共同研究報告書

整理番号第 428 号

高力ボルト摩擦接合継手の設計法の合理化に関する共同研究報告書

平成 24 年 1 月

独立行政法人土木研究所
公立大学法人大阪市立大学

Copyright © (2012) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は，独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって，本報告書の全部又は一部の転載，複製は，独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書

第 428 号 2012 年 1 月

高力ボルト摩擦接合継手の設計法の合理化に関する共同研究報告書

独立行政法人　土木研究所
公立大学法人　大阪市立大学

要旨

土木研究所 CAESAR と大阪市立大学は，平成 21 年度から共同研究「高力ボルト摩擦接合継手の設計法の合理化に関する共同研究」を実施し，厚板鋼板を用いた高力ボルト摩擦接合継手を対象として，厚板・多列となる継手の適用を前提とした設計法に関する実験的・解析的検討を行ってきた。

本報告書は，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験および FEM 解析の結果をまとめたものである。すべり耐力試験では，厚板化や多列化，フィラープレート，肌すき，塗膜厚などが与える影響について明らかにした。FEM 解析では各種構造諸元についてパラメトリック解析を実施し，厚板鋼板の高力ボルト摩擦接合継手の荷重伝達機構について明らかにした。また，既往のすべり耐力試験結果も含めて，設計すべり係数に関する整理分析を行い，摩擦接合継手の設計法に関する現行規定の見直しについて提案を行った。

キーワード：高力ボルト，摩擦接合，厚板，多列，無機ジンクリッチペイント，
すべり耐力試験，締付け軸力，すべり耐力（すべり係数）

共同研究担当者名簿

機　関	氏　名	所　属	担当期間
独立行政法人 土木研究所	村越　潤	構造物メンテナンス研究センター 上席研究員	H21.9～
	遠山　直樹	構造物メンテナンス研究センター 主任研究員	H22.4～
	梁取　直樹	構造物メンテナンス研究センター 主任研究員※1	H21.9～H22.3
	澤田　守	構造物メンテナンス研究センター 研究員	H21.9～
	大嶽　敦郎	構造物メンテナンス研究センター 交流研究員	H22.4～
	石澤　俊希	構造物メンテナンス研究センター 交流研究員※2	H21.9～H22.3
公立大学法人 大阪市立大学	山口　隆司	工学研究科 都市系専攻教授	H21.9～

※1　現　本州四国連絡高速道路株式会社

※2　現　新日本技研株式会社

目　次

１．はじめに …… 1
1.1 研究概要 …… 1
1.2 用語と記号 …… 2

２．研究の背景と目的 …… 3
2.1 研究の背景 …… 3
2.2 既往の研究 …… 4
2.2.1 板厚に関する研究 …… 4
2.2.2 ボルト列数に関する研究 …… 4
2.2.3 フィラープレート，肌すきに関する研究 …… 5
2.3 研究の目的 …… 5

３．高力ボルト摩擦接合継手試験体のすべり耐力試験 …… 6
3.1 試験体 …… 6
3.1.1 寸法諸元 …… 6
3.1.2 高力ボルトの締付け …… 12
3.1.3 試験体 No.5 の母板表面切削加工 …… 14
3.2 計測および試験方法 …… 15
3.2.1 試験体の寸法形状，塗膜厚，肌すき，表面凹凸形状の計測 …… 15
3.2.2 ボルト軸力の計測 …… 19
3.2.3 接触圧力の計測 …… 20
3.2.4 材料強度試験 …… 21
3.2.5 すべり耐力試験 …… 22
3.3 試験体の寸法形状，塗膜厚，肌すき，表面凹凸形状の計測結果 …… 26
3.3.1 寸法形状 …… 26
3.3.2 塗膜厚 …… 40
3.3.3 表面凹凸形状 …… 45
3.4 接触圧力の計測結果 …… 47
3.5 ボルト軸力の計測結果 …… 63
3.5.1 組み立て時のボルト軸力の経時変化 …… 63
3.5.2 ７日経過後までの経時変化 …… 67
3.6 材料強度試験結果 …… 81
3.7 すべり耐力試験結果 …… 83
3.7.1 荷重　変位関係 …… 83
3.7.2 母板と連結板の相対変位 …… 100
3.7.3 試験体側面のひずみ分布 …… 103
3.7.4 試験中のボルト軸力の変化 …… 120

3.7.5 試験後のすべり面……121
3.7.6 すべり耐力及びすべり係数 ……142
3.8 考察……143
3.9 まとめ……169

４．高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動に関する FEM 解析 ……171
4.1 解析の目的と概要……171
4.1.1 解析の目的……171
4.1.2 解析で用いる記号と用語 ……172
4.1.3 解析モデル……175
4.1.4 解析手法……182
4.2 解析モデルの検討……183
4.2.1 モデル化の範囲と要素分割 ……183
4.2.2 すべり先行型を対象としたすべり耐力試験結果との比較 ……197
4.2.3 降伏先行型を対象としたすべり耐力試験結果との比較 ……208
4.2.4 感圧紙による接触圧分布との比較 ……214
4.2.5 まとめ……219
4.3 解析結果と考察……221
4.3.1 すべり定義と摩擦力分布 ……221
4.3.2 すべり/降伏耐力比 β の影響……232
4.3.3 ボルト列数の影響……238
4.3.4 板厚・板幅の影響……257
4.3.5 連結板/母板降伏耐力比 γ の影響……266
4.3.6 ボルト軸力の影響……274
4.3.7 ボルト間隔の影響……279
4.4 まとめ……285

５．まとめ ……288

謝辞 ……290

参考文献 ……291

付属資料
資料　1　接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の設計すべり係数の検討資料 · 資料 1
資料　2　接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した高力ボルト摩擦接合継手の設計法について
厚板・多列ボルト継手の適用を前提とした場合の設計法の改定案　……資料 33
資料　3　塗料の水分量（乾燥期間）の影響に着目したすべり耐力の検討 ……資料 39
資料　4　解析モデル一覧　……資料 54

１．はじめに

1.1　研究概要

近年，部材の簡素化，構造の合理化を図った鋼橋の普及により，板厚 50mm を超える厚板鋼板を使用する事例が増えてきている。鋼板の接合方法には，主に溶接継手と高力ボルト摩擦接合継手の 2 種類が用いられているが，溶接接合は厚板になるほど多層溶接となり品質管理や現場工期が課題となるため，施工性・経済性の面から，高力ボルト摩擦接合が採用される場合が多い。一方，高力ボルト摩擦接合の設計にあたって，道路橋示方書・同解説 Ⅱ鋼橋編[1)]（以下，道示）では，接触面の処理方法に関わらず一定のすべり係数やボルト列数の制限を規定しており，これらが合理化の妨げとなって，継手が多列化・大型化する事例や溶接接合を採用する事例が見られる。また，高力ボルト摩擦接合の厚板鋼板への適用については，ボルト列数，フィラー，肌すき，塗膜厚等の各種構造諸元がすべり耐力に及ぼす影響について，設計法として明らかにすべき点も残されている。

土木研究所では，厚板・多列となる高力ボルト摩擦接合継手の適用を前提とした設計法の提示を目的として，大阪市立大学との共同研究「高力ボルト摩擦接合継手の設計法の合理化に関する共同研究」を平成 21 年度より実施している。本報告書は，厚板鋼板を用いた高力ボルト摩擦接合継手を対象として，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の継手性能について，実験的・解析的検討を行った結果をまとめたものである。すべり耐力試験では，厚板鋼板を用いた高力ボルト摩擦接合継手試験体 51 体を製作してすべり耐力試験を行い，母板・連結板の厚さ，ボルト列数，フィラープレート，肌すき，塗膜厚などの構造諸元が継手性能に及ぼす影響について検討を行った。数値解析では，各種構造諸元についてパラメータ解析を実施し，すべり挙動及びすべり耐力に与える影響について分析を行うとともに，厚板を用いた高力ボルト摩擦接合継手の荷重伝達機構について検討を行った。また，既往のすべり耐力試験結果も含めて，すべり係数に関する分析を行い，摩擦接合継手の設計法に関する現行規定の見直しについて提案を行った。

1.2　用語と記号

本報告書においては，以下に示す記号と用語を用いる。

N_0　：道示 表-解 3.2.6 高力ボルトの許容力に示される設計ボルト軸力で，ボルトの耐力（σ_y）に降伏点に対する比率（α）とボルトのねじ部の有効断面積を乗じた式で計算される設計軸力を示す。

N_1　：試験体に実際にボルトに導入した軸力（実測値）を示す。

N_2　：引張試験直前のボルト軸力（実測値）を示す。

μ_0　：設計ボルト軸力 N_0 に対するすべり係数　$\mu_0 = P/(m \cdot n \cdot N_0)$

μ_1　：締付けボルト軸力 N_1 に対するすべり係数　$\mu_1 = P/(m \cdot n \cdot N_1)$

μ_2　：試験前ボルト軸力 N_2 に対するすべり係数　$\mu_2 = P/(m \cdot n \cdot N_2)$

P_{SL}　：すべり耐力（kN）

m　：摩擦面数

n　：ボルト本数

β　：すべり/降伏耐力比

β= 設計すべり耐力 / 設計降伏耐力

設計すべり耐力 = 設計すべり係数×摩擦面数×設計軸力×ボルト本数

設計降伏耐力 = 板厚×(母板幅　孔径)×設計降伏強度

b　：試験体幅(mm)

t　：試験体厚さ(mm)

板厚差　：厚い方の板厚から，薄い方の板厚を差し引いた値

２．研究の背景と目的

2.1　研究の背景

平成 8 年および平成 14 年の道示の改定において，鋼橋の適用板厚は 100mm まで拡大されている。この理由については，「近年，鋼橋の製作技術の進歩に伴い，板厚 50mm 以上の鋼材も使用されてきており，製作・施工の省力化の観点から鋼材の適用板厚の範囲の拡大が望まれている。今回の改定では，このような状況を踏まえ，溶接構造用圧延鋼材の C 材と SM570 について適用板厚を 100mm まで拡大することとした」とされている。一方，連結の設計については，高力ボルト接合継手について適用板厚の制限や，厚板による長尺ボルトの制限（例えば，ボルトの首下長さの制限値など）は規定されておらず，扱いが必ずしも明確でなかった面がある。ただし，ボルト列数については，解説において「高力ボルト摩擦接合では 12 本程度まではすべり耐力が低下しないという実験例もあるが，無理のない範囲ということでなるべく 8 本程度以下とするのがよい」と 8 列にボルト列数が制限されている。この列数制限により，高力ボルト摩擦接合に用いることができる母板厚は，母板の材質，継手位置応力度およびボルト配置にもよるが，一般的には板厚が 50mm 前後と予想される。板厚が 50mm 前後を大きく超える場合は，溶接継手が採用されるケースが多いと考えられるが，一方で写真-2.1 に示すように継手が多列化・大型化した事例もみられる。

また，道示では，接触面に厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗装した場合にすべり係数 0.4 を用いて算定される摩擦接合の許容力が規定されているが，最近の研究[2)]では，0.4 を上まわるすべり係数を期待できることが確認されている。土木学会の「高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案）」[3)]では，すべり係数は塗膜厚により 0.4 と 0.5 に分類して提案されている。

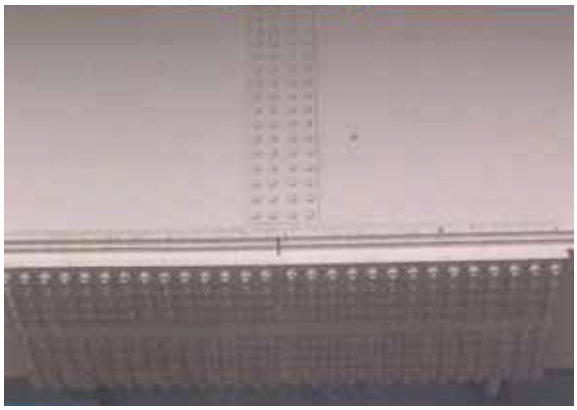


写真-2.1　多列化・大型化した継手の事例[3)]

2.2　既往の研究

高力ボルト継手のすべり耐力に影響を与える要因としては，板厚，ボルト列数，肌すき（板厚差），母板の降伏強度，塗膜厚（塗装条件）等が挙げられる[3]。さらに，これらはボルト軸力の低下に対しても影響を与えることが明らかとされている。これまで高力ボルト継手に関する実験的・解析的研究は数多く行われており，(1) 板厚，(2) ボルト列数，(3) フィラープレート・肌すきに着目して，その主な研究内容を以下に示す。

2.2.1　板厚に関する研究

厚板鋼板に高力ボルト摩擦接合を用いた場合のすべり耐力について，南ら[4,5]，谷平ら[6]，鶴田・木村ら[7] 日本鉄道建設公団・日本車輌製造[8] らの研究がある。このうち，すべり耐力に着目したものとして，南ら[4,5]は，締付け厚が 43mm と 116mm の試験体を用いてすべり耐力試験を実施し，締付け厚 116mm の方が 1 割程度大きいすべり係数を得ている。谷平ら[6] は，40mm 厚のフランジに，40mm のカバープレートを重ね合わせた試験体を用いて，設計すべり係数 0.4 を大きく上回る結果を得ている。また，ボルト軸力変動について，南ら[4,5]，鶴田・木村ら[7] は，締付け厚の異なる 2 種類の試験体のボルト軸力を計測し，締付け厚が大きいほど，ボルト軸力残存率が大きいとしている。一方，日本車輌製造[8] では，首下長さが 165～220mm のトルシアボルトと，首下長さが 170～240mm の六角高力ボルトを用いて締付け後 24 時間の軸力変化を計測しており，首下長さと軸力変化に相関性はないとしている。谷平ら[6] は，締付け厚が 205mm となるような試験体を用いて，1 年間の軸力変動を計測し，締付け時からの低下量が 14~16%となる結果を得ている。

2.2.2　ボルト列数に関する研究

道示で示されているボルト列数制限（8 列）は，昭和 55 年の改定時に規定されたものである。佐伯ら[9] は，接触面を無塗装とした大型供試体を用いてすべり耐力試験を実施し，ボルト列数の影響について検討を行っている。荷重方向のボルト本数が 10 本あるいは 12 本の場合に，継手の端部ですべりが生じた後，全体のすべりが生じる前にボルトや母板の破断に至る性状がみられたとしている。一方，8 列までの試験体では，継手の端部ですべりが生じた後に，全体のすべりが生じており，これにより 8 列という制限が妥当なものであるとしている。

一方，ボルト配置が多列となる場合のすべり耐力について，馬場らの研究[10]，玉越らの研究[11] がある。これらは，いずれも接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した試験体を用いたものである。馬場ら[10] は，ボルト径を M30 とした試験体を用いてすべり耐力試験を実施し，ボルト列数を 3 列，6 列，12 列，18 列と変化させた結果，6 列から 12 列の間ですべり係数が低下するものの，18 列のすべり係数が 12 列を上回っていることから，多列となる場合にすべり係数が低下するとは断定できない，としている。玉越ら[11] は，超高力ボルト（S14T）を用いた場合のすべり耐力試験を実施し，ボルト列数 12 列のすべり係数が，8 列のものを下回る結果を得ている。

また，亀井らの研究[12] では，ボルト列数，すべり/降伏耐力比，ボルト間隔などを変化させた継手を対象とした数値解析を実施し，解析により得られるすべり係数が多列となる場合に低下する要因として，母板と連結板の間における継手長さ方向の層間せん断力が，ボルト間で不均一となることを挙げている。

2.2.3　フィラープレート，肌すきに関する研究

（1）フィラープレートに関する研究

高力ボルト摩擦接合継手にフィラープレートを用いた場合のすべり耐力については，水口らの研究[13)]，滝澤らの研究[14)]，宮地らの研究[15)]がある。水口ら[13)]，滝澤ら[14)]は，フィラープレート厚さが 25mm までであれば，すべり係数は 0.4 以上を確保できるという試験結果を得ている。道示では，フィラープレートの厚さについて，厚い方の母板厚の 1/2 以下とするのが望ましいとしているが，実際の設計においては，これらの試験結果を基に，フィラープレート板厚の上限値を 25mm とする例が多い。また，水口[13)]らは，フィラープレートを有する場合に，フィラープレート側の摩擦面で部分的なすべりが生じること，最大荷重付近でフィラープレートのひずみが大きく減少し，フィラープレートに面した連結板のひずみが大きく増加する傾向が見られることなどを明らかにしており，フィラープレートを有する場合の軸力伝達性状については，更なる考察が必要としている。ただし，ここで取り上げた既往の研究は，いずれも母板の板厚が 50mm 以下の比較的薄いものを対象としており，厚板にフィラープレートを用いた場合のすべり耐力に与える影響については，未解明な部分が残されている。

（2）肌すきに関する研究

高力ボルト摩擦接合継手に肌すきがある場合のすべり耐力について，鞆らの研究[16)]，日本橋梁建設協会の研究[17)]，宮崎らの研究[18)]，がある。これらの研究では，板厚差 1mm 程度を有する試験体のすべり耐力試験を実施し，肌すきのない継手と比べてすべり耐力の低下が 10%程度であり，かつ 0.4 以上のすべり係数を確保できるため，板厚差 1mm 程度は許容範囲であるとしている。また，秋山らの研究[19)]では，数値解析により板厚差がある継手のすべり耐力を評価し，内側縁端距離などの各種構造諸元がすべり耐力に与える影響を明らかにしている。ただし，ここで取り上げた既往の研究は，いずれも薄板を対象としたものであり，厚板において肌すきが生じた場合のすべり耐力に与える影響については，未解明な部分が残されている。

2.3　研究の目的

2.2 節で述べたように，高力ボルト摩擦接合継手に厚板を用いた場合や，多列となった場合のすべり耐力や軸力低下などの継手性能に関する研究は，様々な機関で行われてきているが，現行の規定に対して板厚の適用範囲の明確化やボルト列数制限の見直しを行うだけの研究成果の蓄積は未だ十分とは言い難い。また，フィラープレートや肌すき，塗膜厚などすべり耐力に影響を与える要因が厚板を用いた継手に与える影響についても検討の余地が残されている。以上のことから，本研究では，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した高力ボルト摩擦接合継手を対象に，厚板・多列とした場合のすべり耐力試験及び FEM 解析を実施した。本研究での主な検討内容を以下に示す。

（1）厚板多列継手試験体を用いたすべり耐力試験による各種構造諸元の影響の検討

（2）多列配置モデルを用いた FEM 解析による荷重伝達機構の分析

（3）既往のすべり耐力試験結果も含めたすべり係数の分析

（4）（1）～（3）を踏まえた摩擦接合継手の設計法に関する現行規定の見直しに関する提案

３．高力ボルト摩擦接合継手試験体のすべり耐力試験

3.1　試験体

3.1.1　寸法諸元

本試験で用いた試験体のパラメータおよび比較対象を表-3.1.1 に示す。はじめに，母板厚・ボルト列数をパラメータとして，母板厚 38mm，50mm，75mm と，ボルト列数 3 列，8 列，12 列を組み合わせたものを基本ケースとした。また，厚板を用いた場合のフィラープレートや肌すき，塗膜厚，すべり降伏比 β の影響を検討するため，それぞれフィラーケース，肌すきケース，塗膜厚ケース，母板降伏ケースを設定した。フィラープレートの板厚について，道示では厚い側の母板板厚の 1/2 程度を限度としている。本試験では，母板厚 75mm までを対象として，フィラープレート厚を 12，22，37mm と変化させて，フィラープレート厚の影響を比較することとした。肌すきについて，道示では「原則として肌すきが生じないようにすること」と規定されており，厚板の場合においても，道示の規定を満足する必要があると考えられる。また，道示では鋼板の厚さについて，JIS G 3193「熱間圧延鋼板及び鋼帯の形状，寸法，質量及びその許容差」表 5，厚さの許容差を適用し，かつ備考により，(-) 側の許容差が公称板厚の 5% 以内にならなければならない，と規定されている。この場合，継手の板厚が増大すると，これに伴って板厚公差の量も大きくなり，すべり係数の低下も懸念されることとなるため，本試験では，母板厚 50mm と母板厚 75mm を対象として，すべり側の母板厚と非すべり側の母板厚の間に板厚差 1mm を設け，これを肌すきケースとし，肌すきの有無がすべり耐力に与える影響を比較することとした。

塗膜厚について，道示では，すべり係数 0.4 を確保するための塗装仕様（片面塗膜厚 30μm 以上，合計塗膜厚 90～200μm）が規定されているが，厚板を用いた場合の塗膜厚の影響を確認するため，片面塗膜厚を 60μm，90μm，125μm と変化させて，塗膜厚の影響を比較することとした。母板降伏の影響について，既往の研究[20]では，すべり/降伏耐力比 β（以下，β）が 0.7 を超える場合，β の増加に伴ってすべり係数が低下する傾向にあることが明らかとされている。そこで，本試験では，β を 0.47 と 0.95 とし，それぞれのすべり耐力について比較することとした。ここで，試験体の板厚・ボルト列数については同じ値とし，試験体の幅を変化させて β を調整することとした。

試験体の寸法形状を図-3.1.1 に示す。本試験では，試験結果のばらつきを把握するため，試験体数は各 3 体を基本とした。ただし，塗膜厚の影響に着目した No.1，13，14 については，各 5 体とした。試験体の母板と連結板には溶接構造用圧延鋼材 SM490Y，フィラーには一般構造用圧延鋼材 SS400，ボルトには F10T-M22 を用いた。表-3.1.2，表-3.1.3 に，それぞれ本試験で使用した鋼材および高力ボルトの機械的性質を示す。各試験体とも接触面は，ブラスト処理（Sa2.5）を行った後，無機ジンクリッチペイントを塗装した。無機ジンクリッチペイントには，SD ジンク 1500A（関西ペイント）を使用した。乾燥塗膜中の亜鉛含有量は 82%，亜鉛末の 50%平均粒径は 17μm であり，道示の規定を満足するものを用いた。図-3.1.2 に，無機ジンクリッチペイントの塗装範囲を示す。無機ジンクリッチペイントは接触面に塗装し，フィラー試験体についてもフィラープレートの両面に塗装することとし，塗膜厚は母板や連結板と同じ（90μm）値とした。

表-3.1.1　試験体の基本諸元

試験ケース		基本ケース							フィラーケース			肌すきケース		塗膜厚ケース		母材降伏
		母材38	母材 50			母材 75			母材 38			母材50	母材75	母材38		母材75
試験体 No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ボルト列数 M22(F10T)		3	3	8	12	3	8	12	3	3	3	8	8	3	3	12
母板厚(mm) SM490Y		38 38	50 50			75 75			50 38	60 38	75 38	50 49	75 74	38 38	38 38	75 75
連結板板厚(mm) SM490Y		2×20	2×26	2×26	2×26	2×38	2×38	2×38	2×20	2×20	2×20	2×26	2×38	2×20	2×20	2×38
フィラー板厚(mm) SS400									12	22	37					
試験体幅(mm)		120	120	190	270	120	130	190	120	120	120	190	130	120	120	107
接合面の合計膜厚(μm)		180	180			180			180			180		120	250	180
すべり耐力$_{0.4}$(kN)		492	492	1312	1968	492	1312	1968	492	492	492	1312	1312	492	492	1968
母板降伏耐力(kN)		1288	1600	2772	4112	2399	2651	4158	1288	1288	1288	2717	2615	1288	1288	2073
連結板降伏耐力(kN)		1356	1763	3055	4532	2577	2846	4465	1356	1356	1356	3055	2846	1356	1356	2226
すべり/降伏耐力比		0.38	0.31	0.47	0.48	0.21	0.49	0.47	0.38	0.38	0.38	0.48	0.50	0.38	0.38	0.95
試験体数		5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	3
使用試験機		2MN	2MN	30MN	30MN	2MN	30MN	30MN	2MN	2MN	2MN	30MN	30MN	2MN	2MN	30MN
比較対象	母板厚の影響	●	●	●	●	●	●	●								
	ボルト列数の影響		●	●	●	●	●	●								
	フィラーの影響	●							●	●	●					
	肌隙の影響			●			●					●	●			
	接合面の影響	●												●	●	
	母材降伏の影響							●								●

注1)　ボルト孔径は24.5mm、導入軸力は205kNとした。

注2)　試験体No.1のすべり耐力，母材降伏耐力，連結板降伏耐力，すべり降伏比の計算例を以下に示す。

すべり耐力　：　ボルト軸力205kN×2面×3本×設計すべり係数 0.4　492kN

母板降伏耐力　：　降伏強度355N/mm^2(SM490Y)×(120　24.5)×38 / 1,000　1,288kN

連結板降伏耐力　：　降伏強度355N/mm^2(SM490Y)×(120　24.5)×20×2 / 1,000　1,356kN

すべり/降伏耐力比　：　すべり耐力 492kN / 母板降伏耐力 1288　0.38

表-3.1.2　鋼材の機械的性質（ミルシートより）

鋼種	板厚 mm	機械的性質			化学成分 %					備考
		降伏点 N/mm^2	引張強さ N/mm^2	伸び %	C	Si	Mn	P	S	適用部位と適用試験体
SM490YB	75	368	543	36	0.16	0.43	1.46	0.007	0.003	母材:No.5-7,10,12,15
	60	407	544	35	0.16	0.32	1.38	0.014	0.005	母材:No.9
	50	431	566	27	0.16	0.43	1.46	0.007	0.003	母材:No.2-4,8,11
	38	410	540	29	0.16	0.32	1.38	0.014	0.005	母材:No.1,8-10,13,14 、連結板:No.5-7,12,15
	37	410	540	29	0.16	0.32	1.38	0.014	0.005	チャックつかみ部補強板:No.10
	26	437	563	27	0.17	0.32	1.38	0.013	0.004	連結板:No.2-4,11
	22	442	557	27	0.16	0.32	1.38	0.005	0.003	チャックつかみ部補強板:No.9
	20	437	564	26	0.16	0.26	1.51	0.019	0.005	連結板:No.1,8-10,13,14
	12	439	553	36	0.15	0.25	1.60	0.010	0.002	チャックつかみ部補強板:No.8
SS400	37	279	434	32	0.13	0.19	0.92	0.014	0.005	フィラー:No.10
	22	336	475	27	0.19	0.19	0.55	0.011	0.014	フィラー:No.9
	12	300	441	29	0.16	0.16	0.51	0.014	0.006	フィラー:No.8

表-3.1.3　高力ボルトの機械的性質

等級	ボルト径	首下長さ mm	有効断面積 mm^2	ボルト						ナット	座金	トルク係数値
				4号試験片				製品		製品	製品	
				耐力 N/mm^2	引張強さ N/mm^2	伸び %	絞り %	引張荷重 kN	硬さ HRC	硬さ HRC	硬さ HRC	平均値
F10T	M22	120	303	1030	1078	19	69	330	31	27	40	0.132
		195	303	1046	1087	18	69	333	32	27	40	0.132

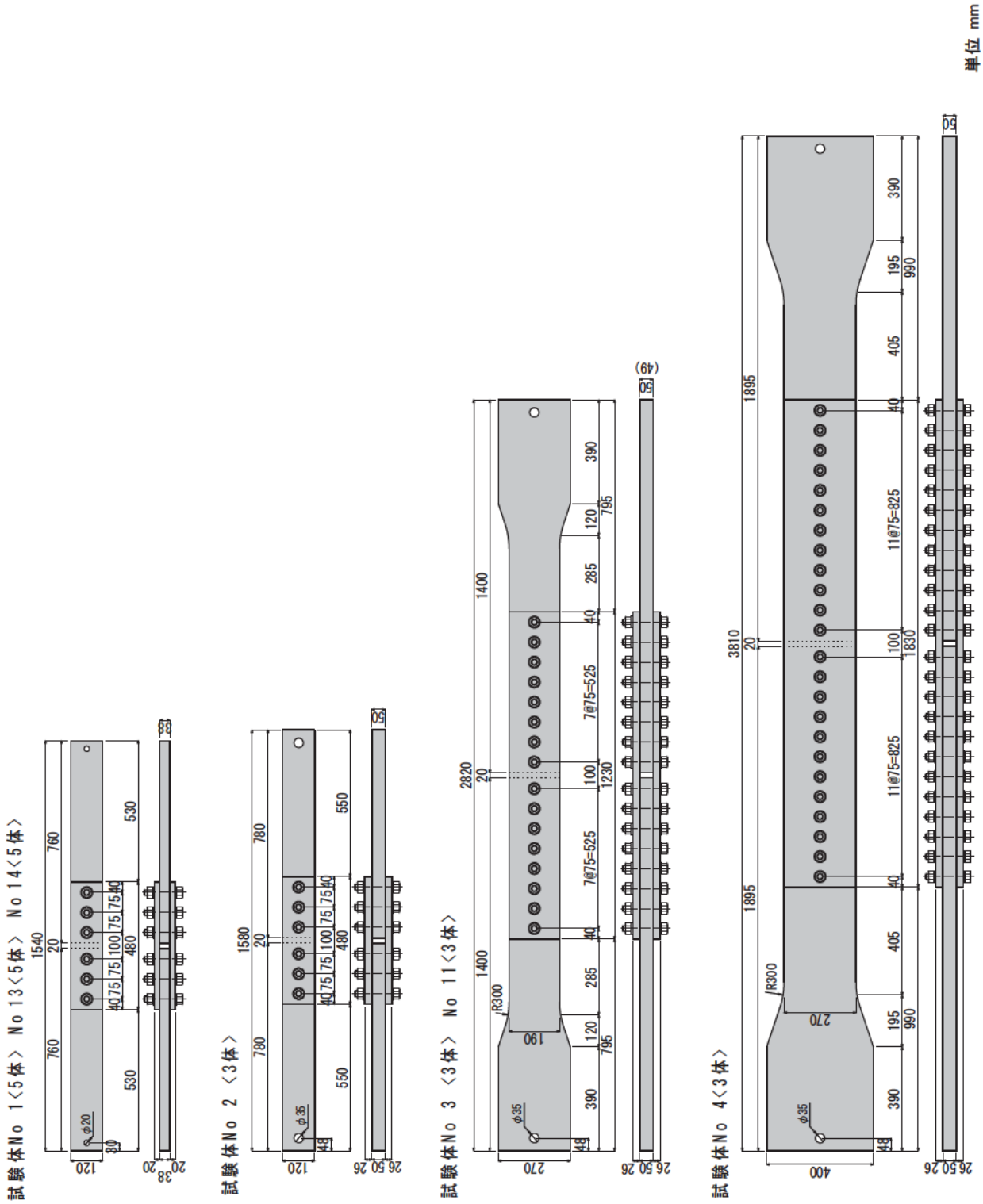


図-3.1.1　試験体形状（No.1，No.2，No.3，No.4，No.11，No.13，No.14）

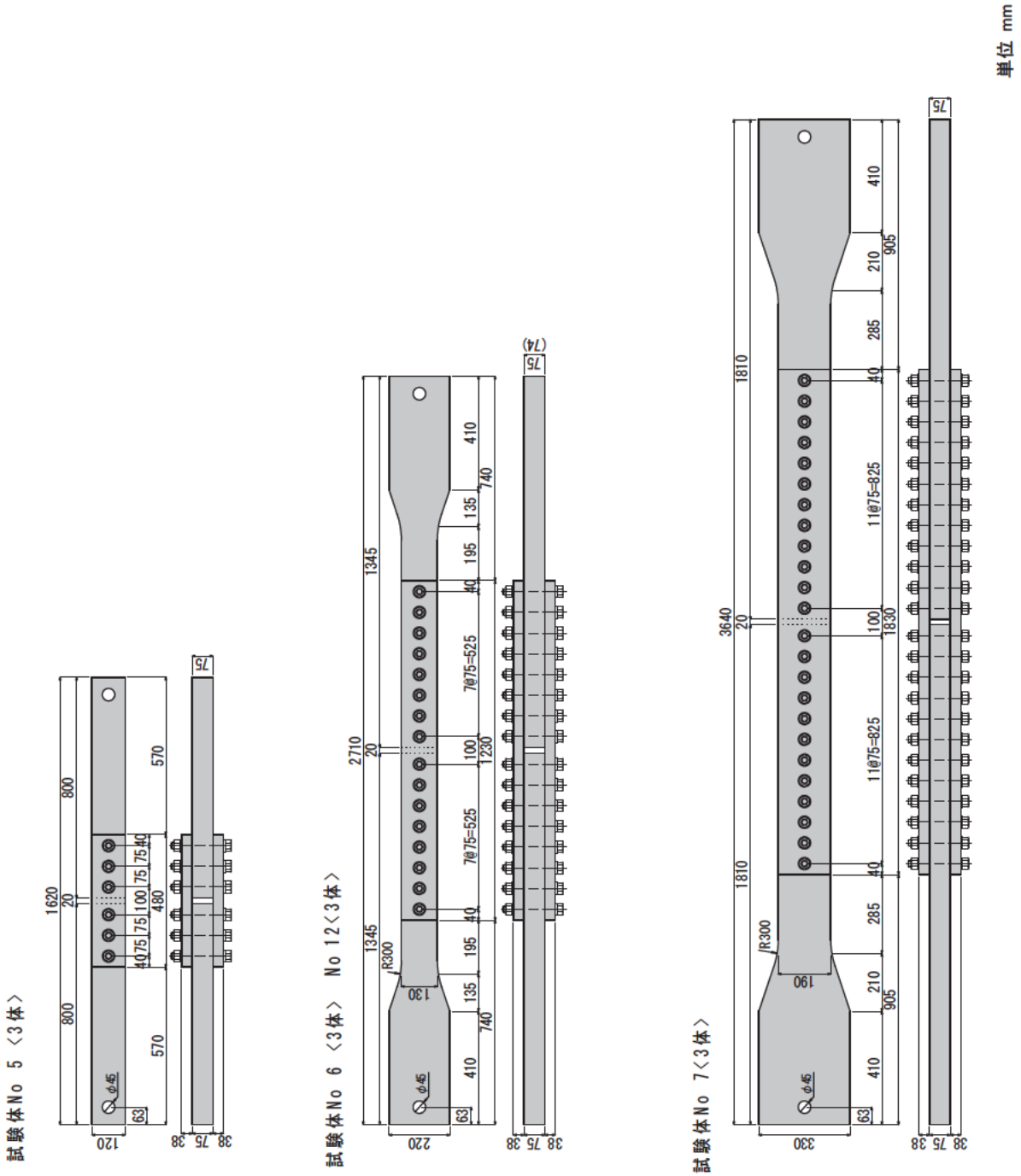


図-3.1.1　試験体形状（No.5，No.6，No.7，No.12）（続き）

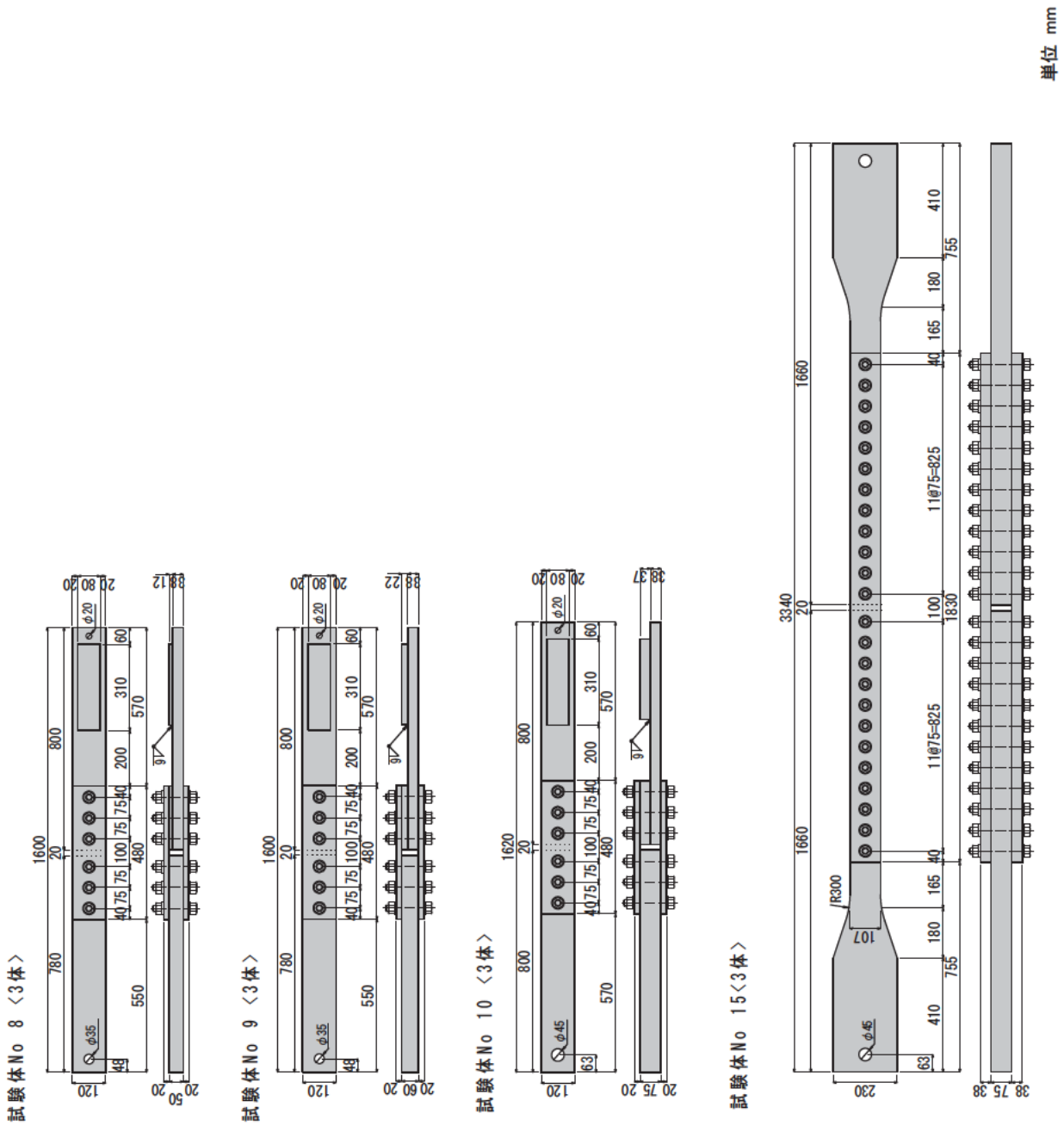
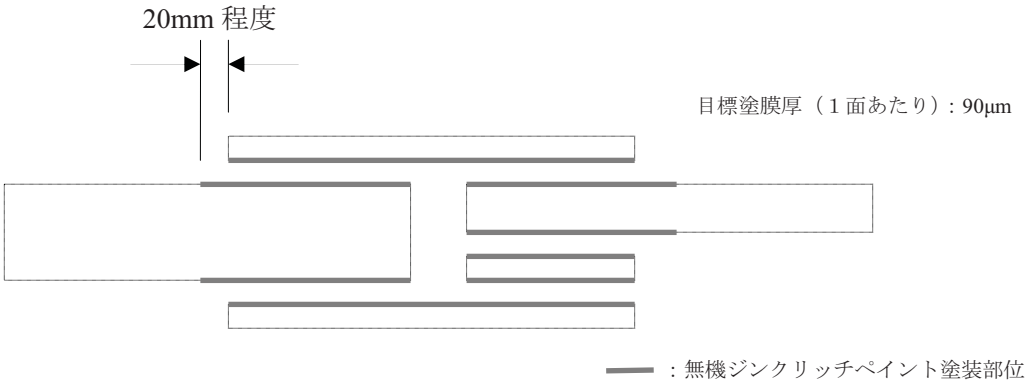


図-3.1.1　試験体形状（No.8，No.9，No.10，No.15）（続き）

（a）基本ケース，肌すきケース，塗膜厚ケース，母板降伏ケース



（b）フィラーケース

図-3.1.2　無機ジンクリッチペイントの塗装範囲

3.1.2　高力ボルトの締付け

ボルトの締付けは，道示に従って，内側から外側に向かって順次行った。締付け作業は 2 度に分けて実施し，1 次締めでは設計ボルト軸力の 60%程度を導入し，2 次締めでは設計ボルト軸力の 100%を導入した。道示では，トルク法によって締付ける場合の締付けボルト軸力について，トルク係数値のばらつき，クリープやリラクゼーション，すべり係数のばらつき等を考慮して設計ボルト軸力の 10%増しとするように規定しているが，本試験では軸力とすべり係数の関係を正確に把握することを目的としていることから，締付け軸力は設計軸力通りとした。ただし，試験時にすべり面が特定し易いように，片側は設計ボルト軸力の 120%以上で締付け，非すべり側とした。

ボルト軸力の管理方法としてはトルク法を用いた。ただし，軸部にひずみゲージを貼付したボルトについては，軸ひずみ値により導入ボルト軸力を管理した。試験体の組み立てに先だって，ボルトのキャリブレーションを行い，導入ボルト軸力とトルク値，あるいは導入ボルト軸力と軸ひずみの関係を求め，これを試験体組み立て時の目標値とした（表-3.1.4，表-3.1.5）。キャリブレーションを行うボルトは，首下長さ 120mm，195mm は 10 本，その他は 5 本とした。キャリブレーションの様子を写真-3.1.1 に示す。

表-3.1.4　キャリブレーション用軸力導入時のトルク値

首下長さ(mm)		軸力 (kN)	トルク読値 (N・m)										
			1本目	2本目	3本目	4本目	5本目	6本目	7本目	8本目	9本目	10本目	平均値
M22	×120	205	710	720	715	720	710	710	720	715	720	715	716
	×130	205	590	610	590	600	600						598
	×140	205	625	625	610	615	620						619
	×145	205	660	660	650	650	660						656
	×155	205	600	630	600	620	630						616
	×195	205	700	680	700	670	680						686
	×195	205	700	700	700	700	700	710	710	700	695	690	701

表-3.1.5　キャリブレーション用軸力導入時のひずみ値

首下長さ(mm)		軸力 (kN)	両面の平均ひずみ ($\times 10^{6}$)					
			1本目	2本目	3本目	4本目	5本目	平均値
M22	×120	205	2349	2381	2424	2426	2402	2,396
	×130	205	2601	2627	2631	2622	2647	2,626
	×140	205	2660	2656	2630	2623	2628	2,639
	×145	205	2670	2638	2646	2662	2663	2,656
	×155	205	2648	2630	2644	2664	2640	2,645
	×195	205	2671	2682	2628	2669	2684	2,667
	×195(白)	205	2675	2674	2556	2698	2604	2,641
	×195(灰)	205	2391	2403	2378	2424	2403	2,400

写真-3.1.1　キャリブレーションの様子

3.1.3　試験体 No.5 の母板表面切削加工

試験体 No.5（ボルト列数 3 列，母板厚 75mm）は，すべり耐力試験の結果，他の試験体に比べてすべり係数が小さかった。その原因として，鋼材表面の凹凸形状がすべり耐力に影響を及ぼした可能性が考えられたため，すべり耐力試験後にレーザー計測により表面凹凸形状の計測を行うこととした（詳細は後述する）。また，No.5 試験体の母板表面を機械切削加工し，接触面を極力平滑に処理した上で，再度すべり耐力試験を行うこととした。表面凹凸形状の処理方法として，グラインダー処理により試験体の角部だけを削り落とす方法も考えられたが，その場合に表面凹凸の改善の程度を具体的に評価することが難しいため，接触面全てを一括で切削する機械切削加工を採用することとした。

対象とした試験体は，No.5 試験体全てとした。機械切削加工後の試験体は，加工前の試験結果と区別するため No.5’と称することとした。切削範囲は，接触面（部材軸方向 230mm×部材軸直角方向 120mm）をカバーするように部材軸方向 250mm×部材軸直角方向 120mm とした。切削量は，板厚の減少量を最小限に抑えるため，20μm を目標とした。実際は試験体表面に凹凸があるため，一律の切削量とはならないが，切削後に切削箇所と非切削箇所の色合いを確認しながら，徐々に切削を行い，切削面が全て光沢のある金属肌となった時点で切削完了と判断した。写真-3.1.2 に No.5 試験体の表面切削加工の様子を示す。

写真-3.1.2　表面機械切削加工の様子

3.2　計測および試験方法

3.2.1　試験体の寸法形状，塗膜厚，肌すき，表面凹凸形状の計測

（1）試験体の寸法形状および肌すき量の計測

試験体のすべての部材（母板，連結板，フィラー）について，幅，長さ，板厚，そり量を計測した。図-3.2.1 に寸法形状測定位置を示す。母板の幅は，試験体の端部を含む 5 箇所（w0～w4），連結板の幅は 7 箇所（w0～w3，w’1～w’3）を計測した。母板および連結板の長さは，試験体端部（L1，L2）を計測した。母板の板厚は，試験体の端部を含む 5 箇所（t0～t4），連結板の板厚は 7 箇所（t0～t3，t’1～t’3）を計測した。計測位置は，試験体幅の中央位置とした。図-3.2.2 にそり量の測定位置を示す。そり量は，試験体接合部の端部を直線で結んだ基準線に対する相対的な凹凸量を計測した。計測位置は，試験体幅の中央位置とした。写真-3.2.1 にそり量の計測状況を示す。

また，各試験体にボルト軸力を導入し組立て後かつリラクゼーション計測前に，母板と連結板の間の肌すき量の計測を行った。計測箇所はボルトひずみの計測箇所と同一の箇所とし，試験体の両側面で計測した。測定はすき間ゲージ（0.04mm 以上）を使用した。写真-3.2.2 に肌すき計測状況を示す。板幅 200mm 未満のものは 1/100 精度のノギスで，板幅 200mm 以上のものは，5/100mm 精度のノギスで計測した。

写真-3.2.1　初期不整の計測状況

写真-3.2.2　肌すき量の計測状況

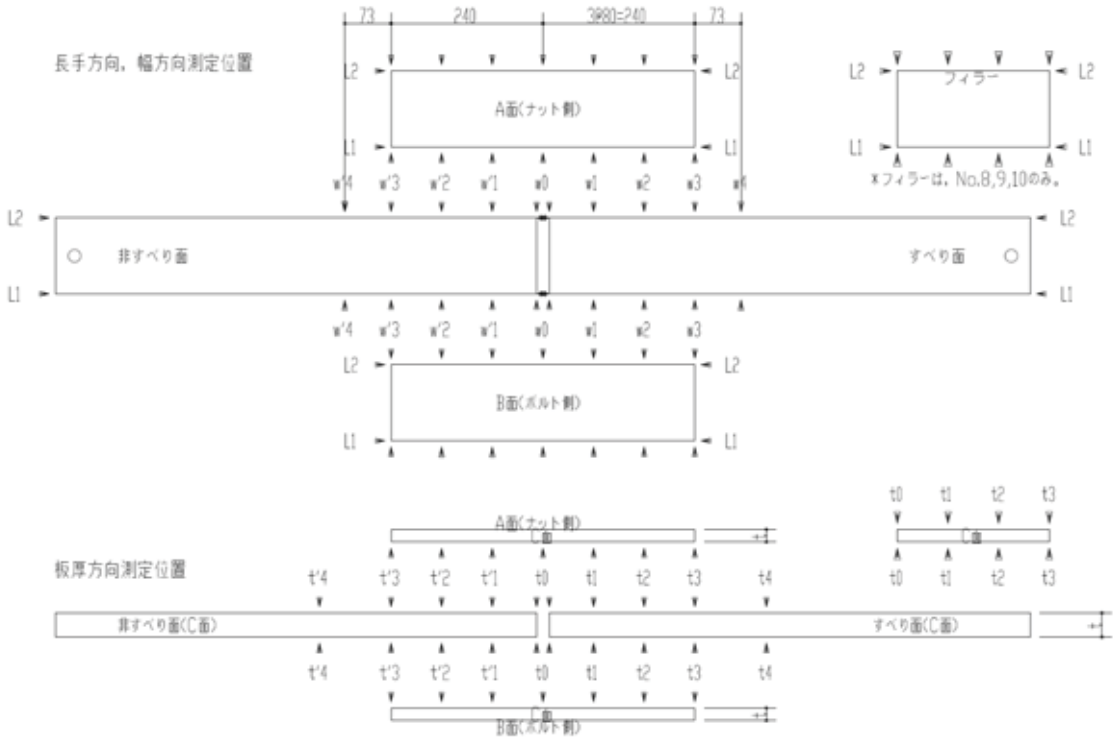


図-3.2.1　試験体幅，長さ，板厚の計測箇所

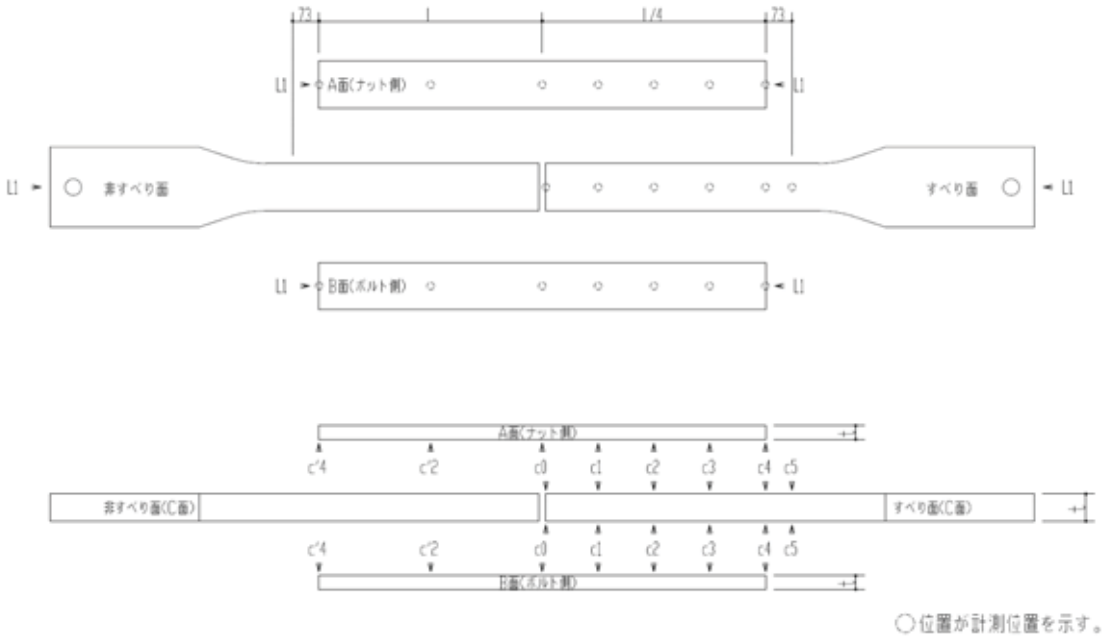


図-3.2.2　試験体そり量の計測位置

（2）塗膜厚の計測

各試験体の母板，連結板，およびフィラーの塗膜厚は，電磁式膜厚計を用いて計測した。図-3.2.3 に塗膜厚の計測位置を，写真-3.2.3 に塗膜厚計測状況を示す。ここでは，母板側及び連結板のそれぞれについて，ボルト孔周辺の 4 箇所を計測した。

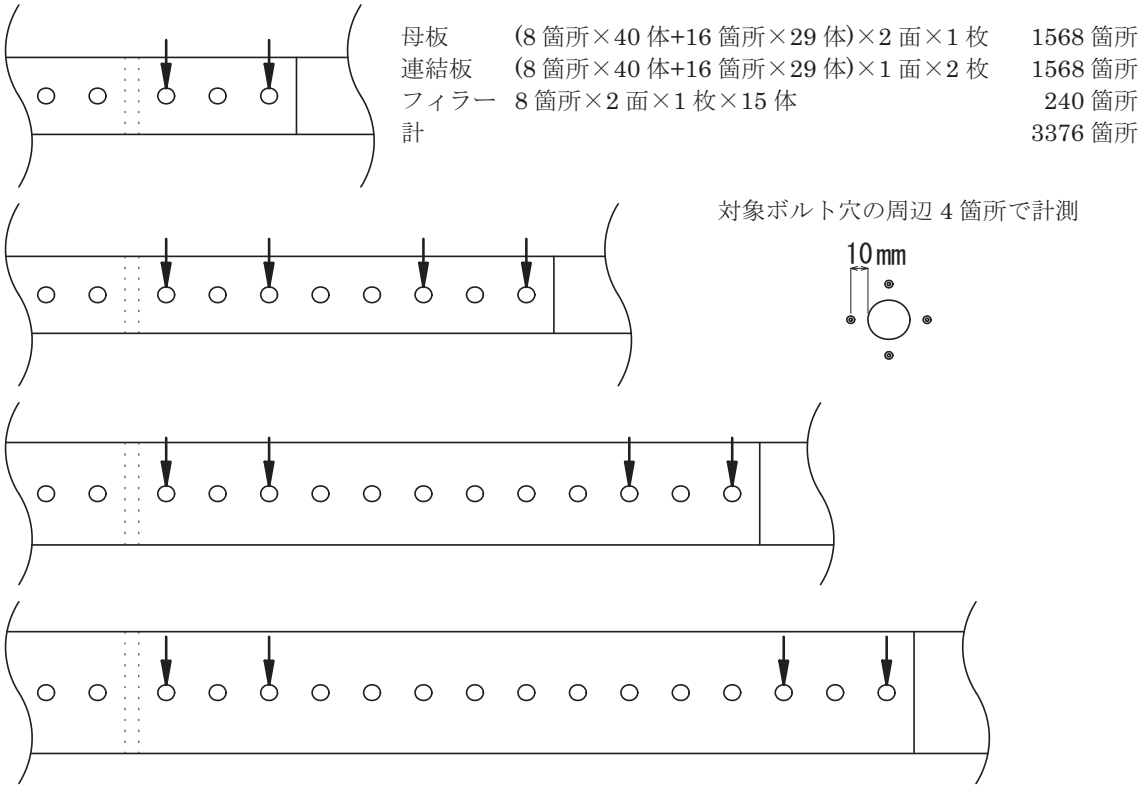


図-3.2.3　塗膜厚の計測個所

写真-3.2.3　塗膜厚の計測状況

(3) 表面凹凸形状の計測

すべり耐力試験の結果は 3.7 章で述べるが，試験体 No.5 のすべり係数は平均 0.51 であった。これは道示の設計すべり係数 0.4 よりは大きいものの，他の基本ケースの平均値（0.70）と比べて小さい結果となった，試験体 No.5 のボルト軸力に注目したところ，リラクゼーションによる軸力残存率（0.91）が他の試験体（0.94～0.96）よりも小さく，接触圧力の低下によりすべり係数が低下したものと考えられた。軸力が低下した理由として，板厚・ボルト列数などの試験体パラメータ以外の要因が悪影響を及ぼしている可能性が考えられたため，試験体の初期不整（表面形状の凹凸）に着目し，レーザー計測を実施した。

計測対象は，試験体 No.5 の中で最もすべり係数の小さい No.5-2 とした。また，すべり耐力が正常と考えられる試験体と比較することとし，試験体 No.5 と同じボルト 3 列の試験体 No.1（No.1-2），同じ母板厚 75mm の試験体 No.6（No.6-3）の計測も行った。いずれの試験体も，母板を計測対象とした。また、すべり耐力試験後に計測を行うこととしたため，ブラスト処理にて接触面の無機ジンクリッチペイントを除去した。なお，ブラスト処理により鋼材表面の凹凸形状が変化することも考えられたため，できるだけ鋼材表面への影響が軽微となるよう，サンドブラストを採用した。

使用機器は，高精度レーザー変位タイプ CD4 シリーズ（オフテックス・エフエー株式会社製）を使用し，計測精度は±3μm 以内とした。部材軸方向は 0.2mm 毎に記録し，5 点分のデータを移動平均化し 1mm ピッチのデータへ加工した。部材軸直角方向は，端部 10mm 区間は 1mm ピッチ，中央部は 2mm ピッチで記録した。はじめに，常盤（竪型フライス盤テーブル）上に試験体を配置，マグネットホルダにより試験体を固定した後，フライス盤を移動させて，レーザー計測を実施した。部材軸方向は，400mm/min 一定で自動送りし，部材軸直角方向は，移動ハンドルを用いて手動で移動させた。試験体は両面ともに凹凸を有しており，計測時に試験体のレベルを確保することが困難であるため，レーザー計測後に試験体端部の 3 点を基準点として傾き補正を行った。ただし，部材切断の影響により端部の表面凹凸が大きくなる場合があるので，端部から 10mm 程度内側の点を基準点とした。写真-3.2.4 に，計測状況を示す。

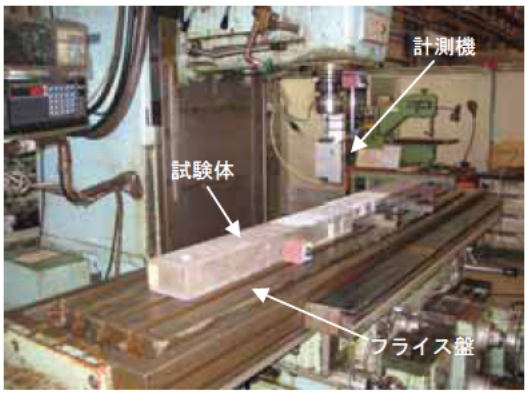


写真-3.2.4　表面凹凸形状の計測状況

3.2.2　ボルト軸力の計測

すべり耐力試験は締付け作業から 7 日以上経過した後に行うものとし，ひずみゲージを貼付したボルトを対象として，7 日間のボルト軸力の変化を計測した。表-3.2.1 に計測のインターバルを示す。今回の試験では，締付け完了後までのインターバルを 5 秒としたが，導入軸力の最大値について，さらに精度のよい値を記録するためには，もう少し短いインターバルとすることも考えられる。写真-3.2.5 に，計測の様子を示す。図-3.2.4 及び写真-3.2.6 に，ひずみゲージの貼り付け状況を示す。ひずみゲージの取り付け位置は，締付け厚の中央とし，ボルト 1 本につき 2 箇所（ボルト軸の 0 度位置と 180 度位置）とした。計測箇所については，3.2.5 で詳述する。

表-3.2.1　高力ボルトの軸力計測インターバル

項目	インターバル
～ 締付け完了後	5 秒
締付け完了後 ～ 6 時間後	1 分
6 時間後 ～ 7 日後	1 時間
すべり耐力試験中	1 分

写真-3.2.5　高力ボルトの軸力計測の様子

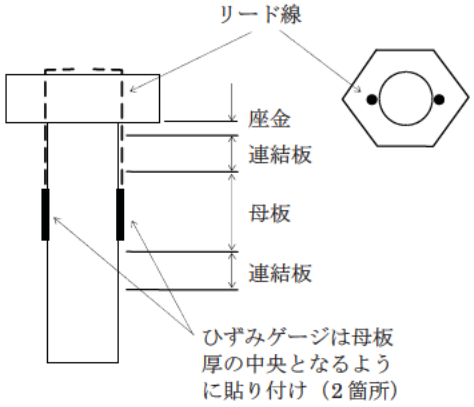


図-3.2.4　ひずみゲージの貼り付け位置

(a)　ボルト軸部

(b)　ボルト頭部

写真-3.2.6　高力ボルトに設置したひずみゲージ

3.2.3　接触圧力の計測

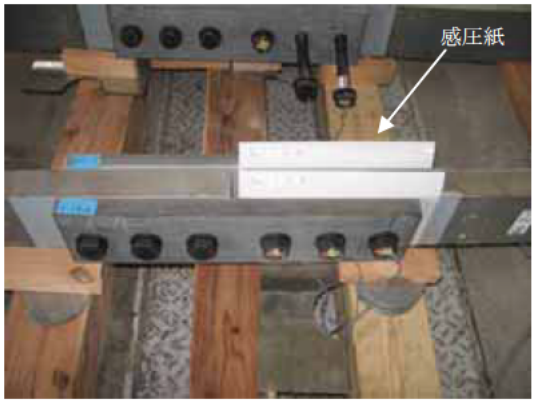
接触面における母板と連結板の接触状況を把握するため，感圧紙を用いて接触圧力を計測した。表-3.2.2 に計測対象とした試験体を示す。計測ケース 1 は，すべり耐力試験が終了した後の試験体を用いて，接触圧力の計測を行ったものであり，主に試験体 No.5 のすべり係数が小さいことに着目して，板厚，ボルト列数など試験体の寸法形状の違いが接触圧力に与える影響について比較することとした。このケースでは，すべり耐力試験の終了後に，試験体を分解して接触面に残存している無機ジンクリッチペイントをブラストで除去し，鋼材素面とした。次に，感圧紙を挿入した状態で組み立てを行い，ボルトに設計軸力を導入して接触圧力を計測した。試験体 No.5'については，試験体 No.5 の母板の表面を切削加工した後で，かつ無機ジンクリッチペイントを塗装する前に接触圧力を計測した。

計測ケース 2 は，すべり耐力試験前に接触圧力の計測を行ったものであり，板厚，ボルト列数，フィラープレート・肌すきの有無などの試験体パラメータが接触圧力に与える影響について比較することとした。このケースでは，軸力計測に先だって接触圧力を計測し，試験体を分解して感圧紙を取り除いた後，再度組み立てを行い，ボルト軸力の計測を行った。

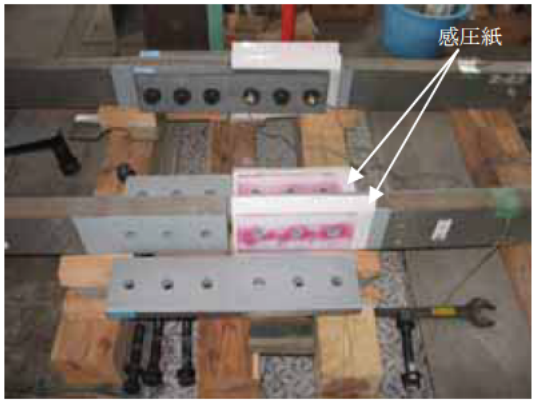
写真-3.2.7 に計測状況を示す。ここでは，試験体接触面に感圧紙を挟み込んだ状態で設計軸力（205kN）を導入し，接触圧力を記録した。計測箇所はすべり側とし，ボルト頭側とナット側に感圧紙をそれぞれ 1 枚ずつ設置した。フィラーケースでは，これに加えて，母板とフィラープレートの間にも感圧紙を設置した。

表-3.2.2　感圧紙の計測対象

計測ケース	試験体ケース	試験体 No.		
計測ケース 1 ・すべり耐力試験完了後 ・接触面は鋼材素面	基本ケース	No.1 3	（母板 38mm，ボルト 3 列）	×1 体
		No.5	（母板 75mm，ボルト 3 列，切削前）	×3 体
		No.5'	（母板 75mm，ボルト 3 列，切削後）	×3 体
		No.6 3	（母板 75mm，ボルト 8 列）	×1 体
計測ケース 2 ・すべり耐力試験前 ・接触面は無機ジンクリッチペイント	基本ケース	No.2	（母板 50mm，ボルト 3 列）	×3 体
		No.3	（母板 50mm，ボルト 8 列）	×3 体
		No.4	（母板 50mm，ボルト 12 列）	×3 体
		No.5'	（母板 75mm，ボルト 3 列）	×3 体
	フィラーケース	No.8	（フィラー12mm）×3 体	×3 体
		No.9	（フィラー22mm）×3 体	×3 体
		No.10	（フィラー37mm）×3 体	×3 体
	肌すきケース	No.11	（母板 50mm，ボルト 8 列，板厚差 1mm）	×3 体



(a) 締付け完了後

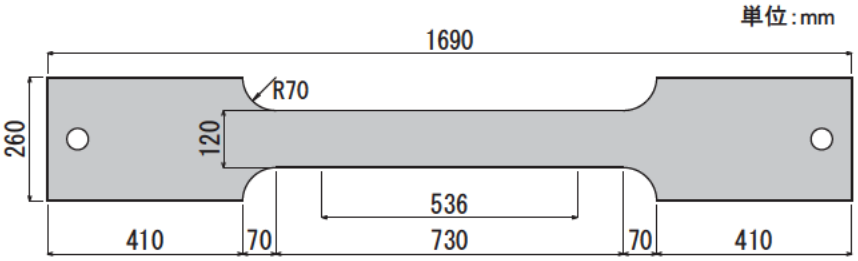


(b)解体後

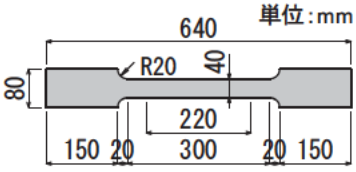
写真-3.2.7　接触圧力の計測状況

3.2.4　材料強度試験

本試験では，母板降伏の影響にも着目していることから，本試験に先立ち材料強度試験を行うこととした。図-3.2.5 および写真-3.2.8 に材料強度試験片を示す。板厚 75mm と 38mm のものを各 3 体製作して試験を実施した。



(a) 板厚 75mm 試験片



(b) 板厚 38mm 試験片

図-3.2.5　材料強度試験片の寸法形状

(a) 板厚 75mm 試験片

(b) 板厚 38mm 試験片

写真-3.2.8　材料強度試験片

3.2.5　すべり耐力試験

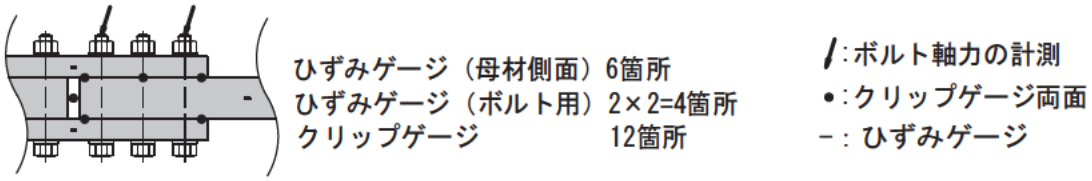
すべり耐力試験には，ボルト列数が 3 列の場合には 2000kN 万能試験機（以下，2MN 試験機）を用い，それ以外の場合には 30MN 大型構造部材万能試験機（以下，30MN 試験機）を用いた。写真-3.2.9 に 2MN 試験機を，写真-3.2.10 に 30MN 試験機での試験状況を示す。

この試験では，試験体の両端部をチャックで固定して引張荷重を作用させ，すべりが生じて荷重が低下した後，すべり痕を明確にするため，すべりが生じたときと同程度の荷重になるまで再載荷した。載荷は，2MN 試験機の場合は荷重制御とし，荷重の増加に従って，載荷速度を遅くし，すべり耐力を正確に計測にできるように努めた。30MN 試験機の場合は，変位制御とし，載荷開始時は 1～2mm/min 程度とし，事前に予測したすべり耐力（すべり係数 0.4 で計算したすべり耐力）の 50%程度に達した時点で 0.8mm/min 程度に変更し, 80%以降は 0.4mm/min 程度とし, すべり発生後は 0.8～1.5mm/min 程度とした。ただし，母板降伏型の試験体 No.15 については，ボルト軸力，側面ひずみ，相対変位を観察しながら載荷速度を適宜変化させた。

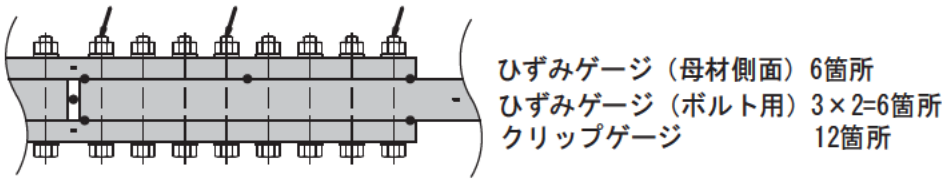
試験時には，ボルト軸力，継手部両側面のひずみを計測するとともに，クリップ変位計により，母板間の相対変位および母板と連結板の相対変位を計測した。図-3.2.6 および図-3.2.7 に, 各計測位置を示す。ボルト軸力と継手部両側面のひずみは，各試験体 No.で 1 体のみ詳細に計測するものとし，それ以外は計測点数を若干減らした（以下，前者を詳細計測，後者を基本計測と称す）。各試験体の計測箇所数を表-3.2.3 に示す。継手部両側面のひずみは，板厚中心や縁端から 5mm 位置に貼付した。試験中は，各データを約 1 秒ピッチで計測した。

写真-3.2.9　2MN 試験機

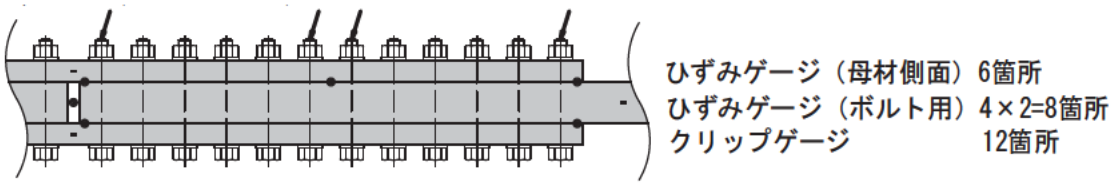
写真-3.2.10　30MN 試験機



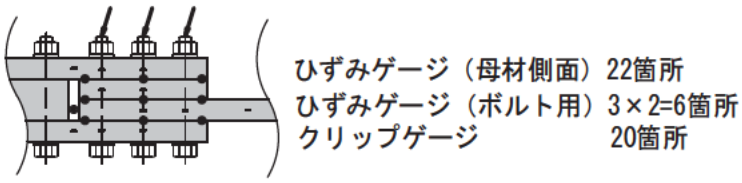
(a) 3 列タイプ



(b) 8 列タイプ

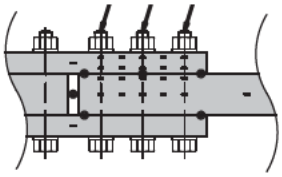


(c) 12 列タイプ



(d) フィラータイプ

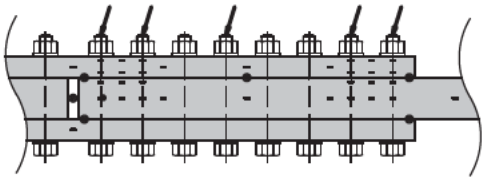
図-3.2.6　ひずみゲージ等設置箇所（基本計測）



ひずみゲージ（母材側面）46箇所
ひずみゲージ（ボルト用）3×2=6箇所
クリップゲージ　12箇所

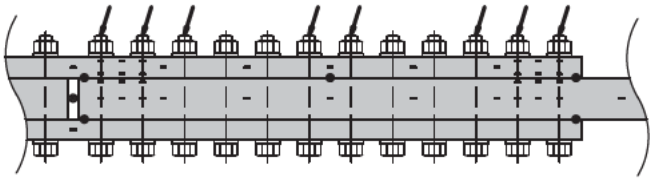
/ :ボルト軸力の計測
• :クリップゲージ両面
: ひずみゲージ

(a) 3 列タイプ



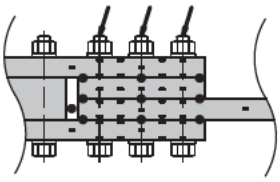
ひずみゲージ（母材側面）66箇所
ひずみゲージ（ボルト用）5×2=10箇所
クリップゲージ　12箇所

(b) 8 列タイプ



ひずみゲージ（母材側面）74箇所
ひずみゲージ（ボルト用）8×2=16箇所
クリップゲージ　12箇所

(c) 12 列タイプ



ひずみゲージ（母材側面）70箇所
ひずみゲージ（ボルト用）3×2=6箇所
クリップゲージ　20箇所

(d) フィラータイプ

図-3.2.7　ひずみゲージ等設置箇所（詳細計測）

表-3.2.3　計測箇所数

試験体			タイプ	ひずみゲージ		クリップゲージ
				母材側面	ボルト	
基本ケース	No.1	1 1	詳細	46	6	12
		1 2	基本	6	4	12
		1 3	基本	6	4	12
		1 4	基本	6	4	12
		1 5	基本	6	4	12
	No.2	2 1	詳細	46	6	12
		2 2	基本	6	4	12
		2 3	基本	6	4	12
	No.3	3 1	詳細	66	10	12
		3 2	基本	6	6	12
		3 3	基本	6	6	12
	No.4	4 1	詳細	74	16	12
		4 2	基本	6	8	12
		4 3	基本	6	8	12
	No.5	5 1	詳細	46	6	12
		5 2	基本	6	4	12
		5 3	基本	6	4	12
	No.6	6 1	詳細	66	10	12
		6 2	基本	6	6	12
		6 3	基本	6	6	12
	No.7	7 1	基本	6	8	12
		7 2	基本	6	8	12
		7 3	詳細	74	16	12
フィラーケース	No.8	8 1	詳細	70	6	20
		8 2	基本	22	6	20
		8 3	基本	22	6	20
	No.9	9 1	詳細	70	6	20
		9 2	基本	22	6	20
		9 3	基本	22	6	20
	No.10	10 1	詳細	70	6	20
		10 2	基本	22	6	20
		10 3	基本	22	6	20
肌すきケース	No.11	11 1	詳細	66	10	12
		11 2	基本	6	6	12
		11 3	基本	6	6	12
	No.12	12 1	詳細	66	10	12
		12 2	基本	6	6	12
		12 3	基本	6	6	12
塗膜厚ケース	No.13	13 1	詳細	46	6	12
		13 2	基本	6	4	12
		13 3	基本	6	4	12
		13 4	基本	6	4	12
		13 5	基本	6	4	12
	No.14	14 1	詳細	46	6	12
		14 2	基本	6	4	12
		14 3	基本	6	4	12
		14 4	基本	6	4	12
		14 5	基本	6	4	12
母材降伏ケース	No.15	15 1	詳細	74	16	12
		15 2	基本	6	8	12
		15 3	基本	6	8	12
基本ケース（切削加工後）	No.5’	5’ 1	詳細	46	6	12
		5’ 2	詳細	46	6	12
		5’ 3	詳細	46	6	12
合計				1376	350	720

3.3　試験体の寸法形状，塗膜厚，肌すき，表面凹凸形状の計測結果

3.3.1　寸法形状

(1) 板厚・幅

表-3.3.1 に各試験体の板厚の計測結果を，表-3.3.2 に試験体板幅の計測結果を示す。設計値に対して特段大きな差は見られない。

(2) そり量

試験体のそり量の計測結果を表-3.3.3 に示す。また，表-3.3.4 に各試験体のそり量の平均値及び最大最小値を示す。図-3.3.1 は各試験体のそり量の分布を示したものである。母板のそり量がほぼ一定であるのに対して，連結板のそり量は相対的に大きく，連結板の長さが長いほど大きくなる傾向にある。

表-3.3.1　板厚の計測結果

(a) 基本ケース（No.1，2，5）

単位： mm

母材	厚さ									
	L1　すべり面(C面側)					L2　すべり面(D面側)				
供試体No.	t0	t1	t2	t3	t4	t0	t1	t2	t3	t4
1 1	38.42	38.42	38.46	38.45	38.24	38.37	38.41	38.44	38.45	38.24
1 2	38.37	38.40	38.47	38.40	38.19	38.39	38.39	38.38	38.39	38.20
1 3	38.34	38.36	38.40	38.42	38.23	38.35	38.41	38.50	38.49	38.34
1 4	38.39	38.41	38.45	38.46	38.27	38.30	38.41	38.43	38.43	38.28
1 5	38.44	38.40	38.40	38.37	38.26	38.33	38.38	38.34	38.36	38.20
2 1	50.01	50.00	49.99	49.93	49.68	50.09	50.14	50.02	49.98	49.77
2 2	49.91	49.92	49.96	49.92	49.70	49.97	49.99	49.95	49.94	49.70
2 3	49.96	49.92	49.92	49.90	49.70	50.06	50.03	49.96	49.99	49.70
5 1	75.42	75.55	75.48	75.45	75.24	75.38	75.39	75.41	75.35	75.20
5 2	75.41	75.52	75.43	75.43	75.25	75.33	75.44	75.49	75.47	75.29
5 3	75.30	75.50	75.50	75.43	75.30	75.51	75.60	75.51	75.49	75.31

単位： mm

母材	厚さ									
	L1　非すべり面(C面側)					L2　非すべり面(D面側)				
供試体No.	t'4	t'3	t'2	t'1	t0	t'4	t'3	t'2	t'1	t0
1 1	38.18	38.39	38.44	38.40	38.25	38.17	38.35	38.70	38.34	38.32
1 2	38.39	38.45	38.40	38.38	38.30	38.29	38.43	38.42	38.37	38.33
1 3	38.27	38.42	38.40	38.40	38.32	38.27	38.43	38.40	38.38	38.33
1 4	38.40	38.39	38.38	38.39	38.32	38.40	38.44	38.43	38.42	38.40
1 5	38.24	38.37	38.37	38.37	38.33	38.33	38.35	38.80	38.36	38.32
2 1	49.83	50.01	50.01	49.93	49.90	49.90	50.11	50.10	50.10	49.96
2 2	49.92	49.97	49.99	50.00	49.85	49.90	50.01	50.03	50.05	49.82
2 3	49.99	50.06	50.04	50.12	49.93	49.94	50.02	50.07	50.05	49.89
5 1	75.09	75.18	75.18	75.13	75.06	75.09	75.25	75.26	75.20	75.14
5 2	75.03	75.21	75.25	75.22	75.20	75.01	75.20	75.23	75.31	75.21
5 3	75.20	75.36	75.38	75.80	75.23	75.18	75.37	75.38	75.43	75.32

表-3.3.1　板厚の計測結果（続き）

(a) 基本ケース（No.1，2，5）（続き）

単位：mm

連結板	厚さ													
	L1　連結板ボルト側(C面側)							L2　連結板ボルト側(D面側)						
供試体No.	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3
1 1	20.34	20.35	20.33	20.34	20.33	20.33	20.29	20.51	20.41	20.38	20.39	20.39	20.39	20.39
1 2	20.32	20.35	20.30	20.36	20.37	20.35	20.36	20.20	20.32	20.33	20.35	20.33	20.34	20.35
1 3	20.40	20.40	20.44	20.43	20.42	20.43	20.43	20.40	20.39	20.38	20.60	20.43	20.42	20.45
1 4	20.32	20.39	20.39	20.38	20.39	20.37	20.39	20.37	20.37	20.35	20.38	20.43	20.42	20.45
1 5	20.39	20.39	20.90	20.38	20.39	20.37	20.39	20.36	20.36	20.38	20.35	20.34	20.36	20.34
2 1	26.30	26.36	26.33	26.34	26.35	26.30	26.29	26.60	26.32	26.33	26.35	26.29	26.20	26.30
2 2	26.28	26.28	26.29	26.28	26.24	26.27	26.27	26.20	26.29	26.32	26.30	26.28	26.28	26.29
2 3	26.22	26.26	26.26	26.20	26.20	26.22	26.20	26.28	26.34	26.28	26.23	26.21	26.23	26.18
5 1	38.46	38.44	38.45	38.44	38.45	38.44	38.42	38.45	38.44	38.43	38.42	38.44	38.46	38.40
5 2	38.49	38.42	38.41	38.38	38.42	38.30	38.37	38.38	38.30	38.36	38.36	38.33	38.30	38.26
5 3	38.41	38.40	38.39	38.42	38.40	38.40	38.41	38.39	38.40	38.42	38.42	38.42	38.40	38.43

単位：mm

連結板	厚さ													
	L1　連結板ナット側(C面側)							L2　連結板ナット側(D面側)						
供試体No.	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3
1 1	20.22	20.21	20.22	20.21	20.10	20.22	20.23	20.32	20.35	20.35	20.32	20.32	20.30	20.28
1 2	20.31	20.30	20.32	20.32	20.32	20.32	20.30	20.25	20.30	20.29	20.32	20.30	20.32	20.31
1 3	20.36	20.36	20.32	20.32	20.30	20.32	20.31	20.32	20.32	20.31	20.33	20.34	20.35	20.33
1 4	20.23	20.26	20.26	20.27	20.27	20.28	20.27	20.18	20.23	20.23	20.24	20.22	20.20	20.19
1 5	20.32	20.80	20.39	20.39	20.38	20.42	20.38	20.36	20.37	20.35	20.43	20.38	20.32	20.34
2 1	26.24	26.17	26.15	26.16	26.20	26.23	26.23	26.22	26.17	26.13	26.14	26.19	26.25	26.24
2 2	26.20	26.26	26.19	26.21	26.20	26.23	26.19	26.19	26.19	26.22	26.20	26.20	26.21	26.18
2 3	26.17	26.20	26.22	26.20	26.22	26.19	26.18	26.23	26.21	26.22	26.23	26.22	26.21	26.19
5 1	38.43	38.42	38.80	38.37	38.38	38.40	38.37	38.41	38.39	38.37	38.38	38.37	38.36	38.34
5 2	38.80	38.39	38.47	38.45	38.42	38.41	38.43	38.39	38.42	38.41	38.40	38.40	38.80	38.40
5 3	38.34	38.34	38.30	38.35	38.35	38.34	38.34	38.52	38.43	38.43	38.42	38.43	38.41	38.40

(b) 基本ケース（No.3，4，6，7）

単位：mm

母材	厚さ											
	L1　すべり面(C面側)						L2　すべり面(D面側)					
供試体No.	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t0	t1	t2	t3	t4	t5
3 1	49.84	49.98	49.98	50.06	50.09	49.97	50.00	50.05	50.04	50.12	50.10	49.94
3 2	49.97	50.05	50.00	50.06	49.96	49.88	50.03	50.04	50.04	50.08	50.04	49.94
3 3	49.87	49.92	49.97	50.07	50.01	49.94	50.03	49.98	49.98	50.08	49.98	49.87
4 1	50.08	50.08	50.09	50.10	50.11	50.00	50.38	50.18	50.18	50.09	49.98	49.89
4 2	49.84	49.97	49.92	49.92	49.96	49.79	50.16	50.12	50.10	50.10	50.01	49.85
4 3	50.20	50.08	50.08	50.05	50.03	49.94	50.13	50.09	50.19	50.06	50.08	49.90
6 1	75.54	75.44	74.44	75.42	75.30	75.29	75.52	75.50	75.52	75.50	75.44	75.36
6 2	75.37	75.41	75.44	75.31	75.24	75.17	75.42	75.46	75.42	75.44	75.35	75.26
6 3	75.45	75.41	75.41	75.41	75.27	74.23	75.51	75.49	75.52	75.54	75.43	75.41
7 1	75.21	75.29	75.29	75.37	75.39	75.29	75.24	75.34	75.30	75.29	75.27	75.22
7 2	75.13	75.22	75.26	75.28	75.36	75.28	75.24	75.31	75.35	75.34	75.39	75.28
7 3	75.35	75.42	75.34	75.38	75.36	75.26	75.16	75.23	75.25	75.25	75.28	75.14

単位：mm

母材	厚さ							
	L1　非すべり面(C面側)				L2　非すべり面(D面側)			
供試体No.	t'5	t'4	t'2	t0	t'5	t'4	t'2	t0
3 1	49.96	50.04	50.06	50.09	49.87	50.02	50.10	49.96
3 2	49.86	49.91	49.95	50.07	49.75	50.00	49.98	49.78
3 3	49.91	50.09	50.06	49.96	49.96	50.19	49.97	49.94
4 1	49.86	49.98	49.94	49.95	49.90	49.93	49.93	49.93
4 2	49.86	49.96	49.91	49.96	49.83	49.95	49.94	50.00
4 3	49.87	49.94	49.98	50.04	49.92	50.01	49.98	49.98
6 1	75.28	75.42	75.41	75.38	75.29	75.52	75.50	75.59
6 2	75.34	75.49	75.46	75.49	75.35	75.42	75.41	75.47
6 3	75.02	75.14	75.29	75.14	75.00	75.00	75.19	75.03
7 1	75.18	75.33	75.40	75.45	75.24	75.30	75.41	75.65
7 2	75.29	75.43	75.50	75.52	75.65	75.40	75.35	75.21
7 3	75.20	75.33	75.38	75.36	75.11	75.13	75.15	75.26

表-3.3.1　板厚の計測結果（続き）

(b) 基本ケース（No.3，4，6，7）（続き）

単位： mm

連結板	厚さ													
	L1　連結板ナット側(C面側)							L2　連結板ナット側(D面側)						
供試体No.	t'4	t'2	t0	t1	t2	t3	t4	t'4	t'2	t0	t1	t2	t3	t4
3 1	26.19	26.10	26.10	26.14	26.13	26.09	26.08	26.20	26.20	26.13	26.17	26.17	26.17	26.13
3 2	26.17	26.17	26.12	26.20	26.22	26.22	26.16	26.08	26.14	26.11	26.12	26.19	26.19	26.21
3 3	26.10	26.14	26.07	26.10	26.14	26.17	26.19	26.11	26.10	26.08	26.14	26.19	26.19	26.19
4 1	26.04	26.11	26.13	26.18	26.16	26.16	26.09	26.12	26.14	26.13	26.20	26.20	26.16	26.19
4 2	26.14	26.12	26.16	26.18	26.18	26.17	26.13	26.30	26.16	26.19	26.18	26.18	26.19	26.16
4 3	26.13	26.12	26.17	26.12	26.13	26.13	26.11	26.11	26.10	26.14	26.13	26.13	26.16	26.19
6 1	38.32	38.31	38.30	38.32	38.33	38.36	38.37	38.22	38.22	38.24	38.31	38.34	38.34	38.33
6 2	38.37	38.35	38.33	38.35	38.35	38.29	38.31	38.36	38.32	38.31	38.35	38.32	38.31	38.30
6 3	38.39	38.37	38.35	38.36	38.32	38.33	38.35	38.37	38.34	38.30	38.29	38.41	38.32	38.30
7 1	38.28	38.31	38.35	38.37	38.40	38.34	38.37	38.27	38.30	38.31	38.35	38.37	38.37	38.40
7 2	38.44	38.29	38.29	38.28	38.30	38.34	38.37	38.28	38.25	38.33	38.29	38.35	38.32	38.34
7 3	38.31	38.28	38.33	38.36	38.41	38.42	38.32	38.22	38.19	38.29	38.28	38.23	38.22	38.16

単位： mm

連結板	厚さ													
	L1　連結板ボルト側(C面側)							L2　連結板ボルト側(D面側)						
供試体No.	t'4	t'2	t0	t1	t2	t3	t4	t'4	t'2	t0	t1	t2	t3	t4
3 1	26.22	26.70	26.15	26.17	26.16	26.13	26.09	26.21	26.15	26.17	26.17	26.20	26.16	26.09
3 2	26.15	26.16	26.15	26.15	26.17	26.16	26.16	26.11	26.21	26.14	26.18	26.14	26.14	26.11
3 3	26.12	26.17	26.18	26.18	26.20	26.19	26.22	26.14	26.20	26.14	26.18	26.15	26.18	26.20
4 1	26.13	26.20	26.16	26.10	26.19	26.16	26.14	26.06	26.16	26.15	26.19	26.17	26.14	26.09
4 2	26.09	26.17	26.16	26.24	26.17	26.16	26.06	26.14	26.20	26.24	26.33	26.28	26.27	26.26
4 3	26.11	26.14	26.11	26.12	26.07	26.12	26.02	26.09	26.09	26.18	26.19	26.17	26.19	26.18
6 1	38.35	38.33	38.33	38.40	38.39	38.38	38.33	38.35	38.34	38.33	38.32	38.32	38.35	38.32
6 2	38.33	38.34	38.34	38.32	38.37	38.34	38.34	38.37	38.35	38.36	38.33	38.35	38.36	38.38
6 3	38.40	38.40	38.34	38.31	38.27	38.28	38.27	38.35	38.39	38.31	38.36	38.31	38.33	38.31
7 1	38.28	38.34	38.35	38.36	38.36	38.32	38.36	38.28	38.30	38.30	38.31	38.30	38.31	38.25
7 2	38.30	38.26	38.33	38.35	38.31	38.33	38.30	38.23	38.25	38.29	38.28	38.24	38.34	38.34
7 3	38.28	38.26	38.28	38.27	38.23	38.23	38.21	38.20	38.22	38.23	38.18	38.21	38.18	38.20

(c) フィラーケース（No.8，9，10）

単位： mm

母材	厚さ									
	L1　すべり面(C面側)					L2　すべり面(D面側)				
供試体No.	t0	t1	t2	t3	t4	t0	t1	t2	t3	t4
8 1	38.33	38.34	38.35	38.30	38.30	38.31	38.34	38.34	38.29	38.20
8 2	38.34	38.35	38.37	38.35	38.21	38.35	38.33	38.33	38.30	38.20
8 3	38.32	38.30	38.33	38.30	38.19	38.35	38.34	38.35	38.31	38.18
9 1	38.31	38.34	38.37	38.35	38.27	38.41	38.40	38.41	38.38	38.26
9 2	38.29	38.28	38.32	38.28	38.10	38.32	38.34	38.37	38.32	38.16
9 3	38.27	38.26	38.28	38.22	38.15	38.39	38.33	38.30	38.24	38.18
10 1	38.24	38.33	38.32	38.30	38.14	38.28	38.30	38.31	38.32	38.13
10 2	38.21	38.23	38.23	38.22	38.29	38.24	38.31	38.32	38.33	38.10
10 3	38.16	38.17	38.21	38.15	38.05	38.30	38.28	38.27	38.28	38.10

単位： mm

母材	厚さ									
	L1　非すべり面(C面側)					L2　非すべり面(D面側)				
供試体No.	t'4	t'3	t'2	t'1	t0	t'4	t'3	t'2	t'1	t0
8 1	49.84	50.00	50.05	50.01	49.95	49.85	50.03	50.07	50.05	49.96
8 2	49.80	50.04	50.08	50.07	50.03	49.90	50.05	50.08	50.03	49.93
8 3	49.74	49.91	49.99	50.00	49.87	49.74	49.98	50.01	49.97	50.01
9 1	60.85	61.04	60.72	60.73	60.64	60.99	60.94	60.67	60.68	60.59
9 2	60.90	60.95	60.78	60.66	60.60	60.90	61.09	60.63	60.67	60.62
9 3	61.01	61.11	60.70	60.68	60.55	60.90	60.99	60.78	60.65	60.58
10 1	75.16	75.36	75.39	75.33	75.26	75.16	75.40	75.47	75.50	75.33
10 2	75.17	75.43	75.51	75.51	75.35	75.17	75.33	75.38	75.32	75.30
10 3	75.55	75.66	75.68	75.48	75.40	75.32	75.52	75.51	75.53	75.44

単位： mm

フィラー	厚さ							
	C面				D面			
供試体No.	t0	t1	t2	t3	t0	t1	t2	t3
8 1	12.05	12.09	12.03	12.03	12.05	12.03	11.97	12.04
8 2	12.09	12.11	12.14	12.11	12.03	12.08	12.07	12.09
8 3	12.05	12.12	12.11	12.12	12.06	12.06	12.08	12.11
9 1	22.13	22.18	22.13	22.27	22.19	22.19	22.12	22.13
9 2	22.21	22.27	22.23	22.25	22.13	22.11	22.15	22.70
9 3	22.05	22.10	22.06	22.07	22.15	22.16	22.21	22.25
10 1	37.53	37.51	37.50	37.55	37.37	37.44	37.47	37.36
10 2	37.43	37.31	37.16	37.21	37.55	37.55	37.27	37.33
10 3	37.29	37.26	37.41	37.58	37.39	37.26	37.35	37.45

表-3.3.1　板厚の計測結果（続き）

(c) フィラーケース（No.8，9，10）（続き）

単位： mm

連結板	厚さ													
	L1　連結板ボルト側(C面側)							L2　連結板ボルト側(D面側)						
供試体No.	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3
8 1	20.23	20.23	20.26	20.28	20.28	20.26	20.30	20.23	20.28	20.31	20.31	20.30	20.32	20.30
8 2	20.16	20.10	20.28	20.16	20.19	20.19	20.20	20.23	20.25	20.26	20.25	20.28	20.29	20.18
8 3	20.27	20.36	20.30	20.32	20.27	20.26	20.27	20.23	20.29	20.30	20.33	20.30	20.60	20.21
9 1	20.37	20.25	20.14	20.10	20.20	20.23	20.24	20.32	20.29	20.30	20.29	20.33	20.29	20.30
9 2	20.28	20.27	20.30	20.29	20.30	20.33	20.50	20.32	20.36	20.36	20.28	20.32	20.20	20.28
9 3	20.39	20.31	20.33	20.60	20.35	20.35	20.32	20.33	20.32	20.20	20.35	20.36	20.30	20.28
10 1	20.15	20.20	20.21	20.23	20.22	20.19	20.20	20.26	20.30	20.32	20.29	20.27	20.30	20.30
10 2	20.23	20.32	20.33	20.29	20.25	20.26	20.23	20.27	20.29	20.33	20.28	20.30	20.30	20.28
10 3	20.12	20.18	20.20	20.20	20.18	20.15	20.14	20.17	20.23	20.26	20.29	20.27	20.29	20.23

単位： mm

連結板	厚さ													
	L1　連結板ナット側(C面側)							L2　連結板ナット側(D面側)						
供試体No.	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3
8 1	20.29	20.29	20.28	20.29	20.20	20.27	20.25	20.29	20.28	20.29	20.30	20.20	20.25	20.23
8 2	20.28	20.30	20.29	20.31	20.28	20.28	20.27	20.34	20.33	20.32	20.28	20.32	20.20	20.25
8 3	20.25	20.23	20.24	20.27	20.24	20.22	20.21	20.27	20.28	20.28	20.30	20.30	20.23	20.18
9 1	20.36	20.35	20.36	20.36	20.33	20.33	20.33	20.35	20.34	20.33	20.33	20.34	20.36	20.35
9 2	20.28	20.27	20.29	20.30	20.28	20.28	20.30	20.43	20.28	20.30	20.33	20.33	20.32	20.33
9 3	20.22	20.17	20.24	20.21	20.20	20.12	20.08	20.24	20.21	20.23	20.23	20.23	20.19	20.15
10 1	20.24	20.32	20.28	20.31	20.29	20.29	20.28	20.23	20.23	20.25	20.25	20.25	20.24	20.22
10 2	20.26	20.31	20.32	20.35	20.33	20.29	20.36	20.25	20.28	20.29	20.32	20.26	20.30	20.28
10 3	20.27	20.32	20.32	20.32	20.32	20.32	20.29	20.24	20.29	20.31	20.28	20.27	20.28	20.31

(d) 肌すきケース（No.11，12）

単位： mm

母材	厚さ											
	L1　すべり面(C面側)						L2　すべり面(D面側)					
供試体No.	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t0	t1	t2	t3	t4	t5
11 1	49.17	49.11	49.10	49.16	49.12	49.05	49.18	49.21	49.16	49.15	49.09	49.00
11 2	49.10	49.11	49.16	49.15	49.12	49.12	49.12	49.19	49.14	49.36	49.20	49.05
11 3	49.19	49.18	49.17	49.15	49.16	49.01	49.16	49.10	49.12	49.17	49.11	49.10
12 1	74.10	74.08	74.03	74.03	74.00	73.76	73.98	74.02	73.98	74.07	73.98	73.86
12 2	73.97	73.97	73.99	73.97	73.98	73.82	73.95	73.93	73.98	73.96	73.98	73.82
12 3	73.98	73.98	73.97	73.97	73.96	73.75	74.04	74.04	73.98	73.98	74.02	74.86

単位： mm

母材	厚さ							
	L1　非すべり面(C面側)				L2　非すべり面(D面側)			
供試体No.	t'5	t'4	t'2	t0	t'5	t'4	t'2	t0
11 1	49.85	50.05	50.13	50.00	49.87	50.05	50.09	50.12
11 2	49.80	49.95	50.18	50.18	49.86	49.96	50.14	49.70
11 3	49.85	49.98	50.20	50.07	49.85	49.95	50.14	49.99
12 1	74.90	75.01	75.24	75.02	74.50	75.04	75.22	75.00
12 2	75.37	75.43	75.50	75.32	75.40	75.46	75.50	75.39
12 3	75.42	75.56	75.51	75.47	75.37	75.50	75.50	75.50

単位： mm

連結板	厚さ													
	L1　連結板ボルト側(C面側)							L2　連結板ボルト側(D面側)						
供試体No.	t'4	t'2	t0	t1	t2	t3	t4	t'4	t'2	t0	t1	t2	t3	t4
11 1	26.15	26.23	26.50	26.26	26.26	26.22	26.21	26.13	26.18	26.18	26.18	26.23	26.26	26.20
11 2	26.19	26.18	26.16	26.13	26.00	26.06	26.07	26.29	26.18	26.16	26.15	26.08	26.00	26.09
11 3	26.16	26.22	26.22	26.16	26.09	26.04	26.18	26.22	26.24	26.17	26.14	26.03	26.08	26.10
12 1	38.27	38.30	38.25	38.30	38.25	38.25	38.22	38.33	38.34	38.32	38.32	38.34	38.00	38.26
12 2	38.41	38.35	38.29	38.34	38.33	38.29	38.26	38.43	38.40	38.35	38.35	38.32	38.32	38.26
12 3	38.37	38.30	38.28	38.24	38.24	38.20	38.20	38.45	38.42	38.35	38.35	38.30	38.30	38.30

単位： mm

連結板	厚さ													
	L1　連結板ナット側(C面側)							L2　連結板ナット側(D面側)						
供試体No.	t'4	t'2	t0	t1	t2	t3	t4	t'4	t'2	t0	t1	t2	t3	t4
11 1	26.13	26.19	26.15	26.15	26.23	26.23	26.23	26.19	26.18	26.21	26.22	26.27	26.26	26.23
11 2	26.09	26.12	26.11	26.09	26.10	26.05	26.05	26.18	26.23	26.19	26.15	26.07	26.04	26.14
11 3	26.24	26.23	26.17	26.17	26.08	26.02	26.12	26.33	26.20	26.22	26.20	26.06	26.14	26.23
12 1	38.25	38.29	38.29	38.30	38.29	38.28	38.33	38.40	38.40	38.36	38.40	38.38	38.42	38.29
12 2	38.27	38.27	38.25	38.29	38.27	38.32	38.25	38.29	38.32	38.30	38.26	38.29	38.29	38.24
12 3	38.46	38.41	38.40	38.41	38.39	38.38	38.34	38.40	38.90	38.36	38.40	38.29	38.28	38.25

表-3.3.1　板厚の計測結果（続き）

（e）塗膜厚ケース（No.13，14）

単位： mm

母材	厚さ									
	L1　すべり面(C面側)					L2　すべり面(D面側)				
供試体No.	t0	t1	t2	t3	t4	t0	t1	t2	t3	t4
13 1	38.30	38.34	38.36	38.32	38.25	38.27	38.33	38.35	38.34	38.25
13 2	38.36	38.33	38.35	38.32	38.25	38.30	38.30	38.31	38.32	38.25
13 3	38.29	38.29	38.32	38.31	38.20	38.26	38.29	38.28	38.28	38.23
13 4	38.30	38.30	38.34	38.33	38.25	38.25	38.29	38.30	38.29	38.20
13 5	38.37	38.37	38.32	38.34	38.22	38.32	38.35	38.34	38.34	38.20
14 1	38.29	38.31	38.35	38.31	38.15	38.36	38.41	38.46	38.42	38.18
14 2	38.43	38.45	38.49	38.48	38.21	38.42	38.45	38.45	38.45	38.25
14 3	38.29	38.37	38.44	38.39	38.13	38.26	38.32	38.35	38.30	38.07
14 4	38.06	38.31	38.32	38.36	38.33	38.35	38.36	38.43	38.32	38.16
14 5	38.20	38.22	38.22	38.23	38.08	38.22	38.24	38.26	38.29	38.06

単位： mm

母材	厚さ									
	L1　非すべり面(C面側)					L2　非すべり面(D面側)				
供試体No.	t'4	t'3	t'2	t'1	t0	t'4	t'3	t'2	t'1	t0
13 1	38.26	38.30	38.30	38.34	38.34	38.20	38.29	38.28	38.28	38.27
13 2	38.33	38.39	38.39	38.37	38.30	38.23	38.29	38.30	38.32	38.24
13 3	38.24	38.34	38.36	38.29	38.26	38.18	38.29	38.34	38.29	38.26
13 4	38.28	38.37	38.37	38.38	38.35	38.29	38.38	38.38	38.38	38.35
13 5	38.32	38.80	38.38	38.37	38.33	38.30	38.80	38.50	38.35	38.33
14 1	38.15	38.39	38.39	38.37	38.36	38.23	38.43	38.40	38.37	38.39
14 2	38.33	38.45	38.45	38.43	38.44	38.20	38.47	38.41	38.41	38.40
14 3	38.13	38.30	38.37	38.35	38.21	38.28	38.37	38.39	38.37	38.34
14 4	38.13	38.34	38.32	38.30	38.24	38.17	38.33	38.33	38.32	38.29
14 5	38.05	38.25	38.27	38.26	38.27	38.05	38.27	38.28	38.26	38.27

単位： mm

連結板	厚さ													
	L1　連結板ボルト側(C面側)							L2　連結板ボルト側(D面側)						
供試体No.	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3
13 1	20.33	20.31	20.34	20.34	20.34	20.35	20.30	20.30	20.33	20.34	20.29	20.30	20.30	20.27
13 2	20.26	20.28	20.28	20.26	20.26	20.25	20.17	20.17	20.17	20.19	20.18	20.19	20.19	20.18
13 3	20.35	20.28	20.10	20.28	20.20	20.10	20.32	20.28	20.25	20.26	20.27	20.29	20.30	20.32
13 4	20.32	20.32	20.30	20.32	20.32	20.29	20.27	20.30	20.31	20.33	20.32	20.34	20.34	20.29
13 5	20.27	20.27	20.28	20.29	20.30	20.30	20.30	20.25	20.21	20.22	20.21	20.24	20.24	20.22
14 1	20.32	20.30	20.30	20.30	20.30	20.34	20.33	20.31	20.33	20.33	20.37	20.32	20.29	20.31
14 2	20.35	20.40	20.42	20.42	20.40	20.40	20.41	20.31	20.34	20.28	20.37	20.30	20.40	20.37
14 3	20.30	20.31	20.31	20.31	20.32	20.32	20.32	20.26	20.27	20.25	20.25	20.22	20.25	20.23
14 4	20.32	20.35	20.37	20.30	20.30	20.35	20.35	20.34	20.37	20.29	20.42	20.42	20.32	20.37
14 5	20.35	20.27	20.29	20.20	20.30	20.29	20.29	20.25	20.22	20.26	20.26	20.25	20.25	20.25

単位： mm

連結板	厚さ													
	L1　連結板ナット側(C面側)							L2　連結板ナット側(D面側)						
供試体No.	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3
13 1	20.23	20.30	20.24	20.23	20.20	20.22	20.21	20.30	20.29	20.30	20.28	20.29	20.30	20.28
13 2	20.29	20.25	20.27	20.27	20.27	20.25	20.22	20.30	20.27	20.29	20.29	20.33	20.33	20.30
13 3	20.28	20.28	20.27	20.28	20.28	20.26	20.23	20.28	20.28	20.32	20.29	20.27	20.29	20.26
13 4	20.20	20.28	20.32	20.29	20.29	20.28	20.28	20.29	20.29	20.34	20.30	20.32	20.28	20.30
13 5	20.33	20.32	20.34	20.34	20.33	20.34	20.29	20.32	20.32	20.33	20.34	20.34	20.33	20.31
14 1	20.32	20.34	20.33	20.32	20.30	20.30	20.30	20.30	20.33	20.36	20.35	20.33	20.30	20.33
14 2	20.33	20.36	20.39	20.38	20.39	20.36	20.39	20.30	20.32	20.34	20.35	20.34	20.38	20.37
14 3	20.33	20.32	20.34	20.32	20.33	20.32	20.27	20.31	20.31	20.32	20.32	20.32	20.20	20.32
14 4	20.35	20.31	20.30	20.31	20.32	20.34	20.35	20.29	20.32	20.28	20.33	20.35	20.33	20.35
14 5	20.26	20.26	20.28	20.24	20.27	20.29	20.29	20.16	20.22	20.21	20.22	20.22	20.23	20.21

表-3.3.1　板厚の計測結果（続き）

（f）母板降伏ケース（No.15）

単位： mm

母材	厚さ											
	L1　すべり面(C面側)						L2　すべり面(D面側)					
供試体No.	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t0	t1	t2	t3	t4	t5
15 1	75.21	75.37	75.37	75.21	75.21	75.05	75.23	75.32	75.31	75.22	75.25	75.09
15 2	75.17	75.20	75.31	75.33	75.12	74.98	75.25	75.12	75.24	75.23	75.06	74.93
15 3	75.20	75.31	75.35	75.22	75.30	75.13	75.26	75.26	75.25	75.20	75.26	75.12

単位： mm

母材	厚さ							
	L1　非すべり面(C面側)				L2　非すべり面(D面側)			
供試体No.	t'5	t'4	t'2	t0	t'5	t'4	t'2	t0
15 1	74.97	75.12	75.25	75.21	75.07	75.28	75.29	75.28
15 2	74.95	75.18	75.21	75.09	74.91	75.12	75.22	75.16
15 3	74.97	75.18	75.27	75.28	75.00	75.18	75.27	75.19

単位： mm

連結板	厚さ													
	L1　連結板ボルト側(C面側)							L2　連結板ボルト側(D面側)						
供試体No.	t'4	t'2	t0	t1	t2	t3	t4	t'4	t'2	t0	t1	t2	t3	t4
15 1	38.26	38.25	38.22	38.29	38.32	38.28	38.36	38.27	38.19	38.21	38.30	38.29	38.30	38.33
15 2	38.27	38.27	38.33	38.22	38.28	38.33	38.32	38.27	38.30	38.29	38.25	38.28	38.30	38.34
15 3	38.23	38.18	38.08	38.18	38.17	38.20	38.22	38.21	38.25	38.20	38.26	38.24	38.17	38.21

単位： mm

連結板	厚さ													
	L1　連結板ナット側(C面側)							L2　連結板ナット側(D面側)						
供試体No.	t'4	t'2	t0	t1	t2	t3	t4	t'4	t'2	t0	t1	t2	t3	t4
15 1	38.30	38.30	38.32	38.26	38.28	38.29	38.30	38.28	38.30	38.34	38.23	38.27	38.32	38.32
15 2	38.34	38.33	38.18	38.31	38.27	38.29	38.29	38.41	38.32	38.25	38.28	38.28	38.24	38.28
15 3	38.20	38.13	38.33	38.27	38.33	38.36	38.34	38.22	38.12	38.19	38.23	38.20	38.18	38.27

表-3.3.2　試験体板幅の計測結果

（a）基本ケース（No.1,2,5）

単位： mm

母材	幅									
	非すべり面					すべり面				
供試体No.	w'4	w'3	w'2	w'1	w0	w0	w1	w2	w3	w4
1 1	122.13	122.26	122.28	122.24	122.19	120.96	120.98	120.91	121.02	121.05
1 2	121.57	121.59	121.65	121.63	121.63	121.46	121.45	121.45	121.50	121.49
1 3	121.58	121.60	121.67	121.68	121.65	121.72	121.74	121.77	121.81	121.86
1 4	121.83	121.84	121.87	121.82	121.84	121.65	121.67	121.72	121.64	121.65
1 5	121.43	121.45	121.43	121.42	121.41	121.57	121.59	121.44	121.46	121.46
2 1	120.57	120.75	120.80	120.74	120.79	120.68	121.05	120.32	120.33	120.05
2 2	121.17	121.43	121.40	121.28	121.22	120.52	120.67	120.51	120.51	120.46
2 3	120.37	120.48	120.66	120.64	120.46	121.48	121.67	121.68	121.61	121.35
5 1	121.94	121.87	121.70	121.78	122.48	121.43	121.57	121.57	121.73	121.88
5 2	122.55	122.28	122.35	122.57	122.62	122.24	122.24	122.16	121.98	121.88
5 3	122.22	122.16	122.04	121.98	121.84	122.02	122.16	122.22	122.26	122.40

単位： mm

連結板	幅													
	連結板ボルト側(A面)							連結板ナット側(B面)						
供試体No.	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3
1 1	121.53	121.59	121.58	121.54	121.50	121.54	121.40	121.77	121.77	121.70	121.67	121.68	121.82	121.83
1 2	121.60	121.57	121.57	121.55	121.58	121.54	121.50	121.48	121.46	121.47	121.61	121.60	121.41	121.47
1 3	120.90	120.86	120.83	120.81	120.75	120.76	120.72	120.88	120.89	120.91	120.90	120.88	120.85	120.82
1 4	120.82	120.82	120.87	120.85	120.84	120.78	120.77	121.66	121.60	121.62	121.65	121.61	121.62	121.58
1 5	121.57	121.58	121.58	121.55	121.60	121.70	121.68	121.57	121.56	121.60	121.56	121.58	121.60	121.60
2 1	121.70	121.70	121.72	121.69	121.72	121.71	121.70	121.81	121.81	121.72	121.66	121.67	121.65	121.64
2 2	121.80	121.75	121.74	121.70	121.68	121.68	121.68	121.77	121.60	121.66	121.65	121.72	121.77	121.70
2 3	121.73	121.73	121.64	121.72	121.71	121.68	121.68	122.12	122.18	122.08	122.21	122.16	122.16	122.10
5 1	121.45	121.52	121.47	121.42	121.57	121.51	121.45	121.46	121.41	121.41	121.37	121.36	121.44	121.32
5 2	121.54	121.54	121.55	121.55	121.50	121.49	121.50	121.57	121.60	121.62	121.55	121.60	121.57	121.55
5 3	121.53	121.61	121.60	121.57	121.60	121.61	121.62	121.90	121.84	121.85	121.84	121.82	121.80	121.86

表-3.3.2　試験体板幅の計測結果（続き）

(b) 基本ケース（No.3, 4, 6, 7）

単位： mm

母材	幅									
	非すべり面				すべり面					
供試体No.	w'5	w'4	w'2	w'0	w0	w1	w2	w3	w4	w5
3 1	191.55	191.55	191.35	190.42	191.20	191.17	191.20	191.19	191.21	191.18
3 2	191.30	191.54	191.27	190.22	190.79	190.90	190.95	190.99	191.97	190.86
3 3	191.05	191.08	191.44	191.40	190.98	191.14	191.14	191.26	190.90	190.79
4 1	269.70	269.75	271.30	271.00	270.00	270.15	270.25	270.50	270.85	270.85
4 2	268.75	269.00	270.25	270.65	270.55	270.70	270.80	271.00	271.40	271.50
4 3	269.00	269.10	270.15	270.55	269.45	269.55	269.40	269.70	269.85	269.80
6 1	131.62	131.61	131.62	131.31	130.18	130.45	130.60	130.45	130.40	130.68
6 2	131.84	131.63	131.36	130.97	131.54	132.01	132.12	132.18	131.78	131.74
6 3	131.43	131.69	132.18	132.19	131.57	131.62	131.58	131.14	131.14	131.08
7 1	192.66	192.80	192.73	192.62	192.82	192.53	192.48	192.67	191.66	191.11
7 2	192.37	192.46	192.35	192.35	191.79	191.86	191.60	190.67	189.68	189.38
7 3	192.41	192.37	191.98	191.79	191.79	191.82	191.75	190.88	190.23	190.08

単位： mm

連結板	幅													
	連結板ボルト側							連結板ナット側						
供試体No.	w'4	w'2	w0	w1	w2	w3	w4	w'4	w'2	w0	w1	w2	w3	w4
3 1	190.96	190.92	191.06	191.07	191.06	191.02	191.02	191.52	191.47	191.54	191.62	191.70	191.59	191.58
3 2	191.07	191.12	191.11	191.10	191.04	191.03	191.07	191.39	191.39	191.49	191.54	191.50	191.48	191.43
3 3	190.80	191.41	191.31	191.44	191.44	191.40	191.41	191.43	191.46	191.47	191.55	191.55	191.57	191.67
4 1	271.55	271.60	271.35	271.50	271.45	271.60	271.60	272.10	272.20	272.25	272.30	272.45	272.40	272.35
4 2	270.80	270.80	270.80	270.90	270.80	270.75	270.65	271.60	271.60	271.55	271.60	271.60	271.65	271.60
4 3	272.15	272.10	272.15	272.15	272.20	272.15	272.10	270.30	270.40	270.55	270.60	270.60	270.55	270.60
6 1	131.46	131.47	131.45	131.47	131.55	131.55	131.54	131.53	131.56	131.53	131.52	131.51	131.52	131.55
6 2	131.50	131.52	131.42	131.43	131.57	131.57	131.53	131.43	131.43	131.41	131.38	131.31	131.31	131.55
6 3	131.31	131.27	131.25	131.30	131.31	131.29	131.30	131.58	131.58	131.50	131.50	131.46	131.46	131.45
7 1	192.11	192.14	192.16	192.18	192.17	192.10	192.07	191.86	191.85	191.81	191.80	191.72	191.81	191.72
7 2	192.25	192.39	192.31	192.23	192.19	192.21	192.18	191.45	191.41	191.41	191.44	191.45	191.45	191.36
7 3	191.46	191.44	191.44	191.46	191.46	191.48	191.45	191.76	191.92	191.96	191.98	191.96	191.93	191.84

(c) フィラーケース（No.8, 9, 10）

単位： mm

母材	幅									
	非すべり面					すべり面				
供試体No.	w'4	w'3	w'2	w'1	w0	w0	w1	w2	w3	w4
8 1	122.34	122.34	122.18	122.05	121.81	121.60	121.59	121.63	121.64	121.63
8 2	121.15	121.39	121.45	121.31	121.61	121.48	121.48	121.44	121.45	121.46
8 3	121.13	122.00	121.94	122.17	122.45	121.32	121.28	121.29	121.36	121.36
9 1	121.66	121.80	121.81	121.98	121.73	121.35	121.33	121.40	121.41	121.39
9 2	121.56	121.65	121.75	121.73	121.70	121.36	121.23	121.27	121.25	121.27
9 3	121.25	121.20	121.10	121.17	121.29	121.21	121.20	121.27	121.27	121.32
10 1	122.78	122.63	122.56	122.45	122.30	121.21	121.22	121.22	121.24	121.25
10 2	123.05	122.94	122.80	122.77	122.59	121.20	121.21	121.21	121.20	121.21
10 3	122.18	122.20	122.18	122.09	122.09	121.21	121.19	121.25	121.30	121.28

単位： mm

連結板	幅													
	連結板ボルト側(A面)							連結板ナット側(B面)						
供試体No.	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3
8 1	120.70	120.70	120.79	120.77	120.76	120.79	120.78	121.64	121.57	121.56	121.56	121.56	121.50	121.73
8 2	121.67	121.66	121.59	121.63	121.66	121.68	121.74	120.80	120.69	120.78	120.82	120.80	120.73	120.77
8 3	121.62	121.58	121.58	121.55	121.56	121.59	121.52	121.83	121.73	121.80	121.70	121.80	121.80	121.84
9 1	121.89	121.73	121.75	121.70	121.73	121.77	121.66	120.77	120.72	120.72	120.73	120.77	120.77	120.76
9 2	121.81	121.82	121.82	121.86	121.92	121.90	121.99	121.87	121.80	121.92	121.95	121.92	121.85	121.88
9 3	121.62	121.60	121.58	121.57	121.58	121.58	121.59	121.80	121.81	121.90	121.84	121.74	121.68	121.80
10 1	121.60	121.60	121.74	121.72	121.73	121.77	121.76	121.81	121.89	121.86	121.86	121.76	121.78	121.82
10 2	121.51	121.44	121.46	121.55	121.64	121.65	121.51	121.75	121.75	121.73	121.73	121.75	121.78	121.75
10 3	121.73	121.77	121.45	121.75	121.72	121.71	121.67	120.71	120.68	120.68	120.72	120.71	120.69	120.65

単位： mm

フィラー	幅			
供試体No.	w0	w1	w2	w3
8 1	120.11	120.09	120.08	120.09
8 2	120.18	120.17	120.19	120.19
8 3	120.07	120.06	120.09	120.08
9 1	120.41	120.62	120.86	121.10
9 2	120.78	120.93	121.00	120.92
9 3	120.81	120.95	121.08	121.03
10 1	121.50	121.57	121.42	121.19
10 2	121.60	121.81	121.96	121.80
10 3	121.18	121.21	121.27	121.33

表-3.3.2　試験体板幅の計測結果（続き）

(d) 肌すきケース（No.11，12）

単位： mm

母材	幅									
	非すべり面				すべり面					
供試体No.	w'5	w'4	w'2	w'0	w0	w1	w2	w3	w4	w5
11 1	191.58	191.43	191.22	191.27	190.62	190.61	190.42	190.70	190.71	191.79
11 2	191.55	191.50	191.21	190.95	190.62	191.16	191.19	191.24	191.30	191.50
11 3	191.06	190.88	190.76	191.10	191.21	191.20	191.19	191.30	191.33	191.34
12 1	132.17	132.40	132.45	132.17	131.53	131.55	131.56	131.97	131.60	131.57
12 2	132.15	132.08	131.82	131.68	132.43	133.32	133.79	134.00	133.60	133.14
12 3	131.47	131.42	131.28	131.28	130.19	130.54	130.71	130.62	131.00	130.96

単位： mm

連結板	幅													
	連結板ボルト側							連結板ナット側						
供試体No.	w'4	w'2	w0	w1	w2	w3	w4	w'4	w'2	w0	w1	w2	w3	w4
11 1	191.01	190.96	191.05	191.15	191.10	191.12	191.13	191.02	190.96	191.09	191.06	191.08	191.22	191.05
11 2	191.49	191.49	191.46	191.55	191.51	191.56	191.38	191.61	191.55	191.50	191.55	191.53	191.57	191.47
11 3	191.00	191.13	191.10	191.09	191.01	191.06	191.00	191.08	191.00	190.97	190.92	190.92	190.94	190.96
12 1	131.40	131.46	131.49	131.49	131.45	131.45	131.49	131.26	131.26	131.20	131.21	131.20	131.19	131.13
12 2	131.23	131.34	131.32	131.34	131.33	131.30	131.33	131.32	131.43	131.44	131.42	131.44	131.40	131.41
12 3	131.46	131.48	131.35	131.47	131.38	131.41	131.42	131.35	131.36	131.30	131.51	131.34	131.32	131.35

(e) 塗膜厚ケース（No.13，14）

単位： mm

母材	幅									
	非すべり面					すべり面				
供試体No.	w'4	w'3	w'2	w'1	w0	w0	w1	w2	w3	w4
13 1	121.50	121.53	121.53	121.50	121.50	121.89	121.95	121.90	121.98	121.80
13 2	121.31	121.30	121.34	121.35	121.20	121.44	121.56	121.62	121.50	121.30
13 3	121.89	121.89	121.95	121.91	121.92	121.37	121.46	121.47	121.40	121.42
13 4	121.39	121.36	121.38	121.50	121.41	121.13	121.19	121.22	121.23	121.23
13 5	121.39	121.42	121.39	121.44	121.43	121.41	121.43	121.41	121.47	121.41
14 1	121.71	121.72	121.71	121.67	121.62	121.43	121.48	121.46	121.33	121.25
14 2	121.66	121.66	121.65	121.66	121.54	121.39	121.42	121.47	121.44	121.45
14 3	121.44	121.49	121.47	121.48	121.41	121.42	121.45	121.52	121.46	121.44
14 4	121.54	121.56	121.56	121.60	121.57	121.58	121.54	121.55	121.46	121.49
14 5	121.78	121.76	121.73	121.69	121.67	121.34	121.50	121.39	121.40	121.40

単位： mm

連結板	幅													
	連結板ボルト側(A面)							連結板ナット側(B面)						
供試体No.	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3	t'3	t'2	t'1	t0	t1	t2	t3
13 1	120.85	120.84	120.82	120.75	120.79	120.69	120.69	122.00	121.89	121.93	121.81	121.92	121.90	121.82
13 2	121.80	121.80	121.81	121.70	121.74	121.80	121.66	121.88	121.88	121.91	121.93	121.92	121.95	121.97
13 3	120.83	120.80	120.79	120.78	120.76	120.77	120.84	121.68	121.57	121.60	121.71	121.65	121.60	121.64
13 4	120.72	120.70	120.75	120.78	120.74	120.75	120.75	121.59	121.57	121.56	121.52	121.54	121.54	121.54
13 5	121.71	121.70	121.74	121.70	121.30	121.70	121.65	121.60	121.61	121.67	121.70	121.70	121.71	121.80
14 1	121.70	121.70	121.59	121.65	121.70	121.68	121.59	121.59	121.59	121.59	121.57	121.60	121.60	121.70
14 2	120.89	120.75	120.67	120.68	120.68	120.69	120.70	120.72	120.67	120.75	120.76	120.77	120.77	120.78
14 3	121.73	121.65	121.66	121.66	121.65	121.68	121.64	121.72	121.56	121.70	121.76	121.76	121.79	121.77
14 4	121.56	121.59	121.59	121.68	121.73	121.73	121.72	121.60	121.60	121.67	121.65	121.50	121.59	121.68
14 5	121.64	121.61	121.62	121.62	121.71	121.75	121.74	121.68	121.60	121.68	121.58	121.58	121.62	121.70

(f) 母板降伏ケース（No.15）

単位： mm

連結板	幅													
	連結板ボルト側							連結板ナット側						
供試体No.	w'4	w'2	w0	w1	w2	w3	w4	w'4	w'2	w0	w1	w2	w3	w4
15 1	107.37	107.36	107.41	107.41	107.38	107.38	107.33	107.32	107.39	107.35	107.32	107.31	107.26	107.33
15 2	107.27	107.38	107.35	107.34	107.32	107.33	107.27	107.27	107.31	107.30	107.30	107.30	107.36	107.43
15 3	107.87	107.83	107.91	107.92	107.90	107.92	107.86	107.87	107.85	107.82	107.79	107.86	107.88	107.83

単位： mm

母材	幅									
	非すべり面				すべり面					
供試体No.	w'5	w'4	w'2	w'0	w0	w1	w2	w3	w4	w5
15 1	107.02	107.06	107.02	107.08	107.05	107.06	107.05	107.05	107.05	107.06
15 2	106.95	107.00	106.95	107.02	106.89	106.96	106.90	106.91	106.91	106.88
15 3	106.99	107.00	106.97	106.98	106.94	106.94	106.91	106.90	106.92	106.91

表-3.3.3　試験体そり量の計測結果

(a) 基本ケース（No.1，2，5）

単位： mm

母材	ナット側					ボルト側				
	L1					L1				
供試体No.	c0	c1	c2	c3	c4	c0	c1	c2	c3	c4
1 1	0.00	0.10	0.14	0.14	0.00	0.00	0.06	0.07	0.03	0.00
1 2	0.00	0.12	0.17	0.15	0.00	0.00	0.06	0.06	0.05	0.00
1 3	0.00	0.11	0.17	0.13	0.00	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00
1 4	0.00	0.18	0.24	0.15	0.00	0.00	0.04	0.02	0.02	0.00
1 5	0.00	0.07	0.16	0.14	0.00	0.00	0.09	0.07	0.01	0.00
2 1	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.02	0.04	0.06	0.00
2 2	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.03	0.01	0.00
2 3	0.00	0.02	0.02	0.04	0.00	0.00	0.02	0.01	0.05	0.00
5 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.05	0.10	0.00
5 2	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.06	0.05	0.10	0.00
5 3	0.00	0.20	0.16	0.09	0.00	0.00	0.16	0.18	0.03	0.00

単位： mm

連結板	ナット側							ボルト側						
	L1							L1						
供試体No.	c'3	c'2	c1	c0	c1	c2	c3	c'3	c'2	c1	c0	c1	c2	c3
1 1	0.00	0.17	0.28	0.26	0.25	0.13	0.00	0.00	0.11	0.10	0.11	0.00	0.03	0.00
1 2	0.00	0.21	0.32	0.36	0.30	0.21	0.00	0.00	0.06	0.29	0.32	0.18	0.02	0.00
1 3	0.00	0.16	0.25	0.26	0.23	0.12	0.00	0.00	0.04	0.03	0.00	0.03	0.04	0.00
1 4	0.00	0.04	0.11	0.16	0.17	0.08	0.00	0.00	0.10	0.21	0.20	0.10	0.04	0.00
1 5	0.00	0.04	0.08	0.11	0.07	0.01	0.00	0.00	0.12	0.09	0.11	0.04	0.01	0.00
2 1	0.00	0.09	0.37	0.11	0.13	0.07	0.00	0.00	0.22	0.25	0.27	0.12	0.02	0.00
2 2	0.00	0.16	0.26	0.32	0.30	0.15	0.00	0.00	0.06	0.15	0.13	0.10	0.05	0.00
2 3	0.00	0.08	0.18	0.19	0.16	0.08	0.00	0.00	0.20	0.21	0.25	0.13	0.02	0.00
5 1	0.00	0.07	0.09	0.13	0.05	0.01	0.00	0.00	0.24	0.11	0.06	0.09	0.04	0.00
5 2	0.00	0.11	0.14	0.15	0.09	0.08	0.00	0.00	0.01	0.06	0.05	0.06	0.02	0.00
5 3	0.00	0.05	0.20	0.25	0.23	0.15	0.00	0.00	0.14	0.26	0.21	0.19	0.01	0.00

(b) 基本ケース（No.3，4，6，7）

単位： mm

母材	ナット側						ボルト側					
	L1						L1					
供試体No.	c0	c1	c2	c3	c4	c5	c0	c1	c2	c3	c4	c5
3 1	0.00	0.10	0.11	0.08	0.08	0.00	0.00	0.06	0.02	0.06	0.06	0.00
3 2	0.00	0.33	0.42	0.16	0.17	0.00	0.00	0.37	0.35	0.03	0.03	0.00
3 3	0.00	0.30	0.35	0.07	0.11	0.00	0.00	0.28	0.25	0.01	0.01	0.00
4 1	0.00	0.27	0.45	0.12	0.15	0.00	0.00	0.41	0.36	0.11	0.11	0.00
4 2	0.00	0.23	0.41	0.10	0.13	0.00	0.00	0.32	0.36	0.00	0.00	0.00
4 3	0.00	0.25	0.43	0.11	0.13	0.00	0.00	0.41	0.41	0.00	0.00	0.00
6 1	0.00	0.20	0.26	0.01	0.01	0.00	0.00	0.19	0.24	0.23	0.02	0.00
6 2	0.00	0.35	0.46	0.12	0.10	0.00	0.00	0.09	0.18	0.20	0.18	0.00
6 3	0.00	0.08	0.16	0.16	0.18	0.00	0.00	0.10	0.19	0.07	0.08	0.00
7 1	0.00	0.22	0.15	0.13	0.08	0.00	0.00	0.04	0.05	0.07	0.05	0.00
7 2	0.00	0.20	0.09	0.00	0.02	0.00	0.00	0.14	0.00	0.20	0.12	0.00
7 3	0.00	0.05	0.06	0.05	0.06	0.00	0.00	0.03	0.19	0.25	0.19	0.00

表-3.3.3　試験体そり量の計測結果（続き）

（b）基本ケース（No.3，4，6，7）（続き）

単位：mm

連結板	ナット側							ボルト側						
	L1							L1						
供試体No.	c'4	c'2	c0	c1	c2	c3	c4	c'4	c'2	c0	c1	c2	c3	c4
3 1	0.00	0.84	1.01	1.16	0.94	0.39	0.00	0.00	1.04	1.12	0.71	0.84	1.23	0.00
3 2	0.00	0.76	0.98	0.68	0.71	0.25	0.00	0.00	1.19	0.72	1.01	0.88	0.45	0.00
3 3	0.00	1.33	0.72	1.09	1.08	0.52	0.00	0.00	0.85	0.91	0.50	0.61	0.14	0.00
4 1	0.00	2.20	2.78	2.28	1.68	0.72	0.00	0.00	1.30	1.52	1.01	0.16	0.31	0.00
4 2	0.00	0.21	0.18	0.48	0.64	0.47	0.00	0.00	1.76	2.07	1.72	0.81	0.46	0.00
4 3	0.00	1.15	1.84	2.02	1.23	1.55	0.00	0.00	1.63	1.93	1.51	0.78	0.37	0.00
6 1	0.00	1.17	1.43	1.51	1.07	0.51	0.00	0.00	1.22	1.56	1.10	1.03	0.69	0.00
6 2	0.00	1.21	1.67	1.39	1.31	0.64	0.00	0.00	0.91	1.24	1.23	0.92	0.44	0.00
6 3	0.00	0.78	1.02	0.91	0.92	0.41	0.00	0.00	0.92	1.37	0.96	1.07	0.18	0.00
7 1	0.00	1.23	1.61	1.41	1.34	0.62	0.00	0.00	1.61	2.24	1.72	1.47	0.79	0.00
7 2	0.00	2.12	2.86	2.55	2.09	1.15	0.00	0.00	1.25	2.00	1.85	1.68	1.09	0.00
7 3	0.00	0.28	1.02	0.93	0.90	0.58	0.00	0.00	1.65	1.96	1.76	1.45	0.88	0.00

（c）フィラーケース（No.8，9，10）

単位：mm

母材	ナット側					ボルト側				
	L1					L1				
供試体No.	c0	c1	c2	c3	c4	c0	c1	c2	c3	c4
8 1	0.00	0.03	0.08	0.13	0.00	0.00	0.09	0.07	0.08	0.00
8 2	0.00	0.16	0.11	0.17	0.00	0.00	0.07	0.03	0.07	0.00
8 3	0.00	0.07	0.15	0.15	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00
9 1	0.00	0.07	0.15	0.17	0.00	0.00	0.06	0.02	0.01	0.00
9 2	0.00	0.08	0.17	0.15	0.00	0.00	0.06	0.07	0.09	0.00
9 3	0.00	0.07	0.18	0.16	0.00	0.00	0.07	0.04	0.01	0.00
10 1	0.00	0.11	0.18	0.11	0.00	0.00	0.04	0.04	0.04	0.00
10 2	0.00	0.07	0.13	0.10	0.00	0.00	0.01	0.01	0.08	0.00
10 3	0.00	0.09	0.21	0.14	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	0.00

単位：mm

連結板	ナット側							ボルト側						
	L1							L1						
供試体No.	c'3	c'2	c1	c0	c1	c2	c3	c'3	c'2	c1	c0	c1	c2	c3
8 1	0.00	0.14	0.24	0.28	0.21	0.11	0.00	0.00	0.10	0.15	0.15	0.08	0.03	0.00
8 2	0.00	0.15	0.24	0.26	0.22	0.16	0.00	0.00	0.12	0.10	0.08	0.07	0.01	0.00
8 3	0.00	0.17	0.23	0.26	0.20	0.12	0.00	0.00	0.12	0.17	0.15	0.07	0.03	0.00
9 1	0.00	0.17	0.23	0.31	0.31	0.21	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00
9 2	0.00	0.14	0.16	0.19	0.17	0.11	0.00	0.00	0.11	0.19	0.23	0.10	0.01	0.00
9 3	0.00	0.11	0.13	0.15	0.10	0.08	0.00	0.00	0.08	0.17	0.20	0.12	0.01	0.00
10 1	0.00	0.10	0.19	0.27	0.18	0.14	0.00	0.00	0.16	0.19	0.18	0.08	0.01	0.00
10 2	0.00	0.08	0.15	0.21	0.21	0.13	0.00	0.00	0.18	0.17	0.15	0.08	0.01	0.00
10 3	0.00	0.07	0.23	0.03	0.19	0.12	0.00	0.00	0.10	0.14	0.08	0.09	0.03	0.00

単位：mm

フィラー	ナット側				ボルト側			
	L1				L1			
供試体No.	c0	c1	c2	c3	c0	c1	c2	c3
8 1	0.00	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
8 2	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.08	0.09	0.00
8 3	0.00	0.05	0.11	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00
9 1	0.00	0.06	0.15	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00
9 2	0.00	0.02	0.08	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00
9 3	0.00	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00
10 1	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.06	0.11	0.00
10 2	0.00	0.20	0.29	0.00	0.00	0.28	0.37	0.00
10 3	0.00	0.46	0.32	0.00	0.00	0.46	0.37	0.00

表-3.3.3　試験体そり量の計測結果（続き）

（d）肌すきケース（No.11，12）

単位： mm

母材	ナット側						ボルト側					
	L1						L1					
供試体No.	c0	c1	c2	c3	c4	c5	c0	c1	c2	c3	c4	c5
11 1	0.00	0.08	0.06	0.20	0.19	0.00	0.00	0.05	0.02	0.05	0.05	0.00
11 2	0.00	0.05	0.11	0.07	0.07	0.00	0.00	0.15	0.08	0.04	0.04	0.00
11 3	0.00	0.09	0.11	0.09	0.08	0.00	0.00	0.15	0.14	0.00	0.00	0.00
12 1	0.00	0.11	0.33	0.22	0.23	0.00	0.00	0.06	0.11	0.11	0.04	0.00
12 2	0.00	0.03	0.03	0.07	0.06	0.00	0.00	0.11	0.15	0.08	0.00	0.00
12 3	0.00	0.03	0.19	0.18	0.16	0.00	0.00	0.10	0.05	0.10	0.01	0.00

単位： mm

連結板	ナット側							ボルト側						
	L1							L1						
供試体No.	c'4	c'2	c0	c1	c2	c3	c4	c'4	c'2	c0	c1	c2	c3	c4
11 1	0.00	0.97	0.72	0.94	0.69	0.33	0.00	0.00	1.19	1.24	0.98	0.52	0.16	0.00
11 2	0.00	1.06	1.67	1.63	1.26	0.60	0.00	0.00	1.03	1.27	0.98	0.42	0.14	0.00
11 3	0.00	1.19	1.85	1.74	1.40	0.69	0.00	0.00	1.13	1.51	1.10	0.39	0.19	0.00
12 1	0.00	1.43	2.04	2.06	1.52	0.90	0.00	0.00	1.29	1.82	1.66	1.33	0.67	0.00
12 2	0.00	1.21	1.67	1.60	1.28	0.67	0.00	0.00	1.22	1.77	1.62	1.26	0.67	0.00
12 3	0.00	1.29	1.93	1.87	1.59	0.80	0.00	0.00	1.12	1.51	1.41	1.18	0.62	0.00

（e）塗膜厚ケース（No.13，14）

単位： mm

連結板	ナット側							ボルト側						
	L1							L1						
供試体No.	c'3	c'2	c1	c0	c1	c2	c3	c'3	c'2	c1	c0	c1	c2	c3
13 1	0.00	0.98	0.91	0.72	0.51	0.24	0.00	0.00	0.17	0.24	0.22	0.15	0.01	0.00
13 2	0.00	0.23	0.27	0.32	0.30	0.13	0.00	0.00	0.16	0.22	0.16	0.10	0.02	0.00
13 3	0.00	0.08	0.15	0.35	0.12	0.00	0.00	0.00	0.06	0.05	0.08	0.03	0.01	0.00
13 4	0.00	0.12	0.22	0.24	0.20	0.11	0.00	0.00	0.04	0.01	0.06	0.01	0.01	0.00
13 5	0.00	0.07	0.09	0.14	0.11	0.06	0.00	0.00	0.15	0.23	0.18	0.14	0.01	0.00
14 1	0.00	0.03	0.07	0.11	0.06	0.03	0.00	0.00	0.01	0.05	0.03	0.02	0.01	0.00
14 2	0.00	0.01	0.07	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.07	0.01	0.04	0.05	0.01	0.00
14 3	0.00	0.05	0.10	0.10	0.61	0.03	0.00	0.00	0.05	0.02	0.04	0.02	0.02	0.00
14 4	0.00	0.09	0.12	0.15	0.13	0.05	0.00	0.00	0.04	0.08	0.06	0.03	0.00	0.00
14 5	0.00	0.02	0.06	0.09	0.06	0.02	0.00	0.00	0.02	0.02	0.07	0.03	0.03	0.00

単位： mm

母材	ナット側					ボルト側				
	L1					L1				
供試体No.	c0	c1	c2	c3	c4	c0	c1	c2	c3	c4
13 1	0.00	0.09	0.09	0.11	0.00	0.00	0.03	0.04	0.02	0.00
13 2	0.00	0.12	0.18	0.14	0.00	0.00	0.02	0.00	0.05	0.00
13 3	0.00	0.08	0.04	0.03	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00
13 4	0.00	0.15	0.21	0.16	0.00	0.00	0.05	0.08	0.07	0.00
13 5	0.00	0.08	0.08	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00
14 1	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00
14 2	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
14 3	0.00	0.06	0.15	0.07	0.00	0.00	0.05	0.04	0.00	0.00
14 4	0.00	0.29	0.30	0.25	0.00	0.00	0.04	0.05	0.08	0.00
14 5	0.00	0.02	0.06	0.16	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05	0.00

表-3.3.3　試験体そり量の計測結果（続き）

（f）母板降伏ケース（No.15）

単位： mm

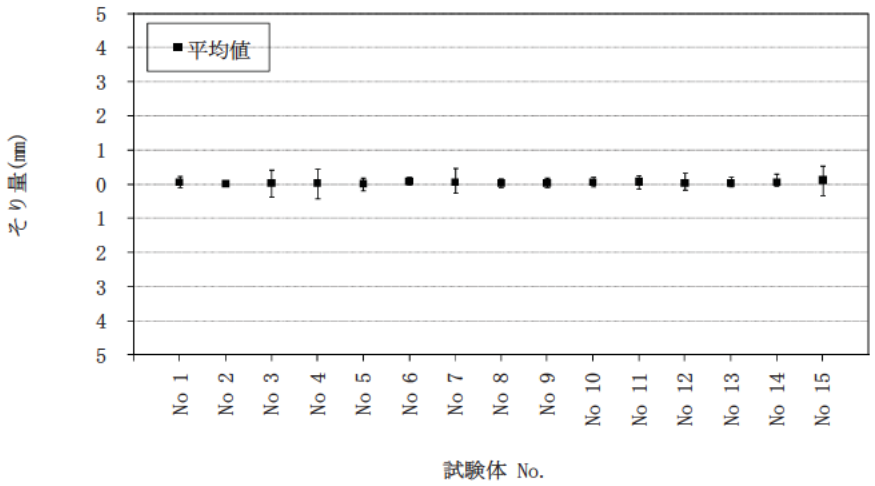
母材	ナット側						ボルト側					
	L1						L1					
供試体No.	c0	c1	c2	c3	c4	c5	c0	c1	c2	c3	c4	c5
15 1	0.00	0.47	0.53	0.25	0.27	0.00	0.00	0.15	0.09	0.32	0.02	0.00
15 2	0.00	0.20	0.40	0.43	0.36	0.00	0.00	0.02	0.09	0.24	0.13	0.00
15 3	0.00	0.23	0.36	0.09	0.09	0.00	0.00	0.08	0.02	0.09	0.16	0.00

単位： mm

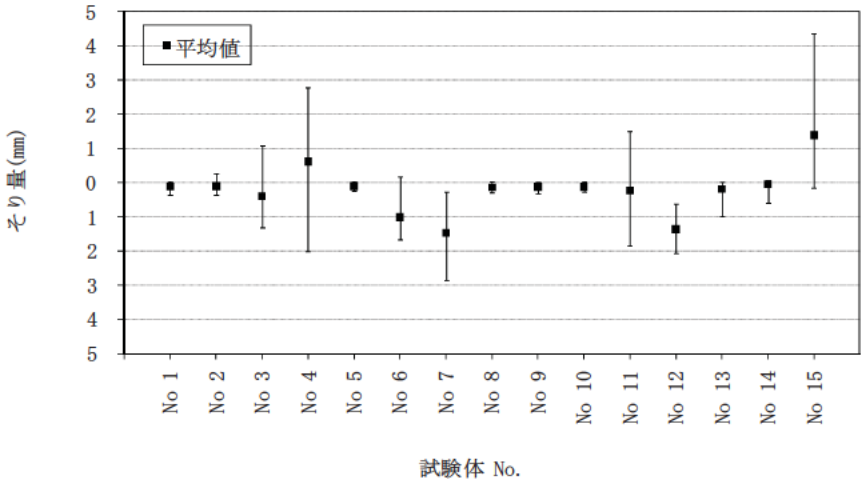
連結板	ナット側							ボルト側						
	L1							L1						
15 1	0.00	0.46	0.10	0.14	0.11	0.05	0.00	0.00	1.88	2.98	2.97	2.21	1.13	0.00
15 2	0.00	2.92	4.08	3.65	2.76	1.22	0.00	0.00	3.41	4.36	3.50	2.28	1.16	0.00
15 3	0.00	0.03	0.19	0.54	0.12	0.22	0.00	0.00	0.03	0.15	0.12	0.05	0.22	0.00

表-3.3.4　試験体そり量の集計結果

試験体No.	母板厚	列数	母板			連結板		
			最大値	平均値	最小値	最大値	平均値	最小値
1	38	3	0.24	0.05	0.09	0.04	0.13	0.36
2	50	3	0.06	0.01	0.03	0.25	0.10	0.37
3	50	8	0.42	0.03	0.37	1.09	0.39	1.33
4	50	12	0.45	0.03	0.41	2.78	0.62	2.02
5	75	3	0.18	0.01	0.20	0.04	0.11	0.26
6	75	8	0.20	0.08	0.02	0.18	1.01	1.67
7	75	12	0.46	0.06	0.26	0.28	1.47	2.86
8	38,50	3	0.17	0.03	0.09	0.03	0.14	0.28
9	38,60	3	0.18	0.04	0.09	0.01	0.13	0.31
10	38,75	3	0.21	0.06	0.06	0.03	0.13	0.27
11	49,50	8	0.25	0.07	0.14	1.51	0.23	1.85
12	74,75	8	0.33	0.03	0.15	0.62	1.37	2.06
13	38	3	0.21	0.04	0.08	0.02	0.18	0.98
14	38	3	0.30	0.05	0.05	0.07	0.05	0.61
15	75	12	0.53	0.11	0.32	4.36	1.38	0.15



(a) 母板



(b) 連結板

図-3.3.1　試験体そり量の分布

（3）肌すき

表-3.3.5 に肌すきの計測結果を示す。試験体 No.1，No.2，No.3，No.5，No.5’，No.6，No.7，No.8，No.9，No.10，No.13，No.14，No.15 については，肌すきが 0mm であったため，計測結果の表示を省略している。肌すきが生じている試験体のうち，試験体 No.11 および試験体 No.12 は肌すきケースであり，第 1 ボルト近傍で 0.1～0.2mm 程度の肌すきが生じている。これらが母板の板厚に 1mm の差を持たせた試験体であり，組み立て開始前の状態では，ボルト頭側とナット側でそれぞれ 0.5mm ずつの肌すきを有しているが，ボルトの締付けに伴って連結板が変形し，肌すきが減少したものと考えられる。また，試験体 No.4 は，試験体 No.11 や試験体 No.12 のような板厚差のある試験体ではないが肌すきが生じている。これは，試験体幅が 270mm と他の試験体幅と比べて特に広いために，幅方向の端部で肌すきが生じたものと考えられる。

表 3.3.5　肌すきの計測結果（mm）

試験体No.				非すべり側												すべり側											
				BL 12'	BL 11'	BL 10'	BL 9'	BL 8'	BL 7'	BL 6'	BL 5'	BL 4'	BL 3'	BL 2'	BL 1'	BL 1	BL 2	BL 3	BL 4	BL 5	BL 6	BL 7	BL 8	BL 9	BL-10	BL-11	BL-12
No.4	4 1	ボルト頭側	C面	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1
			D面	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
		ナット側	C面	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0.1
			D面	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1
	4 2	ボルト頭側	C面	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0.1	0.1	0	0	0
			D面	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0
		ナット側	C面	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.1
			D面	0.1	0.3	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0.1	0.1	0.2
	4 3	ボルト頭側	C面	0	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0.1	0	0	0.1	0	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1
			D面	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		ナット側	C面	0.2	0.2	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			D面	0	0	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1
No.11	11 1	ボルト頭側	C面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0				
			D面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0				
		ナット側	C面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0				
			D面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0				
	11 2	ボルト頭側	C面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0				
			D面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0				
		ナット側	C面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0				
			D面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0				
	11 3	ボルト頭側	C面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0				
			D面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0				
		ナット側	C面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0				
			D面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0				
No.12	12 1	ボルト頭側	C面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0				
			D面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0				
		ナット側	C面					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
			D面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0				
	12 2	ボルト頭側	C面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0				
			D面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0				
		ナット側	C面					0	0	0	0	0	0	0.2	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0				
			D面					0	0	0	0	0	0	0.2	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0				
	12 3	ボルト頭側	C面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0				
			D面					0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0				
		ナット側	C面					0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0				
			D面					0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0				

注）C 面，D 面は部材軸直角方向の面を示す。

3.3.2　塗膜厚

表-3.3.6 に，試験体 No.1～15 の塗膜厚の計測結果を，表-3.3.7 に試験体 No.5'の塗膜厚の計測結果を示す。図-3.3.2 は，各試験体のボルト側及びナット側それぞれの母板と連結板の合計塗膜厚の平均値を示したものである。ここで，合計塗膜厚の平均値とは，試験体毎に母板と連結板のそれぞれに対して，全計測位置における塗膜厚の平均値を求め，これを合計したものである。合計塗膜厚は，目標塗膜厚に対して±20μm 程度の範囲となっている。

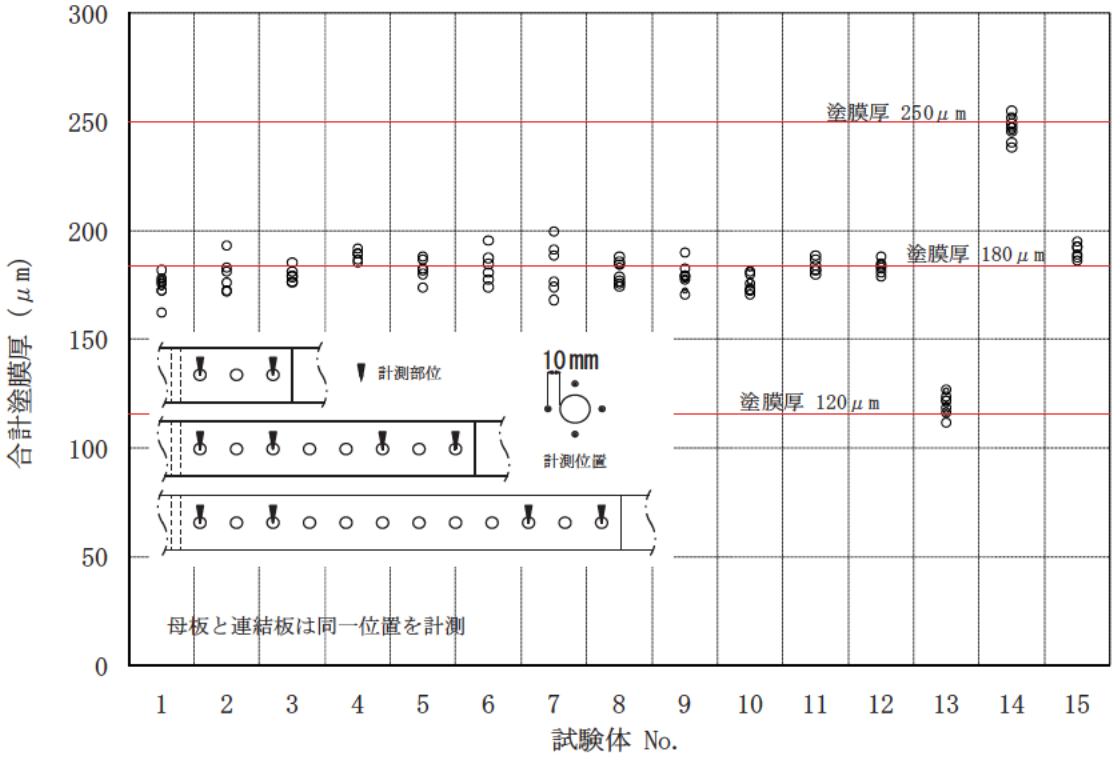


図-3.3.2　各試験体の合計塗膜厚

表 3.3.6　塗膜厚計測結果（No.1~15）

No.		計測位置		片面の膜厚計測値（μm）																合計膜厚値（μm）				
				①				②				③				④				①	②	③	④	平均
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4					
1	1	nut	母材	85	90	95	90	100	100	110	100	−	−	−	−	−	−	−	−	170	181	−	−	176
			連結板	80	85	75	80	90	75	80	70	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	95	85	100	80	90	95	85	85	−	−	−	−	−	−	−	−	180	184	−	−	182
			母材	90	95	85	90	100	90	95	95	−	−	−	−	−	−	−	−					
	2	nut	母材	100	80	85	95	100	80	100	100	−	−	−	−	−	−	−	−	171	174	−	−	173
			連結板	80	75	80	90	85	75	80	75	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	90	90	85	85	95	85	75	80	−	−	−	−	−	−	−	−	181	173	−	−	177
			母材	90	95	95	95	90	85	90	90	−	−	−	−	−	−	−	−					
	3	nut	母材	85	80	80	85	95	95	105	85	−	−	−	−	−	−	−	−	168	178	−	−	173
			連結板	90	80	80	90	90	90	75	75	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	75	80	80	75	85	90	80	85	−	−	−	−	−	−	−	−	174	183	−	−	178
			母材	100	100	95	90	100	100	95	95	−	−	−	−	−	−	−	−					
	4	nut	母材	90	95	90	80	100	95	105	95	−	−	−	−	−	−	−	−	171	176	−	−	174
			連結板	90	80	80	80	80	75	75	80	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	80	90	75	80	80	85	75	80	−	−	−	−	−	−	−	−	178	178	−	−	178
			母材	95	100	90	100	100	95	100	95	−	−	−	−	−	−	−	−					
	5	nut	母材	85	75	80	90	95	80	90	90	−	−	−	−	−	−	−	−	160	165	−	−	163
			連結板	75	80	75	80	80	75	75	75	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	85	90	85	95	85	85	80	80	−	−	−	−	−	−	−	−	178	174	−	−	176
			母材	85	95	85	90	90	90	90	95	−	−	−	−	−	−	−	−					
2	1	nut	母材	95	90	100	90	100	90	100	95	−	−	−	−	−	−	−	−	193	174	−	−	183
			連結板	105	95	95	100	85	75	75	75	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	100	95	95	105	95	95	90	85	−	−	−	−	−	−	−	−	183	180	−	−	181
			母材	80	80	90	85	85	85	95	90	−	−	−	−	−	−	−	−					
	2	nut	母材	95	80	80	90	95	80	90	75	−	−	−	−	−	−	−	−	181	171	−	−	176
			連結板	95	100	85	100	95	90	75	85	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	90	90	90	75	90	80	85	90	−	−	−	−	−	−	−	−	166	178	−	−	172
			母材	80	80	75	85	90	90	95	90	−	−	−	−	−	−	−	−					
	3	nut	母材	100	95	100	100	100	95	100	100	−	−	−	−	−	−	−	−	191	195	−	−	193
			連結板	95	90	95	90	90	105	100	90	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	95	95	95	95	85	75	80	85	−	−	−	−	−	−	−	−	181	164	−	−	173
			母材	90	85	80	90	90	80	80	80	−	−	−	−	−	−	−	−					
3	1	nut	母材	75	90	85	85	80	80	95	80	85	85	80	90	90	95	100	95	179	175	181	180	179
			連結板	90	100	100	90	90	80	100	95	100	90	105	90	80	90	90	80					
		bolt	連結板	85	100	85	100	100	95	105	100	100	105	105	100	90	90	105	95	178	193	190	181	185
			母材	80	80	90	90	85	85	100	100	90	85	95	80	85	90	90	80					
	2	nut	母材	70	75	75	75	80	80	85	75	80	85	80	85	90	90	80	85	171	164	184	186	176
			連結板	100	90	100	100	80	90	85	80	100	105	95	105	100	100	100	100					
		bolt	連結板	95	100	110	105	100	105	105	100	110	95	90	105	85	100	90	80	185	191	180	161	179
			母材	70	85	90	85	95	75	100	85	80	70	85	85	80	70	70	70					
	3	nut	母材	70	80	75	75	80	80	85	80	80	75	85	80	80	90	80	75	173	181	176	176	177
			連結板	100	90	90	110	100	100	105	95	105	90	90	100	100	100	90	90					
		bolt	連結板	95	100	95	100	95	100	95	95	110	105	105	100	105	105	95	105	180	173	190	183	181
			母材	80	95	75	80	80	70	75	80	90	80	90	80	85	75	80	80					
4	1	nut	母材	100	100	95	105	105	100	100	105	100	95	95	90	100	95	90	100	206	196	181	184	192
			連結板	105	105	105	110	95	90	90	100	90	80	90	85	90	80	90	90					
		bolt	連結板	95	105	105	100	100	100	95	95	90	80	90	80	70	70	75	70	203	199	184	173	189
			母材	105	100	100	100	100	100	100	105	100	95	100	100	95	100	100	110					
	2	nut	母材	95	85	85	95	100	95	95	100	95	90	90	100	100	90	90	80	191	201	180	175	187
			連結板	100	105	100	100	105	100	105	105	85	85	85	90	80	90	85	85					
		bolt	連結板	105	100	100	105	105	100	105	95	90	100	80	95	80	80	85	85	198	193	193	175	189
			母材	100	90	90	100	95	100	85	85	105	100	100	100	95	85	90	100					
	3	nut	母材	110	105	100	105	110	110	100	105	95	95	100	95	100	85	90	85	203	205	180	170	189
			連結板	95	100	95	100	100	100	100	95	85	85	80	85	80	80	80	80					
		bolt	連結板	100	105	95	95	90	95	90	100	80	75	85	90	75	85	80	75	185	191	186	180	186
			母材	80	90	85	90	90	100	100	100	105	105	105	100	105	100	100	100					
5	1	nut	母材	95	100	100	100	90	100	100	100	−	−	−	−	−	−	−	−	199	175	−	−	187
			連結板	100	100	100	100	80	75	75	80	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	85	90	100	90	75	75	85	80	−	−	−	−	−	−	−	−	184	176	−	−	180
			母材	95	85	95	95	95	95	100	100	−	−	−	−	−	−	−	−					
	2	nut	母材	95	90	100	100	95	95	100	100	−	−	−	−	−	−	−	−	191	185	−	−	188
			連結板	100	95	95	90	85	85	90	90	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	90	100	90	90	80	85	80	90	−	−	−	−	−	−	−	−	184	181	−	−	183
			母材	90	95	90	90	100	90	100	100	−	−	−	−	−	−	−	−					
	3	nut	母材	100	95	90	90	90	80	95	80	−	−	−	−	−	−	−	−	180	168	−	−	174
			連結板	90	80	85	90	85	80	80	80	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	80	100	95	105	80	80	80	85	−	−	−	−	−	−	−	−	186	178	−	−	182
			母材	95	85	90	95	95	100	90	100	−	−	−	−	−	−	−	−					

表-3.3.6　塗膜厚計測結果（No.1~15）（続き）

No.		計測位置		片面の膜厚計測値（μm）																合計膜厚値（μm）				
				①				②				③				④				①	②	③	④	平均
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4					
6	1	nut	母材	80	90	70	70	80	70	90	85	70	75	85	85	75	80	85	95	179	190	176	178	181
			連結板	100	100	95	110	110	110	110	105	100	100	105	85	100	90	90	95					
		bolt	連結板	80	90	80	75	85	75	75	80	80	80	80	80	90	85	75	85	165	173	179	180	174
			母材	80	75	90	90	100	90	95	90	95	100	100	100	95	95	100	95					
	2	nut	母材	75	80	80	90	85	90	95	90	85	100	100	95	90	85	90	90	183	188	193	188	188
			連結板	105	105	100	95	95	95	100	100	95	95	110	90	100	95	100	100					
		bolt	連結板	90	80	85	80	100	100	105	110	110	105	105	105	100	110	90	105	171	200	213	199	196
			母材	85	85	85	95	105	90	105	85	100	105	110	110	105	95	95	95					
	3	nut	母材	75	75	85	85	85	80	80	80	75	80	80	85	75	70	75	80	179	186	181	164	178
			連結板	100	110	90	95	110	100	110	100	110	100	95	100	85	90	95	85					
		bolt	連結板	90	105	90	100	100	95	95	100	105	100	100	90	90	90	95	85	184	186	194	175	185
			母材	85	90	80	95	90	95	80	90	100	90	95	95	90	85	85	80					
7	1	nut	母材	75	75	75	70	75	80	80	75	90	85	75	80	80	75	70	80	173	165	173	163	168
			連結板	90	105	90	110	85	90	80	95	85	90	95	90	80	90	85	90					
		bolt	連結板	85	95	85	85	95	105	95	90	80	90	85	80	80	85	90	90	165	186	178	168	174
			母材	70	75	80	85	95	90	90	85	95	90	95	95	75	80	90	80					
	2	nut	母材	80	80	80	85	100	95	90	100	90	100	85	95	80	75	80	90	169	190	176	171	177
			連結板	80	90	85	95	85	95	100	95	80	95	80	80	85	95	90	90					
		bolt	連結板	100	100	100	100	105	85	100	85	100	85	95	100	105	90	100	95	181	193	189	191	188
			母材	75	90	80	80	100	95	100	100	100	90	95	90	95	100	95	85					
	3	nut	母材	100	90	95	100	100	90	90	100	100	90	90	100	95	90	80	100	189	194	191	191	191
			連結板	95	90	85	100	100	100	95	100	95	95	95	100	100	105	95	100					
		bolt	連結板	105	110	100	110	110	110	100	100	100	105	110	95	105	90	95	100	199	201	200	199	200
			母材	80	95	100	95	100	95	95	95	100	90	95	105	100	100	105	100					
8	1	nut	連結板	100	85	95	95	85	85	100	100	－	－	－	－	－	－	－	－	189	183	－	－	186
			フィラ	95	100	85	100	85	85	90	100	－	－	－	－	－	－	－	－					
		filler	フィラ	80	85	85	80	80	85	90	75	－	－	－	－	－	－	－	－	178	176	－	－	177
			母材	95	90	95	100	100	90	95	90	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	母材	95	100	100	100	95	80	100	100	－	－	－	－	－	－	－	－	195	181	－	－	188
			連結板	95	95	100	95	80	95	90	85	－	－	－	－	－	－	－	－					
	2	nut	連結板	85	90	90	85	85	75	75	75	－	－	－	－	－	－	－	－	176	173	－	－	174
			フィラ	85	95	85	90	100	90	95	95	－	－	－	－	－	－	－	－					
		filler	フィラ	85	80	95	90	80	85	90	90	－	－	－	－	－	－	－	－	181	176	－	－	179
			母材	100	85	90	100	85	90	90	95	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	母材	85	95	90	95	85	80	80	95	－	－	－	－	－	－	－	－	193	176	－	－	184
			連結板	105	100	100	100	90	100	80	95	－	－	－	－	－	－	－	－					
	3	nut	連結板	90	95	95	85	95	80	85	90	－	－	－	－	－	－	－	－	174	178	－	－	176
			フィラ	80	80	90	80	85	90	90	95	－	－	－	－	－	－	－	－					
		filler	フィラ	95	85	90	90	95	95	100	100	－	－	－	－	－	－	－	－	179	189	－	－	184
			母材	90	95	80	90	90	90	95	90	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	母材	95	95	100	100	80	90	75	80	－	－	－	－	－	－	－	－	176	175	－	－	176
			連結板	80	80	75	80	90	85	100	100	－	－	－	－	－	－	－	－					
9	1	nut	連結板	100	100	100	95	80	90	90	85	－	－	－	－	－	－	－	－	185	174	－	－	179
			フィラ	80	85	90	90	90	75	95	90	－	－	－	－	－	－	－	－					
		filler	フィラ	80	85	85	85	95	85	80	80	－	－	－	－	－	－	－	－	178	181	－	－	179
			母材	100	90	90	95	95	100	90	100	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	母材	95	90	80	90	95	95	95	90	－	－	－	－	－	－	－	－	176	189	－	－	183
			連結板	85	90	90	85	100	105	85	90	－	－	－	－	－	－	－	－					
	2	nut	連結板	75	80	75	80	90	90	90	95	－	－	－	－	－	－	－	－	160	181	－	－	171
			フィラ	90	80	85	75	95	85	90	90	－	－	－	－	－	－	－	－					
		filler	フィラ	80	90	95	85	85	80	80	85	－	－	－	－	－	－	－	－	180	175	－	－	178
			母材	90	90	95	95	90	90	100	90	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	母材	95	95	95	90	85	90	90	100	－	－	－	－	－	－	－	－	191	189	－	－	190
			連結板	95	100	100	95	100	90	100	100	－	－	－	－	－	－	－	－					
	3	nut	連結板	90	90	95	100	95	85	100	85	－	－	－	－	－	－	－	－	183	174	－	－	178
			フィラ	90	90	90	85	80	80	80	90	－	－	－	－	－	－	－	－					
		filler	フィラ	85	90	80	70	90	80	80	80	－	－	－	－	－	－	－	－	174	171	－	－	173
			母材	85	100	90	95	90	80	90	95	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	母材	90	85	95	90	75	75	80	80	－	－	－	－	－	－	－	－	191	166	－	－	179
			連結板	105	95	100	105	85	90	95	85	－	－	－	－	－	－	－	－					

