接触面を無塗装とした厚板・多列の高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験

村越 潤¹・石原 大作²・澤田 守³・山口 隆司⁴

¹正会員 (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: murakosi@pwri.go.jp

²正会員 (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: d-ishihara44@pwri.go.jp

³正会員 国土交通省 中部地方整備局 企画部 企画課 (〒460-8514 名古屋市中区三の丸2-5-1)
E-mail: sawada-m85aa@mlit.go.jp

⁴正会員 大阪市立大学大学院教授 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)
E-mail: yamaguti@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

部材の簡素化, 構造の合理化を図った鋼橋の普及により厚板の部材が使用されるようになり, 現場継手部にも厚板・多列の高力ボルト摩擦接合継手が適用される場合がある. 本検討では, 接触面を無塗装とした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行い, 母板厚やボルト列数等の構造諸元が, すべり係数に与える影響について検討を行った. 母板厚を50, 75mmと変化させ, ボルト列数を3, 8, 12列とした試験体を系統立てて試験した結果, すべり係数は0.4を上回ることを確認した. ただし, ボルト列数の増加に伴い, すべり耐力時の母板と連結板間のずれ挙動が継手内において不均一となること, 8列と12列の試験体を比較した場合, 母板厚50mm, 75mmの場合ともに, すべり係数(平均値)が約3%低下することが確認された.

Key Words : *high strength bolted friction type joint, slip resistance, thick plate, non-coated contact surface, number of rows of bolts*

1. はじめに

公共事業におけるコスト縮減の観点から, 工数低減のために部材の簡素化, 構造の合理化を図った鋼橋が普及してきており, 板厚 50mm を超える厚板鋼板も広く使用されるようになってきている. 鋼板の接合には, 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, 高力ボルト摩擦接合継手の場合には, 部材の厚板化により連結部のボルト列数が増加(多列化)する傾向にある.

ボルト継手の多列化がすべり耐力に及ぼす影響については, 厚板鋼板ではない場合も含めて, これまでも各種の調査研究が行われている. 例えば, 佐伯ら¹⁾は, 接触面を無塗装とした母板厚 35mm の試験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おり, その結果は, 昭和 55 年の道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編²⁾(以下, 道示Ⅱ)以降の解説に反映されている. すなわち, ボルト継手の連結長が長すぎるとボルト毎の分担摩擦力が著しく不均等になることを示し, ボ

ルト列数 12 列程度まではすべり耐力が低下しないという実験例もあったとした上で, ボルト列数は無理のない範囲で8列程度以下とするのがよいとしている. 近年では, 山口ら³⁾が母板厚 50mm で F10T-M16 を使用した試験体を用いてすべり耐力試験を行っている. ボルト列数 4, 8, 12 列を対象に多列化の影響について検討を行い, 8 列以上の場合, 4 列と比較してすべり係数が低下するとしている. 以上のように, 接触面を無塗装とした場合のボルト列数の影響に関するすべり耐力試験は行われているものの事例は少なく, 厚板で, かつ一般的に使用されているボルト(F10T-M22)を用いた試験例は報告されていない.

一方, 防食の観点から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も, 多列継手を対象としたすべり耐力試験によるすべり係数の検討が行われている^{4)~7)}. 馬場ら⁴⁾は, 母板厚 65mm で, ボルトの呼び M30 の太径ボルト継手の試験体を用いてすべり耐力試験を実施している. ボルト列数 18 列までの試験結果より, すべり

係数は6列から12列の間で4%程度低下するものの、18列の場合では12列の場合を約6%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一概にいえなとしている。玉越ら⁹⁾は、母板厚75mmの厚板に対して、M22のトルシア形超高力ボルトによる継手試験体を用いてすべり耐力試験を実施し、ボルト列数が12列の場合のすべり係数が、8列の場合に対して9%程度下回る結果が報告されている。著者ら⁶⁾は、厚板へのボルト列数8列を超える継手の適用性を把握するために、母板厚及びボルト列数をパラメータとした試験体のすべり耐力試験を行い、ボルト列数8列に対して12列では、母板厚75mmの場合7%、50mmの場合1%低下する結果を得ている。また、厚板・多列のボルト継手に対するFEM解析¹⁰⁾により、すべり挙動を解析的に評価するとともに、試験体と同一の継手に対してボルト列数が8列以上となる場合、すべり係数が低下する傾向にあることを明らかにした。

