接合面が鋼材粗面と無機ジンクリッチ ペイント面の高力ボルト摩擦接合継手の すべり係数の提案

丹波 寛夫¹・行藤 晋也²・木村 聡³・山口 隆司⁴・杉浦 邦征⁵

¹正会員 一般財団法人阪神高速道路技術センター 企画研究部 (〒541-0054 大阪市中央区南本町4-5-7)

E-mail: yoshio-tamba@tech-center.or.jp

²学生会員 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail: yukito@brdg.civil.eng.osaka-cu.ac.jp

³正会員 (株)横河住金ブリッジ 設計センター (研究時 大阪市立大学大学院)

(〒550-0004 大阪市西区靱本町1-4-12)

E-mail: kimura-sts@ysbc.co.jp

⁴正会員 大阪市立大学大学院教授 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail: yamaguti@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

⁵正会員 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

補修・補強工事において、既設部材側にブラスト処理が困難な場合を想定して、2種ケレンによる鋼材粗面と無機ジンクリッチペイント面の組合せを対象に、高力ボルト摩擦接合継手供試体を用いてすべり耐力試験を実施し、無機ジンクリッチ膜厚と2種ケレン面の表面粗さがすべり係数に与える影響を明らかにした。その結果、すべり係数は無機ジンクリッチ膜厚より表面粗さに強い相関があることが見られた。また、連結板に塗布した無機ジンクリッチ膜厚以上の表面粗さを有してもすべり係数に改善は見られず、すべり係数は頭打ちすることが分かった。試験結果を踏まえ、連結板の無機ジンクリッチ膜厚を50 μ m以上150 μ m以下確保した上で、鋼材粗面の表面粗さが算術平均粗さ $Ra \geq 5\mu$ mの場合のすべり係数は0.4、 $Ra < 5\mu$ mの場合のすべり係数は0.2を提案した。

Key Words : high strength bolted frictional joints, different kind of surface, slippage test

1. はじめに

鋼橋の補修・補強工事において、落橋防止装置のブラケット取付、腐食した腹板や下フランジにあて板等の鋼部材を追加する場合、その接合には高力ボルト摩擦接合が用いられることが多い。高力ボルト摩擦接合継手に用いるすべり係数については、道路橋示方書・同解説¹⁾では、黒皮を除去した粗面では0.4、ある条件を満足する厚膜型無機ジンクリッチペイント面では0.45とされている。また、森ら²⁾により、表面粗さ毎に粗面のすべり係数が提案されるとともに、赤錆面、無機ジンクリッチペイント面のすべり係数も提案されている。

鋼橋の補修・補強工事の現場では、新たに設置する鋼部材と既設部材との接合面については、製作工場から現

場への運搬期間における防錆対策等を考慮して、新設部材の接合面は無機ジンクリッチペイント面とすることが多い。その一方で、既設の鋼部材側の接合面の処理については、狭隘な施工空間での素地調整となることや、近隣住居などへの騒音等の問題から、都市内ではブラスト処理が困難な場合が多い。そのような場合、動力工具を用いた2種ケレン程度の素地調整としている³⁾が、2種ケレン面に対しては、無機ジンクリッチペイントを適用するのは難しい⁴⁾。

著者ら⁵⁾は、このような現場条件を想定し、新設部材は無機ジンクリッチペイント面とし、既設部材側の接合面の素地調整や塗装仕様の種類を変えたすべり耐力試験を行った。その結果、無機ジンクリッチペイント面とそれに接する粗面とから構成される高力ボルト摩擦接合継

表-1 使用鋼材および材料試験結果 (平均値)

種別	材質	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
母板	SS400	28	287.0	463.9	2.10×10^5	0.305
連結板	SS400	16	265.0	443.1	2.12×10^5	0.299

表-2 使用ボルト

ボルトの種別	ボルトの 等級	ネジの 呼び	首下長さ (mm)	有効 断面積 (mm ²)
高力六角ボルト	F10T	M22	100	303

図-1 試験体形状 (単位: mm)

表-3 試験体の内訳

試験体	母板			連結板	試験体数	
	表面処理の状況	素地調整の方法	仕上げる程度	無機ジンク 目標膜厚(μm)		
A	粗面状態	ディスクサンダー	通常	75	3	
B			少し弱め		3	
C			弱め		2	
D		鋼線カップブラシ	強め	3		
E		ディスクサンダー	少し弱め (素地:ブラスト)	30	1	
F				50	3	
G				100	3	
H		ブラスト処理	弱め	75	4	
I			少し強め		4	
J			強め		4	
K		無機ジンク(目標膜厚75μm)			2	
L					2	

※試験体A～Dのケレン前の表面状態は無機ジンクが7体、有機ジンクが4体である。

手 (以下、異種接合面継手) のすべり係数は、粗面側の表面粗さが $80\mu\text{m } R_{zJS}$ 以下の範囲において、 R_{zJS} が大きくなるにつれてすべり係数が大きくなり、粗面側の表面粗さは、すべり係数に影響を与える重要なパラメータであることを示した。しかし、素地調整における施工のばらつき、さらに、異種接合面継手の無機ジンクリッチペイントの膜厚が、すべり係数に与える影響は明らかにはなっていない。

そこで、補修・補強工事において、既設部材側にブラスト処理が困難な場合を想定して、無機ジンクリッチペイント面と2種ケレン面といった異なる接合面を有する高力ボルト摩擦接合継手試験体を用いてすべり耐力試験を実施し、無機ジンクリッチペイントの膜厚と2種ケレン面の表面粗さがすべり係数に与える影響を明らかにするとともに、2種ケレンによる鋼材粗面と無機ジンクリッチペイント面を接合面とする高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数を提案することを目的とする。

