

高力ボルト摩擦接合継手への 改良した錆促進剤の適用に関する検討

STUDY ON APPLICATION OF IMPROVED RUST ACCELERATOR TO HIGH STRENGTH BOLTED FRICTIONAL JOINTS

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

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。所定のすべり係数を確保する方法として、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られている。そこで本研究では、錆促進剤を塗布し、赤錆を発生させる接合面処理方法を合理的に適用するため、新たに改良した錆促進剤を用いて曝露試験、すべり試験および切断試験を行った。

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. 研究背景と目的

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。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はされているが、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られている。また、土木分野での既設構造物への本処理方法の使用例はなく、錆促進剤による優れた発錆方法や適切な素地調整方法などすべり係数を確保するための性能評価方法が確立されていない。そこで本研究では、錆促進剤を塗布し、赤錆を発生させる接合面処理方法を適用するため、改良した錆促進剤を用いて曝露試験、すべり試験および切断試験を行った。曝露試験結果より、改良した錆促進剤の性能評価と摩擦接合面に錆促進剤を塗布する際の適切な条件の検討を行う。すべり試験結果より錆促進剤を塗布して接合面を発錆させた高力ボルト摩擦接合継手の性能評価を行う。最後に切断試験結果より、すべり試験後における接合面の破壊状況を観察し、錆促進剤による発錆状態下でのすべり発生メカニズムの検証を行う。

2. 曝露試験

2.1 曝露試験方法

(1)曝露試験体および錆促進剤

曝露試験のパラメータを表-1、曝露状況を図-1にそれぞれ示す。曝露試験体には寸法 200mm×200mm×6mm、鋼種 SM490Y の鋼板を用いた。錆促進剤は発錆剤および安定化剤の成分量をそれぞれ市販品の3倍および2倍に増加させた TYPE-A、成分量を TYPE-A と同様に増加させ、垂直面塗布時の液タレ防止のために粘度を市販品の約250倍に増加させた TYPE-B の2種類を用いた。

(2)施工ステップおよび測定方法

試験体曝露までの施工ステップは、① $Ra \leq 5\mu m$ となるまでディスクグラインダを用いてケレン施工、②錆促進剤を刷毛にて塗布、③屋外および屋内にて曝露である。

測定状況を図-2に示す。本試験での測定項目は赤錆の表面粗さ (Ra , Rz , $Rzjs$, RSm) および錆厚とし、測定時期は、塗布前、塗布1時間後、1~5、8、12、16、20、24週間後とした。測定位置は鋼板を3分割し、表面粗さにおいては3箇所×1点×1回、錆厚においては3箇所×1点×5回とした。なお、表面粗さの測定には、表面粗さ測定機(基準長さは JIS B0601-2001 に基づき 2.5mm とした)、錆厚の測定には電磁式膜厚計を用いた。

また、No.7 および 8 の試験体においてはショットブラストによる凹凸の高さを考慮するため、ブラスト処理し

* 技術本部 橋梁設計部 東京設計課

** 技術本部 技術研究室

表-1 曝露試験パラメータ

試験体 No	曝露環境	素地調整方法	発錆方法	錆促進剤種類	試験体設置方向	錆促進剤塗布量		
1	a	ケレン ($Ra \leq 5\mu m$)	錆促進剤塗布	TYPE-A	鉛直	$100g/m^2$ (メーカー推奨値)		
	b						屋内	
2	a	ケレン ($Ra > 5\mu m$)	自然発錆	-		鉛直	-	
	b							屋内
4	a	ケレン ($Ra \leq 5\mu m$)	自然発錆	TYPE-B		水平	$100g/m^2$ (メーカー推奨値)	
	b							屋内
5	a	ケレン ($Ra \leq 5\mu m$)	錆促進剤塗布	TYPE-A			水平	$200g/m^2$ ($100g/m^2 \times 2$ 回塗り)
	b							
6	a	ショットプラスト	自然発錆	-	鉛直	$100g/m^2$ (メーカー推奨値)		
	b						屋内	
7	a	ショットプラスト	自然発錆	-	鉛直	-		
	b						屋内	
8	a	ショットプラスト	自然発錆	-	鉛直	-		
	b						屋内	

※錆促進剤のタイプについて

TYPE-A: 発錆剤および安定化剤の成分量をそれぞれ市販品の3倍および2倍に増加した

TYPE-B: 成分量をTYPE-Aと同様に増加させ、粘度を市販品の約250倍に増加させた



図-1 曝露状況 (左: 屋外, 右: 屋内)



図-2 測定状況 (左: 表面粗さ, 右: 錆厚)

