

## 戦-57 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：構造物研究グループ（橋梁）

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<sup>1)</sup>では，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．本研究では，鋼道路橋上部構造を対象として，試設計及び信頼性解析により抵抗側の部分係数の設定に向けた検討を行うとともに，実験及び解析により厚板の適用を前提とした構造合理化に向けた各種強度照査式の検討を行うものである．

平成 22 年度は，前年度に引き続き厚板を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験を行い，ボルト列数制限や設計すべり係数に関する検討を行った．また，部分係数設計法の導入に向けて，現行設計法との整合性の確保を含め照査書式や部分係数の設定方法に関する検討を行った．

キーワード：構造合理化，部分係数設計法，抵抗係数，高力ボルト摩擦接合，すべり耐力

### 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）<sup>2)</sup>の考え方に沿って，検討・改訂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<sup>1)</sup>（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<sup>3)</sup>，鋼げた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，ボルト多列化の影響等，すべり係数の適切な評価が必要と考えられる．

本研究では，鋼道路橋上部構造を対象として，試設計及び信頼性解析により抵抗係数の設定に向けた検討を行うとともに，耐荷力試験及び FEM 解析等により，厚板の適用を前提とした構造合理化に向けた各種強度照査式の検討を行うものである．

平成 22 年度は，前年度<sup>4)</sup>に引き続き厚板を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験を行い，多列配置時の列数制限やすべり係数に関する検討を行った．また部分係数設計法の導入に向けて，現行設計法との整合性の確保を含め照査書式や部分係数の設定方法に関する検討を行った．

### 2. 研究内容

#### 2.1 高力ボルト摩擦接合継手の合理化に関する検討

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．道示では，高力ボルト摩擦接合の場合，接合面の処理方法に関わらず，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。また、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となるべく 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。

近年、部材の簡素化、構造の合理化を図った鋼橋上部構造の普及により、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が、高力ボルト摩擦接合の適用にあたっては、道示における一定のすべり係数やボルト列数制限が合理化の妨げとなっており、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。一方では、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、フィラープレート、肌すき、塗膜厚等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。

本研究では、これらをパラメータとした継手試験体を製作してすべり試験を行い、厚板・多列がすべり耐力に及ぼす影響について検討を行った。また、最近の研究<sup>5)</sup>では、接合面に無機ジンクリッチペイントを塗布した場合、0.4 以上のすべり係数を期待できることが確認されており、例えば、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)」<sup>6)</sup>では、塗膜厚により 0.4 と 0.5 に分類して提案されている。本研究では構造設計の合理化を目的としていることから、これら最近の研究や前述の実験に加えて、設計すべり係数の根拠となった実験を比較し、すべり係数の検討を行った。

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 部分係数設計法に関する検討

これまで現行基準で設計された鋼道路橋の信頼性レベルや鋼部材の抵抗側部分係数(以下、抵抗係数)に関して、過去には文献 7)～9)等、最近では文献 10)等多くの調査研究が行われてきている。ただし、これらの信頼性を考慮した設計法の実務への適用に関しては、長年の実績のある現行の許容応力度設計法との整合性の確保を含め照査書式や部分係数の設定方法等検討すべき課題も多く、現行設計基準が有する信頼性を評価し、抵抗係数を具体的に提示するという、実用化に重点をおいた系統立てた検討が必ず

しも行われてきているわけではない。

土木研究所では過年度までに鋼道路橋の大半を占める鋼桁橋を対象として、現行設計法の信頼性評価や、抵抗係数の設定に関する検討を行ってきた<sup>3)</sup>。平成 22 年度の検討ではこれらの検討結果を元に、照査書式について現行設計との整合性の観点から検討を行った。具体的には、部分係数設計法が抵抗特性等の不現実性の影響を考慮して適切な安全余裕を与える設計体系であり要求事項を明確なものとする必要があることから、まずは許容設計応力度法における各種基準耐荷力と安全率設定の考え方を整理することとした。また、鋼橋上部構造に要求される性能を満足することを検証するために必要な限界状態及び工学的な評価指標の設定を行い、それぞれの限界状態に対する抵抗係数の設定方法を検討した。

## 3. 高力ボルト摩擦接合継手の合理化に関する検討

### 3. 1 試験方法

本実験では、文献 6)に示される標準すべり試験を参考に、厚板多列ボルト継手試験体を製作してすべり試験を実施した。図-3.1.1 に試験体形状の代表例を示す。試験体は表-3.1.1 に示すように板厚、ボルト列数、フィラープレート厚、肌すきの有無及び塗膜厚をパラメータとした。鋼材及びボルトは実橋での使用実態を考慮してそれぞれ SM490Y、M22 (F10T) とした。接合面は無機ジンクリッチペイント塗装とした。ボルト導入軸力は設計軸力 205kN とし、非すべり側のボルトは軸力を 10%増して締め付けた。試験機は各試験体の設計すべり耐力にあわせて、土木研究所所有の 30MN 大型構造部材万能試験機あるいは 2000kN 疲労試験機を用いた。写真-3.1.1 に、30MN 大型構造部材万能試験機を用いた試験時の様子を示す。

### 3. 2 試験結果

表-3.2.1 に、すべり係数の平均値及び締め付け～7 日経過後のボルト軸力残存率の平均値を示す。すべ

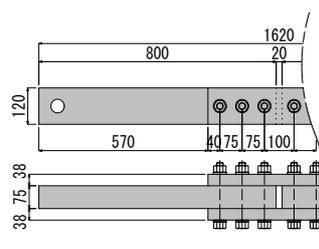


図-3.1.1 試験体形状  
(No. 5)



写真-3.1.1 試験状況  
(No. 1)

表-3.1.1 試験体パラメータ

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38	母材 50			母材 75			母材 38			母材50	母材75	母材38	
試験体 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ボルト列数 M22 (F10T)	3	3	8	12	3	8	12	3			8		3	
母材板厚 (mm) SM490Y	38-38	50-50			75-75			50-38	60-38	75-38	50-49	75-74	38-38	38-38
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
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
接合面の合計膜厚 (μm)	180	180			180			180			180		120	250
すべり耐力 <sub>0.4</sub> (kN)	492	492	1312	1968	492	1312	1968	492	492	492	1312	1312	492	492
母材降伏耐力 (kN)	1,288	1,600	2,772	4,112	2,399	2,651	4,158	1,288	1,288	1,288	2,717	2,615	1,288	1,288
連結板降伏耐力 (kN)	1,356	1,763	3,055	4,532	2,577	2,846	4,465	1,356	1,356	1,356	3,055	2,846	1,356	1,356
すべり降伏比 β	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
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	●											●	●

注) すべり降伏比 β = すべり耐力 / 母材降伏耐力

り係数と軸力残存率は式(3.1)~(3.3)により算出した。

すべり係数： $\mu_0 = P/n/m/N_0$  . . . . .式(3.1)

すべり係数： $\mu_2 = P/n/m/N_2$  . . . . .式(3.2)

軸力残存率： $N_2/N_1$  . . . . .式(3.3)

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、 $N_1$ ：締め付け軸力（実測値）、 $N_2$ ：試験前軸力（実測値）である。いずれの試験体も、すべり係数  $\mu_0$  は道示の設計すべり係数 0.4 を大きく上回ることが確認された。また、軸力残存率は 92~96%程度で、接触面数の多いフィラーケースで 92~94%程度と比較的小さい傾向となるものの、ほぼ同程度の値を示した。

(1) 板厚の影響

図-3.2.1 に、板厚とすべり係数  $\mu_2$  の関係を示す。板厚が厚くなるとすべり係数  $\mu_2$  は僅かに大きくなる傾向にある。ただし、板厚 75mm・ボルト 3 列の場合、一部すべり係数の小さいものがあり、これはエッジの凹凸や部材のそりなどの初期不整の影響によるものと考えられる。初期不整を有する継手では、板厚が厚かつボルト列数が少ないほど接合面が密着しにくいため、その結果、接触圧が低下し、すべり耐力が低下したものと考えられる。

(2) ボルト列数の影響

図-3.2.2 に、ボルト列数とすべり耐力比の関係を示す。すべり耐力比とは、各試験体のすべり係数  $\mu_2$  と 3 列試験体のすべり係数  $\mu_2$ （平均値）の比を示した

