

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

Slip Resistance of Friction Type of High Strength Bolted Connections with Rusted Contact Surfaces

森 猛*, 南 邦明**

Takeshi Mori, Kuniaki Minami

* 工博 法政大学 教授 工学部 都市環境デザイン工学科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2)

** 鉄道建設運輸施設整備支援機構 設計技術部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

In order to examine the slip resistance of the friction type of high strength bolted connections with rusted contact surfaces, tensile tests on the model specimens and observation on the rust have been performed. The steel used is SM490Y. Their surfaces have been treated by grid blast or disk grinder. Then they are exposed near or far from seashore in a period of 0, 2, 4 or 6 months. Test results indicate that quantity of rust is gained with increase in exposure period, significant in the location near seashore and does not depend on the ground treatment for steel. The slip factor is independent of the amount of rust if some quantity of rust covers the steel. The value of the slip factor for the connection with rust surface is over 0.73 in average though the slip factor of the connections without rust is 0.46 or 0.28 when the steel surface is treated by grid blast or disk grinder.

Key Words: high strength bolted connection, slip resistance, rust, exposure condition

キーワード: 高力ボルト摩擦接合継手, すべり耐力, 赤錆, 曝露条件

1. はじめに

鋼橋などの陸上鋼構造物の架設現場における接合方法として最も広く用いられているのは、高力ボルト摩擦接合である。この接合方法は、接合すべき2つの母板を突合せ、それらを跨いで連結板を母板に添え、高力ボルトで母板と連結板を締付けて、締付けにより生じた板間の摩擦抵抗によって母板に作用する力を伝達するものである。伝達すべき力が摩擦抵抗を超えると鋼板間にすべりが生じる。このようなすべりに対する抵抗力(すべり耐力)を求める際に用いられるのが、すべり係数である。すなわち、高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力は、すべり係数、ボルト軸力、ボルト本数(継手片側)と接合面の数の積として求められる。

すべり係数は接合面の状態によって異なることが知られている。しかし、道路橋示方書¹⁾では、すべり係数0.4を保証できるような接合面の状態を要求しており、状況に応じた接合面およびすべり係数の選択ができない。一方、諸外国の設計基準²⁻⁴⁾では接合面の状態に応じたすべり係数の値が規定されている。接合面の状態に応じて適切なすべり係数を設定し、設計で高いすべり係数を用いることができれば、ボルト本数の削減や連結板の小型化が可能となり、低コスト化・省力化が期待できる。

赤錆の生じた接合面を有する高力ボルト摩擦接合継手

のすべり係数は、ブラスト面やプライマー面に比べて、一般に高いとされている。また、接合面に赤錆を発生させることは比較的容易であることから、かつては鋼橋分野においても接合面を赤錆面とすることが少なくなかった。また、建築分野では、グラインダやブラスト等により鋼材表面の黒皮などを除去し、屋外で自然曝露あるいは薬剤処理により赤錆を発生させた状態を現在でも標準としており、そのすべり係数は0.45とされている⁵⁾。

赤錆面を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数については、特に建築分野を中心に数多くの実験・検討が行われている。それらの結果が「鋼構造接合部設計指針」の資料^{2⁶⁾}にまとめられている。それによれば、収集された992のすべり係数データの平均値は0.605、標準偏差は0.051とされている。このように高いすべり係数を有するものの、建築分野の基準で0.45とされているのは、接合面の曝露期間や曝露場所、それに伴う赤錆の性状(錆層の厚さや成分など)とすべり係数の関係が明らかにされていないためと考えられる。

ここでは、異なる下地処理(グリッドブラスト、ディスクグラインダ)を施した鋼板に異なる曝露場所(海岸部、内陸部)・曝露期間(0, 2, 4, 6ヶ月)で赤錆を生じさせ、表面粗さ、錆厚と錆量、錆成分を測定した結果とともに、それらの鋼板を用いた高力ボルト摩擦接合試験体の引張試験を行い、赤錆面を有する継手のすべり係数について検

