

# 予すべりが生じた高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験

Slip Coefficient of High Strength Bolted Connections with Pre-slided Contact Surfaces

小笠原 照夫<sup>\*1</sup>  
Teruo OGASAWARA

田坂 康介<sup>\*2</sup>  
Kosuke TASAKA

岩井 学<sup>\*3</sup>  
Manabu IWAI

米山 徹<sup>\*4</sup>  
Tooru YONEYAMA

和田 浩介<sup>\*5</sup>  
Kosuke WADA

I断面桁や鋼床版の併用継手で問題となっている一旦すべりが生じた高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数について、予すべりの方向と量などをパラメータとした一連の実験の結果が報告されている。ここでは、設計ボルト軸力の60%のボルト締め付け力で仮締めした状態で予すべりを与えた後、設計ボルト軸力で締め付けたトラフリブあるいはI断面桁ウェブを模擬した試験体の引張試験を行い、予すべり量や方向によらず、設計ボルト軸力で締め付けた後のすべり係数は予すべりのない継手と同程度であるという結果を示している。

キーワード：併用継手、高力ボルト継手、予すべり、すべり係数

## 1. はじめに

少数主桁橋は主桁が大断面となり、フランジが50mmを超える厚板となることがある。このような厚板のフランジの接合に高力ボルト摩擦接合継手を用いると、引張フランジがボルト孔の断面控除によりさらに厚くなる、過度な高力ボルト本数と列数となる、景観性に劣ることなどが懸念される。また、全断面溶接継手を用いると、開先精度や部材形状を確保するためのエレクションピースの設置と部位によっては溶接完了後にその撤去が必要になる、ウェブは上進溶接となるため入熱量が大きくなる、現場工期が長くなることなどが懸念される。このような問題を緩和する目的で、フランジを溶接接合、ウェブを高力ボルト摩擦接合とした併用継手が用いられることがある。

鋼床版の現場継手では、デッキプレート表面の平坦性を確保するため、橋軸方向については、デッキプレートとトラフリブとも、溶接接合されていた。しかし、トラフリブの溶接接合は片面から行われることから、溶接品質の確保が難しく、それが原因となって数多くの疲労損傷事例が報告されている。そのため、現在ではデッキプレートを溶接継手、トラフリブを高力ボルト摩擦接合継手で接合する併用継手が一般的となっている。

道路橋示方書<sup>1)</sup>では、上フランジ（鋼床版含む）が

溶接接合、ウェブおよび下フランジが高力ボルト摩擦接合とする場合は、上フランジの溶接前に下フランジおよび下フランジからウェブ高さの1/3程度の範囲をボルトで締め付けても、経験的に問題はないとしている。また、内部応力が導入された継手や部分的にすべりが生じた継手の耐力については、不明な点が多いことから、溶接の完了後に高力ボルトを締め付けるのを原則としている。さらに、溶接前の仮締めボルトの使用についても、ボルトの締め付け軸力の程度や締め付け範囲について十分に検討しなければならないとしている。このように、併用継手の力学的挙動については不明な点が多いとされている。ここでは、ボルトを仮締めした継手が溶接によってすべった後、本締めした場合の継手のすべり耐力について検討する。

併用継手は既にいくつかの橋梁に適用されており、それに関連した検討が行われている。例えば、宿毛高架橋を対象として弾塑性有限要素解析を行うことにより、手締めボルト行数とフランジの引張残留応力、そしてウェブボルトの部分すべりの発生について検討されている<sup>2)</sup>。また、在家塚第3高架橋の施工では、ウェブを仮締めボルトで連結してフランジを現場溶接（仮締めボルトを用いた継手に溶接収縮によるすべりを許容）し、その後ウェブを高力ボルトで本締めすることを想定し、適切な仮締

\* 1 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部技術部 部長

\* 2 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部技術部大阪技術課

\* 3 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部技術部東京技術課 係長

\* 4 川田工業㈱北陸事業部富山工場 工場長

\* 5 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部四国工場生産技術課 係長

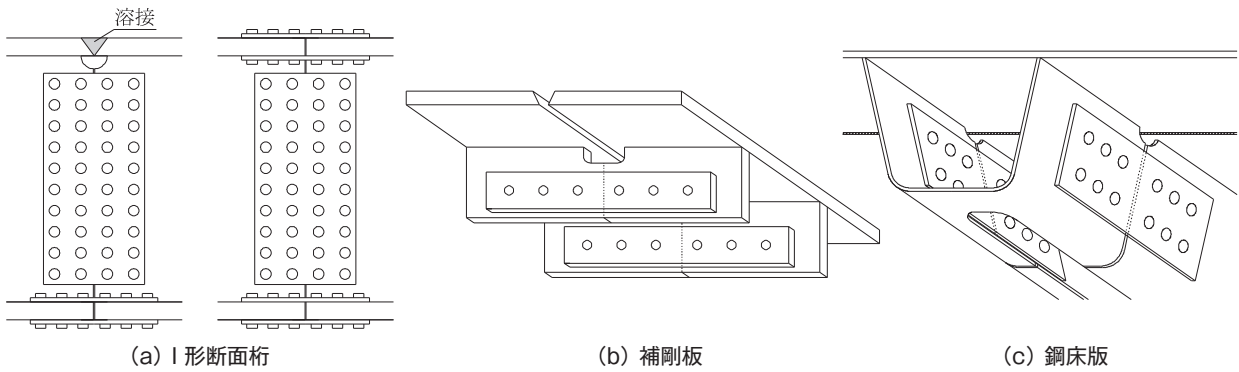


図1 溶接と高力ボルト摩擦接合の併用継手

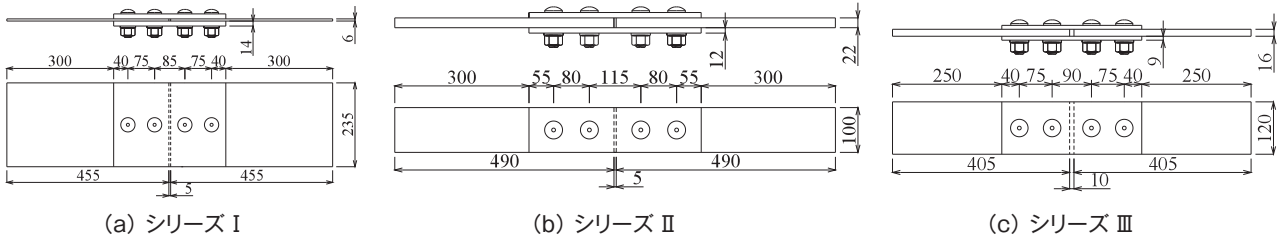


図2 試験体の形状・寸法

めボルトの締付け軸力についてすべり試験を行うことにより検討されている<sup>3)</sup>。名古屋南Nランプ橋では、高力ボルト継手で接合されたエレクションピースあるいはウェブが荷重を受けている場合と受けていない場合で、フランジの現場溶接を行う際の開先変動による溶接高温割れと溶接施工時に高力ボルト継手にすべりが発生した場合の溶接部への影響について、実物大の部分模型の試験を行うことにより検討されている<sup>4)</sup>。第3野木架道橋では、縦リブ等の本部材とエレクションピースで溶接による収縮や変形を拘束し、溶接終了後に本部材の連結板を取替える方法と、エレクションピースのみで溶接による収縮や変形を拘束する施工手順が検討されている<sup>5)</sup>。