表-3.2.1 実験結果

	No.	すべり係数 $\mu_0$	すべり係数 $\mu_2$	軸力残存率	備考
		基本ケース	No. 1	0.68	0.71
	No. 2	0.70	0.73	0.95	母板50mm, 3列
	No. 3	0.71	0.74	0.95	母板50mm, 8列
	No. 4	0.70	0.73	0.95	母板50mm, 12列
	No. 5	0.68	0.71	0.96	母板75mm, 3列
	No. 6	0.71	0.75	0.94	母板75mm, 8列
	No. 7	0.69	0.70	0.95	母板75mm, 12列
フィラーケース	No. 8	0.72	0.77	0.92	フィラープレート 12mm
	No. 9	0.61	0.64	0.94	フィラープレート 22mm
	No. 10	0.57	0.62	0.92	フィラープレート 37mm
肌すきケース	No. 11	0.66	0.69	0.95	肌すきあり
	No. 12	0.63	0.67	0.94	肌すきあり
塗膜厚ケース	No. 13	0.64	0.67	0.93	合計塗膜厚120μm
	No. 14	0.68	0.73	0.92	合計塗膜厚250μm

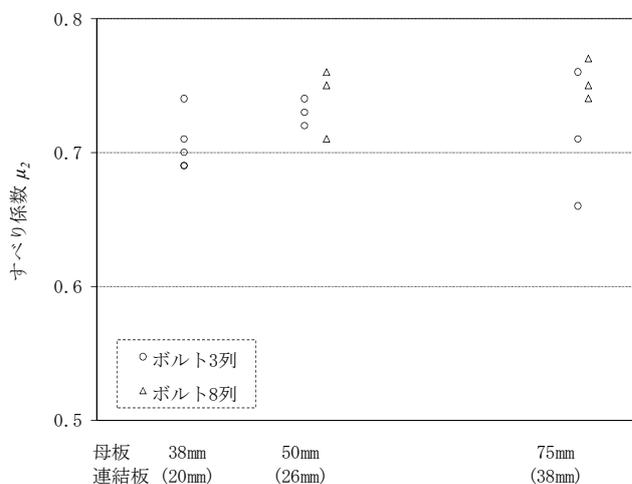


図-3.2.1 板厚とすべり係数  $\mu_2$

ものである。すべり耐力比は、ボルト列数が8列から12列へ増えると板厚50mmで1%、板厚75mmで7%程度低下している。また、文献11)でもボルト列数が8列から12列へ増えるとすべり耐力比が8%程度低下し、今回の実験における板厚75mmの結果に近い傾向を示している。道示では設計すべり係数0.4を適用する場合のボルト列数の上限値について、なるべく8列とするのが良いとしているが、本実験の結果から、8列以降についても12列程度まではすべり係数への影響を考慮した上で適用範囲を拡大できる余地があると考えられる。今後は数値解析により、実験では十分にとらえることのできなかつた多列継手におけるすべり係数の低下に関するメカニズムを母板及び連結板の断面構成にも着目して検討する予定である。

### (3) フィラープレート厚の影響

図-3.2.3に、フィラープレート厚とすべり耐力比の関係を示す。すべり耐力比とは各ケースのすべり係数 $\mu_2$ をフィラープレートのない試験体のすべり係数 $\mu_2$ の平均値で除したものである。今回の実験ではフィラープレート厚が22mmや37mmの場合に、すべり耐力比の平均値が0.88~0.91まで低下する結果となった。これは、母板厚とフィラープレートが厚いために、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したためと考えられる。今回の試験体はボルト3列と連結長が短いため、偏心曲げモーメントの影響を受けやすい構造であったとも考えられるが、今回の結果を踏まえると、厚板の継手に対しては所要のすべり耐力を確保する上でフィラープレート厚の上限値等の適用条件を検討する必要があると考えられる。文献12)では、フィラープレート厚を22mmとした場合に、すべり耐力比が平均0.85程度まで低下する結果が示されており(ただしすべり係数は0.4以上を確保)、これらを踏まえてフィラープレート厚の上限値は25mm程度とするのが良いと考えられる。

### (4) 肌すきの影響

図-3.2.4に、肌すきとすべり耐力比の関係を示す。ここで、すべり耐力比とは各ケースのすべり係数 $\mu_2$ を肌すきのない試験体のすべり係数 $\mu_2$ の平均値で除したものである。文献6)では、肌すきを有する継手のすべり耐力は、連結板の板厚、ボルト列数、縁端距離の影響を受けるとされており、今回の実験でも、母板75mm(連結板38mm)のすべり耐力比が母板50mm(連結板厚26mm)のすべり耐力比を下回り、

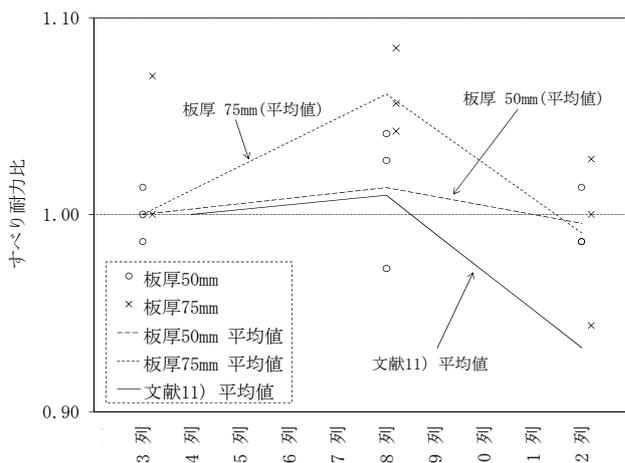


図-3.2.2 ボルト列数とすべり耐力比

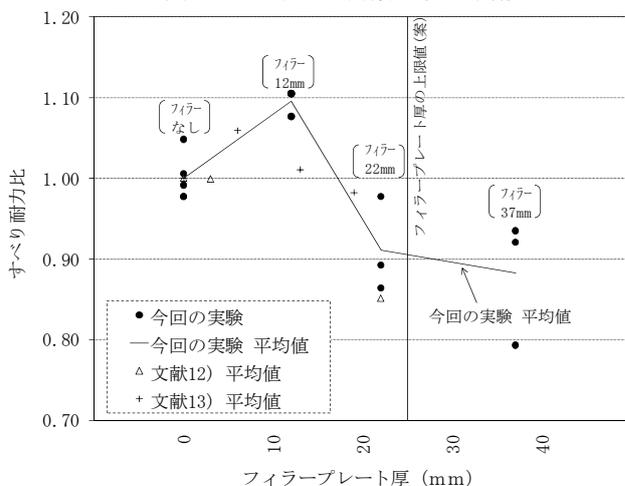


図-3.2.3 フィラープレート厚とすべり耐力比

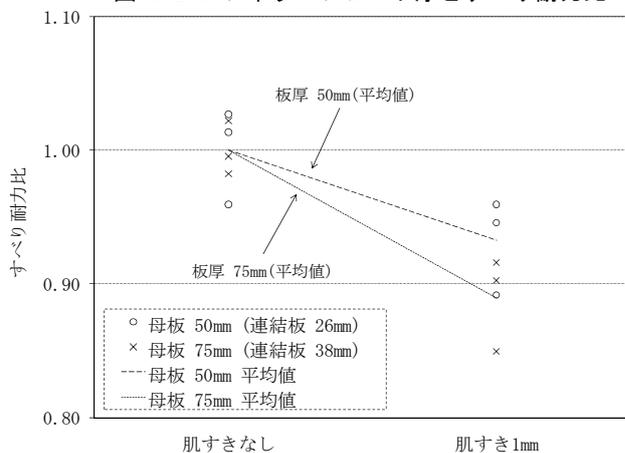


図-3.2.4 肌すきとすべり耐力比

板厚の影響が大きいことが確認された。これは連結板の板厚が厚いために、曲げ剛性が大きくなり、接合面が密着しにくいためにすべり耐力が低下したものと考えられるが、ボルト列数や縁端距離との関係によっては、この低下率はさらに変化する可能性がある。道示ではフィラープレートを用いる場合に接合面に肌すきが生じないように規定しているが、厚板においては特に注意を要すると考えられる。

**(5) 塗膜厚の影響**

図-3.2.5 に、合計塗膜厚とすべり係数  $\mu_0$  の関係を示す。道示では、すべり係数 0.4 を得るための無機ジンクリッチペイントの塗装条件として合計塗膜厚を 90~200 $\mu\text{m}$  と規定しているが、今回の実験においてもすべり係数 0.4 以上が確保できることが確認された。また、塗膜厚の増加とともにすべり係数が大きくなる傾向が見られた。今回の実験結果と他の既往の研究との比較については次節で述べる。