表-3.3.6　塗膜厚計測結果（No.1~15）（続き）

No.		計測位置		片面の膜厚計測値（μm）																合計膜厚値（μm）				
				①				②				③				④				①	②	③	④	平均
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4					
10	1	nut	連結板	100	95	90	100	85	100	95	75	－	－	－	－	－	－	－	－	184	176	－	－	180
			フィラ	95	90	80	85	95	85	80	90	－	－	－	－	－	－	－	－					
		filler	フィラ	70	85	85	80	90	80	80	85	－	－	－	－	－	－	－	－	171	180	－	－	176
			母材	85	90	95	95	95	95	95	100	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	母材	95	85	95	90	100	90	100	100	－	－	－	－	－	－	－	－	171	174	－	－	173
			連結板	80	75	80	85	80	75	75	75	－	－	－	－	－	－	－	－					
	2	nut	連結板	75	95	90	95	90	95	85	90	－	－	－	－	－	－	－	－	180	183	－	－	181
			フィラ	90	90	90	95	90	95	90	95	－	－	－	－	－	－	－	－					
		filler	フィラ	80	90	90	75	85	80	75	80	－	－	－	－	－	－	－	－	175	170	－	－	173
			母材	95	95	80	95	90	90	85	95	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	母材	90	90	85	90	90	80	90	80	－	－	－	－	－	－	－	－	175	166	－	－	171
			連結板	90	90	90	75	75	80	80	90	－	－	－	－	－	－	－	－					
	3	nut	連結板	85	90	90	80	75	75	80	80	－	－	－	－	－	－	－	－	179	175	－	－	177
			フィラ	95	90	90	95	95	95	100	100	－	－	－	－	－	－	－	－					
		filler	フィラ	85	95	100	95	85	80	90	90	－	－	－	－	－	－	－	－	188	178	－	－	183
			母材	100	90	90	95	90	90	90	95	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	母材	85	80	95	80	95	85	95	100	－	－	－	－	－	－	－	－	175	171	－	－	173
			連結板	100	90	90	80	85	75	75	75	－	－	－	－	－	－	－	－					
11	1	nut	連結板	100	95	100	95	90	95	100	95	100	90	100	95	95	95	95	100	185	185	185	181	184
			母材	85	85	90	90	90	85	95	90	90	90	90	85	85	80	85	90					
		bolt	母材	95	105	85	100	100	90	95	90	100	95	90	80	100	90	100	100	196	194	183	181	188
			連結板	95	105	100	100	100	100	105	95	90	95	90	90	85	80	90	80					
	2	nut	連結板	100	90	95	95	100	100	95	100	95	90	95	95	90	90	90	95	188	188	188	185	187
			母材	90	90	95	95	85	90	90	90	95	95	90	95	90	95	95	95					
		bolt	母材	95	95	90	90	85	80	85	90	95	95	80	80	90	90	85	95	184	176	180	179	180
			連結板	90	95	90	90	95	95	90	85	95	85	90	100	80	90	95	90					
	3	nut	連結板	95	90	100	100	100	90	95	90	100	95	100	95	90	95	95	95	184	183	183	180	182
			母材	80	90	85	95	80	90	95	90	85	90	85	80	90	80	90	85					
		bolt	母材	85	85	80	85	85	90	85	90	80	90	80	75	90	85	85	85	181	184	176	185	182
			連結板	95	100	95	100	100	100	90	95	95	90	95	100	95	100	100	100					
12	1	nut	母材	90	95	90	90	90	95	95	95	90	90	85	90	85	85	85	85	183	183	181	170	179
			連結板	90	90	90	95	95	80	90	90	90	90	95	95	80	80	90	90					
		bolt	連結板	90	95	90	90	95	90	95	95	85	80	85	75	80	80	80	85	190	188	175	171	181
			母材	95	100	100	100	100	95	90	90	100	90	90	95	95	85	90	90					
	2	nut	母材	90	85	90	95	95	90	100	85	90	90	100	95	95	80	90	90	184	189	189	170	183
			連結板	90	100	95	90	95	95	100	95	95	95	100	90	80	80	80	85					
		bolt	連結板	90	95	95	80	100	100	105	100	100	100	95	100	100	90	85	95	180	194	193	186	188
			母材	90	95	90	85	95	95	90	90	95	90	95	95	95	90	95	95					
	3	nut	母材	95	95	90	95	90	95	95	100	95	90	100	90	95	85	90	95	186	185	190	174	184
			連結板	90	95	95	90	90	80	100	90	95	100	100	90	80	80	80	90					
		bolt	連結板	90	90	95	95	100	95	95	90	90	85	85	80	95	85	90	90	183	193	181	183	185
			母材	90	90	90	90	100	90	100	100	100	90	100	95	95	90	95	90					
13	1	nut	母材	65	65	55	60	65	60	60	65	－	－	－	－	－	－	－	－	129	125	－	－	127
			連結板	70	70	70	60	70	60	60	60	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	連結板	65	65	70	60	55	60	50	55	－	－	－	－	－	－	－	－	129	119	－	－	124
			母材	60	60	65	70	65	65	65	60	－	－	－	－	－	－	－	－					
	2	nut	母材	60	55	50	50	65	55	55	50	－	－	－	－	－	－	－	－	120	113	－	－	116
			連結板	70	70	65	60	65	55	55	50	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	連結板	60	65	60	65	50	50	50	55	－	－	－	－	－	－	－	－	128	116	－	－	122
			母材	70	65	60	65	65	65	70	60	－	－	－	－	－	－	－	－					
	3	nut	母材	60	50	55	60	55	60	60	60	－	－	－	－	－	－	－	－	119	125	－	－	122
			連結板	70	60	60	60	60	70	70	65	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	連結板	60	55	55	60	50	55	55	50	－	－	－	－	－	－	－	－	124	114	－	－	119
			母材	70	65	65	65	60	65	60	60	－	－	－	－	－	－	－	－					
	4	nut	母材	60	50	55	60	60	60	65	55	－	－	－	－	－	－	－	－	119	121	－	－	120
			連結板	55	60	70	65	65	60	65	55	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	連結板	65	70	65	60	60	60	60	60	－	－	－	－	－	－	－	－	129	124	－	－	126
			母材	65	65	60	65	70	60	65	60	－	－	－	－	－	－	－	－					
	5	nut	母材	60	50	50	60	60	55	50	60	－	－	－	－	－	－	－	－	115	109	－	－	112
			連結板	60	55	65	60	60	50	50	50	－	－	－	－	－	－	－	－					
		bolt	連結板	65	55	65	65	50	50	50	55	－	－	－	－	－	－	－	－	124	109	－	－	116
			母材	70	55	60	60	60	60	55	55	－	－	－	－	－	－	－	－					

表-3.3.6　塗膜厚計測結果（No.1~15）（続き）

No.		計測位置		片面の膜厚計測値（μm）																合計膜厚値（μm）				
				①				②				③				④				①	②	③	④	平均
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4					
14	1	nut	母材	130	130	125	130	135	120	135	135	−	−	−	−	−	−	−	−	244	251	−	−	248
			連結板	110	120	110	120	125	125	110	120	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	130	125	120	120	130	120	125	125	−	−	−	−	−	−	−	−	254	250	−	−	252
			母材	130	135	125	130	130	120	125	125	−	−	−	−	−	−	−	−					
	2	nut	母材	140	135	125	130	130	115	130	125	−	−	−	−	−	−	−	−	251	248	−	−	249
			連結板	120	120	115	120	125	125	120	120	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	125	125	125	120	130	120	125	115	−	−	−	−	−	−	−	−	244	248	−	−	246
			母材	120	125	115	120	130	130	120	120	−	−	−	−	−	−	−	−					
	3	nut	母材	135	125	130	135	140	125	140	135	−	−	−	−	−	−	−	−	254	256	−	−	255
			連結板	120	125	135	110	125	120	120	120	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	125	125	120	115	125	125	120	120	−	−	−	−	−	−	−	−	235	241	−	−	238
			母材	110	110	125	110	115	120	115	125	−	−	−	−	−	−	−	−					
	4	nut	母材	125	125	130	135	135	135	135	125	−	−	−	−	−	−	−	−	246	259	−	−	253
			連結板	120	115	110	125	125	130	120	130	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	110	110	120	115	125	125	120	120	−	−	−	−	−	−	−	−	240	251	−	−	246
			母材	130	120	130	125	130	125	130	130	−	−	−	−	−	−	−	−					
	5	nut	母材	125	125	120	120	135	125	130	130	−	−	−	−	−	−	−	−	234	248	−	−	241
			連結板	120	110	110	105	115	120	115	120	−	−	−	−	−	−	−	−					
		bolt	連結板	125	125	120	125	120	120	125	120	−	−	−	−	−	−	−	−	248	249	−	−	248
			母材	130	125	120	120	135	125	120	130	−	−	−	−	−	−	−	−					
15	1	nut	母材	85	85	95	90	95	95	95	100	95	90	95	100	90	95	95	95	188	194	188	183	188
			連結板	100	100	100	95	95	100	100	95	90	90	95	95	85	90	90	90					
		bolt	連結板	100	100	100	100	90	90	95	95	100	95	95	95	100	95	100	95	200	193	193	195	195
			母材	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	95	90	100	95	95	100					
	2	nut	母材	90	90	90	90	90	90	95	100	95	95	95	100	95	90	95	95	188	190	185	183	186
			連結板	100	100	95	95	100	95	100	90	85	90	95	85	90	90	90	85					
		bolt	連結板	100	95	100	100	95	90	95	95	95	100	95	100	95	100	100	100	190	193	193	195	193
			母材	90	90	100	85	100	100	100	95	90	100	100	90	100	100	90	95					
	3	nut	母材	95	95	95	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	100	90	100	190	194	190	183	189
			連結板	90	95	95	95	90	100	95	90	95	85	95	85	80	90	90	90					
		bolt	連結板	95	100	100	100	95	90	90	85	95	90	85	95	100	100	95	95	198	189	189	195	193
			母材	100	95	100	100	100	100	100	95	100	95	100	95	100	95	95	100					

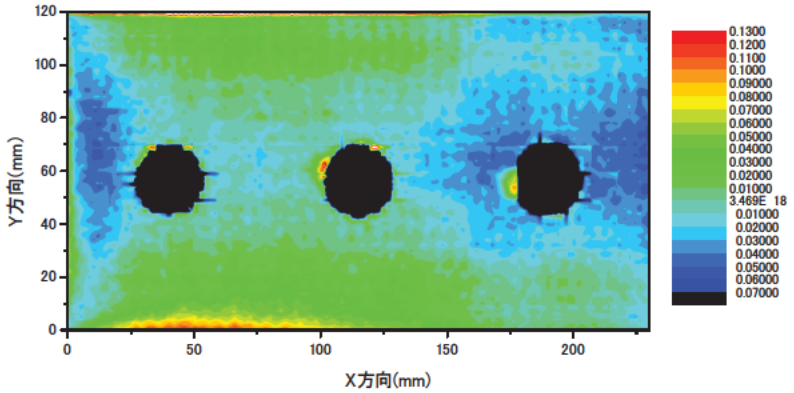
表-3.3.7　塗膜厚計測結果（No.5’）

No.		計測位置		片面の膜厚計測値（μm）																合計膜厚値（μm）				
				①				②				③				④				①	②	③	④	平均
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4					
5’	1	nut	母材	104	92	108	110	108	95	114	111	111	101	111	104					196	205	204		202
			連結板	96	92	101	82	100	90	107	94	104	92	99	96									
		bolt	連結板	112	93	106	107	112	101	108	107	107	100	107	105					202	215	216		211
			母材	95	96	110	91	108	110	115	100	118	114	110	105									
	2	nut	母材	85	101	102	76	99	114	104	89	101	113	102	83					192	209	208		203
			連結板	106	90	108	100	107	96	110	116	112	108	113	102									
		bolt	連結板	117	99	118	115	117	103	118	122	115	100	108	118					201	209	195		201
			母材	85	98	96	76	96	103	94	82	90	98	81	68									
	3	nut	母材	93	111	117	92	112	121	117	99	120	132	120	101					208	219	213		213
			連結板	109	97	109	104	112	108	107	99	106	97	93	86									
		bolt	連結板	113	121	118	104	112	113	111	106	107	116	97	93					214	221	216		217
			母材	95	98	117	90	107	112	124	101	113	122	112	103									

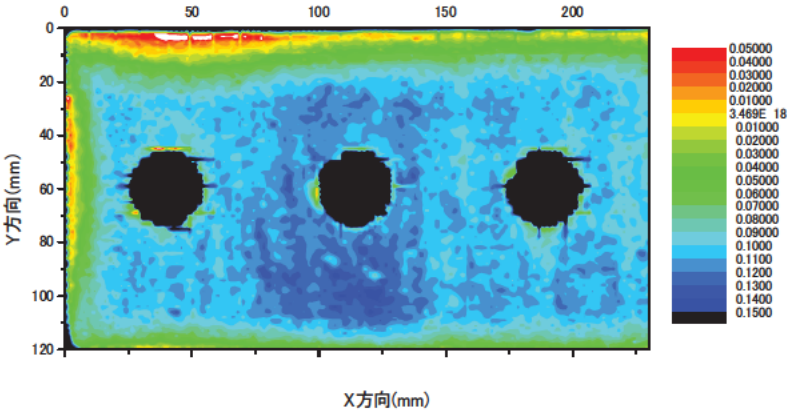
3.3.3　表面凹凸形状

図-3.3.3 に試験体 No.5-2 母板の表面高さのコンター図を示す。ボルト頭側・ナット側ともに部材端部が高く，ボルト孔近傍が低くなっている。高低差はボルト頭側・ナット側ともに 0.2mm 程度である。図-3.3.4 に試験体 No.1-3 母板の表面高さのコンター図（単位：mm）を示す。ボルト頭側・ナット側ともに部材端部が高く，ボルト孔近傍が低くなっている。この傾向は試験体 No.5-2 と同じである。高低差は 0.2mm 程度である。図-3.3.5 に試験体 No.6-3 母板の表面高さのコンター図を示す。ボルト頭側の x 方向 200～300mm の位置が最も高く，ナット側の x 方向 200～300mm の位置が最も低くなっている。また，試験体 No.5-2 や試験体 No.1-3 のように部材端部が高くなる傾向は見られない。これは，試験体 No.6-3 の部材長が長く試験体全体のそりが大きいため，部材端部の凹凸が相対的に目立たなかったものと考えられる。

これらの結果によると，試験体 No.5-2 の母板表面は，試験体 No.1-3 や試験体 No.6-3 に比べると，表面凹凸の起伏が比較的大きく，また連結板が厚く，ボルト本数が少ないこと等が影響して母板と連結板が接触しにくかったものと考えられる。試験体 No.1-3 でも表面凹凸の様子が確認されたが，連結板の厚さが試験体 No.5-2 よりも薄く，表面凹凸形状に追従しやすかったために，すべり係数は低下しなかったものと考えられる。なお，板厚の同じ試験体は同じロール材から採取している。

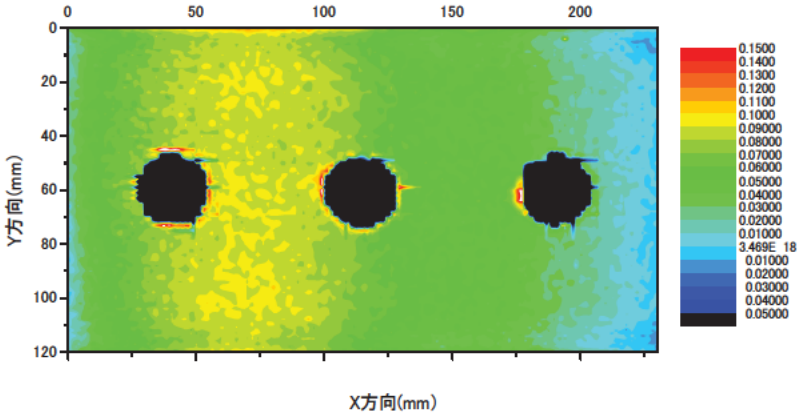


(a) ボルト頭側

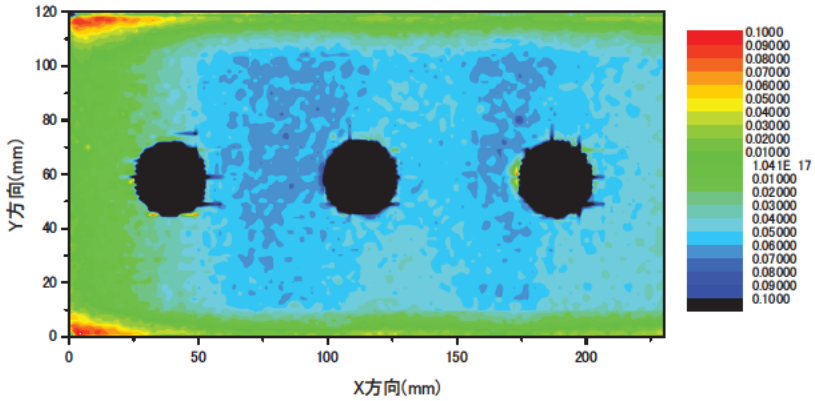


(b) ナット側

図-3.3.3　表面高さのコンター図（No.5-2）

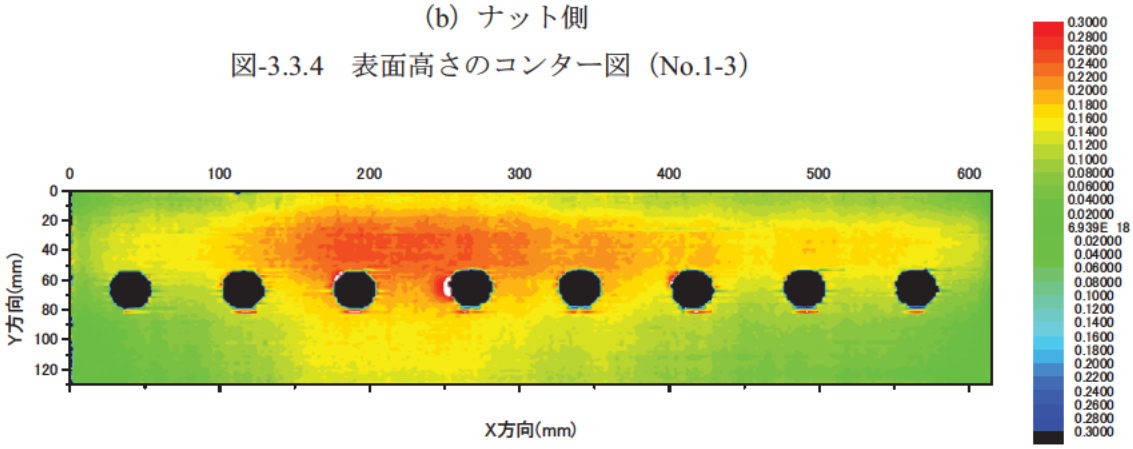


(a) ボルト頭側

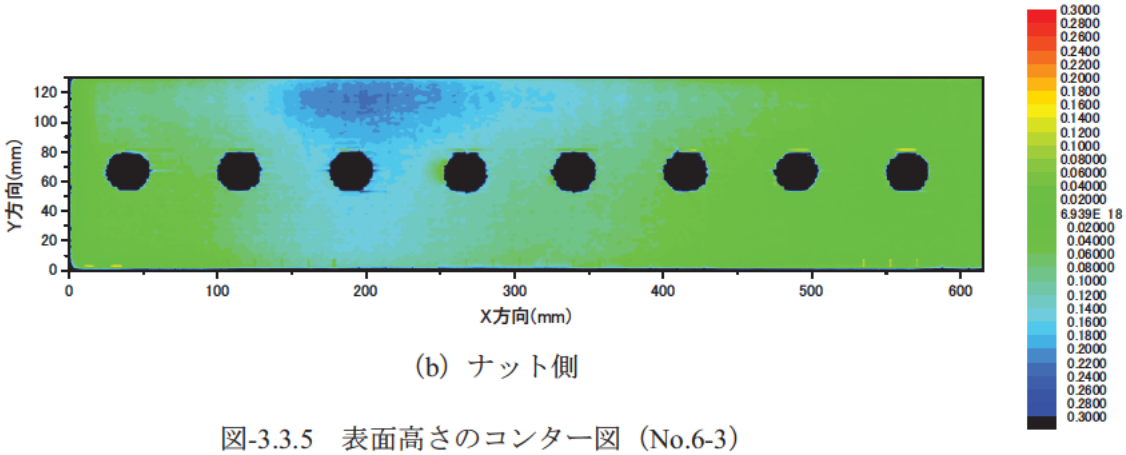


(b) ナット側

図-3.3.4　表面高さのコンター図（No.1-3）



(a) ボルト頭側



(b) ナット側

図-3.3.5　表面高さのコンター図（No.6-3）

3.4　接触圧力の計測結果

（1）計測ケース 1

図-3.4.1 及び図-3.4.2 に，計測ケース 1 における接触圧力の計測位置と計測結果を示す。計測ケース 1 は，すべり試験の実施後，接触面の無機ジンクリッチペイントをブラストで除去した後に計測したものである。図中では，接触応力の大きさをコンター図で示している。なお，これらのコンター図の白色は，計測に用いた感圧紙の測定範囲の下限値（10 N/mm^2）を下回っていることを示している。試験体 No.1-3（母板 38mm，ボルト 3 列）や試験体 No.6-3（母板 75mm，ボルト 8 列）では，ボルト孔周りで接触圧力が大きくなっているが，試験体 No.5（母板 75mm，ボルト 3 列）では試験体端部の接触圧力が大きく，ボルト孔周りの接触圧力は殆ど生じていない。これは試験体 No.5 の試験体端部の表面に凹凸があり（詳細はレーザー計測結果に詳述），かつ連結板の板厚が厚くボルト列数が少ないために，母板と連結板が接触していなかったものと考えられる。試験体 No.5 の母板表面を機械切削加工した後，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装する前に計測した試験体 No.5’では，ボルト孔周りでの接触圧力が生じており，試験体 No.5 と比較すると接触状態が大幅に改善されている様子が確認できる。

（2）計測ケース 2

図--3.4.1 及び図-3.4.3 に，計測ケース 2 における接触圧力の計測位置と計測結果を示す。計測ケース 2 は，すべり試験の実施前，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した後に計測したものである。基本ケースの試験体 No.2（母板 50mm，ボルト 3 列），試験体 No.3（母板 50mm，ボルト 8 列），No.4（母板 50mm，ボルト 12 列）を比較すると，試験体 No.3 において接触圧力の分布に多少のばらつきが見られるが，ボルト孔周りの接触圧力の大きさや広がりはほぼ同じ傾向となっており，ボルト列数の違いは特に見られない。

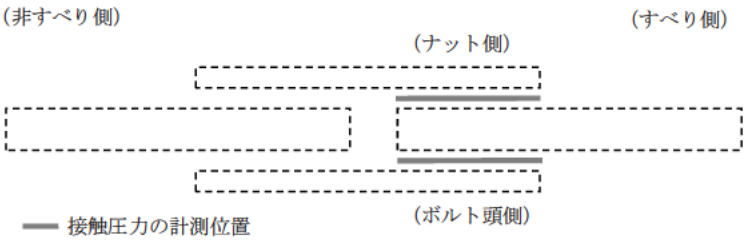
試験体 No.5’（母板 75mm，連結板厚 38mm，ボルト 3 列，切削加工後）は，母板の切削加工を行った後であるものの，母板と連結板が完全には接触していない状況が確認できる。これは連結板の表面を切削加工しなかったためと考えられる。また，試験体 No.2（母板 50mm，連結板厚 26mm，ボルト 3 列）と比較すると，試験体 No.5’は接触圧力が大きく，接触面積が小さい傾向にある。ここで，ボルトの軸力が接触面に伝わるまでに板厚方向の応力が 45° で広がるものと仮定して計算上の圧縮応力度を算出すると，表-3.4.1 に示す通りとなる。連結板の板厚が厚いほど支圧応力は小さくなり，計測結果はこれと逆の傾向を示している。これは，板厚が厚いほど曲げ剛性が大きく，わずかな表面凹凸形状に敏感となり，接触面積が小さく密着度が低下することが影響しているためと考えられる。

フィラーケースの試験体 No.8（フィラープレート厚 12mm），試験体 No.9（22mm），試験体 No.10（37mm）を比較すると，フィラープレートの板厚が厚いほど，フィラープレートと母板の間の接触圧力のばらつきが大きくなっている。これは，フィラープレートの表面凹凸形状の影響によるもので，フィラープレートの板厚が厚いほど，フィラープレートと母板が接触しにくいことを示していると考えられる。肌すきケース（試験体 No.11）は，基本ケース（試験体 No.6）と比較すると，内側第 1 ボルト付近の接触圧力が小さくなっており，板厚差により第 1 ボルト近傍は殆ど接触していない状態であったことがわかる。

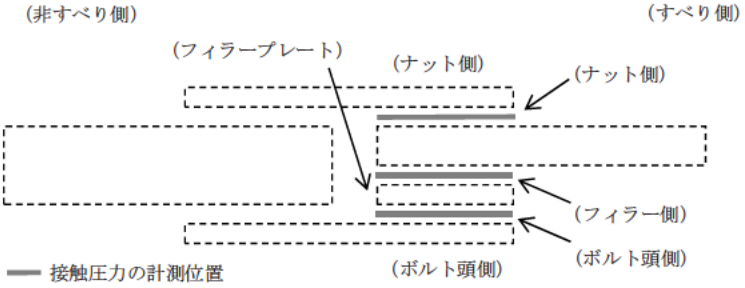
表-3.4.1　ボルト軸力が 45 度方向に広がると仮定した際の計算上の圧縮応力度（参考）

連結板の板厚	圧縮応力度	備考
20mm	40N/mm^2	No.1，8，9，10
26mm	30N/mm^2	No.2，3，4，11
38mm	19N/mm^2	No.5，5’

注 1）連結板 20mm とした場合の計算例を以下に示す。圧縮応力度　205kN / (π/4×(44+20+20)^2 π/4×24.5^2)　40N/mm^2
注 2）圧縮応力度を計算するときの板厚方向の応力の広がりは 45°と仮定している。
注 3）フィラー試験体においては，連結板と母板，あるいは連結板とフィラーの接触面を対象としている。

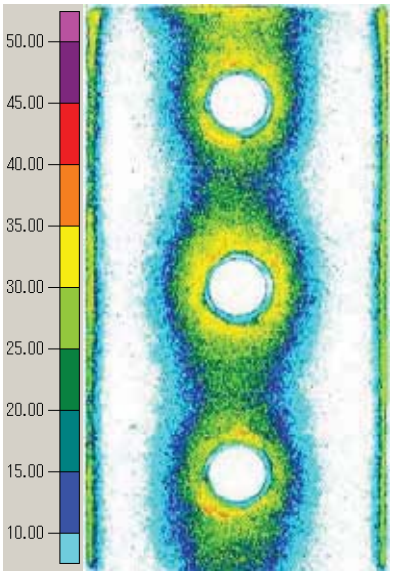


(a)基本ケース、肌すきケース

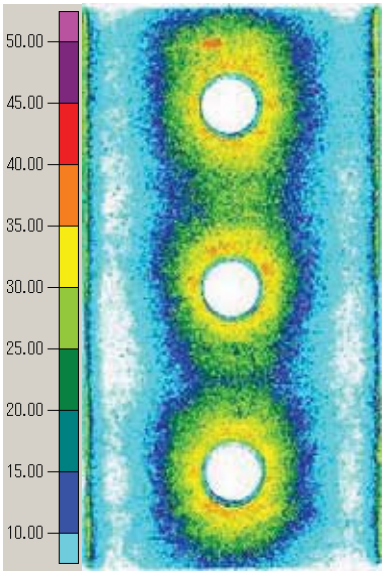


(b)フィラーケース

図-3.4.1 接触圧力の計測位置

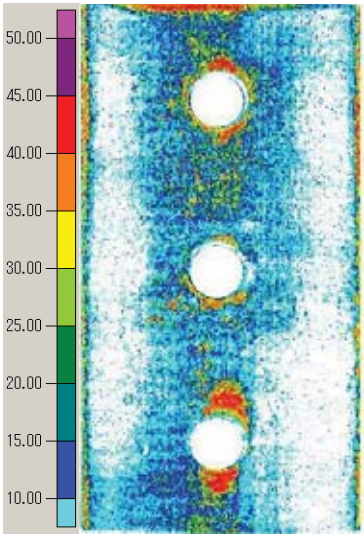


No.1-3（ボルト頭側）

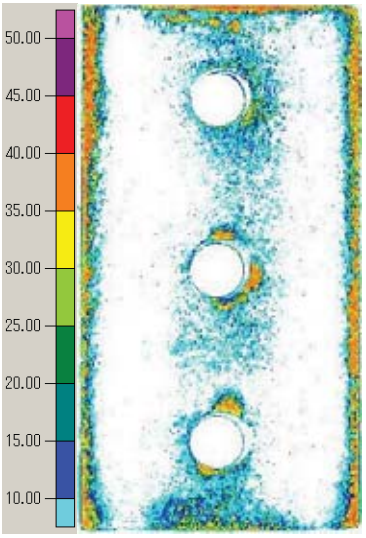


No.1-3（ナット側）

（a）試験体 No.1-3（母板 38mm，連結板 20mm）



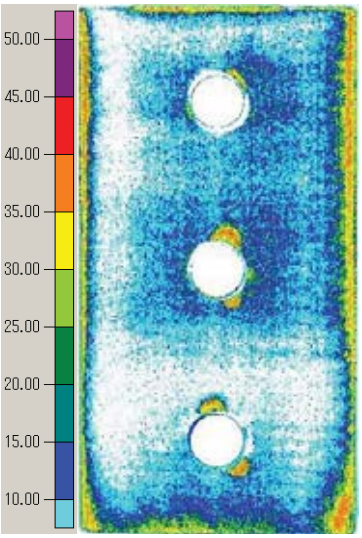
No.5-1（ボルト頭側）



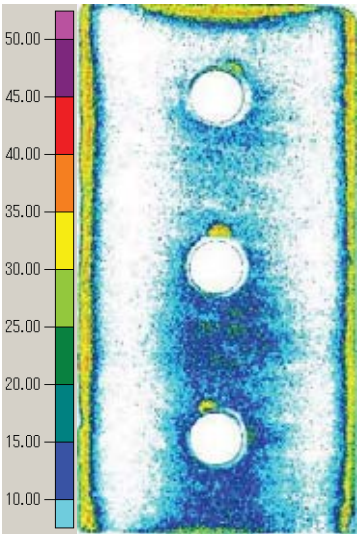
No.5-1（ナット側）

（b）試験体 No.5（母板 75mm，連結板 38mm，ボルト 3 列，切削加工前）

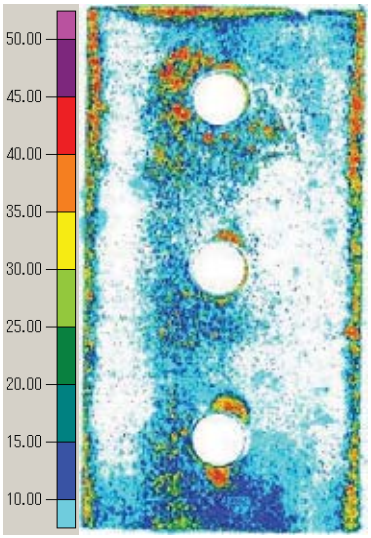
図-3.4.2　接触圧力のコンター図（計測ケース 1，N/mm^2）



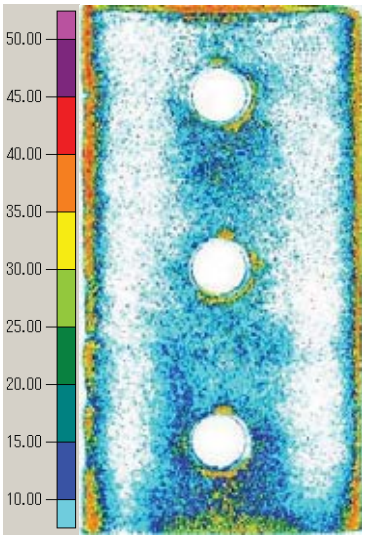
No.5-2（ボルト頭側）



No.5-2（ナット側）



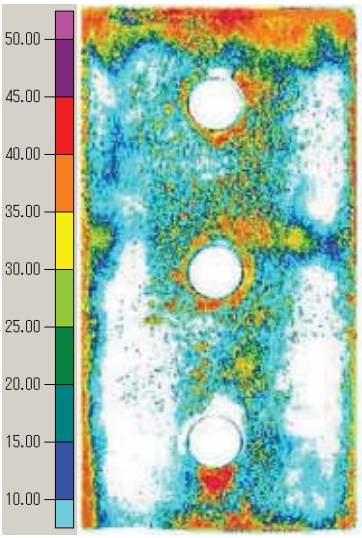
No.5-3（ボルト頭側）



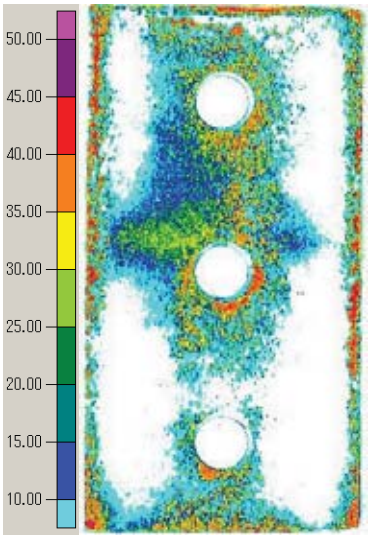
No.5-3（ナット側）

（b）試験体 No.5（母板 75mm，連結板 38mm，ボルト 3 列，切削加工前）（続き）

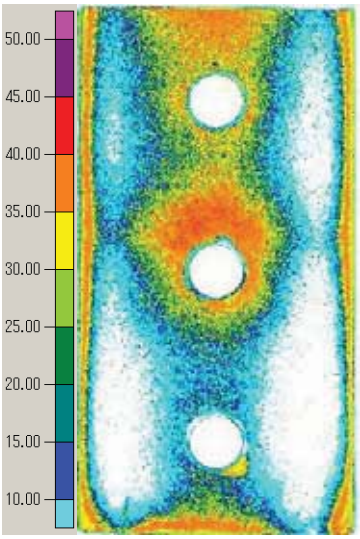
図-3.4.2　接触圧力のコンター図（計測ケース 1，N/mm^2）（続き）



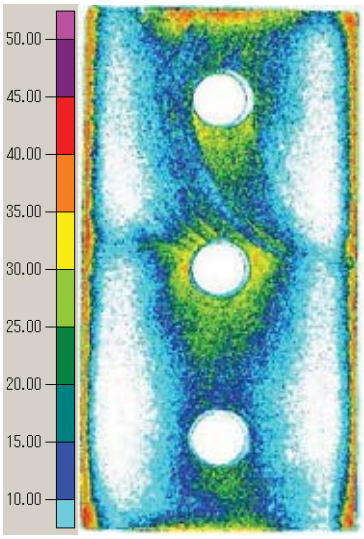
No.5’-1（ボルト頭側）



No.5’-1（ナット側）



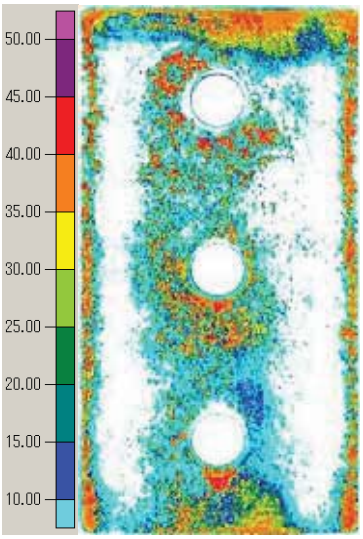
No.5’-2（ボルト頭側）



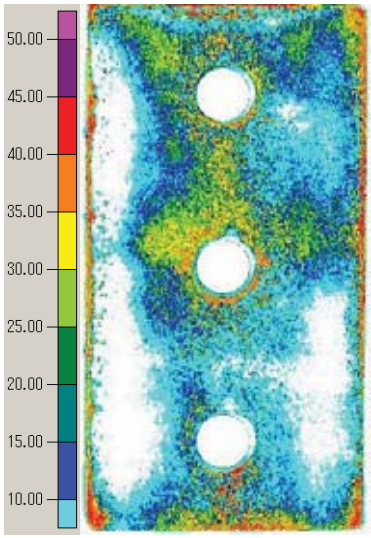
No.5’-2（ナット側）

（c）試験体 No.5’ （母板 75mm，連結板 38mm，ボルト 3 列，切削加工後）

図-3.4.2　接触圧力のコンター図（計測ケース 1，N/mm^2）（続き）

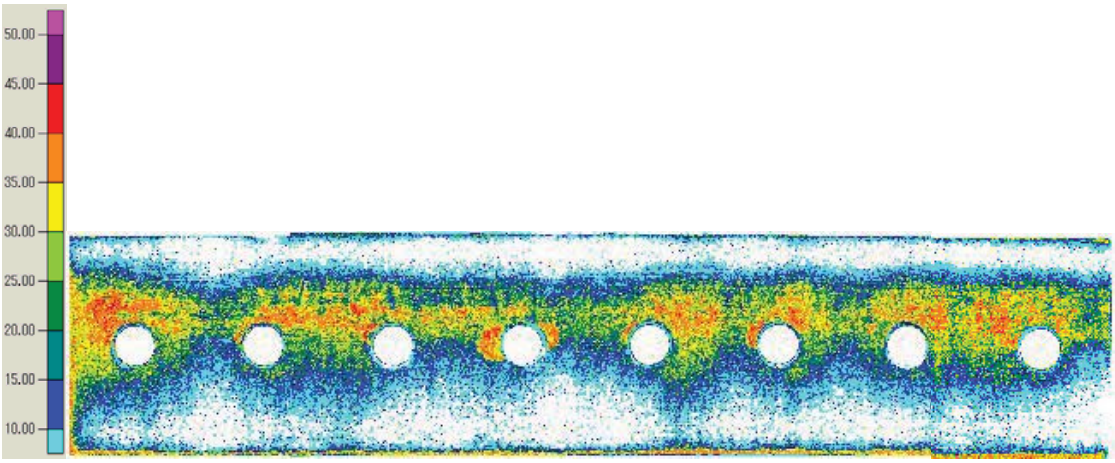


No.5’-3（ボルト頭側）



No.5’-3（ナット側）

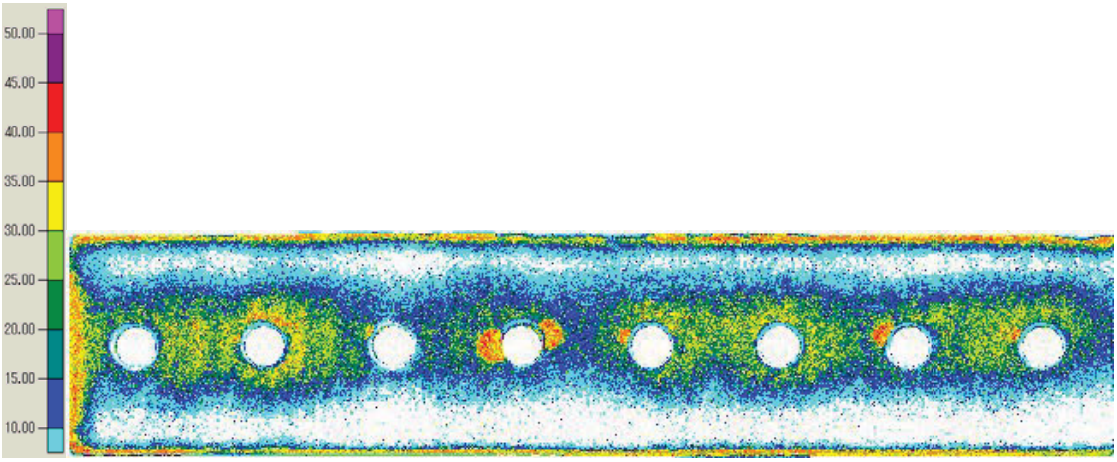
（c）試験体 No.5’ （母板 75mm，連結板 38mm，ボルト 3 列，切削加工後）（続き）



No.6-3（ボルト頭側）

（d）試験体 No.6-3（母板 75mm，連結板 38mm，ボルト 8 列）

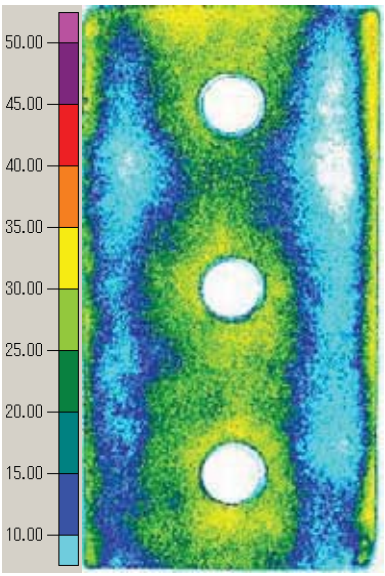
図-3.4.2　接触圧力のコンター図（計測ケース 1，N/mm^2）（続き）



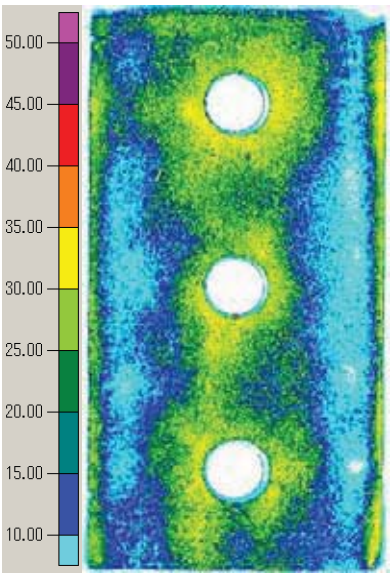
No.6-3（ナット側）

（d）試験体 No.6-3（母板 75mm，連結板 38mm，ボルト 8 列）（続き）

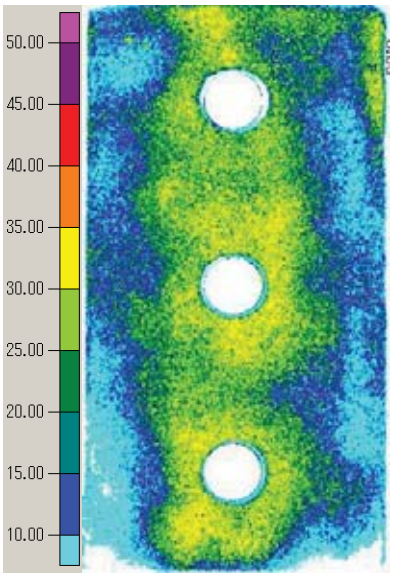
図-3.4.2　接触圧力のコンター図（計測ケース 1，N/mm^2）（続き）



No.2-1（ナット側）



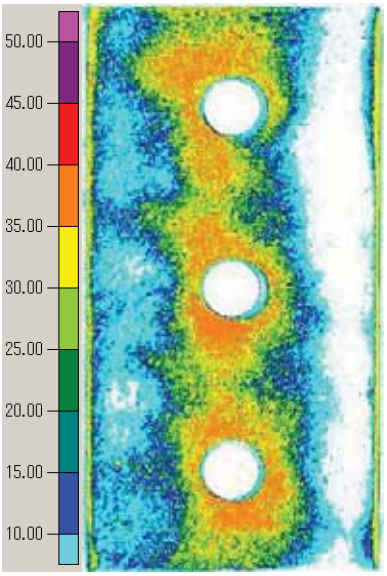
No.2-2（ナット側）



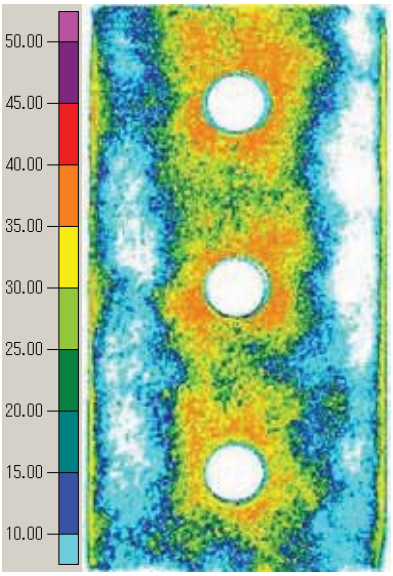
No.2-3（ナット側）

（a）試験体 No.2（母板 50mm，連結板 26mm，ボルト 3 列）

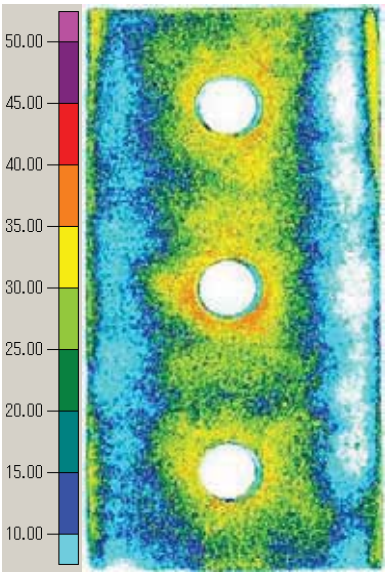
図-3.4.3　接触圧力のコンター図（計測ケース 2，N/mm^2）



No.2-1（ボルト頭側）

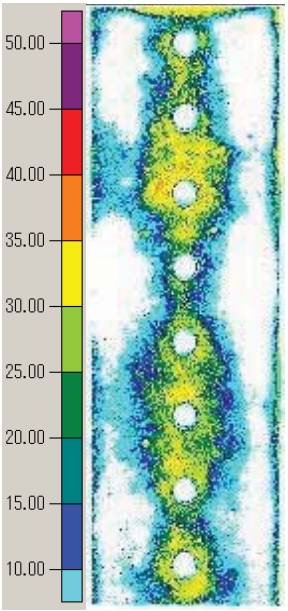


No.2-2（ボルト頭側）

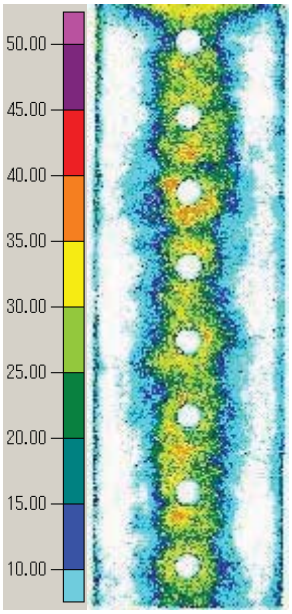


No.2-3（ボルト頭側）

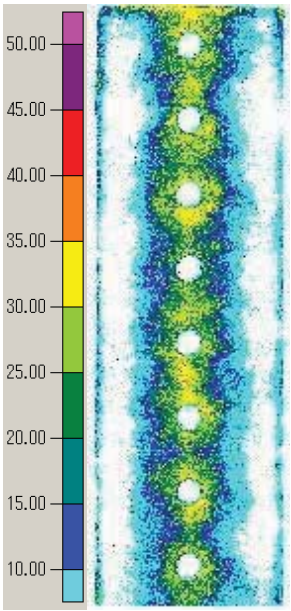
（a）試験体 No.2（母板 50mm，連結板 26mm，ボルト 3 列）（続き）



No.3-1（ナット側）

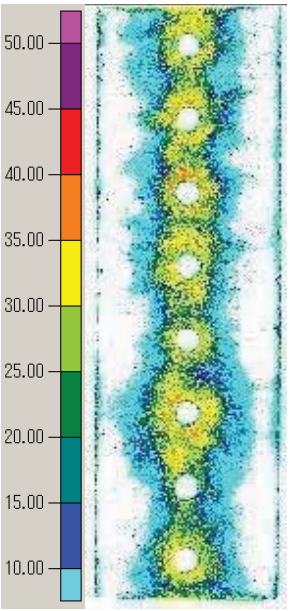


No.3-2（ナット側）

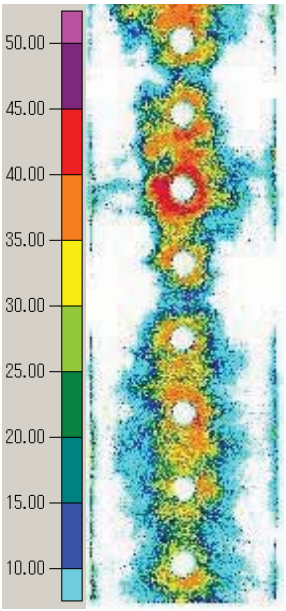


No.3-3（ナット側）

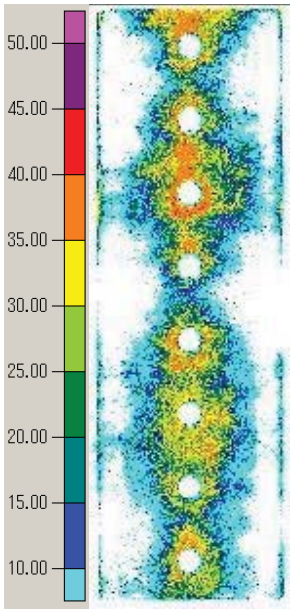
図-3.4.3　接触圧力のコンター図（計測ケース 2，N/mm^2）（続き）



No.3-1（ボルト頭側）

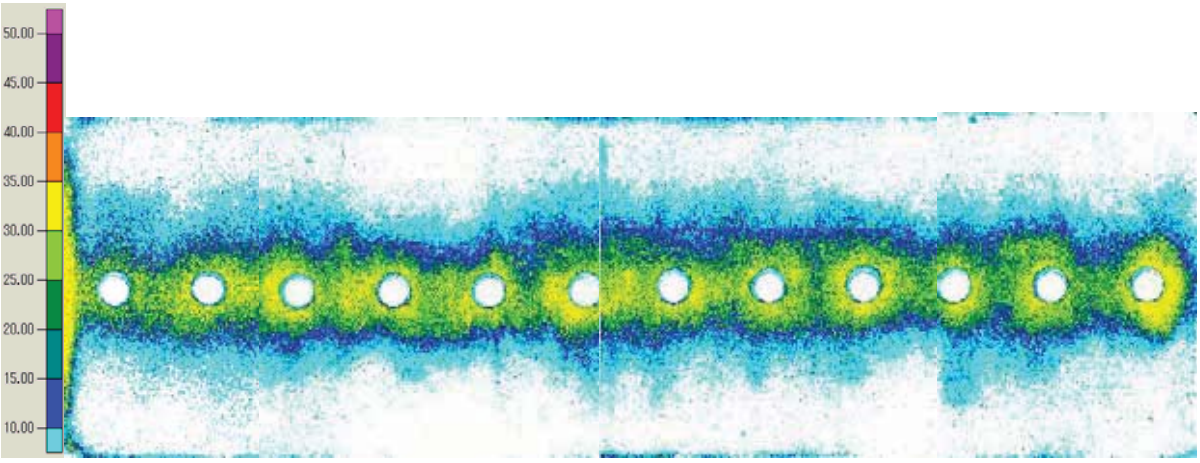


No.3-2（ボルト頭側）



No.3-3（ボルト頭側）

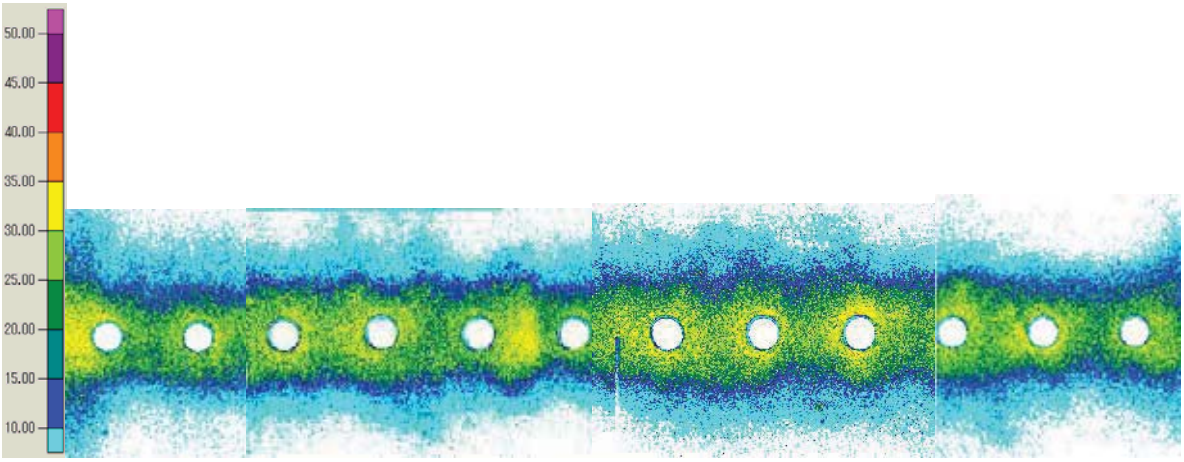
（b）試験体 No.3（母板 50mm，連結板 26mm，ボルト 8 列）



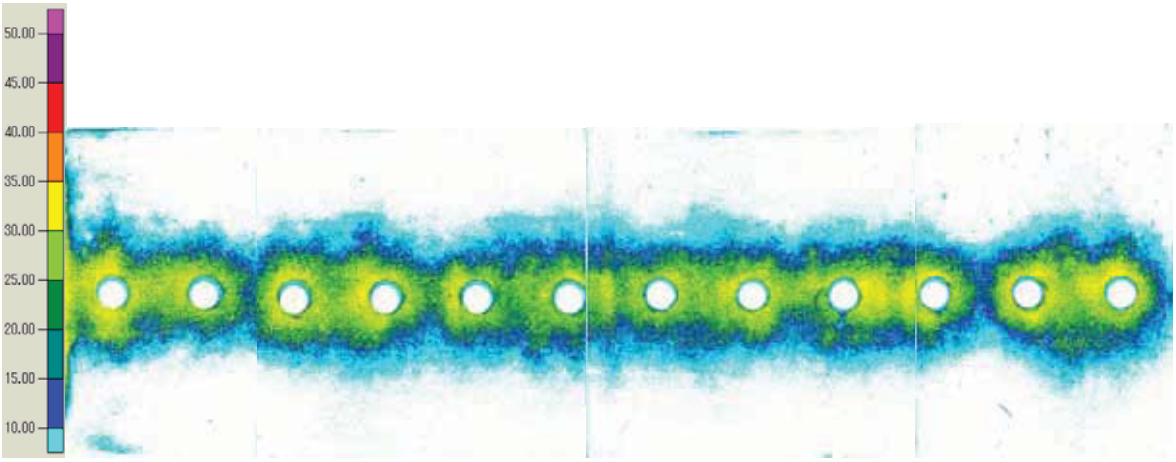
No.4-1（ナット側）

（c）試験体 No.4（母板 50mm，連結板 26mm，ボルト 12 列）

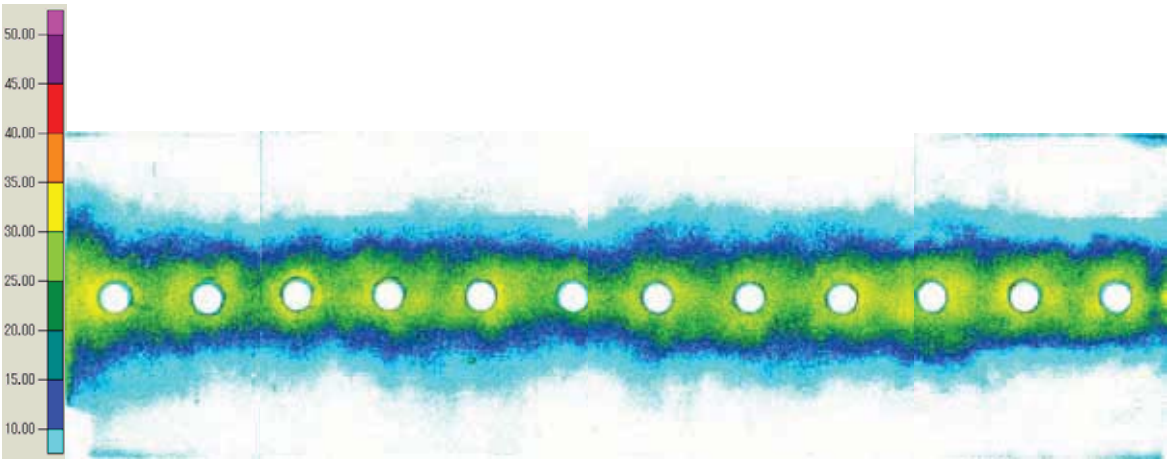
図-3.4.3　接触圧力のコンター図（計測ケース 2，N/mm^2）（続き）



No.4-1（ボルト頭側）



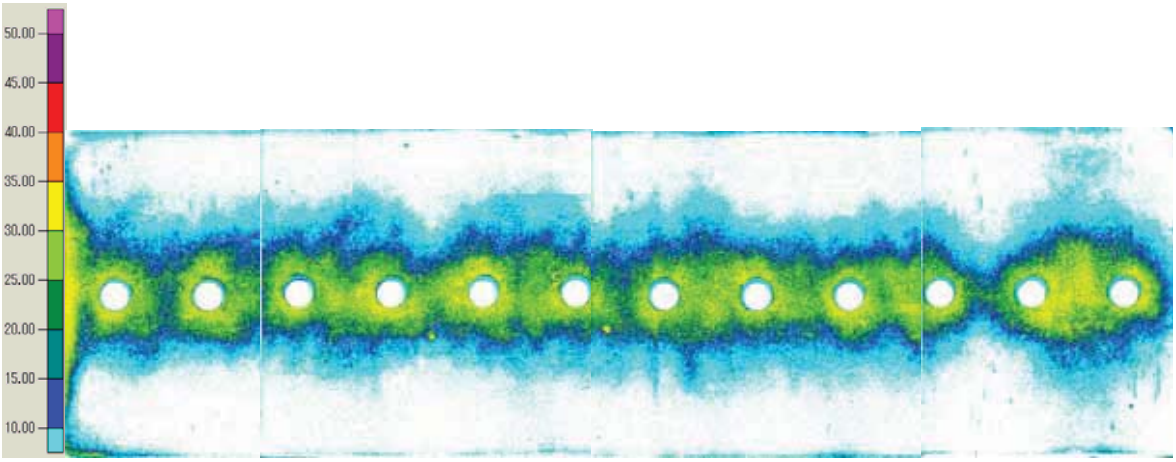
No.4-2（ナット側）



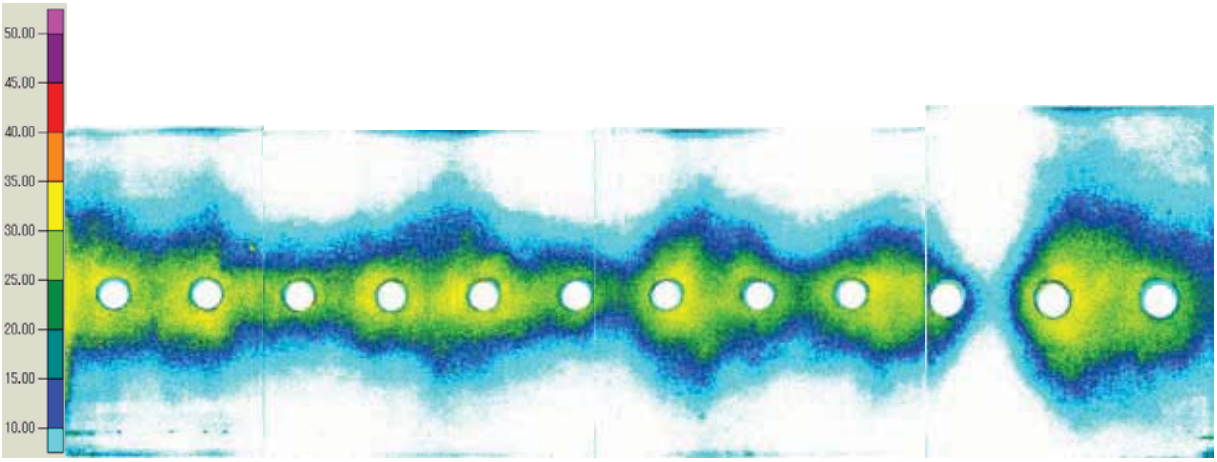
No.4-2（ボルト頭側）

（c）試験体 No.4（母板 50mm，連結板 26mm，ボルト 12 列）（続き）

図-3.4.3　接触圧力のコンター図（計測ケース 2，N/mm^2）（続き）



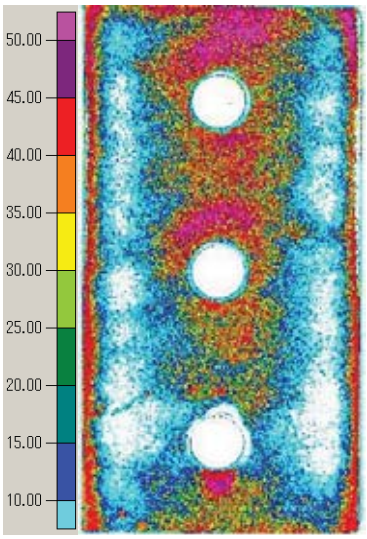
No.4-3（ナット側）



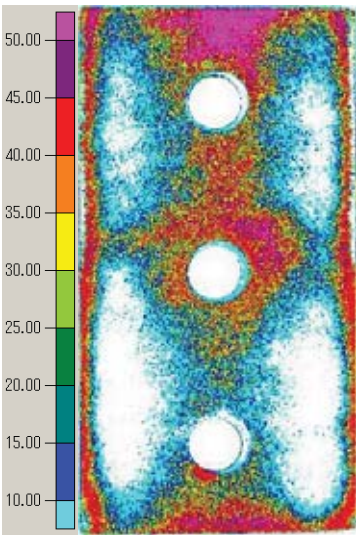
No.4-3（ボルト頭側）

（c）試験体 No.4（母板 50mm，連結板 26mm，ボルト 12 列）（続き）

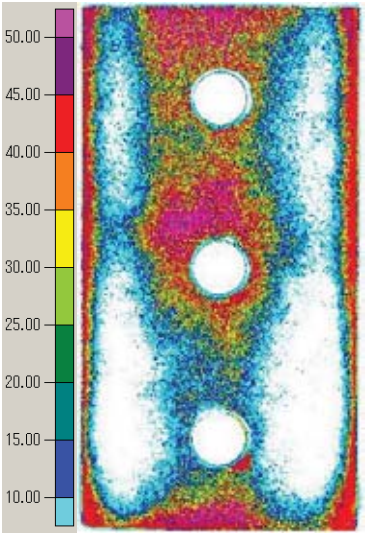
図-3.4.3　接触圧力のコンター図（計測ケース 2，N/mm^2）（続き）



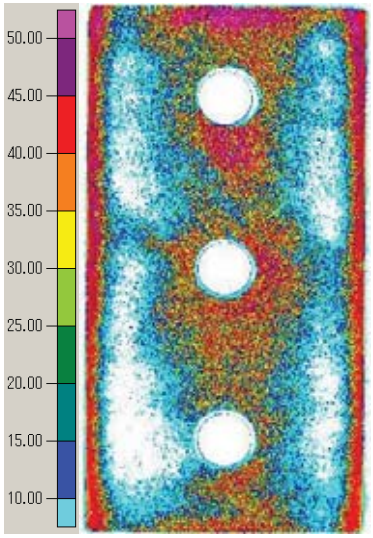
No.5’-1（ボルト頭側）



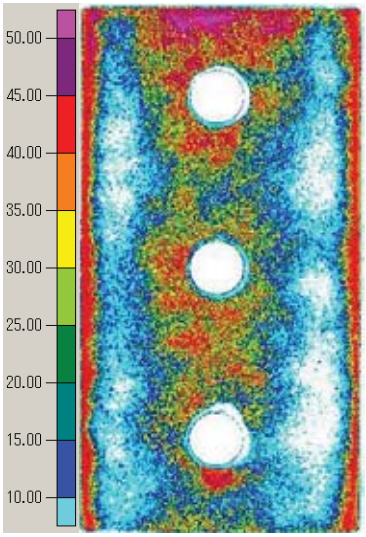
No.5’-1（ナット側）



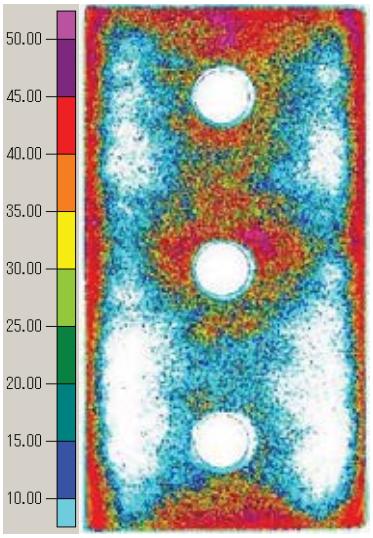
No.5’-2（ボルト頭側）



No.5’-2（ナット側）



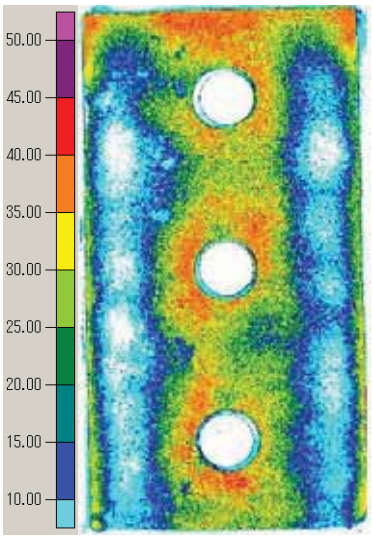
No.5’-3（ボルト頭側）



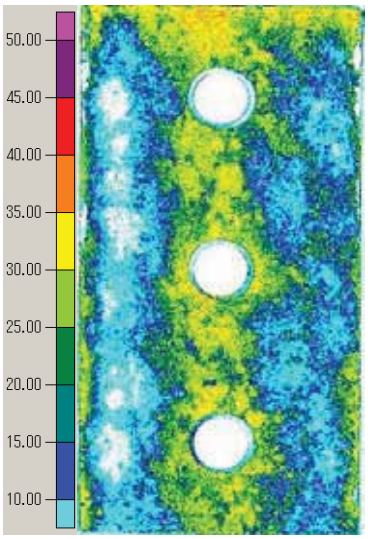
No.5’-3（ナット側）

（d）試験体 No.5’ （母板 75mm，連結板 38mm，ボルト 3 列，切削加工後）

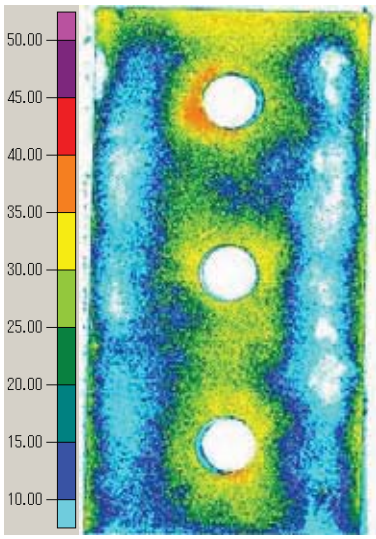
図-3.4.3　接触圧力のコンター図（計測ケース 2，N/mm^2）（続き）



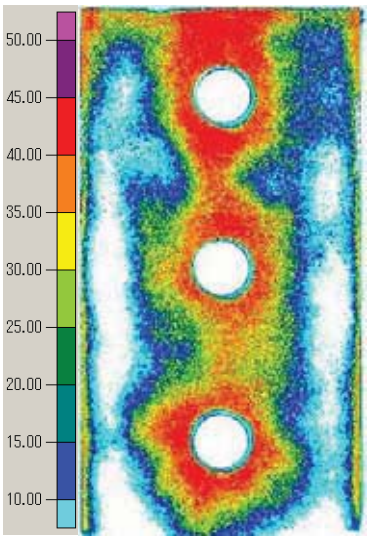
No.8-1（ナット側）



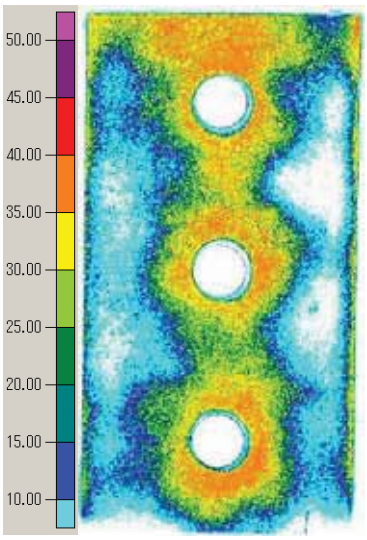
No.8-2（ナット側）



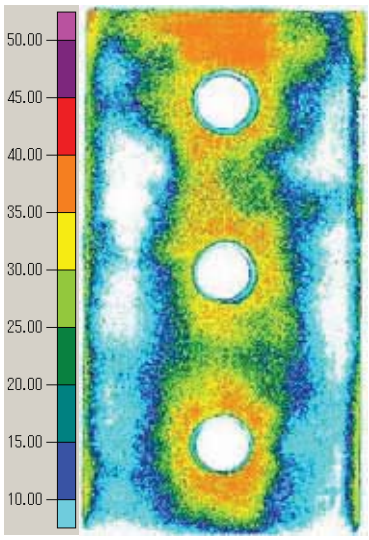
No.8-3（ナット側）



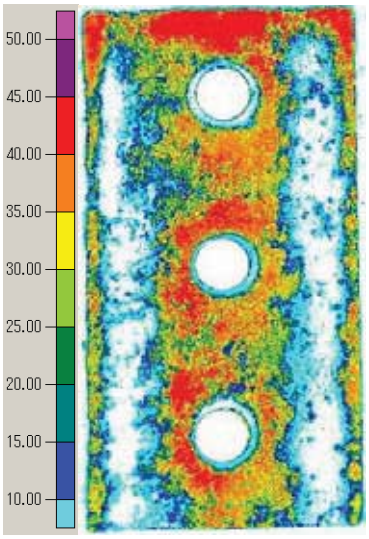
No.8-1（ボルト頭側）



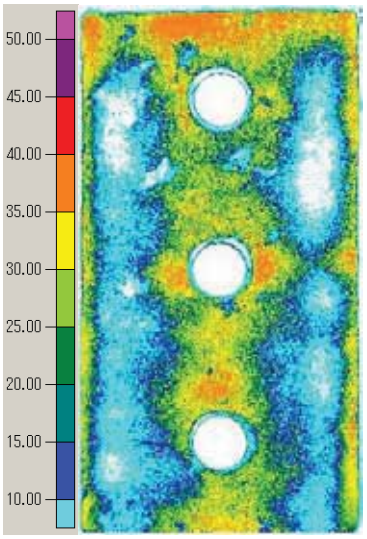
No.8-2（ボルト頭側）



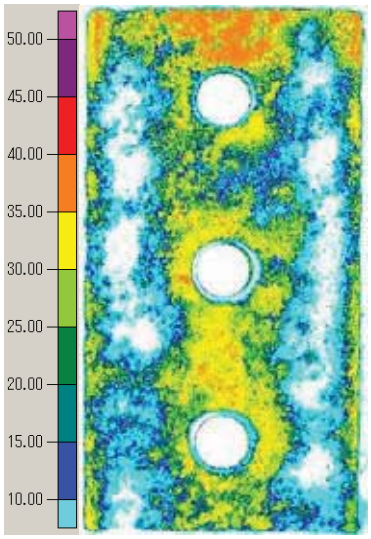
No.8-3（ボルト頭側）



No.8-1（フィラー側）



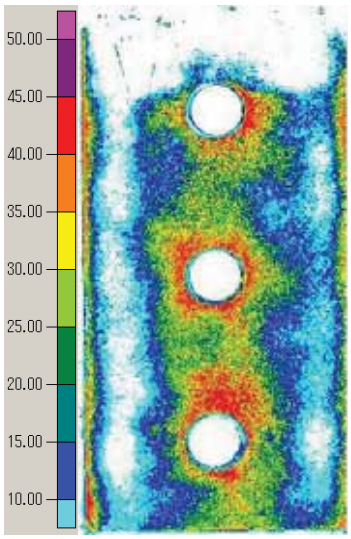
No.8-2（フィラー側）



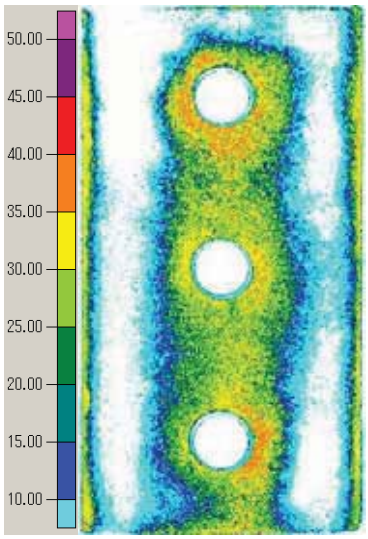
No.8-3（フィラー側）

（e）試験体 No.8（母板 38mm，連結板 20mm，フィラー12mm）

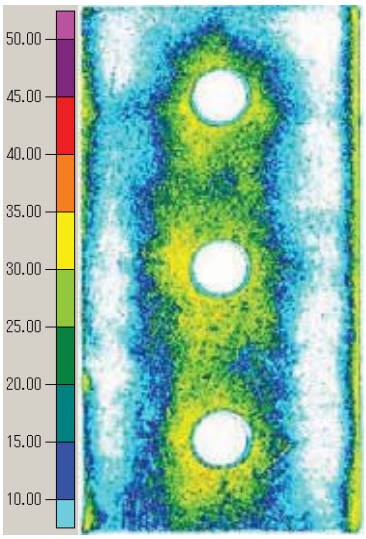
図-3.4.3　接触圧力のコンター図（計測ケース 2，N/mm^2）（続き）



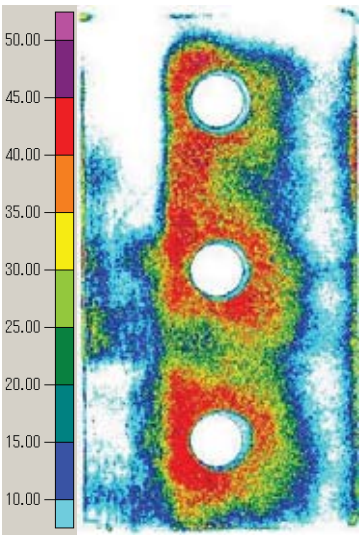
No.9-1（ナット側）



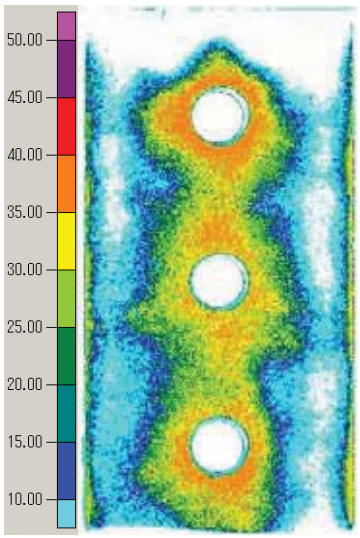
No.9-2（ナット側）



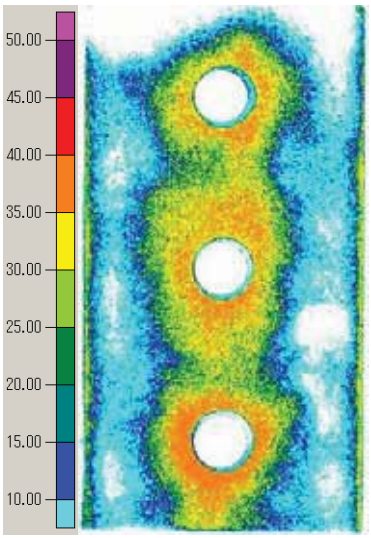
No.9-3（ナット側）



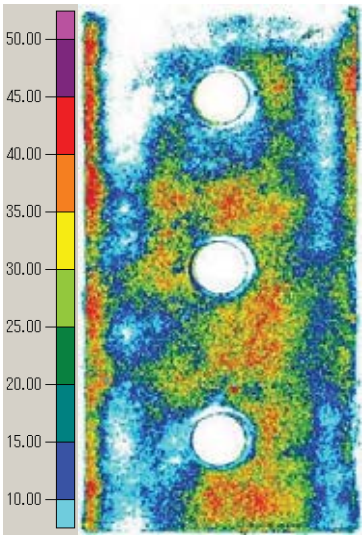
No.9-1（ボルト頭側）



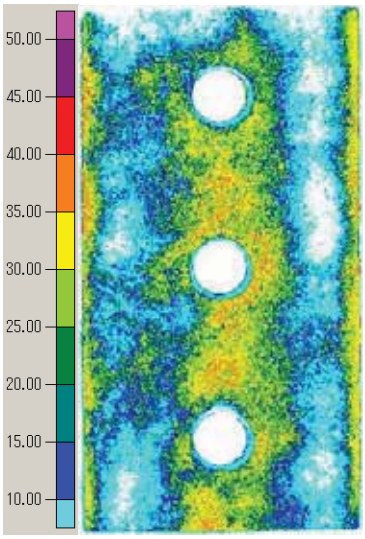
No.9-2（ボルト頭側）



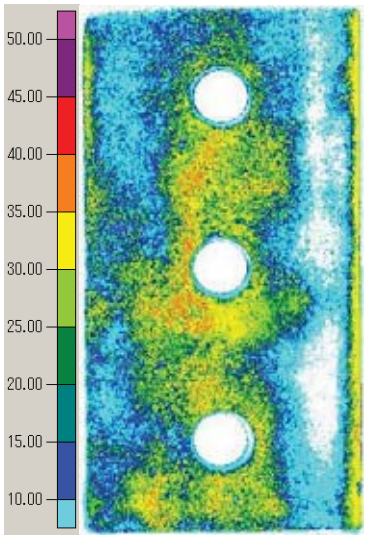
No.9-3（ボルト頭側）



No.9-1（フィラー側）



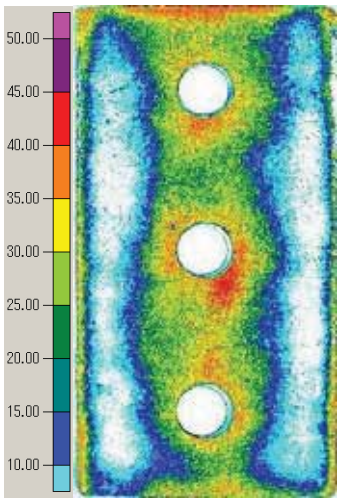
No.9-2（フィラー側）



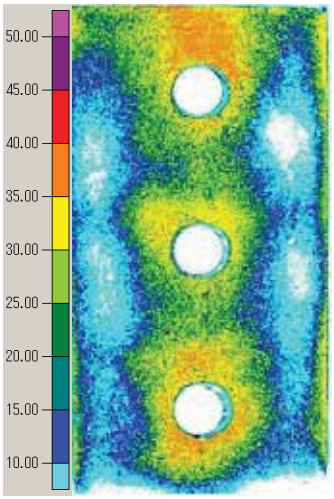
No.9-3（フィラー側）

（f）試験体 No.9（母板 38mm，連結板 20mm，フィラー22mm）

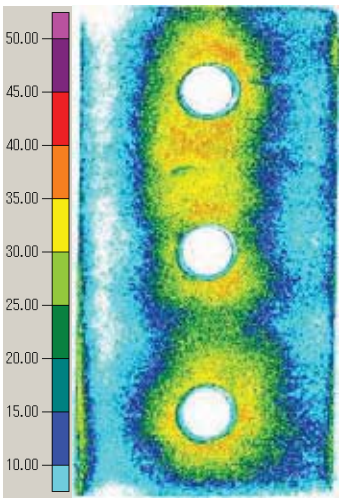
図-3.4.3　接触圧力のコンター図（計測ケース 2，N/mm^2）（続き）



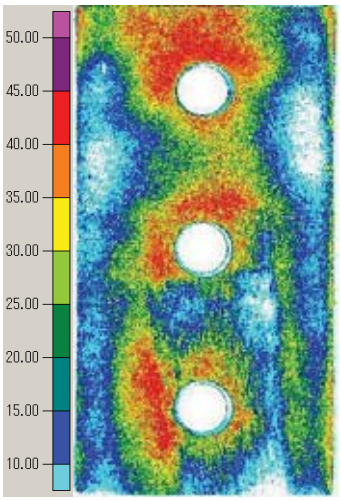
No.10-1（ナット側）



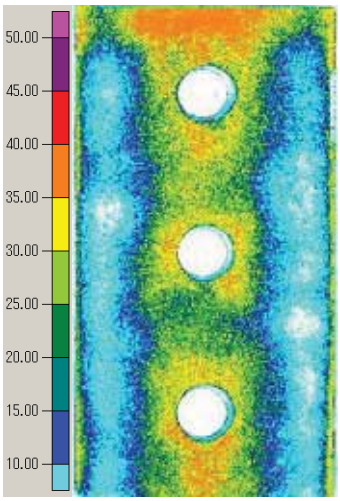
No.10-2（ナット側）



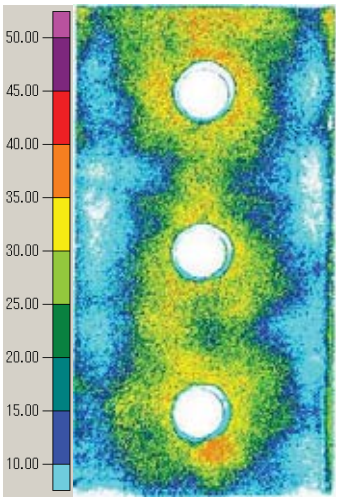
No.10-3（ナット側）



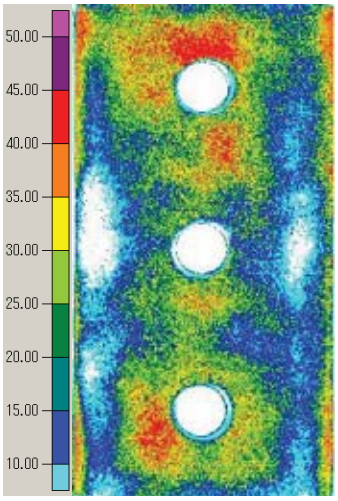
No.10-1（ボルト頭側）



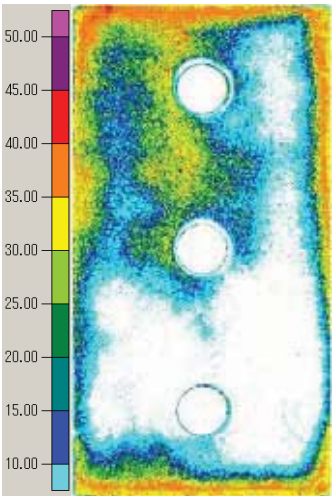
No.10-2（ボルト頭側）



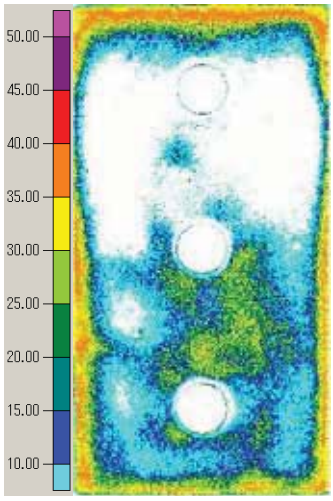
No.10-3（ボルト頭側）



No.10-1（フィラー側）



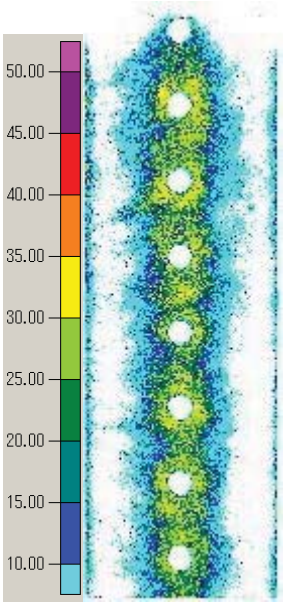
No.10-2（フィラー側）



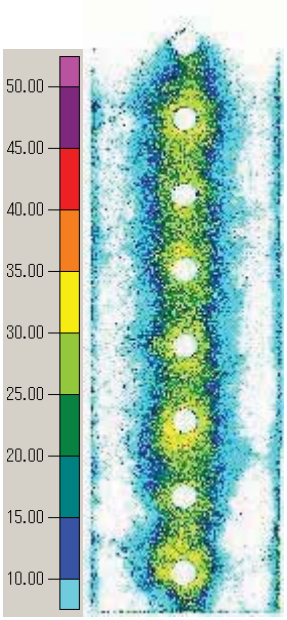
No.10-3（フィラー側）

（g）試験体 No.10（母板 38mm，連結板 20mm，フィラー37mm）

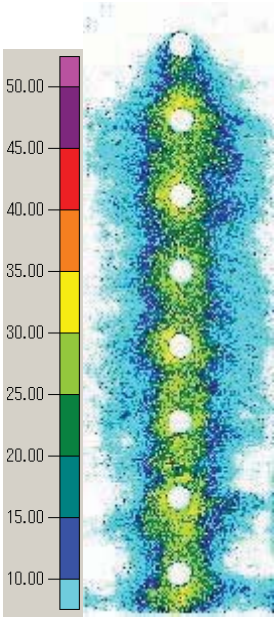
図-3.4.3　接触圧力のコンター図（計測ケース 2，N/mm^2）（続き）



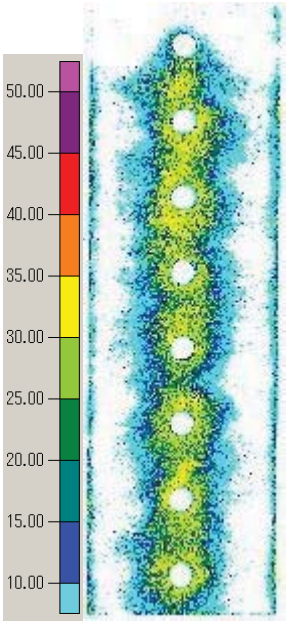
No.11-1（ナット側）



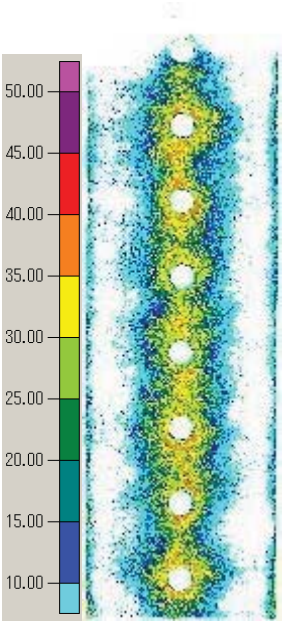
No.11-2（ナット側）



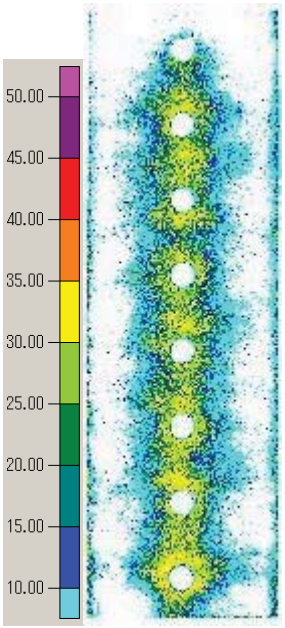
No.11-3（ナット側）



No.11-1（ボルト頭側）



No.11-2（ボルト頭側）



No.11-3（ボルト頭側）

（h）試験体 No.11（母板 50mm，連結板 26mm，板厚差 1mm）

図-3.4.3　接触圧力のコンター図（計測ケース 2，N/mm^2）（続き）

3.5　ボルト軸力の計測結果

3.5.1　組み立て時のボルト軸力の経時変化

図-3.5.1 に 1 次締め完了時点の軸力低下率, 図-3.5.2 に 2 次締め完了時点の軸力低下率を示す。ここで，軸力低下率とは，各ボルトの軸力が，締付けを行ってから組み立てが完了するまでに低下する比率を示すものであり，式（3.5.1），式（3.5.2）により算出した。

1 次締め完了時点での軸力低下率 ＝ （$\varepsilon_{60\%導入}$　$\varepsilon_{1次締め完了}$）／$\varepsilon_{設計軸力}$　・・・・・・・(3.5.1)

2 次締め完了時点での軸力低下率 ＝ （$\varepsilon_{100\%導入}$　$\varepsilon_{2次締め完了}$）／$\varepsilon_{設計軸力}$　・・・・・・・(3.5.2)

ここで，

$\varepsilon_{1次締め完了}$　：試験体の全ボルトに 1 次締めが完了した時点の当該ボルトの軸ひずみ（実測値）

$\varepsilon_{2次締め完了}$　：試験体の全ボルトに 2 次締めが完了した時点の当該ボルトの軸ひずみ（実測値）

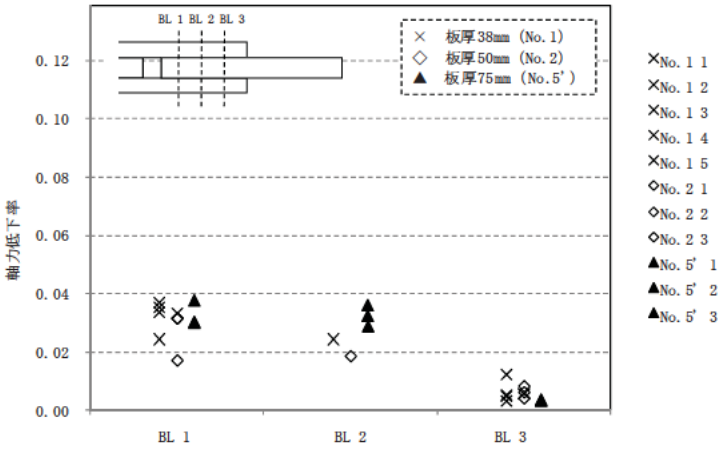
$\varepsilon_{60\%導入}$　：当該ボルトに 1 次締め軸力を導入した際の軸ひずみ（実測値）

$\varepsilon_{100\%導入}$　：当該ボルトに 2 次締め軸力を導入した際の軸ひずみ（実測値）

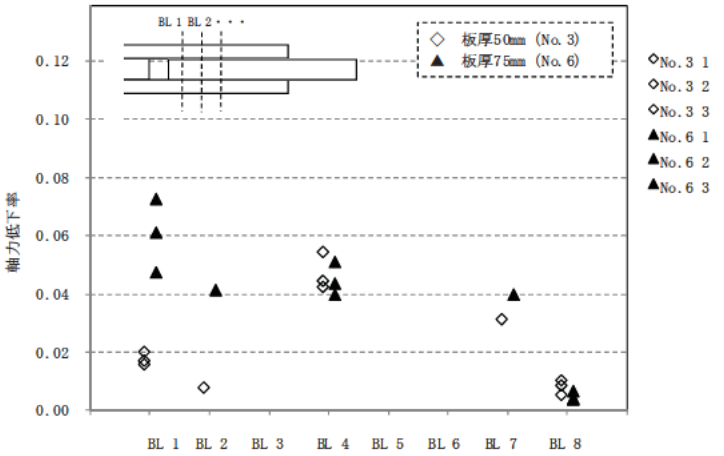
$\varepsilon_{設計軸力}$　：ボルトのキャリブレーションにより算出した設計軸力に対する軸ひずみ（3.1.2 参照）

1 次締め，2 次締めともに，先に締めたボルトの軸力低下率は，後に締めたボルトよりも大きく，かつ 1 次締めの軸力低下率は 2 次締めよりも大きい。また，母板厚 75mm の軸力低下率は，母板厚 38mm や母板厚 50mm のものよりも大きい。3 列試験体，8 列試験体，12 列試験体を比較すると，3 列試験体の BL-1 における軸力低下率が若干小さいが，その他はほぼ同程度の軸力低下率となっている。

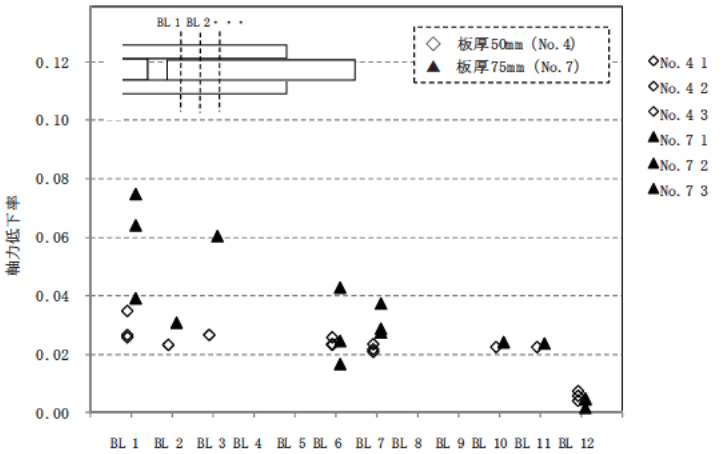
試験体 No.4-1（母板厚 50mm，12 列）と試験体 No.7-3（母板厚 75mm，12 列）の BL-1 に着目し，他のボルトを締付けるタイミングで BL-1 の軸力低下率が変化する様子を図-3.5.3 に示す。1 次締めでは，BL-1 の隣のボルト（BL-1’や BL-2）の締付けを行った際に軸力低下率が大きくなり，BL-2’以降の締付けでは軸力低下率が小さくなっている。また，BL-4 以降の締付けでは，軸力低下率は殆ど変化していない。2 次締めでは，BL-2 までの締付けで軸力残存率は大きく変化しているが，その後の締付けでは，殆ど変化していない。



(a) 3 列試験体

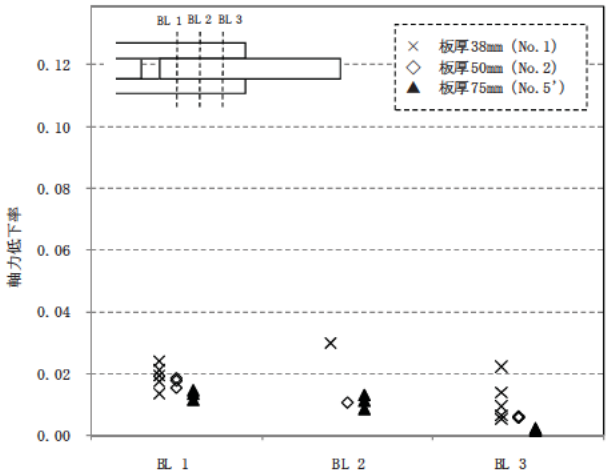


(b) 8 列試験体

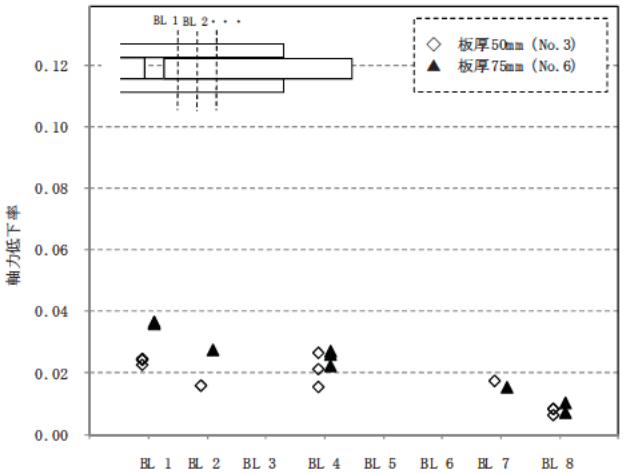


(c) 12 列試験体

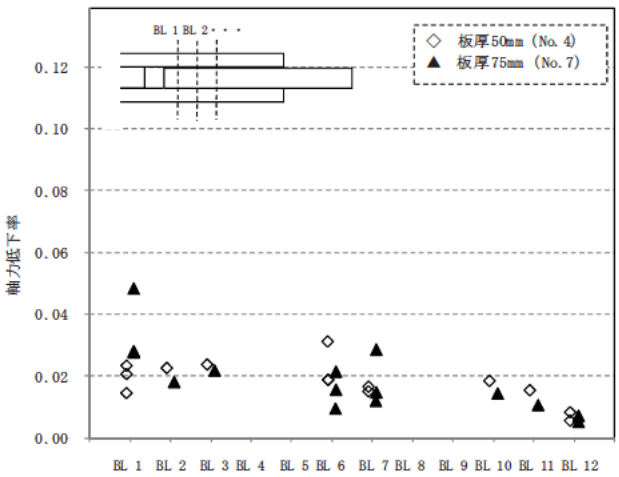
図-3.5.1　1 次締付け時点の軸力低下率



(a) 3 列試験体

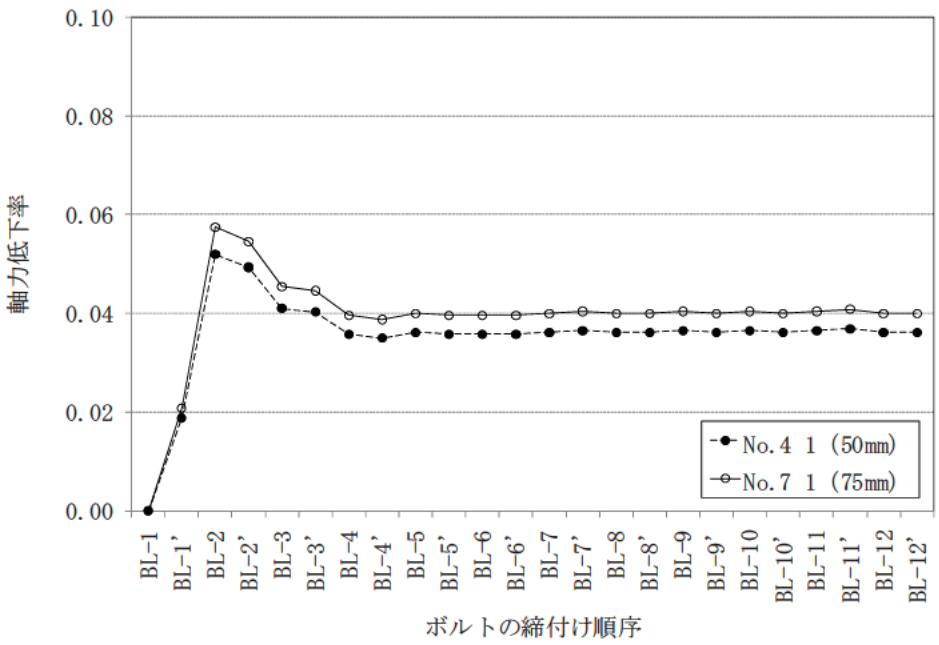


(b) 8 列試験体

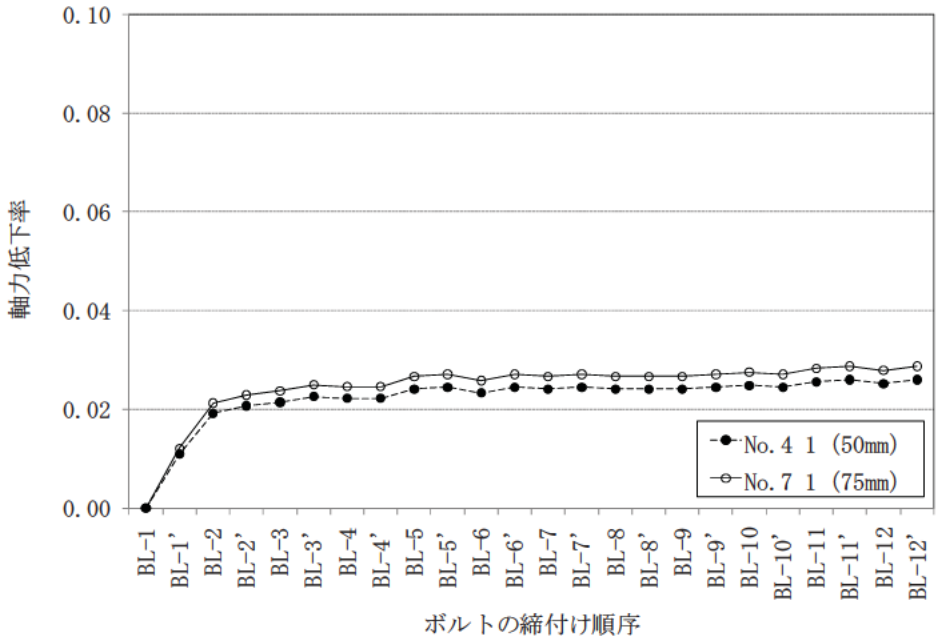


(c) 12 列試験体

図-3.5.2　2 次締付け時点の軸力低下率



(a) 1 次締め



(b) 2 次締め

図-3.5.3　試験体 No.4-1（板厚 50mm）と試験体 No.7-3（板厚 75mm）における BL-1 のひずみの変化

3.5.2　7 日経過後までの経時変化

ここでは，各試験体のボルト軸ひずみの変化に着目する。7 日経過後の軸ひずみを軸力導入時の軸ひずみで除したものを軸力残存率とする。表-3.5.1 に，各試験体のボルト位置毎の軸力残存率を示す。また，表-3.5.2 に試験体毎に軸力残存率を平均化した結果を示す。全ての試験体において，軸力残存率（平均値）の最も小さいものは，試験体 No.5 の 0.91 であった。

ボルトの軸ひずみは，試験体によって計測位置が異なるが，内側第 1 ボルト（BL-1）は全ての試験体で計測を行っているため，これに着目してボルト軸力の経時変化を比較する。締付け～7 日経過までの軸力残存率の変化を図-3.5.4 に示す。この中には，試験体 No.1-2 のように軸力残存率が不連続となっているものがあるが，これは設備の停電により，ボルトのひずみ値が記録できなかったことを意味している。いずれの試験体においても，ボルト軸ひずみは軸力導入後 1 日のうちに大きく低下し，その後は緩やかに低下するか，あるいは殆ど低下しない傾向となっている。

表-3.5.1　各ボルト位置における軸力残存率

No.1（基本ケース，板厚38mm）

	BL 1	BL 2	BL 3	平均
No.1 1	0.92	0.91	0.92	0.92
No.1 2	0.95		0.96	0.95
No.1 3	0.96		0.95	0.95
No.1 4	0.92		0.92	0.92
No.1 5	0.93		0.93	0.93
平均	0.94	0.91	0.93	0.94

No.2（基本ケース，板厚50mm）

	BL 1	BL 2	BL 3	平均
No.2 1	0.94	0.95	0.95	0.95
No.2 2	0.95		0.95	0.95
No.2 3	0.95		0.95	0.95
平均	0.95	0.95	0.95	0.95

No.5（基本ケース，板厚75mm，切削加工前）

	BL 1	BL 2	BL 3	平均
No.5 1	0.89	0.91	0.92	0.90
No.5 2	0.89		0.92	0.91
No.5 3	0.90		0.91	0.91
平均	0.89	0.91	0.92	0.91

No.5’（基本ケース，板厚75mm，切削加工後）

	BL 1	BL 2	BL 3	平均
No.5’1	0.96	0.96	0.97	0.96
No.5’2	0.96	0.95	0.96	0.95
No.5’3	0.96	0.95	0.96	0.96
平均	0.96	0.95	0.96	0.96

No.8（フィラーケース，フィラープレート厚12mm）

	BL 1	BL 2	BL 3	平均
No.8 1	0.92	0.92	0.92	0.92
No.8 2	0.92	0.93	0.92	0.92
No.8 3	0.92	0.92	0.93	0.92
平均	0.92	0.92	0.92	0.92

No.9（フィラーケース，フィラープレート厚22mm）

	BL 1	BL 2	BL 3	平均
No.9 1	0.95	0.93	0.95	0.94
No.9 2	0.94	0.93	0.93	0.93
No.9 3	0.93	0.92	0.97	0.94
平均	0.94	0.93	0.95	0.94

No.10（フィラーケース，フィラープレート厚37mm）

	BL 1	BL 2	BL 3	平均
No.10 1	0.92	0.92	0.93	0.92
No.10 2	0.94	0.91	0.85	0.90
No.10 3	0.91	0.93	0.93	0.92
平均	0.92	0.92	0.91	0.92

No.13（塗膜厚ケース，合計塗膜厚120μm）

	BL 1	BL 2	BL 3	平均
No.13 1	0.93	0.93	0.93	0.93
No.13 2	0.93		0.92	0.93
No.13 3	0.93		0.93	0.93
No.13 4	0.93		0.94	0.93
No.13 5	0.93		0.95	0.94
平均	0.93	0.93	0.93	0.93

No.14（塗膜厚ケース，合計塗膜厚250μm）

	BL 1	BL 2	BL 3	平均
No.14 1	0.93	0.92	0.92	0.92
No.14 2	0.93		0.93	0.93
No.14 3	0.91		0.92	0.91
No.14 4	0.94		0.88	0.91
No.14 5	0.92		0.93	0.92
平均	0.93	0.92	0.91	0.92

表-3.5.1　各ボルト位置における軸力残存率（続き）

No.3 （基本ケース, 板厚50mm）

	BL 1	BL 2	BL 3	BL 4	BL 5	BL 6	BL 7	BL 8	平均
No.3 1	0.96	0.97		0.96			0.96	0.96	0.96
No.3 2	0.94			0.94				0.95	0.94
No.3 3	0.95			0.95				0.95	0.95
平均	0.95	0.97		0.95			0.96	0.95	0.96

No.6 （基本ケース, 板厚75mm）

	BL 1	BL 2	BL 3	BL 4	BL 5	BL 6	BL 7	BL 8	平均
No.6 1	0.94	0.95		0.94			0.94	0.89	0.93
No.6 2	0.93			0.94				0.95	0.94
No.6 3	0.93			0.94				0.94	0.93
平均	0.94	0.95		0.94			0.94	0.92	0.94

No.11 （肌すきケース, 板厚50mm）

	BL 1	BL 2	BL 3	BL 4	BL 5	BL 6	BL 7	BL 8	平均
No.11 1	0.97	0.96		0.95			0.95	0.96	0.96
No.11 2	0.96			0.95				0.95	0.95
No.11 3	0.90			0.96				0.95	0.94
平均	0.94	0.96		0.95			0.95	0.95	0.95

No.12 （肌すきケース, 板厚75mm）

	BL 1	BL 2	BL 3	BL 4	BL 5	BL 6	BL 7	BL 8	平均
No.12 1	0.93	0.95		0.94			0.96	0.96	0.95
No.12 2	0.90			0.93				0.95	0.93
No.12 3	0.90			0.94				0.95	0.93
平均	0.91	0.95		0.94			0.96	0.95	0.94

No.4 （基本ケース, 板厚50mm）

	BL-1	BL-2	BL-3	BL-4	BL-5	BL-6	BL-7	BL-8	BL-9	BL-10	BL-11	BL-12	平均
No.4 1	1.03	0.94	0.94			0.94	0.95			0.94	0.94	0.94	0.95
No.4 2	0.94					0.93	0.95					0.95	0.94
No.4 3	0.94					0.95	0.95					0.95	0.95
平均	0.97	0.94	0.94			0.94	0.95			0.94	0.94	0.95	0.95

No.7 （基本ケース, 板厚75mm）

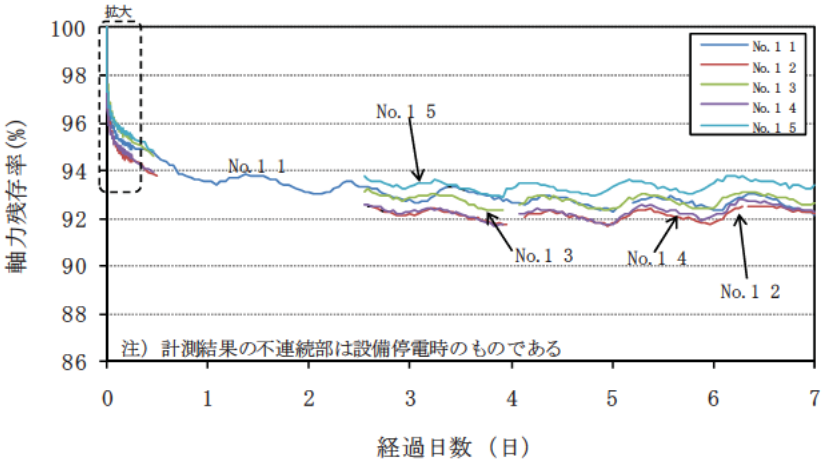
	BL-1	BL-2	BL-3	BL-4	BL-5	BL-6	BL-7	BL-8	BL-9	BL-10	BL-11	BL-12	平均
No.7 1	0.94					0.97	0.97					0.99	0.97
No.7 2	0.94					0.94	0.94					0.97	0.95
No.7 3	0.95	0.95	0.94			0.95	0.95			0.95	0.96	0.96	0.95
平均	0.94	0.95	0.94			0.96	0.95			0.95	0.96	0.97	0.96

No.15 （母材降伏ケース）

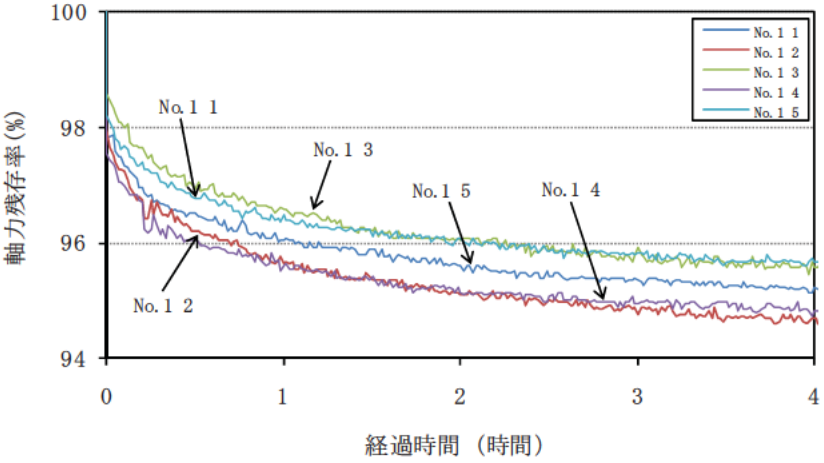
	BL-1	BL-2	BL-3	BL-4	BL-5	BL-6	BL-7	BL-8	BL-9	BL-10	BL-11	BL-12	平均
No.15 1	0.94	0.95	0.94			0.94	0.95			0.95	0.95	0.95	0.94
No.15 2	0.97	0.95	0.97			0.96	0.96			0.96	0.96	0.97	0.96
No.15 3	0.96	0.98	0.97			0.96	0.95			0.98	0.97	0.96	0.97
平均	0.95	0.96	0.96			0.95	0.95			0.96	0.96	0.96	0.96

表-3.5.2　ボルト軸力残存率（平均値）

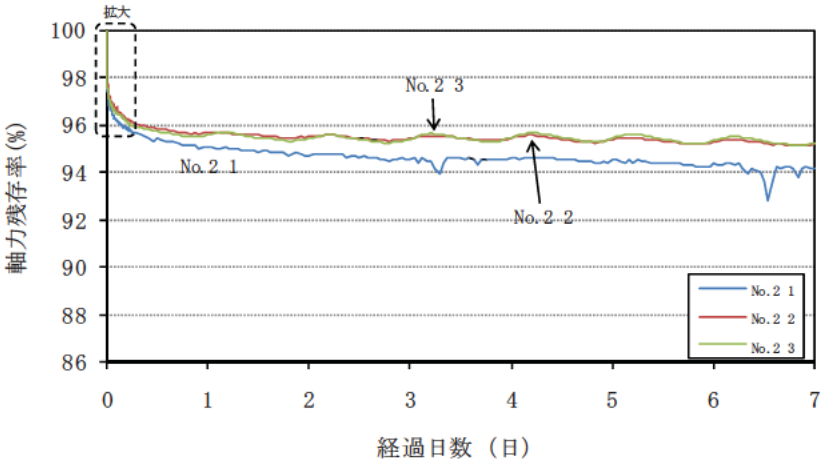
ケース	No.	構造諸元						ボルトの平均ひずみ（×10 ^{6}）			
		母材板厚（mm）	連結板板厚（mm）	フィラー板厚（mm）	試験体幅（mm）	ボルト列数	合計膜厚（μm）	①軸力導入時	②7日間経過後	③軸力残存率②/①	
基本	1 1	38 38	2×20		120	3	180	2,420	2,217	0.92	0.94
	1 2							2,442	2,330	0.95	
	1 3							2,443	2,333	0.95	
	1 4							2,478	2,276	0.92	
	1 5							2,444	2,277	0.93	
	2 1	50 50	2×26		120	3	180	2,708	2,564	0.95	0.95
	2 2							2,671	2,546	0.95	
	2 3							2,681	2,550	0.95	
	3 1				190	8	180	2,675	2,570	0.96	0.95
	3 2							2,690	2,541	0.94	
	3 3							2,693	2,552	0.95	
	4 1				270	12	180	2,697	2,573	0.95	0.95
	4 2							2,692	2,542	0.94	
	4 3							2,709	2,571	0.95	
	5 1	75 75	2×38		120	3	180	2,401	2,170	0.90	0.91
	5 2							2,401	2,177	0.91	
	5 3							2,402	2,175	0.91	
	5’ 1				120	3	180	2,654	2,558	0.96	0.96
	5’ 2							2,672	2,550	0.95	
	5’ 3							2,682	2,561	0.96	
	6 1				130	8	180	2,652	2,475	0.93	0.94
	6 2							2,656	2,494	0.94	
	6 3							2,670	2,496	0.93	
	7 1				190	12	180	2,409	2,327	0.97	0.95
	7 2							2,501	2,367	0.95	
	7 3							2,439	2,323	0.95	
ﾌｨﾗｰ	8 1	50 38	2×20	12	120	3	180	2,658	2,451	0.92	0.92
	8 2							2,658	2,456	0.92	
	8 3							2,633	2,431	0.92	
	9 1	60 38	2×20	22	120	3	180	2,683	2,528	0.94	0.94
	9 2							2,649	2,472	0.93	
	9 3							2,656	2,499	0.94	
	10 1	75 38	2×20	37	120	3	180	2,665	2,463	0.92	0.92
	10 2							2,670	2,399	0.90	
	10 3							2,652	2,452	0.92	
肌隙	11 1	50 49	2×26		190	8	180	2,680	2,564	0.96	0.95
	11 2							2,671	2,546	0.95	
	11 3							2,679	2,506	0.94	
	12 1	75 74	2×38		270	8	180	2,435	2,314	0.95	0.94
	12 2							2,422	2,244	0.93	
	12 3							2,421	2,252	0.93	
塗膜厚	13 1	38 38	2×20		120	3	120	2,473	2,297	0.93	0.93
	13 2							2,458	2,281	0.93	
	13 3							2,463	2,294	0.93	
	13 4							2,431	2,271	0.93	
	13 5							2,419	2,275	0.94	
	14 1				120	3	250	2,415	2,230	0.92	0.92
	14 2							2,412	2,235	0.93	
	14 3							2,491	2,274	0.91	
	14 4							2,509	2,273	0.91	
	14 5							2,418	2,237	0.92	
降伏型	15 1	75 75	2×38		110	12	180	2,438	2,301	0.94	0.96
	15 2							2,438	2,344	0.96	
	15 3							2,448	2,369	0.97	



（a-1）試験体 No.1（全体図）

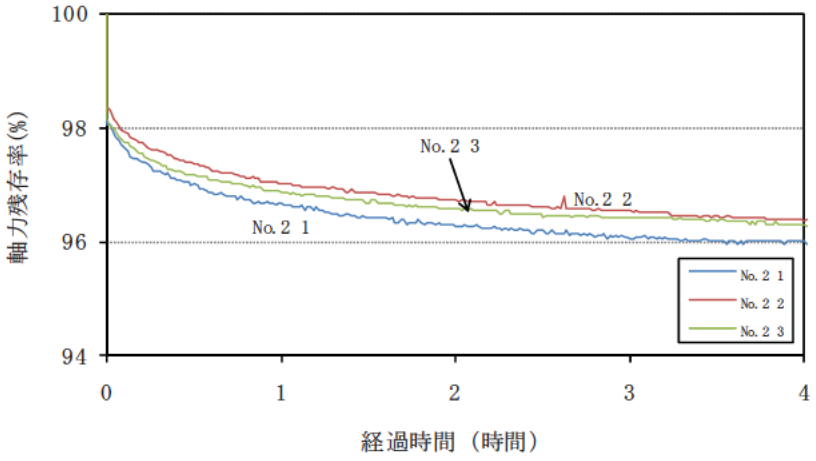


（a-2）試験体 No.1（拡大図）

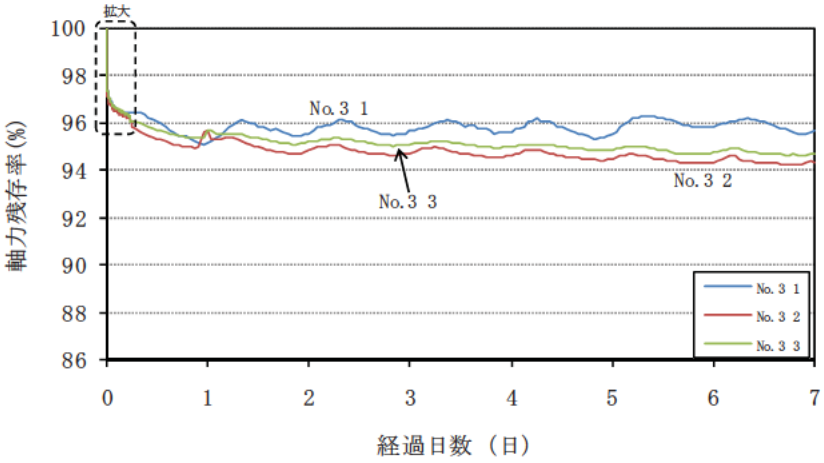


（b-1）試験体 No.2（全体図）

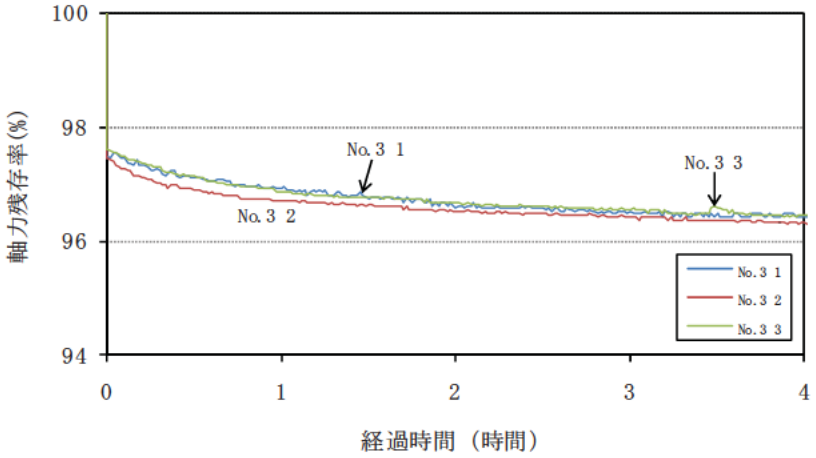
図-3.5.4　第 1 ボルトの軸ひずみの経時変化



（b-2）試験体 No.2（拡大図）

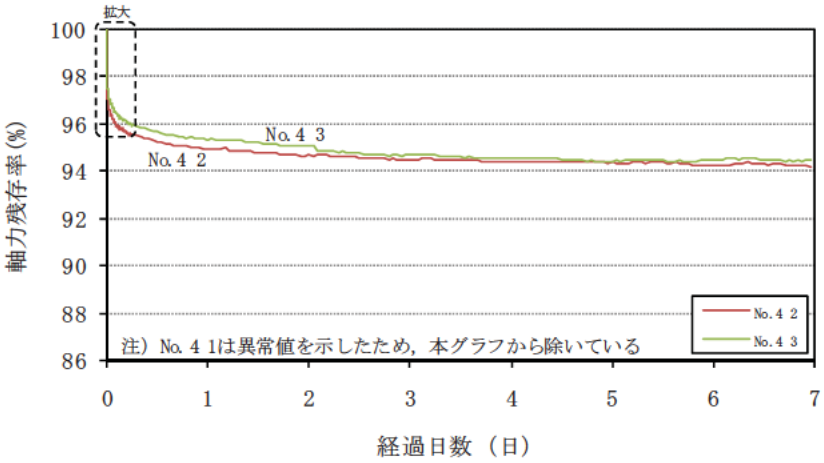


（c-1）試験体 No.3（全体図）

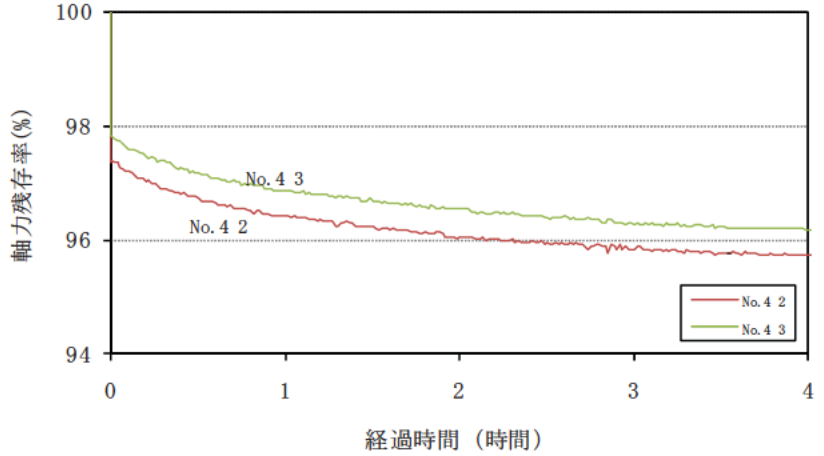


（c-2）試験体 No.3（拡大図）

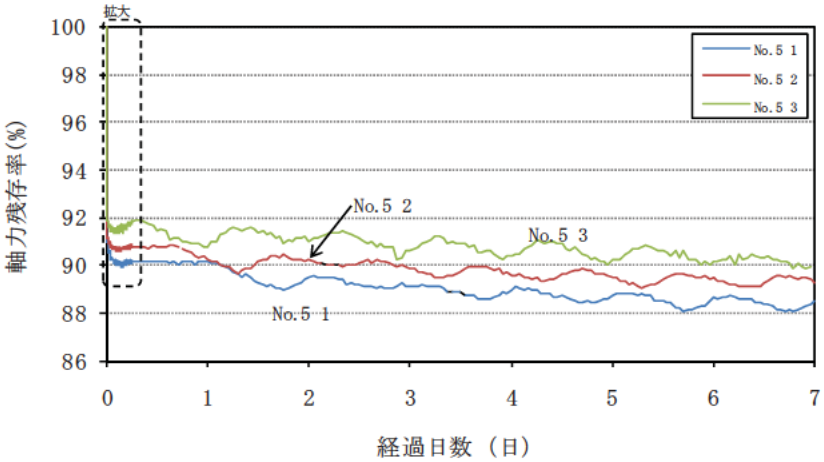
図-3.5.4　第 1 ボルトの軸ひずみの経時変化（続き）



（d-1）試験体 No.4（全体図）

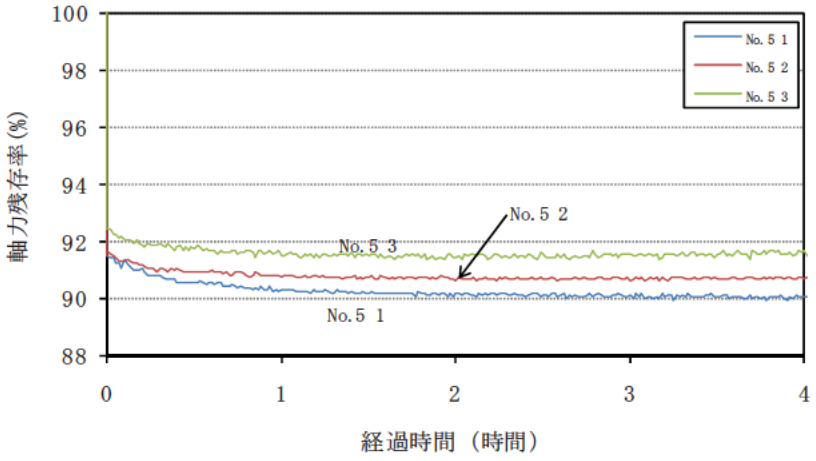


（d-2）試験体 No.4（拡大図）

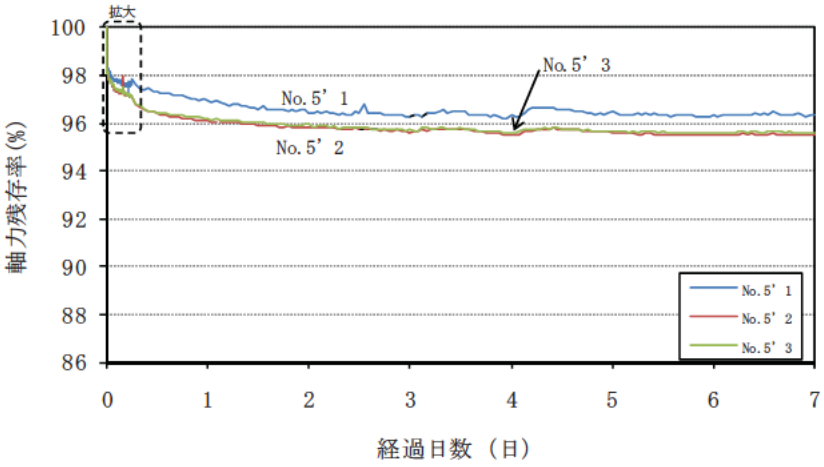


（e-1）試験体 No.5（全体図）

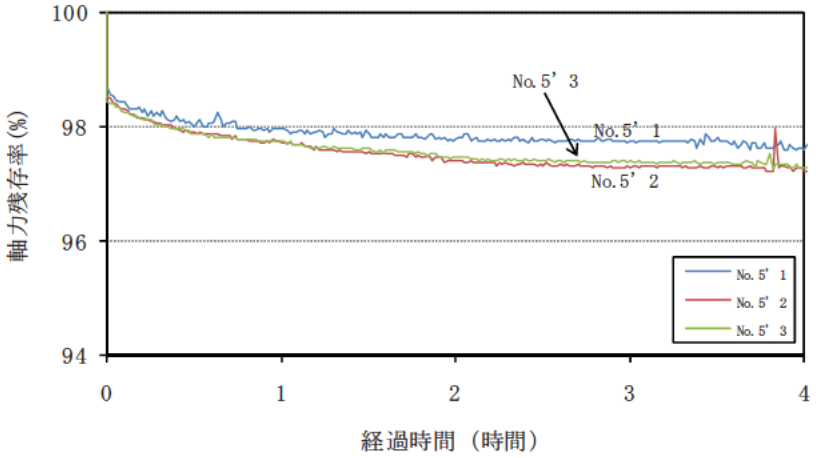
図-3.5.4　第 1 ボルトの軸ひずみの経時変化（続き）



（e-2）試験体 No.5（全体図）

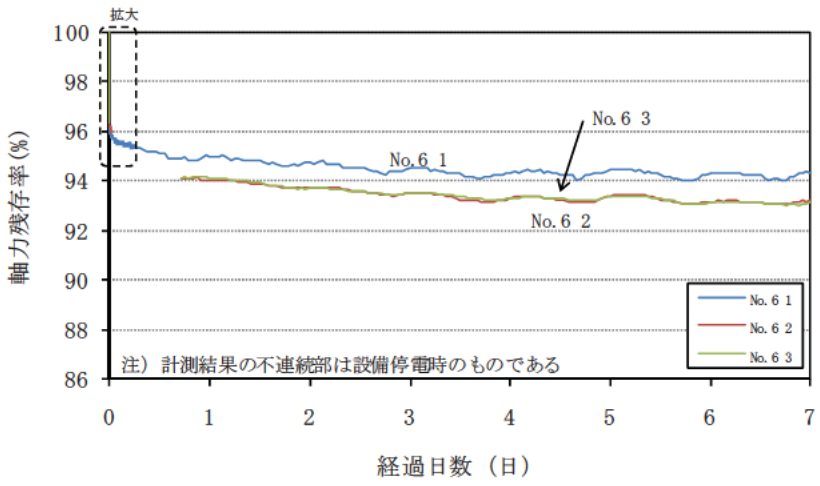


（f-1）試験体 No.5'（全体図）

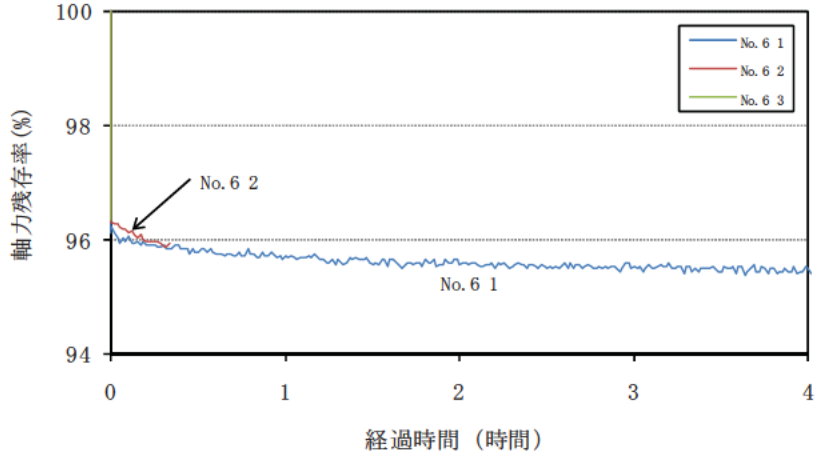


（f-2）試験体 No.5'（拡大図）

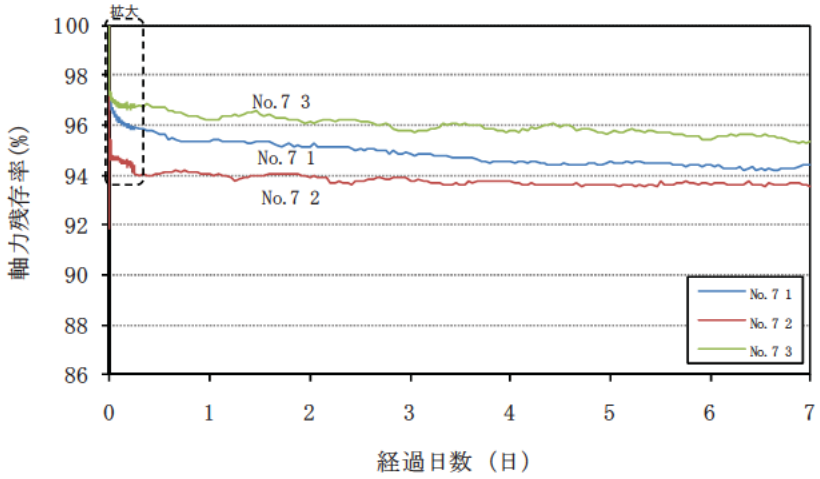
図-3.5.4　第 1 ボルトの軸ひずみの経時変化（続き）



（g-1）試験体 No.6（全体図）

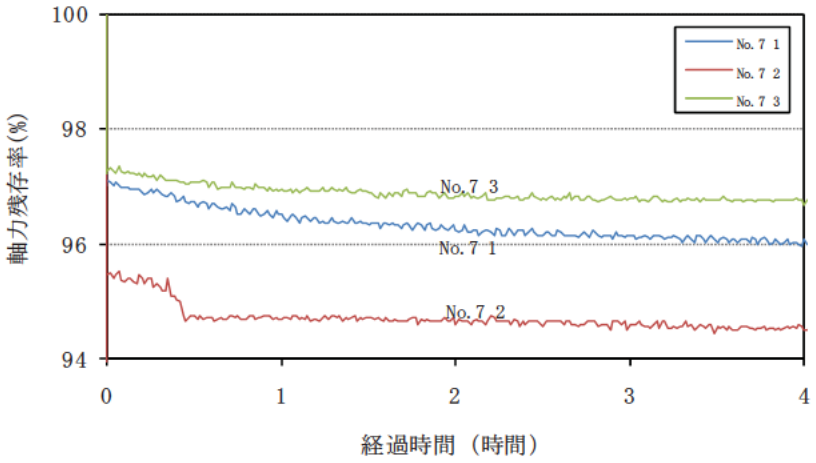


（g-2）試験体 No.6（拡大図）

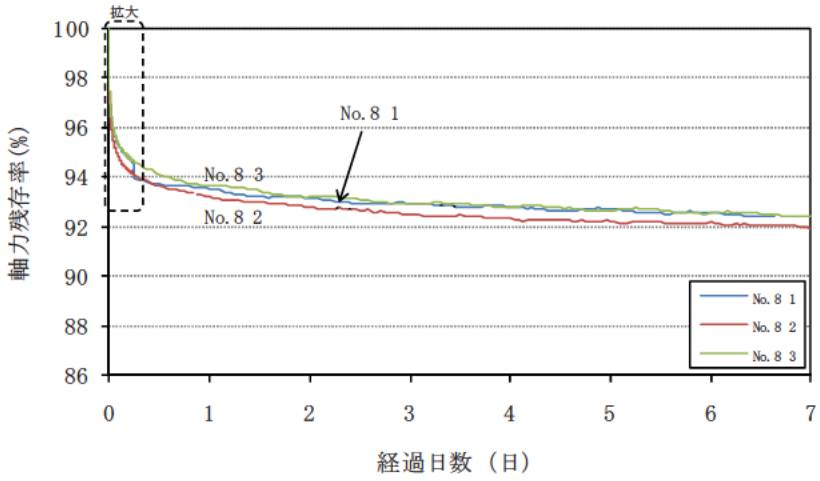


（h-1）試験体 No.7（全体図）

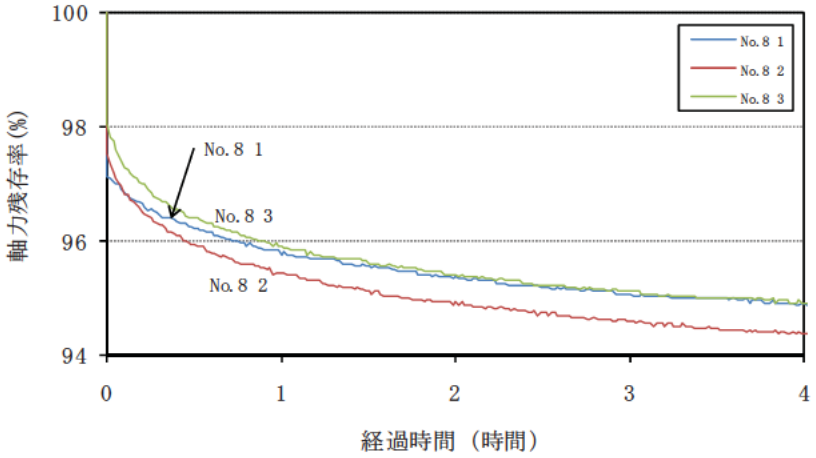
図-3.5.4　第 1 ボルトの軸ひずみの経時変化（続き）



（h-2）試験体 No.7（拡大図）

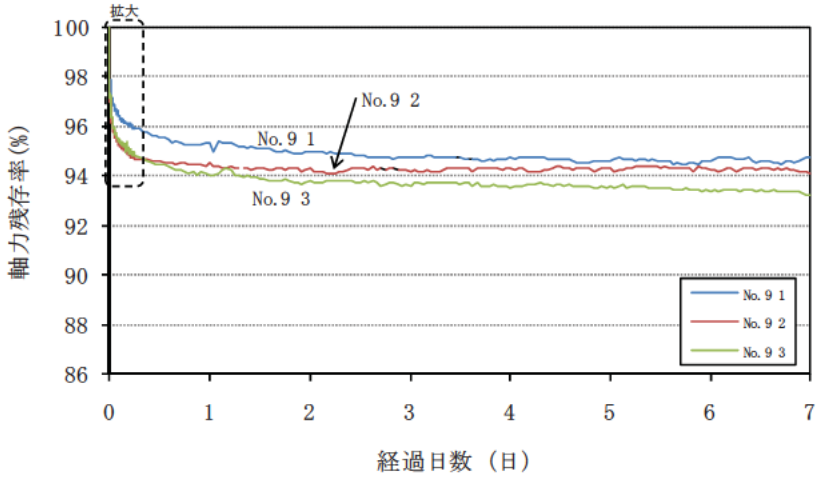


（i-1）試験体 No.8（全体図）

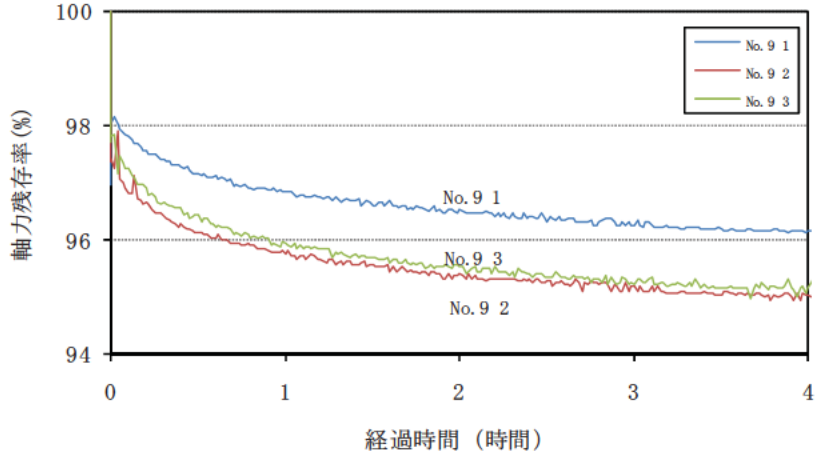


（i-2）試験体 No.8（拡大図）

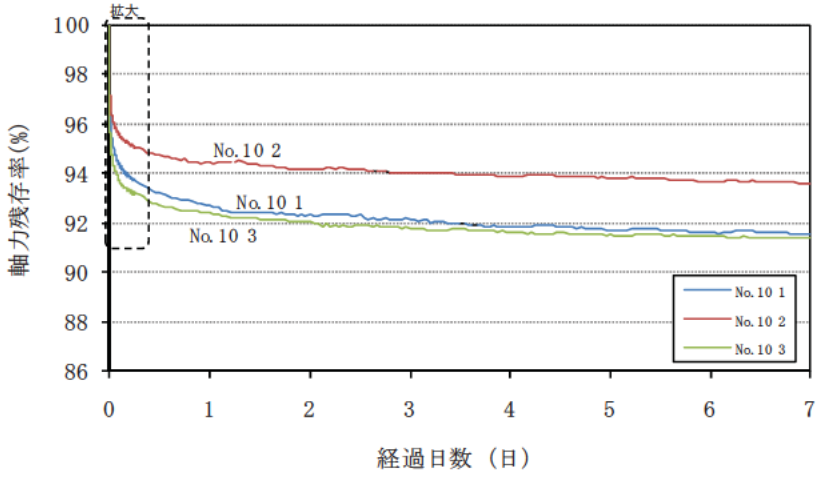
図-3.5.4　第 1 ボルトの軸ひずみの経時変化（続き）



（j-1）試験体 No.9（全体図）

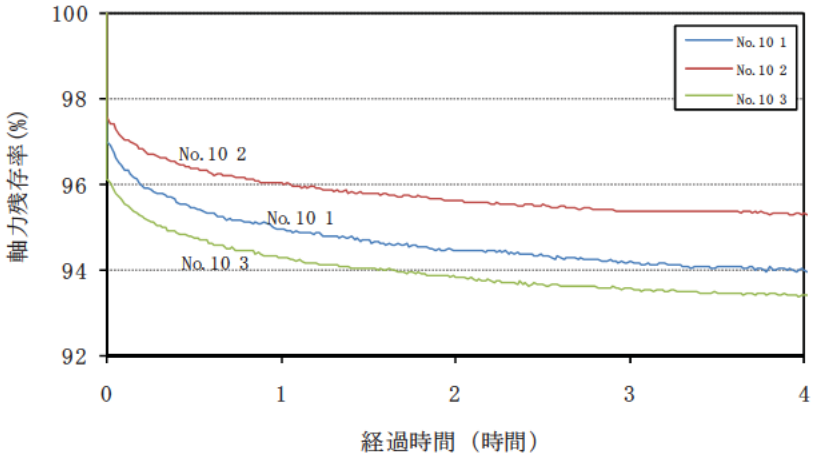


（j-2）試験体 No.9（拡大図）

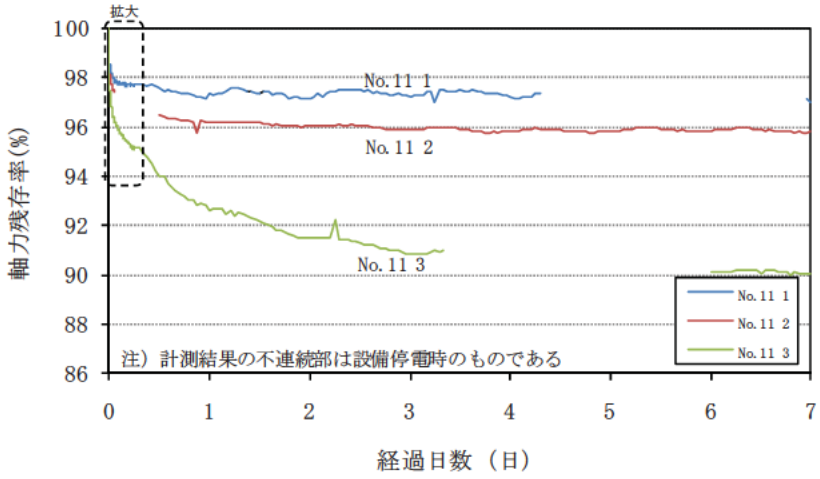


（k-1）試験体 No.10（全体図）

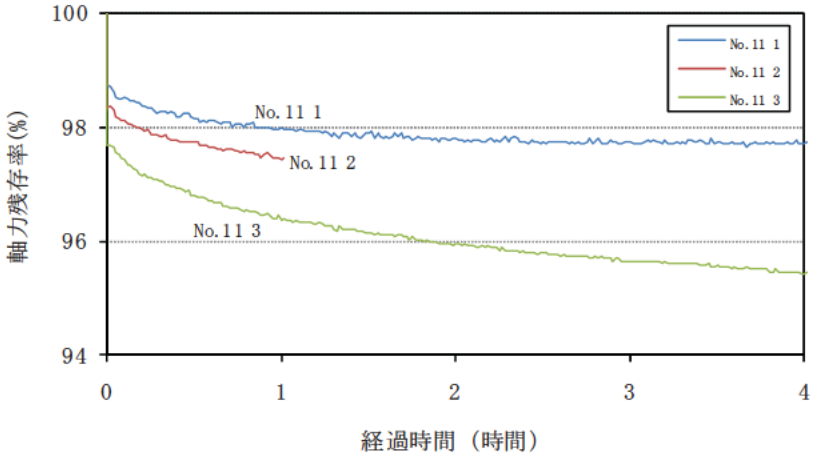
図-3.5.4　第 1 ボルトの軸ひずみの経時変化（続き）



（k-2）試験体 No.10（拡大図）

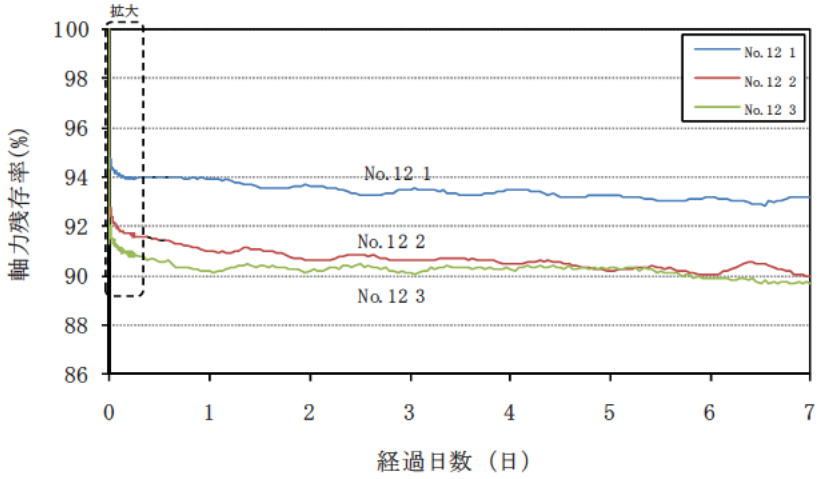


（l-1）試験体 No.11（全体図）

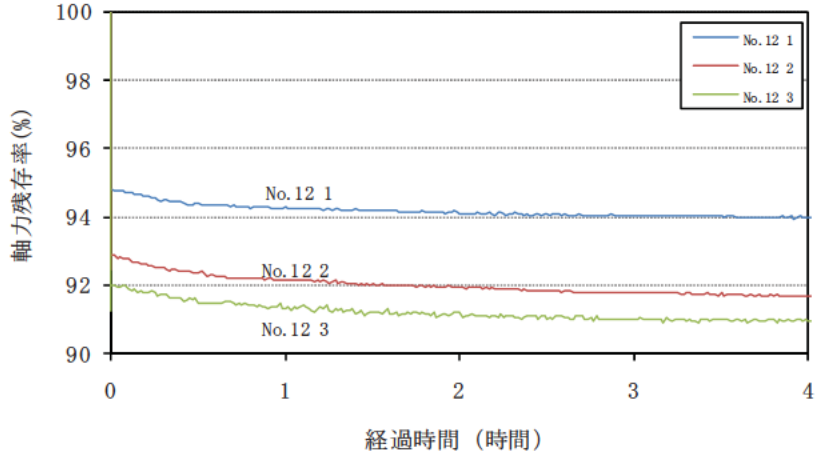


（l-2）試験体 No.11（拡大図）

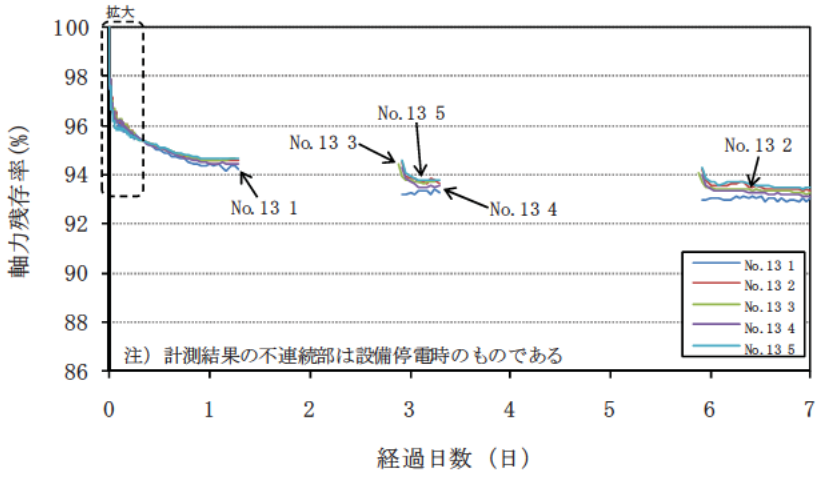
図-3.5.4　第 1 ボルトの軸ひずみの経時変化（続き）



（m-1）試験体 No.12（全体図）

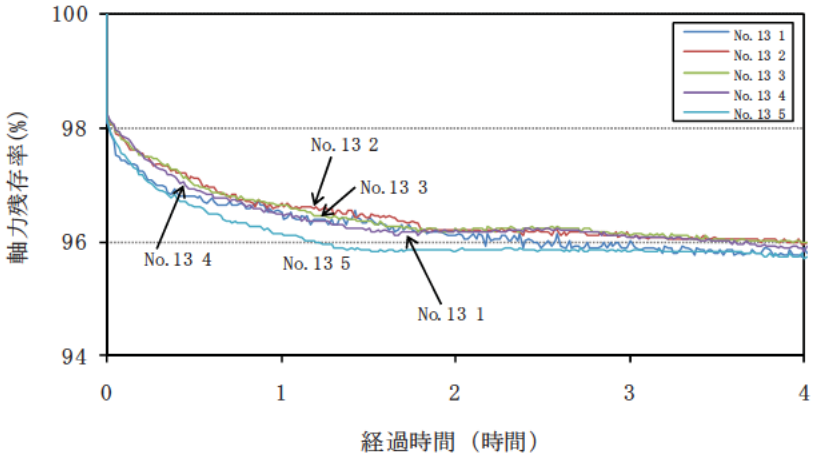


（m-2）試験体 No.12（拡大図）

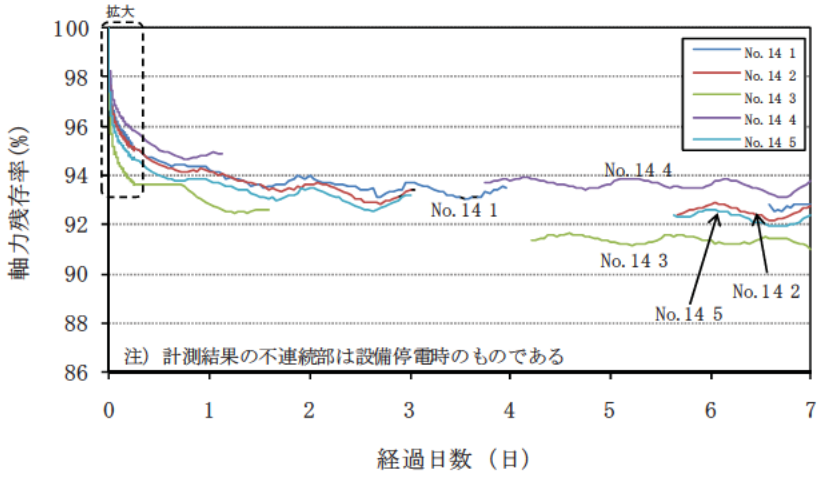


（n-1）試験体 No.13（全体図）

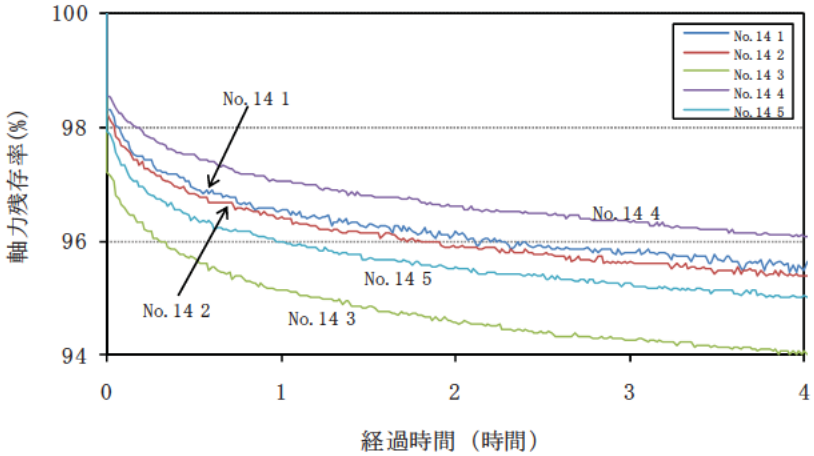
図-3.5.4　第 1 ボルトの軸ひずみの経時変化（続き）



（n-2）試験体 No.13（拡大図）

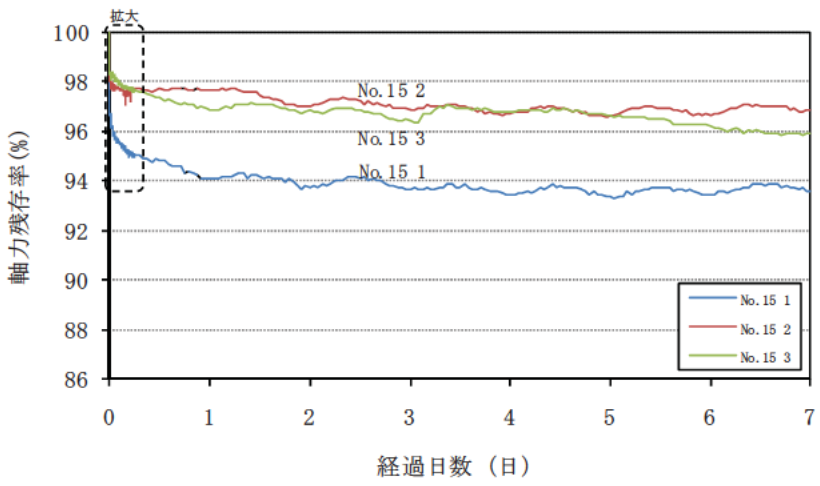


（o-1）試験体 No.14（全体図）

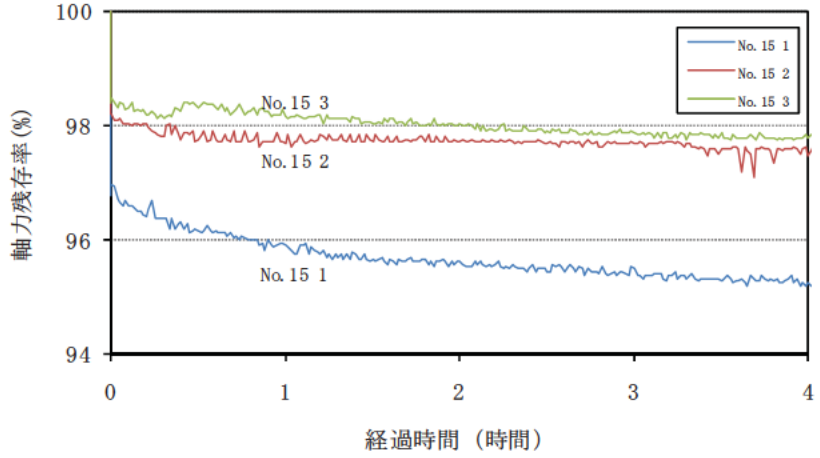


（o-2）試験体 No.14（拡大図）

図-3.5.4　第 1 ボルトの軸ひずみの経時変化（続き）



（p-1）試験体 No.15（全体図）



（p-2）試験体 No.15（拡大図）

図-3.5.4　第 1 ボルトの軸ひずみの経時変化（続き）

3.6　材料強度試験結果

表-3.6.1 に，材料強度試験結果を示す。また，表-3.6.2 に材料強度試験結果とミルシートを比較した結果を示す。材料強度試験により得られた降伏点，引張強さ，伸びは，概ねミルシートと同程度の値であった。

図-3.6.1，図-3.6.2 に材料強度試験片の応力ひずみ関係を示す。板厚 38mm と 75mm とも，それぞれ 3 体ずつ試験を行ったが，いずれも同じような傾向を示した。

表-3.6.1　材料強度試験結果

鋼板の種類	TP No.	最大引張荷重（kN）	降伏荷重（kN）	降伏ひずみ（×10 ^{6}）	引張強さ（N/mm^2）	上降伏点（N/mm^2）	下降伏点（N/mm^2）	弾性係数（kN/mm^2）	ポアソン比	伸び（%）	断面積（mm^2）		絞り（%）
											試験前	試験後	
t=75mm (SM490Y)	1	4928	3439	2141	548	382	363	206.5	0.289	40.0	9001	3675	59.2
	2	4902	3444	2013	549	386	370	208.9	0.285	32.8	8927	3608	59.6
	3	4890	3295	2065	543	366	360	206.5	0.288	32.3	9009	3704	58.9
	平均			2073	546	378	364	207.3	0.287	35.0			59.2
t=38mm (SM490Y)	1	816	583	2242	535	383	376	213.4	0.271	33.0	1525	473	69.0
	2	825	607	2644	541	398	388	213.7	0.271	31.8	1525	447	70.7
	3	811	585	2323	535	386	376	209.6	0.277	30.7	1517	528	65.2
	平均			2403	537	389	380	212.2	0.273	31.8			68.3