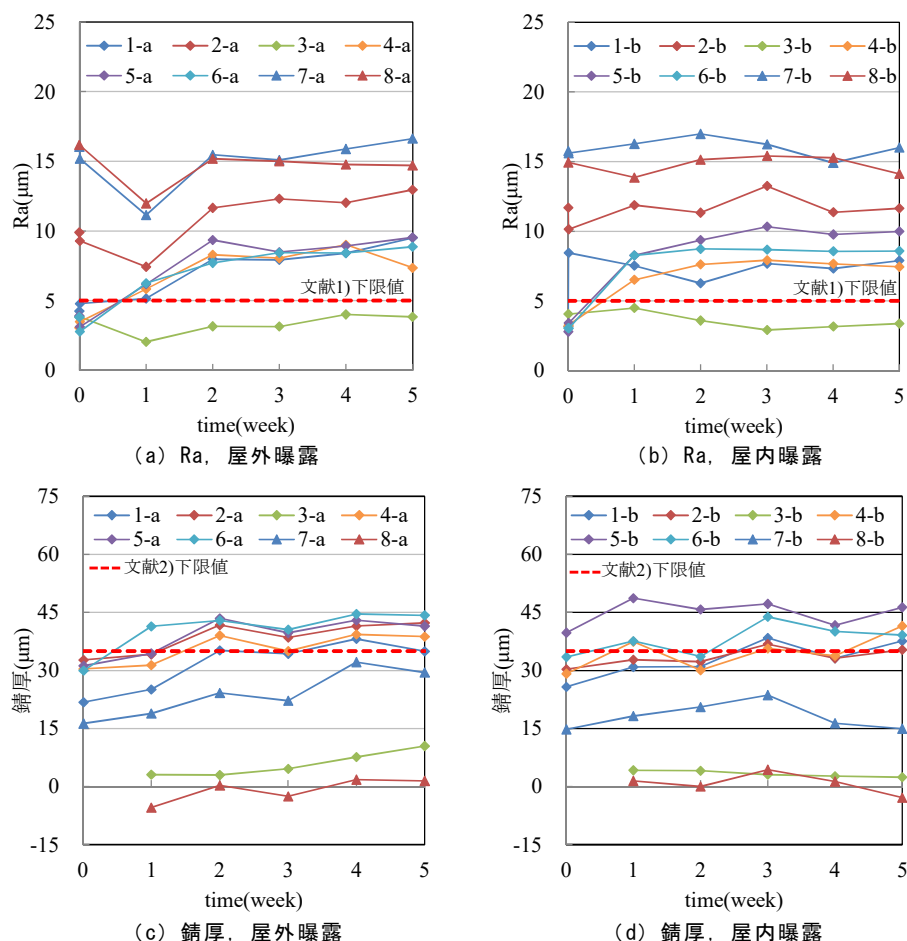


図-3 測定結果

た鋼板の表面粗さをランダムに1,000点測定し、その平均値をブラストによる凹凸の高さとした。

2.2 曝露試験結果および考察

算術平均粗さ Ra および錆厚の5週間後までの測定結

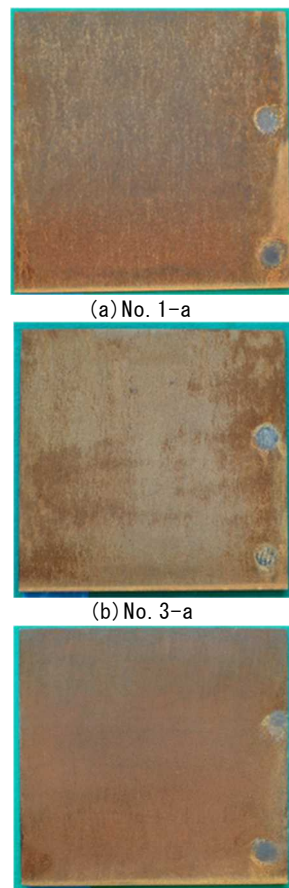


図-4 5週間後の発錆状況

果を図-3に、5週間後の発錆状況の一例を図-4にそれぞれ示す。本試験での発錆状態の評価は Ra および、錆厚によって行う。高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)¹⁾では、粗面状態にて $5\mu m \leq Ra < 10\mu m$

のとき、すべり係数を 0.40 とすることが推奨されている。

また、森ら²⁾は、接合面に錆厚 35~100μm の赤錆を有する継手のすべり係数は平均で 0.73 であったと報告している。したがって、本研究では、 $Ra \geq 5\mu m$ 、錆厚 $\geq 35\mu m$ を接合面における赤錆の目標値とした。

Ra の測定結果から、曝露 1 週間後に No.3 以外のすべての試験体は $Ra=5\mu m$ 以上となった。また、素地調整方法をショットブラストとした No.7 および 8 は 3 週間後においても初期値が大きく、 Ra はほとんど上昇しなかった。No.3 は自然発錆が進んでいないため、No.7 および 8 はショットブラストによる凹凸が錆によってできる凹凸に比べて大きいいため、 Ra が上昇しなかったと考えられる。

錆厚の測定結果から、曝露 1 週間後に No.4-b、6-a、6-b のみ錆厚 $=35\mu m$ 以上となった。特に錆促進剤塗布量をメーカー推奨値 $\times 2$ 回塗りとした No.6-a では 1 週間後までの Ra の増加率が 124.9%、錆厚の増加率が 38.0% となり、最も大きくなった。したがって、TYPE-A の錆促進剤 200g/m² を 100g/m² ずつ 2 回に分けて塗布することを、本すべり試験体への錆促進剤塗布方法として適用することとした。

3. すべり試験体

3.1 すべり試験体および試験パラメータ

本試験で使用した鋼材の鋼種および材料特性を表-2 に示す。試験体には鋼種 SM490Y を用い、母板は 28mm 厚、連結板は 16mm 厚とし、高力ボルトは M22(S10T) を用いた。すべり試験のケースおよびパラメータを表-3 に、試験体の形状および寸法を図-5 にそれぞれ示す。RU3 のみ母板のケレン範囲を孔周り $\phi 80mm$ とした。試験体のケレン範囲を図-6 に示す。

