

## 戦-41 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、梁取直樹

### 【要旨】

現在、道路橋示方書<sup>1)</sup>では、要求性能の明確化、充実化およ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 21 年度は、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、各種構造諸元がすべり耐力に及ぼす影響について検討を行った。

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

### 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）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（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、充実化およ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>2)</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、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方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 21 年度は、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、構造諸元等各種パラメータがすべり耐力に及ぼす影響について検討を行った。

### 2. 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、現行道示における一定のすべり係数やボルト列

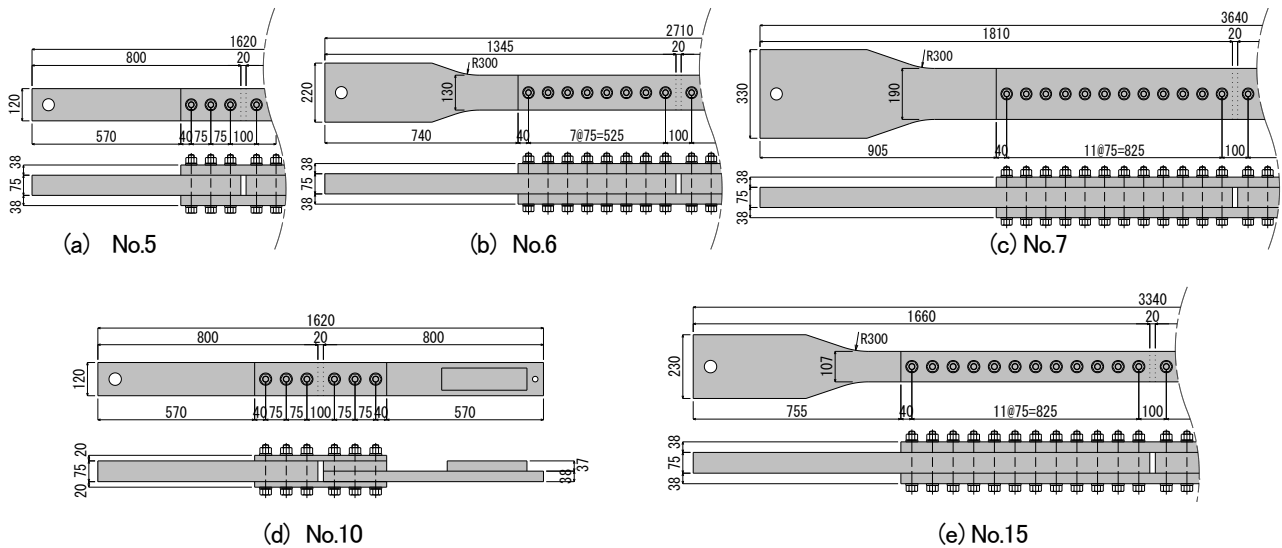
表-1 試験体の基本諸元

試験ケース	基本ケース						フィラーケース			肌隙1mm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	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		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	
母材降伏耐力(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	
$\beta$ ( $\mu=0.4$ )	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	
$\beta$ ( $\mu=0.5$ )	0.48	0.38	0.59	0.60	0.26	0.62	0.59	0.48	0.48	0.48	0.60	0.63	0.48	0.48	1.19	
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							●								●
本年度試験実施	実施				実施	実施	実施						実施	実施	実施	実施

注記) ・ボルト孔径は24.5mm、導入軸力は205 k Nとした。

・道示では、母材降伏耐力の算定に純断面の1.1倍の割増を規定しているが、ここでは割り増さずに算定している。

・比較対象欄の黒丸(●)は、本年度に比較可能な項目を示す。



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、肌隙、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引張試験を行い、すべり耐力に及ぼす影響について検討を行う。なお、最近の研究<sup>3)</sup>では、接合面に厚膜型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>4)</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から、すべり係数の改訂も検討するため、継手試験体の接合面には厚膜型無機ジンクリッチペイントを用いることとした。本年度は、試験計画の一部を実施したので、その結果を報告する。

なお、本研究において、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~22年度)を実施している。

### 3. 試験体

表-1に試験体の基本諸元を、図-1に試験体の寸法

表-2 鋼材の機械的性質

鋼種	板厚 mm	機械的性質			科学成分 %					備考 適用部位と 適用試験体
		降伏点 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	伸び %	C	Si	Mn	P	S	
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
SS400	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
	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 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 <sup>2</sup>	ボルト				ナット		座金		トルク 係数値 平均値
				4号試験片				製品		製品		
				耐力 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	伸び %	絞り %	引張荷重 kN	硬さ HRC	硬さ HRC	硬さ HRC	
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

表-4 材料試験片における材料特性

板厚	降伏応力 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>	ポアソン比 -	伸び %	絞り %
75mm	378	546	207	0.287	35.0	59.2
38mm	389	537	212	0.273	31.8	68.3