注）　引張強さおよび降伏応力の計算には、中央部の断面積を用いた。

表-3.6.2　材料強度試験結果とミルシートの比較

（a）板厚 75mm

	上降伏点（N/mm^2）	引張強さ（N/mm^2）	伸び（%）
材料強度試験結果（平均値）	378	546	35
ミルシート	368	543	36

（b）板厚 38mm

	上降伏点（N/mm^2）	引張強さ（N/mm^2）	伸び（%）
材料強度試験結果（平均値）	389	536	32
ミルシート	410	540	29

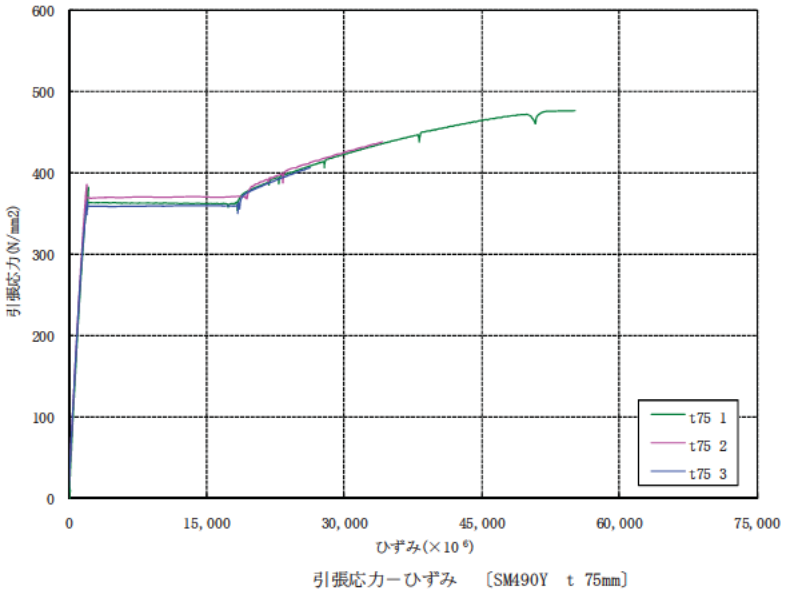


図-3.6.1　材料強度試験片の応力ひずみ関係（板厚 75mm）

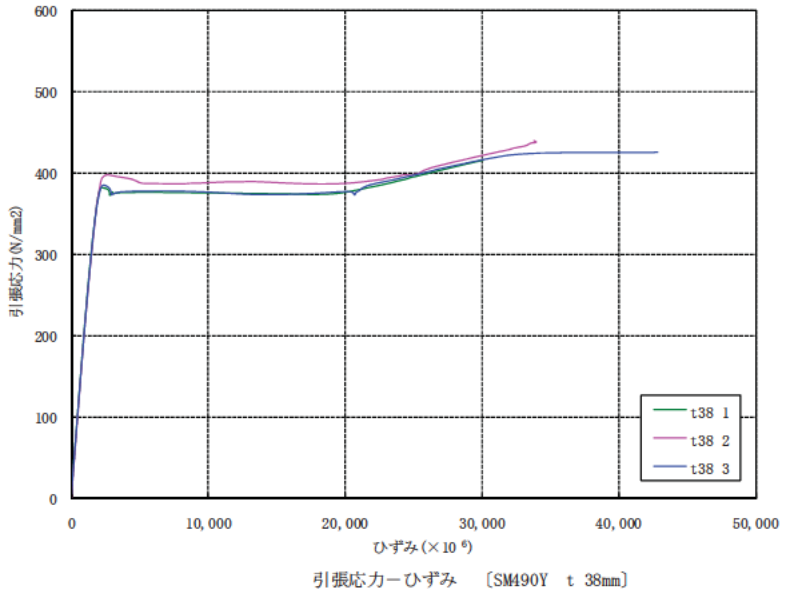


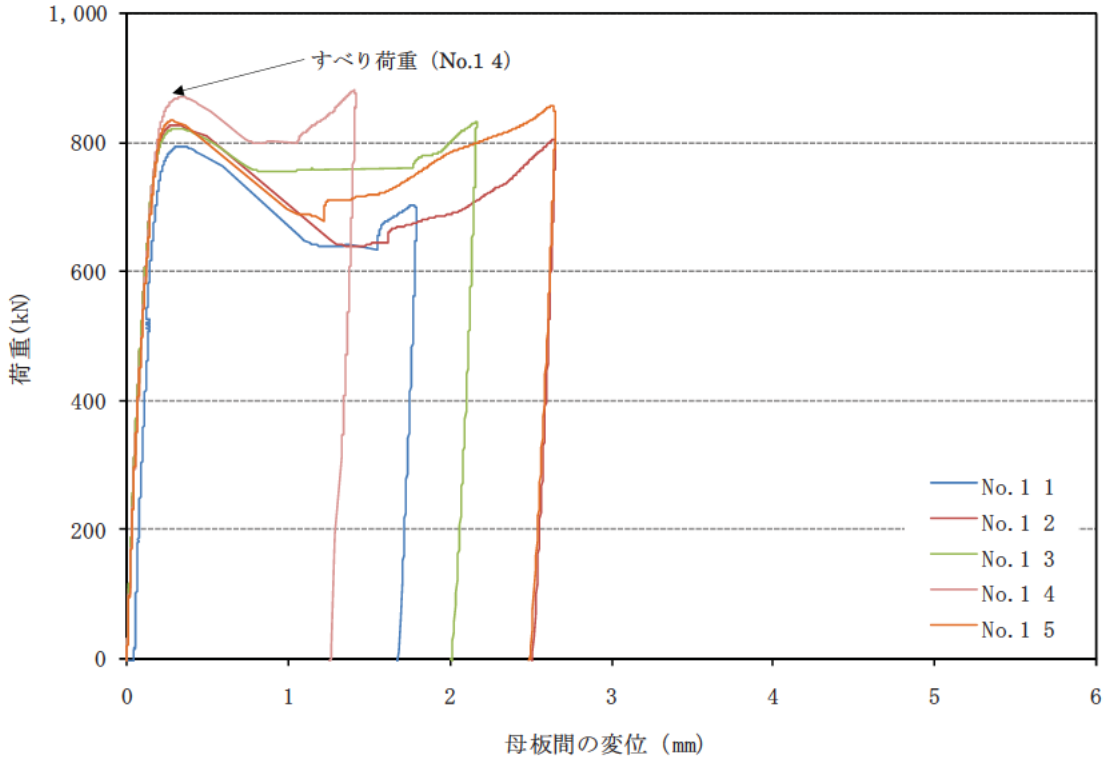
図-3.6.2　材料強度試験片の応力ひずみ関係（板厚 38mm）

3.7　すべり耐力試験結果

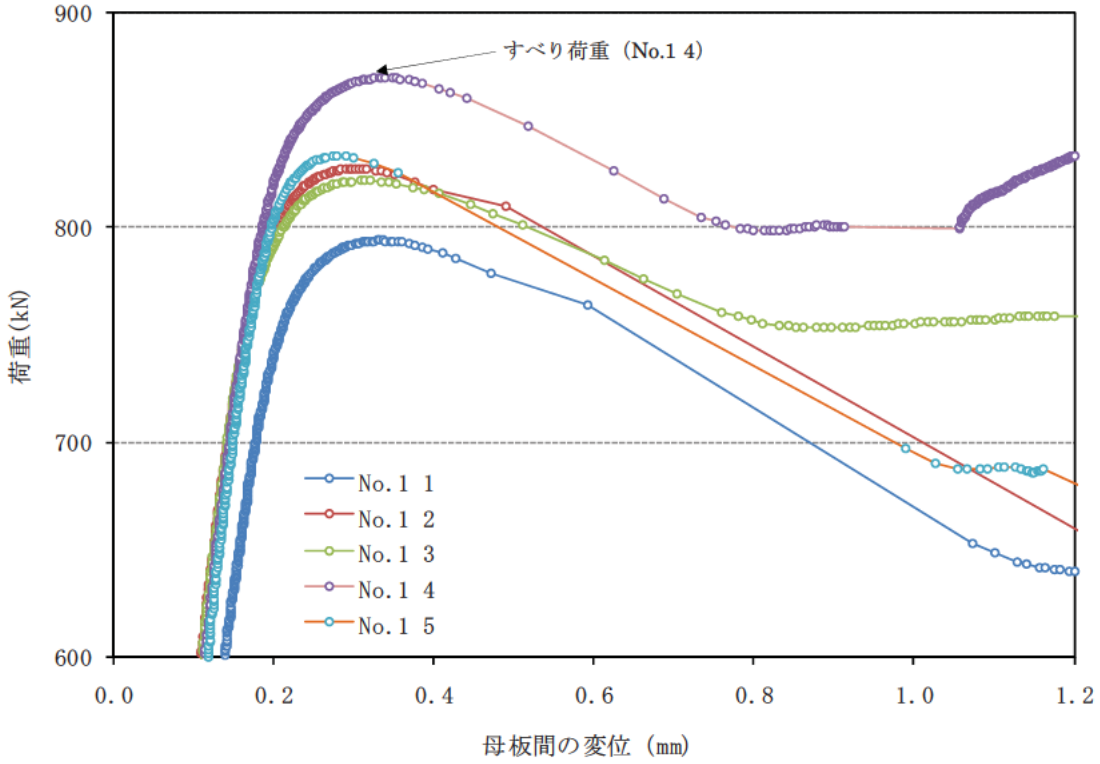
3.7.1　荷重－変位関係

図-3.7.1 に各試験体の荷重と変位の関係を示す。荷重とは試験機における引張荷重であり，母板間の変位（以下，変位）とは，すべり側の母板と非すべり側の母板の間に設置したクリップゲージにより計測した母板間距離の変化量である。いずれの試験体においても，はじめは荷重と変位は線形関係にあるが，試験体 No.1～No.14 では，ある荷重に達すると変位だけが次第に大きくなり，それ以上荷重が増加しない状態となると，荷重が急激に低下するとともに，変位が急激に増加している。試験体 No.15 では，荷重と変位が線形関係でなくなった後に，緩やかに変位が増大し，変位が 4～5mm となる点で，荷重が最大となり，その後荷重が低下する傾向がみられる。ここでは，荷重が増加しなくなり，変位が急激に増加する状態をすべりが生じた状態とする。また，この時の最大荷重をすべり荷重とする。ただし，試験体 No.15 については，明確なすべり現象が見られなかったため，荷重が最大となったときの値をすべり耐力としている。なお，試験体 No.15 は，引張荷重の増加に伴って母板間の変位が大きくなり，試験中にクリップゲージが外れてしまったため，図中では計測できた範囲の結果のみを示している。

一般的に，すべり耐力試験では，すべり時に大きな音が生じ，荷重が急激に低下する挙動を示すとされている。しかし，今回の試験では，音が生じる場合と生じない場合があり，ボルト 3 列の試験体では音が生じるケースは少ない傾向がみられた。

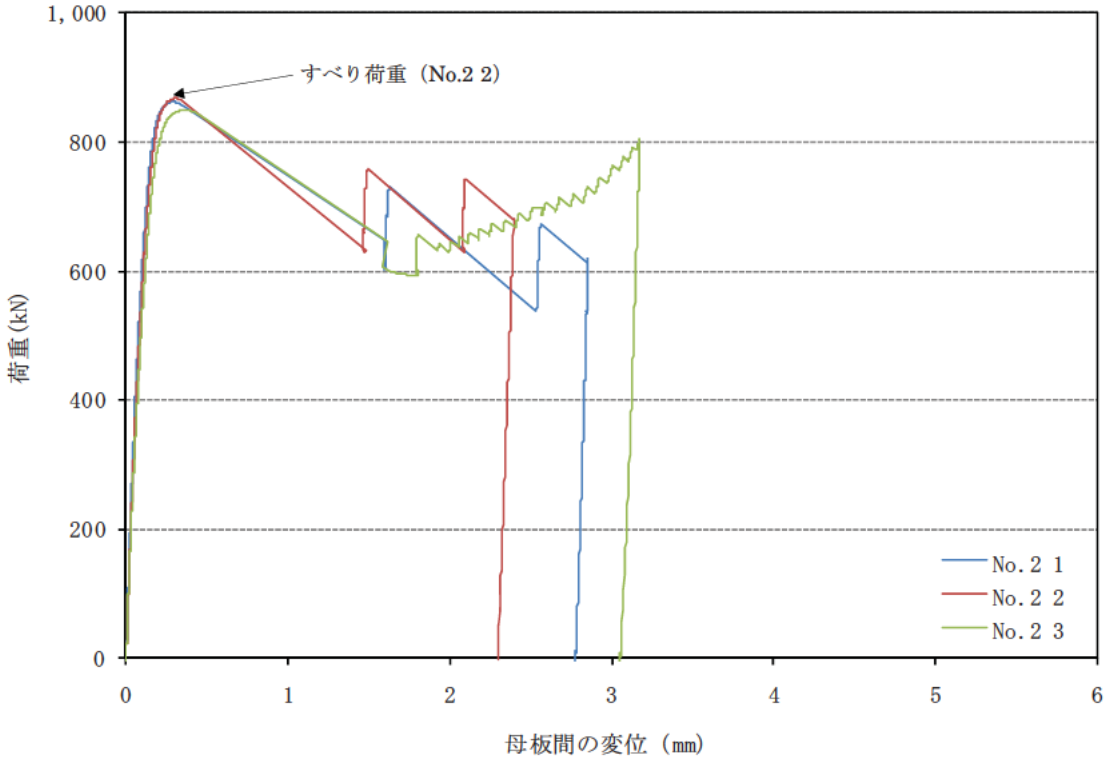


（a-1）No.1（全体図）

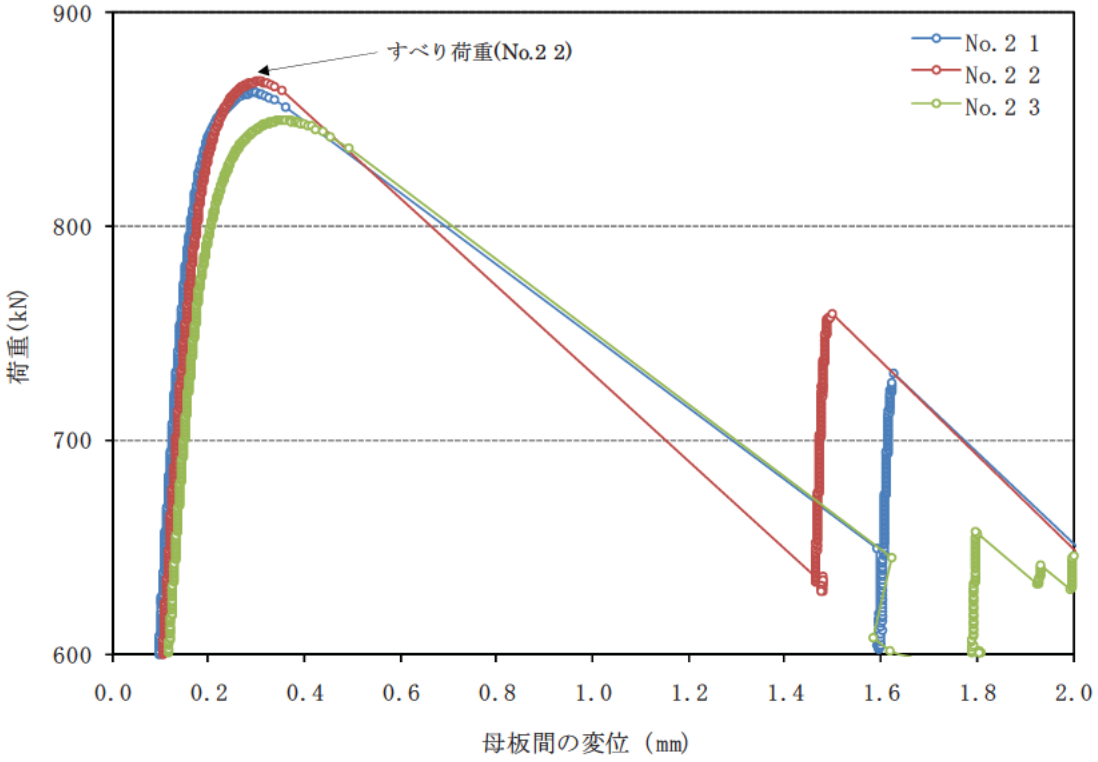


（a-2）No.1（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係

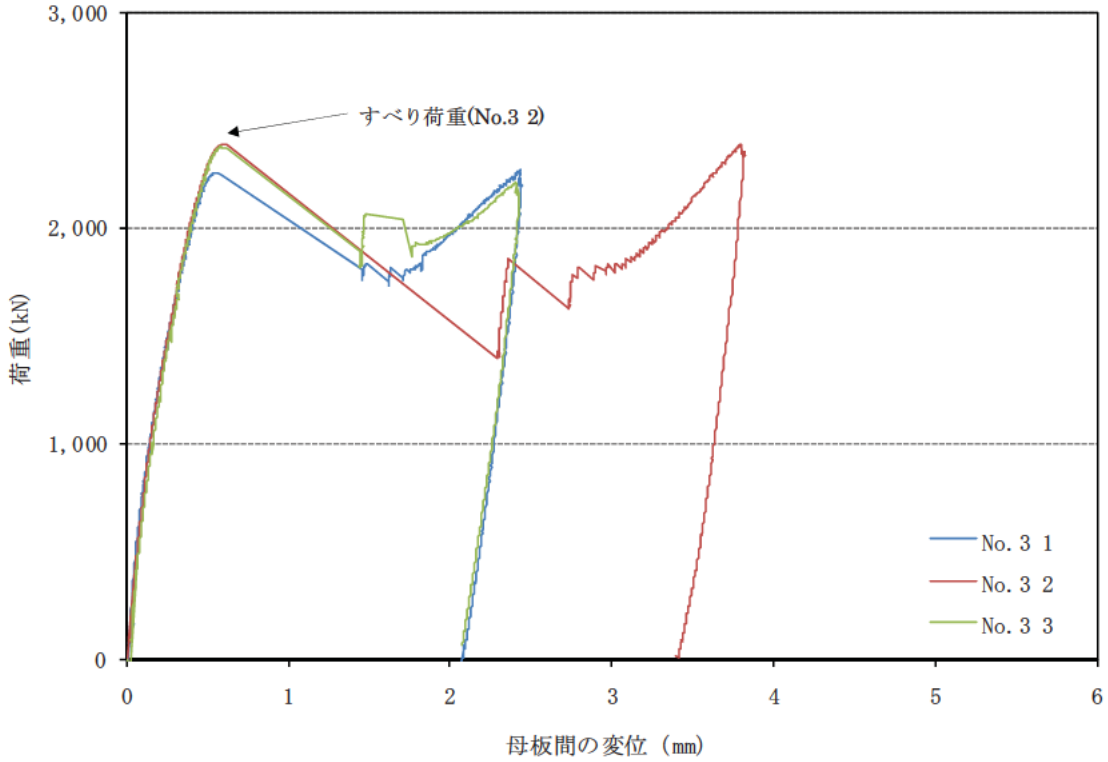


（b-1）No.2（全体図）

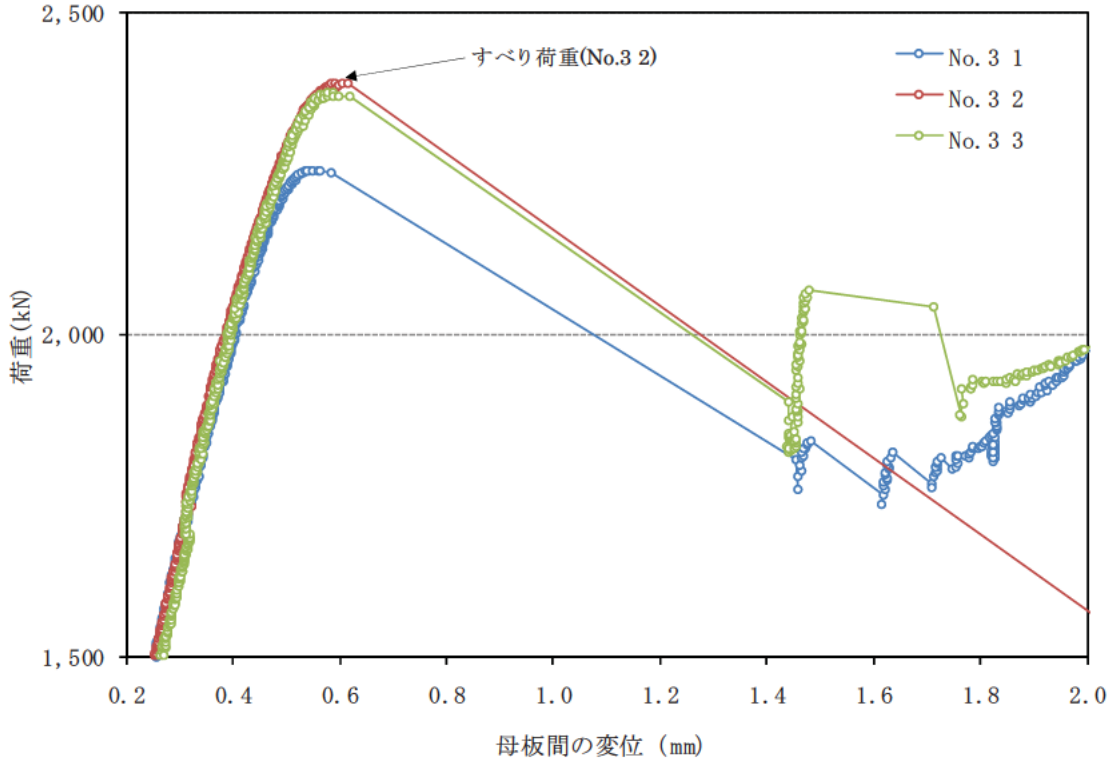


（b-2）No.2（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

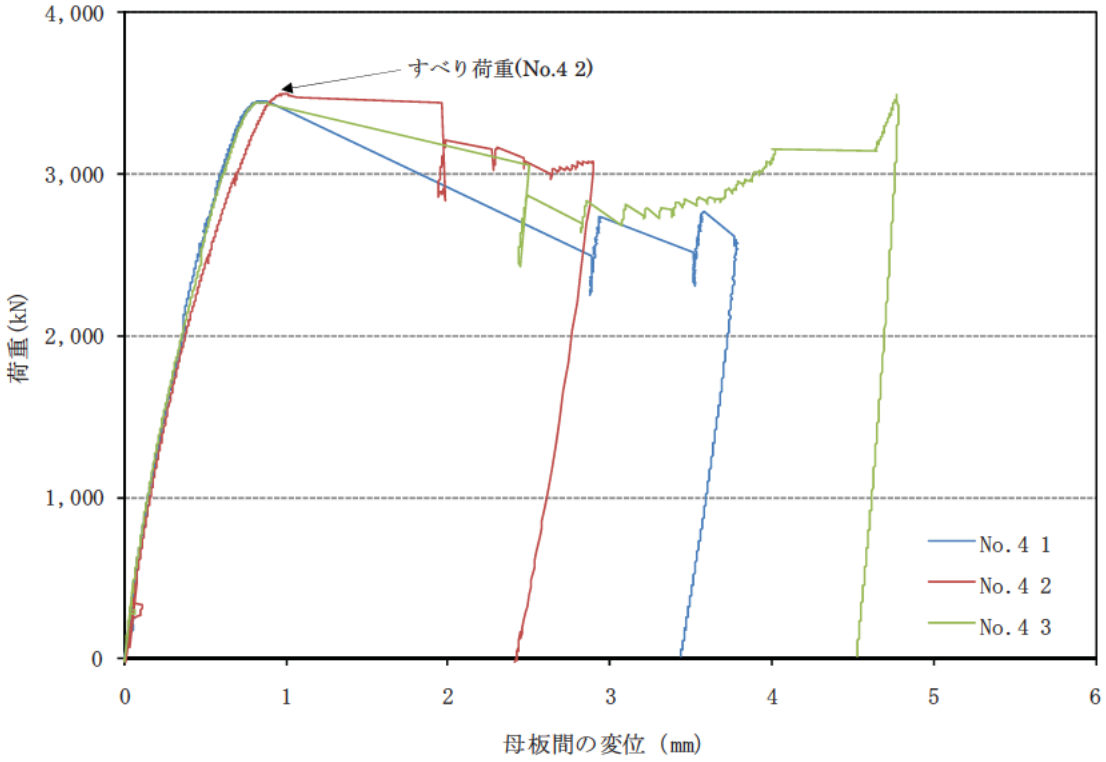


（c-1）No.3（全体図）

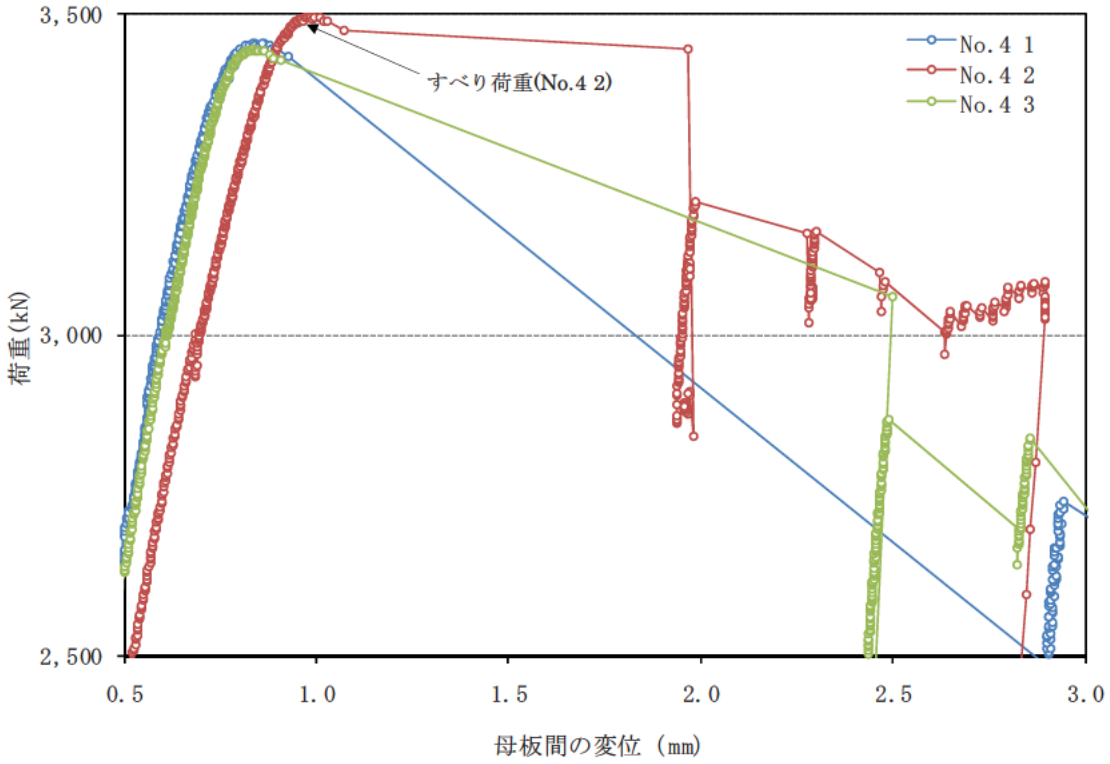


（c-2）No.3（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

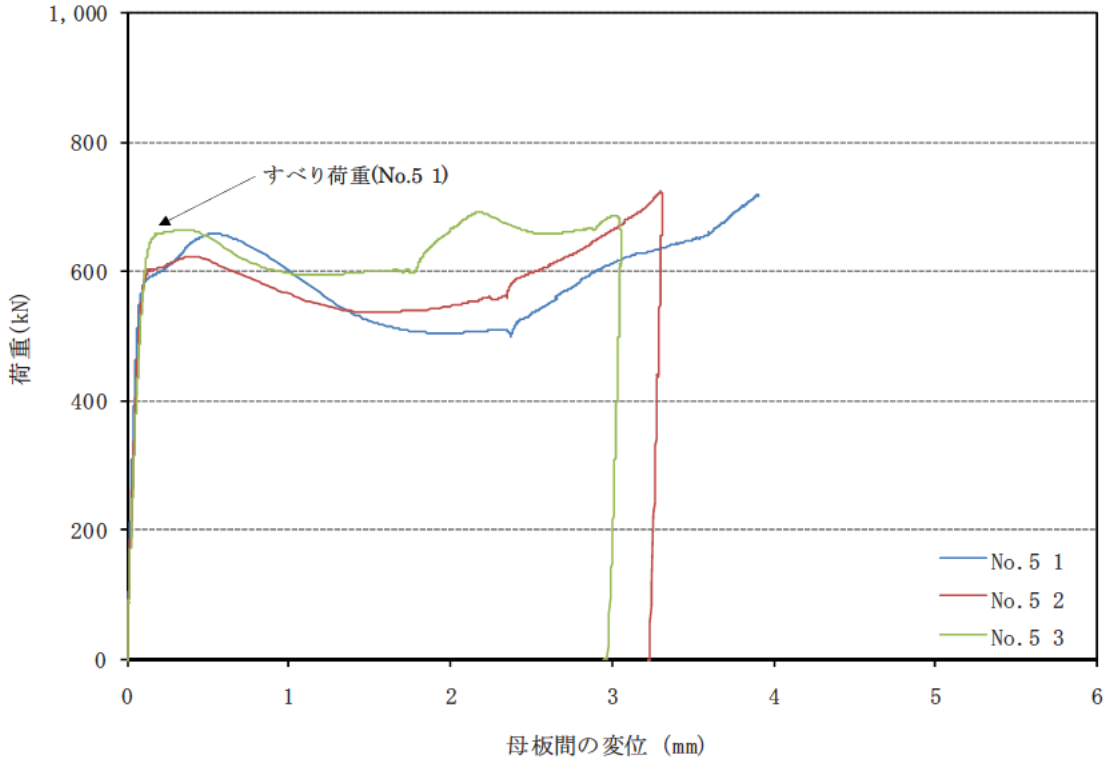


（d-1）No.4（全体図）

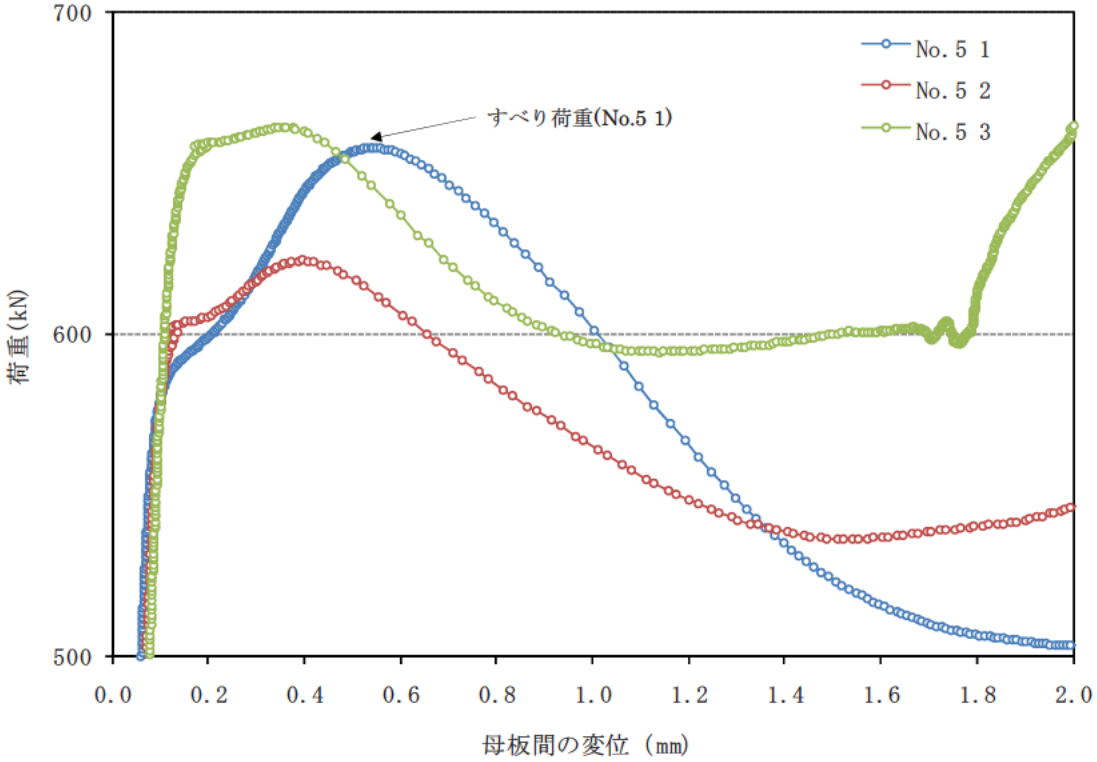


（d-2）No.4（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

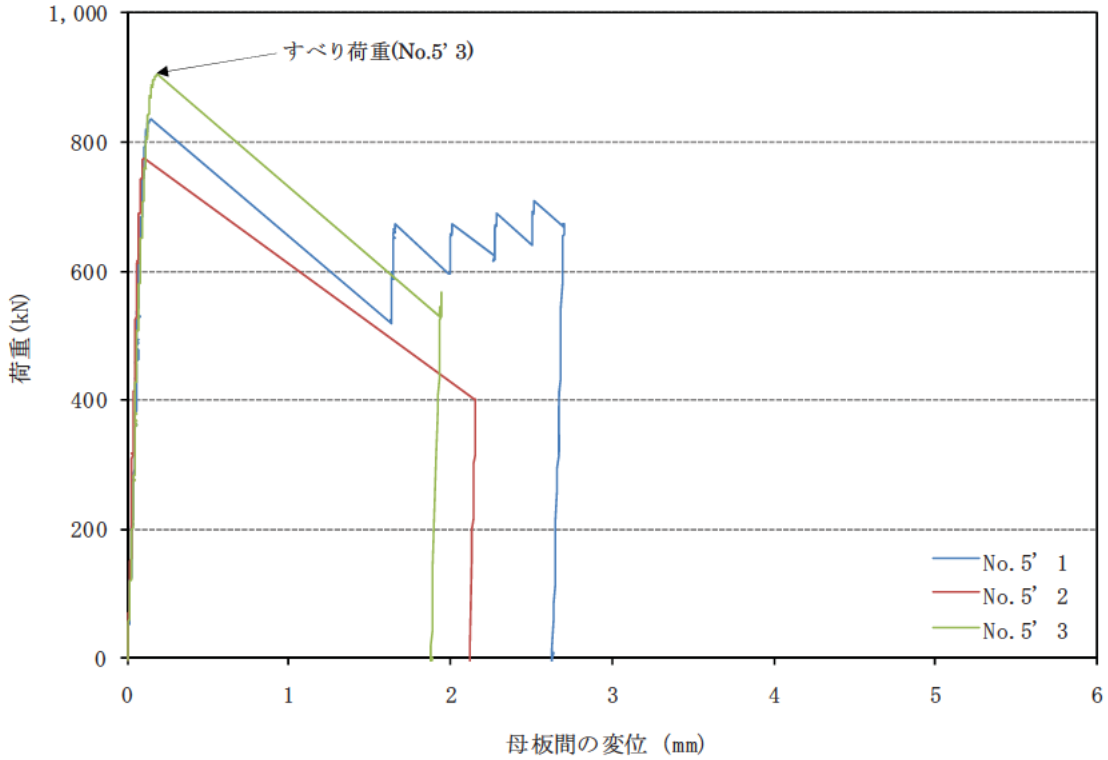


（e-1）No.5（全体図）

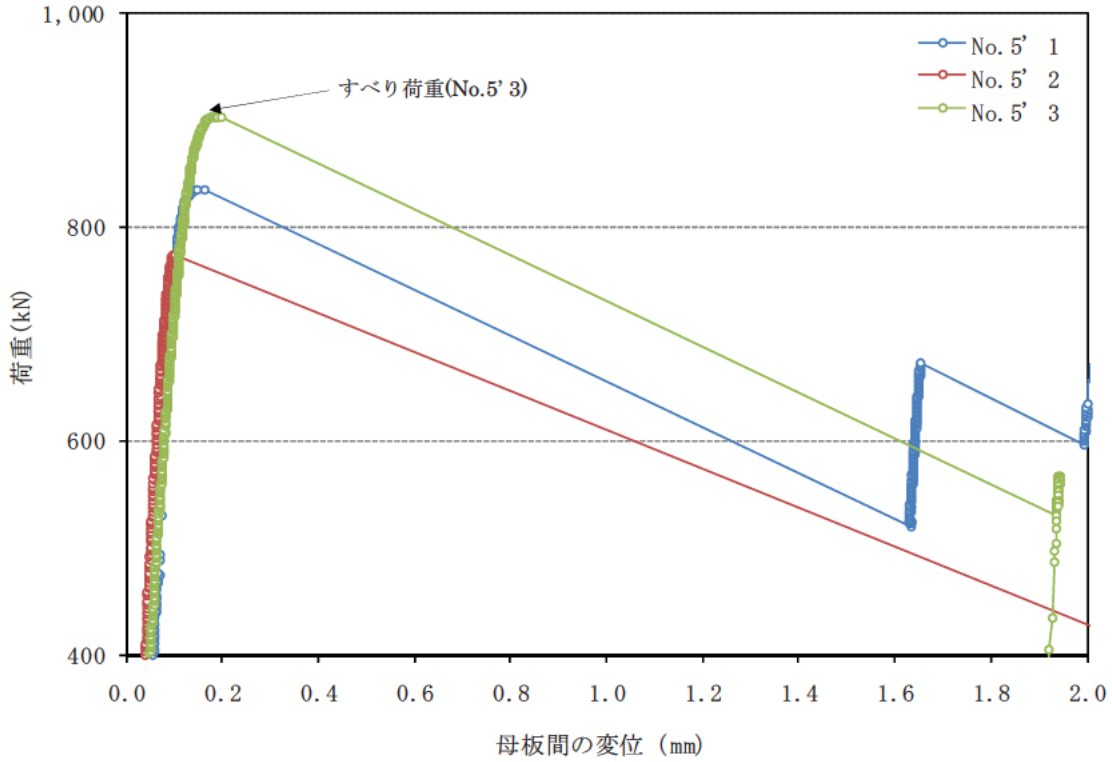


（e-2）No.5（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

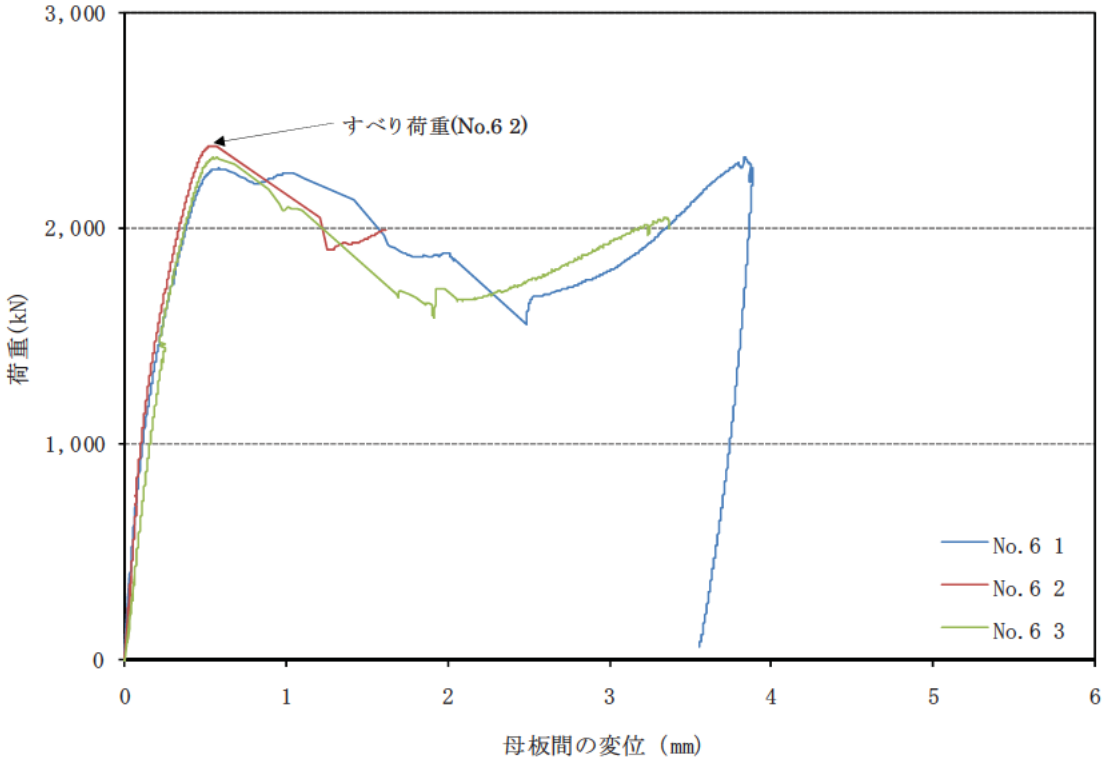


（f-1）No.5'（全体図）

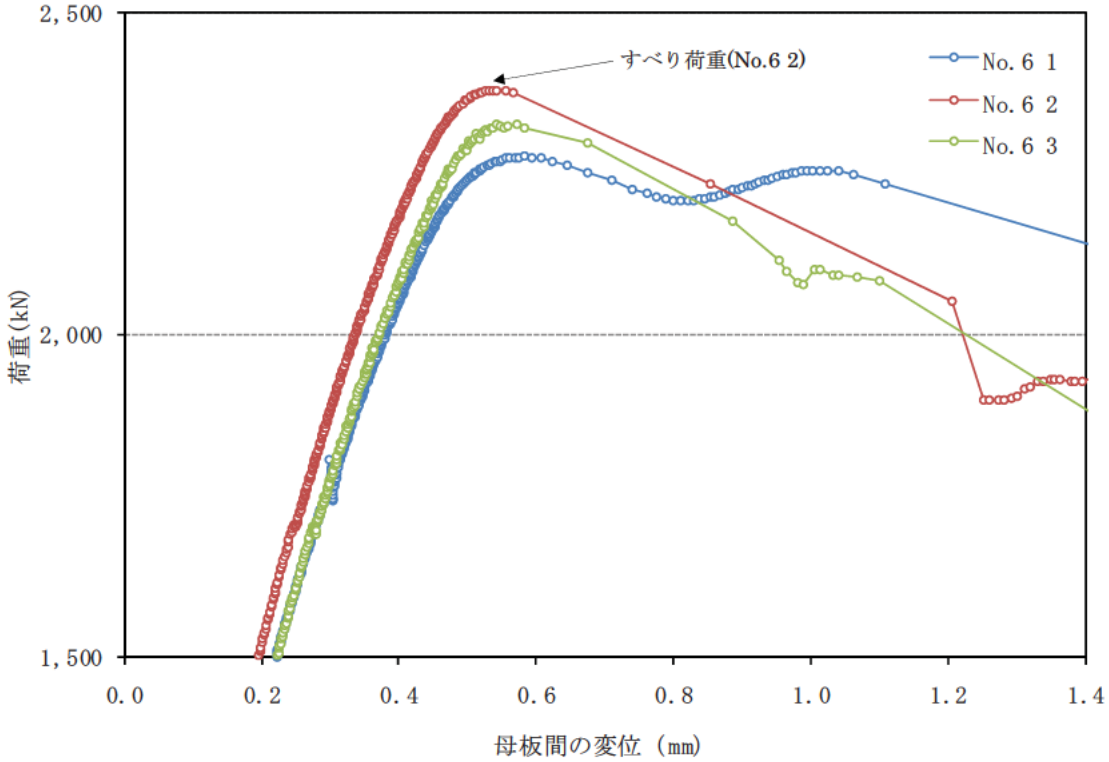


（f-2）No.5'（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

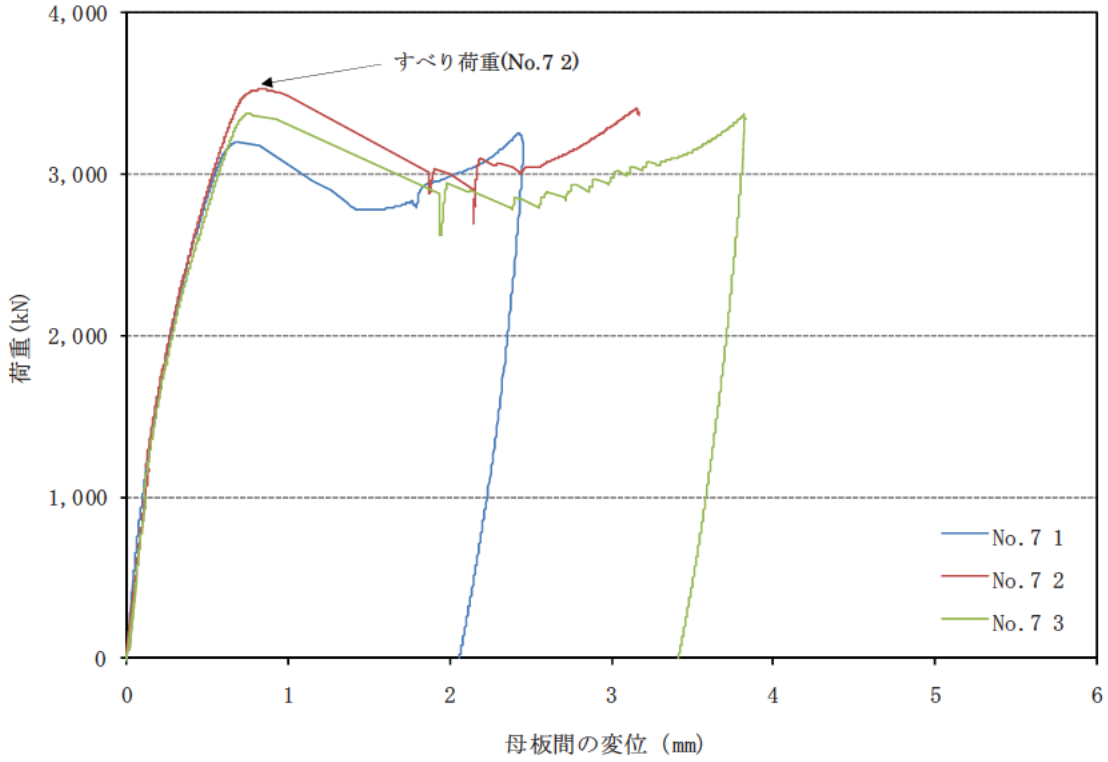


（g-1）No.6（全体図）

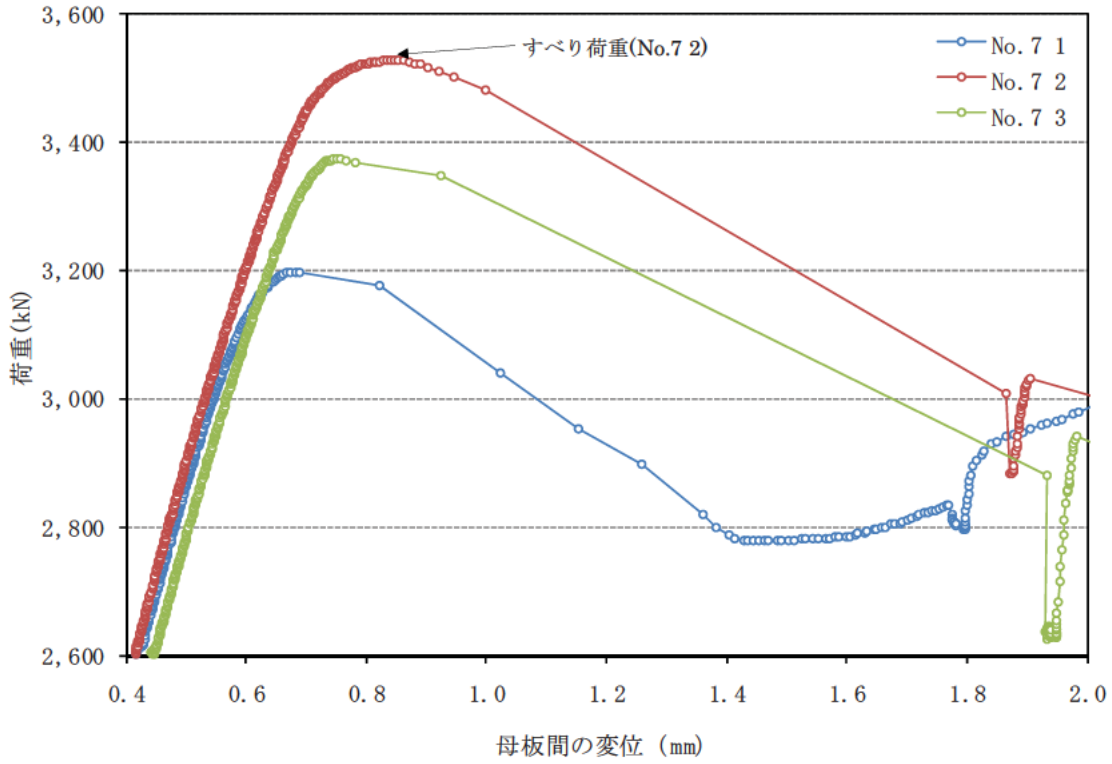


（g-2）No.6（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

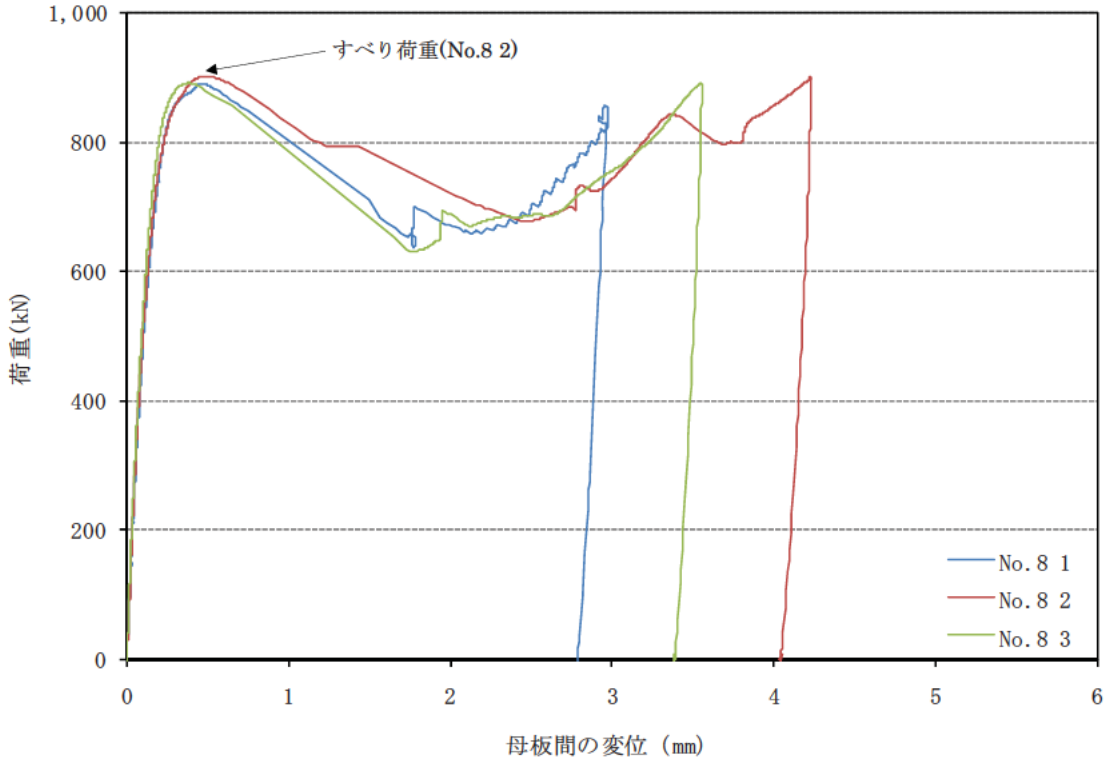


（h-1）No.7（全体図）

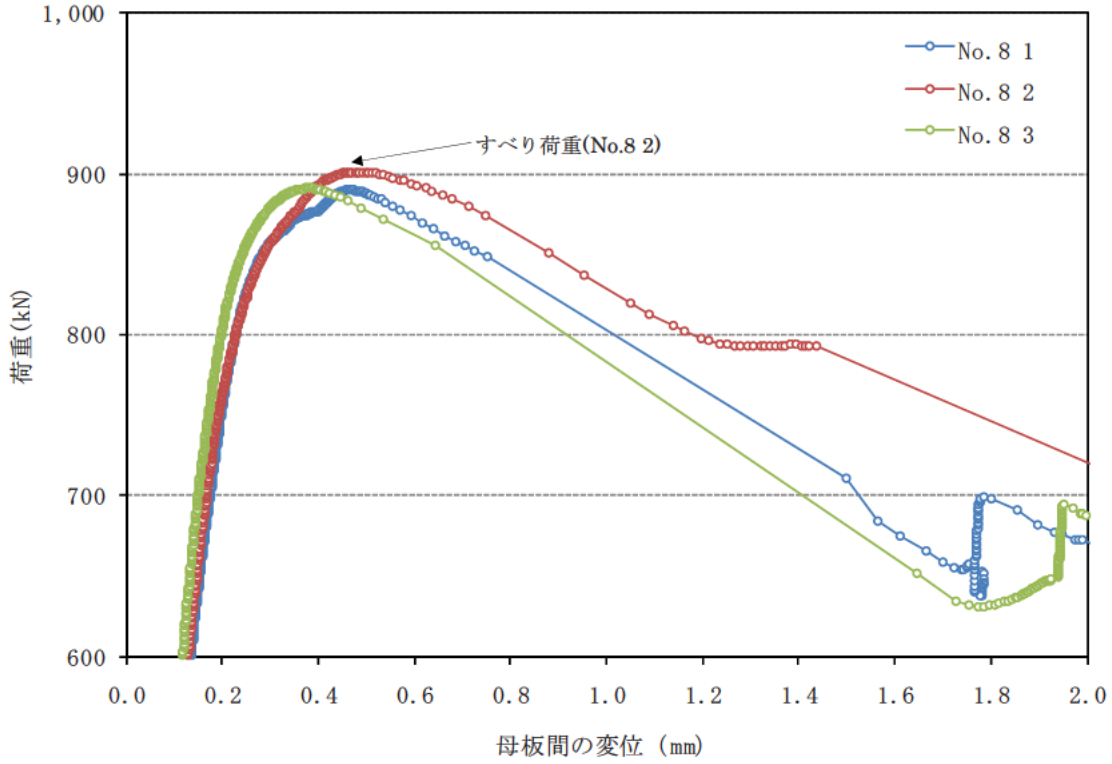


（h-2）No.7（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

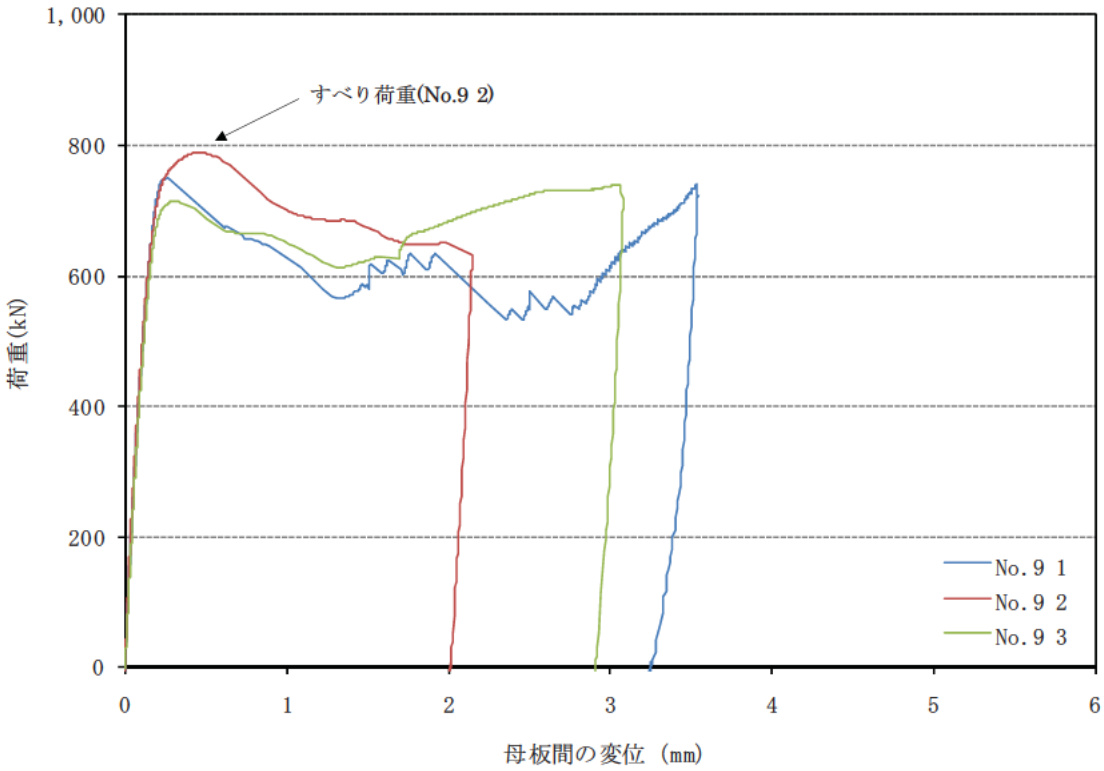


（i-1） No.8（全体図）

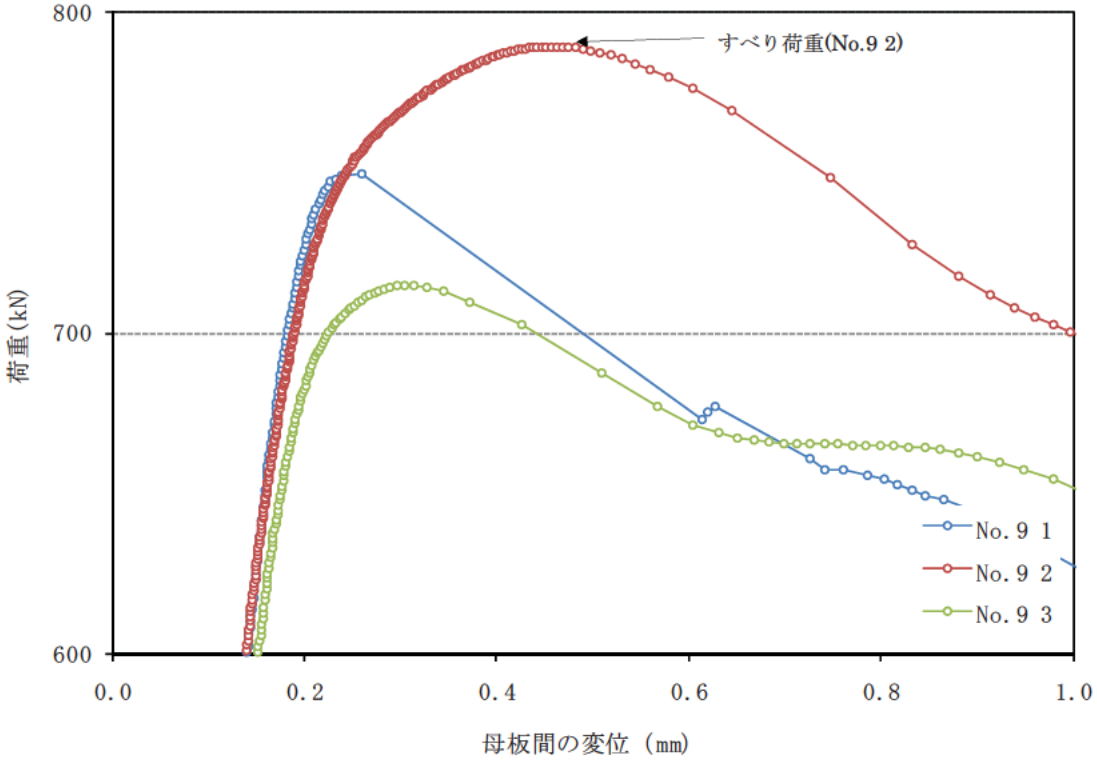


（i-2） No.8（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

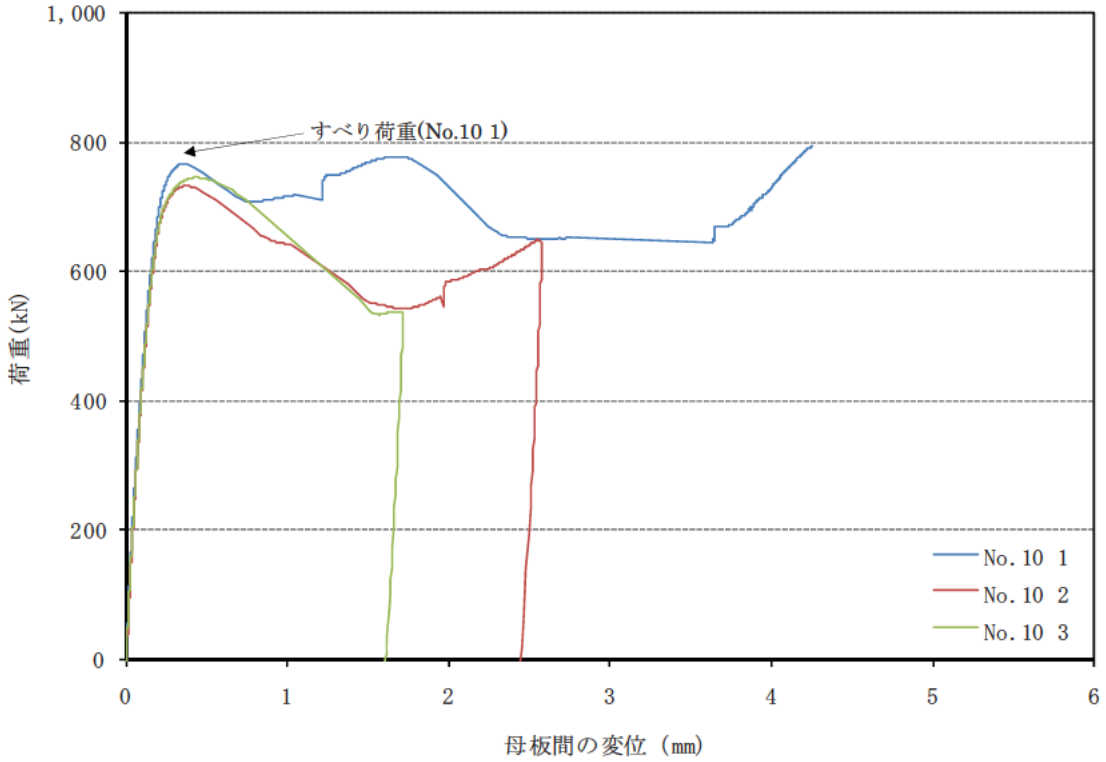


(j-1) No.9（全体図）

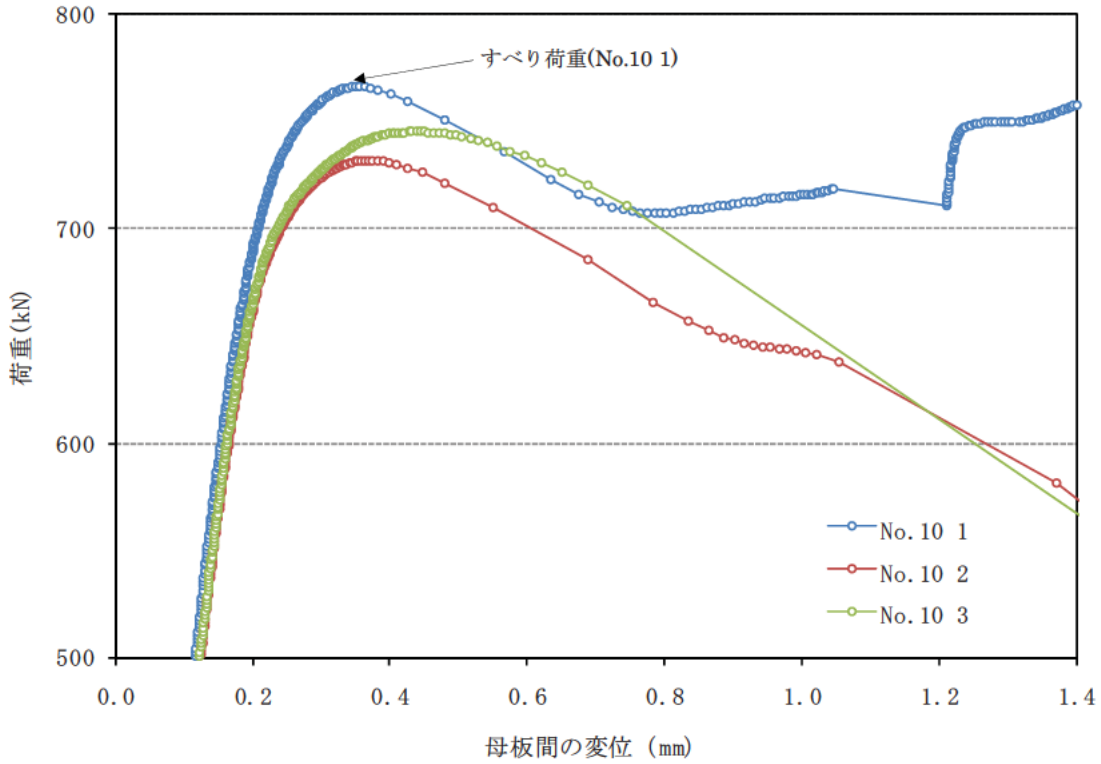


(j-2) No.9（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

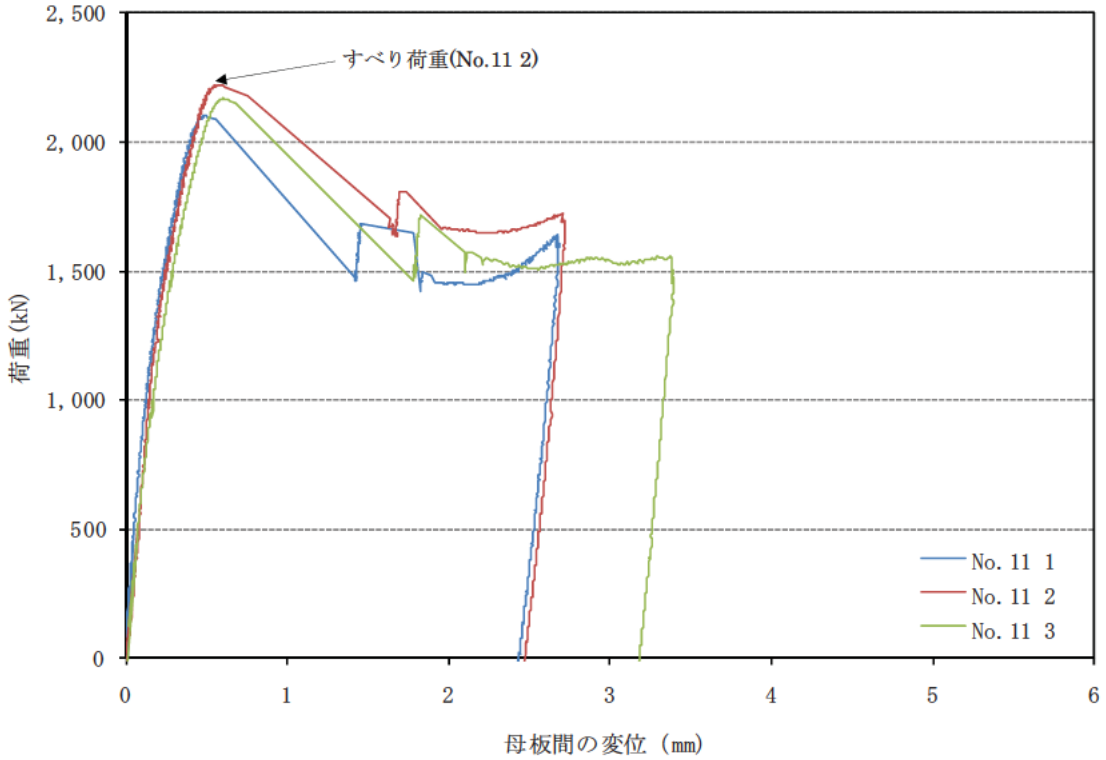


（k-1）No.10（全体図）

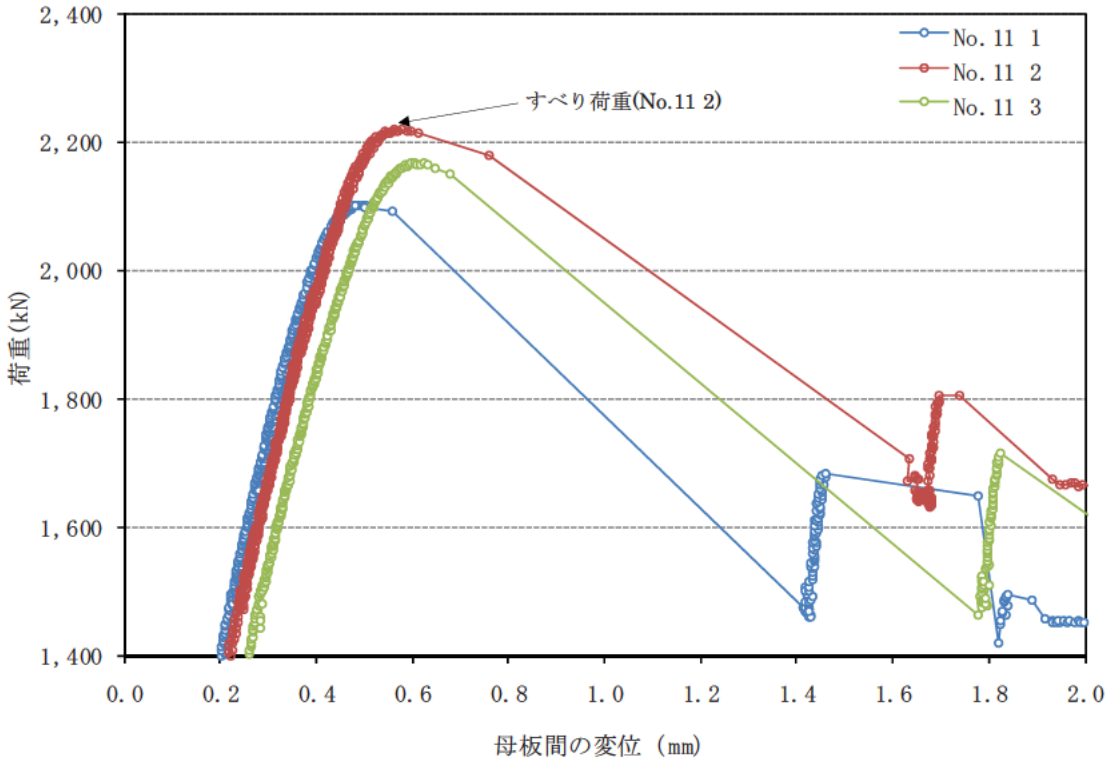


（k-2）No.10（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

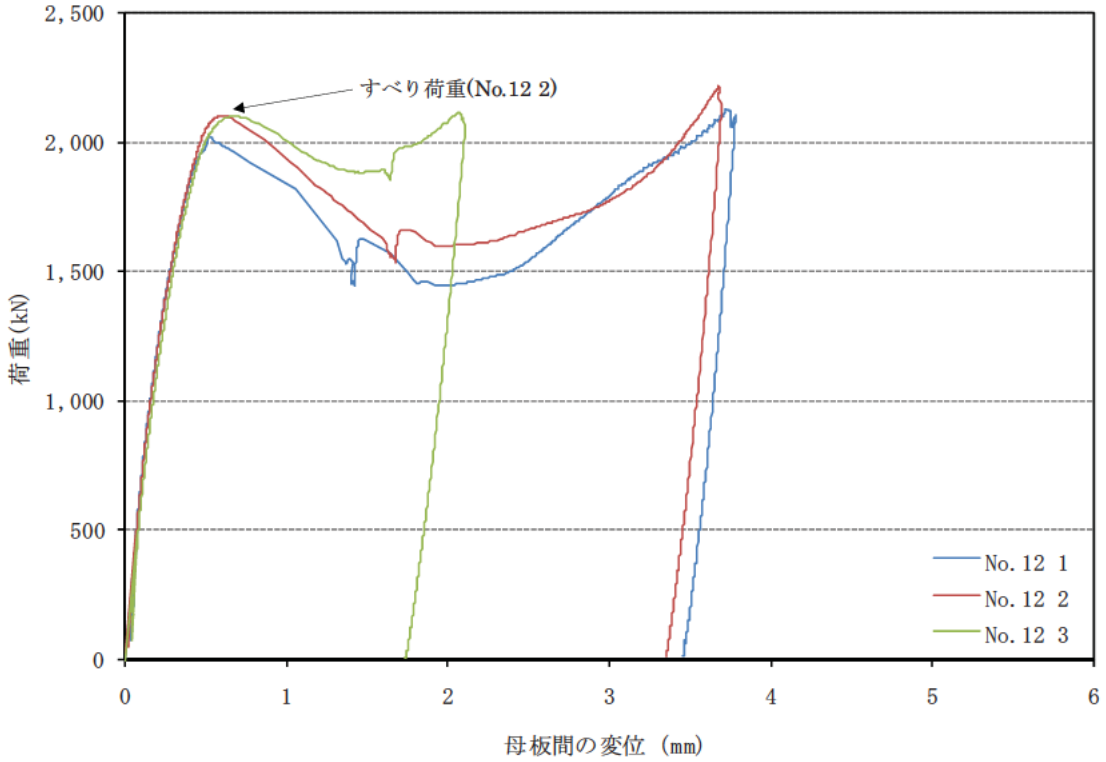


(l-1) No.11（全体図）

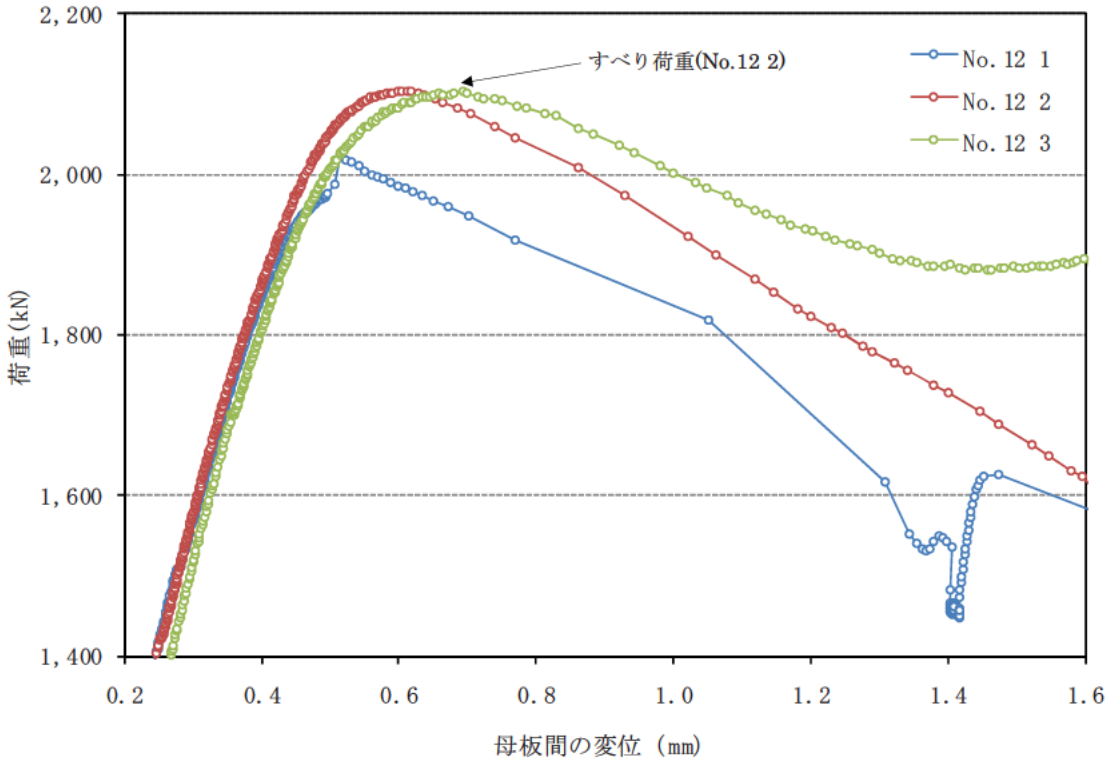


(l-2) No.11（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

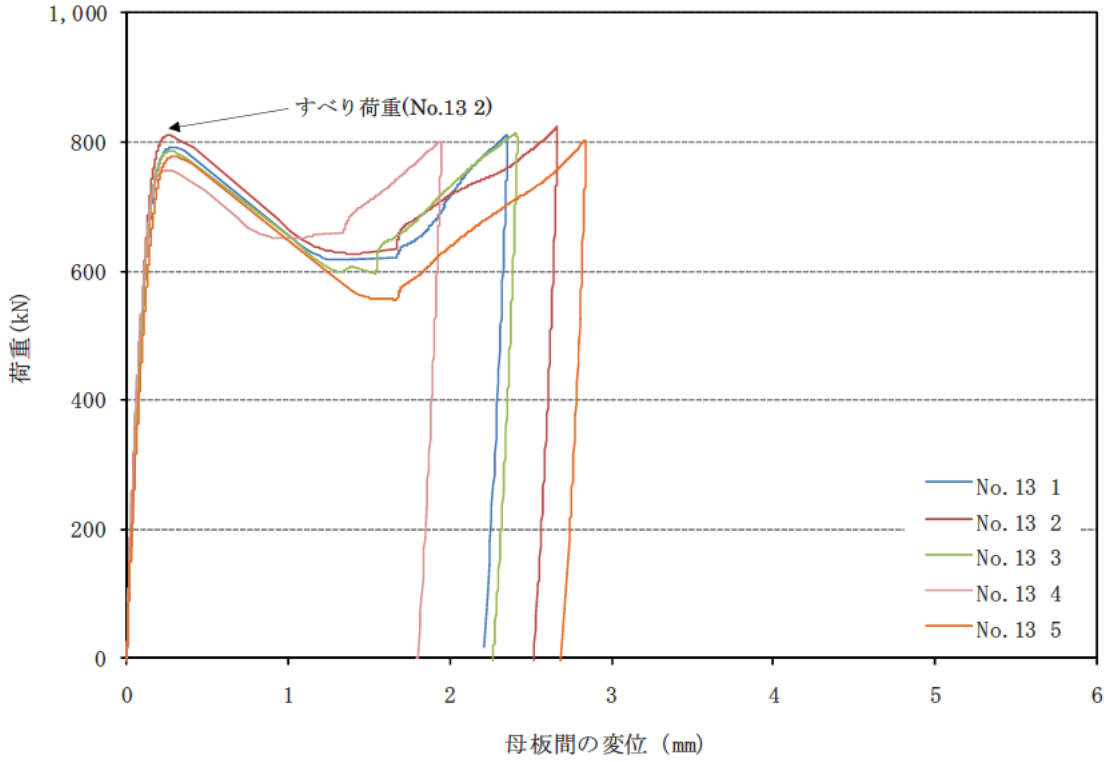


（m-1）No.12（全体図）

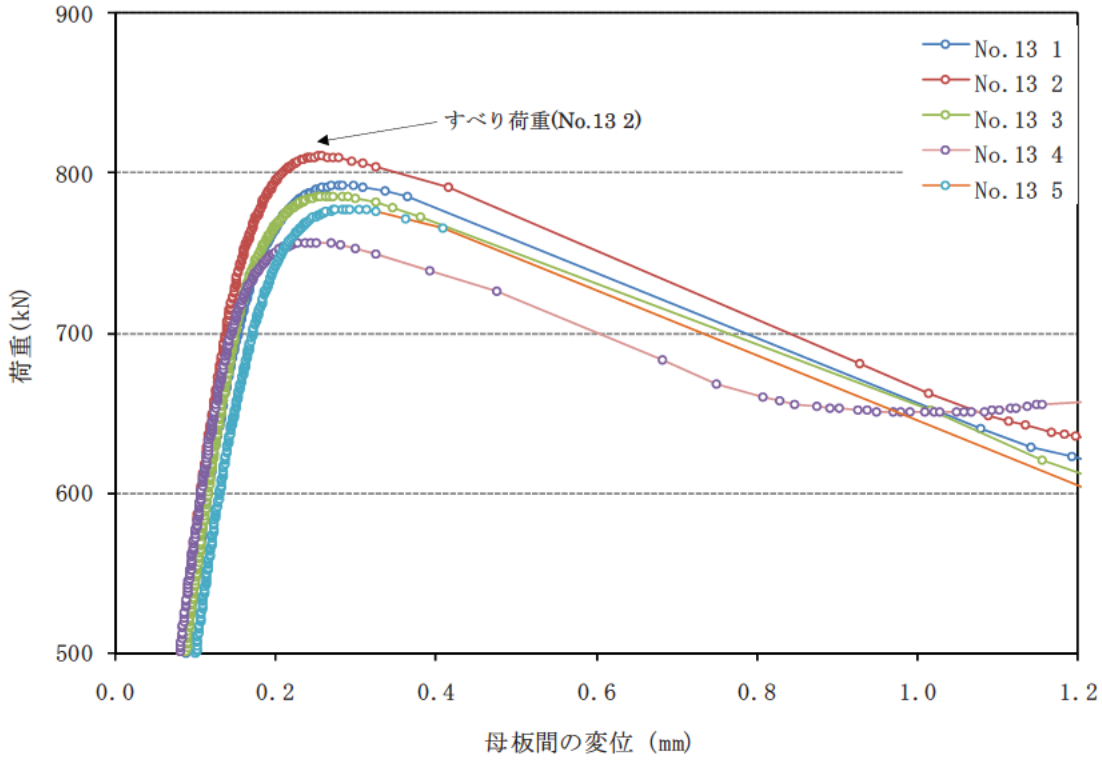


（m-2）No.12（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

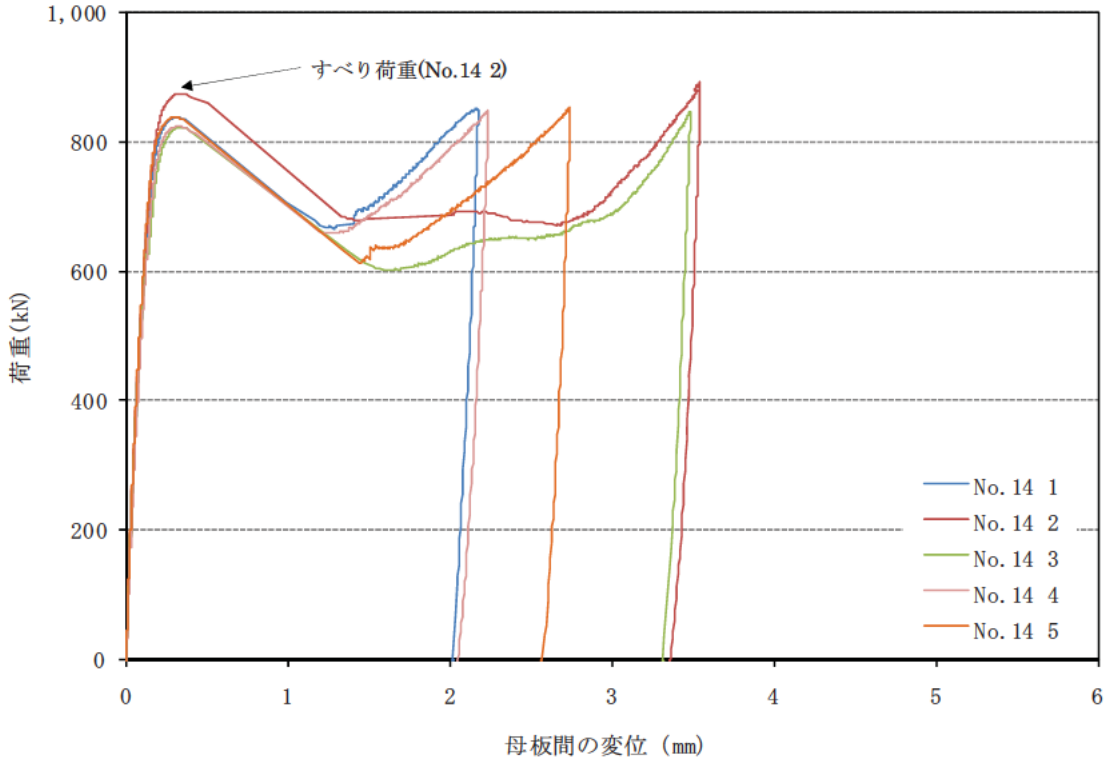


（n-1） No.13（全体図）

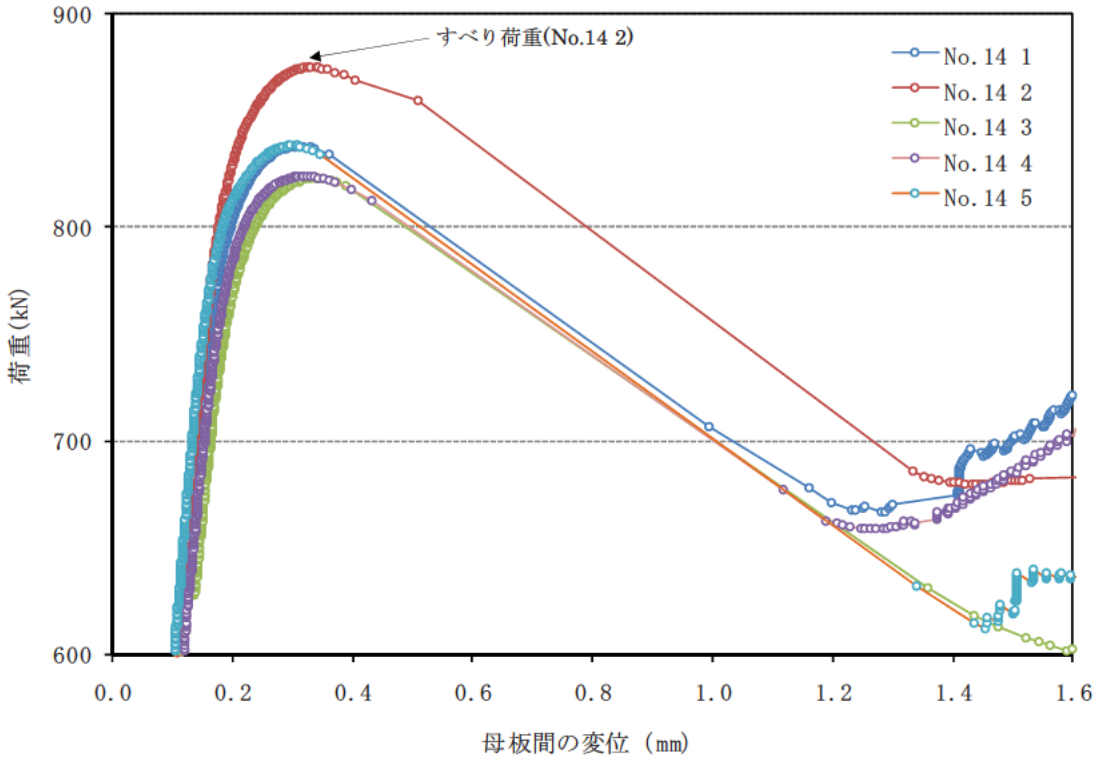


（n-2） No.13（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

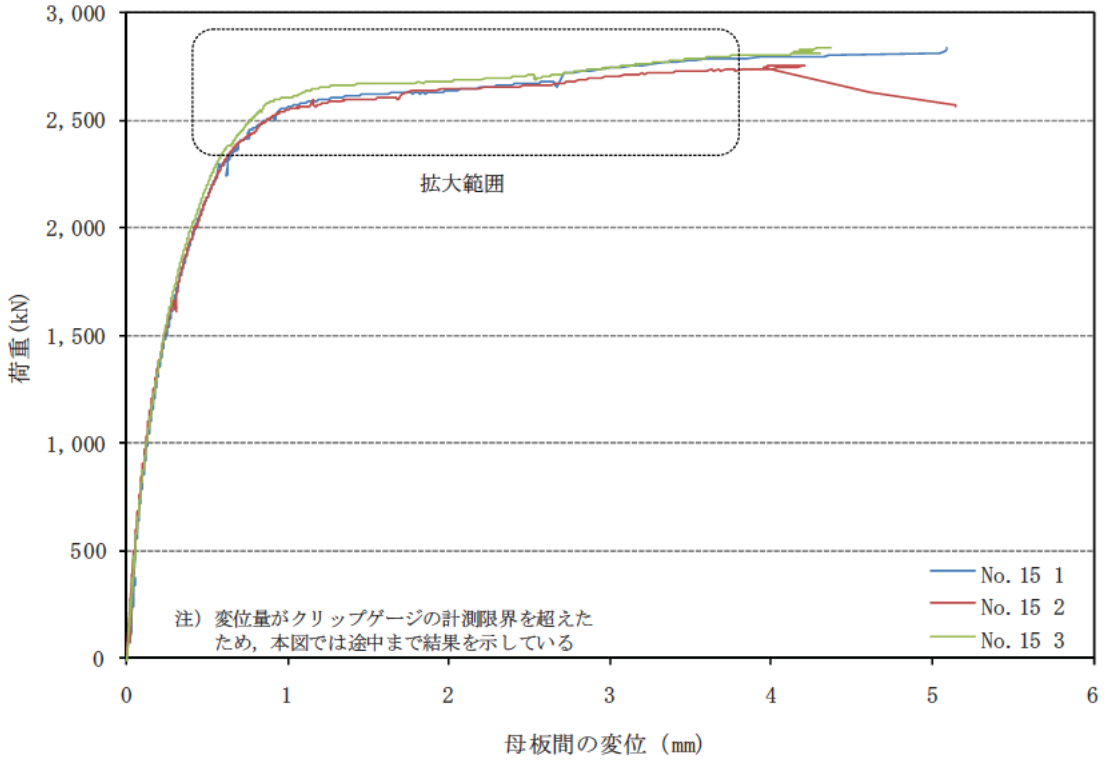


（o-1） No.14（全体図）

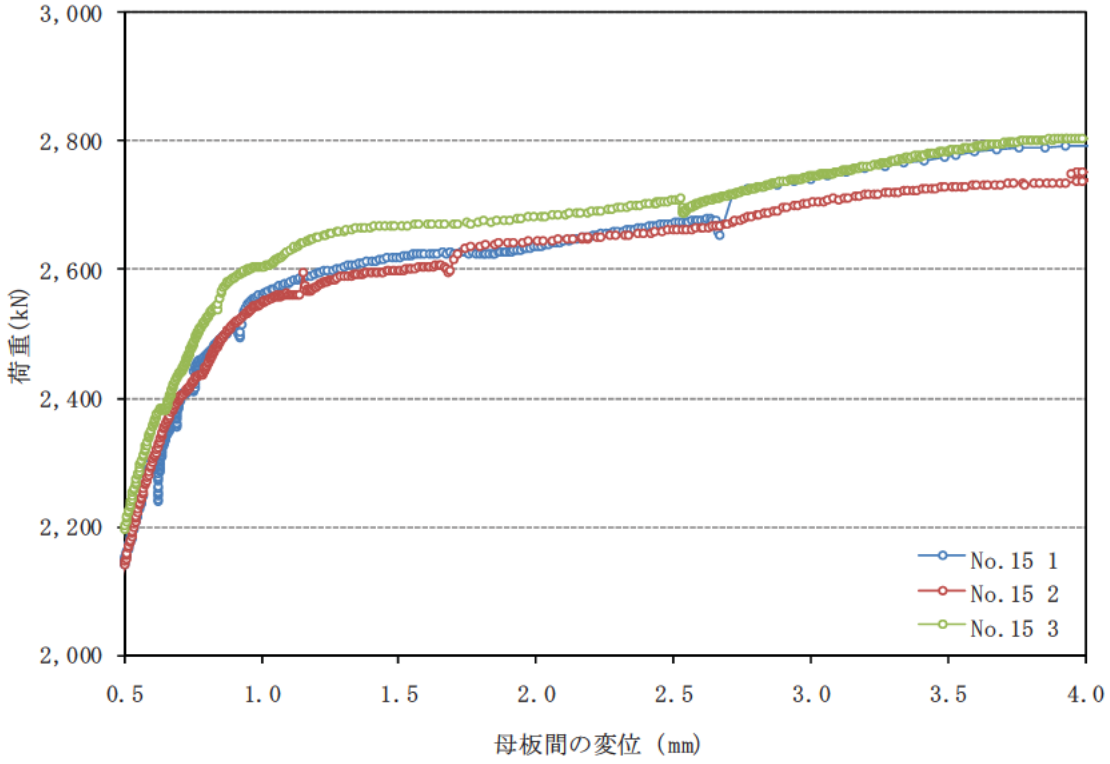


（o-2） No.14（すべり荷重近傍の拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）



（p-1）No.15（全体図）



（p-2）No.15（拡大図）

図-3.7.1　荷重-変位関係（続き）

3.7.2　母板と連結板の相対変位

表-3.7.1 に，継手の内側，中央，外側における母板と連結板間の相対変位の平均値を示す。ここで，すべり荷重時の平均値とは，同一形状の試験体のすべり荷重を平均したものであり，試験体 No.1，試験体 No.13，試験体 No.14 は 5 体平均，その他は 3 体平均である。また，相対変位の平均値とは，クリップゲージを用いて計測した母板と連結板の間の相対変位で，こちらもすべり荷重と同様に同一形状の試験体の相対変位を平均化したものである。各計測位置の名称は，図-3.7.2，図-3.7.3 に示す通りである。フィラープレートを使用しない試験体（No.1，2，3，4，5，5’，6，7，11，12，13，14，15）では，各位置の相対変位は，ボルト頭側（母板と連結板）の相対変位と，ナット側（母板と連結板）の相対変位の平均値である。フィラープレートを使用する試験体（No.8，9，10）では，ボルト頭側（母板と連結板）の相対変位と，ナット側（母板と連結板）の相対変位をそれぞれ分けて示す。

表-3.7.1　すべり荷重時の各試験体の相対変位（平均値，単位：mm）

(a) フィラープレートを使用しない試験体

		荷重 (kN)	内側	中央	外側
基本ケース	No.1	829	0.232	0.215	0.283
	No.2	860	0.202	0.215	0.266
	No.3	2,341	0.334	0.148	0.455
	No.4	3,465	0.558	0.222	0.664
	No.5	648	0.573	0.114	0.650
	No.5’	838	0.072	0.039	0.085
	No.6	2,329	0.253	0.045	0.262
	No.7	3,367	0.434	0.087	0.330
肌すきケース	No.11	2,163	0.337	0.099	0.312
	No.12	2,077	0.430	0.179	0.385
塗膜厚ケース	No.13	785	0.197	0.196	0.258
	No.14	840	0.231	0.198	0.276
母材降伏	No.15	2,941	4.431	0.810	4.722

(b) フィラープレートを使用する試験体

			荷重 (kN)	内側	中央	外側
フィラーケース	No.8	ボルト頭側	894	0.269	0.218	0.193
		ナット側	894	0.198	0.214	0.351
	No.9	ボルト頭側	751	0.285	0.229	0.236
		ナット側	751	0.138	0.089	0.264
	No.10	ボルト頭側	748	0.262	0.218	0.191
		ナット側	748	0.103	0.087	0.221

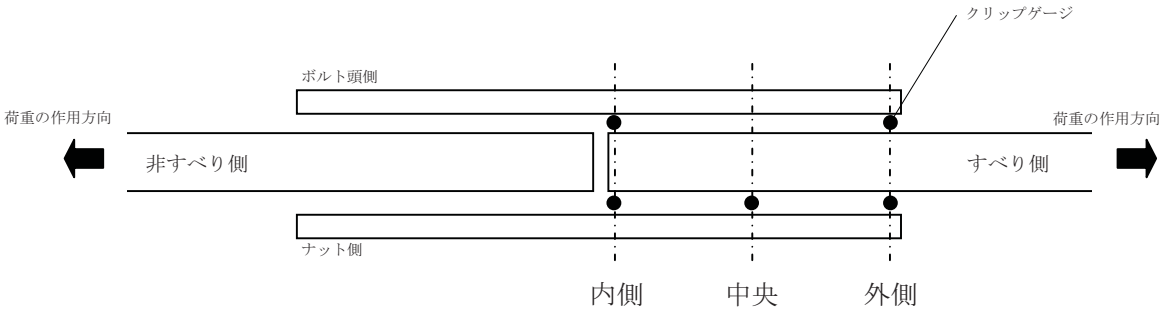


図-3.7.2　計測位置の名称（フィラープレートを使用しない試験体）

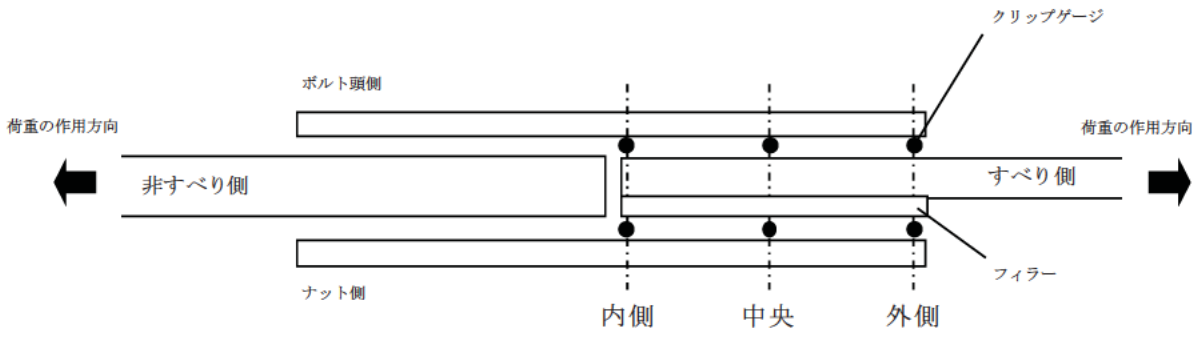
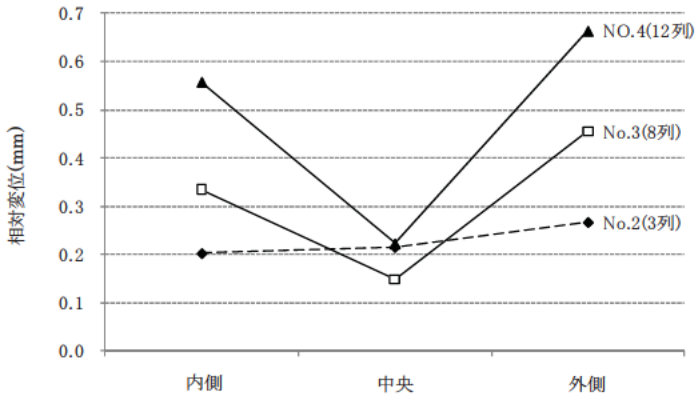


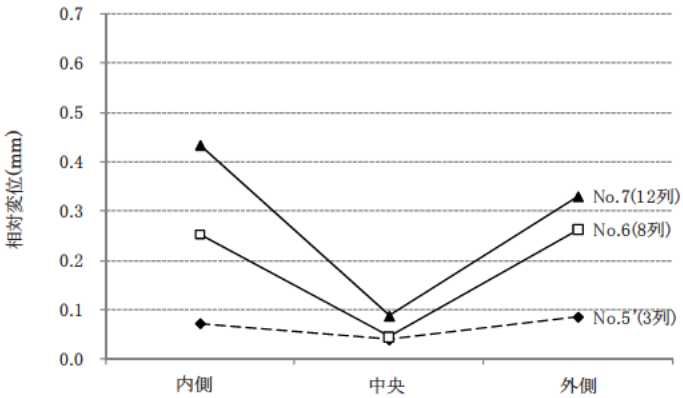
図-3.7.3　計測位置の名称（フィラープレートを使用した試験体）

（1）ボルト列数の影響

図-3.7.4 に，ボルト列数とすべり荷重時の相対変位の関係を示す。ボルト列数が多いほど内側および外側の端部の相対変位が大きくなる傾向にある。



（a）母板厚 50mm

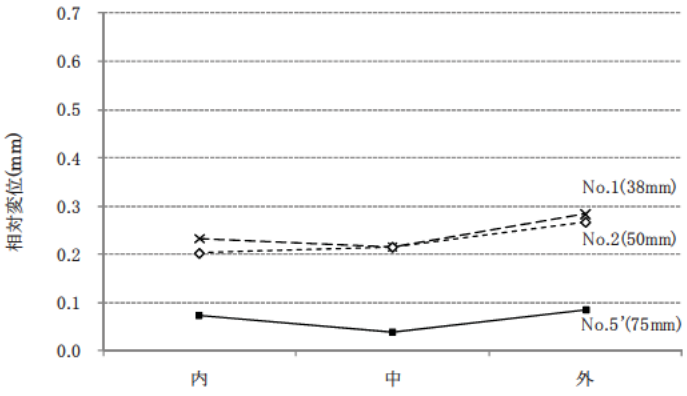


（b）母板厚 75mm

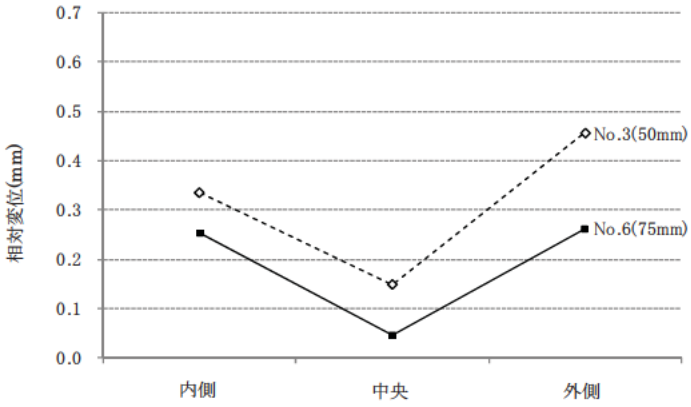
図-3.7.4　ボルト列数とすべり荷重時の相対変位の関係

(2) 板厚の影響

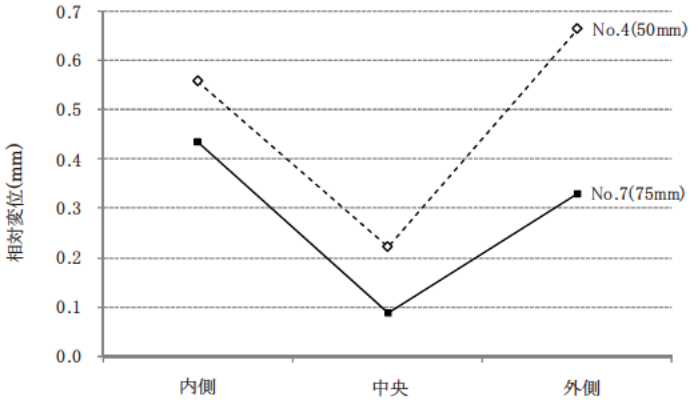
図-3.7.5 に，板厚とすべり荷重時の相対変位の関係を示す。ボルト列数の大小にかかわらず，板厚が厚いほど内側および外側の端部の相対変位が小さくなる傾向にある。



(a) 3 列



(b) 8 列

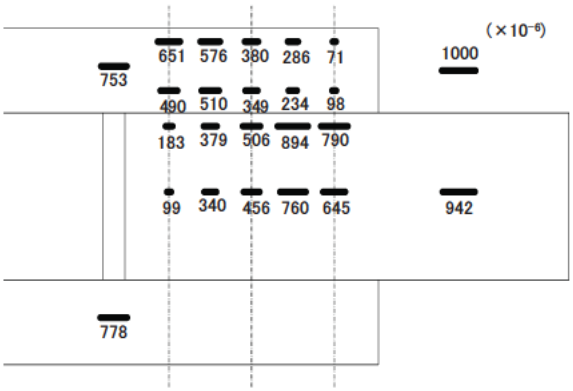


(c) 12 列

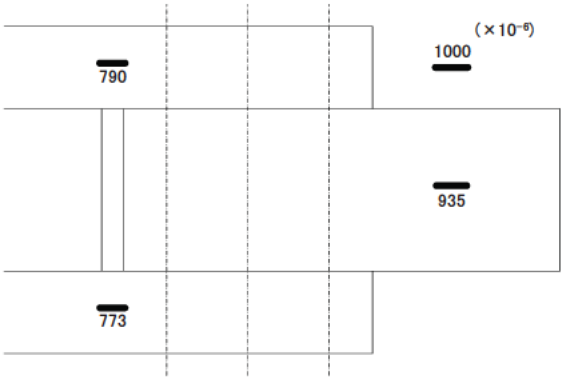
図-3.7.5　板厚とすべり荷重時の相対変位の関係

3.7.3　試験体側面のひずみ分布

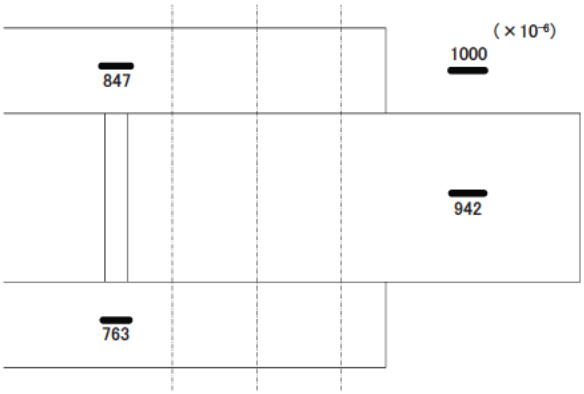
図-3.7.5 に，すべり荷重時の試験体側面のひずみを示す。基本ケース（試験体 No.1~No.4，No.5’，No.6，No.7）では，母板のひずみは母板外側から母板内側に向かって，次第に小さくなり，反対に連結板のひずみは，連結板外側から連結板内側に向かって次第に大きくなっている。また，母板のひずみについて，継手方向に対して同じ位置の母板中央と接触面付近で比較すると，接触面付近のほうが大きくなっており，接触面を介して母板から連結板に力が伝達していることがわかる。一方，試験体 No.5-1 では，内側第 1 ボルトのひずみが連結板下側で 900μm，連結板上側で-33μm となっている。このことから，母板と連結板の接触面で均等にせん断力が伝達されていなかった可能性が考えられる。フィラーケース（試験体 No.8~10）では，フィラーと接する側の母板のひずみが大きく，その反対側の母板のひずみは小さくなっている。これは母板の中心軸のずれにより偏心曲げモーメントが発生したためと考えられる。なお，いずれの試験体においてもフィラープレートには殆どひずみは生じていない。肌すきケース（試験体 No.11，No.12）は，基本ケースとほぼ同様のひずみ分布となっている。母板降伏ケース（試験体 No.15）では，ボルト孔のある断面のひずみよりも，ボルト間断面のひずみの方が大きくなっていた。これは，基本ケース（例えば試験体 No.1-1 など）でも同様の傾向であるが，試験体 No.15-1 ではボルト孔位置とのひずみ差が特に大きくなる傾向がみられた。一般に，ボルト間断面よりもボルト孔のある断面に大きなひずみが生じると考えられるが，ひずみゲージを貼付したのは表面であり，ボルト孔断面部が細くなるとボルト間部の表面が凸に変形するため，表面ひずみが大きくなったものと推測される。



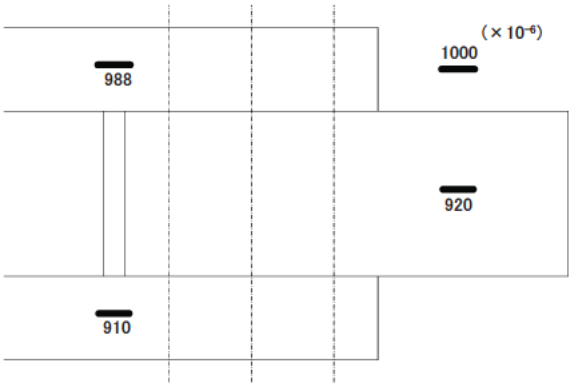
No.1-1（すべり荷重 794kN）



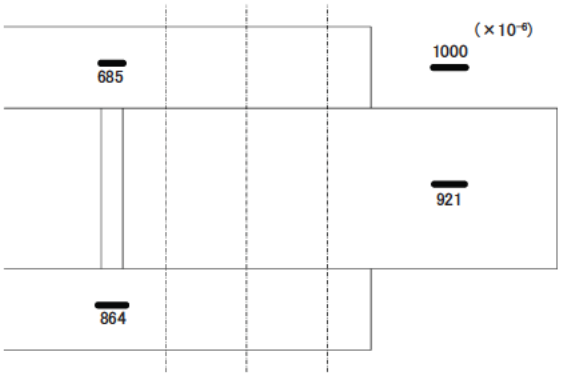
No.1-2（すべり荷重 827kN）



No.1-3（すべり荷重 822kN）



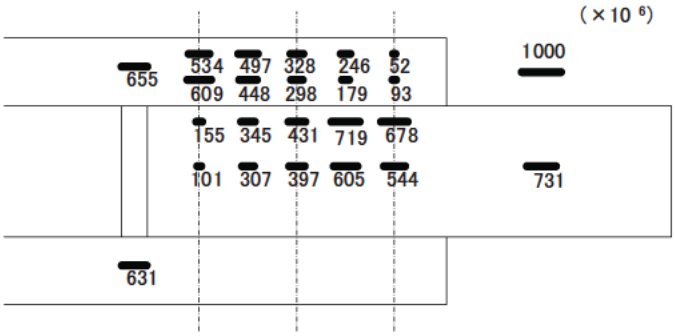
No.1-4（すべり荷重 870kN）



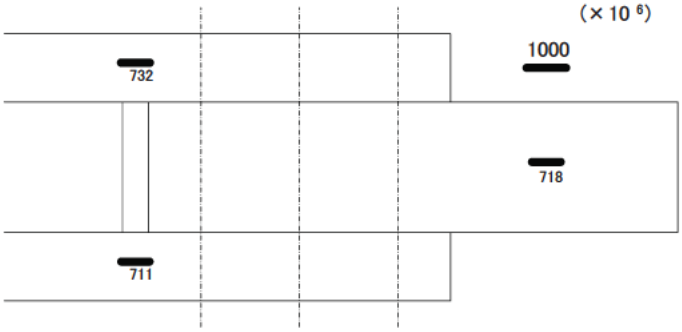
No.1-5（すべり荷重 833kN）

(a) No.1

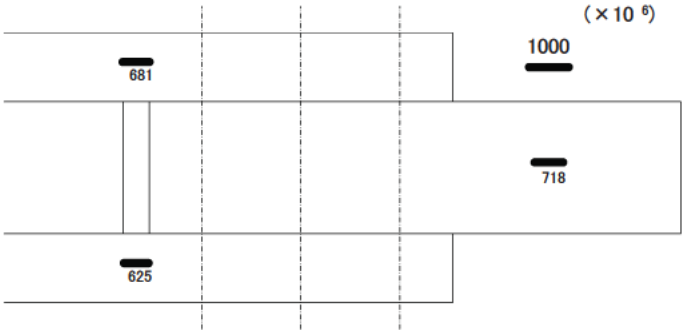
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布



No.2-1（すべり荷重 863kN）



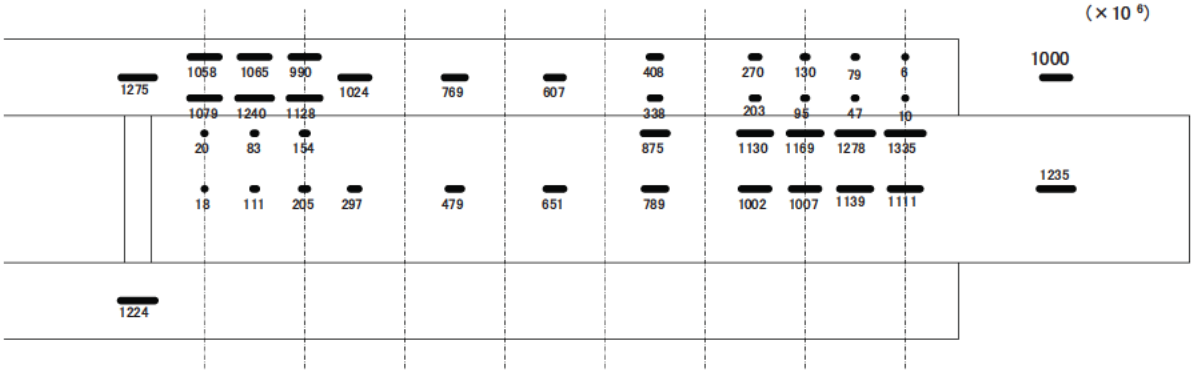
No.2-2（すべり荷重 868kN）



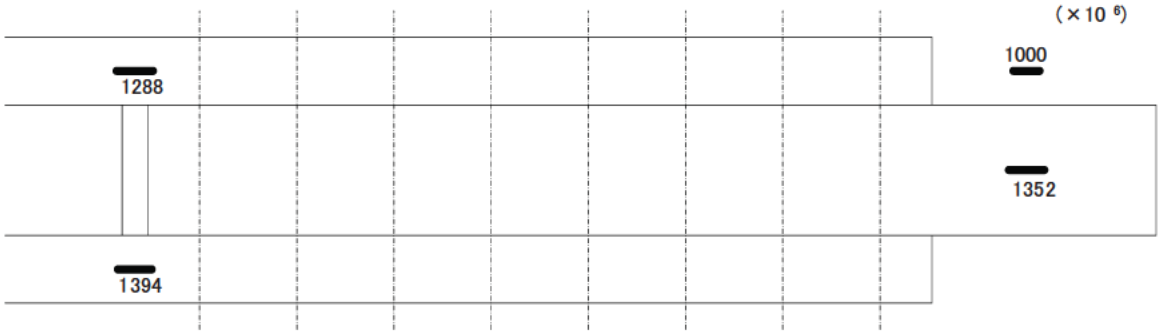
No.2-3（すべり荷重 850kN）

（b）No.2

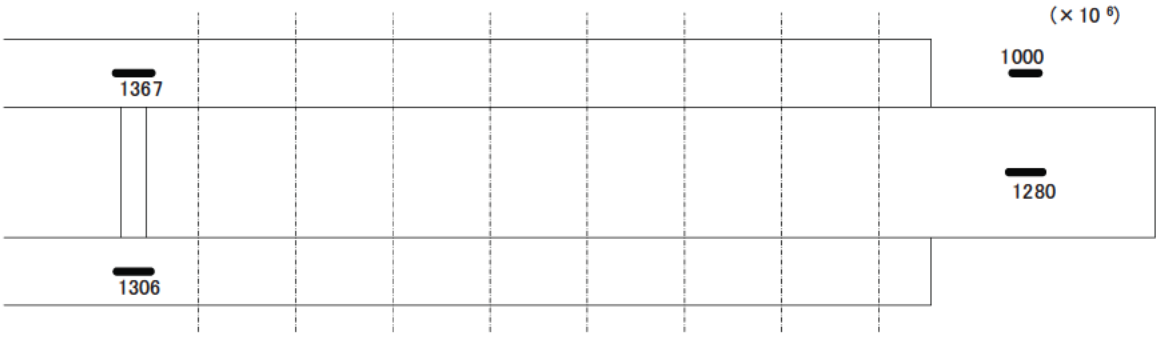
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



No.3-1（すべり荷重 2,256kN）



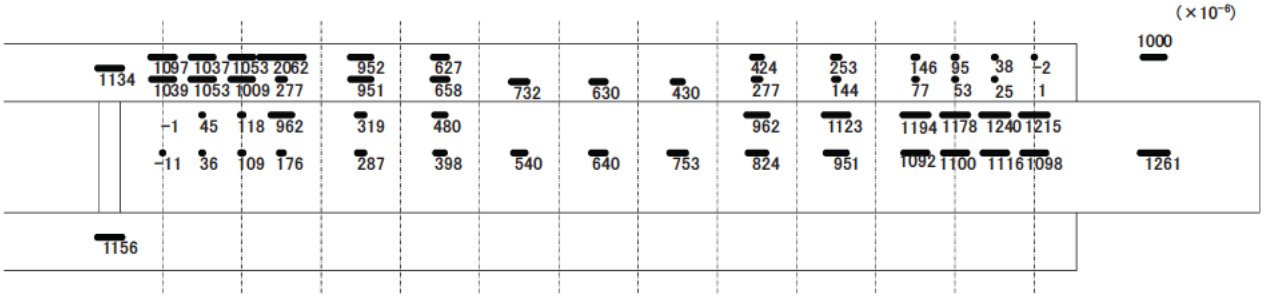
No.3-2（すべり荷重 2,391kN）



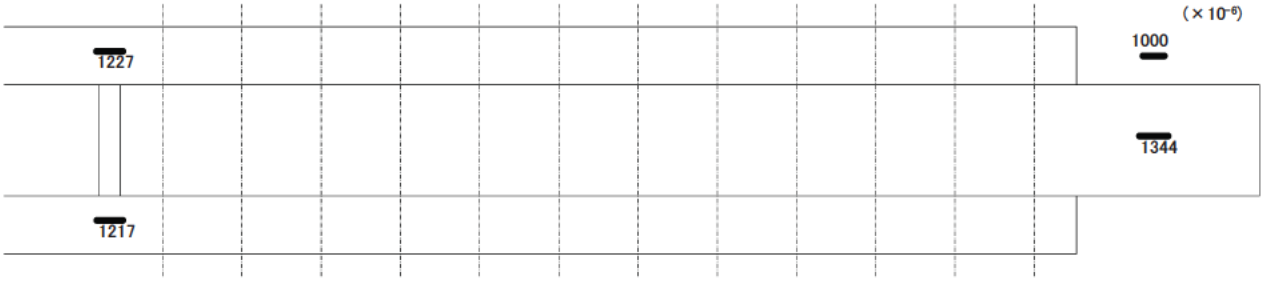
No.3-3（すべり荷重 2,376kN）

（c）No.3

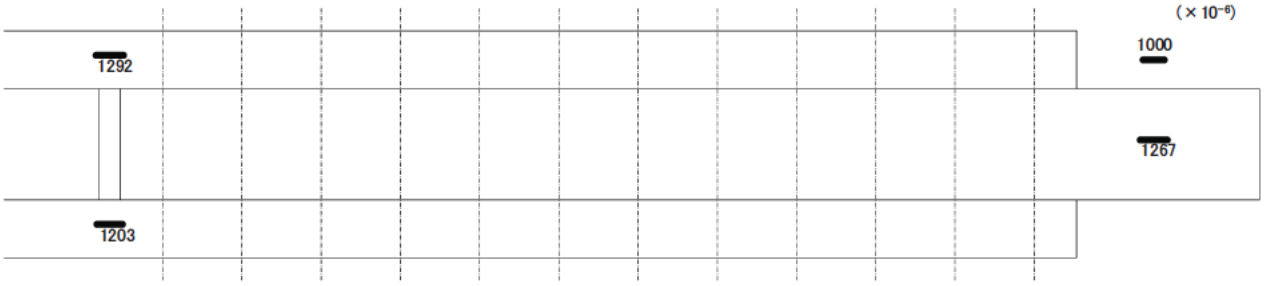
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



No.4-1（すべり荷重 3,455kN）



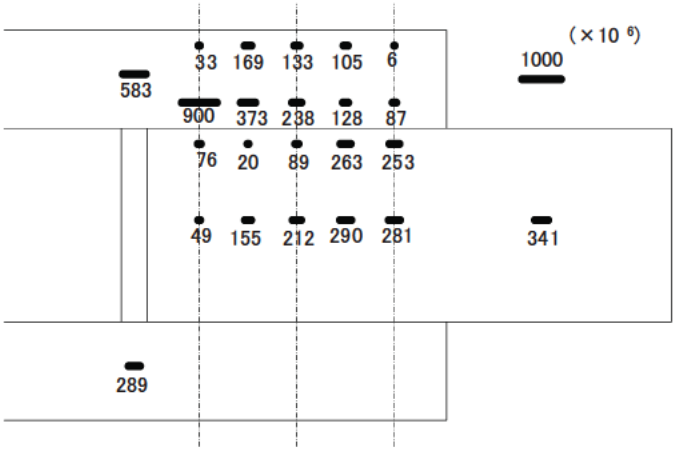
No.4-2（すべり荷重 3,496kN）



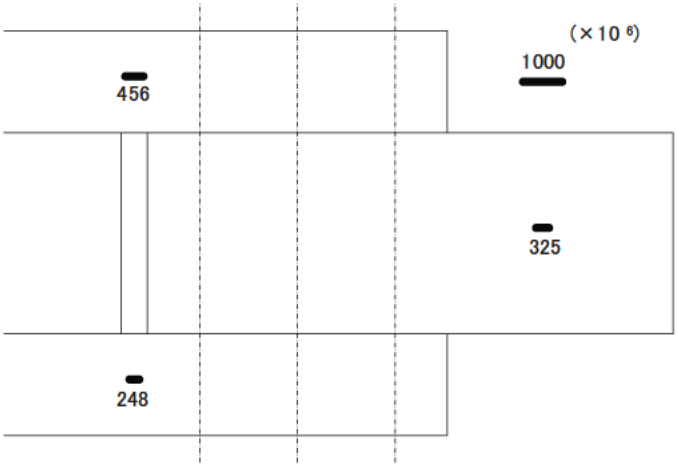
No.4-3（すべり荷重 3,445kN）

（d） No.4

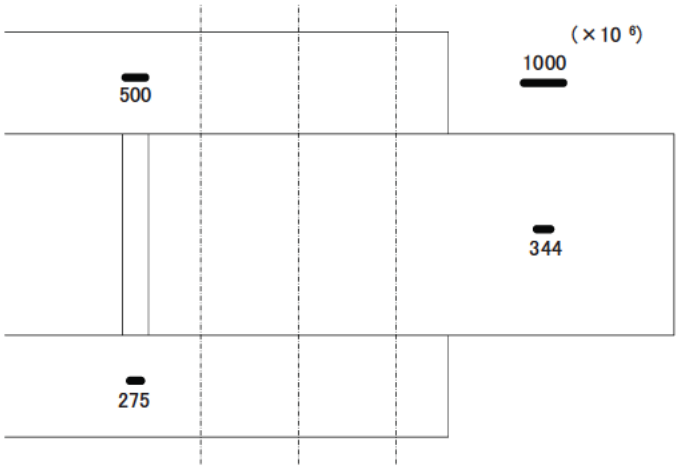
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



No.5-1（すべり荷重 658kN）



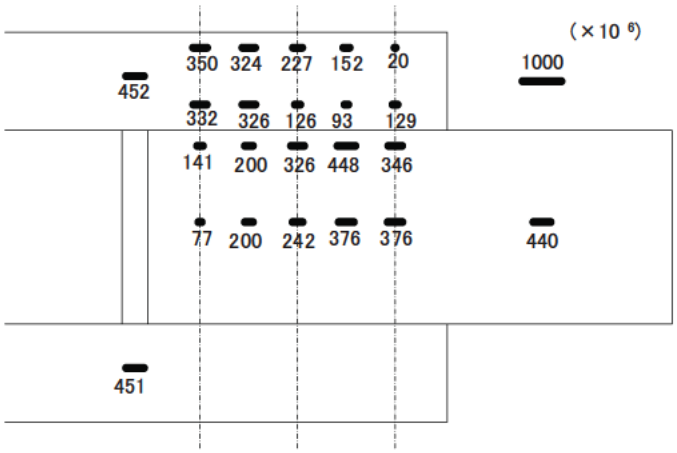
No.5-2（すべり荷重 623kN）



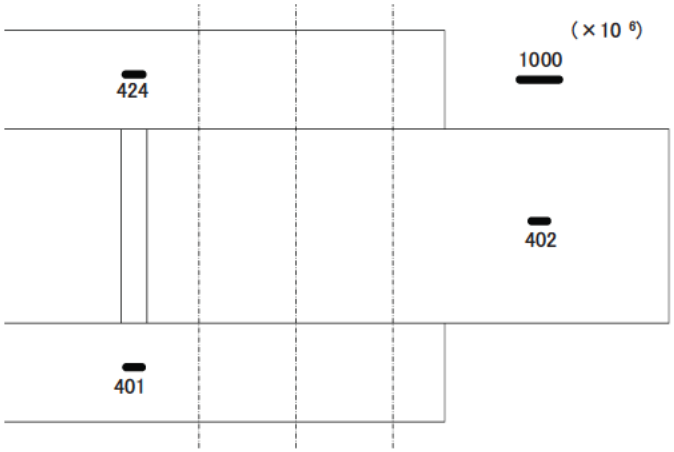
No.5-3（すべり荷重 665kN）

（e）No.5

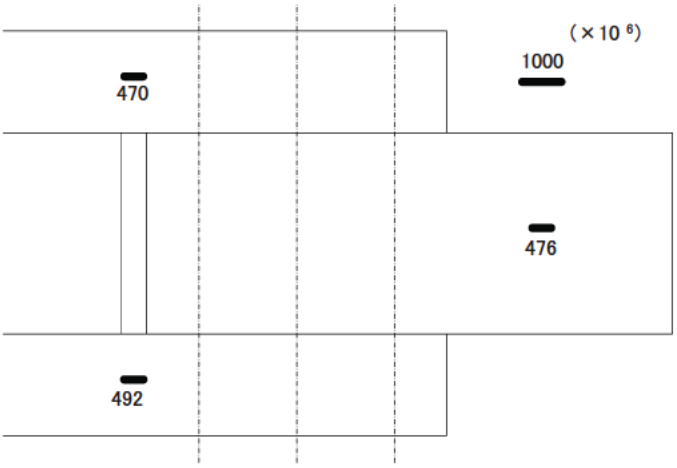
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



No.5'-1（すべり荷重 835kN）



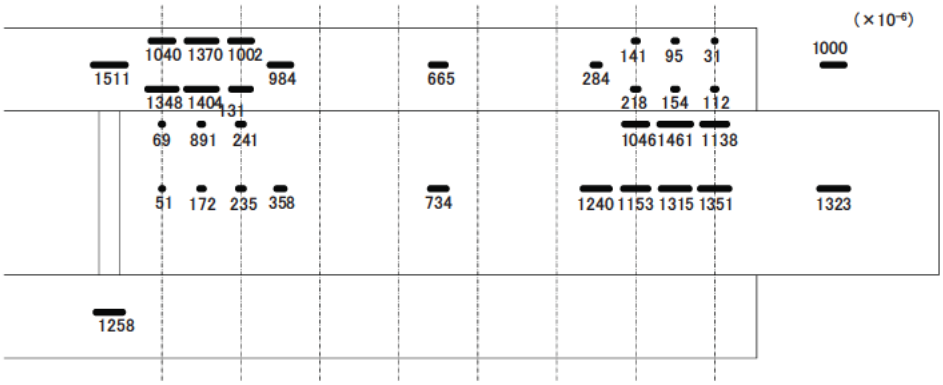
No.5'-2（すべり荷重 774kN）



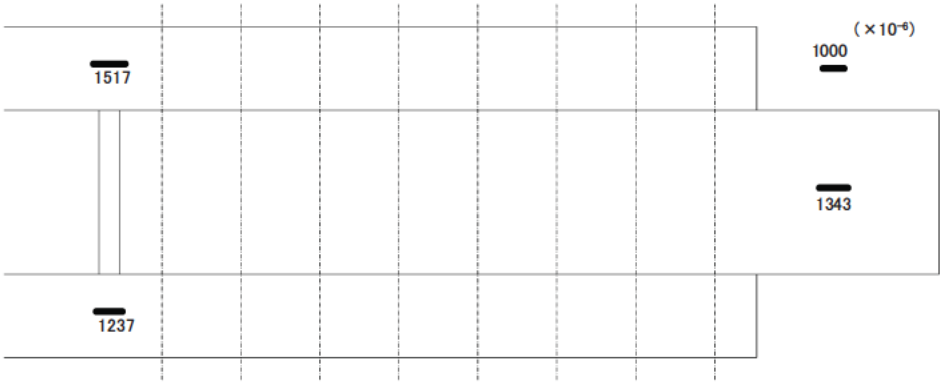
No.5'-3（すべり荷重 904kN）

(f) No.5'

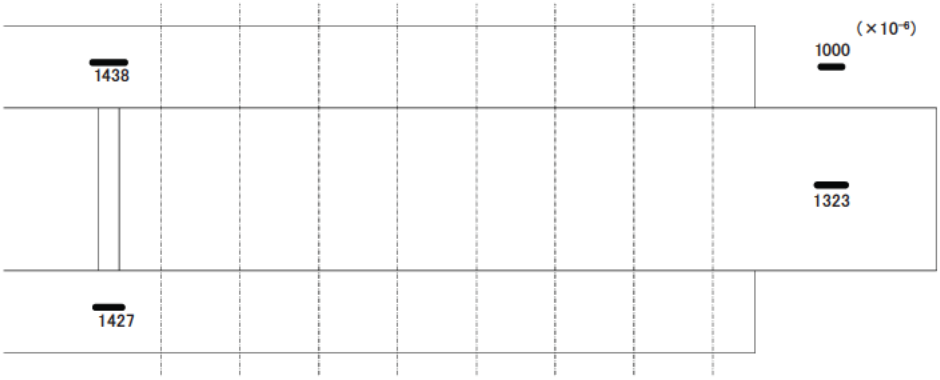
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



No.6-1（すべり荷重 2,276kN）



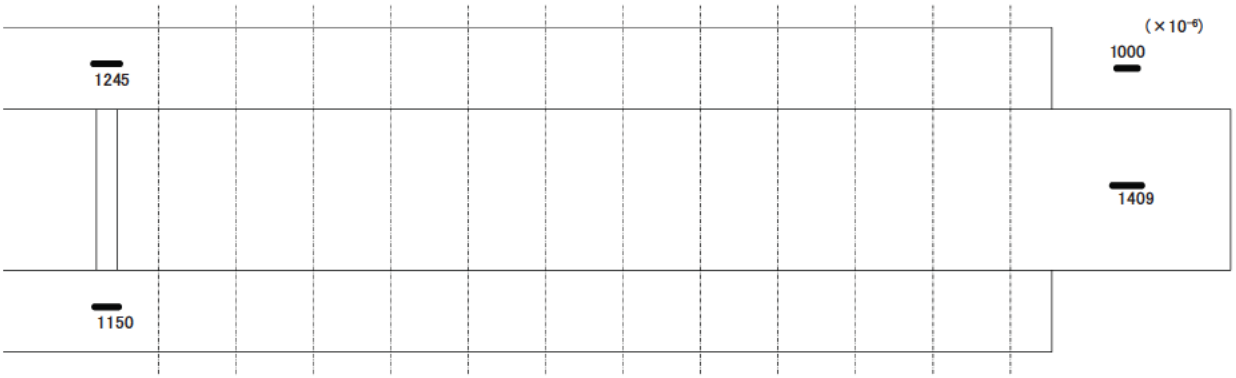
No.6-2（すべり荷重 2,381kN）



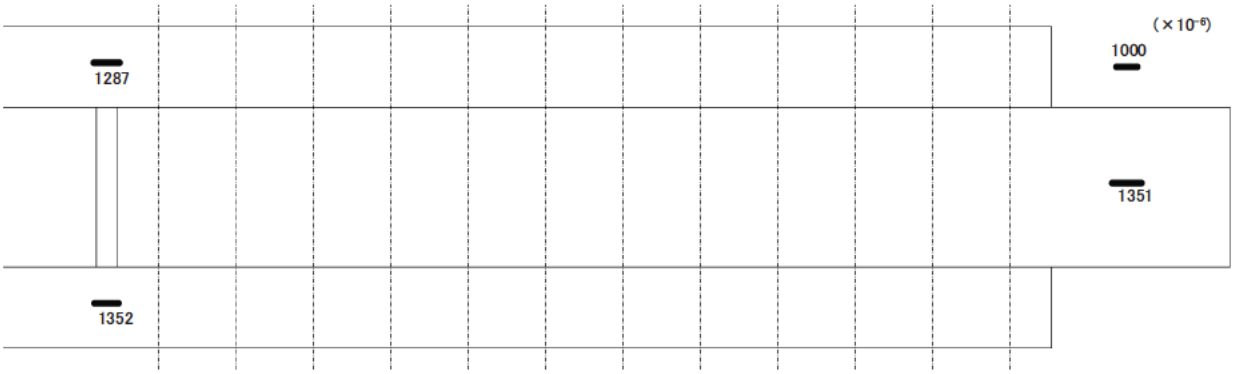
No.6-3（すべり荷重 2,381kN）

（g）No.6

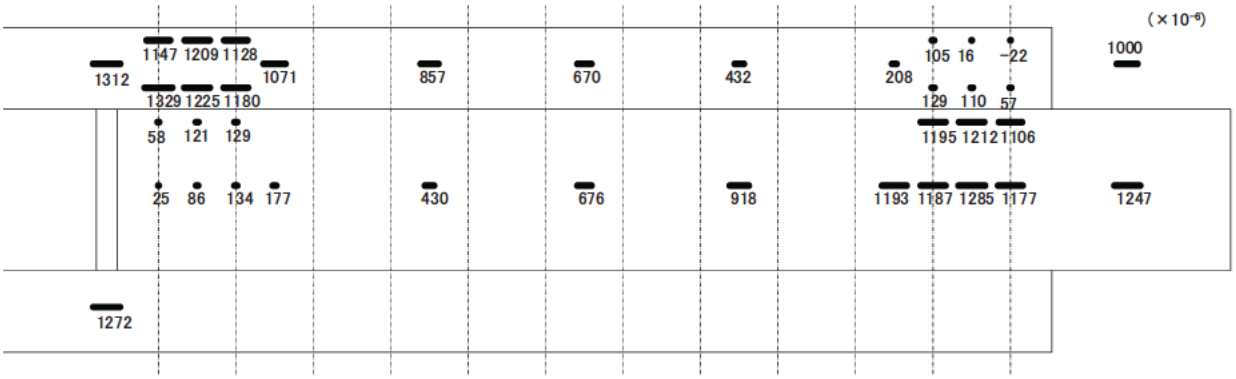
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



No.7-1（すべり荷重 3,198kN）



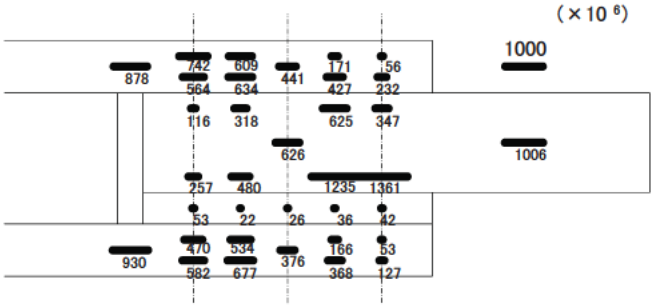
No.7-2（すべり荷重 3,198kN）



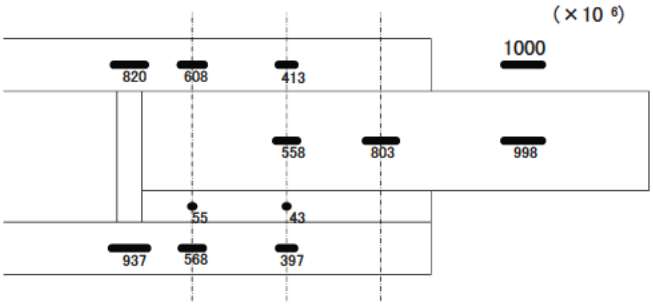
No.7-3（すべり荷重 3,375kN）

（h） No.7

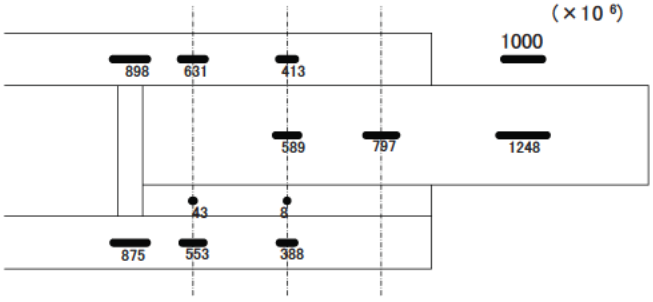
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



No.8-1（すべり荷重 890kN）



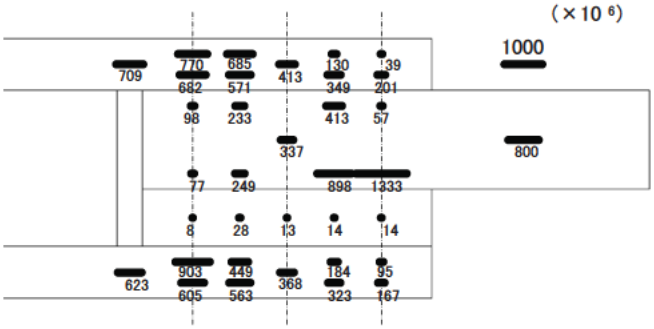
No.8-2（すべり荷重 901kN）



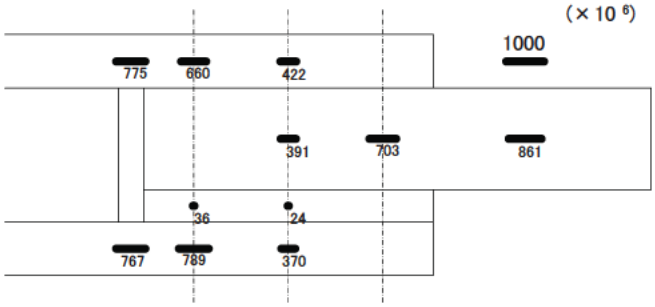
No.8-3（すべり荷重 891kN）

（i）No.8

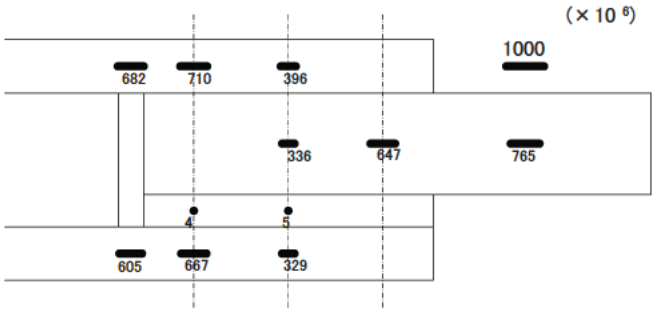
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



No.9-1（すべり荷重 750kN）



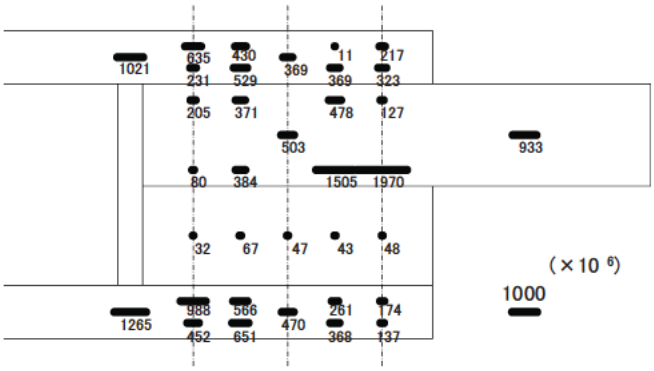
No.9-2（すべり荷重 789kN）



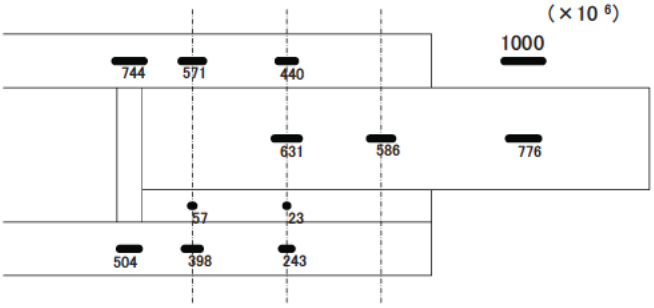
No.9-3（すべり荷重 715kN）

(j) No.9

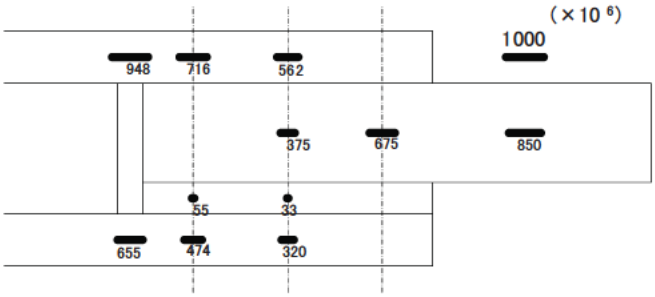
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



No.10-1（すべり荷重 777kN）



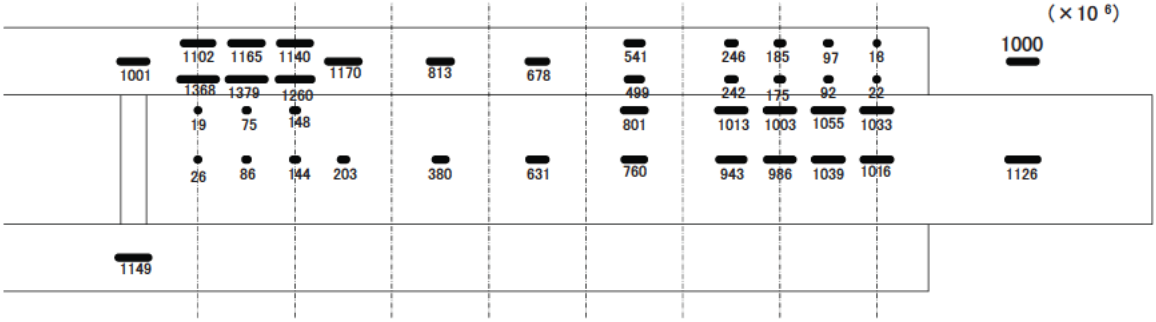
No.10-2（すべり荷重 732kN）



No.10-3（すべり荷重 745kN）

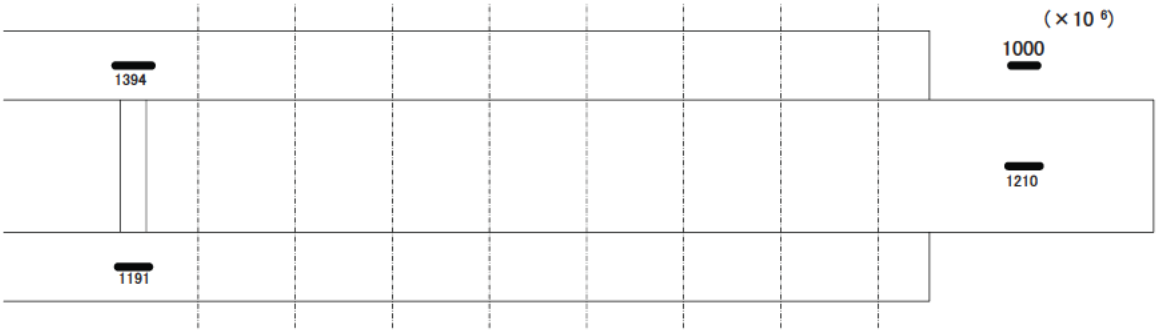
（k）No.10

図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



No.11-1（すべり荷重 2,102kN）

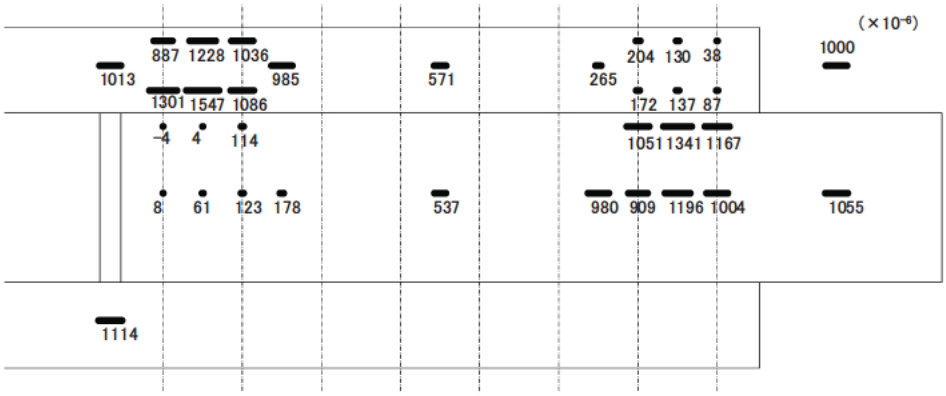
No.11-2（すべり荷重 2,219kN）



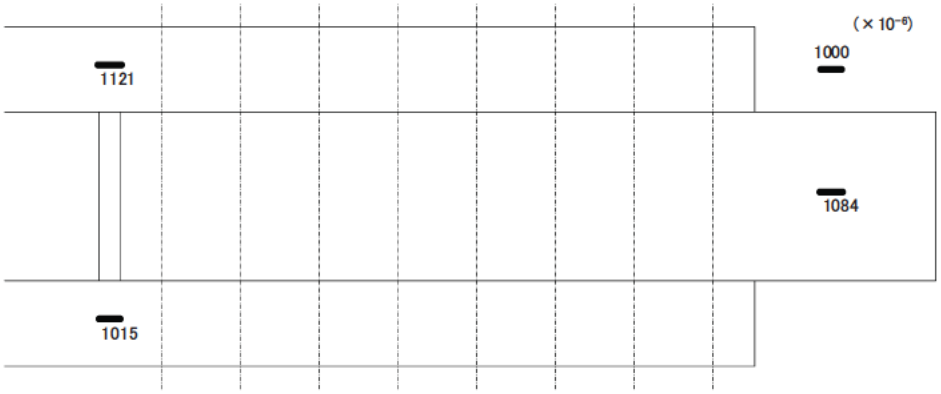
No.11-3（すべり荷重 2,168kN）

(l) No.11

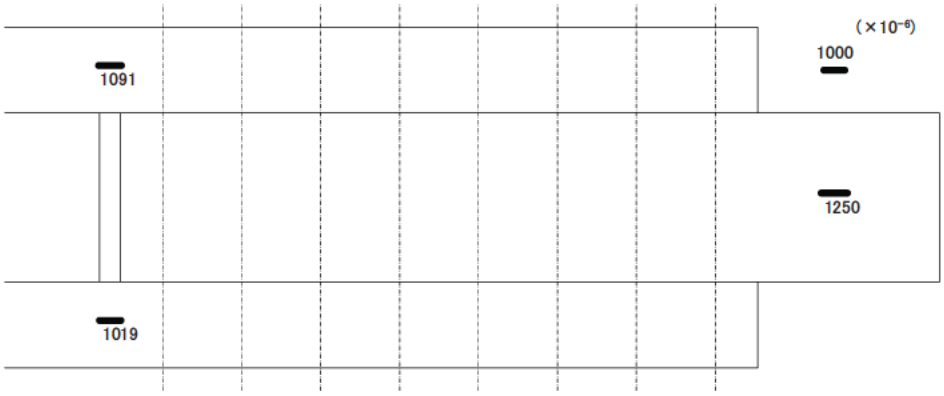
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



No.12-1（すべり荷重 2,024kN）



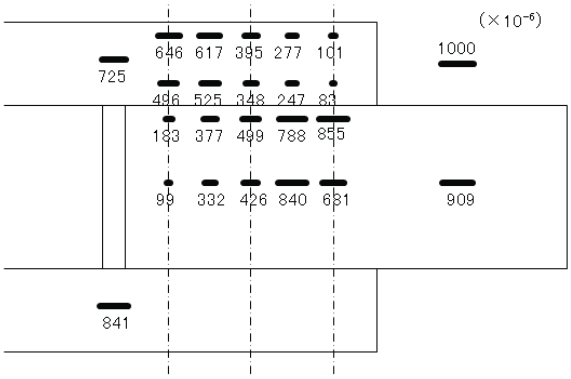
No.12-2（すべり荷重 2,103kN）



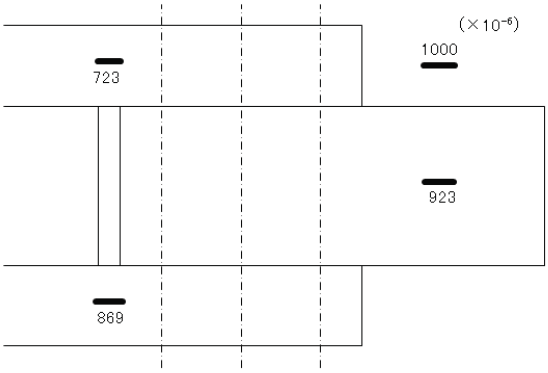
No.12-3（すべり荷重 2,103kN）

（m）No.12

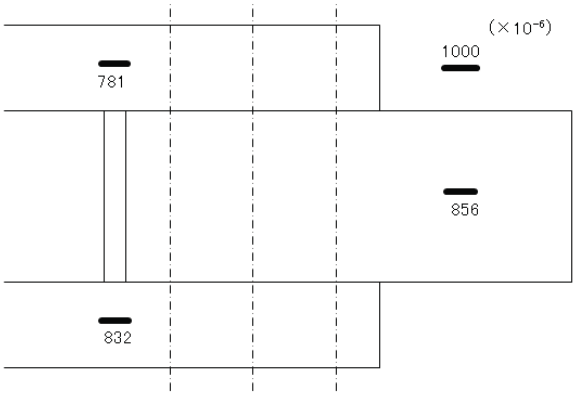
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



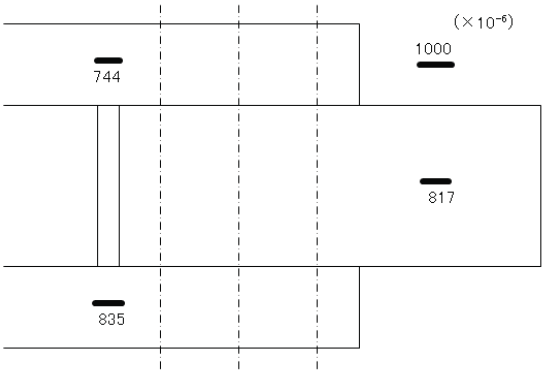
No.13-1（すべり荷重 792kN）



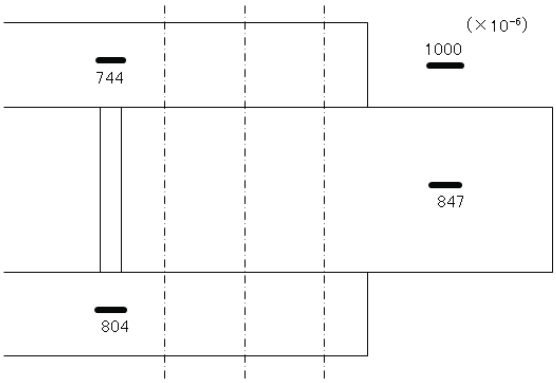
No.13-2（すべり荷重 810kN）



No.13-3（すべり荷重 786kN）



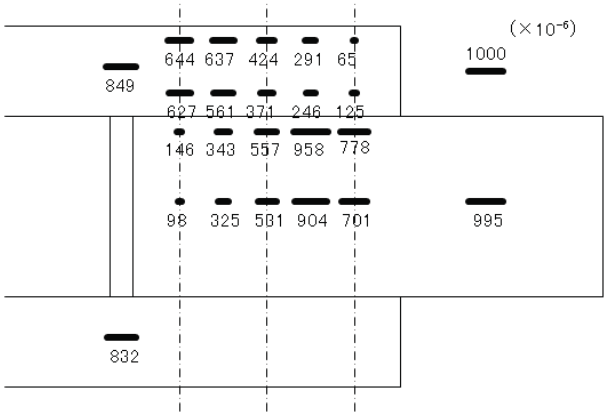
No.13-4（すべり荷重 757kN）



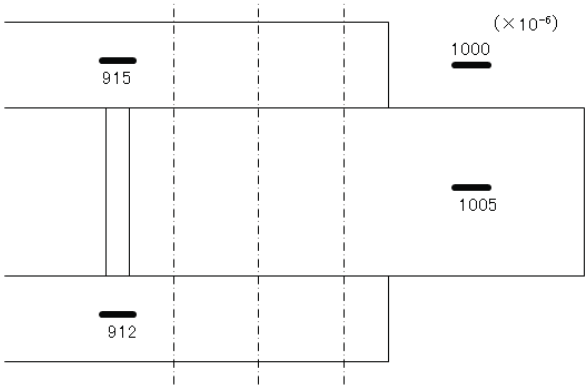
No.13-5（すべり荷重 778kN）

（n）No.13

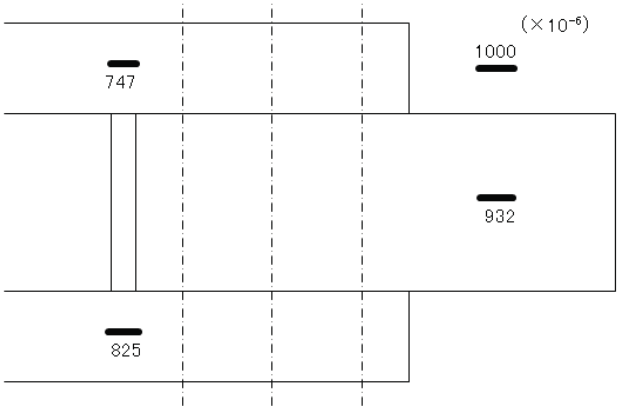
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



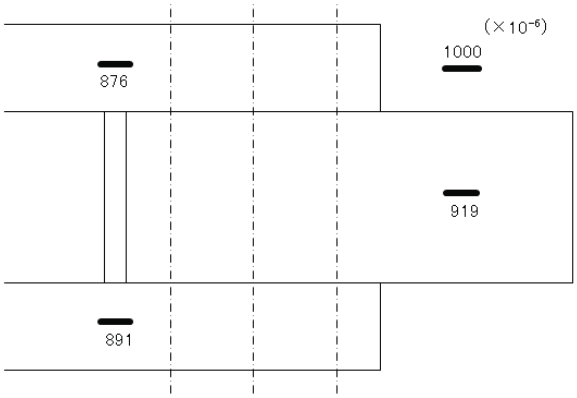
No.14-1（すべり荷重 834kN）



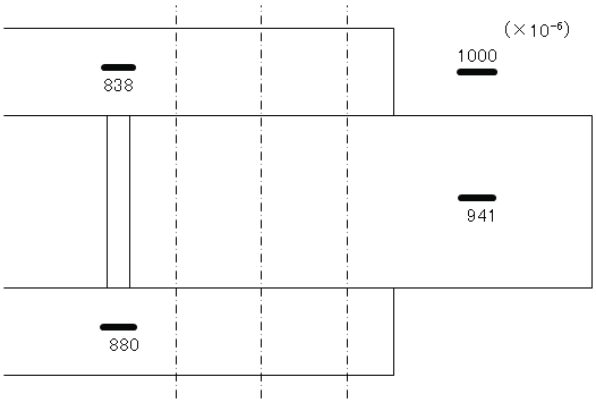
No.14-2（すべり荷重 875kN）



No.14-3（すべり荷重 823kN）



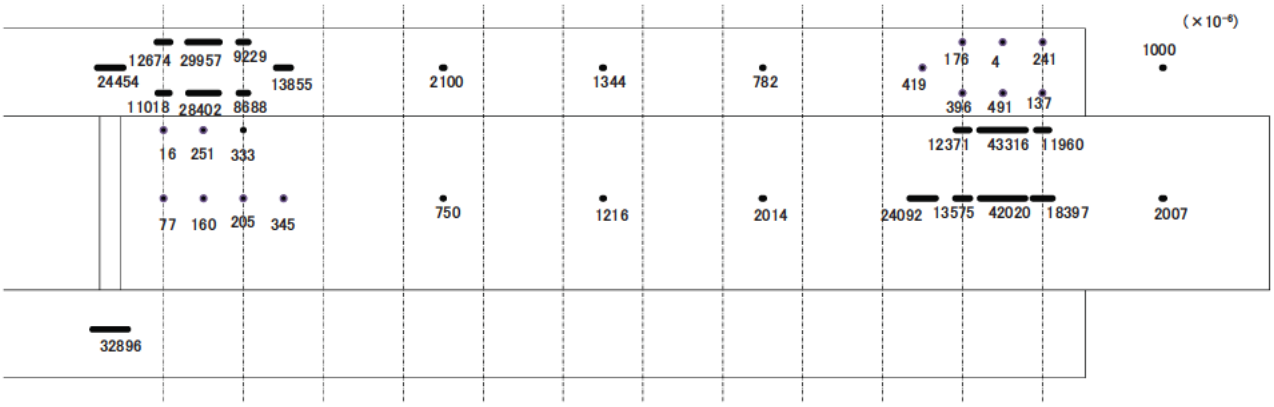
No.14-4（すべり荷重 824kN）



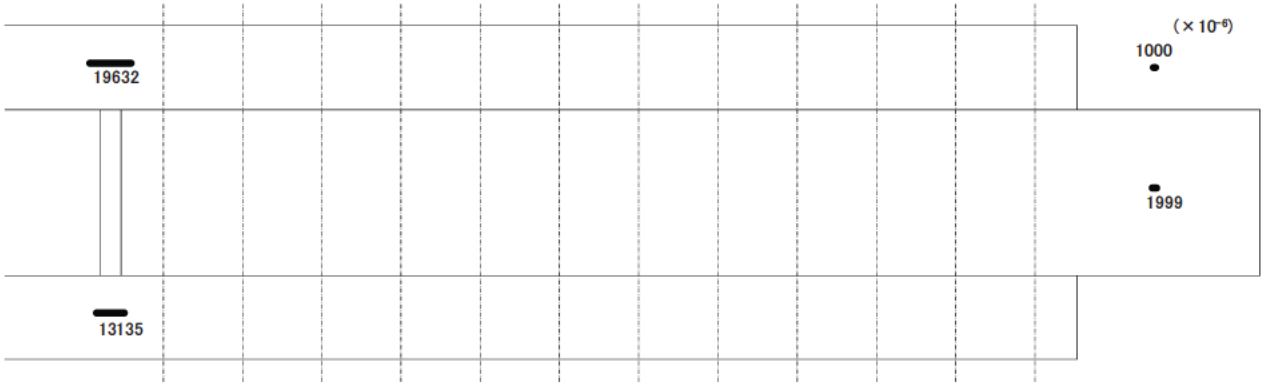
No.14-5（すべり荷重 838kN）

（o）No.14

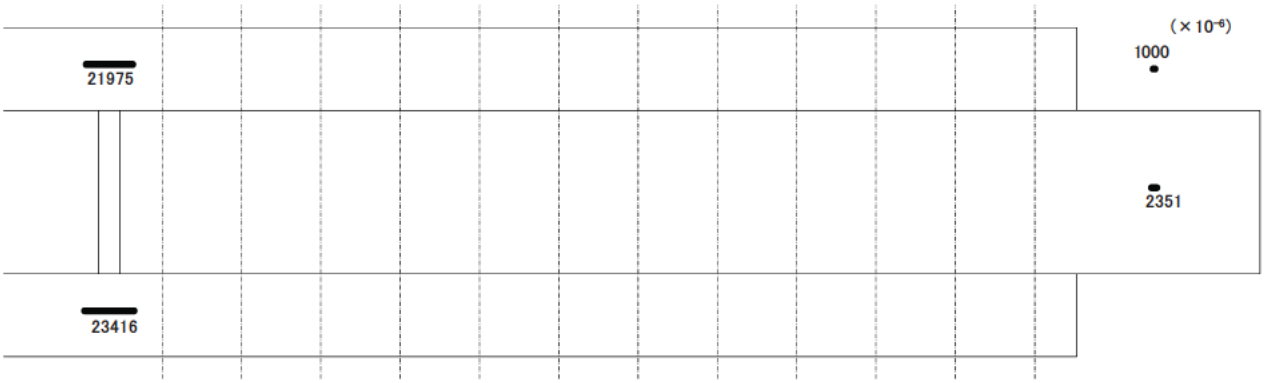
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）



No.15-1（すべり荷重 2,975kN）



No.15-2（すべり荷重 2,750kN）



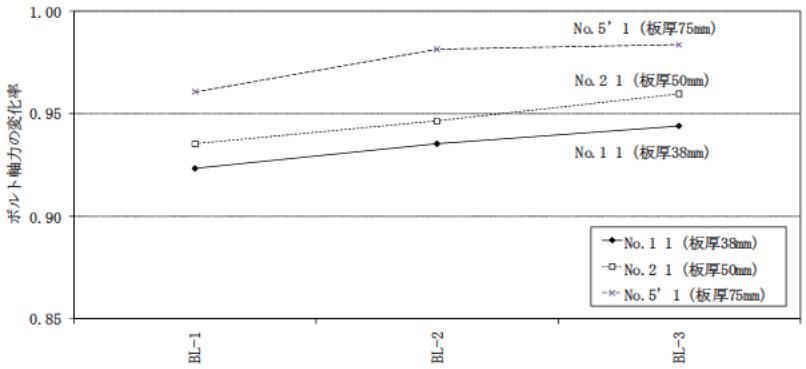
No.15-3（すべり荷重 2,917kN）

（p）No.15

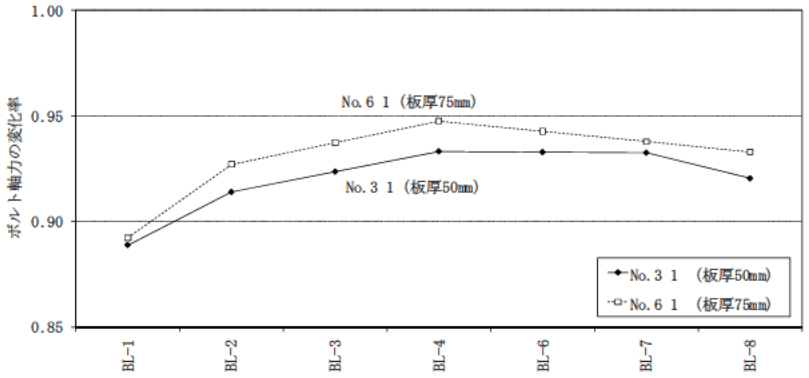
図-3.7.5　すべり荷重時の試験体側面のひずみ分布（続き）

3.7.4　試験中のボルト軸力の変化

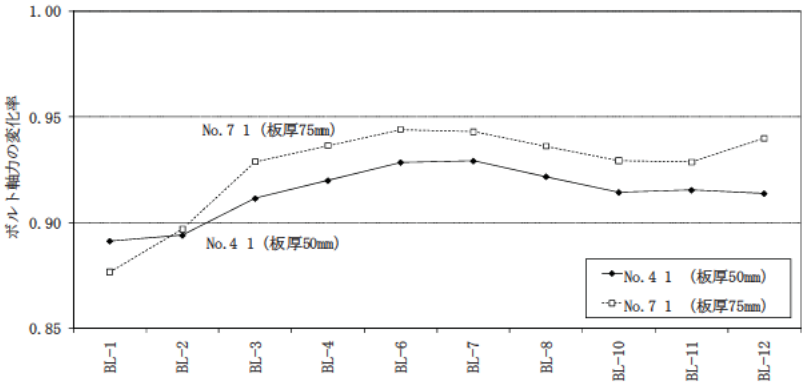
図-3.7.6 に，すべり荷重時のボルト軸力の変化率を示す。ボルト軸力の変化率とは，試験開始前のボルト軸力に対するすべり荷重時のボルト軸力の比率である。すべり荷重に至るまでボルト軸力の変化率が次第に大きくなるのは，試験体に引張荷重が作用すると，ポアソン効果により板厚が薄くなるため等と考えられる。いずれのケースにおいても，板厚が厚いほどボルト軸力の変化率が小さくなっている。また，ボルト列数が多くなるほど，両端部のボルト軸力の変化率が大きくなる傾向がみられる。



