

錆促進剤塗布後の曝露期間に着目した 高力ボルト摩擦接合継手のすべり試験

SLIP TEST OF HIGH STRENGTH BOLTED FRICTIONAL JOINT FOCUSED ON EXPOSURE PERIOD AFTER APPLIED RUST PROMOTER

吉岡 夏樹* 橘 肇** 岡田 幸児**
Natsuki Yoshioka Hajime Tachibana Koji Okada

鋼橋の補強工事において、既設部材に新設部材を取り付ける場合、高力ボルト摩擦接合が採用されることが多い。その際、新設部材の接合面には取付けまでの防錆等を考慮し、無機ジンクリッチペイントを塗装する。一方、既設部材の接合面に対し、ブラスト処理を用いた場合には粉塵の回収や近隣住居等への騒音問題、狭隘な施工空間における作業効率の低下等が懸念されるが、動力工具を用いた素地調整では、摩擦接合面の表面粗さが低くなり、すべり係数が確保できない可能性がある。このような問題を解決するため、既設部材の接合面処理方法として、接合面に錆促進剤を塗布し、赤錆を発生させる接合面処理方法がある。

本稿では、実際の施工現場での曝露期間を想定し、曝露期間をパラメータとしたすべり試験結果から改良した錆促進剤による発錆状態がすべり係数に与える影響を考察する。

キーワード：高力ボルト摩擦接合、錆促進剤、補修・補強、すべり係数

1. まえがき

鋼橋の補修・補強工事において、高力ボルト摩擦接合を用いる際、一般にディスクグラインダ等を用いて既設部材の塗装を除去する。その場合、摩擦接合面を平滑に仕上げるため、設計で求められるすべり係数を確保することが困難な場合が想定される。そこで既設部材の接合面に錆促進剤を塗布し、赤錆を発生させる接合面処理方法の採用が考えられる。しかし、この接合面処理方法は既に建築分野において使用されているが、工程上のやむを得ない事情により、自然発錆が期待できない場合に限定されている。また、既設橋梁では床版が屋根代わりとなり、十分な発錆状態が得られない可能性があることから、錆促進剤を塗布した接合面処理方法を土木分野で適用する場合を想定した性能評価が必要である。

筆者らは文献 1)にて、錆促進剤塗布後 3 週間以上曝露

し、接合面を発錆させた試験体によるすべり試験から、0.56 のすべり係数を得た。本稿では、実際の施工現場での曝露期間を想定し、曝露期間を錆促進剤塗布後 12~48 時間としたすべり試験結果から、錆促進剤による発錆状態がすべり係数に与える影響を考察する。

2. すべり試験

2.1 すべり試験体の形状

本試験で使用した鋼材の鋼種および材料特性を表-1 に、高力ボルトの種類を表-2 に示す。試験体には高張力鋼 SM490Y を使い、母板厚は 28mm、連結板厚は 16mm とし、高力ボルトは M22(F10T)を用いた。

試験体の形状および寸法を図-1 に示す。試験体のすべり/降伏耐力比 β_d は、式(1)を用いて算出した²⁾。その値はすべり係数 μ を 0.4 と仮定し、すべり先行となるように $\beta_d=0.437$ とした。

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

ここに、 μ ：すべり係数(=0.4) m ：接合面の数(=2)

n ：ボルト本数(=2) N ：設計ボルト軸力 W ：板幅
 d ：孔径 t_f ：母板厚 σ_y ：鋼材の降伏点(規格値)

2.2 すべり試験パラメータ

文献 1)では、本研究で想定する現場での接合面処理方

表-1 使用鋼材の鋼種および材料特性

種別	材質	板厚 (mm)	板幅 (mm)	孔径 (mm)	上降伏点 (N/mm ²)	下降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比
母板	SM490Y	28	100	24.5	378.3	367.9	517.7	2.09x10 ⁵	0.277
連結板	SM490Y	16	100	24.5	405.1	398.3	530.2	2.10x10 ⁵	0.282

表-2 高力ボルトの種類

ボルトの種別	高力ボルトの等級	ネジの呼び	首下長さ (mm)	有効断面積 (mm ²)
トルシア型高力ボルト	F10T	M22	100	303

* 技術本部 橋梁設計部 東京設計課

** 技術本部 技術研究室

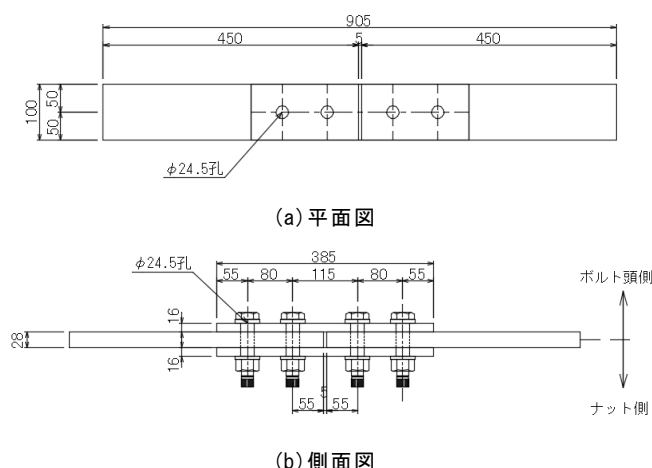


図-1 試験体の標準形状 (単位: mm)