以上のようにこれまででは、溶接前に締付けた高力ボルト部に溶接収縮による部分すべりを生じさせない、あるいは部分すべりが生じても所要のすべり係数を確保するための施工方法の検討に重点が置かれており、一旦すべった継手のすべり耐力が十分に明らかにされているとは言い難い。

ここでは、設計軸力の60%でボルトを仮締めした状態で溶接を行い、その際に継手にすべりが生じた状態を想定し、ボルトと連結板をそのままの状態でのボルトを設計ボルト軸力で締め付けた場合のボルト継手のすべり耐力について検討した結果を報告する。ここで想定している併用継手は、図1に示すように、I形断面桁の一方のフランジもしくは両方のフランジを溶接接合でウェブを高力ボルト摩擦接合とした継手、箱形断面桁のフランジが溶接接合で縦リブ(平リブ)を高力ボルト摩擦接合とした継手、そしてデッキプレートが溶接接合でトラフリブを高力ボルト摩擦接合とした継手である。

## 2. 試験体

試験体は、以下の3シリーズからなっている。各シリーズの試験体の形状と寸法を図2に示す。シリーズIは、鋼床版のトラフリブを、シリーズIIとIIIはI形断面桁あるいは箱形断面桁のウェブあるいは縦リブをモデル化したものである。各シリーズ試験体の母板と連結板の加工は、以下の手順で行った。まず、鋼板から母材と連結板をガス切断で切り出し、ボルト孔をドリルで明け、ボルト孔周辺のまくれをグラインダーで切削した。その後、グリッドブラストで素地調整(ISO Sa2.5)を行い、JIS K5553に規定される厚膜型無機ジンクリッチペイントをエアレススプレーで塗装した。

試験体に用いた鋼材の機械的性質と化学成分を表1に示す。シリーズI試験体の母板の厚さは標準的なトラフリブの板厚を想定して6mm、連結板の厚さは14mmとしている。また、すべりが母材の降伏に先行するように、母板と連結板の材質をSM570とするとともに、それらの幅を235mmとした。シリーズIIの試験体の母板と連結板にはSM490A、シリーズIIIの試験体にはSM490YAを用い、すべり先行となるように母板と連結板の厚さと幅を設定した。ボルトにはトルシア形高力ボルトS10T-M22を用い、ボルト孔径は拡大孔を想定して26.5mmとした。母板と連結板の組み立てにはドリフトピンを用いて、母板と連結板のボルト孔の位置が一致するように行っている。ただし、シリーズIIIのIII-E試験体とIII-H試験体では、母板と連結板のボルト穴の位置を2mm程度ずらしている(表5)。

シリーズIの試験では、塗膜厚、予すべりとその方向、仮締めボルト本数、予すべり後の継手の解体の有無をバ

表1 鋼材の機械的性質と化学成分

(a) シリーズI

使用部位	鋼種	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分 (%)												
			降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	B	Cr	Nb	V	Pcm	Ceq
母板	SM570TMC	6	503	596	33	0.09	0.26	1.57	0.006	0.002	0.02	0.02	0.0001	0.09	0.02	0.04	0.19	0.38
連結板	SM570TMC	14	543	642	34	0.09	0.28	1.54	0.013	0.002	0.02	0.02	0.0001	0.03	0.04	0.04	0.18	0.36

(b) シリーズII

使用部位	鋼種	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分 (%)						
			降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	C	Si	Mn	P	S	Pcm	Ceq
母板	SM490A	22	467	557	24	0.13	0.3	1.38	0.012	0.002	0.21	0.37
連結板	SM490A	12	385	541	24	0.17	0.28	1.46	0.022	0.004	0.25	0.43

(c) シリーズIII

使用部位	鋼種	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分 (%)											
			降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	B	Cr	V	Pcm	Ceq
母板	SM490YA	16	412	550	25	0.16	0.42	1.44	0.015	0.004	0.02	0.01	0.0001	0.02	0.06	0.25	0.43
連結板	SM490YA	9	432	556	23	0.15	0.43	1.45	0.015	0.004	0.02	0.03	0.0001	0.02	0.06	0.25	0.42

表2 試験条件と試験結果 (シリーズI)

Case	試験体	着目	仮締めボルト本数	No	△上 ▽下	膜厚 (μm)	方向	予すべり			先行	すべり荷重 (kN)	本すべり				
								予すべり量 (mm)					試験体	すべり係数			
								左	右	平均					S: 予すべり側	F: 固定側	
A	塗膜厚の影響 (最小厚:45μm)	-	-	1	△	45	-	-	-	-	○	485.50	0.59	0.59			
								-	-	-	○	501.00	0.61				
								-	-	-	○	460.00	0.56				
B	塗膜厚の影響 (標準:75μm)	-	-	1	△	75	-	-	-	-	○	499.00	0.61	0.61			
								-	-	-	○	503.50	0.61				
								-	-	-	○	491.50	0.60				
C	塗膜厚の影響 (最大厚:100μm)	-	-	1	△	100	-	-	-	-	○	499.00	0.61	0.63			
								-	-	-	○	535.00	0.65				
								-	-	-	○	507.00	0.62				
D	予すべりの影響 (最小厚:45μm)	2	2	1	△	45	圧縮	0.05	1.20	0.63	-	-	-	○	476.50	0.58	0.59
								-0.05	1.65	0.80	-	-	-	○	498.50	0.61	
								0.20	1.05	0.63	-	-	-	○	483.50	0.59	
E	予すべりの影響 (標準:75μm)	2	2	1	△	75	圧縮	0.10	0.55	0.33	-	-	-	○	434.00	0.53	S
								-	-	-	-	-	-	○	488.00	0.60	F
								0.00	2.70	1.35	-	-	-	○	518.50	0.63	
F	予すべりの影響 (最大厚:100μm)	2	2	1	△	100	圧縮	0.10	1.00	0.55	-	-	-	○	534.50	0.65	S
								-	-	-	-	-	-	○	531.50	0.65	F
								-0.50	2.50	1.00	-	-	-	○	537.50	0.66	
G	仮締めボルト本数の影響	1	2	1	△	100	圧縮	0.00	1.10	0.55	-	-	-	○	511.00	0.62	S
								-0.95	2.50	0.78	-	-	-	○	517.00	0.63	F
								-0.85	2.20	0.68	-	-	-	○	505.50	0.62	
H	予すべり方向	2	2	1	△	75	引張	-0.90	-1.00	-0.95	-	-	-	○	504.50	0.62	S
								-0.50	-0.50	-0.50	-	-	-	○	522.50	0.64	F
								-0.50	-0.50	-0.50	-	-	-	○	510.00	0.62	
I	予すべり後一旦 SPL 取外し	2	2	1	△	75	圧縮	-	-	-	-	-	-	○	418.00	0.51	S
								0.50	1.95	1.23	-	-	-	○	438.50	0.53	F
								0.20	1.90	1.05	-	-	-	○	477.50	0.58	