これらの既往研究等をふまえ、無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の、8列以上の場合のボルト継手とする場合のボルト許容力に乘じる低減係数が道示II⁹⁾解説では示された。一方、接触面を無塗装とした場合に対しては、すべり耐力試験等による知見が必ずしも十分でない。

著者らは、接触面を無塗装とした高力ボルト摩擦接合継手を対象として、母板厚及びボルト列数をパラメータとした試験体(計18体)のすべり耐力試験を行い、無塗装の場合におけるボルト列数が継手挙動に及ぼす影響について検討を行った。

2. 試験体

(1) 寸法形状と試験パラメータ

本試験で用いた試験体の基本諸元を表-1に、その寸法形状を図-1に示す。母板厚は50、75mmの2種類と、ボルト列数は3、8、12列の3種類として、それらを組み合わせた6種類を試験対象とした。ここで試験体名称は「3-50A」のように表し、1番目の数字はボルト列数、2番目は母板厚、最後の記号は同一諸元の試験体3体を区別する記号(A,B,C)を示すこととする。ボルト列数は、施工性や継手の適用実績を踏まえ、概ね上限に近いと考えられる12列を最大とした。試験体数は各3体とし、試験体の母板と連結板には溶接構造用圧延鋼材SM490Y、高力ボルトにはF10TM22を用いた。すべり耐力には、式(1)で表される母板の降伏耐力に対するすべり耐力の比率(以下、すべり/降伏耐力比)が影響することが明らかにされている¹⁰⁾。本検討では、列数がすべり耐力に与える影響について適切に評価できるように、すべり/降伏耐力比を

表-1 試験体の基本諸元

試験体名称	ボルト列数	母板厚(mm)	連結板厚(mm)	母板幅(mm)	母板すべり耐力(kN)	すべり/降伏耐力比 β
3-50A,B,C	3	50	26	120	576	0.32
8-50A,B,C	8			190	1504	0.49
12-50A,B,C	12			270	2123	0.46
3-75A,B,C	3	75	38	120	584	0.22
8-75A,B,C	8			130	1527	0.51
12-75A,B,C	12			190	2104	0.45

0.5程度以下となるように試験体の板幅を設定した。

$$\beta = \frac{\mu \cdot m \cdot n \cdot N}{(W - d) \cdot t \cdot \sigma_y} \quad (1)$$

ここに、

β : すべり/降伏耐力比

μ : 設計すべり係数 (=0.4)

m : 接合面の数 (=2)

N : 設計ボルト軸力(kN) (=205 kN)

W : 母板の板幅(mm)

d : ボルト孔径(mm) (=24.5mm)

t : 母板の板厚(mm)

σ_y : 母板の降伏点の公称値(N/mm²)

また、ボルト中心間隔は、ボルトが多列配置となる場合、設計・施工の面から連結板をできるだけ小さく設計することが一般的と考えられるため、M22の高力ボルトの最小中心間隔75mmとした。なお、本試験で用いた試験体は筆者らが文献6)、7)で使用した試験体と同一の試験体であり、接触面処理のみをブラスト処理に変更したものである。

試験体組立て前に、母板及び連結板の板幅、板厚等を計測した。板厚について、設計値に対する計測値の比率の平均値は1.003、標準偏差は0.01で、設計値とほぼ一致しており、すべり耐力に影響を与えるような板厚差は生じていなかった。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を試験体側面において計測した。肌すき量は、最大で0.16mm(試験体12-50B)であった。計測された肌すき量と、後述するすべり耐力試験で得られたすべり係数の間の相関性は明確でなく、すべり耐力に有意な影響を与えるものではなかったと考えられる。