表-1 供試鋼材の機械的性質および化学成分

材 質	機械的性質			化学成分												
	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	C x100	Si x100	Mn x100	P x1000	S x1000	Cu x100	Ni x100	Cr x100	B x1000	Mo x100	V x100	Pcm x100	Ceq x100
SM490YB (母板)	404	540	25	16	20	143	22	5	2	2	2	1	0	5	24	40
SM490YA (連結板)	407	546	26	15	21	142	16	3	1	2	2	1	0	5	24	41

表-2 試験体名称

試験体名	下地処理	曝露期間	曝露環境
B0	ブラスト	0	—
B2S	ブラスト	2ヶ月	海岸
B2I	ブラスト	2ヶ月	内陸
B4S	ブラスト	4ヶ月	海岸
B4I	ブラスト	4ヶ月	内陸
B6S	ブラスト	6ヶ月	海岸
B6I	ブラスト	6ヶ月	内陸
G0	グラインダ	0	—
G2S	グラインダ	2ヶ月	海岸
G2I	グラインダ	2ヶ月	内陸
G4S	グラインダ	4ヶ月	海岸
G4I	グラインダ	4ヶ月	内陸
G6S	グラインダ	6ヶ月	海岸
G6I	グラインダ	6ヶ月	内陸

討した。

2. 試験体

2.1 供試鋼材と鋼材の表面処理

ボルト継手試験体に用いた鋼材は、板厚 22mm の SM490YB と板厚 12mm の SM490YA である。これらの鋼材のミルシートに記載された機械的性質と化学成分を表-1 に示す。板厚 22mm の鋼材はボルト継手試験体の母板に、板厚 12mm の鋼材は連結板に用いている。これらの鋼材表面の黒皮を 50 番のディスクグラインダあるいはグリッドブラスト (Sa2.5) で除去した後、母板 (600 x 140mm) と連結板 (460 x 140mm) を切り出し、さらに直径 24.5mm のドリル孔を設けた。

赤錆の性状を調べる目的で、ボルト継手試験体の母板に用いたものと同じ板厚 22mm の鋼板を、50 番のディスクグラインダあるいはグリッドブラスト (Sa2.5) で除去した後、直径 24.5mm の円孔を有する幅 70mm・長さ 96mm の鋼板も準備した。

2.2 曝露条件

前節で示したグリッドブラストあるいはディスクグラ

インダで下地処理した鋼板を、以下の条件で自然曝露した。曝露期間は 0、2ヶ月、4ヶ月、6ヶ月の 4 種類、曝露場所は海岸部 (千葉県市川市 海岸から約 1.5m 離れた場所) と内陸部 (千葉県八街市 海岸から約 20km 離れた地点) とした。曝露は、各鋼板を高さ 1.5m 程度のフレームから吊り下げることによって行った。以上のように、下地処理 2 種類、曝露期間 4 種類、曝露場所 2 箇所、計 14 種類の試験材を準備した。それらの名称を表-2 に示す。

これらの試験体の表面を高圧水で洗浄し、浮錆を除去した後、各種測定およびボルト継手試験体の組み立てを行った。

2.3 継手試験体の製作

すべり耐力を求めるための引張試験に用いる試験体は、2 枚の母板を突合せて連結板 2 枚で両面添接した 1 行 3 列の高力ボルト摩擦接合継手である。ボルトのセット (ボルト、ナット、座金) は F10T-M22 である。ミルシートに記載されている母板の降伏応力 (407 N/mm²) を用いて計算される純断面降伏耐力は 1034kN である。この荷重ですべりが生じるとすれば、設計ボルト軸力を用いて計算されるすべり係数は 0.84 となる。