試験体のすべり/降伏耐力比 β_d ¹⁾ は式(1)を用いて算出した。その値はすべり係数を 0.4 と仮定し、母板の降伏限界より摩擦面のすべり限界が先行する 0.44 とした。

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

ここに、 μ : すべり係数 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_1 : 母板厚 σ_y : 鋼材の降伏点 (規格値)

3.2 すべり試験体の製作

(1) 既設部材の再現とケレン

本試験では鋼部材の取替えや鋼橋の補修を想定するため、IZ0 以外において試験体の母板は既設構造物の塗装を再現した。塗装系は塗替え塗装を想定し、首都高速道路株式会社による橋梁塗装設計施工要領³⁾に準拠し、NU-C2 とした。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、再現する塗装工程を下塗り第一層である有機ジンクリッチペイントまでとした。既設部材を再現した試験体はディスクサンダ (番手 24) でケレンをしたのち、ディスクサンダ (番手 40) で仕上げた。

(2) 錆促進剤の塗布および曝露

錆促進剤は 100g/m² ずつ 2 回に分けて合計 200g/m² を接合面に塗布し、塗布後 6 時間は雨に当たらないようにした。その後、均一かつ十分な赤錆を得るため、3 週間以上屋外にて曝露した。

(3) すべり試験体の表面粗さおよび錆厚測定

すべり試験体の測定項目は曝露試験時と同様、赤錆の表面粗さ (Ra , Rz , Rz_{jis} , RSm) および錆厚とし、測定時期は、塗布前、塗布 1 日後、1~3 週間後、締付直前とした。表面粗さおよび錆厚の測定箇所を図-7 に示す。

表-2 使用鋼材の鋼種および材料特性

種別	材質	板厚 (mm)	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	362.2	530.4	1.98 $\times 10^5$	0.278
連結板	SM490Y	16	409.5	537.4	1.84 $\times 10^5$	0.275

表-3 すべり試験パラメータ

試験ケース	母板の接合面処理方法	ケレン範囲	母板の孔あけ順序	導入軸力	連結板の接合面処理方法
IZ0	無機ジンクリッチペイント 75μm	-	-	226kN	無機ジンクリッチペイント 75μm
RU1	ケレン ($Ra \leq 5\mu m$) →錆促進剤塗布	全面	ボルト孔あけ →ケレン		
RU2	ケレン ($Ra > 5\mu m$) →錆促進剤塗布				
RU3	ケレン ($Ra \leq 5\mu m$) →錆促進剤塗布	ボルト孔周り ($\phi 80$)	ケレン →ボルト孔あけ		
RU4		全面	ボルト孔あけ →ケレン		
RU5				226kN	
RU6					ブラスト →自然発錆
RU7	ブラスト →錆促進剤塗布				
RU8	ケレン ($Ra \leq 5\mu m$) →錆促進剤塗布				

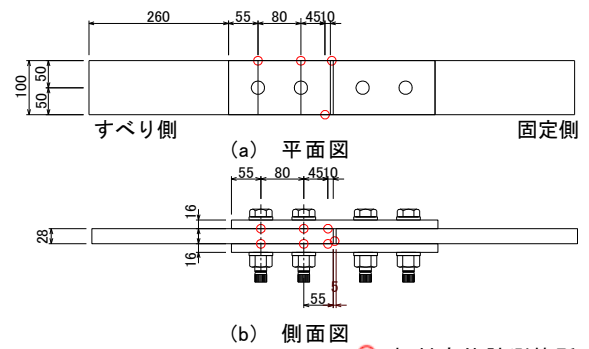


図-5 すべり試験体の形状および寸法 (単位: mm)

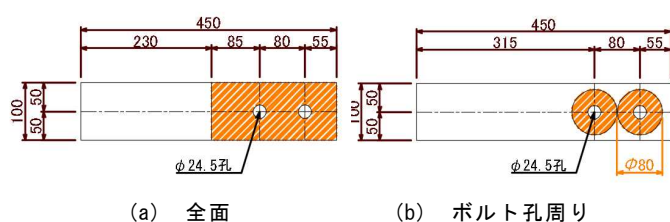


図-6 ケレン範囲 (単位: mm)

表-4 NU-C2の塗装系

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	変形エポキシ樹脂塗料下塗	SDK P-314	240	1		1日~10日
		下塗り第3層	変形エポキシ樹脂塗料下塗	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	SDK P-322	140	1		1日~10日
		上塗り	ポリウレタン樹脂塗料上塗	SDK P-331	120	1		

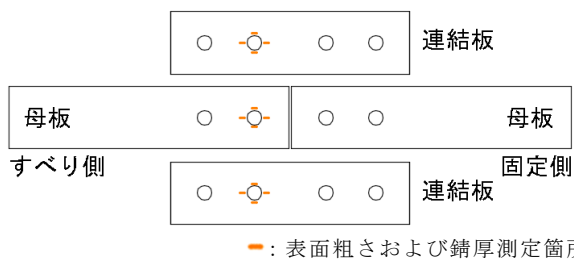


図-7 表面粗さおよび錆厚の測定箇所

表-5 母板の Ra および錆厚の測定結果

(a) Ra					
時間	1日後	1週間後	2週間後	3週間後	締付直前
平均(μm)	4.2	7.1	7.6	7.7	8.5
標準偏差	0.953	0.745	0.831	0.869	1.165
変動係数	0.228	0.105	0.109	0.112	0.137
増加率(%)		41.1	6.8	1.8	8.6