表3 塗膜厚測定結果 (I-B, D, E, F)

Case	目標値 (μm)	平均値 (μm)		最小値 (μm)		標準偏差 (μm)	
		測定値	規格値	測定値	規格値	測定値	規格値
I-B	75	78	68 以上	65	53 以上	5.8	15 以下
I-D	45	47	41 以上	36	32 以上	5.3	9 以下
I-E	75	76	68 以上	65	53 以上	4.6	15 以下
I-F	100	103	90 以上	92	70 以上	6.6	20 以下

表4 試験条件と試験結果 (シリーズII)

Case	試験体	着目	仮締めボルト本数	No	△上 ▽下	予すべり			先行	すべり荷重 (kN)	本すべり	
						予すべり量 (mm)					試験体	すべり係数
						左	右	平均				
A	基準試験体	-	-	1	△	-	-	-	○	529.25	0.65	0.64
						-	-	-	○	507.67	0.62	
						-	-	-	○	519.44	0.63	
						-	-	-	○	556.23	0.68	
						-	-	-	○	516.01	0.63	
B	予すべり後解体あり	2	2	1	△	0.78	0.79	0.78	○	469.41	0.57	0.57
						-	-	-	○	538.08	0.66	
						0.52	0.51	0.51	○	460.09	0.56	
						0.49	0.48	0.49	○	460.58	0.56	
						-	-	-	○	522.87	0.64	
C	予すべり後解体なし	2	2	1	△	0.54	0.53	0.54	○	546.91	0.67	0.69
						0.55	0.58	0.57	○	632.25	0.77	
						0.51	0.51	0.51	○	534.65	0.65	
						-	-	-	○	566.53	0.69	
						0.58	0.65	0.61	○	566.04	0.69	

ラメータとしている。それらの試験条件、塗膜厚と試験体数を表2に示す。仮締めボルト本数の欄に - が記されているものは、予すべりなしで標準ボルト軸力で締め付けた試験体であることを意味している。また、予すべり後解体の記載のないものは、仮締めした（設計ボルト軸力の60%）ボルトを予すべり後にそのまま本締めしたものである。表中の塗膜厚は、目標値である。試験前

に電磁式膜厚計で測定した塗膜厚は、目標値とほぼ一致していた。参考のために測定結果の一部を表3に示す。

シリーズIIの試験では、予すべり後の継手の解体の有無がすべり係数に及ぼす影響を検討している。シリーズIIIの試験では、予すべり量、予すべり後解体して清掃、予すべり後の浸水、予すべり後のボルトのリラクゼーションをパラメータとしている。それらの試験条件と試



験体数を表4と表5に示す。なお、シリーズIIとIIIの試験体の母板と連結板の塗膜厚は75μmとした。

表5 試験条件と試験結果 (シリーズIII)

Case	試験体 着目	仮締め ボルト 本数	No	予すべり			本すべり		試験体 S:予すべり側 F:固定側	すべり係数								
				予すべり量 (mm)			先行	すべり 荷重 (kN)										
				左	右	平均												
A	基準試験体	-	1	△	-	-	-	○	541.02	0.66	-	0.62						
				▽	-	-	-	○	474.80	0.58								
				△	-	-	-	○	518.46	0.63								
				▽	-	-	-	○	534.65	0.65								
				△	-	-	-	○	500.31	0.61								
				▽	-	-	-	○	519.44	0.63								
				△	-	-	-	○	507.18	0.62								
				▽	-	-	-	○	503.25	0.61								
				△	-	-	-	○	497.37	0.61								
				▽	-	-	-	○	516.01	0.63								
				△	0.61	0.57	0.59	○	538.08	0.66								
				▽	-	-	-	○	504.23	0.61								
				△	0.62	0.55	0.58	○	549.36	0.67								
				▽	-	-	-	○	509.14	0.62								
				△	0.69	0.63	0.66	○	499.33	0.61								
B	予すべり量 (0.5mm)	2	3	△	-	-	-	○	504.23	0.61	S	0.64						
				▽	-	-	-	○	518.95	0.63								
				△	0.67	0.55	0.61	○	558.19	0.68								
				▽	-	-	-	○	494.91	0.60								
				△	0.63	0.55	0.59	○	494.91	0.60								
				▽	-	-	-	○	528.27	0.64								
				C	予すべり量 (1.0mm)	2	1	△	1.16	1.09			1.12	○	521.40	0.64	S	0.64
								▽	-	-			-	○	516.50	0.63		
								△	1.14	1.04			1.09	○	512.57	0.63		
								▽	-	-			-	○	524.34	0.64		
								△	1.11	1.16			1.13	○	501.29	0.61		
								▽	-	-			-	○	510.12	0.62		
								△	1.16	1.11			1.14	○	535.14	0.65		
								▽	-	-			-	○	529.74	0.65		
								△	1.17	1.14			1.16	○	547.89	0.67		
▽	-	-	-					○	500.31	0.61								
D	予すべり量 (2.0mm)	2	1					△	2.11	1.94	2.03	○	525.33	0.64	S	0.63		
								▽	-	-	-	○	540.04	0.66				
								△	2.22	2.04	2.13	○	540.04	0.66				
								▽	-	-	-	○	532.68	0.65				
								△	2.19	2.16	2.17	○	514.53	0.63				
				▽	-	-	-	○	515.03	0.63								
				△	2.23	2.04	2.13	○	522.87	0.64								
				▽	-	-	-	○	453.71	0.55								
				E	予すべり量 (2.0mm) (寄せる)	2	1	△	2.15	2.18	2.16	○	453.71	0.55			S	0.60
								▽	-	-	-	○	478.73	0.58				
								△	2.20	2.13	2.16	○	525.33	0.64				
								▽	-	-	-	○	501.78	0.61				
								△	2.12	2.22	2.17	○	512.08	0.62				
								▽	-	-	-	○	501.78	0.61				
								△	2.14	2.13	2.14	○	481.67	0.59				
▽	-	-	-					○	507.67	0.62								
△	2.22	2.11	2.17					○	476.77	0.58								
▽	-	-	-					○	506.69	0.62								
F	予すべり後 解体・清掃	2	1					△	1.26	1.30	1.28	○	284.49	0.35	S	0.44		
								▽	-	-	-	○	-	-				
								△	1.11	1.14	1.13	○	342.86	0.42				
								▽	-	-	-	○	382.59	0.47				
								△	1.20	1.21	1.21	○	382.59	0.47				
				▽	-	-	-	○	-	-								
				△	1.26	1.11	1.19	○	402.70	0.49								
				▽	-	-	-	○	-	-								
				△	1.24	1.17	1.21	○	404.66	0.49								
				▽	-	-	-	○	-	-								
				G	予すべり後 リラクゼーション	2	1	△	1.56	1.70	1.63	○	490.01	0.60			S	0.61
								▽	-	-	-	○	516.50	0.63				
								△	1.47	1.63	1.55	○	548.87	0.67				
								▽	-	-	-	○	522.87	0.64				
								△	1.60	1.51	1.55	○	482.16	0.59				
▽	-	-	-					○	523.85	0.64								
△	1.45	1.41	1.43					○	468.43	0.57								
▽	-	-	-					○	533.17	0.65								
△	1.53	1.44	1.48					○	516.50	0.63								
▽	-	-	-					○	523.85	0.64								
H	降雨の影響	2	1					△	2.53	2.28	2.41	○	377.69	0.46	S	0.56		
								▽	-	-	-	○	498.35	0.61				
								△	2.07	2.25	2.16	○	489.52	0.60				
								▽	-	-	-	○	506.20	0.62				
								△	2.28	2.11	2.19	○	493.44	0.60				
				▽	-	-	-	○	525.33	0.64								
				△	2.03	2.19	2.11	○	492.46	0.60								
				▽	-	-	-	○	520.42	0.63								
				△	2.17	2.16	2.17	○	453.22	0.55								
				▽	-	-	-	○	495.90	0.60								