ボルトの締付けはトルクレンチを用いて以下の手順で行った。

- ドリフトピンを用いて、母材と連結板の円孔の位置を合わせ、ボルト軸が円孔の中心に位置するように設置する。
- 予備締めを行う。(ボルトの締付け順序は中央から外に向かって行う。)
- 一次締め：トルク法により所定軸力の 6 割程度の軸力が生じるように締付ける。
- 二次締め：トルク法により設計ボルト軸力 (205kN) の 1 割増しの軸力が生じるように締付ける。

ここでは、下地処理・曝露場所・曝露期間を変えた 14 種

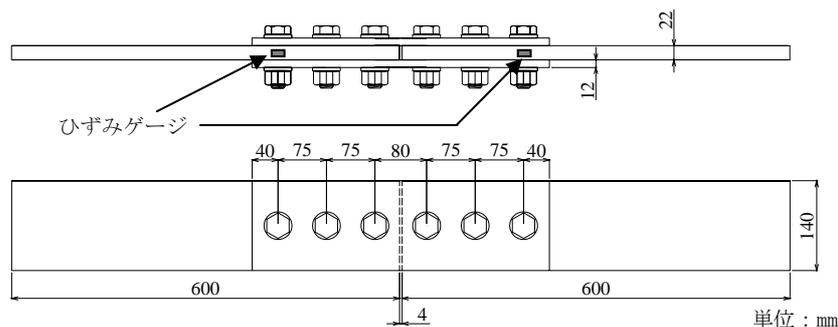


図-1 継手試験体の形状と寸法

類で3体ずつ、合計42体の試験体を製作した。試験体の形状と寸法を図-1に示す。

3. 接合面の状況

3.1 外観

下地処理、曝露場所、曝露期間ごとに、母板表面の拡大写真を写真-1に示す。ブラスト処理面はグレーの色調であり、ブラストにより生じた表面の凹凸が認められる。グラインダ面は光沢を有しており、グラインダによって生じた水平方向のきずと腐食によるピットのような小さな凹部が認められる。

いずれの下地処理においても、曝露期間2ヶ月では海岸部曝露でほぼ全面に赤錆が認められるものの、内陸部曝露では赤錆面に対して素地の占める割合が高くなっている。曝露期間4ヶ月でも同様の傾向である。しかし、曝露期間6ヶ月では、曝露場所によらず、表面全体が赤錆に覆われている。なお、錆を有するいずれの面においても錆粒子は細かく、鱗状の錆や層状剥離した錆は認められなかった。

3.2 表面粗さ測定

1つのボルト継手試験体に用いる2枚の母板の両面それぞれ3箇所（計12箇所）および2枚の連結板の片面3箇所（計6箇所）について、レーザー変位計（3次元形状測定システム：EMS98AD-3D、レーザー：KEYENCE/LT-8110）を用い、表面粗さを測定した。測定基準長さは8mmである。測定数は、各種試験体の母板で36、

連結板で18である。同じ下地処理・曝露場所・曝露期間であれば、母板と連結板で表面粗さに顕著な差は認められなかった。

図-2に表面粗さ（算術平均粗さ R_a ）と曝露期間の関係を示す。図中のマークは算術平均粗さの平均値を示している。曝露前の算術平均粗さは、下地処理により異なり、グリッドブラスト処理面で $16\mu\text{m}$ 程度であるのに対し、グラインダ処理面では $8\mu\text{m}$ 程度となっている。しかし、一旦錆が生じると下地処理によらず算術平均粗さは $10\sim 17\mu\text{m}$ 程度であり、曝露期間および曝露場所による規則的な変化も認められない。

3.3 錆層断面の観察

各試験片から表面を含む小試料（ $10\times 10\times 10\text{mm}$ 程度）を切り出し、樹脂に埋込み、研磨した後、錆を有する断面を、デジタルマイクロスコープを用いて200倍に拡大した状態で撮影した。これらの写真を写真-2に示す。粗さ試験結果からも推定されるように、グラインダで仕上げた面はブラスト仕上げ面よりも滑らかである。