(2) 材料強度特性

表-2、表-3に本試験で使用した鋼材及び高力ボルトの機械的性質(ミルシート値)をそれぞれ示す。

(3) 表面処理

接触面にはISO Sa 2.5を目標としてブラスト処理(スチールグリット: JIS G 5903の粒度G50)を行った。参考

図-1 試験体の寸法形状 (単位: mm)

表-4 試験体の表面粗度 Ra (μm)

試験体 名称	計測箇所		平均値	
	母板 (平均値)	連結板 (平均値)	試験体毎	グループ毎
3-50A	10.67	11.91	11.29	11.52
3-50B	10.83	12.99	11.91	
3-50C	11.29	11.43	11.36	
8-50A	10.72	10.69	10.70	10.98
8-50B	10.95	11.43	11.19	
8-50C	10.81	11.28	11.05	
12-50A	11.38	9.65	10.51	10.66
12-50B	10.19	11.27	10.73	
12-50C	11.04	10.42	10.73	
3-75A	11.19	11.32	11.26	10.72
3-75B	10.01	9.92	9.97	
3-75C	10.65	11.22	10.93	
8-75A	10.95	11.24	11.09	11.26
8-75B	11.14	11.29	11.21	
8-75C	11.06	11.88	11.47	
12-75A	12.57	10.95	11.76	11.21
12-75B	11.64	10.92	11.28	
12-75C	11.04	10.13	10.58	

表-2 鋼材の機械的性質

鋼種	使用 部位	機械的性質				化学成分 (%)				
		板厚 (mm)	降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	伸び (%)	C	Si	Mn	P	S
SM490YB	母板	75	368	543	36	0.16	0.43	1.46	0.007	0.003
		50	431	566	27	0.16	0.43	1.46	0.007	0.003
	連結板	38	410	540	29	0.16	0.32	1.38	0.014	0.005
		26	437	563	27	0.17	0.32	1.38	0.013	0.004

表-3 高力ボルトの機械的性質とトルク係数値

等級	ボルトの 呼び	ボルト						ナット	座金	トルク 係数値の 平均値
		4号試験片			製品		製品	製品	製品	
		首下長さ (mm)	有効断面積 (mm^2)	耐力 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	伸び(%)	引張荷重 (kN)	硬さ HRC	硬さ HRC	
F10T	M22	120	303	1,030	1,078	19	330	31	27	40
		195	303	1,046	1,087	18	333	32	27	40

として、表-4にブラスト処理面に関して、触針式表面粗さ測定器により算出した、JISB0601で規定されている算術平均粗さ Ra を示す。表面粗さの計測は、ボルト側及びナット側の母板-連結板間の各接合面2面に対して行った。継手長手方向については、ボルト列数3列の試験体の場合、ボルト間の2箇所計測し、ボルト列数8列、12列の場合、最内・外縁ボルトとそのボルトに隣接するボルト間2箇所ならびに継手方向中央位置の計3箇所（1面あたり）で計測した。文献11)ではブラスト処理に対して、 $Ra \geq 10\mu m$ の場合、すべり係数0.45を推奨しているが、本試験体の Ra は全て $10\mu m$ 以上であった。

(4) 組立て

ボルトの締付けは、道示Ⅱ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度に分けて行い、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。締付け軸力は0%増しせず設計軸力通りとした。ただし、計測側ですべ

るように、片側（非計測側）は設計ボルト軸力の120%以上で締付けを行い、非すべり側とした。

3. 試験方法

(1) 試験概要と計測

試験体組立て後に、ボルト軸力計測及びすべり耐力試験を実施した。ボルト軸力計測では、ボルト軸力の経時変化をひずみゲージにより計測した。すべり耐力試験では、すべり挙動を把握するために、母板間及び母板-連結板間の相対変位をクリップゲージにより計測するとともに、試験中のボルト軸力の変化を計測した。