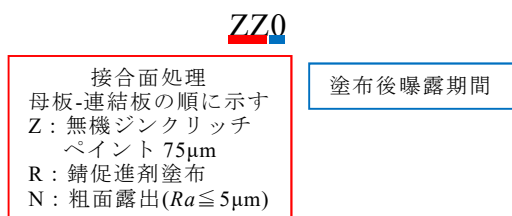


図-2 すべり試験体の命名法

表-3 すべり試験のパラメータ

試験ケース	接合面処理		塗布後曝露時間 (h)	組み立て後リラクゼーション期間		
	母板	連結板				
ZZ0	無機ジンクリッチペイント75μm	無機ジンクリッチペイント75μm	72時間			
NZ48	ケレン (Ra ≤ 5μm)					
RZ12	ケレン (Ra ≤ 5μm) → 錆促進剤塗布 (100g/m ² ×2回)				12	
RZ24					24	
RZ36					36	
RZ48					48	
RZ48Y					48	
RR12					ケレン (Ra ≤ 5μm) → 錆促進剤塗布 (100g/m ² ×2回)	12
RR24	24					
RR36	36					
RR48	48					

法の基本ケース (母板: 錆促進剤による赤錆, 連結板: 無機ジンクリッチペイント 75μm) のすべり係数が 0.56 となった。また, 母板および連結板ともに算術平均粗さ $Ra \leq 5\mu m$ となるまでケレンしたのちに錆促進剤を塗布したケースのすべり係数が 0.73 となり, 全ケースにおいて最も高くなった。これより, 本試験で想定する現場での接合面処理方法は, 文献1)と同様とした。したがって, 本試験でのすべり試験パラメータは, ①母板の接合面処理方法, ②連結板の接合面処理方法, ③錆促進剤塗布後の試験体組立までの曝露期間および④組立後リラクゼーション期間とした。試験体の命名法を図-2に, 試験パラメータを表-3にそれぞれ示す。各パラメータにつき試験体数は3体とした。

表-4 NU-C2の塗装系³⁾

塗装系	素地調整	塗装工程	塗料名	塗料規格	使用量 g/m ² 回	回数	塗装方法	塗装間隔
NU-C2	2種	下塗り第1層	有機ジンクリッチペイント	SDK P-312	300	1	はけ	1日~10日
		下塗り第2層	変性エポキシ樹脂塗料下塗り	SDK P-314	240	1		1日~10日
		下塗り第3層	変性エポキシ樹脂塗料下塗り	SDK P-314	240	1		1日~10日
		中塗り	ポリウレタン樹脂塗料用中塗り	SDK P-322	140	1		1日~10日
		上塗り	ポリウレタン樹脂塗料用上塗り	SDK P-331	120	1		1日~10日

ZZ0 は標準的な接合面処理方法として, 全体での比較ケースとした。NZ48 は錆促進剤塗布によってすべり係数が向上することを確認するために, ケレン後に錆促進剤を塗布しない比較ケースとした。RZ12~48 は錆促進剤塗布後の試験体組立までの期間をパラメータとし, 錆促進剤塗布後の赤錆面における表面粗さや錆厚, 曝露期間がすべり係数に与える影響を考察し, 土木の現場において錆促進剤が適用可能であるかを検討する。RZ48Y は組立後のリラクゼーション期間を1年とすることで, 錆促進剤によって発生した赤錆の進行が止まり, 組立後1年以上経過してもすべり係数が保たれていることを確認する。RR12~48 は母板, 連結板ともに錆促進剤を塗布し, 赤錆を発生させることで, 錆促進剤塗布後の赤錆の表面粗さ, 錆厚および曝露期間がすべり係数に与える影響を考察する。また, 母板と連結板の接合面処理方法を同処理とすることで, より短期間ですべり係数が向上するかを確認する。

2.3 すべり試験体の製作

(1) 既設部材の再現

本試験では鋼部材の取替えや鋼橋の補修を想定しているため, ZZ0 以外の母板は既設構造物の塗装として, 「首都高速道路株式会社, 橋梁塗装設計施工要領」³⁾の塗替え塗装系, NU-C2 を再現した。NU-C2 の塗装系を表-4に示す。塗装した試験体の接合面はケレンによる素地調整を行うため, NU-C2 を再現する塗装工程として, 下塗り第一層である有機ジンクリッチペイント (以下, 有機ジンクとする) までとした。また, ZZ0 の母板, ZZ0, NZ48, RZ12~48 および RZ48Y の連結板には, 無機ジンクリッチペイント (以下, 無機ジンクとする) を膜厚 75μm となるように塗布した。膜厚の測定箇所は母板および連結板の各孔周りの4点で, 1点につき1回測定を行っている。無機ジンクの膜厚は最大 88.1μm, 最小 62.5μm, 平均 72.7μm であった。