(b) 錆厚					
時間	1日後	1週間後	2週間後	3週間後	締付直前
平均(μm)	15.2	32.7	36.7	38.6	42.8
標準偏差	5.224	6.351	5.765	5.882	7.756
変動係数	0.345	0.194	0.157	0.152	0.181
増加率(%)		53.6	11.0	4.8	9.8

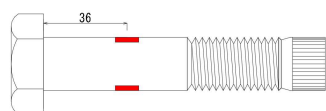


図-8 ひずみゲージ貼り付け位置 (単位: mm)

素地調整方法を $Ra \leq 5\mu\text{m}$ とした母板の Ra , および錆厚の平均, 標準偏差, 変動係数および増加率を表-5に示す. 試験体の締付直前における Ra の最大値は $9.7\mu\text{m}$, 最小値は $7.5\mu\text{m}$, 錆厚の最大値は $50.1\mu\text{m}$, 最小値は $36.3\mu\text{m}$ となり, 目標値である $Ra \geq 5\mu\text{m}$, 錆厚 $\geq 35\mu\text{m}$ を満足することができた.

4. すべり試験

4.1 ボルト軸力

試験体の高力ボルト締付に先立ち, ボルト軸力のキャリブレーションを行った. キャリブレーションでは, 高力ボルト5本を用いて, ボルト軸部に2枚のひずみゲージを対称かつ軸方向に貼り, 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-8に示す.

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, トルク法により所定軸力の約6割の軸力が生じるように1次締めを行った. その後, グリップ回転式シャーレンチを用いてピンテールが破断するまで本締めを行った. RU1~4, 6~8の目標軸力は設計ボルト軸力の1割増しである 226kN の軸力を導入した. RU5はピンテール破断後に回転角レンチを用いて 30° 増し締めした. 30° 増し締めは 10° ずつ3回に分けて行い, 20° 増し締めした時点で目標軸力を導入できた高力ボルトは, その時点で増し締めを終了した.

4.2 計測項目

計測項目は載荷荷重および相対変位とした. 相対変位はすべり側における2本のボルト位置における母板と連結板間の相対変位をクリップ変位計(株東京測器研究所製, RA5)により計測した. また文献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継手中心から縁端距離 10mm 位置とし, この位置における母板と連結板間の相対変位をクリップ変位計(株東京測器研究所製, UB5)により計測した. 相対変位計測箇所を図-5に示す.

4.3 試験方法

すべり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 $1,000\text{kN}$)を用いて行った. なお, ボルト軸力のリラクゼーションを考慮し, ボルト締付完了から72時間経過後にすべり試験を行った.

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, すべり荷重は縁端距離 10mm 位置の相対変位が 0.2mm に達する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同位置の相対変位 0.2mm に対応する荷重と定義した.

5. すべり試験結果および考察

5.1 リラクゼーション

ボルト締付から72時間後の各試験体における軸力残存率を図-9に示す. なお, ここでの軸力残存率は導入時に対するすべり試験前時点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.

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

連結板の接合面に無機ジンクリッチペイント(以下, 無機ジンクという)を塗布した試験体は連結板を発錆させた試験体より軸力残存率が小さくなり, 最も小さいRU2で93.8%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リラクセーションと考えられる。一方, 連結板の接合面を発錆させた試験体の軸力残存率はRU7の96.0%が最も小さくなり, 接合面を赤錆とした試験体の軸力残存率は接合面を無機ジンクとした試験体より大きくなるのが分かった。

5.2 すべり荷重とすべり係数

各ケースの試験結果の一覧を表-6に示す。すべり係数は文献より式(3)を用いて算出した。各ケースのすべり係数を図-10に示す。(以下, 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すべり係数のことを示す。)

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

ここに, μ : すべり係数 P : すべり荷重(kN)
 m : 接合面の数(=2) n : ボルト本数(=2)
 N : 試験前ボルト軸力, 設計ボルト軸力(kN)