赤錆と素材の境界の形状は、ブラスト処理面と同様であり、区別することは難しい。しかし、グラインダ処理面の境界形状は錆の進行とともに粗くなっており、曝露期間が4ヶ月以上になると、その形状はブラスト面とほぼ同じとなっている。

3.4 錆厚と錆量

本節と次節で示す結果は、小型試験片の観察・測定によ

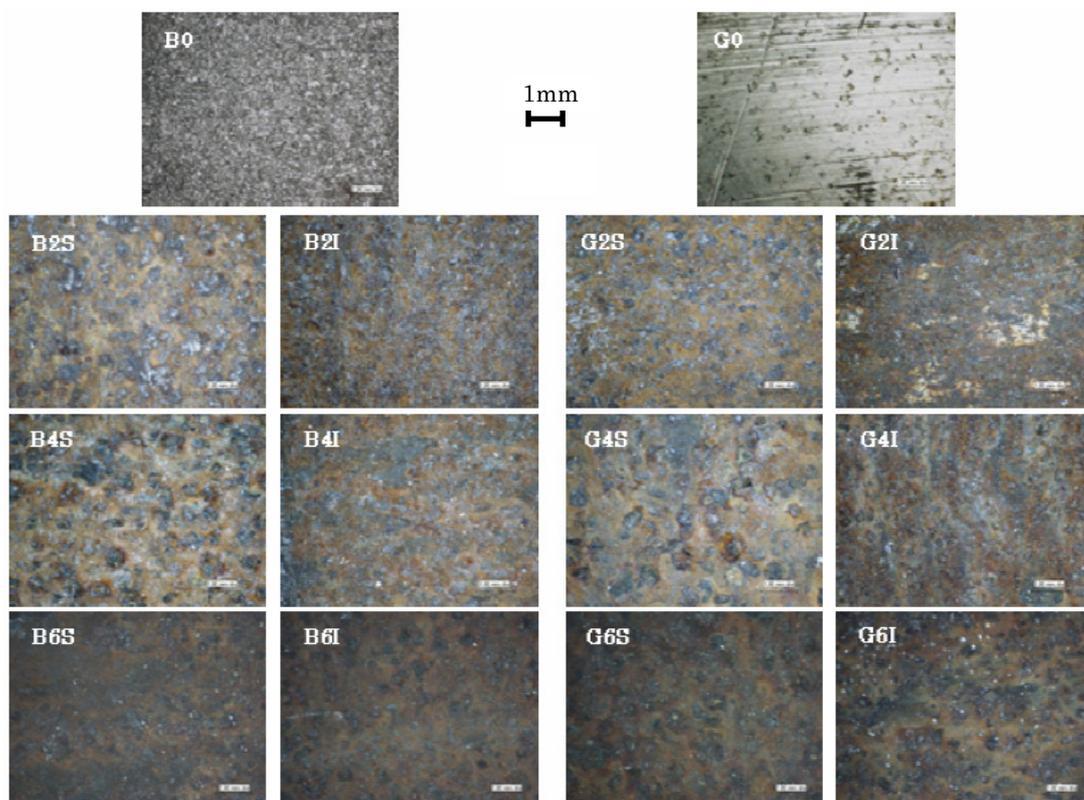


写真-1 赤錆表面の状況

るものである。電磁膜厚計 256F (ELCOMETER) を用いて、試験片片面の各 3 点の錆厚を測定した。錆厚 (3 点の平均値) と曝露期間の関係を図-3 に示す。曝露場所 (海岸部・内陸部), 下地処理によらず, 錆厚は曝露期間とともに増加している。また, 内陸部に比べて海岸部で, 錆層は厚くなっている。それらに比べて, 下地処理による錆厚の違いは小さい。