2. 試験体

(1) 試験体形状と寸法

試験体形状および寸法を図-1に示す。試験体の母板

には28mm厚、連結板には16mm厚の一般構造用圧延鋼材SS400を用い、高力ボルトにはM22(F10T)を使用した。試験体寸法は、高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)⁹⁾に示される標準試験片を採用し、すべり係数を0.4として、式(1)により算出されるすべり/降伏耐力比 β を0.66に設定した。本試験に使用した鋼材の材料試験結果と使用した高力ボルトを表-1、表-2にそれぞれ示す。

$$\beta = \frac{\mu \cdot m \cdot n \cdot N}{(W - d) \cdot t_1 \cdot \sigma_y} \quad (1)$$

ここで、 μ : すべり係数 m : 接合面数
 n : ボルト本数 N : 設計ボルト軸力(205 kN)
 W : 板幅(mm) d : 孔径(mm)
 t_1 : 母板厚(mm) σ_y : 鋼材の降伏点(N/mm²)

(2) 試験体の種類

試験体の種類を表-3に示す。母板の接合面処理は、既設部材を現場で加工することを想定して、動力工具を用いた2種ケレンを基本とし、素地調整の仕上げる程度を変化させることで鋼材粗面の表面粗さをパラメータとした。動力工具には、写真-1に示すようにディスクサンダー(砥粒C、粒度F16)と鋼線カップブラシ(線径

0.3mm)を使用した。ケレン作業は、実際に鋼橋の補修・補強を施工している業者に依頼し、作業員によるばらつきを考慮して原則として試験体毎に3人の作業員により行った。なお、試験体数が1体と2体の試験体については、作業員が順に1人1体ずつケレン作業を行った。試験体A～Dのすべり側の母板は、素地調整の仕上げの程度をそれぞれ指定し、表面粗さが算術平均粗さ $Ra < 5\mu m$ の範囲を目標とした。なお、ケレン前の表面状態は無機ジंकリッチペイント(以下、無機ジंक)を基本とし、試験体A, B, Dの一部では有機ジंकリッチペイント(以下、有機ジंक)の塗装面である。試験体E～Gは、ケレン前がブラスト面である試験体を用い、仕上げを少し弱めとすることで、算術平均粗さが $Ra \geq$

$5\mu m$ の範囲を目標とした。また、試験体H～Jはいずれもブラスト処理を行い、目標の表面粗さになるように、表面粗さが小さいものはアルミナグリッドを、表面粗さが大きいものはスチールグリッドをそれぞれ使い分けた。なお、素地調整に要する作業時間は、作業員の力の入れ具合や動力工具の摩耗状況等にも影響を受けるが、仕上げの程度の強弱は、概ね作業時間の長短を表している。通常の2種ケレンである試験体Aでは、塗膜が完全に除去されている状態を目標として、試験体BからCへとケレンの仕上げの程度が弱くなるにつれ、ケレン前の塗膜が少し残っている状態(2種ケレンが出来ていない状態)を目標とした。母板の接合面状態を写真-2に示す。

(a) ディスクサンダー (砥粒C, 粒度F16)

(b) 鋼線カップブラシ

写真-1 使用した動力工具

(a) 試験体A (ディスクサンダー通常)

(b) 試験体B (ディスクサンダー少し弱め)

(c) 試験体C (ディスクサンダー弱め)

(d) 試験体D (鋼線カップブラシ強め)

(e) 試験体E～G (ディスクサンダー少し弱め (素地:ブラスト))

(f) 試験体H (ブラスト弱め)

(g) 試験体I (ブラスト少し強め)

(h) 試験体J (ブラスト強め)

写真-2 接合面の状況

連結板は、新設部材を想定し、工場での加工として 1 種ケレン (ブラスト処理 ISO Sa 2.5) の後に無機ジंकを塗布し、その膜厚をパラメータとした。阪神高速道路 (株) の土木工事共通仕様書⁷⁾では、連結板の接合面における無機ジंकの標準膜厚を $75\mu\text{m}$ としている。また、2012 年に改訂された道路橋示方書・同解説¹⁾ではすべり係数 0.45 を確保できる条件の一つとして、無機ジंकの接触面片面あたりの最小乾燥塗膜厚を $50\mu\text{m}$ 以上としている。一方、改訂前の道路橋示方書・同解説⁸⁾ではすべり係数 0.4 を確保できる条件の一つとして、同じく $30\mu\text{m}$ 以上としていた。これらを考慮し、無機ジंकの目標膜厚は 30, 50, 75, $100\mu\text{m}$ とした。

(3) 表面粗さ

母板に無機ジंकを塗布する試験体 K, L を除くすべての母板に対して、ケレン作業後に表面粗さの計測を行った。表面粗さの測定には、触針式粗さ測定器 (株) ミツトヨ製、サーフテスト SJ-400) を用いた。計測した表面粗さパラメータ⁹⁾は、算術平均粗さ R_a 、最大高さ粗さ

図-2 表面粗さ計測位置 (単位: mm)