(a) ボルト 3 列試験体（No.1，2，5'）



(b) ボルト 8 列試験体（No.3，7）



(c) ボルト 12 列試験体（No.4，7）

図-3.7.6　試験中のボルト軸力の変化

3.7.5　試験後のすべり面

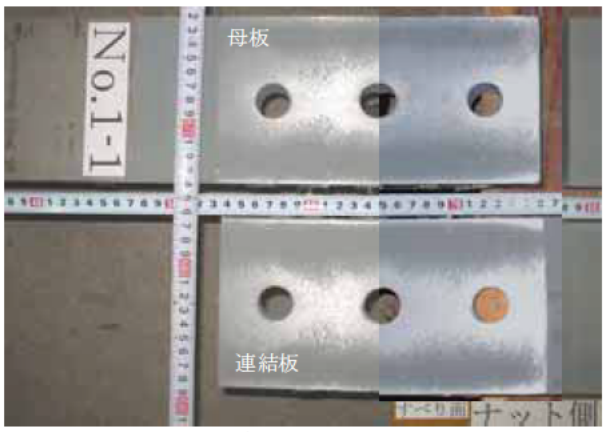
写真-3.7.1～写真-3.7.16 に，各試験体のすべり痕を示す。いずれの試験体においても，すべり痕と思われる箇所では，無機ジンクリッチペイントが変色していた。ただし，鋼材の地肌が露出している箇所は無かった。既往の研究成果 [8)]によると，無機ジンクリッチペイントを塗装した接触面では，塗膜は摩擦により空隙が押しつぶされて変形するとともに，亜鉛末粒子が摩擦のため流動するとされている。本試験体においても無機ジンクリッチペイントが変色していたことから，これと同じ状態が生じていたものと予想される。

すべり痕の広がりについて，試験体 No.1（板厚 38mm），試験体 No.2（50mm），試験体 No.5’（75mm）を比較すると，板厚が大きいほど大きくなっている。また，試験体 No.4（50mm）と試験体 No.7（75mm）は同程度の大きさとなっている。ボルト列数の影響に着目すると，ボルト列数 8 列の試験体（No.3，No.6）のすべり痕と，ボルト列数 12 列の試験体（No.4，No.7）のすべり痕の間に大きな差異は見られない。

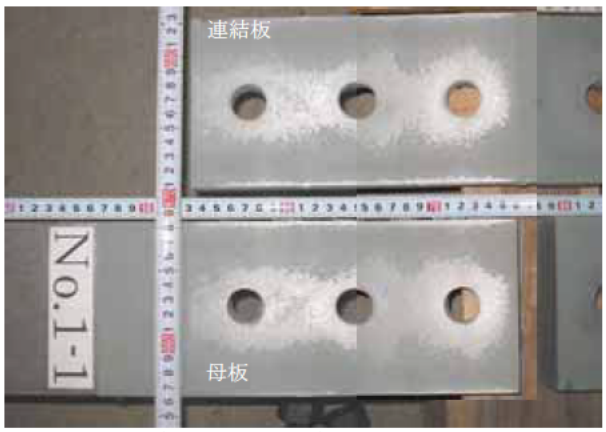
肌すきケース（試験体 No.11，試験体 No.12）では，内側第 1 ボルト付近にすべり痕が見られず，これは板厚差により第 1 ボルト近傍で母板と連結板がほとんど接触していなかったことを示すものと考えられる。塗膜厚ケースのすべり痕に大きな差異は見られなかった。母板降伏型の試験体（試験体 No.15）では，内側第 1 ボルト付近と最終ボルト付近において，ボルト孔を結ぶようにすべり痕が集中していた。写真-3.7.17 に，母板および連結板の端部（連結板外側）の拡大図を示す。端部のボルト位置ではボルト孔が楕円形に変形し，孔引き断面が細くなっていることが確認できる。このようにボルト孔断面は，ボルト孔の欠損により，ボルト孔を結ぶ部分よりも降伏の影響を受けやすい状態にあり，このようなすべり痕が生じたものと考えられる。

試験体 No.5 では，ボルト軸周りのすべり痕が見られず，母板と連結板が十分に接触していなかったためにすべり係数が低下したものと考えられる。表面切削加工を行った試験体 No.5’ではボルト軸周りのすべり痕が見られ，切削加工により接触状態が大幅に改善されたものと考えられる（3.8 考察で詳述）。

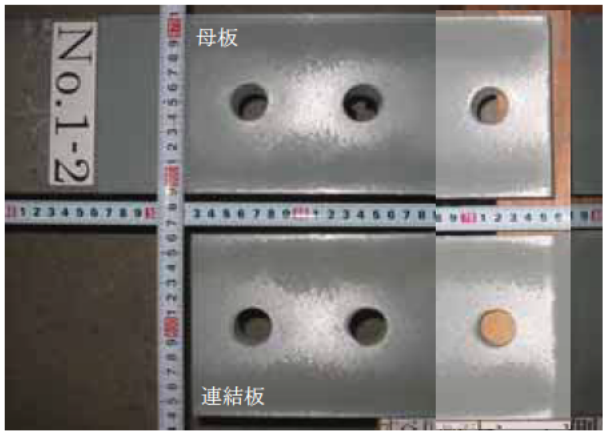
なお，写真-3.7.1，写真-3.7.6，写真-3.7.8，写真-3.7.16 は，可能な限りすべり痕が鮮明となるよう，すべり面を複数枚撮影し，それらを組み合わせたものとしている。



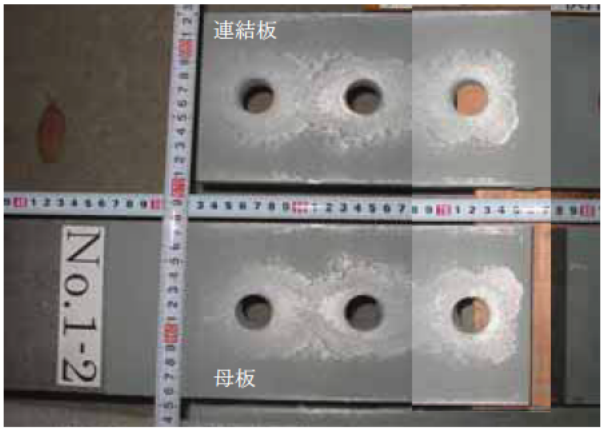
試験体 No.1-1　ナット側



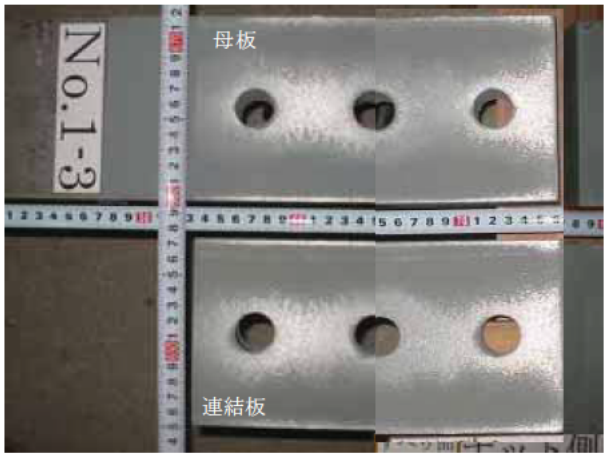
試験体 No.1-1　ボルト頭側



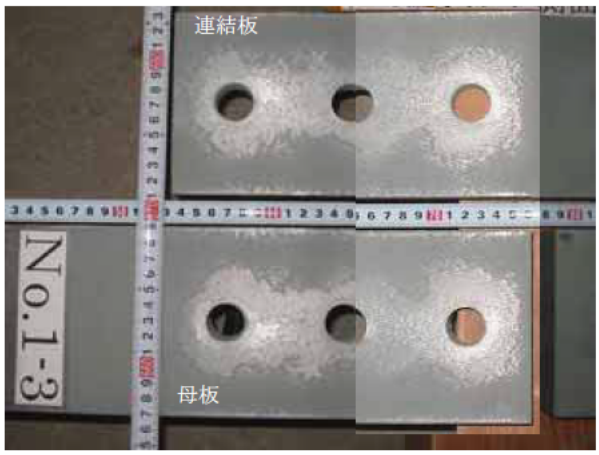
試験体 No.1-2　ナット側



試験体 No.1-2　ボルト頭側

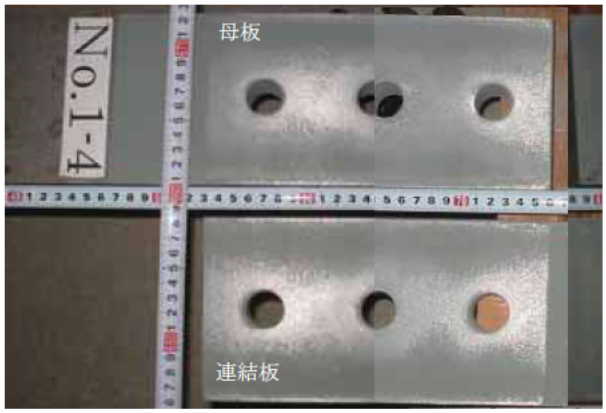


試験体 No.1-3　ナット側

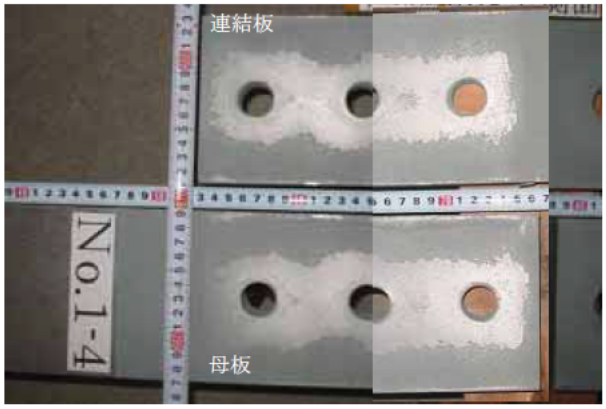


試験体 No.1-3　ボルト頭側

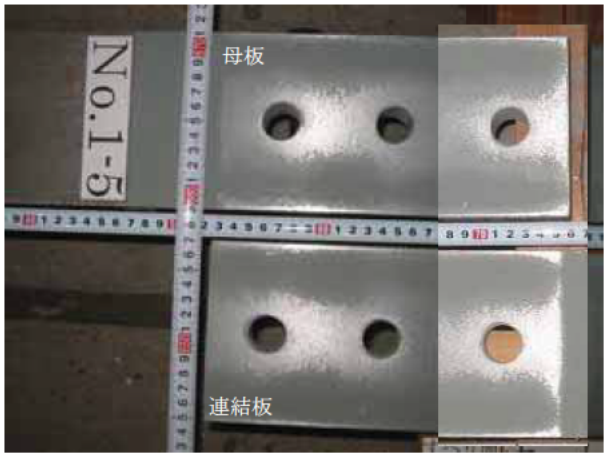
写真-3.7.1　試験体 No.1



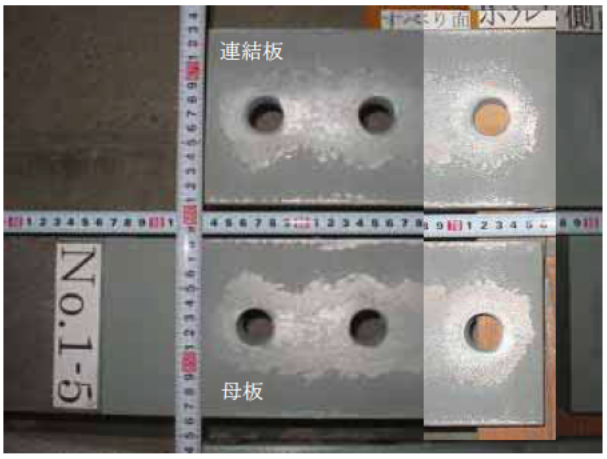
試験体 No.1-4　ナット側



試験体 No.1-4　ボルト頭側

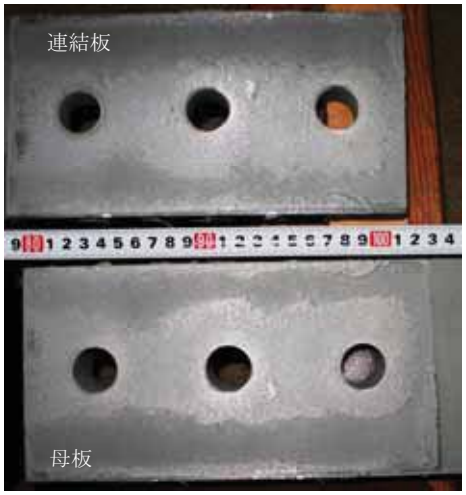


試験体 No.1-5　ナット側



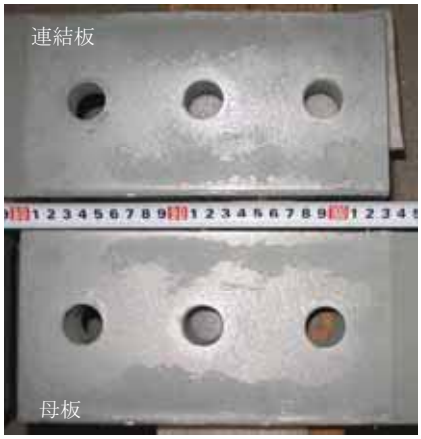
試験体 No.1-5　ボルト頭側

写真-3.7.1　試験体 No.1（続き）

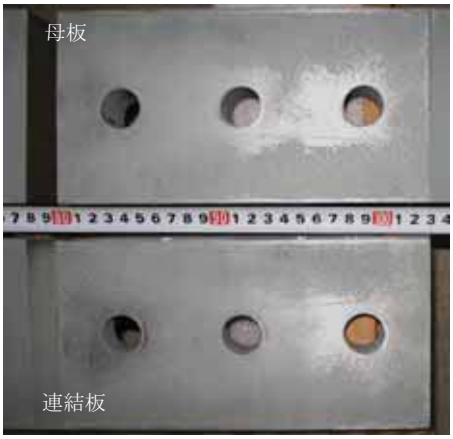


試験体 No.2-1　ナット側

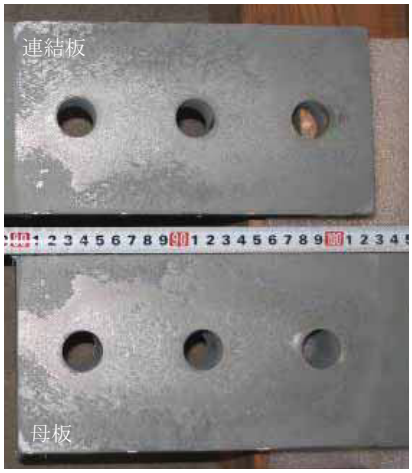
試験体 No.2-1　ボルト頭側



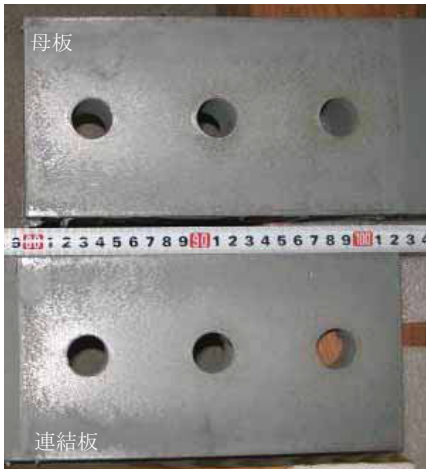
試験体 No.2-2　ナット側



試験体 No.2-2　ボルト頭側



試験体 No.2-3　ナット側



試験体 No.2-3　ボルト頭側

写真-3.7.2　試験体 No.2

試験体 No.3-1　ナット側

試験体 No.3-1　ボルト頭側

試験体 No.3-2　ナット側

試験体 No.3-2　ボルト頭側

試験体 No.3-3　ナット側

試験体 No.3-3　ボルト頭側

写真-3.7.3　試験体 No.3

試験体 No.4-1　ナット側

試験体 No.4-1　ボルト頭側

試験体 No.4-2　ナット側

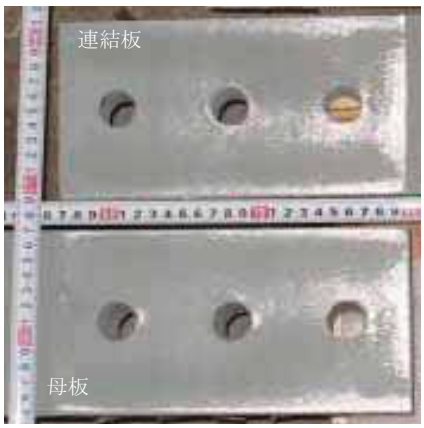
試験体 No.4-2　ボルト頭側

試験体 No.4-3　ナット側

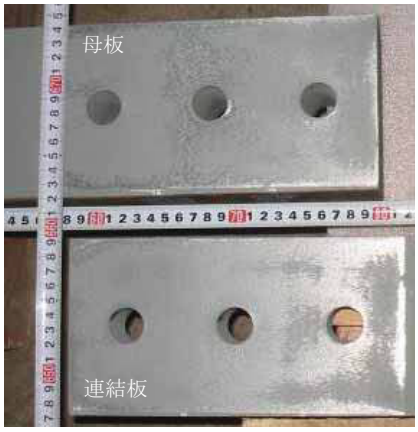
試験体 No.4-3　ボルト頭側

写真-3.7.4　試験体 No.4

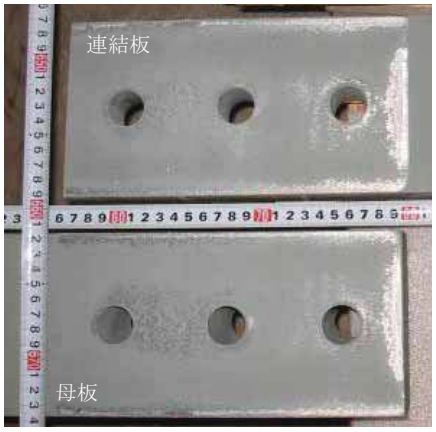
試験体 No.5-1　ナット側



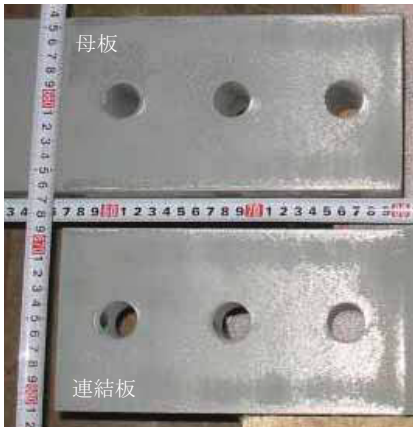
試験体 No.5-1　ボルト頭側



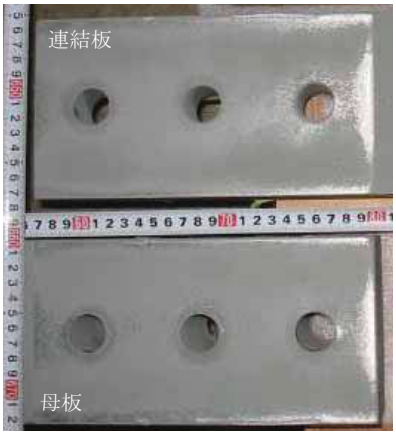
試験体 No.5-2　ナット側



試験体 No.5-2　ボルト頭側

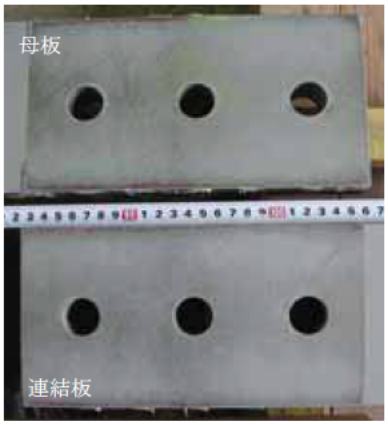


試験体 No.5-3　ナット側

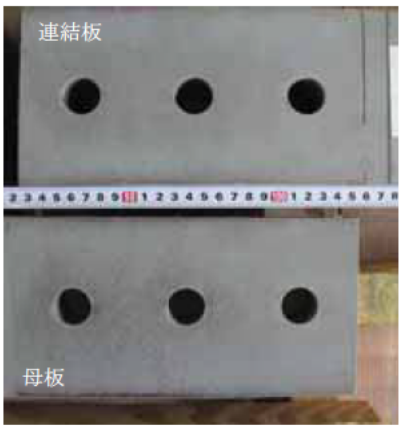


試験体 No.5-3　ボルト頭側

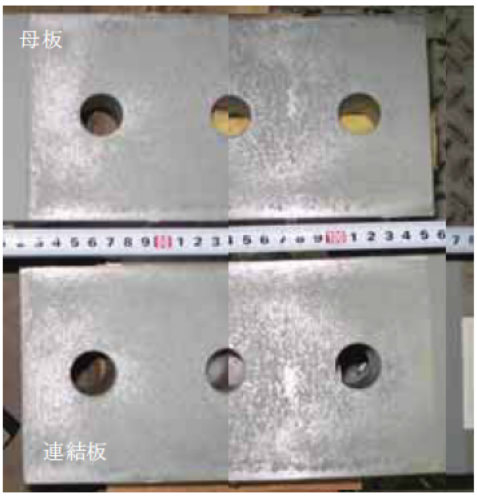
写真-3.7.5　試験体 No.5



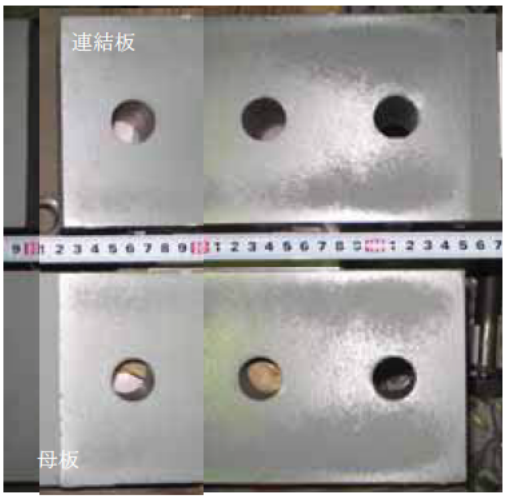
試験体 No.5’-1　ナット側



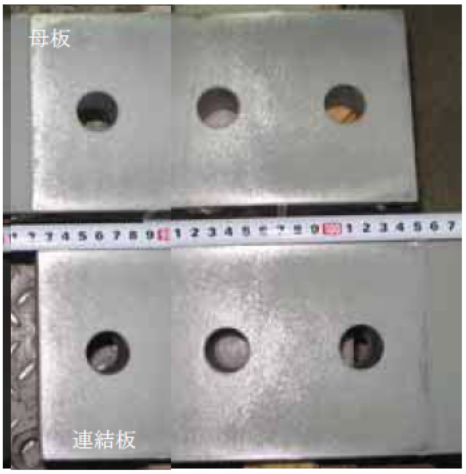
試験体 No.5’-1　ボルト頭側



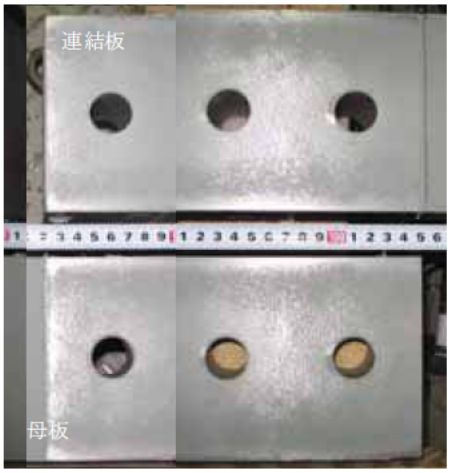
試験体 No.5’-2　ナット側



試験体 No.5’-2　ボルト頭側



試験体 No.5’-3　ナット側



試験体 No.5’-3　ボルト頭側

写真-3.7.6　試験体 No.5’

試験体 No.6-1　ナット側

試験体 No.6-1　ボルト頭側

試験体 No.6-2　ナット側

試験体 No.6-2　ボルト頭側

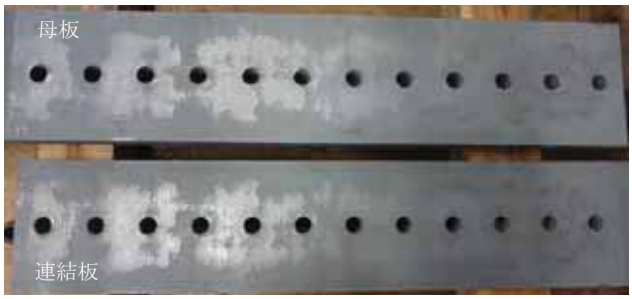
試験体 No.6-3　ナット側

試験体 No.6-3　ボルト頭側

写真-3.7.7　試験体 No.6

試験体 No.7-1　ナット側

試験体 No.7-1　ボルト頭側



試験体 No.7-2　ナット側

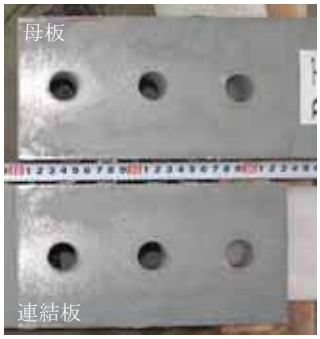
試験体 No.7-2　ボルト頭側

試験体 No.7-3　ナット側

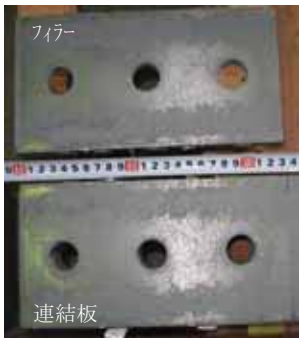
試験体 No.7-3　ボルト頭側

写真-3.7.8　試験体 No.7

No.8-1　ナット側

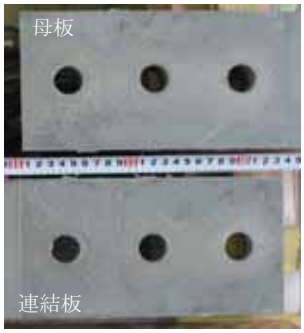


No.8-1　ボルト頭側



No.8-1　フィラー側

No.8-2 ナット側



No.8-2 ボルト頭側

No.8-2 フィラー側

No.8-3 ナット側

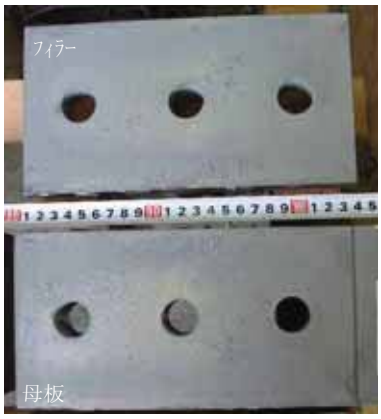
No.8-3 ボルト頭側

No.8-3 フィラー側

写真-3.7.9　試験体 No.8

No.9-1　ナット側

No.9-1　ボルト頭側



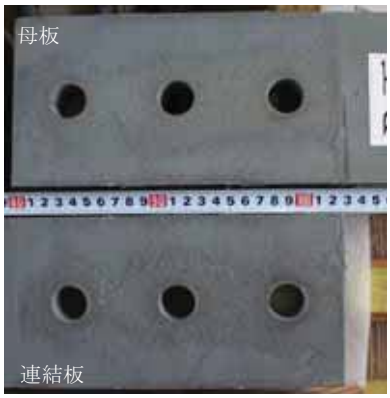
No.9-1　フィラー側

No.9-2　ナット側

No.9-2　ボルト頭側

No.9-2　フィラー側

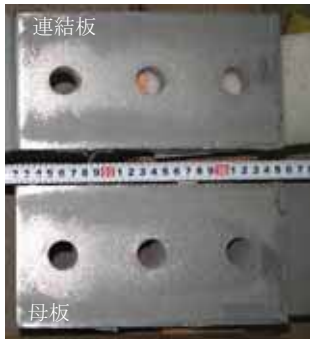
No.9-3　ナット側



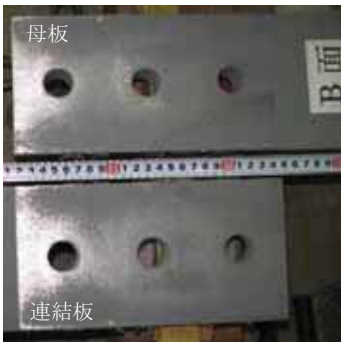
No.9-3　ボルト頭側

No.9-3　フィラー側

写真-3.7.10　試験体 No.9



No.10-1　ナット側

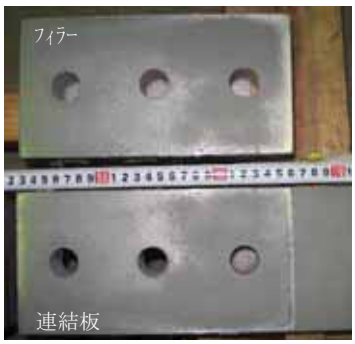


No. 10-1　ボルト頭側

No. 10-1　フィラー側

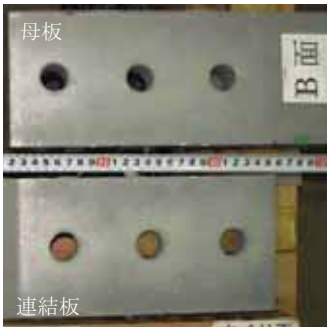
No.10-2　ナット側

No.10-2　ボルト頭側



No.10-2　フィラー側

No. 10-3　ナット側



No. 10-3　ボルト頭側

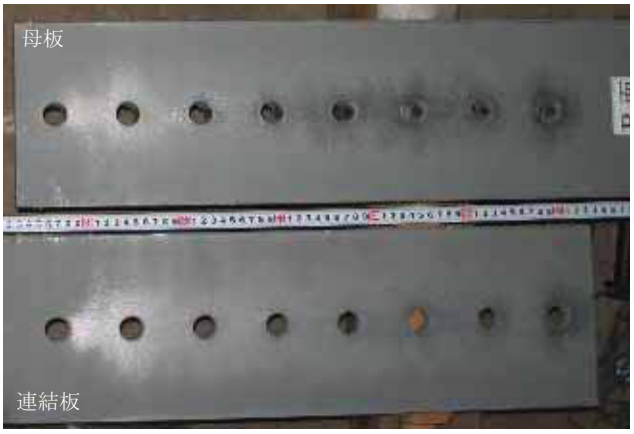
No. 10-3　フィラー側

写真-3.7.11　試験体 No.10

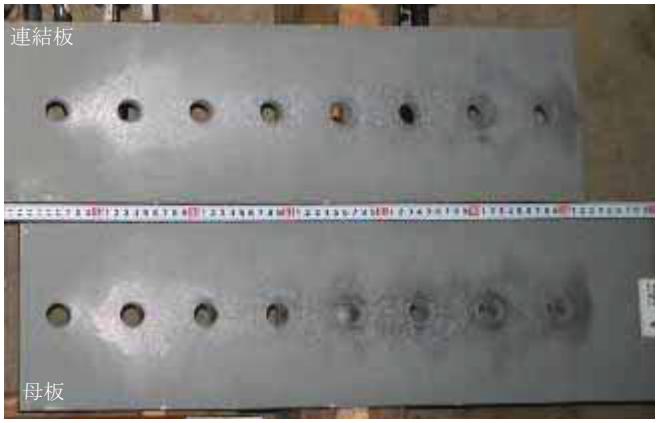
試験体 No.11-1　ナット側

試験体 No.11-1　ボルト頭側

試験体 No.11-2　ナット側



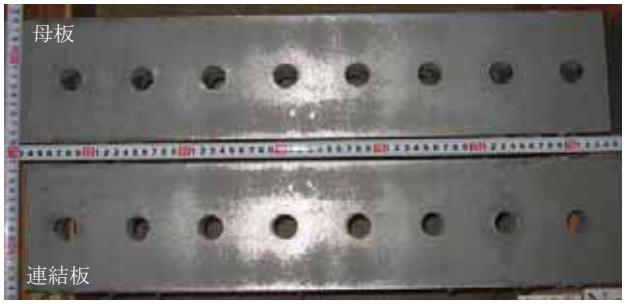
試験体 No.11-2　ボルト頭側



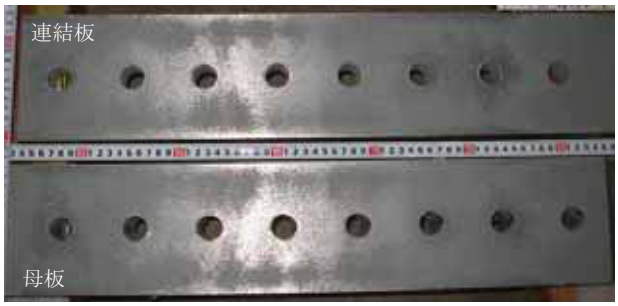
試験体 No.11-3　ナット側

試験体 No.11-3　ボルト頭側

写真-3.7.12　試験体 No.11

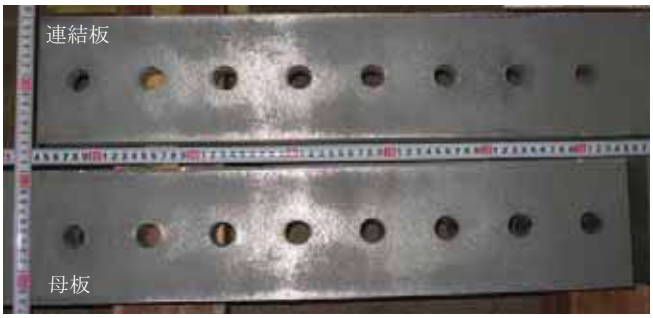


試験体 No.12-1　ナット側



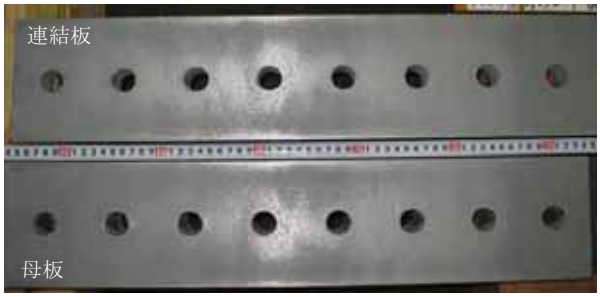
試験体 No.12-1　ボルト頭側

試験体 No.12-2　ナット側



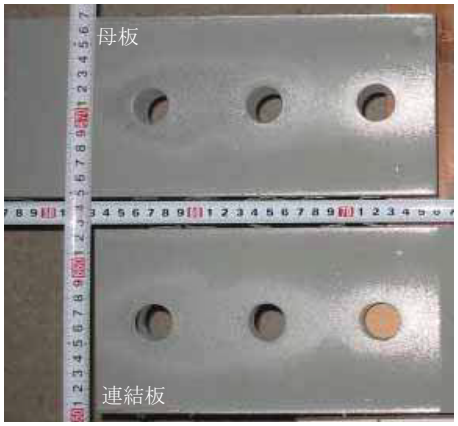
試験体 No.12-2　ボルト頭側

試験体 No.12-3　ナット側

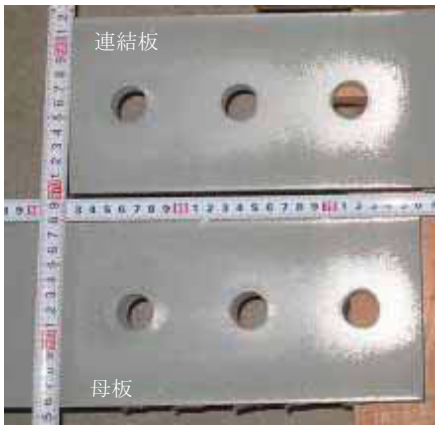


試験体 No.12-3　ボルト頭側

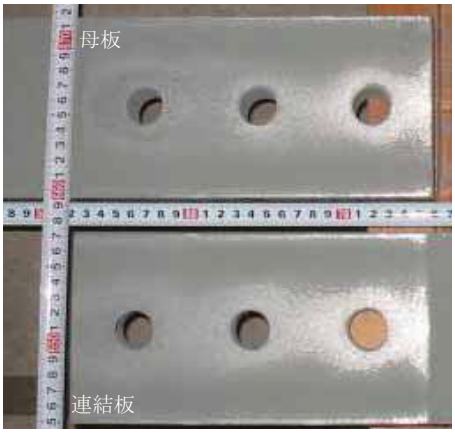
写真-3.7.13　試験体 No.12



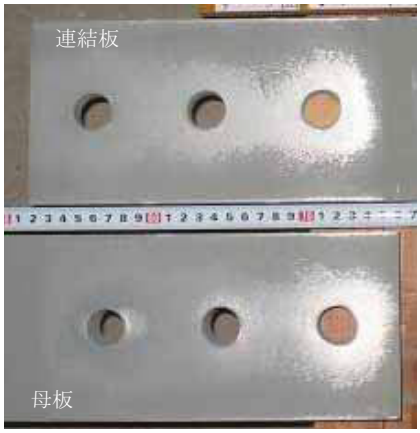
試験体 No.13-1　ナット側



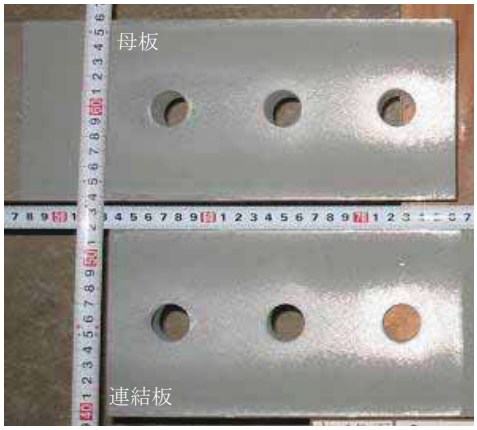
試験体 No.13-1　ボルト頭側



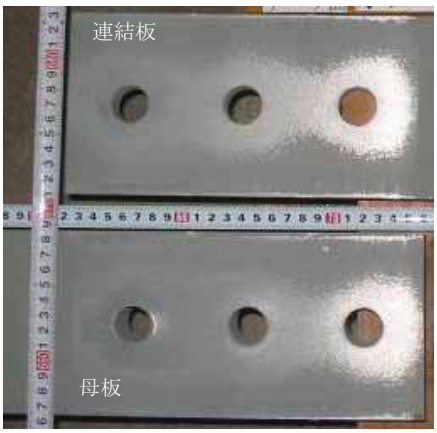
試験体 No.13-2　ナット側



試験体 No.13-2　ボルト頭側

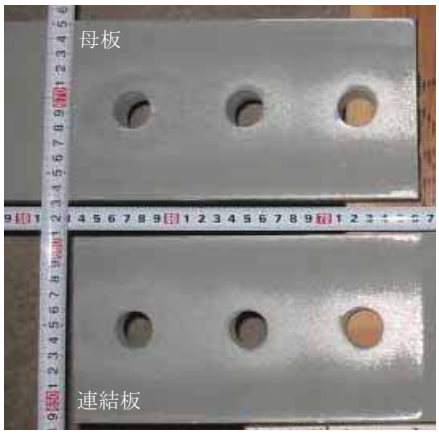


試験体 No.13-3　ナット側

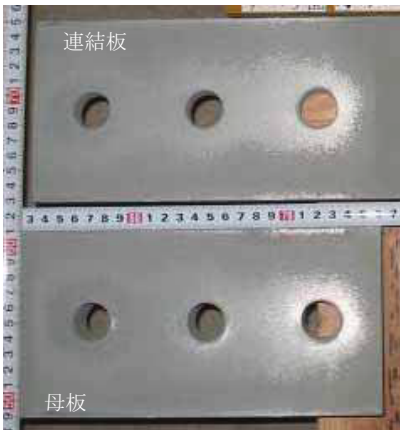


試験体 No.13-3　ボルト頭側

写真-3.7.14　試験体 No.13

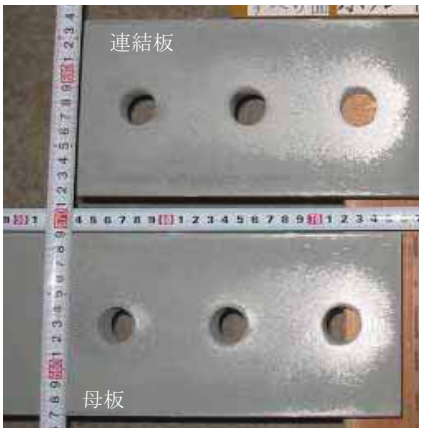


試験体 No.13-4　ナット側



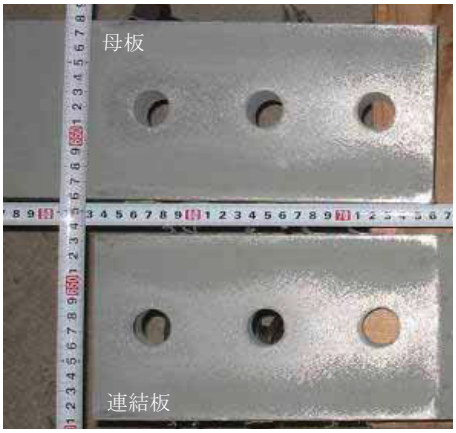
試験体 No.13-4　ボルト頭側

試験体 No.13-5　ナット側

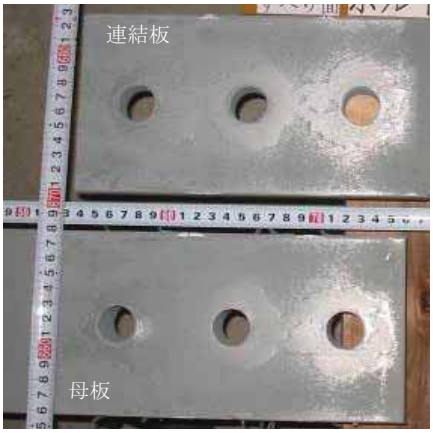


試験体 No.13-5　ボルト頭側

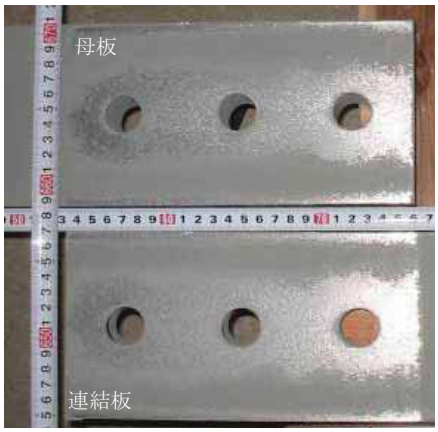
写真-3.7.14　試験体 No.13（続き）



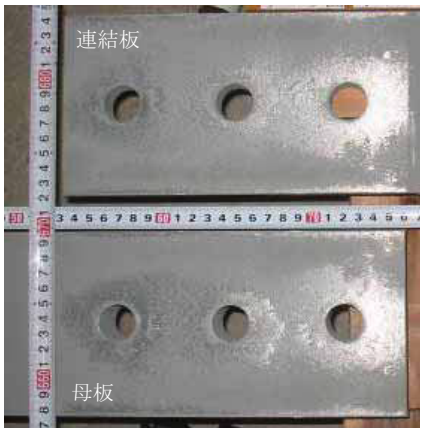
試験体 No.14-1　ナット側



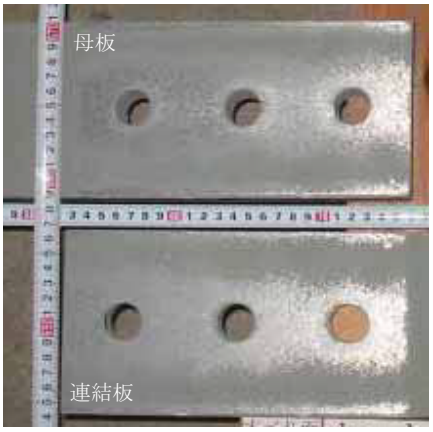
試験体 No.14-1　ボルト頭側



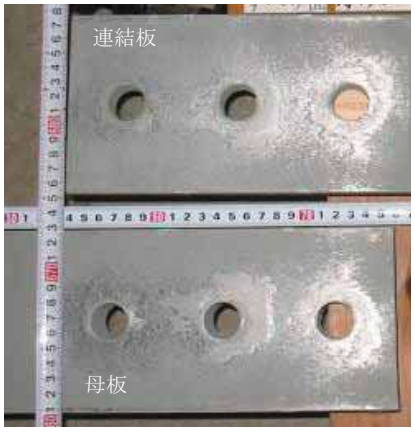
試験体 No.14-2　ナット側



試験体 No.14-2　ボルト頭側

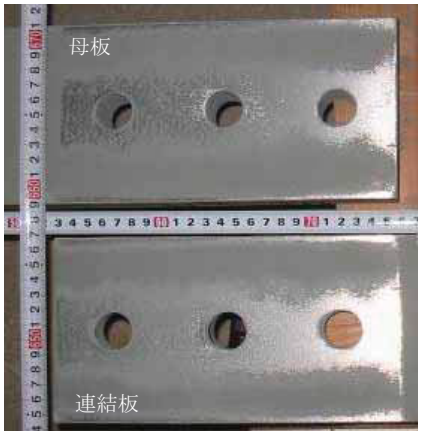


試験体 No.14-3　ナット側

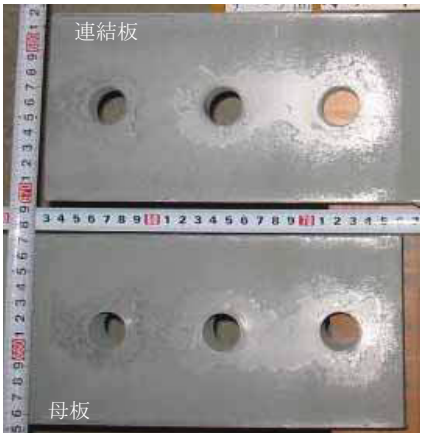


試験体 No.14-3　ボルト頭側

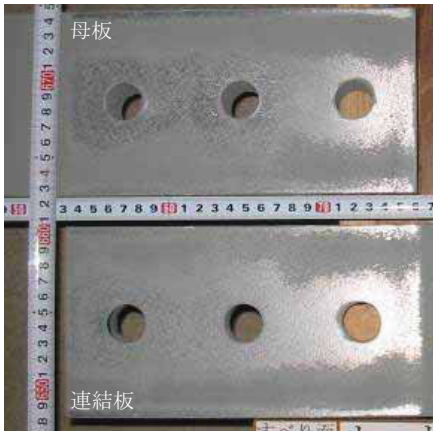
写真-3.7.15　試験体 No.14



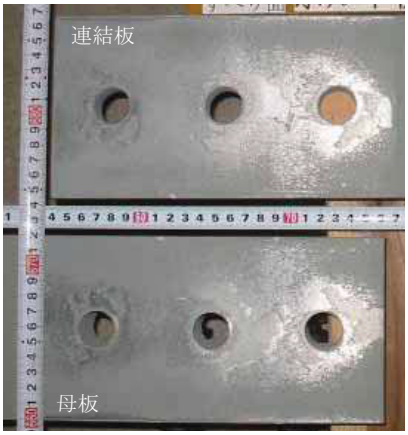
試験体 No.14-4　ナット側



試験体 No.14-4　ボルト頭側



試験体 No.14-5　ナット側



試験体 No.14-5　ボルト頭側

写真-3.7.15　試験体 No.14（続き）

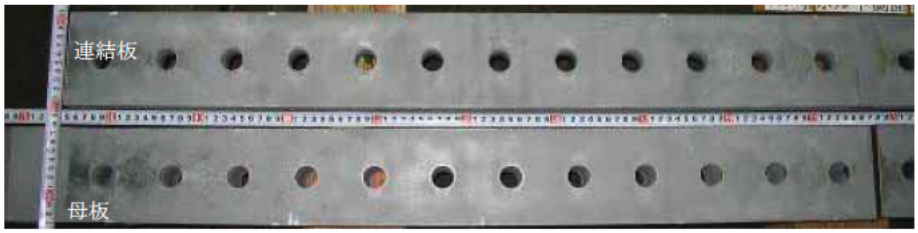
試験体 No.15-1　ナット側

試験体 No.15-1　ボルト頭側

試験体 No.15-2　ナット側

試験体 No.15-2　ボルト頭側

試験体 No.15-3　ナット側



試験体 No.15-3　ボルト頭側

写真-3.7.16　試験体 No.15

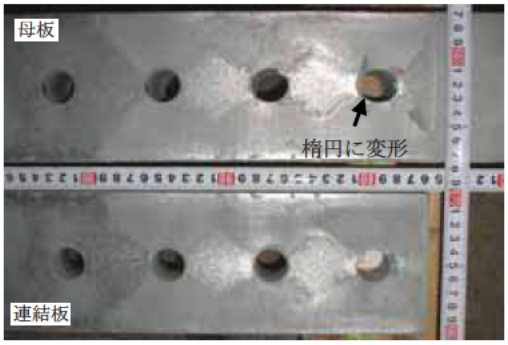


写真-3.7.17　試験体 No.15-1（連結板外側の端部を拡大したもの）

3.7.6　すべり耐力及びすべり係数

表-3.7.2 に，各試験体のすべり耐力及びすべり係数を示す。すべり係数が最も小さい試験体は No.5 の 0.53 であり，いずれの場合も設計すべり係数 0.40 を大きく上回っている。なお，試験体 No.15 のすべり耐力は荷重が最大となったときのものである。

表-3.7.2　すべり係数

ケース	No.	構造諸元										試験結果						
		母材板厚(mm)	連結板板厚(mm)	フィラー板厚(mm)	試験体幅(mm)	ボルト列数	合計膜厚(μm)	設計軸力(kN)	締付軸力(kN)	試験前軸力(kN)	設計すべり耐力(kN) μ 0.4	すべり耐力(kN)	すべり係数 μ_0		すべり係数 μ_1		すべり係数 μ_2	
													各値	平均値	各値	平均値	各値	平均値
基本	1 1	38 38	2×20		120	3	180	205	202	190	492	794	0.65	0.68	0.65	0.67	0.70	0.71
	1 2							205	206	199	492	827	0.67		0.67		0.69	
	1 3							205	206	200	492	822	0.67		0.66		0.69	
	1 4							205	207	195	492	870	0.71		0.70		0.74	
	1 5							205	206	195	492	833	0.68		0.67		0.71	
	2 1	50 50	2×26		120	3	180	205	206	198	492	863	0.70	0.70	0.70	0.70	0.73	0.73
	2 2							205	204	197	492	868	0.71		0.71		0.74	
	2 3							205	204	197	492	850	0.69		0.69		0.72	
	3 1				190	8	180	205	202	198	1312	2,256	0.69	0.71	0.70	0.72	0.71	0.74
	3 2							205	204	196	1312	2,391	0.73		0.73		0.76	
	3 3							205	204	197	1312	2,376	0.72		0.73		0.75	
	4 1				270	12	180	205	204	199	1968	3,455	0.70	0.70	0.70	0.70	0.72	0.73
	4 2							205	204	196	1968	3,496	0.71		0.71		0.74	
	4 3							205	206	198	1968	3,445	0.70		0.70		0.72	
	5 1	75 75	2×38		120	3	180	205	191	185	492	658	0.53	0.53	0.57	0.56	0.59	0.58
	5 2							205	191	186	492	623	0.51		0.54		0.56	
	5 3							205	192	186	492	665	0.54		0.58		0.60	
	5' 1				120	3	180	205	202	197	492	835	0.68	0.68	0.69	0.69	0.71	0.71
	5' 2							205	203	196	492	774	0.63		0.63		0.66	
	5' 3							205	204	197	492	903	0.73		0.74		0.76	
	6 1				130	8	180	205	199	192	1312	2,276	0.69	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75
	6 2							205	202	194	1312	2,381	0.73		0.74		0.77	
	6 3							205	202	194	1312	2,328	0.71		0.72		0.75	
	7 1				190	12	180	205	204	199	1968	3,198	0.65	0.69	0.65	0.68	0.67	0.70
	7 2							205	208	202	1968	3,529	0.72		0.71		0.73	
	7 3							205	205	198	1968	3,375	0.69		0.69		0.71	
ﾌｨﾗｰ	8 1	50 38	2×20	12	110	3	180	205	204	191	492	877	0.71	0.72	0.72	0.73	0.76	0.77
	8 2							205	204	192	492	900	0.73		0.74		0.78	
	8 3							205	202	190	492	890	0.72		0.73		0.78	
	9 1	60 38	2×20	22	110	3	180	205	205	196	492	748	0.61	0.61	0.61	0.62	0.63	0.64
	9 2							205	202	192	492	790	0.64		0.65		0.69	
	9 3							205	203	194	492	715	0.58		0.59		0.61	
	10 1	75 38	2×20	37	110	3	180	205	203	191	492	647	0.53	0.57	0.53	0.58	0.56	0.62
	10 2							205	202	186	492	731	0.59		0.60		0.66	
	10 3							205	201	190	492	744	0.60		0.62		0.65	
肌隙	11 1	50 49	2×26		190	8	180	205	204	198	1312	2,102	0.64	0.66	0.64	0.66	0.66	0.69
	11 2							205	203	197	1312	2,219	0.68		0.68		0.71	
	11 3							205	204	193	1312	2,168	0.66		0.67		0.70	
	12 1	75 74	2×38		270	8	180	205	203	198	1312	2,024	0.62	0.63	0.62	0.65	0.64	0.67
	12 2							205	199	192	1312	2,103	0.64		0.66		0.69	
	12 3							205	199	192	1312	2,103	0.64		0.66		0.68	
塗膜厚	13 1	38 38	2×20		120	3	120	205	208	197	492	792	0.64	0.64	0.63	0.63	0.67	0.67
	13 2							205	207	195	492	810	0.66		0.65		0.69	
	13 3							205	207	196	492	786	0.64		0.63		0.67	
	13 4							205	205	194	492	757	0.62		0.62		0.65	
	13 5							205	204	195	492	778	0.63		0.64		0.67	
	14 1				120	3	250	205	203	191	492	834	0.68	0.68	0.68	0.68	0.73	0.73
	14 2							205	203	191	492	875	0.71		0.72		0.76	
	14 3							205	209	195	492	823	0.67		0.66		0.71	
	14 4							205	211	194	492	824	0.67		0.65		0.71	
	14 5							205	203	191	492	838	0.68		0.69		0.73	
降伏型	15 1	75 75	2×38		110	12	180	205	204	197	1968	2,975	0.60	0.58	0.61	0.58	0.63	0.60
	15 2							205	206	200	1968	2,753	0.56		0.56		0.57	
	15 3							205	209	204	1968	2,918	0.59		0.58		0.60	

3.8　考察

今回の試験結果や既往の研究成果を踏まえて，厚板多列継手の継手性能と，それに影響を与える要因との関係について考察を行う。ここでは，すべり耐力（すべり係数）およびボルト残存軸力などの継手性能に影響を与える要因として，(1) 板厚，(2) ボルト列数，(3) フィラープレート厚，(4) 肌すきの有無，(5) 塗膜厚，(6) すべり/降伏耐力比，(7) 表面形状に着目する。

(1) 板厚の影響

板厚が 1) すべり係数，2) ボルト軸力に与える影響について考察を行う。また，締付け厚が大きくなる場合に用いる長尺ボルトについても考察を行う。

1) すべり係数

基本ケースの中から，母板厚 38mm（試験体 No.1），母板厚 50mm（試験体 No.2，No.3），母板厚 75mm（試験体 No.5’，No.6）を比較する。なお，これらの試験体のすべり/降伏耐力比 β は全て 0.7 以下である。

表-3.8.1，表-3.8.2 に，各試験体のすべり係数 μ_0 およびすべり係数 μ_2 を示す。また，図-3.8.1，図-3.8.2 に，板厚とすべり係数の関係を示す。すべり係数 μ_0，すべり係数 μ_2 は，ともに板厚に関わらずほぼ一定であるが，板厚 75mm でボルト 3 列の場合，ばらつきが大きく，一部すべり係数の小さいものがある。一般に，鋼板端部の凹凸や部材のそり等の初期不整に対し，母板と連結板はボルト軸力によって弾性変形して接触面が密着する。板厚が厚く，ボルト本数が少ないと接触面が密着しにくくなり，接触圧が低下することからすべり係数が低下したものと考えられる。また，図-3.6.7（試験体 No.5’，板厚 75mm）で示すボルト 3 列試験体の接触圧力は，ボルト孔周りで不均一な圧力分布となっており，これが原因ですべり係数が低下したものと考えられる。

図-3.8.3 に，今回の試験結果の他，厚板に関する既往の研究結果 [4,5,6] を併記したものを示す。既往の研究については，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した試験体を用いたものを対象としている。これらの研究成果での試験と今回の試験では，試験体の形状や組み立てからすべり耐力試験までの経過期間などが異なるため，厳密に板厚の影響について比較することは困難であるが，いずれの場合であってもすべり係数は 0.4 以上を確保することができている。

表-3.8.1　板厚とすべり係数 μ_0

ケース名		板厚(mm)			すべり係数 μ_0					
		母板	連結板	締付け厚	各体値					平均値
3列	No.1	38	20	78	0.65	0.67	0.67	0.71	0.68	0.68
	No.2	50	26	102	0.7	0.71	0.69			0.70
	No.5'	75	38	151	0.68	0.63	0.73			0.68
8列	No.3	50	26	102	0.69	0.73	0.72			0.71
	No.6	75	38	151	0.69	0.73	0.71			0.71

表-3.8.2　板厚とすべり係数 μ_2

ケース名		板厚(mm)			すべり係数 μ_2					
		母板	連結板	締付け厚	各体値					平均値
3列	No.1	38	20	78	0.7	0.69	0.69	0.74	0.71	0.71
	No.2	50	26	102	0.73	0.74	0.72			0.73
	No.5'	75	38	151	0.71	0.66	0.76			0.71
8列	No.3	50	26	102	0.71	0.76	0.75			0.74
	No.6	75	38	151	0.74	0.77	0.75			0.75

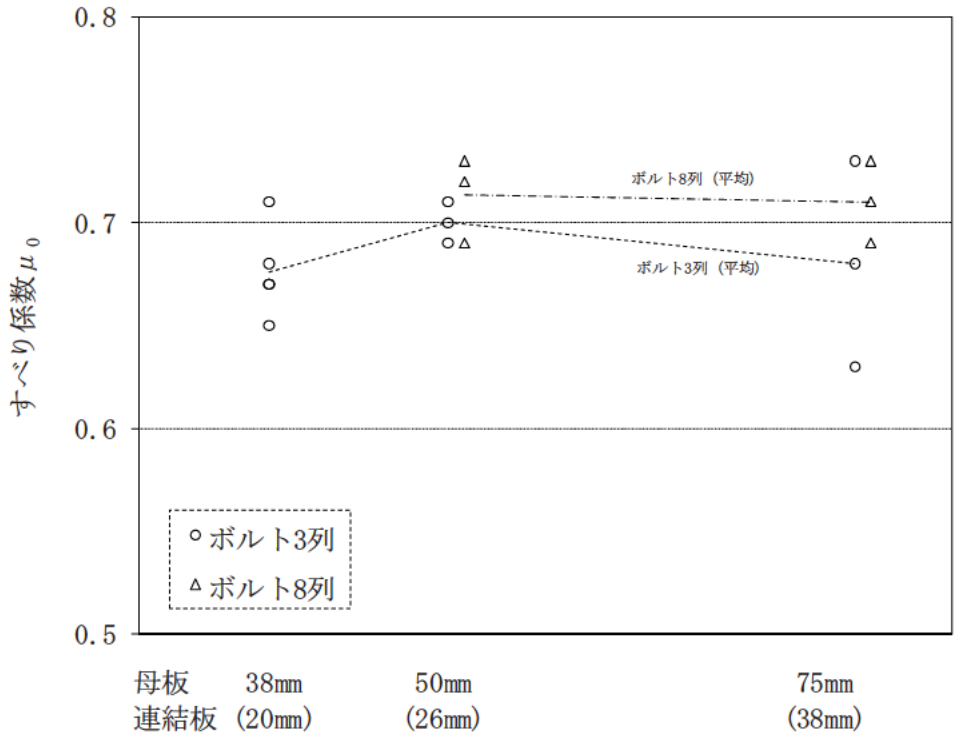


図-3.8.1　板厚とすべり係数 μ_0 の関係

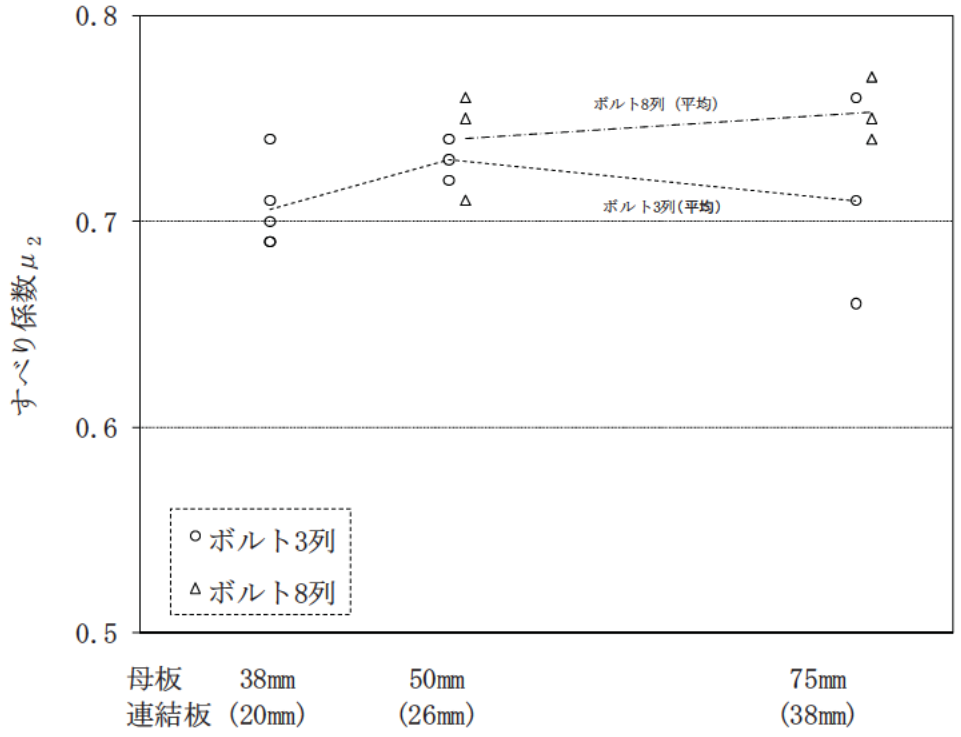


図-3.8.2　板厚とすべり係数 μ_2 の関係

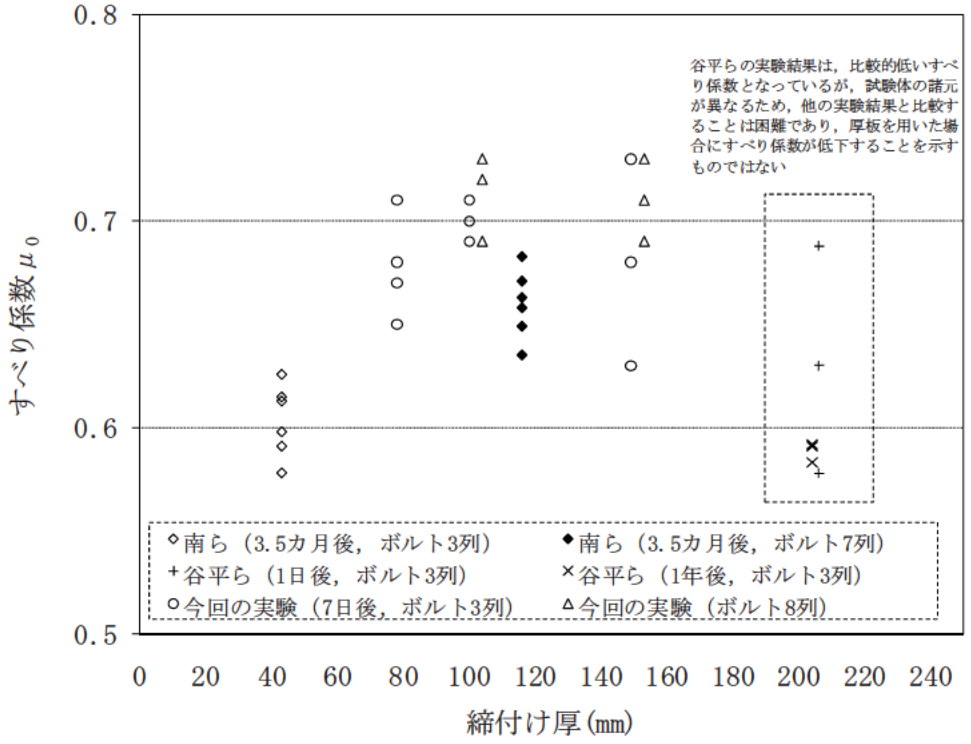


図-3.8.3　締付け厚とすべり係数 μ_0 の関係
（既往の研究における試験結果及び今回の試験結果）

2）ボルト軸力低下

基本ケースの試験体 No.1（板厚 38mm）, 試験体 No.2, No.3, No.4（板厚 50mm）, 試験体 No.5’， No.6, No.7（板厚 75mm）において，軸ひずみの計測を行った全てのボルトを対象としている。図-3.8.4 に，7 日経過後の軸力残存率と板厚の関係を示す。板厚が大きいほど軸力残存率が大きくなる傾向が見られる。ボルト軸力による支圧を受けた塗膜は，その厚さが減少することに伴ってボルト軸力が低下するが，板厚が大きいほど塗膜厚の影響が相対的に小さくなるために軸力残存率が大きくなったと考えられる。

今回の試験結果の他，厚板に関する既往の研究結果[4,5,6]を併記したものを図-3.8.5 に示す。既往の研究については，（1）と同様に接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した試験体を用いたものを対象としている。これらの試験に用いた試験体と今回の試験体では，板厚構成や組み立てからすべり耐力試験までの経過期間などが異なるため，これらの試験を比較して厳密に板厚の影響だけを整理することは困難であるが，今回の試験結果や南らの研究[4,5]によると，ボルトの軸力残存率は板厚が厚いほど大きくなる可能性が高いと考えられる。

3）ボルトの機械的性質，遅れ破壊性能

今回の試験では，締付け厚が厚くなる場合に用いる長尺ボルトの機械的性質について，特に確認試験などは行っていない。ただし，JIS B 1186 では，ボルト首下長さの基準寸法について M22 の場合に 160mm，M24 の場合に 180mm まで規定しており，特に必要がある場合にはこれを超えるものを使用することができるとされている。また，ボルト軸部分の製作方法が変わるものではないので，ボルトの機械的性質，遅れ破壊性能については，一般的な長さのボルトとの相違はないものと考えられる。なお，過去の実績では，M24 の場合に首下長さ 250mm のボルトが適用された事例[6]があり，今回の試験では，首下長さが 195mm（M22）のボルトを使用している。

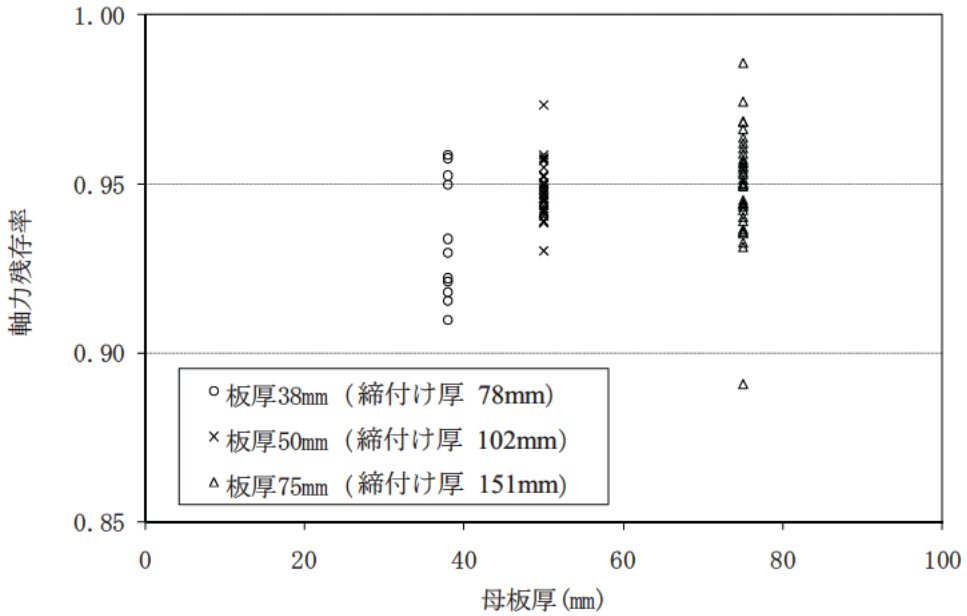


図-3.8.4　7 日経過後の軸力残存率と母板厚の関係

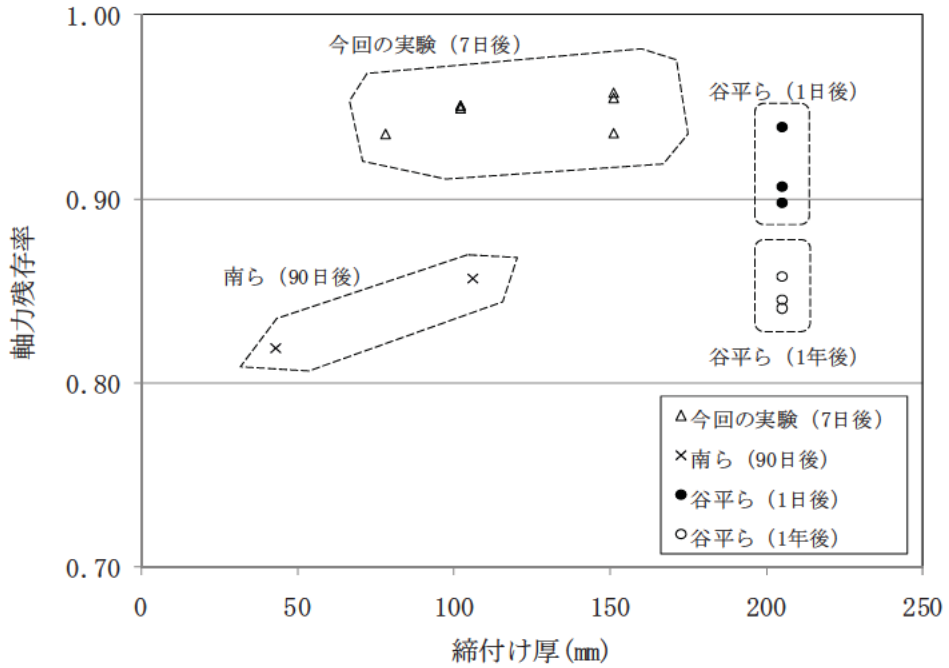


図-3.8.5　締付け厚と軸力残存率の関係
（既往の研究における試験結果及び今回の試験結果）

（2）ボルト列数の影響

基本ケースのうち，ボルト 3 列（試験体 No.1，No.2，No.5’），ボルト 8 列（試験体 No.3，No.6），ボルト 12 列（試験体 No.4，No.7）を比較する。なお，これらの試験体のすべり/降伏耐力比 β は全て 0.7 以下である。すべり耐力比とは，各試験体のすべり係数 μ_2 と 3 列試験体のすべり係数 μ_2（平均値）の比を示したものである。表-3.8.3 に，各試験体のすべり係数 μ_2 とすべり耐力比を，図-3.8.6 に，ボルト列数とすべり耐力比の関係をそれぞれ示す。本試験では，ボルト列数が 8 列から 12 列へ増えるとすべり耐力が板厚 50mm で 1%，板厚 75mm で 7%程度低下する傾向がみられる。また，ボルト 3 列と 8 列とを比較すると明確なすべり耐力の低下は認められない。

図-3.8.7 に，本試験結果に厚板多列ボルト継手に関する既往の研究結果 [10, 11] を加えたものを示す。既往の研究については，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した試験体を用いて試験を行ったものを対象としている。これらの試験結果はボルト径や板厚が異なるため，厳密に板厚の影響だけを整理することは困難であるが，いずれの試験結果においても，多列となる場合にはすべり係数が低下する傾向が得られている。玉越らの試験 [11] では，12 列試験体のすべり耐力比の低下量が今回の試験と近いものとなっている。一方，馬場らの試験結果 [10]では，6～12 列試験体のすべり耐力比の低下率が今回の試験よりも小さくなっている。玉越らの試験における試験体は β が約 0.2～0.4 に対し，馬場らの試験における試験体は β が約 0.7～0.75 と高めであり，馬場らの試験における，列数によるすべり耐力の低下傾向については，β が影響を与えている可能性も考えられる。

図-3.8.8 に，本試験結果（平均値）に厚板多列ボルト継手の解析結果を加えたものを示す。解析方法については, 4 章で詳述する。また, 表-3.8.4, 3.8.5 に既往の研究成果と解析結果をまとめたものを示す。今回の解析では，母板の厚さの違いにより，すべり耐力の低下の程度や低下し始める列数が異なるが，母板厚 50mm 及び 75mm の解析結果は, 今回の試験結果（母板 75mm）の低下量と同程度となっている。また図中に, 亀井らの研究 [12]におけるすべり耐力の低減式についても併記する。この低減式については，5 列以上に適用するのが妥当であるとされており，4 列までのすべり耐力比を 1.0 としているため，4~5 列間でのすべり耐力比が大きく低下しているが，5 列以降のすべり耐力比の低下率は，今回の解析に近いものとなっている。

佐伯ら [9] の研究では，接触面を無塗装とした継手を対象にすべり耐力試験を実施している。2.2.2 項で述べたように，荷重方向のボルト本数が 10 本や 12 本の場合に，継手の端部ですべりが生じた後，端部のボルトが支圧状態となり母板やボルトの破断に至る性状があったことが報告されており，このことからボルト列数は 8 列以下とするのが良いとしている。一方，本試験では，いずれのボルト列数においても全体すべりが生じている。このようにすべり性状が異なるのは，佐伯らの研究で用いられた試験体のボルト間隔（110mm）が比較的大きく，かつ母板の降伏等が影響を与えている可能性が考えられる。なお，常時に対する継手の設計においては，母材降伏に対して安全率を見込んだ設計が行われており，母材降伏の影響が生じるような作用力は想定していないため，今回の試験では β の影響のない試験体としている。

表-3.8.3　ボルト列数とすべり係数 μ_2・すべり耐力比（今回の試験）

（a）板厚 50mm

	すべり係数 μ_2				すべり耐力比			
	各試験体値			平均値	各試験体値			平均値
3 列	0.73	0.74	0.72	0.73	1.00	1.01	0.99	1.00
8 列	0.71	0.76	0.75	0.74	0.97	1.04	1.03	1.01
12 列	0.72	0.74	0.72	0.73	0.99	1.01	0.99	1.00

（b）板厚 75mm

	すべり係数 μ_2				すべり耐力比			
	各試験体値			平均値	各試験体値			平均値
3 列	0.71	0.66	0.76	0.71	1.00	0.93	1.07	1.00
8 列	0.74	0.77	0.75	0.75	1.04	1.08	1.06	1.06
12 列	0.67	0.73	0.71	0.70	0.94	1.03	1.00	0.99

表-3.8.4　ボルト列数とすべり耐力比（既往の研究）

ボルト列数	玉越ら（M22,S14T）				馬場ら（M30）	亀井ら[注1)]
	各試験体値			平均値		
3列					1.00	1.00
4列	1.03	0.99	0.99	1.00		1.00
5列						0.93
6列					0.97	0.91
7列						0.89
8列	0.97	1.06	1.00	1.01	0.96	0.87
9列						0.87
10列						
11列						
12列	0.96	0.87	0.97	0.93	0.93	

注1）亀井らの解析は4列のすべり耐力を基本として，それとの比率を示したものである

表-3.8.5　すべり耐力比（解析結果）

	32mm	50mm	75mm
3 列	1.00	1.00	1.00
5 列	1.00	1.00	1.00
8 列	0.99	0.99	0.99
10 列	0.91	0.98	0.99
12 列	0.81	0.90	0.95

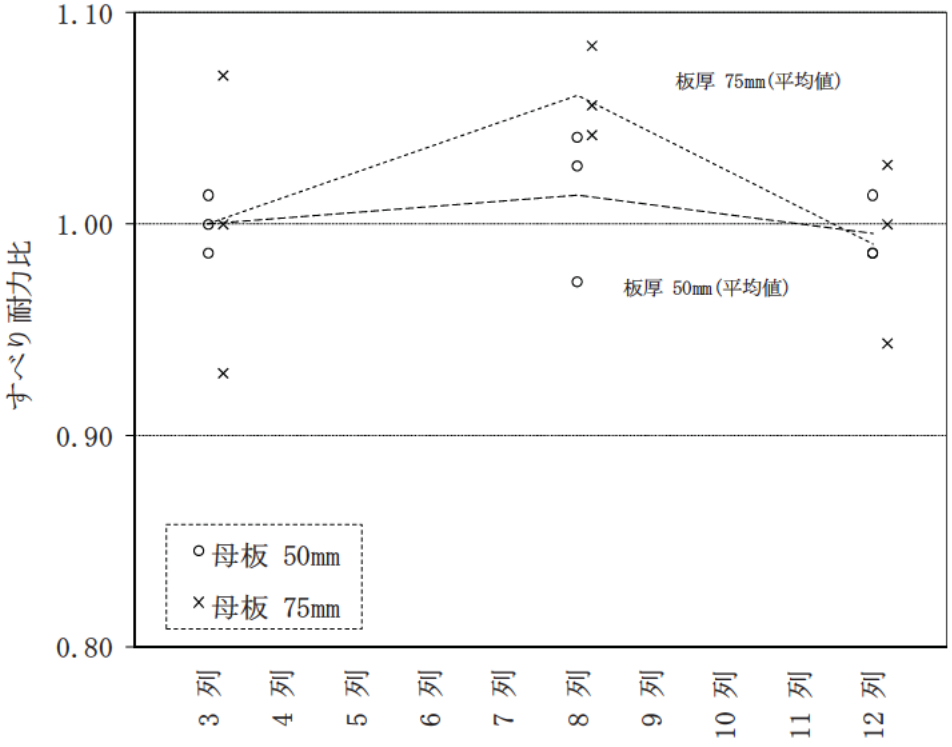


図-3.8.6　ボルト列数とすべり耐力比（今回の試験）

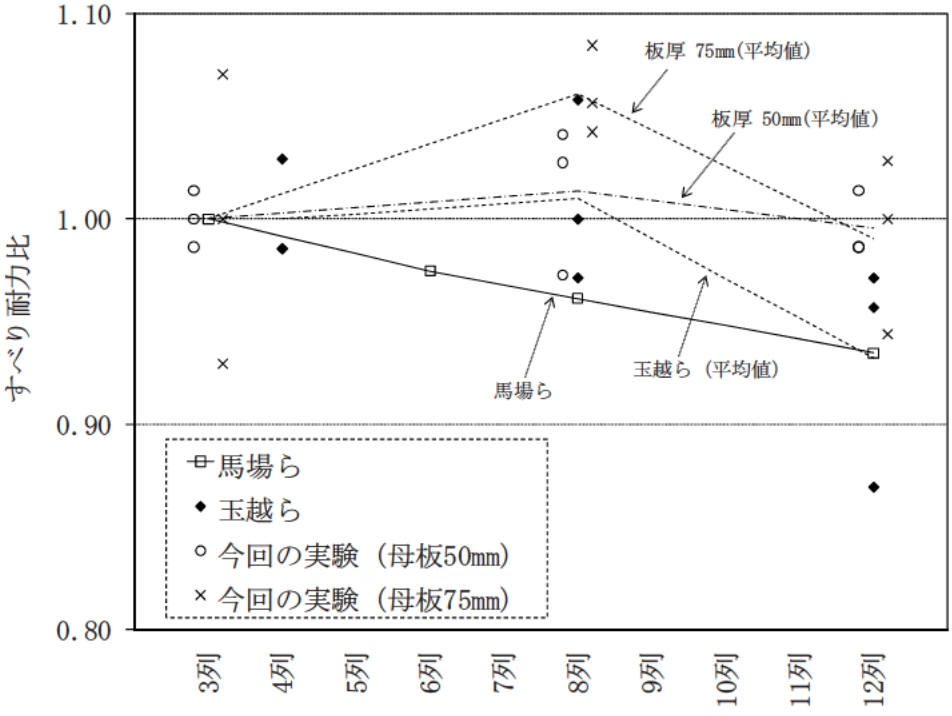


図-3.8.7　ボルト列数とすべり耐力比（他の研究との比較）

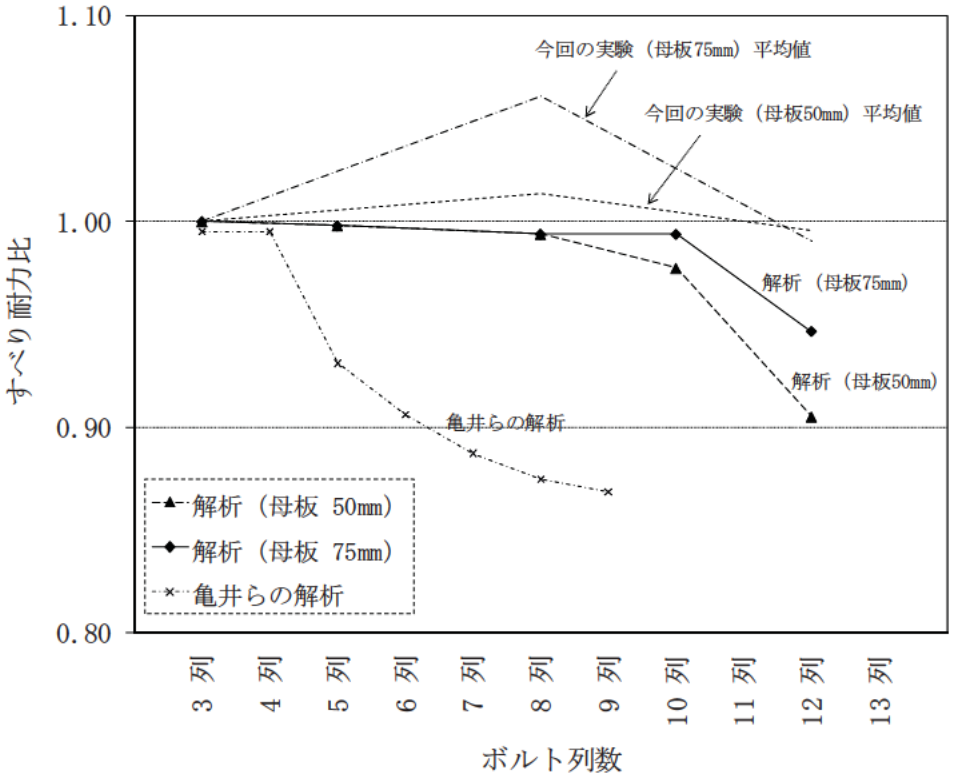


図-3.8.8　ボルト列数とすべり耐力比（解析との比較）

（3）フィラープレートの影響

フィラーケースの試験体 No.8（フィラープレート厚 12mm），試験体 No.9（22mm），試験体 No.10（38mm）とフィラープレートのない基本ケースの試験体 No.1 を比較する。既往の研究によると，フィラープレートを有する継手のすべり耐力は，断面変化率がある程度の値以上となる場合に，低下する可能性があるとされていることから，ここではフィラープレート厚に加えて，断面変化率にも着目して整理する。ここで，断面変化率とはフィラー厚を厚い方の母板厚で除したものである。

表-3.8.6～表-3.8.8 に，試験体の断面変化率，すべり係数 μ_2，すべり耐力比を示す。ここで，すべり耐力比とは，各試験体のすべり係数 μ_2 を基本ケース（No.1）のすべり係数 μ_2 の平均値で除したものである。図-3.8.9 に，フィラープレート厚とすべり耐力比の関係を示す。フィラープレート厚が 12mm の場合，フィラープレートの無いものよりもすべり耐力比が大きくなっている。一方，フィラープレート厚が 22mm の場合，すべり耐力比が平均 91%まで低下しており，フィラープレート厚が 38mm の場合，平均 88%まで低下している。このようにフィラープレートの板厚は薄い場合のすべり耐力が高くなるものの，板厚が薄くなると大きく低下する傾向が確認された。これは，フィラーが厚いほど母板中心軸のズレによる偏心曲げモーメントが大きくなり，継手部のすべり耐力に影響を及ぼすためと考えられる。

図-3.8.10 に，断面変化率とすべり耐力比の関係を示す。フィラープレート厚と断面変化率では傾向に大きな差異はなく，断面変化率が 0.30 となる辺りですべり耐力比が低下する傾向となっている。現行道示では，断面変化率が 50%以下となるように規定しているが，フィラープレート厚 37mm を用いた場合，断面変化率を 50%ではあるが，すべり耐力比は 80%程度まで低下しているものもある。

図-3.8.11 に，今回の試験結果の他，肌すきに関する既往の研究結果を加えたものを示す。既往の研究については，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装したもので，かつすべり/降伏耐力比 β が 0.7 以下の試験結果を対象としたものである。表-3.8.9 に，これらの試験で得られたすべり耐力比を示す。宮地らの研究 [15] では，フィラープレート厚が 0～19mm の範囲ですべり耐力比はほぼ一定であるが，滝澤らの研究 [14] では，フィラープレート厚が 22mm の場合にすべり耐力が低下する傾向となっている。図-3.8.12 は，図-3.8.10 と同様に，断面変化率とすべり耐力比の関係を示したものである。この場合も，断面変化率が 0.30 となる辺りですべり耐力比が低下する傾向となっている。ただし，これらの試験結果（今回の試験含む）は，全てボルト列数が 3 列のものであり，ボルト列数が多い場合には，すべり耐力比の傾向が変わる可能性も考えられる。

表-3.8.6　断面変化率（今回の試験）

試験体No.	フィラープレート厚(mm)	母板厚(mm)		断面変化率
		薄い方の板厚	厚い方の板厚	
No.1	0	38	38	0.00
No.8	12	38	50	0.24
No.9	22	38	60	0.37
No.10	37	38	75	0.49

表-3.8.7　すべり係数 μ_2（今回の試験）

試験体No.	フィラープレート厚(mm)	断面変化率	すべり係数 μ_2					
			各体値					平均値
No.1	0	0.00	0.70	0.69	0.69	0.74	0.71	0.71
No.8	12	0.24	0.76	0.78	0.78			0.77
No.9	22	0.37	0.63	0.69	0.61			0.64
No.10	37	0.49	0.56	0.66	0.65			0.62

表-3.8.8　すべり耐力比（今回の試験）

試験体No.	フィラープレート厚(mm)	断面変化率	すべり耐力比					
			各体値					平均値
No.1	0	0.00	0.99	0.98	0.98	1.05	1.01	1.00
No.8	12	0.24	1.08	1.10	1.10			1.10
No.9	22	0.37	0.89	0.98	0.86			0.91
No.10	37	0.49	0.79	0.93	0.92			0.88

表-3.8.9　すべり耐力比（既往の研究）

	フィラープレート厚(mm)	断面変化率	すべり耐力比			
			各体値			平均値
宮地ら	0	0.00	1.01	1.01	0.98	1.00
	6	0.16	1.08	1.05	1.04	1.06
	13	0.34	1.08	0.96	0.99	1.01
	19	0.50	0.96	0.97	1.01	0.98
滝澤ら	0	0	1.04	0.99	0.98	1.00
	3	0.12	1.03	1.01	0.96	1.00
	22	0.5	0.84	0.84	0.88	0.85

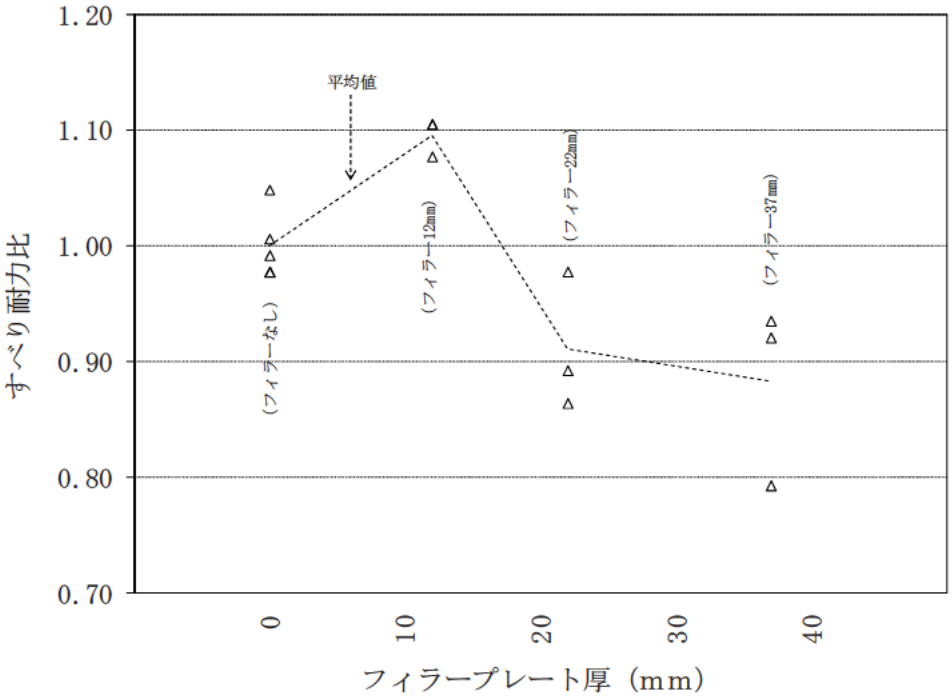


図-3.8.9　フィラープレート厚とすべり耐力比（今回の試験）

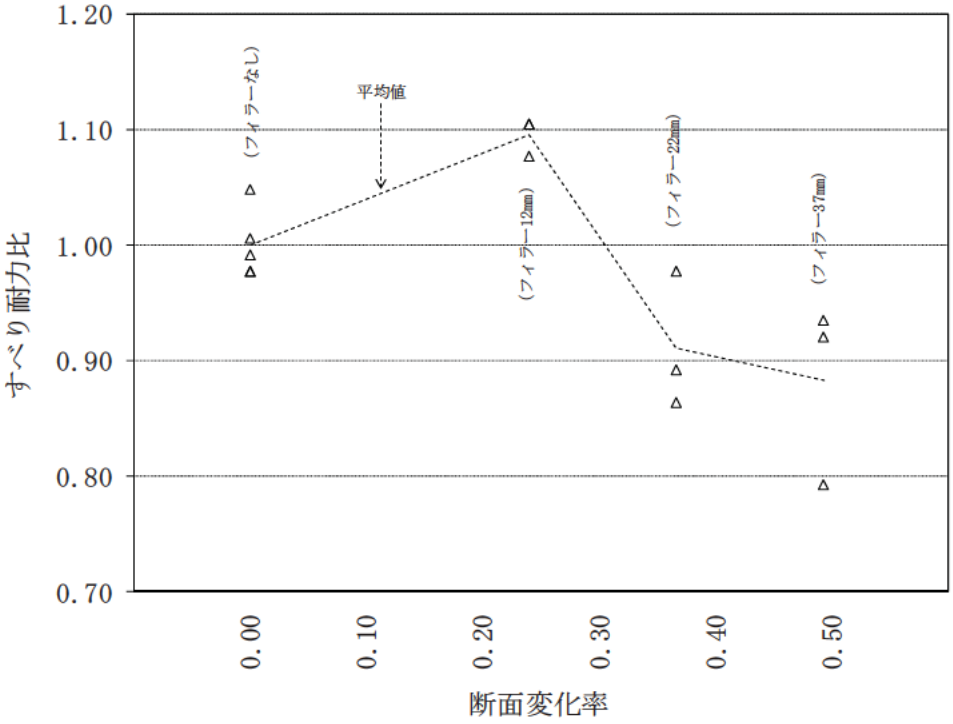


図-3.8.10　断面変化率とすべり耐力比（今回の試験）

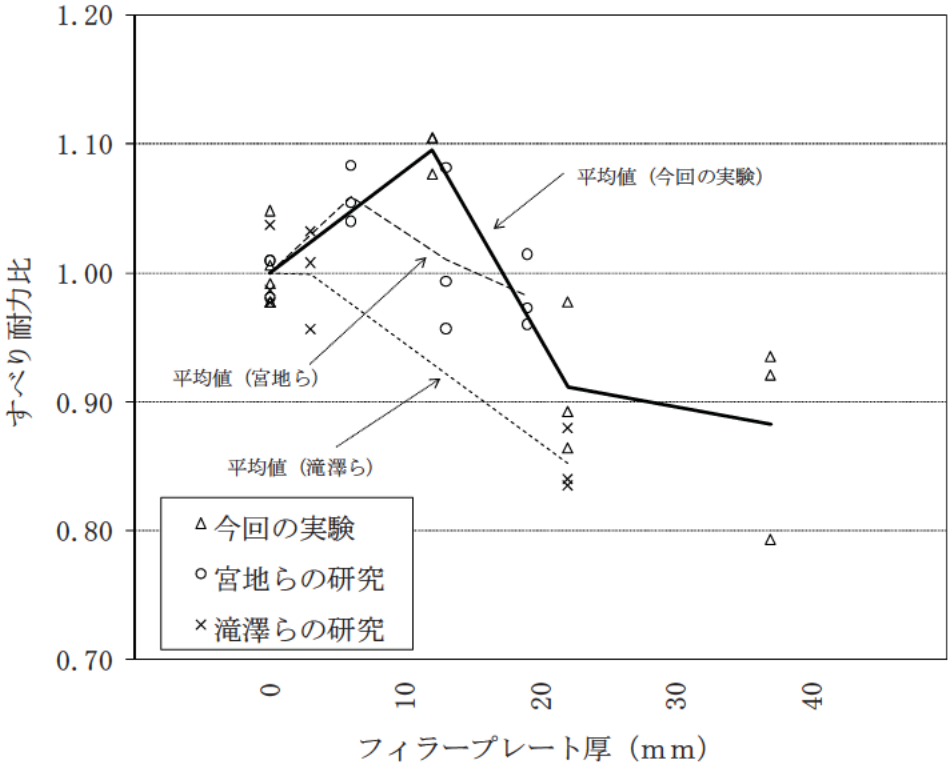


図-3.8.11　フィラープレート厚とすべり耐力比（今回の試験結果および既往の研究成果）

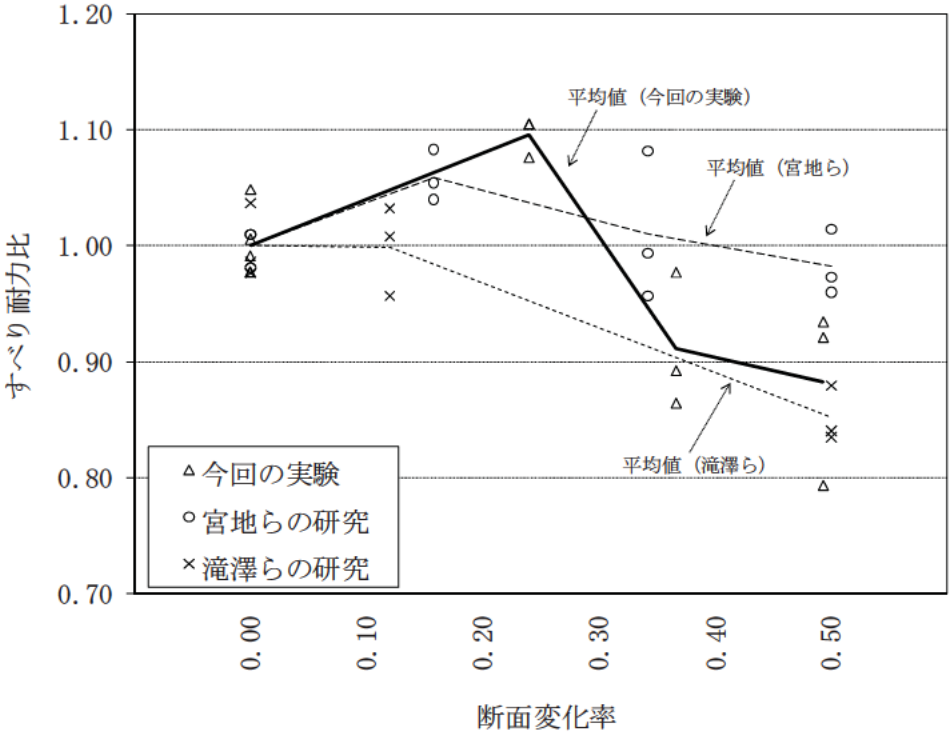


図-3.8.12　断面変化率とすべり耐力比（今回の試験結果および既往の研究成果）

(4) 肌すきの影響

肌すきの有無が，すべり係数，ボルト軸力に与える影響について考察を行う。

1) すべり係数

基本ケースの試験体 No.3（母板 50mm，連結板 26mm），試験体 No.6（母板 75mm，連結板 38mm）と，肌すきケースの試験体 No.11（母板 50mm，連結板 26mm），試験体 No.12（母板 75mm，連結板 38mm）を比較する。これらは，いずれもボルト 8 列の試験体である。

表-3.8.10 に, それぞれの試験体のすべり係数 μ_2 とすべり耐力比を示す。ここで, すべり耐力比とは, 各試験体のすべり係数 μ_2 と，肌すきなし試験体のすべり係数 μ_2（平均値）の比を示したものである。図-3.8.13 に，肌すきの有無とすべり耐力比の関係を示す。肌すきがある場合，すべり耐力比が低下する傾向にある。これは，肌すきがあると接触面が密着しにくく，接触圧力が失われるためにすべり耐力が低下したものと考えられる。また，連結板が厚いほどすべり耐力比が小さく，母板厚 50mm（連結板 26mm）で平均 0.93，母板厚 75mm（連結板 38mm）で平均 0.89 となっている。これは，連結板が厚いほど曲げ剛性が大きく，接触面に密着しにくいために，接触圧力が小さくなって，すべり耐力比が小さくなったものと考えられる。

図-3.8.14 に，今回の試験結果の他，肌すきに関する既往の研究結果[16,17]を加えたものを示す。これらの試験結果については，いずれも接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装したものである。大まかな傾向をみると，板厚差が大きくなるほど，すべり耐力比が低下する傾向にあるが，板厚差 1mm の場合は大きくばらつく結果となっている。文献 3）では，肌すきのある継手において，すべり耐力に影響を与える要因は板厚差の他に，ボルト列数，連結板厚等があるとしている。そのため，試験条件の異なる研究事例を比較して，厳密に肌すきだけの影響を評価することは難しいと考えられる。そこで，板厚差 1mm の試験結果だけを対象として，ボルト列数とすべり耐力比を整理したものを図-3.8.15 に示す。試験体数が少ないため，厳密に比較することは困難であるが，ボルト列数が 2 列の試験体では，すべり耐力比が小さくなっている。これは，板厚差がある場合に内側第 1 ボルト近傍の接触圧力が低下するため，ボルト列数が少ないほどすべり耐力比の低下が顕著になるためと考えられる。宮崎ら[18]は FEM 解析により，板厚差を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に対して，ボルト列数，板厚，縁端距離や材質が与える影響について検討を行っている。これらの検討結果のうち，連結板の板厚の影響を比較すると，図-3.8.16 に示す通り，連結板が厚くなるほどすべり耐力が低下しており，今回の試験結果と同じ傾向がみられる。また，ボルト列数が与える影響についても，図-3.8.17 に示す通り，ボルト列数が少ないほどすべり耐力が低下している。

表-3.8.10　すべり係数 μ_2 およびすべり耐力比

（a）板厚 50mm

	すべり係数 μ_2				すべり耐力比			
	各体値			平均値	各体値			平均値
肌すきなし	0.71	0.76	0.75	0.74	0.96	1.03	1.01	1.00
肌すき1mm	0.66	0.71	0.70	0.69	0.89	0.96	0.95	0.93

（b）板厚 75mm

	すべり係数 μ_2				すべり耐力比			
	各体値			平均値	各体値			平均値
肌隙なし	0.74	0.77	0.75	0.75	0.98	1.02	1.00	1.00
肌隙1mm	0.64	0.69	0.68	0.67	0.85	0.92	0.90	0.89

表-3.8.11　鞆ら[16]，日本橋梁建設協会[17]の試験結果

	試験体 No.	連結板厚さ (mm)	ボルト列数	板厚差 (mm)	すべり係数 μ_2			
					各体値			平均値
鞆ら	C-2	19	2	1.0	0.55	0.56	0.52	0.54
	D-2	16	2	1.0	0.45	0.49	0.50	0.48
日本橋梁建設協会	2	16	4	1.0	0.56	0.55	0.54	0.55
	3	16	4	2.0	0.50	0.54	0.54	0.53

表-3.8.12　宮崎ら[18]の解析結果

	試験体 No.	連結板厚さ (mm)	ボルト列数	すべり耐力比			
				板厚差 1mm	板厚差 2mm	板厚差 3mm	板厚差 4mm
宮崎ら	A	16	4	0.96	0.93	0.86	0.80
	C	19	4	0.89	0.85	0.80	0.78
	F	20	5	0.94	0.89	0.84	0.79
	J	20	4	0.94	0.87	0.80	0.76

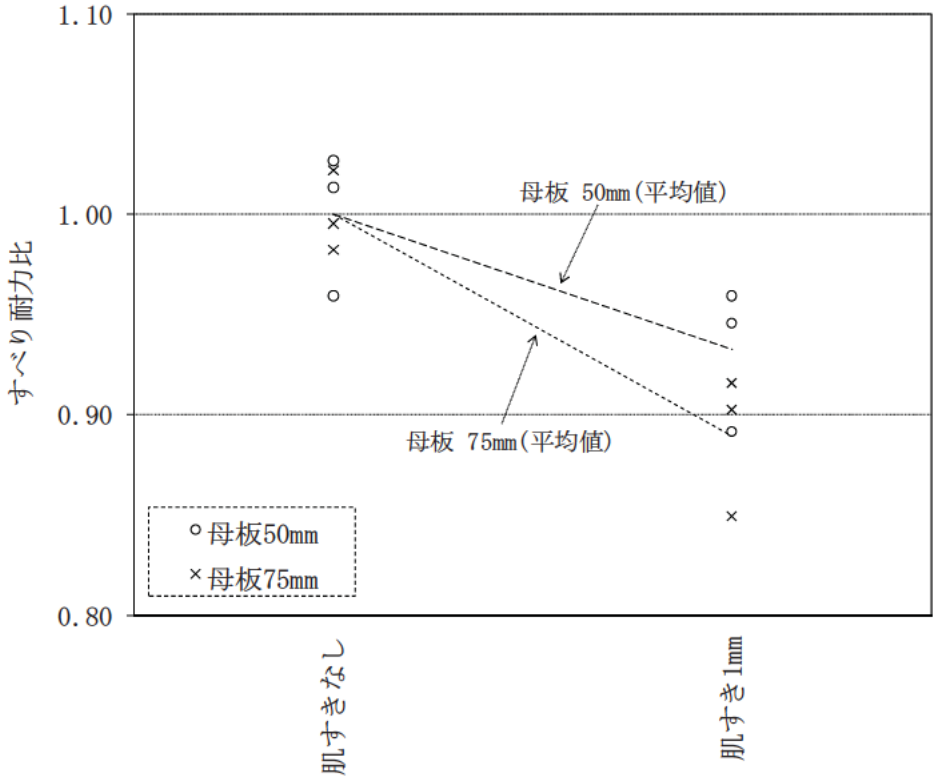


図-3.8.13　すべり耐力比（肌すきの有無の比較，今回の試験結果）

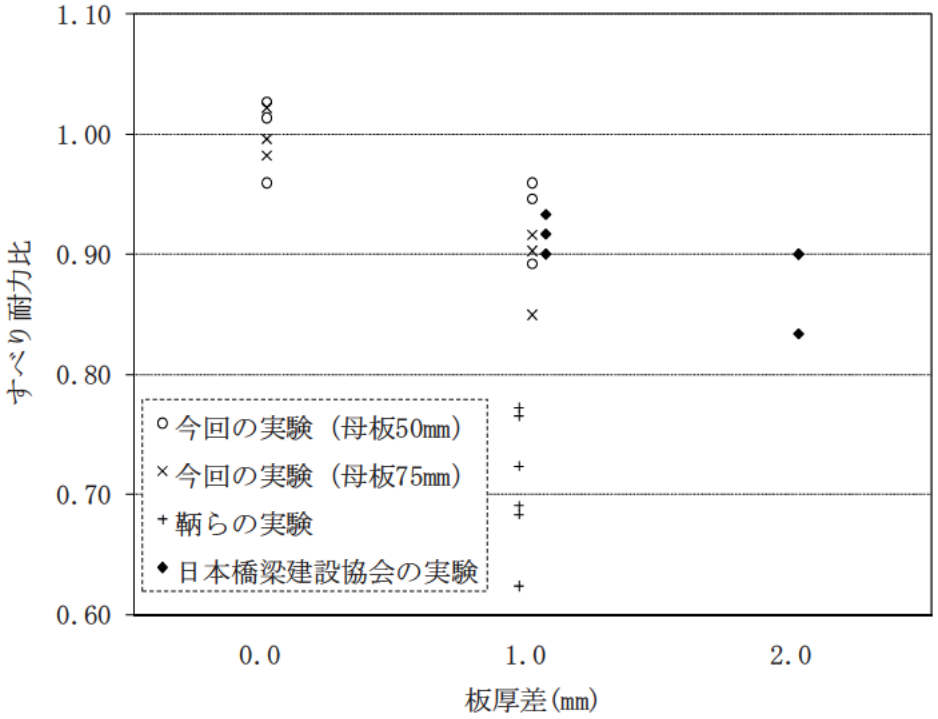


図-3.8.14　板厚差とすべり耐力比（今回の試験結果および既往の研究成果）

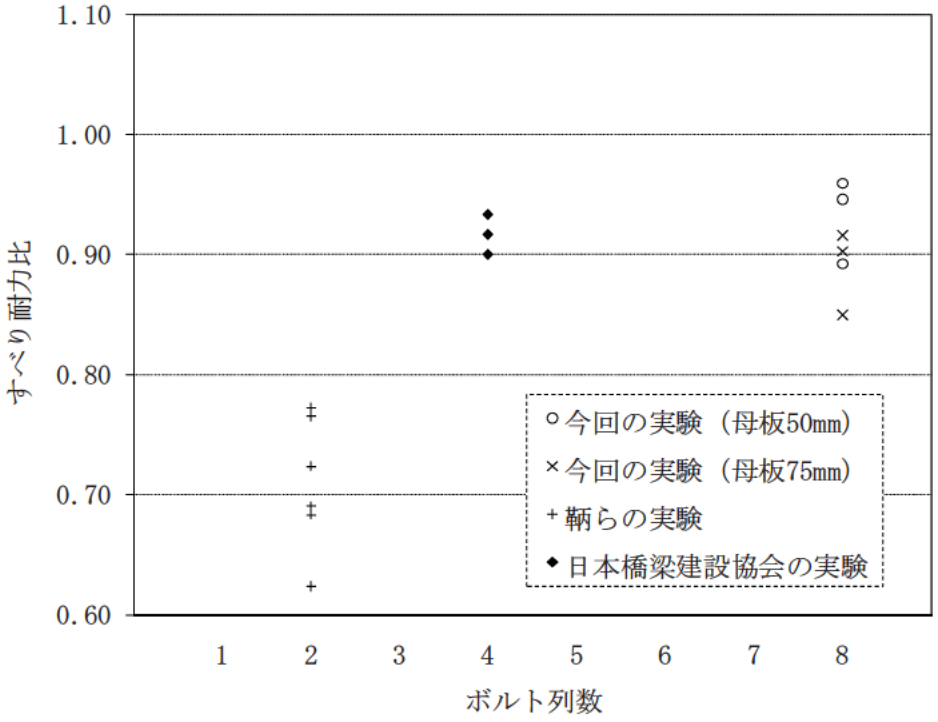


図-3.8.15　板厚差 1mm の場合におけるボルト列数とすべり耐力比

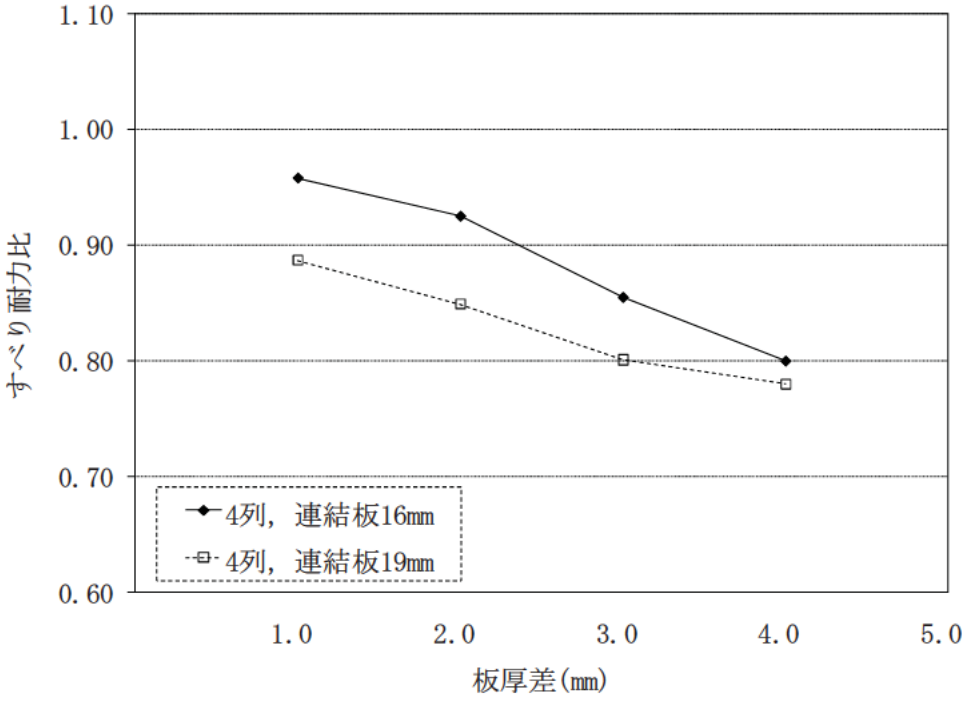


図-3.8.16　板厚差 1mm，ボルト 4 列の場合における連結板厚さとすべり耐力比 [18)]

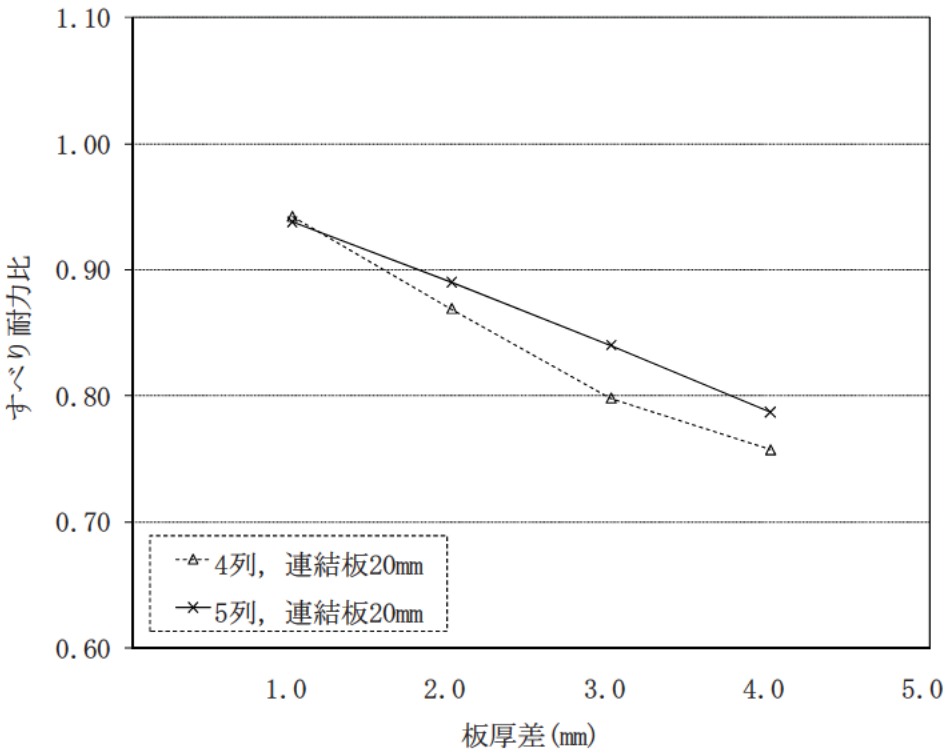


図-3.8.17　板厚差 1mm，連結板 20mm の場合におけるボルト列数とすべり耐力比 [18)]

2）ボルト軸力低下

今回の試験結果から肌すきの有無がボルト軸力低下に与える影響について検討する。図-3.8.18 に，肌すきの有無と 7 日経過後の軸力残存率の関係を示す。ここでは，基本ケースの試験体 No.3（板厚 50mm），試験体 No.6（75mm）と，肌すきケースの試験体 No.11（50mm），試験体 No.12（75mm）を対象としている。軸力残存率は，軸力導入時のひずみと 7 日経過後のひずみの比を示したもので，各試験体においてひずみゲージを設置した全てのボルトを対象としている。それぞれの板厚において，軸力残存率はほぼ一定であり，肌すきとの相関性は見られない。

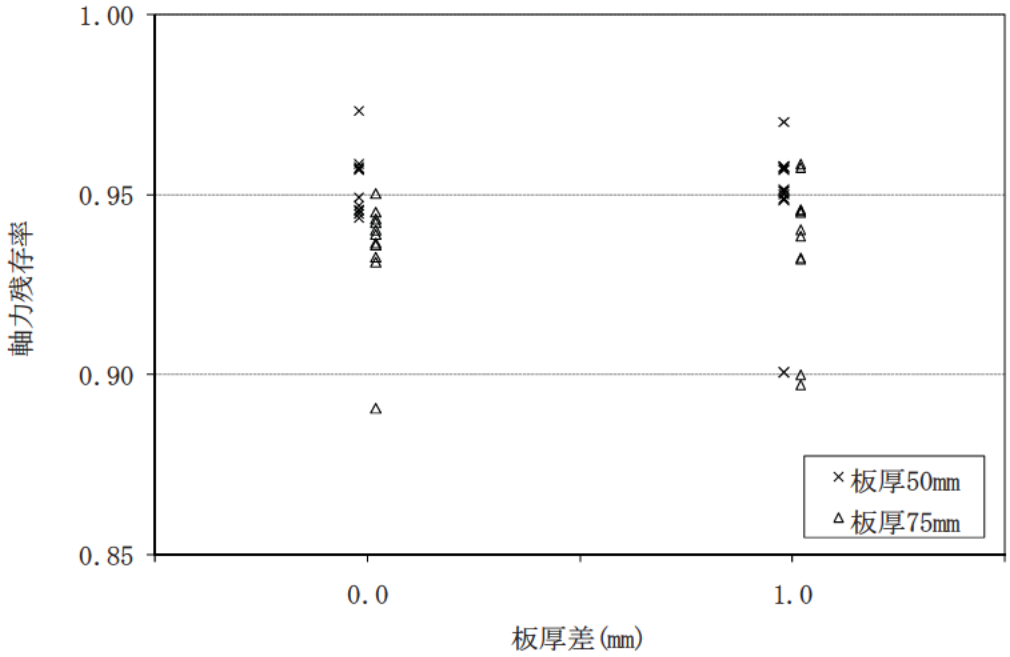


図-3.8.18　肌すきを有する継手の 7 日経過後の軸力残存率

（5）塗膜厚の影響

塗膜厚が 1）すべり係数，2）ボルト軸力に与える影響について考察を行う。試験体の塗膜厚の計測結果は，目標塗膜厚との差が小さかったので，ここでは目標塗膜厚を用いて整理する。

1）すべり係数

今回の試験結果を元に，塗膜厚がすべり係数に与える影響について検討する。ここでは，試験体 No.1（合計塗膜厚 180μm），試験体 No.13（120μm），試験体 No.14（250μm）を対象とする。なお，これらの試験体のすべり/降伏耐力比 β は全て 0.7 以下である。

図-3.8.19 に，各試験体の合計塗膜厚とすべり係数 μ_0 の関係を示す。すべり係数 μ_0 は，いずれの試験体においても，設計すべり係数 0.4 を大きく上回っており，合計塗膜厚との相関性は小さい。文献 20）では，塗料の種類によっては，塗膜厚が 200μm を超えるとすべり係数が低下する場合があるとしているが，今回の試験では塗膜厚 250μm としても，すべり係数は低下していない。

図-3.8.20 に，各試験体の合計塗膜厚とすべり係数 μ_2 の関係を示す。すべり係数 μ_2 は，すべり係数 μ_0 よりも全体的に大きい値となっており，合計塗膜厚が増えるにしたがって僅かに大きくなる傾向を示している。

既往の研究との比較は付属資料の資料　1 で整理分析することとし，ここでは省略する。

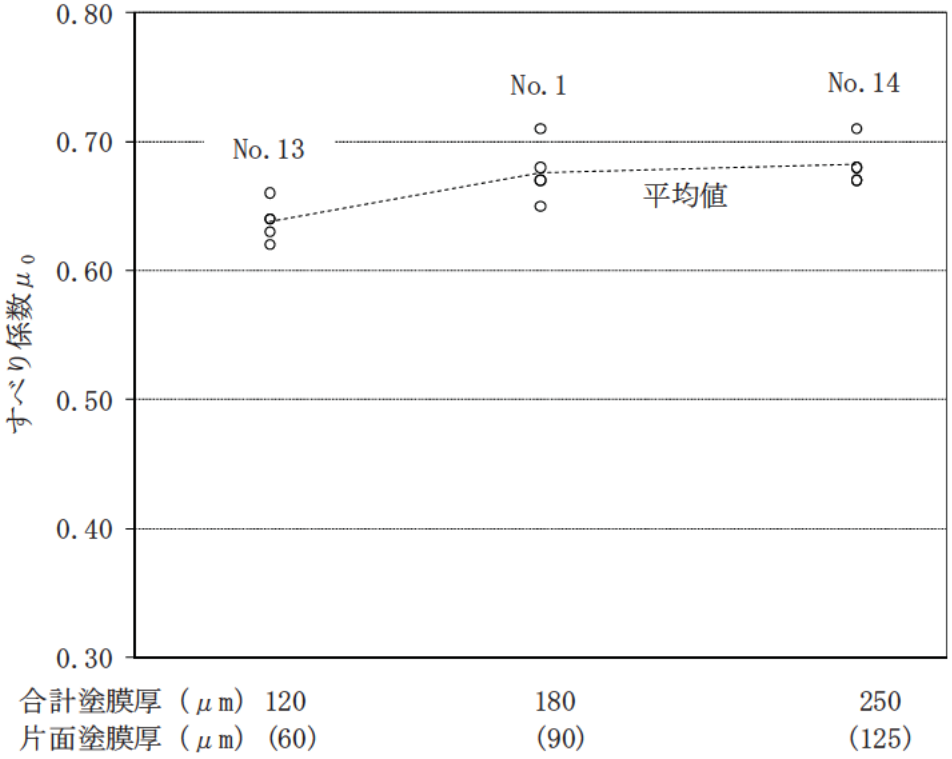


図-3.8.19　塗膜厚とすべり係数 μ_0

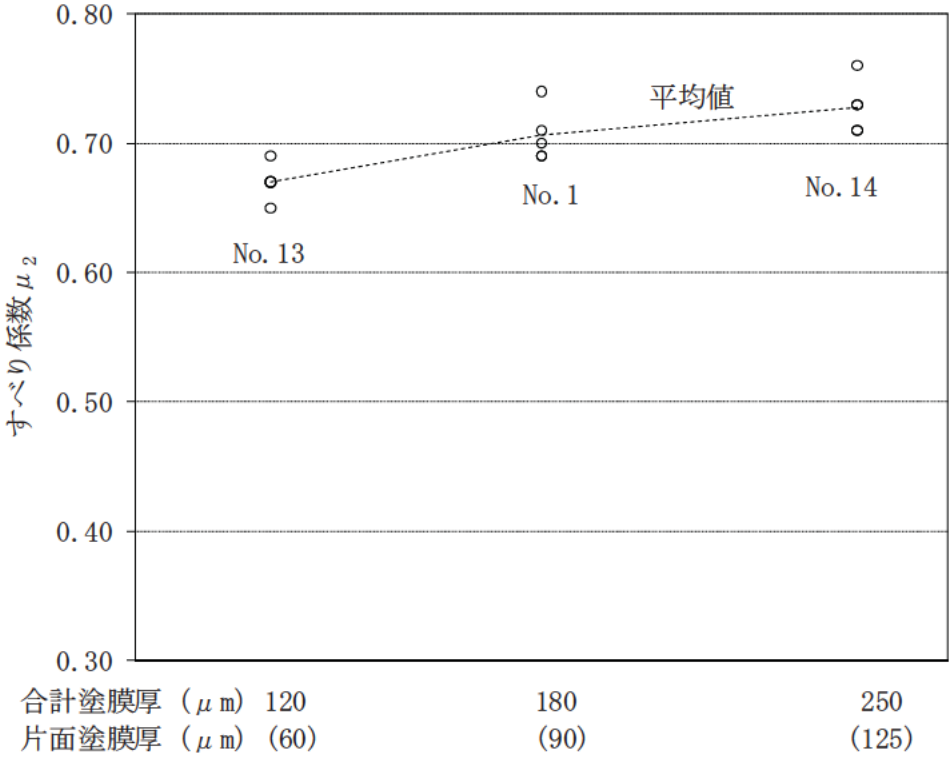


図-3.8.20　塗膜厚とすべり係数 μ_2

2）ボルト軸力残存率

試験体 No.1（合計塗膜厚 180μm），試験体 No.13（120μm），試験体 No.14（250μm）の軸力残存率を比較する。軸力残存率とは，軸力導入時のひずみと 7 日経過後のひずみの比を示したもので，ひずみゲージを設置した全てのボルトを対象としている。

図-3.8.21 に，合計塗膜厚と軸力残存率の関係を示す。これらを比較すると，合計塗膜厚の厚い試験体 No.14 において，軸力残存率が若干小さくなる傾向がみられる。

次に，板厚が異なる試験体やフィラーケースの試験体を含めて，塗膜厚の影響を検討する。板厚の異なる試験体を一律に比較するため，ここでは締付け厚に対する合計塗膜厚の比を算出して整理する。表-3.8.13 に，対象とした試験体とそれぞれの合計塗膜厚，締付け厚，合計塗膜厚と締付け厚の比を示す。締付け厚とは，母板厚に連結板の厚さ（両側 2 枚）を加えたものである。ここで，フィラーケースについては，母板，連結板の他に，フィラープレートの両面にも無機ジンクリッチペイントを塗装していることから，この塗膜厚を合計塗膜厚に加算している。図-3.8.22 に，合計塗膜厚と締付け厚の比と軸力残存率の関係を示す。これらを比較すると，軸力残存率のばらつきが大きく，塗膜厚の影響のみを厳密に分析することは困難であるが，合計塗膜厚／締付け厚が大きいほど，軸力残存率が概ね小さくなる傾向が得られている。

既往の研究との比較は，付属資料の資料　1 で整理分析することとし，ここでは省略する。

表-3.8.13　合計塗膜厚と締付け厚の比

試験体 No.		合計塗膜厚[注 1)]（μm）	締付け厚[注 2)]（mm）	合計塗膜厚／締付け厚
基本ケース	No.1	90×4 面 ＝360	20+38+20 = 78	2.3
	No.2	90×4 面= 360	26+50+26 = 102	1.8
	No.3	90×4 面= 360	26+50+26 = 102	1.8
	No.4	90×4 面= 360	26+50+26 = 102	1.8
	No.5’	90×4 面= 360	38+75+38 = 151	1.2
	No.6	90×4 面= 360	38+75+38 = 151	1.2
	No.7	90×4 面= 360	38+75+38 = 151	1.2
フィラーケース	No.8	90×6 面= 540 [注 1)]	20+38+12+20 = 90	4.0
	No.9	90×6 面= 540 [注 1)]	20+38+22+20 = 100	3.6
	No.10	90×6 面= 540 [注 1)]	20+38+3.8+20 = 115	3.1
塗膜厚ケース	No.13	60×4 面= 240	20+38+20 = 78	1.5
	No.14	125×4 面= 500	20+38+20 = 78	3.2

注 1）合計塗膜厚は，母板・連結板・フィラープレートに塗装した無機ジンクリッチペイントの塗膜厚の合計値とする。例えば，試験体 No.1 の場合は，無機ジンクリッチペイントを連結板（ボルト頭側）の接触面，母板の両面，連結板（ナット側）の接触面の合計 4 面に塗装し，それぞれの塗膜厚は 90μm であるから，合計塗膜厚は 90×4　360μm となる。フィラーケースの場合は，フィラーの両面にも無機ジンクリッチペイントを塗装するため，全部で 6 面となる。

注 2）締付け厚は，連結板厚＋母板厚＋（フィラープレート厚）＋連結板厚で算出した値を示している。

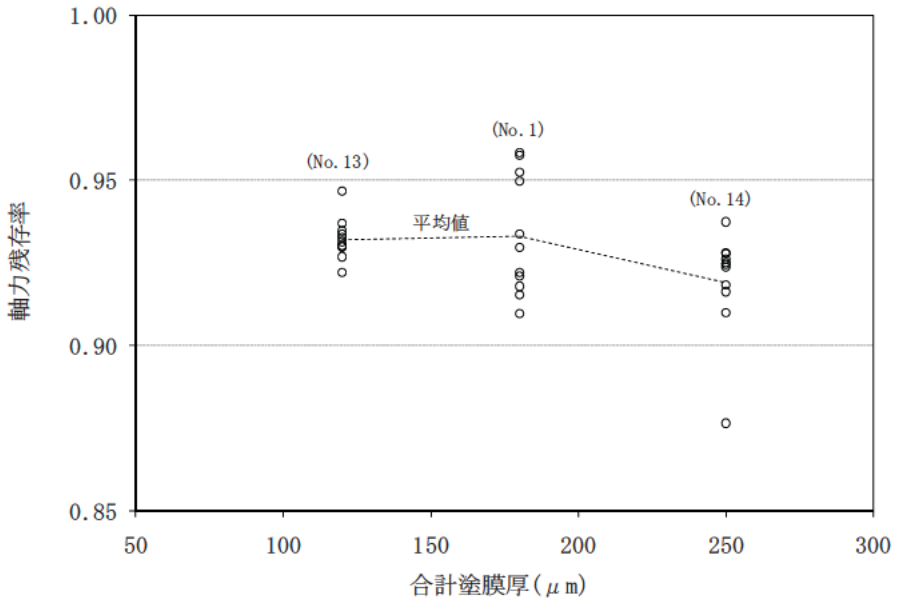


図-3.8.21　合計塗膜厚と軸力残存率（塗膜厚ケースのみ）

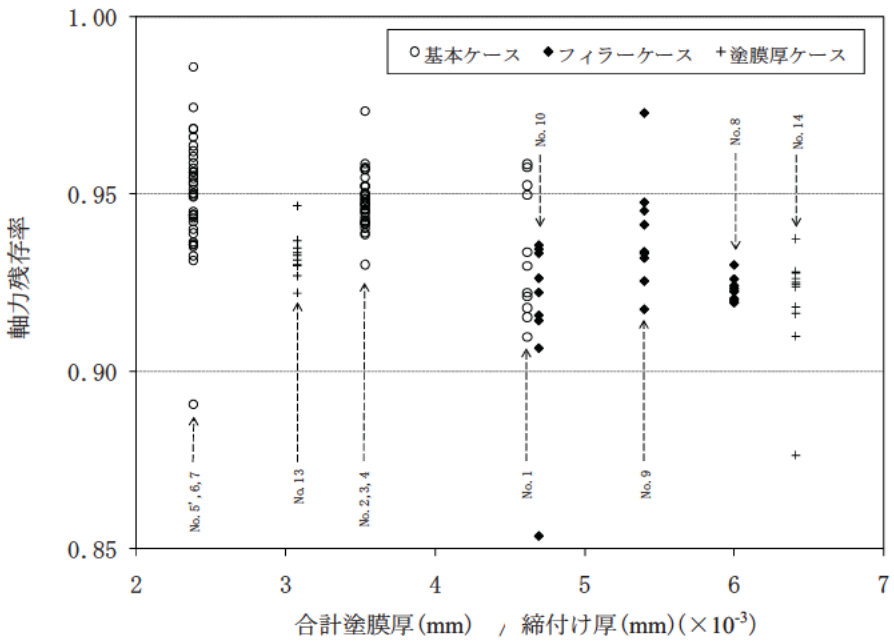


図-3.8.22　合計塗膜厚と軸力残存率（基本ケース，フィラーケース，塗膜厚ケース）

（6）母板降伏の影響

試験体 No.7（すべり/耐力降伏比 $\beta = 0.47$）と，試験体 No.15（すべり/耐力降伏比 $\beta = 0.95$）を比較する。前述の通り試験体 No.15 のすべり係数は，すべり耐力を荷重が最大となったときのものとしている。

図-3.8.23 に，すべり/耐力降伏比 β（以下，β）とすべり係数 μ_2 の関係を示す。β が大きい試験体 No.15 の方がすべり係数が 0.1 程度小さくなる傾向がみられた。β の影響については，これまで継手設計において陽な形では考慮されていない。常時荷重で設計する場合には安全率 1.7 程度が考慮されているため，β の大きさが継手性能に影響を及ぼす可能性は低いと考えられるが，地震の影響など許容応力度の割り増し係数などを考慮して設計する場合，つまり安全余裕が小さい場合には，β の影響が変わってくる可能性がある。β の影響に関して，実際の設計への反映については，さらに検討する必要がある。

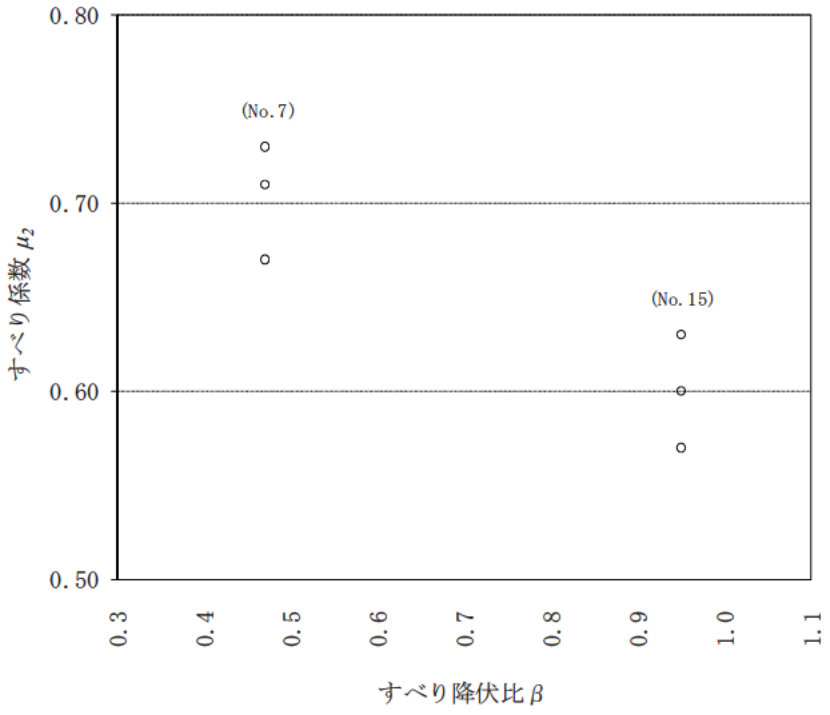


図-3.8.23　すべり/耐力降伏比 β とすべり係数 μ_2

（7）表面形状の影響

ここでは，試験体 No.5（切削加工前）と試験体 No.5’（切削加工後）の試験結果を比較する。図-3.8.24 および図-3.8.25 に，それぞれの試験体におけるすべり係数 μ_0 および μ_2 を示す。試験体 No.5 のすべり係数 μ_0 は，いずれも設計すべり係数 0.4 を上回っているものの，他の試験体と比べると小さい値となっている。一方，試験体 No.5’のすべり係数 μ_0 は試験体 No.5 のものよりも大きく，他の試験体と同程度の値が得られている。

「3.3.3 表面凹凸形状の計測結果」や「3.4 接触圧力の計測結果」，「3.7.5 試験後のすべり面」で述べたように，試験体 No.5 では表面凹凸の影響によって，母板と連結板が十分に密着していなかった可能性が高く，すべり係数が低かったが，表面切削加工を施すことにより母板と連結板の密着度が改善され，すべり係数が大きくなったものと考えられる。また，試験体 No.5’のすべり係数においては試験体 No.6 や試験体 No.7 と比較すると，ばらつきが大きく，表面凹凸を加工した後であっても，厚板かつボルト列数が少ない継手では，すべり係数が小さくなる可能性があるので，特に注意する必要があると考えられる。

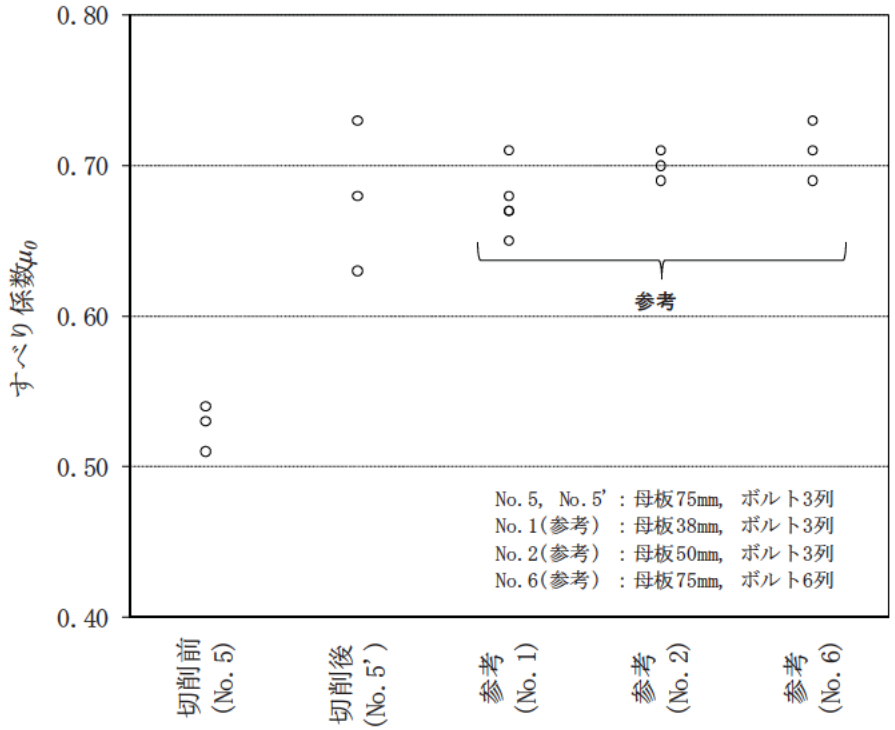


図-3.8.24　試験体 No.5 のすべり係数 μ_0（切削加工前後の比較）

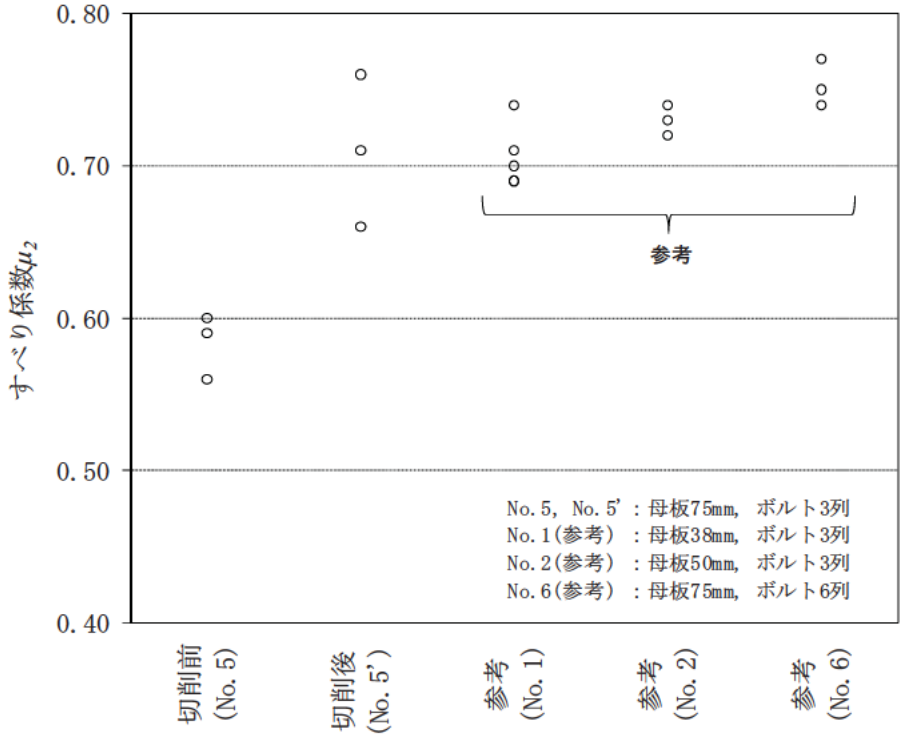


図-3.8.25　試験体 No.5 のすべり係数 μ_2（切削加工前後の比較）

3.9 まとめ

本章では，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した厚板・多列の高力ボルト摩擦接合継手を対象として，すべり耐力試験を実施し，すべり耐力（すべり係数）および残存軸力などの継手性能に影響を与える要因について試験結果を整理・考察するとともに，既往の研究成果と比較，分析した。本検討によって得られた主な結論を以下にまとめる。

(1) 継手の厚板化の影響を検討するため，肌すき，フィラーを有しない母材厚 38mm（締付け厚：78mm），50mm（締付け厚：102mm），75mm（締付け厚：151mm）の試験結果の比較を行った。母材厚 50mm 及び 75mm の厚板を用いた試験体のすべり係数は，母材厚 38mm の試験体と概ね同じ値であった。ただし，母材厚 75mm でボルト列数 3 本の試験体については，すべり係数が低いものがみられた。通常，作用力が大きい場合に母板厚が厚くなりボルト列数も多列化するため，このような継手の適用は考えにくいが，厚板でボルト列数が極端に少ない継手については，すべり係数が低くなる場合もあり注意が必要と考えられる。また，締付けから 7 日後の軸力低下率については，締付け厚が厚いほど，軸力低下率が若干高くなる傾向がみられた。

(2) ボルト列数の影響を検討するため，ボルト列数 3，8，12 列の試験体の試験結果の比較を行った。ボルト列数が 8 列以下の場合，すべり係数は概ね一定であるが，8 列を超えるとすべり係数は低下する傾向がみられ，12 列のすべり係数は 8 列以下のものに比べて 1～7%程度低下した。また，すべり/耐力降伏比 β が影響しないと考えられる $\beta<0.7$ の範囲内で実施された既往の研究データについても，ボルト列数が増えるとすべり係数が低下する傾向がみられており，すべり係数の低下量は，今回の試験結果に近いものであった。

(3) フィラーの影響を検討するため，フィラー厚 12mm（母材厚 50mm，38mm），22mm（母材厚 60mm，38mm），37mm（母材厚 75mm，38mm）の試験結果の比較を行った。フィラープレート厚 12mm の場合には，フィラー無しに比べ若干すべり係数が上がる傾向にあったが，フィラー厚 22mm，37mm の試験体では，すべり係数の低下がみられた。また，フィラー厚 37mm の試験体では，フィラーなしの試験体のすべり係数に対して最大で 20%低下するものもみられた。既往の研究データについても，フィラー厚が厚くなると，すべり係数が低下する傾向がみられることを確認した。

(4) 接合面の肌すきの影響を検討するため， 1mm の肌すきを有する試験体（母材厚 50mm 及び連結板厚 26mm，母材厚 75mm 及び連結板厚 38mm）と肌すきなしの試験体の試験結果の比較を行った。接合面に肌すきを有する試験体は，肌すきなしの試験体と比較し，すべり係数が低下した。また，肌すきを有する試験体では，連結板の厚いほうがすべり係数が低下した。これは，連結板の剛性が高くなるために，特に連結板内側の第 1 ボルト近傍において母板と連結板が接触しにくく，すべり耐力が低下したものと考えられる。また，既往の研究成果についても，肌すきによりすべり係数が低下し，連結板が厚いほど低下の傾向が大きいことを確認した。

(5) 接合面に塗装した無機ジンクリッチペイントの塗膜厚の影響を検討するため，母板 38mm の試験体に対して，接触面の合計塗膜厚を 120，180，250μm とした試験体の試験体の試験結果の比較を行

った。いずれの試験体も，設計すべり係数 0.4 を大きく上回っていた。また，合計塗膜厚が増えるに従ってすべり係数はわずかに大きくなる傾向がみられた。

４．高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動に関するFEM解析

4.1　解析の目的と概要

4.1.1　解析の目的

本章では第3章で報告した実物大継手部のすべり耐力試験の結果を補完し，厚板多列の高力ボルト摩擦接合継手におけるすべり挙動のメカニズムを解明することを目的として，FEM解析を行う。解析モデルの概要をすべり耐力試験体（3列，写真-4.1.1）を例として図-4.1.1に示す。

ここでは，すべり耐力試験結果に基づいた解析モデルの妥当性の検証と，すべり/降伏耐力比β，継手のボルト列数，板厚，板幅，ボルト軸力などの各構造諸元や各構造パラメータがすべり挙動に与える影響を解析結果に基づいて検討する。

写真-4.1.1　すべり耐力試験の試験体の例

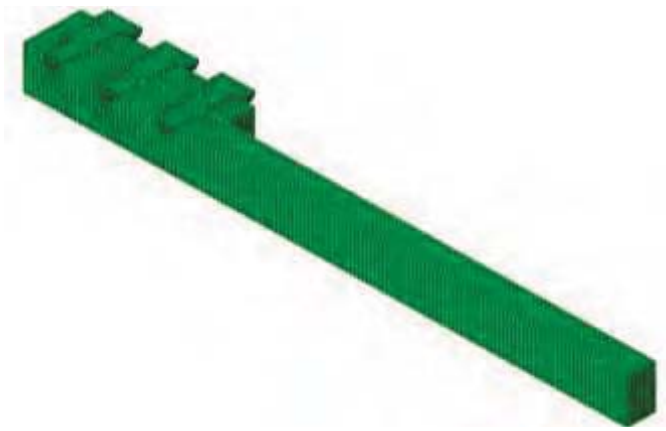


図-4.1.1　本章で用いた解析モデルの例

4.1.2　解析で用いる記号と用語

本章では1.2節で定義した記号と用語に加えて，以下に定義する記号と用語を用いる。

(a) 解析条件およびモデルに関する記号と用語

母板厚　t

板幅　W

ボルト孔径　d　：母板，および連結板にあけたボルト孔の直径

母板の降伏応力　σ_{ya}　：材料強度試験結果をもとに解析で設定した値

連結板の降伏応力　σ_{ya}'　：材料強度試験結果をもとに解析で設定した値

摩擦係数　：2 つの物体の接触面にはたらく摩擦力と、接触面に垂直に作用する力との比。垂直に作用する力 P と摩擦力 F は比例し，

$$F = f \cdot P$$

の関係がある。このときの比例係数 f が摩擦係数である。

端部長さ　：連結板の中央から母板の（継手内側）縁端までの距離。継手における 2 枚の母板と母板との隙間の距離の半分（図-4.1.2）。

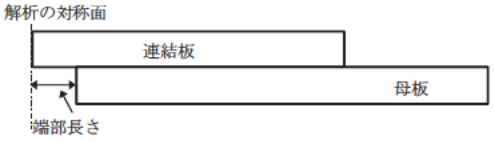


図-4.1.2　端部長さの定義

ボルト列数　：継手の片側のボルト本数（図-4.1.3）

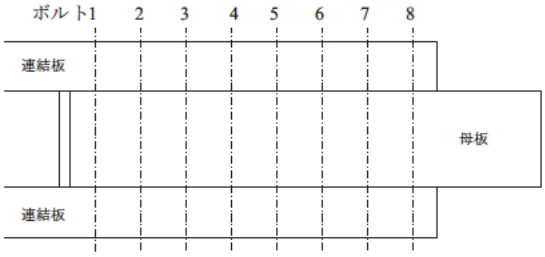


図-4.1.3　ボルト列数（8 列の場合）

目標導入軸力　N_0　：解析において，ボルトに導入するボルト軸力の目標値。標準すべり試験と同じ条件の解析では設計ボルト軸力（M22 高力ボルトの場合，205 kN[3)]）に相当する。

設計すべり耐力　P_d　：解析で設定した摩擦係数に接触面数と目標導入軸力とボルト本数を乗じたもの

$$P_d = \mu_a \cdot N_0 \cdot m \cdot n$$

ここで，μ_a：すべり係数，　N_0：目標導入軸力，

m：接触面数，n：ボルト列数

断面の降伏耐力　：板の純断面積と降伏応力の積

解析すべり/降伏耐力比　β_a　：設計すべり耐力を母板の降伏耐力で除した値

$$\beta_a = \frac{P_d}{(W-d)\cdot t\cdot \sigma_{ya}}$$

ここで，P_d：設計すべり耐力，W：板幅，
d：ボルト孔径，t：母板厚，
σ_{ya}：解析で設定した母板の降伏応力

解析連結板/母板降伏耐力比　γ_a　：連結板断面の降伏耐力を母板断面の降伏耐力で除した値

$$\gamma_a = \frac{A'\cdot \sigma_{ya}'}{A\cdot \sigma_{ya}}$$

ここで，A'：連結板の純断面積，A：母板の純断面積，
σ_{ya}'：解析で設定した連結板の降伏応力，
σ_{ya}：解析で設定した母板の降伏応力

(b) 解析結果に関する記号と用語

ボルト軸力　N　：引張荷重載荷中のボルト軸力

導入軸力　N_1　：解析モデルのボルトに導入された軸力（引張荷重載荷開始時のボルト軸力）

ボルト軸力低下率　α　：導入軸力に対するボルト軸力の低下率

$$\alpha = \frac{N_1 - N}{N_1}$$

ここで，N_1：導入軸力，N：ボルト軸力

引張荷重　P

すべり荷重　P_{SL}　：解析におけるすべり発生時の引張荷重。解析のすべり定義は，解析における最大荷重発生時，もしくは母板と連結板の接触面の内側相対変位が 0.2 mm に達した時のうち，内側相対変位が小さい方の時点としている。

すべり係数　μ_a　：すべり荷重を導入軸力の総和と接触面数で除した値

$$\mu_a = \frac{P_{SL}}{\sum_{i=1}^{n} N_{1i}\cdot m}$$

ここで，P_{SL}：すべり荷重，N_{1i}：i 番目ボルトの導入軸力，
m：接触面数，n：ボルト列数

μ_{0a}　：すべり荷重を設計ボルト軸力の総和と接触面数で除した値

$$\mu_{0a} = \frac{P_{SL}}{\sum_{i=1}^{n} N_{\mathrm{d}i}\cdot m}$$

ここで，P_{SL}：すべり荷重，$N_{\mathrm{d}i}$：i 番目ボルトの設計ボルト軸力，
m：接触面数，n：ボルト列数

ボルト 1 本あたりのすべり耐力　S_{cr}　：すべり係数と目標導入軸力の積

$$S_{cr} = \mu_a \cdot N_0$$

ここで，μ_a：すべり係数，N_0：目標導入軸力

ボルト 1 本あたりの分担摩擦力　：図-4.1.4 に示すボルトごとに領域分割した母板表面に発生するせん断応力の合計値

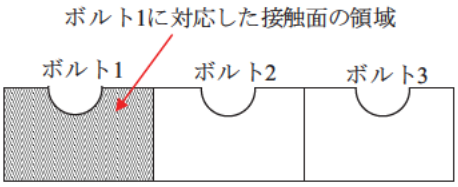
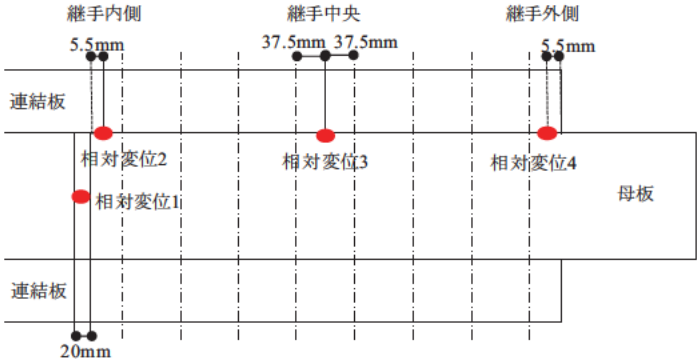


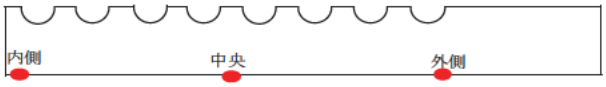
図-4.1.4　ボルトごとに分割した接触面の領域

断面力の分担率　：母板（連結板）の断面力を引張荷重で除した値

内側相対変位　：図-4.1.5 に示す継手内側における母板と連結板の変位量の差



(a) 板厚方向における測定位置



(b) 板幅方向における測定位置

図-4.1.5　相対変位測定位置（解析）

中央相対変位　：図-4.1.5 に示す継手中央における母板と連結板の変位量の差

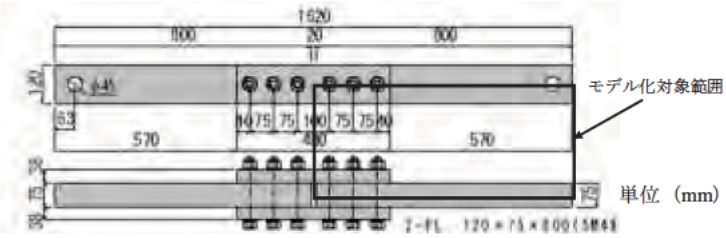
外側相対変位　：図-4.1.5 に示す継手外側における母板と連結板の変位量の差

開口量　：母板と連結板で定義される接触面間の距離（離間が発生すれば正値となる）

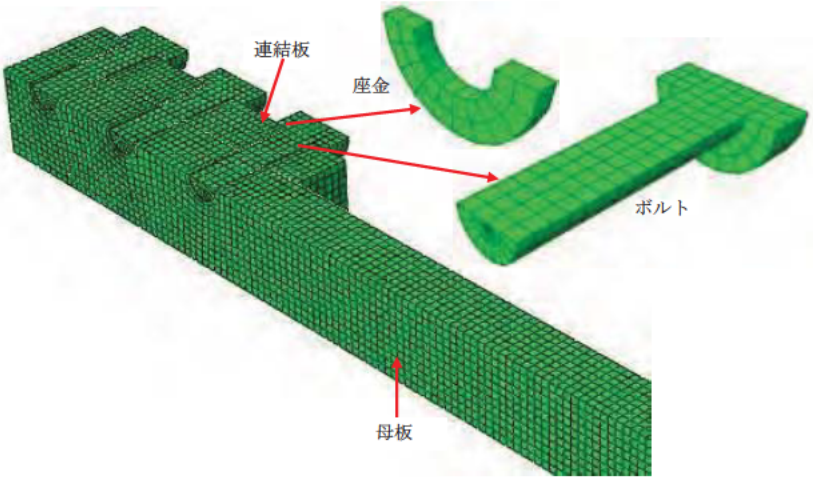
4.1.3　解析モデル

(a) モデルの形状および材料特性

用いた有限要素解析コードは Abaqus/Standard[22] である。図-4.1.6 に解析モデルのモデル化範囲，および全体形状，ボルト，座金の詳細をそれぞれ示す。要素および分割については，ボルトは 6 節点ソリッド完全積分要素（Abaqus 要素タイプ：C3D6），および 8 節点ソリッド低減積分要素（C3D8R）を，母板，連結板，および座金は 8 節点ソリッド低減積分要素（C3D8R）を用い，軸方向の要素長は 5.5 mm としている。試験体の形状，荷重状態，および変形状態の対称性に基づき，1/8 モデルとした。なお，これらのモデル化の妥当性については 4.2.1 項で示している。



(a) 解析のモデル化範囲



(b) 要素分割の例

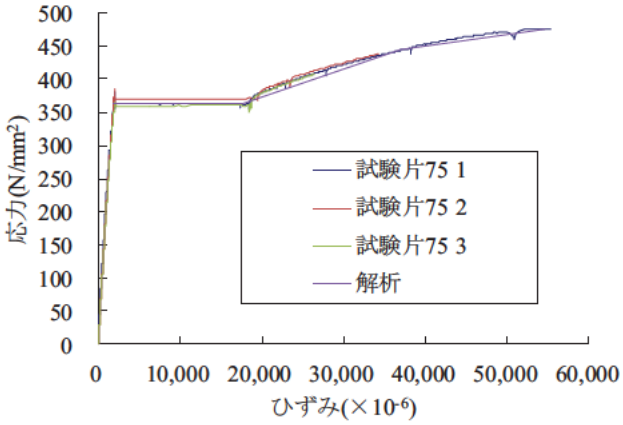
図-4.1.6　解析モデルのモデル化範囲および形状と要素分割

母板と連結板の材料特性については，材料強度試験結果 [23]（表-3.6.1）で得られたデータから，板厚 38 mm の TP No. 1 と 75 mm の TP No. 1 の試験結果をもとに設定した。ボルトと座金の材料特性は，すべり挙動に与える影響が少ないと判断し，公称値 [24]を参考に設定した。解析モデルに与えた材料特性（ヤング率，ポアソン比），および応力 ひずみ関係の詳細を図-4.1.7 に示す。

解析モデルにおける対称面に設定した境界条件（拘束条件）を図-4.1.8 に示す。図中の X 軸，Y 軸，および Z 軸方向は，解析の内部計算での座標系の 1 軸，2 軸，および 3 軸にそれぞれ対応している。図 (a) は，母板の板厚方向中央の対称面の拘束条件を示している。ボルト軸部の対称面には，ボルト軸力を導入するための強制変位を与えることから，拘束を与えていない。図 (b)，(c) は，連結板の軸方向中央の対称面と，板幅方向中央の対称面の拘束条件をそれぞれ示している。

ヤング率 (N/mm²)	ポアソン比	応力 (N/mm²)	塑性ひずみ
206,500	0.289	363.3*	0
		363.9	0.0159
		444.7	0.0351
		476.1	0.0528

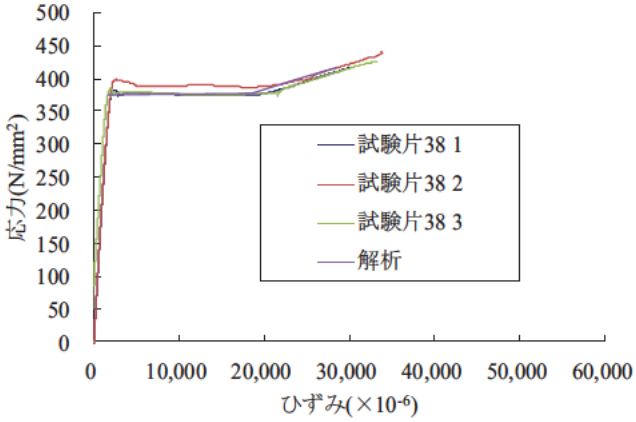
*降伏応力



(a) 母板（SM490Y）

ヤング率 (N/mm²)	ポアソン比	応力 (N/mm²)	塑性ひずみ
213,400	0.271	375.7*	0
		377.2	0.0168
		400.3	0.0228
		416.4	0.0268

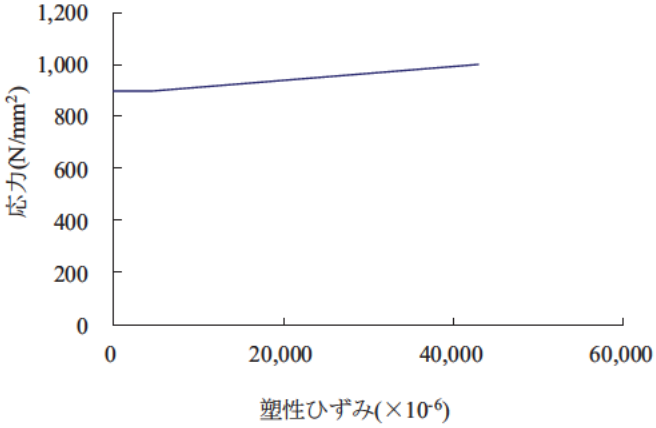
*降伏応力



(b) 連結板（SM490Y）

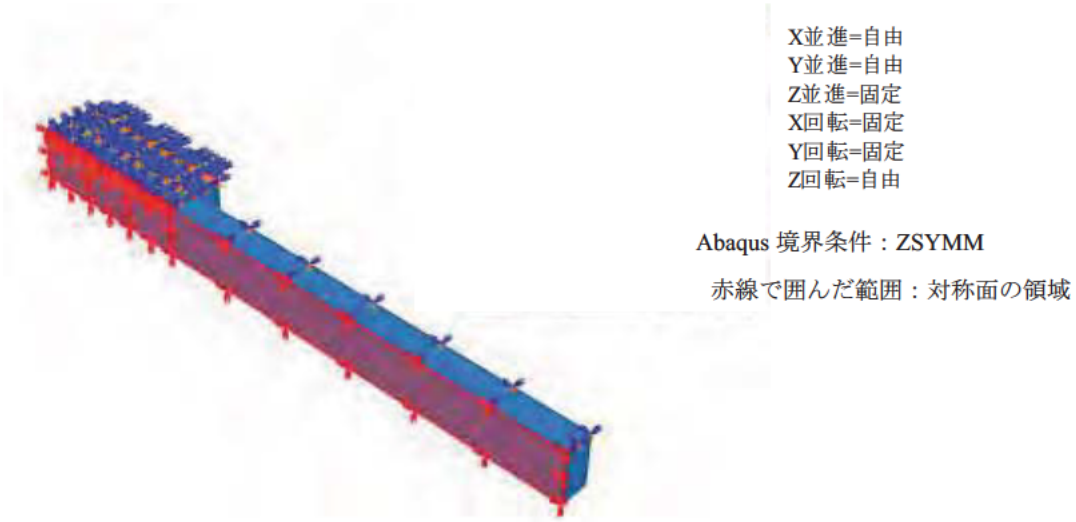
ヤング率 (N/mm²)	ポアソン比	応力 (N/mm²)	塑性ひずみ
200,000	0.3	900*	0
		900	0.0044
		1000	0.0429