### 3. すべり試験方法

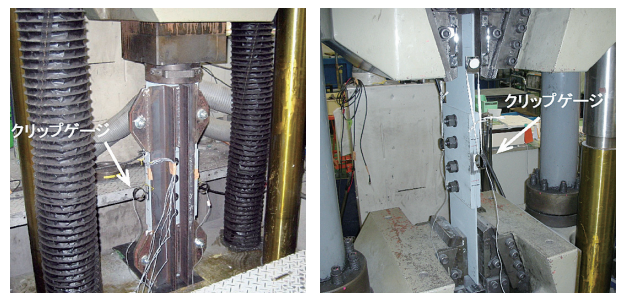
#### (1) シリーズI

予すべり試験とすべり試験は、日本工業試験所に設置された荷重能力2000kNのアムスラー型万能試験機を用いて行った。

表2に示すようにI-A, I-B, I-C試験体では、塗膜厚を45, 75, 100μmと変えている。これらの膜厚は、道路橋仕方書の接合面の規定「接触面の合計膜厚90~200μm」を参考に定めた。I-A, I-B, I-C試験体については、予すべりを与えずに初期の状態からボルトを本締めしている。I-D, I-E, I-F試験体は、塗膜厚を45, 75, 100μmとし、ボルトを仮締め(設計ボルト軸力の60%)した状態で圧縮の予すべりを与え、その後ボルトを本締めしている。I-G試験体は、仮締めボルトの本数を2本ではなく、1本としたものである。I-H試験体は、予すべりの方向を引張としている。I-I試験体は、圧縮の予すべりを与えた後、一旦連結板を取り外し、再度同じ連結板をボルトで本締めすることにより取り付けられたものである。

予すべりを導入する試験体では、予すべりを与える母板を特定するために継手片側のボルトを仮締め、反対側を本締めしている。なお、仮締めボルトの軸力管理は設計軸力の60%の軸力が生じるように調整したナットランナーを用いて行った。写真1(a)に圧縮の予すべりを与える試験の様子を示す。母板が6mmと薄いため、試験体の転倒・座屈防止のために治具を用いて弱軸方向を拘束するとともに、試験体と治具の間にテフロン板を設置して試験体と治具の摩擦抵抗を軽減した。そして、試験体の端を試験機に取り付けた定盤で押すことにより予すべりを与えた。予すべり量の管理は、試験体の両側面の母板間の変位をクリップゲージで測定することによって行った。圧縮の予すべりを与えた場合のすべり量は、試験機のコントロールが難しく、0.28~1.35mm(開口変位を測定した左右の平均)と広い範囲にあった。また、試験体端部の平滑度と直角度には十分に注意を払ったものの、定盤との接触状態が均等ではなく、左右で開口変位が大きく異なっているものもあった(表2)。例えば、一方の開口変位が圧縮側2.50mm、もう一方で引張側0.50mmとなったものもあった。ただし、板幅が広いために母板の回転量は小さいものと判断される。引張の予すべりを与えたI-H試験体で観察された予すべり量は0.50~0.95mmの範囲にあり、また左右の開口変位量の相違は5%以下であった。

予すべりを与えた後、試験体を試験機から取り外し、仮締めしたボルトをシャーレンチでトルシアボルトのピ



(a) 予すべり試験 (圧縮) (b) すべり試験

写真1 試験の状況 (シリーズI)

ンテールが破断するまで締め付けた。そして12時間から24時間後にすべり試験を行った。その様子を写真1(b)に示す。すべり試験は、どちらか一方の母板がすべった時点で終了した。なお、本締め後のすべり試験時には、荷重と開口変位（予すべり試験と同じ）の関係を測定している。

(2) シリーズII, III

予すべり試験とすべり試験には、法政大学建築学科に設置された荷重能力2000kNのアムスラー型万能試験機を用いた。シリーズIIとIIIでは予すべりの方向を引張としている。シリーズIIIのIII-FとIII-H試験体のみ予すべり時のボルトの締め付けを、片側だけではなく、両側とも設計ボルト軸力の60%としている。試験の状況を写真2に示す。本締めした後のすべり試験は、2枚の母板のいずれもがすべるまで行った。