図-2に計測箇所を示す。ボルトの軸力計測は、各試験体3体のうち1体のみ詳細に計測（詳細計測）し、それ以外は計測点数を若干減らして計測（基本計測）した。ひずみゲージの貼付位置は、図-3に示すとおり、締付け厚の中央に相当する位置とし、すべり後もボルト軸力を計測できる

図-2 ボルト軸力及び相対変位の計測箇所

図-3 ボルトに対するひずみゲージの貼付位置

ようにボルト1本につき2箇所とした。また、母板間及び母板-連結板間の相対変位の計測は、クリップゲージを用いて行い、詳細計測及び基本計測ともに同じ位置とした。

(2) ボルト軸力計測

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
行うこととし、試験体組立て後、7日間のボルト軸力の変
化をひずみゲージにより計測した。なお、本試験で使用し
たひずみゲージのリード線はリード線自体の温度による
影響が軽微な3線式を使用している。計測は最後のボルト
締付け完了後6時間までは5秒間隔で行い、6時間～7日間
までは1時間の間隔で行った。

(3) すべり耐力試験

すべり耐力試験は、ボルト列数が3列の試験体には土木
研究所所有の 載荷能力 2MN の試験機を、8列及び 12列の
試験体には載荷能力 30MN の試験機を使用した。締付けか
らすべり耐力試験実施までの期間は、15～30日であった。

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
りが生じた際と同程度の荷重に達するまで再載荷した。

図-4 第1ボルト軸力残存率(締付け後7日間経過後)の経時変化

載荷にあたって、2MN試験機では荷重制御(載荷開始時
1kN/sec)、30MN試験機では変位制御(載荷開始時 1.5mm/min)
とし、荷重の増加に従って、載荷速度を徐々に遅くし、す
べり耐力を正確に計測できるように努めた。

なお、試験体 12-75C については、後述の式(2)のすべり
係数 μ_0 が 0.38 であり、設計値 0.4 を若干下回る結果であつ
た。本試験結果については試験体の載荷装置へのセット
アップ時の不具合がすべり荷重に影響を与えた可能性が
あり、他の試験体と同等にすべり耐力の評価は行えない
と判断し、以下の分析では除外することとした。

4. 試験結果

(1) ボルト軸力残存率(締付け後7日間経過後)

図-4に母板厚 50mm の各試験体から 1 体を抽出し、第
1ボルト(図-2参照)のボルト軸力の締付け後、7日間
における経時変化を示す。図中の縦軸は、計測したボル
ト軸力をすべてのボルト締付け完了時の初期軸力で無
次元化した軸力残存率である。ボルト軸力の低下は締付
け直後に顕著にみられた。また、別途計測した外気温の
変動の影響を受けて、ボルト軸力の経時的な変化がみら
れた。表-5に試験体ごとに計測対象ボルトの軸力残存率
(締付け後7日間経過後)の平均値を整理した結果を示す。
全試験体で、軸力残存率(締付け後7日間経過後)は、0.97～
1.00であり、ボルト列数、ボルト位置による軸力残存率
(締付け後7日間経過後)の違いは明確にはみられなかつ
た。母板厚の軸力残存率への影響については 5. (1)で述
べる。

表-5 ボルト軸力残存率(締付後7日間経過後)の平均値

試験体 No.	構造諸元			ボルト軸力(kN)		[3] 軸力残存率 ([2]/[1])	
	母板厚 (mm)	連結 板厚 (mm)	ボルト 列数	[1] 軸力 導入時	[2] 7日間 経過後		
3-50A	50	26	3	207.4	207.0	1.00	0.99
3-50B				207.5	205.6	0.99	
3-50C*				205.9	203.7	0.99	
8-50A			8	206.0	199.7	0.97	0.97
8-50B				209.4	203.6	0.97	
8-50C*				207.2	200.5	0.97	
12-50A			12	209.4	207.5	0.99	0.99
12-50B				207.2	203.1	0.98	
12-50C*				205.6	202.9	0.99	
3-75A	75	38	3	205.7	205.6	1.00	1.00
3-75B				207.8	209.2	1.01	
3-75C*				206.0	206.9	1.00	
8-75A			8	206.0	201.2	0.98	0.98
8-75B				205.6	202.5	0.98	
8-75C*				205.5	201.1	0.98	
12-75A			12	205.7	204.4	0.99	0.99
12-75B				205.4	203.5	0.99	
12-75C*				206.5	205.0	0.99	