表-4 表面粗さ計測結果

試験体		R_a		R_z		$R_{z_{JS}}$	
		平均値 (μm)	変動係数	平均値 (μm)	変動係数	平均値 (μm)	変動係数
A	1	1.56	0.304	13.43	0.417	8.00	0.337
	2	1.50	0.282	10.96	0.313	7.18	0.259
	3	0.97	0.455	6.31	0.449	4.53	0.444
B	1	2.98	0.280	20.98	0.305	13.83	0.360
	2	2.21	0.349	16.38	0.410	10.08	0.301
	3	2.07	0.436	17.36	0.485	10.45	0.489
C	1	3.93	0.389	25.84	0.396	17.08	0.396
	2	2.97	0.223	19.56	0.155	14.17	0.225
D	1	3.21	0.280	19.68	0.256	12.86	0.293
	2	3.21	0.262	20.70	0.241	13.24	0.283
	3	3.59	0.340	19.86	0.298	13.03	0.311
E	1	9.33	0.221	51.16	0.185	35.06	0.162
F	1	9.41	0.154	50.78	0.117	36.18	0.135
	2	9.05	0.284	50.31	0.219	37.48	0.298
	3	9.39	0.277	53.18	0.219	37.10	0.216
G	1	8.48	0.341	54.46	0.271	35.44	0.282
	2	9.20	0.191	53.68	0.169	36.48	0.126
	3	9.01	0.258	54.86	0.122	37.01	0.169
H	1	5.88	0.075	35.84	0.342	25.19	0.154
	2	4.72	0.165	32.89	0.195	22.71	0.144
	3	6.38	0.243	37.10	0.167	24.23	0.180
	4	7.45	0.186	41.69	0.140	31.18	0.167
I	1	10.63	0.113	61.39	0.035	52.70	0.066
	2	10.27	0.097	64.45	0.142	51.15	0.075
	3	11.26	0.094	71.10	0.067	57.14	0.081
	4	10.90	0.076	74.16	0.114	56.98	0.070
J	1	21.80	0.119	151.58	0.174	115.16	0.112
	2	21.41	0.096	160.95	0.145	123.85	0.109
	3	20.67	0.060	162.91	0.140	119.28	0.075
	4	20.67	0.117	146.26	0.173	113.73	0.105

R_z 、十点平均粗さ $R_{z_{JS}}$ の 3 種類である。計測位置を図-2 に示す。母板 1 枚に対し片面 4 点×両面の計 8 点を、1 点につき 1 回の計測を行った。なお、粗さ計測の基準長さは 8mm で統一した。

各試験体で計測した表面粗さの測定結果の平均値と変動係数を表-4 に示す。2 種ケレンの通常仕上げの試験体 A は、 $R_a=1\sim1.6\mu\text{m}$ 、 $R_z=6\sim13\mu\text{m}$ 、 $R_{z_{JS}}=5\sim8\mu\text{m}$ であった。試験体 A から C へとケレンの仕上げが弱くなるにつれて、表面粗さの値が大きくなっていることが確認できる。鋼線カップブラシを使用した試験体 D は、ディスクサンダー少し弱めおよび弱めの試験体 B, C と同程度の表面粗さであることがわかる。次に、3 つの表面粗さパラメータの変動係数を見ると、ディスクサンダーや鋼線カップブラシを用いた試験体 A~G では、ブラスト処理した試験体 H~J に比べて大きくなった。これは、動力工具による素地調整は、作業員の力の入れ具合やサンダーがけの方向などもばらつきの原因となり、表面粗さの再現性はブラスト処理に比べ低いものと考えられる。

表面粗さパラメータ間の関係を図-3 に示す。同図には、全計測値をプロットしている。図中の式は、原点を通る直線回帰として求めた近似式を示し、実線で示している。相関係数はそれぞれ R_a と $R_{z_{JS}}$ においては 0.98, R_z と $R_{z_{JS}}$ においては 0.99, R_a と R_z においては 0.97 であり、算術平均粗さ R_a 、十点平均粗さ $R_{z_{JS}}$ 、最大高さ粗さ R_z にはそれぞれ互いに高い相関があることがわかる。また、同図には、文献 10)において森らが提示している表面粗さパラメータ間の近似式を点線で示している。文献 10)は、主にブラスト処理を対象として、ブラスト条件を変えて行った測定結果であるが、動力工具により 2 種ケレンを行った本研究の直線回帰式とほぼ同じであることから、表面粗さパラメータ間の関係は、素地調整の種類にはあまり影響を受けないことがわかる。

(4) 無機ジंकの塗装膜厚

試験体 K, L の母板およびすべての連結板に対して、無機ジंकの塗装膜厚の計測を行った。計測位置を図-4 に示す。母板は 1 枚につき片面 8 点×両面の計 16 点を、連結板は 1 枚につき片面 8 点をそれぞれ計測した。なお、1 点につき 5 回の計測を行った。

計測結果を表-5 に示す。すべての試験体においてばらつきは小さく、目標値に対して概ね $\pm 10\%$ 程度の範囲に収まっていることがわかる。ただし、目標膜厚 $30\mu\text{m}$ の試験体 E は、その他に比べ変動係数が大きい。これは、 $30\mu\text{m}$ の膜厚は、膜厚が薄く膜厚管理が難しいためと考えられる。

3. すべり耐力試験

(1) ボルト軸力

試験体のボルトの締め付けに先立ち、ボルト軸力のキャリブレーションを行うために、高力六角ボルト5本を用いて、ボルト軸部に2枚のひずみゲージを対称に平行に貼り、ボルト軸部のひずみを計測した。ひずみゲージの貼り付け位置を図-5に示す。

図-3 表面粗さパラメータ間の関係

試験体の製作は、母板と連結板の孔位置を合わせ、孔中央に高力ボルトを配置後、トルクレンチを用いて人力で締め付けを行った。すべり側のボルト2本には、ボルト

表-5 膜厚計測結果

試験体		連結板の膜厚			
		目標値 (μm)	平均値 (μm)	変動係数	平均値 /目標値
A	1	75	77.6	0.052	1.04
	2		73.5	0.049	0.98
	3		73.1	0.058	0.98
B	1		74.6	0.048	1.00
	2		72.8	0.057	0.97
	3		70.9	0.058	0.95
C	1		74.8	0.055	1.00
	2		71.1	0.051	0.95
D	1		73.3	0.052	0.98
	2		72.4	0.057	0.97
	3		70.9	0.051	0.95
E	1	30	35.7	0.101	1.19
F	1	50	44.8	0.086	0.90
	2		44.0	0.077	0.88
	3		45.6	0.070	0.91
G	1	100	94.5	0.041	0.95
	2		95.6	0.040	0.96
	3		93.6	0.038	0.94
H	1	75	76.6	0.048	1.02
	2		78.4	0.057	1.05
	3		77.9	0.053	1.04
	4		77.1	0.057	1.03
I	1		77.7	0.054	1.04
	2		76.4	0.054	1.02
	3		74.4	0.054	0.99
	4		75.1	0.053	1.00
J	1		73.6	0.057	0.98
	2		74.6	0.044	1.00
	3		77.3	0.045	1.03
	4		75.8	0.056	1.01
K	1	75	72.9	0.056	0.97
	2		71.9	0.055	0.96
L	1	75	74.6	0.057	0.99
	2		77.1	0.047	1.03