図-4 は錆量と曝露期間の関係を示したものである。錆量は, 錆の除去前後で試料の質量をデジタル電子天秤で測定することによって求めた。錆量と曝露期間の関係は, 錆厚と曝露期間の関係と同様である。参考のために, 錆厚と錆量の関係を図-5 に示す。

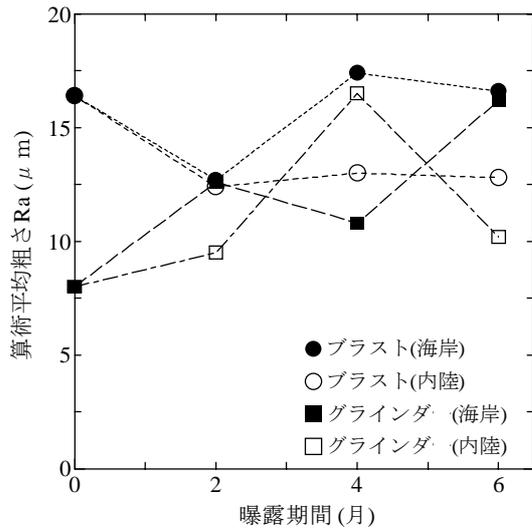


図-2 算術平均粗さと曝露期間の関係

3.5 錆成分の測定

錆を有する断面を鏡面に仕上げ, EPMA (Electron Probe Micro Analyze) 法により, 錆の成分を調べた。用いた装置は, JXA8621MX (日本電子) である。測定は, Na, Cl, O, Fe, S の 5 元素について行った。

測定結果を表-3 に示す。錆の主成分は Fe であり, 次いで O が多く含まれている。これらの含有量に対する曝露場所・期間, 下地処理による規則的な影響は認められない。Cl については, 内陸部曝露に比べて海岸部曝露で含有量が多いような傾向も認められるが, 明確なものではない。Na と S についても, 曝露場所・期間, 下地処理による規則的な差は認められない。