シリーズIIのII-B試験体とII-C試験体では、目標の予すべり量を0.5mmとしたが、実際には0.49~0.78mm(左右の平均)の範囲にあった。また、左右の開口変位にはほぼ差はなく、最大で6%程度であった。

予すべり量は、シリーズIと同様に、母材間の隙間の開口変位をクリップゲージを用いて測定することによって求めた。また、本締め後のすべり試験時には、荷重と開口変位の関係を測定した。シリーズIIIのIII-G試験体とIII-H試験体では、ボルト軸に対称に2枚のゲージを貼付して、ボルト軸力を測定した。



写真2 試験の状況 (シリーズII)

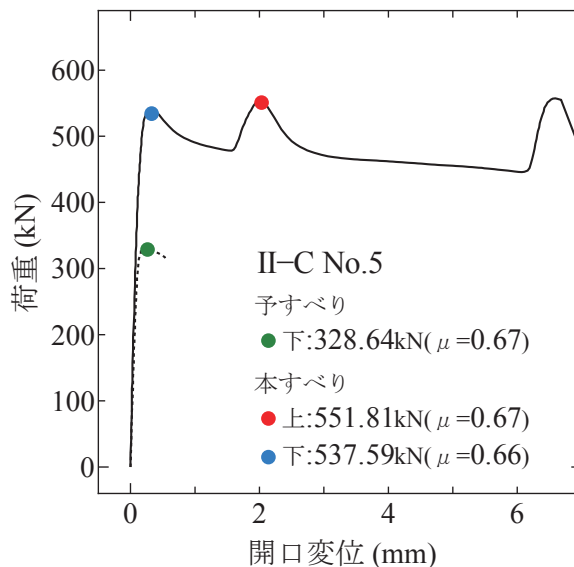


図3 荷重と開口変位の関係の例 (II-C No.5)

4. すべり試験結果

(1) 荷重-開口変位関係とすべり係数の定義

図3に荷重と開口変位の関係の例を示す。これは、II-C試験体No.5で測定されたものである。いずれの場合にも、ある荷重までは荷重と開口変位は線形関係にある。予すべりは荷重328kN程度で生じ、荷重が増加することなく、開口変位が増加し、0.55mm程度となった時点で試験を終了した。除荷した後の開口変位は0.47mmであった。このように弾性変形分だけ除荷によって開口変位が減少している。これは、予すべりを与えた試験体ですべて同じであった。

本締めした後の荷重-開口変位関係は、試験体の片側が滑ることによって、荷重が若干減少し、開口変位が急激に増加している。その後荷重が再び上昇し、もう一方の側の母板がすべっている。この荷重上昇は、先にすべった母板のボルト孔にボルトが接触して支圧状態となったためと考えられる。

すべり係数は、図3に示した荷重-開口変位関係から判断したすべり発生時の荷重と設計ボルト軸力を用いて算出した。

(2) シリーズIの試験結果

シリーズIの試験で測定した各試験体の予すべり量、

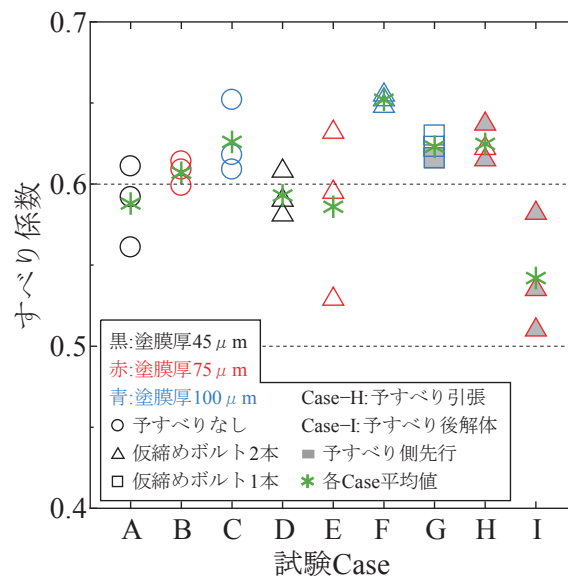


図4 すべり係数の測定結果 (シリーズI)

本締め後の試験で得られたすべり発生順番、そしてすべり係数を表2に示す。また、本締め後の各試験体で得られたすべり係数を図4に示す。

塗膜厚を変えて、初期から本締めした試験体I-A

(45 $\mu$ m), I - B (75 $\mu$ m), I - C (100 $\mu$ m) で得られたすべり係数の平均は、それぞれ 0.59, 0.61, 0.63 であり、塗膜が厚くなるにしたがってすべり係数が高くなっている。しかし、その差は小さく、塗膜厚が道路橋示方書の範囲(接触面の合計乾燥膜厚 90~200 $\mu$ m)であれば、すべり係数に対する塗膜厚の影響はほとんどないといえる。

塗膜厚を変えて、予すべりを与えた試験体 I - D (45 $\mu$ m), I - E (75 $\mu$ m), I - F (100 $\mu$ m) で得られた本締め後のすべり係数の平均は、それぞれ 0.59, 0.59, 0.65 である。なお、これらの試験体のすべりは、すべて初期から本締めした接合面で生じており、予すべりを与えた接合面ですべりが観察されたものはなかった(表 2)。これらの結果から判断して、予すべりを有する接合面のすべり係数は予すべりのない接合面と同程度以上であり、またその傾向は塗膜厚によらないと判断される。

仮締めボルト本数を 1 本とした I - G 試験体においても、本締め後の引張試験でのすべりは、すべて初期から本締めした接合面で生じ、予すべりを与えた接合面ですべりが観察されたものはなかった(表 2)。したがって、仮締めボルト本数を減らしても、予すべりを有する接合面のすべり係数は予すべりのない接合面と同程度以上と判断される。

予すべりの方向を引張とした I - H 試験体では、本締め後の試験でのすべりは、3 体のうち 1 体が予すべりを受けた接合面で、2 体が初期から本締めした接合面で観察された。予すべり面ですべりが生じた場合のすべり係数は 0.62 であり、初期から本締めした面のすべり係数(平均 0.63), I - B 試験体のすべり係数(平均 0.61), I - E 試験体のすべり係数(平均 0.59) とほぼ同じである。すなわち、すべり係数は、すべり方向に依存しないと判断される。

予すべりを与えた後、連結板を一旦外して、再度組み立てて本締めした I - I 試験体でのすべりはすべて予すべりを与えた接合面で生じた。それらのすべり係数は平均で 0.54 であり、I - B 試験体や I - E 試験体に比べて 10%程度低くなっている。