注)※はボルト軸力の詳細計測を実施(図-2参照)

図-5 荷重-母板間の相対変位の関係

(2) すべり耐力試験

a) 荷重と母板間の相対変位の関係

図-5に各試験体のうち1体を例に、荷重と母板間の相対変位の関係を示す。いずれの試験体においても、初期は線形関係にあるが、徐々に相対変位が増加し勾配がゆるやかになり、ピーク荷重を迎えた後、荷重の低下と相対変位の急激な増加がみられる。これらの結果から、本試験体はすべり先行型の挙動を呈していると推測される。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し、この時の荷重値(図中の曲線上の○印)をすべり耐力と定義した。

b) すべり耐力及びすべり係数

表-6に試験から得られた各試験体のすべり耐力及びすべり係数を示す。表中のすべり係数 μ_0 、 μ_2 は式(2)、(3)により算出した。すべり係数の設計値に対する評価は、設計ボルト軸力により算出する μ_0 を用いて行い、板厚、ボルト列数及び母板間の板厚差等の影響の分析については、締付け完了時の軸力によって算出する μ_2 を用いて行う。

表-6 すべり耐力及びすべり係数

試験体 No.	構造諸元					試験結果						
	母板厚 (mm)	連結板厚 (mm)	ボルト 列数	締付 軸力 (kN)	試験前 軸力 (kN)	すべり 耐力 (kN)	すべり係数		すべり係数		変動 係数	
							μ_0		μ_2			
							各値	平均	各値	平均		
3-50A	50	26	3	207.4	205.9	552	0.45	0.45	0.45	0.02		
3-50B				207.5	202.3	560	0.46		0.46			
3-50C				205.9	204.5	539	0.44		0.44			
8-50A			8	206.0	195.2	1,537	0.47	0.48	0.49	0.03		
8-50B				209.4	203.0	1,526	0.47		0.47			
8-50C				207.2	201.7	1,612	0.49		0.50			
12-50A			12	209.4	208.1	2,268	0.46	0.47	0.45	0.03		
12-50B				207.2	200.9	2,259	0.46		0.47			
12-50C				205.6	204.7	2,401	0.49		0.49			
3-75A			75	3	205.7	203.5	552	0.45	0.44	0.45	0.03	
3-75B					207.8	209.6	532	0.43		0.42		
3-75C					206.0	208.4	548	0.45		0.44		
8-75A					8	206.0	201.2	1,532	0.47	0.48	0.48	0.04
8-75B						205.6	203.3	1,667	0.51		0.51	
8-75C						205.5	204.8	1,540	0.47		0.47	
12-75A	12	205.7			202.5	2,261	0.46	0.46	0.47	0.01		
12-75B		205.4			203.1	2,314	0.47		0.47			
12-75C		206.5			202.5	1,859	0.38		-		0.38	-

$$\mu_0 = \frac{P}{n \cdot m \cdot N_0} \quad (2)$$

$$\mu_2 = \frac{P}{n \cdot m \cdot N_2} \quad (3)$$

ここで、

P : すべり耐力 (kN)

n : ボルト本数

m : 接触面数 (=2)

N_0 : 設計軸力 (=205kN)

N_2 : 試験前軸力(計測値) (kN)

試験体 12-75C を除く全試験体のすべり係数 μ_0 は、0.4を上回っており、その平均値は 0.46、変動係数は各試験体で 0.01~0.04 であった。

c) 母板-連結板間の相対変位

図-6にすべり耐力時(図-5に示す○印の時点)の母板-連結板間の相対変位について、試験体ごとに各3体の平均値を整理した結果を示す。図中には、クリップゲージで計測した母板-連結板間の内側、中央、外側の相対変位を示す。また、各試験体から1体を例に、図-7に荷重と母材-連結板間の相対変位の関係を示す。なお、これらの図ではボルト列数と板厚に着目して整理している。