(2) 再現した既設部材のケレン

既設部材を再現した試験体は, ダブルアクションサンダ (コンパクト・ツール株式会社: 945A4) の番号#40



図-3 ケレン作業の状況（ダブルアクションサンダ）

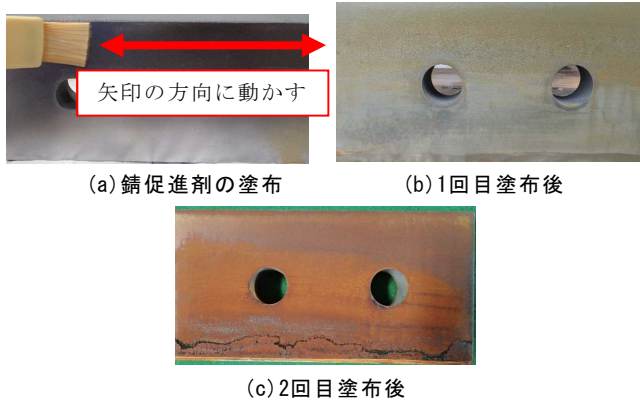


図-4 錆促進剤塗布時の状況（鉛直設置し、塗布）

を用いてケレン作業を行った。ケレン作業の状況を図-3に示す。ケレン作業は試験体の算術平均粗さ $Ra \leq 5\mu\text{m}$ となるように行った。

(3) 錆促進剤の塗布および曝露

文献 1)と同様に、錆促進剤を $100\text{g}/\text{m}^2$ ずつ 2 回に分けて（合計 $200\text{g}/\text{m}^2$ ）鉛直に設置したすべり試験体に塗布した。1回の塗布で使用する錆促進剤の量は 2.2g ($100\text{g}/\text{m}^2 \times 220\text{mm} \times 100\text{mm}$) とし、1つの接合面に 2 回の塗布を行い、合計 4.4g の錆促進剤を塗布した。塗布する際、ボルト孔に錆促進剤が入りこむことを考慮し、錆促進剤塗布量の計算にボルト孔の面積も含めている。2 回目の塗布は 1 回目に塗布した錆促進剤が乾いたことを目視で確認したのちに行った。すべり試験体への錆促進剤塗布の状況を図-4に示す。なお、錆促進剤の塗布は屋内で行い、各ケースで設定した期間となるまで屋内で曝露した。

3. 表面粗さおよび錆厚の測定

3.1 測定方法

測定項目は算術平均粗さ Ra および錆厚とし、表面粗さの測定には表面粗さ測定機（株式会社ミツトヨ製：SJ-210）を、錆厚の測定には電磁式膜厚計（株式会社サンコウ電子研究所製：SWT-8000 II）を用いた。表面粗さ測定の基準長さは JIS B 0601-2001 に基づき、 2.5mm とした。表面粗さおよび錆厚の測定箇所は内側ボルトの孔周りの 4 点とし、母板は両面、連結板は接合面のみ測定を行った。表面粗さは 1 点につき 1 回、錆厚は 1 点につき 5 回測定した。

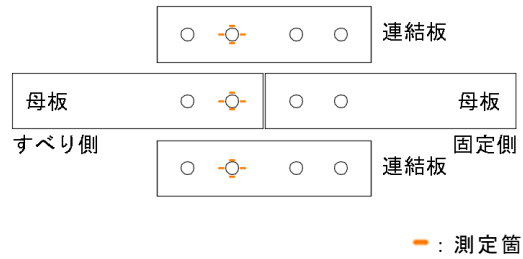


図-5 表面粗さおよび錆厚の測定箇所

表-5 母板の表面粗さおよび錆厚と曝露期間の関係

(a) 算術平均粗さ Ra

時間	曝露前	12時間後	24時間後	36時間後	48時間後
平均 (μm)	1.5	2.9	3.8	4.1	4.3
標準偏差	0.305	0.671	0.699	0.872	1.131
変動係数	0.207	0.230	0.186	0.215	0.263
増加率 (%)		49.5	22.2	7.6	5.5

(b) 錆厚

時間	曝露前	12時間後	24時間後	36時間後	48時間後
平均 (μm)	0.0	10.0	13.5	14.8	15.0
標準偏差	0.000	2.801	3.016	3.601	4.308
変動係数		0.279	0.224	0.244	0.287
増加率 (%)			25.5	8.7	1.7

表面粗さおよび錆厚の測定箇所を図-5に示す。表面粗さを測定するタイミングは錆促進剤塗布前、塗布 12、24、36、48 時間後とした。錆厚を測定するタイミングは錆促進剤塗布 12、24、36、48 時間後とした。

3.2 測定結果

試験体曝露開始時に外気温が最も高くなった試験体は、RZ24-1 の曝露開始時で、気温 24.9°C 、湿度 60.3% であった。一方で、曝露開始時に外気温が最も低くなった試験体は RZ48Y であり、気温 17.2°C 、湿度 64.8% であった。算術平均粗さ Ra および錆厚と曝露期間との関係を表-5に示す。ここで、12 時間後までの錆厚増加率は曝露 0 時間の錆厚を $0\mu\text{m}$ としているため、算出してない。

母板の算術平均粗さ Ra は曝露前～12 時間後の増加率が 49.5% と最も大きくなり、36～48 時間後の増加率は 5.5% となった。錆厚の増加率は 12～24 時間後の増加率が 25.5% と最も大きくなり、36～48 時間後の増加率は 1.7% となった。

4. すべり試験

4.1 すべり試験方法

すべり試験は、大阪市立大学が所有する載荷能力 $1,000\text{kN}$ のアムスラー型万能試験機を用いて行った。載荷は載荷速度 $1\text{kN}/\text{sec}$ を目標として行った。なお、高力ボルト締付け後のリラクセーションによるボルト軸力の低下を考慮し、締付け完了から 72 時間以上経過してから試験を行った。すべり試験の状況を図-6に示す。