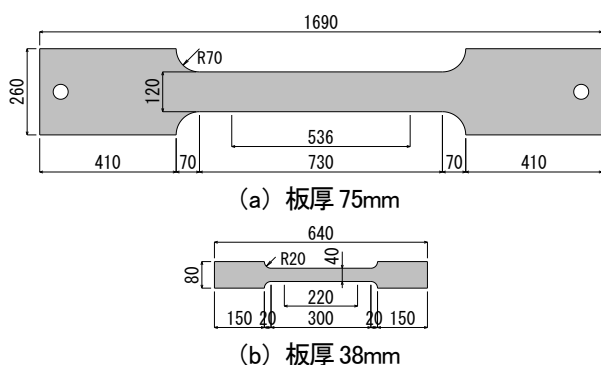


図-2 材料試験片の寸法

形状の代表例を示す。

試験体は、表-1に示すように、板厚、ボルト列数、フィラー厚、肌隙の有無、塗膜厚等を変化させた。比較対象欄に示すように、No.1~7は、板厚およびボルト列数の影響を検討する基本ケースであり、板厚は38、50、75mmとし、ボルト列数は3、8、12列とした。No.8~10はフィラーの影響を検討するケースであり、ボルト3列を対象に、母材の薄板側を38mmと一定にし、厚板側を50、60、75mmと変化させた。No.11、12は肌隙の影響を検討するケースであり、ボルト8列を対象に、母材板厚50mmと75mmに対して肌隙が1mmになるように試験体を製作した。No.13、14は塗膜厚の影響を検討するケースであり、ボルト3列を対象に、No.1の塗膜厚180μm

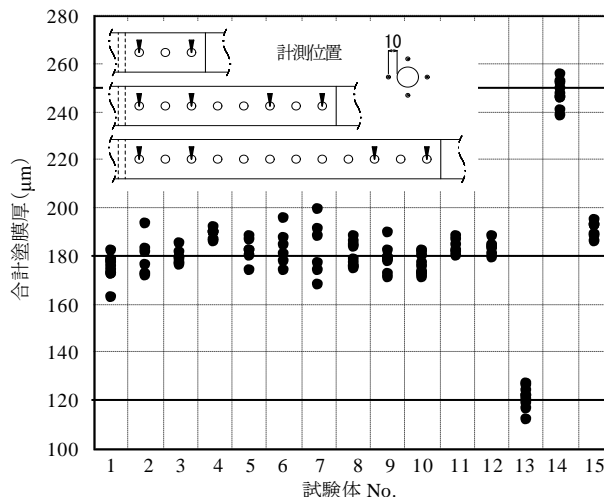


図-3 合計膜厚の計測結果

に対して、それぞれ120、250μmと変化させた。No.15は母材や連結板の降伏の影響を検討するケースであり、ボルト12列を対象としてNo.7の結果と比較する。

試験体数は3体を基本としたが、塗膜厚の影響を検討するNo.1、13、14では5体とした。試験体幅は、すべり係数を0.5と仮定した場合にβ(すべり耐力/母材降伏耐力:すべり耐力=0.4×2面×導入軸力205kN×ボルト本数、母材降伏耐力=母材板厚×(母材幅-24.5mm)×母材降伏応力)が0.6程度になるように設定した。ただし、ボルト列数が3列の場合には、図-1に示すように継手部とつかみ部を同一の幅とし、つかみ部の必要幅から120mmとした。

表-2、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。試験体の母材と連結板に

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。なお、No.15 は母材降伏型であるため、**図-2**に示すように板厚 75mm と 38mm の材料試験片を各 3 体製作して引張試験を実施し、材料特性を確認した。**表-4**に材料試験片における材料特性（3 体の平均値）を示す。**表-2**と比較すると概ね同じ結果であった。

継手試験体の接合面には、工場において無機ジンクリッチペイント（SD ジンク 1500A：関西ペイント）を塗布した。塗膜厚の基本値は、道示の規定厚（90～200 $\mu$ m）を参考に 180 $\mu$ m とし、塗膜厚の影響を検討する No.13、14 では、それぞれ 120、250 $\mu$ m とした。電磁式膜厚計を用いて、各試験体の母材、連結板、およびフィラーの塗膜厚を計測した。**図-3**に合計塗膜厚の計測結果を示す。計測位置は、**図中**に示すように、ボルト列数が 3 列の場合は 2 つの孔を、8、12 列の場合は 4 つの孔を対象とし、ボルト孔周辺の母材側及び連結板のそれぞれ 4 箇所 の平均値の合計値をプロットした。計測の結果、目標値と計測値との差は、 $\pm 20\mu$ m 程度であった。なお、乾燥塗膜中の亜鉛含有量は 82%、亜鉛末の 50% 平均粒径は 17 $\mu$ m であり、道示の規定値を満足していた。

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。また、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 205kN を導入した。ただし、試験時にすべり面が特定し易いように、片側を設計ボルト軸力の 120% 以上で締め付け、非すべり側とした。ボルト軸力の管理方法としては、基本的にはトルク法を用いたが、軸平行部にひずみゲージを貼付したボルト（**図-6**参照）については、ひずみ値により導入ボルト軸力を管理した。トルクおよびひずみの管理値は、事前に軸力計を用いたキャリブレーションにより決定した。

本年度に実施した試験は、No.1、5～7、12～15 である。

#### 4. ボルト軸力の経時変化計測

継手試験体の引張試験は締付け作業から 7 日以上確保して行うものとし、その間のボルト軸力の経時変化を計測した。計測対象は、ひずみゲージを貼付したボルトであり（**図-6**参照）、計測は**表-5**に示す間隔で実施した。