すべり試験結果より, 全ケースにおいてすべり係数0.40を満足した。本試験での標準的なケースである, 母板の接合面に錆促進剤を塗布し赤錆を発生させ, 連結板

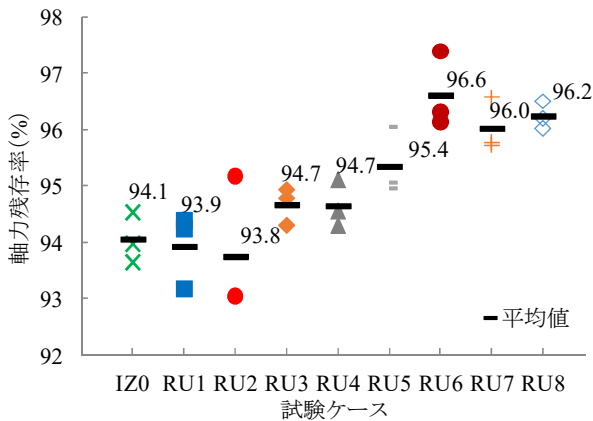


図-9 ボルト締め付けから72時間後の軸力残存率

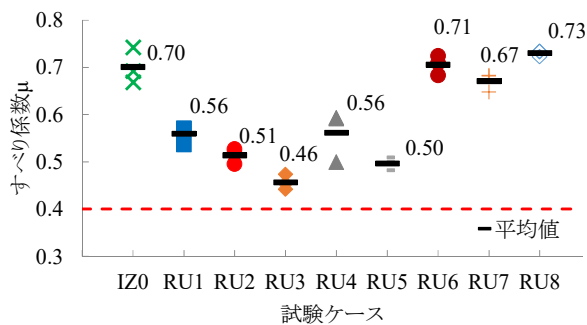


図-10 すべり係数

の接合面を無機ジンクとしたRU1のすべり係数は0.56となった。ケレン時に $Ra > 5\mu\text{m}$ としたRU2およびボルト孔周り $\phi 80\text{mm}$ のみケレンしたRU3のすべり係数はそれぞれ0.51, 0.46となり, RU1よりも小さくなった。一方, ケレン後に孔あけを行うことで, ケレンによるボルト孔縁の形状変化を防止したRU4のすべり係数は0.56となりRU1と同等となった。これより, ボルト孔縁形状がすべり係数へ与える影響は小さいと考えられる。設計ボルト軸力から算出するすべり係数を大きくすることを目的に, 30° 増し締めを行ったRU5における設計ボルト軸力から算出したすべり係数は平均で0.59となり, RU1より大きくなった。

母板, 連結板ともに発錆させたRU6~8のすべり係数はそれぞれ0.71, 0.67, 0.73となり, 高いすべり係数を得た。このうち, RU8のすべり係数が0.73と全ケース中, 最も大きくなり, 連結板の素地調整方法をブラスト処理とするよりも, $Ra \leq 5\mu\text{m}$ となるようにケレンした方が, 微小ではあるがすべり係数が大きくなった。これより, 母板と連結板の両接合面に錆促進剤を塗布する場合, その接合面の素地調整方法は同じとした方がすべり係数が大きくなるのが分かった。

母板の Ra および錆厚とすべり係数との関係を図-11に示す。接合面処理方法の違いによる Ra および錆厚とすべり係数の相関関係は確認できなかった。

5.3 荷重と相対変位の関係および軸力残存率

各ケースの継手中心から縁端距離10mm位置での荷重-相対変位関係を図-12に, 載荷中の内側ボルト軸力残存率を図-13にそれぞれ示す。連結板の接合面を無機ジンクとしたRU1~4は相対変位が0.2mmとなる前に最大荷重が生じた後, 急激な変位の増加に伴い荷重が低下した。母板および連結板の接合面を発錆させたRU6~8は相対変位が0.2mmを超えた後も徐々に荷重が増加し, 最大荷重到達後, 荷重が低下した。また, すべり発生時の軸力残存率はRU1が94.3%, RU6が87.8%となり, 接合面が赤錆同士のケースの方が小さくなった。

5.4 すべり試験後の接合面状況

すべり試験後における接合面の一例を図-14に示す。連結板の接合面を無機ジンクとしたRU1~4は, 無機ジンクが母板の赤錆面に付着していることから, 無機ジンクの凝集破壊によるすべりの発生を確認した。一方, 母板および連結板の接合面を赤錆とした試験体は赤錆が剥離しており, 赤錆層内, もしくは鋼材と赤錆の付着部分での赤錆の剥離によるすべりの発生を確認した。

