

構造合理化に対応した鋼橋の設計法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 25

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：村越潤，遠山直樹，澤田守

【要旨】

現在、道路橋示方書¹⁾では、要求性能の検証方法として部分係数設計法の導入検討が進められている。本研究では、鋼道路橋上部構造を対象に、部分係数設計法への移行に向けて、各種部材の実験データを基に抵抗側の部分係数の整理をするとともに、座屈強度関連の照査式や厚板・多列を前提とした高力ボルト摩擦接合継手の設計法について検討を行うものである。

平成 23 年度は、高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験を行い、接合面の塗装条件がすべり係数に与える影響について検討した。また、溶接箱断面部材の座屈強度を対象として、弾塑性 FEM、既往の実験データの比較分析等を行い、設計に用いる基準耐荷力曲線について検討した。

キーワード：構造合理化，高力ボルト摩擦接合，すべり耐力，溶接箱断面部材，耐荷力曲線

1. はじめに

土木・建築分野の各種構造物の設計に係わる技術基準については、「土木・建築にかかる設計の基本」（国土交通省，2002 年）²⁾の考え方に沿って、検討・改定を進めていくこととされており、この中で要求性能を満たすことの検証方法として信頼性設計の考え方を基礎とする限界状態設計法の導入が求められている。現在、道路橋に関する技術基準である道路橋示方書¹⁾（以下、道示）については、技術基準の国際的整合への対応を図るとともに、品質を確保しつつより合理的かつ効率的な道路橋整備を可能とするため、要求性能の明確化、充実化及びみなし仕様の充実化に向けた次期改訂のための調査検討が行われており、要求性能の検証方法として部分係数設計法の導入検討が進められている。

過年度に実施した重点プロジェクト研究（平成 17-20 年度）では、道路橋設計への部分係数法の導入に向けた検討を行い³⁾、鋼桁橋を対象に部分係数の設定の考え方、具体的数値及び部分係数書式に基づく基準試案を提示している。今後は、荷重係数の検討を踏まえた上で、鋼桁以外の形式も含めた抵抗係数の設定に向けた検討を行う必要がある。併せて、個別部材の強度照査規定に関しては、コスト削減に向けた構造合理化を踏まえ、規定の充実を図っていく必要がある。

特に、各種の座屈強度照査規定は昭和 48 年基準改訂時に体系的に整備されたが、その後の実験的研究、

解析法の進歩により、最新の技術的知見や諸外国設計基準と比較して耐荷力式に相違が見られる部分があり、構造合理化に向けて適宜強度規定の再構築を図る必要がある。また、近年、コスト削減の観点から構造の簡素化や 100mm 近くまでの構成部材の厚板化が普及し、耐久性向上に資する構造が普及しつつあるが、特に、部材接合において一般的に用いられる高力ボルト摩擦接合継手に対し、ボルトの多列化や継手の厚板化の影響を把握し、設計法の見直しについて検討する必要がある。

本研究では、鋼道路橋上部構造を対象に、部分設計法への移行に向け、各種部材の実験データを基に現行の設計規定の安全余裕を整理するとともに、座屈強度関連の照査式や厚板・多列を前提とした高力ボルト摩擦接合継手の設計法について検討を行うものである。

平成 23 年度は、高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験を行い、塗膜厚等の接合面の塗装条件がすべり係数に与える影響について検討した。また、鋼アーチ橋や鋼トラス橋の圧縮部材として使用頻度の高い溶接箱断面部材の座屈強度を対象として、実構造断面諸元の整理、強度の支配因子である残留応力データの収集、弾塑性 FEM、既往の実験データの比較分析等を行い、設計に用いる基準耐荷力曲線について検討した。

2. 高力ボルト摩擦接合継手の合理化に関する検討

2.1 研究内容

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、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。道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編（以下、道示）¹⁾では、高力ボルト摩擦接合の設計すべり係数について、従来まで接合面の処理条件によらず一律0.4としていたが、H24年の改定では、既往の実験結果や最近の施工管理実績を踏まえて、接合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を0.45とされている⁴⁾。

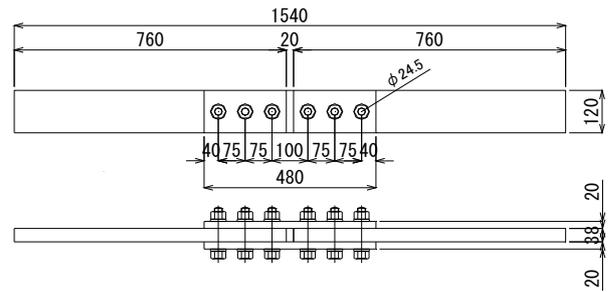
ここでは、国内の塗料メーカーの無機ジンクリッチペイント（6種類）に対してすべり耐力（長期、短期）やボルト軸力の経時変化について検討した結果のうち、主に短期試験（試験体組立後、7日間後にすべり耐力試験を実施）や30日間の軸力変動の計測の結果について報告するものである。また、塗料組成の違いがすべり耐力に与える影響については、土木研究所が1989年に実施した実験（以下、〔土研、1989〕）⁵⁾でも検討されており、この結果と比較している。

なお、本研究では、大阪市立大学 山口隆司教授と共同研究「高力ボルト摩擦接合継手設計法の合理化に関する研究」（平成21年度～23年度）を実施している。

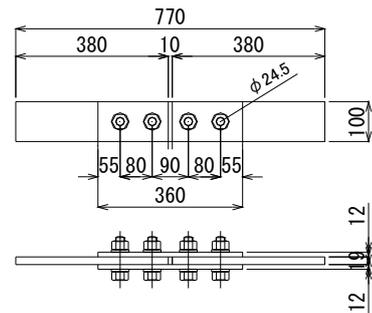
2.2 試験体および計測内容

図-2.1に、本実験で用いた試験体（軸力計測用試験体、すべり耐力試験用試験体）を示す。軸力計測用試験体（図-2.1(a)、全6体）は、試験体組立後に屋内で30日間放置し、その間のボルト軸力変動を計測した。すべり耐力試験用試験体（図-2.1(b)、全60体）は、試験体組立後に屋内で7日間放置し、その間のボルト軸力変動を計測した後、すべり耐力試験を実施した。軸力計測用試験体には、6本のボルト全てに軸ひずみゲージを貼り付け、すべり耐力試験用試験体には、すべり側のボルト2本に軸ひずみゲージを貼り付けた。またすべり耐力試験時には母板間にクリップゲージを設置し、母板間距離の変化量を計測した。