**図-4**に、各試験体 No. から 1 体を抽出し、内側第 1 ボルト（**図-6**のボルト 1）のボルト軸力の経時変化を示す。**図中**の縦軸は、測定したボルト軸力を初期軸力で無次元化した軸力残存率である。なお、同一寸法・条件の各試験体 No. では、ボルトの軸力残存率は同程度であ

表-5 ボルト軸力の経時変化の計測間隔

測定間隔	締付け作業時	締付け終了後	
	5秒	0～6時間	6時間～7日
		1分	1時間

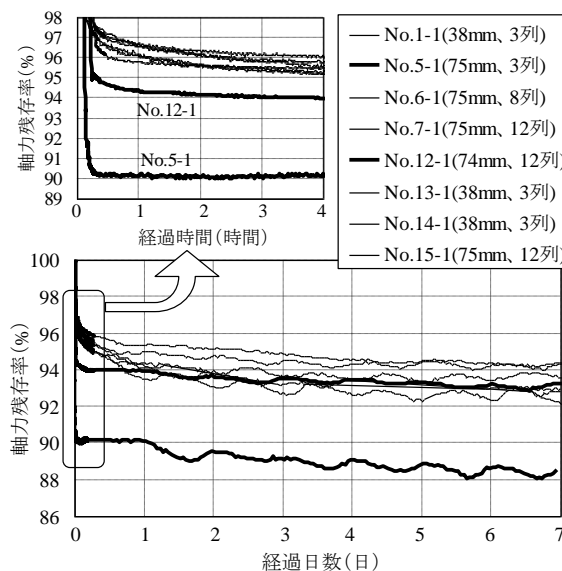


図-4 ボルト軸力の経時変化

った。

ボルト軸力の低下は、締付け作業時および直後が顕著であり、No.5-1 および No.12-1 が大きかった。No.5-1 は、母材厚 75mm、ボルト 3 列の試験体であるが、大きく低下した原因としては、6. で後述するように初期不整による肌隙の影響と考えられる。No.12-1 は、肌隙 1mm を有する母材厚 74mm、ボルト 8 列の試験体である。肌隙がある場合、内側第 1 ボルトを締め付ける際に、連結板に曲げ変形が生じるが、肌隙が残っている場合には第 2 ボルトを締め付ける時にも変形が増加するため、第 1 ボルトの軸力が大きく減少すると考えられる。

締付けから 7 日後の軸力残存率は、No.5 が 88% 程度、それ以外が 93% 程度で、約 6% の差があった。しかしながら、1 日後から 7 日後までの低下量は、ほぼ同一であり、2% 程度であった。既往の研究<sup>5,6)</sup>によると、無機ジンクリッチペイントを用いた場合、軸力残存率は 95～80% 程度であり、本試験体の軸力残存率は、比較的高いものであった。

#### 5. すべり耐力試験

##### 5.1 試験方法

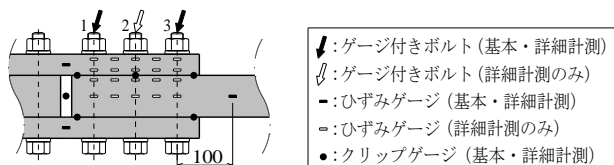
すべり耐力試験は、ボルト締付け作業から 7 日以上経過してから実施した。試験には、ボルト列数が 3 列の場合には 2000kN 万能試験機（以下、2MN 試験機）を用い、



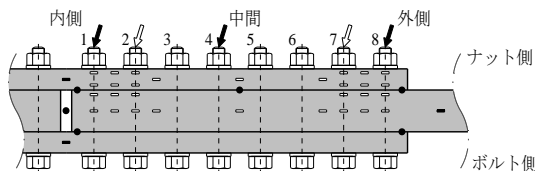
図-5 試験状況(No.1)

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。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 試験機を用いた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 試験機を用いた場合は、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、母材降伏型の 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。試験状況を図-5に示す。

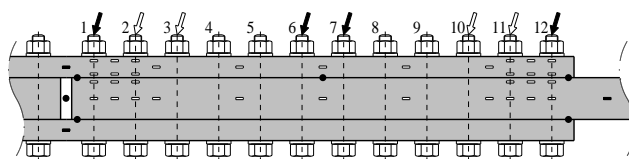
試験時には、ボルト軸力、継手部両側面のひずみ（ゲージ長 5mm）を計測するとともに、クリップ変位計により、母材間の相対変位および母材と連結板の相対変位を計測した。図-6に、各計測位置を示す。ボルト軸力と継手部両側面のひずみは、各試験体 No.で 1 体のみ詳細に計測するものとし、それ以外は計測点数を若干減らした（以下、前者を詳細計測、後者を基本計測）。試験中は、各データを約 1 秒ピッチで計測した。なお、ボルト軸力は、首下 25mm 位置の軸平行部に対称に 2 枚のひずみゲージ（ゲージ長 5mm）を貼付して平均ひずみ値を計測し、事前のキャリブレーションにより確認されている関係から軸力を求めている。また、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。