試験体		母板の膜厚			
		目標値 (μm)	平均値 (μm)	変動係数	平均値 /目標値
K	1	75	76.4	0.067	1.02
	2		75.1	0.065	1.00
L	1		76.3	0.029	1.02
	2		74.5	0.043	0.99

ト軸部に2枚のひずみゲージを貼り、ひずみゲージの値を監視しながら、設計ボルト軸力の1割増し(205kN×1.1=226kN)を目標として導入した。固定側は、トルク法により設計ボルト軸力の2割増し(205kN×1.2=246kN)を目標ボルト軸力として導入した。

(2) 計測項目と方法

載荷荷重、ボルト位置における母板と連結板間の相対変位、固定側とすべり側の母板間の相対変位、すべり側のボルト軸力を計測した。各相対変位はクリップ型変位計(株)東京測器研究所製、RA-5)により計測し、その取り付け位置を図-6に示す。

(3) 試験方法

すべり耐力試験は、大阪市立大学所有のアムスラー型万能試験機(載荷能力1,000 kN)を用いて行った。なお、

図-5 ひずみゲージの貼り付け位置 (単位: mm)

図-6 相対変位の計測位置 (単位: mm)

ボルト軸力のリラクセーションを考慮し、締め付け完了後24時間経過後に試験を行った。

荷重は、すべり側がすべり荷重に達し、ボルト軸部がボルト孔壁にあたる支圧状態となるまで載荷した。なお、すべり荷重は、明瞭な主すべりが生じた場合は主すべり発生直後に荷重が低下もしくは一定の値を保つため、最大荷重をすべり荷重と定義した。一方、緩慢なすべりにより明瞭な主すべりを生じない場合は鋼構造接合部設計指針¹⁾を参考に、ボルト位置での母板と連結板の相対変位が0.2mmまでに最大荷重が生じた場合はその最大荷重を、そうでない場合は内と外のどちらかのボルト位置での相対変位が0.2mmに達した時をすべり荷重と定義した。

4. 試験結果と考察

(1) 軸力減衰率

軸力減衰率の比較を図-7に示す。ここで、軸力減衰率とは、導入ボルト軸力に対する試験前(24時間)までのボルト軸力の減少量の割合であり、式(2)により算出している。軸力減衰率はすべての試験体で3~8%程度であった。連結板の無機ジンク膜厚が軸力減衰率に与える影響を把握するために、母板の表面粗さが同程度(Ra=8.5~9.4μm)の試験体E, F, Gを比較すると、無機ジンク膜厚が大きくなるにつれて、軸力減衰率が小さくなる傾向が確認できる。

軸力減衰率(%)

$$= \frac{\text{導入ボルト軸力(kN)} - \text{試験前ボルト軸力(kN)}}{\text{導入ボルト軸力(kN)}} \quad (2)$$

(2) 荷重と相対変位との関係

計測された荷重と相対変位の関係を、図-8, 9に示す。図-8は計測した5つの相対変位について、すべり側ですべりが先行した例(A-1)と、固定側ですべりが先行した後すべり側ですべりが生じた例(F-1)である。図-9

図-7 軸力減衰率の比較 (24時間)

は、相対変位に、すべり側内のボルト位置での母板と連結板の相対変位を用いて、代表的な試験体の荷重と相対変位の関係を比較したものである。

固定側の導入ボルト軸力はすべり側の導入ボルト軸力の約 10%増しとしているが、F-1 をはじめ、いくつかの試験体で固定側が先行してすべりが生じた。固定側に先行してすべりが生じた理由としては、すべり耐力にばらつきが大きかった可能性等が考えられる。

A-1 では、150kN 付近ですべり側と固定側の相対変位は同じように線形的に増加し、その後最大荷重を迎えるまではすべり側の変位の増分が大きくなり、すべり側にすべりが生じている。この最初の線形的な増加は、クリップ型変位計の設置箇所間における鋼材の弾性変形と考えられ、その後、母板と連結板間のすべりに伴う微小変位が加わっているものと考えられる。一方、F-1 では、概ね A-1 と同じ傾向であるが、固定側のすべりが先行したため、初期の線形的な増加後、固定側の変位増分がやや大きくなり、固定側にすべりが生じる。その後、固定側が支圧状態となって荷重が増大し、最大荷重に達して、すべり側にすべりが生じている。また、すべり側のすべりが先行した試験体は A-1、固定側のすべりが先行した後すべり側にすべりが生じた試験体は F-1 と、荷重と相対変位の関係は概ね同じであった。母板同士の相対変位（開口変位）は、どちらの試験体においても、連結板と母板の相対変位に比べ大きな変位となっており、すべり変形に連結板の弾性変形が加算されているためである。

(a) A-1

(b) F-1

図-8 荷重と5箇所相対変位の関係

(a) 試験体 A

(b) 試験体 E

(c) 試験体 F

(d) 試験体 G

(e) 試験体 J

(f) 試験体 K

図-9 代表的な試験体の荷重と相対変位の関係

図-9 より, すべての試験体において, 最大荷重の後, すべりの発生に伴い荷重の低下および変位の増加が見られた. 無機ジンク同士の組合せである試験体 K をみると, K-1 と K-2 とともにほぼ同一の挙動を示しており, 2 種ケレンと無機ジンクの組合せよりも, 無機ジンク同士の組合せのほうが供試体間のばらつきが少ない安定したすべり挙動が得られることがわかる.