表-6 各ケースの試験一覧

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)	リラクゼーション		すべり 荷重 kN	すべり係数														
		kN	kN	kN	残存率 %	平均 %		$\mu 1$	平均	標準 偏差	変動 係数	$\mu 2$	平均	標準 偏差	変動 係数							
IZ0	1	内側	225.8	216.1	214.0	95.7	93.9	572.0	0.67	0.70	0.031	0.044	0.70	0.73	0.029	0.040						
		外側	227.0	211.9		93.3							0.77									
	2	内側	226.2	211.2	211.2	93.4		627.5	0.74				0.70				0.031	0.044	0.77	0.73	0.029	0.040
		外側	-	-		-													0.71			
	3	内側	226.0	214.4	211.7	94.9		586.2	0.69				0.70				0.031	0.044	0.71	0.73	0.029	0.040
		外側	226.9	208.9		92.1													0.71			
RU1	1	内側	224.2	211.1	211.5	94.2	93.9	482.5	0.57	0.56	0.016	0.028	0.59	0.57	0.024	0.042						
		外側	224.6	211.9		94.3							0.59									
	2	内側	225.0	212.1	213.2	94.3		486.5	0.57				0.56				0.016	0.028	0.59	0.57	0.024	0.042
		外側	226.7	214.3		94.5													0.54			
	3	内側	226.9	210.5	206.0	92.8		442.4	0.54				0.56				0.016	0.028	0.54	0.57	0.024	0.042
		外側	216.0	201.4		93.2													0.54			
RU2	1	内側	226.6	214.4	215.6	94.6	93.7	427.8	0.50	0.51	0.013	0.025	0.52	0.53	0.009	0.018						
		外側	226.5	216.8		95.7							0.52									
	2	内側	215.3	197.9	206.0	91.9		426.9	0.52				0.51				0.013	0.025	0.52	0.53	0.009	0.018
		外側	227.4	214.1		94.1													0.54			
	3	内側	223.1	205.3	210.5	92.0		443.7	0.53				0.51				0.013	0.025	0.54	0.53	0.009	0.018
		外側	229.5	215.7		94.0													0.54			
RU3	1	内側	231.8	220.4	220.9	95.1	94.9	390.6	0.44	0.46	0.013	0.028	0.48	0.48	0.011	0.022						
		外側	233.8	221.4		94.7							0.50									
	2	内側	224.9	214.7	214.3	95.5		405.9	0.47				0.46				0.013	0.028	0.50	0.48	0.011	0.022
		外側	226.3	213.9		94.5													0.47			
	3	内側	227.6	215.4	212.2	94.7		385.0	0.45				0.46				0.013	0.028	0.47	0.48	0.011	0.022
		外側	220.5	208.9		94.7													0.47			
RU4	1	内側	214.8	201.7	208.6	93.9	94.7	493.4	0.59	0.56	0.044	0.078	0.60	0.57	0.040	0.071						
		外側	226.3	215.4		95.2							0.51									
	2	内側	225.0	216.7	210.2	96.3		419.9	0.50				0.56				0.044	0.078	0.51	0.57	0.040	0.071
		外側	216.8	203.6		93.9													0.59			
	3	内側	218.4	204.4	204.6	93.6		485.7	0.59				0.56				0.044	0.078	0.59	0.57	0.040	0.071
		外側	215.6	204.8		95.0													0.59			
RU5	1	内側	262.6	251.3	245.6	95.7	95.4	473.1	0.48	0.50	0.011	0.023	0.58	0.59	0.019	0.032						
		外側	254.1	239.9		94.4							0.62									
	2	内側	257.3	243.7	247.6	94.7		504.4	0.51				0.50				0.011	0.023	0.62	0.59	0.019	0.032
		外側	258.3	251.6		97.4													0.57			
	3	内側	239.8	226.4	235.4	94.4		469.7	0.50				0.50				0.011	0.023	0.57	0.59	0.019	0.032
		外側	256.0	244.5		95.5													0.57			
RU6	1	内側	225.9	217.9	213.8	96.5	96.6	606.6	0.71	0.71	0.017	0.024	0.74	0.75	0.014	0.019						
		外側	218.8	209.7		95.8							0.73									
	2	内側	225.9	220.8	220.0	97.7		601.4	0.68				0.71				0.017	0.024	0.73	0.75	0.014	0.019
		外側	226.0	219.3		97.1													0.77			
	3	内側	220.4	211.0	216.9	95.7		628.7	0.72				0.71				0.017	0.024	0.77	0.75	0.014	0.019
		外側	230.1	222.9		96.9													0.77			
RU7	1	内側	219.8	210.9	211.0	96.0	96.0	575.4	0.68	0.67	0.016	0.025	0.70	0.69	0.011	0.016						
		外側	221.1	211.2		95.5							0.70									
	2	内側	218.0	208.1	210.2	95.5		574.9	0.68				0.67				0.016	0.025	0.70	0.69	0.011	0.016
		外側	220.9	212.3		96.1													0.68			
	3	内側	216.1	207.8	214.4	96.2		555.5	0.65				0.67				0.016	0.025	0.68	0.69	0.011	0.016
		外側	227.9	221.0		97.0													0.68			
RU8	1	内側	217.3	207.1	213.8	95.3	96.2	628.1	0.73	0.73	0.005	0.007	0.77	0.77	0.004	0.005						
		外側	227.2	220.5		97.1							0.78									
	2	内側	226.6	218.9	219.9	96.6		635.7	0.72				0.73				0.005	0.007	0.78	0.77	0.004	0.005
		外側	229.0	220.8		96.4													0.77			
	3	内側	228.3	222.4	216.1	97.4		633.9	0.73				0.73				0.005	0.007	0.77	0.77	0.004	0.005
		外側	221.7	209.8		94.6													0.77			