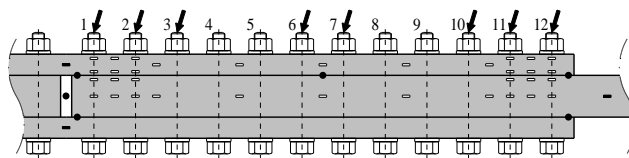
(a) ボルト 3 列の場合(No.1,5,13,14)



(b) ボルト 8 列の場合(No.6,12)



(c) すべり先行型のボルト 12 列の場合(No.7)



(d) 母材降伏型のボルト 12 列の場合(No.15)

図-6 すべり耐力試験時の各計測位置

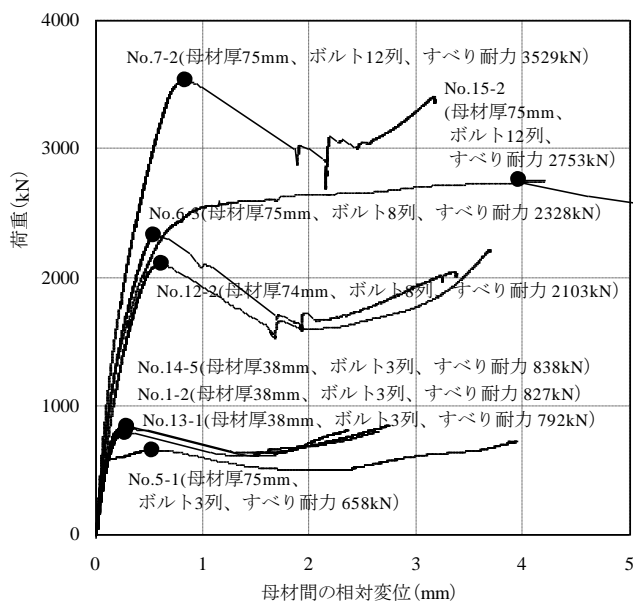


図-7 荷重-母材間の相対変位 関係

## 5.2 試験結果

### (1) すべり耐力とすべり係数

図-7に、各試験体 No.から 1 体を抽出し、荷重と母材間の相対変位の関係を示す。図中には、すべり耐力と判定した点をプロットした。一般にボルト摩擦接合継手の

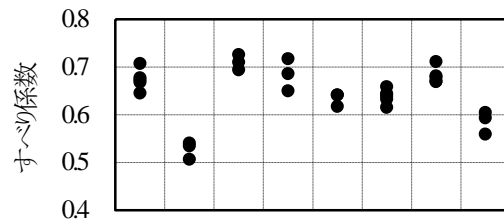
表-6 すべり耐力とすべり係数

ケース	No.	構造諸元				試験結果		
		母材板厚 (mm)	ボルト列数	$\beta_{0.4}$	合計膜厚 ( $\mu\text{m}$ )	すべり耐力 (kN)	すべり係数	平均
基本	1-1	38-38	3	0.38	180	794	0.646	0.67
	1-2					827	0.672	
	1-3					822	0.668	
	1-4					870	0.707	
	1-5					833	0.677	
	5-1	75-75	3	0.21	180	658	0.535	0.53
	5-2					623	0.507	
	5-3					665	0.541	
	6-1	75-75	8	0.49	180	2276	0.694	0.71
	6-2					2381	0.726	
	6-3					2328	0.710	
	7-1					3198	0.650	
	7-2	12	0.47	180	3529	0.717	0.68	
7-3	3375				0.686			
肌隙	12-1	75-74	8	0.50	180	2024	0.617	0.63
	12-2					2103	0.641	
	12-3					2103	0.641	
塗膜厚	13-1	38-38	3	0.38	120	792	0.644	0.64
	13-2					810	0.659	
	13-3					786	0.639	
	13-4					757	0.615	
	13-5					778	0.633	
	14-1	38-38	3	0.38	250	834	0.678	0.68
	14-2					875	0.711	
	14-3					823	0.669	
	14-4					824	0.670	
	14-5					838	0.681	
降伏型	15-1	75-75	12	0.95	180	2975	0.605	0.59
	15-2					2753	0.560	
	15-3					2918	0.593	

引張試験では、すべり時に大きな音が発生し、荷重が急激に下がるようであるが、本試験では音を生じず荷重が徐々に低下した。表-6に本試験のすべり耐力と設計軸力 205kN を用いて算定したすべり係数を示す。また、図-8に本試験のすべり係数を示す。すべり係数は、すべて 0.5 以上であった。

母材厚の影響を検討するため、No.1 (38mm) と No.5 (75mm) のすべり係数を比較する。母材厚が薄い No.1 の方がすべり係数が大きかった。しかしながら、No.5 では、6. で後述するように、初期不整により内側第 1 ボルト部の締付け圧力が小さく、すべり抵抗が小さかったものと推測されるため、母材厚の影響については、来年度に実施する No.2 も含めた検討が必要と考えられる。

ボルト列数の影響を検討するため、No.5 (3列)、No.6 (8列)、No.7 (12列) を比較する。すべり係数は、No.6 が最も大きく、次いで No.7、No.5 の順であった。一般に、ボルト列数が増加するとすべり係数が小さくといわれており、No.6、7 ではその傾向が見られた (No.5 が小さい