母板と連結板の接触面には、無機ジンクリッチペイントを塗布した。塗膜厚は、表-2.1に示す道示の規定値を参考に、軸力計測用試験体では75 μm とした。すべり耐力試験用試験体では塗膜厚の影響につ



(a) 軸力の経時変化計測用試験体



(b) すべり耐力試験用試験体⁶⁾

図-2.1 試験体の寸法形状

表-2.1 すべり係数0.45を確保するための塗装条件¹⁾

項目	条件
接触面片面あたりの最小乾燥塗膜厚	50 μm 以上
接触面の合計乾燥塗膜厚	100～200 μm
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）	10 μm 程度以上

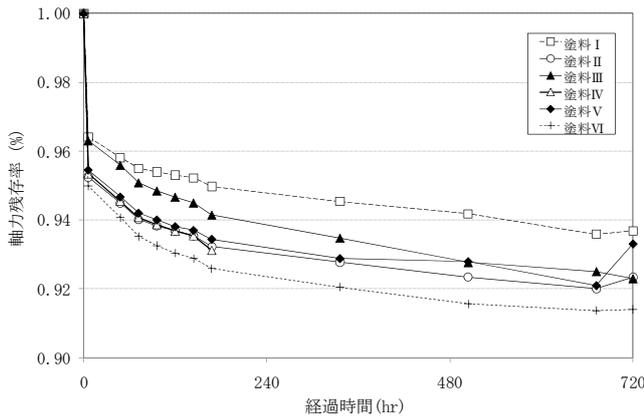
表-2.2 接触面片面あたりの塗膜厚の目標値と管理値⁷⁾

試験体の種類	目標値	管理値		
		最小値 (目標値の70%以上)	平均値 (目標値の90%以上)	上限値 (最小値+40 μm)
軸力計測用試験体	75 μm	53 μm	68 μm	93 μm
すべり耐力試験体	50 μm	35 μm	45 μm	75 μm
	150 μm	105 μm	135 μm	145 μm

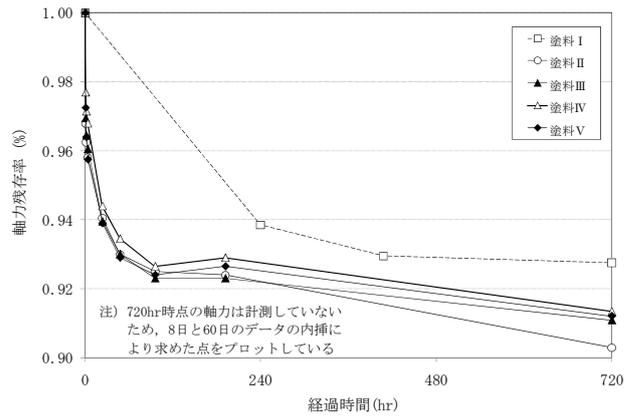
表-2.3 無機ジンクリッチペイントの塗料組成

塗料の種類	乾燥塗膜中の亜鉛含有量(%)	亜鉛末の粒径(50%平均粒径, μm)
塗料Ⅰ	82	14
塗料Ⅱ	81	13
塗料Ⅲ	82	13
塗料Ⅳ	85	18
塗料Ⅴ	83	16
塗料Ⅵ	80	13

いて検討するため50, 150 μm の2種類とした。また、母板と連結板の塗膜厚は同一とした。表-2.2に、塗膜厚の管理値を示す。最小値および平均値は文献7)



(a) 今回の実験



(b) [土研, 1989]

図-2.2 ボルト軸力残存率の経時変化(平均値)

を参考に設定した。

無機ジンクリッチペイントは、塗料組成の異なる6種類を用いることとし軸力計測用試験体は各1体ずつ、すべり耐力試験用試験体は各10体ずつ(片面塗膜厚50 μ m:5体, 合計塗膜厚150 μ m:5体)とした。表-2.2に、これらの塗料の加熱残分中の金属亜鉛(%)と亜鉛末の平均粒径(50%平均粒径)を示す。いずれの塗料においても道示の規定を満たしており、特に塗料IVと塗料Vの乾燥塗膜中の亜鉛含有量と亜鉛末の粒径(50%平均粒径)が他よりも若干大きい傾向がみられた。

表-2.4 ボルト軸力残存率(平均値)

経過時間	塗料 I	塗料 II	塗料 III	塗料 IV	塗料 V	塗料 VI
導入後	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
6時間後	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
2日目	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
3日目	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
4日目	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
5日目	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
6日目	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
7日目	0.99	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99
14日目	0.99	0.99	0.99	※	0.99	0.99
21日目	0.99	0.99	0.99	※	0.99	0.99
28日目	0.99	0.99	0.99	※	0.99	0.99
30日	1.00	1.00	1.00	※	1.00	1.00

注) ※部の値は異常値であったため、本表から削除している

2.3 ボルト軸力の計測結果

表-2.4に、今回の実験における軸力計測用試験体の塗料別の軸力残存率(平均値)を示す。軸力残存率とは、今回の実験では、初期軸力を導入した際のボルトの軸ひずみと、各計測時の軸ひずみの比率である。[土研, 1989]では初期軸力を導入した際のひずみが計測されていないため、設計軸力に対する比率としている。なお、ここでは軸力残存率はそれぞれの塗料ごとに、全てのボルトの平均値を示している。

図-2.2に、今回の実験及び[土研, 1989]における軸力残存率の経時変化を、それぞれ示す。

今回の実験では、ボルトの軸力残存率は、軸力導入後6時間程度までに、約4~5%程度低下し、その後緩やかに低下する傾向がみられる。軸力残存率が大きい塗料と小さい塗料の間には2%程度の差しかなく、時間経過に伴う変化量はほぼ同じである。また、720時間(30日)経過時点においても、低下傾向が続いているものもある。[土研, 1989]では、初

表-2.5 すべり係数(平均値)

(a) 接触面の片面塗膜厚50 μ m

塗料の種類	すべり係数		軸力残存率(%)
	μ_0	μ_2	
塗料 I	0.55	0.61	93.8
塗料 II	0.64	0.60	94.6
塗料 III	0.57	0.67	93.5
塗料 IV	0.57	0.57	93.8
塗料 V	0.69	0.64	91.5
塗料 VI	0.59	0.72	91.5