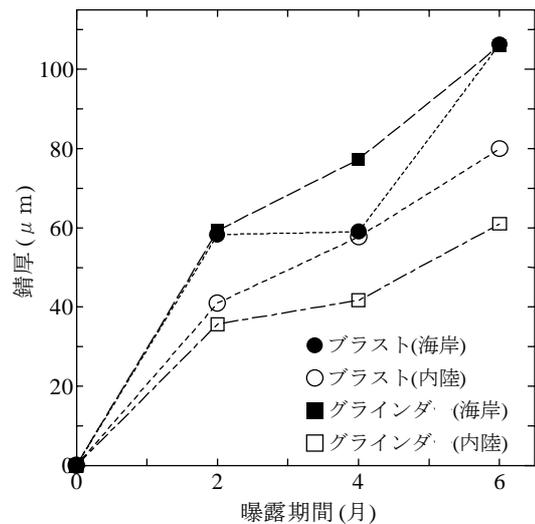


図-3 錆層の厚さと曝露期間の関係

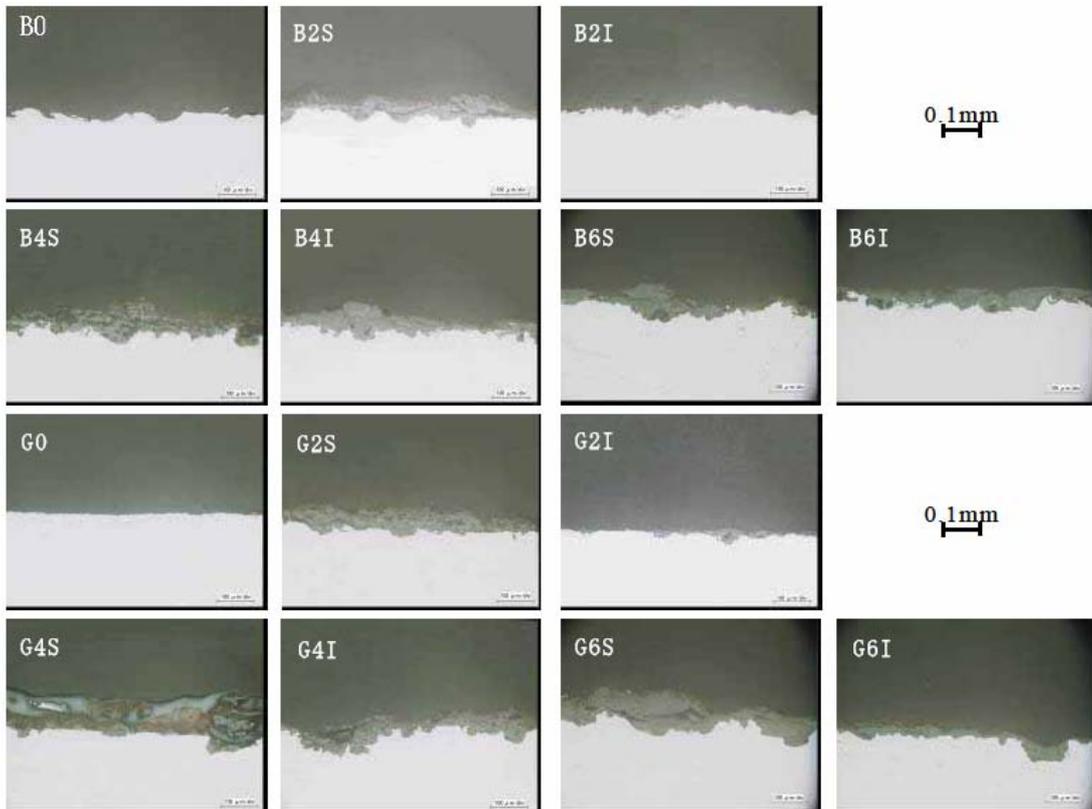


写真-2 錆層を有する断面

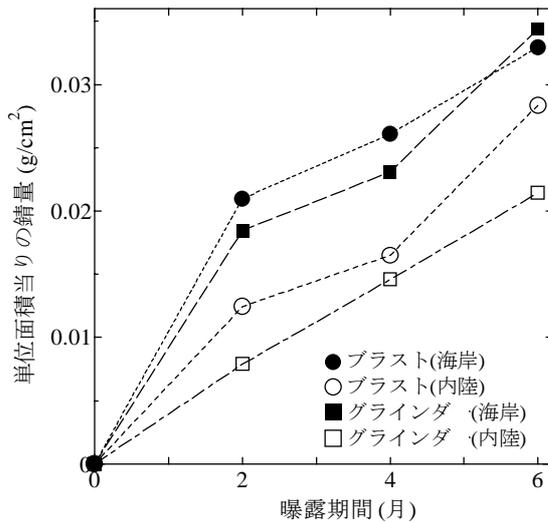


図-4 単位面積当たりの錆量と曝露期間の関係

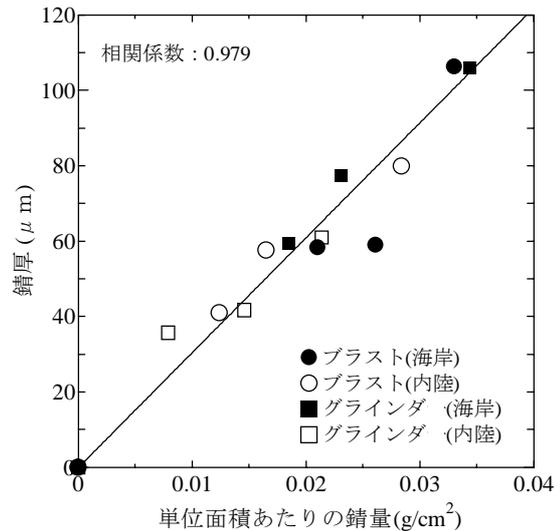


図-5 錆層の厚さと単位面積当たりの錆量の関係

4. 引張試験

4.1 試験方法

継手試験体の組み立て後 12~24 時間の間に引張試験を行った。引張試験には、載荷能力 2000kN の万能試験機を用いた。試験体両端部からそれぞれ 100mm までの範囲を試験機のチャックではさみ、すべりと全断面降伏の双方が観察されるまで引張荷重を徐々に載荷した。