※ $\mu 1$: 試験前ボルト軸力を用いて算出したすべり係数

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

注) “-” は試験中におけるひずみゲージ破断による計測不能を示す

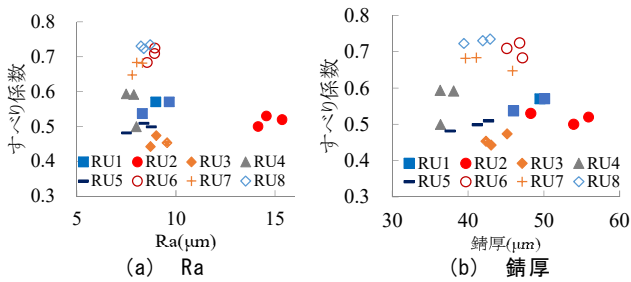


図-11 母板の Ra および錆厚とすべり係数との関係

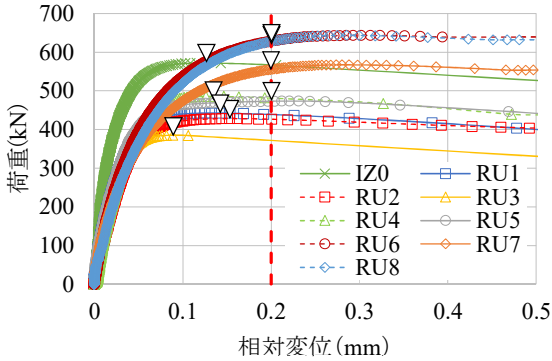


図-12 荷重-相対変位関係

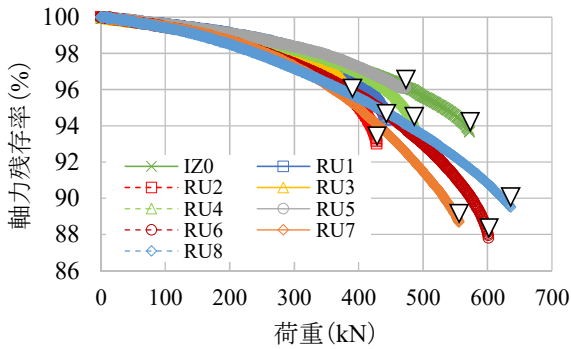


図-13 荷重中の内側ボルト軸力残存率

6. 切断試験

6.1 切断および観察方法

すべり試験後における IZO および RU1 の母板、RU6～8 の母板および連結板の切断面を観察した。観察箇所を図-15 に示す。観察箇所は相対変位の計測を行った内側ボルト軸上とした。

試験片作成の手順は①切断機を用いて、埋め込み機に入るサイズ (20mm×10mm×14mm) に切断する、②埋め込み機にて約 150℃の温度で圧縮し、樹脂に埋め込む、③研磨ディスク (番手 220, 400, 1200) を用いて研磨し、最後はダイヤモンドリキッドで仕上げる、④試験片を倒立型顕微鏡にて観察する。製作した試験片を図-16 に示す。

6.2 観察結果および考察

膜厚計にて測定した試験前の錆厚と倒立顕微鏡にて確認した試験後の錆厚を表-7 に、各試験体の切断面を図-17 にそれぞれ示す。また、図-17 内に示す赤点線は樹脂

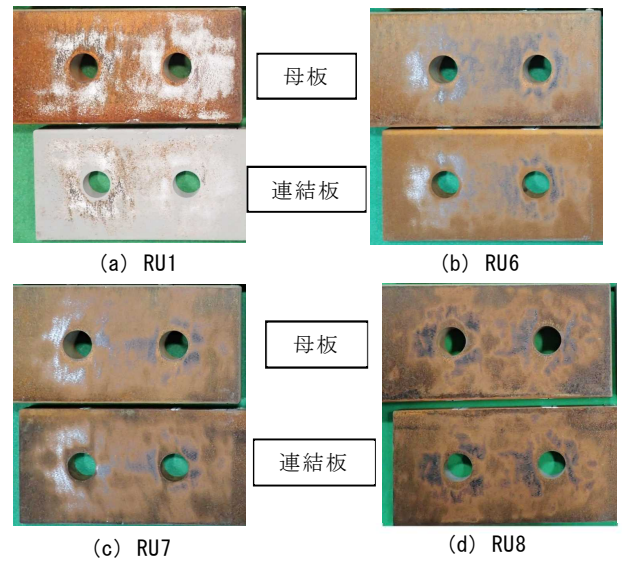


図-14 試験後における接合面の状況の一例

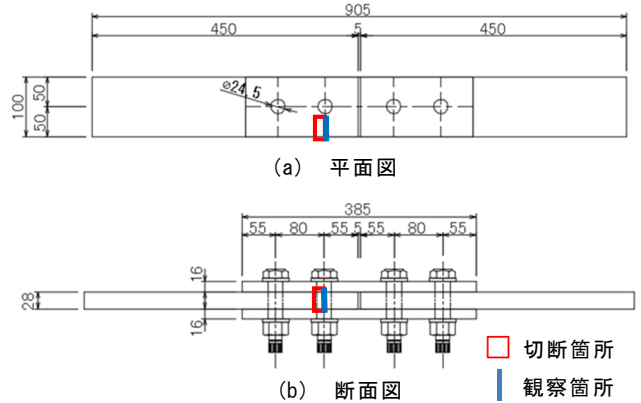


図-15 断面観察切断箇所と観察位置 (単位: mm)

と接合面の境界線である。膜厚計での錆厚測定では、粗面の凹凸による測定誤差が十分に考慮できないため、試験後に測定した錆厚の方が試験前の錆厚より大きくなるケースが確認された。RU1 の切断面は赤錆が残っており、赤錆層の上に無機ジンクの付着が確認できた。これより、RU1 は無機ジンクが凝集破壊し、すべりが発生している。RU6～8 の切断面より、赤錆が残っている箇所と粗面がむき出しになっている箇所を確認できた。これより、母板および連結板の両接合面が赤錆の場合、赤錆層内部もしくは赤錆と粗面の境界面が破壊し、すべりが発生している。また、連結板の発錆前の素地調整方法がブラスト処理の RU6 および 7 は赤錆がブラスト処理によってできた凹凸の谷部分に多く残っていることを確認できた。一方、母板、連結板ともに発錆前の素地調整方法を $Ra \leq 5\mu m$ にケレンした RU8 は、連結板における切断面の錆厚が RU7 に比べて小さくなった。これより、素地の凹凸が小さい場合、錆促進剤により発生させた赤錆同士がボルト締付時により密着したと考えられる。