試験体 No.	1	5	6	7	12	13	14	15
母材厚 (mm)	38	75		75	75	38	75	
ボルト列数	3	3	8	12	8	3	3	12
塗膜厚 ( $\mu\text{m}$ )	180	180		180	120	250	180	
備考	-	-		肌隙	膜厚	降伏		

図-8 本試験におけるすべり係数

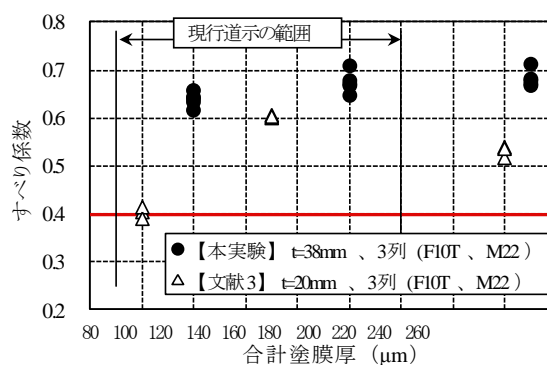


図-9 合計塗膜厚とすべり係数の関係

原因については、6. で後述する)。

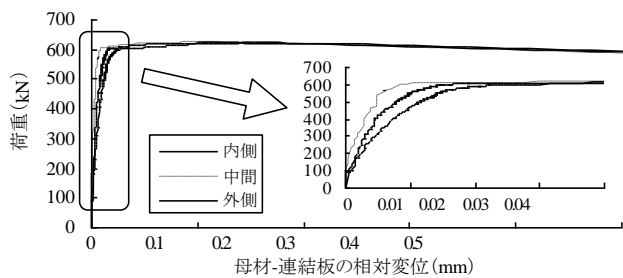
肌隙の影響を検討するため、No.6 (肌隙なし)、No.12 (肌隙 1mm) の結果を比較する。すべり係数は、肌隙により 0.71 から 0.63 に低下した。原因としては、肌隙のある No.12 では、内側第 1 ボルトの締付け圧力が小さく、摩擦抵抗が小さくなるためと考えられる。

塗膜厚の影響を検討するため、図-9に文献 2)の結果も含めて塗膜厚とすべり係数の関係を示す。本試験では、塗膜厚の増加とともにすべり係数が大きくなったが、文献3)では、150 $\mu\text{m}$ での値が最も大きかった。文献6)でも指摘しているように、無機ジクリッチペイントには、塗膜厚の増加とともにすべり係数が大きくなるタイプとある塗膜厚ですべり係数が最大値になるタイプの2種類が存在するようであり、本試験では前者のタイプを、文献3)では後者のタイプを使用した可能性がある。

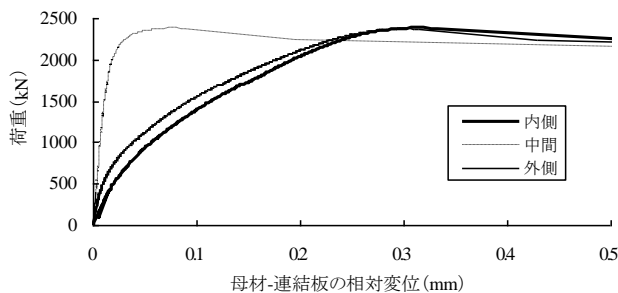
母材降伏の影響に関して、No.7 (すべり先行型)、No.15 (母材降伏型) のすべり係数を比較すると、それぞれ、0.68 と 0.59 であった。詳細は、6. で検討する。

(2) 母材と連結板の相対変位

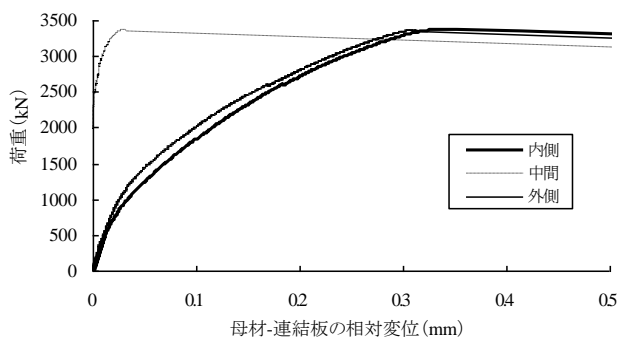
図-10に、No.5、6、7 の母材と連結板の相対変位の計測結果を示す。内側の相対変位が早く増加し、次いで



(a) No.5-2 (ボルト3列、母材厚75mm)



(b) No.6-2 (ボルト8列、母材厚75mm)



(c) No.7-3 (ボルト12列、母材厚75mm)