(b) 接触面の片面塗膜厚150 μ m

塗料の種類	すべり係数		軸力残存率(%)
	μ_0	μ_2	
塗料 I	0.58	0.73	88.1
塗料 II	0.68	0.70	87.9
塗料 III	0.62	0.76	88.6
塗料 IV	0.66	0.65	89.2
塗料 V	0.70	0.63	89.1
塗料 VI	0.57	0.78	87.1

期の低下量が7~8%程度と今回の実験よりも僅かに大きく、720時間(30日)時点の軸力残存率は今回の実験よりも小さい。

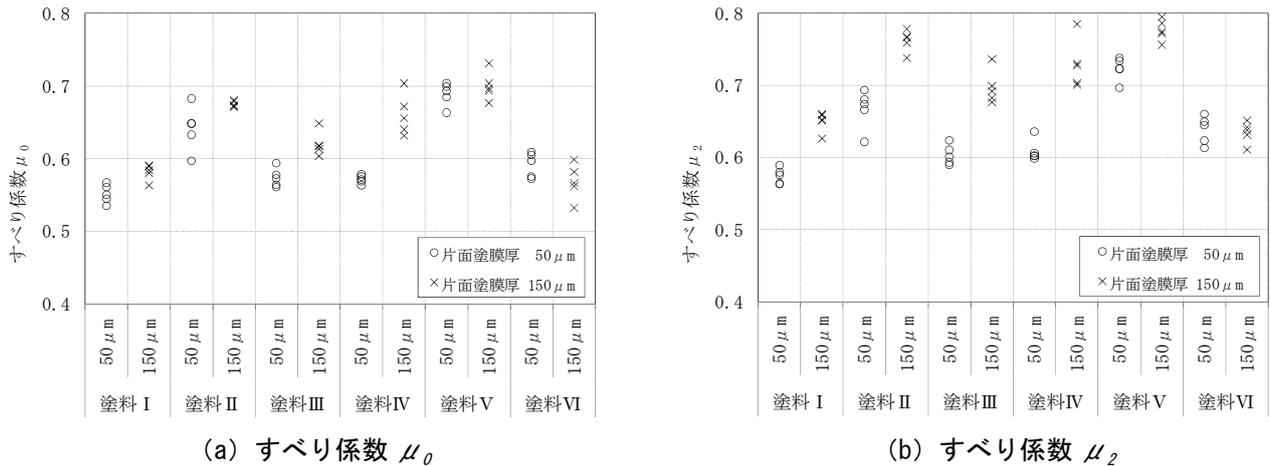


図-2.3 すべり係数

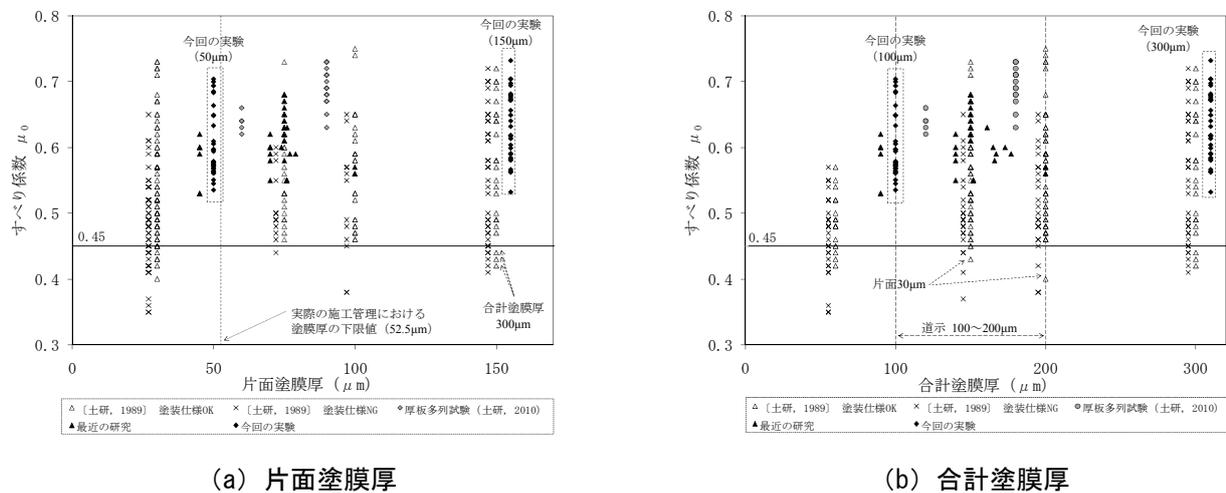


図-2.4 塗膜厚とすべり係数の関係

2.4 すべり耐力試験結果

表-2.5 に、塗料毎のすべり係数及び軸力残存率の平均値を示す。すべり係数および軸力残存率は、式(1)~(3)により算出した。ここで、 P ：すべり耐力、 n ：ボルト本数、 m ：接触面数、 N_0 ：設計軸力、 N_2 ：試験前軸力（実測値）である。

$$\text{すべり係数： } \mu_0 = P / (n \cdot m \cdot N_0) \quad \dots \text{式 (1)}$$

$$\text{すべり係数： } \mu_2 = P / (n \cdot m \cdot N_2) \quad \dots \text{式 (2)}$$

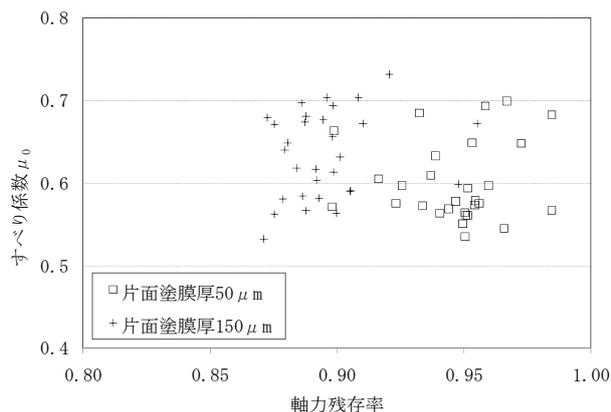
$$\text{軸力残存率： } N = N_2 / N_0 \quad \dots \text{式 (3)}$$

すべり係数 μ_0 は、いずれの塗料においても設計すべり係数 0.45 を上回っている。すべり係数 μ_2 は、試験前軸力（実測値）に対するすべり係数であり、ボルト軸力の経時変化により軸力が低下しているため、 μ_0 よりも大きくなる傾向がみられる。