*降伏応力

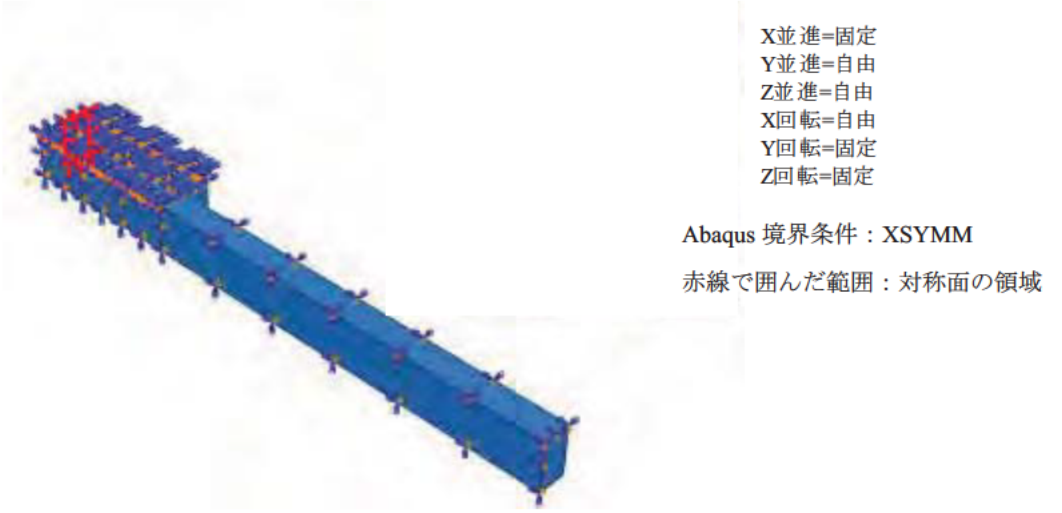


(c) ボルトと座金（公称値参考）

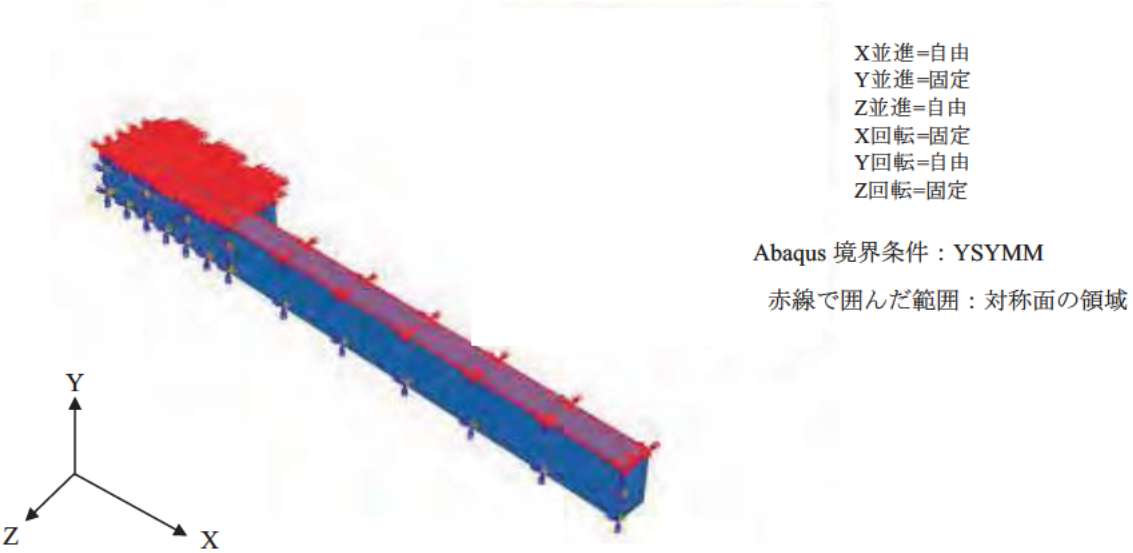
図-4.1.7　解析モデルに設定した材料特性



(a) 母板の板厚方向中央の対称面の拘束条件



(b) 連結板の軸方向中央の対称面の拘束条件



(c) 板幅方向中央の対称面の拘束条件

図-4.1.8　解析モデルの境界条件（拘束条件）

（b）接触条件

Abaqus/Standard では，接触，離間，および固着を表現する「接触相互作用」のモデル化では，接触を設定したさまざまな位置に条件付拘束を与えて計算する。これらの拘束の位置と条件は，接触定式化で使用される接触の計算手法にしたがって定められる。Abaqus/Standard では，従来の「節点-サーフェス（node-to-surface）」の計算手法と，「サーフェス-サーフェス（surface-to-surface）」の計算手法のいずれかを選択できる。本解析では，「サーフェス-サーフェス」の計算手法を選択した。

「サーフェス-サーフェス」の計算手法は，接触拘束の領域内でスレーブ面（接触対の計算上の従属側。節点-サーフェスでは，節点が接触判定に用いられる。「サーフェス-サーフェス」ではマスター面と同じ扱いになり，節点から構成される面が接触判定に用いられる。）とマスター面（接触対の計算上の支配側。節点から構成される面が接触判定に用いられる。）の両方の形状を考慮できる。「サーフェス-サーフェス」の計算手法には，以下の重要な特徴がある。

・接触条件は，計算上の点（「節点-サーフェス」の計算時でのスレーブ節点など）の位置ではなく，スレーブ面上で平均的に与えられる。したがって，個々の節点にはわずかな貫入が見られる可能性がある。ただし，スレーブ面へのマスター節点の貫入が大きくなることはない。

Abaqus/Standard では，接触面へのマスターとスレーブの割り当てに関して，以下の規則がある。

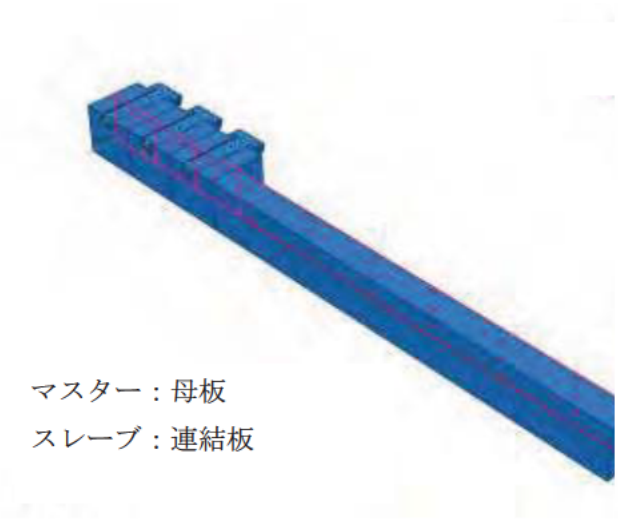
・解析上の剛表面は，マスター面としなければならない。
・スレーブ面は，変形，または剛であると定義した変形可能な物体側に定義しなければならない。
・接触対の両方の面を剛表面にすることはできない。
・接触対を構成する表面に対し，スレーブ面にする表面とマスター面にする表面を選択しなければならない。一般に，小さい表面と大きい表面が接触する場合は，小さい表面をスレーブ面とするのがよい。大きさで区別できない場合は，剛性が高い方の物体の表面をマスター面とするか，剛性が同程度ならばメッシュが粗い方の表面をマスター面とする。マスター面とスレーブ面の選択においては，その材料の剛性だけではなく，構造物としての剛性を考慮しなければならない。剛性とメッシュ分割が同程度の場合には，どちらをマスター面あるいはどちらをスレーブ面にするかは，必ずしも自明ではない。

一般に，「サーフェス-サーフェス」の接触でのマスター面とスレーブ面の選択が解析結果に与える影響は，きわめて小さい。しかし，2 つの表面のメッシュの細かさが異なる場合は，マスターとスレーブの割り当てが解析効率に大きく影響する可能性がある。すなわち，スレーブ面がマスター面よりも極端に粗い場合は，解析時間が長くなる可能性がある。

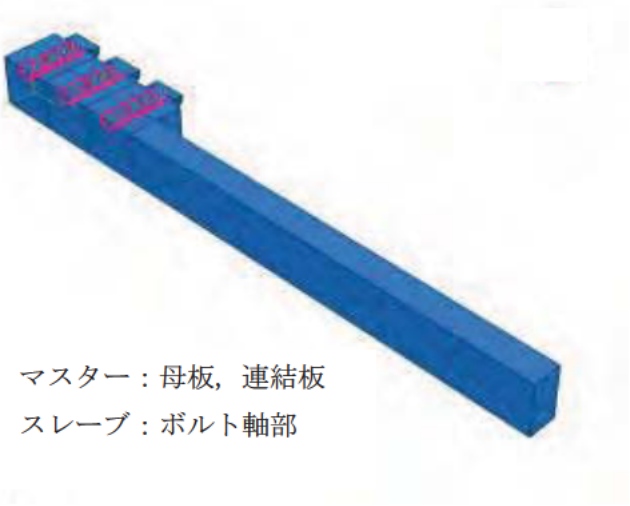
以上を考慮して，本解析では図-4.1.9 に示すようにマスター面とスレーブ面を設定した。母板と連結板の接触は，接触面積が小さい連結板をスレーブ面としている。母板，および連結板とボルト軸部との接触は，ボルト軸部をスレーブ面で統一している。連結板，およびボルト軸部と座金との接触は，座金をマスター面としている。

表面が接触している場合，通常は接触面を介して表面の法線方向の力とともに，摩擦力も伝達される。Abaqus/Standard で使用可能な摩擦モデルに，古典的な等方性のクーロン摩擦モデルがある。

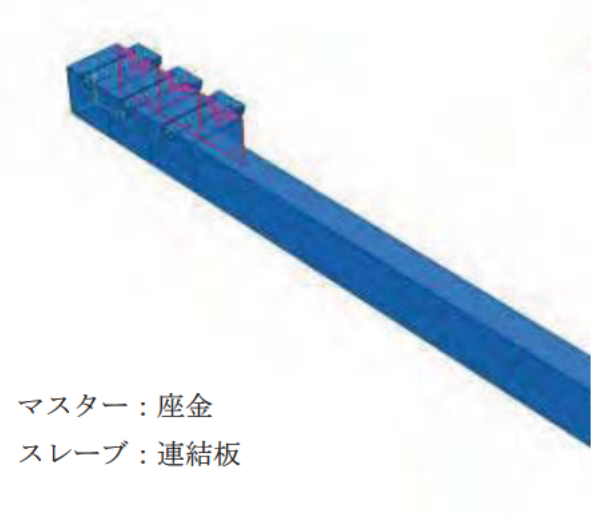
クーロン摩擦モデルの基本概念は，接触面での最大許容摩擦（せん断）応力を，接触する物体間の接触圧に関係付けることにある。クーロン摩擦モデルの基本形では，接触している 2 つの表面間に作用するせん断応力が特定の大きさに達するまで，接触面が相対的にすべり始めることはない。この状態は，



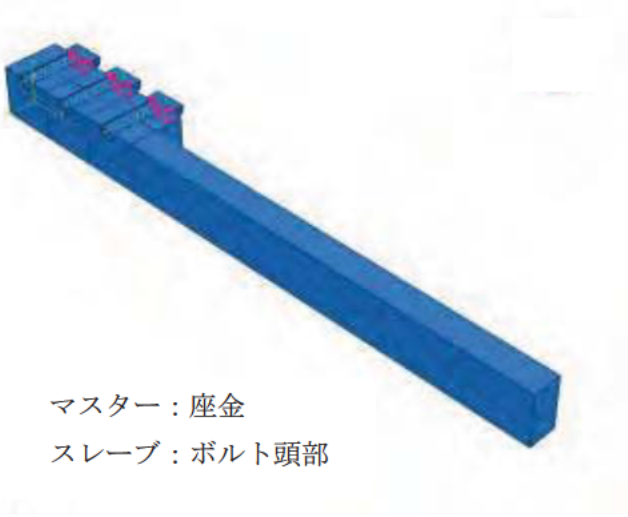
(a) 母板対連結板



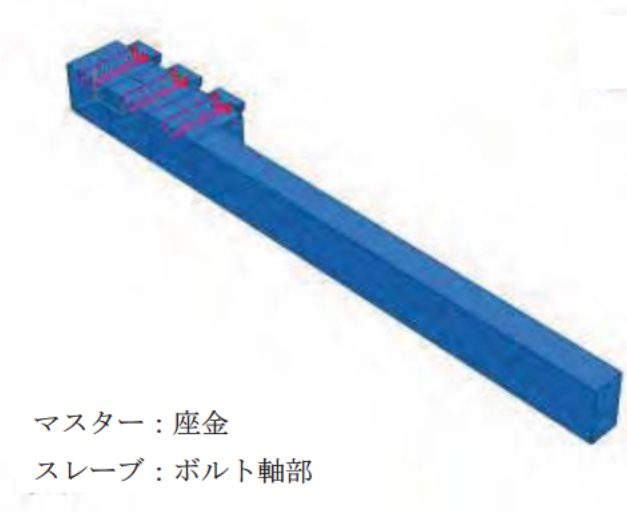
(b) ボルト軸部対母板，および連結板



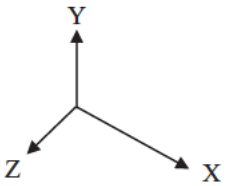
(c) 連結板対座金



(d) ボルト頭部対座金



赤線で囲んだ範囲：接触を定義した領域



(e) ボルト軸部対座金

図-4.1.9　接触のマスター面とスレーブ面の設定

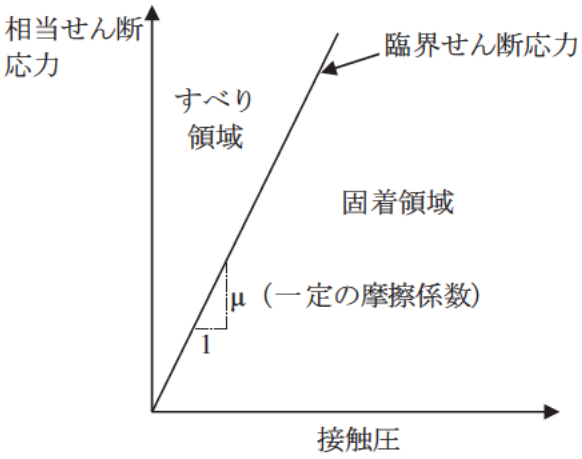


図-4.1.10　基本的なクーロン摩擦モデルのすべり領域

固着と呼ばれる。クーロン摩擦モデルでは，表面がすべり始める臨界せん断応力 τ_{crit} を，表面間に作用する接触圧 p の一定の割合として定義する（$\tau_{crit}=\mu P$）。比例定数 μ は，摩擦係数である。

基本的な摩擦モデルでは，すべての方向で μ は同じであると仮定される（等方性摩擦）。3 次元解析では，2 つの物体間の接触面に沿って，直交する 2 つのせん断応力成分 τ_1 と τ_2 が存在する。これらの成分は，接触面や接触要素のすべり方向に作用する。

Abaqus/Standard は，接触点の状態が固着からすべりへ，またはすべりから固着へいつ移行するのかを決定する固着/すべり計算のために，2 つのせん断応力成分を 1 つの「相当せん断応力$\bar{\tau}$」に合成する。ここで $\bar{\tau}$　$\sqrt{\tau_1^2+\tau_2^2}$である。さらに，2 つのすべり速度成分は 1 つの相当すべり速度$\dot{\gamma}$　$\sqrt{\dot{\gamma}_1^2+\dot{\gamma}_2^2}$に合成される。固着/すべり計算により，固着状態からすべり状態への変化点を表す面が接触圧-せん断応力空間内に図-4.1.10 に示すように定義される。しかし，本解析で継手にかける荷重が 1 方向のみであるため，荷重方向のせん断応力が大きく，他の方向のせん断応力は，無視できるほど小さくなっている。

Abaqus/Standard では，基本的なクーロン摩擦モデルを定義する方法が 2 つ用意されている。一つは 摩擦係数を相当すべり速度と接触圧の関数として定義する方法であり，もう一つは，静止摩擦係数と動摩擦係数を直接に指定する方法である。前者では，すべり速度，接触圧，温度，および場の変数に依存させることができる。この場合，摩擦係数を以下のように定義される。

$$\mu \quad \mu(\dot{\gamma}_{eq}, p, \overline{\theta}, \bar{f}^{\alpha}) \qquad \cdots\cdots (4.1.1)$$

ここで，$\dot{\gamma}_{eq}$は相当すべり速度，p は接触圧，$\overline{\theta}$　$\frac{1}{2}(\theta_A+\theta_B)$は接触点での平均表面温度，$\bar{f}^{\alpha}$　$\frac{1}{2}(f_A^{\alpha}+f_B^{\alpha})$は場の変数αの接触点での平均である。$\theta_A$，$\theta_B$，$f_A^{\alpha}$，および，$f_B^{\alpha}$ は，表面上の点 A と B での温度と場の変数である。点 A はスレーブ面上の節点であり，点 B は，対になるマスター面上で点 A に最も近い点である。温度と場の変数は，マスター面に沿って B の位置で内挿される。マスター面が剛体で構成されている場合，参照節点での温度と場の変数（熱応力場，電磁場，拡散場，流れ場など任意の場を対象とする解析に応じて指定可能）が使用される。摩擦係数には，負以外の任意の値を設定することができる。

一般に，静止摩擦係数は，動摩擦係数と異なることが明らかにされており，静止摩擦係数は動摩擦係数より大きいとされている。前者のモデル化の場合，静止摩擦係数はすべり速度がゼロのときに得られる値に対応し，動摩擦係数は，最大すべり速度で得られる値に対応している。静止摩擦から動摩擦への

移行は，これらの中間で定義されるすべり速度で得られる。

本解析では，後者のモデル化によっており，すべりのメカニズム解明が目的であり，すべり発生までの評価を主としているため，静止摩擦係数と動摩擦係数は等しいと仮定した。4.3 節に示しているパラメトリック解析において各接触面に設定した摩擦係数を表-4.1.1 に示す。母板と連結板，ボルト軸部とボルト，座金と連結板に対する設定した摩擦係数は 0.5 であり，試験体の接触面処理（無機ジンクリッチペイント塗装）に対応したすべり係数[3)]の推奨値を参考に設定した。

本解析では図-4.1.11 のように Abaqus/Standard での「摩擦の定式化」オプションでは「ペナルティ」法を選択しており，これは，Abaqus/Standard における一般的な接触アルゴリズムの 1 つである。一般的に「ペナルティ」法は，本来は要素貫入が発生しない要素間において，計算上貫入が発生した場合，節点に仮想のばねを設定し，貫入がなくなるまで節点を押し戻すのに必要な荷重を計算し，貫入のない節点位置と，接触反力を求める方法である。

表-4.1.1　パラメトリック解析で設定した摩擦係数

マスター面	スレーブ面	摩擦係数
母板	連結板	0.5
ボルト軸部	ボルト	0.5
座金	ボルト	1.0
座金	連結板	0.5

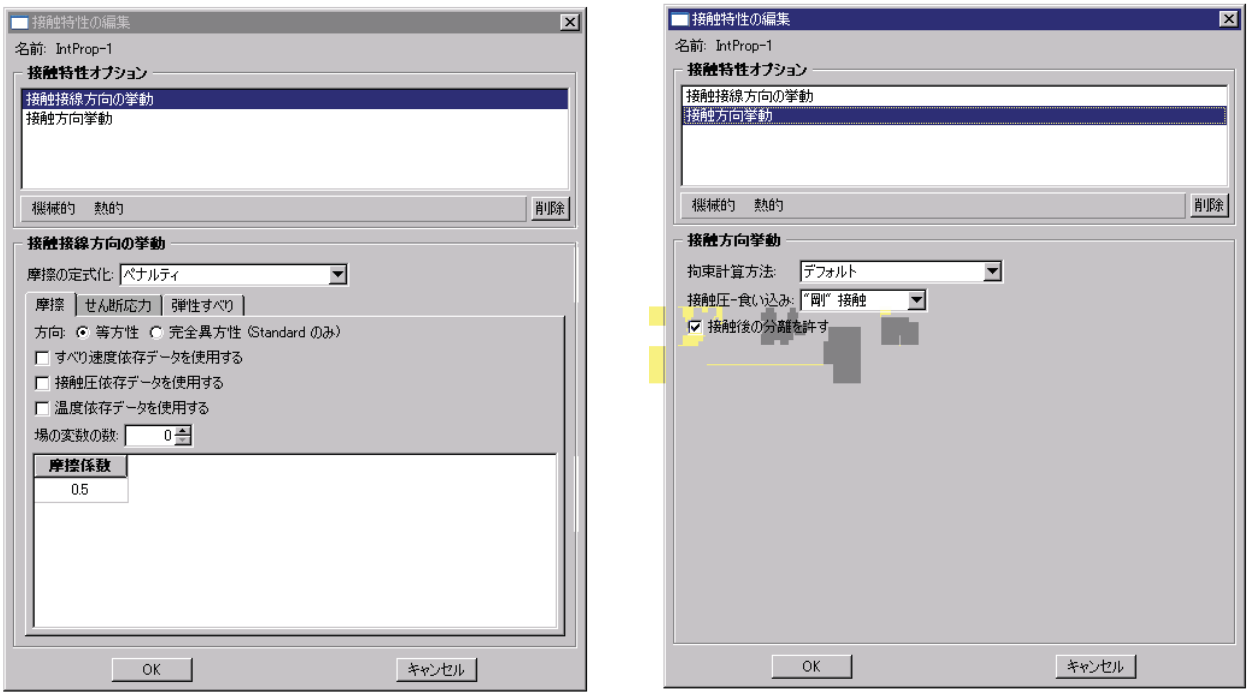
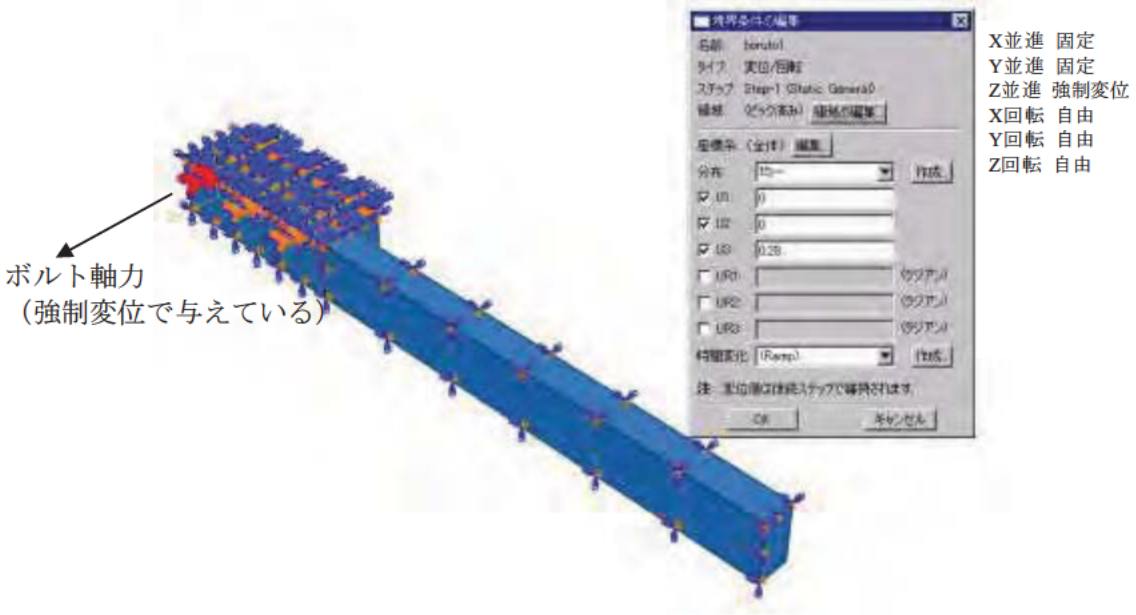


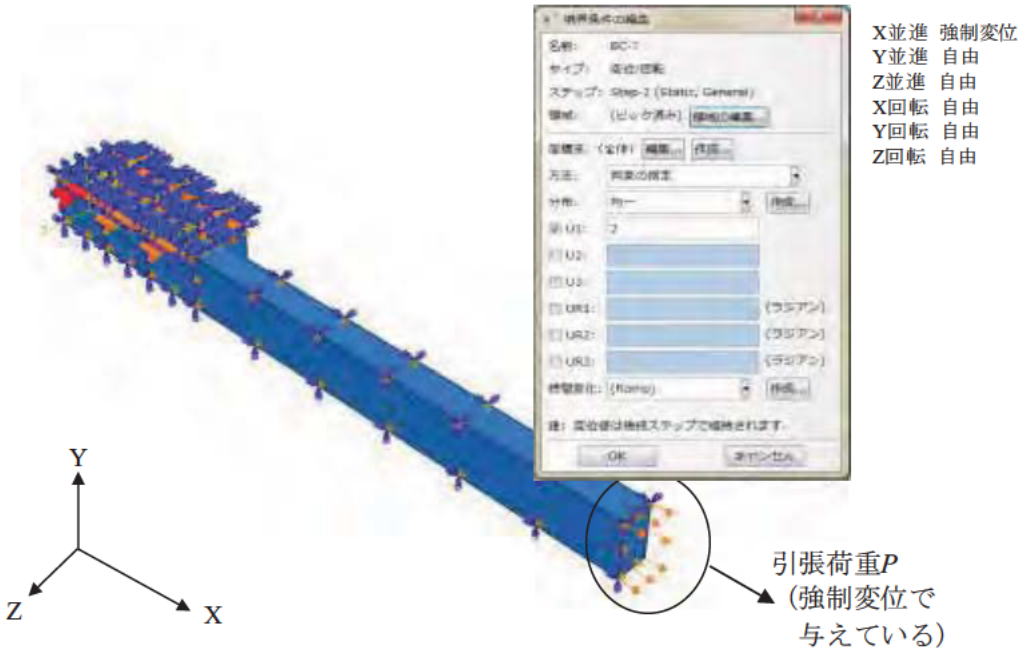
図-4.1.11　Abaqus における本モデルの「接触特性」の設定

4.1.4　解析手法

解析計算は，図-4.1.12 に示すように 2 つのステップから成る。まず，図（a）に示すように STEP-1 でボルト軸部の対称面に強制変位を与えて，ボルト軸力を導入する。なお，ボルト軸部の対称面は，X 軸，および Y 軸方向の並進を拘束している。次に，図（b）に示すように STEP-2 で母板の外側の面に強制変位を与えて引張荷重を導入する。この時，ボルト軸部の対称面は，X 軸および Y 軸方向の変位を許容している。



（a）STEP-1　ボルト軸力導入時



（b）STEP-2　母板引張時

図-4.1.12　解析ステップ

4.2　解析モデルの検討

4.2.1　モデル化の範囲と要素分割

（a）連結板の端部長さ

図-4.2.1 に示す連結板の端部長さ（母板と母板の間隔の 1/2）がすべり挙動，およびすべり係数に与える影響について検討する。母板厚が 75 mm で，ボルト列数が 3 列の場合に対し，端部長さを 0 mm, 10 mm, 40 mm と設定した解析を行った。本解析では，摩擦係数を，すべり耐力試験から得られた試験体のすべり荷重 P_{SL} を再現するように調整し，0.66 としている。

表-4.2.1 に解析ケースを，表-4.2.2 に解析結果をそれぞれ示す。ここでは，最大荷重に到達した時点を，すべり発生としている。表中の解析すべり/降伏耐力比 β_a の定義を式（4.2.1）に示す。

表-4.2.2 より，異なる端部長さであってもすべり荷重に変化は見られず，端部長さについて，すべり荷重（すべり係数）に与える影響はないと判断される。

$$\beta_a = \frac{P_d}{(W-d)\cdot t\cdot \sigma_{ya}} \qquad \cdots\cdots (4.2.1)$$

$$P_d = \mu_a \cdot N_0 \cdot m \cdot n \qquad \cdots\cdots (4.2.2)$$

ここで，P_d：設計すべり耐力，W：板幅，d：ボルト孔径（直径），

t：母板厚，σ_{ya}：解析で設定した母板の降伏応力，

μ_a：すべり係数*，　N_0：目標導入軸力 ，m：接触面数，n：ボルト列数

*すべり係数には，解析で設定した摩擦係数と同じ 0.66 を使用した。

後述するパラメトリック解析では，すべり係数として，解析で設定した摩擦係数と同じ 0.5 を使用した。

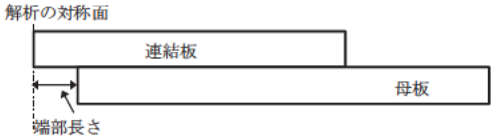


図-4.2.1　端部長さの定義

表-4.2.1　解析ケース

解析ケース		端部長さ 0mm	端部長さ 10mm	端部長さ 40mm
ボルトM22（F10T）孔径24.5mm	ボルト本数	3	3	3
	導入軸力（kN/本）*	203	203	203
母材　SM490Y	板厚（mm）	75	75	75
連結板　SM490Y	板厚（mm）	38	38	38
試験体幅（mm）		120	120	120
解析すべり/降伏耐力比 β_a		0.31	0.31	0.31
摩擦係数		0.66	0.66	0.66

*目標導入軸力：205 kN

表-4.2.2　解析結果

解析ケース	端部長さ 0mm	端部長さ 10mm	端部長さ 40mm
すべり荷重（kN）	786	786	786
すべり係数	0.646	0.646	0.646

図-4.2.2 に解析ケース「端部長さ 0 mm」，「端部長さ 10 mm」，「端部長さ 40 mm」の荷重-相対変位関係を示す。図の縦軸は引張荷重 P をすべり荷重 P_{SL} で無次元化した値 P/P_{SL}，横軸は母板と連結板の内側相対変位をそれぞれ示す。図-4.2.3 にボルト番号とその位置を，図-4.2.4 に荷重-ボルト軸力関係をそれぞれ示す。図の縦軸はボルト軸力を，横軸は引張荷重をそれぞれ示す。

図-4.2.2 より，各ケースの荷重-相対変位関係は一致しており，その傾向は端部長さに依存しない。図-4.2.4 より，荷重が大きくなると，軸力が低下している。これは，荷重の増加に伴い，板の伸びに対するポアソン効果によって板厚が減少し，軸力が低下するためと考えられる。

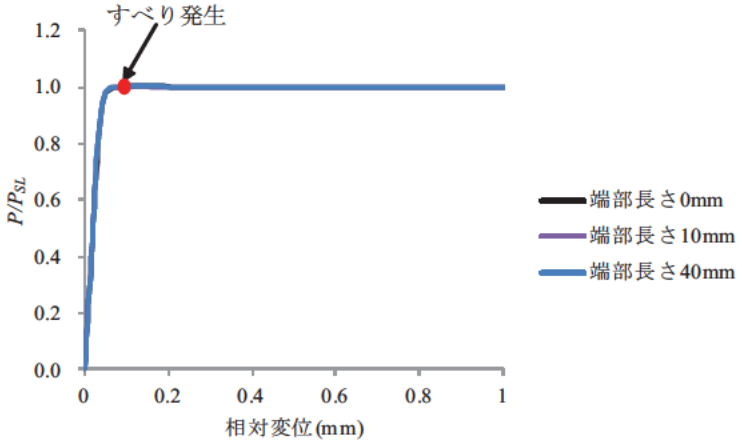


図-4.2.2　荷重 相対変位図

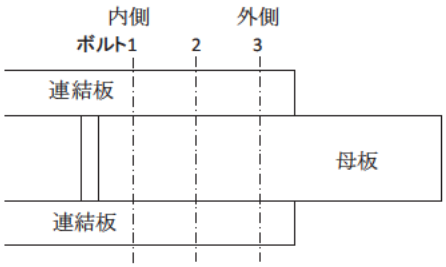
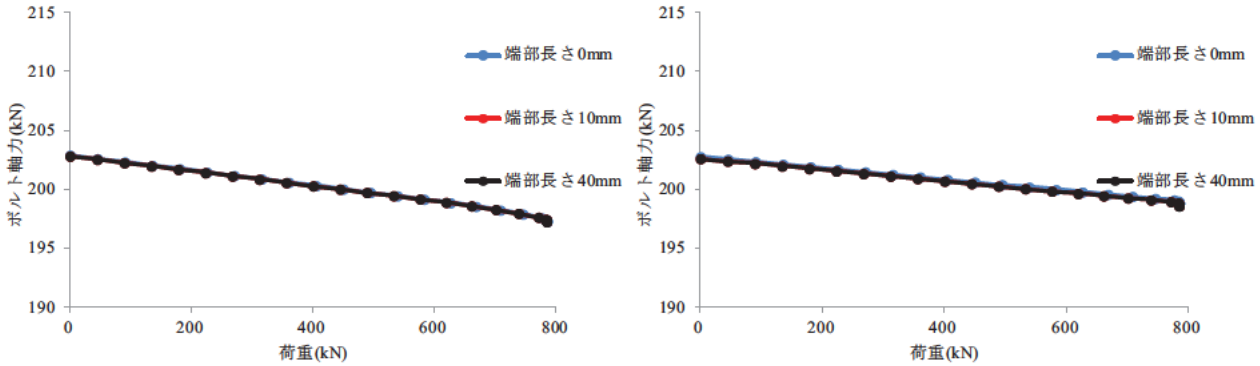
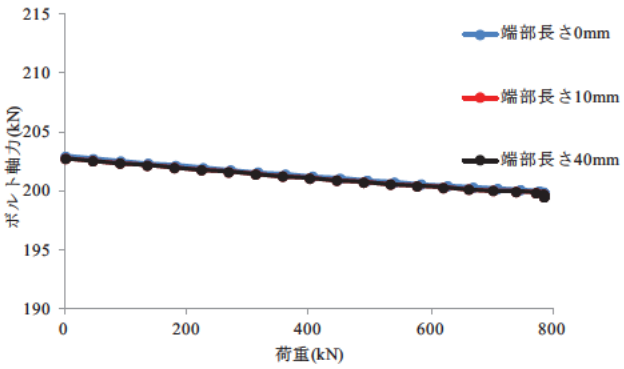


図-4.2.3　ボルト番号とその位置



(a) ボルト 1　　(b) ボルト 2

図-4.2.4　荷重 ボルト軸力関係



(c) ボルト 3

図-4.2.4　荷重 ボルト軸力関係（続き）

図-4.2.5 に軸力導入時の連結板接触面の接触圧 σ_z の分布を，図-4.2.6 にすべり時の連結板接触面のせん断応力 τ_{xz} の分布を示す。

図-4.2.5 より，各ケースの接触圧は同じ性状を示しており，端部長さの影響は見られない。また，図-4.2.6 より，端部長さによるせん断応力分布に差異は認められない。

図-4.2.7 にすべり時の各ボルトの分担摩擦力を示す。図 (a) の縦軸はボルト 1 本あたり分担摩擦力を，横軸はボルト番号をそれぞれ示す。ボルト 1 本あたり分担摩擦力は，図 (b) に示すボルトごとに領域分割した母板接触面に発生するせん断応力の合計値で求められる。図 (a) の点線は，ボルト 1 本あたりすべり耐力 S_{cr} であり，式 (4.2.3) で求められる。

$$S_{cr} = \mu_a \cdot N_0 \qquad \cdots\cdots (4.2.3)$$

ここで，μ_a：すべり係数 ［0.66（4.2.1 項）／0.50（4.3.1 項～4.3.5 項）］

N_0：目標導入軸力

図-4.2.7 (a) より，各ケースともに，すべり発生時に，ボルト 1，ボルト 2 の分担摩擦力がボルト 1 本あたりすべり耐力値に達していることがわかる。

図-4.2.8 にすべり時の連結板接触面を構成する要素の軸方向応力 σ_x の分布を，図-4.2.9 にすべり時の母板と連結板間の開口量の分布を示す。

図-4.2.8 より，端部長さが異なっても，各位置の応力がほぼ一致していることがわかる。図-4.2.9 より，端部長さが異なっても，母板と連結板の開口量の範囲と度合いがほぼ一致している。したがって，端部長さの開口量に与える影響がほぼないと考えられる。

以上より，端部長さが 0 mm，10 mm，40 mm の解析ケースに対し，導入軸力の接触圧と母板・連結板開口量についてはその差は微小であり，すべり挙動に与える影響はほとんどない。このため，以降においては，要素数が少なく，計算時間が短かくなる端部長さを 0 mm と設定した。

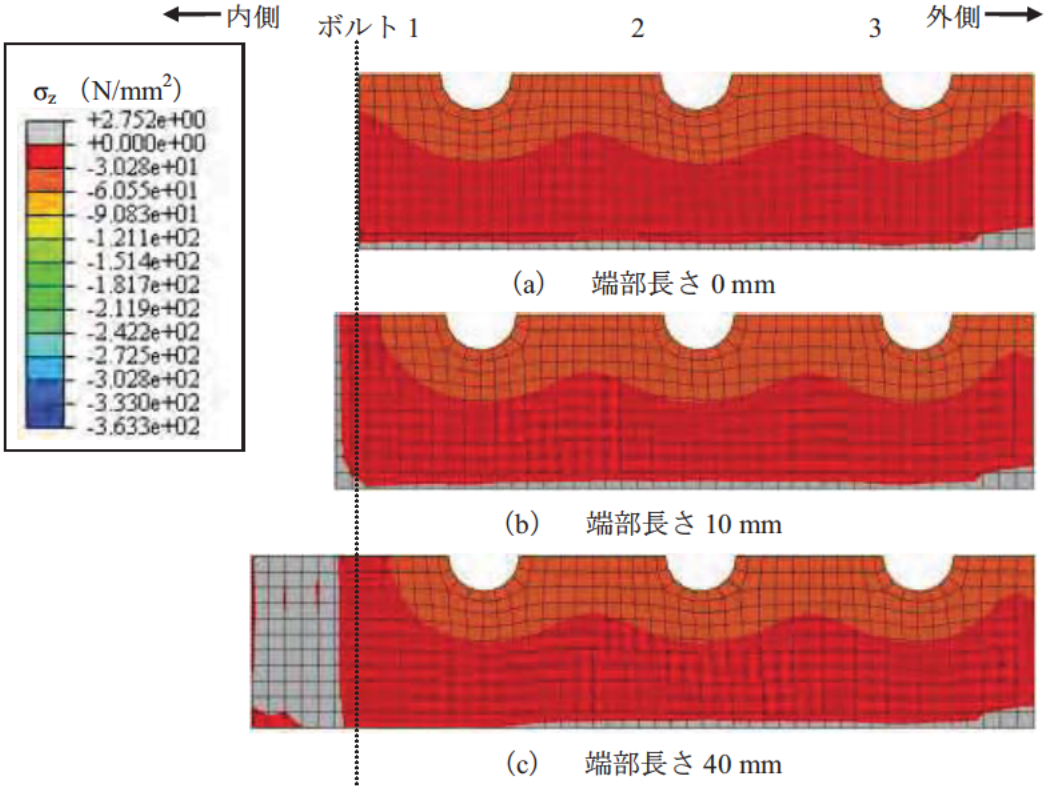


図-4.2.5　軸力導入時の接触圧 σ_z の分布（連結板接触面）

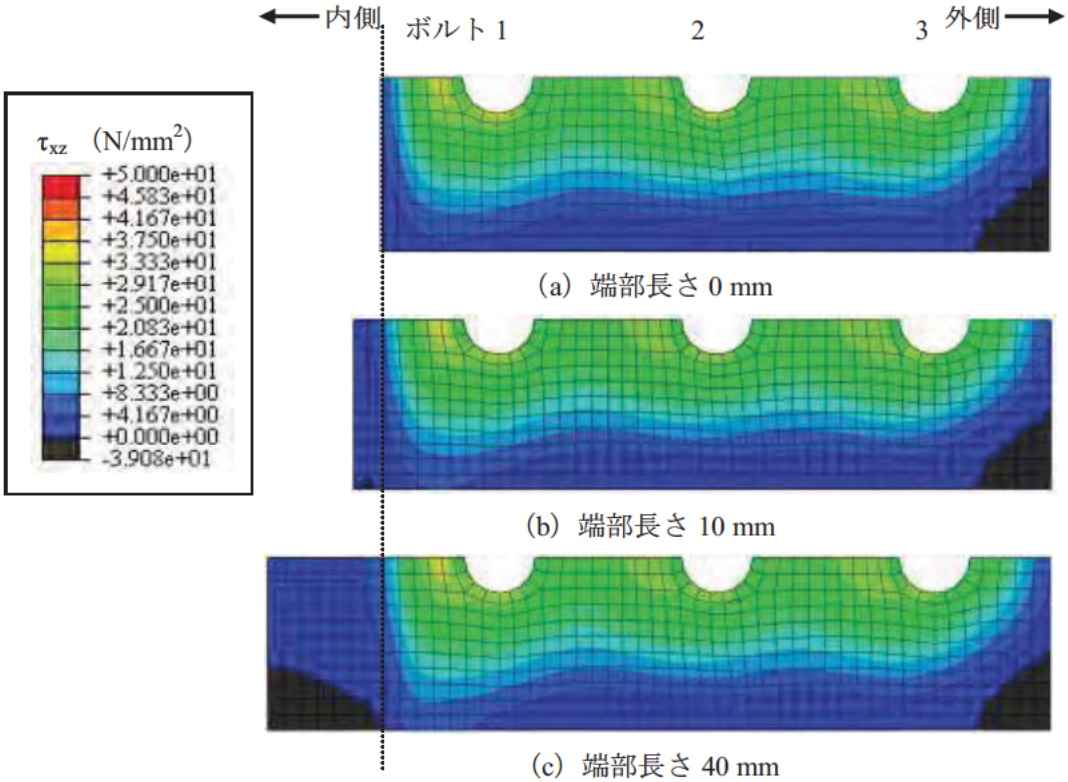
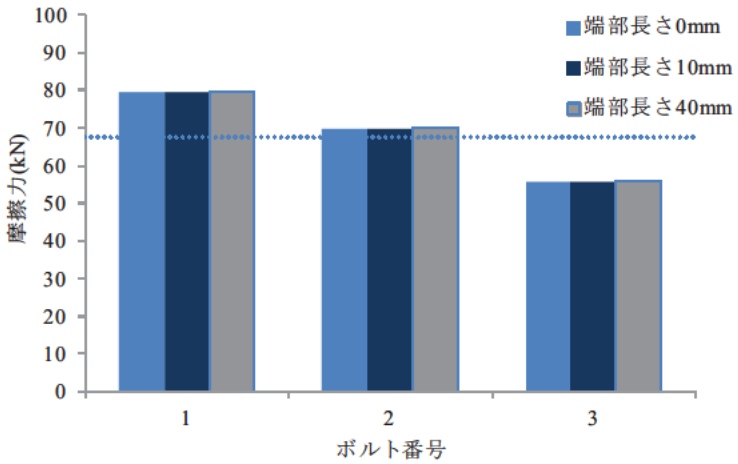
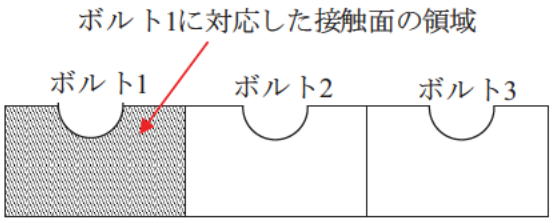


図-4.2.6　すべり時のせん断応力 τ_{xz} の分布（連結板接触面）

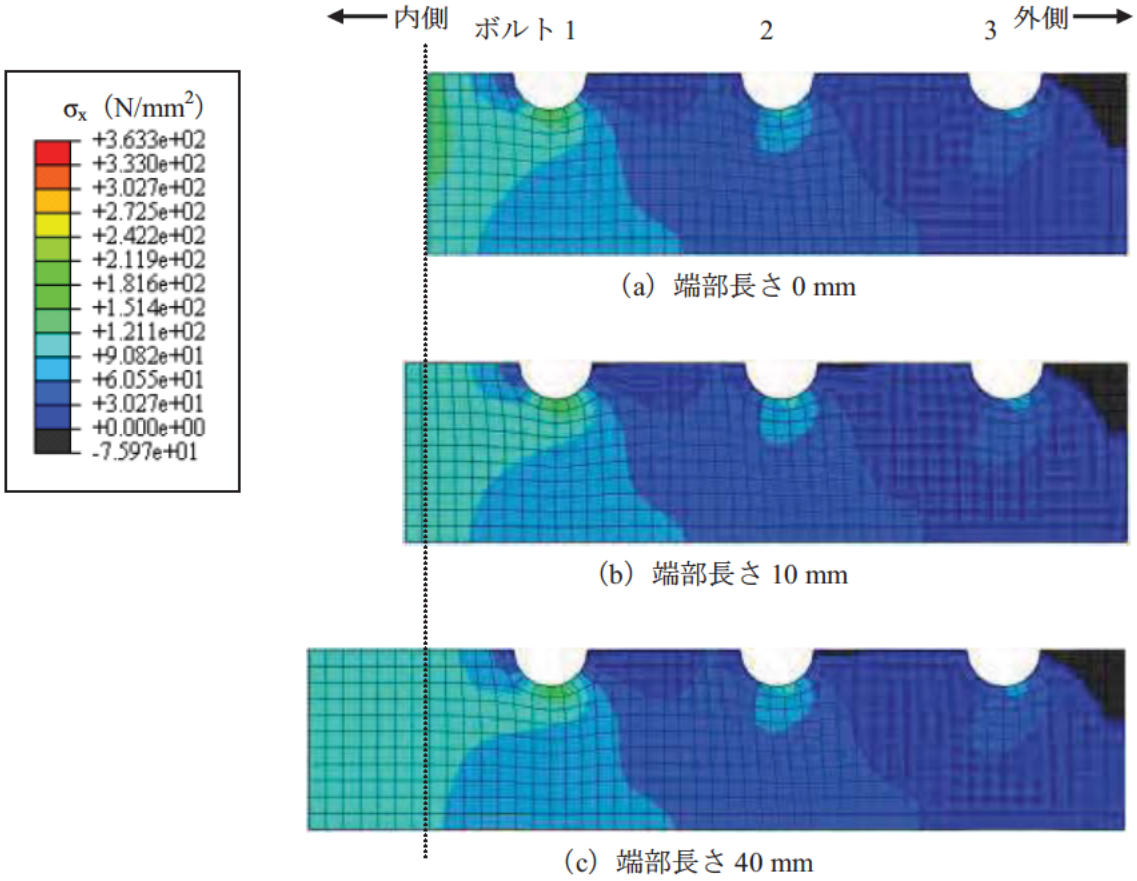


(a) すべり時の各ボルト列の分担摩擦力



(b) 各ボルトの接触面の領域

図-4.2.7　すべり時の各ボルトの分担摩擦力



(a) 端部長さ 0 mm

(b) 端部長さ 10 mm

(c) 端部長さ 40 mm

図-4.2.8　すべり時の軸方向応力 σ_x の分布（連結板接触面側要素）

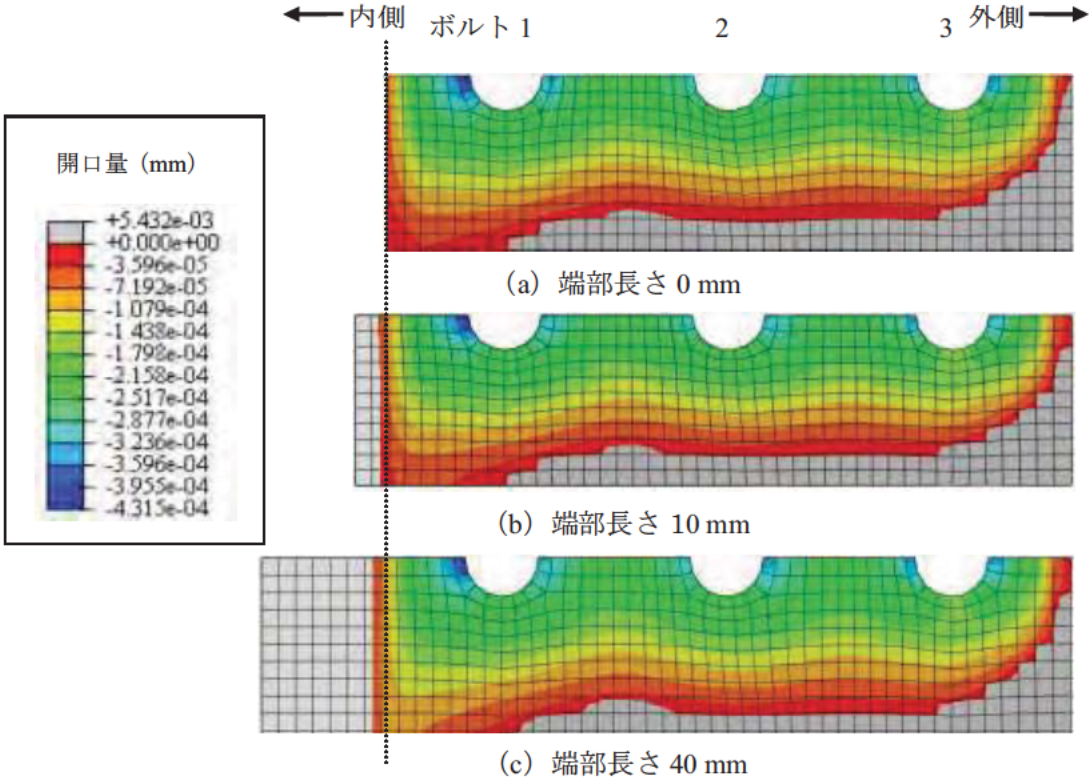


図-4.2.9　すべり時の開口量の分布（母板・連結板間）

（b）要素分割

母板厚が 75mm，ボルト列数が 3 列の場合に対し，要素長（一辺の長さ）を，2.9 mm, 5.5 mm, 11 mm とした場合の要素長がすべり挙動（すべり係数）に与える影響について検討する。

表-4.2.3 に解析ケースを，表-4.2.4 に解析結果をそれぞれ示す。ボルト軸力の導入のため，ボルト端部に同じ強制変位量を与えたが，表-4.2.3 より，ボルトに導入された軸力はわずかながら差がみられる。しかし，その差はわずかであり，得られたすべり荷重（すべり係数）には，ほとんど差がない。

表-4.2.3　解析ケース

解析ケース		要素長 2.9mm	要素長 5.5mm	要素長 11mm
ボルトM22（F10T）孔径24.5mm	ボルト本数	3	3	3
	導入軸力（kN/本）＊	203	202	201
母材　SM490Y	板厚（mm）	75	75	75
連結板　SM490Y	板厚（mm）	38	38	38
試験体幅（mm）		120	120	120
解析すべり/降伏耐力比 β_a		0.24	0.24	0.24
摩擦係数		0.50	0.50	0.50

＊目標導入軸力：205 kN

表-4.2.4　解析結果

解析ケース	要素長 2.9mm	要素長 5.5mm	要素長 11mm
すべり荷重（kN）	597	598	594
すべり係数	0.491	0.492	0.492

図-4.2.10 に解析ケース「要素長 2.9 mm」,「要素長 5.5 mm」,「要素長 11 mm」の荷重-相対変位関係を，図-4.2.11 に荷重-ボルト軸力関係をそれぞれ示す。ボルト位置は図-4.2.2 に示している。

図-4.2.10 より，要素長 2.9 mm と 5.5 mm の結果はほぼ一致しているが，要素長 11 mm の場合では，他のケースと初期剛性や，すべり後の荷重の増加の傾向が異なっている。これは，要素長 11 mm のケースでは，孔壁の要素分割が不十分であり，母板と連結板の相対変位が小さい段階で支圧状態に入ったためと考えられる。図-4.2.11 より，同じ強制変位に対し，要素長 11 mm のケースでは，要素長 2.9 mm と 5.5 mm と比べ，導入される軸力が低くなっている。

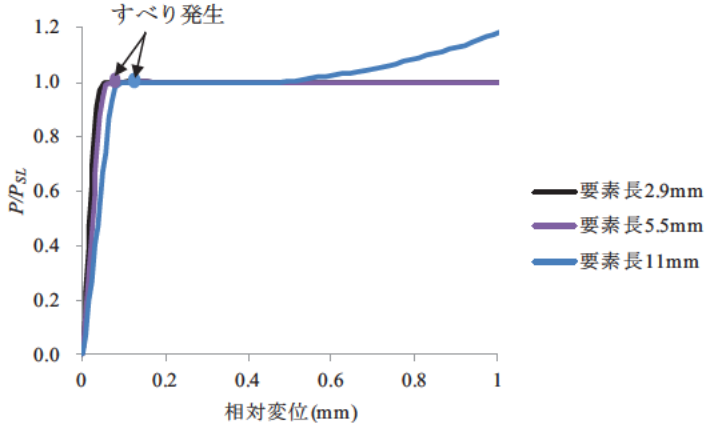
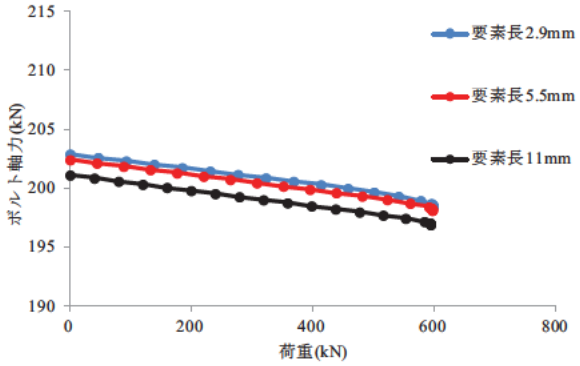
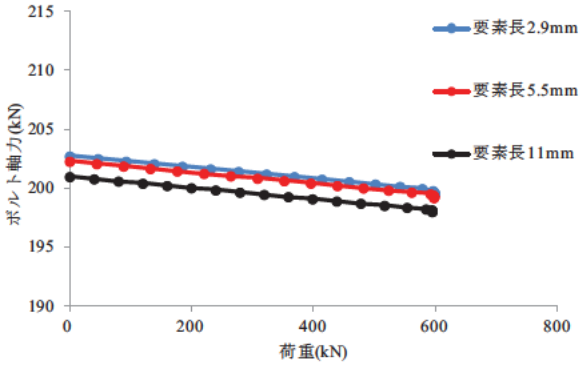


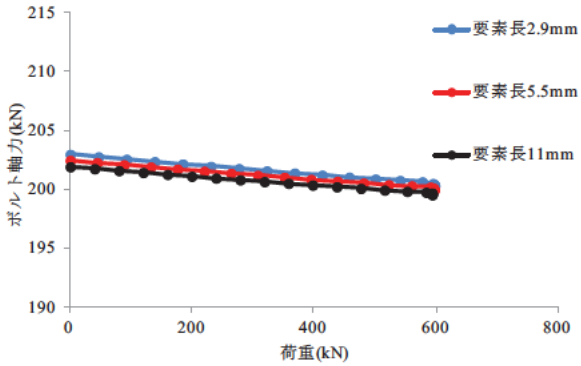
図-4.2.10　荷重 相対変位関係



(a) ボルト 1



(b) ボルト 2



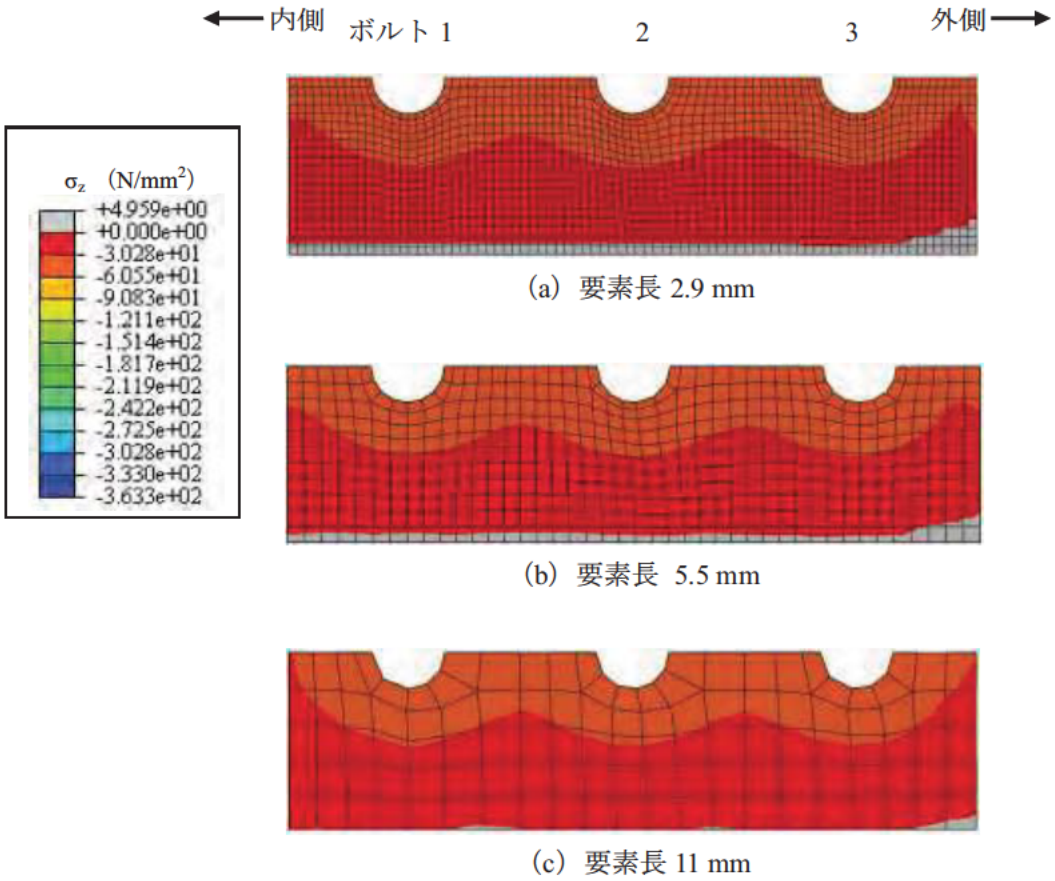
(c) ボルト 3

図-4.2.11 荷重 ボルト軸力関係

図-4.2.12 に軸力導入時の連結板接触面の接触圧 σ_z の分布を，図-4.2.13 にすべり時の連結板接触面のせん断応力 τ_{xz} の分布を，図-4.2.14 にすべり発生時の各ボルトの分担摩擦力を，図-4.2.15 にすべり時の連結板接触面を構成する要素の軸方向応力 σ_x の分布を，図-4.2.16 にすべり時の母板と連結板間の開口量の分布をそれぞれ示す。

図-4.2.12 より，要素長が異なっても，接触圧の分布は大きく変わらない。ただし，接触圧に若干の差異がみられる。図-4.2.13 より，要素長 2.9mm と要素長 5.5mm は，同等の結果となっているが，要素長 11mm の結果は他と異なる応力分布となっている。図-4.2.14 より，要素長 11mm の分担摩擦力が，要素長 2.9mm と要素長 5.5mm より大きくなっている。図-4.2.15（a）と（b）を比較すると，応力の差異があまりみられないが，図（c）については，応力の分布に差があることがわかる。図-4.2.16 より，要素長 11 mm の開口量は，要素長が 2.9 mm，5.5 mm と比べ，分布が異なっており精度に違いがみられる。

以上より，要素長を 2.9 mm, 5.5 mm, 11 mm としたモデルについて，すべり荷重，すべり係数，軸力導入時の接触圧，連結板接触面のせん断応力 τ_{xz}，各ボルトの分担摩擦力，連結板接触面を構成する要素の軸方向応力 σ_x，母板と連結板開口量を調べた結果，要素長 2.9 mm と 5.5 mm とはほぼ一致しているが，要素長 11 mm では，これらのケースと異なる結果が得られた。このことから，本検討では，要素長 2.9 mm と 5.5 mm のうち，解析時間の短い要素長 5.5 mm の解析モデルを使用することとした。

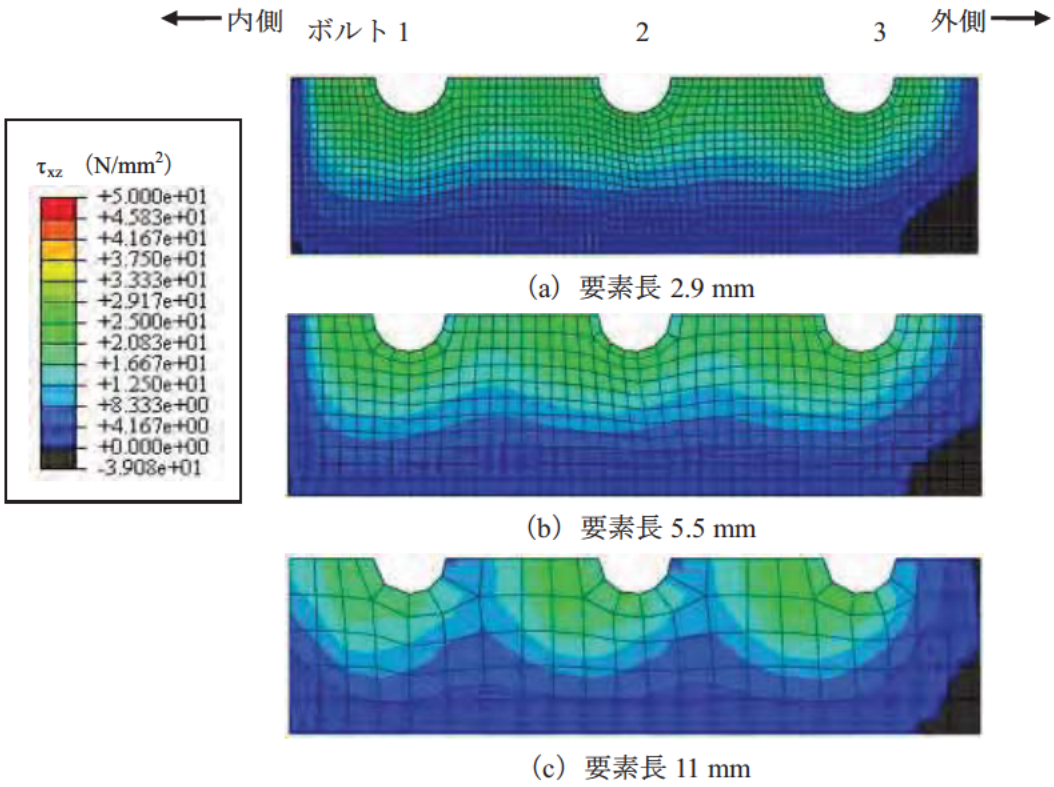


（a）要素長 2.9 mm

（b）要素長 5.5 mm

（c）要素長 11 mm

図-4.2.12　軸力導入時の接触圧 σ_z の分布（連結板接触面）



(a) 要素長 2.9 mm

(b) 要素長 5.5 mm

(c) 要素長 11 mm

図-4.2.13　すべり時のせん断応力 τ_{xz} の分布（連結板接触面）

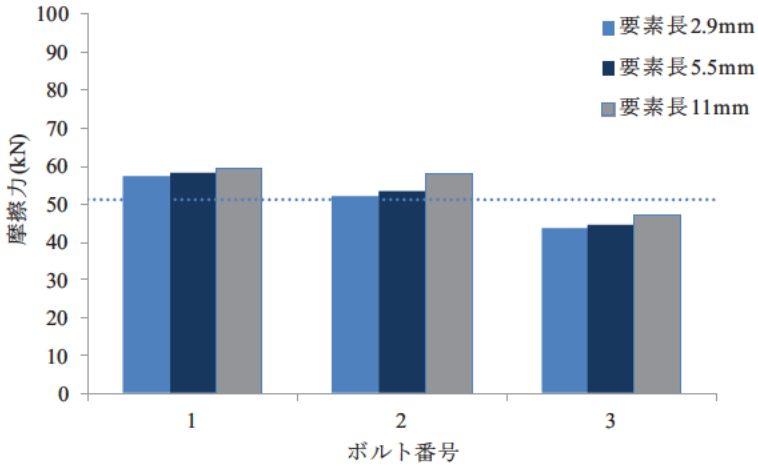
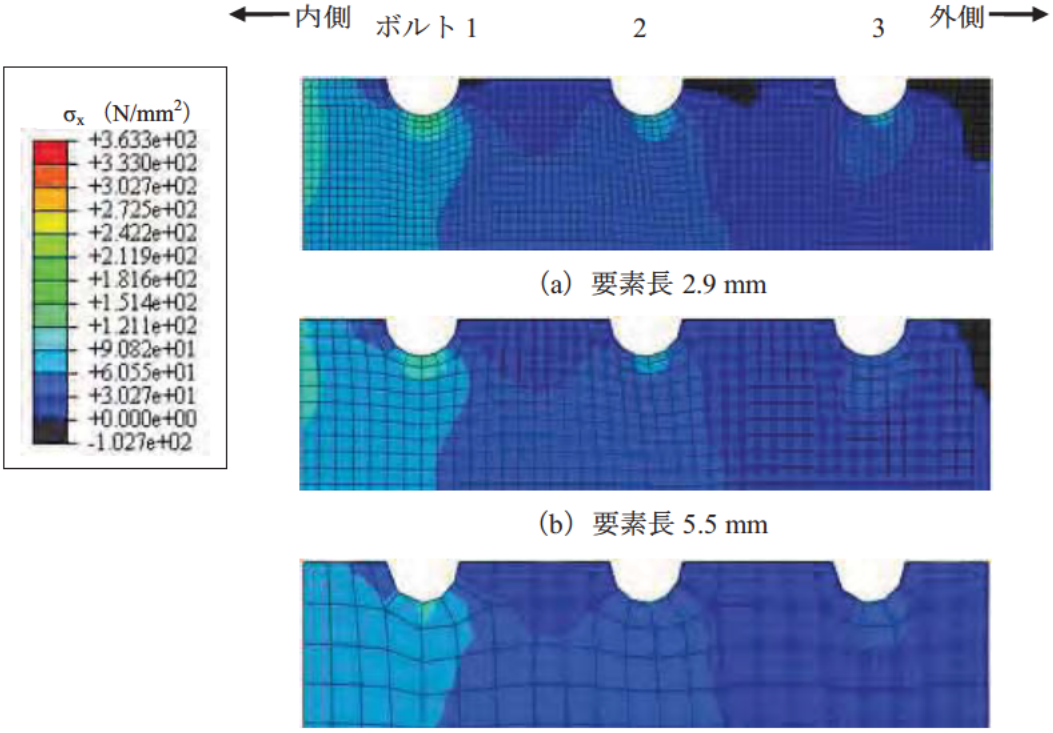


図-4.2.14　すべり時の各ボルト列の分担摩擦力

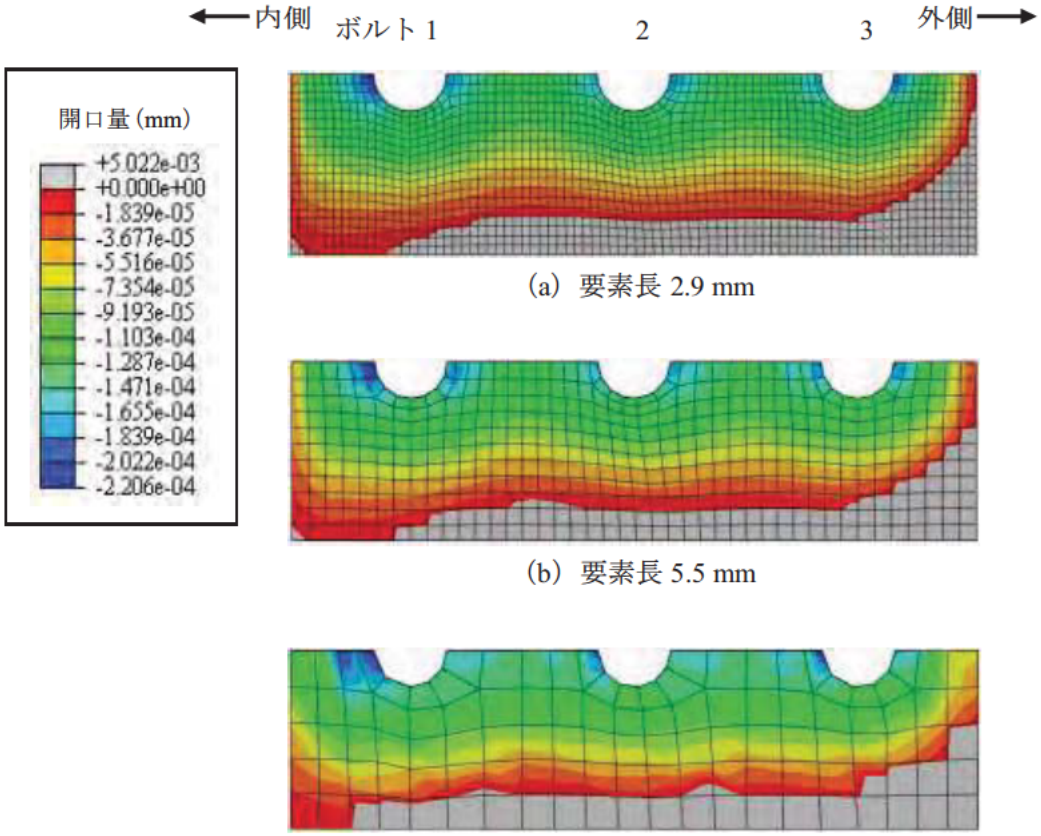


(a) 要素長 2.9 mm

(b) 要素長 5.5 mm

(c) 要素長 11 mm

図-4.2.15　すべり時の軸方向応力 σ_x の分布（連結板接触面側要素）



(a) 要素長 2.9 mm

(b) 要素長 5.5 mm

(c) 要素長 11 mm

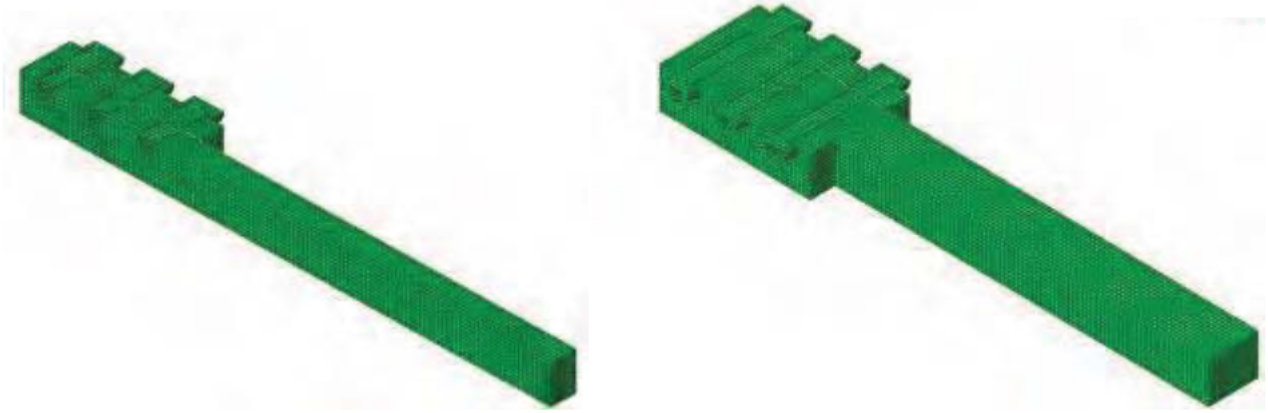
図-4.2.16　すべり時の開口量の分布（母板・連結板間）

(c) 解析対象範囲

解析対象を試験体の 1/8，および 1/4 とした場合のモデル化の範囲の違いがすべり挙動，およびすべり係数に与える影響について検討する。ボルトのモデル化の差異による影響についても検討している。

図-4.2.17 に，1/8 モデルと 1/4 モデルの形状を示す。1/8 モデルでは，ボルト軸部の対称面に強制変位を与えることによりボルト軸力を導入している。一方，1/4 モデルではボルト軸部に荷重を直接与えている。

表-4.2.5 に解析ケースを，表-4.2.6 に解析結果をそれぞれ示す。表-4.2.5 より，ボルト軸力導入の方法が異なっているため，ボルト軸力の値がわずかに異なっているが，その差は小さい。また，表-4.2.6 から，すべり荷重，およびそれらから計算されるすべり係数のいずれの差も小さい。



(a) 1/8 モデル　　(b) 1/4 モデル

図-4.2.17　モデルの形状

表-4.2.5　解析ケース

解析ケース		1/8モデル	1/4モデル
ボルトM22（F10T） 孔径24.5mm	ボルト本数	3	3
	導入軸力（kN/本）＊	203	205
	軸力導入方法	強制変位	荷重
母材　SM490Y	板厚（mm）	75	75
連結板 SM490Y	板厚（mm）	38	38
試験体幅（mm）		120	120
解析すべり/降伏耐力比 β_a		0.31	0.31
摩擦係数		0.66	0.66

＊目標導入軸力：205 kN

表-4.2.6　解析結果

解析ケース	1/8モデル	1/4モデル
すべり荷重（kN）	786	796
すべり係数	0.646	0.647

図-4.2.18 に解析ケース「1/8 モデル」と「1/4 モデル」の荷重-相対変位関係を，図-4.2.19 に荷重-ボルト軸力関係をそれぞれ示す。

図-4.2.18 より，1/8 モデルと 1/4 モデルはすべり荷重時の相対変位量は，同等の結果が得られた。図-4.2.19 より，1/8 モデルと，1/4 モデルのボルト軸力の低下率は，引張荷重が大きくなるにつれて減少しており，両者の傾向は一致している。したがって，ボルト軸力の導入手法よる軸力低下の差異は小さく，すべり荷重（すべり係数）に与える影響はほとんどないと考えられる。

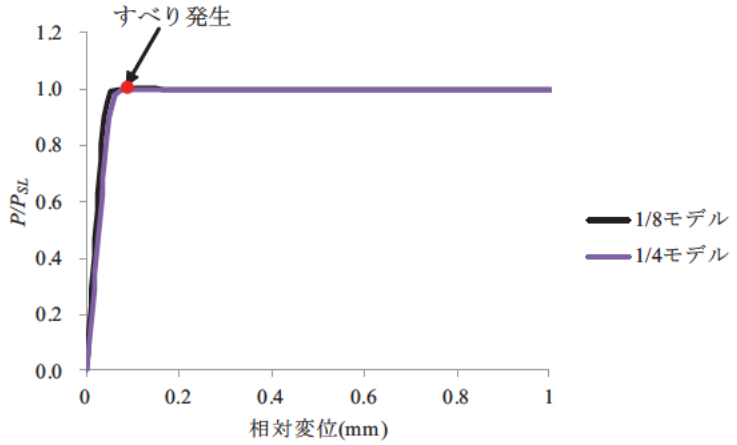


図-4.2.18　荷重 相対変位

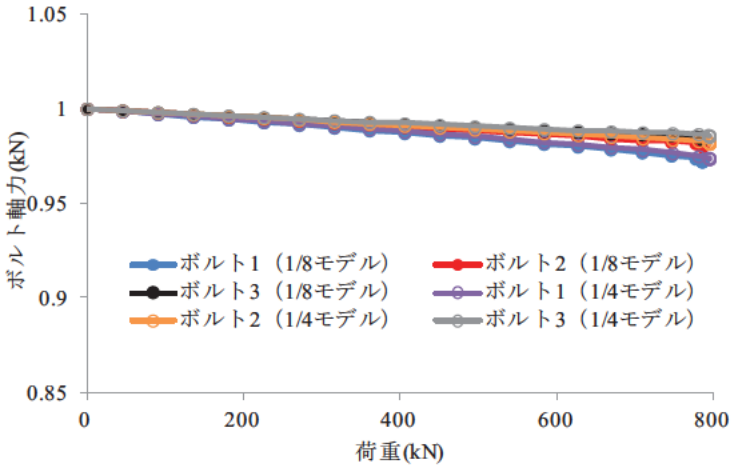
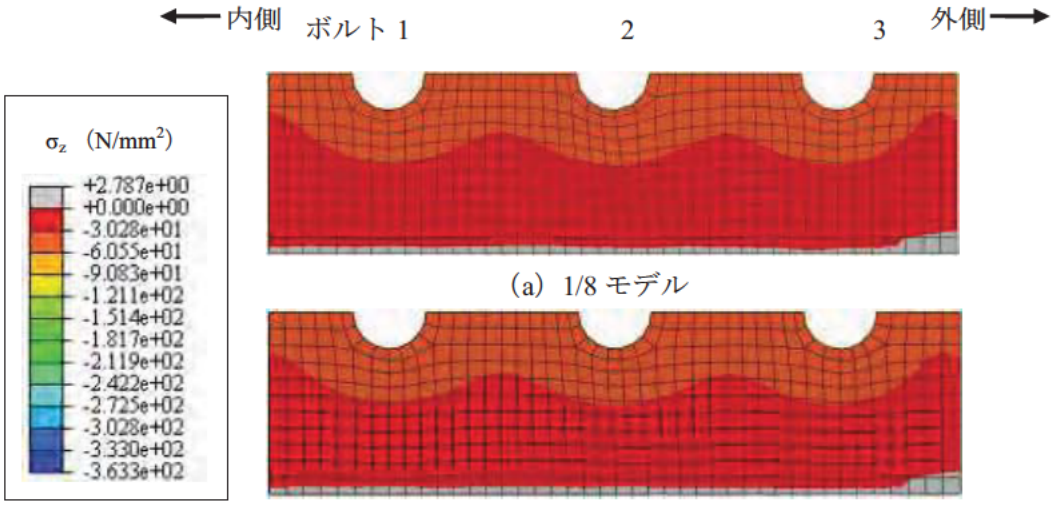


図-4.2.19　荷重 ボルト軸力

図-4.2.20 に軸力導入時の連結板接触面の接触圧 σ_z の分布を，図-4.2.21 にすべり時の連結板接触面のせん断応力 τ_{xz} の分布を，図-4.2.22 にすべり時の連結板接触面を構成する要素の軸方向応力 σ_x の分布を，図-4.2.23 にすべり時の母板と連結板間の開口量の分布をそれぞれ示す。

図-4.2.20，図-4.2.21，図-4.2.22 より，軸力導入の手法が異なるが，接触圧 σ_z，せん断応力 τ_{xz}，および軸方向応力 σ_x の分布がほぼ一致している。図-4.2.23 より，軸力導入の手法が異なるが，各位置の応力および板と連結板の開口量の範囲と度合いがほぼ一致している。

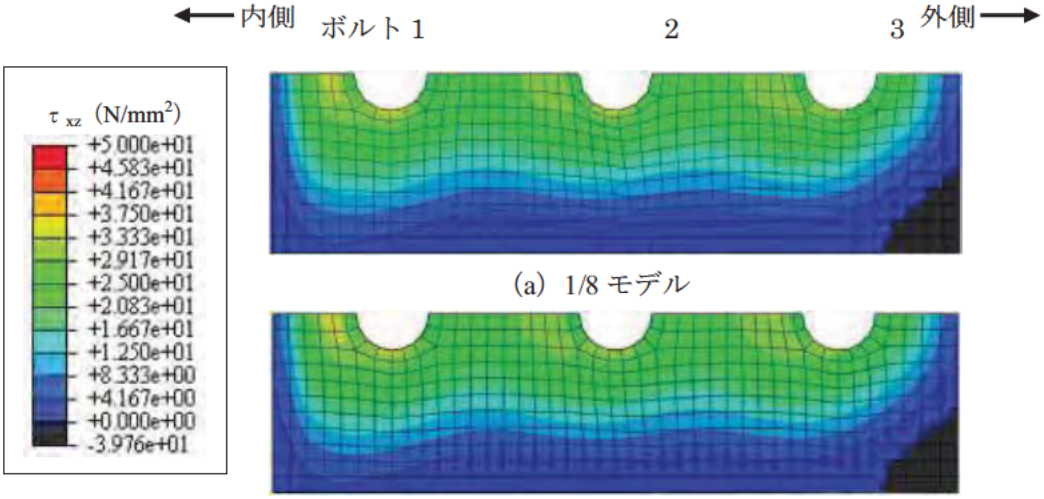
以上より，1/4 モデルと 1/8 モデルで解析結果に差がないことから，要素数の少ない 1/8 モデルで検討を行うこととした。



(a) 1/8 モデル

(b) 1/4 モデル

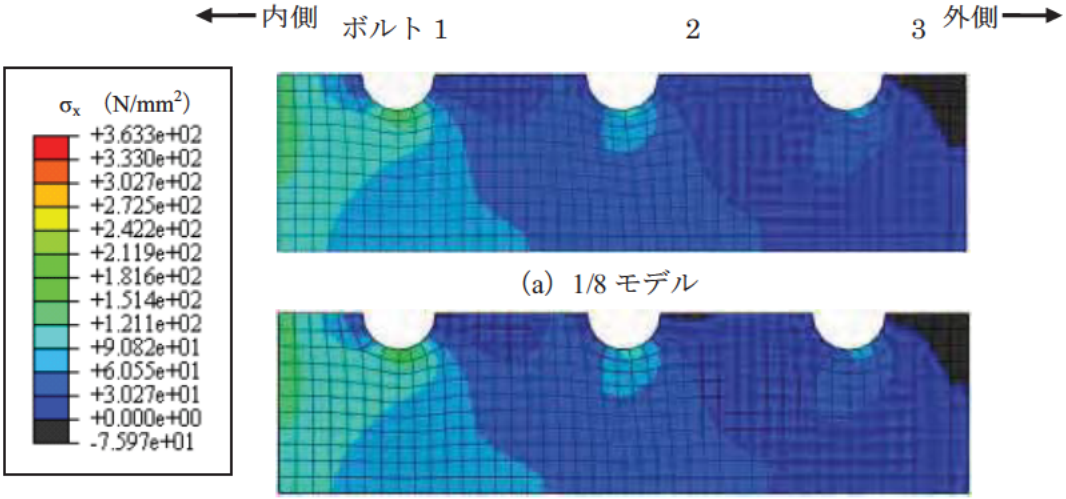
図-4.2.20　軸力導入時の接触圧 σ_z の分布（連結板接触面）



(a) 1/8 モデル

(b) 1/4 モデル

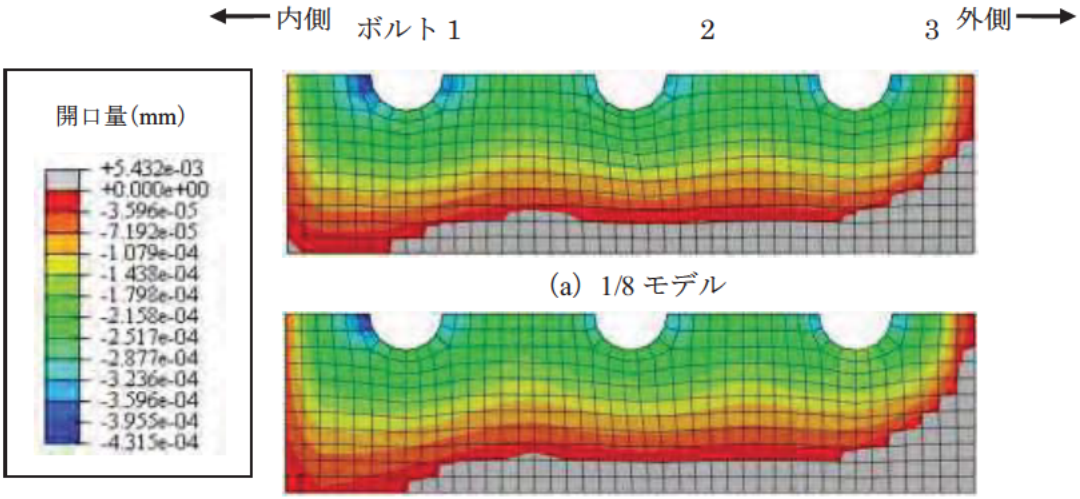
図-4.2.21　すべり時のせん断応力 τ_{xz} の分布（連結板接触面）



(a) 1/8 モデル

(b) 1/4 モデル

図-4.2.22　すべり時の軸方向応力 σ_x の分布（連結板接触面側要素）



(a) 1/8 モデル

(b) 1/4 モデル

図-4.2.23　すべり時の母板と連結板開口量の分布（連結板接触面）

4.2.2　すべり先行型を対象としたすべり耐力試験結果との比較

すべり耐力試験において相対変位やひずみを詳細に測定した試験体 No. 6-1（M22-8-0.49），No. 7-3（M22-12-0.47）のすべり耐力試験を再現する解析を行い，解析モデルの妥当性を検証する。解析モデルの形状，構造諸元，および材質は試験体 No. 6-1 と同じとし，解析で設定する摩擦係数は，解析の最大荷重が試験体 No. 6-1 のすべり荷重と一致するように調整し，0.73 とした。これを他のすべての再現解析のケースに用いた。本解析ではすべり発生までの挙動の再現を目的としており，動摩擦係数は静止摩擦係数と同じ値を設定している。表-4.2.7 に解析で与えた材料特性を示す。これらの特性は 3.6 節の材料強度試験結果より得られた降伏点と，応力-ひずみ関係に基づきモデル化している。

表-4.2.8 に解析ケースの内訳を示す。解析ケース名は，M の後の数値がボルトの呼び径を，次の数値がボルト列数を，最後の数値がすべり/降伏耐力比 β を表している。なお，最後に英字 A がつくものは解析を意味している。表-4.2.9 に解析結果とすべり耐力試験結果との比較を示す。すべり耐力試験の結果は，解析で比較対象とした試験体のものを示し，括弧内は，3 体ずつ行ったすべり耐力試験の平均値を示す。なお，解析のすべり荷重は最大荷重としている。

表-4.2.9 より，試験体 No. 6-1 のすべり荷重と解析のすべり荷重がほぼ一致しており，解析における摩擦係数が適切に設定されていることを確認した。また，試験体 No. 7-3 の再現解析のすべり荷重が，試験体 No. 7-3 のすべり荷重とほぼ一致していることも確認した。

表-4.2.7　材料特性

(a)　母板

ヤング率 (N/mm²)	ポアソン比	応力 (N/mm²)	塑性ひずみ
206,500	0.289	363.3*	0
		363.9	0.0159
		444.7	0.0351
		476.1	0.0528

*降伏応力

(b)　連結板

ヤング率 (N/mm²)	ポアソン比	応力 (N/mm²)	塑性ひずみ
213,400	0.271	375.7*	0
		377.2	0.0168
		400.3	0.0228
		416.4	0.0268

*降伏応力

表-4.2.8　解析ケース

解析ケース		M22 8 0.49A	M22 12 0.47A
ボルトM22（F10T）孔径24.5mm	ボルト本数	8	12
	導入軸力（kN/本）*	205	205
母材　SM490Y	板厚（mm）	75	75
連結板　SM490Y	板厚（mm）	38	38
試験体幅（mm）		130	190
摩擦係数		0.73	0.73
備考		すべり先行	

*目標導入軸力：205 kN

表-4.2.9　解析とすべり耐力試験の結果の比較

	M22 8 0.49		M22 8 0.49A	M22 12 0.47		M22 12 0.47A
	No. 6 1	No. 6 3体の平均		No. 7 3	No. 7 3体の平均	
すべり荷重（kN）	2,276	2,328	2,264	3,375	3,367	3,371

図-4.2.24 に解析における相対変位の測定位置を示す。また，一点鎖線はボルト位置の中心を示す。相対変位 1 は母板間，相対変位 2 は継手内側の母板と連結板の間，相対変位 3 は継手中央の母板と連結板の間，相対変位 4 は継手外側の母板と連結板の間であり，相対変位の値は，測定位置にもっとも近い節点の変位差である。

図-4.2.25，図-4.2.26 にケース M22-8-0.49/M22-8-0.49A と M22-12-0.47/M22-12-0.47A の荷重-相対変位関係をそれぞれ示す。

図より，母板間変位（図中の 1），端部の母板と連結板間変位（図中の 2，4），中央の母板と連結板間変位（図中の 3）の順で，相対変位が大きくなっており，その傾向は試験値と解析値でおおむね一致している。それぞれの荷重-相対変位関係はすべり発生まではおおむね一致している。しかしながら，すべり後の荷重-相対変位関係は，すべり耐力試験では低下していくものの解析では低下せず，一致しない。この理由は，本解析では，動摩擦係数を静止摩擦係数と等しく設定しているため，すべり後の荷重低下がないまま，相対変位が大きくなるからである。さらに相対変位が大きくなると，支圧状態に移行し，摩擦による荷重伝達の影響が小さくなり，両者の増加の傾向は一致している。

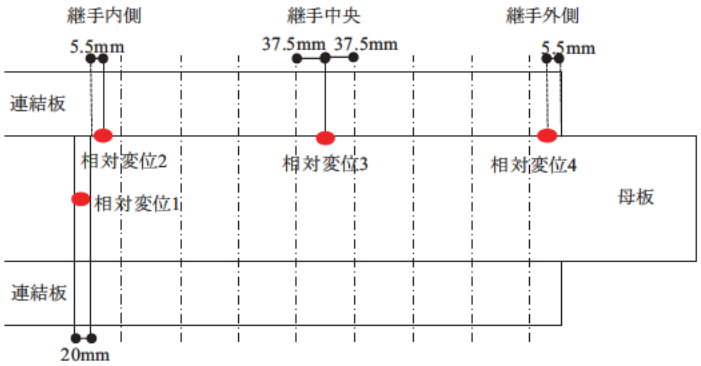
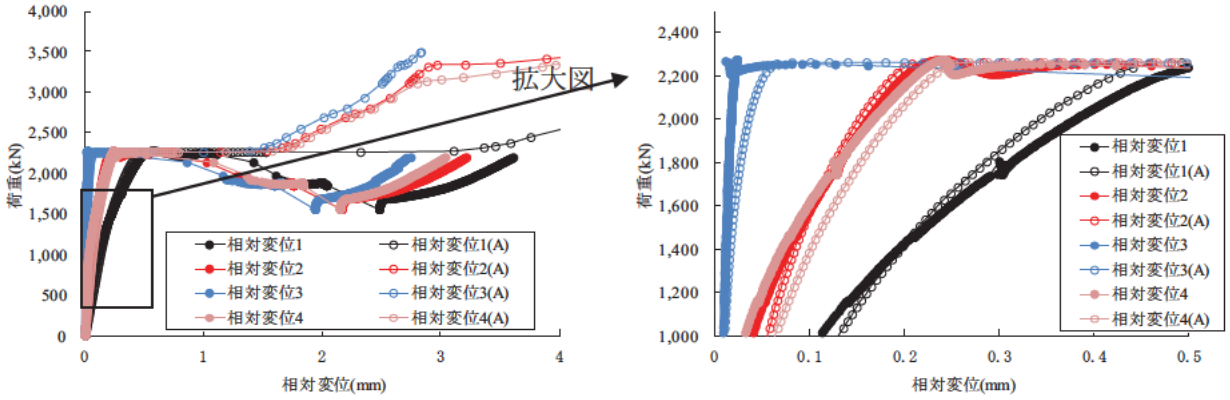
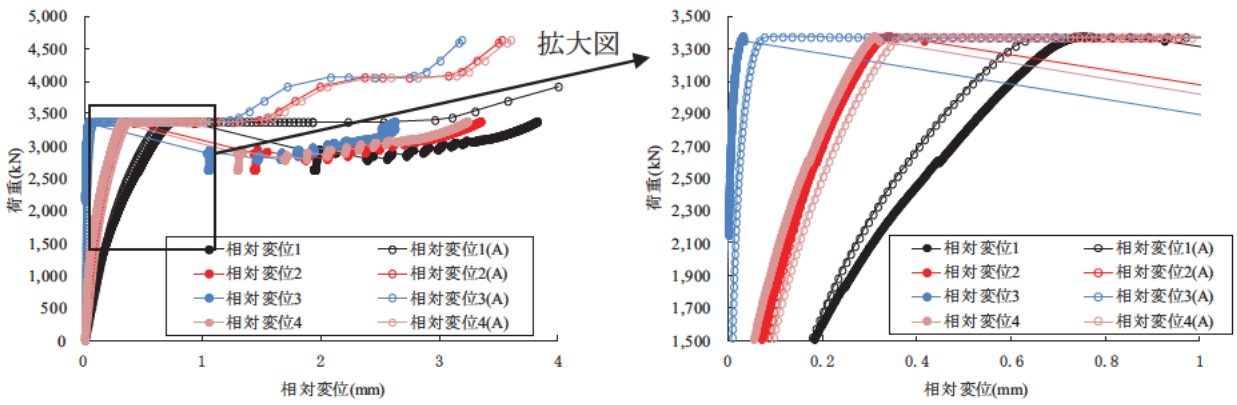


図-4.2.24　相対変位の測定位置



（a）全体図　　（b）すべり荷重近傍の拡大図

図-4.2.25　M22-8-0.49/M22-8-0.49A の荷重-相対変位関係の比較



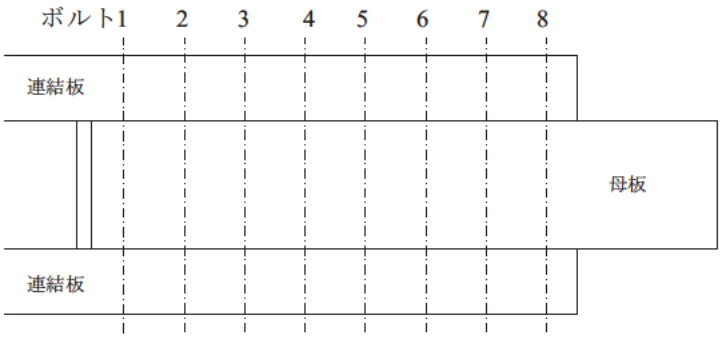
（a）全体図　　（b）すべり荷重近傍の拡大図

図-4.2.26　M22-12-0.47/M22-12-0.47A の荷重-相対変位関係の比較

図-4.2.27，図-4.2.28 に M22-8-0.49/M22-8-0.49A と M22-12-0.47/M22-12-0.47A の荷重-ボルト軸力関係をそれぞれ示す。図中にはボルト番号とその位置も示している。

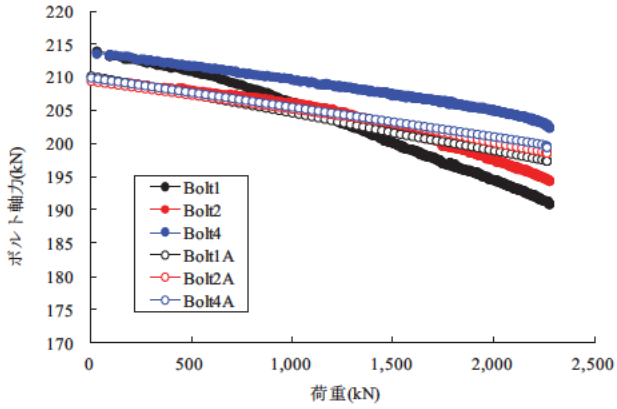
すべり耐力試験では，初期ボルト軸力にばらつきが認められる。これは，主として設計ボルト軸力は 205 kN であるものの，導入軸力のばらつきとボルトリラクゼーションの影響などが原因であると考えられる。図-4.2.27 より，試験体のボルト 1 とボルト 2 の低下傾向については，解析結果のそれが一定の傾きで低下することに対し，試験結果のそれは荷重が約 750 kN のところで低下の傾向が変化し，低下度が大きくなっている。このように FEM 解析において一定の低下傾向を示すもののすべり耐力試験においてボルト軸力の低下傾向がある荷重レベルから変化するのは，すべてのボルトで見られるわけでなく，継手の端部であるボルト 1，2 など，限定された部位で生じている。これは，すべり耐力試験において，主すべりが発生する前の段階で，母板と連結板の接触面の一部で局所的なすべりが発生して進行しているものと推測される。また，中央のボルト（ボルト 4）については，端部に配置されたボルトと異なり，解析値と試験値がよく一致している。

図-4.2.28 より，ボルト列数が 12 列の場合においても，ボルト列数が 8 列の場合と同様に，ボルト 1，2，3，とボルト 11，12 の低下傾向が試験値と解析値とで異なり，すべり耐力試験の結果では，引張荷重がおよそ 1,000 kN から 2,000 kN の間で軸力低下の傾向が変化している。一方，中央のボルトについては，解析値と試験値とは一致している。

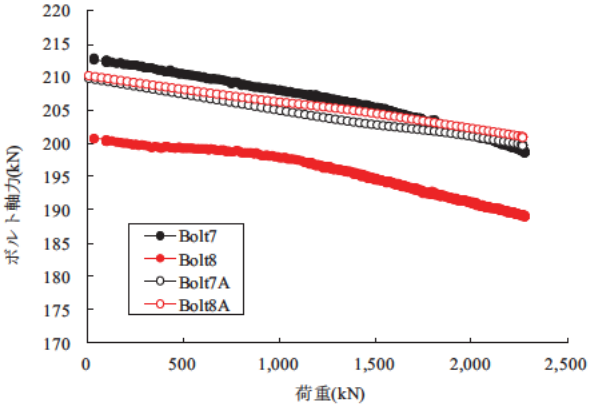


（a）ボルト番号とその位置

図-4.2.27　M22-8-0.49/M22-8-0.49A の荷重-ボルト軸力関係の比較

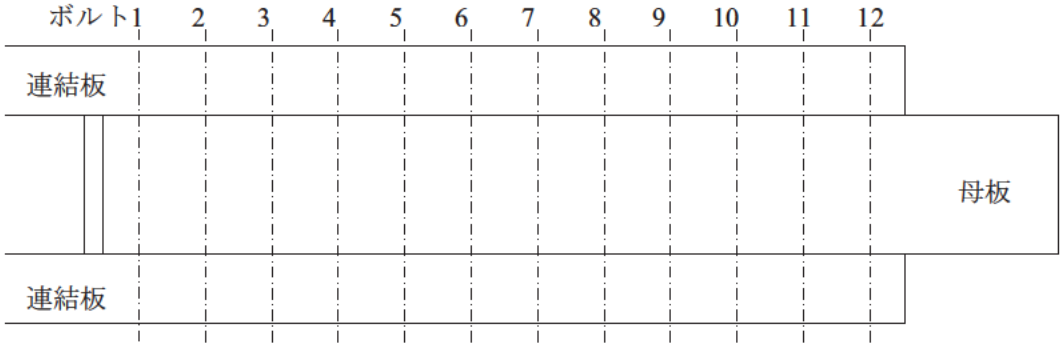


(b) ボルト 1，2，4

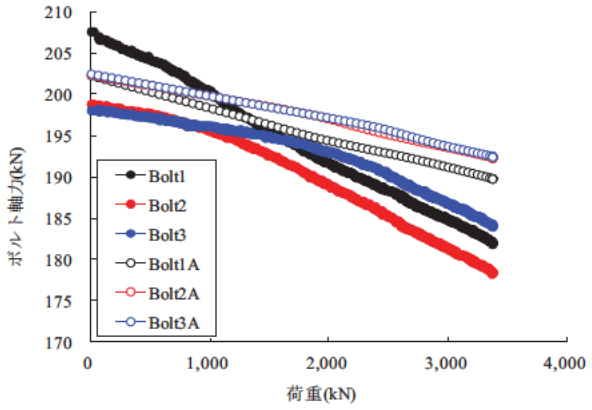


(c) ボルト 7，8

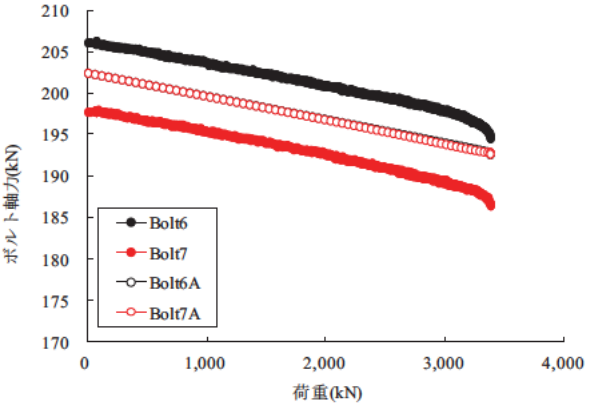
図-4.2.27　M22-8-0.49/M22-8-0.49A の荷重-ボルト軸力関係の比較（続き）



(a) ボルト番号とその位置

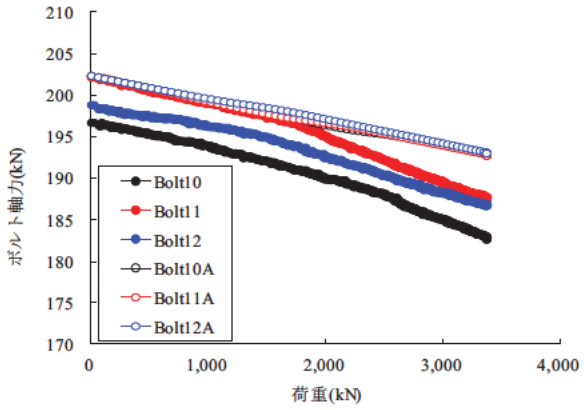


(b) ボルト 1，2，3



(c) ボルト 6，7

図-4.2.28　M22-12-0.47/M22-12-0.47A の荷重-ボルト軸力関係の比較



(d) ボルト 10，11，12

図-4.2.28　M22-12-0.47/M22-12-0.47A の荷重-ボルト軸力関係の比較（続き）

図-4.2.29 にボルト列数が 8 列の場合のケース M22-8-0.49/M22-8-0.49A の母板と連結板のひずみの測定位置を，図-4.2.30 に荷重-ひずみ関係をそれぞれ示す。すべり耐力試験におけるひずみはゲージ長 5 mm のひずみゲージの出力値であり，解析におけるひずみは試験の測定位置に最も近い要素長 5.5 mm の要素中心値としている。

図-4.2.30 より，すべり耐力試験結果と解析結果における荷重-ひずみ関係については，その傾向はおおむね一致しているが，引張荷重がおよそ 1,500 kN となるまでの連結板に発生するひずみが，すべり耐力試験の結果と解析結果で異なり，試験結果の方が解析結果よりも小さくなっている。

図-4.2.31 にボルト列数が 12 列の場合の M22-12-0.47/M22-12-0.47A の母板と連結板のひずみの測定位置を，図-4.2.32 に荷重-ひずみ関係をそれぞれ示す。

図より，すべり耐力試験の結果と解析の結果の比較については，ボルト列数が 8 列の場合と同様の傾向を示しており，差異はない。 M22-8-0.49/M22-8-0.49A と M22-12-0.47/M22-12-0.47A を比較すると，M22-12-0.47/M22-12-0.47A の方が試験値と解析値がよく一致している。

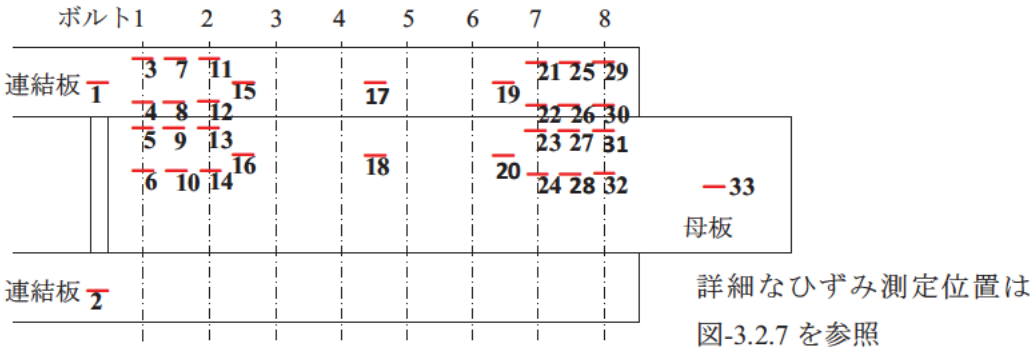
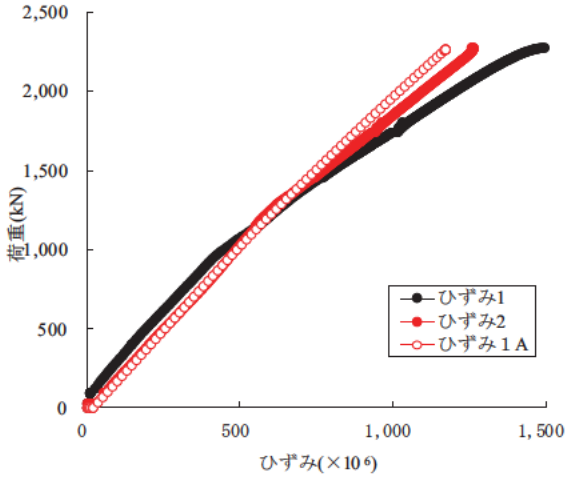
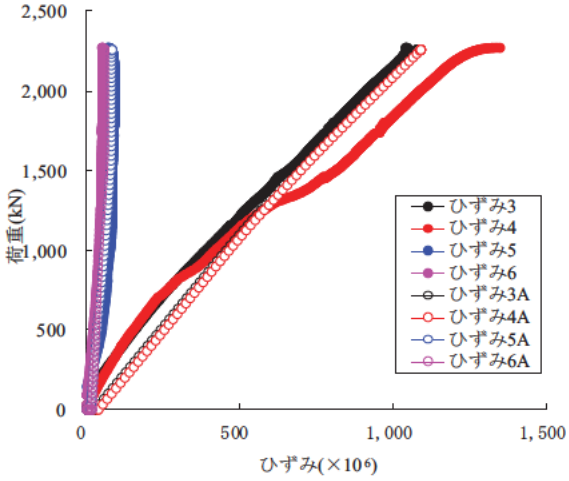


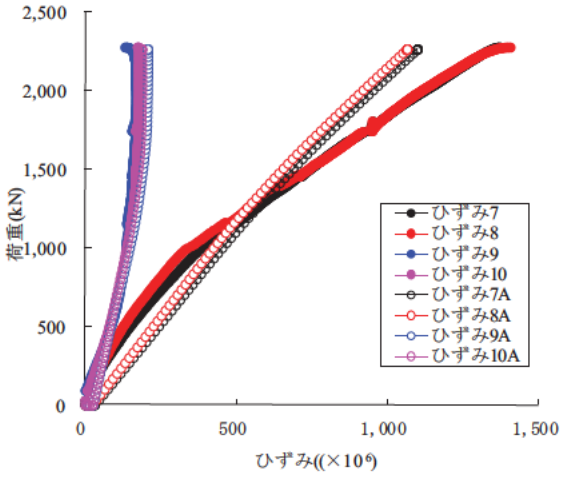
図-4.2.29　M22-8-0.49/M22-8-0.49A のひずみ測定位置



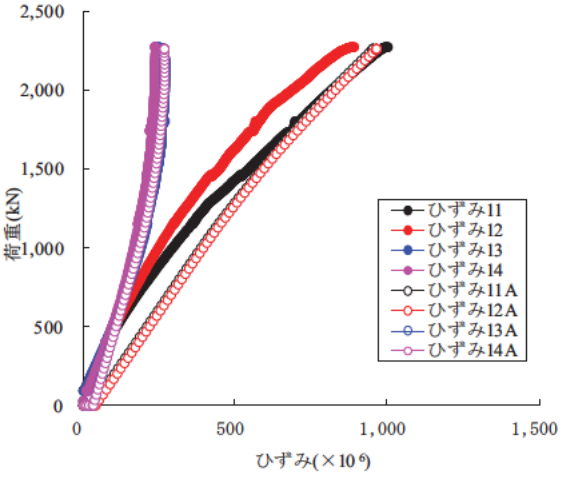
(a) ひずみ 1, 2



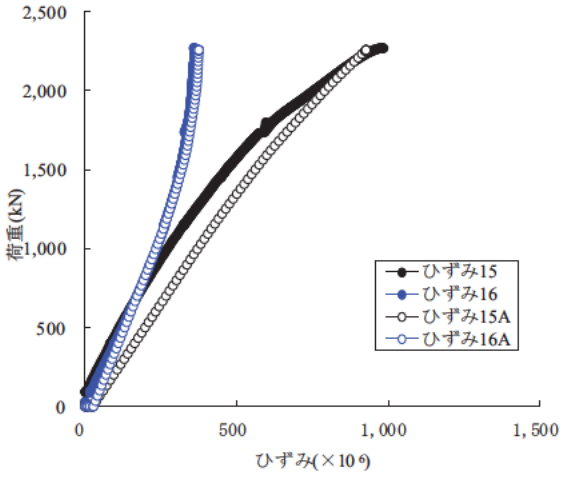
(b) ひずみ 3~6



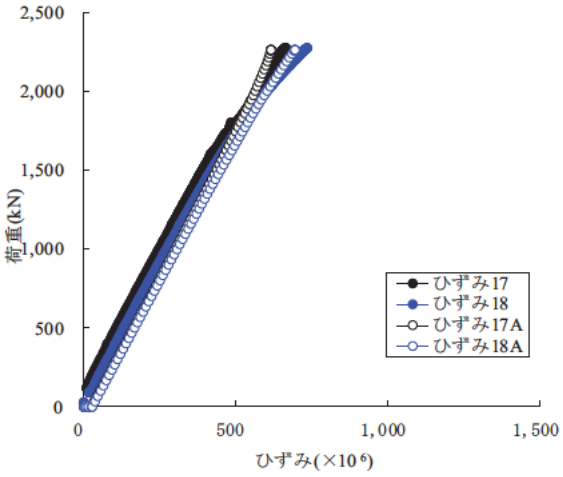
(c) ひずみ 7~10



(d) ひずみ 11~14

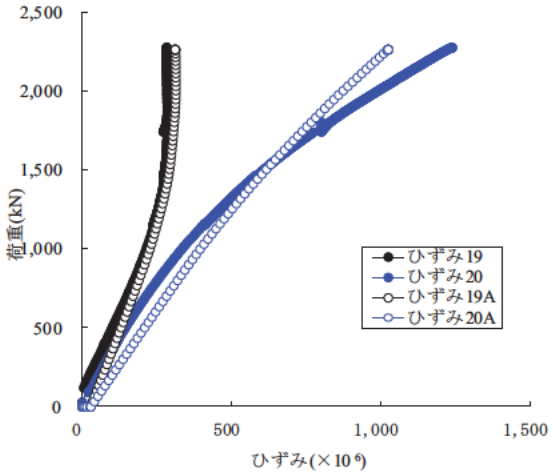


(e) ひずみ 15, 16

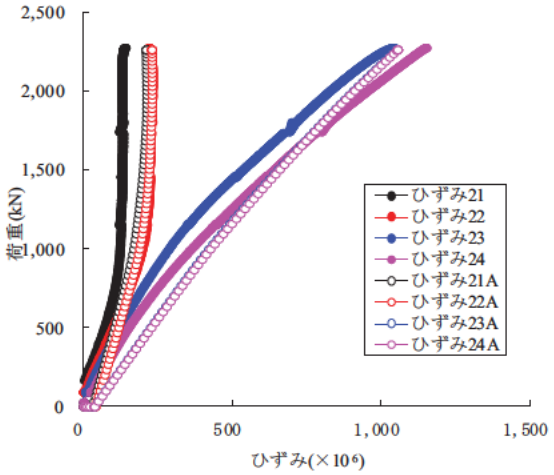


(f) ひずみ 17, 18

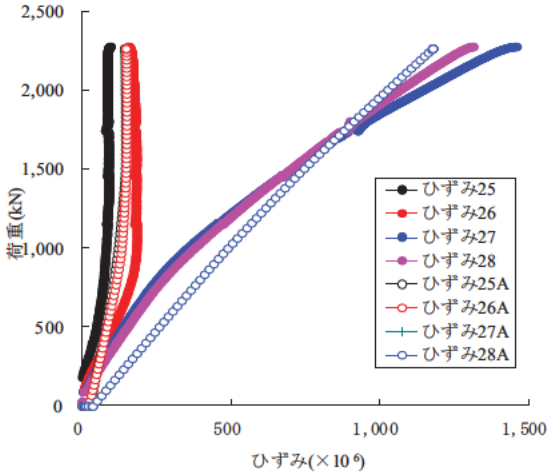
図-4.2.30　M22-8-0.49/M22-8-0.49A の荷重-ひずみ関係の比較



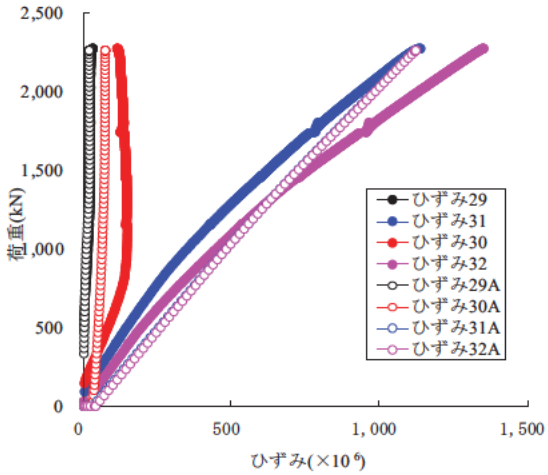
(g) ひずみ 19, 20



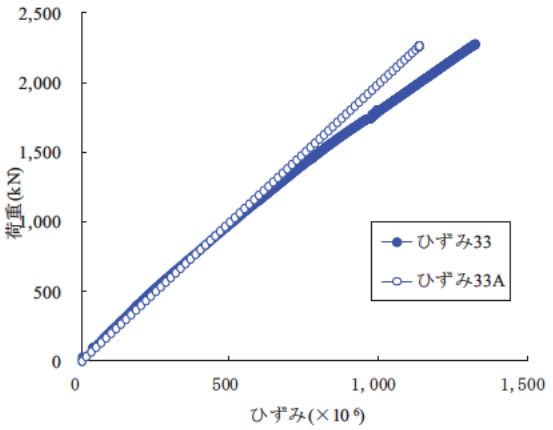
(h) ひずみ 21~24



(i) ひずみ 25~28



(j) ひずみ 29~32



(k) ひずみ 33

図-4.2.30　M22-8-0.49/M22-8-0.49A の荷重-ひずみ関係の比較（続き）

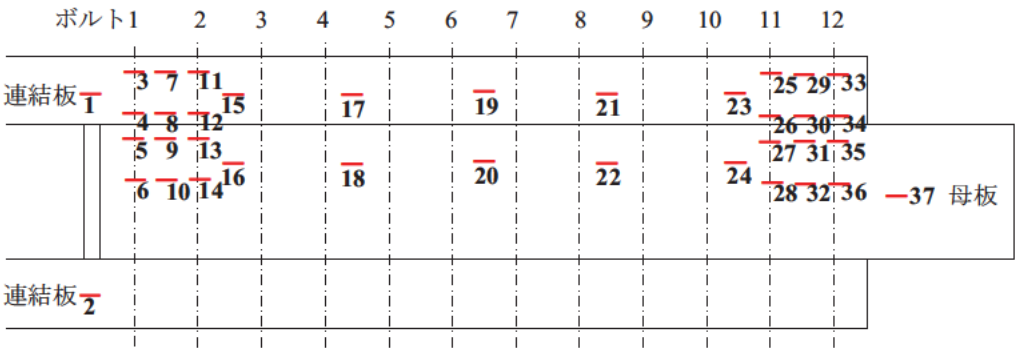
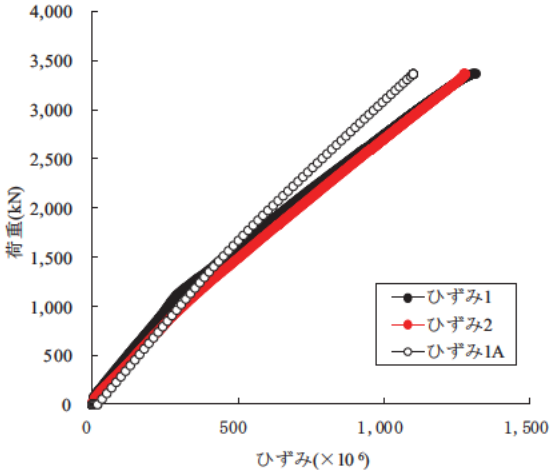
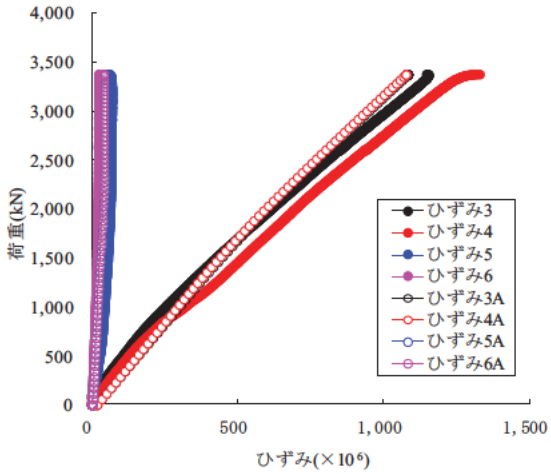


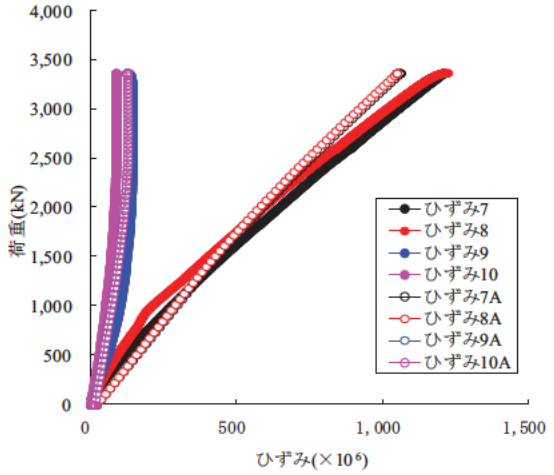
図-4.2.31　M22-12-0.47/M22-12-0.47A のひずみ測定位置



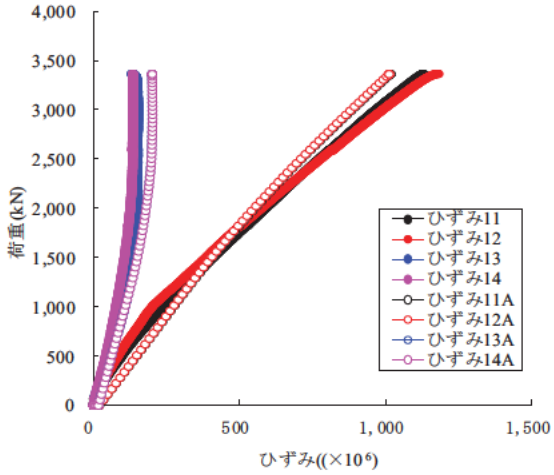
(a) ひずみ 1, 2



(b) ひずみ 3~6

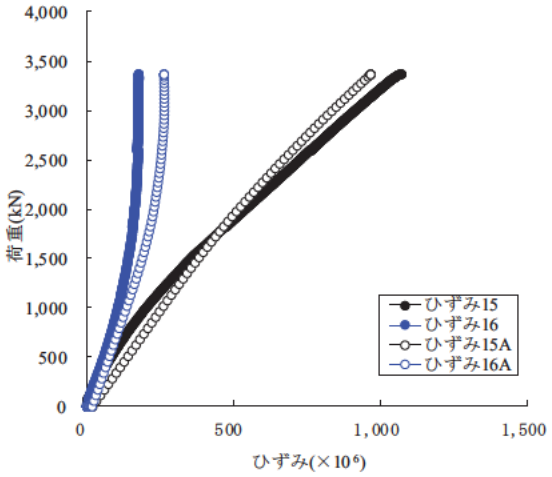


(c) ひずみ 7~10

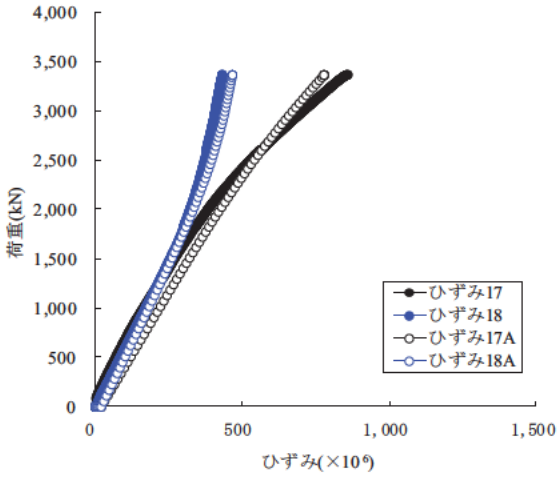


(d) ひずみ 11~14

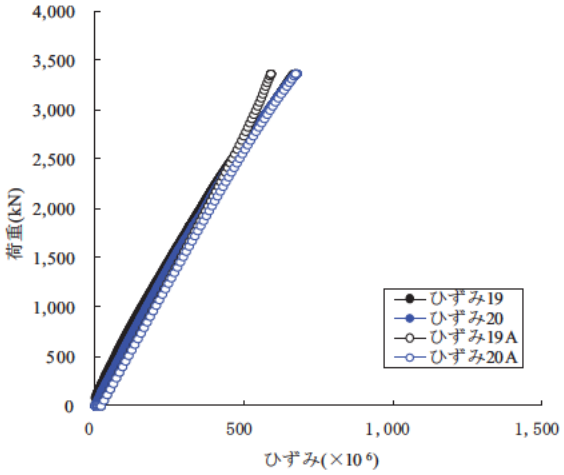
図-4.2.32　M22-12-0.47/M22-12-0.47A の荷重-ひずみ関係の比較



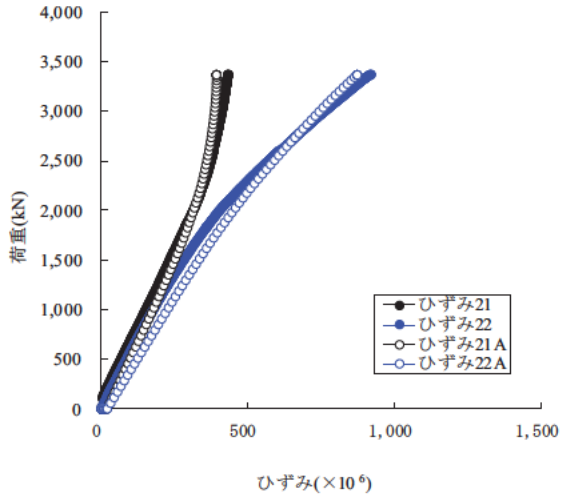
(e) ひずみ 15, 16



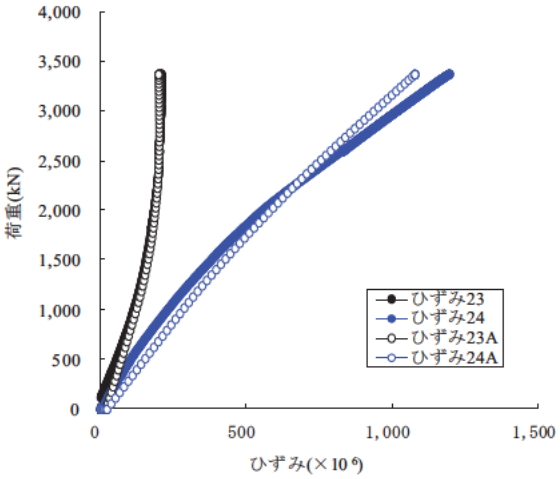
(f) ひずみ 17, 18



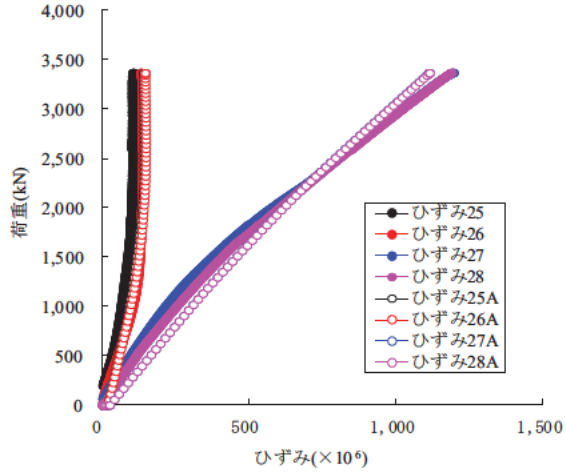
(g) ひずみ 19, 20



(h) ひずみ 21, 22

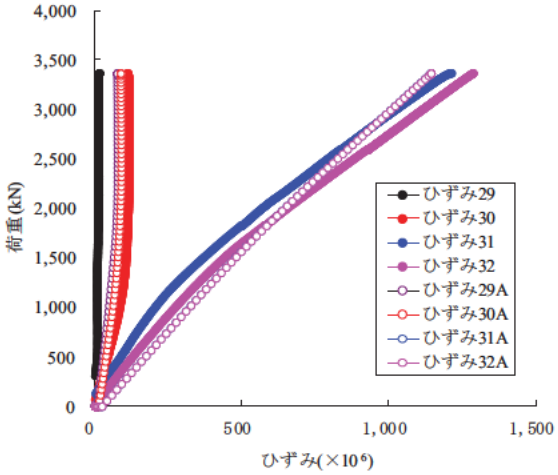


(i) ひずみ 23, 24

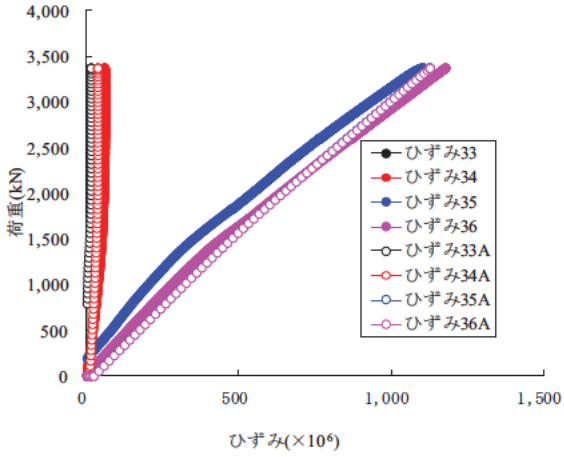


(j) ひずみ 25~28

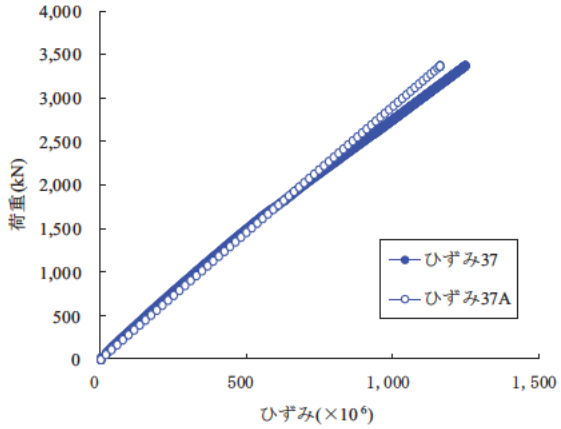
図-4.2.32　M22-12-0.47/M22-12-0.47A の荷重-ひずみ関係の比較（続き）



(k) ひずみ 29~32



(l) ひずみ 33~36



(m) ひずみ 37

図-4.2.32　M22-12-0.47/M22-12-0.47A の荷重-ひずみ関係の比較　（続き）

ここでは，すべり耐力試験の試験体 No. 6-1 のすべり荷重と解析における最大荷重が一致するように摩擦係数を調整し，調整した摩擦係数を用いてボルト列数が 8 列および 12 列の場合に対して解析を実施した。そして，得られた解析結果とすべり耐力試験の結果とを比較し，再現解析の妥当性を検証した。

その結果，荷重-相対変位関係，荷重-ボルト軸力関係，荷重-ひずみ関係については，ボルト列数が 8 列と 12 列のそれぞれに対して，両者がおおむね一致していることを確認した。継手の内側と外側に配置されたボルトの軸力の低下性状については，ある荷重レベルまではすべり耐力試験の結果と解析結果とは一致したものの，ある荷重レベルからは異なり，すべり耐力試験の結果を再現することはできなかった。一方，継手中央に配置されたボルトの軸力低下については，両者はおおむね一致した。

本解析では，ボルト導入軸力のばらつき，母板と連結板の初期不整や加工時に生じた局所的な凹凸の考慮，ボルトのねじ部の形状，ボルト孔に対するボルトの位置のずれ等を解析モデルに反映しておらず，また，すべり耐力試験では低い荷重段階における母板と連結板の局所的なずれが生じたものの解析ではそれを再現できなかったため，解析のボルト軸力の低下性状は，継手中央部のボルトにおいてすべり耐力試験の低下性状を再現したものの，継手の内側と継手の外側のボルトにおいてある荷重段階までは一

致したが，その後の低下率は一致しなかった。また，ボルト列数が増えるとこれらの影響が相対的に小さくなり，結果として，本解析結果とすべり耐力試験の結果とはおおむね一致する傾向にあった。

また，ここでは，動摩擦係数を静止摩擦係数と等しいと仮定し，すべり発生を最大荷重到達時としてすべり荷重を定義した。そのため，ボルト列数が 8 列の試験体 No. 6-1 とボルト列数が 12 列の試験体 No. 7-3 の再現解析において，それぞれの試験結果とほぼ同じすべり荷重を得た。しかし，3 体ずつ行った試験の結果の平均値では，試験結果と再現解析の結果に差異がみられた。このように，試験結果そのものについても各種の要因の影響を受けばらついており，解析結果との比較をどのようにすべきかについて，すべり発生の適切な定義，評価の方法とも関連し，重要である。したがって，4.3.1 項では，試験結果を適切に再現できるすべり発生の定義について議論を行うこととする。

4.2.3　降伏先行型を対象としたすべり耐力試験結果との比較

降伏先行型の解析モデルの妥当性を検証するため，第 3 章で示したすべり耐力試験における試験体 No. 15-2（M22-12-0.92）の再現解析を行った。なお，ここで比較するすべり耐力試験と解析のすべり/降伏耐力比 β は 1 より小さいが，降伏先行型の挙動を示すケースである [3)]。解析モデルの形状および構造諸元，材質は試験体 No. 15-2 と同じとし，材料特性も材料強度試験から得られた応力-ひずみ関係をモデル化した値を与えている。解析で与える目標導入軸力は，試験体 No. 15-2 の引張載荷直前のボルト軸力の実測値（平均値）とした。摩擦係数は，4.2.2 項のすべり先行型で設定した値を用いた。なお，摩擦係数は解析における設定値であり，すべり係数は解析結果から得られるすべり発生時の引張荷重，すなわちすべり荷重を導入軸力の総和で除した値である。そのため，すべり係数は，すべり発生時の板の変形によるボルトの軸力の低下などの影響を受けることから，摩擦係数より低い値となる場合がある。

表-4.2.10 に解析ケースを示す。解析ケース名は，M の後の数値がボルトの呼び径を，次の数値がボルト列数を，最後の数値がすべり/降伏耐力比 β を表している。なお，最後の英字 A は解析を意味している。解析に用いた材料特性は，4.2.2 項で示した表-4.2.7 と同じである。表-4.2.11 に解析結果と試験結果（試験体 No. 15-2）との比較を示す。なお，試験結果の括弧内は，3 体ずつ行った試験の平均値を示す。解析のすべり荷重は最大荷重としている。表-4.2.11 より，すべり荷重の試験値と解析値は，おおむね一致している。

表-4.2.10　解析ケース

解析ケース		M22 12 0.92A
ボルトM22（F10T） 孔径24.5mm	ボルト本数	12
	導入軸力（kN/本）＊	199
母材　SM490Y	板厚（mm）	75
連結板　SM490Y	板厚（mm）	38
試験体幅（mm）		110
摩擦係数		0.73
備考		母材降伏

＊目標導入軸力：200 kN

表-4.2.11　解析と試験結果の比較

	M22-12-0.92		M22-12-0.92A
	No. 15-2	No. 15 3体の平均	
すべり荷重（kN）	2,753	2,882	2,864
すべり係数	0.57	0.6	0.60

図-4.2.33 にケース M22-12-0.92/M22-12-0.92A の相対変位の測定位置を示す。図中の一点鎖線はボルト位置を示す。相対変位 1 は母板間，相対変位 2 は継手内側の母板と連結板の間，相対変位 3 は継手中央の母板と連結板の間，相対変位 4 は継手外側の母板と連結板の間であり，相対変位の値は，測定位置にもっとも近い節点の変位差である。図-4.2.34 に M22-12-0.92/M22-12-0.92A の荷重-相対変位関係の比較を示す。

図-4.2.33，および図-4.2.34 より，荷重-相対変位関係における初期剛性はよく一致している。ただし，相対変位 4 は，すべり耐力試験の相対変位が解析のそれより大きくなっている。相対変位 4 の位置は母板と連結板の局所的なすべりの影響を最も受けやすいと推測されること，さらにすべり耐力試験の相対変位には標点間の弾性変形を含まれていることなどが原因と考えられる。

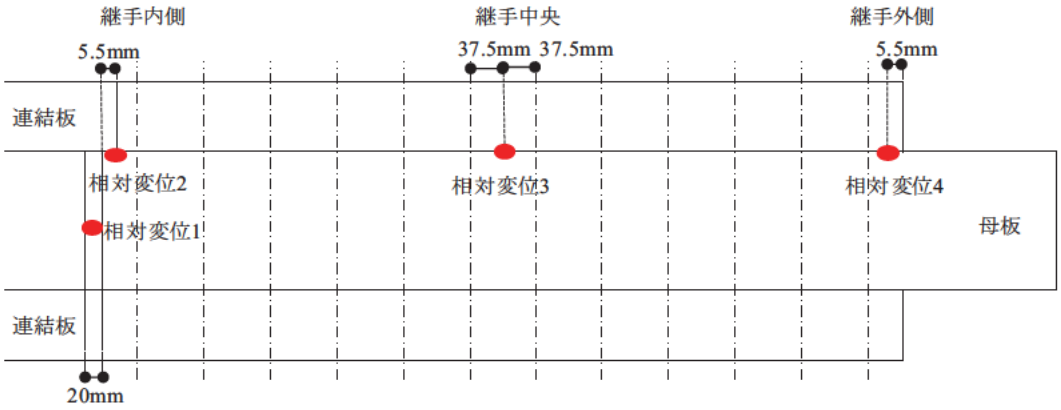
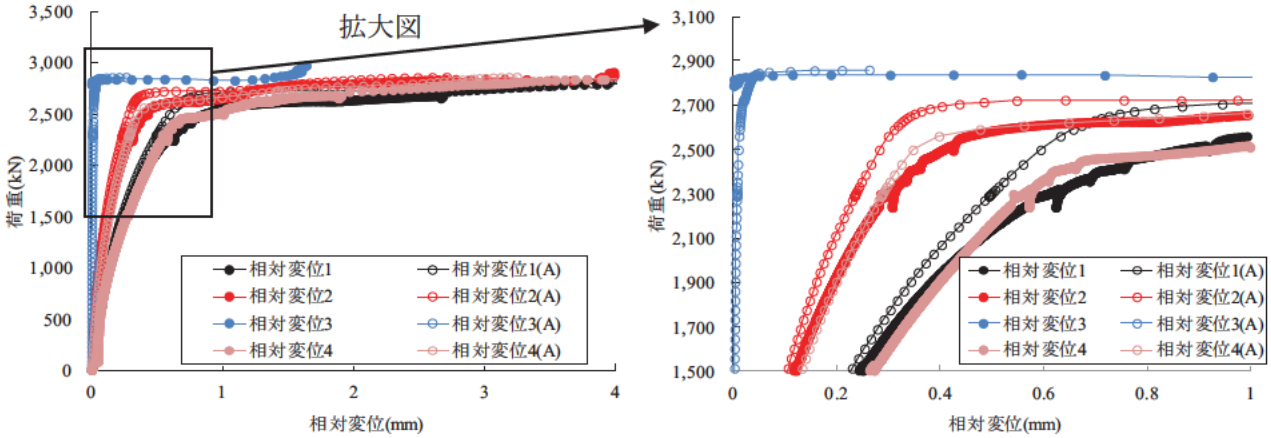


図-4.2.33　M22-12-0.92/M22-12-0.92A の相対変位の測定位置

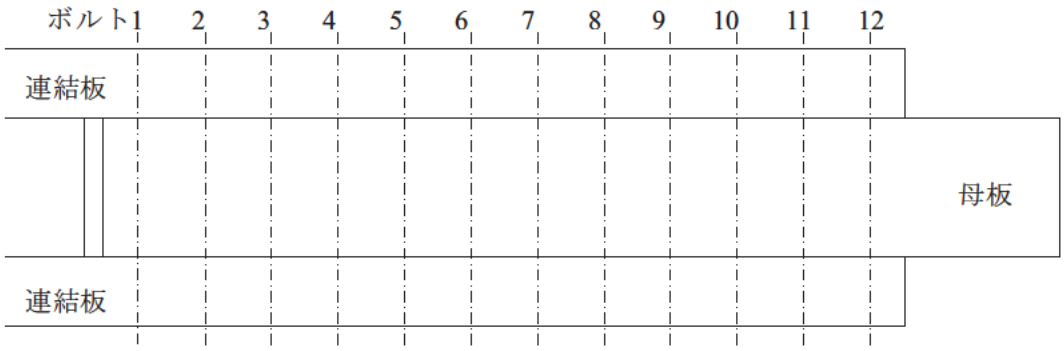


（a）全体図　　（b）すべり荷重近傍の拡大図

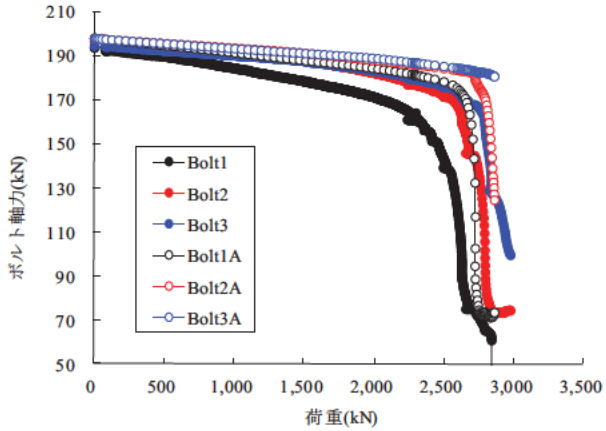
図-4.2.34　M22-12-0.92/M22-12-0.92A における荷重-相対変位関係の比較

図-4.2.35（a）に M22-12-0.92/M22-12-0.92A のボルト番号とその位置を示す。図-4.2.35（b），（c），（d）に M22-12-0.92/M22-12-0.92A の荷重-ボルト軸力関係の比較を示す。

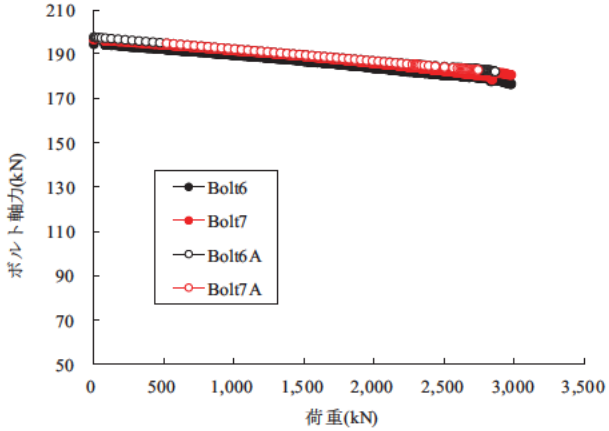
すべり耐力試験の結果では，最大荷重の近傍で，ボルト 1，2，3，11，12 の軸力低下が顕著であり，低下の性状は内側ボルトの方が外側ボルトより顕著である。一方，解析結果では，内側ボルトの方が外側ボルトに比べて低下の性状が大きいというボルト軸力の低下の傾向は，すべり耐力試験の結果と同じであった。しかしながら，解析のボルト軸力の低下性状は，継手中央部のボルトにおいてすべり耐力試験の低下性状を再現したものの，継手の内側と継手の外側のボルトにおいてある荷重段階までは一致したが，その後の低下率は一致しなかった。これは，ボルト導入軸力のばらつき，母板と連結板の初期不整や加工時に生じた局所的な凹凸の考慮，ボルトのねじ部の形状，ボルト孔に対するボルトの位置のずれ等を解析モデルに反映しておらず，また，すべり耐力試験では低い荷重段階における母板と連結板の局所的なずれが生じたものの解析ではそれを再現できなかったためと考えられる。



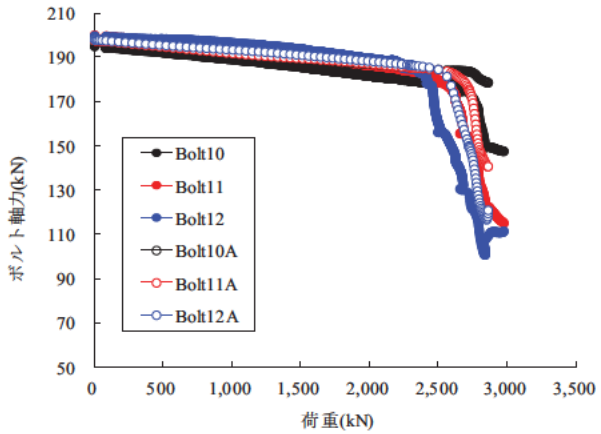
(a) ボルト番号とその位置



(b) ボルト 1，2，3 の軸力変化



(c) ボルト 6，7 の軸力変化



(d) ボルト 10，11，12 の軸力変化

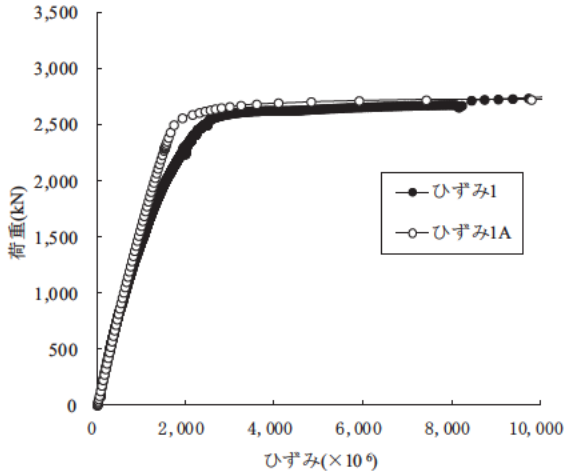
図-4.2.35 M22-12-0.92/M22-12-0.92A の荷重-ボルト軸力関係の比較

図-4.2.36 に母板と連結板のひずみ測定位置を示す。図-4.2.37 に M22-12-0.92/M22-12-0.92A の荷重-ひずみ関係の比較を示す。

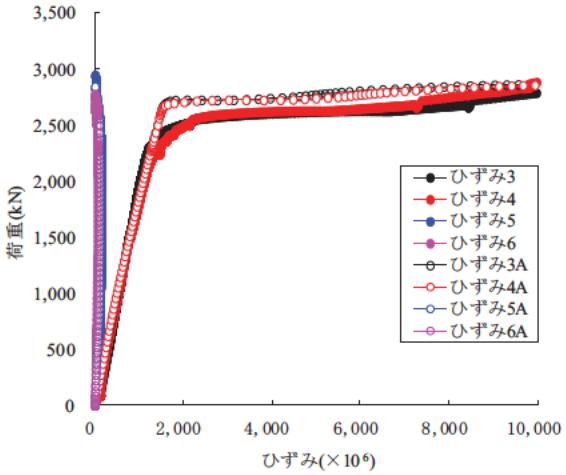
図-4.2.37 より，4.2.2 項で示したすべり先行型の場合に比べてすべり耐力試験と解析の結果はよく一致しているが，連結板のボルト 1，2 の近傍と母板のボルト 11，12 の近傍において，引張荷重がおよそ 1,500 kN から 2,000 kN のレベルにおいてすべり耐力試験から得られたひずみが解析より得られたそれより大きくなっている。また，図-4.2.37（e），（k）のひずみ 15，31，32 については，解析より得られたすべり

発生前のひずみがすべり耐力試験結果のそれより小さくなっている。このように，ある荷重レベル以降にすべり耐力試験の結果と解析結果の両者にわずかに差異が生じるのは，解析モデルの設定において，初期たわみなどの初期不整を再現できていないことが原因と考えられる。

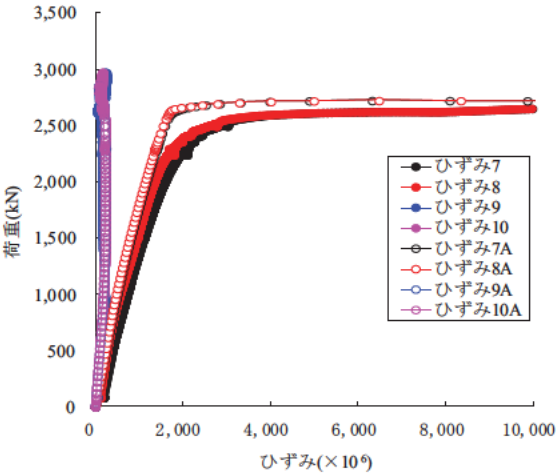
図-4.2.36　M22-12-0.92/M22-12-0.92A のひずみ測定位置



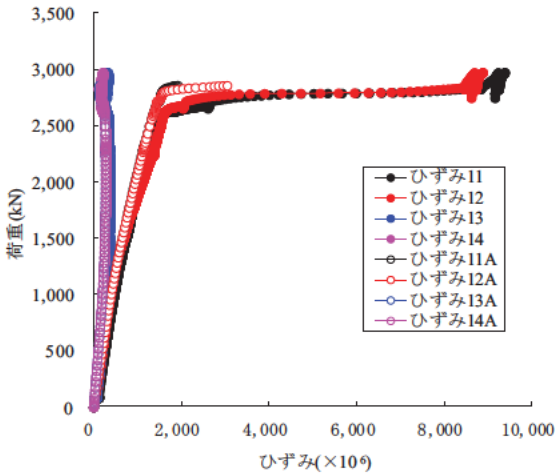
(a) ひずみ 1



(b) ひずみ 3~6

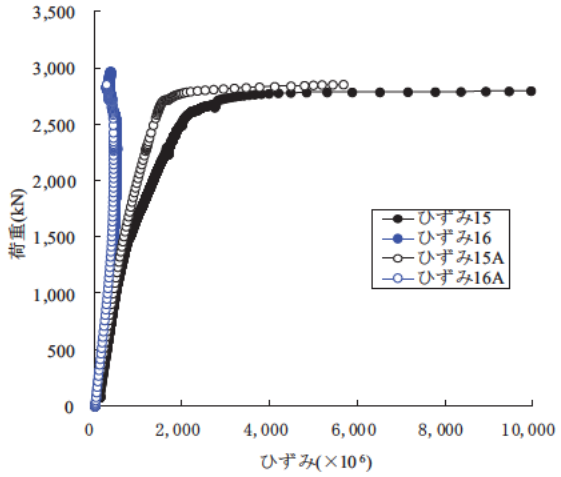


(c) ひずみ 7~10

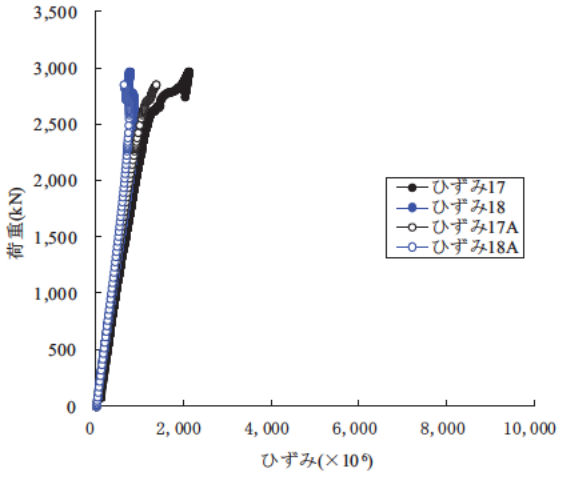


(d) ひずみ 11~14

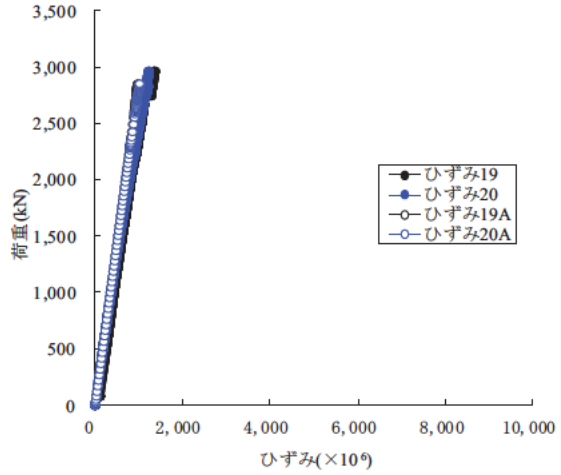
図-4.2.37　M22-12-0.92/M22-12-0.92A の荷重-ひずみ関係の比較



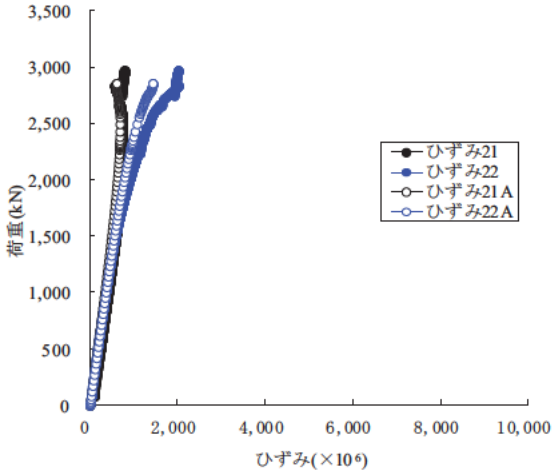
(e) ひずみ 15，16



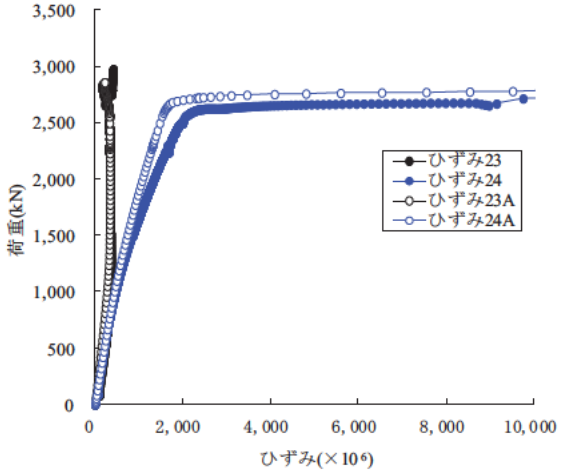
(f) ひずみ 17，18



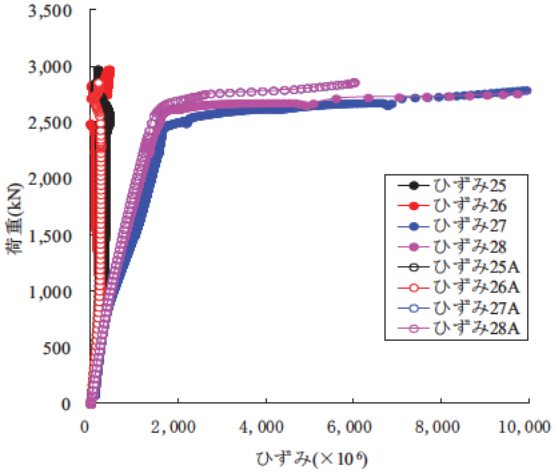
(g) ひずみ 19，20



(h) ひずみ 21，22

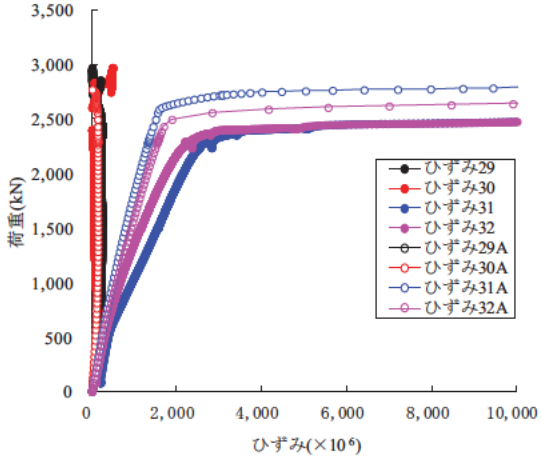


(i) ひずみ 23，24

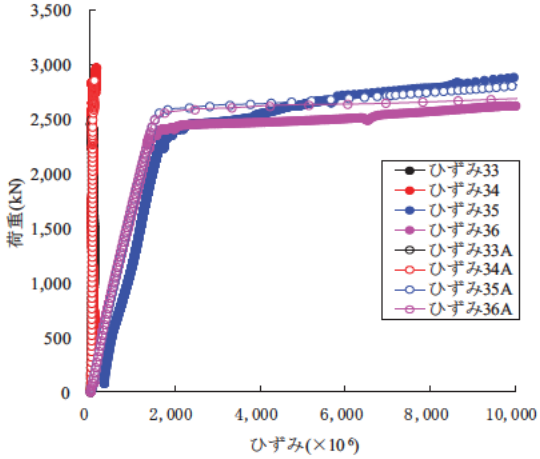


(j) ひずみ 25~28

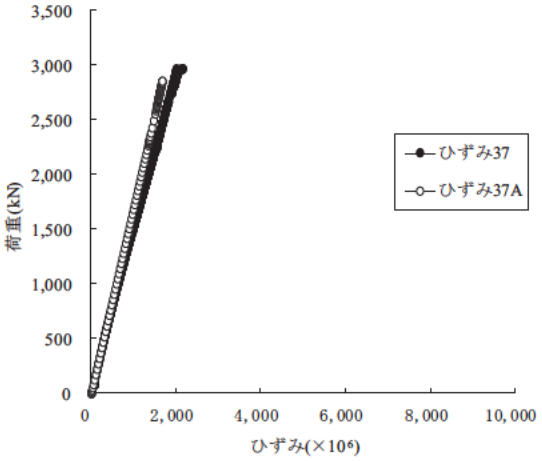
図-4.2.37　M22-12-0.92/M22-12-0.92A の荷重-ひずみ関係の比較　（続き）



(k) ひずみ 29~32



(l) ひずみ 33~36



(m) ひずみ 37

図-4.2.37　M22-12-0.92/M22-12-0.92A の荷重-ひずみ関係の比較（続き）

4.2.2 項で決定した摩擦係数を用いて，ボルト列数が 12 列の降伏先行型の場合に対して再現解析を実施した。そして，得られた解析結果とすべり耐力試験との結果を比較し，解析の妥当性を検証した。その結果，荷重-相対変位関係，荷重-ボルト軸力関係，荷重-ひずみ関係については，両者がおおむね一致していることを確認した。4.2.2 項と同様，継手の内側と外側に配置されたボルトの軸力については，最大荷重近傍の荷重レベルにおけるボルト軸力の低下性状が両者で異なり，解析においてそれを再現することはできなかった。一方，継手中央に配置されたボルトの軸力低下については，両者はおおむね一致した。

以上のことから，本解析で用いた降伏先行型の解析モデルはすべり挙動を再現することが可能であると考えられる。

4.2.4　感圧紙による接触圧分布との比較

設計ボルト軸力導入時の接触圧について，感圧紙による試験結果と解析結果との比較を行う。

すべり耐力試験では，母板厚が 75 mm，連結板厚が 38 mm でボルト列数が 3 列の試験体を用いて，接触面にブラスト処理，研磨処理，無機ジンクリッチペイント塗装を段階的に行い，それぞれの段階で感圧紙を挿入し設計ボルト軸力導入時の接触圧を測定した。さらに，母板厚が 75 mm，連結板厚が 38 mm でボルト列数が 8 列の試験体の接触面に感圧紙を挿入し，ブラスト処理した場合の接触圧を測定した。これらの試験で測定した接触圧分布と FEM 解析によって得られた接触圧分布を比較する。

(a) 75mm-3 列

図-4.2.38 に解析ケース 75mm-3 列の軸力導入時の接触圧を示す。

図より，ボルト孔周辺の接触圧は大きく，ボルト孔から離れるにしたがって，接触圧が小さくなっている。ボルト孔周辺の最も高い接触圧は 50 N/mm^2 である。

試験体の接触面をブラスト処理し，感圧紙を用いて設計ボルト軸力（205 kN）を導入した場合の接触圧を図-4.2.39 に，その後，研磨処理した場合の接触圧を図-4.2.40 に，最後に無機ジンクリッチペイント塗装した場合の接触圧を図-4.2.41 にそれぞれ示す。なお，コンター図の白色は，計測に用いた感圧紙の測定範囲の下限値（10 N/mm^2）を下回っていることを示している。

図-4.2.39 より，ブラスト処理の場合は，連結板のボルト孔近傍のボルト側，ナット側両方とも，接触圧がほぼ 20 N/mm^2 以下と低く，連結板の接触面の外周部分で接触圧が高くなっている。この原因は初期たわみの影響が大きいと考えられる。図-4.2.40 より，研磨処理の場合は，ブラスト処理と比較すると接触圧の分布は均一化され，ボルト孔近傍の接触圧が高くなるものの，接触面外周部分の接触圧が高い傾向もみられる。これは，研磨処理によって，接触面が平滑になり初期たわみの影響が小さくなったためと考えられる。図-4.2.41 より，無機ジンクリッチペイントの場合は，図-4.2.41 に示すように試験体のボルト孔周辺の接触圧は 50 N/mm^2 に達している。塗膜により，研磨処理よりさらに表面が平滑になり，母板と連結板間の密着の度合いが高く，接触圧が均一化されたものと考えられる。解析から得られる接触圧は，無機ジンクリッチペイントを塗装した試験体の接触圧が一番近い傾向にある。

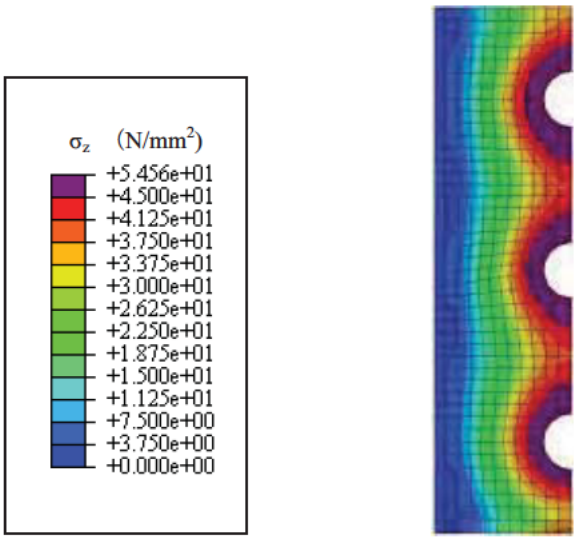
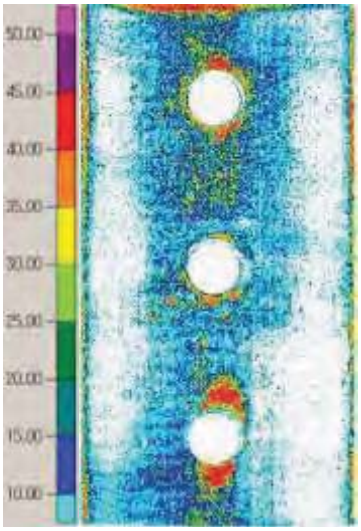
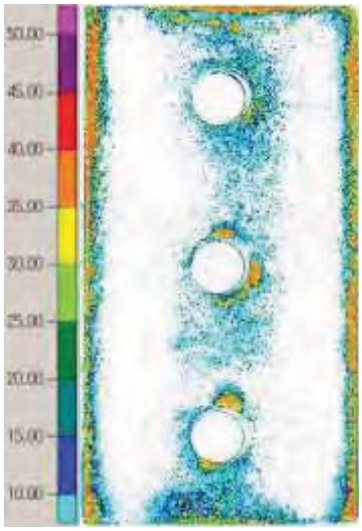