7. まとめ

7.1 曝露試験

- (1) 発錆剤および安定化剤の成分量をそれぞれ市販品の3倍および2倍に増加させた錆促進剤の発錆性能向上を確認できた。また、一様な発錆状態を確認できた。
- (2) すべり試験では、曝露試験結果より赤錆を発生させる接合面処理方法として、発錆剤および安定化剤の成分量を増加させた錆促進剤を用い、塗布量はメーカー推奨の100g/m²を2回に分けて合計200g/m²塗布した。

表-7 試験前後の錆厚の比較 (単位: μm)

試験ケース	鋼板	錆厚		試験前後の差
		試験前	試験後	
RU1	母板	50.1	42.7	7.4
	母板	47.2	50.0	-2.8
RU6	母板	10.2	42.7	-32.5
	連結板	41.1	82.3	-41.2
RU7	母板	26.6	73.8	-47.2
	連結板	39.4	50.1	-10.7
RU8	母板	46.6	32.5	14.1
	連結板			

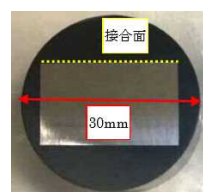


図-16 試験片

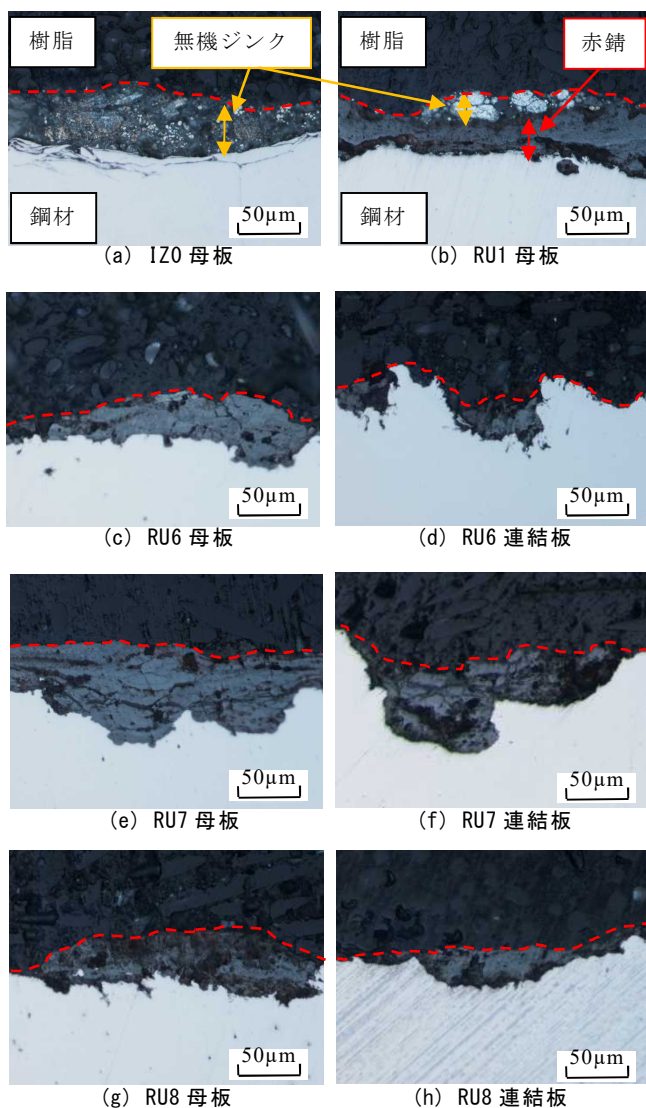


図-17 各試験体の切断面

7.2 すべり試験

- (1) ボルト締付から72時間後の軸力低下は、連結板の接合面を無機ジンクリッチペイントとした試験体より赤錆とした試験体の方が小さくなった。
- (2) 母板の接合面に錆促進剤を塗布し赤錆を発生させ、連結板の接合面を無機ジンクリッチペイントとしたケースのすべり係数は0.56となった。
- (3) 母板および連結板の両接合面を $Ra \leq 5\mu\text{m}$ となるまでケレンした後に錆促進剤を塗布し、接合面に赤錆を発生させたケースのすべり係数は0.73となった。
- (4) 錆促進剤を接合面に塗布後3週間曝露し、赤錆を発生させた高力ボルト摩擦接合接手のすべり係数は0.40を満足し、土木構造物への錆促進剤適用の可能性を示すことができた。

7.3 切断試験

- (1) 母板の接合面が赤錆、連結板の接合面が無機ジンクリッチペイントの場合、連結板の無機ジンクリッチペイントが凝集破壊し、母板および連結板の両接合面が赤錆の場合、赤錆層内部もしくは赤錆と粗面の境界面が破壊し、すべりが発生している。
- (2) 素地調整方法がブラスト処理の場合は、赤錆がブラスト処理によってできた凹凸の谷部分に多く残っていることを確認できた。
- (3) 母板および連結板の両接合面を $Ra \leq 5\mu\text{m}$ となるまでケレンしたRU8は、すべり試験後において連結板の錆厚が最も小さくなった。これより、素地の凹凸が小さいことで、ボルトを締付けた時に赤錆面同士がより密着したと考えられる。

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、神鋼ボルト株式会社および株式会社イチネンケミカルズにご指導およびご協力いただいた。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いた。ここに併せて、厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 社団法人土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案），2006.12.
- 2) 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，pp.1305-1312，2007.3.
- 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.