**3. 3 設計すべり係数に関する検討**

**3. 3. 1 検討内容と検討条件**

道示では、設計すべり係数を 0.4 と定めており、解説で「すべり係数は、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、リ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」としている。また、接合面に無機ジンクリッチペイントを塗布した場合の継手に対して、塗装仕様が表-3.3.1 の通り規定されている。これは、土木研究所が 1989 年に実施した実験（以下、〔土研，1989〕）<sup>14,15)</sup>に基づいて、設計すべり係数 0.4 を満足するように定められたものである。

一方、最近の研究<sup>5)</sup>では、接合面に無機ジンクリッチペイントを塗布した場合、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おり、本検討では、〔土研，1989〕の結果を再分析しつつ、今回の実験や最近の研究と比較し、設計すべり係数の検討を行うこととした。

最近の研究<sup>5,12,16-21)</sup>については、表-3.3.1 の塗装仕様を満足するもの、ボルト 8 列以下のもの、すべり降伏比  $\beta$  が 0.7 以下のものの 3 条件を満足する実験データを比較の対象とした。最近の研究の中には、実験時の締め付けボルト軸力の目標値を、道示に従い設計軸力の 10%増しとするものと、設計軸力のままとするものがある。これらを同レベルで比較するため、すべり係数は実験時の締め付けボルト軸力の目標値  $N_0'$  を用いて整理し、 $\mu_0$  の代わりに式(3.4)に従って算出した  $\mu_0'$  により比較することとした。なお、前述の  $N_l$  は締め付け軸力の実測値であり、施工上の誤差を含む分だけ  $N_0'$  とは異なる。なお、〔土研，1989〕及び今回の実験については、実験時の締め付け軸力の目標値  $N_0'$  を設計軸力としているため、 $\mu_0$  と  $\mu_0'$  は同値である。ここで、すべり係数  $\mu_0'$  は、式(3.2)及

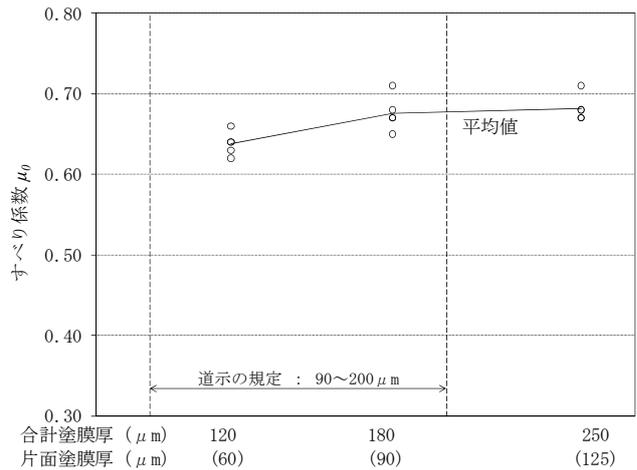


図-3.2.5 合計塗膜厚とすべり係数  $\mu_0$

表-3.3.1 すべり係数 0.4 を確保するための塗装条件

項目	条件
接触面片面あたりの最小乾燥塗膜厚	30 $\mu\text{m}$ 以上
接触面の合計乾燥塗膜厚	90~200 $\mu\text{m}$
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 $\mu\text{m}$ 程度以上

表-3.3.2 無機ジンクリッチペイントの仕様

	〔土研，1989〕			今回の実験
	塗料 I	塗料 II	塗料 IV	
乾燥塗膜中の亜鉛含有量 (%)	83.5	82.0	82.4	82
亜鉛末の50%平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )	9.8	11.1	16.0	17

び式(3.4)から、式(3.5)に示すように式変形され、軸力残存率  $N_2 / N_0'$  とすべり係数  $\mu_2$  の積で表すことができる。

$$\text{すべり係数} : \mu_0' = P / n / m / N_0' \quad \dots \dots \text{式(3.4)}$$

$$\text{すべり係数} : \mu_0' = (N_2 / N_0') \cdot \mu_2 \quad \dots \dots \text{式(3.5)}$$

〔土研，1989〕では、塗料の種類（表-3.3.2）や塗膜厚をパラメータとしているため、これらが軸力残存率やすべり係数  $\mu_2$  に与える影響を検証することとした。また、締め付け直後にすべり試験を実施したタイプ A と、締め付け後 180 日間屋外放置した後にすべり試験を実施したタイプ B の違いにも着目することとした。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  $\mu_2$  を求めることができず、試験前軸力が計測されているタイプ B のすべり係数  $\mu_2$  と直接比較することができないが、タイプ A が締め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仮定し、タイプ A のすべり係数  $\mu_0'$  とタイプ B のすべり係数  $\mu_2$  を比較することとした。

### 3. 3. 2 検討結果

#### (1) すべり係数 $\mu_0'$ のばらつきの傾向

図-3.3.1に、〔土研，1989〕，今回の実験及び最近の研究におけるすべり係数  $\mu_0'$  の頻度分布を示す．これらの実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，実験により得られたすべり係数  $\mu_0'$  (0.40~0.75) の下限値に相当する．
- ・今回の実験や最近の研究では，すべり係数  $\mu_0'$  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，今回の実験や最近の研究に比べてすべり係数  $\mu_0'$  のばらつきが大きい．

#### (2) すべり係数 $\mu_0'$ と塗膜厚の関係

図-3.3.2に、〔土研，1989〕，今回の実験及び最近の研究における片面塗膜厚及び合計塗膜厚とすべり係数  $\mu_0'$  の関係を示す．前述の通り，今回の実験や最近の研究は，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．ここで，実験結果の下限値 (0.40) は〔土研，1989〕における片面塗膜厚 30 $\mu\text{m}$  (合計塗膜厚 200 $\mu\text{m}$ ) のものである．この片面塗膜厚 30 $\mu\text{m}$  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布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)<sup>22)</sup>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 30~70 $\mu\text{m}$  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<sup>15)</sup>．

一方，鋼道路橋防食・塗装便覧 (H17)<sup>22)</sup>では，高力ボルト摩擦接合面の塗装仕様について，無機ジンクリッチペイントを塗布する場合の塗膜厚を 75 $\mu\text{m}$  としている．また，土木工事共通仕様書<sup>23)</sup>では，塗膜厚の施工管理規格値を表-3.3.3 に示すように定められており，これによると片面塗膜厚の最小値は 52.5 $\mu\text{m}$  (=75 $\mu\text{m}\times 0.7$ ) となり，設計すべり係数 0.4 を確保するための塗装条件 (30 $\mu\text{m}$ ) 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 52.5 $\mu\text{m}$  とした場合，図-3.3.2 に示す様に，すべり係数  $\mu_0'$  の下限値は 0.46 となる．

図-3.3.3に、片面塗膜厚の最小値を 52.5 $\mu\text{m}$  とした場合のすべり係数  $\mu_0'$  の頻度分布を示す．前述の通り実験結果の下限値は 0.46 であり，平均値やばらつきなどの傾向は図-3.3.1 と殆ど変わらない．今回の実験や最近の研究では，片面塗膜厚を 52.5 $\mu\text{m}$  とした場合