(3) すべり係数

すべり耐力試験の結果を表-6 に示す. 表中のすべり荷重は, すべり側のすべり荷重を示している. これは, ボルト軸力を計測しているすべり側ですべり挙動を正確に評価するとしたためである. なお, 表中の3つのすべり係数については, ボルト軸力 N を, 設計ボルト軸力 (205kN) としたときのすべり係数を μ_1 , 試験前ボルト軸力としたときのすべり係数を μ_2 , すべり時ボルト軸力としたときのすべり係数 (摩擦係数) を μ_3 として, 式 (3)によりそれぞれ算出した.

$$\mu = \frac{P}{m \cdot n \cdot N} \quad (3)$$

ここで, μ : すべり係数 P : すべり荷重
 m : 接合面数 n : ボルト本数
 N : ボルト軸力

設計ボルト軸力を用いて算出したすべり係数 μ_1 は, 導入ボルト軸力, リラクセーションにばらつきが生じて

しまうため, 個体間のすべり係数の比較にはそれらのばらつきを含む. 一方, 試験前ボルト軸力によるすべり係数 μ_2 では試験体それぞれの軸力を用いるため, これらのばらつきを排除し, 個体間の接合面の状態におけるすべり係数の値の比較が可能となる. μ_1 , μ_2 , μ_3 において, すべり係数の大小の相対的な関係に差異はなかったため, 以下では試験前ボルト軸力を用いて算出したすべり係数 μ_2 による比較, 考察を行う.

すべり係数 μ_2 の比較を図-10 に示す. 通常のディスクサンダーの試験体 A ではすべり係数は 0.27~0.30 であり, すべり係数が 0.4 を下回る結果となった. 試験体 B, C においてもすべり係数は 0.3 前後であり, 0.4 を満足していない. また, 鋼線カップブラシを使用した試験体 D では, すべり係数は 0.19~0.21 であり, 非常に低いすべり係数となった. 表面粗さが比較的大きい試験体 E では, すべり係数は 0.37, 試験体 F では F-2 を除くと 0.42, 0.44, 試験体 G では 0.40~0.54 であり, 表面粗さが小さい試験体 A~D よりもすべり係数は大きくなる傾向であった. 試験体 F の中で F-2 のみがすべり係数が小さいのは, 試験体 F の無機ジンク膜厚が 45 μ m 程度と小さく, すべり係数がばらついたと考えられる. 試験体 H, I を見ると, いずれもすべり係数は 0.4 以上であり, 表面粗さが大きくなるに従いすべり係数も大きくなる傾向が見られた. しかし, 試験体 J では表面粗さをかなり大きくしたにも関わらず, すべり係数 0.60~0.67 であり, 試験

表-6 試験結果一覧

試験体		母板の表面粗さ(μ m)			連結板膜厚 (μ m)	導入軸力 (kN)	試験前軸力 (kN)	軸力減衰率 (%)	すべり荷重 (kN)	すべり時軸力 (kN)	すべり係数****			無機ジンクの 破壊箇所
		Ra	Rz	RzJIS							μ_1	μ_2	μ_3	
A	1**	1.6	13.4	8.0	77.6	228.4	217.5	4.8	244.4	212.7	0.30	0.28	0.29	界面
	2*	1.5	11.0	7.2	73.5	227.8	218.0	4.3	265.3	212.4	0.32	0.30	0.31	
	3*	1.0	6.3	4.5	73.1	227.7	217.8	4.3	237.5	213.6	0.29	0.27	0.28	
B	1**	3.0	21.0	13.8	74.6	230.9	219.7	4.9	238.3	214.5	0.29	0.27	0.28	界面
	2**	2.2	16.4	10.1	72.8	226.1	216.1	4.4	237.9	211.2	0.29	0.28	0.28	
	3*	2.1	17.4	10.5	70.9	226.0	218.6	3.3	211.7***	215.3	0.26	0.24	0.25	
C	1*	3.9	25.8	17.1	74.8	226.4	216.9	4.2	273.6	211.5	0.33	0.32	0.32	界面
	2*	3.0	19.6	14.2	71.1	227.0	216.5	4.6	251.3	210.7	0.31	0.29	0.30	
D	1*	3.2	19.7	12.9	73.3	226.9	217.0	4.4	186.3	213.5	0.23	0.21	0.22	界面+凝集
	2*	3.2	20.7	13.2	72.4	226.1	217.6	3.8	162.4	214.3	0.20	0.19	0.19	
	3**	3.6	19.9	13.0	70.9	226.9	219.2	3.4	168.0	215.3	0.20	0.19	0.20	
E	1	9.3	51.2	35.1	35.7	228.4	220.6	3.4	326.9	210.7	0.40	0.37	0.39	凝集
F	1	9.4	50.8	36.2	44.8	228.8	220.2	3.8	391.4***	206.5	0.48	0.44	0.47	凝集
	2	9.1	50.3	37.5	44.0	227.1	217.0	4.4	223.6	208.3	0.27	0.26	0.27	
	3	9.4	53.2	37.1	45.6	227.4	217.1	4.5	364.7***	202.5	0.44	0.42	0.45	
G	1	8.5	54.5	35.4	94.5	231.9	218.6	5.7	447.3***	204.4	0.55	0.51	0.55	凝集
	2	9.2	53.7	36.5	95.6	226.9	214.6	5.4	464.6***	198.7	0.57	0.54	0.58	
	3	9.0	54.9	37.0	93.6	226.6	215.0	5.1	344.2***	208.6	0.42	0.40	0.41	
H	1	5.9	35.8	25.2	76.6	226.9	218.7	3.6	369.0	208.6	0.45	0.42	0.44	界面+凝集
	2	4.7	32.9	22.7	78.4	226.7	213.9	5.6	382.0	204.5	0.47	0.45	0.47	
	3	4.4	37.1	24.2	77.9	225.7	214.9	4.8	387.5	208.1	0.47	0.45	0.47	
	4	7.5	41.7	31.2	77.1	226.5	213.5	5.7	412.0	206.4	0.50	0.48	0.50	
I	1	10.6	61.4	52.7	77.7	232.9	220.1	5.5	561.5	199.6	0.68	0.64	0.70	凝集
	2	10.3	64.5	51.2	76.4	227.7	211.3	7.2	497.5	196.0	0.61	0.59	0.63	
	3	11.3	71.1	57.1	74.4	228.9	219.5	4.1	508.0***	206.7	0.62	0.58	0.61	
	4	10.9	74.2	57.0	75.1	226.8	215.1	5.2	488.0	198.8	0.60	0.57	0.61	
J	1	21.8	151.6	115.2	73.4	225.4	213.4	5.3	532.0	199.0	0.65	0.62	0.67	凝集
	2	21.4	161.0	123.9	74.6	225.7	211.5	6.3	538.0	187.8	0.66	0.64	0.72	
	3	20.7	162.9	119.3	77.3	227.2	208.8	8.1	558.0***	188.8	0.68	0.67	0.74	
	4	20.7	146.3	113.7	75.8	226.3	209.9	7.3	506.5	187.5	0.62	0.60	0.68	
K	1	—	—	—	74.6	227.1	212.7	6.3	592.5	194.1	0.72	0.70	0.76	凝集
	2	—	—	—	77.1	224.1	212.3	5.2	578.5***	197.0	0.71	0.68	0.73	
L	1	—	—	—	72.9	225.7	213.4	5.4	509.6	196.4	0.62	0.60	0.65	凝集
	2	—	—	—	71.9	226.2	213.3	5.7	509.1	195.4	0.62	0.60	0.65	