### (3) シリーズⅡの試験結果

シリーズⅡの各試験体のすべり試験結果を表 4、各試験体で得られたすべり係数を図 5 に示す。

Ⅱ - A 試験体は初期からすべてのボルトを本締めして基準となるすべり係数を求めるための試験体であり、そのすべり係数は 0.62~0.68 の範囲にあり、それらの平均は 0.64 である。Ⅱ - B 試験体は 0.5mm を目標として予すべりを与えた後に連結板を一旦解体し、その後本締めした試験体である。Ⅱ - B 試験体のすべりは、予すべりを与えた接合面で先に生じており、それらのすべり係数の平均は 0.57 と、Ⅱ - A 試験体と比べて 10%程

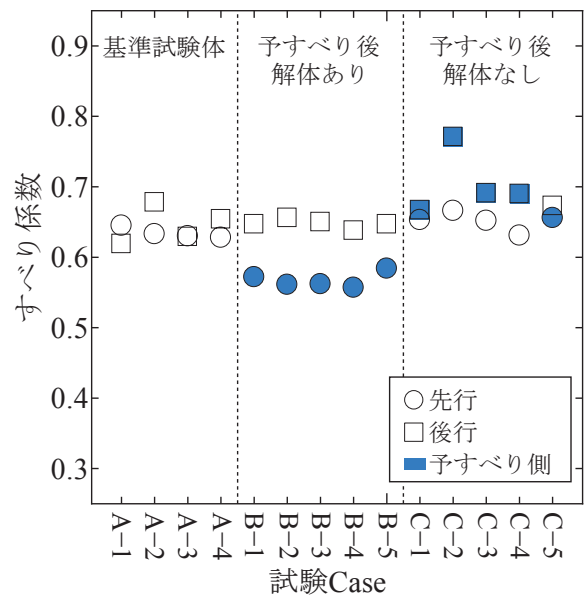


図 5 すべり係数の測定結果 (シリーズⅡ)

度低い。予すべりが生じなかった接合面のすべり係数の平均は 0.65 であり、Ⅱ - A 試験体とほぼ同じである。このように一旦力を加えた後で連結板を外して再度組み立てても、接合面にすべりが生じていなければ、すべり係数に変化はない。

Ⅱ - C 試験体は、0.5mm を目標として予すべりを与えた後にそのまま本締めした試験体である。本締め後のⅡ - C 試験体でのすべりは、5 体の試験体の内 1 体は予すべりを与えた接合面で先行したものの、他の 4 体は予すべりが生じていない接合面で先行した。本締め後の予すべり面のすべり係数は、平均で 0.69 とⅡ - A 試験体よりも若干高い。一方、予すべりを受けていない接合面でのすべり係数の平均は 0.65 と、Ⅱ - A 試験体とほぼ同じである。したがって、本締めの 60%程度 of ボルト締め付け状態ですべり(ここでは 0.5mm 程度)が生じた後にそのまま本締めした時の接合面は、初期から本締めした接合面と同程度以上のすべり係数を有すると考えられる。

写真 3 (a) はⅡ - A 試験体の試験後の接合面、(b) は予すべりを与えた後に解体したⅡ - B 試験体の接合面、(c) はその後本締めをしてすべりが生じた接合面の例を示したものである。また、(d) はⅡ - C 試験体の試験後の接合面(予すべりを与えた接合面)の例を示したものである。本締めをしてすべりが生じた後の接合面(写真 3 (a), (d))には塗料が押し延ばされた様な跡が見られ、ボルト孔周辺では鋼材素地が露出している。さらにその周囲には延ばされた塗料が寄せられて凹凸が生じている。予すべり後に解体した試験体の接合面(写真 3 (b))においてもボルト孔周辺に凹凸が見られるが、本締めをした場合と比べると凹凸が細かく、鋼材素地は露出していない。解体後に本締めをしてすべりが生じた



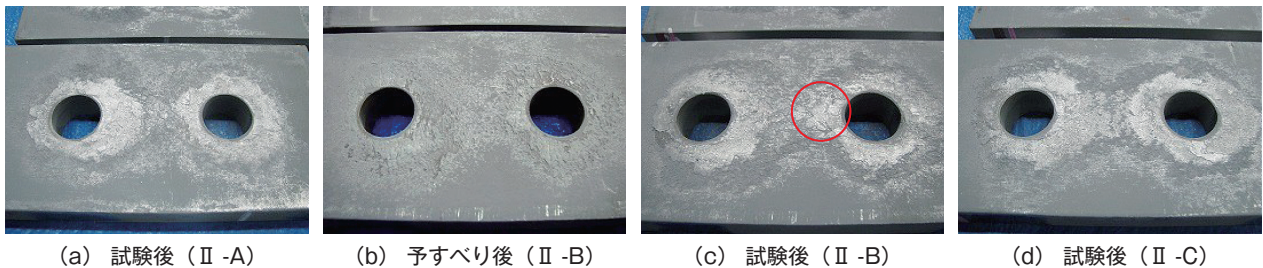


写真3 試験体の接合面の状況

接合面(写真3(c))でも写真3(a)や(d)と同様の表面状況がボルト孔周辺で観察されるが、所々で塗膜がつぶれたようなかたまりが見られる。これは、予すべりの際に浮いた塗膜が、解体した際に剥がれ、それを本締めを行うときに挟み込んだものと思われる。この剥がれた塗膜が潤滑剤となったことが、すべり係数低下の要因とも考えられるが、詳細は不明である。

#### (4) シリーズⅢの試験結果(すべり量の影響)

シリーズⅢの試験結果を表5に示す。Ⅲ-A試験体は初期からすべてのボルトを本締めして基準となるすべり係数を求めるための試験体であり、そのすべり係数は0.58～0.66の範囲にあり、それらの平均は0.62である。Ⅲ-B、Ⅲ-C、Ⅲ-D試験体は、それぞれ目標を0.5、1.0、2.0mmとして予すべりを与えた後に本締めした試験体である。また、Ⅲ-E試験体は、Ⅲ-D試験体と同じく予すべり量の目標値を2.0mmとしたものであるが、母板と連結板のボルト孔を2mm程度ずらして組み立てている。このようにボルト孔をずらした理由は、Ⅲ-D試験体でのボルトのクリアランスが2.25mm程度であり、2.0mmを目標とした場合にボルト軸がボルト孔に接触することがあるために予すべり面のすべり係数が測定できなかったためである。