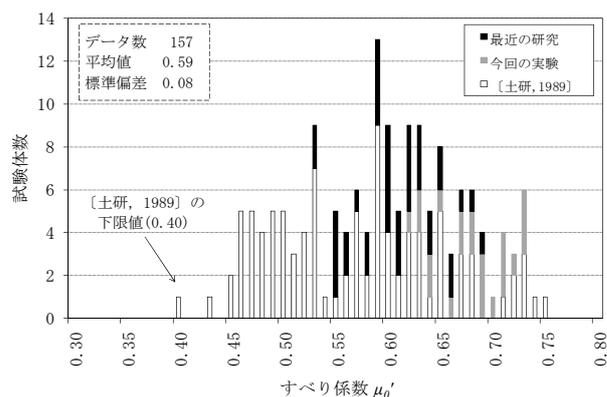


図-3.3.1 すべり係数  $\mu_0'$  の頻度分布

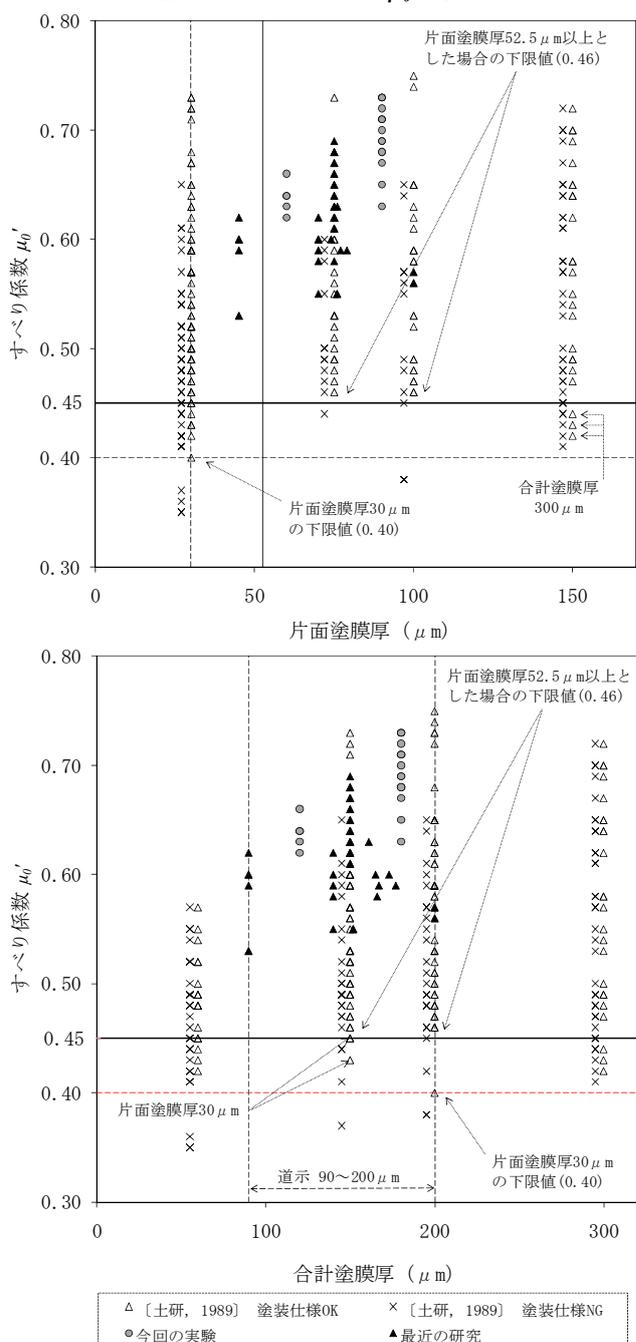


図-3.3.2 塗膜厚とすべり係数  $\mu_0'$

(上段：片面塗膜厚，下段：合計塗膜厚)

の実験は行われていないが、塗膜厚の施工管理規格値における平均値は、表-3.3.3 に示す通り目標塗膜厚の90% ( $75 \times 0.9 = 67.5 \mu\text{m}$ ) 以上とされており、今回の実験における片面塗膜厚  $60 \mu\text{m}$  の結果などを踏まえると、すべり係数は0.45以上を確保できると考えられる。

合計塗膜厚が  $200 \mu\text{m}$  を超えた場合、図-3.3.2 に示すように、すべり係数が低下するものもあり、中には0.45を下回るデータも見られる。したがって、合計塗膜厚の上限値は従来通り  $200 \mu\text{m}$  程度とするのが良いと考えられる。

**(3) 塗装条件と軸力残存率について**

図-3.3.4に、[土研, 1989]のタイプB試験体(締め付け後180日間屋外放置)、今回の実験及び最近の研究を対象として、軸力残存率と締め付け～試験までの経過日数(以下、経過日数)の関係を示す。今回の実験では、締め付け～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、締め付け後2日目以降の軸力低下が見られなかったことから、7日以上での軸力低下を計測したとしても、軸力が急激に低下した可能性は低かったと予想される。[土研, 1989]では、締め付け後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-3.3.5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の様に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セ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、厳密には亜鉛含有量や亜鉛末の平均粒径以外の化学成分の違いが軸力低下の差異として現れた可能性があると考えられる。図-3.3.6に、[土研, 1989]のタイプB試験体及び今回の実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  $90 \sim 200 \mu\text{m}$  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、合計塗膜厚  $200 \mu\text{m}$  以上の範囲では、塗料Iのように軸力残存率が大きく低下するものもあるため、この

表-3.3.3 塗膜厚の施工管理基準及び規格値(例)

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。

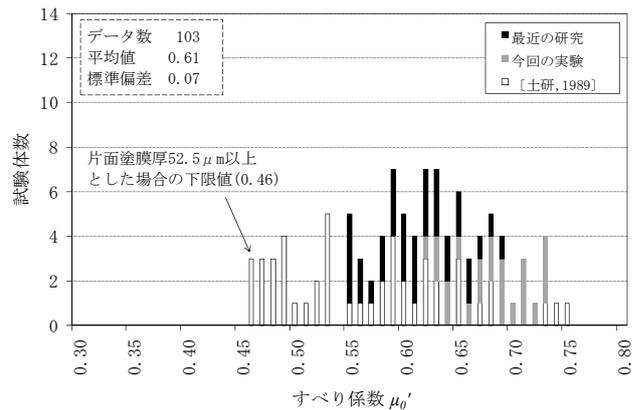


図-3.3.3 すべり係数  $\mu_0'$  の頻度分布 (片面塗膜厚  $52.5 \mu\text{m}$  以上)

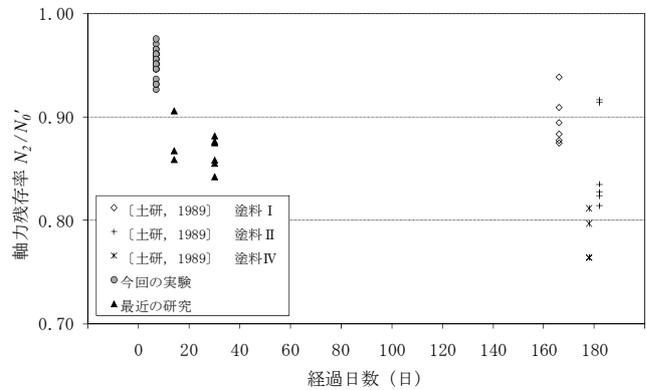


図-3.3.4 軸力残存率と経過日数

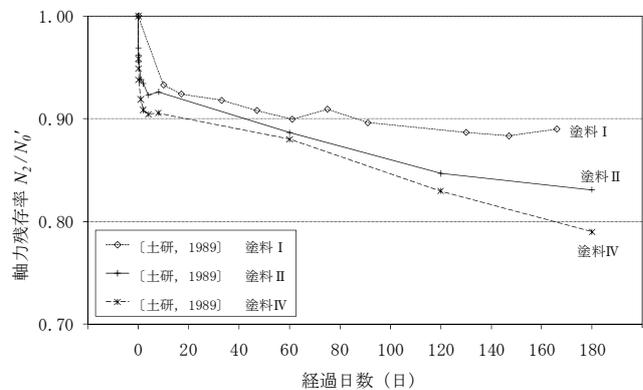


図-3.3.5 [土研, 1989] の軸力残存率の変化

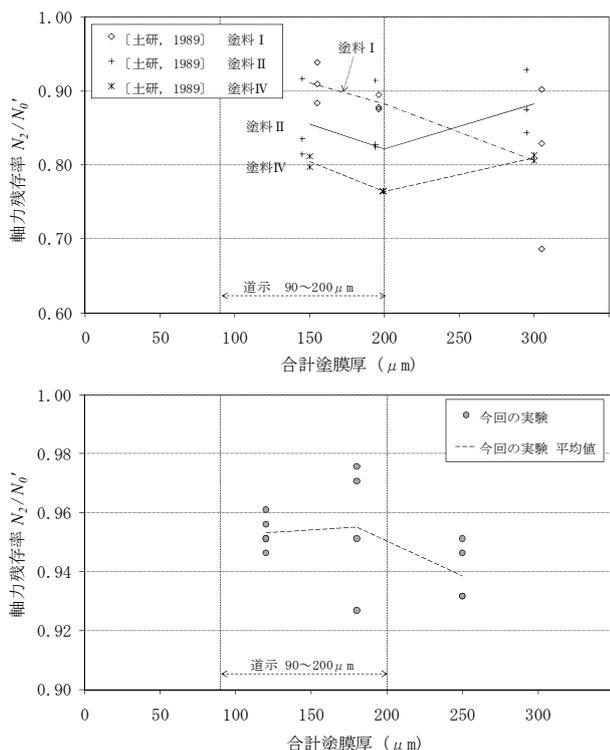


図-3.3.6 軸力残存率と合計塗膜厚  
(上段：[土研，1989]，下段：今回の実験)