注)*: ケレン前の表面状態が無機ジンク ***: ケレン前の表面状態が有機ジンク ****: 固定側のすべりが先行した試験体
 ****: μ_1 は設計ボルト軸力 (205kN), μ_2 は試験前ボルト軸力, μ_3 はすべり時ボルト軸力により算出した.

図-10 すべり係数の比較

体 I のすべり係数 0.57~0.64 とあまり変わらない。一方、無機ジンク面同士の試験体 K, L では、その他の試験体よりも安定したすべり係数が得られることがわかる。また、ケレン前の表面状態が無機ジンク、有機ジンクであっても両者のすべり係数に有意な差異は認められなかった。

(4) すべり係数と各パラメータとの関係

母板の表面粗さが同程度 ($R_a=8.5\sim11.3\mu m$) の試験体 E, F, G, I について、すべり係数 μ_2 と連結板の無機ジンク膜厚の関係を図-11 に示す。図中の式は、直線回帰した近似式であり、相関係数は 0.59 とやや高い結果となった。これより、無機ジンク膜厚が $50\mu m$ 以下の場合のすべり係数は、無機ジンク膜厚が $75\mu m$ 以上 $100\mu m$ 以下の場合に比べて小さくなることがわかる。

次に、連結板の目標無機ジンク膜厚が $75\mu m$ 以上の試験体を対象とし、すべり係数 μ_2 と表面粗さとの関係を図-12(a)~(c)に示す。近似直線は試験体 J 以外の試験体に対して算出した。すべり係数と表面粗さパラメータとの相関係数は、算術平均粗さ R_a で 0.90、最大高さ粗さ R_z で 0.90、十点平均粗さ $R_{z_{JS}}$ で 0.91 であり高い相関が見られた。しかし、試験体 J のように表面粗さを大きくしてもすべり係数は頭打ちし大きくならない。このことから、表面粗さが大きいことで粗面の凹凸が無機ジンク面に引っかかりやすくなるため、すべり係数は表面粗さに対して線形的に大きくなるものと推察される。一方、試験体 J のように、連結板の無機ジンク膜厚以上の表面粗さを有しても、無機ジンクへの引っかかりは試験体 I と同等であるため試験体 I とほとんど同じすべり係数であったと考えられる。算術平均粗さ R_a が $4\mu m$ 以下の場合、すべり面の破壊は無機ジンクと鋼材粗面の界面で生じるが、算術平均粗さ R_a が $8\mu m$ 以上の場合では無機ジンクの凝集破壊が生じると考えられる。また、素地調整方法が鋼線カップブラシである試験体 D のすべり係数は 0.2 未満となることもあり、低い値となった。なお、

図-11 すべり係数 μ_2 と無機ジンク膜厚の関係

図-11 において、Case-I のすべり係数が近似直線の上側に位置しているが、これは、他のケースより表面粗さが、 R_a で $1\sim2\mu m$ 程度大きいと考えられる。

既往の研究との比較のため、すべり係数 μ_1 と十点平均粗さ $R_{z_{JS}}$ との関係をプロットしたものを図-12(d)に示す。文献 5) は本試験と同様に母板が鋼材粗面、連結板が無機ジンクの組合せであり、文献 10) は鋼材粗面同士の組合せである。また同図には、連結板の無機ジンク膜厚が $50\mu m$ 以上の試験結果 (本試験) と文献 5) で行われた試験の結果をともに用いた場合の近似直線と、文献 10) の試験結果の近似直線を示している。

$R_{z_{JS}}$ が $40\mu m$ 程度までの領域では、無機ジンクと鋼材粗面のすべり係数と鋼材粗面同士のすべり係数に大きな差はみられないが、 $60\sim80\mu m$ の領域で無機ジンクと鋼材粗面の方がすべり係数が大きくなる傾向にあった。文献 10) において、鋼材粗面同士では $R_a=10\sim15\mu m$ ($R_{z_{JS}}$ では $54\sim81\mu m$) の範囲では、すべり係数が小さくするとされているが、無機ジンクと鋼材粗面の場合は、無機ジンクの柔らかい層が鋼材粗面の凹凸にかみ合い、そのような傾向が見られないものと考えられる。