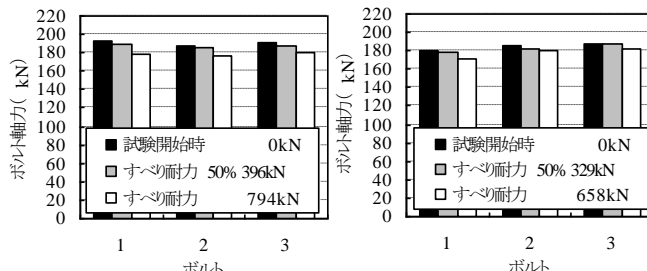
図-10 荷重-母材と連結板間の相対変位 関係

外側、中間の順で増加している。ボルト列数が3列のNo.5は、相対変位の増加に大きな差はないが、ボルト列数が多いNo.6、7の相対変位は、内側と外側での増加傾向と中間とでかなりの差があった。No.6、7の内側と外側の相対変位は、荷重600kN程度から勾配が低下しており、No.5のすべり時と同程度である。すなわち、No.6、7では、荷重600kN程度で内側第1ボルトや外側第1ボルト部がすべりはじめ、その後、中間に向かってすべりがゆっくりと進化したものと推測される。

**(3) ボルト軸力の変化**

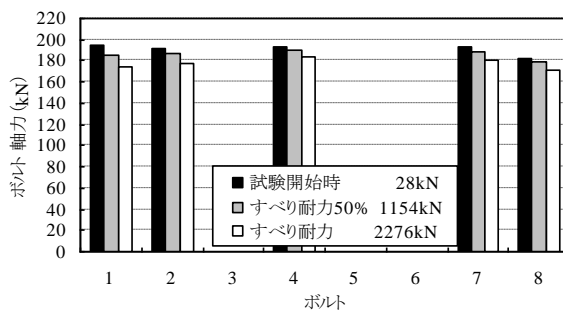
図-11に、試験中のボルト軸力の変化を示す。図中には、試験開始時、すべり耐力の50%時、すべり耐力時のボルト軸力を示した。ボルトの番号は、図-6に対応している。

ボルト軸力は、荷重の増加にともなって減少しており、ボルト列数が3列のNo.1、5におけるボルト軸力の減少は、全ボルトで同程度であるが、多列のNo.6、7では、

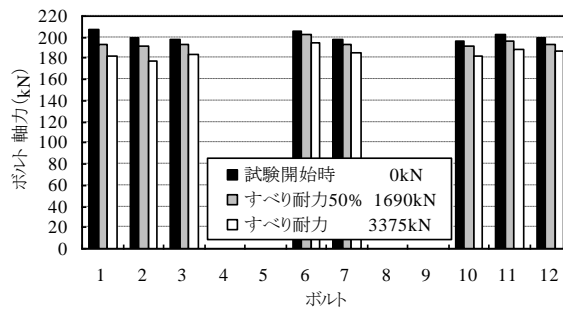


(a) No.1-1 (母材厚38mm)

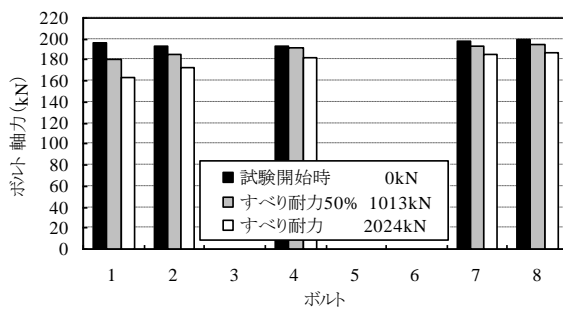
(b) No.5-1 (母材厚75mm)



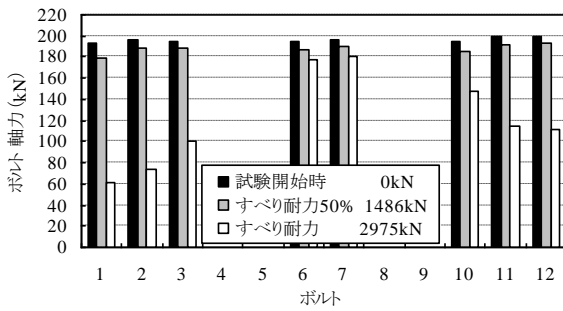
(c) No.6-1 (母材厚75mm)



(d) No.7-3 (母材厚75mm)



(e) No.12-1 (母材厚75mm:1mm肌隙)



(f) No.15-1 (母材厚75mm:母材降伏型)