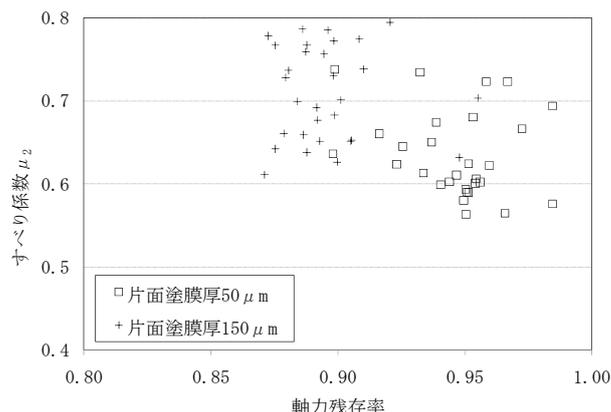
(1) 塗膜厚とすべり係数の関係

図-2.3 に、片面塗膜厚とすべり係数の関係を示す。塗料VIを除いて、すべり係数 μ_0 、 μ_2 とともに、片面塗

膜厚が大きいほど、すべり係数が大きくなる傾向にある。また、塗料IIのように片面塗膜厚が小さい方がすべり係数のばらつきが大きいものもあれば、塗料IVのように片面塗膜厚が大きい方がすべり係数のばらつきが大きいものもある。図-2.4 は、〔土研，1989〕や最近の研究成果における塗膜厚（片面塗膜厚，合計塗膜厚）とすべり係数の関係⁶⁾に今回の実験結果をプロットしたものである。道示では設計すべり係数 0.45 と、それを確保するための塗装条件（片面塗膜厚 50 μm 以上，合計塗膜厚 100~200 μm ）を規定しているが、今回の実験結果においても片面塗膜厚を 50 μm 以上とすれば、すべり係数が 0.45 よりも十分大きいことが確認された。また、〔土研，1989〕では、合計塗膜厚を 300 μm とした場合のすべり係数が合計塗膜厚 200 μm のものに比べて低下する傾向が示されており、これを踏まえて道示では合計塗膜厚



(a) すべり係数 μ_0



(b) すべり係数 μ_2

図-2.5 軸力残存率とすべり係数の関係

の上限値を 200 μm と規定している。

今回の実験では、合計塗膜厚を 300 μm とした場合のすべり係数は合計塗膜厚を 100 μm とほぼ同じ値であるが、一部の塗料においては低下する傾向がみられることから、現行の上限値を踏襲するのが望ましいと考えられる。ただし、すべり係数 0.45 よりも十分大きく、仮に 200 μm を越えたとしても継手性能を又差なくなるとは考えにくい。

(2) 軸力残存率とすべり係数の関係

図-2.5 (a) に、軸力残存率とすべり係数 μ_0 の関係を、図-2.5 (b) に、軸力残存率とすべり係数 μ_2 の関係を示す。すべり係数 μ_0 で整理した図-2.5 (a) でみると、片面塗膜厚 150 μm の方が軸力残存率が低く、導入軸力が減少しているが、すべり係数 μ_0 に大差はみられない。すべり係数 μ_2 で整理した図-2.5 (b) でみると、片面塗膜厚 150 μm の方が μ_2 が高くなる傾向がみられた。これは塗膜のなじみ等の影響と推察される。

(3) 塗料組成とすべり係数の関係

図-2.6 は、今回の実験結果と〔土研, 1989〕の実験結果について、塗料組成とすべり係数 μ_0 の関係を示したものである。〔土研, 1989〕の実験結果については、片面塗膜厚 75 μm , 100 μm , 150 μm のものを示し、片面塗膜厚 30 μm の結果は除いている。

道示では、設計すべり係数 0.45 を確保するための接合面の処理条件として、乾燥塗膜中の亜鉛含有量を 80%以上確保すること、亜鉛末の粒径 (50%平均粒径) を 10 μm 程度以上確保することとしている。今回の実験で用いた無機ジンクリッチペイントは、いずれもこれらの規定を満たしており、すべり係数 μ_0 も 0.45 を十分上回っている。また、〔土研, 1989〕

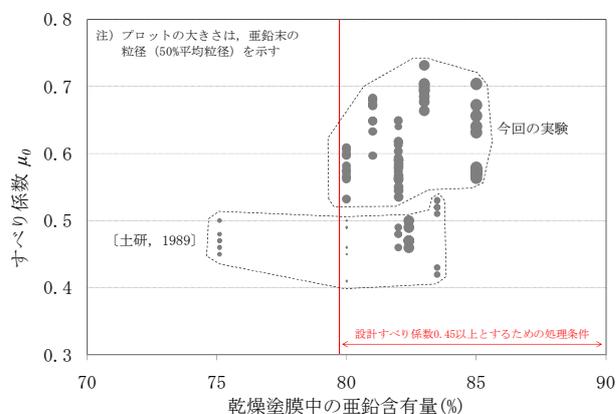


図-2.6 塗料組成とすべり係数の関係

と今回の実験のすべり係数を比較すると、今回の実験結果は全体的に〔土研, 1989〕よりも大きくなっている。試験体形状や試験条件など同一条件下での比較ではないため、厳密な比較は困難であるが、乾燥塗膜中の亜鉛含有量や亜鉛末の粒径 (50%平均粒径) などの塗料組成に大きな差異はないと考えられることから、〔土研, 1989〕で用いた無機ジンクリッチペイントと、今回の実験で用いた無機ジンクリッチペイントの間に、乾燥塗膜中の亜鉛含有量や亜鉛末の粒径 (50%平均粒径) 以外の要因が影響した可能性が考えられる。

2.5 まとめ

高力ボルト摩擦接合継手に関して、塗膜厚や塗料組成が継手性能に与える影響について検討を行った。短期試験では、いずれの試験体においても、設計すべり係数以上の値を十分確保できることを確認した。

での耐荷力を弾塑性有限変位解析により求め、残留応力や初期不整などを変化させた場合の解析結果を用いて、各種のパラメータが耐荷力に与える影響について検討した。具体的には、鋼アーチ橋の実績に基づいて溶接箱形断面として5断面(図-3.2)を設定し、残留応力の大きさ、分布形状、鋼材の種類、鋼材の材料構成則等をパラメータとした弾塑性有限変位解析を行い、それらの因子が耐荷力に与える影響を解析的に検討した。

(2) 解析方法

解析は、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した複合非線形解析(弾塑性有限変位解析)とした。対象部材は、シェル要素でモデル化した。図-3.3に