連結板の無機ジンク膜厚が $50\mu m$ 以上の試験結果 (本試験) と文献 5) で行われた試験の結果をともに用いて、直線近似した場合の相関係数は 0.92 であった。これは、文献 10) の鋼材粗面同士の近似直線の相関係数 0.83 より

も大きく、すべり係数と表面粗さの相関が強いことがわかる。また、両者の近似曲線の傾きも異なった。

(5) すべり面の観察

すべり耐力試験終了後、試験体を解体してすべり面の観察を行った。すべり面の状況の一例を写真-3に示す。なお、写真の上段が連結板を、下段が母板を示しており、写真の左方向に母板を引っ張った場合となるように整理している。界面破壊と凝集破壊の破壊イメージを図-13に示す。

これより、すべての試験体において、連結板のボルト孔周辺に無機ジंकの損傷が見られた。母板の表面粗さが小さい試験体 A~D では、写真-3(a)試験体 A に示すように、連結板の無機ジंकの損傷に対して母板には無機ジंकの付着が見られなかった。即ち、図-13(a)の破壊イメージのように母板の表面粗さが小さい試験体 A~D では、母板と無機ジंकの界面ですべりが発生（界面破壊）したものと考えられる。次に、母板の表面粗さが大きい試験体 E~J では、連結板の無機ジंकの損傷に対して母板にその無機ジंकの付着が確認できる。このことから、これらの試験体は、図-13(b)のように連結板の無機ジंकの塗装内における凝集破壊によるすべりが発生したものと考えられる。また、無機ジंक同士の試験体 K, L も同様に無機ジंकの凝集破壊によるすべりが

発生したものと考えられる。

5. 2 種ケレンによる鋼材粗面と無機ジंक面の高力ボルト摩擦接合継手の破壊メカニズムとすべり係数

本試験の結果、表面粗さが大きい場合は、すべり係数が大きく、またそのすべり面は無機ジंक塗装内での凝集破壊であった。一方、表面粗さが小さい場合は、すべり係数が小さく、またそのすべり面は母板と無機ジंकとの界面破壊であった。これより、母板の表面粗さが小さい場合は、母板粗面の凹凸が小さいために無機ジंकとの引っかかりが少なく、母板と無機ジंकとの界面破壊によりすべり、そのすべり係数が小さくなるものと考えられる。一方、母板の表面粗さが大きい場合は、母板粗面の凹凸と無機ジंकとの引っかかりが大きく、無機ジंक塗装内における凝集破壊によりすべるものと考えられ、すべり係数は、無機ジंकのせん断強度や膜厚に依存するものと考えられる。

2 種ケレンによる鋼材粗面においても表面粗さパラメータ間にはそれぞれ非常に高い相関が認められるため、算術平均粗さ R_a を基準として、接合面が 2 種ケレンによる鋼材粗面と無機ジंक面の場合の高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数を提案することとする。なお、算術

(a) すべり係数 μ_2 と算術平均粗さ R_a

(b) すべり係数 μ_2 と最大高さ粗さ R_z

(c) すべり係数 μ_2 と十点平均粗さ R_{z15}

(d) すべり係数 μ_1 と十点平均粗さ R_{z15} (既往の研究との比較)

図-12 すべり係数と表面粗さパラメータの関係

写真-3 試験後の接合面状況の例

図-13 接合面の破壊イメージ

平均粗さ Ra を基準としたのは、高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)⁹⁾と同様にするためである。

本試験では、連結板の無機ジンク膜厚が $50\mu\text{m}$ 未満のように小さくなるとすべり係数も小さくなったことから、無機ジンクの施工品質のばらつきなども考慮し、無機ジンクの設計膜厚は例えば $75\mu\text{m}$ 程度にしておくのがよい。無機ジンクの膜厚を小さくすることは、膜厚管理が難しく、施工品質やすべり係数がばらつくために避けた方がよい。また、道路橋示方書・同解説¹⁾では、接触面に無機ジンクを塗布する場合は、接触面の合計乾燥膜厚は $100\sim 200\mu\text{m}$ 、片面あたりの最小乾燥膜厚は $50\mu\text{m}$ 以上とされていることから、片面の乾燥膜厚は最大で $150\mu\text{m}$ まで許容されているものと考えられるため、異種接合継手における連結板の無機ジンク膜厚の上限値は $150\mu\text{m}$ が良いと考えられる。無機ジンク膜厚が $50\mu\text{m}$ 以上にお

図-14 すべり係数と表面粗さの関係

いて、母板粗面の表面粗さが $Ra=1\sim 4\mu\text{m}$ の試験体では母板と無機ジンクの界面破壊によりすべりが発生し、表面粗さが $Ra=8\mu\text{m}$ 以上の試験体では無機ジンクの塗装内で、明確な凝集破壊によりすべりが発生していることが確認できた。無機ジンクが界面破壊した供試体より凝集破壊した供試体の方がすべり係数は高く、接合面が鋼材粗面と無機ジンク面の場合では、すべり係数を高くするには、無機ジンク層内での凝集破壊が生じるように、母板の表面粗さを指定する必要があると考えられる。

以上の結果を踏まえ、無機ジンク膜厚が $50\mu\text{m}$ 以上 $150\mu\text{m}$ 以下の試験体を対象として、試験前ボルト軸力により算出したすべり係数と表面粗さの関係を図-14 に示す。同図には、凝集破壊か界面破壊の破壊形態も示して

いる。ただし、凝集破壊と界面破壊が混在した試験体については示していない。無機ジンクの膜厚を $50\mu\text{m}$ 以上 $150\mu\text{m}$ 以下に確保している場合、2 種ケレンによる鋼材粗面と無機ジンク面の高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数は、鋼材粗面の表面粗さが、算術平均粗さ $Ra \geq 5\mu\text{m}$ の場合は 0.4, $Ra < 5\mu\text{m}$ の場合は 0.2 を提案する。