測定項目は、母板間の相対変位と継手側面のひずみである。ひずみゲージは母板で最も早く全断面降伏が生じると考えられる継手外側の円孔を含む断面に貼付した(図-1参照)。相対変位は母板突合せ開口部にクリップゲージを設置して測定した。

4.2 試験結果

(1) すべり耐力

図-6 に荷重と開口変位の関係の例を示す。B0 試験体、G0 試験体および内陸部曝露試験体では、図-6(a)に示すように、すべり時に開口変位が急増し、荷重が急減するものがほとんどであった。その際のピーク荷重をすべり耐力 P_s と定義した。その後、荷重を増加させると、もう一方ですべりが生じ、同様な挙動が生じている。これもすべり耐力 P_s と定義した。したがって、1 種類の試験体で合計 6 つのすべり耐力 (3 体、継手の両側) を測定したことになる。ただし、先に測定されたすべり耐力よりも後に測定されたすべり耐力の方が低い場合には、後にすべった方のすべり耐力も先に滑った側のすべり耐力と同じとみなした。なお、このような挙動を示す試験体では、すべり時に大きな音が生じた。

海岸部曝露試験体では、図-6(a)に示したような荷重 - 開口変位関係を示すものもあったが、多くの場合、図-6(b)に示すように、すべりが生じても急激な荷重の減少と開口変位の増加は生じなかった。その際、聞き取れるような音も生じなかった。内陸部曝露の試験体においても、このよ

うな挙動が見られるものもあったが、多くの場合には図-6(a)に示すような挙動を示した。

表-4 にすべり耐力試験で得られた各試験体のすべり係数 μ を示す。すべり係数 μ は(1)式より算出した。

$$\mu = \frac{P_s}{m \cdot n \cdot N} \quad (1)$$

P_s : すべり耐力

N : 設計ボルト軸力 (205kN)

m : 接合面の数 (2 面)

n : 接合面片側のボルト全本数 (3 本)

(2) 降伏耐力

降伏耐力は、荷重と継手側面で測定したひずみ(図-1参照)の関係を利用して 0.2%耐力で定義した。これは、図-7 に示すように明確な降伏点が認められないことによる。0.2%耐力は、荷重-ひずみ関係において、荷重 0、ひずみ 0.2%の点から荷重-ひずみ曲線の初期勾配に平行な線を引き、荷重-ひずみ曲線と交わった点の荷重とした。その荷重-ひずみ関係の例を図-7 に示す。降伏耐力について

表-3 錆の成分分析結果

試験片の種類	5 元素の成分 (%)				
	Na	Cl	O	Fe	S
B2S	0.07	0.02	6.75	68.37	0.00
B2I	0.07	0.02	6.78	68.10	0.01
B4S	0.05	0.00	7.24	59.31	0.01
B4I	0.05	0.00	8.90	62.21	0.03
B6S	0.06	0.04	10.65	75.63	0.03
B6I	0.07	0.02	7.40	65.87	0.00
G2S	0.05	0.06	8.59	62.70	0.02
G2I	0.07	0.01	3.72	69.42	0.00
G4S	0.05	0.01	7.51	60.76	0.01
G4I	0.06	0.01	4.93	58.86	0.00
G6S	0.06	0.10	10.65	63.17	0.04
G6I	0.07	0.01	6.24	67.00	0.00