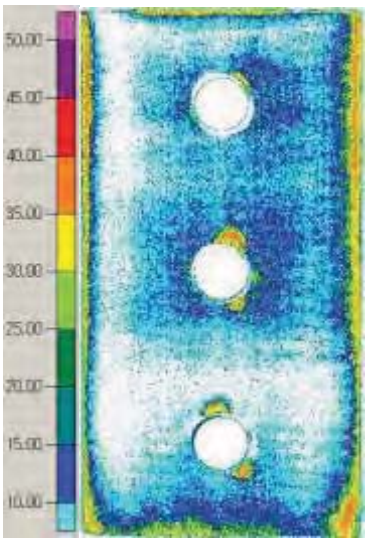
図-4.2.38　設計ボルト軸力導入時の接触圧の分布（解析）



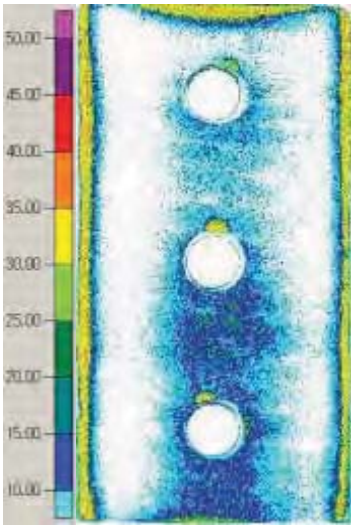
（a）ボルト側の連結板（試験体 No. 5-1）



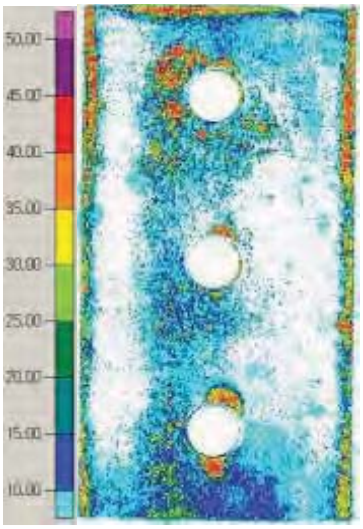
（b）ナット側の連結板（試験体 No. 5-1）



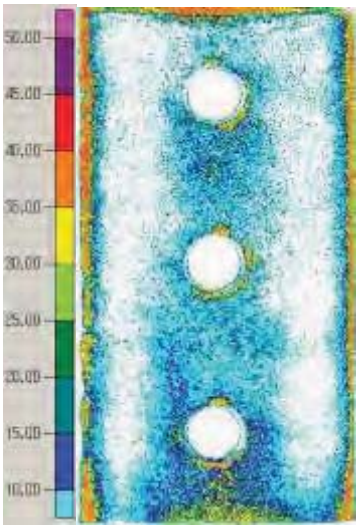
（c）ボルト側の連結板（試験体 No. 5-2）



（d）ナット側の連結板（試験体 No. 5-2）

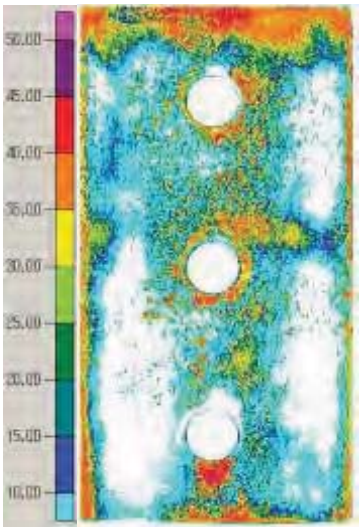


（e）ボルト側の連結板（試験体 No. 5-3）

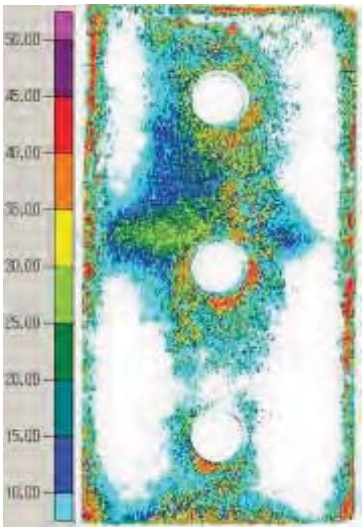


（f）ナット側の連結板（試験体 No. 5-3）

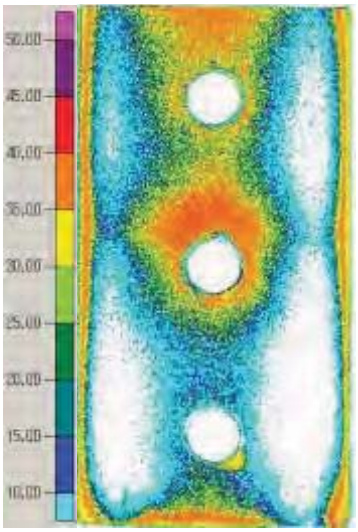
図-4.2.39　設計ボルト軸力導入時の接触圧の分布（ブラスト処理）（N/mm^2）



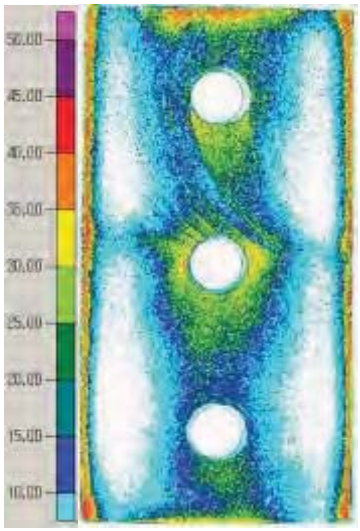
(a) ボルト側の連結板（試験体 No. 5’-1）



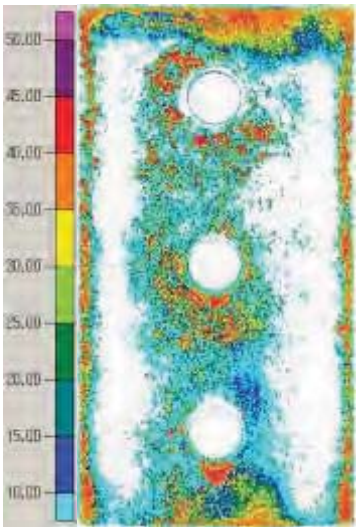
(b) ナット側の連結板（試験体 No. 5’-1）



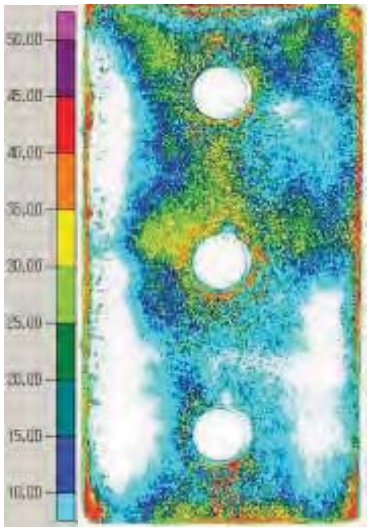
(c) ボルト側の連結板（試験体 No. 5’-2）



(d) ナット側の連結板（試験体 No. 5’-2）

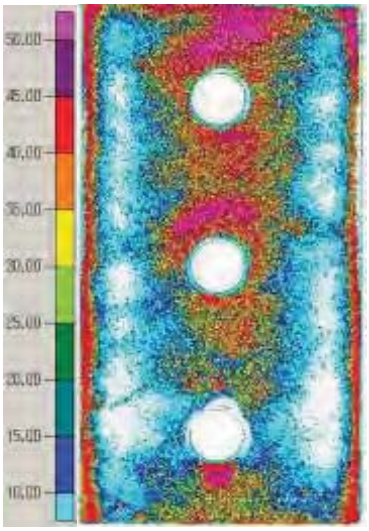


(e) ボルト側の連結板（試験体 No. 5’-3）

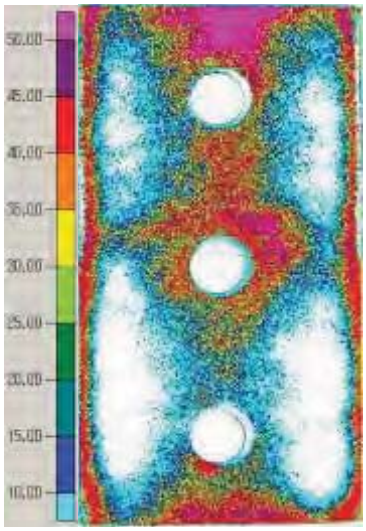


(f) ナット側の連結板（試験体 No. 5’-3）

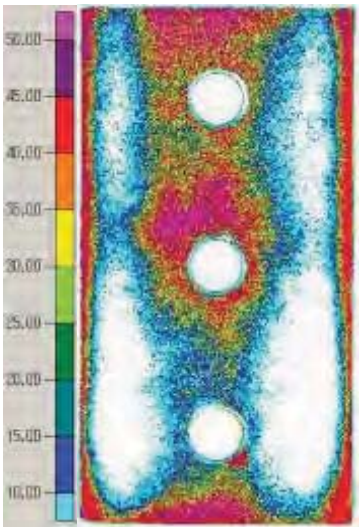
図-4.2.40　設計ボルト軸力導入時の接触圧の分布（研磨処理）（N/mm^2）



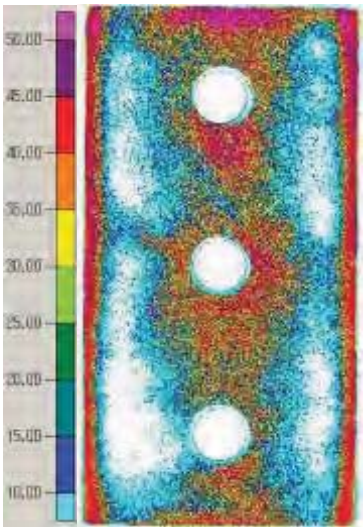
（a）ボルト側の連結板（試験体 No. 5’-1）



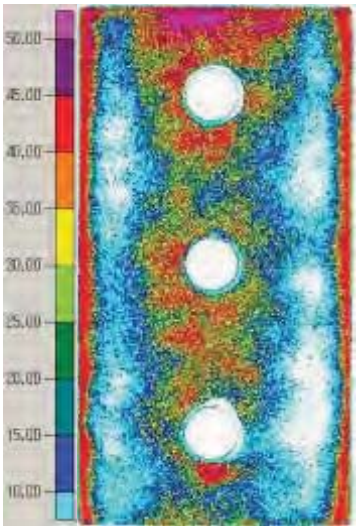
（b）ナット側の連結板（試験体 No. 5’-1）



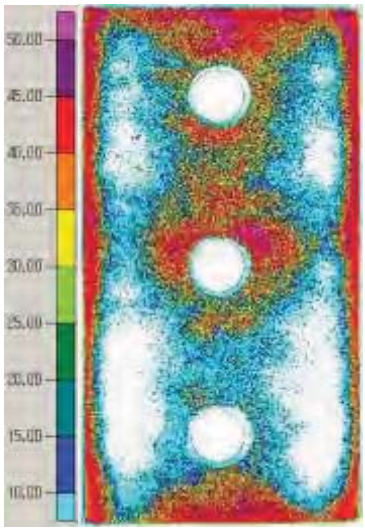
（c）ボルト側の連結板（試験体 No. 5’-2）



（d）ナット側の連結板（試験体 No. 5’-2）



（e）ボルト側の連結板（試験体 No. 5’-3）



（f）ナット側の連結板（試験体 No. 5’-3）

図-4.2.41　設計ボルト軸力導入時の接触圧の分布（無機ジンクリッチペイント塗装）（N/mm^2）

(b) 75mm-8 列

図-4.2.42 に解析ケース 75mm-8 列の軸力導入時の接触圧のコンター図を示す。

図より，ボルト孔周辺の接触圧が 50 N/mm^2 に達し，ボルト孔から離れると接触圧が小さくなっており，3 列の場合と同様の結果が得られている。

図-4.2.43 にブラスト後の試験体の設計ボルト軸力（205 kN）導入時の接触圧を示す。

図より，試験体のボルト側の連結板，ナット側の連結板ともに，接触圧はほぼ 40 N/mm^2 程度となっており，解析と比べ，試験の場合の接触圧が，約 20 %小さくなっている。これは，主として試験体の初期不整が影響していると考えられる。また，ボルト列数が 3 列の試験体 No. 5-1～3（ブラスト）と比べ，ボルト列数が 8 列の試験体 No. 6-3 の接触圧の方が均一化されている。これは，ボルト列数の多い方が，初期たわみの影響が小さくなるためと考えられる。

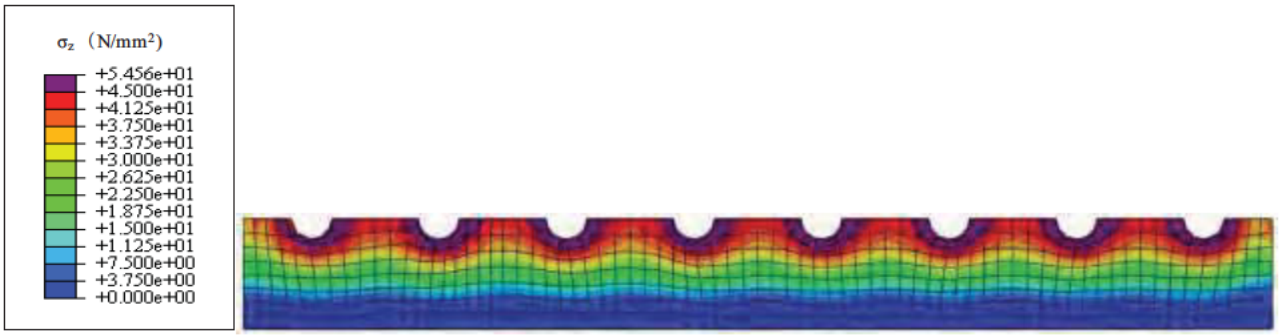
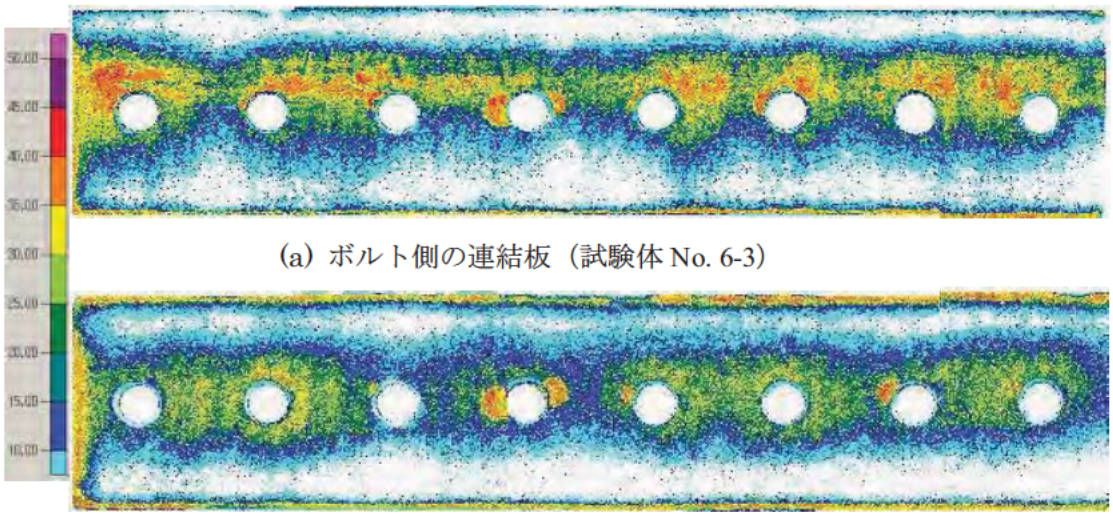


図-4.2.42　ボルト軸力導入時の接触圧の分布（解析）



(a) ボルト側の連結板（試験体 No. 6-3）

(b) ナット側の連結板（試験体 No. 6-3）

図-4.2.43　設計ボルト軸力導入時の接触圧の分布（ブラスト処理）(N/mm^2)

以上より，設計ボルト軸力（205 kN）を導入した時の試験体の接触圧は，連結板や母板の初期不整，不陸，および切断加工によるかえりなどの影響を受けるため分布が均一とならない。そのため，初期たわみが再現されていない解析では，接触圧の不均一を再現することはできなかった。しかしながら，無機ジンクリッチペイントを塗装することで，接触圧の不均一さは小さくなり，解析結果の接触圧の分布形状により近づく傾向がみられた。

4.2.5 まとめ

本節では，高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動を，FEM 解析によって検討するにあたり，使用するモデル，および解析手法の妥当性について，すべり耐力試験の結果と FEM 解析の結果との比較などから検討し，以下のことを明らかにした。

なお，ここでは，比較対象とする一連のすべり耐力試験体に同じ接触面処理がなされ，そのすべり係数は試験体間で同様とみなせることから，すべり先行型で，ボルト列数が 8 列である試験体 No. 6-1 のすべり荷重が解析における最大荷重（すべり荷重）と一致するように解析の摩擦係数を調整，決定している。そして，このようにして決定された摩擦係数をすべてのケースに共通として与え，それぞれの試験結果と解析結果とを比較することで解析モデルの妥当性を議論した。

- 4.2.1 項では，解析モデルの作成にあたって，解析結果に影響を与えると考えられる連結板の端部長さ, 要素分割, モデル化の範囲について, パラメトリックな検討を行った。その結果, 端部長さ 0 mm, ソリッド要素における要素の一辺の長さ 5.5 mm, 解析対象の対称性を考慮してモデル化の範囲を 1/8 とした解析モデルによって，高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動を十分な精度で検討できることを示した。
- 4.2.2 項では，すべり耐力試験の試験体 No. 6-1 のすべり荷重と解析における最大荷重が一致するように摩擦係数を調整し, 調整した摩擦係数を用いてボルト列数が 8 列および 12 列の場合に対して解析を実施した。そして，得られた解析結果とすべり耐力試験の結果とを比較し，再現解析の妥当性を検証した。その結果，荷重-相対変位関係，荷重-ボルト軸力関係，荷重-ひずみ関係については，ボルト列数が 8 列と 12 列のそれぞれに対して，両者がおおむね一致していることを確認した。継手の内側と外側に配置されたボルトの軸力の低下性状については，ある荷重レベルまではすべり耐力試験の結果と解析結果とは一致したものの，ある荷重レベルからは異なり，すべり耐力試験の結果を再現することはできなかった。一方，継手中央に配置されたボルトの軸力低下については，両者はおおむね一致した。
- 4.2.3 項では，4.2.2 項で決定した摩擦係数を用いて，ボルト列数が 12 列の降伏先行型の場合に対して再現解析を実施した。そして，得られた解析結果とすべり耐力試験との結果を比較し，解析の妥当性を検証した。その結果，荷重-相対変位関係，荷重-ボルト軸力関係，荷重-ひずみ関係については，両者がおおむね一致していることを確認した。4.2.2 項と同様，継手の内側と外側に配置されたボルトの軸力については，最大荷重近傍の荷重レベルにおけるボルト軸力の低下性状が両者で異なり，解析においてそれを再現することはできなかった。一方，継手中央に配置されたボルトの軸力低下については，両者はおおむね一致した。
- 本解析では，ボルト導入軸力のばらつき，母板と連結板の初期不整や加工時に生じた局所的な凹凸の考慮，ボルトのねじ部の形状，ボルト孔に対するボルトの位置のずれ等を解析モデルに反映しておらず，また，すべり耐力試験では低い荷重段階における母板と連結板の局所的なずれが生じたものの解析ではそれを再現できなかったため，解析のボルト軸力の低下性状は，継手中央部のボルトにおいてすべり耐力試験の低下性状を再現したものの，継手の内側と継手の外側のボルトにおいてある荷重段階までは一致したが，その後の低下率は一致しなかった。また，ボルト列数が増えるとこれらの影響が相対的に小さくなり，結果として，本解析結果とすべり耐力試験の結果とはおおむね一致する傾向にあった。

- 4.2.2 項と 4.2.3 項では，動摩擦係数を静止摩擦係数と等しいと仮定し，すべり発生を最大荷重到達時としてすべり荷重を定義した。そのため，ボルト列数が 8 列の試験体 No. 6-1 とボルト列数が 12 列の試験体 No. 7-3 の再現解析において，それぞれの試験結果とほぼ同じすべり荷重を得た。しかし，3 体ずつ行った試験の結果の平均値では，試験結果と再現解析の結果に差異がみられた。このように，試験結果そのものについても各種の要因の影響を受けばらついており，解析結果との比較をどのようにすべきかについて，すべり発生の適切な定義，評価の方法とも関連し，重要である。したがって，4.3.1 項では，試験結果を適切に再現できるすべり発生の定義について議論を行うこととする。
- 以上のことから，総合的に判断すると，本解析モデルと解析手法により，すべり係数の低下，ボルトの軸力低下，荷重伝達メカニズムについては，解析ケースの相対比較による検討が可能と考えられる。特に，8 列以上の多列となる場合では，初期不整等がすべり挙動に与える影響が小さくなる傾向にあることから，解析ケース間における定量的な比較検討も可能であると考えられる。

4.3　解析結果と考察

4.3.1　すべり定義と摩擦力分布

（a）試験の相対変位

表-4.3.1 にすべり耐力試験で得られたすべり荷重，および各計測位置でのすべり時の相対変位量を示す。表中の比率 1 は内側相対変位と中央相対変位の比，比率 2 は外側相対変位と中央相対変位の比をそれぞれ示している。すべり耐力試験では母板の板厚が 38 mm，50 mm，75 mm，ボルト列数が 3 列，8 列，12 列となっている。試験ケース 75mm-12 列 K は解析すべり/降伏耐力比 β が 0.92 であり，降伏先行型に近いケースである。図-4.3.1 に 3 列の場合の母板と連結板の相対変位の測定位置を示す。すべり耐力試験では，荷重が増加しなくなり，変位が急激に増加する状態をすべりが生じた状態としており，この時の荷重をすべり荷重としている。

表-4.3.1　すべり耐力試験結果（相対変位）

試験ケース	試験体	すべり荷重 (kN)	母板間相対変位 (mm)	内側相対変位 (mm)	中央相対変位 (mm)	外側相対変位 (mm)	比率1	比率2
				A	B	C	A/B	C/B
38mm 3列	No.1	794	0.33	0.23	0.23	0.28	1.00	1.22
50mm 3列	No.2	863	0.29	0.16	0.28	0.20	0.58	0.72
50mm 8列	No.3	2,256	0.55	0.32	0.13	0.42	2.46	3.19
50mm 12列	No.4	3,455	0.87	0.55	0.26	0.68	2.16	2.66
75mm 3列	No.5	658	0.54	0.24	0.14	0.14	1.65	0.96
75mm 8列	No.6	2,276	0.60	0.25	0.02	0.24	10.65	10.57
75mm 12列	No.7	3,375	0.76	0.34	0.03	0.31	11.03	10.00
75mm 12列K	No.15	2,750		3.97	0.11	4.13	36.09	37.55

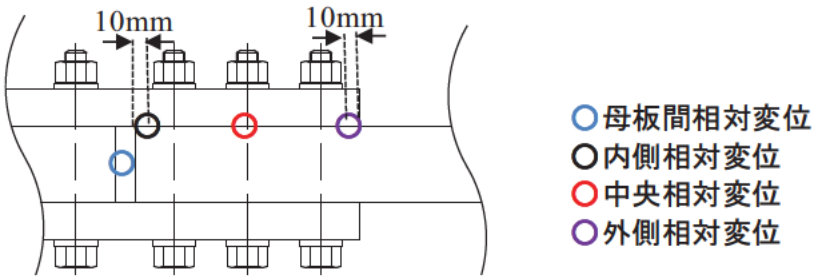
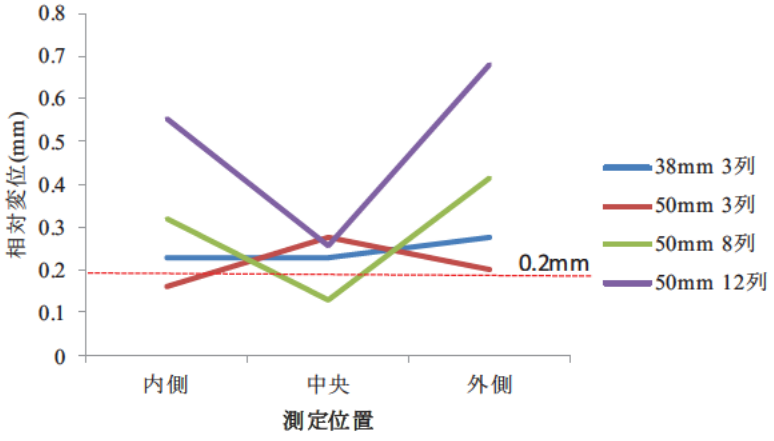


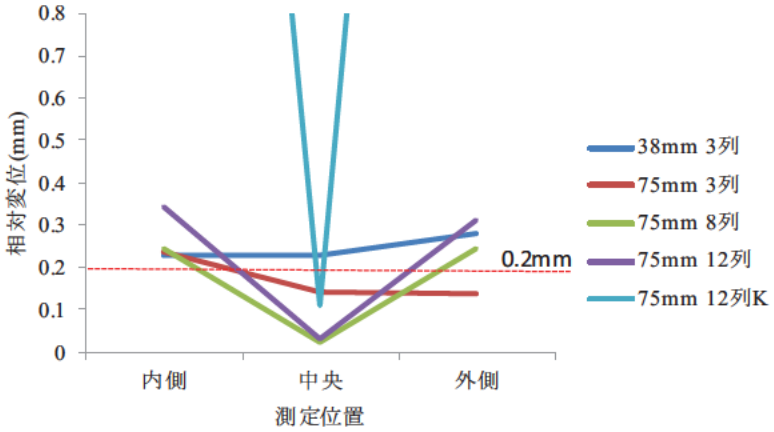
図-4.3.1　相対変位の測定位置（すべり耐力試験）

図-4.3.2 にすべり耐力試験におけるすべり時の母板と連結板の相対変位を表す。図（a）では，板厚 38 mm と 50 mm の場合を，図（b）では，板厚 38 mm と 75 mm の場合をそれぞれ比較している。図より，3 列の場合，板厚，位置による相対変位量の差異は小さく，すべり時の相対変位も 0.2 mm 前後となっている。一方，ボルト列数が多い 8 列と 12 列の場合，外側相対変位と内側相対変位が大きく，中央相対変位は相対的に小さく（その変位量の大きさは 0.2 mm 以下）なっている。この値は板厚が厚くなるにつれて，小さくなっており，板厚 75 mm でボルト列数が 8，12 列の場合，わずかに 0.1 mm 以下となっている。一方，降伏先行型 75mm-12 列 K の場合は，外側相対変位と内側相対変位が非常に大きく，これらの位置での母板および連結板の降伏の影響が顕著に表れている。

板厚 50 mm のボルト列数が 8 列と 12 列を比較すると，各相対変位測定位置において 12 列の方がすべり発生時の相対変位が大きくなった。これにより，ボルト列数が 12 列のすべり係数（表-3.7.2）は，8 列（表-3.7.2）と比べほとんど低下がみられないと考えられる。



(a) 38 mm と 50 mm の場合



(b) 38 mm と 75 mm の場合

図-4.3.2　すべり時の相対変位量の比較（すべり耐力試験）

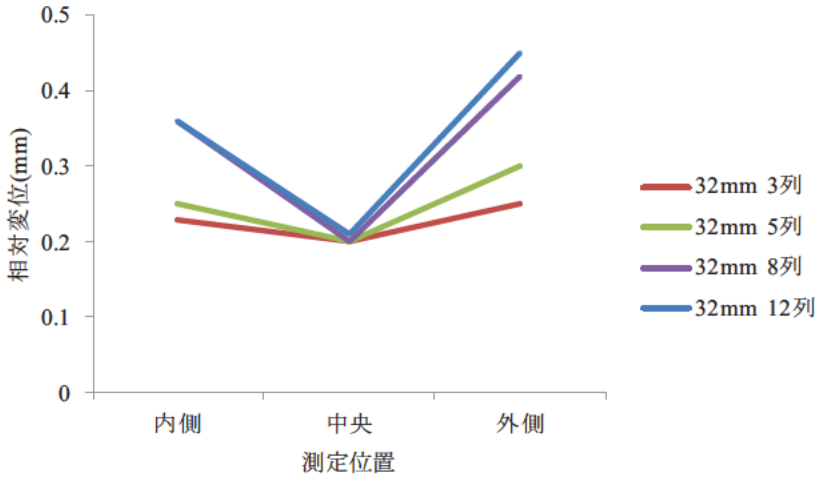
(b) 解析の相対変位

表-4.3.2 に解析で得られた中央相対変位が 0.2 mm に達した時の各位置の相対変位を示す。表-4.3.1 と同様に比率 1 は内側相対変位と中央相対変位の比，比率 2 は外側相対変位と中央相対変位の比を示す。ここでは，中央相対変位が 0.2 mm の場合の内側相対変位と外側相対変位について考察する。

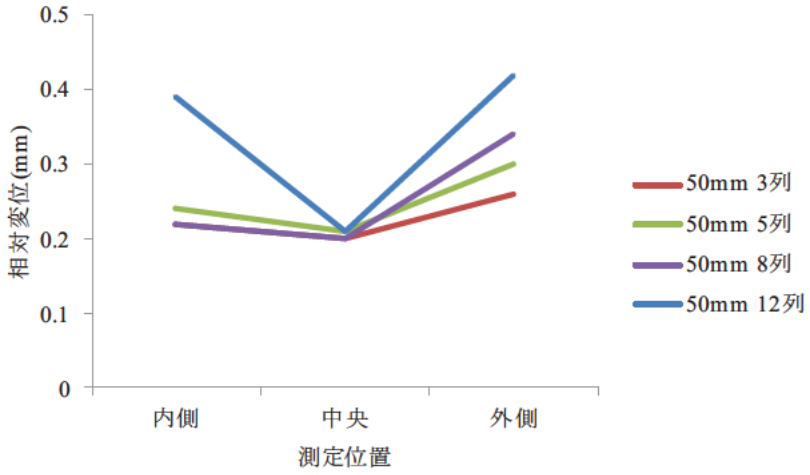
図-4.3.3 に中央相対変位が 0.2 mm に達した時の各位置の相対変位を示す。図 (a)，(b)，(c) より，いずれの板厚に対しても，内側相対変位と外側相対変位が中央相対変位よりも大きくなっている。さらに，内側相対変位と外側相対変位とを比べると，内側相対変位の方が大きくなる傾向にある。一方，3 列の場合，すべり耐力試験と同様に各位置の相対変位はほぼ同じである。また，図-4.3.3 (d)，(e) より，同じボルト列数の場合の比較では，中央相対変位が 0.2 mm の時，内側相対変位と外側相対変位は板厚が厚くなるにつれて，小さくなっていることがわかる。

表-4.3.2　解析結果（相対変位）

解析ケース	内側相対変位 (mm)	中央相対変位 (mm)	外側相対変位 (mm)	比率1	比率2
	A	B	C	A/B	C/B
32mm-3列	0.23	0.20	0.25	1.15	1.25
32mm-5列	0.25	0.20	0.30	1.25	1.50
32mm-8列	0.36	0.20	0.42	1.80	2.10
32mm-12列	0.36	0.21	0.45	1.71	2.14
50mm-3列	0.22	0.20	0.26	1.10	1.30
50mm-5列	0.24	0.21	0.30	1.14	1.43
50mm-8列	0.22	0.20	0.34	1.10	1.70
50mm-12列	0.39	0.21	0.42	1.86	2.00
75mm-3列	0.21	0.20	0.22	1.05	1.10
75mm-5列	0.25	0.20	0.27	1.25	1.35
75mm-8列	0.32	0.21	0.34	1.52	1.62
75mm-12列	0.38	0.21	0.41	1.81	1.95
75mm-12列K	0.51	0.23	0.56	2.22	2.43

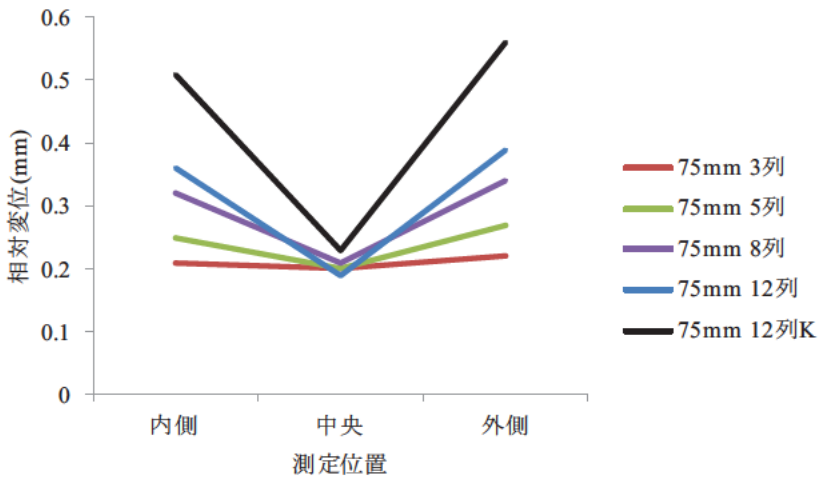


(a) 母板 32 mm の場合

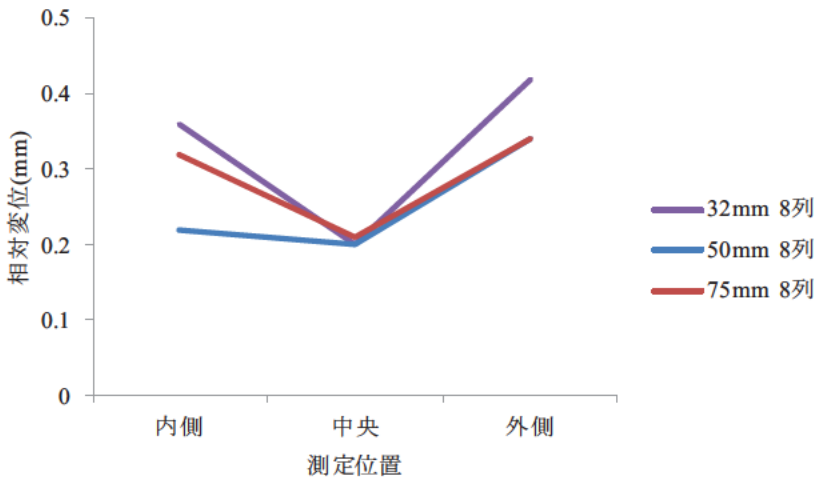


(b) 母板 50 mm の場合

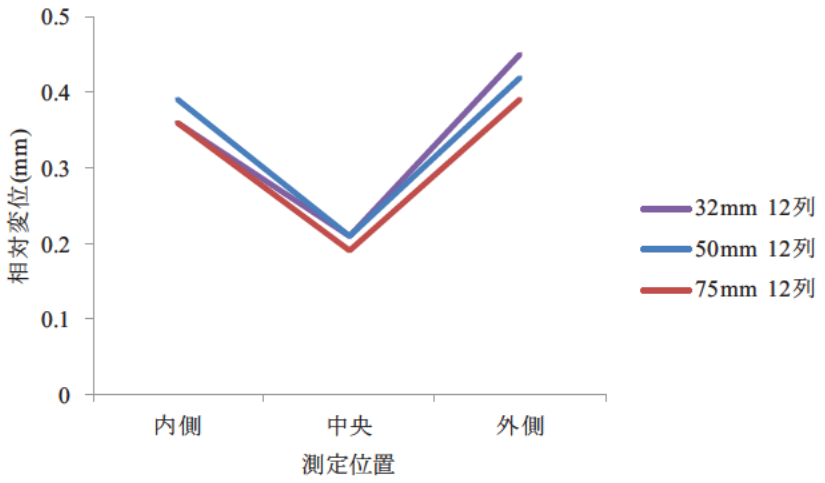
図-4.3.3　中央相対変位が 0.2 mm の時の相対変位量の比較（解析）



(c) 母板 75 mm の場合



(d) ボルト 8 列の場合



(e) ボルト 12 列の場合

図-4.3.3　中央相対変位が 0.2 mm の時の相対変位量の比較（解析）（続き）

以上（a）と（b）に示したすべり耐力試験と解析の結果から，すべり先行型，降伏先行型ともに，ボルト列数の増加につれて，中央相対変位が 0.2 mm のとき，中央相対変位に比べて内側相対変位と外側相対変位が大きくなっている。その傾向は，降伏先行型の方が顕著である。

（c）解析におけるすべりの定義

試験結果から，ボルト列数が 3 列と少ない場合には，各測定位置の相対変位量の差は小さく，中央相対変位がおおむね 0.2 mm となった時に，すべりが発生している。これは，文献 25）ですべりの判断指標の 1 つとして挙げている内側相対変位 0.2 mm と一致している。しかし，ボルト列数が多くなると，中央相対変位と，内側相対変位および外側相対変位に差が生じ，中央相対変位が 0.1 mm 程度ですべりが発生し，この時の内側相対変位と外側相対変位は，0.2 mm 以上となっている。このように，ボルト列数が多くなるにつれて，部分すべりの影響が顕著になるため，すべり発生時の内側相対変位と外側相対変位が中央相対変位と比べ大きくなる。したがって，部分すべりはすべり係数の低下に影響を与える要因の 1 つとなっていると考えられる。

解析における相対変位の着目位置の詳細を図-4.3.4 に示す。図-4.3.5 にすべり定義を「着目位置の相対変位 0.2 mm に達したとき」とし，その着目位置を内側，中央，外側とした場合の各ボルト近傍のボルト 1 本当たりの分担摩擦力分布を示す。図では解析ケース 75mm-12 列の場合を示している。図中の縦軸はボルト 1 本当たりの分担摩擦力を，横軸はボルト位置（図-4.3.4 参照）をそれぞれ示す。ボルト 1 本当たりの分担摩擦力は，ボルト 1 本当たりの接触面の領域に発生するせん断応力の合計によって求めている。解析のモデル化範囲を試験体の板幅の半分としているため，図中の点線は式（4.2.1）で与えられるボルト 1 本あたりすべり耐力値の 2 分の 1 となっている。

中央相対変位によるすべり定義の場合，中央列の摩擦力がすべり耐力に達し，すべり時のボルトの分担摩擦力がほぼ均等になっている。内側相対変位と外側相対変位により，すべり定義をした場合，中央列の摩擦力がボルト 1 本あたりのすべり耐力までに達していない。また，内側ボルト（図中のボルト 1）に比べ，外側ボルト（図中のボルト 12）の分担摩擦力が小さくなっている。このメカニズムについては 4.3.1（f）で詳述する。

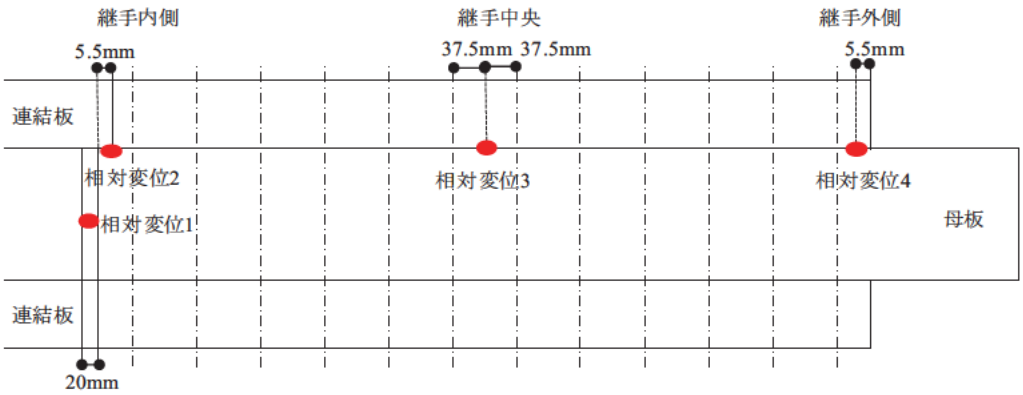
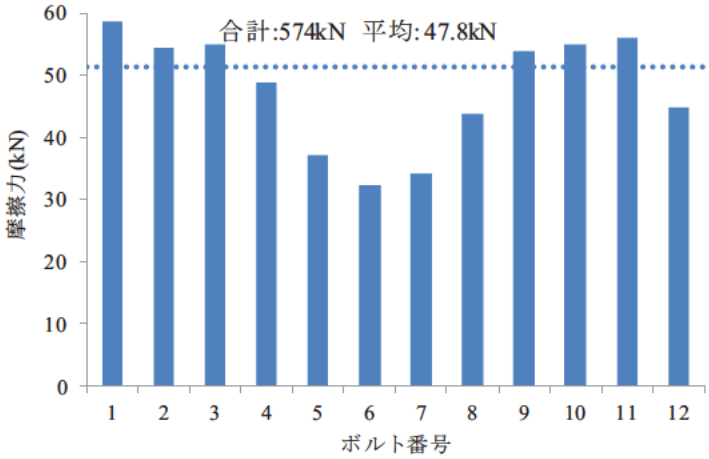
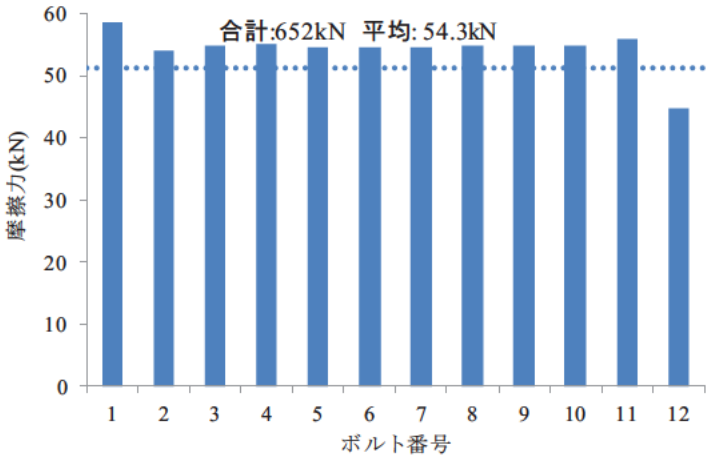


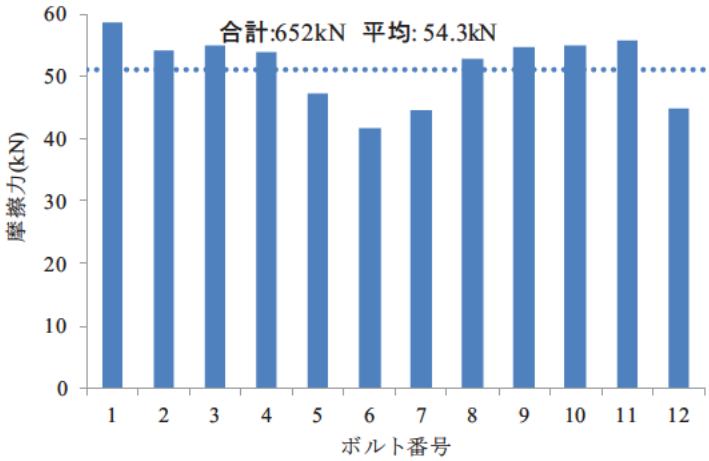
図-4.3.4　相対変位の計測位置とボルト番号とその位置



(a) 内側相対変位が 0.2 mm の時をすべり発生とした場合



(b) 中央相対変位が 0.2 mm の時をすべり発生とした場合



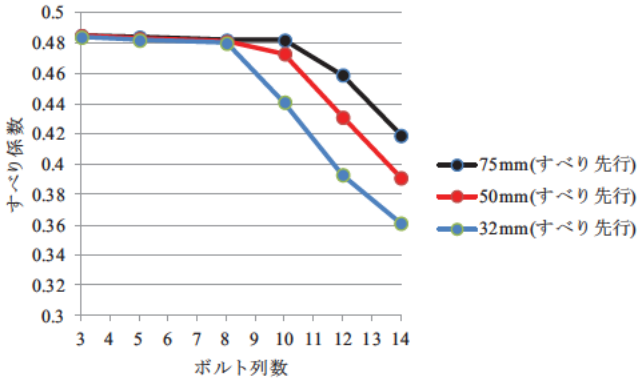
(c) 外側相対変位が 0.2 mm の時をすべり発生とした場合

図-4.3.5 すべり定義の違いによる摩擦力の分布の比較

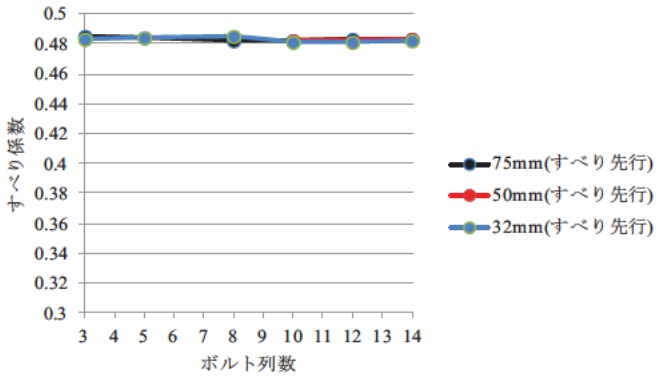
すべり定義の違いによるすべり係数の違いを比較したものを図-4.3.6 に示す。これらの図より，接合部の内側相対変位，および外側相対変位が 0.2 mm に達するときをすべり発生とすると，ボルト列数の増加に伴い，すべり係数が低下する傾向が見られる。一方，中央相対変位が 0.2 mm に達するときをすべり発生とすると，ボルト列数が増加しても，すべり係数の低下は見られない。また，外側相対変位が 0.2 mm に達する時をすべり発生と定義する場合，外側のボルト 1 本当たりの分担摩擦力が小さく，すべり係数の低下がより顕著となっている。内側相対変位と外側相対変位の定義の違いに着目すれば，外側で定義した場合の方がすべり係数が一定から低下に転じるボルト列数が小さくなる。例えば，32 mm の場合では，内側で定義した場合は 8 列，外側で定義した場合は 5 列となる。このように，すべり定義の違いにより，すべり係数は変わることになる。

厚板多列高力ボルト摩擦接合継手を含むすべり耐力試験の結果から，継手の内側および外側での相対変位量が 0.2 mm 程度であったこと，継手外側の相対変位は母板の断面形状の影響を受けやすく，すべり発生の定義に用いることは適切でないことなどから総合的に判断して，4.3 節の解析において，すべり発生を「解析における最大荷重発生時，もしくは母板と連結板の接触面の内側相対変位が 0.2 mm に達した時のうち，内側相対変位が小さい方の時点」と定義した。

なお，鋼構造接合部設計指針[26]において，列数の少ないすべり試験体に対するすべり荷重の算定方法ではあるが，「0.2 mm までに最大の荷重が生じた場合はその最大荷重，明瞭な主すべりが生じない場合はすべり量 0.2 mm に対応する荷重とする」という記述があり，本定義における相対変位は，この値と一致している。

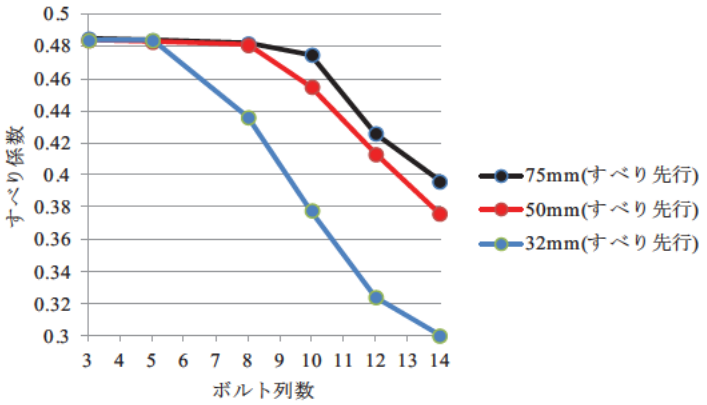


(a) 内側相対変位が 0.2 mm の時をすべり発生とした場合



(b) 中央相対変位が 0.2 mm の時をすべり発生とした場合

図-4.3.6　すべり定義の違いによるすべり係数の比較



(c) 外側相対変位が 0.2 mm の時をすべり発生とした場合

図-4.3.6　すべり定義の違いによるすべり係数の比較（続き）

(d) Eurocode[26]の内側ボルトの分担率 b_1 との比較

図-4.3.8 に内側相対変位によってすべりを定義した場合のすべり荷重に対する内側ボルト（ボルト 1：図-4.3.4 に位置を示す）の荷重分担率 b_1 とボルト列数の関係を示す。Eurocode では，ボルト 1 の荷重分担率 b_1（文献 27）では β_1 と表記）は，式（4.3.1）で定義される。

$$b_1 = \frac{1}{K_s \times n} \qquad \cdots\cdots (4.3.1)$$

$$K_s = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d} \qquad \cdots\cdots (4.3.2)$$

ここで，b_1: ボルト 1 の荷重分担率

L_j: 内側ボルトと外側ボルトの距離　（図-4.3.7）

d: ボルトの直径

K_s: 低減係数

n: ボルト列数

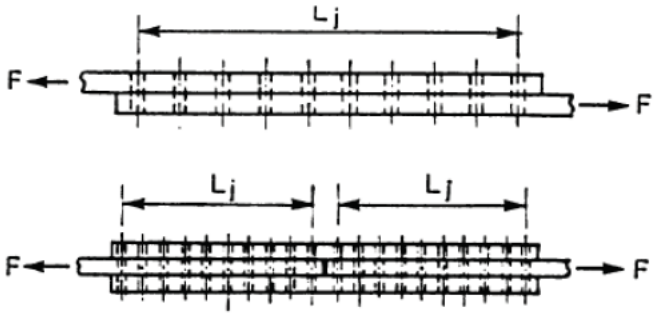


図-4.3.7 継手 L_j の長さの定義[26]

本解析では，解析におけるボルト 1 の荷重分担率 b_1 を，ボルト 1 の分担摩擦力をすべり荷重で除すことによって求めている。なお，分担摩擦力は，ボルト 1 に対応する接触面の領域に発生するせん断応力の和で求められる。

図より，ボルト列数が少ないほど，板厚による荷重分担率の差が大きく，ボルト列数が多いほど，板厚による荷重分担率の差が小さくなっている。これは，後の 4.3.1（f）で説明する母板と連結板の荷重作用位置の偏心が影響していると考えられる。すなわち，荷重偏心の大きい 75 mm の方が，32 mm より荷重分担率が高くなっている。また，ボルト列数が多くなると，ボルト 1 本当たりの寄与が小さくなり均等化されるため，板厚の違いよる分担率の差が小さくなると考えられる。解析で得られたボルト 1 の荷重分担率とボルト列数の関係と Eurocode で与えられる関係を比較するとボルト列数の少ない範囲で 11 %～15 %程度の差異はみられるものの，その傾向は一致している。

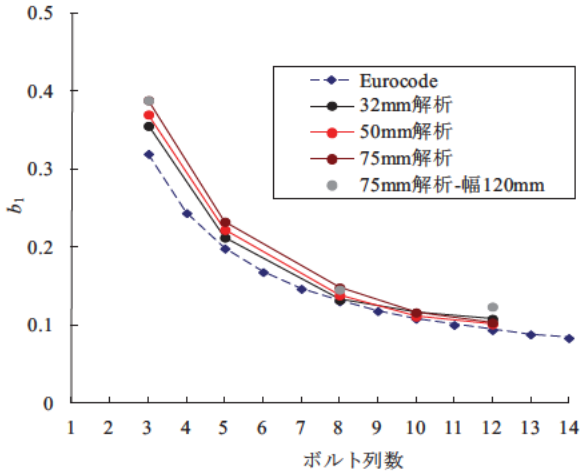


図-4.3.8　内側ボルトの荷重分担率 b_1 とボルト列数の関係

（e）試験と解析のすべり耐力比の比較

解析のすべり定義に基づいた場合のすべり耐力比の解析結果とすべり耐力試験の結果の比較を図-4.3.9 に示す。図の縦軸は，各ケースのすべり荷重を同じ板厚でボルト列数が 3 列の場合のすべり荷重で除した値（以下，すべり耐力比）を，横軸はボルト列数をそれぞれ示す。すべり耐力試験では，各ケース 3 体ずつ試験を行っており，それらの平均値を点線で示している。

図より，あるボルト列数まですべり耐力比が一定となり，その後ボルト列数が増えるとすべり耐力比が下がっている。試験結果と比べ，解析の方が，すべり耐力比の低下が大きい。解析の場合，ボルト列数が 8 列未満では，すべり耐力比が低下しない。一方，8 列以上（解析すべり/降伏耐力比 β_a を一定と仮定）では，板厚 32 mm のすべり耐力比の低下量が，板厚 50 mm と 75 mm と比べ大きくなっている（詳細は 4.3.3 で説明）。

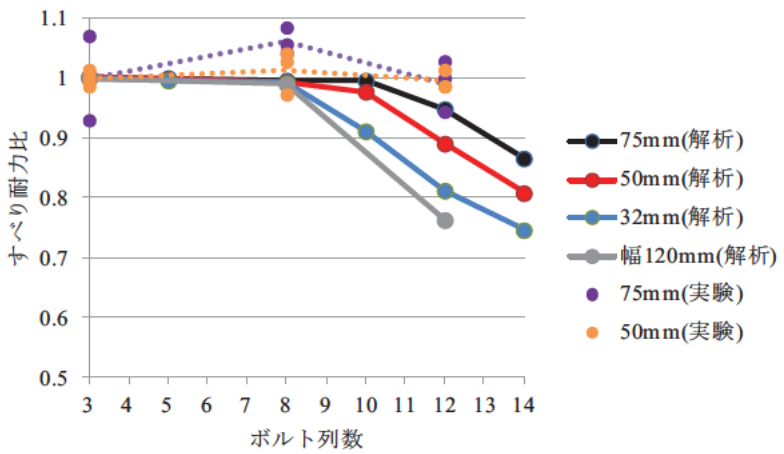


図-4.3.9　すべり耐力比とボルト列数の関係

すべり耐力試験と，解析の比較では，ボルト列数を増やしていくと，ある列数からすべ耐力比が低下する。その傾向は同じであるが，低下量は両者で異なり，解析の低下量の方が大きくなっている。すべり耐力試験のボルト列数が 8 列の場合，3 列と比べてすべり耐力比が上昇しているが，これは，基準とした 3 列のすべり係数が，初期たわみや，肌隙等の初期不整の影響で低かったためと考えられる。試験体の平均値で比較すると，75mm-12 列の平均値では，すべり耐力比の低下が 7 %程度になっている。

解析におけるすべり発生の定義を内側相対変位に着目することで，すべり耐力試験で見られたボルト列数の増加に伴うすべり係数の低下の傾向（すべり係数が低下し始めるボルト列数も含む）がより適切に再現され，本定義を用いた解析によって，ボルト列数の増加がすべり耐力に与える影響などを検討できると考えられる。

（f）摩擦力分布の解明

ボルト列数 12 列の各ボルトの分担摩擦力は，図-4.3.5（a）の解析結果より，一番内側のボルト（ボルト 1）の分担摩擦力が高くなり，一番外側のボルト（ボルト 12）の分担摩擦力が低くなっている。

一般的に摩擦力の上限は，接触面にはたらく垂直力の大きさに依存するため，分担摩擦力の分布形状は，接触面の垂直応力の分布を用いて次のように説明できる。図-4.3.10 にボルト周辺の母板と連結板間の接触面の垂直応力の分布の模式図を示す。垂直応力は荷重偏心によって生じる曲げモーメントによる垂直応力とボルト軸力による垂直応力の合成応力である。また，図-4.3.11 に示すようにボルト 1 本あたりの範囲にはたらく σ_{yy} の分布を細線で示すが，実際には隣のボルトによる垂直応力 σ_{yy} が相互に作用するため，垂直応力 σ_{yy} が不連続になることはなく均等化されると考えられる。したがって，中央の各ボルト列では垂直応力 σ_{yy} の分布が均等になり，内側のボルト位置の垂直応力が高く，外側のボルト位置の垂直応力が低くなっていると考えられる。

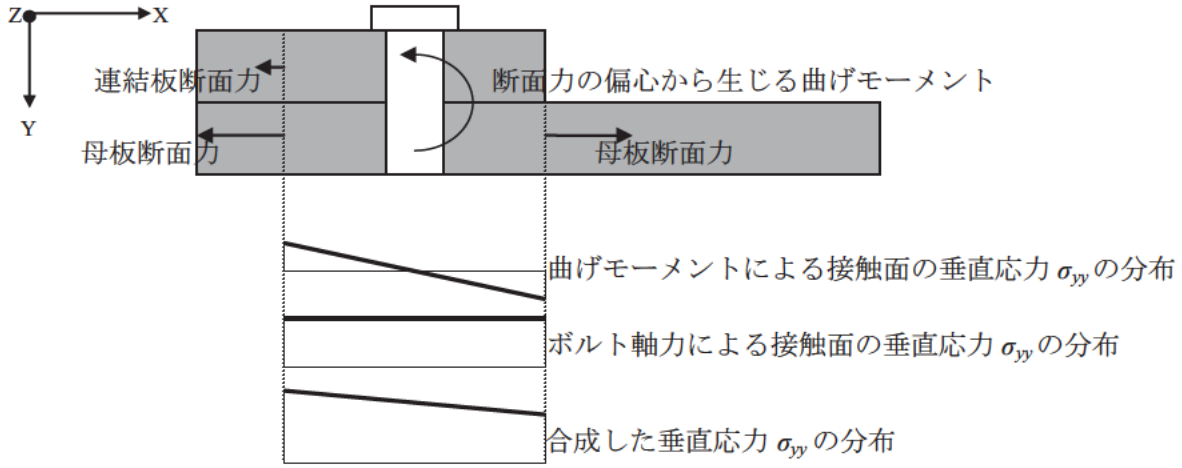


図-4.3.10　ボルト 1 本に着目した接触面にはたらく垂直応力の分布（模式図）

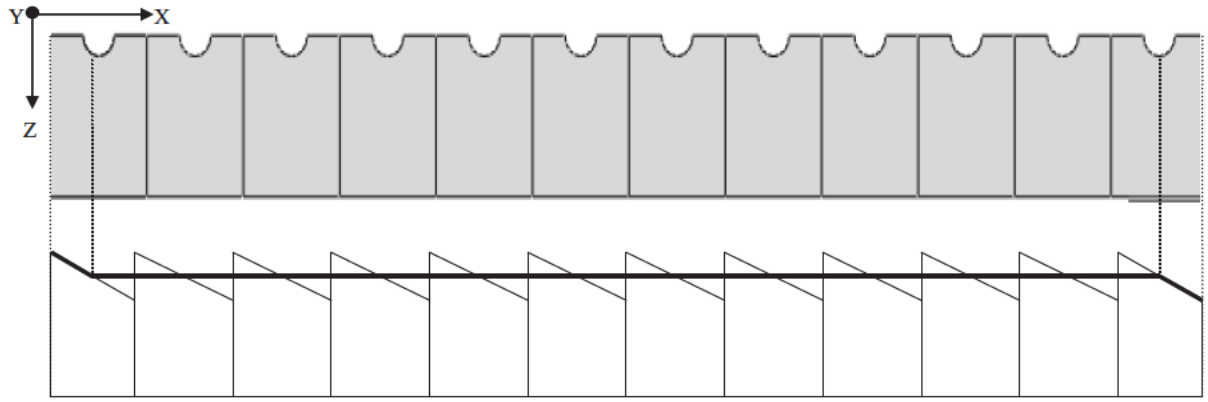


図-4.3.11　接触面にはたらく垂直応力の分布（模式図）

4.3.2　すべり/降伏耐力比 β の影響

板厚とボルト列数が一定のもと，すべり/降伏耐力比 β がすべり係数の低下とすべり挙動に与える影響を考察する。解析ケースを表-4.3.3 に示す。解析ケース名は，最初の数値が母板厚を，次の数値がボルト列数を，最後の数値が解析すべり/降伏耐力比 β_a を表している。β_a はすべり係数を 0.5 と仮定し，材料強度試験から得られた降伏応力で算出した値である。ここでは，板厚による挙動の違いを調べるために，板厚 32mm と 75mm のケースを設定し，さらにそれぞれに対してすべり先行型のケース（β_a が 0.57）と β_a が 1 より小さいが降伏先行型の挙動を示すケース（β_a が 0.95）を設定した。

解析では，共通の条件の下で計算結果を比較するため，摩擦係数 0.5，およびボルト導入軸力（205 kN）を共通として計算を行った。すべり係数の低下が発生しない場合では，すべり係数は摩擦係数とほぼ同じか，少し小さい値になる。すべり耐力試験で使用した試験体の表面処理が無機ジンクリッチペイント塗装であり，すべり係数の推奨値が 0.5[3] とされているため，この値を参考として摩擦係数を設定した。解析結果を表-4.3.4 に示す。

解析から得られたすべり係数とボルト列数の関係を図-4.3.12 に示す。ボルト列数が 3 列では，解析すべり/降伏耐力比 β_a が 0.95 の場合のすべり係数は，それが 0.57 の場合と比べて，約 2 %低下している。一方，12 列の場合では，解析すべり/降伏耐力比 β_a が 0.95 のすべり係数は，それが 0.57 の場合と比べて，約 18 %低下している。このように，ボルト列数が増加すれば，解析すべり/降伏耐力比 β_a の違いの影響が大きくなることがわかる。すべり係数の低下という点では，降伏先行型の方がボルト列数の影響を強く受ける。

表-4.3.3　解析ケース

解析ケース		32mm 3列 0.57	32mm 3列 0.95	75mm 12列 0.57	75mm 12列 0.95
ボルトM22（F10T）孔径24.5mm	ボルト本数	3	3	12	12
	導入軸力（kN/本）＊	208	208	206	205
母材　SM490Y	板厚（mm）	32	32	75	75
連結板　SM490Y	板厚（mm）	19	19	38	38
試験体幅（mm）		117	80	190	120
解析すべり/降伏耐力比 β_a		0.57	0.95	0.57	0.95
摩擦係数		0.50	0.50	0.50	0.50

＊目標導入軸力：205 kN

表-4.3.4　解析結果

解析ケース	32mm-3列-0.57	32mm-3列-0.95	75mm-12列-0.57	75mm-12列-0.95
すべり荷重（kN）	604	594	2,268	1,861
すべり係数	0.484	0.476	0.459	0.378

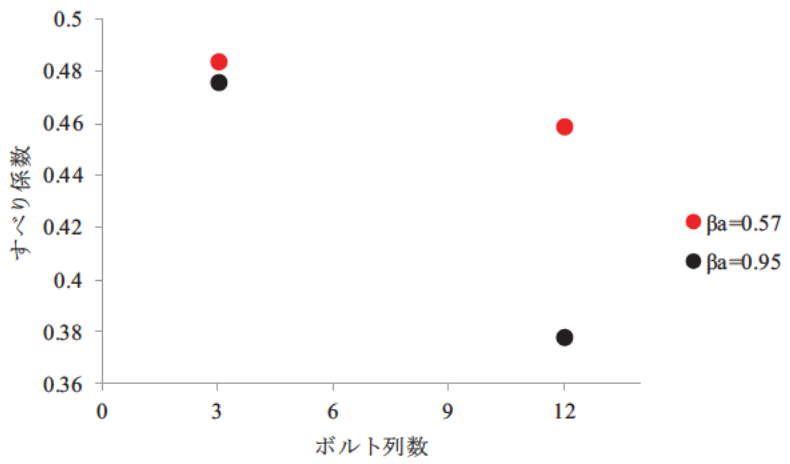


図-4.3.12　すべり係数とボルト列数の関係

（a）32mm-3 列の場合

図-4.3.13 に解析ケース「32mm-3 列-0.57」と「32mm-3 列-0.95」の荷重 相対変位関係を示す。図の縦軸は引張荷重をすべり荷重で無次元化した値 P/P_{SL} を，横軸は母板と連結板の内側相対変位をそれぞれ示す。図中の点線はすべり発生の定義の基準の一つである相対変位 0.2 mm を示す。

図より，両ケースの内側相対変位が 0.2 mm に達する前に，最大荷重（すべり荷重）に到達している。また，両者の荷重 相対変位関係が一致している。

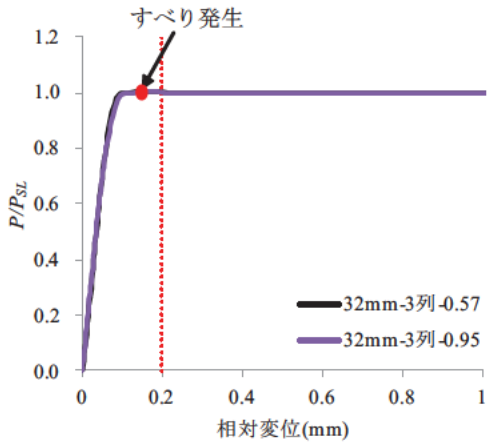


図-4.3.13　荷重 相対変位関係

図-4.3.14 に 32mm-3 列-0.57 と 32mm-3 列-0.95 のボルトの軸力低下率の比較を示す。縦軸はボルトの軸力低下率を，横軸はボルト位置をそれぞれ示す。図-4.3.15 にはボルト番号とその位置を示す。

図-4.3.14 より，解析すべり/降伏耐力比 β_a が大きい 32mm-3 列-0.95 の各ボルトの軸力低下率は，β_a が小さい 32mm-3 列-0.57 と比べて，約 2 %大きくなっている。これは，32mm-3 列-0.95 の方が，β_a が大きく，すべり時の母板，連結板に発生する軸方向の引張応力が高く，それによって生じるポアソン効果による板厚減少が大きくなり，軸力の低下量に差異が生じたと考えられる。さらに，内側のボルト 1 の軸力低下は，他の位置にあるボルトと比べ，大きくなっている。これは，ポアソン効果による板厚減少と，荷重偏心によって生じる曲げモーメントが与える接触面に垂直な圧縮応力の影響により，ボルト 1 の軸力低下が大きくなったものと考えられる。

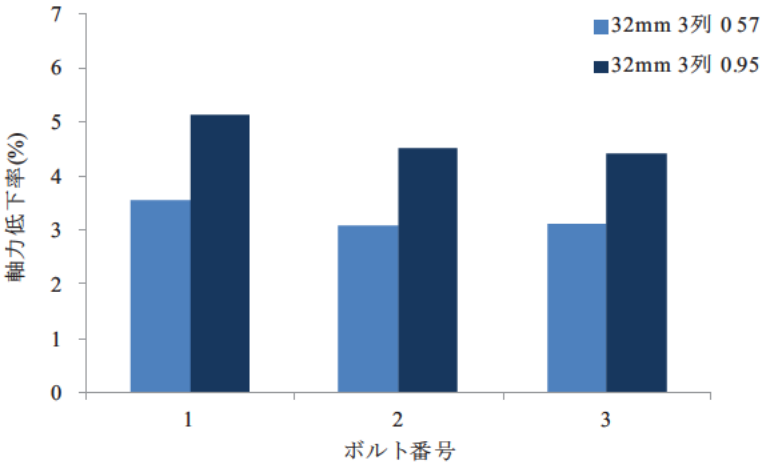


図-4.3.14　すべり時のボルト軸力低下率

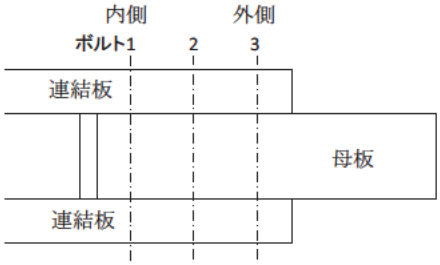
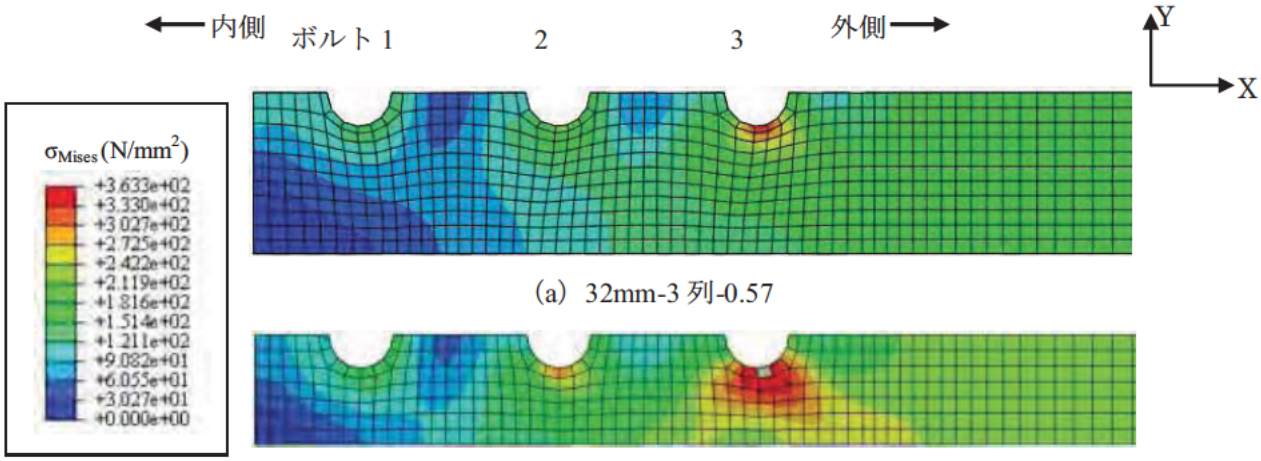


図-4.3.15　ボルト番号とその位置

図-4.3.16にすべり発生時の母板の接触面を構成する要素のミーゼス応力の分布を示す。

図より，32mm-3列-0.57と比べ，32mm-3列-0.95では，ボルト3（外側ボルト）の近傍で降伏に近い応力が発生している。このように，解析すべり/降伏耐力比β_aが0.95の場合，すべり発生時にはボルト3の周辺で局部降伏が進展しており，それが0.95で1.0より小さいにも関らず，降伏先行の挙動を示す原因と考えられる。



(a) 32mm-3 列-0.57

(b) 32mm-3 列-0.95

図-4.3.16　すべり時のミーゼス応力の分布（母板接触面側要素）

図-4.3.17 にすべり発生時のボルト 1 本当たりの分担摩擦力の分布を示す。図の縦軸はボルト 1 本当たりの分担摩擦力を，横軸はボルト位置をそれぞれ示す。図中の点線は式（4.2.3）に示すボルト 1 本あたりすべり耐力である。

図より，32mm-3 列-0.57 と 32mm-3 列-0.95 の場合，すべり発生時では，ほぼすべての列で分担摩擦力がすべり耐力に近い状態になっていることがわかる。また，すべり時のボルト 1 本当たりの分担摩擦力で比較すると，解析すべり/降伏耐力比 β_a の大きい方は分担摩擦力がやや小さいといえる。

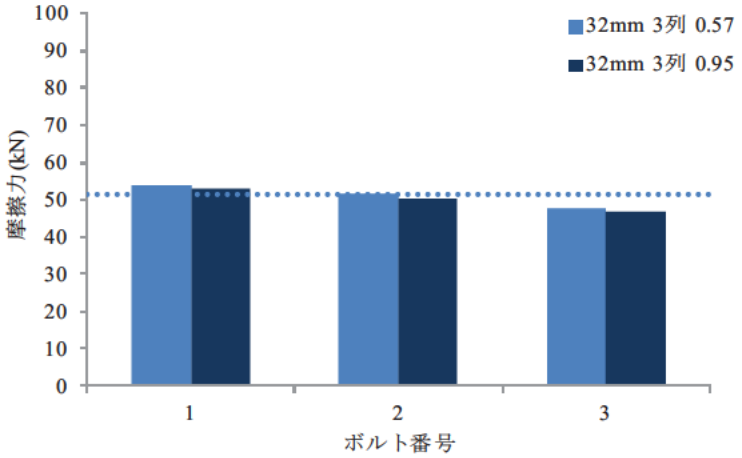


図-4.3.17　すべり時の各ボルト列の分担摩擦力

(b) 75mm-12 列の場合

図-4.3.18 に解析ケース「75mm-12 列-0.57」と「75mm-12 列-0.95」の荷重 相対変位関係を示す。

図より，両者ともに最大荷重に達する前に，内側相対変位が 0.2 mm に達しており，これによってすべり発生と決定される。したがって，内側相対変位が 0.2 mm のとき，P/P_{SL} の値が 1.0 となっており，すべり荷重 P_{SL} が異なるため，最大荷重時の P/P_{SL} の値が異なっている。表-4.3.4 より，75mm-12 列-0.57 のすべり荷重は 2,268 kN で，75mm-12 列-0.95 のすべり荷重は 1,927 kN であり，解析すべり/降伏耐力比 β_a が大きい 75mm-12 列-0.95 では，すべり荷重が 75mm-12 列-0.57 と比べ小さくなっている。この原因は，75mm-12 列-0.95 の場合，引張応力が高くなる母板外側と連結板内側において局部降伏が進展し，相対変位が 0.2 mm に達するときの荷重が小さいためと考えられる。

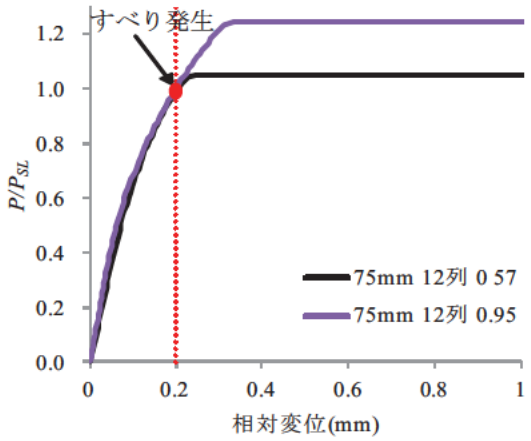


図-4.3.18　荷重 相対変位関係

図-4.3.19 に 75mm-12 列-0.57 と 75mm-12 列-0.95 のボルトの軸力低下率の比較を，図-4.3.14 と同様に示す。ボルト番号とその位置を図-4.3.15 に示す。

図-4.3.19 より，解析すべり/降伏耐力比 β_a が大きい 75mm-12 列-0.95 の各ボルトの軸力低下率は，β_a が小さい 75mm-12 列-0.57 と比べて大きくなっている。その差は，3 列の場合と同様に，約 2 %である。これは，75mm-12 列-0.95 の方が，β_a が大きく，すべり時の母板と連結板に発生する軸方向引張応力が大きく，軸力低下も大きくなったためと考えられる。ボルト 1 の軸力低下率は，他の位置にあるボルト軸力低下率に比べて大きく，その理由は 32mm-3 列の場合と同様と考えられる。

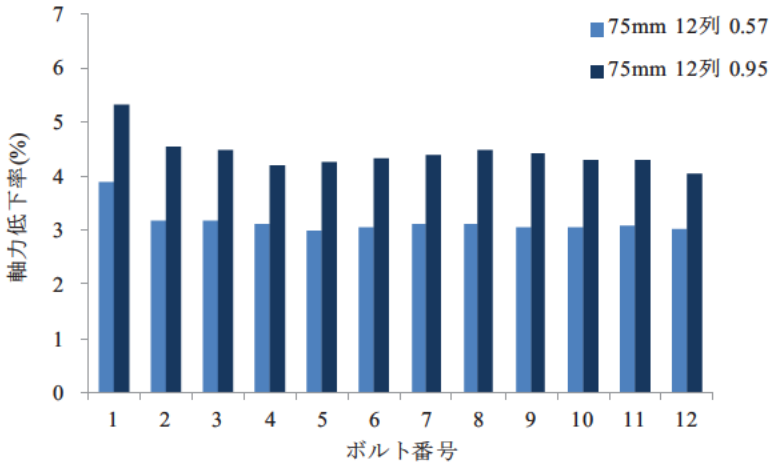
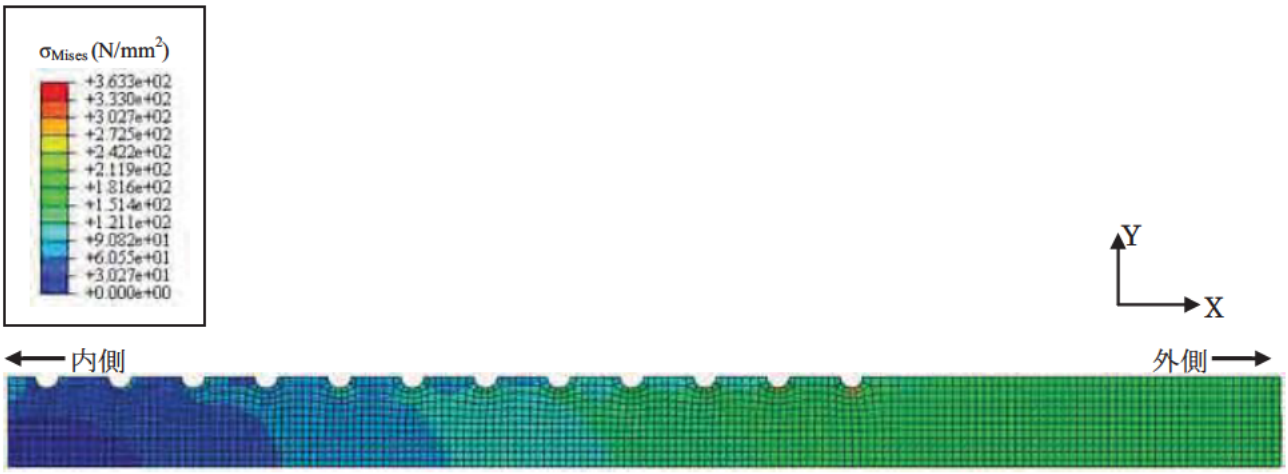


図-4.3.19　すべり時のボルト軸力低下率

図-4.3.20にすべり発生時の母板の接触面を構成する要素のミーゼス応力の分布を示す。

図より，75mm-12列-0.57と比べ，75mm-12列-0.95の応力が大きく外側ボルトの周辺で局部降伏が進展している。



(a) 75mm-12 列-0.57

(b) 75mm-12 列-0.95

図-4.3.20　すべり時のミーゼス応力の分布（母板接触面側要素）

図-4.3.21 にすべり発生時のボルト 1 本当たりの分担摩擦力の分布を示す。図より，75mm-12 列-0.57 と 75mm-12 列-0.95 ともに，すべり発生時に，中央の分担摩擦力がボルト 1 本当たりのすべり耐力に達していない。特に，β_a が 0.95 の場合，中央の分担摩擦力が非常に小さくなっている。これは，板の局部降伏が生じ，早期に内側の相対変位が 0.2 mm に達し，各ボルトの分担摩擦力も小さいためと考えられる。

75mm-12 列-0.57 の場合，内側の相対変位が 0.2 mm に達した時，内側と外側の各 4 列のボルトまで，分担摩擦力がボルト 1 本あたりすべり耐力に達している。

以上の検討により，接触面の各ボルトの分担摩擦力の分布性状はボルト列数と密接に関係しており，ボルト列数が多い 12 列の場合，継手の中央部分に配置されたボルトの分担摩擦力は小さくなる。これはボルト列数が多い継手では，すべり発生時においてボルトの分担摩擦力がボルト 1 本あたりのすべり耐力に到達しないボルトがあることを意味し，その結果としてすべり係数が低下していると考えられる。

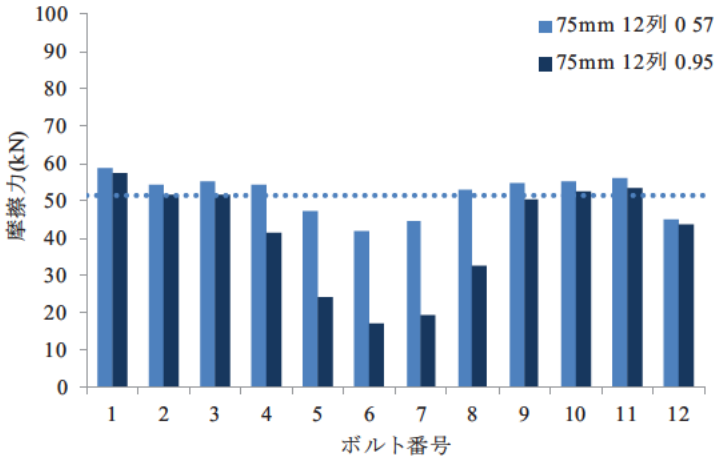


図-4.3.21　すべり時の各ボルト列の分担摩擦力

4.3.3　ボルト列数の影響

文献 28）では，継手の断面積が一定の条件のもと，ボルト列数がすべり耐力に与える影響について，議論している。ここでは，解析すべり/降伏耐力比 β_a と板厚を一定としてボルト列数がすべり挙動に与える影響を考察する。なお，解析すべり/降伏耐力比 β_a がすべり挙動に与える影響を排除するため，β_a を一定（0.57）のもと，母板厚に対し 32 mm，50 mm，75 mm の 3 種類を設定した。さらに，実際の設計での状況を想定し，板幅と板厚を一定とした場合についても，同様の影響を考察する。

解析すべり/降伏耐力比 β_a を 0.57 と一定とした板厚 32 mm の場合の解析ケースと解析結果のまとめを表-4.3.5 と表-4.3.6 に示す。同様に β_a が 0.57 で，板厚 50 mm の場合を表-4.3.7 と表-4.3.8 に，板厚 75 mm の場合を表-4.3.9 と表-4.3.10 にそれぞれ示す。さらに板幅を一定とし，板厚 75 mm とした場合を，表-4.3.11 と表-4.3.12 にそれぞれ示す。なお，4.3.2 項と同様に，解析の計算条件として摩擦係数に 0.5 を与えている。

表-4.3.5　解析ケース（β_a 一定，板厚 32mm）

解析ケース		32mm 3列	32mm 5列	32mm 8列	32mm 10列	32mm 12列	32mm 14列
ボルトM22（F10T）孔径24.5mm	ボルト本数	3	5	8	10	12	14
	導入軸力（kN/本）＊	208	210	209	210	209	200
母材　SM490Y	板厚（mm）	32	32	32	32	32	32
連結板　SM490Y	板厚（mm）	19	19	19	19	19	19
試験体幅（mm）		117	179	272	334	396	458
解析すべり/降伏耐力比 β_a		0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
摩擦係数		0 50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

＊目標導入軸力：205 kN

表-4.3.6　解析結果（β_a 一定，板厚 32mm）

解析ケース	32mm 3列	32mm 5列	32mm 8列	32mm 10列	32mm 12列	32mm 14列
すべり荷重（kN）	604	1,012	1,606	1,848	1,974	2,034
すべり係数	0.484	0.482	0.480	0.441	0.393	0.361

表-4.3.7　解析ケース（β_a 一定，板厚 50mm）

解析ケース		50mm 3列	50mm 5列	50mm 8列	50mm 10列	50mm 12列	50mm 14列
ボルトM22（F10T）孔径24.5mm	ボルト本数	3	5	8	10	12	14
	導入軸力（kN/本）＊	205	206	205	205	205	205
母材　SM490Y	板厚（mm）	50	50	50	50	50	50
連結板　SM490Y	板厚（mm）	26	26	26	26	26	26
試験体幅（mm）		84	124	183	223	262	302
解析すべり/降伏耐力比 β_a		0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
摩擦係数		0.50	0.50	0.50	0.50	0 50	0.50

＊目標導入軸力：205 kN

表-4.3.8　解析結果（β_a 一定，板厚 50mm）

解析ケース	50mm 3列	50mm 5列	50mm 8列	50mm 10列	50mm 12列	50mm 14列
すべり荷重（kN）	598	996	1,578	1,939	2,119	2,250
すべり係数	0.485	0.483	0.481	0.473	0.431	0.391

表-4.3.9　解析ケース（β_a一定，板厚 75mm）

解析ケース		75mm 3列	75mm 5列	75mm 8列	75mm 10列	75mm 12列	75mm 14列
ボルトM22（F10T）孔径24.5mm	ボルト本数	3	5	8	10	12	14
	導入軸力（kN/本）＊	200	201	204	203	206	205
母材　SM490Y	板厚（mm）	75	75	75	75	75	75
連結板 SM490Y	板厚（mm）	38	38	38	38	38	38
試験体幅（mm）		64	90.6	130	156.6	190	209
解析すべり/降伏耐力比 β_a		0.57	0.57	0.57	0.57	0.55	0.57
摩擦係数		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

＊目標導入軸力：205 kN

表-4.3.10　解析結果（β_a一定，板厚 75mm）

解析ケース	75mm 3列	75mm 5列	75mm 8列	75mm 10列	75mm 12列	75mm 14列
すべり荷重（kN）	581	972	1,575	1,950	2,268	2,383
すべり係数	0.485	0.484	0.482	0.482	0.459	0.419

表-4.3.11　解析ケース（板幅 120mm 一定，板厚 75mm）

解析ケース		幅120mm 3列	幅120mm 8列	幅120mm 12列
ボルトM22（F10T）孔径24.5mm	ボルト本数	3	8	12
	導入軸力（kN/本）＊	200	202	214
母材　SM490Y	板厚（mm）	75	75	75
連結板 SM490Y	板厚（mm）	38	38	38
試験体幅（mm）		120	120	120
解析すべり/降伏耐力比 β_a		0.57	0.63	0.95
摩擦係数		0.50	0.50	0.50

＊目標導入軸力：205 kN

表-4.3.12　解析結果（板幅 120mm 一定，板厚 75mm）

解析ケース	幅120mm 3列	幅120mm 8列	幅120mm 12列
すべり荷重（kN）	594	1,554	1,900
すべり係数	0.492	0.480	0.370

すべり係数とボルト列数の関係を図-4.3.22 に示す。解析すべり/降伏耐力比β_aを一定とした板厚 32 mm の場合は，3，5，8 列のすべり係数はほぼ一定である。一方，10 列，12 列と 14 列のすべり係数は，これらに比べて約 9 %，19 %，25 %それぞれ低下した。板厚 50 mm では，3，5，8，10 列のすべり係数はほぼ一定であるが，12 列と 14 列のすべり係数はこれらに比べて約 9 %，19 %それぞれ低下した。板厚 75 mm では，3，5，8，10 列のすべり係数はほぼ一致しているが，12 列と 14 列のすべり係数はこれらに比べて約 5 %，13 %それぞれ低下した。また，板幅を一定とした場合，3 列と比べて，8 列のすべり係数が約 3 %低下し，12 列のすべり係数が約 25 %低下した。このようにすべり係数が大きく低下したのは，板厚・板幅をともに一定としてボルト列数のみを増した結果，12 列のケースの解析すべり/降伏耐力比β_aが 0.95 となり，降伏先行型に近づいたためと考えられる。

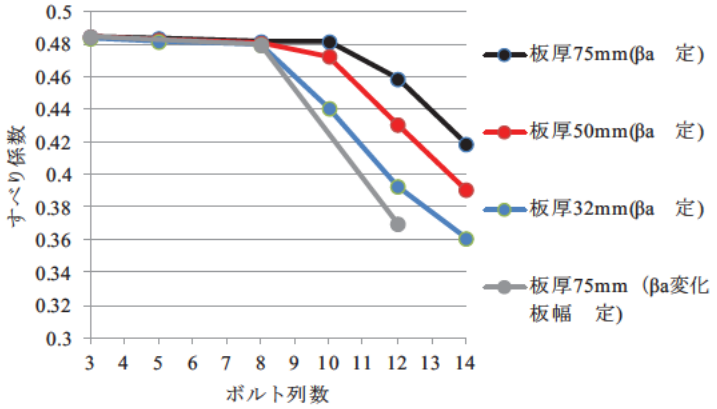


図-4.3.22　板厚の違いによるすべり係数とボルト列数の関係

（a）板厚 32 mm の場合

図-4.3.23 に解析ケース「32mm-3 列」，「32mm-5 列」，「32mm-8 列」，「32mm-10 列」，「32mm-12 列」の荷重-相対変位関係を示す。図の縦軸は引張荷重をすべり荷重で無次元化した値 P/P_{SL} を，横軸は母板と連結板の内側相対変位をそれぞれ示す。図中の点線はすべり発生定義の基準の一つである相対変位 0.2 mm を示す。

図より，3，5，8 列の場合，最大荷重が発生した時点で，すべり発生と決定され，10，12 列の場合，内側相対変位が 0.2 mm に達した時点ですべり発生と決定される。そのため，解析ケース 32mm-10 列と 32mm-12 列のすべり係数は低くなっている。

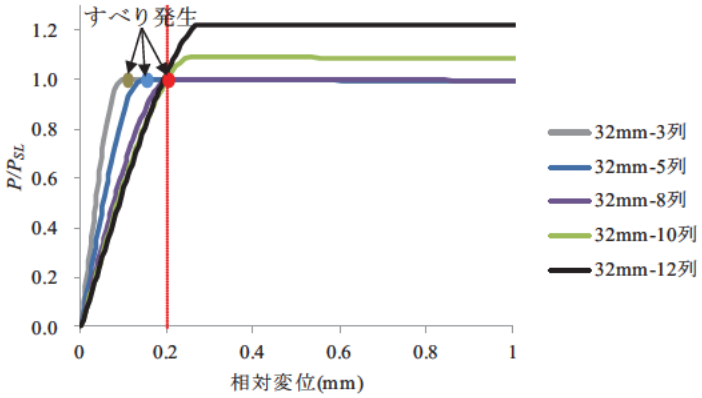
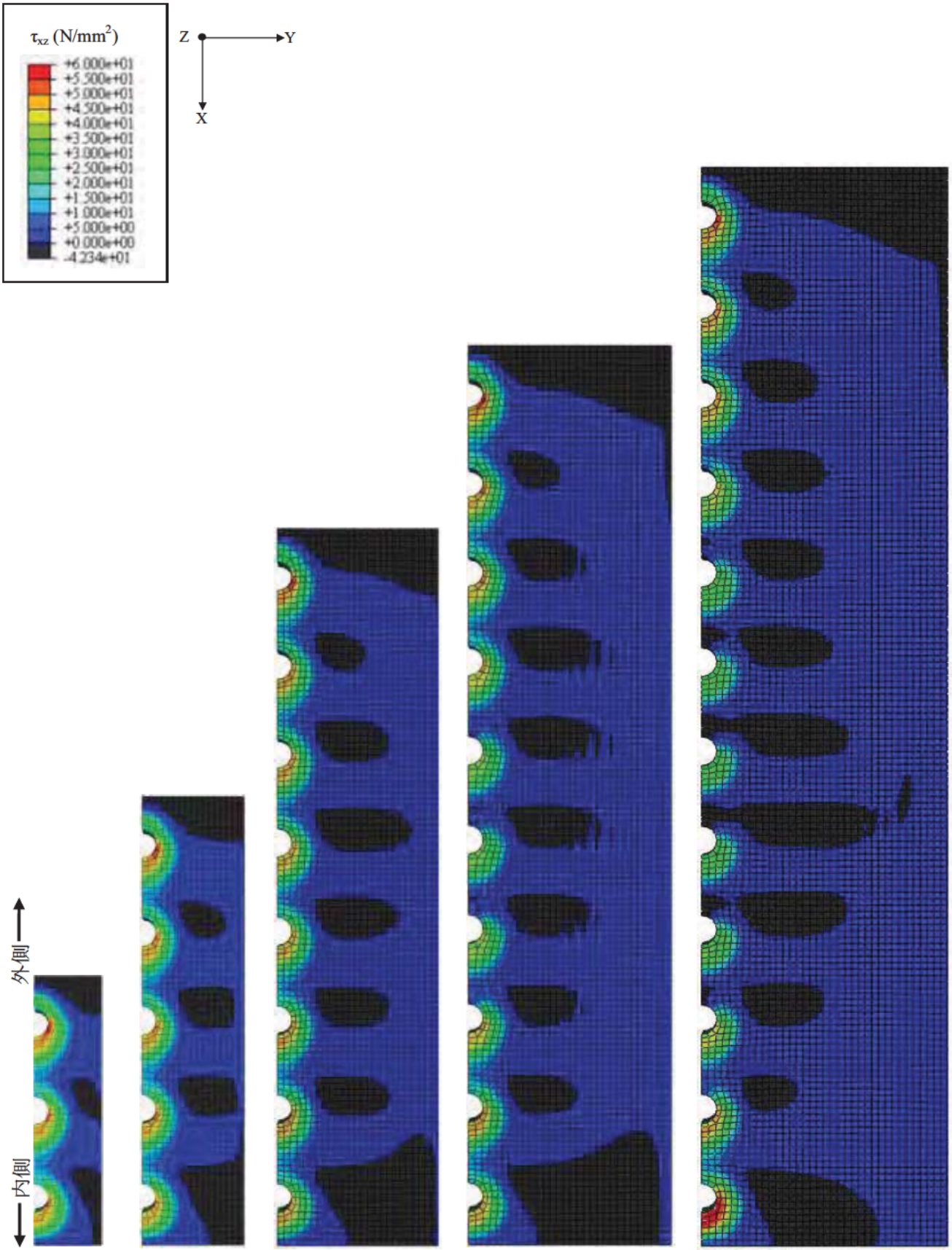


図-4.3.23 荷重-相対変位関係

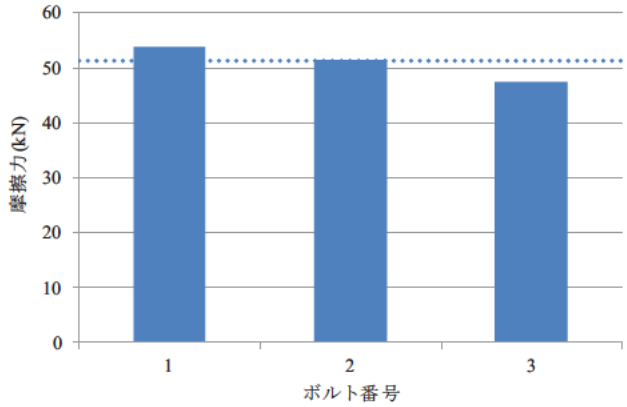
図-4.3.24 にすべり時の連結板のせん断応力 τ_{xz} の分布を示す。なお，τ_{xz} は接触面にはたらく軸方向のせん断応力を示す。これは摩擦力の分布に相当する。図-4.3.25 にすべり時のボルト 1 本当たりの分担摩擦力の分布を示す。図中の点線は，式（4.2.3）に示すボルト 1 本当たりのすべり耐力を示す。

図-4.3.24 より，表-4.3.6 で示したすべり係数がほぼ同じである 3，5，8 列は，内側，中央，外側のせん断応力分布がほぼ同じであり，すべり係数が低下する 10，12 列は，ボルト孔近くのせん断応力の大きさをみると，内側と外側と比べ，中央のせん断応力が小さく，各ボルトが分担する摩擦力が不均一になっている。図-4.3.25 より，3，5，8 列の場合，すべり発生時に，ほぼすべてのボルト列で分担摩擦力がボルト 1 本あたりすべり耐力に近い状態になっていることがわかる。

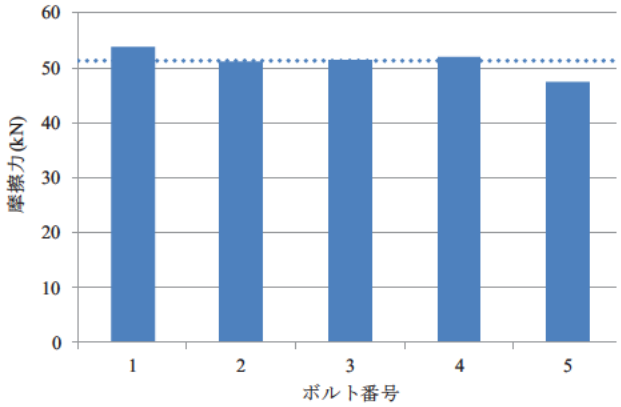


(a) 32mm-3 列 (b) 32mm-5 列 (c) 32mm-8 列 (d) 32mm-10 列 (e) 32mm-12 列

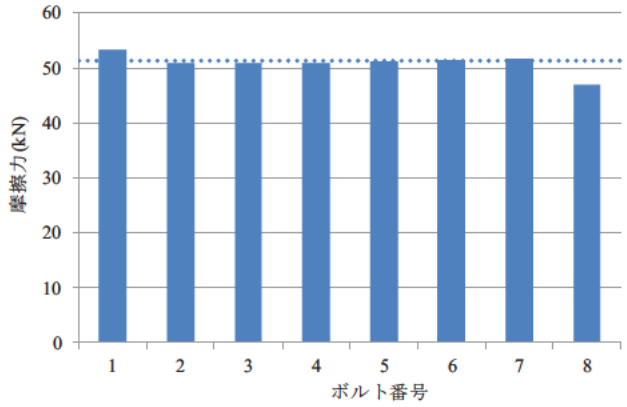
図-4.3.24 すべり時のせん断応力 τ_{xz} の分布（連結板接触面）



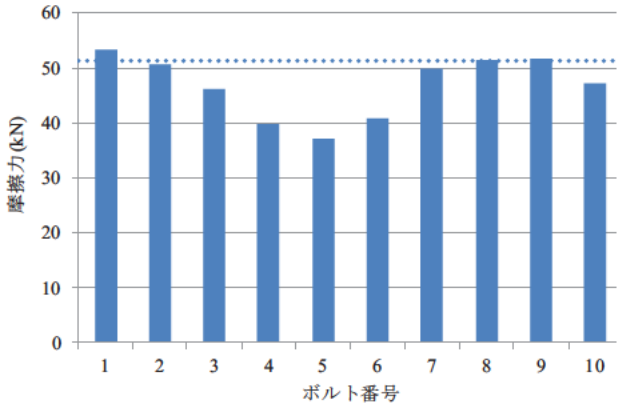
(a) 32mm-3 列



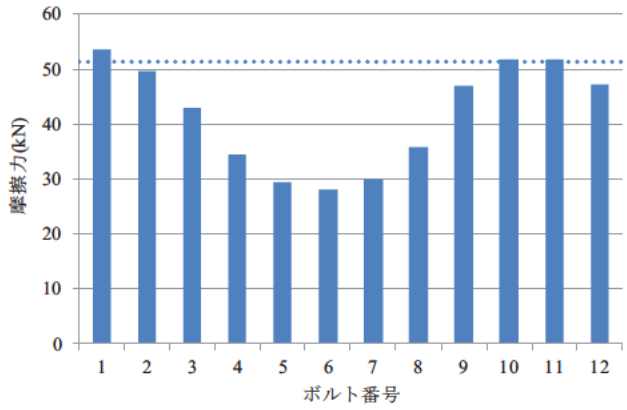
(b) 32mm-5 列



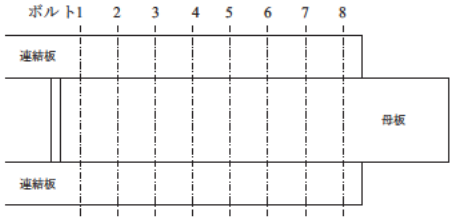
(c) 32mm-8 列



(d) 32mm-10 列



(e) 32mm-12 列



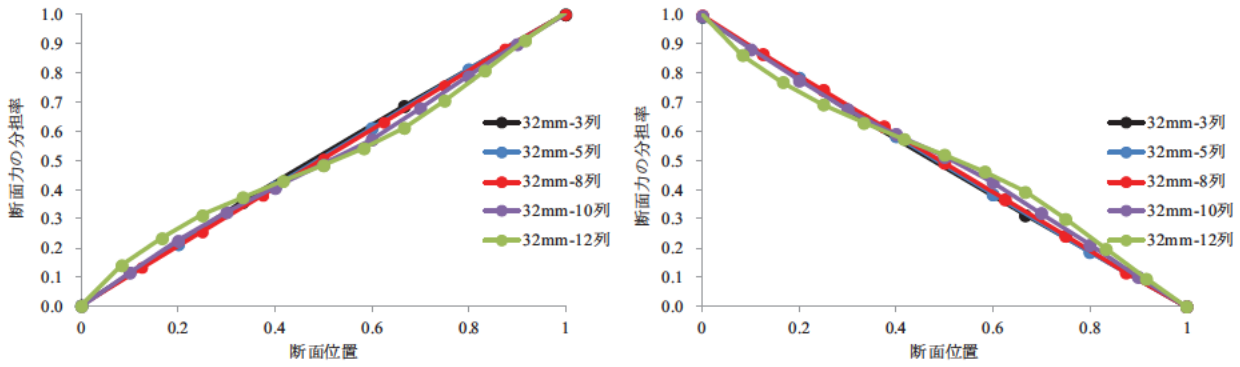
(f) ボルト番号とその位置（8 列の場合）

図-4.3.25　すべり時の各ボルト列の分担摩擦力

一方，10 列の場合，すべり時の中央列（ボルト 4，5，6）の分担摩擦力はボルト 1 本あたりすべり耐力の 70 %程度。12 列の場合それの 55 %程度となっている。これは，ボルト列数の増加に伴い，中央列の分担摩擦力が小さくなっていることを示している。

図-4.3.26 はすべり時の連結板と母板の各断面位置による作用断面力を，断面位置を無次元化して整理したものである。図-4.3.27 に母板と連結板の無次元化した断面位置を示す。断面位置は，ボルト列数の違いで継手の長さが異なるため，内側が 0，外側が 1 となるように無次元化している。ある位置の作用断面力と隣の作用断面力の差が，その間にあるボルト 1 本当たりの分担摩擦力となる。ある位置の母板断面の作用断面力（図-4.3.26（a））と，同じ位置の連結版のそれ（図（b））を加えると，引張荷重と等しくなるため，図で示している値を合計すると 1 となる。各ボルトの分担する摩擦力が均一であれば，すべり係数と摩擦係数の差が小さくなり，作用断面力の分布は線形に近づく。反対に，多列ボルトの場合のように，中央ボルトの分担摩擦力が低く，各ボルトの摩擦力が均一でない場合は，作用断面力の分布が線形にならず曲線になり，すべり係数と摩擦係数の差が大きくなっている。なお，図-4.3.25 と図-4.3.26 の関係は，前者が各ボルト一本当たりの分担摩擦力を示すのに対して，後者は，内側，あるいは外側から分担摩擦力の累積値を示したものになる。

図-4.3.26 より，10，12 列の作用断面力分布と比べて，3，5，8 列では，その変化が線形に近くなっていることがわかる。



（a）母板断面（内側-外側）　　（b）連結板断面（内側-外側）

図-4.3.26　すべり時の作用断面力の分布

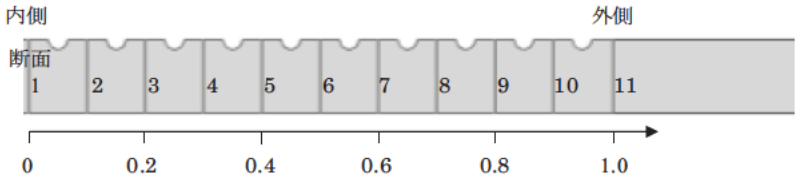


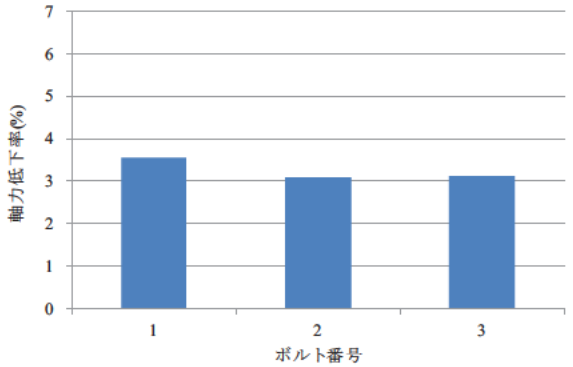
図-4.3.27 母板と連結板の断面位置と無次元化座標（ボルト列数 10 列の場合）

図-4.3.28 にすべり時の各ボルトの軸力低下率を示す。ボルト番号とボルト位置は図-4.3.25（f）と同じである。図-4.3.28 の縦軸は軸力低下率を，横軸はボルト列数を示している。

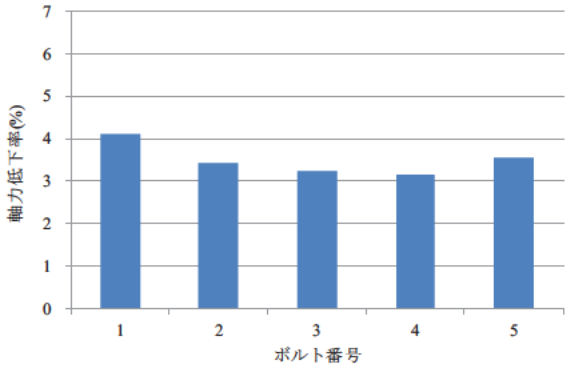
図-4.3.28 より，3 列の場合，すべてのボルトの軸力低下率がほぼ同じとなっている。一方,他のケースでは，内側と外側のボルトの軸力低下率が高くなり，中央部のボルトの軸力低下率が低い。すなわち，ボルト列数の増加に伴い，内側と外側ボルトの軸力低下率は高くなり，中央のボルトの軸力低下

率が低くなっている。内側と，外側のボルトの軸力低下率は，ボルト列数が変化しても変わらない。特に，ボルト列数が多い 10，12 列では，中央部のボルト軸力低下率は両側のボルト軸力低下率の 60 %程度である。これは，中央に比べて連結板内側と母板外側にかかる引張荷重が大きくなるため，ポアソン効果による板厚減少が大きくなり，ボルト軸力が低下したと考えられる。

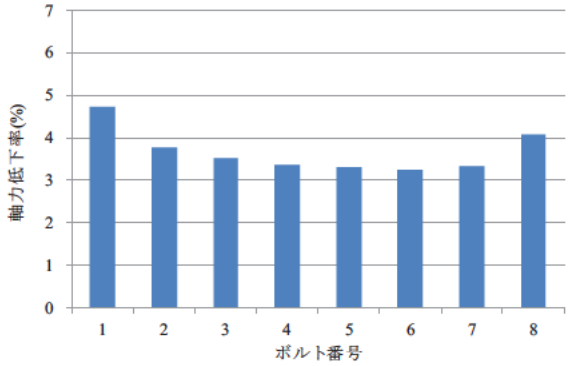
ボルト軸力の低下は，接触面で伝達可能な摩擦力の低下に影響し，すべり係数の低下につながる。ボルト間の軸力低下率の差はわずかであり，中央のボルト列の低下率は低いため，すべり係数への影響は小さい。むしろ，図-4.3.25（d），（e）で示したようなすべり発生時のボルト間の分担摩擦力の不均一がすべり係数の低下に関連性が高いといえる。



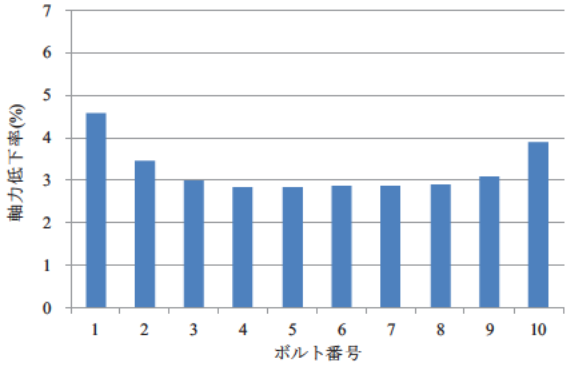
（a）32mm-3 列



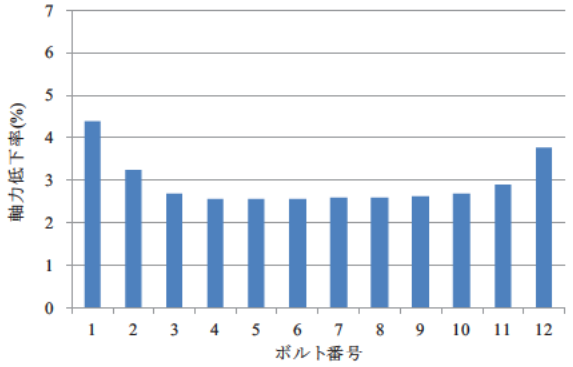
（b）32mm-5 列



（c）32mm-8 列



（d）32mm-10 列



（e）32mm-12 列

図-4.3.28　すべり時のボルト軸力低下率

(b) 板厚 50 mm の場合

図-4.3.29 に解析ケース「50mm-3 列」,「50mm-5 列」,「50mm-8 列」,「50mm-10 列」,「50mm-12 列」の荷重-相対変位関係を示す。

図より，3，5，8，10 列の場合，最大荷重の発生した時点がすべり発生と決定され，12 列の場合，内側相対変位が 0.2 mm に達した時点ですべり発生と決定される。そのため，50mm-12 列のすべり係数が低くなっている。

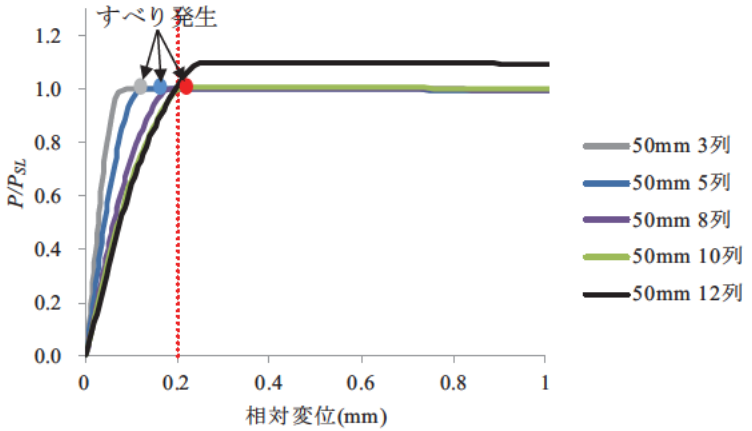
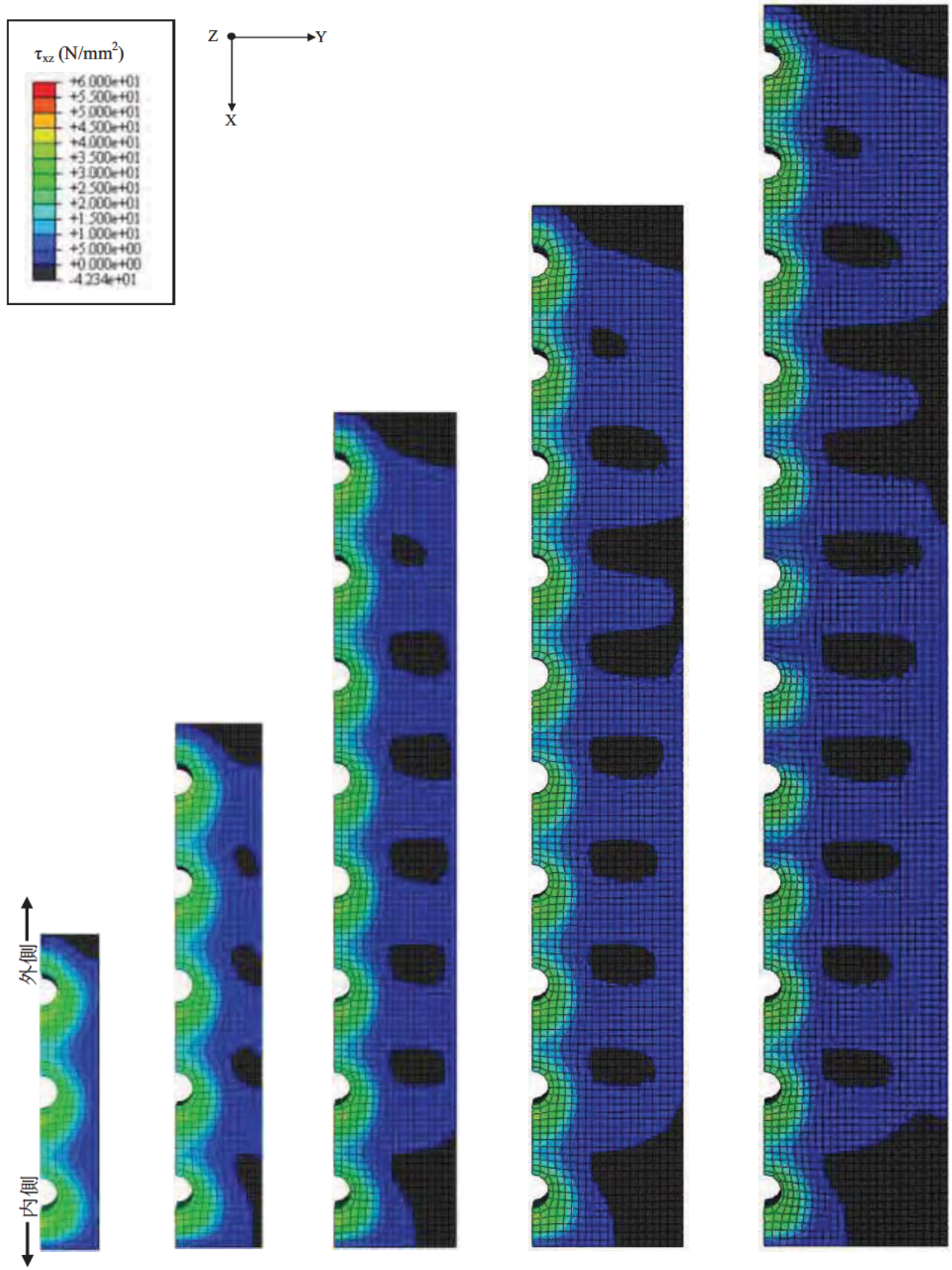


図-4.3.29 荷重-相対変位関係

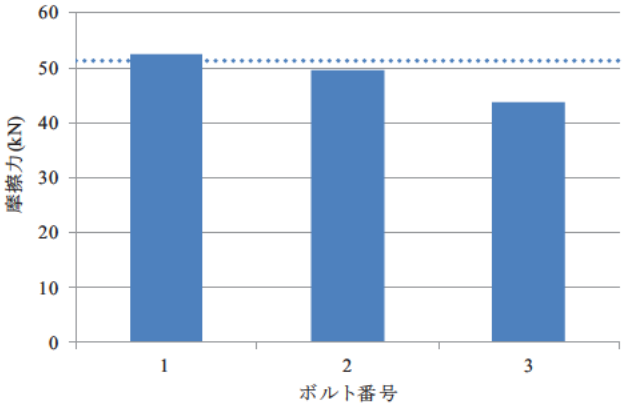
図-4.3.30 にすべり時の連結板のせん断応力 τ_{xz} の分布図を，図-4.3.31 にすべり時の各ボルトの分担摩擦力の分布図を示す。図-4.3.32 は，図-4.3.26 と同様にすべり時の連結板と母板の各断面位置による作用断面力の変化を整理したものである。母板と連結板の断面位置を図-4.3.27 に示す。図-4.3.33 にすべり時の各ボルトの軸力低下率を示す。

図-4.3.30 より，表-4.3.8 で示したすべり係数がほとんど変わらない 3，5，8，10 列は，内側，中央，外側のせん断応力分布がほぼ同じであり，すべり係数が低下する 12 列は，内側，および外側と比べ，中央のボルト孔近傍のせん断応力が小さくなっている。図-4.3.31 より，3，5，8，10 列の場合，すべり発生時に，ほぼすべてのボルト列で分担摩擦力がボルト 1 本あたりすべり耐力に近い状態になっていることがわかる。一方，12 列では，中央列の分担摩擦力がボルト 1 本あたりすべり耐力の 60 %程度にとどまっている。 図-4.3.32 より，12 列の作用断面力分布と比べて，3，5，8，10 列の場合，その変化がほぼ線形であることがわかる。図-4.3.33 より，3，5，8 列のケースでは，接合部内側のボルトの軸力低下率が高くなり，中央と外側のボルトの軸力低下率が低いことがわかる。また，10 列と 12 列では，接合部内側と外側のボルトの軸力低下率が中央より大きくなっている。これは， 32 mm の場合と同様にボルト列数の増加に伴い，連結板の内側，および母板の外側にかかる引張荷重が大きくなるため，板厚減少が大きく，ボルト軸力が低下したと考えられる。

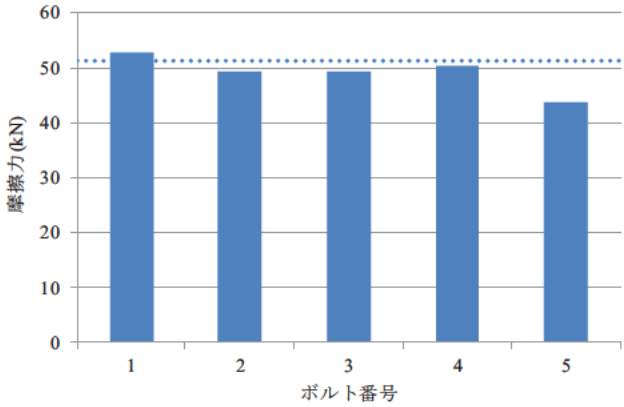


(a) 50mm-3 列　(b) 50mm-5 列　(c) 50mm-8 列　(d) 50mm-10 列　(e) 50mm-12 列

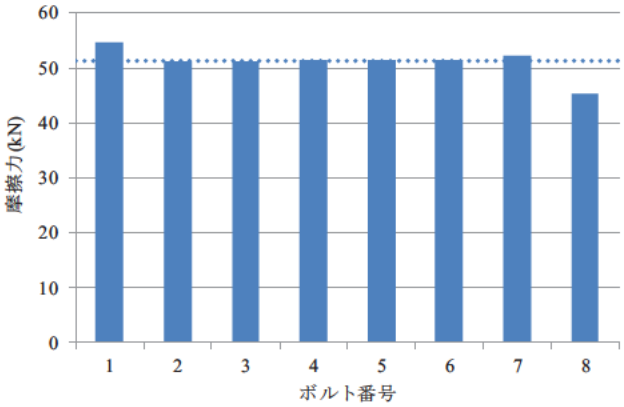
図-4.3.30　すべり時のせん断応力 τ_{xz} の分布（連結板接触面）



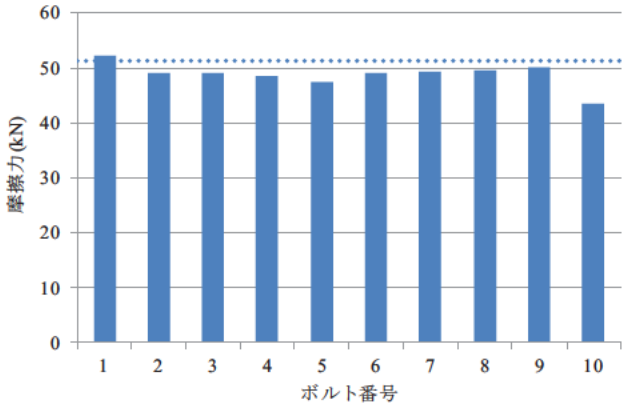
(a) 50mm-3 列



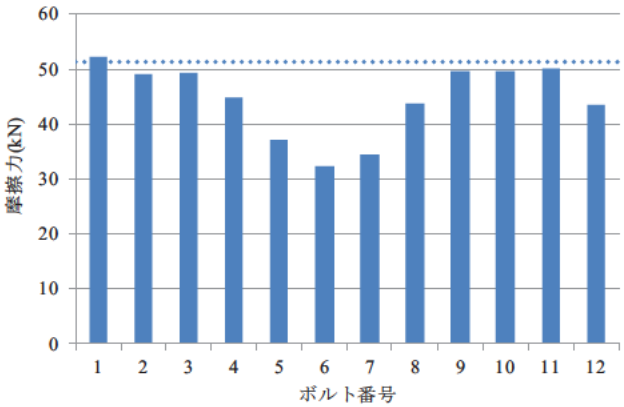
(b) 50mm-5 列



(c) 50mm-8 列

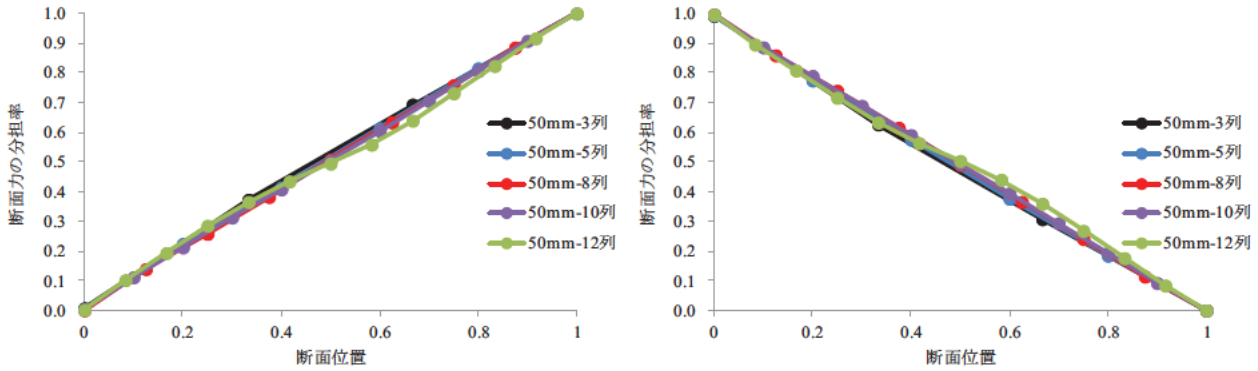


(d) 50mm-10 列



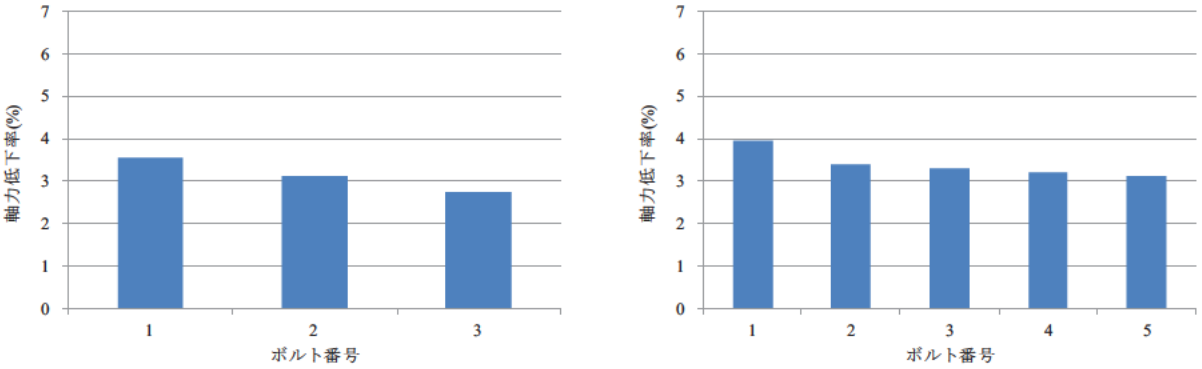
(e) 50mm-12 列

図-4.3.31　すべり時の各ボルト列の分担摩擦力

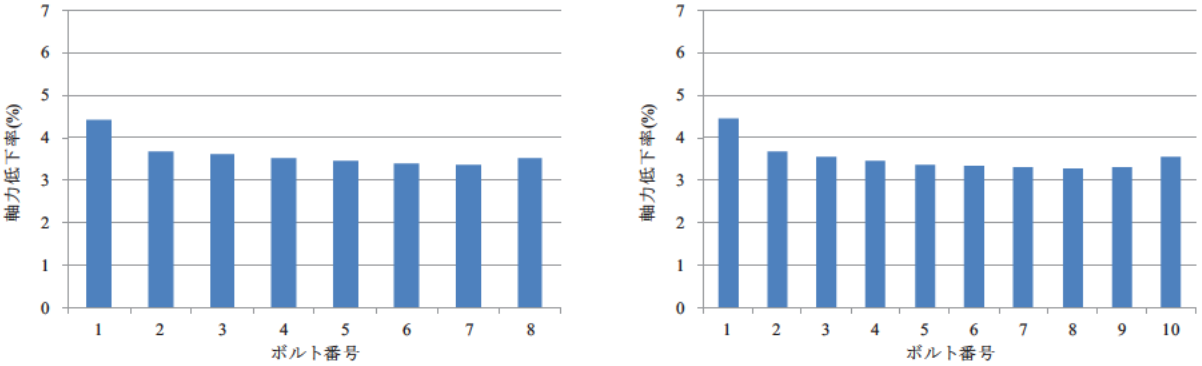


(a) 母板断面（内側-外側）　　(b) 連結板断面（内側-外側）

図-4.3.32　すべり時の作用断面力分布

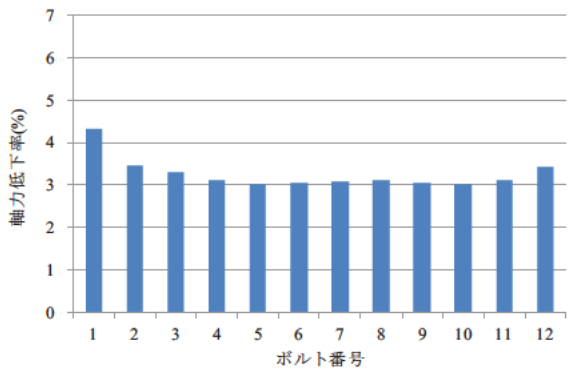


(a) 50mm-3 列　　(b) 50mm-5 列



(c) 50mm-8 列　　(d) 50mm-10 列

図-4.3.33　すべり時のボルト軸力低下率



（e）50mm-12 列

図-4.3.33　すべり時のボルト軸力低下率（続き）

（c）板厚 75 ㎜ の場合

図-4.3.34 に解析ケース「75mm-3 列」，「75mm-5 列」，「75mm-8 列」，「75mm-10 列」，「75mm-12 列」の荷重-相対変位関係を示す。

図より，3，5，8，10 列の場合は，最大荷重が発生した時点で，すべり発生と決定され，12 列の場合，内側相対変位が 0.2 mm に達した時点ですべり発生と決定される。そのため，75mm-12 列のすべり係数が低くなっていることがわかる。

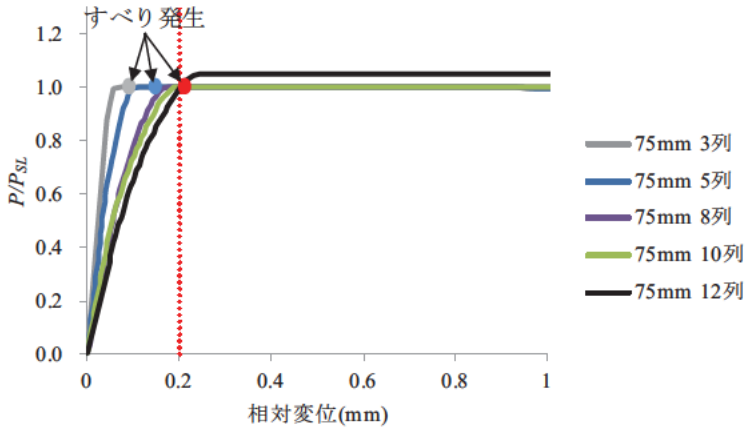
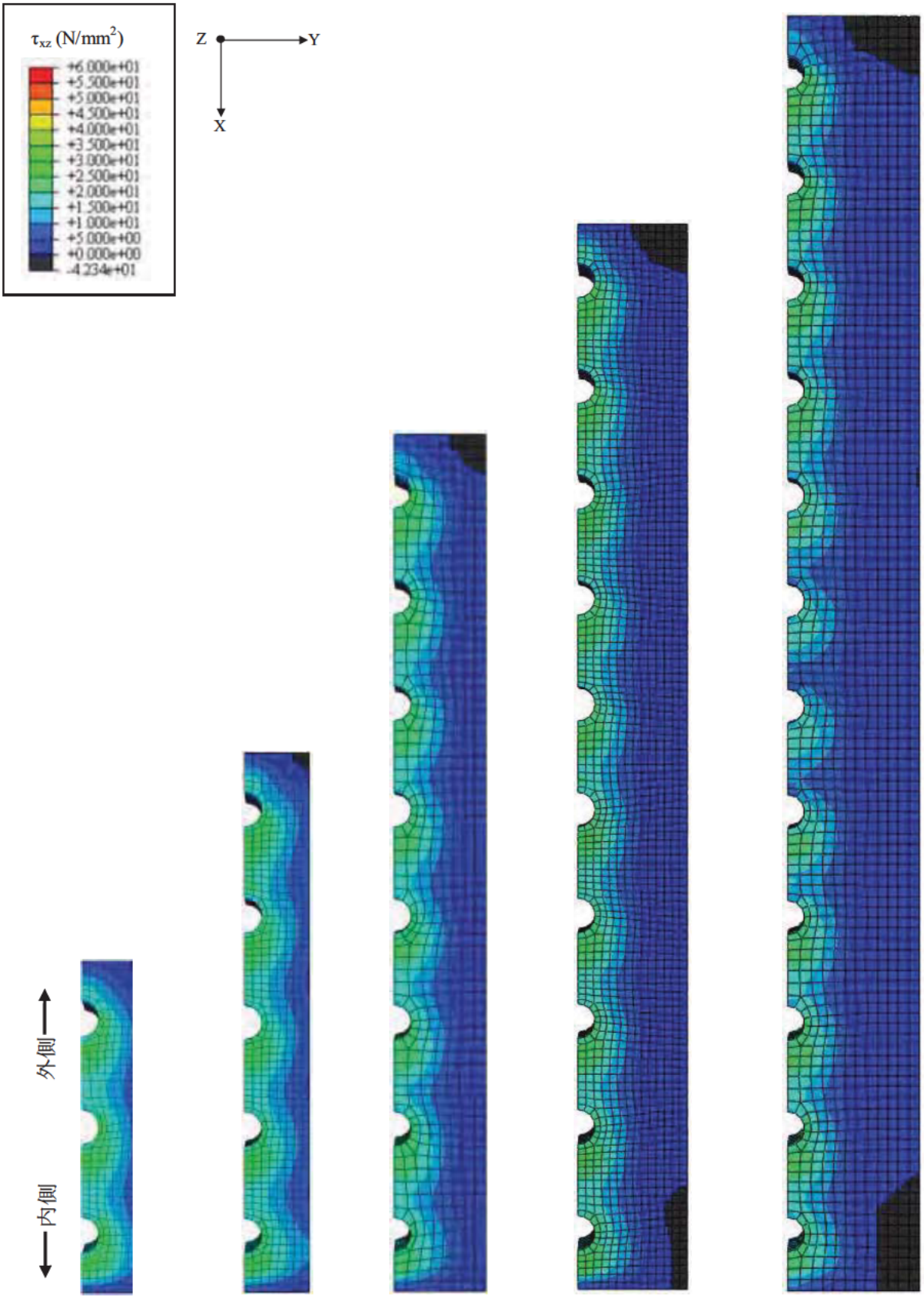


図-4.3.34　荷重-相対変位関係

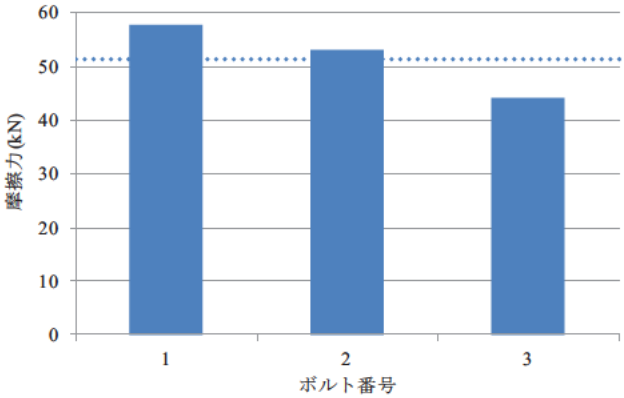
図-4.3.35 にすべり時の連結板のせん断応力 τ_{xz} の分布を，図-4.3.36 にすべり時の各ボルトの分担摩擦力の分布を示す。

図-4.3.35 より，表-4.3.10 で示したすべり係数がほとんど変わらない 3，5，8，10 列は，内側，中央，外側のせん断応力分布がほぼ同じであり，すべり係数が低下する 12 列は，ボルト孔近くの内側と外側と比べ，中央のせん断応力が小さくなっている。図-4.3.36 より，3，5，8，10 列の場合，すべり発生時に，ほぼすべてのボルト列で分担摩擦力がボルト 1 本あたりすべり耐力に近い状態になっていることがわかる。一方，12 列では，中央列の分担摩擦力がボルト 1 本あたりすべり耐力の 80 %程度になっている。

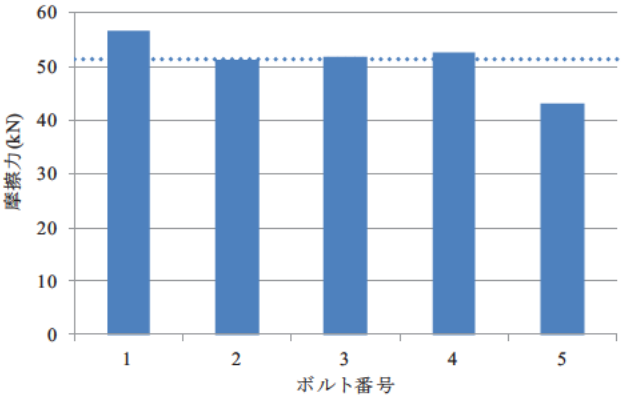


(a) 75mm-3 列　(b) 75mm-5 列　(c) 75mm-8 列　(d) 75mm-10 列　(e) 75mm-12 列

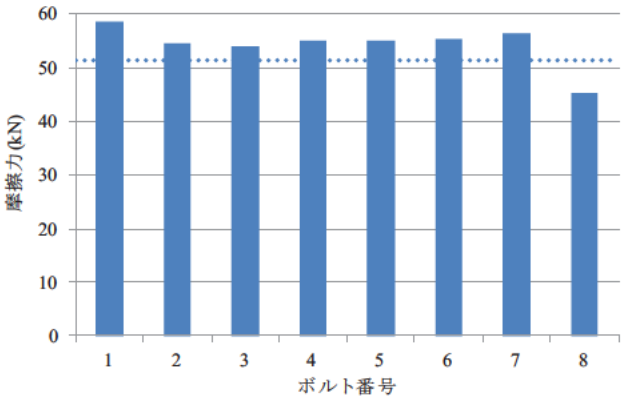
図-4.3.35　すべり時のせん断応力 τ_{xz} の分布（連結板接触面）



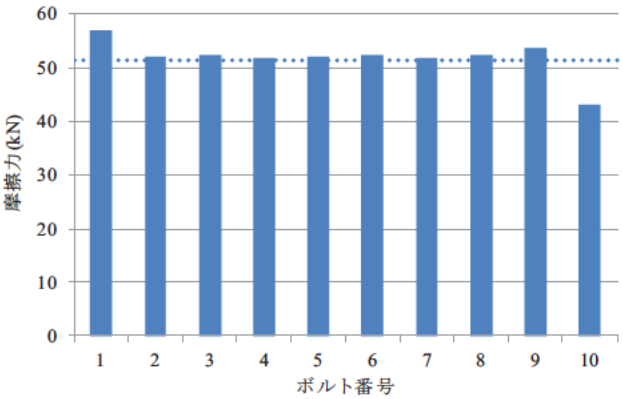
(a) 75mm-3 列



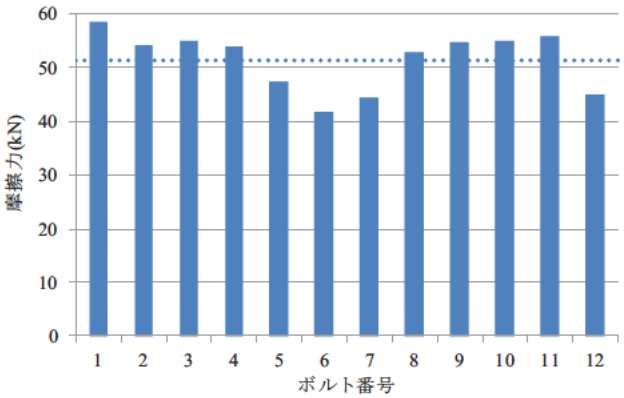
(b) 75mm-5 列



(c) 75mm-8 列



(d) 75mm-10 列



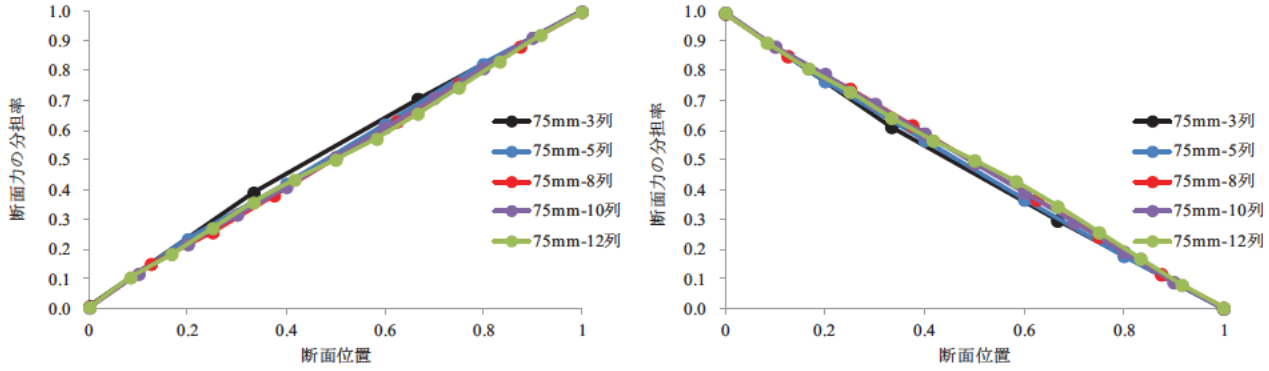
(e) 75mm-12 列

図-4.3.36 すべり時の各ボルトの分担摩擦力

図-4.3.37 に図-4.3.26 と同様にすべり時の連結板と母板の各断面位置による作用断面力の変化を整理したものを示す。断面位置を図-4.3.27 に示す。図-4.3.38 にすべり時の各ボルトの軸力低下率を示す。

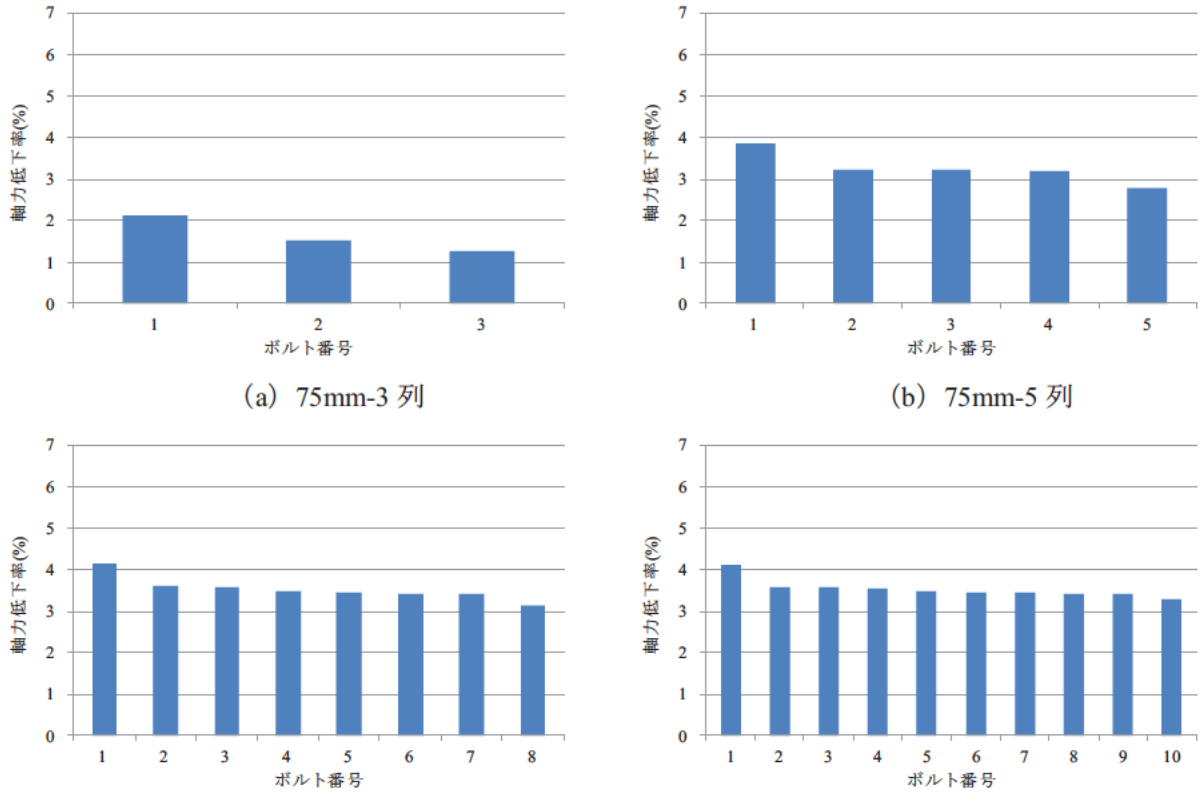
図-4.3.37 より，12 列の作用断面力の変化と比べて， 5，8，10 列の場合，その変化がほぼ線形となっている。図-4.3.38 より，各ケースとも，内側のボルトの軸力低下率が高くなり，中央と外側のボルトの

軸力低下率が低くなっている。板厚 32 mm と比べ，板厚 50 mm と 75 mm の外側ボルトの軸力低下率が小さくなる原因は，母板が厚いほど荷重偏心の影響が大きくなり，外側の摩擦力が小さく，母板の伸びも内側と比べ小さくなるため，ポアソン効果による板厚減少が小さいことが影響していると考えられる。なお，内側ボルトの軸力低下は連結板の板厚減少が，外側ボルトの軸力低下は母板の板厚減少が主に影響しているものと考えられる。



（a）母板断面（内側-外側）　　（b）連結板断面（内側-外側）

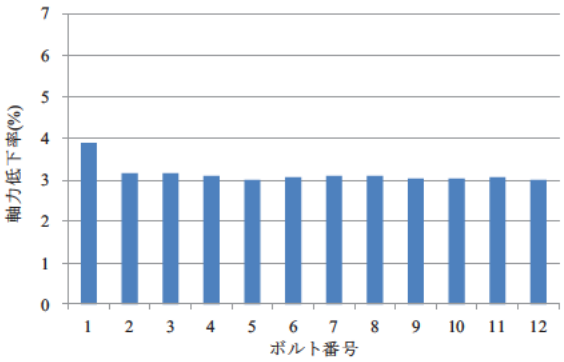
図-4.3.37　すべり時の作用断面力の分布



（a）75mm-3 列　　（b）75mm-5 列

（c）75mm-8 列　　（d）75mm-10 列

図-4.3.38　すべり時のボルト軸力低下率



（e）75mm-12 列

図-4.3.38　すべり時のボルト軸力低下率（続き）

（d）板厚 75 ㎜ の場合（板幅一定）

図-4.3.39 に板厚と板幅を一定としてボルト列数のみ変化させた解析ケース「幅 120mm-3 列」,「幅 120mm -8 列」,「幅 120mm -12 列」の荷重-相対変位関係を示す。

図より，3 列と 8 列は最大荷重が発生した時点で，すべり発生と決定され，12 列の場合は内側相対変位が 0.2 mm に達した時点ですべり発生と決定される。12 列の場合，すべり荷重と最大荷重の差が大きいことがわかる。これは，幅 120mm-12 列の解析すべり/降伏耐力比 β_a が 0.95 となり，荷重が低い段階で板の局部降伏が生じ，引張荷重が最大荷重に対し低いレベルで，相対変位が 0.2 mm に達したためと考えられる。

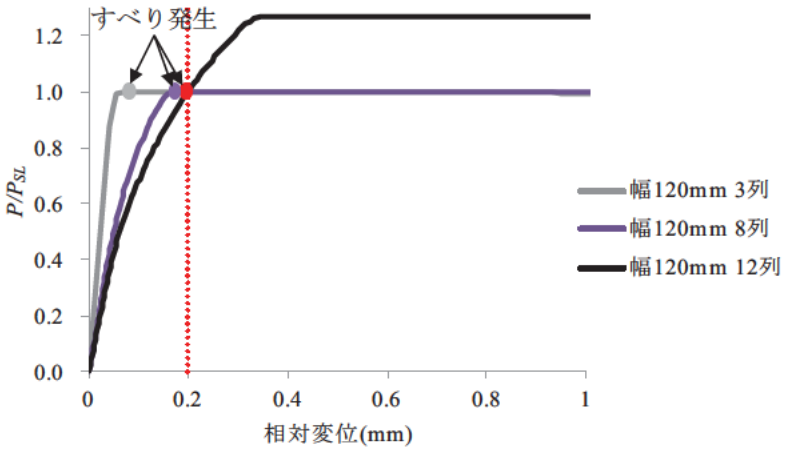
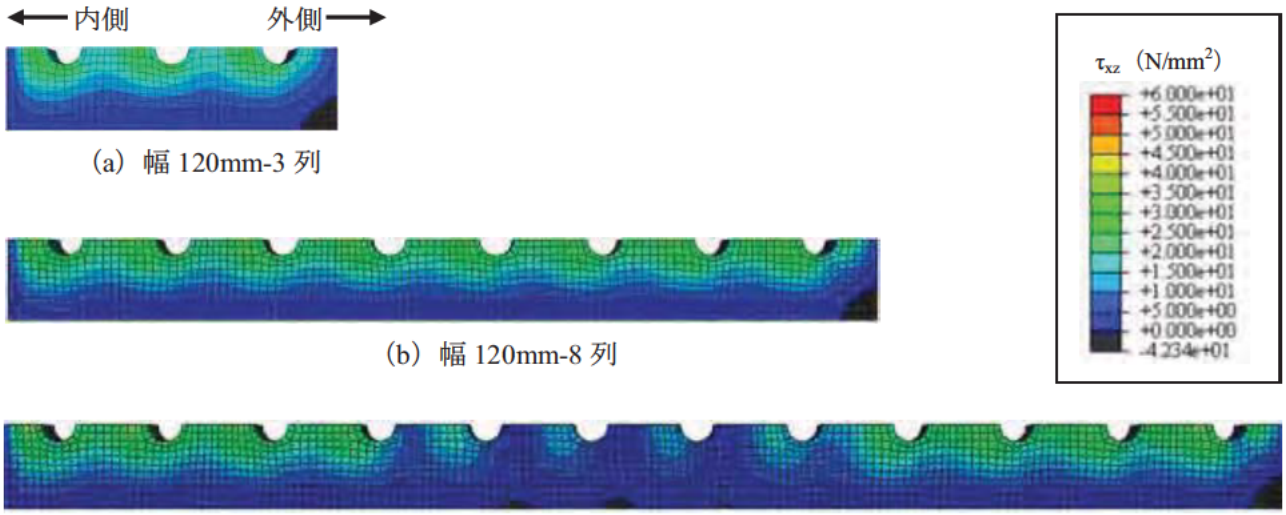


図-4.3.39　荷重-相対変位関係

図-4.3.40 にすべり時の連結板のせん断応力 τ_{xz} のコンター図を示す。

ボルト列数が 3 列と 8 列の場合では，内側，中央，外側のせん断応力分布がほぼ同じであり，ボルト列数が多い 12 列では，内側と外側と比べ，中央のせん断応力が小さくなっている。また，図（c）の 12 列は，解析すべり/降伏耐力比 β_a が 0.95 で降伏先行型に近く，図-4.3.35（e）に示した β_a が 0.57 の場合より接触面の中央部のせん断応力が低くなっている。したがって，ボルト列数が 12 列の場合，β_a の増加に伴い，摩擦力による接触面での荷重伝達が効率的でない領域が増加していると考えられる。



(a) 幅 120mm-3 列

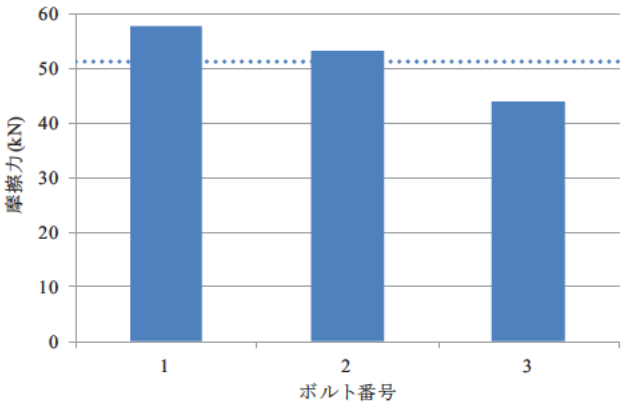
(b) 幅 120mm-8 列

(c) 幅 120mm-12 列

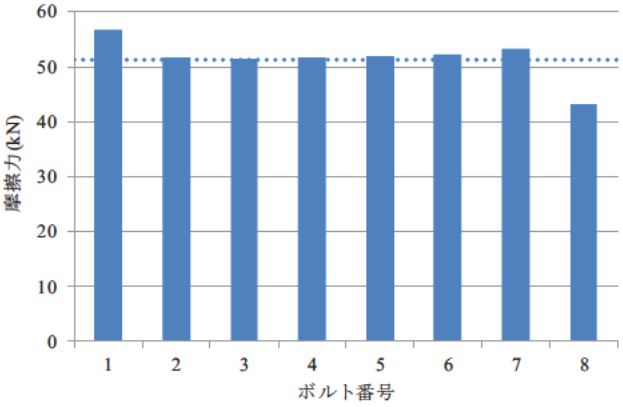
図-4.3.40　すべり時のせん断応力 τ_{xz} の分布（連結板接触面）

図-4.3.41 にすべり時の各ボルトの分担摩擦力を示す。図-4.3.42 は，図-4.3.26 と同様にすべり時の連結板と母板の各断面位置による作用断面力の変化を整理したものである。断面位置は図-4.3.27 に示す。図-4.3.43 に各ボルトの軸力低下率を示す。

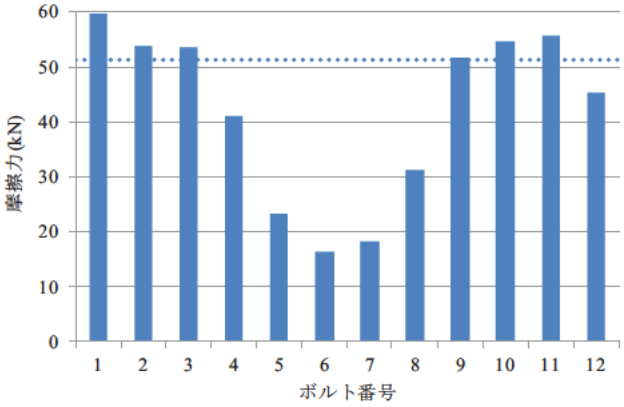
図-4.3.41 より，3 列と 8 列の場合，すべり発生時に，ほぼすべての列で分担摩擦力がすべり耐力に近い状態になっている。一方，12 列では，中央列の分担摩擦力がすべり耐力の 30 %になっていることがわかる。図-4.3.42 より，12 列の作用断面力分布は，各ボルトの分担摩擦力が均一でないため，直線にはなっていない。図-4.3.43 より，各ケースとも，接合部の内側（ボルト番号 1 側）のボルトの軸力低下率が高いことがわかる。一方，ボルト列数の増加に伴い，ボルトの軸力低下率が大きくなっている。これは，板幅を一定とした場合，ボルト列数の増加に伴い，解析すべり/降伏耐力比 β_a が大きくなるため，母板・連結板に作用する応力が高くなり，ボルト軸力が低下したものと考えられる。



(a) 幅 120mm 3 列

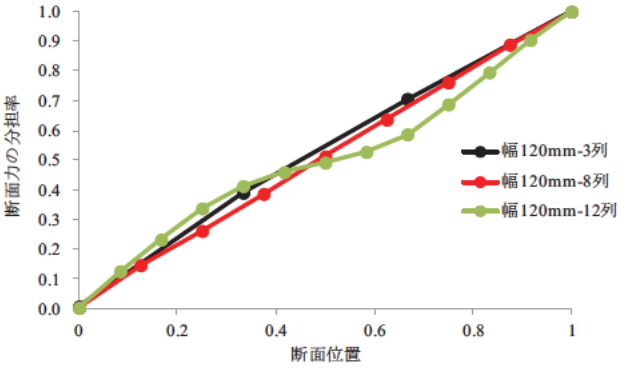


(b) 幅 120mm 8 列

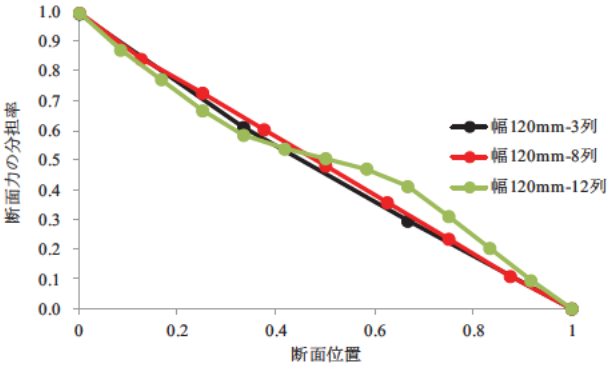


(c) 幅 120mm 12 列

図-4.3.41　すべり時の各ボルトの分担摩擦力

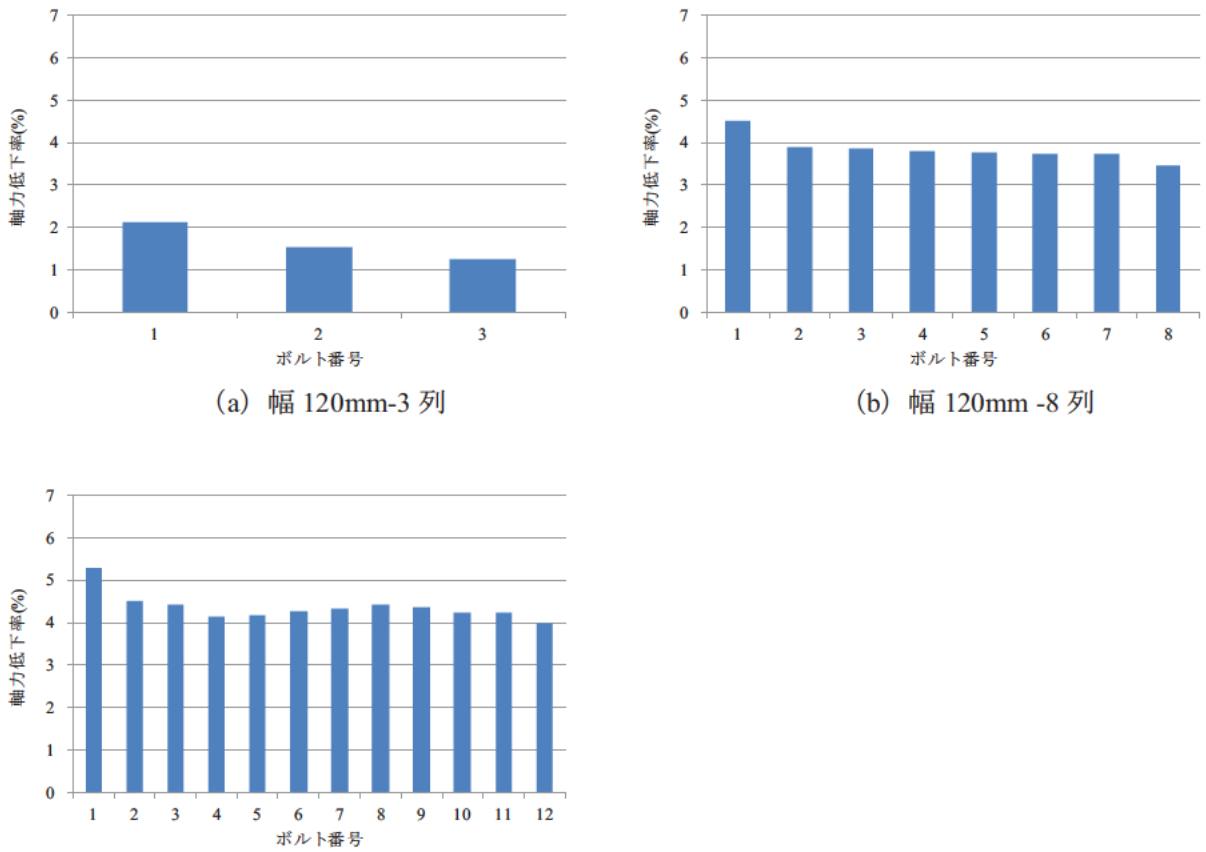


(a) 母板断面（内側-外側）



(b) 連結板断面（内側-外側）

図-4.3.42 すべり時の作用断面力の分布



(a) 幅 120mm-3 列

(b) 幅 120mm -8 列

(c) 幅 120mm -12 列

図-4.3.43　すべり時のボルト軸力低下率

以上の検討により，すべり/降伏耐力比 β を一定，すなわち母板の純断面積を一定として，ボルト列数を 3 列，5 列，8 列，10 列，12 列と設定し，ボルト列数がすべり挙動に与える影響を検討した。その結果，ボルト列数が増えるとすべり係数が低下しないボルト列数の範囲とボルト列数が増加するとすべり係数が低下するボルト列数の範囲が存在することを示した。また，板厚が小さいほど，ボルト列数の増加に伴うすべり係数の低下がみられた。すべり係数が低下する原因は，上記と同様であり，継手中央に配置されたボルト列の分担摩擦力は，ボルト列数が多く，板厚が薄いほど小さくなる結果となった。

4.3.4　板厚・板幅の影響

母板，および連結板の断面形状がすべり係数に与える影響を調べるために，解析すべり/降伏耐力比 β_a とボルト列数を一定とし，板厚，板幅を変化させた場合の解析を行い，すべり係数の低下とすべり挙動に与える影響を考察する。表-4.3.13 に解析ケースを示す。解析ケースでは，ボルト列数を 5，10，12 列で一定とし，それぞれの場合において断面形状を変化させたケースを設定した。ボルト列数が 5 列の場合の解析ケースを表（a）に，10 列の場合を表（b）に，12 列の場合を表（c）に示す。また，解析すべり/降伏耐力比 β_a に加え母板の板厚をそろえて，板幅を変化させた場合の解析ケースを表（d）に示す。表-4.3.14 に解析結果を示す。

表-4.3.13　解析ケース

（a）β_a 一定，ボルト 5 列

解析ケース		32mm -5列	50mm -5列	75mm -5列
ボルトM22（F10T） 孔径24.5mm	ボルト本数	5	5	5
	導入軸力（kN/本）＊	210	206	201
母材　SM490Y	板厚（mm）	32	50	75
連結板　SM490Y	板厚（mm）	19	26	38
試験体幅（mm）		179	124	91
解析すべり/降伏耐力比 β_a		0.57	0.57	0.57
摩擦係数		0.50	0.50	0.50

＊目標導入軸力：205 kN

（b）β_a 一定，ボルト 10 列

解析ケース		32mm -10列	50mm -10列	75mm -10列
ボルトM22（F10T） 孔径24.5mm	ボルト本数	10	10	10
	導入軸力（kN/本）＊	210	205	203
母材　SM490Y	板厚（mm）	32	50	75
連結板　SM490Y	板厚（mm）	19	26	38
試験体幅（mm）		334	223	157
解析すべり/降伏耐力比 β_a		0.57	0.57	0.57
摩擦係数		0.50	0.50	0.50