図-6 すべり試験の状況

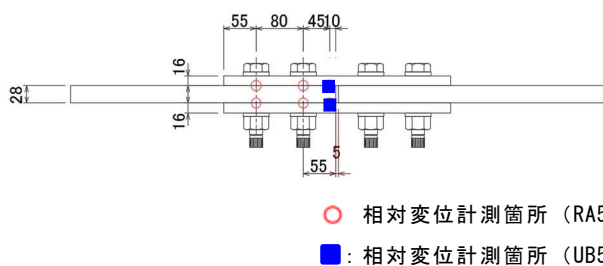


図-7 相対変位計測箇所 (単位: mm)

4.2 計測項目

すべり挙動を考察するために、母板および連結板の相対変位を計測した。計測箇所を図-7に示す。すべり側の2本のボルト位置における母板と連結板の側面での相対変位を、クリップ型変位計(株東京測器研究所製, RA5)を用いて計測した。また、「鋼構造接合部設計指針」⁴⁾より、すべり荷重を判定するための相対変位計測位置を母板端から縁端距離10mmとし、この位置における母板と連結板の側面における相対変位を、クリップ型変位計(株東京測器研究所製, UB5)を用いて計測した。

4.3 すべり試験結果

すべり試験では、すべり側の継手部がすべり荷重に達し、ボルト孔壁がボルト軸部にあたる支圧状態となるまで載荷を行った。すべり荷重は縁端距離10mmの位置で計測している相対変位が、0.2mmまでに最大荷重が生じた場合はその最大荷重、明瞭な主すべりが生じた場合はその主すべり荷重、明瞭な主すべりが生じない場合は相対変位0.2mmに対応する荷重とそれぞれ定義した。

(1) ボルト軸力のリラクセーション

高力ボルトの締付けからすべり試験までの期間におけるボルト軸力の経時変化の一例を図-8に、すべり試験直前の各試験体における軸力残存率を図-9にそれぞれ示す。なお、軸力残存率は導入ボルト軸力に対する試験前ボルト軸力までのボルト軸力の残存率であり、式(2)により算出している。

$$\text{軸力残存率(\%)} = \frac{\text{試験前ボルト軸力(kN)}}{\text{導入ボルト軸力(kN)}} \times 100 \quad (2)$$

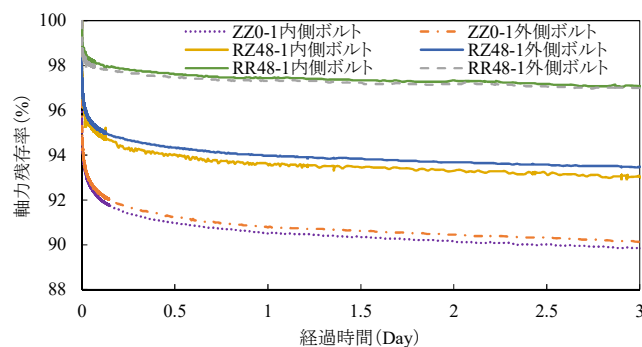


図-8 ボルト軸力の経時変化の一例

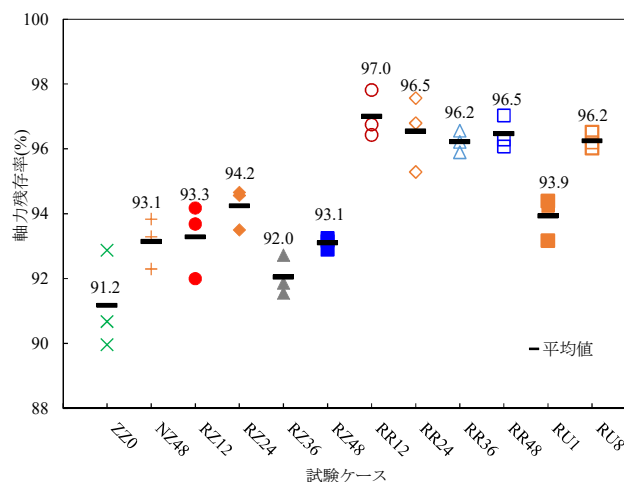


図-9 軸力残存率の比較

母板および連結板ともに接合面を無機ジンクとしたZZ0の軸力残存率が最も小さく、平均で91.2%となった。これは、無機ジンクが押しつぶされることによるボルト軸力のリラクセーションの影響であると考えられ、接合面を赤錆面とするより無機ジンクとした方が、ボルト軸力の低下が大きい結果となった。母板の接合面を錆促進剤により発錆させ、連結板の接合面を無機ジンクとしたRZ12~48の軸力残存率は最小で92.0%、最大で94.2%となり、文献1)において接合面処理が同処理であるRU1の軸力残存率93.9%と同等になった。また、母板および連結板ともに錆促進剤を塗布し、赤錆を発生させたRR12~48の軸力残存率は最小で96.2%、最大で97.0%となり、文献1)において接合面処理が同処理であるRU8の軸力残存率96.2%と同等になった。したがって、接合面を錆促進剤で発錆させたケースの軸力残存率は文献1)の結果と比較すると、短期間の曝露期間においても、3週間以上曝露した場合と同等の結果となった。