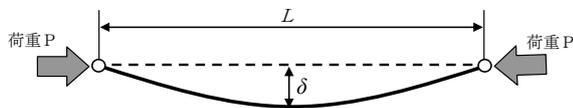


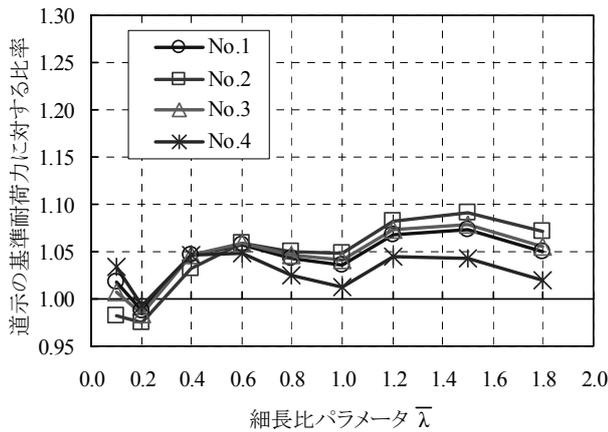
図-3.5 荷重条件

解析モデルの例(断面 No.3)を示す。鋼材の応力-ひずみ関係は、2次勾配が E/100 のバイリニア型とし、降伏条件は Mises 降伏条件とした。境界条件は、部材両端の弱軸周りのみピンとし、強軸周りを固定とした。また、部材に与える初期たわみのたわみ形状は、半波長の正弦波とした。残留応力分布は、断面内の内部応力として入力し、内部応力が釣り合う場合の応力が図-3.4となるように入力した。荷重条件は、初期たわみの無い状態で部材に圧縮力のみが作用するように、部材軸方向に偏芯の無い状態とし、図-3.5に示すように、部材に対して圧縮力(荷重 P)を作用させて、柱としての耐荷力を算出した。

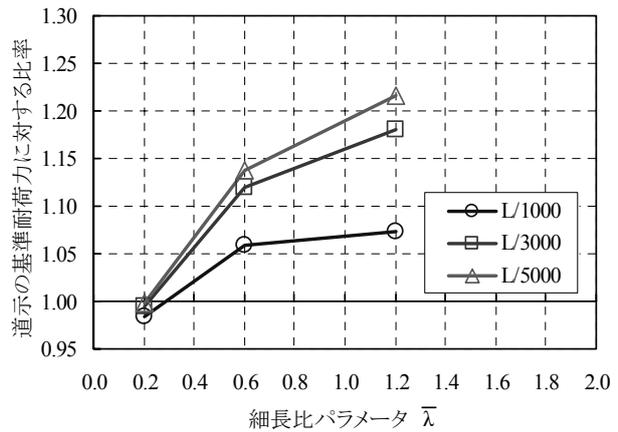
解析におけるパラメータは、断面寸法(断面 No.1~5)、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ (0.1~1.8)、初期たわみ ($L/1000$, $L/3000$, $L/5000$)、圧縮残留応力(無し, $0.2\sigma_y$, $0.4\sigma_y$, $0.6\sigma_y$)、鋼種 (SM400, SM490Y) とした。

(3) 解析結果

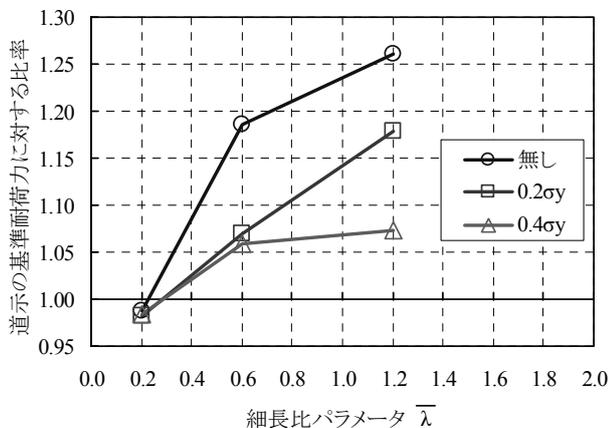
図-3.5 に各種パラメータで実施した解析結果を



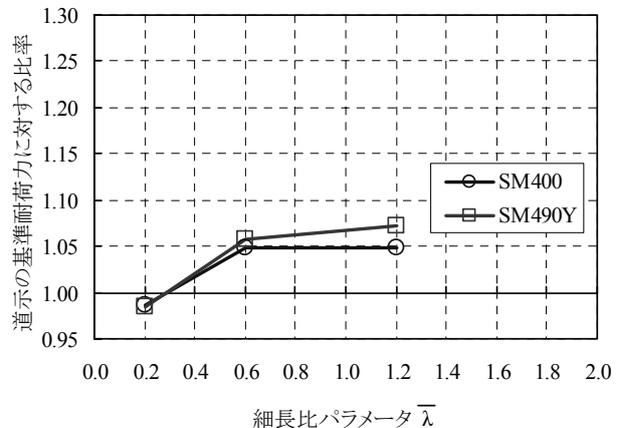
(a) 断面寸法別の H14 道示の基準耐荷力に対する比率



(b) 初期たわみ別の H14 道示の基準耐荷力に対する比率



(c) 残留応力別の H14 道示の基準耐荷力に対する比率



(d) 鋼種別の H14 道示の基準耐荷力に対する比率

図-3.6 各種パラメータの解析結果

示す。図は、H14 道示の耐荷力に対する比率で整理している。

解析結果を断面寸法別に整理したものを図-3.6(a)に示す。H14 道示の基準耐荷力を下回った結果は、 $\bar{\lambda}$ が0.2以下の領域となっており、道示において座屈ではなく圧縮降伏で決定する範囲となっている。 $\bar{\lambda}$ が0.2より大きな領域では、解析の σ_{cr}/σ_y がH14 道示の基準耐荷力と比較して概ね4%程度上回っており、 $\bar{\lambda}$ が大きいほど解析の耐荷力がH14 道示の基準耐荷力に比べて大きくなる傾向がある。断面外形寸法が異なるが補剛板としての幅厚比パラメータ R_R が0.45程度とした断面No.1~No.3では、 $\bar{\lambda}$ が0.2より大きい領域では同一 $\bar{\lambda}$ に対する3断面の解析 σ_{cr}/σ_y の差が1%程度であることから、断面外形寸法による σ_{cr}/σ_y の有意な差はないと考えられる。断面外形寸法が同一で板厚を変化させた断面No.3とNo.4では、 $\bar{\lambda}$ が0.4以下の領域で σ_{cr}/σ_y の差がほとんどないが、 $\bar{\lambda}$ が0.6以上の領域では板厚の薄い断面No.3が厚い断面No.4に対して σ_{cr}/σ_y が常に大きくなっている。ただし、その差は1~3%程度であり板厚による σ_{cr}/σ_y の有意な差とは言えない。