ボルト列数に対して相対変位を比較すると(図-6(a), (b)), 3列の試験体では、内側、中央、外側において差はほとんどみられないが、8列、12列と多列になるに伴い、中央と端部(内側、外側)の差が大きくなっている。また、荷重と母材-連結板間の相対変位の関係において(図-7(a), (b)), 内側と外側では、中央に比べ初期の段階から相対変位が増加している。すなわち、ボルトが多列配置となるにつれて、端部では荷重初期段階から局所的にすべりが発生し、すべり発生荷重に至るまでは母材-連結板間の相対変位について継手の中央と端部(内側、外側)を比べると差が著しくなり、継手内で不均一なすべりが生じていると考えられる。

母板厚に対して相対変位を比較すると(図-6(c), 図-7(c)), 母板厚 75mm と 50mm の場合では、すべり耐力

図-6 すべり耐力時の中央と端部の母板-連結板間の相対変位

に至るまでの中央と端部の挙動や、すべり耐力時の差は同程度であり、板厚による挙動の特筆すべき違いはみられない。

d) 試験時のボルト軸力の変化

図-8に詳細計測を実施した試験体 (12-75については、基本計測を実施した試験体) における、試験時のボルト軸力の変化を示す。図中の括弧内の数値は、試験開始時 (荷重 0kN時) のボルト軸力に対するすべり耐力時のボルト軸力の比率である。ボルト列数による中央と端部の軸力減少の傾向に関して、8列や12列の試験体にみられるように、多列の場合には内側 (ボルトNo.1) の方が軸力の減少が若干大きい傾向が見られた。著者らによるすべり挙動に関する解析的検討^{6,8)}では、母板及び連結板に作用する断面力の偏心から生じる付加曲げの影響による内

図-7 荷重と母板-連結板間の相対変位の関係

側の軸力減少について明らかにしており、本試験結果も同様の挙動によるものと考えられる。

ボルト軸力残存率と荷重の関係について、試験体 12-75A を例として図-9に示す。ボルト軸力に関しては内側 (ボルト No.1) では荷重に対する低下の比率 (低下率) が大きく、試験開始時からすべり発生まで概ね一定の割合で低下している。一方、中央 (ボルト No.6, 7) ではボルト軸力の低下率は小さく、かつすべり直前に急激に低下する挙動がみられる。以上の傾向は 8 列や 12 列の全ての試験体で確認されており、多列の場合の内側のボルト軸力減少が顕著にみられた。

(a) 試験体 3-50C (ボルト 3 列, 母板厚 50mm)

(b) 試験体 3-75C (ボルト 3 列, 母板厚 75mm)

(c) 試験体 8-50C (ボルト 8 列, 母板厚 50mm)

(d) 試験体 8-75C (ボルト 8 列, 母板厚 75mm)

(e) 試験体 12-50C (ボルト 12 列, 母板厚 50mm)

(f) 試験体 12-75A (ボルト 12 列, 母板厚 75mm)

図-8 母板厚と各位置のボルト軸力残存率(すべり耐力時)の関係

図-9 すべり試験時のボルト軸力残存率と荷重の関係 (試験体 12-75A)

5. 母板厚, ボルト列数の影響

本章では, 母板厚及びボルト列数が継手挙動に与える影響について, ボルト軸力導入後の経時変化(ボルト軸

力残存率)と, すべり係数 μ_2 に着目して考察する。

(1) 母板厚の影響

図-10 に母板厚とボルト締め付け時から 7 日後のボルト軸力残存率の関係を示す。ボルト軸力の変化に関して板厚による違いは小さいが, 板厚 75mm の方が軸力残存率が若干大きい。連結部が厚くなるとボルト長が長くなり, ボルト長が長いほど軸力残存率が大きくなる傾向は, 文献 12) においても無機ジンクリッチペイント仕様の接触面処理の場合に対して報告されている。同文献で考察されているように, 締め付け厚に含まれるボルトのねじ部長さが主に影響しているものと考えられる。