図-11 試験中のボルト軸力の変化

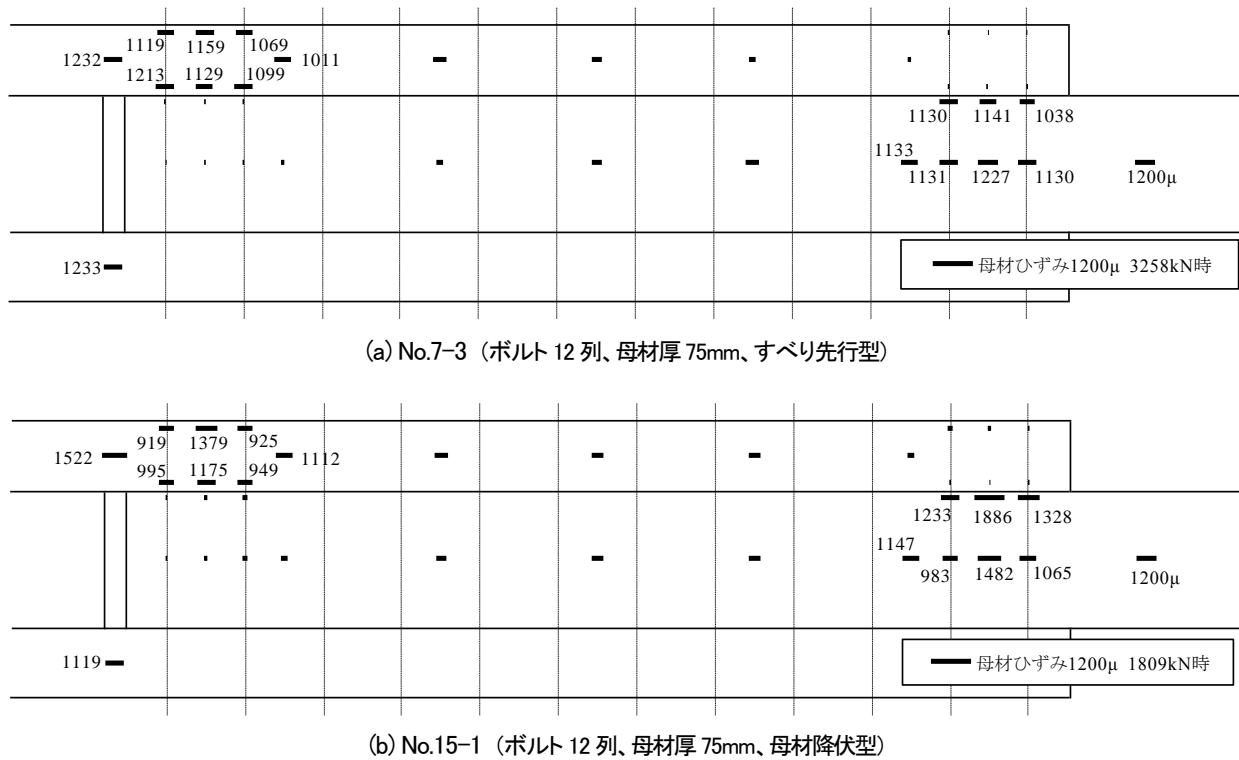


図-12 試験中の側面のひずみ分布

端部の第1ボルト側や最終ボルト側の方が、中央の減少量よりも若干大きかった。また、肌隙1mmのNo.12では、第1、2ボルトの減少量が他ボルトに比べて大きかった。母材降伏型のNo.15では、端部の第1ボルト側や最終ボルト側のボルト軸力が大幅に減少した。これは、第1ボルト側では連結板が、最終ボルト側では母材が降伏して細くなるため、ボルト軸力が減少したと考えられる。

なお、No.13、14のボルト軸力は、No.5とほぼ同様であり、塗膜厚の影響は見られなかった。

#### (4) 側面のひずみ分布

図-12に、No.7（すべり先行型）とNo.15（母材降伏型）の試験中の側面のひずみ分布を示す。図のひずみ分布は、母材のみの断面の側面ひずみが1200 $\mu$ に達した時点を対象とした。

側面のひずみは、内側第1ボルト付近の連結板および最終ボルト付近の母材で大きかった。その部分のひずみは、No.7ではほぼ均等であったが、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かった。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と推測される。

#### 6. すべり面の観察

図-13に、すべり耐力試験の終了後、試験体を解体しすべり面を撮影した結果を示す。図は、ボルト側（図-6参照）の面の写真であり、右がすべり側、左が非すべり側である。

No.6では、すべり痕が広範囲に分布しており、全ボルト孔の周辺が接触していたと考えられる。

No.1、5を比較すると、No.5では、内側の縁端部のすべり痕が濃く、内側第1ボルト部のすべり痕が薄いことが確認できた。これは、内側第1ボルト部よりも母材縁端部の方が厚いため、肌隙がある場合と同様に、内側第1ボルトの締付け圧力が小さくなり、すべり抵抗が小さくなったものと考えられる。

No.7でのすべり痕は、内側第1ボルト部が薄く、他のボルト部でも濃い部分と薄い部分があった。このため、No.7のすべり係数は、No.6に比べて小さかったものと考えられる。

No.12は、肌隙1mmを有する試験体であり、内側第1ボルト付近にすべり痕は見られなかった。肌隙により、内側第1ボルト付近では、ほとんど接触してなかったものと考えられる。