解析結果を初期たわみ別に整理したものを図-3.6(b)に示す。 $\bar{\lambda}$ が0.2の場合にはすべてのケースで1%程度H14 道示の基準耐荷力を下回るものの初期たわみによる σ_{cr}/σ_y の差はほとんどみられない。 $\bar{\lambda}$ が0.6と1.2の場合には、初期たわみが小さくなるほど σ_{cr}/σ_y が大きくなっており、H14 道示の基準耐荷力からの σ_{cr}/σ_y の余裕量は同程度となっている。初期たわみが大きいほど耐荷力は減少し、初期たわみが耐荷力に与える影響が大きいことがうかがえる。

解析結果を残留応力別に整理したものを図-3.6(c)に示す。 $\bar{\lambda}$ が0.2の場合には、残留応力の違いによる σ_{cr}/σ_y の差はほとんどみられない。 $\bar{\lambda}$ が0.6の場合には、最大の残留応力無しに対して最小の残留応力 $0.4\sigma_y$ が13%差があり、 $\bar{\lambda}$ が1.2の場合には18%差と $\bar{\lambda}$ が大きくなるに従い、残留応力による影響が大きくなっている。

解析結果を鋼種別に整理したものを図-3.6(d)に示す。 $\bar{\lambda}$ が0.2の場合には、これまでの検討と同様に鋼種の違いによる σ_{cr}/σ_y の差はほとんどみられない。 $\bar{\lambda}$ が0.6と1.2の場合には、その差は1~2%程度であり鋼種による σ_{cr}/σ_y の有意な差は無いと考えられる。

以上より、断面寸法（外形、板厚）と鋼種について

は、その違いによる有意な差は見られないが、初期たわみや残留応力といった初期不整により有意な違いが認められ、耐荷力に与える影響が大きいことがわかった。また、圧縮残留応力の違いが柱の耐荷力に及ぼす影響は、溶接箱形断面部材で現実的に発生しうる $0\sim 0.4\sigma_y$ の範囲では、圧縮残留応力が大きいほど、耐荷力が低くなる傾向となった。ただし、 $\bar{\lambda}$ が0.6の場合には、圧縮残留応力 $0.6\sigma_y$ の解析ケースの結果は $0.4\sigma_y$ の結果を若干上回っていた。初期たわみについては、初期たわみが大きいほど耐荷力が低くなり、 $L/1000$ の条件の解析結果が最も低くなった。

3.3 溶接箱形断面部材の耐荷力曲線に関する検討

(1) 検討概要

ここでは、既往の研究成果や3.2節で示した耐荷力解析結果を参考に、溶接箱形断面部材の設計に適用する耐荷力曲線について検討した。

具体には、既往の研究成果で示されている部材形状および初期不整をパラメータとした耐荷力曲線の推定式に関して、既往の耐荷力実験結果と3.2節で示した解析結果を用いて、耐荷力曲線式の妥当性を確認した。さらに、初期不整に関して、残留応力の大きさに関する既往の研究成果の整理を行い、溶接箱形断面部材に生じる残留応力の大きさを把握するとともに、耐荷力曲線の推定式を用いて、溶接箱形断面部材固有の耐荷力曲線について検討した。

(2) 既往の研究成果の分析

1) 耐荷力推定式に関する既往の研究成果

3.2節で実施した解析結果からも明らかのように、圧縮部材の耐荷力は残留応力や初期たわみといった初期不整の大きさにより異なる。このことは既往の研究成果でも明らかにされており、初期不整を考慮した耐荷力推定式に関する研究成果としては文献8)~10)が挙げられる。3.2節での解析結果と耐荷力推定式を比較した結果を図-3.7に示す。解析結果と初期不整をパラメータとした文献8)、9)の耐荷力推定式が比較的良く一致していることがわかる。

2) 残留応力に関する既往の研究成果

残留応力に関する既往の研究成果として、様々な材質を用いた矩形断面の4隅を溶接接合した溶接箱形断面部材の残留応力を計測したものを対象とすると、文献13)~16)が挙げられる。これらを幅厚比別に整理した結果を図-3.8に示す。なお、ここでは、既往の研究成果のうち、板厚が8mm未満の結果につ