図-11 に母板厚とすべり係数 μ_2 の関係を示す。すべり係数 μ_2 は板厚によらずほぼ一定であり, 母板厚 50mm と 75mm との間では, 板厚による違いは明確にみられない。

図-10 母板厚とボルト軸力残存率（試験前）の関係

 図-11 母板厚とすべり係数 μ_2 の関係

(2) ボルト列数の影響

図-12 にボルト列数とすべり耐力比の関係を示す。ここで、すべり耐力比とは、各試験体のすべり係数 μ_2 の8列試験体のすべり係数 μ_2 （平均値）に対する比を表す。ボルト列数が8列から12列に増加すると、8列の場合と比較してすべり耐力は母板厚50mm, 75mmともに約3%低下している。また、図中には、道示Ⅱ⁹⁾解説中のボルト列数12列に対する低減係数（無機ジンクリッチペイント仕様）の0.92より求めたすべり耐力比を示し、本試験のすべり係数の低下程度は、この値よりもさらに小さい傾向にある。

なお、ボルト列数3列の試験体では、8列に比べてすべり係数が小さくなっており、同様の傾向は著者らによる文献6), 7)においても報告されている。一般に、母板間の板厚差や母板及び連結板端部の凹凸等の初期不整に対して、母板と連結板はボルト軸力によって弾性変形して密着しようとするが、板厚が厚いと剛性が大きく、初期不整の影響を受けやすくなる。すなわち、導入された軸力の一部は板の弾性変形に使われ、接触圧が減少することになるが、列数が多くなると、ボルト一本あたりの初期不整の影響が小さくなり、結果としてすべり係数に与える影響が相対的に小さくなっているものと考えられる。

図-12 ボルト列数とすべり耐力比の関係

(a) 母板厚 50mm

(b) 母板厚 75mm

図-13 すべり耐力時の母板-連結板間の相対変位の比較

6. 既往の試験結果との比較

著者らは、本試験を実施する前に、本試験体を使用し、接触面に無機ジンクリッチペイント（以下、無機ジンク）を塗布した場合に対して、同様のすべり耐力試験^{6), 7)}を実施している。図-13にすべり耐力時の母板-連結板間の相対変位について、本試験結果（無塗装の場合）と無機ジンクを塗布した場合の試験結果を比較して示す。接触面の処理によらず、中央に対する端部（外側、内側）の相対変位の差は、ボルト列数の増加に伴い、大きくなる傾向がみられる。なお、無機ジンクを塗布した場合の方がすべり係数が大きいので、同一の板厚、ボルト列数では、

図-14 8列に対する12列のすべり耐力比の無機ジंक仕様の試験結果との比較

図-15 すべり発生時におけるすべり面の状況

塗装の場合より無機ジंकの場合の相対変位は大きくなっている。

図-14にボルト列数8列に対する12列の各板厚におけるすべり耐力比について、本試験結果と接触面に無機ジंकを塗布した場合の試験結果を比較して示す。参考に、図中には無機ジंक仕様の場合の低減係数に相当するすべり耐力比を示す。いずれの場合も、12列では低減係数の範囲内のすべり耐力の低下がみられる。

図-15に試験後の母板及び連結板の接触面の状況(ボルト列数3列で、母板厚50mmの試験体の例)を示す。なお、本試験結果(無塗装の場合)の写真については、すべり面を明確にするため画像の強調処理を行っている。板幅方向のすべり発生面の状況に着目すると、接触面の処理によらず同程度の幅のすべり痕が生じていることが確認できる。

7. まとめ

本検討では、接触面を無塗装とした高力ボルト摩擦接合継手を対象に、板厚(50, 75mm)、ボルト列数(3, 8, 12列)をパラメータとした試験体のすべり耐力試験を行い、母板厚及びボルト列数が継手挙動に及ぼす影響につ