(2) すべり荷重とすべり係数

すべり試験結果の一覧を表-6に、すべり係数の比較を図-10にそれぞれ示す。以後、単に「すべり係数」という場合は試験前ボルト軸力によって算出した値のことを

いう。すべり係数 μ は文献2)より式(3)を用いて算出した。

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

ここに、 μ : すべり係数 P : すべり試験によるすべり荷重

m : 接合面の数(=2) n : ボルト本数(=2)

N : 試験前ボルト軸力もしくは設計ボルト軸力

母板の接合面を算術平均粗さ $Ra \leq 5\mu\text{m}$ となるまでケレンした後に錆促進剤を塗布し、曝露期間を12~48時間まで12時間ごとに設定したRZ12~48のすべり係数は、RZ24が0.55となり最も高くなった。これより、文献1)において接合面処理が同処理であるRU1のすべり係数0.56と同等の結果となり、実際の現場における施工期間として想定している1~2日程度の曝露期間ですべり係数0.40を満足することができた。一方で、RZ12のすべり係数は0.50となり、最も低くなった。

母板および連結板ともに接合面を算術平均粗さ $Ra \leq 5\mu\text{m}$ となるまでケレンした後に錆促進剤を塗布し、曝露期間を12~48時間まで12時間ごとに設定したRR12~48のすべり係数は、RR24が0.80となり最も高くなった。これより、RR24のすべり係数は文献1)の接合面処理が同処理であるRU8のすべり係数0.73よりも高い結果となった。RR24のすべり係数が文献1)より高くなった理由として、ケレン程度の差異により、錆促進剤塗布前の接合面の状況が異なっていたことが考えられる。文献1)のディスクグラインダ(番手#40)を用いたケレンでは、接合面に対して斜めにディスクが当たる。一方で、本試験で用いたダブルアクションサンダ(番手#40)は接合面を均等にケレンすることが可能のため、より平滑にケレンすることができた。その結果、接合面に発生した緻密な赤錆がよりかみ合わさり、すべり係数が高くなったと考えられる。

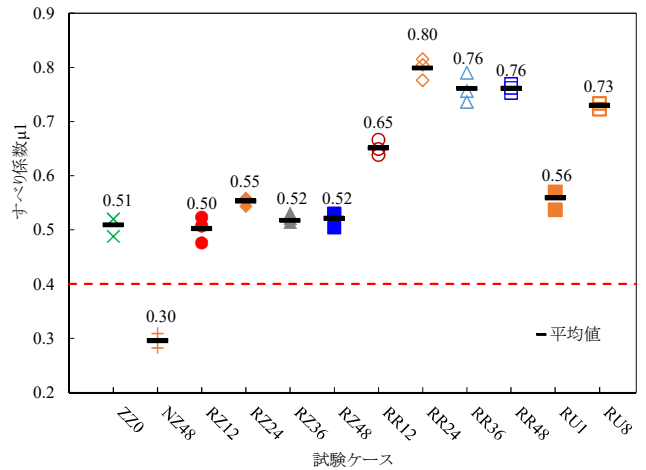
錆促進剤の塗布を行わなかったNZ48のすべり係数は0.30となり全試験体で最も低くなった。これより、丹波らの研究⁵⁾と同様に、2種ケレンによって算術平均粗さ $Ra \leq 5$ とした面と無機ジンクとの接合面では、すべり係数0.40を満足しない。しかし、ケレンしたのちに錆促進剤を塗布して赤錆を発生させることにより、すべり係数0.40を満足することができた。

なお、試験体の組立を行ってから1年間のリラクゼーション期間を設けるRZ48Yは、2018年11月現在、長期リラクゼーションの最中であるため、すべり試験はまだ実施していない。

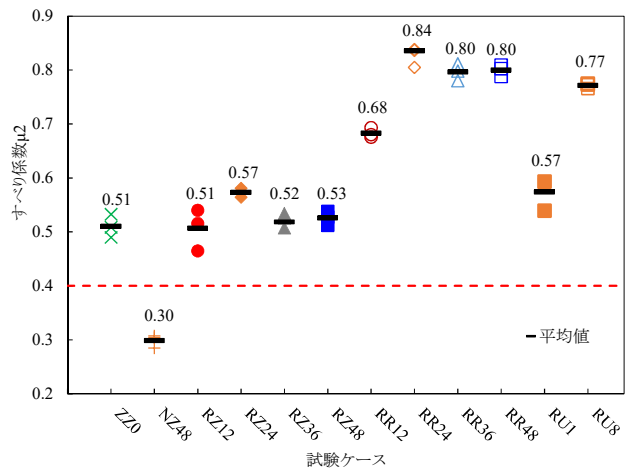
(3) 荷重と相対変位の関係

荷重と相対変位の関係を図-11に示す。相対変位計測箇所は図-7に示した縁端距離10mm位置である。全ての

試験体において、相対変位が0.2mmに達する前に最大荷重に達し、明瞭なすべりが確認できた。また、各ケースの縁端距離10mm位置で計測した荷重-相対変位関係の載荷開始後における荷重-相対変位関係の傾きは全ての