図6にすべり係数と予すべり量の関係を示す。予すべり量0は、初期から本締めしたⅢ-A試験体のすべり係数を示している。予すべり面のすべり係数は、予すべりの有無、またその量によらずほぼ一定である。なお、予すべり面でのすべりが先行した試験数は、Ⅲ-B試験体で5体中1体、Ⅲ-C試験体で5体中2体、Ⅲ-E試験体で5体中4体であった。このことから、すべり係数は予すべりの有無や予すべり量に依存しないと判断される。

#### (5) シリーズⅢの試験結果(連結板解体の影響)

シリーズⅠとⅡで、予すべりを与えた後、連結板を一旦取り外して、再度組み立てた時のすべり係数は、初期から本締めした継手に比べて10%程度低下していた。そして、その原因は解体したことにより摩擦接合面の擦れた塗膜が剥がれ、これが潤滑剤となったことにあるのではないかと考えた。そこで、Ⅲ-F試験体では、予すべり後解体した際に接合面をスポンジヤスリで清掃し

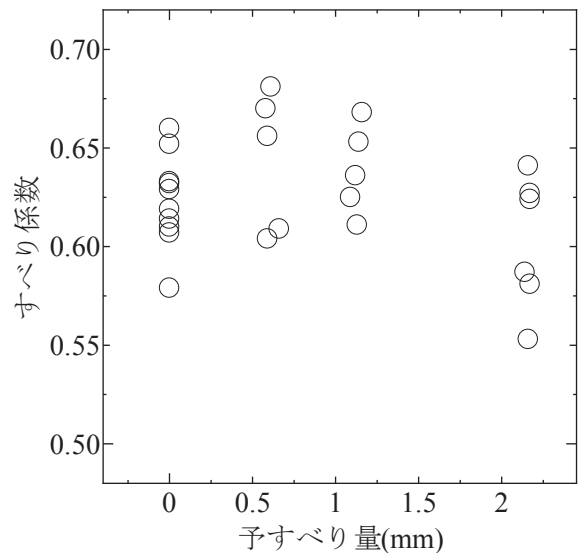


図6 すべり係数と予すべり量の関係(シリーズⅢ)

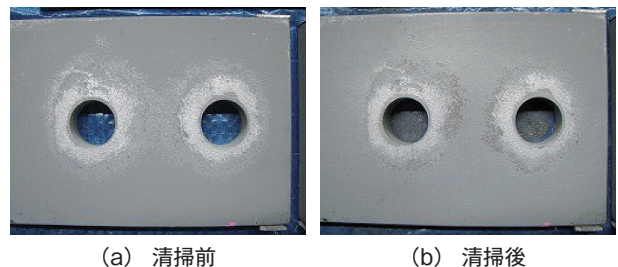


写真4 予すべり後の接合面の状況

た。ここで得られたすべり係数は平均で0.44(表5)と、基準となるⅢ-A試験体に比べて30%程度低い。写真4に予すべりを与えた後に解体した母板表面と、それを清掃した面を示す。両者に明確な差は認められない。清掃によりすべり係数が低下した原因としては、清掃により大半の塗膜が剥がれ、ボルト締めにより接触する部分、すなわち摩擦抵抗を受けもつ表面が小さくなったことなどが考えられるが、その詳細は不明である。

#### (6) シリーズⅢの試験結果(リラクセーション)

図7は、Ⅲ-G試験体の仮締めボルト軸力導入時および予すべり後のボルト本締め時の導入軸力測定結果を示している。ボルト軸力は継手の片側(予すべり側)の2本、5体すべての試験体、計10本のボルトで測定している。

仮締め時の軸力は、目標値123kN(205kN×0.6)よりも高く、その平均は140kN程度である。本締めした

際のボルト軸力の平均は 215kN 程度である。この軸力は、トルシアボルトでは設計軸力の 10%増しの導入軸力が得られるとされていることと対応している。ただし、10 本の内 2 本のボルトは設計ボルト軸力を満たしていない。

本締め後のボルト軸力の変化を図8に示す。図の縦軸は本締め時の初期ボルト軸力からの軸力減少率である。なお、この測定は恒温室内において2ヶ月間行っている。10本のボルトの内の1本を除くと時間に伴うボルト軸力の変化はほぼ一致しており、本締め後10日での軸力低下は6~7%であり、2ヶ月では7~9%となっている。他の1本の2ヶ月後のボルト軸力低下率は13%程度となっている。一般に、無機ジンクリッチペイントを施した場合のボルト軸力低下率は10%程度とされている<sup>6)~8)</sup>。これとここでの結果はほぼ一致しており、一旦すべった接合面のボルトを本締めしても、その時間に伴うボルト軸力の変化は初期から本締めしたボルトと同じと考えられる。

本締め後60日目にすべり試験を行って得た予すべり面のすべり係数は0.57~0.67の範囲にあり、その平均は0.61である。これは、基準であるⅢ-A試験で得られたすべり係数の平均値0.62とほぼ等しい。また、Ⅲ-G試験体のすべりのない接合面で得られたすべり係数の平均値は0.64であった。さらに、Ⅲ-G試験体で予すべり面が先にすべった試験体は5体中3体であった。以上のことより、一旦すべった面のボルトを本締めし、時間が経ても(ここでは60日間)、すべり係数の変化は小さいといえる。このようにすべり係数が低下しなかった原因としては、ボルト軸力の減少がすべり耐力に与える影響と塗料のなじみ等による摩擦係数増大の影響がある程度相殺した<sup>8)</sup>ためと考えられる。また、Ⅲ-G以外の試験体のすべり試験は、ボルト本締め後12~24時間後に行っているため、ボルト軸力の違いは先に示したボルト軸力低下率よりも小さい。

(7) シリーズⅢの試験結果(降雨の影響)

実施工で、連結板と本部材を高力ボルトで仮締めし、その後現場溶接、そして本締めする作業を、一日で完了することは困難であり、部位や養生の方法によっては降雨により連結板や高力ボルト部に水が浸入し、高力ボルト摩擦接合継手の接合面の品質が低下する可能性がある。そこで、Ⅲ-H試験体では仮締めした面に予すべり(目標値2.0mm)を与えた後、一晚(約12時間)浸水し、その後本締めした高力ボルトの軸力と継手のすべり係数を測定した。なお、ボルト軸力はすべての試験体(5体)、すべてのボルト(試験体1体当たり4本)、計20本のボルトで測定している。