＊目標導入軸力：205 kN

（c）β_a 一定，ボルト 12 列

解析ケース		32mm -12列	50mm -12列	75mm -12列
ボルトM22（F10T） 孔径24.5mm	ボルト本数	12	12	12
	導入軸力（kN/本）＊	209	205	206
母材　SM490Y	板厚（mm）	32	50	75
連結板　SM490Y	板厚（mm）	19	26	38
試験体幅（mm）		396	262	190
解析すべり/降伏耐力比 β_a		0.57	0.57	0.55
摩擦係数		0.50	0.50	0.50

＊目標導入軸力：205 kN

（d）β_a 一定，板厚 75mm，ボルト 12 列

解析ケース		幅110mm	幅190mm
ボルトM22（F10T） 孔径24.5mm	ボルト本数	12	12
	導入軸力（kN/本）＊	98	206
母材　SM490Y	板厚（mm）	75	75
連結板　SM490Y	板厚（mm）	38	38
試験体幅（mm）		110	190
解析すべり/降伏耐力比 β_a		0.53	0.55
摩擦係数		0.50	0.50

＊目標導入軸力：103kN（幅 110 mm），205 kN（幅 190 mm）

表-4.3.14　解析結果

（a）β_a 一定，ボルト 5 列

解析ケース	32mm -5列	50mm -5列	75mm -5列
すべり荷重（kN）	1,012	996	972
すべり係数	0.482	0.483	0.484

（b）β_a 一定，ボルト 10 列

解析ケース	32mm -10列	50mm -10列	75mm -10列
すべり荷重（kN）	1,848	1,939	1,950
すべり係数	0.441	0.473	0.482

（c）β_a 一定，ボルト 12 列

解析ケース	32mm -12列	50mm -12列	75mm -12列
すべり荷重（kN）	1,974	2,119	2,268
すべり係数	0.393	0.431	0.459

（d）β_a 一定，板厚 75mm，ボルト 12 列

解析ケース	幅110mm	幅190mm
すべり荷重（kN）	1,115	2,268
すべり係数	0.472	0.459

すべり係数と母板厚の関係を図-4.3.44 に示す。解析すべり/降伏耐力比 β_a を一定とした 5 列の場合は，母板厚 32mm，50mm，75mm のすべり係数はほぼ一定である。一方，10 列と 12 列の場合，母板厚 32mm と 50mm のすべり係数は，母板厚 75mm に比べて小さくなっている。特に，幅が大きくなるとすべり係数の低下が大きくなっている。また，板幅を変化させた場合，ケース幅 110mm と比べて，幅 190mm のすべり係数が約 3 %低下した。

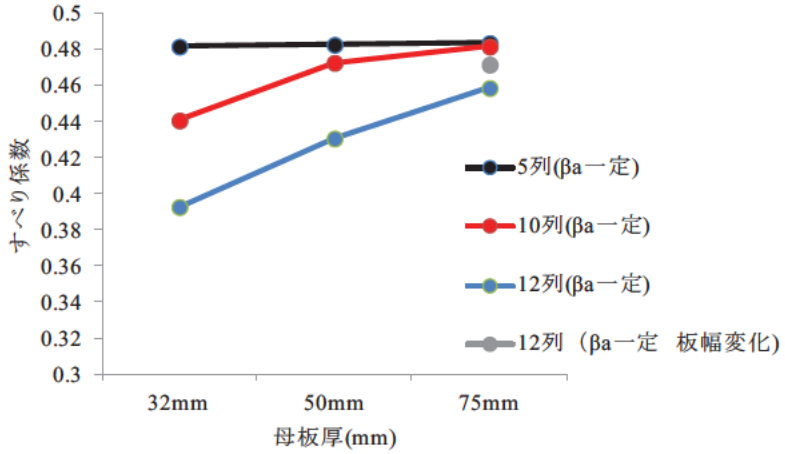


図-4.3.44　ボルト列数の違いによるすべり係数と母板厚の関係

（a）ボルト列数 5 列の場合

図-4.3.45 に解析ケース「32mm-5 列」，「50mm-5 列」，「75mm-5 列」の荷重 相対変位関係を示す。図の縦軸は引張荷重をすべり荷重で無次元化した値 P/P_{SL} を，横軸は母板と連結板の内側相対変位をそれぞれ示す。

図より，各ケースとも最大荷重が発生した時点で，すべり発生と決定される。各ケースの荷重 相対変位関係は板厚による初期剛性は異なるものの，すべり荷重は最大荷重で決定されるため，すべり係数は同じ値となる。

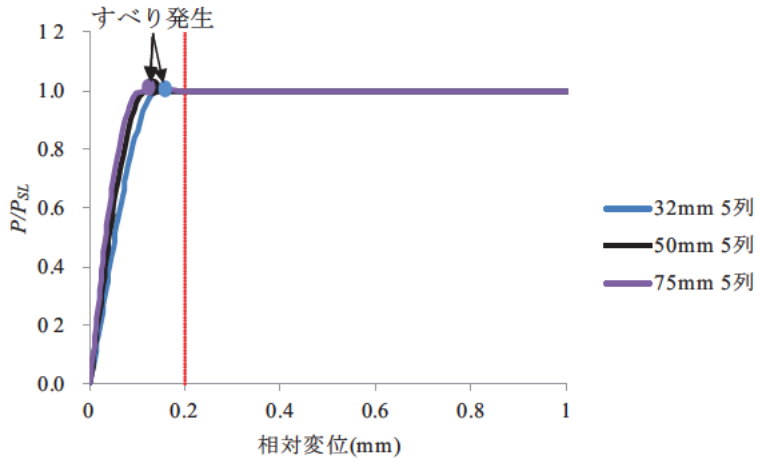
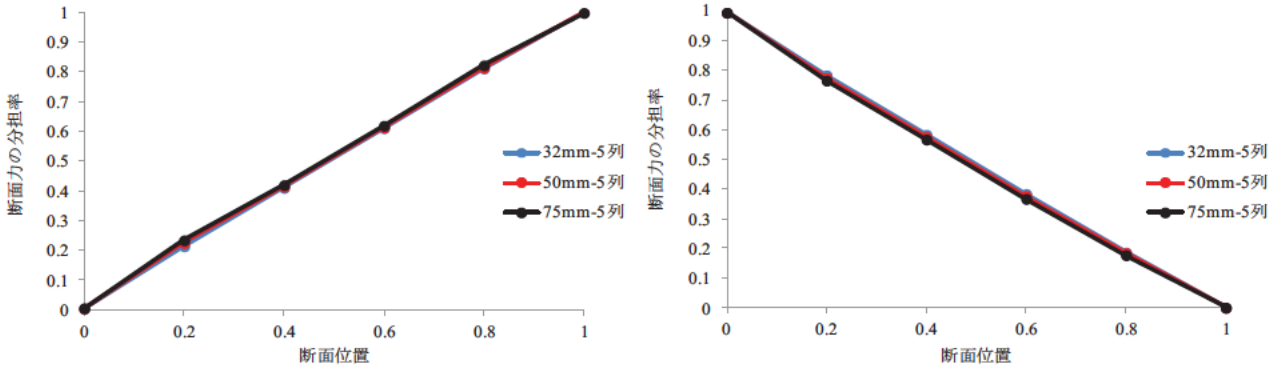


図-4.3.45 荷重 相対変位関係

図-4.3.46 は図-4.3.26 と同様にすべり時の連結板と母板の断面位置による作用断面力の変化を，断面位置を横軸にして整理したものである。母板と連結板の断面位置を図-4.3.47 に示す。図-4.3.48 に，引張荷重 P をすべり荷重 P_{SL} で除した P/P_{SL} が 0.5 と 1.0 の時の連結板中央断面（断面 1）における軸方向応力 σ_x の板厚方向の平均値の分布を示す。図（b）と（c）の縦軸は図（a）に示すように連結板中心から縁端まで Z 方向の距離，横軸は軸方向応力 σ_x の板厚方向の平均値を示す。図中の点線は，各ケースの引張荷重を着目位置の断面積で除した軸力方向の断面平均応力 σ_x である。

図-4.3.46 より，作用断面力の変化は断面位置に対しほぼ線形になっていることから，各ボルトの分担摩擦力が均等であることがわかる。図-4.3.48 より，板厚が厚いほど断面平均応力が小さくなっている。これは，解析すべり/降伏耐力比 β_a を一定としたため，母板の純断面積は等しいが，ボルト孔のない位置の総断面積は厚板の方が大きくなっている。表-4.3.14（a）より，各ケースのすべり荷重がほぼ同じであるが，総断面積が異なるため，それが大きいケース 75mm-5 列の断面平均応力が小さいことがわかる。



（a）母板断面（内側 外側）　　（b）連結板断面（内側 外側）

図-4.3.46　すべり時の作用断面力の分布

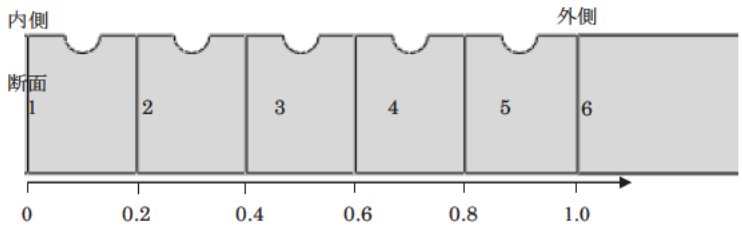
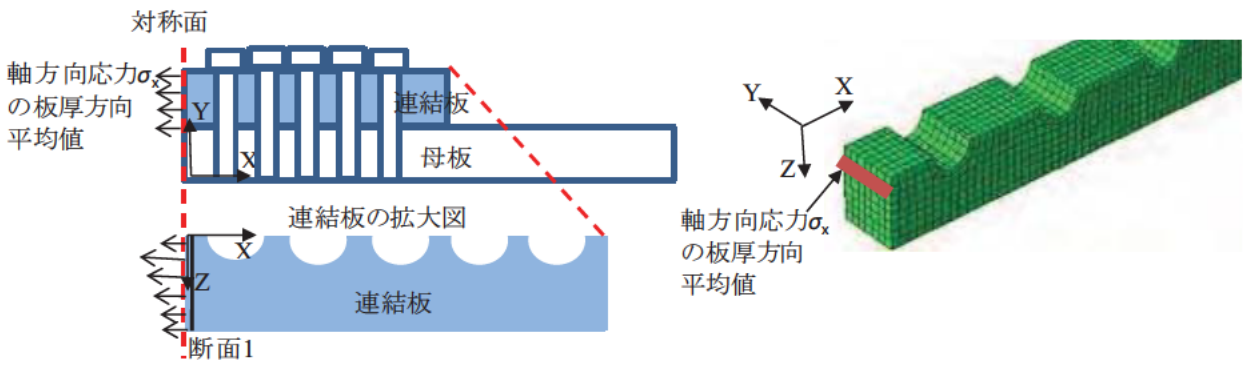
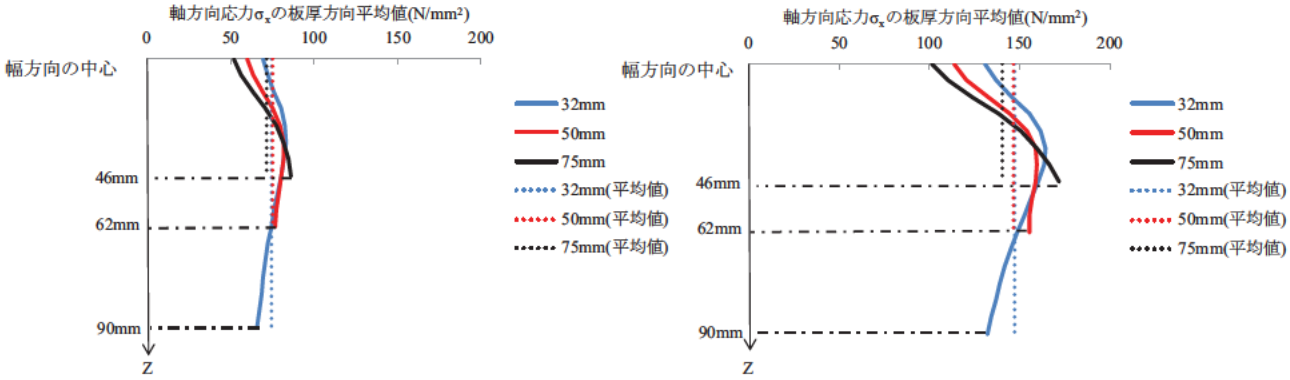


図-4.3.47 母板と連結板断面位置と無次元化座標（5 列の場合）



(a) 断面 1 の位置および σ_x の表示（5 列の場合）



(b) P/P_{SL}=0.5　　(c) P/P_{SL}=1.0（すべり時）

図-4.3.48　軸方向応力 σ_x の板厚方向平均値の分布

(b) ボルト列数 10 列の場合

図-4.3.49 に解析ケース「32mm-10 列」,「50mm-10 列」,「 75mm-10 列」の荷重 相対変位関係を示す。

図より，ケース 50mm-10 列と 75mm-10 列は最大荷重が発生した時点で，すべり発生と決定され，32mm-10 列は，内側相対変位が 0.2 mm に達した時点ですべり発生と決定される。なお，表-4.3.14 (b) より，50 mm と 75 mm の場合のすべり係数はほぼ同じで，それらに比べ，32 mm の場合は約 10 %低下している。

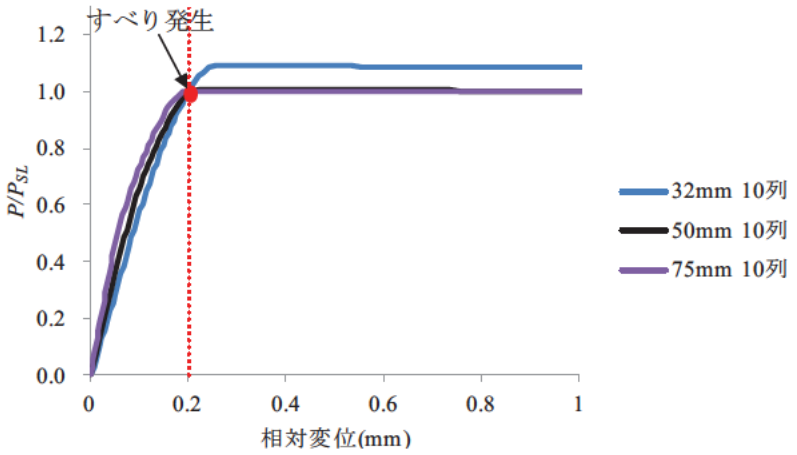
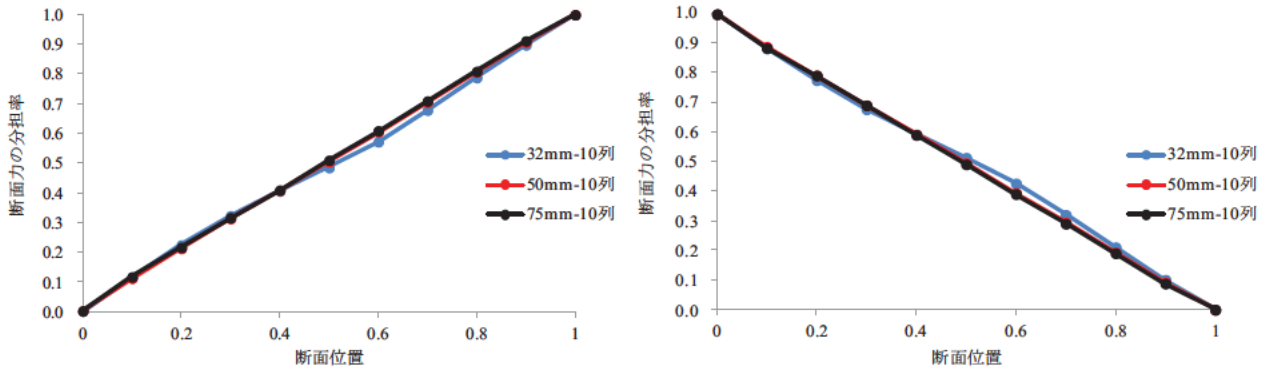


図-4.3.49　荷重 相対変位関係

図-4.3.50 は，図-4.3.26 と同様にすべり時の連結板と母板の断面位置による作用断面力の変化を，断面位置を横軸にして整理したものである。母板と連結板の断面位置を図-4.3.51 に示す。図-4.3.52 は，図-4.3.48 と同様に P/P_{SL} が 0.5 と 1.0 の時の連結板の断面 1 における軸方向応力 σ_x の板厚方向平均値の分布を示す。

図-4.3.50 より，32mm-10 列と 50mm-10 列と比べ，75mm-10 列の作用断面力変化は断面位置に対しほぼ線形になっている。そのため，75mm-10 列の各ボルトの分担摩擦力が均一であるのに対し，32mm-10 列と 50mm-10 列の場合は不均一であると考えられる。図-4.3.52 より，すべり時の板厚 32 mm の場合は，点線で示されている断面平均応力が，他のケースと比較して低くなっている。この原因は，表-4.3.14 (b) で示したように，板厚 32 mm の場合は，すべりが最大荷重に達する前の荷重が低い段階で発生しているため，その時の断面平均応力が低くなっていると考えられる。



(a) 母板断面（内側 外側）　　(b) 連結板断面（内側 外側）

図-4.3.50　すべり時の作用断面力の分布

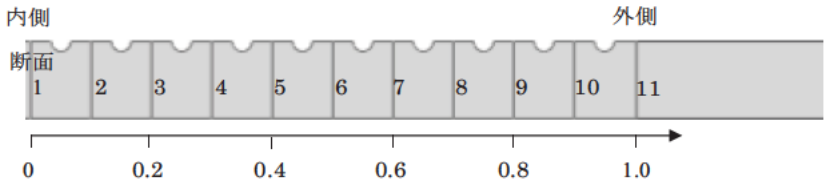
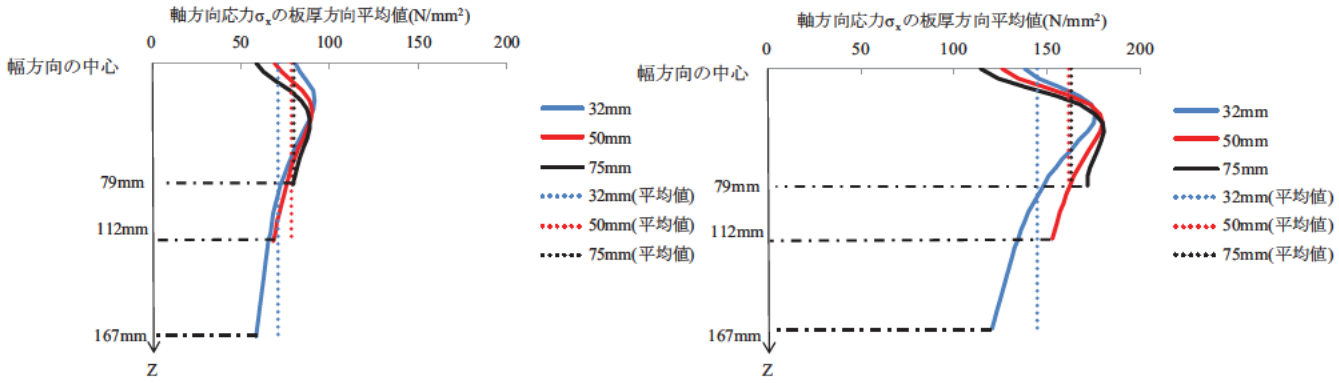


図-4.3.51　母板と連結板断面位置と無次元化座標（10 列の場合）



(a) P/P_{SL}=0.5　　(b) P/P_{SL}=1.0（すべり時）

図-4.3.52　軸方向応力 σ_x の板厚方向平均値の分布

(c) ボルト列数 12 列の場合

図-4.3.53 に解析ケース「32mm-12 列」,「50mm-12 列」,「75mm-12 列」の荷重 相対変位関係を示す。図より，いずれのケースも内側相対変位が 0.2 mm に達した時点ですべり発生と決定される。表-4.3.14 (c) より，板厚 32 mm のケースのすべり荷重と比べ，板厚 50 mm のすべり荷重は約 5 %，板厚 75 mm のすべり荷重は約 15 %それぞれ増加している。これは，解析すべり/降伏耐力比 β_a を一定としたため，板厚が薄い場合，板幅が大きくなる。また，ボルト軸力による接触圧の分布は，ボルト孔近傍で高く，ボルト孔から離れると低くなる。これらのことから接触面にはたらく摩擦力の大きさは，接触圧の大きさに依存するため，接触圧の分布と同様になり，板幅の小さい厚板の場合はすべり荷重が高く，板幅が大きい薄板の場合はそれが低くなる。

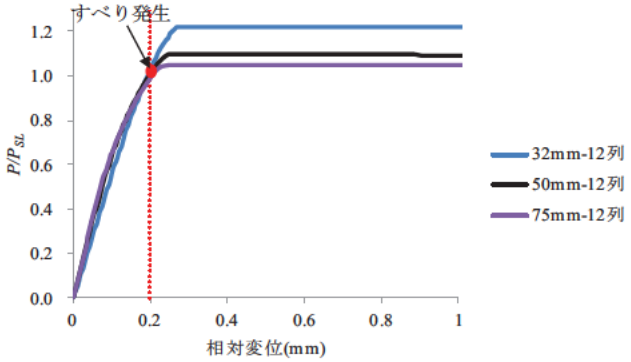
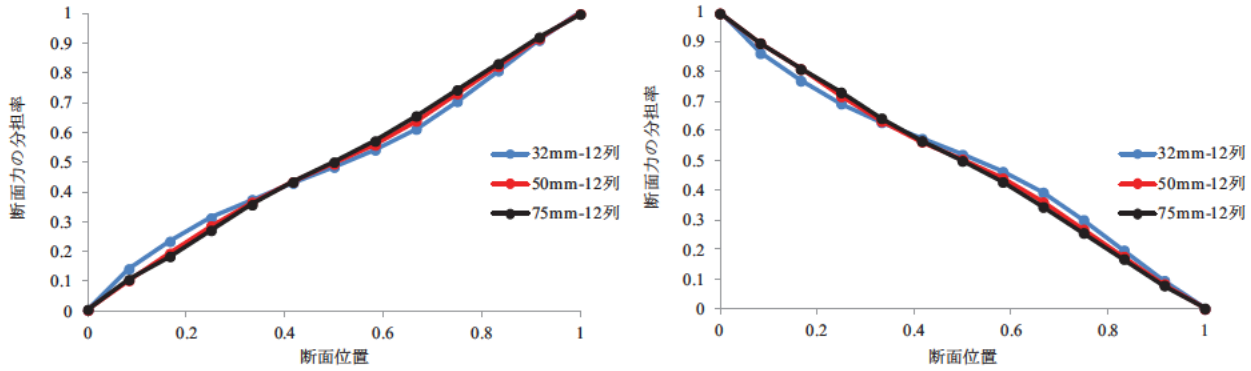


図-4.3.53 荷重 相対変位関係

図-4.3.54 は図-4.3.26 と同様にすべり時の連結板と母板の断面位置による作用断面力の変化を，断面位置を横軸にして整理したものである。母板と連結板の断面位置を図-4.3.55 に示す。図-4.3.56 は図-4.3.48 と同様に P/P_{SL} が 0.5 と 1.0 の時の連結板の断面 1 における軸方向応力 σ_x の板厚方向平均値の分布を示す。

図-4.3.54 より，板厚が厚いほど作用断面力の変化は線形に近づいており，各ボルトの分担摩擦力が均等に近いといえる。母板が薄い方が，低い荷重段階ですべりが発生するため，各ボルトの分担摩擦力が均等ではなく，作用断面力の分布は非線形になる。図-4.3.56 より， 50 mm と 75 mm と比べ，32 mm の断面平均値が顕著に小さくなっている。これは，32mm-12 列のボルト孔と離れたところの軸方向応力 σ_x が小さくなり，その断面平均値が小さくなったため考えられる。

以上のことから，解析すべり/降伏耐力比 β_a が一定すなわち純断面積が一定の場合，板幅を広げるよりも，板厚を厚くする方がすべり荷重に対して効率的といえる。



(a) 母板断面（内側 外側）　　(b) 連結板断面（内側 外側）

図-4.3.54 すべり時の作用断面力の分布

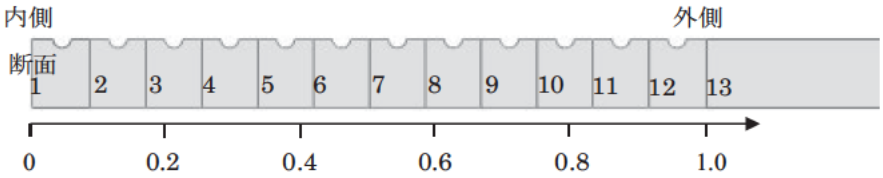
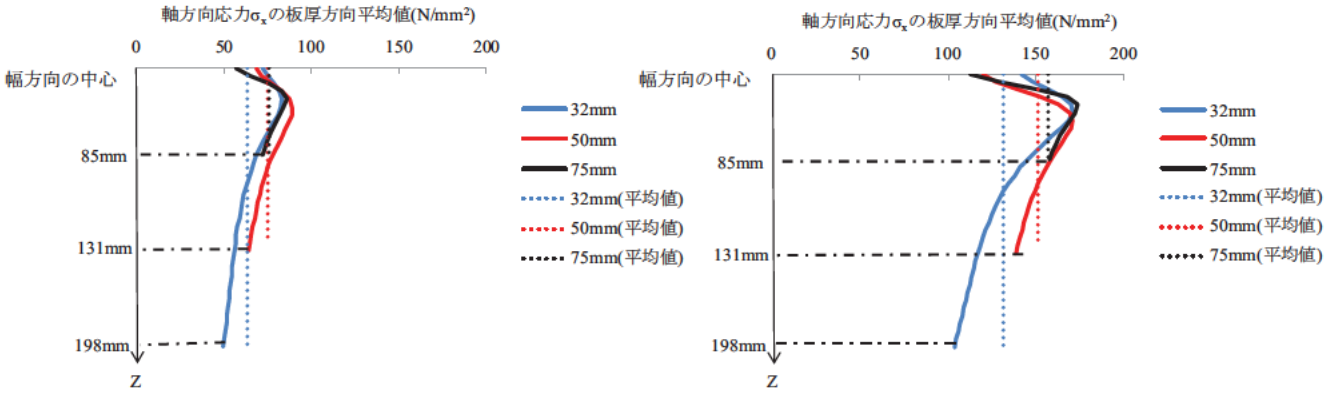


図-4.3.55　母板と連結板断面位置と無次元化座標（12 列の場合）



（a）P/P_{SL}=0.5　　（b）P/P_{SL}=1.0（すべり時）

図-4.3.56　軸方向応力 σ_x の板厚方向平均値の分布

（d）ボルト列数 12 列の場合（板厚一定）

図-4.3.57 に「幅 110 mm」と「幅 190 mm」の荷重 相対変位関係を示す。なお，幅 110 mm のケースの母板の純断面積は，幅 190 mm の場合の半分であるから，解析すべり/降伏耐力比 β_a を同じにするため，幅 110 mm の場合の設定ボルト軸力を幅 190 mm のそれの半分とした。

図より，幅 190 mm の場合と比較して，幅 110 mm の場合，すべり荷重は小さいが，すべり係数が高くなった（表-4.3.14（d））。これは，図-4.3.57 により，幅 110 mm の場合，最大荷重が発生した時点で，すべり発生と決定され，幅 190mm の場合，内側相対変位が 0.2 mm に達した時点ですべり発生と決定されるためである。

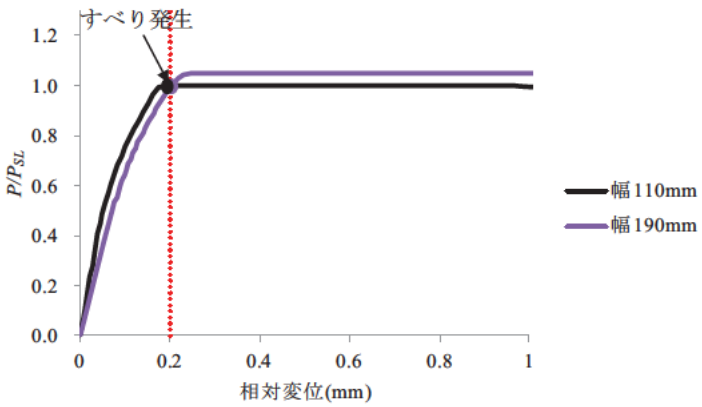


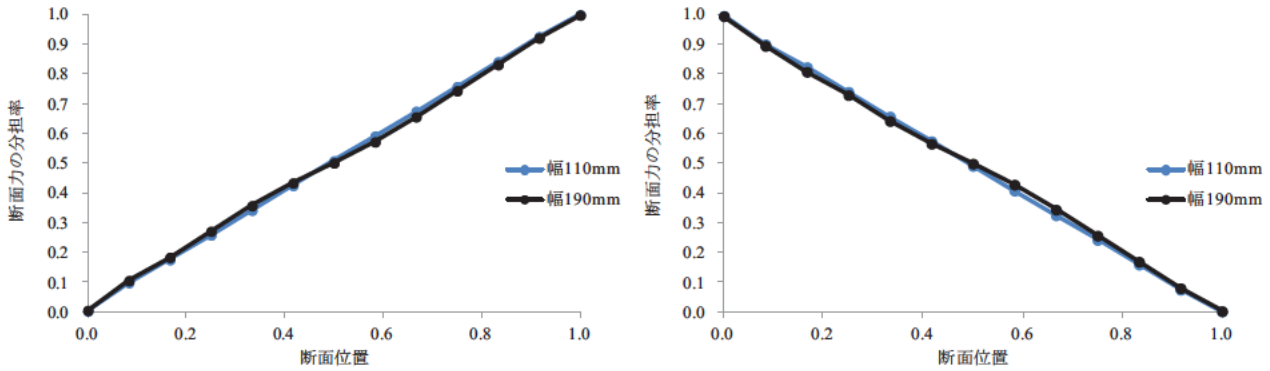
図-4.3.57　荷重 相対変位関係

図-4.3.58 は図-4.3.26 と同様にすべり時の連結板と母板の断面位置による作用断面力の分布を整理したものである。母板と連結板の断面位置を図-4.3.55 に示す。図-4.3.59 は図-4.3.48 と同様に P/P_{SL} が 0.5 と 1.0 の時の連結板の断面 1 における軸方向応力 σ_x の板厚方向平均値の分布を示す。ただし，図の横軸は，軸方向応力 σ_x の板厚方向平均値を式（4.3.3）に示す設計軸方向応力 σ_{xd} で除した値を示す。

$$\sigma_{xd} = \frac{P_d}{W \cdot t} \qquad \cdots\cdots (4.3.3)$$

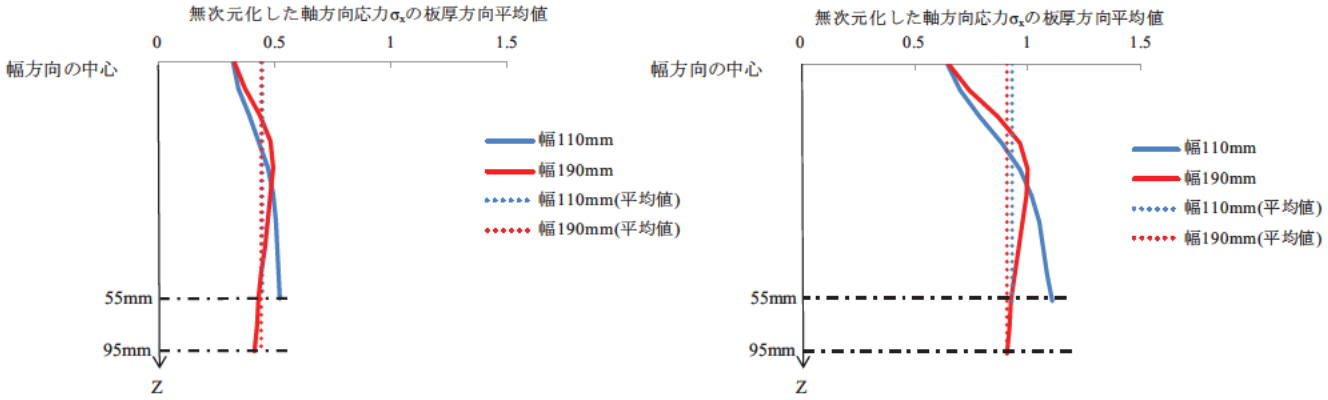
ここで，σ_{xd}：設計軸方向応力（すべり時），P_d：設計すべり耐力（式（4.2.2）），
W：板幅，　t：母板厚

図-4.3.58 より，幅 110 mm の場合，その形状は線形のため，各ボルトの分担摩擦力が均一である。幅 190 mm の場合は曲線の形状が線形ではないため，分担摩擦力が不均一になっていると考えられる。 幅 110 mm のすべり係数は幅 190 mm の場合より高い値が得られたが，図-4.3.59 より，幅 110 mm の場合の断面平均応力は，幅 190 mm の場合と比べわずかではあるが，大きくなっており，幅 110 mm の方がすべり係数も大きい結果が得られている。



（a）母板断面（内側 外側）　　（b）連結板断面（内側 外側）

図-4.3.58　すべり時の作用断面力の分布



（a）P/P_{SL}=0.5　　（b）P/P_{SL}=1.0（すべり時）

図-4.3.59　軸方向応力 σ_x の板厚方向平均値の分布

以上の検討により，ボルト列数が少ない（5 列）の場合は，板厚が変化しても，すべり発生時の各ボルトの分担摩擦力は均等であり，板厚の影響は見られなかった。ボルト列数が多い（10，12 列）ほど，すべり時の各ボルト列の分担摩擦力が不均一の程度が大きくなる。特に，板厚が薄い場合，不均一になりやすい。

解析すべり/降伏耐力比 β_a と板厚が一定，すなわち母板の純断面積が同じという条件のもとで，ボルト列数が多い場合，板厚を薄くして板幅を広げるより，板厚を厚くして板幅を狭くする方が，すべり荷重が高くなることがわかった。また，解析すべり/降伏耐力比 β_a と板厚が一定で，板幅のみを変えた場合も，板幅が広い場合より，板幅が狭い方がすべり係数が高くなることがわかった。

4.3.5　連結板/母板降伏耐力比 γ の影響

既往の研究[12)]では，すべり先行型で母板の板厚が 7～40 mm，ボルト列数が 2～9 列のケースに対し，連結板/母板降伏耐力比 γ の値によりすべり荷重が異なることを検討しており，連結板/母板降伏耐力比 γ の値が大きくなるほどすべり荷重が大きくなることが報告されている。ここでは，厚板多列ボルトの継手を対象に，解析連結板/母板降伏耐力比 γ_a がすべり挙動とすべり係数に与える影響を考察する。表-4.3.15，表-4.3.16 に解析ケースと解析結果をそれぞれ示す。表中のケース名について，最初の数値が板厚を，次の数値がボルト列数を，最後の数値が解析連結板/母板降伏耐力比 γ_a を表している。図-4.3.59 に γ_a が異なる場合のすべり係数とボルト列数の関係を示す。

図より，解析連結板/母板降伏耐力比 γ_a が大きくなることですべり係数が低下しはじめるボルト列数が大きくなることがわかる。すなわち，γ_a が 1.52 以上では，ボルト列数が 12 列まですべり係数は一定となっている。一方，γ_a が 1.08 の場合では 10 列まで一定であり，それよりもボルト列数が増えるとすべり係数は低下している。ボルト列数が 12 列の場合，50mm-12 列-1.08 と比べ，50mm-12 列-1.52 のすべり係数は 10 %程度低下している。

表-4.3.15　解析ケース

(a) γ_a=1.08（一定）

解析ケース		50mm 3列 1.08	50mm 5列 1.08	50mm 8列 1.08	50mm 10列 1.08	50mm 12列 1.08	50mm 14列 1.08
ボルトM22（F10T） 孔径24 5mm	ボルト本数	3	5	8	10	12	14
	導入軸力（kN/本）＊	205	206	205	205	205	205
母材　SM490Y	板厚（mm）	50	50	50	50	50	50
連結板 SM490Y	板厚（mm）	26	26	26	26	26	26
試験体幅（mm）		84	124	183	223	262	302
連結板/母板耐力比 γ_a		1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
摩擦係数		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

(b) γ_a=1.52（一定）

解析ケース		50mm 3列 1.52	50mm 5列 1.52	50mm 8列 1.52	50mm 12列 1.52	50mm 14列 1.52
ボルトM22（F10T） 孔径24.5mm	ボルト本数	3	5	8	12	14
	導入軸力（kN/本）＊	204	205	200	206	203
母材　SM490Y	板厚（mm）	50	50	50	50	50
連結板 SM490Y	板厚（mm）	38	38	38	38	38
試験体幅（mm）		84	124	183	262	302
連結板/母板耐力比 γ_a		1 52	1.52	1.52	1.52	1.52
摩擦係数		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

＊目標導入軸力：205 kN

表-4.3.16　解析結果

(a) γ_a=1.08（一定）

解析ケース	50mm 3列 1.08	50mm 5列 1.08	50mm 8列 1.08	50mm 10列 1.08	50mm 12列 1.08	50mm 14列 1.08
すべり荷重（kN）	598	996	1,578	1,939	2,119	2,250
すべり係数	0.485	0.483	0.481	0.473	0.431	0.391

(b) γ_a=1.52（一定）

解析ケース	50mm 3列 1.52	50mm 5列 1.52	50mm 8列 1.52	50mm 12列 1.52	50mm 14列 1.52
すべり荷重（kN）	597	1,000	1,550	2,393	2,543
すべり係数	0.487	0.487	0.485	0.485	0.448

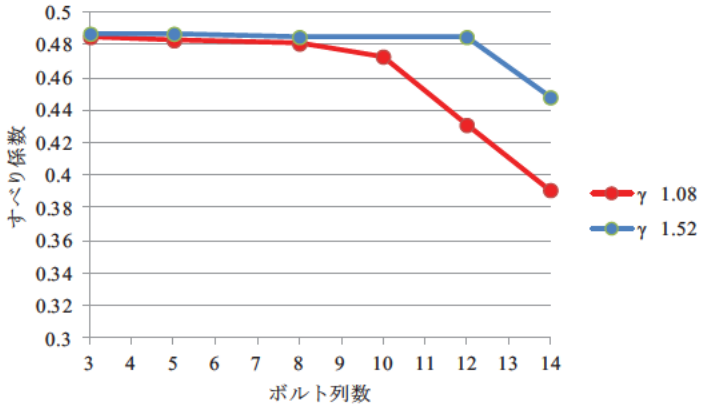


図-4.3.59　γ_aの違いによるすべり係数とボルト列数の関係

(a) ボルト列数 8 列の場合

図-4.3.60 に解析ケース「50mm-8 列-1.08」と「50mm-8 列-1.52」の荷重-相対変位関係を示す。図の縦軸は引張荷重をすべり荷重で無次元化した値 P/P_{SL} を，横軸は母板と連結板の内側相対変位をそれぞれ示す。図中の点線はすべり発生の定義の基準の一つである相対変位 0.2 mm を示す。

図より，いずれのケースも，最大荷重が発生した時点で，すべり発生と決定される。また，荷重の増加につれて，50mm-12 列-1.08 と比べ，50mm-12 列-1.52 の相対変位が小さいことがわかる。これは，連結板が厚くなると，断面積が大きいため，応力が小さくなり，板の変形量が小さくなったと考えられる。

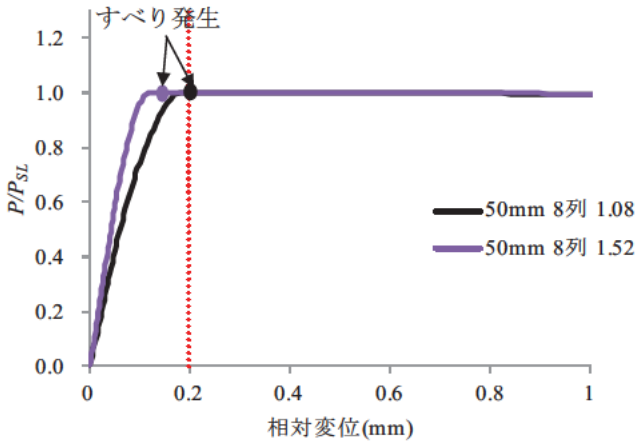


図-4.3.60　荷重-相対変位関係

図-4.3.61 にすべり発生時の各ボルトの分担摩擦力を示す。ボルト位置は，図-4.3.62 に示す。すべり発生時に，ほぼすべての列で分担摩擦力がボルト 1 本あたりすべり耐力に達していることがわかる。また，50mm-8 列-1.52 のボルト 1 の分担摩擦力が大きくなっている。これは，母板の板厚は同じだが，連結板厚が厚いため，連結板荷重と母板荷重の偏心量が大きく，曲げの影響が大きくなるためと考えられる。同様の理由により，50mm-8 列-1.52 のボルト 8 の分担摩擦力の方が小さくなっている。

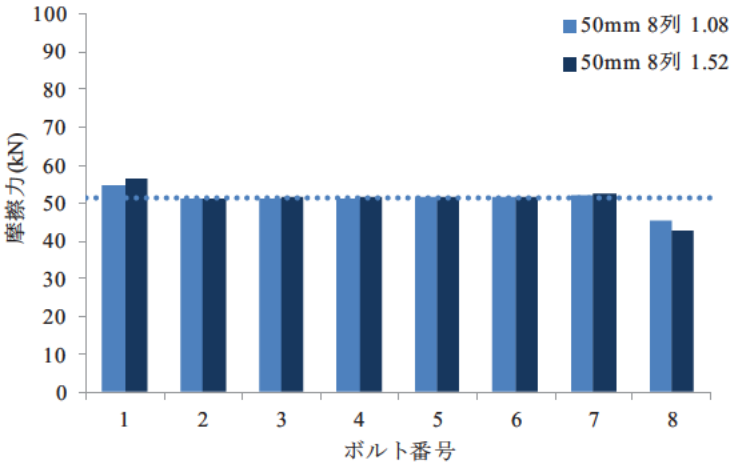


図-4.3.61　すべり時の各ボルトの分担摩擦力

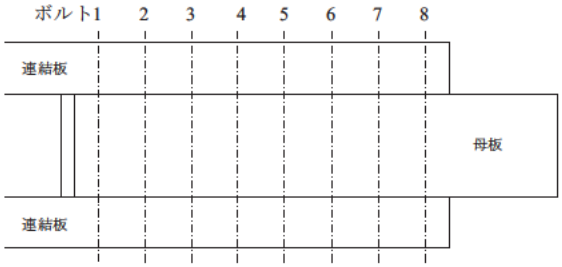
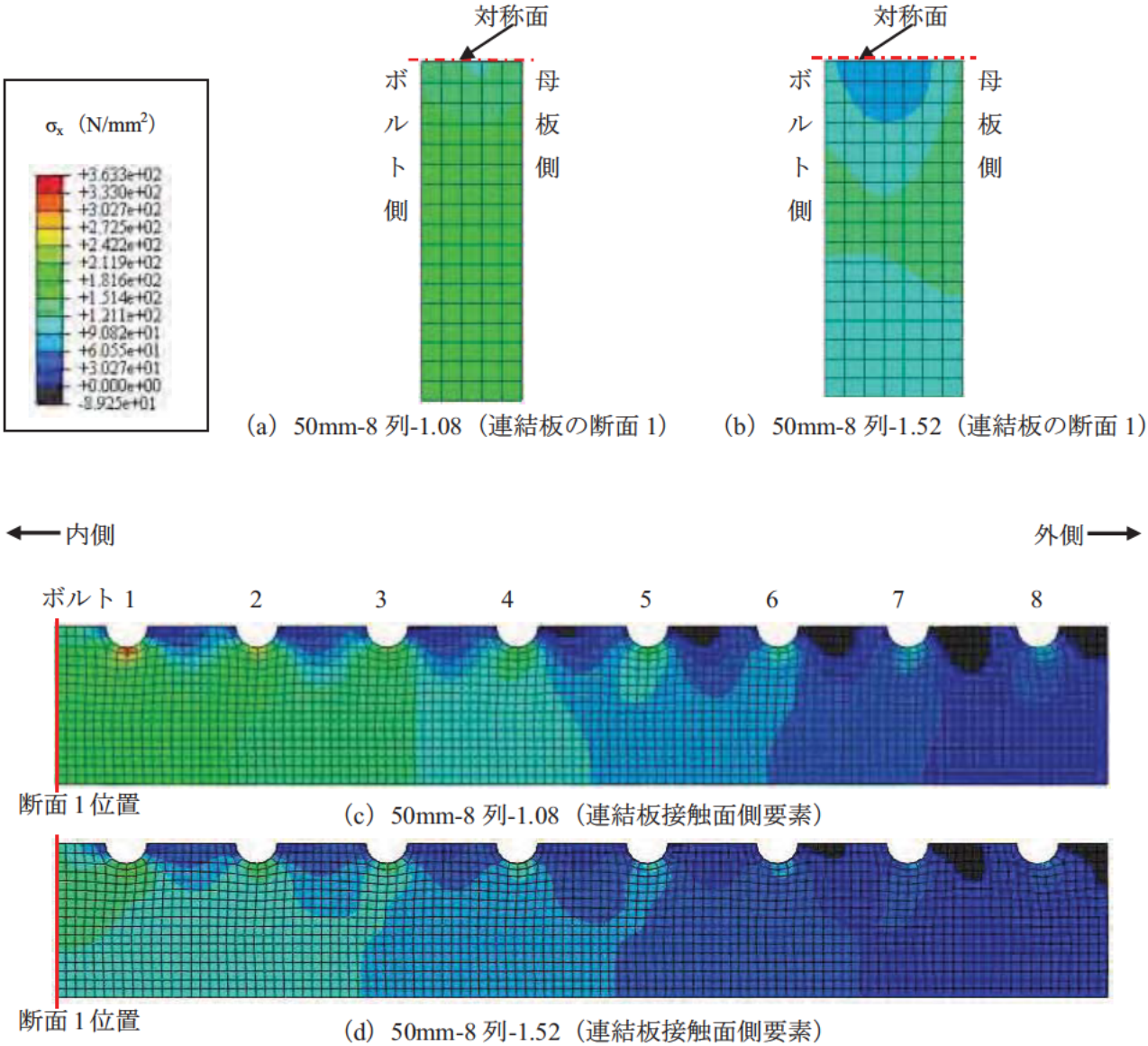


図-4.3.62 ボルトとその位置（8 列の場合）

図-4.3.63 にすべり時の軸方向応力 σ_x の分布を示す。図（a）と（b）は，連結板の断面 1 における軸方向応力 σ_x を，図（c）と（d）は，連結板の接触面を構成する要素の軸方向応力 σ_x をそれぞれ示す。

図より， 50mm-8 列-1.08 の方が，50mm-8 列-1.52 よりすべり時の軸方向応力が大きいことがわかる。さらに，50mm-8 列-1.08 の連結板内側のボルト孔の近傍において，降伏点に近い応力が発生している。これは，すべり荷重がほぼ同じであるのに対し，50mm-8 列-1.08 の方が，断面積が小さく，応力が高くなるためである。



(a) 50mm-8 列-1.08（連結板の断面 1）　(b) 50mm-8 列-1.52（連結板の断面 1）

(c) 50mm-8 列-1.08（連結板接触面側要素）

(d) 50mm-8 列-1.52（連結板接触面側要素）

図-4.3.63　すべり時の軸方向応力 σ_x の分布

図-4.3.64 にすべり時の各ボルトの軸力低下率を示す。各ボルトの位置を，図-4.3.63 に示す。

図-4.3.64 より，50mm-8 列-1.52 と比べ，50mm-8 列-1.08 のすべてのボルト軸力低下率が大きくなっている。これは，50mm-8 列-1.08 の方が，連結板の断面積が小さく，応力が高くなるため，伸びに対するポアソン効果により，板厚減少が大きくなるためと考えられる。

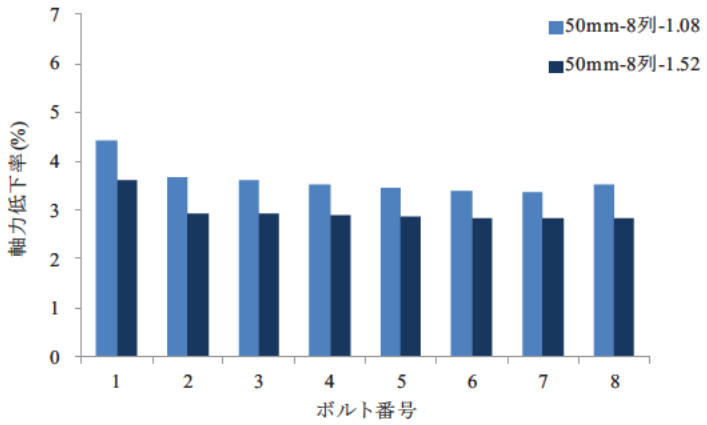


図-4.3.64　すべり時のボルト軸力低下率

(b) ボルト列数 12 列の場合

図-4.3.65 に解析ケース「50mm-12 列-1.08」と「50mm-12 列-1.52」の荷重-相対変位関係を示す。

図より，50mm-12 列-1.52 は，最大荷重が発生した時点で，すべり発生と決定され，50mm-12 列-1.08 は，内側相対変位が 0.2 mm に達した時点ですべり発生と決定される。これは，荷重の増加につれ，50mm-12 列-1.08 の相対変位が，50mm-12 列-1.52 と比べ大きくなっており，連結板の厚さの違いによるものと考えられる。

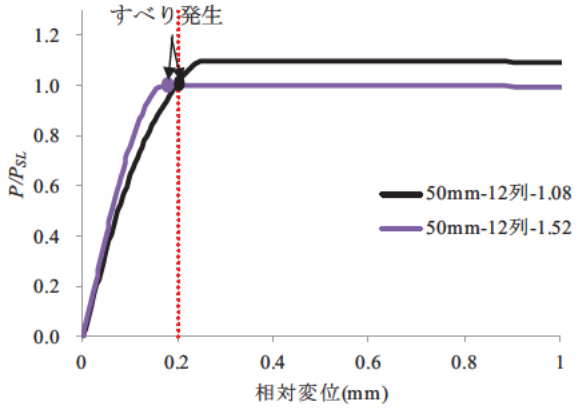


図-4.3.65　荷重-相対変位関係

図-4.3.66 にすべり発生時の各ボルトの分担摩擦力を示す。ボルト位置を図-4.3.67 に示す。

図より，すべり発生時に，解析ケース 50mm-12 列-1.52 のすべての列の分担摩擦力がボルト 1 本あたりすべり耐力に達している。また，50mm-12 列-1.08 の中央列の分担摩擦力がすべり耐力に達していない。さらに，中央のボルト 6 の分担摩擦力はボルト 1 本あたりすべり耐力の 60 %程度となっている。これは，50mm-12 列-1.08 では，連結板のボルト 1，2，3 の位置の軸方向応力が大きく，母板と連結板の相対変位量が大きいためと考えられる。一方，図より，50mm-12 列-1.52 のボルト 1 の分担摩擦力が，50mm-12 列-1.08 のそれより，大きくなっている。これは，50mm-12 列-1.52 の方が，連結板厚が厚く，連結板と母板間の偏心量が大きくなるため，曲げの影響が大きくなったと考えられる。

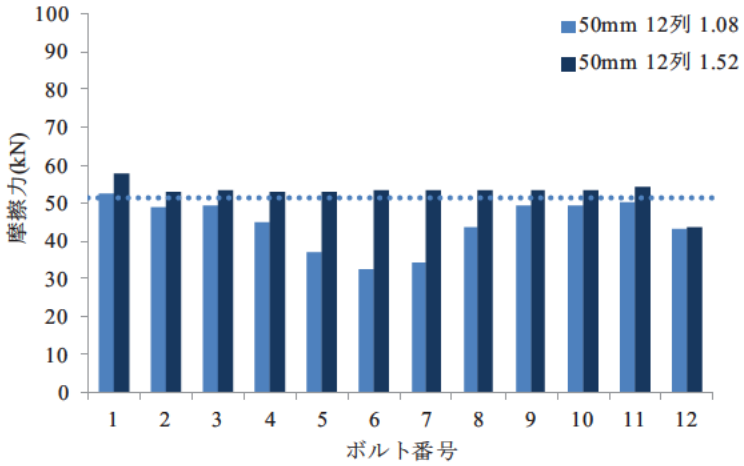


図-4.3.66　すべり時の各ボルトの分担摩擦力

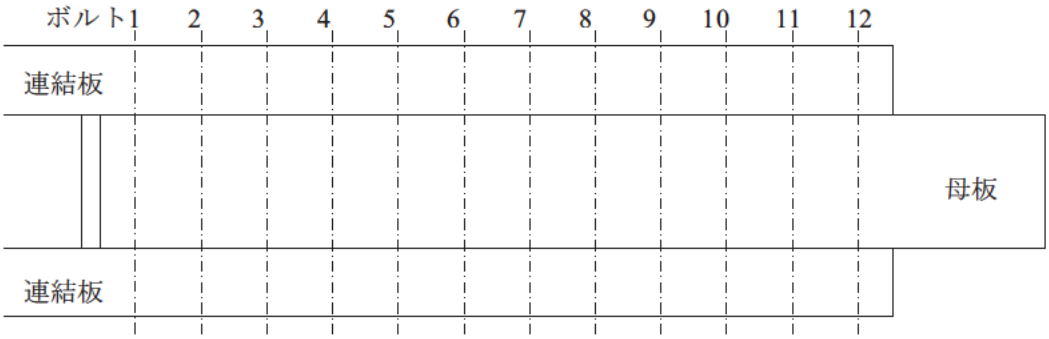
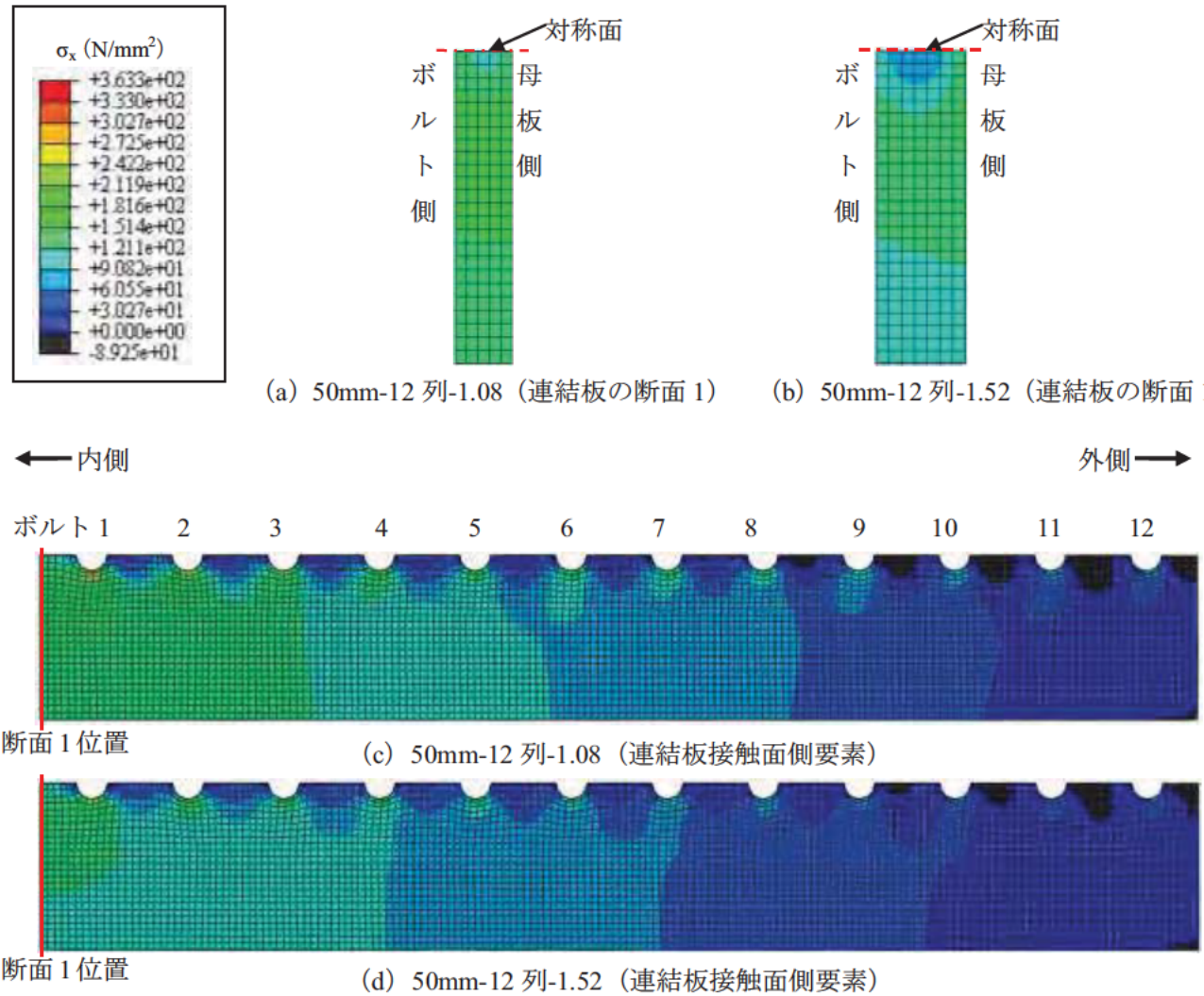


図-4.3.67　ボルト番号とその位置

図-4.3.68 にすべり時の軸方向応力 σ_x の分布を示す。図（a）と（b）は，連結板の断面 1 における軸方向応力 σ_x を，図（c）と（d）は，連結板の接触面を構成する要素の軸方向応力 σ_x をそれぞれ示す。

表-4.3.16 より，50mm-12 列-1.52 と比べ，50mm-12 列-1.08 のすべり荷重が小さい。この原因は，図-4.3.68（c），（d）より，50mm-12 列-1.08 の方が，連結板の断面積が小さく内側の軸方向応力が高くなること，50mm-12 列-1.08 のみボルト 1 のボルト孔まわりに局部降伏がみられることから，50mm-12 列-1.08 の方が連結板の伸びが大きく，低い引張荷重段階ですべりに達したためと考えられる。



(a) 50mm-12 列-1.08（連結板の断面 1）　(b) 50mm-12 列-1.52（連結板の断面 1）

(c) 50mm-12 列-1.08（連結板接触面側要素）

(d) 50mm-12 列-1.52（連結板接触面側要素）

図-4.3.68　すべり時の軸方向応力 σ_x の分布

図-4.3.69 にすべり時の各ボルトの軸力低下率を示す。ボルト位置は図-4.3.67 に示す。図より，50mm-12 列-1.52 に比べ，50mm-12 列-1.08 のすべてのボルト軸力低下率が大きくなっている。これは，50mm-8 列-1.08 の内側ボルト 1，2，3 の近傍の軸方向応力が大きくなり，伸びに対するポアソン効果により，板厚減少が大きくなるためと考えられる。

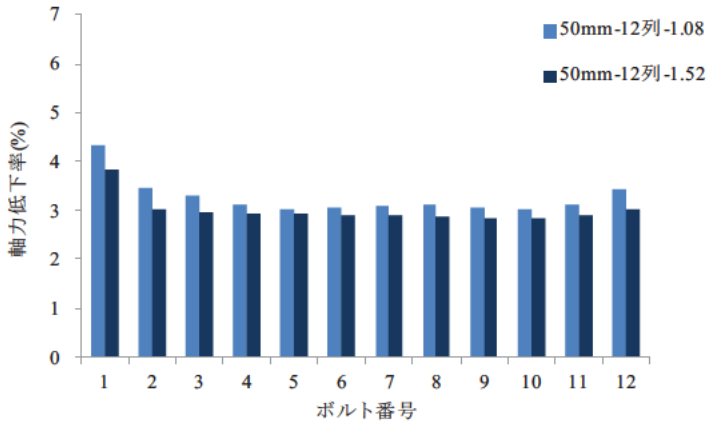


図-4.3.69　すべり時のボルト軸力低下率

以上の検討により, ボルト列数が 8 列の場合は, γ がすべり荷重とすべり係数に与える影響は小さく, 一方，ボルト列数が 12 列の場合は大きく影響した。したがって，母板の板厚を同じとし，γ を変化させると，すべり係数が低下するボルト列数の範囲が異なることがわかった。

4.3.6　ボルト軸力の影響

文献 29）では，ボルト列数が多いほど導入ボルト軸力のばらつきがすべり荷重に与える影響が小さくなることが明らかにされている。したがって，ここでは，ボルト軸力の影響が大きいと考えられるボルト列数が少ない，ケース 75mm-3 列を対象とし，ボルト軸力がすべり挙動とすべり係数に与える影響を考察する。

表-4.3.17，表-4.3.18 に解析ケースと解析結果をそれぞれ示す。ボルト軸力は，すべり挙動に影響が最も大きいと考えられるボルト 1（図-4.3.70 参照）のみ変化させ，その軸力は設計ボルト軸力の 80 %, 100 %, 120 %とした。解析ケース名は，最初の数値は板厚を，次の数値はボルト列数を，最後の数値はボルト 1 に導入される軸力が設計軸力の何パーセントであるかを示している。

表-4.3.18 より，すべり荷重は各ケースで異なっているが，導入軸力の総和で求めたすべり係数 μ_a は各ケースとも等しくなっている。したがって，すべり荷重の差は，導入軸力の差に応じて生じたため，すべり係数は等しくなったといえる。しかし，ここで設定した目標導入軸力の違いが，実際のボルトに導入されるボルト軸力のばらつきを反映していると考えると，すべり荷重，および表の最下段に示したすべり係数 μ_{0a} は表-4.3.18 のように変化し，ボルト軸力が直接すべり荷重に影響を与えていることが確認できる。

表-4.3.17　解析ケース

解析ケース		75mm 3列 80%	75mm 3列 100%	75mm 3列 120%
ボルトM22(F10T) 孔径24.5mm	ボルト本数	3	3	3
	内側ボルト軸力（kN）	162**	203*	244***
	中央ボルト軸力（kN）*	203	203	203
	外側ボルト軸力（kN）*	203	203	203
母材　SM490Y	板厚（mm）	75	75	75
連結板　SM490Y	板厚（mm）	38	38	38
試験体幅（mm）		120	120	120
解析すべり/降伏耐力比 β_a		0.31	0.31	0.31
摩擦係数		0.66	0.66	0.66

*目標導入軸力：205 kN，**目標導入軸力：164 kN，***目標導入軸力：246kN

表-4.3.18　解析結果

解析ケース	75mm-3列 -80%	75mm-3列 -100%	75mm-3列 -120%
すべり荷重（kN）	733	786	839
すべり係数 μ_a	0.645	0.645	0.645
すべり係数 μ_{0a}	0.596	0.639	0.682

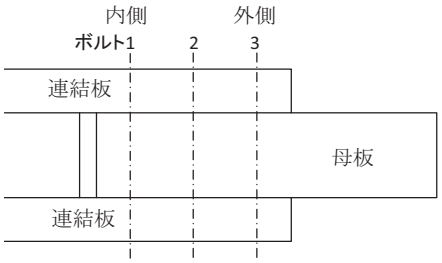


図-4.3.70　ボルト番号とその位置

図-4.3.71 に解析ケース「75mm-3 列-80%」，「75mm-3 列-100%」，「75mm-3 列-120%」の荷重-相対変位関係を示す。図の縦軸は引張荷重をすべり荷重で無次元化した値 P/P_{SL} を，横軸は母板と連結板の内側相対変位をそれぞれ示す。図中の点線はすべり発生定義の基準の一つである相対変位 0.2 mm を示す。

図より，いずれのケースも，最大荷重が発生した時点で，すべりが発生しているものと判断される。また，各ケースの荷重-相対変位関係はいずれも一致している。

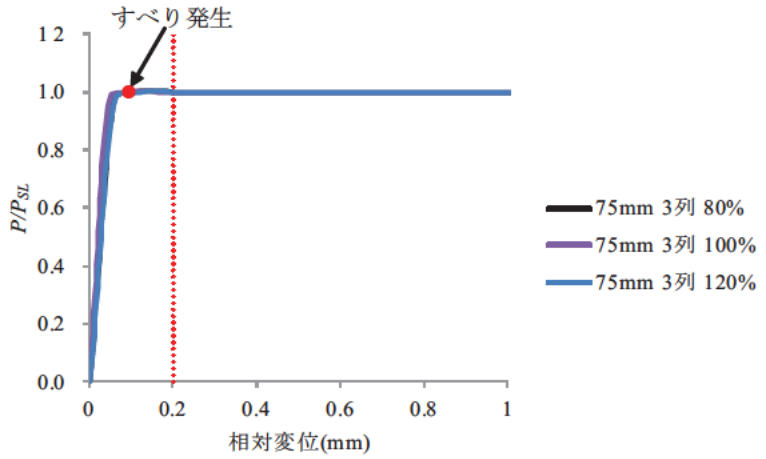
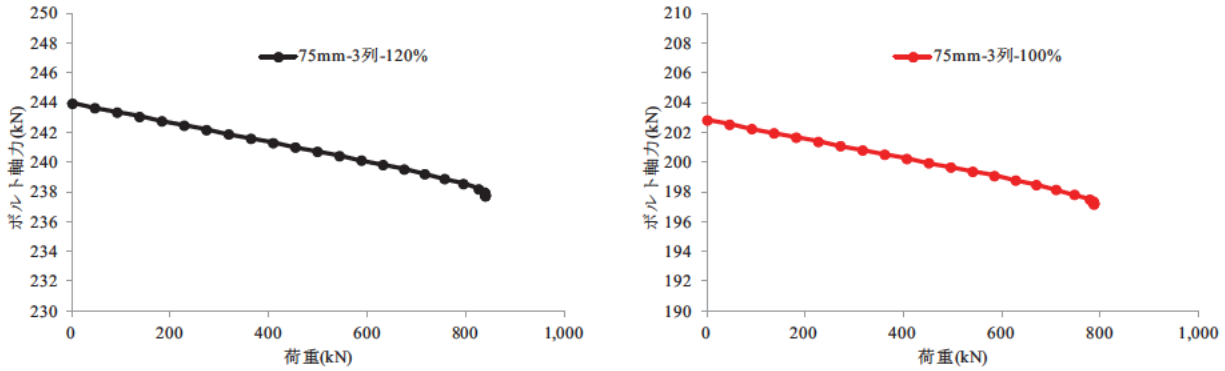


図-4.3.71　荷重-相対変位関係

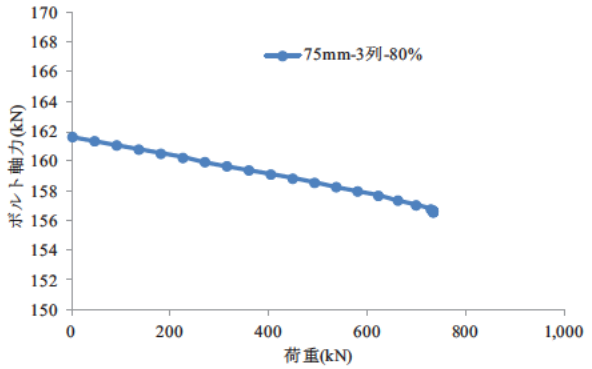
図-4.3.72 に荷重-ボルト軸力関係を示す。図の縦軸はボルト軸力，横軸は引張荷重をそれぞれ示す。

図（a），（b），（c）より，導入軸力は異なるが，軸力低下の性状はほぼ一致している。また，図（d），（e）より，ボルト 2 とボルト 3 の荷重-ボルト軸力関係も同様の傾向であった。ボルト 1 のボルト軸力低下の傾きが，ボルト 2，3 より大きくなっているが，これは，4.3.1（f）で示した母板と連結板にはたらく引張荷重の偏心による影響であると考えられる。

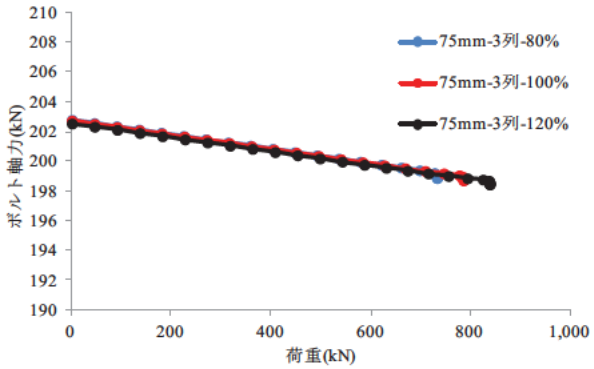


（a）ボルト 1（75mm-3 列-80%）　　（b）ボルト 1（75mm-3 列-100%）

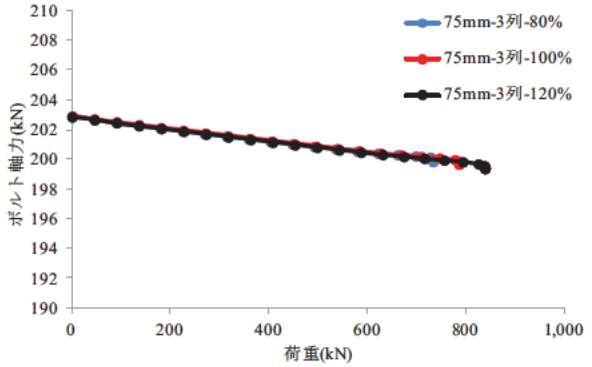
図-4.3.72　荷重-ボルト軸力関係



(c) ボルト 1（75mm-3 列-120%）



(d) ボルト 2

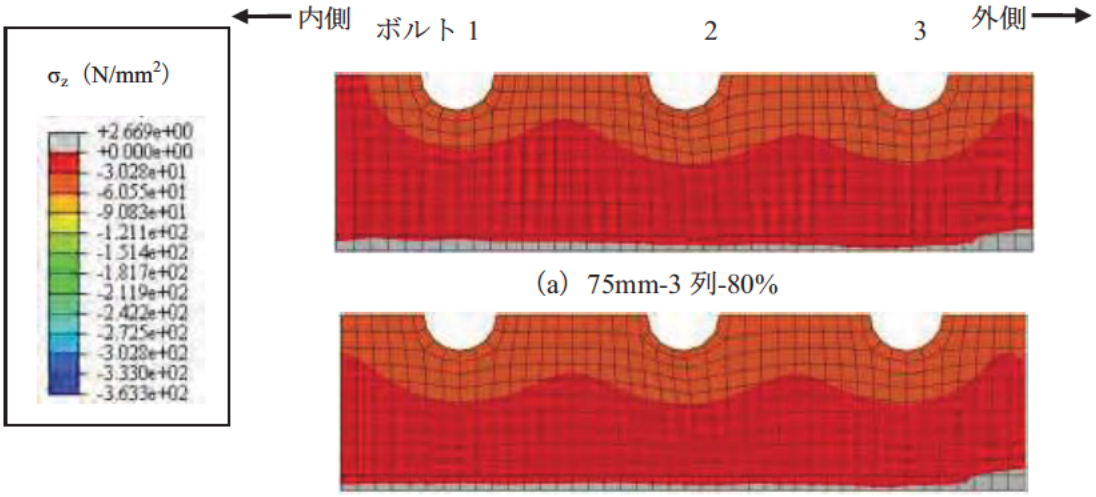


(e) ボルト 3

図-4.3.72　荷重-ボルト軸力関係（続き）

図-4.3.73 に軸力導入時の接触圧 σ_z の分布を，図-4.3.74 にすべり時の連結板のせん断応力 τ_{xz} の分布を，図-4.3.75 にすべり時の各ボルトの分担摩擦力をそれぞれ示す。

図-4.3.73 より，ボルト 1 のボルト孔の周辺では，導入する軸力の違いにより，接触圧が異なっている。また，ボルト 2 とボルト 3 のボルト孔の周辺では，導入する軸力が等しいため，接触圧は一致している。図-4.3.74 より，ボルト 1 の導入する軸力が解析ケースにより異なっているため，その位置のせん断応力もそれに応じて異なっている。導入する軸力の高い方が，すべり時のせん断応力が大きくなっている。



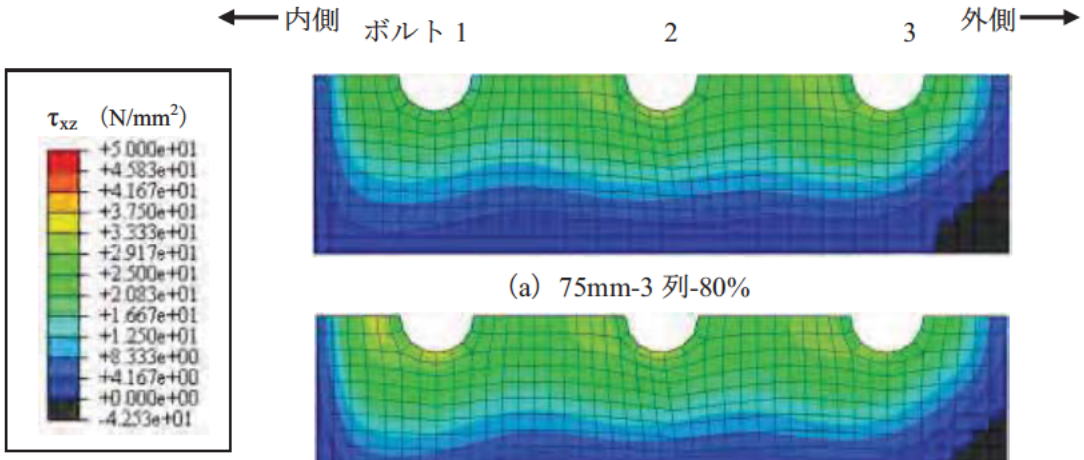
(a) 75mm-3 列-80%

(b) 75mm-3 列-100%

図-4.3.73　軸力導入時の接触圧 σ_z の分布（連結板接触面）

(c) 75mm-3 列-120%

図-4.3.73　軸力導入時の接触圧 σ_z の分布（連結板接触面）



(a) 75mm-3 列-80%

(b) 75mm-3 列-100%

(c) 75mm-3 列-120%

図-4.3.74　すべり時のせん断応力 τ_{xz} の分布（連結板接触面）

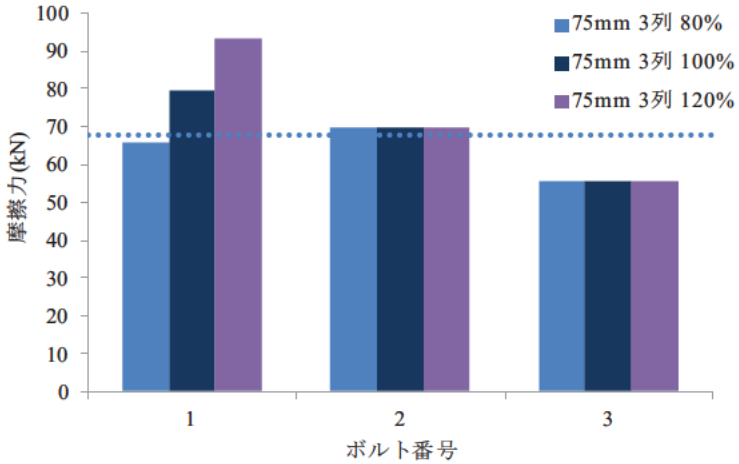


図-4.3.75　すべり時の各ボルトの分担摩擦力

図-4.3.76 にすべり時の軸方向応力 σ_x の分布を示す。図（a），（b），（c）は，連結板の断面 1 における軸方向応力 σ_x を，図（d），（e），（f）は，連結板の接触面を構成する要素の軸方向応力 σ_x をそれぞれ示す。

図より，ボルト 1 の導入する軸力を変化させた場合，導入軸力が大きいほど，連結板の断面 1 における軸方向応力は大きくなっている。また，ボルト 2 とボルト 3 付近の軸方向応力は同様であり，ボルト 1 に導入する軸力を変化させても，ボルト 2 とボルト 3 の近傍の応力分布にほとんど影響がみられない。

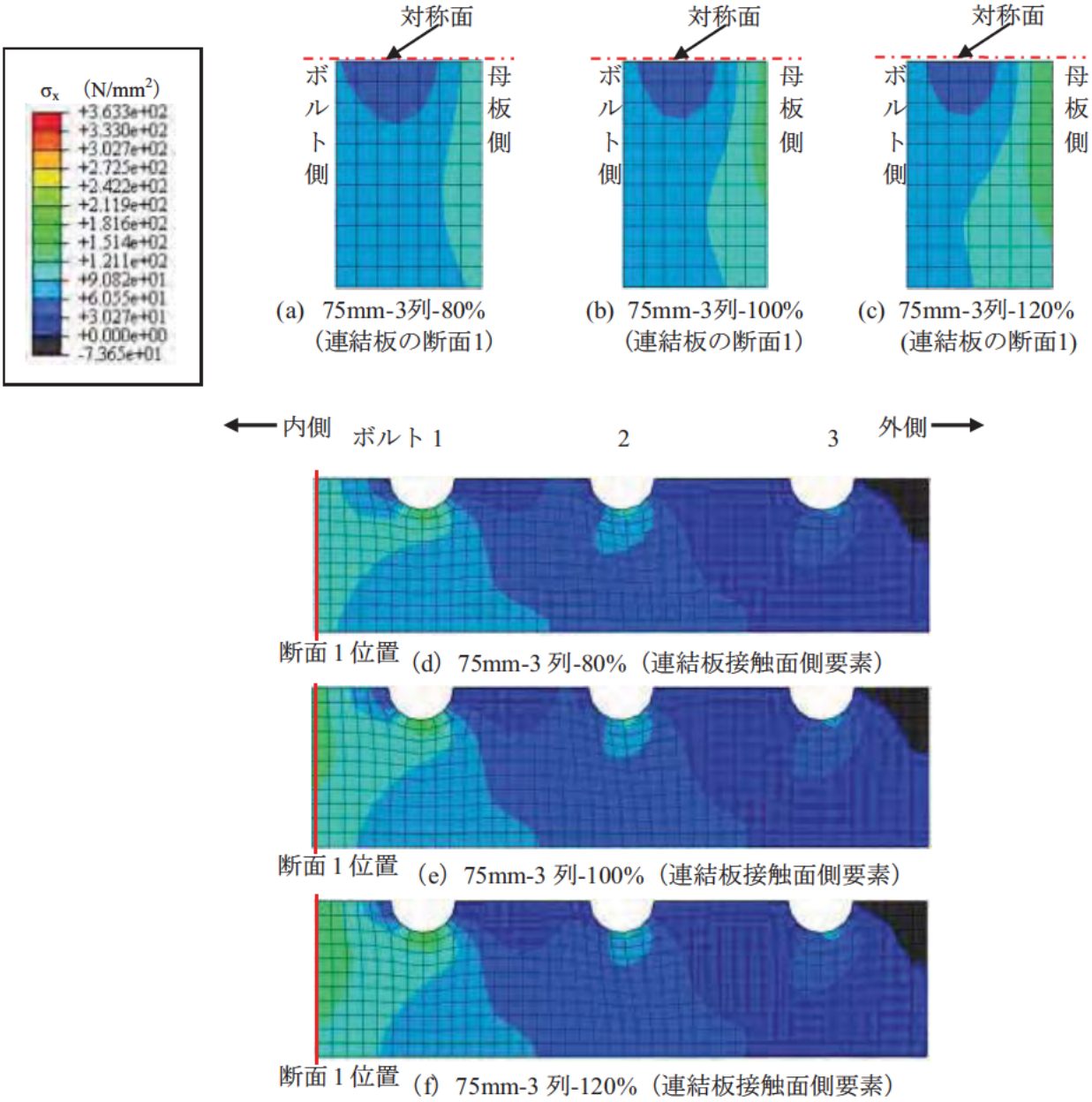


図-4.3.76　すべり時の軸方向応力 σ_x の分布

以上より，ボルト列数が 3 列のすべり先行型を対象とし，その導入ボルト軸力のばらつきがすべり挙動に与える影響を検討した結果，すべり荷重は導入されたボルト軸力に応じて異なり，導入軸力の総和で求めたすべり係数 μ_a は等しいが，設計ボルト軸力で求めたすべり係数 μ_{0a} に影響することを確認した。

4.3.7　ボルト間隔の影響

複数列を有する継手においてボルトに順次軸力を導入する場合，ボルト間隔が他のボルトの軸力に与える影響について検討する。

ボルト列数が 3 列の解析ケースに対し，標準ボルト間隔とした板厚 32 mm と 75 mm の場合， および標準の 2 倍のボルト間隔とした板厚 75 mm の場合で，ボルト軸力導入時の各ボルトの軸力変化を表-4.3.19 に示す。これらのケースでは，ボルト 1 から 3 の順序で継手内側から外側へボルトに軸力を導入する場合を想定している。表より，ボルトに軸力を導入した時に，他のボルトに微小な軸力が入力される原因は，軸力導入したボルトの孔周辺の板が圧縮される反作用として，連結板が変形して，隣接するボルトに引張荷重が作用しているためと考えられる。各ケースの解析 Step とボルト軸力の変化を図-4.3.77，図-4.3.78，図-4.3.79 にそれぞれ示す。図の縦軸はボルト軸力を，横軸は解析 Step を示す。

表および図より，標準ボルト間隔とした板厚 32 mm と標準の 2 倍のボルト間隔とした板厚 75 mm の場合, ボルト軸力にほとんど影響は見られなかった。ただし, 板厚 75 mm で標準ボルト間隔とした場合，ボルト軸力の導入，すなわちボルトの締付けによって，隣接するボルトのボルト軸力がわずかに減少する傾向が見られる。

表-4.3.19　ボルト軸力と軸力変化率

（a）32mm-3 列，標準間隔

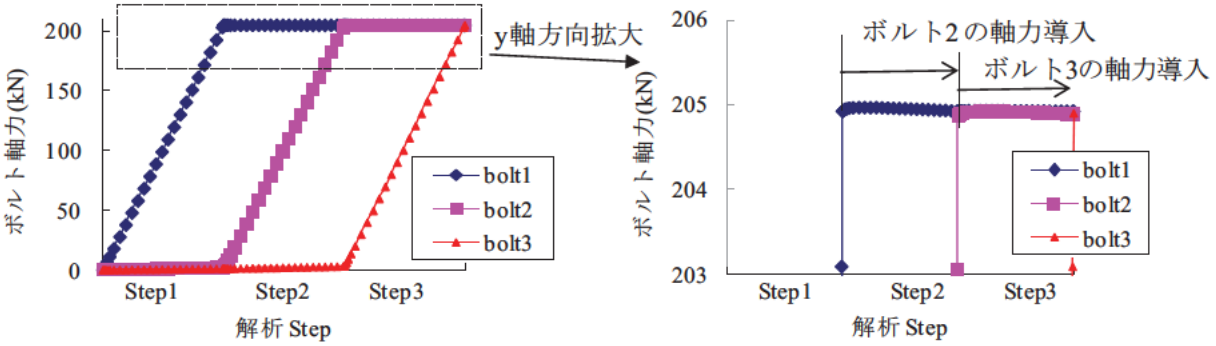
軸力導入段階	ボルト軸力(kN)			ボルト軸力変化率(%)		
	ボルト1	ボルト2	ボルト3	ボルト1	ボルト2	ボルト3
ボルト1の軸力導入	204.93	2.28	1.14	軸力導入	-	-
ボルト2の軸力導入	204.94	204.89	3.03	0.0010	軸力導入	-
ボルト3の軸力導入	204.93	204.90	204.91	0.0000	0.0078	軸力導入

（b）75mm-3 列，標準間隔

軸力導入段階	ボルト軸力(kN)			ボルト軸力変化率(%)		
	ボルト1	ボルト2	ボルト3	ボルト1	ボルト2	ボルト3
ボルト1の軸力導入	205.11	0.59	1.69	軸力導入	-	-
ボルト2の軸力導入	204.55	205.09	2.10	0.2831	軸力導入	-
ボルト3の軸力導入	204.58	204.55	205.07	0.2831	0.2834	軸力導入

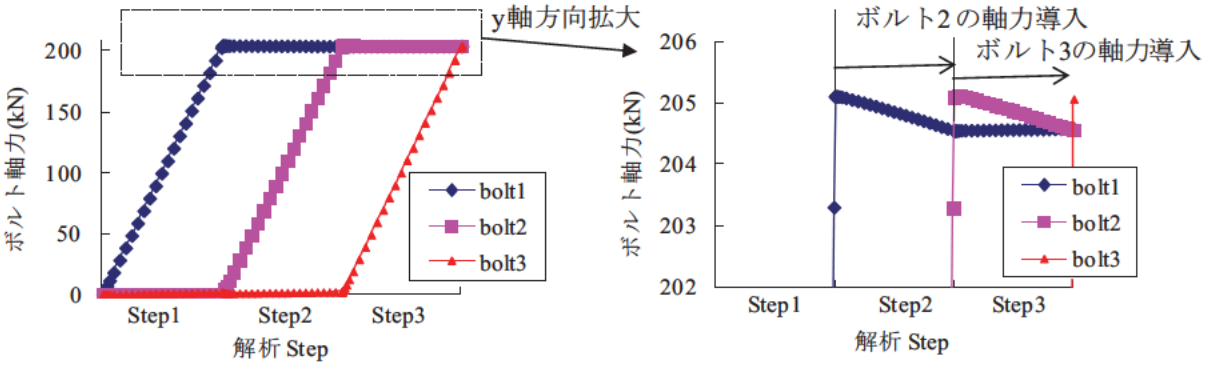
（c）75mm-3 列，標準間隔の 2 倍

軸力導入段階	ボルト軸力(kN)			ボルト軸力変化率(%)		
	ボルト1	ボルト2	ボルト3	ボルト1	ボルト2	ボルト3
ボルト1の軸力導入	204.99	1.73	0.75	軸力導入	-	-
ボルト2の軸力導入	205.04	204.97	2.04	0.0263	軸力導入	-
ボルト3の軸力導入	205.04	205.02	204.99	0.0263	0.0244	軸力導入



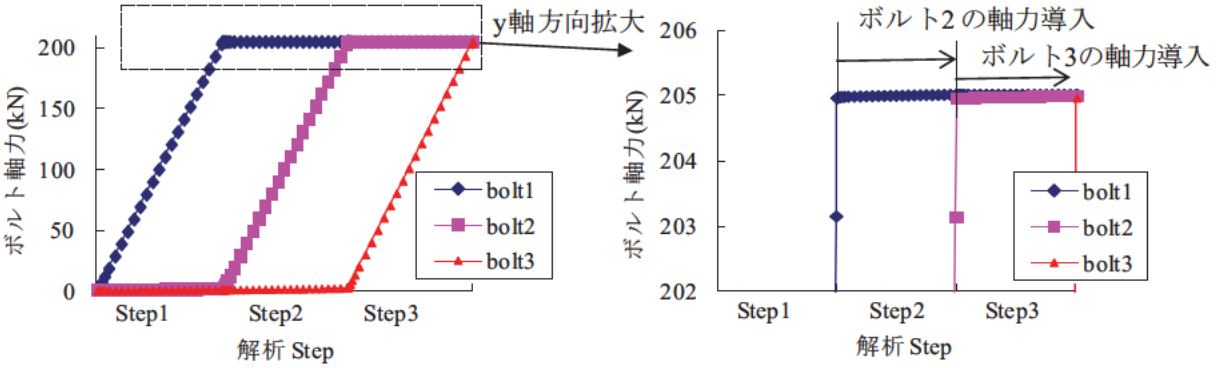
(a) ボルト軸力の変化　　(b) 拡大図

図-4.3.77　ボルト軸力の変化（32mm-3 列，標準間隔）



(a) ボルト軸力の変化　　(b) 拡大図

図-4.3.78　ボルト軸力の変化（75mm-3 列，標準間隔）

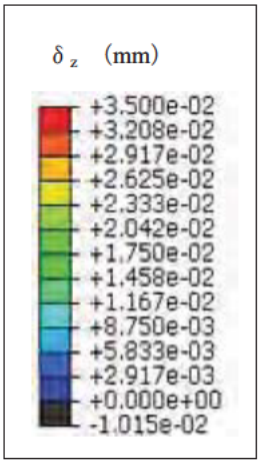


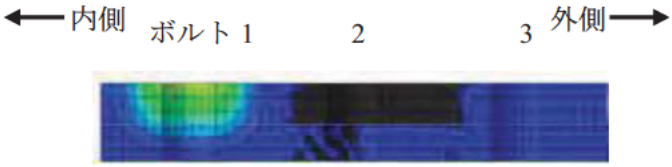
(a) ボルト軸力の変化　　(b) 拡大図

図-4.3.79　ボルト軸力の変化（75mm-3 列，標準間隔の 2 倍）

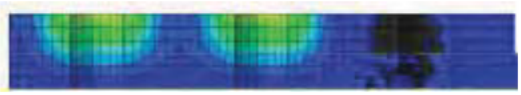
図-4.3.80 に軸力導入時の母板と連結板の板厚方向の変位を示す。図より，ボルト 1，2，3 の各導入時に，導入したボルト位置の板厚方向の変位はほぼ一致していることがわかる。また，ボルト軸力を導入したときの連結板表面での板厚変化がみられる範囲は，35-3mm と 75mm-3 列（標準間隔の 2 倍）ではボルト孔間隔の中央までに対し，75mm-3 列（標準間隔）では隣のボルト孔までその影響がみられる。なお，板厚変化がみられる範囲は，コンター図で板厚減少が 0 mm 以下を示す黒色の輪郭位置で判断した。したがって，35-3mm と 75mm-3 列（標準間隔の 2 倍）では，ボルト軸力導入時に隣のボルト位置

の板厚減少が生じないため，図-4.3.79 で示したボルト軸力が減少せず，75mm-3 列（標準間隔）の場合はボルト軸力導入時に隣のボルト位置において板厚減少の影響があるためボルト軸力が低下したものと考えられる。

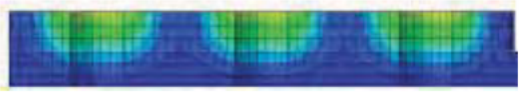




(a) ボルト 1 に軸力導入した時（32mm-3 列，標準間隔）

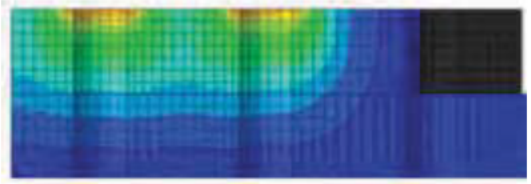


(b) ボルト 2 に軸力導入した時（32mm-3 列，標準間隔）

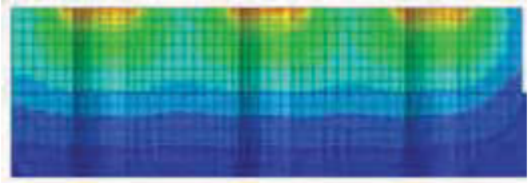


(c) ボルト 3 に軸力導入した時（32mm-3 列，標準間隔）

(d) ボルト 1 に軸力導入した時（75mm-3 列，標準間隔）



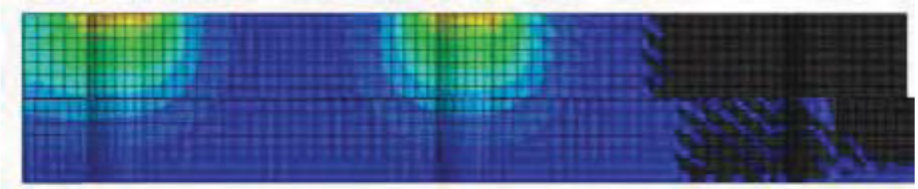
(e) ボルト 2 に軸力導入した時（75mm-3 列，標準間隔）



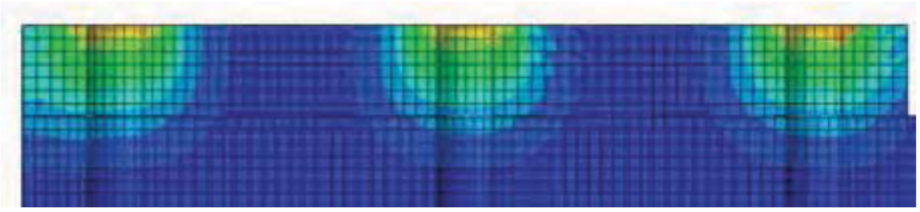
(f) ボルト 3 に軸力導入した時（75mm-3 列，標準間隔）

図-4.3.80　軸力導入時の母板と連結板の板厚方向の変位の分布

(g) ボルト 1 に軸力導入した時（75mm-3 列，標準間隔の 2 倍）



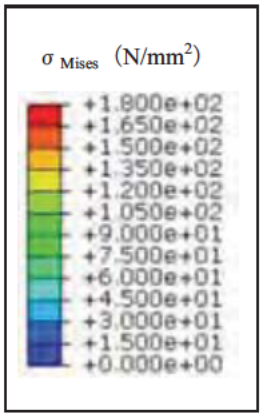
(h) ボルト 2 に軸力導入した時（75mm-3 列，標準間隔の 2 倍）



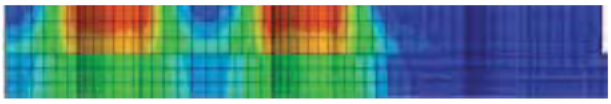
(i) ボルト 3 に軸力導入した時（75mm-3 列，標準間隔の 2 倍）

図-4.3.80　軸力導入時の母板と連結板の板厚方向の変位の分布（続き）

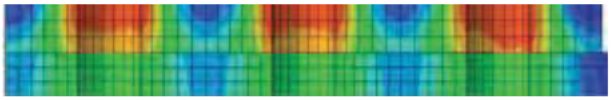
図-4.3.81 に母板と連結板表面のミーゼス応力の分布を示す。図より，ボルト 1，2，3 に軸力導入をした各段階で，軸力を導入したボルト位置の母板と連結板の応力分布に差異が見られない。また，導入したボルト以外の応力分布にも影響が見られない。



(a) ボルト 1 に軸力導入した時（32mm-3 列，標準間隔）



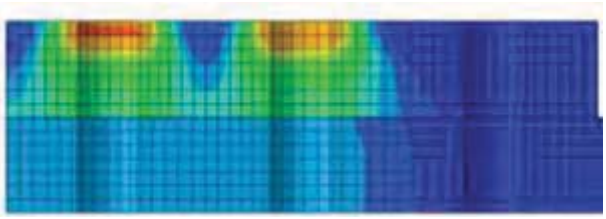
(b) ボルト 2 に軸力導入した時（32mm-3 列，標準間隔）



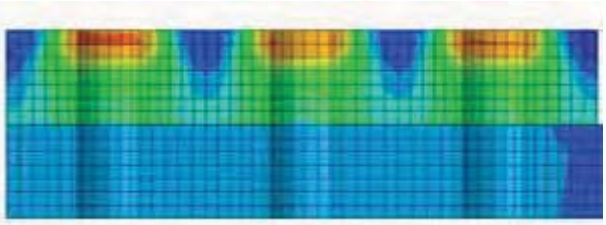
(c) ボルト 3 に軸力導入した時（32mm-3 列，標準間隔）

図-4.3.81　軸力導入時のミーゼス応力の分布

（d）ボルト 1 に軸力導入した時（75mm-3 列，標準間隔）

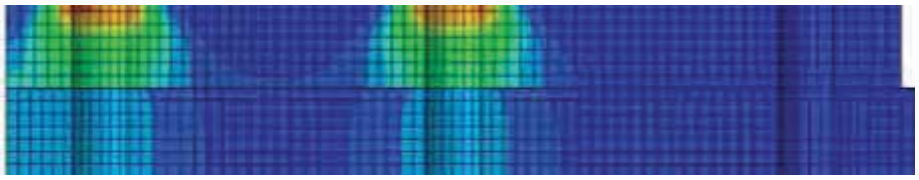


（e）ボルト 2 に軸力導入した時（75mm-3 列，標準間隔）

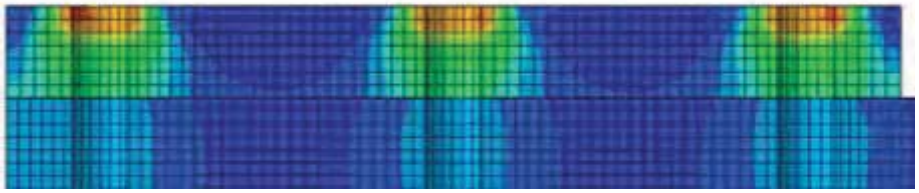


（f）ボルト 3 に軸力導入した時（75mm-3 列，標準間隔）

（g）ボルト 1 に軸力導入した時（75mm-3 列，標準間隔の 2 倍）



（h）ボルト 2 に軸力導入した時（75mm-3 列，標準間隔の 2 倍）



（i）ボルト 3 に軸力導入した時（75mm-3 列，標準間隔の 2 倍）

図-4.3.81　軸力導入時のミーゼス応力の分布（続き）

以上より，本解析のように初期たわみ，肌隙，不陸等の初期不整を考慮しない場合，ボルト間隔により，ボルト軸力の導入が隣接するボルトの軸力に与える影響は，板厚が薄い場合，影響は見られないが，板厚が厚くなると，微小な影響が見られた。また，その影響は，ボルト間隔が大きくなると，小さくなった。したがって，ボルト間隔がすべり挙動に与える影響はほとんどないと考えられる。

4.4　まとめ

本章では，第 3 章で報告した実物大継手部のすべり耐力試験の結果を補完し，厚板多列ボルトを有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動を明らかにするため，FEM 解析を行った。得られた主な結論は以下の通りである。

4.2 節では，高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動を検討するためのパラメトリック解析を行うにあたって，解析に使用するモデルおよび解析手法の妥当性を，試験結果と解析結果とを比較することで検討し，以下のことを明らかにした。なお，ここでは，すべり先行型 8 列の試験体 No. 6-1 のすべり荷重が解析と一致するように解析で与える摩擦係数を調整し，得られた摩擦係数をすべてのケースに共通として与えている。

- 4.2.1 項では，解析モデルの作成にあたって，解析結果に影響を与えると考えられる連結板の端部長さ, 要素分割, モデル化の範囲について, パラメトリックな検討を行った。その結果, 端部長さ 0 mm, ソリッド要素における要素の一辺の長さ 5.5 mm, 解析対象の対称性を考慮してモデル化の範囲を 1/8 とした解析モデルによって，高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動を十分な精度で検討できることを示した。
- 4.2.2 項では，すべり耐力試験の試験体 No. 6-1 のすべり荷重と解析における最大荷重が一致するように摩擦係数を調整し, 調整した摩擦係数を用いてボルト列数が 8 列および 12 列の場合に対して解析を実施した。そして，得られた解析結果とすべり耐力試験の結果とを比較し，再現解析の妥当性を検証した。その結果，荷重-相対変位関係，荷重-ボルト軸力関係，荷重-ひずみ関係については，ボルト列数が 8 列と 12 列のそれぞれに対して，両者がおおむね一致していることを確認した。継手の内側と外側に配置されたボルトの軸力の低下性状については，ある荷重レベルまではすべり耐力試験の結果と解析結果とは一致したものの，ある荷重レベルからは異なり，すべり耐力試験の結果を再現することはできなかった。一方，継手中央に配置されたボルトの軸力低下については，両者はおおむね一致した。
- 4.2.3 項では，4.2.2 項で決定した摩擦係数を用いて，ボルト列数が 12 列の降伏先行型の場合に対して再現解析を実施した。そして，得られた解析結果とすべり耐力試験との結果を比較し，解析の妥当性を検証した。その結果，荷重-相対変位関係，荷重-ボルト軸力関係，荷重-ひずみ関係については，両者がおおむね一致していることを確認した。4.2.2 項と同様，継手の内側と外側に配置されたボルトの軸力については，最大荷重近傍の荷重レベルにおけるボルト軸力の低下性状が両者で異なり，解析においてそれを再現することはできなかった。一方，継手中央に配置されたボルトの軸力低下については，両者はおおむね一致した。
- 本解析では，ボルト導入軸力のばらつき，母板と連結板の初期不整や加工時に生じた局所的な凹凸の考慮，ボルトのねじ部の形状，ボルト孔に対するボルトの位置のずれ等を解析モデルに反映しておらず，また，すべり耐力試験では低い荷重段階における母板と連結板の局所的なずれが生じたものの解析ではそれを再現できなかったため，解析のボルト軸力の低下性状は，継手中央部のボルトにおいてすべり耐力試験の低下性状を再現したものの，継手の内側と継手の外側のボルトにおいてある荷重段階までは一致したが，その後の低下率は一致しなかった。また，ボルト列数が増えるとこれらの影響が相対的に小さくなり，結果として，本解析結果とすべり耐力試験の結果とはおおむ

ね一致する傾向にあった。

- 4.2.2 項と 4.2.3 項では，動摩擦係数を静止摩擦係数と等しいと仮定し，すべり発生を最大荷重到達時としてすべり荷重を定義した。そのため，ボルト列数が 8 列の試験体 No. 6-1 とボルト列数が 12 列の試験体 No. 7-3 の再現解析において，それぞれの試験結果とほぼ同じすべり荷重を得た。しかし，3 体ずつ行った試験の結果の平均値では，試験結果と再現解析の結果に差異がみられた。このように，試験結果そのものについても各種の要因の影響を受けばらついており，解析結果との比較をどのようにすべきかについて，すべり発生の適切な定義，評価の方法とも関連し，重要である。したがって，4.3.1 項では，試験結果を適切に再現できるすべり発生の定義について議論を行うこととする。
- 以上のことから，総合的に判断すると，本解析モデルと解析手法により，すべり係数の低下，ボルトの軸力低下，荷重伝達メカニズムについては，解析ケースの相対比較による検討が可能と考えられる。特に，8 列以上の多列となる場合では，初期不整等がすべり挙動に与える影響が小さくなる傾向にあることから，解析ケース間における定量的な比較検討も可能であると考えられる。

4.3 節では，4.2 節における解析モデルの妥当性の検討を踏まえ，すべり耐力試験結果とパラメトリック解析による解析結果を検討し，以下のことを明らかにした。

- 4.3.1 項で示したように，厚板多列高力ボルト摩擦接合継手を含むすべり耐力試験の結果から，継手の内側および外側での相対変位量が 0.2 mm 程度であったこと，継手外側の相対変位は母板の断面形状の影響を受けやすく，すべり発生の定義に用いることは適切でないことなどから総合的に判断して，4.3 節の解析において，すべり発生を「解析における最大荷重発生時，もしくは母板と連結板の接触面の内側相対変位が 0.2 mm に達した時のうち，内側相対変位が小さい方の時点」と定義した。解析におけるすべり発生の定義を内側相対変位に着目することで，すべり耐力試験で見られたボルト列数の増加に伴うすべり係数の低下の傾向（すべり係数が低下し始めるボルト列数も含む）がより適切に再現され，本定義を用いた解析によって，ボルト列数の増加がすべり耐力に与える影響などを検討できると考えられる。
- 4.3.2 項で示したすべり/降伏耐力比 β がすべり挙動に与える影響の検討では，接触面の各ボルトの分担摩擦力の分布性状はボルト列数と密接に関係しており，ボルト列数が多い 12 列の場合，継手の中央部分に配置されたボルトの分担摩擦力は小さくなる。これはボルト列数が多い継手では，すべり発生時においてボルトの分担摩擦力がボルト 1 本あたりのすべり耐力に到達しないボルトがあることを意味し，その結果としてすべり係数が低下していると考えられる。
- 4.3.3 項，および 4.3.4 項で示した，すべり/降伏耐力比 β を一定，すなわち母板の純断面積を一定として，ボルト列数を 3 列，5 列，8 列，10 列，12 列と設定し，ボルト列数がすべり挙動に与える影響を検討した。その結果，ボルト列数が増えるとすべり係数が低下しないボルト列数の範囲とボルト列数が増加するとすべり係数が低下するボルト列数の範囲が存在することを示した。
- 板厚が小さいほど，ボルト列数の増加に伴うすべり係数の低下がみられた。すべり係数が低下する原因は，上記と同様であり，継手中央に配置されたボルト列の分担摩擦力は，ボルト列数が多く，板厚が薄いほど小さくなる結果となった。
- 板厚・板幅のすべり挙動への影響を検討するため，ボルト列数と板厚を一定とし，すべり/降伏耐力

比 β が一定となるように目標導入軸力を調整した解析を行った。その結果，板幅が広い場合より，板幅が狭い方がすべり係数が高くなることがわかった。

- 4.3.5 項で示した連結板/母板降伏耐力比 γ がすべり挙動に与える影響については，ボルト列数が 8 列の場合は，γ がすべり荷重とすべり係数に与える影響は小さく，一方，ボルト列数が 12 列の場合は大きく影響した。したがって，母板の板厚を同じとし，γ を変化させると，すべり係数が低下するボルト列数の範囲が異なることがわかった。

５．まとめ

本研究では，これまで研究事例の少ない厚板・多列の高力ボルト摩擦接合継手を対象として，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した試験体を用いたすべり耐力試験及び FEM 解析を行い，板厚や列数など各構造諸元がすべり耐力（すべり係数），軸力低下等の継手性能に与える影響について検討を行った。本検討によって得られた主な結論を以下にまとめる。

（1）すべり耐力試験による検討

・継手の厚板化の影響を検討するため，肌すき，フィラーを有しない母材厚 38mm（締付け厚：78mm），50mm（締付け厚：102mm），75mm（締付け厚：151mm）の試験結果の比較を行った。母材厚 50mm 及び 75mm の厚板を用いた試験体のすべり係数は，母材厚 38mm の試験体と概ね同じ値であった。ただし，母材厚 75mm でボルト列数 3 本の試験体については，すべり係数が低いものがみられた。通常，作用力が大きい場合に母板厚が厚くなりボルト列数も多列化するため，このような継手は設計上想定しにくいが，厚板でボルト列数が極端に少ない継手については，すべり係数が低くなるため注意が必要と考えられる。また，締付けから 7 日後の軸力低下率については，締付け厚が厚いほど，軸力低下率が若干高くなる傾向がみられた。

・ボルト列数の影響を検討するため，ボルト列数 3，8，12 列の試験体の試験結果の比較を行った。ボルト列数が 8 列以下の場合，すべり係数は概ね一定であるが，8 列を超えるとすべり係数は低下する傾向がみられ，12 列のすべり係数は 8 列以下のものに比べて 1～7%程度低下した。また，すべり/降伏耐力比 β が影響しないと考えられる $\beta<0.7$ の範囲内で実施された既往の試験データについても，ボルト列数が増えるとすべり係数が低下する傾向がみられており，すべり係数の低下量は，今回の試験結果に近いものであった。

・フィラーの影響を検討するため，フィラー厚 12mm（母材厚 50mm，38mm），22mm（母材厚 60mm，38mm），37mm（母材厚 75mm，38mm）の試験結果の比較を行った。フィラープレート厚 12mm の場合には，フィラー無しに比べ若干すべり係数が上がる傾向にあったが，フィラー厚 22mm，37mm の試験体では，すべり係数の低下がみられた。また，フィラー厚 37mm の試験体では，フィラーなしの試験体のすべり係数に対して最大で 20%低下するものもみられた。既往の試験データについても，フィラー厚が厚くなると，すべり係数が低下する傾向がみられることを確認した。

・接合面の肌すきの影響を検討するため， 1mm の肌すきを有する試験体（母材厚 50mm 及び連結板厚 26mm，母材厚 75mm 及び連結板厚 38mm）と肌すきなしの試験体の実験結果の比較を行った。接合面に肌すきを有する試験体は，肌すきなしの試験体と比較し，すべり係数が低下した。また，肌すきを有する試験体では，連結板の厚いほうがすべり係数が低下した。これは，連結板の剛性が高くなるために，特に連結板内側の第 1 ボルト近傍において母板と連結板が接触しにくく，すべり耐力が低下したものと考えられる。また，既往の試験データについても，肌すきによりすべ

り係数が低下し，連結板が厚いほど低下の傾向が大きいことを確認した。

・接合面に塗装した無機ジンクリッチペイントの塗膜厚の影響を検討するため，母板 38mm の試験体に対して，接触面の合計塗膜厚を 120，180，250μm とした試験体の試験体の実験結果の比較を行った。いずれの試験体も，設計すべり係数 0.4 を大きく上回っていた。また，合計塗膜厚が増えるに従ってすべり係数はわずかに大きくなる傾向がみられた。なお，既往の試験データとの比較分析については，付属資料の資料　1 にまとめる。

(2) FEM 解析による検討

・FEM 解析結果と試験結果の比較により本解析モデル及び解析手法の妥当性を検討し，厚板多列化によるすべり係数の変化傾向や母板と連結板間の荷重伝達メカニズムについて，解析ケースの相対比較により概ね評価できることを確認した。

・本研究のすべり耐力試験の結果，および解析結果の比較検討から，解析におけるすべり発生を「解析における最大荷重発生時，もしくは母板と連結板の接触面の内側相対変位が 0.2 mm に達した時のうち，内側相対変位が小さい方の時点」と定義し，パラメトリック解析において，すべり挙動およびすべり係数の評価に用いた。

・ボルト列数の影響について，すべり/降伏耐力比 β が一定の条件のもと，ボルト列数が増えるともすべり係数が低下しないボルト列数の範囲とボルト列数が増加するとすべり係数が低下するボルト列数の範囲が存在することを示した。また，板厚が小さいほど，ボルト列数の増加に伴うすべり係数の低下が見られた。すべり係数が低下する原因は，各ボルトの分担摩擦力の不均一，すなわち継手中央部に配置されたボルト列の分担摩擦力が継手外側や継手内側に配置されたそれよりも低くなっていることによるものであり，この継手中央に配置されたボルト列の分担摩擦力が小さくなるほど，すべり係数の低下は大きくなる。

謝辞

本検討を行うにあたり，試験体 No.12 の試験体の製作については，大阪市立大学大学院山口隆司教授が，一般社団法人日本鉄鋼連盟より鋼構造研究・教育助成事業による助成を受けて行ったものである。また，感圧紙による接触圧の計測にあたっては宇都宮大学大学院鈴木康夫助教より多大なご協力を得た。ここに謝意を表します。

参考文献

1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，2002.3.
2) 森, 南, 井口, 山口 : 接合面処理方法と品質を考慮した高力ボルト摩擦接合継手すべり係数の提案，土木学会論文集 A，Vol.64，No.1，pp.48~59，2008.1.
3) 土木学会鋼構造委員会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案），鋼構造シリーズ 15，丸善，2006.12.
4) 南，森，堀川：50mm 厚鋼板を用いた太径ボルト（M36）継手のすべり耐力試験，土木学会論文集 A，Vol.62，No.2，pp.267~278，2006.4.
5) 南，堀川，森：太径ボルト（M36-175）および長尺ボルト（M22-150）のすべり耐力試験，土木学会第 60 回年次学術講演会　講演概要集，I-177，pp.351-352，2005.9.
6) 谷平，石原，指吸：締め付け厚の大きい高力ボルト継手の耐力特性調査と長期挙動予測，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1035~1042，1993.3.
7) 鶴田，木村 : LONG GRIP 摩擦継手（圧縮載荷型）に関する研究〔I〕応力緩和について，製鉄研究，No.260
8) 日本鉄道建設公団　北陸新幹線建設局，日本車両製造（株）衣浦製作所：超長の高力ボルト軸力確認試験結果，1995.5.
9) 佐伯，西川，滝沢：高力ボルト摩擦接合継手に関する試験調査（I）引張荷重を受ける継手のすべり耐力，土木研究所資料 第 1871 号，1982.9.
10) 馬場，田島，平野：太径多列高力ボルト摩擦継手試験，橋梁と基礎，1985.10.
11) 玉越，大久保，池田，加藤 :「交換可能損傷制御部材等」の一般橋梁も含めた適用性検討，国総研道路調査費等年度報告，2010.
12) 亀井，松野，西村：多列高力ボルト摩擦接合引張継ぎ手のすべり強度に関する解析的研究，土木学会論文集，No.640，I-50，pp.49-60，2000.1.
13) 水口，宮本，望月，小枝，宮地：高力ボルト継ぎ手設計法の合理化に関する実験的研究　継手部にフィラープレートを設置した小型試験体の引張試験　，第 53 回土木学会年次学術講演会　講演概要集，pp.310~311，1998.10.
14) 滝澤，沢田，黒田，阿部：鋼道路橋設計ガイドラインに基づく高力ボルト摩擦接合継手のすべり試験，橋梁と基礎，pp.25-28，1999.9.
15) 宮地，小枝，望月：フィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動について，構造工学論文集，Vol.44A，pp.55~60，1998.3.
16) 鞆，後藤，石田，永島：合計板厚差が 1mm 程度ある高力ボルト摩擦接合継手部のすべり確認試験と一考察，土木学会第 59 回年次学術講演会　講演概要集 I-591，pp.1179~1180，2004.9.
17) 日本橋梁建設協会 製作技術部会 高力ボルト部会：試験報告書　高力ボルト摩擦接合における 1mm 以下の板厚差がすべり係数に及ぼす影響，2004.6.
18) 宮崎，黒田，田中，森：板厚の異なる材片を接合した高力ボルト摩擦接合継手の滑り耐力，構造工学論文集　Vol.44A，pp.61~70，1998.3.
19) 秋山，木村，小澤，西村：被接合材片に板厚差を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力，土木学会論文集 A，Vol.63，No.1，66~74，2007.1.
20) 藤原，村越，田中ほか：高力ボルト摩擦接合継手に関する試験調査　　接合面に無機ジンクリッチペイントを塗布した継手のすべり耐力等（その 2）　，土木研究所資料　第 2796 号，1989.8.
21) 秋山，西村，亀井，池端：高力ボルト摩擦接合引張継手の限界状態の区分，鋼構造年次論文報告

集，第 3 巻，pp.289~296，1995.11.
22）Dassault Systemes：Abaqus 6.9ja オンラインドキュメンテーション，2009.8.
23）彭，山口，村越，澤田，遠山，大嶽：多列厚板高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動に関する解析的検討，土木学会第 66 回年次学術講演会，I-252，2011.
24）日本規格協会：JIS B 1186，摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット，1995.
25）日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，第 2 版，2006.3.
26) European committee for standardization : Eurocode 3 Design of steel structures. BS EN 1993-1-1 2005, 2005.
27）Yong-hui Huang，Rong-hui Wang，Jin-hua Zou，Quan Gan : Finite element analysis and experimental study on high strength bolted friction grip connections in steel bridges， Journal of Constructional Steel Research, Vol. 66，pp. 803~815，2010.
28）Geoffrey L. Kulak，John W. Fisher，John H. Struik : Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, JOHN WILEY & SONS，1987.
29) 西村 : 高力ボルト摩擦接合のすべり荷重の統計学的考察, 土木学会論文報告集, 第 188 号, pp. 17~22, 1971.4.

付属資料

資料－1　接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の設計すべり係数の検討

資料－2　接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した高力ボルト摩擦接合継手の設計法について　－厚板・多列ボルト継手の適用を前提とした場合の設計法の改定案－

資料－3　塗料の水分量（乾燥期間）の影響に着目したすべり耐力の検討

資料－4　解析モデル一覧

資料-1　接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の設計すべり係数の検討

1. 目的

道路橋示方書・同解説 Ⅱ鋼橋編（以下，道示）[1)]では，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の継手に対して，設計すべり係数を 0.4 と定めており，すべり係数 0.4 を確保するための塗装仕様が規定されている。この塗装仕様は，土木研究所が 1989 年に実施した試験（以下，〔土研，1989〕）[2,3)]に基づいて定められたものである。一方，最近の研究 [4)]では，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合，設計すべり係数について合理化の余地があることが報告されている。

本検討では，〔土研，1989〕の結果と今回の試験結果に加え，〔土研，1989〕以降の他機関が実施した試験のデータを収集・整理し，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合のすべり係数に関するデータベースを作成するとともに，これらデータを分析し，設計すべり係数について検討を行う。

2. 背景

2.1　道路橋示方書における設計すべり係数の変遷

道示の設計すべり係数に関する規定を表-資 1.2.1 に示す。設計すべり係数は，鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針解説（S41）[5)] から，現在に至るまで 0.4 とされている。接触面の処理方法に関する規定を表-資 1.2.2 に示す。当初，すべり係数は黒皮を除去した鋼材素面に対する値として与えられていたが，その後，橋梁の大型化やこれに伴う施工の長期化により，接触面の管理（浮き錆落としや清掃など）に要する手間が増加することや，接触面が塗装上の弱点となり易いことが指摘されるようになってきたため，昭和 55 年の道示の改定では，0.4 以上のすべり係数が確保されることが確認された場合に限り，接触面の塗装などを許容する旨の記述が解説に記載されている。また，平成 2 年の道示の改定では，接触面を鋼材素面とした場合，および無機ジンクリッチペイントを塗装した場合について，設計すべり係数 0.4 を用いて許容力が規定され，無機ジンクリッチペイントを塗装する場合の条件が施工編に規定されている（表-資 1.2.2 中の表-17.5.1）。

表-資 1.2.1　道示における設計すべり係数の取り扱い

基準	設計すべり係数	解説
鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針（S41.7）	無塗装の場合：0.40	すべり係数 μ は，ボルト軸力とすべり荷重の比であって，小型試験片による実験値では黒皮を除去した場合，平均 0.5 程度となるがすべり荷重のバラつき，ボルトのリラクゼーション，その他を考慮して 0.4 とした。
道路橋示方書・同解説 Ⅱ鋼橋編（S48.2，S55.2）	無塗装の場合：0.40	すべり係数 μ は小型試験片による実験値では黒皮を除去した場合，平均 0.5 以上を得ることができるが，ボルトの配置や圧力の不均等などによるすべり荷重のバラつきやボルトのクリープ，レラクセーションによる導入軸力の減少，その他を考え 0.4 とした。
道路橋示方書・同解説 Ⅱ鋼橋編（H2.2）以降	無塗装の場合：0.40 厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗装する場合：0.40 注1)	同上

注1）厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗装する場合のすべり係数については，施工編ですべり係数0.40を得るための塗装条件が規定されている。この塗装条件は，土木研究所の試験結果（1989年）に基づいて規定されたものであり，無塗装の場合と同じすべり係数（0.4）を得るために必要な塗装の条件（塗膜厚や亜鉛末の粒径，含有量）について比較検討されたものである（参考：土木研究所資料 第2796号）

表-資 1.2.2　道路橋示方書における接触面の処理方法の取り扱い

<table>
<tr><th>基準</th><th>条文</th><th>解説</th></tr>
<tr><td>鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針（S41 7）</td><td>i ）接合される材片の接触面は黒皮を除去し，粗面とし，塗装を行ってはならない。
ii ）現場において材片を締付ける際，接触面に浮錆などが発生している場合は，ワイヤーブラシなどでこれを取り除かなければならない
iii ）摩擦面は現場において接合する前に，監督員の検査を受けなければならない。</td><td>接触面はサンダーなどで滑面にみがきあげるのではなく，工場出荷時に粗面約 50S を目標とし，ペンキ塗装を行ってはならないのは勿論の事，ウオシュプライマーなどの下地処理の錆止め剤も，現場施工の際に十分清掃しなければならない。</td></tr>
<tr><td>道路橋示方書
・同解説
Ⅱ鋼橋編
（S48 2）</td><td>接合される材片の接触面は，黒皮を除去し粗面としなければならない。また接触面には塗装を行ってはならない。ただし，支圧接合の場合はプライマー塗装の除去を省略することができる。現場において材片を締付ける際，接触面に浮錆などが発生している場合には，ワイヤーブラシなどでこれを取り除かなければならない。また，油，泥などの汚れは十分に清掃して取り除かなければならない。</td><td>材片接触面は黒皮を除去し，50S 程度の粗面とすることにした。材片接触面にはペンキ塗装を行ってはならないのはもちろん，ウオシュプライマーなどの下地処理の錆止め剤も，除去しなければならない。ただし，支圧接合野場合には，プライマーを除去する必要はない。</td></tr>
<tr><td>道路橋示方書
・同解説
Ⅱ鋼橋編
（S55 2）</td><td>1) 接合される材片の接触面は，0 4 以上のすべり係数が得られるように処理しなければならない。ただし，支圧接合の場合はこのかぎりではない。
2) 材片の締付けにあたっては，接触面の浮錆，油，泥などを十分に清掃して取り除かなければならない。</td><td>従来，接触面は黒皮を除去して粗面とし，塗装を行ってはならず，ウォッシュプライマーなどの下地処理剤も除去しなければならないとされており，このような接触面を持つ継手では，0 4 以上のすべり係数が確保できることが知られている。
しかし，工場製作時にこのような処理を行っても，現場でこの状態を維持することが難しく，接触面に浮き錆，油，泥などが付着している場合が多い。このような場合は，現場で接合する直前に接触面を十分清掃して，これらを除去することが大切である。
一方，橋梁の大型化に伴い個々の連結板の重量が増加してきたため，現場における浮き錆などの除去作業が困難になってきている。また，接合部の塗装が完成後の防錆上の弱点となりやすいことから，接触面にも塗装などの表面処理を施すことが考えられてきた。例えば，亜鉛とアルミニウムの合金による金属溶射を施した場合は，0 4 以上のすべり係数を確保できることが実験で確認され，この方法により施工された橋梁もある。また，無機質ジンクリッチペイントを施した場合の実験結果によれば，0 4 以上のすべり係数が得られた例がある。
したがって，今回の改定にあたり接触面は必ずしも黒皮を除去した粗面とする必要はなく，すべり係数 0 4 以上を確保することができれば防錆処理をすることも認めるものとして条文を改正したものである。しかしながら，防錆処理した場合は，塗膜の種類や厚さなどによっては 0 4 以上のすべり係数を確保できないおそれや，塗膜のクリープによりボルト軸力の低下の原因となるおそれもあるので，その必要性もふくめて慎重に検討したうえで使用しなければならない。</td></tr>
<tr><td>道路橋示方書
・同解説
Ⅱ鋼橋編
（H2 2）以降</td><td>(1) 摩擦接合において接合される材片の接触面については，必要とするすべり係数が得られるように適切な処理を施さなければならない。
(2) 下記に示す処理を施した場合には，0 4 以上のすべり係数が得られるものと考えてよい。
1) 接触面を塗装しない場合，接触面は黒皮を除去して粗面とする。材片の締付けにあたっては接触面の浮さび，油，泥等を十分に清掃して取り除く。
2) 接触面を塗装する場合，表-17 5 1 に示す条件にしたがい，厚膜型無機ジンクリッチペイントを使用する。
3) 接触面に 1)，2)以外の処理を施す場合は，0 4 以上のすべり係数が十分得られるように検討する。

表-17 5 1　厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗布する場合の条件
<table><tr><th>項目</th><th>条件</th></tr><tr><td>接触面片面あたりの最小乾燥塗膜厚</td><td>30μm 以上</td></tr><tr><td>接触面の合計乾燥塗膜厚</td><td>90～200μm</td></tr><tr><td>乾燥塗膜中の亜鉛含有量</td><td>80%以上</td></tr><tr><td>亜鉛末の粒径（50%平均粒径）</td><td>10μm 程度以上</td></tr></table></td><td>(1) 摩擦接合継手では，接触面のすべり係数を仮定して継手のすべり耐力が算定されているため，施工においては設計で仮定したすべり係数が得られるように接触面について適切な処理をしなければならない。
なお，支圧接合において継手性能の改善を目的としてボルトに締付け軸力を与え摩擦力による力の伝達を期待するような場合や引張接合において接触面の摩擦力によりせん断力を伝達するような場合には，接触面について摩擦接合と同様な処理を行わなければならない。
(2) 従来より，黒皮を除去して接触面を粗面とした継手では，0 4 以上のすべり係数が十分確保できることが知られている。しかし，工場製作時にこのような処理を行っても，現場で接合を行うまでこの状態を維持することが難しく，接触面に浮きさび，油，泥等が付着している場合が多い。このような場合は，現場で接合する直前に接触面を十分清掃して，これらを除去することが大切である。
一方，橋の大型化に伴い個々の連結板の重量が増加してきたため，現場における浮さび等の除去作業が困難になってきたこと，また，接合部の塗装が完成後の防せい防食上の弱点となりやすいことから，接触面にも塗装等の表面処理を施すことが考えられてきた。
すべり係数 0 4 以上を確保できる塗装仕様に関しては，条文(2) 2) に示す条件に従って塗装を行えば，すべり係数 0 4 以上を確保できることが明らかにされており 8)，9)，厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗布する場合の条件を規定した。接触面にそれぞれ異なる厚膜型無機ジンクリッチペイントを用いたり，他の塗料を併用したりしてはいけない。素地調整後，直接，厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗布する。
摩擦接触面のみに厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗装し，他の部分に別の塗装系を用いる場合には，境界部の処理に注意し，塗装相互に悪影響を生じさせないように事前に検討しておくことが必要である。また，塗膜厚の管理は十分に行うものとする。
接触面に条文(2) 1)及び 2)以外の防せい防食処理を施す場合は，塗膜の種類や厚さ等によっては，0 4 以上のすべり係数を確保できないおそれや，塗膜のクリープによりボルト軸力の低下の原因となるおそれもあるので，その必要性も含めて慎重に検討したうえで使用しなければならない。なお，溶融亜鉛めっき橋におけるめっき処理を施した接触面については，ブラスト処理を実施して 0 4 以上のすべり係数を確保するのがよいが，使用するブラスト材の種類や施工条件によっては，0 4 以上のすべり係数が得られない場合があるので，文献 10)等を参考とするのがよい。</td></tr>
</table>

2.2　既往の研究

2.2.1　すべり係数に関する研究

接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数に着目した研究は，これまでに多くの研究がなされており，これらの中から主な研究事例を以下に示す。

【高力ボルト摩擦接合継手に関する試験調査（土木研究所）[2,3]】

本研究は，高力ボルト摩擦接合継手の接触面に無機ジンクリッチペイントを施した場合の無機ジンクリッチペイントの仕様がすべり耐力に与える影響に着目したものである。この研究の主な検討結果を以下に示す。

- 十分なすべり耐力を得るためには，乾燥塗膜中の亜鉛含有量が 80%以上となる塗料を用いるとともに，合計塗膜厚をある程度以上とする必要がある。過去の試験結果も参考にすると，合計塗膜厚を 90μm 以上とすれば，すべり係数 0.4 以上を確保することができる。一方，合計塗膜厚の最大値は 200μm 程度が妥当である（図-資 1.2.1）。
- 亜鉛末の 50%平均粒径は亜鉛含有量ほどすべり係数に影響しないものの 10μm 程度以上あることが望ましい。
- 塗膜のクリープ等によるボルト軸力減少がすべり耐力に与える影響よりも塗料のなじみ等による真の摩擦係数を増大させる影響の方が大きく，軸力導入後，時間が経過するに伴ってすべり耐力は増大する。
- 以上の結果は，小型供試体によるものであるが，これらの結果は実物大のものよりも安全側の評価しているものと考えられ，実際に用いられる高力ボルト摩擦接合継手の設計にも十分反映できる。

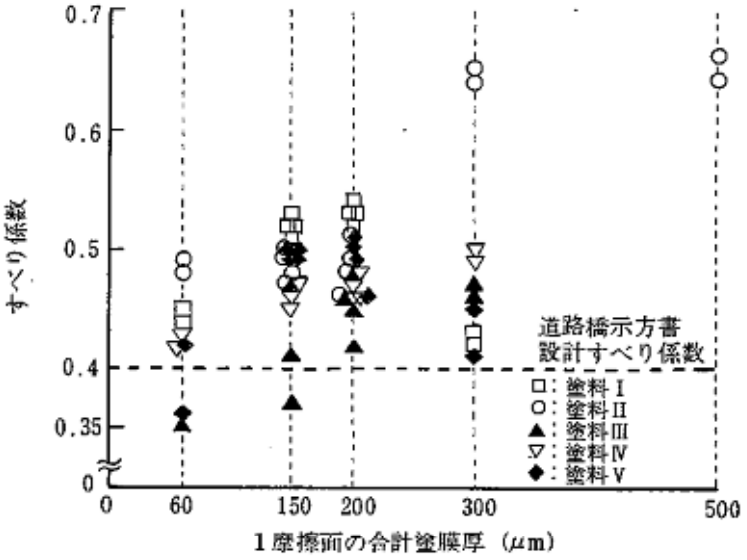


図-資 1.2.1　合計塗膜厚とすべり係数[2)]

（補足：▲および◆は施工編に規定する塗装仕様を満足しない塗料である）

【高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案）」（土木学会）[4)]】

本指針（案）では，高力ボルト摩擦接合継手の設計すべり係数について，接触面処理方法に応じたすべり係数を提案している。接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合については，〔土研，1989〕を含むこれまでの研究成果をとりまとめて，塗膜厚とすべり係数の関係を整理し，片面塗膜厚が 65μm 以下の場合はすべり係数 0.4，片面塗膜厚が 65μm より大きい場合はすべり係数 0.5 としている。

2.2.2　軸力残存率に関する研究

〔土研，1989〕では，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した試験体を対象として，試験体を組み立てた後，屋外に 6 カ月放置した後の軸力を計測している。ここでは，軸力のばらつきが大きく，塗料組成の影響はあまり見られない。また，合計塗膜厚との関係は，平均して見た場合に塗膜厚が厚いほど，軸力減少量が大きくなる傾向がみられる（図-資 1.2.2）。

高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案）」（土木学会）[4)]では，軸力低下率に関する既往の研究をとりまとめており，ボルトの締付け後数年間経過した実橋を対象として，軸力低下が 20%程度となるような事例を紹介している。またボルトや連結板の腐食がある場合は，30%近い軸力低下が生じる事例があることについても触れている。また，接触面に無機ジンクリッチペイント 70μm を塗装した継手では，谷平ら [21)]の試験により，5 年間の軸力残存率が 85%程度となるような試験結果が得られているが，それ以外に長期の軸力を計測した研究事例は少なく，十分な知見は得られていない。

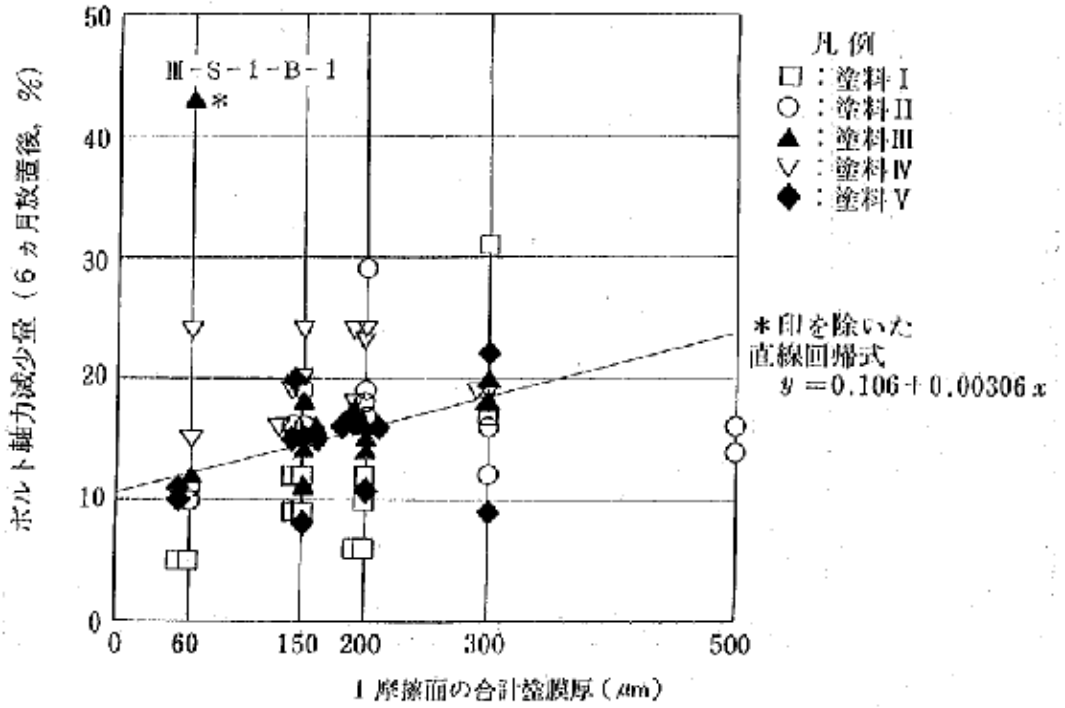


図-資 1.2.2　合計塗膜厚とすべり係数 [2)]

（補足：▲および◆は施工編に規定する塗装仕様を満足しない塗料である）

2.3　無機ジンクリッチペイントに関する規定の変遷

接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装する方法は 1980 年代に本州四国連絡橋を中心に実用化に向けた検討が行われ，その後 1991 年に JIS 化されている。表-資 1.2.3 に，本州四国連絡橋公団規格と JIS 規格における品質を示す。耐候性の他は，全て同じ内容となっており，無機ジンクリッチペイントの品質については大きな違いは見られない。

表-資 1.2.3　無機ジンクリッチペイントに関する規定の比較

	本州四国連絡橋公団規格 HBS K-5603-1980,1990	JIS K 5553-1998 （1 種）	JIS K 5553-2002 （1 種）
様気の中の状態	粉：微小で一様な粉末であること 液：かき混ぜたとき堅い塊がなくて一様になること	同左	同左
乾燥時間（h）	5 以内	同左	同左
塗膜の外観	塗面に流れ・むら・われ・はがれがないこと	塗膜の外観が正常であること	同左
ﾎﾟｯﾄﾗｲﾌ（h）	5 以上	5 以上	5 時間で使用できるものとする
耐衝撃性	衝撃により割れ・はがれができないこと	同左	同左
圧塗り性	圧塗り性に支障がないこと	同左	同左
耐塩水噴霧性	塩水噴霧に耐えること	同左	同左
混合塗料中の加熱残分(%)	70 以上	同左	同左
加熱残分中の金属亜鉛(%)	75 以上	同左	同左
耐候性	－	2 年間の試験でさび・割れ・はがれ・膨れがないこと	同左

注）簡略化のため，一部表現を修正している

3. 検討方法

3.1　検討フロー

検討フローを図-資 1.3.1 に示す。設計すべり係数の見直しにあたって，まず既往の研究成果から試験データを抽出する。その際，できるだけ同一条件下での比較となるよう，塗膜厚や試験体形状について，一定の条件を満足するものに限定する。試験結果については，平均値や下限値，ばらつき等を整理するとともに，塗膜厚やボルト軸力などすべり係数に影響を与える要因とすべり係数の関係を整理する。また，これらの結果を踏まえて，設計すべり係数の見直しについて検討を行う。

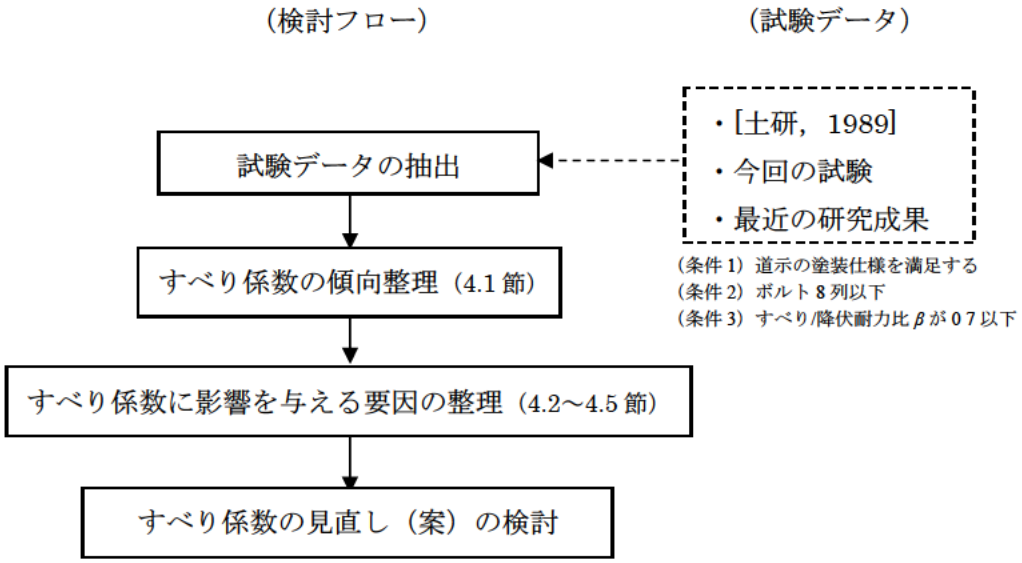


図-資 1.3.1　検討フロー

3.2　試験データの抽出条件

すべり係数に与える要因については，塗膜厚や試験体形状，ボルト軸力など多くの要因が影響することが知られている。既往の研究成果から試験データを収集するにあたって，できるだけ同一条件下での比較となるよう，下記の 3 つの条件を考慮した。

1）道示に規定される塗装仕様を満足するもの
2）ボルト列数が 8 列以下のもの
3）すべり/降伏耐力比 β が 0.7 以下のもの

1）の塗装仕様について，既往の研究では，塗装仕様がすべり係数に与える影響が大きいことが明らかとされているため，本検討では，塗装仕様が明確な研究成果のみを取り扱うこととした。

2）のボルト列数について，道示ではなるべく 8 本程度以下とするのがよいとしており，ボルト列数が多列となると，すべり係数が低下する傾向があることが既往の研究により明らかとなっているため，本検討では 8 列以下の試験結果のみを取り扱うこととした。

3）のすべり/降伏耐力比 β について，文献 4)などでは，すべり/降伏耐力比 β が 0.7 を超えると，すべり/降伏耐力比 β の増加に伴ってすべり係数が低下する傾向があるとされている。本検討ではすべり降伏 β の影響を受けない状態のすべり係数を比較することを目的として，すべり/降伏耐力比 β が 0.7 を下回る試験結果のみを取り扱うこととした。

なお，データベースでは，下記の条件を満たさないデータについても掲載しており，採用可否の検討結果と，不採用となった場合の理由も記述している。

3.3　検討対象

本検討では，以下の 3 種類の研究成果を対象とした。なお，これらの研究成果の詳細なデータは参考資料-2 に示す。

(1)〔土研，1989〕

・5 種類の塗料の中から，道示の規定を満足する塗料Ⅰ，Ⅱ，Ⅳを対象とする

・小型試験体および大型試験体の両方を対象とする

・試験体の暴露条件が異なる下記 3 ケース全てを対象とする

タイプ A　：　締付け直後にすべり耐力試験を実施（具体的な経過時間は不明）

タイプ B　：　締付け後 180 日間屋外放置した後にすべり耐力試験を実施

タイプ C　：　180 日間屋外放置後に組み立て

(2) 今回の試験

・基本ケースのうちボルト列数が 8 列以下のもの（試験体 No.1，2，3，5’，6）

・塗膜厚ケースのうち，塗膜厚が道示の規定を満足するもの（試験体 No.13）

(3) 最近の研究成果

・城島　：接合面にジンクリッチペイントをもつ高力ボルト継手のすべり耐力試験[6)]

・加藤ら　：いろいろの条件で無機ジンクリッチペイントを塗布した高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験，技法たきがみ，1990[7)]

・岩田ら　：厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗布した高力ボルト摩擦接合部の基礎的調査，技報まつお，1992[8)]

・谷平ら　：締付け厚の大きい高力ボルト継手の耐力特性調査と長期挙動予測，構造工学論文集 Vol.39A，1993[9)]

・宮地ら　：フィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動について，1998[10)]

・日本道路公団　：防錆処理トルシア形高力ボルト性能試験報告書，1998[11)]

・水口ら　：高力ボルト継手設計法の合理化に関する実験的研究，1998[12)]

・山田・亀井ら　：ジンクリッチペイントを塗布した高力ボルト摩擦接合継手の引張試験，土木学会関西支部，2000[13)]

・日本橋梁建設協会　：高力ボルト摩擦接合における 1mm 以下の板厚差がすべり係数に及ぼす影響，2004

・鞆ら　：合計板厚差が 1mm 程度ある高力ボルト摩擦接合継手部のすべり確認試験と一考察，土木学会第 59 回年次学術講演会，2004[15)]

・森ら　：接触面処理方法と品質を考慮した高力ボルト摩擦接合継手すべり係数の提案，土木学会論文集，2008[16)]

・滝澤ら　：鋼道路橋設計ガイドラインに基づく高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験，橋梁と基礎，1999[17)]

注 1）上記の研究成果の中には，フィラープレートや肌すきに着目したケースも含まれているが，ここではフィラープレートを用いていない試験体や肌すきのない試験体の試験結果のみを引用している。

注 2）文献中から孔径が読みとれないものについては，ボルト径＋2 5mm と仮定して，降伏耐力あるいはすべり/降伏耐力比 β を算出した。

注 3）論文中から母板や連結板の材質が読みとれないものについては，SM490 材の降伏強度を用いて，降伏耐力あるいはすべり降伏比 β を算出した。

3.4　すべり係数の算出方法

すべり係数の算出方法としては，ボルト軸力の考え方の違いにより，式（資 1.3.1）～（資 1.3.4）に示す 4 つの方法を考慮した。

すべり係数 : $\mu_0 = P / (n \cdot m \cdot N_0)$　・・・・・式（資 1.3.1）

すべり係数 : $\mu_0' = P / (n \cdot m \cdot N_0')$　・・・・・式（資 1.3.2）

すべり係数 : $\mu_1 = P / (n \cdot m \cdot N_1)$　・・・・・式（資 1.3.3）

すべり係数 : $\mu_2 = P / (n \cdot m \cdot N_2)$　・・・・・式（資 1.3.4）

ここで,

P : すべり荷重

n : ボルト本数

m : 接触面数

N_0 : 設計軸力

N_0' : 締付け軸力（目標値）

N_1 : 締付け軸力（実測値）

N_2 : 試験前軸力（実測値）

また，式（資 1.3.2）と式（資 1.3.4）により，μ_0'と μ_2 の関係は式（資 1.3.5）に示す通りとなる。

すべり係数 : $\mu_0' = (N_2 / N_0') \cdot \mu_2$　・・・・・式（資 1.3.5）

研究成果の中には, 試験体の締付け軸力を道示に従い設計軸力の 10%増しとするものと,〔土研, 1989〕や今回の試験のように，試験体の締付け軸力を道示に従い設計軸力のままとするものが混在している。これらの試験結果を同レベルで比較するため，ここではすべり係数 μ_0'を用いて比較することとした。この場合，すべり係数 μ_1 を用いる方がより正確であるが，締付け軸力の計測値が明らかでないケースが多いことから，本研究ではすべり係数 μ_0'を用いて比較することとした。

また，すべり係数 μ_2 は，すべり荷重を試験前軸力で除したものであり，ボルト軸力に時間経過に伴う軸力低下の影響を考慮した試験前軸力を用いているため，実際の摩擦係数に最も近い値であると考えられる。そこで，本研究では，前述のすべり係数 μ_0'に加えて，このすべり係数 μ_2 を用いて検討を行うこととした。

なお,〔土研，1989〕では，締付け直後にすべり耐力試験を実施したタイプ A と，締付け後 180 日間屋外放置した後にすべり耐力試験を実施したタイプ B の違いにも着目しているが, タイプ A では試験前軸力が計測されていないため，すべり係数 μ_2 を求めることができない。そこで，タイプ A が締付け直後に試験を実施していることを踏まえて，軸力低下は軽微であると予想し，つまりタイプ A のすべり係数 μ_0'と μ_2 は同値であると仮定して，タイプ A のすべり係数 μ_0'とタイプ B のすべり係数 μ_2 を比較することとした。

4. 検討結果

4.1　すべり係数のばらつきの傾向

〔土研，1989〕，今回の試験，最近の研究成果におけるすべり係数 μ_0' の頻度分布を図-資 1.4.1 に，すべり係数 μ_2 の頻度分布を図-資 1.4.2 に示す。図中では，すべり係数のデータ数，平均値及びすべり係数の分布が正規分布であると仮定した場合の標準偏差を示している。これらの試験は必ずしも同一の条件下で実施したものではないため，単純比較することについては議論の余地があるが，概ね以下の傾向がみられる。

- 設計すべり係数 0.4 は，試験により得られたすべり係数 μ_0' が示す範囲（0.40～0.75）の下限値に相当する。
- 今回の試験や最近の研究成果では，すべり係数 μ_0' は 0.4 を大きく上回っており，〔土研，1989〕と比べても比較的高い値が得られている。
- 〔土研，1989〕は，最近の研究成果や今回の試験に比べて，すべり係数 μ_0' のばらつきが大きい。
- すべり係数 μ_2 の平均値（0.67）は，すべり係数 μ_0' の平均値（0.59）よりも大きく，すべり係数 μ_2 の標準偏差（0.05）は，すべり係数 μ_0' の標準偏差（0.08）よりも小さい。

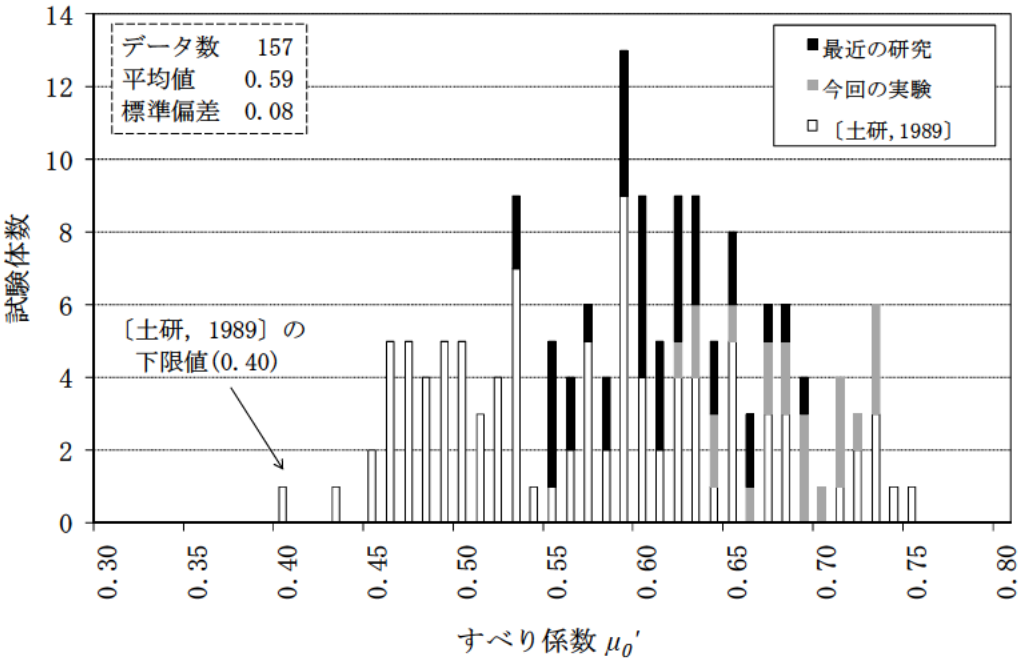


図-資 1.4.1　すべり係数 μ_0' の分布

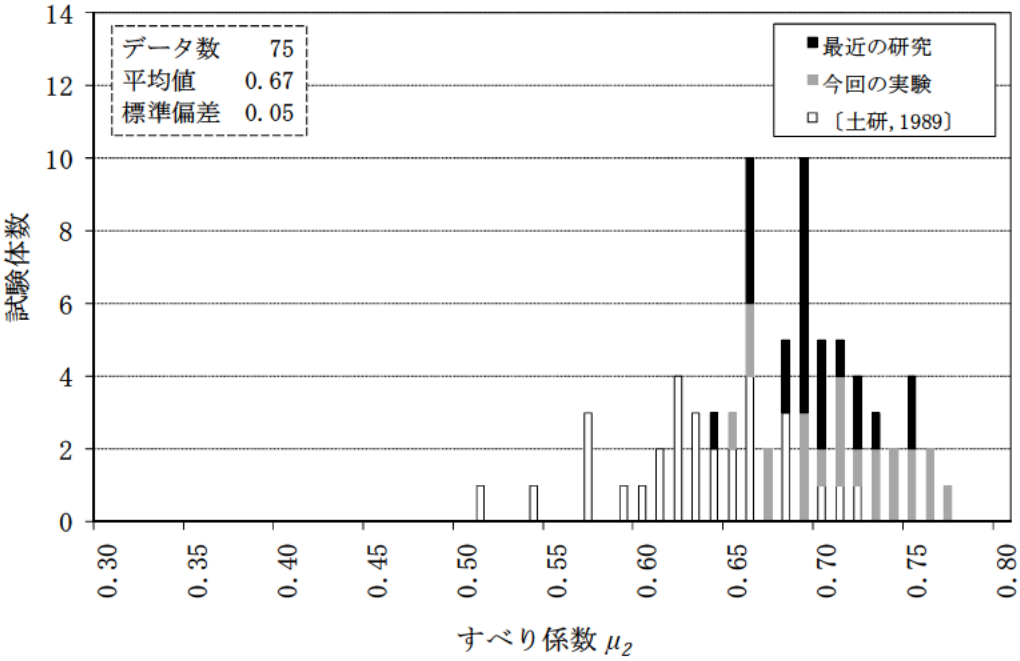


図-資 1.4.2　すべり係数 μ_2 の分布

4.2　すべり係数と塗膜厚の関係

片面塗膜厚及び合計塗膜厚とすべり係数 μ_0' の関係を図-資 1.4.3，図-資 1.4.4 に示す。図中では，〔土研，1989〕の試験体のうち，塗装仕様が道示の規定を満足しない試験体の試験結果も参考として示している。塗装仕様が道示の規定を満足するものを「〔土研，1989〕塗装仕様 OK」と表示し，塗装仕様が道示の規定を満足しないものを「〔土研，1989〕塗装仕様 NG」と表示している。前節で述べたとおり，今回の試験や最近の研究成果では，すべり係数 μ_0' は設計すべり係数 0.4 を大きく上回っており，〔土研，1989〕と比べても比較的高いすべり係数が得られていることが分かる。ここで，試験結果の下限値 0.4 は〔土研，1989〕における片面塗膜厚 30μm（合計塗膜厚 200μm）のものである。この片面塗膜厚 30μm を設定した理由について，当時は高力ボルト継手部に無機ジンクリッチペイントを塗装する場合の塗装仕様が定められておらず，鋼道路橋塗装便覧（S54）において一時的防錆を目的とした場合の無機ジンクリッチペイントが 30～70μm で用いられていたことから，この下限値に基づいて設定したとしている[2)]。

一方，鋼道路橋防食・塗装便覧（2005）[18)]では，表-資 1.4.1 に示すように，高力ボルト摩擦接触面の塗装仕様について，無機ジンクリッチペイントを塗装する場合の塗膜厚を 75μm としている。また，土木工事施工管理基準[19)]では，塗膜厚の施工管理規格値を表-資 1.4.2 に示すように定めており，これによると片面塗膜厚の最小値は 52.5μm（=75μm×0.7）となり，設計すべり係数 0.4 を確保するための塗装条件（30μm）を上回る値となっている。この施工管理規格値に基づいて，片面塗膜厚の最小値を 52.5μm，合計塗膜厚は現行基準と同じ 200μm 以下としてデータを整理すると，すべり係数 μ_0'の下限値は 0.46 となる。図-資 1.4.5，図-資 1.4.6 に，すべり係数 μ_0' と μ_2の頻度分布を示す。すべり係数 μ_0' の平均値（M）は 0.61，標準偏差（S）は 0.07 であり，ここですべり係数を 0.45 と設定すると，0.45 は M－2S~ 3S の範囲内にある。また，すべり係数 μ_0' と μ_2の頻度分布を比較すると，μ_2の方がばらつきが小さくなっている。これは，すべり係数のばらつきに対して，導入した軸力の低下のばらつきの影響が大きいためと考

えられる。

表-資 1.4.1　鋼道路橋塗装・防食便覧（高力ボルト連結部（接触面）の塗装仕様）[18)]

工場塗装	
2次素地調整	下塗り
ブラスト処理 ISO $Sa2^{1}/_{2}$	無機ジンクリッチペイント 600g/m2 75μm

表-資 1.4.2　土木工事施工管理基準及び規格値（国土交通省 関東地方整備局）[19)]

測定基準	1ロットの大きさは500 ㎡とする。1ロット当たりの測定数は25点とし、各点の測定は5回行い、その平均値をその点の測定値とする。
規格値	ａ．ロットの塗膜厚平均値は、目標塗膜厚合計値の90％以上。 ｂ．測定値の最小値は、目標塗膜厚合計値の70％以上。 ｃ．測定値の分布の標準偏差は、目標塗膜厚合計値の20％を超えない。ただし、測定値の平均値が目標塗膜厚合計値より大きい場合はこの限りではない。

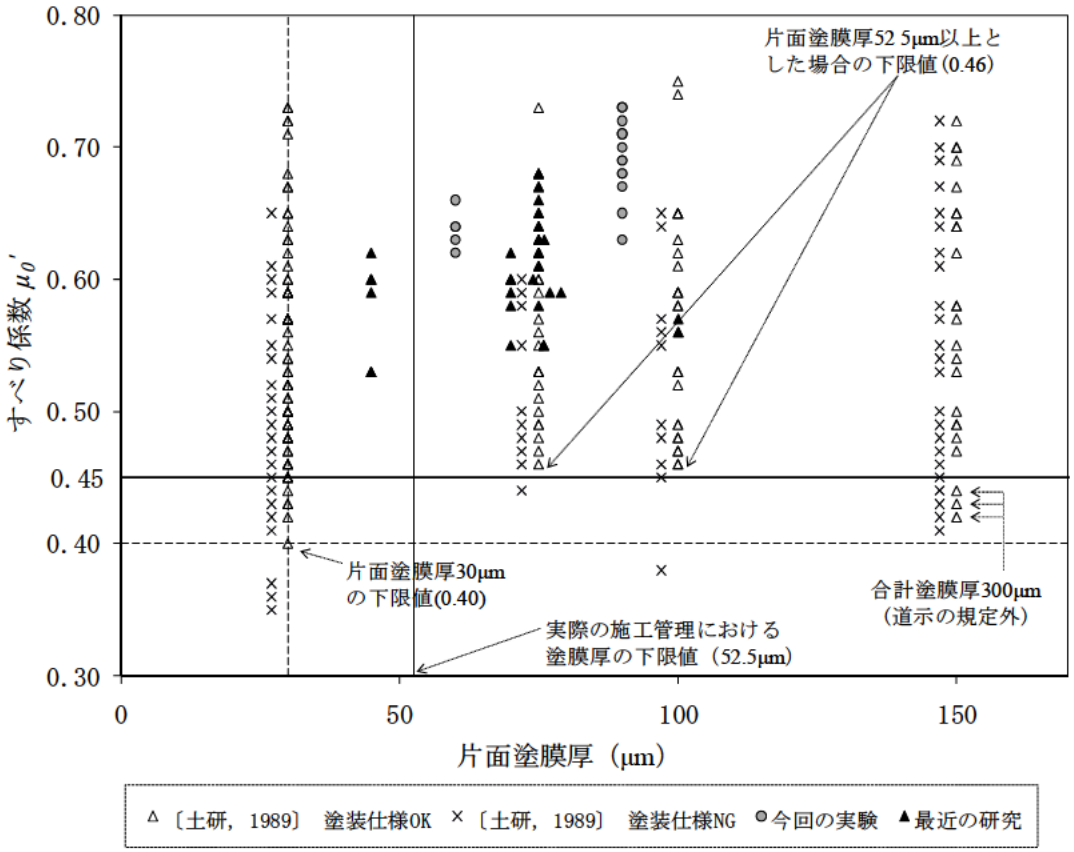


図-資 1.4.3　片面塗膜厚とすべり係数 μ_0'の関係

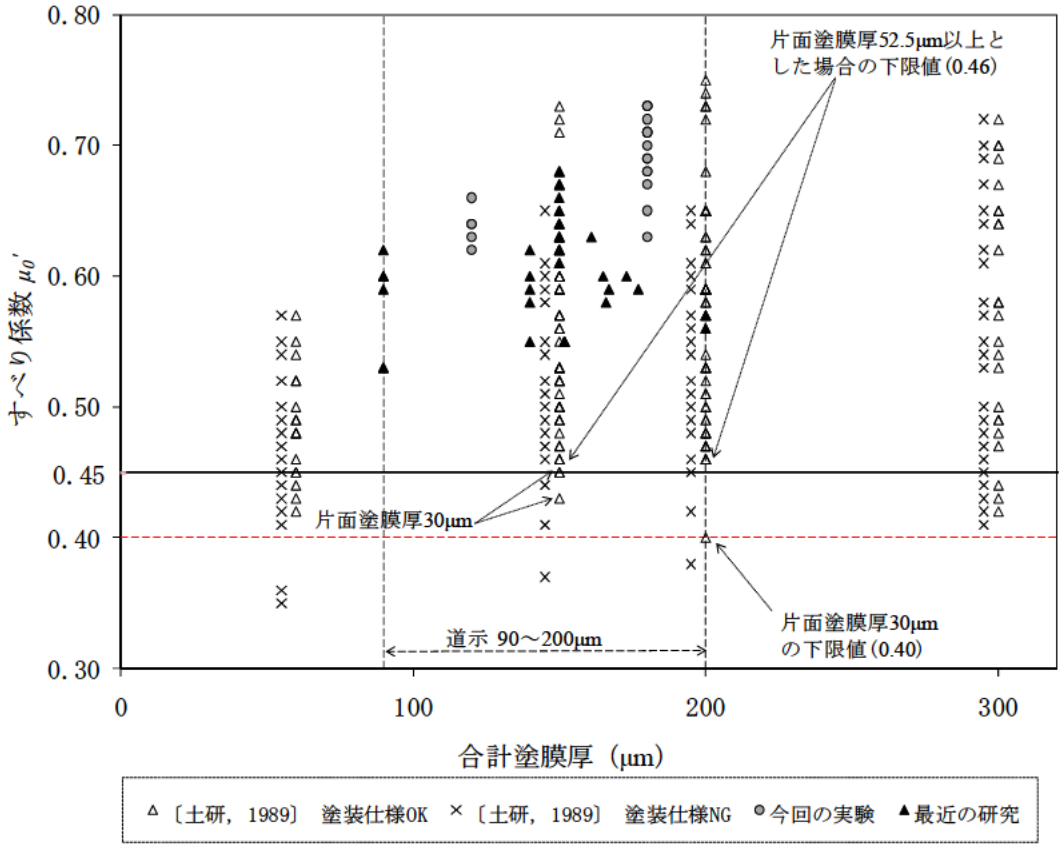


図-資 1.4.4　合計塗膜厚とすべり係数 μ_0'の関係

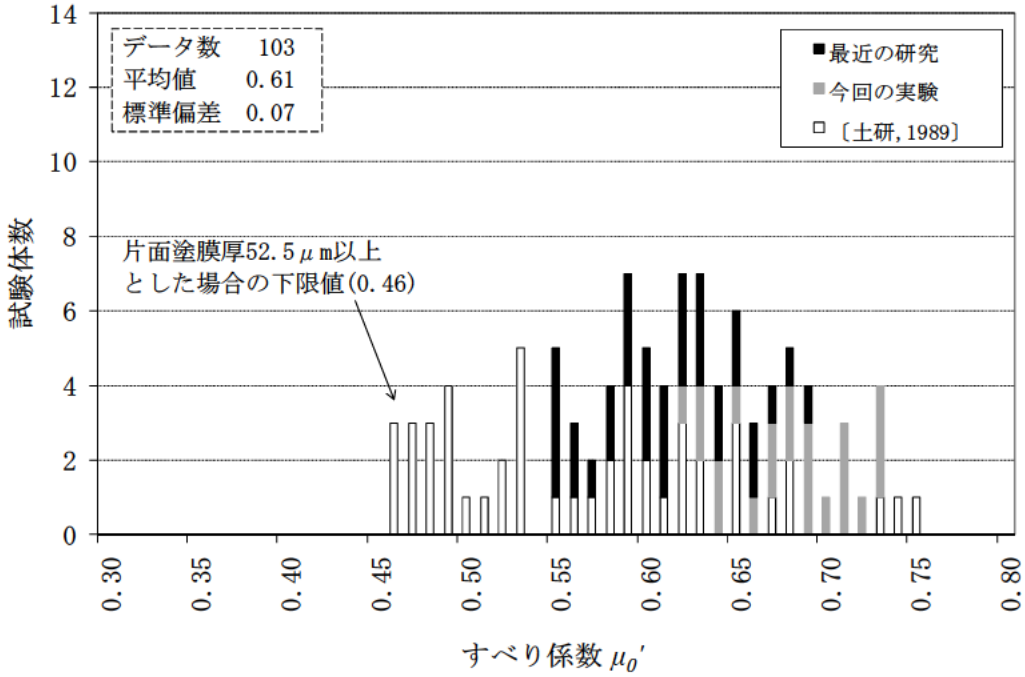


図-資 1.4.5　すべり係数 μ_0'の分布（片面塗膜厚 52.5μm 以上を対象）

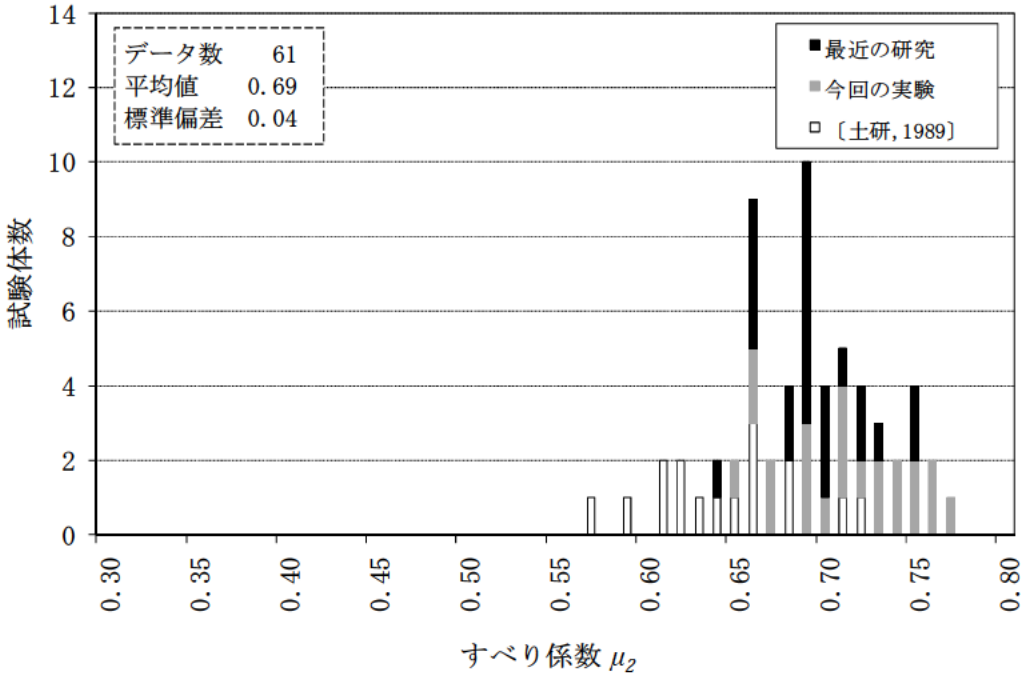


図-資 1.4.6　すべり係数 μ_2 の分布（片面塗膜厚 52.5μm 以上を対象）

4.3　塗装条件と軸力残存率の関係について

図-資 1.4.7 に，〔土研，1989〕のタイプ B 試験体（締付け後 180 日間屋外放置），今回の試験及び最近の研究を対象として，軸力残存率と締付け～試験までの経過日数（以下，経過日数）の関係を示す。今回の試験では，締付け～試験の期間が 7 日と短く，軸力残存率は 0.93～0.98 程度と比較的大きい値となっている。ただし，締付け後 2 日目以降の軸力低下が小さかったことから，7 日以上の軸力低下を計測したとしても，軸力が急激に低下する可能性は低かったと予想される。〔土研，1989〕では，締付け後 180 日における軸力残存率は 0.76～0.93 と大きくばらついている。