(a) すべり係数 $\mu 1$



(b) すべり係数 $\mu 2$

図-10 すべり係数の比較

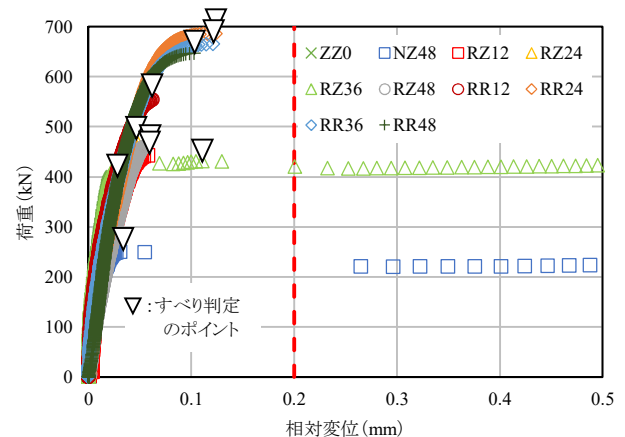


図-11 荷重と相対変位の関係

表-6 すべり試験結果一覧

試験ケース	ボルト	導入ボルト軸力	試験前ボルト軸力	試験前ボルト軸力(平均)	リラクセーション(72時間後)		すべり荷重	すべり係数								
		kN	kN	kN	残存率 %	平均 %		kN	$\mu 1^{※1}$	平均	標準偏差	変動係数	$\mu 2^{※2}$	平均	標準偏差	変動係数
ZZ0	1	内側	226.7	203.7	205.8	89.9	91.2	401.7	0.49	0.51	0.015	0.030	0.49	0.51	0.018	0.034
		外側	230.9	208.0		90.1							0.51			
	2	内側	221.2	198.8	200.3	89.9		416.9	0.52				0.51			
		外側	220.7	201.9		91.5							0.53			
	3	内側	229.0	206.7	210.1	90.3		436.9	0.52				0.53			
		外側	223.6	213.5		95.5										
NZ48	1	内側	221.2	207.7	206.8	93.9	93.1	233.5	0.28	0.30	0.011	0.036	0.28	0.30	0.010	0.033
		外側	222.2	206.0		92.7							0.31			
	2	内側	220.5	202.8	204.2	92.0		252.1	0.31				0.30			
		外側	222.1	205.6		92.6							0.30			
	3	内側	222.4	209.9	211.1	94.4		249.5	0.30				0.30			
		外側	227.4	212.2		93.3										
RZ12	1	内側	218.5	201.1	200.2	92.0	93.3	381.3	0.48	0.50	0.020	0.039	0.46	0.51	0.031	0.062
		外側	216.8	199.4		92.0							0.52			
	2	内側	221.8	208.5	211.5	94.0		442.9	0.52				0.52			
		外側	227.4	214.6		94.3							0.51			
	3	内側	221.2	211.1	208.3	95.4		422.8	0.51				0.52			
		外側	223.5	205.5		91.9										
RZ24	1	内側	225.2	213.1	207.2	94.6	94.2	462.7	0.56	0.55	0.007	0.012	0.56	0.57	0.007	0.012
		外側	218.0	201.4		92.4							0.54			
	2	内側	223.1	211.3	216.6	94.7		471.0	0.54				0.55			
		外側	234.6	221.8		94.6							0.56			
	3	内側	229.4	219.2	213.4	95.5		476.3	0.56				0.58			
		外側	221.8	207.6		93.6										
RZ36	1	内側	216.0	198.2	203.1	91.8	92.0	431.1	0.53	0.52	0.007	0.013	0.53	0.52	0.011	0.021
		外側	222.0	208.0		93.7							0.52			
	2	内側	221.6	202.9	210.2	91.6		438.2	0.52				0.52			
		外側	237.7	217.6		91.5							0.51			
	3	内側	224.7	204.8	202.4	91.1		416.1	0.51				0.51			
		外側	216.0	200.0		92.6										
RZ48	1	内側	223.1	207.5	208.1	93.0	93.1	441.2	0.53	0.52	0.012	0.024	0.54	0.53	0.011	0.020
		外側	223.2	208.8		93.5							0.53			
	2	内側	220.8	203.0	203.7	91.9		432.4	0.53				0.52			
		外側	217.8	204.4		93.9							0.51			
	3	内側	221.3	208.6	208.3	94.2		420.2	0.50				0.51			
		外側	226.0	208.1		92.1										
RR12	1	内側	222.2	218.7	218.5	98.4	97.0	557.8	0.64	0.65	0.012	0.018	0.68	0.68	0.007	0.011
		外側	224.5	218.2		97.2							0.69			
	2	内側	220.1	215.0	213.2	97.7		568.4	0.67				0.65			
		外側	220.6	211.3		95.8							0.68			
	3	内側	221.6	213.5	213.4	96.3		554.1	0.65				0.68			
		外側	220.9	213.3		96.5										
RR24	1	内側	223.2	211.9	210.8	95.0	96.5	687.3	0.82	0.80	0.016	0.021	0.84	0.84	0.003	0.003
		外側	219.2	209.6		95.6							0.78			
	2	内側	231.4	224.6	220.9	97.0		686.0	0.78				0.80			
		外側	225.1	217.3		96.5							0.83			
	3	内側	216.8	211.8	211.9	97.7		682.2	0.80				0.83			
		外側	217.7	212.1		97.4										
RR36	1	内側	222.3	214.9	216.3	96.7	96.2	654.5	0.76	0.76	0.022	0.029	0.80	0.80	0.013	0.016
		外側	227.4	217.8		95.8							0.74			
	2	内側	223.7	214.0	217.3	95.7		639.8	0.74				0.76			
		外側	229.4	220.5		96.1							0.81			
	3	内側	218.6	212.4	210.5	97.2		665.4	0.79				0.81			
		外側	217.4	208.6		95.9										
RR48	1	内側	223.8	217.2	214.7	97.0	96.5	646.2	0.75	0.76	0.007	0.009	0.79	0.80	0.009	0.011
		外側	218.6	212.1		97.0							0.81			
	2	内側	224.6	214.7	215.5	95.6		663.5	0.77				0.76			
		外側	223.0	216.3		97.0							0.80			
	3	内側	234.0	226.8	215.9	96.9		658.1	0.76				0.80			
		外側	215.2	204.9		95.2										