図7と同様に、高力ボルトの導入軸力測定結果を図9に示す。仮締め時の軸力は当然のことではあるが、前項

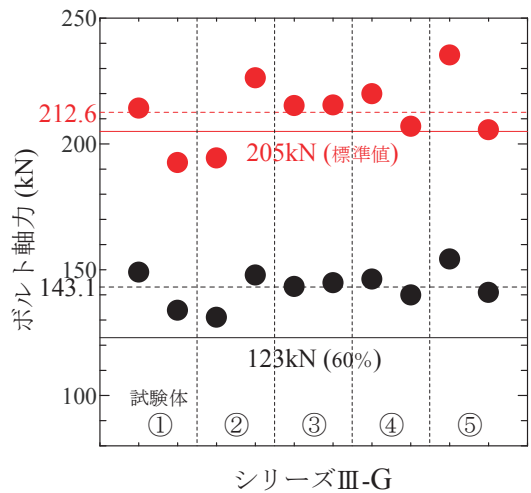


図7 Ⅲ-G試験体の導入軸力測定結果

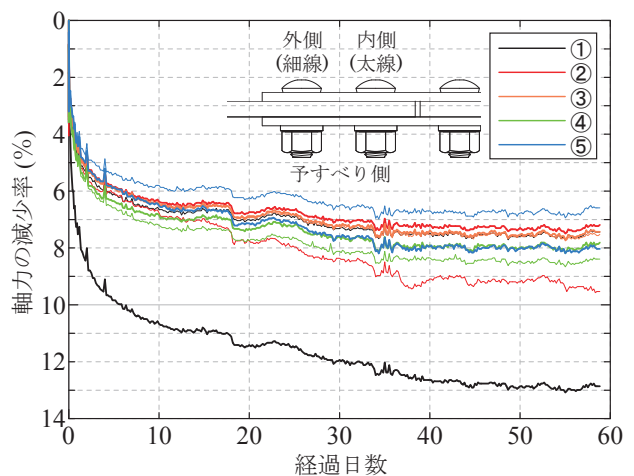


図8 本締め後のボルト軸力の変化

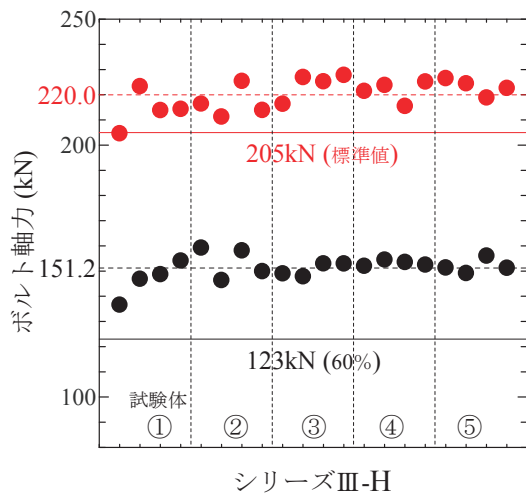


図9 Ⅲ-H試験体の導入軸力測定結果

の測定結果とほぼ同じである。また、浸水後本締めした際の導入軸力も前節で示した結果とほぼ同じである。したがって、浸水後にボルトを本締めしても、導入軸力にほとんど差はないといえる。

浸水後にボルトを本締めした後に行ったすべり試験より得られたすべり係数は0.46, 0.60, 0.60, 0.60, 0.55であった。このように1体のみ低いすべり係数が得られたもの



の、他の4体は基準であるⅢ-A試験体のすべり係数(平均0.62)とほぼ同じである。すべり係数が低かった試験体を試験後に解体したところ、ボルト孔に少量の水が認められた。水が確認された理由としては、解体時に水が浸入した、ひずみゲージのリード線を通すためのボルト頭部の孔の養生が不十分であった、高力ボルトを仮締めしただけでは高力ボルトから水が浸入する、などの可能性が考えられる。このように、高力ボルトを設計ボルト軸力の60%で仮締めした状態では、材片間の密着を十分に確保できず、継手内部に水が浸入する可能性は否定できない。実施工に当たっては、降雨対策を確実に行う必要があると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗布した接合面を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数に対する予すべりの影響について実験的に検討し、以下の結果を得た。

- ① 高力ボルトを設計ボルト軸力の60%で仮締めした状態で接合面にすべりが生じても、連結板を外さず、仮締めした高力ボルトをそのまま本締めした継手のすべり係数は予すべりのない継手とほぼ同じであった。
- ② 一旦予すべりを受けた継手のすべり係数に対する塗膜厚(合計膜厚90~200 $\mu$ m)、仮締めボルトの本数(1本と2本)、予すべりの方向(引張と圧縮)、予すべり量(0.5~2.0mm)、予すべり後の継手の浸水、ボルトのリラクゼーション、母板の板厚(試験に用いた板厚の範囲 $t=6\sim 22$ mm)の顕著な影響は認められなかった。
- ③ 予すべり後に連結板を外すと、すべり係数が10%程度小さくなった。さらに、連結板を外した際に接合面を清掃するとすべり係数の低下度は30%程度であった。
- ④ 設計ボルト軸力の60%で締め付けた状態で予すべりを与えて、その後本締めしたトルシアボルトのリラクゼーションは、予すべりのない高力ボルトと同程度であった。

**謝辞:** 本論文は、森猛教授(法政大学)との共同研究として行っており、試験の計画から実施、試験結果の取り纏めにあたり多くのご指導を頂きました。また、試験の実施にあたり、長崎英二氏(元神鋼ボルト株)、法政大学の学生の方々にも多くのご協力頂きました。心より厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, pp.480 - 481, 2002.
- 2) 中村貴史, 亀井義典, 西村宜男, 雨森慶一, 新井正樹: 高力ボルト・溶接併用継手における高力ボルト施工要領, 土木学会第54回年次学術講演会, I - A196, 1999.9.
- 3) 小日向謙寿, 広瀬剛, 小森武, 葛西真一: 在家塚第3高架橋における併用継手の施工要領, 土木学会第55回年次学術講演会, I - A53, 2000.9.
- 4) 西浩嗣, 木治昇, 川上剛司, 社浦潤一, 東谷修, 井元泉: 少数2主鋼桁の併用継手検証試験-第二東名名古屋南Nランプ橋-, 土木学会第56回年次学術講演会, I - B169, 2001.10.
- 5) 南邦明, 玉井真一, 鈴木隆, 乙森幸之助, 小早川豊: 3% Ni 系高耐候性鋼を用いた併用継手の現場溶接施工試験, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp.586 - 598, 2007.10.
- 6) 藤原 博, 紫桃孝一郎, 平野 晃: 高摩擦有機ジンクリッチペイントを用いた高力ボルト摩擦継手のすべり試験, 橋梁と基礎 Vol.38, No.10, pp.39 - 44, 2004.10.
- 7) 南 邦明, 森 猛, 堀川 秀信: 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.
- 8) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室: 土木研究所資料第2796号 高力ボルト摩擦接合継手に関する試験調査, 1989.8.