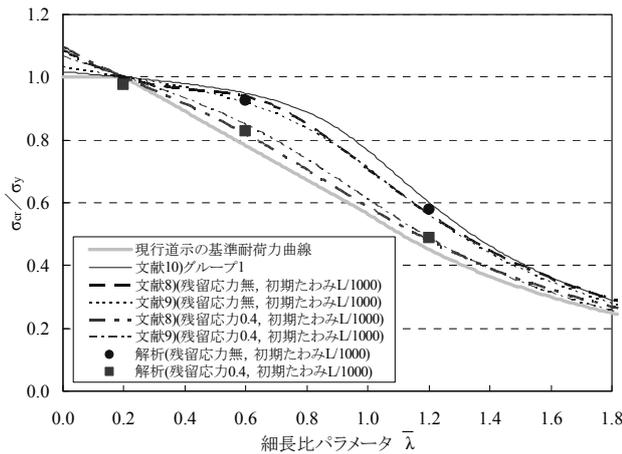


図-3.7 耐力推定式と解析結果との比較

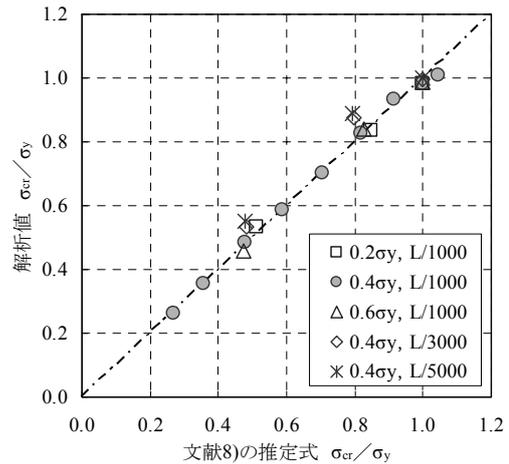


図-3.9 推定式⁸⁾と解析値の相関図

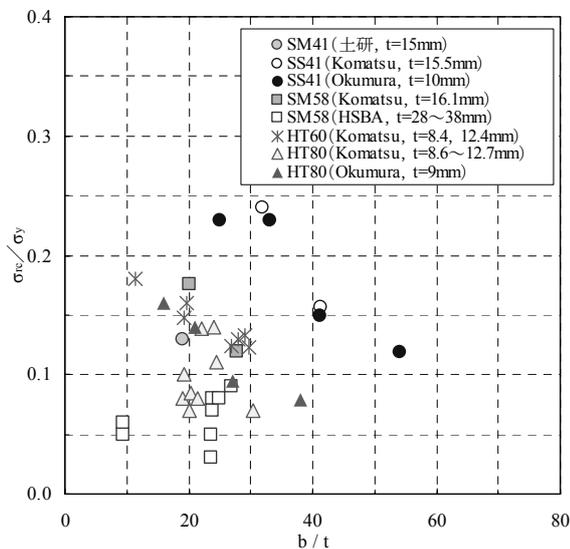


図-3.8 残留応力計測結果

(首都大学東京野上邦栄教授提供による)

いてはH14道示の規定(道示II4.1.4 鋼材の最小板厚)により溶接箱形断面部材としては用いないため対象としていない。この図より、残留応力と幅厚比との相関性は確認されないが、残留応力が概ね $0.25\sigma_y$ 以下であることがわかる。

(3) 耐力推定式による耐力曲線の提案

図-3.9に文献8)の耐力推定式による耐力の算定結果と解析結果の関係を示す。ここで用いている解析値は、3.2節で用いた断面No.3で鋼材の材質はSM490Yの解析結果である。初期たわみがL/5000またはL/3000と小さい場合、耐力推定式の算定値は解析結果に比べ若干の安全側の評価を与えるものの、L/1000においては、残留応力の大きさに関わらず、両者は良く一致している。また、図-3.10に、既往

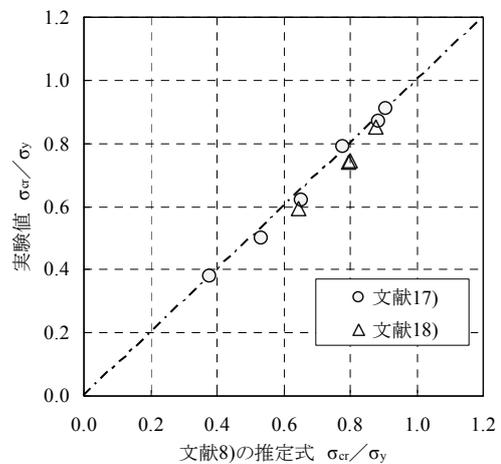


図-3.10 推定式⁸⁾と実験値との相関図

の実験結果のうち、残留応力の大きさが明らかな結果を抽出し、残留応力および初期たわみの実測値を代入した耐力推定式の算定値と実験結果の関係を示すが、両者は良く一致していることがわかる。以上の比較結果から、文献8)における耐力推定式は、溶接箱形断面部材の耐力を精度良く推定しているものと考えられる。

以上を踏まえ、文献8)の耐力推定式を用いて、溶接箱形断面の耐力曲線について検討する。

耐力に影響を与える初期不整について、以下の通り設定する。

1)残留応力： $0.25\sigma_y$

図-3.8に示した通り、軟鋼を含む様々な溶接箱形断面部材を対象とした既往の計測結果によれば、いずれの材質においても最大で $0.25\sigma_y$ 以下であるため、耐力の下限値を推定する残留応力の大きさを $0.25\sigma_y$ とする。

2)初期たわみ：L/1000

H14 道示Ⅱ「17.3.2 部材精度」の規定において、圧縮材の曲りの上限値である $L/1000$ を、耐荷力の下限値を推定する初期たわみとする。

文献 8)の耐荷力推定式の残留応力を $0.25 \sigma_y$ 、初期たわみを $L/1000$ とした場合の耐荷力曲線と H14 道示における基準耐荷力曲線を図-3.11 に示す。併せて、初期たわみが $L/1000$ 以下で、局部座屈が生じない溶接箱形断面を対象とした既往の耐荷力の実験データを示す。この図から、推定式による耐荷力曲線は、概ね既往の実験値の下限側に対応していることがわかる。

また、図-3.12 には文献 10), 11)で整理された既往の実験データと耐荷力曲線を比較して示す。実験データ数は、溶接箱形断面 31 体を含む圧延 H 形断面を中心とした 958 体である。この図から、推定式による耐荷力曲線は、既往の溶接箱形断面部材の概ね下限値を示していることがわかる。