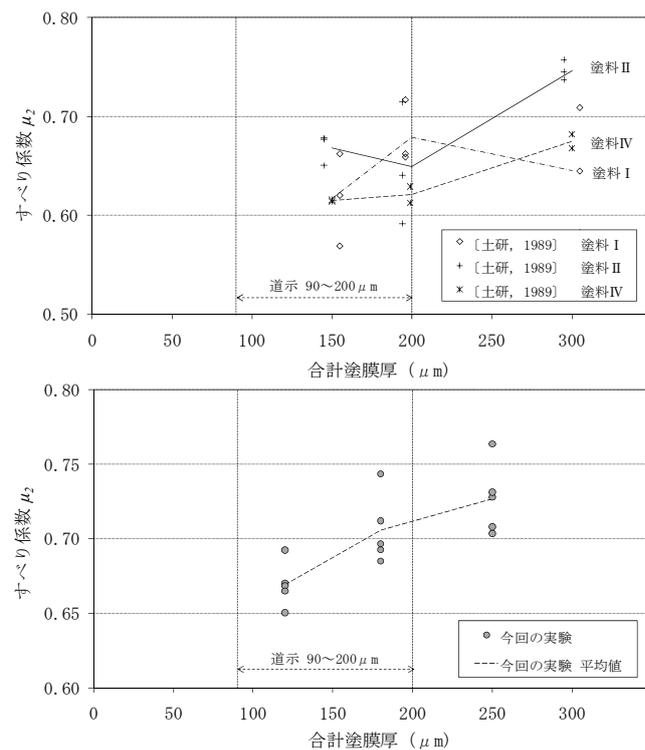


図-3.3.7 すべり係数  $\mu_2$  と合計塗膜厚  
(上段：[土研，1989]，下段：今回の実験)

点からも合計塗膜厚の上限値は200 $\mu\text{m}$ とするのが望ましいと考えられる。また、今回の実験では、塗膜厚180 $\mu\text{m}$ の場合の軸力残存率のばらつきが若干大きくなっているが、全体的には[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。

(4) 塗装条件・試験前軸力と  $\mu_2$  について

図-3.3.7に、[土研，1989]のタイプB試験体及び今回の実験結果における合計塗膜厚とすべり係数  $\mu_2$  の関係を示す。道示で規定される合計塗膜厚の範囲(90~200 $\mu\text{m}$ )であれば、合計塗膜厚の増加に伴って、すべり係数  $\mu_2$  は大きくなる傾向を示す。

図-3.3.8に、[土研，1989]のタイプB試験体及び今回の実験の試験前軸力  $N_2$  とすべり係数  $\mu_2$  の関係を示す。この結果によると、両者の相関性は低い。

図-3.3.9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  $\mu_2$  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  $\mu_2$  が大きくなる傾向にある。これは文献15)でも述べている通り、塗料のなじみ等によりすべり係数  $\mu_2$  が増大したためと考えられる。したがって、今回の実験や最近の研究成果でも経過日数が長くなれば、さらに大きなすべり係数  $\mu_2$  が得られる可能性があると考えられる。

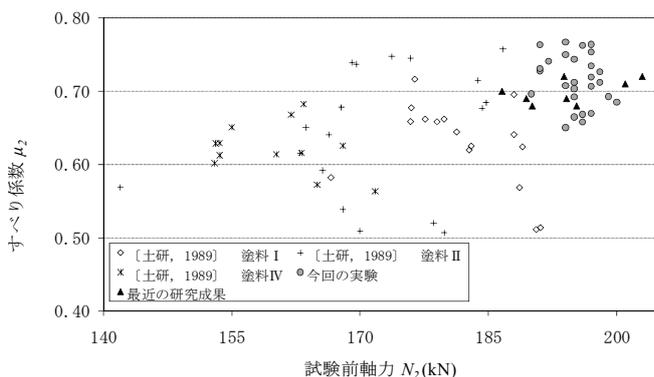


図-3.3.8 試験前軸力とすべり係数  $\mu_2$

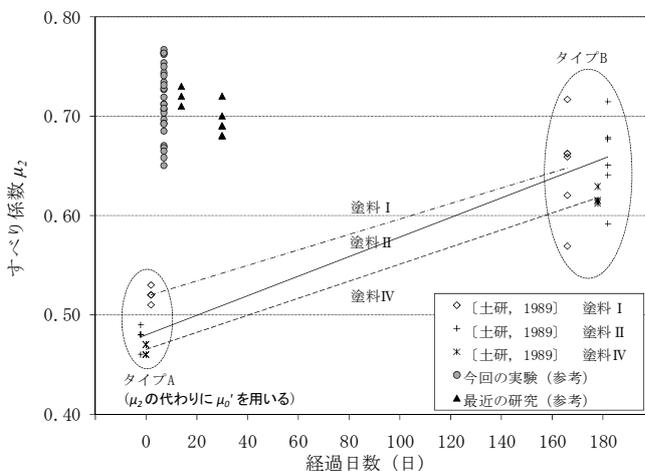


図-3.3.9 すべり係数  $\mu_2$  と経過日数

(5) すべり係数  $\mu_0'$  について

(3), (4)の検討により, 軸力残存率やすべり係数  $\mu_2$  は塗膜厚の影響よりも, 時間経過の影響が大きいことが分かった. そこで, 以下ではすべり係数  $\mu_0'$  に着目し, 軸力残存率とすべり係数  $\mu_2$  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-3.3.10 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  $\mu_0'$  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  $\mu_0'$  が大きくなる傾向にある. ただし, すべり係数  $\mu_2$  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, タイプ B の方が軸力残存率が低いためと考えられる.

図-3.3.11 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  $\mu_0'$  と軸力残存率の関係を示す. 式(3.5)で示すように, すべり係数  $\mu_0'$  は軸力残存率とすべり係数  $\mu_2$  を乗じたものであり, すべり係数  $\mu_2$  を一定値と仮定した場合, すべり係数  $\mu_0'$  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  $\mu_2$  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  $\mu_2$  が大きく, すべり係数  $\mu_0'$  も大きくなっている. これは, 図-3.3.12 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  $\mu_2$  が大きくなる影響の方が大きいためと考えられる. 今回の実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  $\mu_0'$  が更に大きくなる可能性があると考えられる. これらの結果を踏まえると, すべり係数  $\mu_0'$  は 0.45 以上を確保できる可能性が高いと考えられる.

4. 部分係数設計法に関する検討

4.1 道示の各種強度規定における安全率の整理

鋼橋上部構造の設計では, 荷重に対する安全性等の照査に関して, 荷重組合せによる作用応力度と安全率を考慮して設定された許容応力度を比較することにより照査する方法(許容応力度設計法)が用いられている. 安全率については, 材料または部材の限界状態とする強度に対して表-4.1.1 に示す値が確保されるように規定されている. 安全率の値は, 設定当時の技術水準や経験等の時代背景を踏まえて設定されてきており, 強度規定間の整合性が必ずしも