図-資 1.4.8 に，〔土研，1989〕の塗料毎の軸力残存率（平均値）の変化の様子を示す。塗料Ⅰのように軸力残存率の変化が緩やかなものもあれば，塗料Ⅱ，Ⅳのように 180 日時点でも軸力低下が継続しているものもある。ボルトの軸力低下は，一般的に塗膜のクリープによるリラクゼーションの影響が大きいとされているが，塗料Ⅰと塗料Ⅱの亜鉛含有量や亜鉛末の粒径はほぼ同じであり，亜鉛含有量や亜鉛末の平均粒径以外の因子の違いが軸力低下の差異として現れた可能性がある。

図-資 1.4.9 に，〔土研，1989〕のタイプ B 試験体及び今回の試験結果における軸力残存率と合計塗膜厚の関係を示す。〔土研，1989〕のタイプ B 試験体では，合計塗膜厚 90～200μm の範囲では，塗料Ⅰ，Ⅱ，Ⅳの順で軸力残存率が小さくなっており，いずれの塗料も合計塗膜厚の増加に伴って，軸力残存率が僅かに低下する傾向にある。これは合計塗膜厚が大きいほど，ボルト軸力により支圧力を受ける塗膜厚の減少量が大きくなることにより，ボルト軸力の低下量が大きくなるためと考えられる。また，今回の試験では，〔土研，1989〕と同様に，合計塗膜厚の増加に伴って軸力残存率が低下する傾向にある。

〔土研，1989〕や既往の研究（2.2.2 参照）を基に，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の軸力残存率を 80%と仮定し，図-資 1.4.6 に基づいて，すべり係数 μ_2 の下限値を 0.57 とすると，軸力低下後のすべり係数は，式（資 1.3.5）により 0.46 となり，設計すべり係数 0.4 を上回る値が得られる。ここで，すべり係数 μ_2 は経時変化を無視した固定値として計算を行っているが，実際は時間の経過に伴って増加することが確認されており，これについて次節で詳述する。

すべり係数：$\mu_0' = (N_2 / N_0') \cdot \mu_2$　　・・・・・式（資 1.3.5）

$= 0.80 \times 0.57 = 0.46$

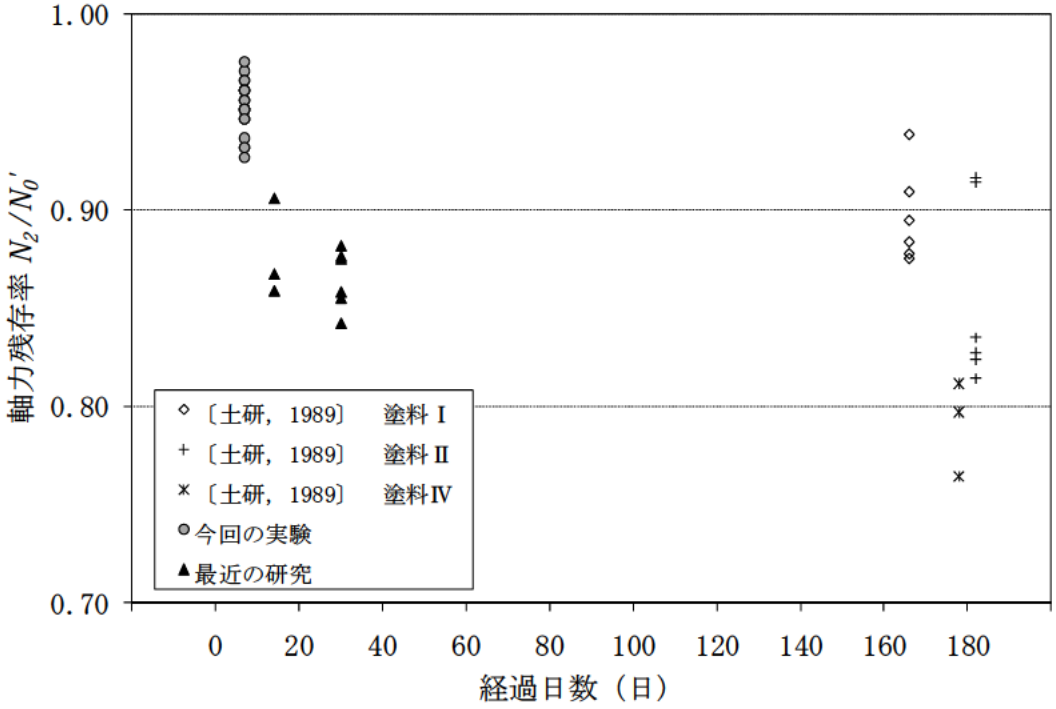


図-資 1.4.7　軸力残存率と経過日数

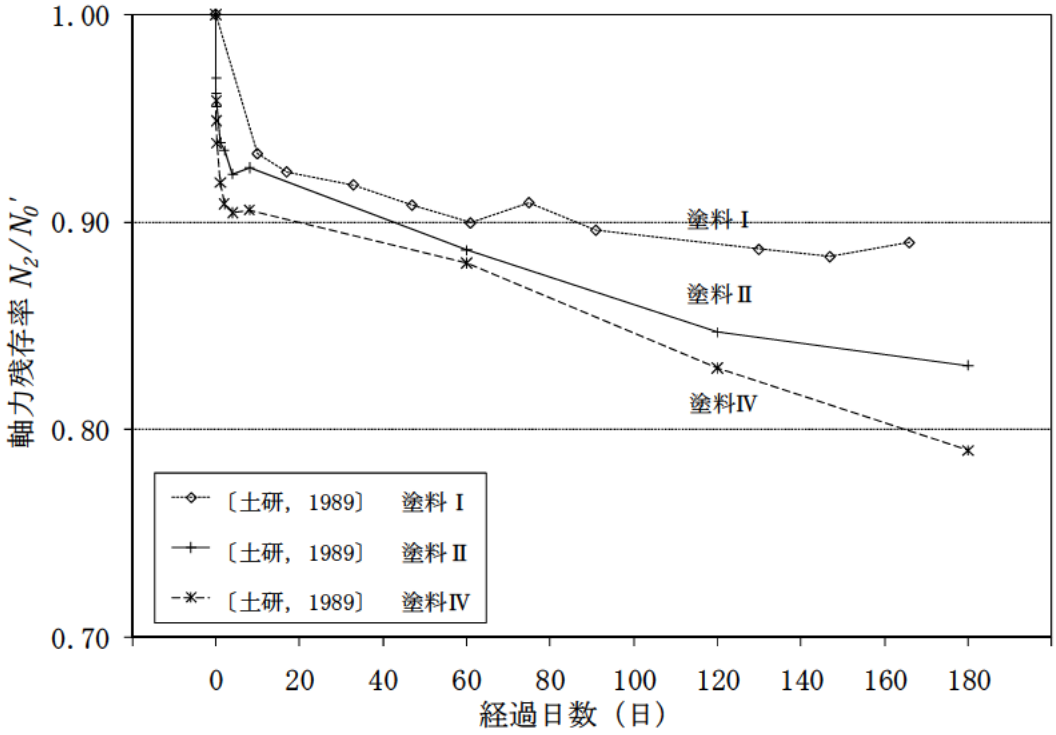


図-資 1.4.8　〔土研，1989〕の軸力残存率の変化

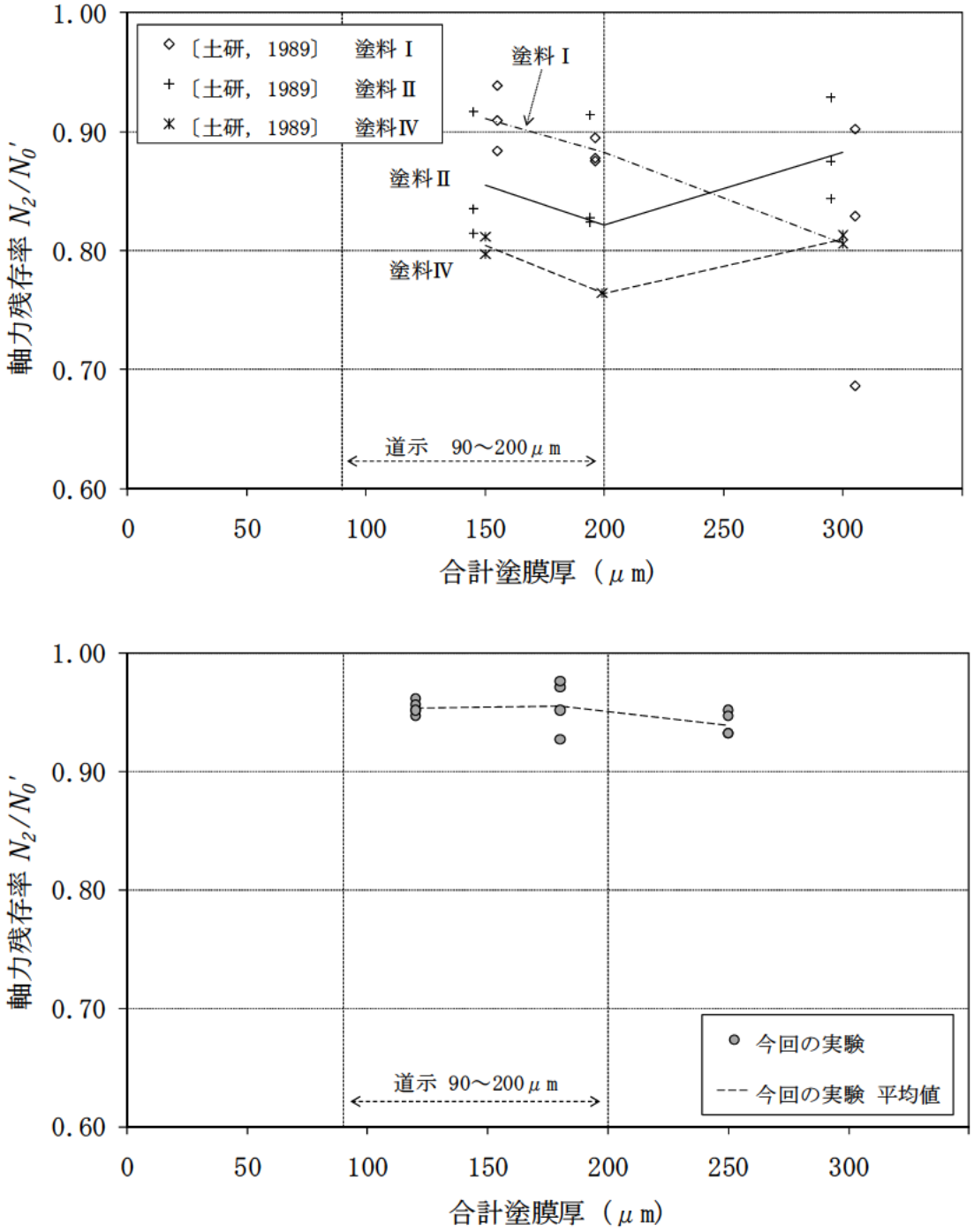


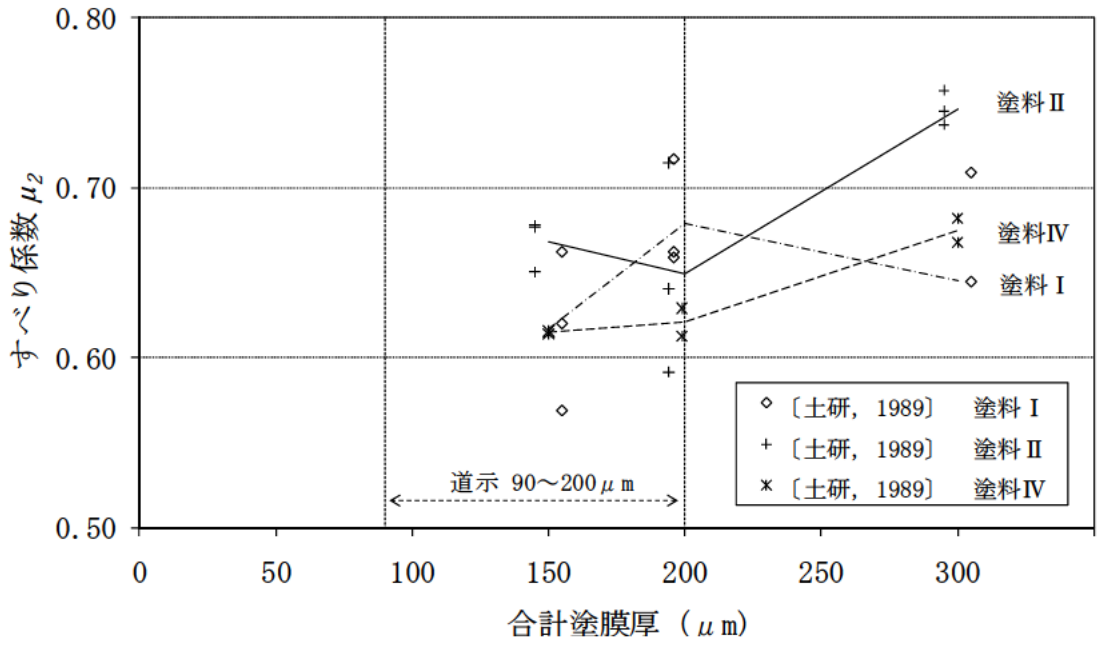
図-資 1.4.9　軸力残存率と合計塗膜厚（上段：〔土研，1989〕，下段：今回の試験）

4.4　塗装条件・試験前軸力 N_2 とすべり係数 μ_2 の関係

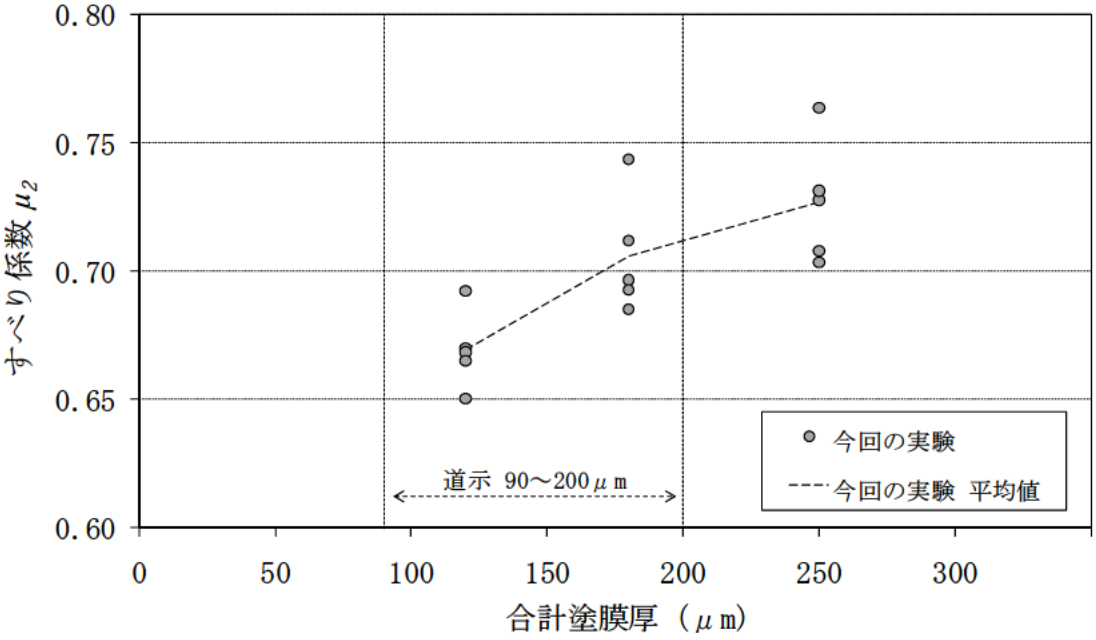
図-資 1.4.10 に，〔土研，1989〕のタイプ B 試験体及び今回の試験結果における合計塗膜厚とすべり係数 μ_2 の関係を示す。道示で規定される合計塗膜厚の範囲（90～200μm）であれば，合計塗膜厚の増加に伴って，すべり係数 μ_2 は大きくなる傾向がみられる。

図-資 1.4.11 に，〔土研，1989〕のタイプ B 試験体及び今回の試験の試験前軸力 N_2 とすべり係数 μ_2 の関係を示す。この結果によると，すべり係数 μ_2 と試験前軸力 N_2 の相関性は低いと考えられる。

図-資 1.4.12 に，〔土研，1989〕のタイプ A 試験体とタイプ B 試験体のすべり係数 μ_2 と経過日数の関係を示す。いずれの塗料も，経過日数が長くなるとすべり係数 μ_2 が大きくなる傾向にある。これは文献 2）でも述べられているように，塗料のなじみ等によりすべり係数 μ_2 が増加したためと考えられる。したがって，今回の試験や最近の研究成果でも経過日数が長くなれば，同様の傾向が得られる可能性があると考えられる。



(a)〔土研，1989〕の結果



(b)今回の試験結果

図-資 1.4.10　合計塗膜厚とすべり係数 μ_2

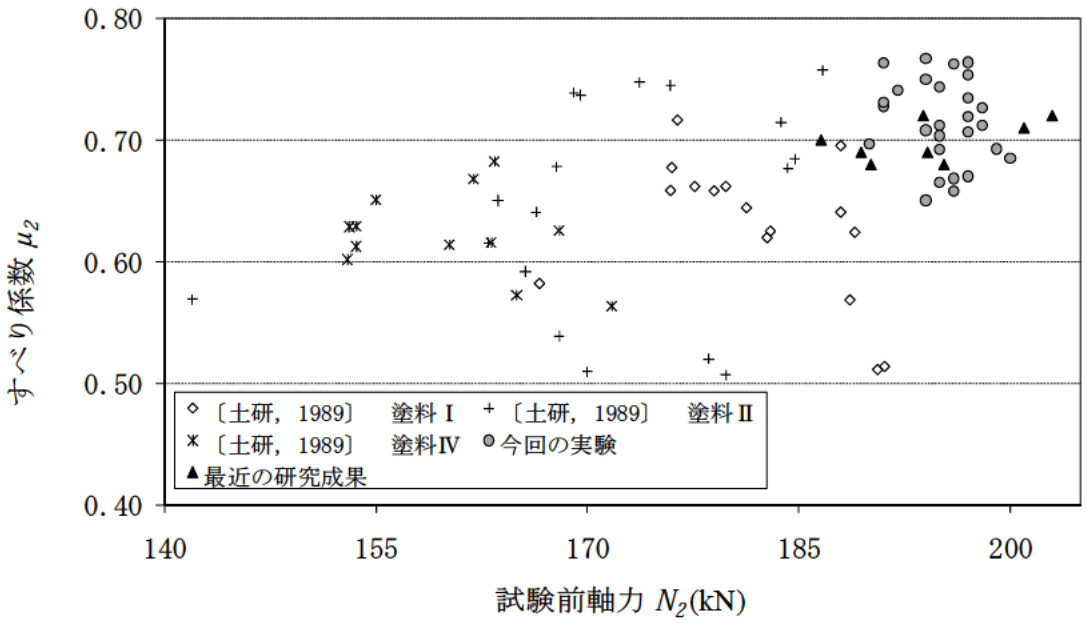


図-資 1.4.11　試験前軸力とすべり係数 μ_2

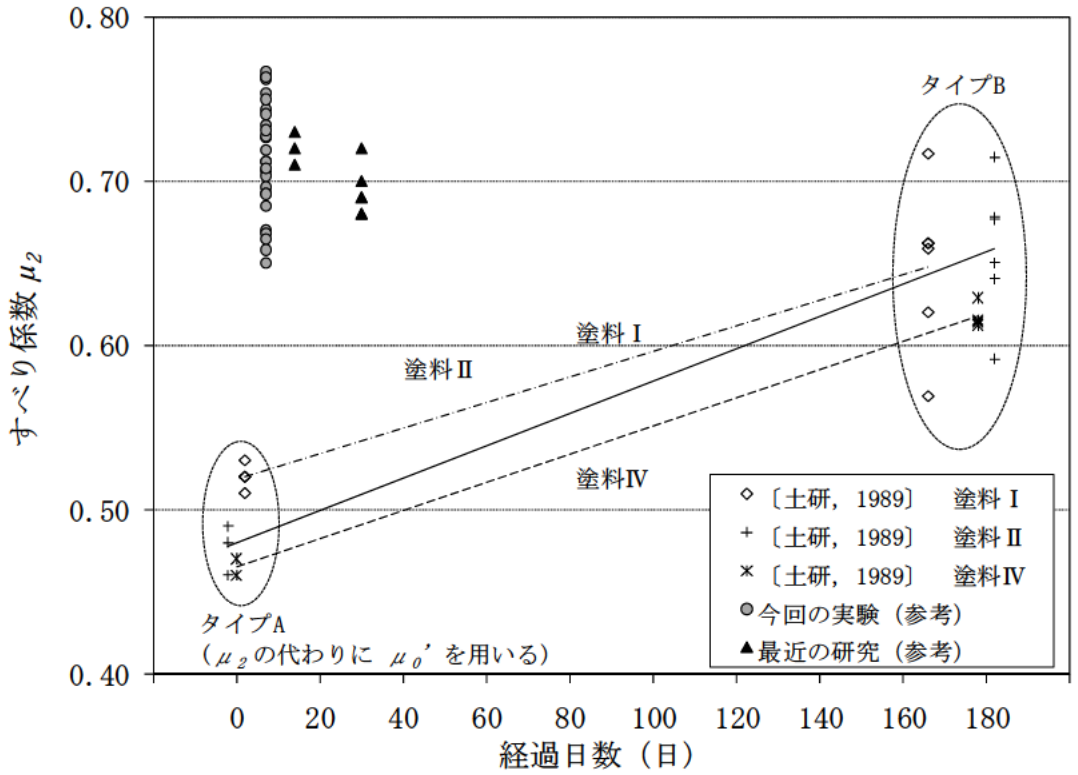


図-資 1.4.12　すべり係数 μ_2 と経過日数

4.5　すべり係数 μ_0' について

前節までの検討により，軸力残存率やすべり係数 μ_2 は，時間経過の影響を受けやすい傾向がみられた。そこで，以下ではすべり係数 μ_0' に着目し，軸力残存率とすべり係数 μ_2 を同時に考慮した場合における経過日数の影響について検討する。

図-資 1.4.13 に，〔土研，1989〕のタイプ A 試験体とタイプ B 試験体のすべり係数 μ_0' と経過日数の関係を示す。いずれの塗料も，経過日数が長くなるとすべり係数 μ_0' が大きくなる傾向にある。ただし，図-資 1.4.12 のすべり係数 μ_2 と経過日数の関係に比べると，タイプ A からタイプ B への増加は緩やかなものとなっている。これは，主にタイプ B においてすべり係数を算出するにあたって軸力減少を考慮するか否かの違いによるものと考えられる。

図-資 1.4.14 に，〔土研，1989〕のタイプ A 試験体とタイプ B 試験体のすべり係数 μ_0' と軸力残存率の関係を示す。式（資 1.3.5）で示すように，すべり係数 μ_0’は軸力残存率とすべり係数 μ_2 を乗じたものであり，すべり係数 μ_2 を一定値と仮定した場合，すべり係数 μ_0’と軸力残存率（N_2 / N_0’）は比例関係（直線）で示される。また，すべり係数 μ_2 が大きいほど勾配が大きくなる。タイプ B は軸力残存率が小さいものの，すべり係数 μ_2 が大きく，すべり係数 μ_0' も大きくなっている。これは，図-資 1.4.15 に示すように，軸力残存率が小さくなる影響よりも，すべり係数 μ_2 が大きくなる影響の方が大きいためと考えられる。今回の試験や最近の研究の経過日数（7～30 日）は，〔土研，1989〕のタイプ B 試験体と比較すると，比較的経過日数の短いものである。仮に，これらの経過日数が長くなった場合，〔土研，1989〕のようにすべり係数 μ_0' は同様の傾向を示すことにより 0.45 以上を確保できる可能性が高いと推察される。

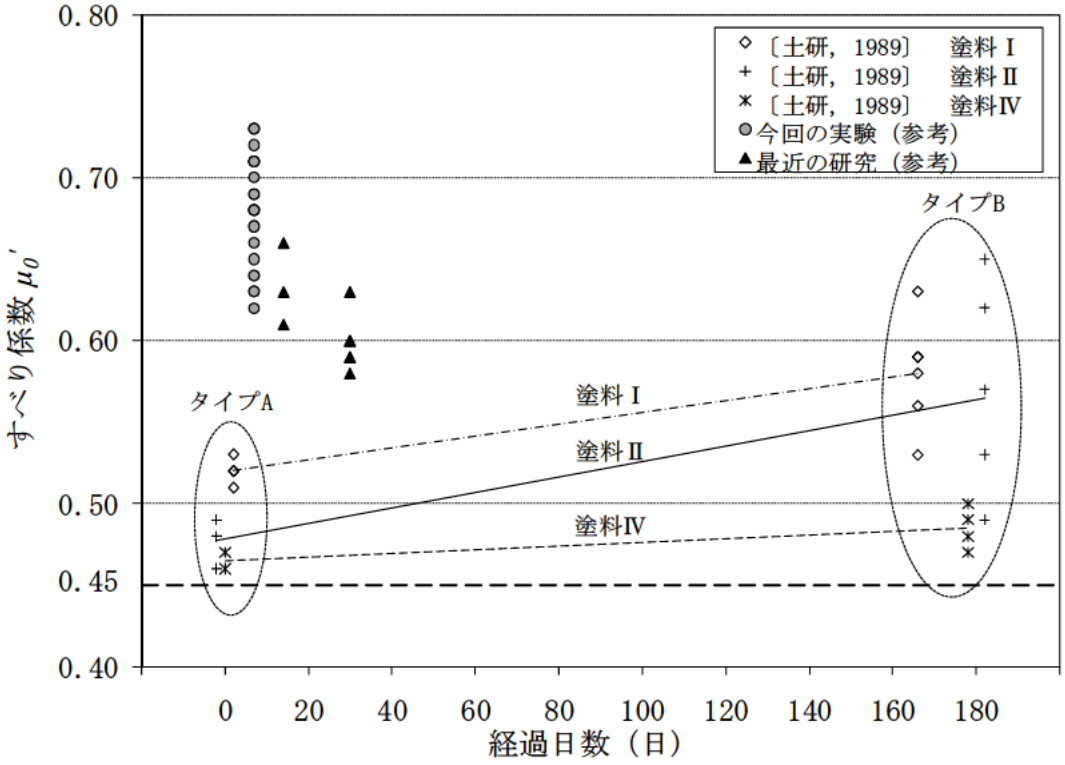


図-資 1.4.13　すべり係数 μ_0' と経過日数の関係

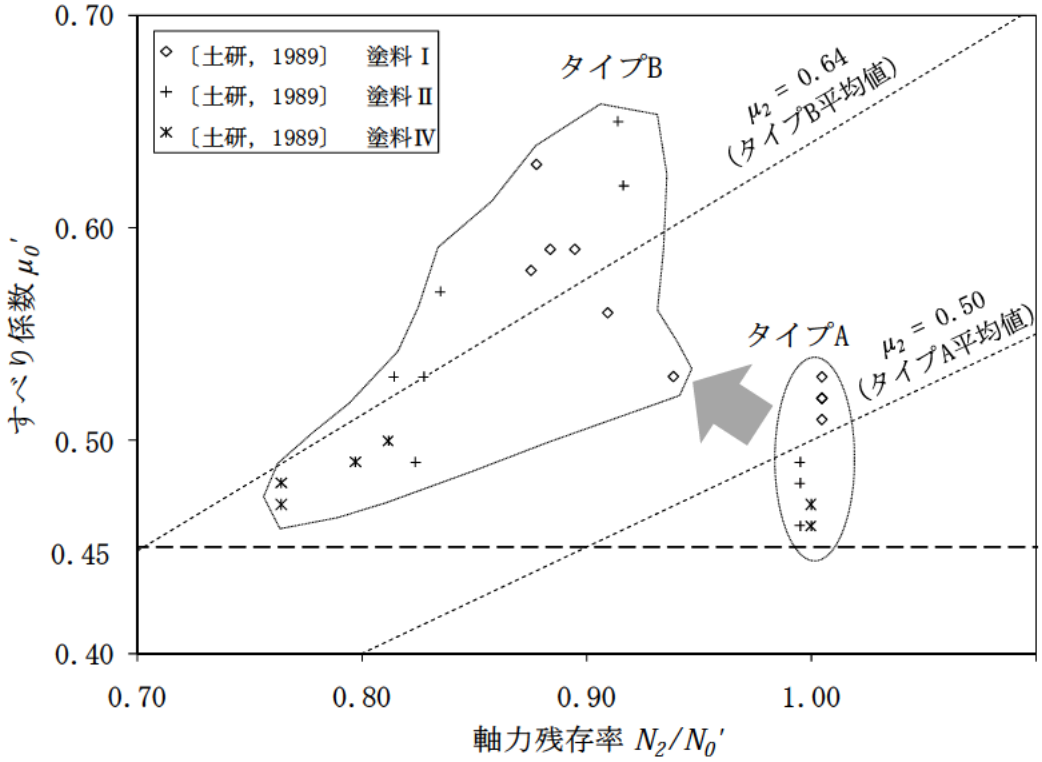


図-資 1.4.14　〔土研，1989〕のすべり係数 μ_0' と軸力残存率の関係

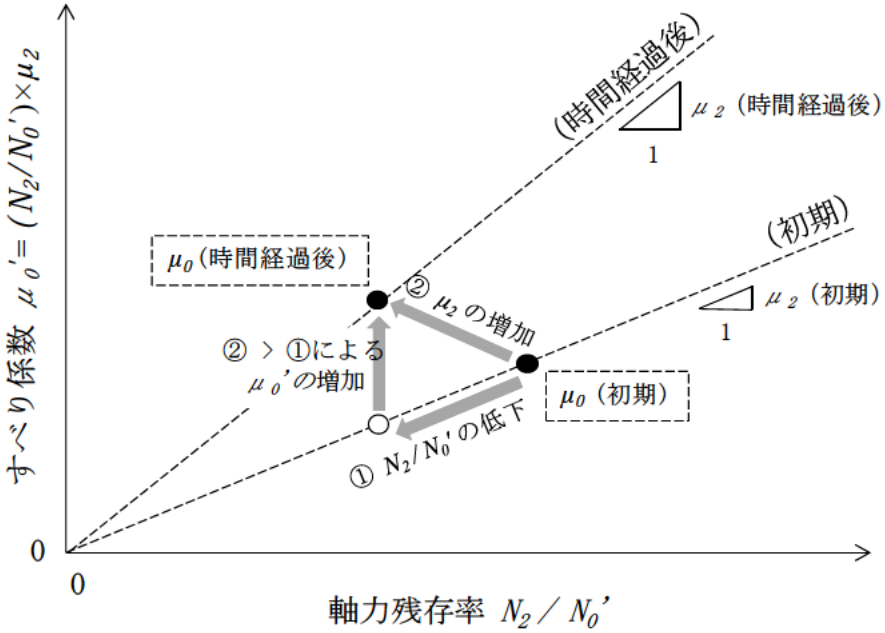


図-資 1.4.15　時間経過に伴うすべり係数 μ_0' の変化イメージ

5. まとめ

本検討では，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の設計すべり係数について，〔土研，1989〕の結果を再分析し，最近の研究成果や今回の試験結果と比較した。主な結論を以下にまとめる。

1) 道示における設計すべり係数 0.4 は，試験で得られたすべり係数 μ_0'（0.40～0.75）の下限値に相当する。今回の試験や最近の研究成果で得られたすべり係数 μ_0' は 0.4 を大きく上回っており，〔土研，1989〕と比べても比較的高い値が得られている。
2) 試験結果の下限値（0.40）は〔土研，1989〕において片面塗膜厚 30μm とした場合の結果である。この結果に基づき，道示ではすべり係数 0.4 を得るための塗装仕様として片面塗膜厚を 30μm 以上とすることを規定しているが，現行の施工管理規格値における片面塗膜厚の最小値は 52.5μm であり，道示の規定と乖離が生じている。
3) 片面塗膜厚の最小値を 52.5μm とした場合，すべり係数 μ_0' の下限値は 0.46 であった。
4) 〔土研，1989〕のタイプ B 試験体のように，締付け後に長期間放置した後にすべり耐力試験を実施した試験体では，締付け直後にすべり耐力試験を実施した試験体よりも軸力残存率が低下し，すべり係数 μ_2 が増加する傾向がみられた。
5) 締付け後に 180 日間放置した後にすべり耐力試験を実施した試験体は，締付け直後にすべり耐力試験を実施した試験体よりもすべり係数 μ_0' が大きくなっており，軸力低下の影響よりも，すべり係数が大きくなる影響の方が大きいものと推察される。

以上の結果を踏まえると，道示における設計すべり係数は 0.45 へ見直すことは可能と考えられる。なお，今回の検討はすべり/降伏耐力比 β<0.7 となる継手を対象としているが，β≧0.7 の試験データを含めた場合でもすべり係数は 0.45 以上であった。

表-資 1.5.5 にすべり係数 0.45 を確保するための無機ジンクリッチペイントの塗装仕様（案）を示す。前述の通り片面塗膜厚は，実際の施工に合わせて 50μm 以上としている。これに伴い，合計乾燥塗膜厚の最小値を 100μm としている。なお，乾燥塗膜中の亜鉛含有量や亜鉛末の粒径（50%平均粒径）については変更せず，道示の規定の通りとしている。

表-資 1.5.5　すべり係数 0.45 を確保するための無機ジンクリッチペイントの塗装仕様（案）

項　目	条　件
接触面片面あたりの最小乾燥塗膜厚	50μm以上
接触面の合計乾燥塗膜厚	100～200μm
乾燥塗膜中の亜鉛含有量	80%以上
亜鉛末の粒径（50%平均粒径）	10μm程度以上

参考文献

1) 例えば，日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，2002.3.
2) 藤原，村越，田中ほか：高力ボルト摩擦接合継手に関する試験調査　－接触面に無機ジンクリッチペイントを塗布した継手のすべり耐力等（その 2）－，土木研究所資料　第 2796 号，1989.8.
3) 篠原，西川，田中：無機ジンクリッチペイントを塗布した高力ボルト摩擦接合継手すべり耐力実験と塗装仕様案，土木技術資料 29-1，pp.37~42，1987.
4) 土木学会 鋼構造委員会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案），鋼構造シリーズ 15，丸善，2006.12.
5) 日本道路協会：鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針・解説，1966.7.
6) 城島：接触面にジンクリッチペイントをもつ高力ボルト継手のすべり耐力試験，東骨技報 No.8
7) 加藤，曽我，堀：いろいろの条件で無機ジンクリッチペイントを塗布した高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験，技報たきがみ，Vol.8，pp.82~90，1990.
8) 岩田，山上：厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗布した高力ボルト摩擦接合部の基礎的調査，技報まつお，No.23，1992.4.
9) 谷平，石原，指吸：締付け厚の大きい高力ボルト継手の耐力特性調査と長期挙動予測，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1035~1042，1993.3.
10) 宮地，小枝，望月：フィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動について，構造工学論文集，Vol.44A，pp.55~60，1998.3.
11) 日本道路公団試験研究所，（社）日本橋梁建設協会：防錆処理トルシア形高力ボルト性能試験報告書，1998.10.
12) 水口，宮本，望月，小枝，宮地：高力ボルト継ぎ手設計法の合理化に関する実験的研究 －継手部にフィラープレートを設置した小型試験体の引張試験－，第 53 回土木学会年次学術講演会　講演概要集，pp.310~311，1998.10.
13) 山田，亀井，西村，秋山：ジンクリッチペイントを塗布した高力ボルト摩擦接合継手の引張試験，土木学会関西支部　講演概要集，I-109-1~2，2000.
14) 日本橋梁建設協会 製作技術部会 高力ボルト部会：試験報告書　高力ボルト摩擦接合における 1mm 以下の板厚差がすべり係数に及ぼす影響，2004.6.
15) 鞆，後藤，石田，永島：合計板厚差が 1mm 程度ある高力ボルト摩擦接合継手部のすべり確認試験と一考察，土木学会第 59 回年次学術講演会　講演概要集 I-591，pp.1179~1180，2004.9.
16) 森，南，井口，山口：接触面処理方法と品質を考慮した高力ボルト摩擦接合継手すべり係数の提案，土木学会論文集 A，Vol.64，No.1，pp.48~59，2008.1.
17) 滝澤，沢田，黒田，阿部：鋼道路橋設計ガイドラインに基づく高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験，橋梁と基礎，pp.25-28，1999.9.
18) 例えば，日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，2005.12.
19) 例えば，国土交通省　関東地方整備局：土木工事施工管理基準及び規格値，2009.
20) 例えば，本州四国連絡橋公団：HBS 塗料規格（案），1990.4.
21) 谷平，狩野，石原，小林：高力ボルト摩擦接合の耐久性評価に関する一考察，鋼構造年次論文報告集，第 10 巻，pp.247~254，2002.11.

参考資料-1　国内外の基準等におけるすべり係数

国内外の基準等で規定されているすべり係数（もしくは設計継手強度算出の根拠となるすべり係数）のうち，接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合のすべり係数を表-参 1.1 に示す。

表-参1.1　すべり係数（接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合）

基準等	すべり係数	備 考
道路橋示方書，2002.	0.4	厚膜型無機ジンクリッチペイント塗装
鉄道総合技術研究所 鉄道構造物設計標準，1992.	0.4	厚膜型無機ジンクリッチペイント塗装 （片面塗膜厚60～90μ）
ISO 1072-1，1997.	0.5	無機ジンクリッチペイント （片面塗膜厚60μm以下）
AASHTO，2010.	0.5	ブラストの後，Class Bのコーティング
Eurocode 3 part2，2003.	-	厚膜型無機ジンクリッチペイント塗装を適用した場合のすべり係数は規定されていない
（参考）高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案），土木学会，2004.	0.4	片面塗膜厚 ≦ 65μm
	0.5	片面塗膜厚 ≧ 65μm
（参考）鋼構造設計規準，日本建築学会，2002.	-	厚膜型無機ジンクリッチペイント塗装を適用した場合のすべり係数は規定されていない
（参考）鋼構造接合部設計指針，日本建築学会，2001.	0.45	無機ジンクリッチ塗料塗装面 （片面塗膜厚45～75μmRy以上）

参考資料-2　すべり係数に関する試験データ

本文中で用いたすべり係数に関するデータベースを，表-参 2.2~表-参 2.4 に示す。注意事項を以下に示す。

注 1）　片面塗膜厚および合計塗膜厚は，目標塗膜厚を示す。目標塗膜厚が示されていない場合は，各試験体の実塗膜厚の平均値を示す。

注 2）　無機ジンクリッチペイントの仕様について，乾燥塗膜中の亜鉛含有量と亜鉛末の粒径（50%平均粒径）を示す。表中では，以下のように示す。

（率）：乾燥塗膜中の亜鉛含有量

（径）：亜鉛末の粒径（50%平均粒径）

注 3）　ボルト本数については，片側の本数を示す。

注 4）　ボルト孔径について，論文中から孔径が読みとれないものについては，ボルト径＋2.5mm と仮定して，降伏耐力あるいはすべり降伏比 β を算出する。

注 5）　論文中から母板あるいは連結板の材質が読みとれないものについては，SM490 材の降伏強度を用いて，降伏耐力あるいはすべり降伏比 β を算出する。

注 6）　母板あるいは連結板の降伏耐力 P_y は下式により算出する。

$$P_y = (W - d) \cdot t \cdot \sigma_y$$

ここで，

W　：母板あるいは連結板の板幅

d　：孔径

t　：母板あるいは連結板の板厚

σ_y　：母板あるいは連結板の降伏強度の公称値（N/mm^2）

注 7）　すべり耐力 P_{sl} は下式により算出する。

$$P_{sl} = \mu_d \cdot m \cdot n \cdot N_d$$

ここで，

μ_d　：設計すべり係数（0.4）

m　：接触面数　（ = 2）

n　：ボルト本数

N_d　：設計ボルト軸力（kN）

注 8）　すべり/降伏耐力比 β，連結板/母板降伏耐力比 γ は下式により算出する。

$$\beta = P_{sl} \diagup P_y$$

$$\gamma = P_{y_連結板} \diagup P_{y_母板}$$

注 9）　文献中に重力単位系で示されている値は，1 kgf = 9.8N として SI 単位系へ変換する

注 10）　すべり係数は下式により算出する。

すべり係数：$\mu_0 = P /（n \cdot m \cdot N_0）$　・・・・・式（参 2.1）

すべり係数：$\mu_0' = P /（n \cdot m \cdot N_0'）$　・・・・・式（参 2.2）

すべり係数：$\mu_1 = P /（n \cdot m \cdot N_1）$　・・・・・式（参 2.3）

すべり係数：$\mu_2 = P /（n \cdot m \cdot N_2）$　・・・・・式（参 2.4）

ここで，

P　：すべり荷重
n　：ボルト本数
m　：接触面数
N_0　：設計軸力
N_0'　：締付け軸力（目標値）
N_1　：締付け軸力（実測値）
N_2　：試験前軸力（実測値）

注 11）　すべり係数の統計データとしての使用可否について，不採用理由の凡例は以下の通り。

■不採用理由の凡例

※1　：　無機ジンクリッチペイントの仕様が道路橋示方書の規定（表-参 2.1 の項目③，④）を満足しないもの

※2　：　片面塗膜厚あるいは合計塗膜厚が道路橋示方書の規定（表-参 2.1 の項目①，②）を満足しないもの，例えば合計塗膜厚が NG の場合，※2（合計）と表示

※3　：　すべり/降伏耐力比 β が 0.7 以上のもの

表-参 2.1　すべり係数 0.4 を得るための塗装条件 [1)]

番号	項目	条件
①	接触面片面あたりの最小乾燥塗膜厚	30μm以上
②	接触面の合計乾燥塗膜厚	90～200μm
③	乾燥塗膜中の亜鉛含有量	80%以上
④	亜鉛末の粒径（50%平均粒径）	10μm程度以上

表-参 2.2　すべり係数に関するデータ（今回の試験）

		接触面				試験体諸元																ボルト軸力					すべり係数					統計データとしての採用判断（注11）			
文献名称	試験体名称	塗膜厚(μm)（注1）			塗装仕様に関する記載（注2）	ボルト					母材・連結板						すべり降伏比					ボルト軸力(kN)				締付～試験までの期間	すべり耐力(kN)(実測値)	すべり係数(注10)				判定1（無機ジンク仕様）：道示の規定を満たす（○），満たさないか不明（×） 判定2（塗膜厚）：道示の規定を満たす（○），満たさないか不明（×） 判定3（すべり降伏比）：0.7以下（○），0.7以上あるいは不明（×）			不採用理由
		母板	添接板	合計膜厚		ボルト本数(注3)	ボルト行数	ボルト列数	孔径(mm)(注4)	ボルト径	連結板板厚(mm)	母材板厚(mm)	試験体幅(mm)	降伏応力(N/mm²)(注5)	母板降伏耐力(kN)(注6)	連結板降伏耐力(kN)(注6)	すべり耐力(設計値)(注7)	すべり降伏比β(注8)：母板	すべり降伏比β(注8)：連結板	連結板降伏比γ(注8)	材質	設計軸力 N_0	締付軸力 N_0'（目標値）	締付軸力 N_1（実測値）	試験前軸力 N_2（実測値）			μ_0	μ_0'	μ_1	μ_2	判定1	判定2	判定3	
今回の実験	1-1	90	90	180	（率）82%（径）17μm	3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	202	190	7日以降	794	0.65	0.65	0.66	0.70	○	○	○	採用
	1-2	90	90	180		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	206	199	7日以降	827	0.67	0.67	0.67	0.69	○	○	○	採用
	1-3	90	90	180		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	206	200	7日以降	822	0.67	0.67	0.67	0.69	○	○	○	採用
	1-4	90	90	180		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	207	195	7日以降	870	0.71	0.71	0.70	0.74	○	○	○	採用
	1-5	90	90	180		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	206	195	7日以降	833	0.68	0.68	0.67	0.71	○	○	○	採用
	2-1	90	90	180		3	1	3	24.5	M22	26	50	120	355	1,695	1,763	492	0.29	0.28	1.04	SM490Y	205	205	206	198	7日以降	863	0.70	0.70	0.70	0.73	○	○	○	採用
	2-2	90	90	180		3	1	3	24.5	M22	26	50	120	355	1,695	1,763	492	0.29	0.28	1.04	SM490Y	205	205	204	197	7日以降	868	0.71	0.71	0.71	0.73	○	○	○	採用
	2-3	90	90	180		3	1	3	24.5	M22	26	50	120	355	1,695	1,763	492	0.29	0.28	1.04	SM490Y	205	205	204	197	7日以降	850	0.69	0.69	0.69	0.72	○	○	○	採用
	3-1	90	90	180		8	1	8	24.5	M22	26	50	190	355	2,938	3,055	1,312	0.45	0.43	1.04	SM490Y	205	205	202	198	7日以降	2,256	0.69	0.69	0.70	0.71	○	○	○	採用
	3-2	90	90	180		8	1	8	24.5	M22	26	50	190	355	2,938	3,055	1,312	0.45	0.43	1.04	SM490Y	205	205	204	196	7日以降	2,391	0.73	0.73	0.73	0.76	○	○	○	採用
	3-3	90	90	180		8	1	8	24.5	M22	26	50	190	355	2,938	3,055	1,312	0.45	0.43	1.04	SM490Y	205	205	204	197	7日以降	2,376	0.72	0.72	0.73	0.75	○	○	○	採用
	5-1	90	90	180		3	1	3	24.5	M22	38	75	120	355	2,543	2,577	492	0.19	0.19	1.01	SM490Y	205	205	202	197	7日以降	835	0.68	0.68	0.69	0.71	○	○	○	採用
	5-2	90	90	180		3	1	3	24.5	M22	38	75	120	355	2,543	2,577	492	0.19	0.19	1.01	SM490Y	205	205	203	196	7日以降	774	0.63	0.63	0.64	0.66	○	○	○	採用
	5-3	90	90	180		3	1	3	24.5	M22	38	75	120	355	2,543	2,577	492	0.19	0.19	1.01	SM490Y	205	205	204	197	7日以降	903	0.73	0.73	0.74	0.76	○	○	○	採用
	6-1	90	90	180		8	1	8	24.5	M22	38	75	130	355	2,809	2,846	1,312	0.47	0.46	1.01	SM490Y	205	205	199	192	7日以降	2,276	0.69	0.69	0.71	0.74	○	○	○	採用
	6-2	90	90	180		8	1	8	24.5	M22	38	75	130	355	2,809	2,846	1,312	0.47	0.46	1.01	SM490Y	205	205	202	194	7日以降	2,381	0.73	0.73	0.74	0.77	○	○	○	採用
	6-3	90	90	180		8	1	8	24.5	M22	38	75	130	355	2,809	2,846	1,312	0.47	0.46	1.01	SM490Y	205	205	202	194	7日以降	2,328	0.71	0.71	0.72	0.75	○	○	○	採用
	13-1	60	60	120		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	208	197	7日以降	792	0.64	0.64	0.63	0.67	○	○	○	採用
	13-2	60	60	120		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	207	195	7日以降	810	0.66	0.66	0.65	0.69	○	○	○	採用
	13-3	60	60	120		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	207	196	7日以降	786	0.64	0.64	0.63	0.67	○	○	○	採用
	13-4	60	60	120		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	205	194	7日以降	757	0.62	0.62	0.62	0.65	○	○	○	採用
	13-5	60	60	120		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	204	195	7日以降	778	0.63	0.63	0.64	0.66	○	○	○	採用
	14-1	125	125	250		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	203	191	7日以降	834	0.68	0.68	0.68	0.73	○	×	○	※2合計
	14-2	125	125	250		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	203	191	7日以降	875	0.71	0.71	0.72	0.76	○	×	○	※2合計
	14-3	125	125	250		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	209	195	7日以降	823	0.67	0.67	0.66	0.70	○	×	○	※2合計
	14-4	125	125	250		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	211	194	7日以降	824	0.67	0.67	0.65	0.71	○	×	○	※2合計
	14-5	125	125	250		3	1	3	24.5	M22	20	38	120	355	1,288	1,356	492	0.38	0.36	1.05	SM490Y	205	205	203	191	7日以降	838	0.68	0.68	0.69	0.73	○	×	○	※2合計

表-参 2.3　すべり係数に関するデータ〔土研，1989〕

文献名称	試験体名称	接触面				試験体諸元																ボルト軸力					すべり係数				統計データとしての採用判断（注11）			不採用理由
		塗膜厚(μm)（注1）			塗装仕様に関する記載（注2）	ボルト					母材・連結板						すべり降伏比					ボルト軸力(kN)				締付～試験までの期間	すべり耐力(kN)(実測値)	すべり係数（注10）				判定1（無機ジンク仕様）：選択の規定を満たす（○），満たさないか不明（×） 判定2（塗膜厚）：選択の規定を満たす（○），満たさないか不明（×） 判定3（すべり降伏比）：0.75以下（○），0.75以上あるいは不明（×）			
		母板	添接板	合計膜厚		ボルト本数(注3)	ボルト行数	ボルト列数	孔径(mm)(注4)	ボルト径	連結板板厚(mm)	母材板厚(mm)	試験体幅(mm)	降伏応力(N/mm²)(注5)	母板降伏耐力(kN)(注6)	連結板降伏耐力(kN)(注6)	すべり耐力(設計値)(注7)	すべり降伏比β(注8)：母板	すべり降伏比β(注8)：連結板	連結板降伏比γ(注8)	材質	設計軸力 N_0	締付軸力 N_0'（目標値）	締付軸力 N_1（実測値）	試験前軸力 N_2（実測値）			μ_0	μ_0'	μ_1	μ_2	判定1	判定2	判定3	
文献2	Ⅱ(S)	30	30	60	（率）82% （径）11.1mm	4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	767	0.48	0.48			○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅱ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		179	6ヶ月後	743	0.46	0.46		0.52	○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅱ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	911	0.57	0.57			○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅱ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	790	0.49	0.49			○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅱ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		180	6ヶ月後	729	0.45	0.45		0.51	○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅱ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	811	0.50	0.50			○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅱ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	805	0.50	0.50			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		170	6ヶ月後	694	0.43	0.43		0.51	○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	970	0.60	0.60			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	750	0.47	0.47			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		168	6ヶ月後	725	0.45	0.45		0.54	○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	789	0.49	0.49			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	822	0.51	0.51			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		142	6ヶ月後	647	0.40	0.40		0.57	○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	956	0.59	0.59			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	822	0.51	0.51			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		163	6ヶ月後	804	0.50	0.50		0.62	○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	998	0.62	0.62			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	764	0.48	0.48			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		168	6ヶ月後	910	0.57	0.57		0.68	○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	968	0.60	0.60			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	794	0.49	0.49			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		164	6ヶ月後	852	0.53	0.53		0.65	○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,014	0.63	0.63			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	767	0.48	0.48			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		166	6ヶ月後	853	0.53	0.53		0.64	○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,051	0.65	0.65			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	743	0.46	0.46			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		166	6ヶ月後	784	0.49	0.49		0.59	○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	784	0.49	0.49			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,034	0.64	0.64			○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		170	6ヶ月後	1,000	0.62	0.62		0.74	○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,117	0.70	0.70			○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,049	0.65	0.65			○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		176	6ヶ月後	1,049	0.65	0.65		0.75	○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,107	0.69	0.69			○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(S)	250	250	500		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,024	0.64	0.64			○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(S)	250	250	500		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		169	6ヶ月後	1,000	0.62	0.62		0.74	○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(S)	250	250	500		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,098	0.68	0.68			○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(S)	250	250	500		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,064	0.66	0.66			○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(S)	250	250	500		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		174	6ヶ月後	1,039	0.65	0.65		0.75	○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(S)	250	250	500		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,176	0.73	0.73			○	×	○	※2合計
〃	Ⅳ(S)	30	30	60	（率）82.4% （径）16mm	4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	668	0.42	0.42			○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅳ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		172	6ヶ月後	774	0.48	0.48		0.56	○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅳ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	843	0.52	0.52			○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅳ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	686	0.43	0.43			○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅳ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		153	6ヶ月後	770	0.48	0.48		0.63	○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅳ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	892	0.55	0.55			○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅳ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	720	0.45	0.45			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		168	6ヶ月後	841	0.52	0.52		0.63	○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	941	0.59	0.59			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	797	0.50	0.50			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		153	6ヶ月後	737	0.46	0.46		0.60	○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,008	0.63	0.63			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	767	0.48	0.48			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		155	6ヶ月後	808	0.50	0.50		0.65	○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	980	0.61	0.61			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	745	0.46	0.46			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		165	6ヶ月後	757	0.47	0.47		0.57	○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,018	0.63	0.63			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	755	0.47	0.47			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		160	6ヶ月後	787	0.49	0.49		0.61	○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,003	0.62	0.62			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	745	0.46	0.46			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		163	6ヶ月後	804	0.50	0.50		0.62	○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	960	0.60	0.60			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	738	0.46	0.46			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		154	6ヶ月後	773	0.48	0.48		0.63	○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,003	0.62	0.62			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	748	0.47	0.47			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		154	6ヶ月後	753	0.47	0.47		0.61	○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	977	0.61	0.61			○	○	○	採用
〃	Ⅳ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	798	0.50	0.50			○	×	○	※2合計
〃	Ⅳ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		162	6ヶ月後	865	0.54	0.54		0.67	○	×	○	※2合計
〃	Ⅳ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	931	0.58	0.58			○	×	○	※2合計
〃	Ⅳ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	795	0.49	0.49			○	×	○	※2合計
〃	Ⅳ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		163	6ヶ月後	892	0.55	0.55		0.68	○	×	○	※2合計
〃	Ⅳ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	916	0.57	0.57			○	×	○	※2合計

表-参 2.3　すべり係数に関するデータ〔土研，1989〕（続き）

文献名称	試験体名称	接触面				試験体諸元																ボルト軸力					すべり係数				統計データとしての採用判断（注11）			不採用理由
		塗膜厚(μm)（注1）			塗装仕様に関する記載（注2）	ボルト					母材・連結板						すべり降伏比					ボルト軸力(kN)				締付～試験までの期間	すべり耐力(kN)(実測値)	すべり係数（注10）				判定1（無機ジンク仕様）：選示の規定を満たす（○），満たさないか不明（×） 判定2（塗膜厚）：選示の規定を満たす（○），満たさないか不明（×） 判定3（すべり降伏比）：0.75以下（○），0.75以上あるいは不明（×）			
		母板	添接板	合計膜厚		ボルト本数(注3)	ボルト行数	ボルト列数	孔径(mm)(注4)	ボルト径	連結板板厚(mm)	母材板厚(mm)	試験体幅(mm)	降伏応力(N/mm²)(注5)	母板降伏耐力(kN)(注6)	連結板降伏耐力(kN)(注6)	すべり耐力(設計値)(注7)	すべり降伏比β(注8)：母板	すべり降伏比β(注8)：連結板	連結板降伏比γ(注8)	材質	設計軸力 N_0	締付軸力 N_0'（目標値）	締付軸力 N_1（実測値）	試験前軸力 N_2（実測値）			μ_0	μ_0'	μ_1	μ_2	判定1	判定2	判定3	
〃	Ⅰ(L)	30	120	150	（率）83.5%（径）9.8mm	20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,782	0.72	0.72			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(L)	30	120	150		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201		188	6ヶ月後	4,812	0.60	0.60		0.64	○	○	○	採用
〃	Ⅰ(L)	30	120	150		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,174	0.64	0.64			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(L)	30	170	200		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,488	0.68	0.68			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(L)	30	170	200		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201		179	6ヶ月後	4,724	0.59	0.59		0.66	○	○	○	採用
〃	Ⅰ(L)	30	170	200		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,263	0.65	0.65			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(L)	75	75	150		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,870	0.73	0.73			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(L)	75	75	150		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201		189	6ヶ月後	4,292	0.53	0.53		0.57	○	○	○	採用
〃	Ⅰ(L)	75	75	150		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,459	0.68	0.68			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(L)	100	100	200		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	6,017	0.75	0.75			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(L)	100	100	200		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201		176	6ヶ月後	5,057	0.63	0.63		0.72	○	○	○	採用
〃	Ⅰ(L)	100	100	200		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,253	0.65	0.65			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(L)	150	150	300		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	4,253	0.53	0.53			○	×	○	※2合計
〃	Ⅰ(L)	150	150	300		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201		181	6ヶ月後	4,675	0.58	0.58		0.64	○	×	○	※2合計
〃	Ⅰ(L)	150	150	300		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,135	0.64	0.64			○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(L)	30	120	150	（率）82%（径）11.1mm	20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,370	0.67	0.67			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(L)	30	120	150		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201		177	6ヶ月後	5,723	0.71	0.71		0.81	○	○	○	採用
〃	Ⅱ(L)	30	120	150		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,400	0.67	0.67			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(L)	30	170	200		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,860	0.73	0.73			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(L)	30	170	200		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201		179	6ヶ月後	5,772	0.72	0.72		0.81	○	○	○	採用
〃	Ⅱ(L)	30	170	200		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,860	0.73	0.73			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(L)	75	75	150		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,370	0.67	0.67			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(L)	75	75	150		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201		184	6ヶ月後	4,988	0.62	0.62		0.68	○	○	○	採用
〃	Ⅱ(L)	75	75	150		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,488	0.68	0.68			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(L)	100	100	200		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	4,724	0.59	0.59			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(L)	100	100	200		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201		184	6ヶ月後	5,253	0.65	0.65		0.71	○	○	○	採用
〃	Ⅱ(L)	100	100	200		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,909	0.74	0.74			○	○	○	採用
〃	Ⅱ(L)	150	150	300		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,782	0.72	0.72			○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(L)	150	150	300		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201		187	6ヶ月後	5,655	0.70	0.70		0.76	○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(L)	150	150	300		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,380	0.67	0.67			○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(L)	250	250	500		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	4,929	0.61	0.61			○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(L)	250	250	500		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201		185	6ヶ月後	5,057	0.63	0.63		0.68	○	×	○	※2合計
〃	Ⅱ(L)	250	250	500		20	4	5	24.5	M22	18	35	480	450	6,017	6,188	3,214	0.53	0.52	1.03	SM58Q	201	201			締付後直ちに	5,370	0.67	0.67			○	×	○	※2合計
〃	Ⅰ(S)	30	30	60	（率）83.5%（径）9.8mm	4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	713	0.44	0.44			○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅰ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		191	6ヶ月後	780	0.49	0.49		0.51	○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅰ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	829	0.52	0.52			○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅰ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	719	0.45	0.45			○	×	○	※2片面　合計
〃	Ⅰ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		191	6ヶ月後	786	0.49	0.49		0.51	○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅰ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	875	0.54	0.54			○	×	○	※2片面，合計
〃	Ⅰ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	837	0.52	0.52			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		183	6ヶ月後	914	0.57	0.57		0.63	○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	908	0.57	0.57			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	847	0.53	0.53			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		176	6ヶ月後	954	0.59	0.59		0.68	○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	907	0.56	0.56			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	847	0.53	0.53			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		188	6ヶ月後	1,046	0.65	0.65		0.70	○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	913	0.57	0.57			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	861	0.54	0.54			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		189	6ヶ月後	945	0.59	0.59		0.62	○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	909	0.57	0.57			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	841	0.52	0.52			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		178	6ヶ月後	941	0.59	0.59		0.66	○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	8 6	0.53	0.53			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	819	0.51	0.51			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		183	6ヶ月後	907	0.56	0.56		0.62	○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	889	0.55	0.55			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	844	0.53	0.53			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		176	6ヶ月後	927	0.58	0.58		0.66	○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	945	0.59	0.59			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	829	0.52	0.52			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		180	6ヶ月後	953	0.59	0.59		0.66	○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	935	0.58	0.58			○	○	○	採用
〃	Ⅰ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	691	0.43	0.43			○	×	○	※2合計
〃	Ⅰ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		167	6ヶ月後	776	0.48	0.48		0.58	○	×	○	※2合計
〃	Ⅰ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	710	0.44	0.44			○	×	○	※2合計
〃	Ⅰ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	674	0.42	0.42			○	×	○	※2合計
〃	Ⅰ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		138	6ヶ月後	782	0.49	0.49		0.71	○	×	○	※2合計
〃	Ⅰ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	752	0.47	0.47			○	×	○	※2合計

表-参 2.3　すべり係数に関するデータ〔土研，1989〕（続き）

文献名称	試験体名称	接触面				試験体諸元																ボルト軸力					すべり係数				統計データとしての採用判断（注11）			不採用理由
		塗膜厚(μm)（注1）			塗装仕様に関する記載（注2）	ボルト					母材・連結板						すべり降伏比					ボルト軸力(kN)				締付～試験までの期間	すべり耐力(kN)(実測値)	すべり係数（注10）				判定1（無機ジンク仕様）：選択の規定を満たす（○），満たさないか不明（×） 判定2（塗膜厚）：選択の規定を満たす（○），満たさないか不明（×） 判定3（すべり降伏比）：0.7以下（○），0.7以上あるいは不明（×）			
		母板	添接板	合計膜厚		ボルト本数（注3）	ボルト行数	ボルト列数	孔径(mm)（注4）	ボルト径	連結板板厚(mm)	母材板厚(mm)	試験体幅(mm)	降伏応力(N/mm²)（注5）	母板降伏耐力(kN)（注6）	連結板降伏耐力(kN)（注6）	すべり耐力(設計値)（注7）	すべり降伏比β（注8）母板	すべり降伏比β（注8）連結板	連結板降伏比γ（注8）	材質	設計軸力 N_0	締付軸力 N_0^*（目標値）	締付軸力 N_1（実測値）	試験前軸力 N_2（実測値）			μ_0	μ_0^*	μ_1	μ_2	判定1	判定2	判定3	
〃	V(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	583	0.36	0.36			×	×	○	※1
〃	V(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		179	6ヶ月後	657	0.41	0.41		0.46	×	×	○	※1
〃	V(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	794	0.49	0.49			×	×	○	※1
〃	V(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	671	0.42	0.42			×	×	○	※1
〃	V(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		181	6ヶ月後	663	0.41	0.41		0.46	×	×	○	※1
〃	V(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	755	0.47	0.47			×	×	○	※1
〃	V(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	783	0.49	0.49			×	×	○	※1
〃	V(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		161	6ヶ月後	812	0.51	0.51		0.63	×	×	○	※1
〃	V(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,037	0.65	0.65			×	×	○	※1
〃	V(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	787	0.49	0.49			×	×	○	※1
〃	V(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		185	6ヶ月後	772	0.48	0.48		0.52	×	×	○	※1
〃	V(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	973	0.61	0.61			×	×	○	※1
〃	V(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	822	0.51	0.51			×	×	○	※1
〃	V(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		168	6ヶ月後	784	0.49	0.49		0.8	×	×	○	※1
〃	V(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	970	0.60	0.60			×	×	○	※1
〃	V(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	807	0.50	0.50			×	×	○	※1
〃	V(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		178	6ヶ月後	839	0.52	0.52		0.9	×	×	○	※1
〃	V(S)	30	170	200	（率）80.0% （径）3.8mm	4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	862	0.54	0.54			×	×	○	※1
〃	V(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	782	0.49	0.49			×	×	○	※1
〃	V(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		170	6ヶ月後	767	0.48	0.48		0.6	×	×	○	※1
〃	V(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	931	0.58	0.58			×	×	○	※1
〃	V(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	800	0.50	0.50			×	×	○	※1
〃	V(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		170	6ヶ月後	792	0.49	0.49		0.8	×	×	○	※1
〃	V(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	951	0.59	0.59			×	×	○	※1
〃	V(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	782	0.49	0.49			×	×	○	※1
〃	V(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		169	6ヶ月後	890	0.55	0.55		0.66	×	×	○	※1
〃	V(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,025	0.64	0.64			×	×	○	※1
〃	V(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	734	0.46	0.46			×	×	○	※1
〃	V(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		169	6ヶ月後	909	0.57	0.57		0.67	×	×	○	※1
〃	V(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,038	0.65	0.65			×	×	○	※1
〃	V(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	652	0.41	0.41			×	×	○	※1
〃	V(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		182	6ヶ月後	768	0.48	0.48		0.53	×	×	○	※1
〃	V(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	973	0.61	0.61			×	×	○	※1
〃	V(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	721	0.45	0.45			×	×	○	※1
〃	V(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		156	6ヶ月後	706	0.44	0.44		0.57	×	×	○	※1
〃	V(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	973	0.61	0.61			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	568	0.35	0.35			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		115	6ヶ月後	838	0.52	0.52		0.91	×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	888	0.55	0.55			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	569	0.35	0.35			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		176	6ヶ月後	713	0.44	0.44		0.51	×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	30	60		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	727	0.45	0.45			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	598	0.37	0.37			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		173	6ヶ月後	750	0.47	0.47		0.54	×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	839	0.52	0.52			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	654	0.41	0.41			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		178	6ヶ月後	708	0.44	0.44		0.50	×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	120	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	868	0.54	0.54			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	667	0.42	0.42			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		173	6ヶ月後	766	0.48	0.48		0.55	×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	951	0.59	0.59			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	742	0.46	0.46			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	170	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		169	6ヶ月後	764	0.48	0.48		0.57	×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	30	170	200	（率）75.1% （径）7.3mm	4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	983	0.61	0.61			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	798	0.50	0.50			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		168	6ヶ月後	701	0.44	0.44		0.52	×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	966	0.60	0.60			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	750	0.47	0.47			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		164	6ヶ月後	733	0.46	0.46		0.56	×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	75	75	150		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	886	0.55	0.55			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	728	0.45	0.45			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		171	6ヶ月後	615	0.38	0.38		0.45	×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	908	0.57	0.57			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	769	0.48	0.48			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		169	6ヶ月後	608	0.38	0.38		0.45	×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	100	100	200		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	905	0.56	0.56			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	757	0.47	0.47			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		164	6ヶ月後	725	0.45	0.45		0.55	×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	909	0.57	0.57			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	735	0.46	0.46			×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201		161	6ヶ月後	721	0.45	0.45		0.56	×	×	○	※1
〃	Ⅲ(S)	150	150	300		4	2	2	24.5	M22	9	19	240	315	1,143	1,083	643	0.56	0.59	0.95	SM50A	201	201			締付後直ちに	1,002	0.62	0.62			×	×	○	※1

資料31

表-参 2.4　すべり係数に関するデータ（最近の研究成果）

文献名称	試験体名称	接触面				試験体諸元																							すべり係数					統計データとしての採用判断（注11）			不採用理由
		塗膜厚(μm)（注1）			塗装仕様に関する記載（注2）	ボルト					母材・連結板						すべり降伏比					ボルト軸力(kN)				締付～試験までの期間	すべり耐力(kN)(実測値)	すべり係数（注10）				判定1（無機ジンク仕様）：道示の規定を満たす（○），満たさないか不明（×） 判定2（強膜厚）：道示の規定を満たす（○），満たさないか不明（×） 判定3（すべり降伏比）：0.7以下（○），0.7以上あるいは不明（×）			
		母板	添接板	合計膜厚		ボルト本数(注3)	ボルト行数	ボルト列数	孔径(mm)(注)	ボルト径	連結板厚(mm)	母材板厚(mm)	試験体幅(mm)	降伏応力(N/mm²)(注5)	母板降伏耐力(kN)(注6)	連結板降伏耐力(kN)(注6)	すべり耐力(設計値)(注7)	すべり降伏比β(注8) 母板	すべり降伏比β(注8) 連結板	連結板降伏比γ(注8)	材質	設計軸力 N_0	締付軸力 N_i'（目標値）	締付軸力 N_i（実測値）	試験前軸力 N_i（実測値）			μ_0	μ_0'	μ_1	μ_2	判定1	判定2	判定3	
文献 6	D	77	77	15	記載なし	2	1	2	2 5	M22	9	19	125	355	678	6 2	373	0.55	0 58	0 95	SM50YB	233	269		212	200時間	3	0 7	0 1		0 52	×	○	○	※1
		75	75	150		2	1	2	2 .5	M22	9	19	125	355	678	6 2	373	0.55	0.58	0.95	SM50YB	233	269		21	200時間	539	0.58	0.50		0.63	×	○	○	※1
		75	75	150		2	1	2	2 .5	M22	9	19	125	355	678	6 2	373	0.55	0.58	0.95	SM50YB	233	269		212	200時間	523	0.56	0. 9		0.62	×	○	○	※1
文献 7	A	5	5	90	(率)81% (径)15mm	2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0 6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	523	0 6	0 59			○	○	○	採用
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0 6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	531	0.65	0.60			○	○	○	採用
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	527	0.6	0.60			○	○	○	採用
	B	5	5	90	(率)77% (径)17.5mm	2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0 6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	99	0 61	0.56			×	○	○	※1
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0 6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	89	0 60	0.55			×	○	○	※1
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	519	0.63	0.59			×	○	○	※1
	C	5	5	90	(率)83% (径)7mm	2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0 6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	393	0 8	0			×	○	○	※1
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0 6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	37	0 53	0 9			×	○	○	※1
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0 6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	8	0 55	0 51			×	○	○	※1
	D	5	5	90	(率)83% (径)7.5mm	2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	501	0.61	0.57			×	○	○	※1
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0 6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	51	0 63	0 58			×	○	○	※1
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0 6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	66	0 57	0 53			×	○	○	※1
	A	5	5	90	(率)81% (径)15mm	2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			12ヶ月	68	0.57	0.53			○	○	○	採用
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			12ヶ月	5 9	0 67	0 62			○	○	○	採用
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			12ヶ月	70	0.57	0.53			○	○	○	採用
	B	5	5	90	(率)77% (径)17.5mm	2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			12ヶ月	538	0.66	0.61			×	○	○	※1
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			12ヶ月	552	0.67	0.62			×	○	○	※1
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			12ヶ月	553	0.67	0.62			×	○	○	※1
	C	5	5	90	(率)83% (径)7mm	2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			12ヶ月	86	0.59	0.55			×	○	○	※1
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			12ヶ月	67	0.57	0.53			×	○	○	※1
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			12ヶ月	90	0.60	0.55			×	○	○	※1
	D	5	5	90	(率)83% (径)7.5mm	2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			12ヶ月	551	0.67	0.62			×	○	○	※1
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			12ヶ月	533	0.65	0.60			×	○	○	※1
		5	5	90		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0 6	1.26	不明	205	221			12ヶ月	50	0 61	0 57			×	○	○	※1
	A	75	75	150	(率)81% (径)15mm	2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	576	0.70	0.65			○	○	○	採用
		75	75	150		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	56	0.69	0.6			○	○	○	採用
		75	75	150		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	538	0.66	0.61			○	○	○	採用
	B	75	75	150	(率)77% (径)17.5mm	2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	55	0.55	0.51			×	○	○	※1
		75	75	150		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	531	0.65	0.60			×	○	○	※1
		75	75	150		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	93	0.60	0.56			×	○	○	※1
	C	75	75	150	(率)83% (径)7mm	2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	51	0.55	0.51			×	○	○	※1
		75	75	150		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	08	0.50	0. 6			×	○	○	※1
		75	75	150		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	33	0.53	0 9			×	○	○	※1
	D	75	75	150	(率)83% (径)7.5mm	2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	5 2	0.66	0.61			×	○	○	※1
		75	75	150		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0 6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	523	0 6	0 59			×	○	○	※1
		75	75	150		2	1	2	26	M22	12	19	120	315(仮)	563	711	328	0.58	0.6	1.26	不明	205	221			6ヶ月	503	0.61	0.57			×	○	○	※1
文献 8		100	100	200	(率)82% (径)不明	2	1	2	2 5	M22	9	18	130	685	1 301	1 301	328	0.25	0.25	1.00	HT80	205	226	225	189	不明	503	0.61	0.56	0.56	0.66	○	○	○	採用
		100	100	200		2	1	2	2 .5	M22	9	18	130	685	1 301	1 301	328	0.25	0.25	1.00	HT80	205	226	218	18	不明	509	0.62	0.56	0.58	0.69	○	○	○	採用
		100	100	200		2	1	2	2 .5	M22	9	18	130	685	1 301	1 301	328	0.25	0.25	1.00	HT80	205	226	232	196	不明	518	0.63	0.57	0.56	0.66	○	○	○	採用
文献 9		70	70	1 0	道示に準拠	3	1	3	26 5	M2	0	5	120	315 (仮)	1 325	2 356	571	0 3	0 2	1.78	不明	238	262	273	2 8	1日後	9 9	0.66	0.60	0 58	0 6	○	○	○	採用
		70	70	1 0		3	1	3	26.5	M2	0	5	120	315 (仮)	1 325	2 356	571	0. 3	0.2	1.78	不明	238	262	259	232	1日後	978	0.68	0.62	0.63	0.70	○	○	○	採用
		70	70	1 0		3	1	3	26.5	M2	0	5	120	315 (仮)	1.325	2.356	571	0. 3	0.2	1.78	不明	238	262	255	219	1年後	906	0.63	0.58	0.59	0.69	○	○	○	採用
		70	70	1 0		3	1	3	26.5	M2	0	5	120	315 (仮)	1 325	2 356	571	0. 3	0.2	1.78	不明	238	262	260	220	1年後	921	0.65	0.59	0.59	0.70	○	○	○	採用
		70	70	1 0		3	1	3	26 5	M2	0	5	120	315 (仮)	1 325	2 356	571	0 3	0 2	1.78	不明	238	262	2 6	207	1年後	860	0 60	0 55	0 58	0.69	○	○	○	採用
文献 10	A	75	75	150	記載なし	2	1	2	不明	M2	12	38	100	355	992	626	381	0.38	0.61	0.63	SM 90Y	238	238	230	217	7日後	5 7	0.57	0.57	0.59	0.63	×	○	○	※1
		75	75	150		2	1	2	不明	M2	12	38	100	355	992	626	381	0.38	0.61	0.63	SM 90Y	238	238	235	221	7日後	559	0.59	0.59	0.59	0.63	×	○	○	※1
		75	75	150		2	1	2	不明	M2	12	38	100	355	992	626	381	0.38	0.61	0.63	SM 90Y	238	238	236	222	7日後	5 6	0.57	0.57	0.58	0.61	×	○	○	※1
文献 11		75	75	150	(率)82% (径)不明	2	1	2	2 5	M22	12	22	100	315	523	571	328	0 63	0 57	1.09	SM 90	205	205	23	203	1ヶ月	535	0.65	0.65	0 57	0.66	○	○	○	採用
		75	75	150		2	1	2	2 .5	M22	12	22	100	315	523	571	328	0.63	0.57	1.09	SM 90	205	205	22	195	1ヶ月	513	0.63	0.63	0.57	0.66	○	○	○	採用
		75	75	150		2	1	2	2 5	M22	12	22	100	315	523	571	328	0.63	0.57	1.09	SM 90	205	205	220	191	1ヶ月	52	0 6	0 6	0 60	0.69	○	○	○	採用
文献 12	2-S	75	75	150	記載なし	2	1	2	不明	M20	16	25	100	355	688	880	26	0.38	0.30	1.28	SM 90Y	165	165		153	不明	57	0.69	0.69		0.75	×	○	○	※1
		75	75	150		2	1	2	不明	M20	16	25	100	355	688	880	26	0.38	0.30	1.28	SM 90Y	165	165		1 6	不明	0	0 61	0.61		0.69	×	○	○	※1
		75	75	150		2	1	2	不明	M20	16	25	100	355	688	880	26	0.38	0.30	1.28	SM 90Y	165	165		1 7	不明	39	0.66	0.66		0.75	×	○	○	※1
文献 13	B	75	75	150	道示に準拠	2	1	2	22 5	M20	12	22	75	355	10	7	285	0.69	0 6	1.09	SM 90Y	178	178			少なくとも 時間	2	0.62	0.62			○	○	○	採用
		75	75	150		2	1	2	22.5	M20	12	22	75	355	10	7	285	0.69	0.6	1.09	SM 90Y	178	178			少なくとも 時間	38	0.62	0.62			○	○	○	採用
		75	75	150		3	1	3	22.5	M20	12	22	75	355	10	7	27	1.0	0.95	1.09	SM 90Y	178	178			少なくとも 時間	588	0.55	0.55			○	○	×	※3
		75	75	150		3	1	3	22.5	M20	12	22	75	355	10	7	27	1.0	0.95	1.09	SM 90Y	178	178			少なくとも 時間	578	0.5	0.5			○	○	×	※3
		75	75	150		2	1	2	22 5	M20	12	22	75	355	10	7	233	0.57	0.52	1.09	SM 90Y	1 6	1 6			少なくとも 時間	398	0 68	0 68			○	○	○	採用
		75	75	150		2	1	2	22 5	M20	12	22	75	355	10	7	233	0.57	0.52	1.09	SM 90Y	1 6	1 6			少なくとも 時間	393	0.67	0.67			○	○	○	採用
		75	75	150		3	1	3	22.5	M20	12	22	75	355	10	7	3 9	0.85	0.78	1.09	SM 90Y	1 6	1 6			少なくとも 時間	5 2	0.62	0.62			○	○	×	※3
		75	75	150		3	1	3	22.5	M20	12	22	75	355	10	7	3 9	0.85	0.78	1.09	SM 90Y	1 6	1 6			少なくとも 時間	558	0.6	0.6			○	○	×	※3
文献 1		72	72	1 3	道示に準拠		1		2 .5	M22	16	32	100	355	858	858	656	0.76	0.76	1.00	SM 90Y	205	226	233	21	1 日以降	1 001	0.61	0.55	0.5	0.58	○	○	×	※3
		72	72	1 3			1		2 5	M22	16	32	100	355	858	858	656	0.76	0.76	1.00	SM 90Y	205	226	238	217	1 日以降	1 038	0.63	0.57	0.55	0.60	○	○	×	※3
		72	72	1 3			1		2 5	M22	16	32	100	355	858	858	656	0.76	0.76	1.00	SM 90Y	205	226	231	211	1 日以降	1 051	0 6	0 58	0 57	0.62	○	○	×	※3
文献 15		75	75	150	道示に準拠	2	1	2	26.5	M22	16	25	110	355	7 1	9 9	328	0.	0.35	1.28	SM 90Y	205	23	22	201	1 日以降	571	0.70	0.61	0.6	0.71	○	○	○	採用
		75	75	150		2	1	2	26.5	M22	16	25	110	355	7 1	9 9	328	0.	0.35	1.28	SM 90Y	205	23	23	212	1 日以降	616	0.75	0.66	0.66	0.73	○	○	○	採用
		75	75	150		2	1	2	26.5	M22	16	25	110	355	7 1	9 9	328	0.	0.35	1.28	SM 90Y	205	23	225	203	1 日以降	587	0.72	0.63	0.65	0.72	○	○	○	採用
文献 16		76	76	152	(率)85% (径)10μm	3	1	3	2 .5	M22	12	22	120	355	7 6	81	91	0.66	0.60	1.09	SM 90Y	205	225			1日以内	738	0.60	0.55			○	○	○	採用
		76	76	152		3	1	3	2 .5	M22	12	22	120	355	7 6	81	91	0.66	0.60	1.09	SM 90Y	205	225			1日以内	7 6	0.61	0.55			○	○	○	採用
		76	76	152		3	1	3	2 .5	M22	12	22	120	355	7 6	81	91	0.66	0.60	1.09	SM 90Y	205	225			1日以内	7 2	0.60	0.55			○	○	○	採用
		3	3	87		3	1	3	2 .5	M22	12	22	120	355	7 6	81	91	0.66	0.60	1.09	SM 90Y	205	225			1日以内	97	0. 1	0.37			○	×	○	※2合計
		3	3	87		3	1	3	2 5	M22	12	22	120	355	7 6	81	91	0 66	0 60	1 09	SM 90Y	205	225			1日以内	509	0 1	0 38			○	×	○	※2合計
		3	3	87		3	1	3	2 5	M22	12	22	120	355	7 6	81	91	0 66	0 60	1 09	SM 90Y	205	225			1日以内	80	0 39	0 36			○	×	○	※2合計
		126	126	251		3	1	3	2 .5	M22	12	22	120	355	7 6	81	91	0.66	0.60	1.09	SM 90Y	205	225			1日以内	636	0.52	0. 7			○	×	○	※2合計
		126	126	251		3	1	3	2 .5	M22	12	22	120	355	7 6	81	91	0.66	0.60	1.09	SM 90Y	205	225			1日以内	663	0.5	0. 9			○	×	○	※2合計
		126	126	251		3	1	3	2 .5	M22	12	22	120	355	7 6	81	91	0.66	0.60	1.09	SM 90Y	205	225			1日以内	659	0.5	0. 9			○	×	○	※2合計
文献 17	A-P-1	76	85	161	道示に準拠	2	1	2	2 5	M22	12	22	100	315(仮)	523	571	321	0.61	0.56	1.09	不明	201	221	232	19	1ヶ月	559	0 70	0.63	0 60	0.72	○	○	○	採用
		7	99	173		2	1	2	2 .5	M22	12	22	100	315(仮)	523	571	321	0.61	0.56	1.09	不明	201	221	230	19	1ヶ月	532	0.66	0.60	0.58	0.69	○	○	○	採用
		70	95	165		2	1	2	2 .5	M22	12	22	100	315(仮)	523	571	321	0.61	0.56	1.09	不明	201	221	227	195	1ヶ月	530	0.66	0.60	0.58	0.68	○	○	○	採用
	A-P-2	79	98	177		2	1	2	26.5	M22	12	22	102	315(仮)	523	571	321	0.61	0.56	1.09	不明	201	221	228	187	1ヶ月	519	0.65	0.59	0.57	0.70	○	○	○	採用
		77	90	167		2	1	2	26.5	M22	12	22	102	315(仮)	523	571	321	0.61	0.56	1.09	不明	201	221	227	189	1ヶ月	521	0.65	0.59	0.57	0.69	○	○	○	採用
		75	91	166		2	1	2	26 5	M22	12	22	102	315(仮)	523	571	321	0 61	0 56	1 09	不明	201	221	225	190	1ヶ月	517	0 6	0 58	0 57	0 68	○	○	○	採用

資料32

資料-2　接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した高力ボルト摩擦接合継手の設計法について　－厚板・多列ボルト継手の適用を前提とした場合の設計法の改定案－

本資料は，道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編（平成 14 年 3 月）[1)]（以下，道示）に対し，今回の実験・解析結果や既往の研究で得られた知見を踏まえ，厚板及び多列ボルトを前提とした高力ボルト摩擦接合継手の設計法に関する改定案を示したものである。

１．設計すべり係数に関する規定

（1）改定案

3.2.3　溶接部及び接合用鋼材の許容応力度

（2）高力ボルトの許容力及び許容応力度

1）摩擦接合用高力ボルト及び摩擦接合用トルシア形高力ボルトの許容力は表-3.2.7 に示す値とする。

表-3.2.7　摩擦接合用高力ボルトの許容力（1 ボルト 1 摩擦面あたり）

（a）接触面を塗装しない場合　(kN)

ボルトの等級 / ねじの呼び	F8T	F10T	S10T
M20	31	39	39
M22	39	48	48
M24	45	56	56

（b）接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装する場合　(kN)

ボルトの等級 / ねじの呼び	F8T	F10T	S10T
M20	35	44	44
M22	44	54	54
M24	51	63	63

≪解説要旨≫

・摩擦接合用高力ボルトの許容力は式（解 3.2.5）で与えられる。

$\rho_a = (1/\nu) \cdot \mu \cdot N$ ……（解 3.2.5）

ここに，

ρ_a：ボルト 1 本 1 摩擦面あたりの許容力（N）

ν：継手のすべりに対する安全率（1.7）

μ：すべり係数

接触面を塗装しない場合：0.40

接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装する場合：0.45（17.5.3 参照）

（以下，省略）

・すべり係数 μ は，これまで接触面の処理方法によらず一律 0.4 としていたが，17.5.3 の規定に従って接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装する場合には，0.45 を確保できることが最近の研究成果により確認されたことから，それに併せて許容力を見直している。

・接触面に無機ジンクリッチペイント以外の防食方法を施す場合には，防食仕様がすべり耐力に与える影響を実験で明らかにした上で，すべり係数を適切に設定するとともに，施工管理方法などについて慎重に検討を行う必要がある。

（2）補足説明

接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した継手について，設計すべり係数を 0.4 と定めており，併せて 0.4 以上のすべり係数が得られるとみなしてよい塗装条件を定めている（道示，表-17.5.1）。このうち，片面塗膜厚の最小値として 30μm が示されているが，施工の実態としては，塗装・防食便覧 [2)]や土木工事施工管理基準及び規格値（例えば，国土交通省 関東地方整備局）[3)]で規定される施工管理規格値の最小値（53μm）で管理されている。片面塗膜厚の最小値の 30μm について，当時は継手部の塗装仕様が定められておらず，一時的防錆を目的とした場合の無機ジンク（鋼道路橋塗装便覧，昭和 54 年 [2)]）の下限値を基に設定されたものである。

現行規定の根拠となった実験結果（土木研究所，1989 年）[4,5)]と，それ以降に実施された実験結果（厚板化を反映）をあわせて，塗装条件とすべり係数の関係について整理分析したところ，片面最小塗膜厚を施工管理規格値の最小値（53μm）とした場合に，すべり係数として 0.45 以上を確保できることを確認できたため, 設計すべり係数については従来までの 0.40 から 0.45 へ見直すことが妥当と考えられる。なお，詳細な検討結果については，資料-1 に示す。

２．板厚に関する規定

（1）改定案

3.2.3　溶接部及び接合用鋼材の許容応力度

（2）高力ボルトの許容力及び許容応力度

≪解説要旨≫

・部材の締付け厚さは 150mm 程度までの範囲とし，これを超える場合には継手性能に与える影響を別途確認する必要がある。

（2）補足説明

道示では，高力ボルト摩擦接合継手について，適用板厚の制限や厚板による長尺ボルトの制限（例えば，ボルトの首下長さの制限値など）は規定されておらず，扱いが必ずしも明確でなかった面がある。今回の実験や既往の研究によれば，締付け厚さ 150mm 程度（母板 75mm 程度）までの範囲では，厚板でない継手と同等のすべり耐力を確保できる結果が得られており，かつ，長尺化によるボルト自体の性能の差はないことが明らかとなっている。したがって，この範囲内であれば高力ボルト摩擦接合としての継手性能に問題はないと考えられることから，許容応力度あるいは設計すべり係数の適用範囲として，締付け厚さの目安を示したものである。

３．ボルト列数に関する規定

（1）改定案

6.3.1　一般（6.3　高力ボルト継手）

・高力ボルトを用いる継手は，ボルトに作用する力が不均等とならないよう，1 ボルト線上に並ぶ本数に配慮して設計しなければならない。（追加）

≪解説要旨≫

・接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装する場合の高力ボルト摩擦接合継手については，最近の実験等により，多列配置がすべり耐力に及ぼす影響が確認されている。これらを踏まえ，接合面に無機ジンクリッチペイントを塗装する継手に対し，表-3.2.7 に示す摩擦接合用高力ボルトの許容力に表-解 6.3.1 に示す低減係数を乗じて継手の設計を行う場合には，1 ボルト線上に並ぶ本数を最大 12 本までとすることができる。

表-解 6.3.1　摩擦接合用高力ボルトの許容力に乗じる低減係数

1ボルト線上に並ぶボルト本数	低減係数	(参考)みなしのすべり係数
8本以下	1.00	0.45
9本	0.98	0.44
10本	0.96	0.43
11本	0.94	0.42
12本	0.92	0.41

注 1）本表に示す低減係数は，17.5.3 の規定に従って接合面に無機ジンクリッチペイントを塗装した継手を対象としたものである。
注 2）1 ボルト線上に並ぶボルト本数が 8 本を超える場合には，対象とする継手の全てのボルトについて，この低減係数を許容力に乗じる。

（2）補足説明

道示では，連結長が長すぎるとボルトに作用する力が不均等となるため，「高力ボルト摩擦接合では，1 ボルト線上に並ぶ本数をなるべく 8 本程度以下とするのがよい」としている。無機ジンク仕様の多列ボルトに関する実験や解析結果によれば，多列（8 本程度以上配置）の場合，すべり係数が低下する傾向がみられるため，道示の考え方を踏襲することが妥当と考えられる。一方では，多列化のニーズもあり，想定される厚板に関する実験・解析結果を踏まえて，無機ジンクリッチペイント仕様の場合について限定的に照査方法を補足している。具体の照査方法としては，すべり係数の低下に配慮して，設計すべり係数に低減係数を乗じる照査方法とし，低減係数については図-資 2.3.1 に示すように，実験・解析結果を踏まえ，多列となった場合のすべり耐力が安全側となるように設定するものである。表-解 6.3.1 では，設計すべり係数を 0.45 とし，かつボルト列数を 8 列以上配置した場合の設計すべり係数を示している。なお，12 列とした場合には，0.45×0.92＝0.41 となり，従来のすべり係数 0.4 に近い値となる。

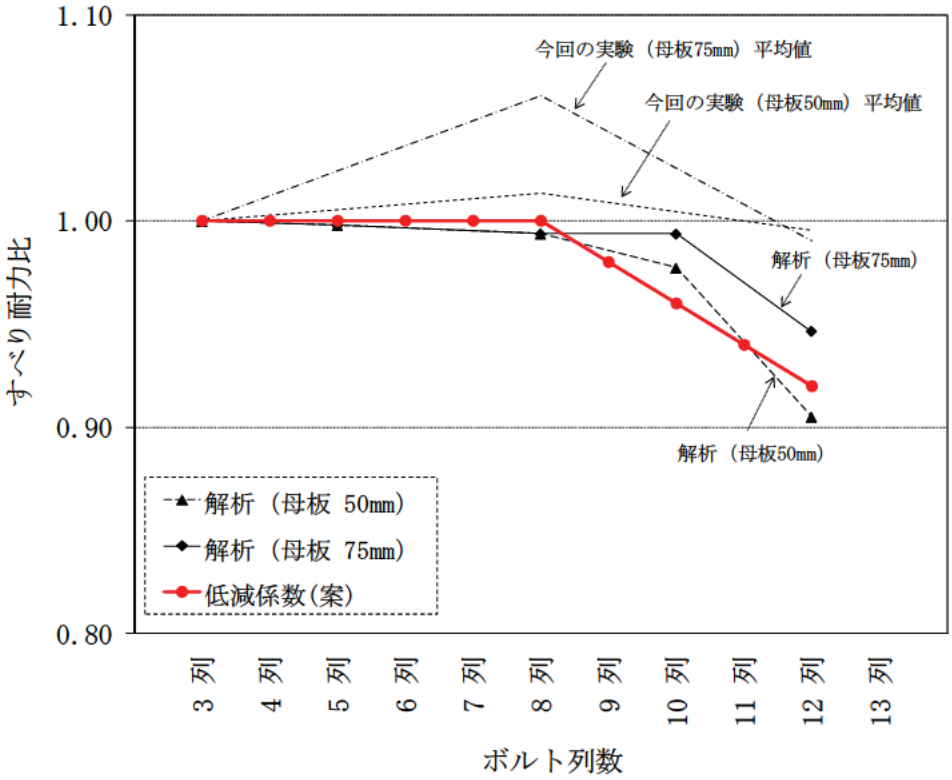


図-資2.3.1　ボルト列数に応じたすべり係数の低減係数

4．フィラーに関する規定

（1）改定案

6.3.15 フィラー

≪解説要旨≫

・フィラーは板厚が厚いほど母板中心軸のずれによる偏心曲げモーメントが大きくなり，継手のすべり耐力に影響を及ぼすことが知られている。

・そのため，フィラーの板厚は厚い側の母材板厚の 1/2 程度かつ 25mm 程度を限度とするのが望ましい。

（2）補足説明

1)フィラーの板厚について

今回の実験や既往の研究における実験結果を踏まえると，フィラーを有する継手は，フィラーの無い継手に比べてすべり耐力が低下し，特にフィラーの板厚が 20mm 程度を超えた場合に，すべり耐力が大きく低下する可能性がある（図-資 2.3.2）。道示では，フィラーの板厚の上限値を，母板の厚い側の板厚の 1/2 を限度としていたが，従来の規定に板厚の制限値として 25mm を追加する。

2)肌すきについて

今回の実験を含むこれまでの実験結果を踏まえると，肌すきを有する継手は，肌すき無い継手に比べてすべり耐力が低下し，特に連結板の板厚が厚くなるほどすべり耐力が大きく低下する可能性がある。これまで道示では，継手部には肌すきが生じないように設計するように規定されており，厚板多列ボルト継手においてもこれに準ずるのが望ましいと考えられる。

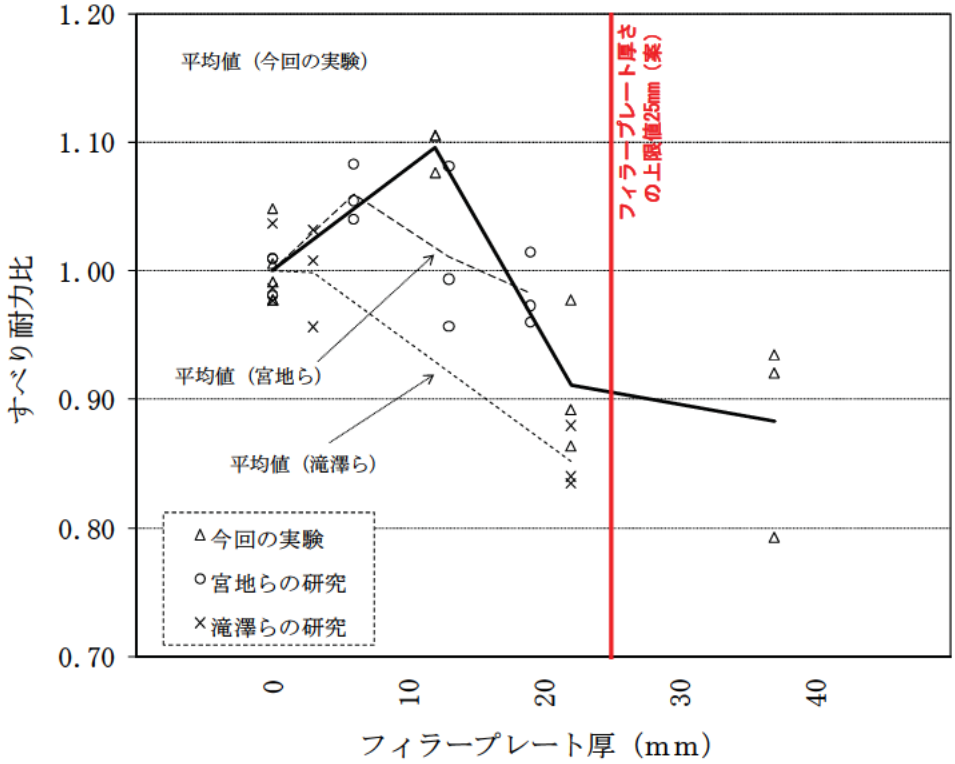


図-資2.3.2　フィラープレート厚さの上限値

5．施工に関する規定

（1）改定案

17.5.3　接触面の処理

(2) 下記に示す処理を施した場合においては，表-17.5.1 に示すすべり係数が得られるものとみなす。

1) 接触面を塗装しない場合には，接触面は黒皮を除去して粗面とする。材片の締付けにあたっては接触面の浮さび，油，泥等を十分に清掃して取り除く。

2) 接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装する場合，表-17.5.2 に示す条件に従い，無機ジンクリッチペイントを使用する。

表-17.5.1　すべり係数

項目	すべり係数
(a) 接触面を塗装しない場合	0.40

(b) 接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装する場合	0.45

表-17.5.2　無機ジンクリッチペイントを塗装する場合の条件

項目	条件
接触面片面あたりの最小乾燥塗膜厚	50μm以上
接触面の合計乾燥塗膜厚	100～200μm
乾燥塗膜中の亜鉛含有量	80%以上
亜鉛末の粒径（50%平均粒径）	10μm程度以上

≪解説要旨≫

・現状の接合面の塗膜厚管理値や最近の研究成果を踏まえることにより，塗装仕様を見直した場合にすべり係数 0.45 を確保できることが明らかにされており，今回の改定では，接合面に無機ジンクリッチペイントを塗装する場合のすべり係数を 0.45 とするとともに，表-17.5.2 に無機ジンクリッチペイントを塗装する場合の塗装仕様を規定したものである。

17.5.4　ボルトの締付け

≪解説要旨≫

・部材の締付厚さが大きい場合には，ボルトの緩む度合いが大きくなる可能性があるため，十分注意して施工を行う必要がある。

(2) 補足説明

1) 接触面の処理

「１．設計すべり係数の見直し」を参照。

2) ボルトの締付け

高力ボルト摩擦接合接手において，締付け厚さが大きい場合は，ボルトの緩む度合いが大きくなる可能性があるため，十分注意して施工を行う旨を解説に追加することが適切と考えられる。

道示では，既に肌すきに関する留意事項として，肌すきが生じた場合の処理方法の例が示されており，厚板多列ボルト継手においてもこれに準ずるのが望ましいと考えられる。ただし，連結板の板厚が厚くなるほどすべり耐力が低下する可能性があるため，施工時に注意する必要がある。

参考文献

1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，2002.3.
2) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，2005.12.
3) 例えば，関東地方整備局：施工管理基準及び規格値，2009.
4) 土木研究所：高力ボルト摩擦接合継手に関する試験調査，土木研究所資料第 2796 号,1989.8.
5) 篠原，西川，田中：無機ジンクリッチペイントを塗布した高力ボルト摩擦接合継手すべり耐力実験と塗装仕様案，土木技術資料 29-1，37-42，1987.

資料-3　塗料の水分量（乾燥期間）の影響に着目したすべり耐力の検討

１．背景

道示で規定されている無機ジンクリッチペイントの仕様以外にすべり係数に影響を与える因子として考えられる，無機ジンクの製造方法（製造時の無機ジンクに含まれる水分量）に着目し，すべり耐力試験を実施した。

塗料メーカーのヒアリングによると，無機ジンクリッチペイントは，過去（1980 年前後）の製造方法では，製造時に材料と外気が触れているため，製造時の湿度等による影響を受け，品質（特にシリケートの品質）にばらつきが大きかった可能性があるとのことである。また，過去の試験では，無機ジンクリッチペイントが完全に乾燥する前に試験体を組み立て，試験を行われていた可能性がある。乾燥時間とすべり係数の関係は明らかではないが，これによりすべり係数が低かった可能性が考えられるため，今回の試験では乾燥時間についても着目することとした。

２．試験方法

2.1　無機ジンクリッチペイント

試験体の接触面に塗装する無機ジンクリッチペイントは，現在製造および使用されているもの（通常）と過去にものを模擬したもの（水分量多，水分量少）の合計 3 種類製作した（表-資 3.2.1）。ここで，表中に示す加水分解率とは，水分量をエチルシリケートの量で除したものである。加水分解率が大きいと，高分子量で反応基（-SiOH）を多く持つ加水分解縮合物ができ，これを塗装すると，塗膜の乾燥・硬化過程で大きな歪みを生じ，形成された塗膜は内部応力が大きくなる（硬く脆い品質となる）。なお，無機ジンクリッチペイントは，道示Ⅱで規定されている条件（乾燥塗膜中の亜鉛含有量：80%以上，亜鉛末の粒径（50%平均粒径）：10μm 程度以上）を満足するものである。

表-資 3.2.1　使用塗料液の種類

塗料名	加水分解率	備考
通常使用	60%	現在の品質（通常使用している塗料液）
水分量少	30%	過去の品質（現在の塗料液に比べ，水分量の少ない塗料液で，塗膜が柔らかい品質となる）
水分量多	100%	過去の品質（現在の塗料液に比べ，水分量の多い塗料液で，塗膜が硬く脆い品質となる）

2.2　無機ジンクリッチペイント硬度測定

無機ジンクリッチペイントの硬度測定は，硬度測定用鋼材への塗装を行い，所定の乾燥日数（1 日，2 日，5 日，14 日，28 日）を定め，JIS 規格に規定される鉛筆法（JIS K 5600-5-4）に準じて手かき法にて行った。硬度測定時の環境は 23±2℃，50±5%RH の恒温室内で実施した。

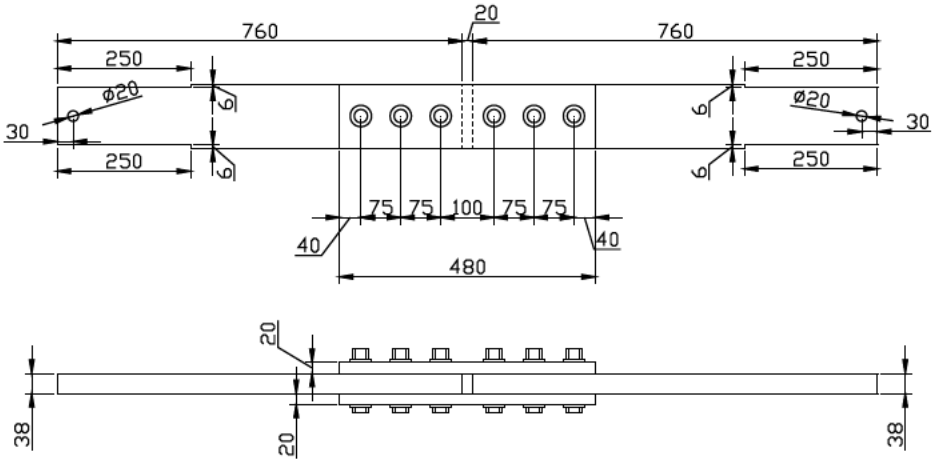
2.3　すべり耐力試験体

製作したすべり耐力試験体（全 15 体）を図-資 3.2.1 に示す。つかみ部は，試験機に設置できるよう幅方向に 6mm ずつ切削している。

試験体の接触面には 2.1 で製作した塗液にて塗装および乾燥を行った。塗液が 3 種類，乾燥日数が，2 日，5 日，14 日，28 日の 4 種類，計 12 種類の試験パターンを製作した。塗液の種類と乾燥日数と試験パターンの関係を表-資 3.2.2 に示す。試験体パターンにある前の数字は塗液の加水分解率を表し，後ろの数字は乾燥日数を表す。

試験体の締付け順序は，標準的な方法として内側からの締付けで行う。ボルトの締付けは 2 段階とし，1 次締付けは締付け軸力（205kN）の 60%とする。非すべり側の軸力は 120%増しとする。なお，導入軸力は，キャリブレーション結果に基づきボルト軸のひずみにより制御している。締付け終了から 1 週間，リラクゼーションを計測した。

ボルト軸のひずみは，締付け開始時から，すべり耐力試験終了まで計測し，軸力の変化を計測した。



（単位：mm）

図-資 3.2.1　標準すべり耐力試験体

表-資 3.2.2　試験パターン

		無機ジンクリッチペイントの種類		
		水分量多 100%	通常 60%	水分量少 30%
乾燥日数	2 日	100-2	60-2（1） 60-2（2）	30-2
	5 日	100-5	60-5（1） 60-5（2）	30-5
	14 日	100-14	60-14（1） 60-14（2）	30-14
	28 日	100-28	60-28	30-28

2.4　塗膜厚

塗装の翌日，無機ジンクリッチペイントの膜厚測定を行った。表-資 3.2.3，表-資 3.2.4，表-資 3.2.5，表-資 3.2.6 および図-資 3.2.2 に測定結果を示す。図-資 3.2.3 に示すように膜厚測定位置は，ボルト孔まわりの 4 点について行った。測定は各点で 5 回測定し，その平均値を記録した。その値から，各接触面の合計平均膜厚を算出し結果をまとめた。道示で規定されている接触面の合計乾燥膜厚は 90～200μm であり，本試験体はこれを満足している。

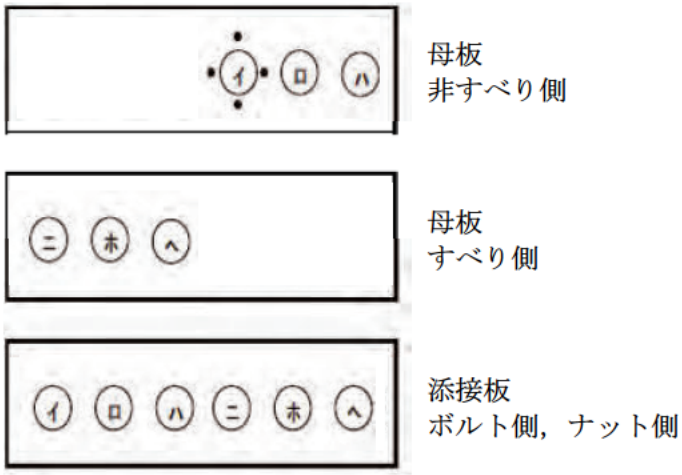


図-資 3.2.3　膜厚測定位置

表-資 3.2.3　各接触面の合計平均膜厚（μm）（その１）

測定箇所			100-2	60-2(1)	60-2(2)	30-2	100-5	60-5(1)	60-5(2)	30-5
各接触面の合計平均両面塗膜厚	非すべり側	表イ	157	143	157	148	186	146	143	170
		表ロ	177	157	178	157	196	154	159	185
		表ハ	179	148	157	161	198	151	168	181
		裏イ	164	154	161	150	189	145	152	165
		裏ロ	174	155	186	150	197	149	168	175
		裏ハ	185	137	175	148	198	148	161	173
		平均	173	149	169	152	194	149	159	175
	すべり側	表ニ	188	166	159	171	176	158	164	166
		表ホ	198	175	157	172	178	175	170	177
		表ヘ	192	146	158	158	160	152	147	168
		裏ニ	177	163	162	148	185	173	180	177
		裏ホ	177	158	167	139	190	174	176	176
		裏ヘ	166	131	167	131	172	144	159	169
		平均	183	157	162	153	177	163	166	172

表-資 3.2.4　各接触面の合計平均膜厚（μm）（その２）

測定箇所			100-14	60-14(1)	60-14(2)	30-14	100-28	60-28	30-28
各接触面の合計平均両面塗膜厚	非すべり側	表イ	136	166	146	169	166	145	180
		表ロ	153	176	155	179	170	167	212
		表ハ	151	181	161	181	167	157	203
		裏イ	146	145	157	175	169	166	158
		裏ロ	157	162	173	164	172	190	186
		裏ハ	156	167	181	168	168	193	188
	すべり側	表二	183	146	147	158	151	172	168
		表ホ	183	146	159	180	159	176	182
		表ヘ	168	141	138	149	148	173	162
		裏ニ	198	165	164	170	161	156	187
		裏ホ	195	158	171	181	160	155	191
		裏ヘ	177	147	155	152	147	157	159

表-資 3.2.5　各接触面の片面膜厚の最大値，最小値（μm）（その１）

測定箇所	100-2	60-2(1)	60-2(2)	30-2	100-5	60-5(1)	60-5(2)	30-5
最小値	74	60	74	64	76	65	69	67
最大値	108	108	91	107	96	101	106	99

表-資 3.2.6　各接触面の片面膜厚の最大値，最小値（μm）（その２）

測定箇所	100-14	60-14(1)	60-14(2)	30-14	100-28	60-28	30-28
最小値	74	64	44	71	66	62	60
最大値	103	90	96	101	104	93	110

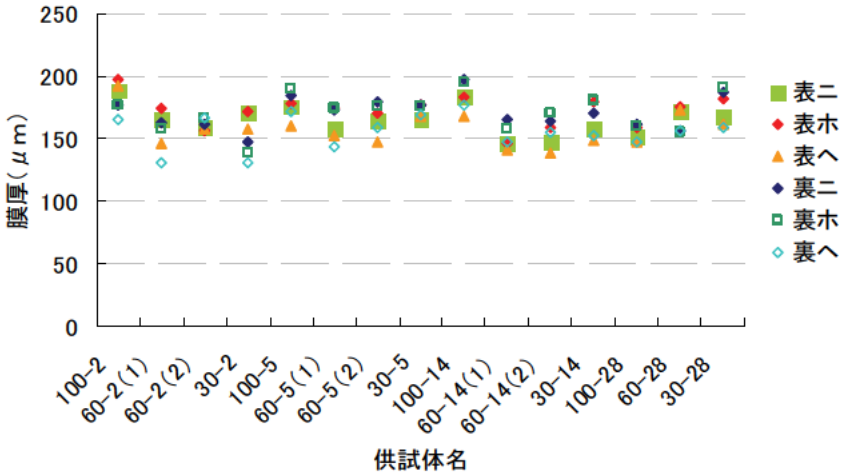


図-資 3.2.2　塗膜厚

2.5　高力ボルトのキャリブレーション試験

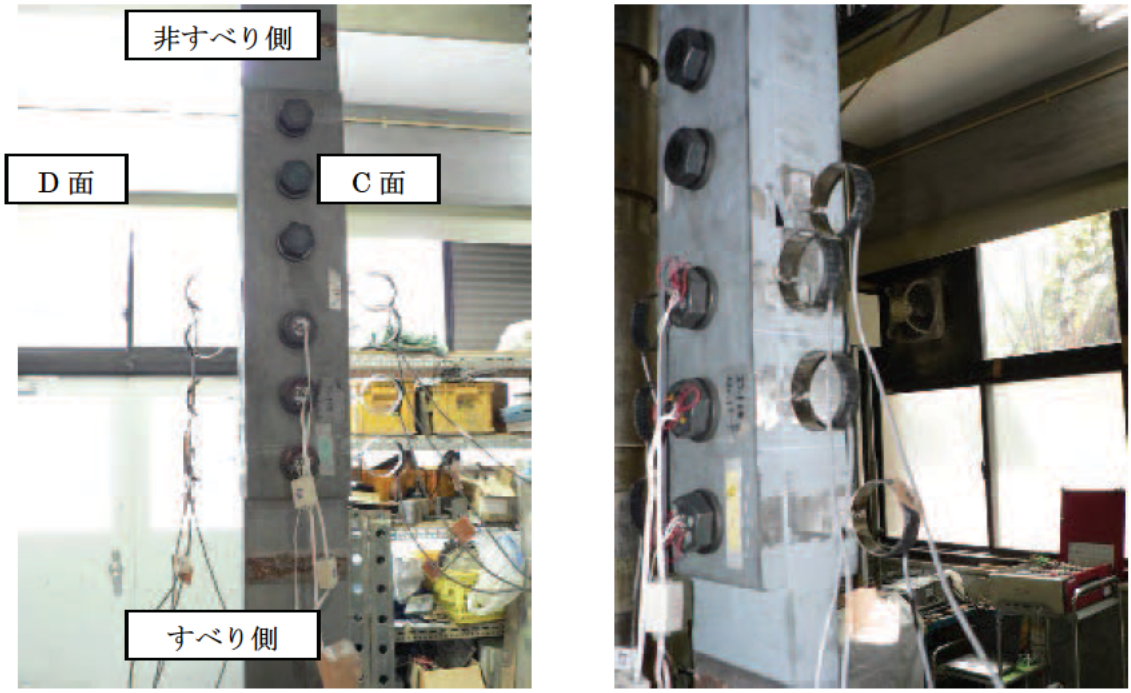
使用する高力ボルトのうち，5 本を抽出し，キャリブレーション試験を行うことで，導入軸力とボルトの軸ひずみの関係（ヤング率）を計測した。計測結果を表-資 3.2.7 に示す。この計測結果の平均値より，導入する軸力を制御した。

表-資 3.2.7　キャリブレーション試験結果（ヤング率，単位：N/mm^2）

	bolt-1	bolt-2	bolt-3	bolt-4	bolt-5
計測値	2.06×10^5	2.07×10^5	2.11×10^5	2.09×10^5	2.06×10^5
平均値	2.08×10^5				

2.6　すべり耐力試験

すべり耐力試験には，大阪市立大学が所有する 1,000kN 万能試験機を使用し，載荷は最初のすべり挙動を示した時点で終了とした。計測項目は，すべり荷重，すべり側のボルト軸力，相対変位（母板-連結板間，母板-母板間）とした。図-資 3.2.4 に計測位置を，図-資 3.2.5 にボルト番号を示す。また，図-資 3.2.6 にすべり発生後の写真を示す。



（a）正面　　（b）C 面

図-資 3.2.4　載荷状況

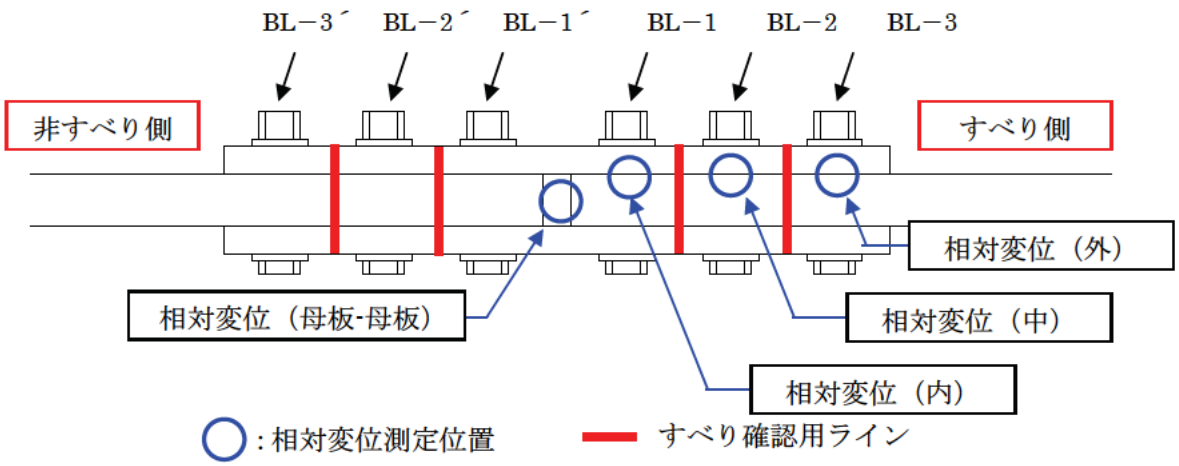


図-資 3.2.5　ボルト番号と相対変位測定位置

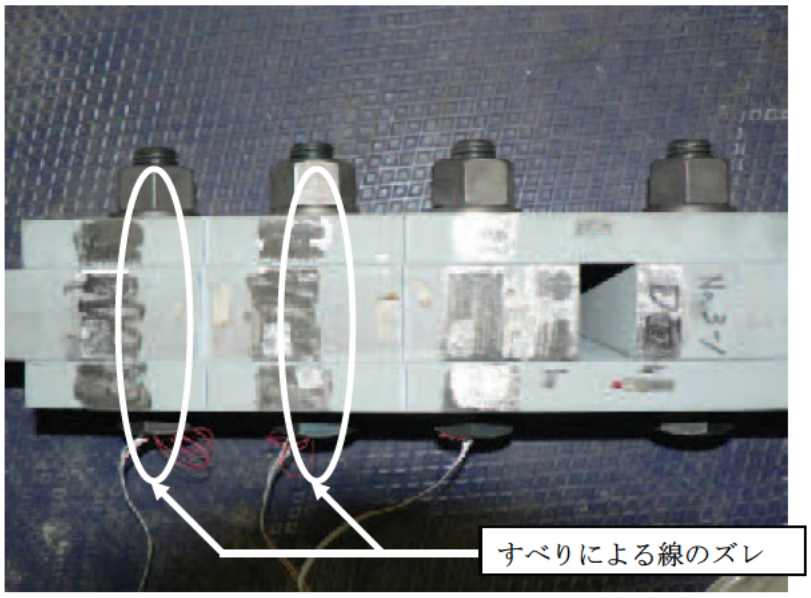


図-資 3.2.6　すべり発生後（D 面）

３．結果

3.1　無機ジンクリッチペイントの硬度

表-資 3.3.1 および図-資 3.3.1 に，無機ジンクリッチペイントの硬度測定結果を示す。表中に示す記号は，鉛筆法による引っかき硬度（JIS K 5600-5-4）で，B→HB→F→H→2H の順で硬くなることを示している。いずれの無機ジンクリッチペイントにおいても，乾燥日数ともに硬度が高くなっている。また，無機ジンクリッチペイントの種類による硬度は，水分量が多いほど高いが，乾燥日数の増加とともにその差は少なくなり，乾燥 28 日目ではいずれの塗膜も同じ値であった。

表-資 3.3.1　硬度計測結果

乾燥温度・湿度	乾燥日数		無機ジンクリッチペイントの種類		
			通常使用	水分量少	水分量多
標準 23±2℃ 50±5%RH	1 日	接触乾燥	30 分	60 分	30 分
		半硬化乾燥	3 時間	18 時間以内	18 時間以内
		硬化乾燥	18 時間以内	18 時間以内	18 時間以内
	2 日		F	B	H
	5 日		H	HB	H
	14 日		H	F	H
	28 日		2H	2H	2H

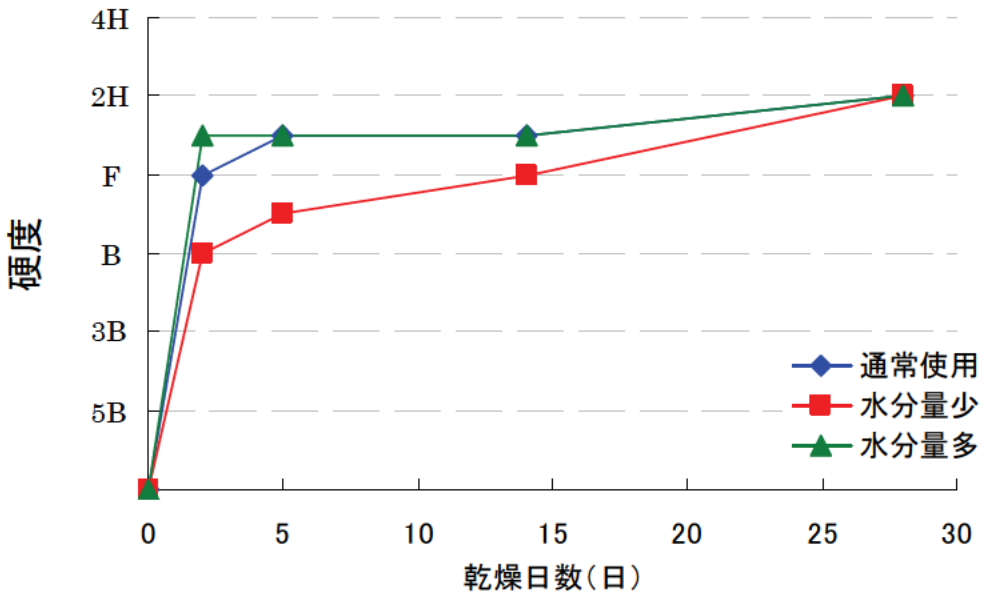


図-資 3.3.1　硬度-乾燥日数関係

3.2　すべり荷重

すべり耐力試験結果を表-資 3.3.2 に，すべり係数と乾燥日数および加水分解率の関係を図-資 3.3.2 に示す。すべり係数 μ_i は締付け時の軸力でのすべり係数，μ_r は試験開始時の軸力でのすべり係数，μ_s はすべり発生時でのすべり係数を表している。なお，30-14 の BL-3 の軸力は，リラクゼーション中に誤ってリード線を切断してしまったため，計測できていない。よって残りの 2 本の平均から軸力を仮定しすべり係数を計算した。

乾燥日数 14 日で含水率 30%のすべり係数が他に比べ大きな値となっている（すべり発生時の軸力を用いたすべり係数でも同様に大きな値となっている)。塗膜厚も他の試験体と比較して大きな差異は見られないことから，試験結果のばらつきと推定される。

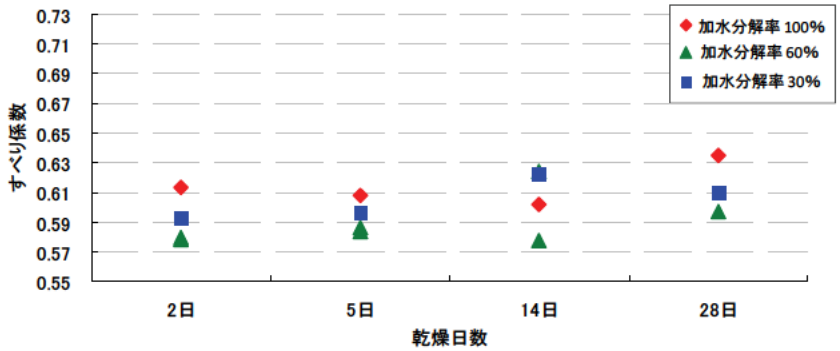
図-資 3.3.2 より, 試験開始時のボルト軸力を用いたすべり係数では, 乾燥日数が長期間になるほど，どの無機ジンクリッチペイントの加水分解率でも，すべり係数が増加する傾向が見られる。また，加水分解率 60%の場合，最もすべり係数が小さくなり，加水分解率 100%の場合で，最もすべり係数が大きくなる。塗膜厚の結果よりどの試験体でも規定の膜厚を確保していることから，この影響は加水分解率が原因であると考えられる。

すべり発生時のボルト軸力を用いたすべり係数を確認すると，乾燥日数が短い 2 日，5 日では，加水分解率 60%で小さく，100%，30%ではほぼ等しいすべり係数を示している。しかし，乾燥日数が長期になるとばらつきが大きくなっている。

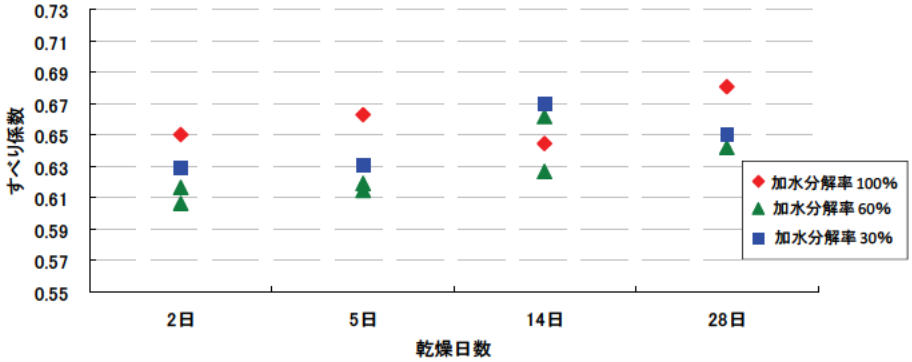
3.1 より，水分量が少ない場合（加水分解率 30%)，塗膜硬度は他に比べ小さい。しかしすべり係数について確認すると，他に比べ異常な点は見られない。よって，塗膜硬度とすべり係数には直接的な関係はないと考えられる。

表-資 3.3.2　すべり耐力試験結果

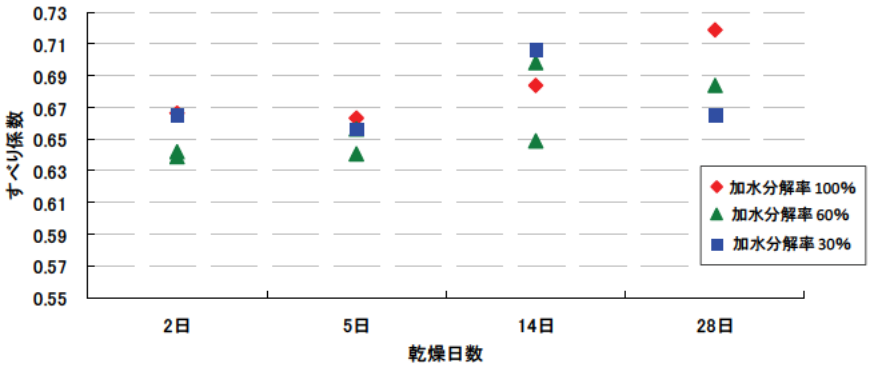
		締付け時		試験開始時			すべり時			すべり耐力	すべり係数		
		軸力（kN）	平均軸力(kN)	軸力（kN）	平均軸力(kN)	減少率(%)	軸力（kN）	平均軸力(kN)	減少率(%)	kN	μi	μr	μs
100-2	BL-1	204.3	205.9	194.5	194.1	5.7	189.9	189.5	8.0	757.5	0.613	0.650	0.666
	BL-2	206.6		194.1			189.1						
	BL-3	206.9		193.8			189.6						
60-2(1)	BL-1	205.6	207.1	195.3	197.4	4.7	182.2	187.6	9.4	718.5	0.578	0.607	0.638
	BL-2	209.6		200.4			191.0						
	BL-3	206.1		196.5			189.5						
60-2(2)	BL-1	204.3	205.4	191.1	193.2	6.0	-	185.6	9.7	714.5	0.580	0.616	0.642
	BL-2	204.7		192.9			184.7						
	BL-3	207.3		195.6			186.4						
30-2	BL-1	202.6	205.2	192.1	193.4	5.8	178.7	183.1	10.8	730.5	0.593	0.630	0.665
	BL-2	206.4		193.7			184.5						
	BL-3	206.6		194.4			186.0						
100-5	BL-1	209.6	207.6	191.2	190.5	8.3	196.3	190.5	8.3	757.5	0.608	0.663	0.663
	BL-2	210.3		188.5			187.8						
	BL-3	203.1		191.8			187.3						
60-5(1)	BL-1	205.4	204.2	197.0	194.8	4.6	180.8	182.4	10.7	718.5	0.586	0.615	0.657
	BL-2	203.6		197.6			181.4						
	BL-3	203.7		190.0			184.9						
60-5(2)	BL-1	203.1	204.1	190.3	192.3	5.8	179.3	183.7	10.0	714.5	0.583	0.619	0.648
	BL-2	204.2		193.8			186.3						
	BL-3	205.1		192.7			185.5						
30-5	BL-1	202.8	204.2	192.2	192.9	5.5	180.4	185.5	9.1	730.5	0.596	0.631	0.656
	BL-2	206.3		196.4			189.3						
	BL-3	203.4		190.1			186.9						
100-14	BL-1	202.8	205.7	189.8	192.2	6.6	176.3	181.1	11.9	743	0.602	0.644	0.684
	BL-2	211.1		197.4			185.8						
	BL-3	203.2		189.4			181.2						
60-14(1)	BL-1	207.8	205.7	199.5	194.0	5.7	186.4	183.9	10.6	770	0.624	0.662	0.698
	BL-2	205.1		192.7			184.0						
	BL-3	204.0		189.8			181.1						
60-14(2)	BL-1	207.8	206.5	185.2	190.3	7.8	169.7	179.2	13.2	716	0.578	0.627	0.666
	BL-2	204.6		191.3			181.9						
	BL-3	206.9		194.5			186.1						
30-14	BL-1	204.4	204.6	190.1	190.1	7.1	178.0	180.3	11.9	764	0.622	0.670	0.706
	BL-2	205.1		190.2			182.5						
	BL-3	204.3		-			-						
100-28	BL-1	202.5	203.9	190.1	190.3	6.7	178.1	180.2	11.6	777	0.635	0.680	0.719
	BL-2	203.1		187.9			177.2						
	BL-3	206.1		193.0			185.2						
60-28	BL-1	206.5	204.5	192.9	190.1	7.0	181.6	178.6	12.7	732.5	0.597	0.642	0.684
	BL-2	204.0		190.8			177.8						
	BL-3	203.1		186.7			176.3						
30-28	BL-1	205.5	203.5	192.7	190.9	190.9	179.7	184.3	190.9	744.5	0.610	0.650	0.673
	BL-2	202.5		189.9			181.5						
	BL-3	202.5		190.1			191.7						



(a)締付け時のボルト軸力でのすべり係数（μ_i）



(b)試験開始時のボルト軸力でのすべり係数（μ_r）



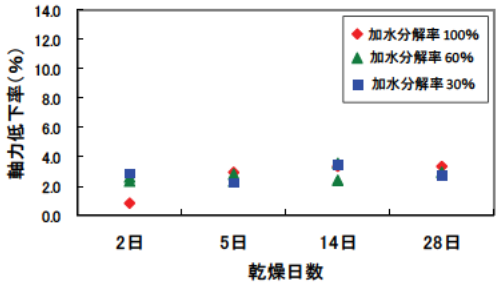
(c)すべり発生時のボルト軸力でのすべり係数（μ_s）

図-資 3.3.2　すべり係数

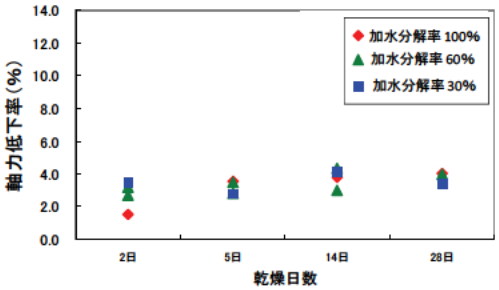
3.3　ボルトの軸力変化

図-資 3.3.3 および図-資 3.3.4 にリラクゼーション中の軸力低下量を示す。図-資 3.3.3 より，塗膜の種類に関わらず，乾燥日数が長くなれば，軸力低下率が大きくなる傾向が見られる。また，図-資 3.4 より，乾燥日数が短い（2 日の）場合，加水分解率が高ければ軸力低下率が小さくなる傾向がある。しかし，リラクゼーション期間が 1 週間経過した場合，この影響は小さくなり，加水分解率によらず一定値となっている。一方，加水分解率が 60%，30%では，他の乾燥日数での軸力低下率と変わらない値となっている。また， 乾燥日数が長くなり塗膜が十分乾いた状態になると軸力低下率は加水分解率によらず一定の値となっている。

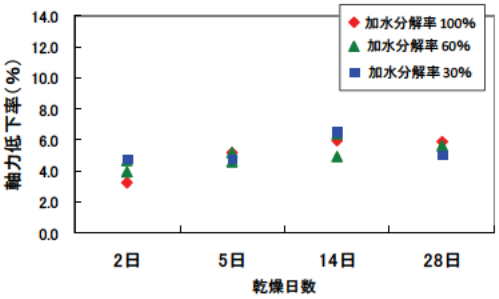
よって，塗膜の乾燥が十分でない場合，加水分解率の影響が大きく現れることがわかる。



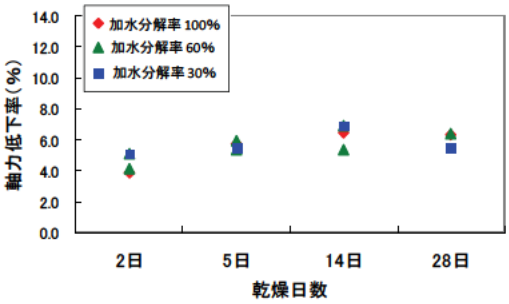
（a）30 分



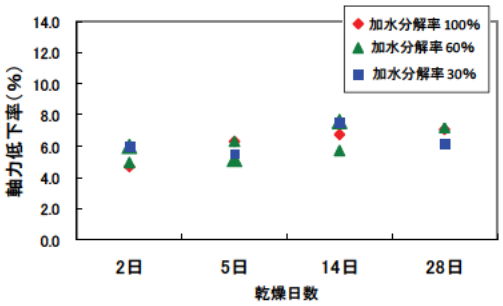
（b）2 時間後



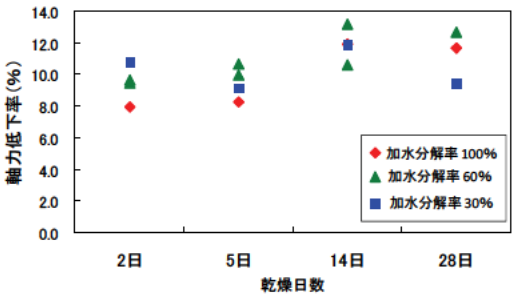
（c）1 日



（d）3 日

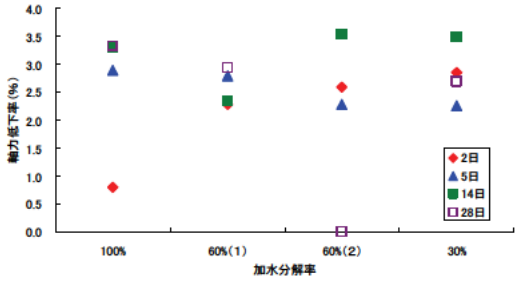


（e）7 日

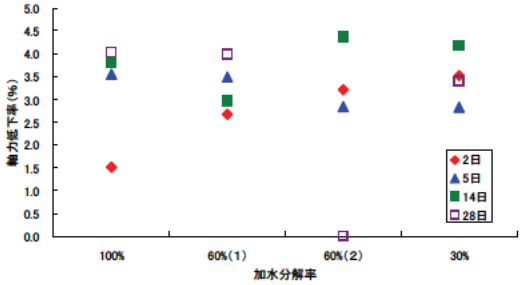


（f）すべり発生時

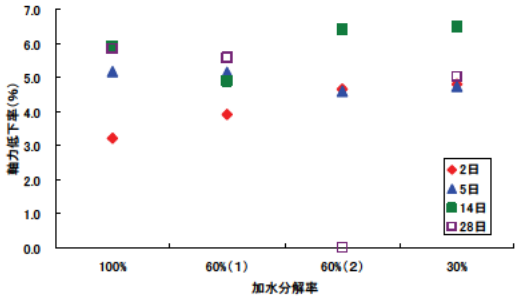
図-資 3.3.3　軸力低下率（乾燥日数との関係）



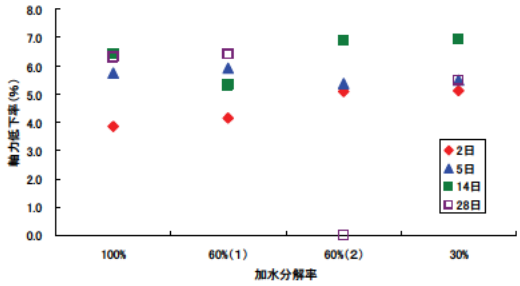
(a) 30 分



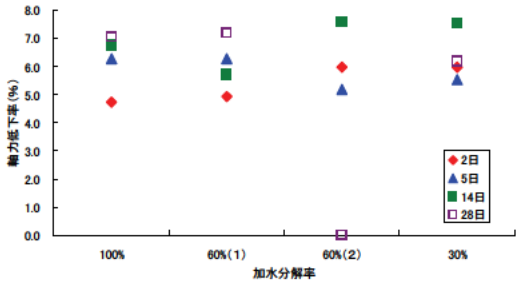
(b) 2 時間後



(c) 1 日

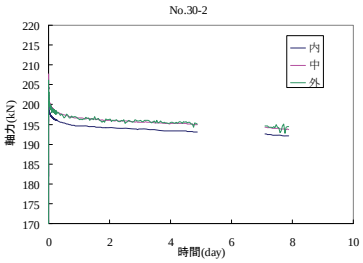


(d) 3 日

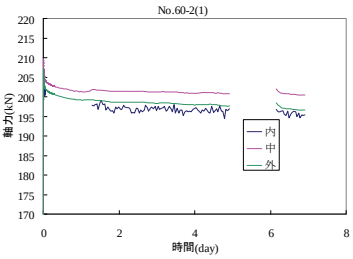


(e) 7 日

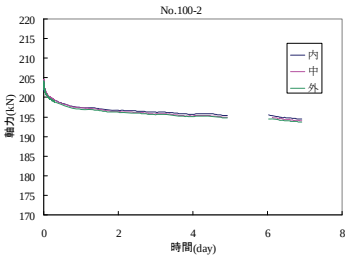
図-資 3.3.4　軸力低下率（加水分解率との関係）



加水分解率 30%

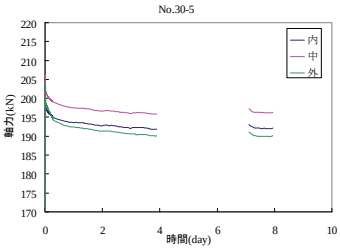


加水分解率 60%

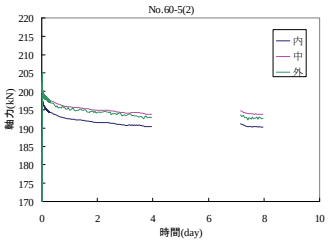


加水分解率 100%

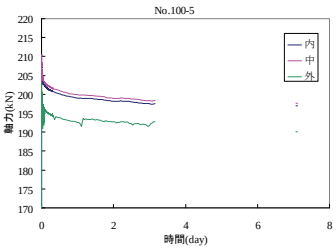
（a）乾燥日数 2 日



加水分解率 30%

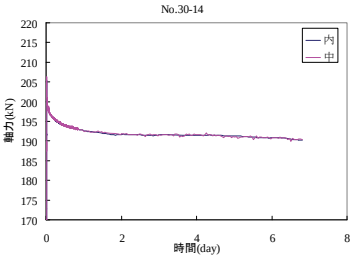


加水分解率 60%

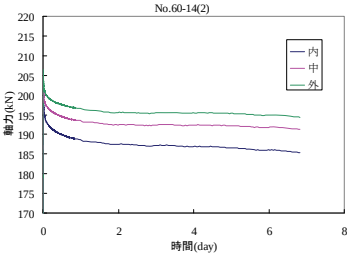


加水分解率 100%

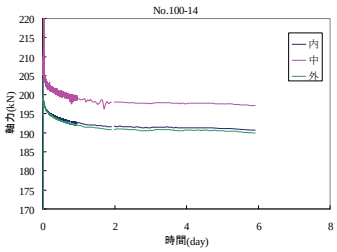
（b）乾燥日数 5 日



加水分解率 30%

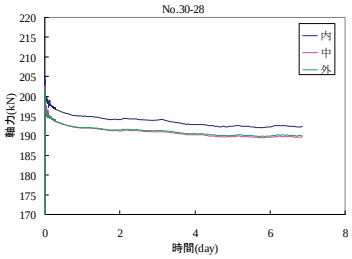


加水分解率 60%

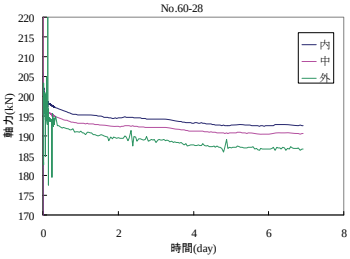


加水分解率 100%

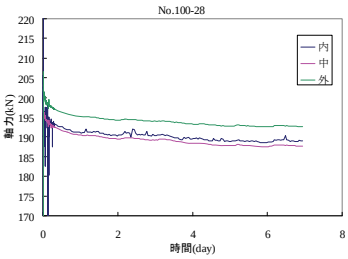
（c）乾燥日数 14 日



加水分解率 30%



加水分解率 60%



加水分解率 100%

（d）乾燥日数 28 日

図-資 3.3.5　リラクゼーション中の時間-軸力関係

3.4　すべり痕

図-資 3.3.6 に，すべり耐力試験後のすべり面を示す。

水分量が多いほどすべり痕の面積が大きくなっていて全体的に塗膜がはがれ鋼材が見えていた。逆に水分量が少ないほうがすべり痕の面積が小さく局所的に塗膜がはがれ鋼材が見えていた。

また乾燥日数が短くなるほどすべり痕の面積が大きくなっていて全体的に塗膜がはがれ鋼材が見えていた。逆に乾燥日数が長いほどすべり痕の面積が小さく局所的に塗膜がはがれ鋼材が見えていた。これらの特徴は，特にボルト孔とボルト孔の間で，また連結部の中央にいくほどその傾向が顕著であった。

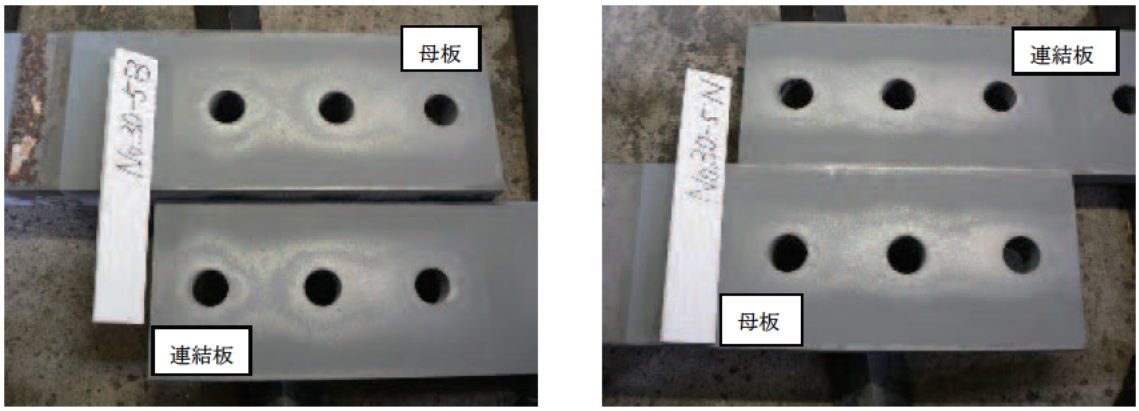


図-資 3.3.6　母板と連結板の位置の違い（左：ボルト側，右：ナット側）

４．まとめ

本検討では，道示で規定されている無機ジンクリッチペイントの仕様以外にすべり係数に影響を与える因子として，無機ジンクリッチペイントの製造時に含まれる水分量と乾燥期間に着目したすべり耐力試験を実施した。本試験で得られた主な結論を以下にまとめる。

1）いずれの無機ジンクリッチペイントとも，乾燥日数の経過に伴って硬度が高くなった。無機ジンクリッチペイントの種類による硬度は，水分量が多いほど高いが，乾燥日数の増加とともにその差は少なくなり，乾燥 28 日目ではいずれの塗膜も同じ硬度であった。

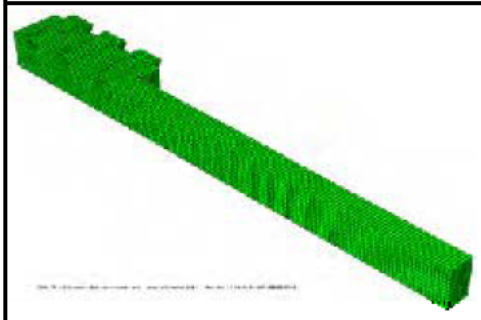
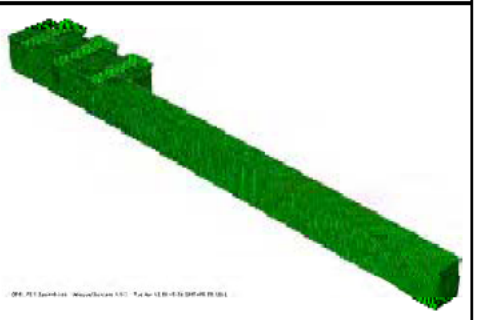
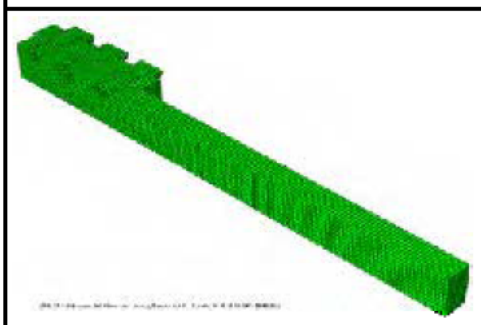
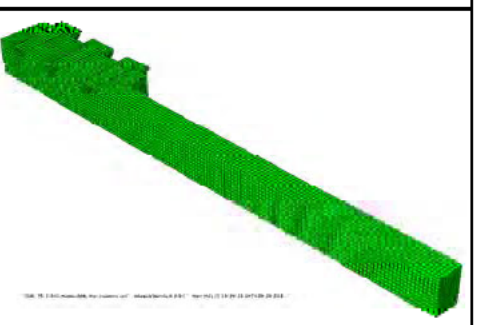
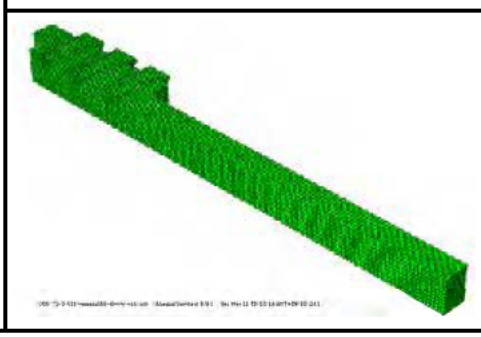
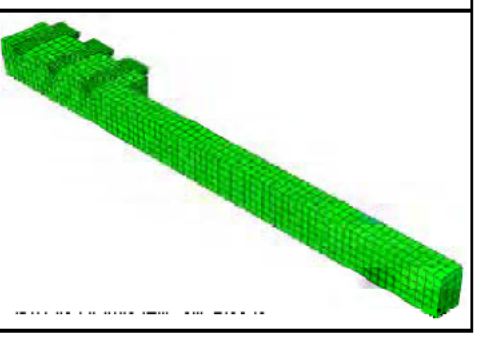
2）乾燥日数が短い 2 日，5 日では，加水分解率 60%のすべり係数が小さかった。塗膜硬度とすべり係数には直接的な関係はないと考えられる。

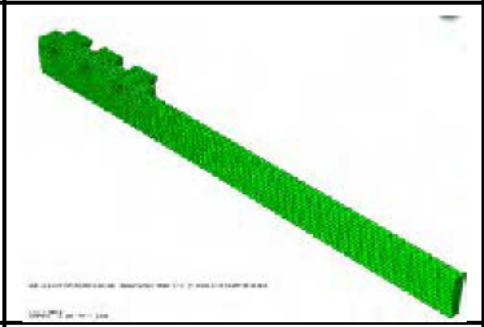
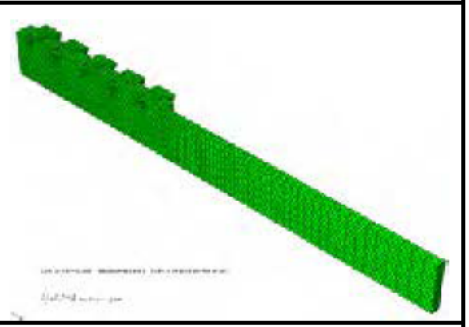
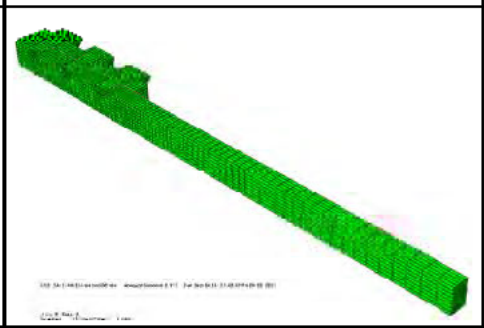
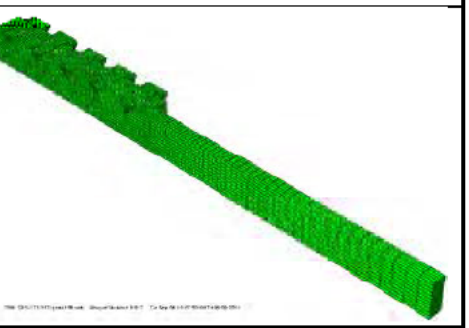
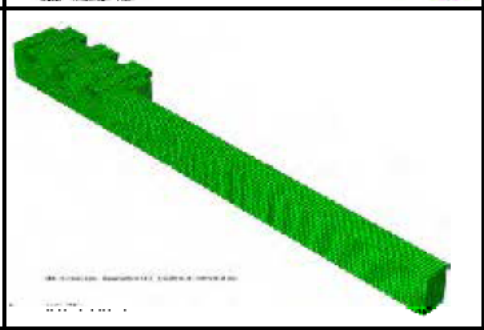
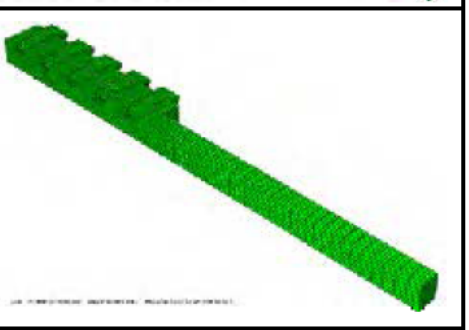
3）乾燥日数が長いほど，軸力低下率が大きくなる傾向がみられたが，乾燥日数の短いものとの差は小さかった。例えば，乾燥日数が 2 日の軸力低下率は 4.7～6.0%で，乾燥日数が 28 日の軸力低下率は 6.2～7.0%である。また，塗膜の乾燥日数が短い（2 日の）場合，加水分解率が高ければ軸力低下率が小さくなる傾向がみられた。

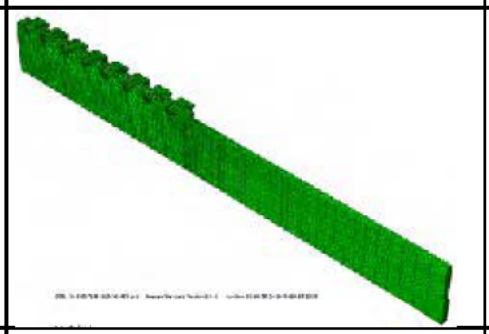
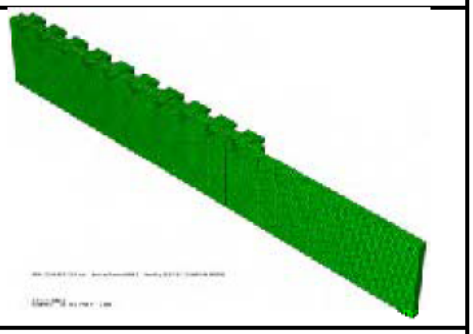
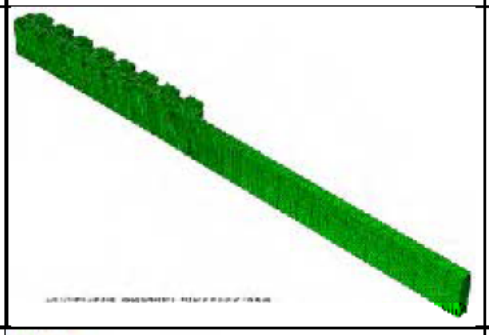
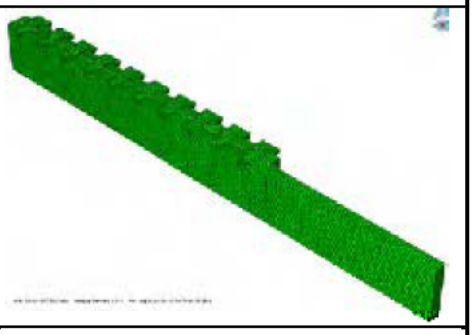
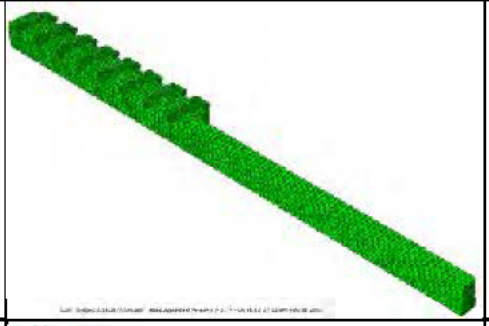
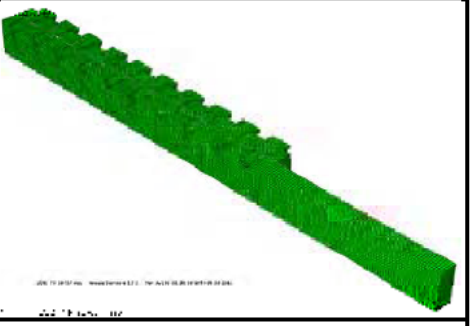
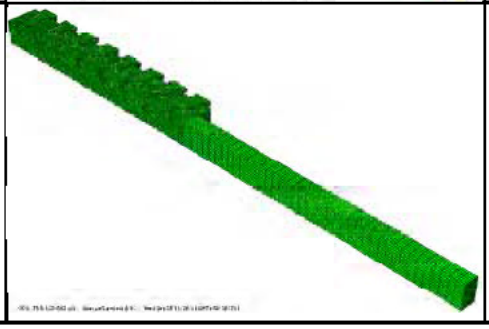
【謝辞】

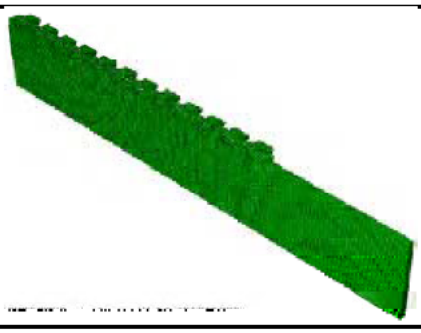
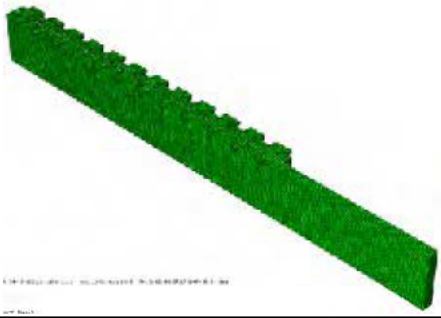
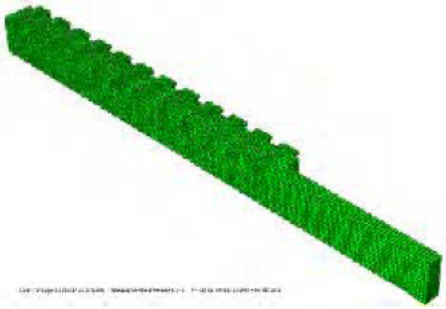
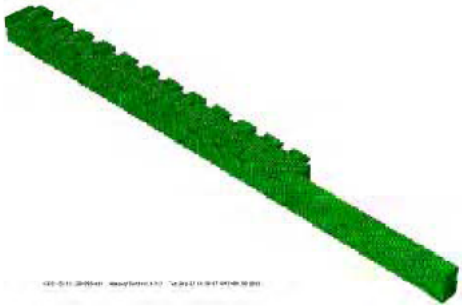
本検討を行うにあたり，関西ペイント株式会社から多大なご協力を得た。
ここに謝意を表します。

資料-4 解析モデル一覧

<table>
<tr><td rowspan="6">母板厚
75mm
連結板厚
38mm
γ_a=1.05
ボルト列数
3列</td><td>端部長さ0mm</td><td>要素長2.9mm</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>端部長さ10mm</td><td>要素長5.5mm</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>端部長さ40mm</td><td>要素長11mm</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
</table>

ボルト列数		3列	5列
母板厚 32mm 連結板厚 19mm γ_a=1.23	β_a=0.57		
	β_a=0.95		
母板厚 50mm 連結板厚 26mm γ_a=1.08	β_a=0.57		
母板厚 75mm 連結板厚 38mm γ_a=1.05	β_a=0.57		
	β_a=0.95		

ボルト列数		8列	10列
母板厚 32mm 連結板厚 19mm γ_a=1.23	β_a=0.57		
	β_a=0.95		
母板厚 50mm 連結板厚 26mm γ_a=1.08	β_a=0.57		
母板厚 75mm 連結板厚 38mm γ_a=1.05	β_a=0.57		
	β_a=0.63		

ボルト列数		12列
母板厚 32mm 連結板厚 19mm γ_a=1.23	β_a=0.57	
	β_a=0.95	
母板厚 50mm 連結板厚 26mm γ_a=1.08	β_a=0.57	
母板厚 75mm 連結板厚 38mm γ_a=1.05	β_a=0.57	
	β_a=0.95	

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No. 428 January 2012

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話029－879－6754