いて検討した。得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 設計ボルト軸力に対するすべり係数 μ_0 は0.43~0.51(平均値0.46)であり、道示IIに規定されるすべり係数0.4を上回った。
- (2) 母板厚の影響に関して、母板厚50mmと75mmではすべり係数 μ_2 (各試験体の平均値)の違いはほとんど見られなかった。
- (3) ボルト列数の影響に関して、ボルト列数8列に対する12列の場合のすべり係数 μ_2 (各試験体の平均値)は、母板厚50mm, 75mmともに約3%低下した。
- (4) すべり耐力時の母板と連結板間の相対変位に関して、8列及び12列の場合、継手の中央と端部(内側、外側)ではすべり発生荷重に至るまでに差が大きくなる挙動が確認され、端部で作用力が大きくなる傾向にあることが、すべり係数の低下に影響を及ぼしたと考えられる。
- (5) ボルト列数の多列化によるすべり係数の低下の傾向、すべり耐力時の継手内の相対変位の不均一さ及びすべり面の発生傾向は、著者ら^{6,7)}が同一試験体を用いて別途実施した、接触面に無機ジंकリッチペイントを塗布した場合のすべり耐力試験の結果と概ね一致していた。

今回の試験結果を踏まえ、接触面を無塗装とした高力ボルト摩擦接合継手に対して、多列の場合のボルト許容力に乘じる低減係数について検討する予定である。

参考文献

- 1) 佐伯彰一, 西川和廣, 滝沢晃: 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.
- 2) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説II 鋼橋編, 1980.2.
- 3) 山口隆司, 彭雪, 鈴木康夫, 宮尾修平: 極厚鋼板を対象とした多列高力ボルト摩擦接合継手の力学的挙動に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第17巻, 第66号, pp.23-33, 2010.6.
- 4) 馬場賢三, 田島二郎, 平野茂: 大径多列高力ボルト摩擦継手試験, 橋梁と基礎, pp.8-14, 1985.10.
- 5) 玉越隆史, 大久保雅憲, 池田秀継, 加藤浩一: 国土技術政策総合研究所資料, 第624号, 平成21年度道路調査費等年度報告, pp.104-105, 2011.2.
- 6) 村越潤, 遠山直樹, 梁取直樹, 澤田守, 大嶽敦郎, 石澤俊希, 山口隆司: 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.
- 7) 村越潤, 澤田守, 山口隆司, 彭雪, 大嶽敦郎: 接触面に無機ジंकリッチペイントを塗布した厚板・多列の高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験, 土木学会論文集A1, Vol.70, No.1, pp.94-104, 2014.3.
- 8) 彭雪, 山口隆司, 高井俊和, 村越潤, 澤田守: 厚板多列高力ボルト摩擦接合継手の構造諸元がすべり挙動に与える影響に関する解析的研究, 土木学会論文集A1, Vol.69, No.3, pp.452-466, 2013.9.

- 9) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2014.3.
- 10) 西村宣男, 秋山寿行, 亀井義典：高力ボルト摩擦接合継手に関する最近の研究動向, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.1-14, 2001.4.
- 11) (社)土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案), p.36, 2006.11.
- 12) 南邦明, 森猛, 堀川秀信：50mm 厚板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.
- (2015. 6. 1 受付)

SLIP RESISTANCE TESTS OF FRICTION-TYPE HIGH-STRENGTH MULTI BOLTED JOINTS WITH UNCOATED CONTACT SURFACES ON THICK PLATE

Jun MURAKOSHI, Daisaku ISHIHARA, Mamoru SAWADA
and Takashi YAMAGUCHI

In this paper, influence of number of rows of bolts and plate thickness on slip resistance is discussed based on the slip resistance tests. The slip resistance tests of high strength bolted friction type joints with uncoated contact surfaces were carried out for the test specimens which have combinations of 50/75mm thickness plates and 3/8/12 rows of bolts. As a result of these tests, it was observed that all the specimens had slip coefficients over 0.4 which is specified in the current design code, Japanese Specification for Highway Bridges, and it is found that the slip resistance of the 12-row-specimens decreased approximately 3% compared with 8-row-specimens.