No.15は、母材降伏型の試験体であり、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



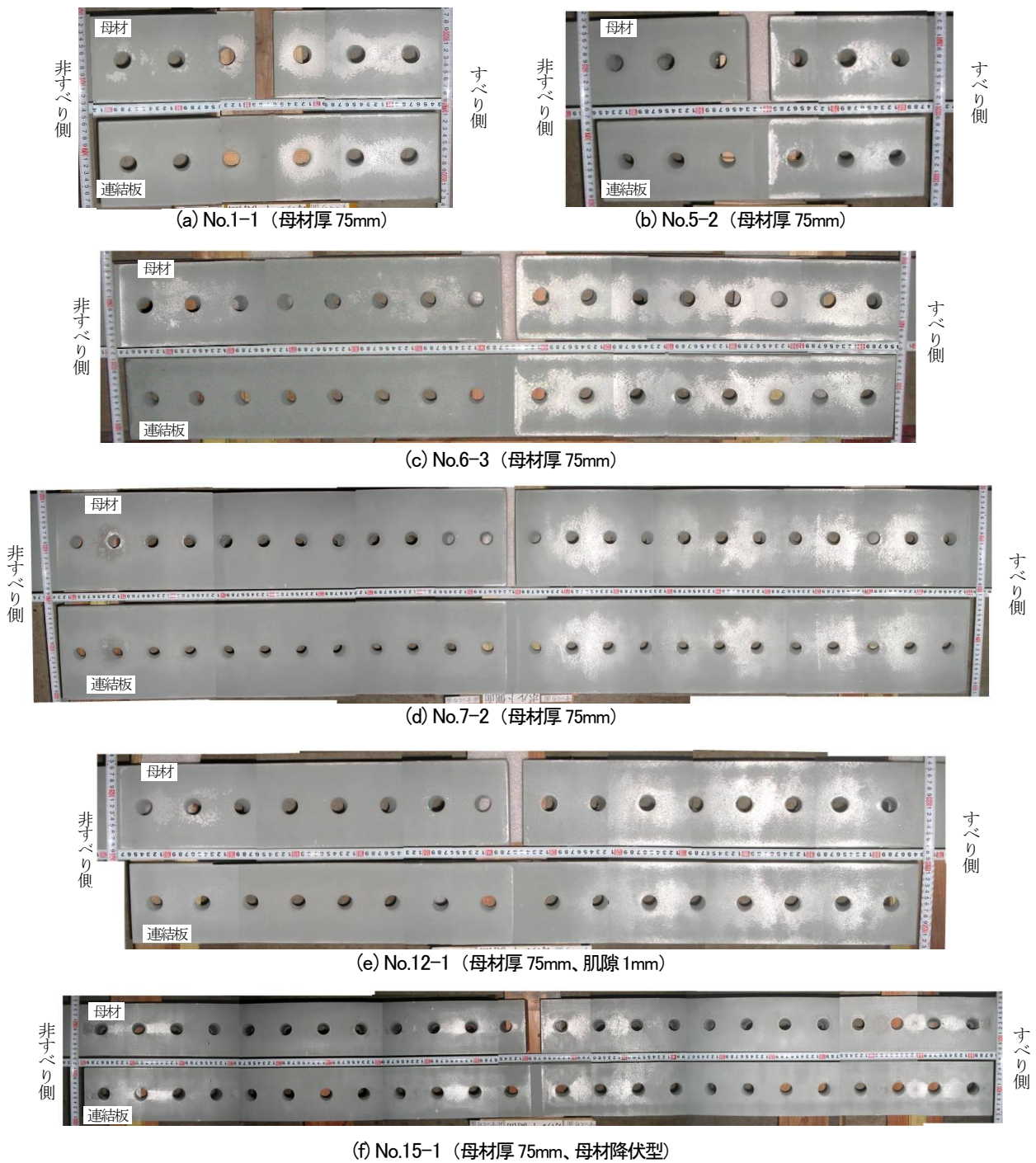


図-13 すべり面の観察結果

にすべり痕が集中していた。図-14に、最終ボルト位置での母材の降伏状態を示す。ボルト孔が楕円に変形し、孔引き断面が細くなっていることが確認できる。一方、ボルト孔を結ぶ部分は、細くならなかったため、このようなすべり痕が生じたものと考えられる。

## 6. おわりに

本年度は、高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に関して試験計画の一部を実施した。その結果、いずれの試

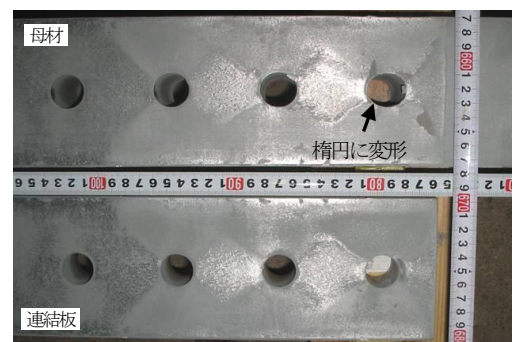


図-14 No.15 の最終ボルト位置での母材の降伏

験体においても、すべり係数は0.5以上確保されており、道示でのすべり係数0.4を上回ることを確認した。次年度には、残りの試験を行うとともに、FEM解析により各種パラメータの影響を補うことにより、厚板鋼板に高力ボルト接合継手を適用した場合の設計の合理化に向けた検討を実施していく。また、各種強度照査式における抵抗係数の設定に向けた検討を進めていく。

### 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) 独立行政法人土木研究所：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.
- 3) 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、48-59、2008.1.
- 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) 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、267-278、2006.4.
- 6) 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.

## STUDY ON DESIGN RATIONALIZATION FOR STEEL BRIDGES

**Budget** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2009-2013

**Research Team** : Bridge and Structural Technology Research Group

**Author** : Jun MURAKOSHI

Naoki YANADORI

**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 FY2009, the slip-resistance tests for high-strength bolted connections were carried out, and the effects of structural detail on the slip resistance were investigated.

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