6. まとめ

補修・補強工事において、既設部材にブラスト処理が困難な場合を想定し、2 種ケレン面と無機ジンク面の組合せを対象にすべり耐力試験を実施し、無機ジンク膜厚と 2 種ケレン面の表面粗さがすべり係数に与える影響について検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 2 種ケレンにおいても、表面粗さのパラメータである、算術平均粗さ Ra と最大高さ粗さ Rz と十点平均粗さ Rz_{JS} との間には、それぞれ高い相関がある。
- (2) ディスクサンダー（砥粒 C、粒度 F16）による通常の 2 種ケレン仕上げでは、鋼材粗面の表面粗さは、 $Ra=1\sim 1.6\mu\text{m}$, $Rz=6\sim 13\mu\text{m}$, $Rz_{JS}=5\sim 8\mu\text{m}$ であった。また、表面粗さの変動係数は大きく、動力工具による素地調整は、作業員の力の入れ具合やサンダーがけの方向などもばらつきの原因となり、表面粗さの再現性は低いものと考えられる。
- (3) ディスクサンダーによる通常の 2 種ケレン仕上げ（塗膜が完全に除去された状態： $Ra=1\sim 1.6\mu\text{m}$ ）と無機ジンクとの組合せでは、すべり係数は 0.27～0.30 であり、0.4 を下回った。
- (4) 最大高さ粗さ Rz が無機ジンク膜厚より小さい場合はすべり係数と各表面粗さパラメータ（ Ra , Rz , Rz_{JS} ）は線形の関係であった。しかし、無機ジンク膜厚以上の最大高さ粗さ Rz においては、頭打ちする結果となった。
- (5) 鋼材粗面同士の組合せよりも、鋼材粗面と無機ジンクとの組合せの方が、鋼材粗面の表面粗さとすべり係数の相関性は高いことがわかった。また、 Rz_{JS} が $40\mu\text{m}$ 程度までの領域は両者に大きな差はみられないが、 $60\sim 80\mu\text{m}$ の領域で鋼材粗面同士の場合よりも無機ジンクと鋼材粗面の場合の方がすべり係数が大きくなる傾向にあった。
- (6) すべり試験後の接合面観察により、無機ジンク膜厚を $50\mu\text{m}$ 以上確保している場合、表面粗さが小さい試験体では母板と無機ジンクの界面においてすべり

が発生し、表面粗さが大きい試験体では無機ジンク層内での凝集破壊によりすべりが発生していることが確認できた。また、表面粗さが大きい方がすべり係数が大きくなったことから、無機ジンクの界面破壊よりも無機ジンクの凝集破壊の方がすべり係数が大きくなると判断できる。

- (7) 2 種ケレンによる鋼材粗面と無機ジンク面の高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数について、新規部材の無機ジンク膜厚を $50\mu\text{m}$ 以上 $150\mu\text{m}$ 以下とすれば、動力工具を用いて素地調整した既設部材の表面粗さが、算術平均粗さ $Ra \geq 5\mu\text{m}$ の場合はすべり係数 0.4, $Ra < 5\mu\text{m}$ の場合はすべり係数 0.2 を提案した。

$Ra \geq 5\mu\text{m}$ を確保する 2 種ケレンの施工方法や品質管理方法については今後の課題であるが、表面粗さを確保するために、著者らが文献 5) で用いた回転式動力工具による素地調整等が考えられ、また素地調整の後には、表面粗さを測定し、確認する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，2012.3.
- 2) 森猛，南邦明，井口進，山口隆司：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，pp.48-59，2008.1.
- 3) 阪神高速道路公団：道路構造物の補修要領 第 1 部 鋼構造物 第 3 編 鋼桁切欠部の補修要領，2005.4.
- 4) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，2005.12.
- 5) 丹波寛夫，木村聡，杉山裕樹，山口隆司：無機ジンクリッチペイント面とそれと異なる接合面処理がなされた高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験，構造工学論文集，Vol.58A，pp.803-813，2012.3.
- 6) 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)，2006.12.
- 7) 阪神高速道路株式会社：土木工事共通仕様書，2009.2.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，2002.3.
- 9) 日本規格協会：JIS B 0601，製品の幾何特性仕様（GPS）—表面性状：輪郭曲線方式—用語，定義及び表面性状パラメータ，2013.
- 10) 森猛，田坂康介，一宮充，小笠原照夫：鋼材の表面粗さパラメータと高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.67，No.2，pp.446-453，2011.
- 11) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，pp.281-283，2006.3.

(2013. 8. 22 受付)

SLIP FACTOR OF HIGH STRENGTH BOLTED FRICTIONAL JOINTS WITH ROUGHENED STEEL SURFACE AND INORGANIC ZINC RICH PAINTED SURFACE

Yoshio TAMBA, Shinya YUKITO, Satoshi KIMURA, Takashi YAMAGUCHI
and Kunitomo SUGIURA

As for on-site of the maintenance and strengthening work for steel bridges, the high strength bolted friction type joints are often applied. But, the surface preparation of the existing steel member may not be able to be processed abrasive blast-cleaning depending on site conditions. Therefore, the slippage tests were carried out using splice plates processed the inorganic zinc rich paint on surface and connected plates varied surface roughness on surface. As a result of the slip test, it was found that the slip factor and surface roughness have a linear relationship up to painted 75 μ m thickness of inorganic zinc-rich paint. And it is proposed that in case that painted 50 μ m~150 μ m thickness of inorganic zinc-rich paint, the slip factor is 0.4 in case of Ra (arithmetic mean estimation) > 5 μ m, but it is 0.2 in case of Ra < 5 μ m.