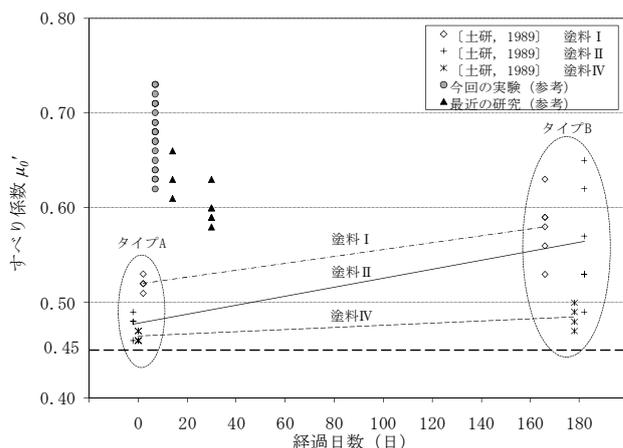


図-3.3.10 すべり係数  $\mu_0'$  と経過日数

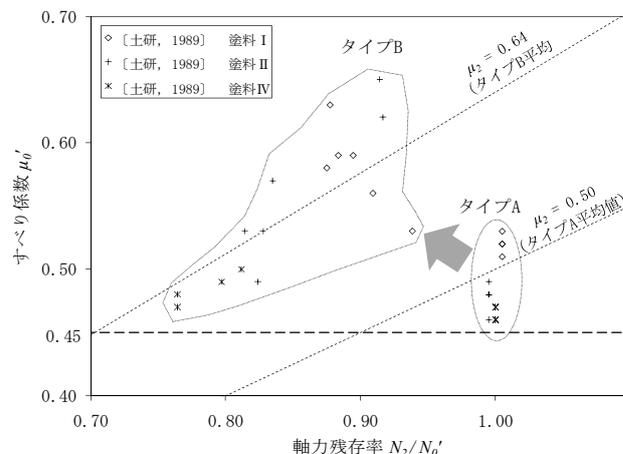


図-3.3.11 すべり係数  $\mu_0'$  と軸力残存率

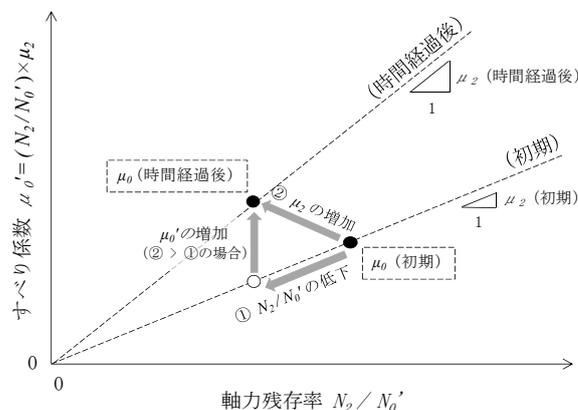


図-3.3.12 時間経過に伴うすべり係数  $\mu_0'$  の変化イメージ

図られていない部分も見受けられる.

各種許容応力度規定の基本となる強度(以下, 基準耐荷力)については, 改訂当時の知見に照らして概ね以下の考え方を基本に設定されているものと考えられる.

- ① 耐荷力に影響する構造パラメータを考慮するとともに, 初期不整等の設計・施工の条件を踏まえた上での, 実験結果もしくは解析結果で得られた耐荷力の下限値を基本に設定

表-4.1.1 道示の主な強度規定と安全率

強度規定		想定する限界状態	基準耐力に対する安全率		改訂時期 ※1	基準耐力の考え方
部材	1 許容軸方向引張応力度 許容曲げ引張応力度	引張降伏 ※ 降伏比が大きい場合 には引張強度で規定	SM400, SM490Y <sub>1</sub> ほか	1.70程度 (1.68~1.72)	S39	JIS規格の下限值, 引張強度に対する 安全率は3程度
			SM570	1.76程度 (1.75~1.76)	S48	JIS規格の下限值, 引張強度に対する 安全率は2.2程度
	2 中心圧縮材の全体座屈	全体座屈		1.70程度	S48	実験結果の下限値を基本 ※2
	3 横倒れ座屈	全体座屈		1.70程度	S48	実験結果の下限値を基本
	4 山形及びT形断面を 有する圧縮部材	全体座屈		1.70程度	S48	実験結果の下限値を基本
	5 両縁支持板	局部座屈		1.70程度	S55	実験結果の下限値を基本 ※3
	6 自由突出板	局部座屈		1.70程度	S55	実験結果の下限値を基本 ※3
構造	7 補剛板	局部座屈		1.70程度	S55	実験結果の下限値を基本 ※3
	8 アーチ面外座屈	面外全体座屈		2.00	S48	※4
	9 アーチ終局強度	主に面内全体座屈		1.70	S55	※5
製品 材料	10 高力ボルト摩擦接合	すべり		1.70	H2	すべり係数0.4は, 実験の下限值
	11 仕上げボルト	降伏	強度区分 4.6	1.71	H2	
			強度区分 8.8	1.83	H2	降伏比が高いことを考慮して高めに規定
			強度区分 10.9	2.00	H2	降伏比が高いことを考慮して高めに規定
	12 アンカーボルト	せん断降伏		2.20~2.49	S14 以前	施工性の不確実性などに配慮し, 許容応力度を70%~低減
	13 ケーブル	破断	吊橋	3.00	S48	※6
斜張橋			2.50	H2	※7	
14 ハンガーロープ	破断	直線部	3.50	S48	※8	
		曲線部	4.50	S48	※9	

※1 SI単位系への移行を除く  
 ※2 各種の断面形状を対象とした実験結果の下限值相当としている。安全余裕は座屈パラメータの大小に関わらず一定としている  
 ※3 座屈パラメータの大きい領域では, 基準耐力曲線に安全余裕を持たせている  
 ※4 当時の改訂根拠資料によれば, 「座屈現象が直ちに落橋, 人命の損傷を意味する座屈の場合は安全率を2にとる」としている  
 ※5 非線形性の影響を考慮している  
 ※6 降伏点に相当する0.7%全伸び耐力に対して2.0の安全率をとると破断に対する安全率は2.8となる, 曲げ剛性等による二次応力も考えられるので安全率3.0をとることとしている  
 ※7 吊橋に比べ, 二次応力の影響が小さいことを考慮し, 我が国での長大支間の斜張橋の実績, 海外の基準等を参考としている  
 ※8 死荷重の占める割合が小さく, 活荷重応力の発生頻度も大となるため, としている  
 ※9 ケーブル断面が大きい場合はハンガーを2つ折りにしてケーブルにかける方法をとることがある, この場合ハンガーは局部的に大きく曲げられるので, その影響を考慮している

② 座屈のように耐力を超える荷重や変形を受けた時に, 最大荷重以降, 耐力が急激に低下する場合(座屈パラメータが大きく, ねばりのない構造となる場合)に対しては, 耐力の下限值よりも, さらに安全余裕をもたせた設計基準耐力を設定

一方で, ②の安全余裕については, 現状の知見に照らすと以下の課題が挙げられる。

- ① 部材によっては, 必ずしも前述に適合せず, 実験値もしくは解析値の下限值と, 基準耐力との乖離が見られる場合があり, 部分係数設計法を導入する段階で強度規定間の整合を図るのが難しくなる可能性がある。
- ② 部材の基準耐力は, 本来耐力に影響する構造的特徴により強度分類されることが合理的な場合があるが, 実務上の煩雑さを避けるべく, 全分類の強度の下限値を基本に基準耐力を設定している場合があり, 合理化の余地がある。

上記に該当する例として, ①では自由突出板の圧縮強度, ②では柱(溶接箱断面)の圧縮強度が挙げられ, 今後, 適切な基準耐力の設定を行う必要があると考えられる。

降伏や座屈に対する安全率は概ね 1.7 程度に設定されているが, その経緯は以下の通りである<sup>24)</sup>。「日本国内で明確に許容応力度の字句が出てくるのは, 関場茂樹の著書(標準橋梁仕様書)と思われるが, この中で破壊強度に対し安全率 3 を与えている。このことは, 降伏点を破壊の 2/3 としたうえで, 降伏点に 2 の安全率を考えたものと想定されるとされている。その後, 昭和 35 年(1956 年)の道路橋示方書改訂の際, JIS 改訂に伴い, 同クラスの鋼種(SS41)に, 降伏強度の下限が 23kgf/cm<sup>2</sup> と新規格が設けられたことにより, 鋼材の安全率は降伏点に対し, 約 1.7 となった。」現行設計における安全率と設計限界値(許容値)の関係について, 引張部材と圧縮部材(座屈の生じる場合)を例として図-4.1.1 に示す。これらは常時荷重に対する安全率の考え方を示したものであり, 許容応力度の割り増しは考慮していない。引張部材の設計限界値は, 降伏強度から安全率 1.7 程度を確保した点, あるいは引張強度から安全率 2.2 程度を同時に確保するように定められている。また圧縮部材(座屈の生じる場合)の設計限界値は, 座屈強度に対し安全率 1.7 程度を確保するように定められている。