※1 $\mu 1$: 試験前ボルト軸力を用いて算出したすべり係数

※2 $\mu 2$: 設計ボルト軸力(205kN)を用いて算出したすべり係数

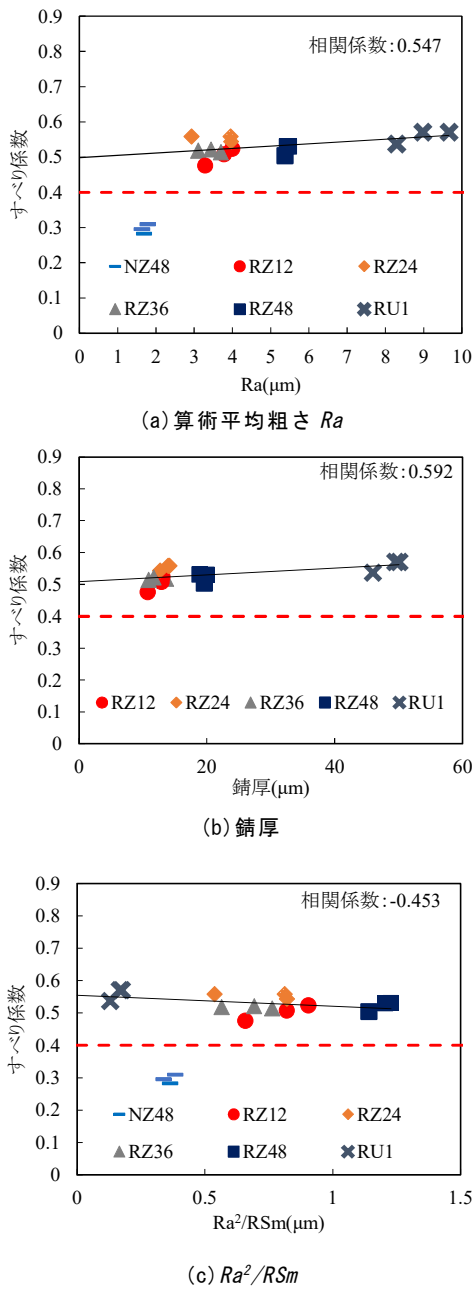


図-12 母板の各表面粗さおよび錆厚とすべり係数との関係 (連結板：無機ジンクリッチペイント 75 μm)

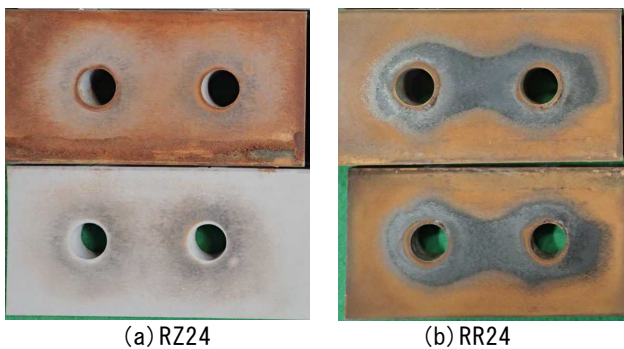


図-13 すべり後の接合面状況 (上：母板，下：連結板)

試験ケースにおいて同等となった。

(4) すべり係数と表面粗さおよび錆厚の関係

森らの研究⁶⁾では、接合面に一定厚さの赤錆を有する継手のすべり係数は平均で 0.73 と高い結果となるが、これに対する錆面の粗さ、下地処理、曝露場所、曝露期間の影響は認められないとされている。一方で、鋼材の表面粗さとすべり係数に着目した森らの研究⁷⁾では、接合面にブラスト処理を実施した高力ボルト摩擦接合継手のすべり試験において、 Ra^2/RSm (RSm ：粗さ曲線要素の平均長さ) というパラメータを導入してブラスト処理面のすべり係数を評価した結果、 Ra^2/RSm の値が $0.25\mu m$ 以上の範囲ではすべり係数 0.4 を満たし、 $0.35\mu m$ 以上の範囲では 0.5、 $0.45\mu m$ 以上の範囲では 0.6 を満たすことが示されている。そこで、本試験では測定した表面粗さと錆厚に加え、 Ra^2/RSm についてもすべり係数との関係を整理した。連結板を無機ジンクとした場合における各試験体組立直前の母板の表面粗さおよび錆厚とすべり係数との関係を図-12 に示す。ここで、図に記載している近似曲線および相関係数は母板を赤錆、連結板を無機ジンクとした RZ シリーズおよび RU1 に対するものであり、NZ48 は対象としていない。