これまで検討した結果を踏まえて、溶接箱形断面部材の設計に用いる耐荷力曲線として、残留応力を

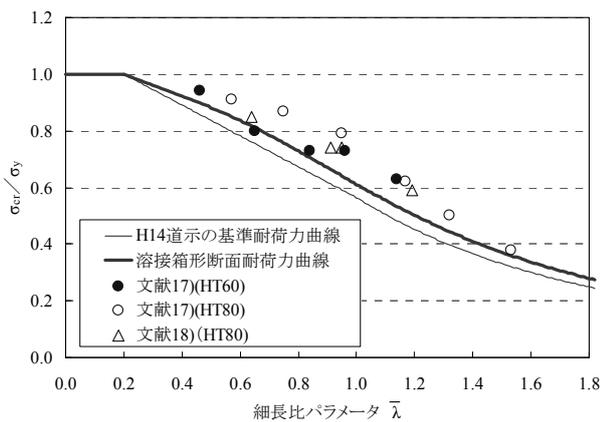


図-3.11 溶接箱形断面耐荷力曲線と実験値との比較

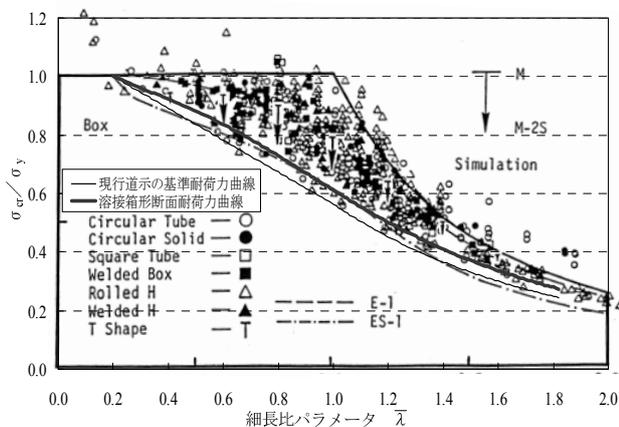


図-3.12 溶接箱形断面耐荷力曲線と既往の実験値^{10), 11)}との比較

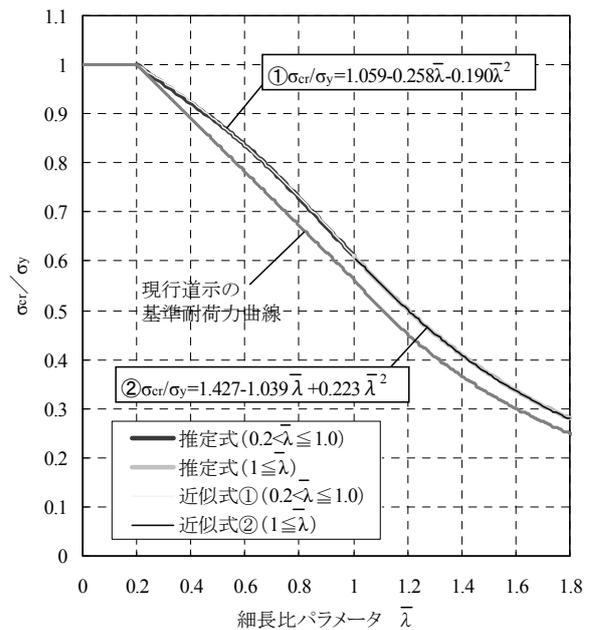


図-3.13 耐荷力曲線と推定式の関係

$0.25 \sigma_y$ 、初期たわみを $L/1000$ とした場合の文献 8)の推定式による耐荷力曲線を、簡易な 2 次式で近似的に表現し、基準耐荷力曲線として提案する (図-3.13)。

3.4 まとめ

溶接箱形断面を対象とした種々のパラメータを用いた FEM 解析により、耐荷力に与える影響が最も大きい因子としては、初期たわみや残留応力といった初期不整であることを確認した。また、既往の実験結果を整理するとともに、耐荷力に影響をおよぼす因子である初期不整を変数とした信頼性の高い耐荷力の推定式を用いて、既往の残留応力の計測結果を参考にして、溶接箱形断面部材 (残留応力: $0.25 \sigma_y$ 、初期たわみ: $L/1000$) の設計に用いる基準耐荷力曲線式を提案した。

4. まとめ

高力ボルト摩擦接合継手に関して、塗膜厚や塗料組成が継手性能に与える影響について検討を行った。短期試験では、いずれの試験体においても、設計すべり係数以上の値を十分確保できることを確認した。

溶接箱形断面部材の座屈強度を対象として、実構造断面諸元の整理、強度の支配因子である残留応力データの収集、弾塑性 FEM、既往の実験データの比較分析等を行い、設計に用いる基準耐荷力曲線を提

案した。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，2002.3.
- 2) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002.3.
- 3) (独) 土木研究所：鋼道路橋の部分係数設計法に関する検討，土木研究所資料，第 4141 号，2009.3.
- 4) (独) 土木研究所，大阪市立大学：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，共同研究報告書第 428 号，2012.1.
- 5) (独) 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.
- 6) (社) 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.
- 7) 例えば，国土交通省 関東地方整備局：施工管理基準及び規格値（H17）
- 8) 西村宣男，青木徹彦，西井学，福本昤士：鋼柱部材の基本強度の統一評価，土木学会論文集，第 410 号/I-12，pp.325-333，1989.10.
- 9) 織田博孝，長谷川雄一，宇佐美勉：初期不整の関数で表した連成座屈強度公式の実験データによる検証，土木学会論文集，No.543/I-36，pp.31-40，1996.7.
- 10) 福本昤士（研究代表者）：鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究，平成元年度科学研究費補助金（総合研究 A）研究成果報告書，1990.3.
- 11) 福本昤士，伊藤義人：座屈実験データベースによる鋼柱の基準強度に関する実証的研究，土木学会論文報告集，第 335 号，1983.7.
- 12) CEN：Eurocode3:Design of steel structures, prEN1993-1-1:2003, 2003.
- 13) 奥村敏恵，西野文雄，長谷川彰夫：箱形断面柱の局部座屈強度，土木学会論文報告集，第 205 号，pp.19-30，1972.9.
- 14) 小松定夫，牛尾正之，北田俊行：補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究：土木学会論文報告集：第 265 号，1977.9.
- 15) 本州四国連絡橋公団：塔柱部材の残留応力測定結果報告，鋼上部工構造委員会構造分科会報告書，1993.
- 16) 宮下剛，永田賢康，澤田守，野上邦栄，長井正嗣：磁歪法による既設鋼橋の箱形断面部材の残留応力計測：第 38 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，2011.3.
- 17) 伊藤文人，田島二郎：高張力鋼を用いた溶接角柱の圧縮強さ，鉄道技術研究報告，第 516 号，1966.1.
- 18) 宇佐美勉，福本昤士，青木徹彦：溶接箱型断面柱の局部座屈と全体座屈の連成強度に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 308 号，1981.4.
- 19) 成岡昌夫，福本昤士，伊藤鉦一：ヨーロッパ鋼構造協会連合・VIII委員会の鋼柱座屈曲線について，JSSC，Vol.6，No.55，1970.
- 20) 小松定夫：道路橋示方書（1971 年）座屈関連規定の論拠（上），橋梁と基礎，vol.6，No.6，1972.

STUDY ON DESIGN RATIONALIZATION FOR STEEL BRIDGES

Budgeted: Grants for operating expenses

General account

Research Period: FY2009-2013

Research Team: Bridge and Structural Technology Research Group

Author: Jun MURAKOSHI

Naoki TOYAMA

Mamoru SAWADA

Abstract : For the next revision of Japanese Specification of Highway Bridges, partial factor design (PFD) based on reliability analysis is being investigated in order to secure consistency with international technical standard, and to make bridge design more rational and reliable. The goal of this study is to propose the resistance factors for the design of highway bridges and to rationalize the design of steel members, including compression member and high-strength bolted joint, based on experimental data. In FY2011, the slip-resistance tests for high-strength bolted joint were carried out to investigate the influence of the paint specification of the contact surface of the joint. Also, FEA and the investigation on the experimental data of the past were carried out to suggest the buckling design curve for welded box column.

Key words : rational design, high-strength bolted connection, slip-resistance, welded box column, buckling design curve