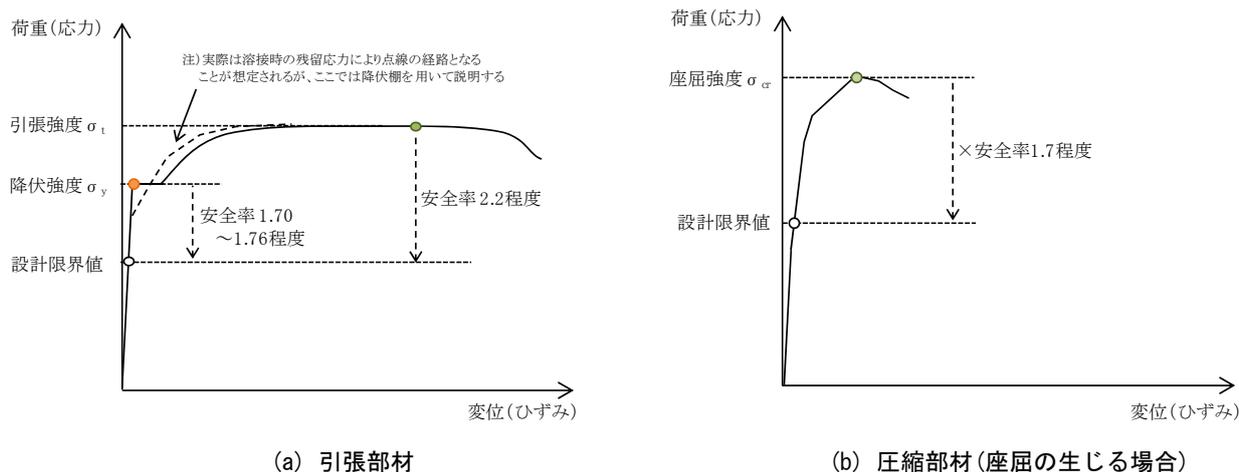


図-4.1.1 現行設計における設計限界値の例

表-4.2.1 使用目的との適合性、修復性、安全性の観点から分類した部材や構造の限界状態

限界状態A	部材や構造の応答が可逆性を有し、かつ、恒常的に過度な変位、変形又は振動が生じない限界の状態
限界状態B	部材や構造の塑性化の程度を限定的とし、修復が容易に行いうる範囲にとどまる限界の状態
限界状態C	部材や構造の強度に低下が生じない限界の状態

表-4.2.2 鋼橋上部構造を構成する部材や構造の限界状態

作用	限界状態	部材や構造の状態	主げた・横げたの例
永続作用	A	・鋼部材の腐食やき裂は生じないとみなせる限界の状態 (注1)	・腐食による主げた・横げたの断面欠損はなく、有効断面に影響がないとみなせる限界の状態 ・主げた・横げたの母材及び溶接継手では疲労強度に到達しないとみなせる限界の状態
変動作用	A	・力学的特性が概ね線形性を保持し、有害な残留変形が生じないとみなせる限界の状態 ・供用に支障を来すおそれのある有害な変形、振動が生じないとみなせる限界の状態	・主げた・横げたの母材及び溶接継手では降伏強度に到達しないとみなせる限界の状態 ・主げた・横げたの高力ボルト摩擦接合継手部では、すべりは生じないとみなせる限界の状態 ・桁や床版のたわみが橋の機能に影響がないとみなせる限界の状態 ・発散振動が発現せず、かつ供用に支障をきたす限定的振動が発現しないとみなせる限界の状態
	C	・耐荷性能を失わないとみなせる限界の状態	・主げた・横げたの母材及び溶接継手では座屈強度あるいは最大強度に到達しないとみなせる限界の状態
偶発作用	A	・力学的特性が概ね線形性を保持し、有害な残留変形が生じないとみなせる限界の状態 ・供用に支障を来すおそれのある有害な変形、振動が生じないとみなせる限界の状態	・主げた・横げたの母材及び溶接継手では降伏強度に到達しないとみなせる限界の状態 ・主げた・横げたの高力ボルト摩擦接合継手部では、すべりは生じないとみなせる限界の状態
	C	・耐荷性能を失わないとみなせる限界の状態	・主げた・横げたの母材及び溶接継手では座屈強度あるいは最大強度に到達しないとみなせる限界の状態

注1) 例えば限界状態Bとして、速やかな機能回復に支障を来さない程度の限定的な鋼部材の腐食やき裂が生じない程度の状態を設定することも考えられる

#### 4.2 部材・構造の限界状態の整理

鋼橋上部構造を構成する部材や構造の限界状態に関しては、橋の重要度、橋全体の性能や各種作用に対して考慮する限界状態に応じて、床版、床組、桁などの部材・構造ごとに具体的に設定することも考えられるが、橋全体系の性能を満足する部材・構造の組合せは複数想定され、各組合せ全てを網羅して橋の限界状態を設定するのは困難であると考えられ

る。このため、部材や構造の限界状態を設定し、これを適切に組み合わせて、橋全体系の性能を代表させることとした。なお、部材や構造の限界状態は、材料・構造によらない普遍的な表現として、①使用目的との適合性、②部材に損傷が生じた場合の修復性、③安全性の観点から、表-4.2.1 に示す通りとした。また、これに基づいて設定した鋼橋上部構造を構成する部材や構造の限界状態を表-4.2.2 に示す。ここで

は部材や構造の限界状態は作用との関係で整理した方が理解しやすいことから、作用を永続作用・変動作用・偶発作用の3つに分類し、それぞれ限界状態を設定することとした。

永続作用とは、設計で考慮する期間内において、ほとんどその大きさが変動することなく継続的に働く作用あるいは非常に高い頻度で構造物に働く作用であり、ここでは腐食、疲労など耐久性に関する限界状態を設定することとし、鋼材の腐食やき裂を生じないとみなせる限界の状態を限界状態 A とした。また、例えば限界状態 B として速やかな機能回復に支障を来さない程度の限定的な鋼部材の腐食やき裂しか生じない限界の状態を設定することも考えられ、適用にあたっては維持管理の条件と併せて検討する必要がある。

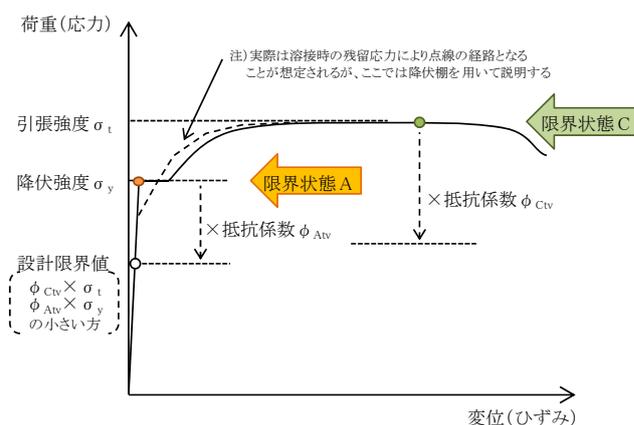
変動作用とは、設計で考慮する期間内において絶えず大きさが変動し、その作用の最大値あるいは最小値が構造物に及ぼす影響が無視できない作用であり、例えば複数の車両群の同時載荷による荷重、風荷重などが考えられる。この変動作用に対して、限界状態 A では部材・構造の力学的特性が概ね線形性を保持し、有害な残留変形が生じないとみなせる限界の状態、または供用に支障を来すおそれのある有害な変形・振動が生じないとみなせる限界の状態とした。限界状態 C では、耐荷性能を失わないとみなせる限界の状態とした。これに対し、引張部材では、限界状態 A は弾性限界である降伏強度であり、限界状態 C は最大強度を示す引張強度である。圧縮部材では、限界状態 C は座屈強度である。

偶発作用とは、設計で考慮する期間内に生じる可能性は極めて小さいが、構造物に及ぼす影響が甚大である作用であり、例えばレベル 2 地震などが考えられる。この偶発作用に対する限界状態は、変動作用に対する限界状態と同じものを設定することとした。

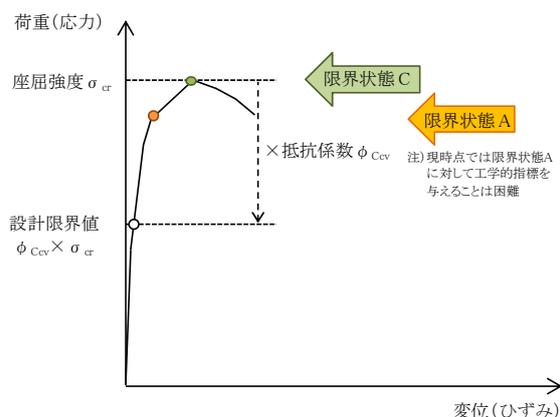
#### 4. 3 設計限界値の設定に関する検討

部分係数設計における設計限界値は、部材強度の特性値に抵抗係数を乗じた値として求められる。図-4.3.1 に、変動作用が支配的な状況における引張部材あるいは圧縮部材（座屈の生じる場合）の設計限界値の例を示す。ここでは常時荷重（死荷重+活荷重）のイメージを示す。