母板を赤錆、連結板を無機ジンクとした RZ シリーズおよび RU1 のすべり係数との相関係数は、算術平均粗さ Ra が 0.547、錆厚が 0.592、 Ra^2/RSm が -0.453 となった。この結果から、母板を赤錆、連結板を無機ジンクとした場合、着目した母板の各表面粗さパラメータとすべり係数との間にやや相関があると考えられる。また、文献⁷⁾のブラスト処理面同士では Ra^2/RSm が大きくなるにしたがって、すべり係数が高くなる傾向が認められたが、本研究では無機ジンク面と赤錆面の異種接合面であり、図-12(c)に示すように同様の傾向が認められなかった。これは、(5)に示すように無機ジンクの凝集破壊によってすべりが発生したためと考えられる。

(5) すべり後の接合面の状況

すべり試験終了後、試験体を解体して接合面の観察を行った。すべり側における接合面の状況を図-13 に示す。母板に錆促進剤を塗布して赤錆面とし、連結板を無機ジンクとした RZ シリーズは連結板の無機ジンクが母板に付着していることが確認でき、無機ジンクの凝集破壊によってすべりが発生したと考えられる。母板および連結板ともに錆促進剤を塗布して発錆させた RR シリーズは母板および連結板ともに同形状の黒いすべり痕が確認できた。これより、RR シリーズでは母板および連結板のかみ合わさった緻密な赤錆同士が錆層内で破壊したと考えられる。

5. あとがき

本研究では、接合面に錆促進剤塗布した後に 1~2 日程度の曝露期間を設けた高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数 0.40 が満足できることを示すため、錆促進剤塗布後の曝露期間をパラメータとしたすべり試験を実施した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 連結板の接合面を無機ジンクとした RZ12~48 の軸力残存率は最小で 92.0%，最大で 94.2% となり、文献 1) において接合面処理が同処理である RU1 の軸力残存率 93.9% と同等になった。また、母板および連結板ともに錆促進剤を塗布し、赤錆を発生させた RR12~48 の軸力残存率は最小で 96.2%，最大で 97.0% となり、文献 1) の接合面処理が同処理である RU8 の軸力残存率 96.2% と同等になった。
- (2) 母板の接合面を算術平均粗さ $Ra \leq 5\mu\text{m}$ となるまでケレンした後に錆促進剤を塗布し、曝露期間を 12~48 時間まで 12 時間ごとに設定した RZ12~48 のすべり係数は、RZ24 が 0.55 となり最も高くなった。これより、文献 1) において接合面処理が同処理である RU1 のすべり係数 0.56 と同等の結果となった。
- (3) 母板および連結板ともに接合面を算術平均粗さ $Ra \leq 5\mu\text{m}$ となるまでケレンした後に錆促進剤を塗布し、曝露期間を 12~48 時間まで 12 時間ごとに設定した RR12~48 のすべり係数は、RR24 が 0.80 となり最も高くなった。
- (4) 錆促進剤の塗布を行わなかった NZ48 のすべり係数は 0.30 となり全試験体で最も低くなった。
- (5) 母板を赤錆、連結板を無機ジンクとした場合、すべり係数との相関係数は算術平均粗さ Ra が 0.547、錆厚が 0.592、 Ra^2/RSm が -0.453 となり、やや相関がある結果となった。
- (6) 母板に錆促進剤を塗布して赤錆面とし、連結板を無機ジンクとした RZ シリーズは連結板の無機ジンクが母板に付着していることが確認でき、無機ジンクの凝集破壊によってすべりが発生したと考えられる。
- (7) 母板および連結板ともに錆促進剤を塗布して発錆させた RR シリーズは母板および連結板ともに同形状の黒いすべり痕が確認できた。これより、RR シリーズでは母板および連結板のかみ合わさった緻密な赤錆同士が錆層内で破壊したと考えられる。

以上のことから、接合面に錆促進剤を塗布し、実際の

現場施工期間と想定される 1~2 日程度を曝露期間とした高力ボルト摩擦接合継手はすべり係数 0.40 を満足することができた。なお、錆促進剤を塗布する際は、気温 5℃以下、湿度 80%以上とにならないように注意し、錆促進剤塗布後 6 時間は雨などに当たらないように注意する必要がある。

謝辞

本研究は大阪市立大学、株式会社 IHI インフラシステムおよび株式会社 IHI インフラ建設との共同研究として実施しました。本稿の執筆に際し、関係者にご協力いただき、厚く御礼を申し上げます。また、本研究を実施するにあたり、株式会社イチネンケミカルズおよび神鋼ボルト株式会社にご指導およびご協力いただきました。さらに本多克行氏をはじめとする大阪市立大学橋梁工学研究室学生諸氏にご協力いただきました。ここに併せて、厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 本多克行, 山口隆司, 橘肇, 吉岡夏樹, 齊藤史朗, 中村定明: 既設構造物の高力ボルト摩擦接合継手接合面への改良した錆促進剤の適用に関する検討, 構造工学論文集 vol.64A, 2018.4.
- 2) 社団法人土木学会: 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指標 (案), 2006.12.
- 3) 首都高速道路株式会社: 橋梁塗装設計施工要領, 2006.4.
- 4) 社団法人日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2006.3.
- 5) 丹波寛夫, 行藤晋也, 木村聡, 山口隆司, 杉浦邦征: 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, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.70, No.1, 137-149, 2014.3.
- 6) 森猛, 南邦明: 赤錆面を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験, 土木学会構造工学論文集, Vol.53A, pp1305-1312, 2007.3.
- 7) 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, Vol.67, No.2, pp446-453, 2011.8.