引張部材の場合、降伏強度  $\sigma_y$  と引張強度  $\sigma_t$  に対して、それぞれの強度のばらつきや、限界状態、橋



(a) 引張部材



(b) 圧縮部材(座屈の生じる場合)

図-4.3.1 部分係数設計法における設計限界値の例(変動作用の場合)

全体への影響等を踏まえ、適切に抵抗係数を設定する必要がある。限界状態 A では、降伏強度  $\sigma_y$  に抵抗係数  $\phi_{AIV}$  を乗じた点が設計限界値となる。限界状態 C では、引張強度  $\sigma_t$  に抵抗係数  $\phi_{CIV}$  を乗じた点が設計限界値となる。引張強度に対する照査については現行の設計では考慮されておらず、降伏比の大きい高張力鋼 (SM570 材) の場合に対しては、降伏強度に対する安全率が若干高めとなるように設定されている。部分係数設計法では、この部分について引張強度に対する抵抗係数を設定するか、もしくは降伏強度に対する抵抗係数が若干低めとなるように別途設定する必要がある。また限界状態 C の引張強度  $\sigma_t$  に対する安全性を確保するうえで、設計限界値に加えて、 $\epsilon_t$  や降伏比  $\sigma_y/\sigma_t$  に対して制限値を設定することも考えられる。

圧縮部材の場合、限界状態 A は非線形挙動を示す限界であるが、工学的に評価することが難しいことから、限界状態 A を設計に導入することは困難である。限界状態 C では、座屈強度  $\sigma_{cr}$  に抵抗係数  $\phi_{CCV}$

を乗じた点が設計限界値となる。現行設計では自由突出板や圧縮補剛板など、それぞれの基準耐荷力に対し同程度の安全余裕を確保するように設計が行われている。それぞれの基準耐荷力で元になった実験結果のバラツキなどが異なるため、抵抗係数を個別に設定することも考えられる。

抵抗の特性値については、どのような値を設定するかについては議論のあるところであるが、ここでは許容応力度が設定されてきた部材の使用を前提として、現行の設計基準との整合性を踏まえて設定するものとした。つまり、引張部材の例では、限界状態 A の降伏強度の特性値  $\sigma_y$  は保証降伏点であり、限界状態 C の引張強度の特性値  $\sigma_t$  は保証強度である。また、圧縮部材（座屈の生じる場合）では、限界状態 C の座屈強度の特性値  $\sigma_{cr} / \sigma_y$  は、現行規定における基準耐荷力曲線である。なお、抵抗係数の具体的な設定方法については、文献 3) で記述されており、ここでは省略する。

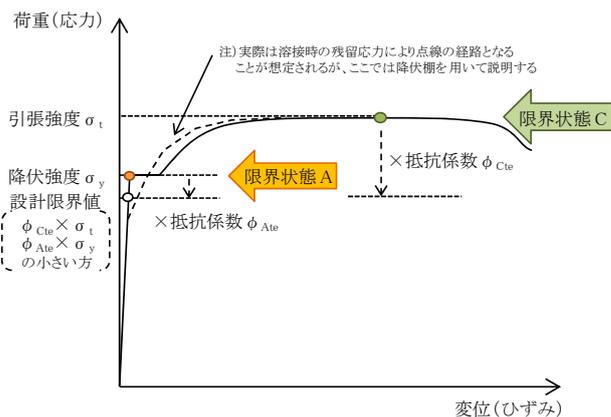
図-4.3.2 に、偶発作用が支配的な状況における引張部材あるいは圧縮部材（座屈の生じる場合）における設計限界値の例を示す。引張部材の場合、限界状態 A では、降伏強度  $\sigma_y$  に抵抗係数  $\phi_{Ate}$  を乗じた点が設計限界値となる。限界状態 C の場合は、引張強度  $\sigma_t$  に抵抗係数  $\phi_{Cte}$  を乗じた点が設計限界値となる。圧縮部材の場合、限界状態 C では、座屈強度  $\sigma_{cr}$  に抵抗係数  $\phi_{Cce}$  を乗じた点が設計限界値となる。現行の設計では発生頻度の低い地震や衝突荷重などの作用に対して、許容応力度の割り増し係数を許容応力度に乗じた点を設計限界値としており、抵抗係数  $\phi_{Ate}$ 、 $\phi_{Cte}$ 、 $\phi_{Cce}$  は、変動作用の抵抗係数  $\phi_{Atv}$ 、 $\phi_{Ctv}$ 、 $\phi_{Ccv}$  よりも大きな値が設定されることとなる。

## 5. まとめ

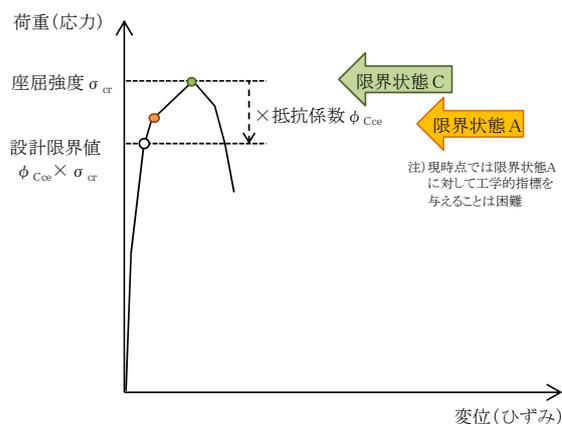
本年度は、高力ボルト摩擦接合継手の合理化に関する検討と、部分係数設計法に関する検討を実施した。高力ボルト摩擦接合継手に関する検討では、厚板を適用した場合のすべり耐力を明らかにするとともに、ボルト列数制限や設計すべり係数に関する検討を行った。部分係数設計法に関する検討では、部材・構造の限界状態を整理し、設計限界値の設定に関する検討を行った。

## 参考文献

1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I～V編，2002.3.



(a) 引張部材



(b) 圧縮部材(座屈の生じる場合)

図-4.3.2 部分係数設計法における設計限界値の例(偶発作用の場合)

- 2) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002.3.
- 3) 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) 村越ら：構造合理化に対応した鋼橋の設計法に関する研究，重点プロジェクト研究報告書（重点プロジェクト研究・戦略研究），2010.
- 5) 森ら：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, 48-59, 2008.1.
- 6) 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) 土木学会：構造物の安全性・信頼性，1976.10.
- 8) 東海鋼構造研究グループ：鋼構造部材の抵抗強度の評価と信頼性設計への適用（上）（下），橋梁と基礎，1980.11-12.
- 9) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART A 一般構造物，1997.5.

- 10) 日本鋼構造協会：土木構造物の性能設計ガイドライン，2001.10.
- 11) 国土技術政策総合研究所：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，国総研資料 第624号,2011.2
- 12) 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試験，橋梁と基礎，1999.9.
- 13) 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，構造工学論文集，vol.44A，1998.314)
- 14) 篠原ら：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.
- 15) 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
- 16) 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，2000.6.
- 17) 谷平ら：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 (No.8)，構造工学論文集，1993.3.
- 18) 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，1992.4.
- 19) 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
- 20) 軈ら：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，H16.9.
- 21) 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
- 22) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，H17.12.ほか
- 23) 例えば，関東地方整備局：施工管理基準及び規格値 (H17)
- 24) 日本道路協会：日本道路史，1977

## 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** : In the next revision of Japanese Specification for 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. In this research, resistance factors for strength limit state are calibrated based on reliability analysis and trial design for superstructures of steel highway bridges. Also, factored resistance equations are proposed to realize cost-effective steel structure using thick steel plate based on experimental and analytical results. In FY2010, the slip-resistance tests for high-strength bolted connections were carried out to find the reasonable values for the slip coefficients and the limitation of the number of bolt rows specified in the above specification. Also, for the introduction of the partial factor design method, the investigation on the limit states of the steel structures were carried out.

**Key words** : rational design, partial factor design method, resistance factor, high-strength bolted connection, slip-resistance