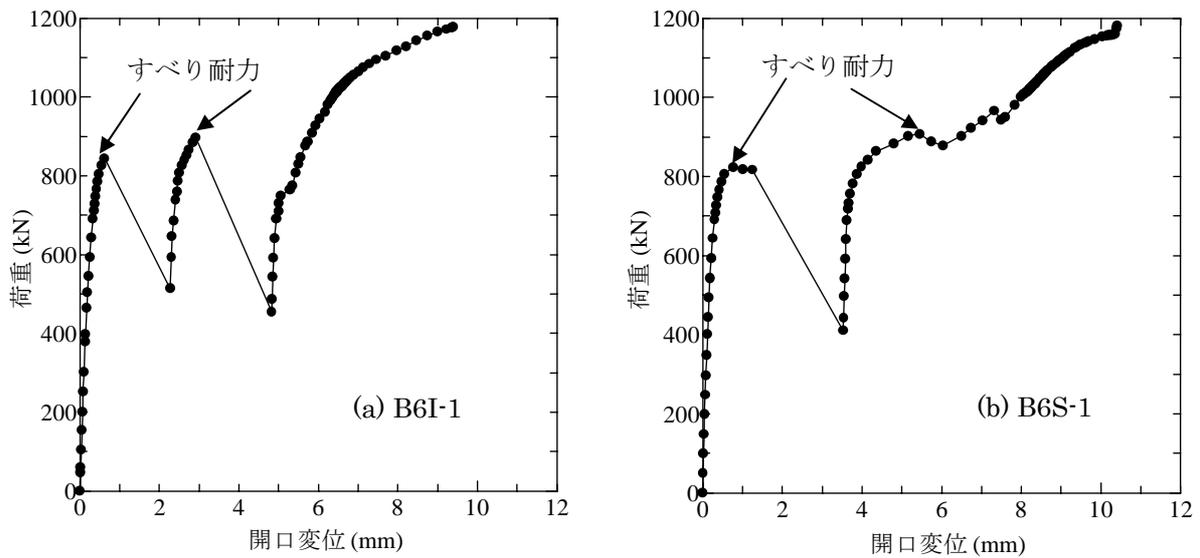


図-6 荷重 - 開口変位関係の例

表-4 引張試験より得られた各試験体のすべり係数

試験体の種類	試験体 1		試験体 2		試験体 3		平均値	標準偏差
	上側	下側	上側	下側	上側	下側		
B0	0.471	0.471	0.451	0.465	0.450	0.450	0.459	0.010
B2S	0.781	0.727	0.808	0.722	0.739	0.727	0.751	0.035
B2I	0.699	0.687	0.677	0.677	0.675	0.675	0.682	0.010
B4S	0.757	0.727	0.833	0.756	0.825	0.814	0.785	0.044
B4I	0.701	0.678	0.715	0.732	0.739	0.740	0.718	0.025
B6S	0.736	0.682	0.709	0.797	0.749	0.715	0.731	0.040
B6I	0.731	0.690	0.676	0.680	0.731	0.731	0.706	0.027
G0	0.265	0.307	0.265	0.318	0.240	0.274	0.278	0.029
G2S	0.781	0.774	0.794	0.715	0.691	0.734	0.746	0.042
G2I	0.715	0.730	0.733	0.762	0.719	0.719	0.730	0.017
G4S	0.799	0.721	0.766	0.738	0.802	0.754	0.763	0.033
G4I	0.787	0.743	0.789	0.794	0.751	0.717	0.764	0.031
G6S	0.687	0.795	0.703	0.686	0.708	0.708	0.715	0.041
G6I	0.689	0.689	0.717	0.744	0.707	0.707	0.709	0.021

でも継手の両側で測定した。なお、ここで用いた継手試験体のすべてにおいて、降伏よりもすべりが先に観察された。すなわち、すべての試験体がすべり先行型の継手であった。

図-8 に引張試験より得られた降伏耐力を示す。なお、

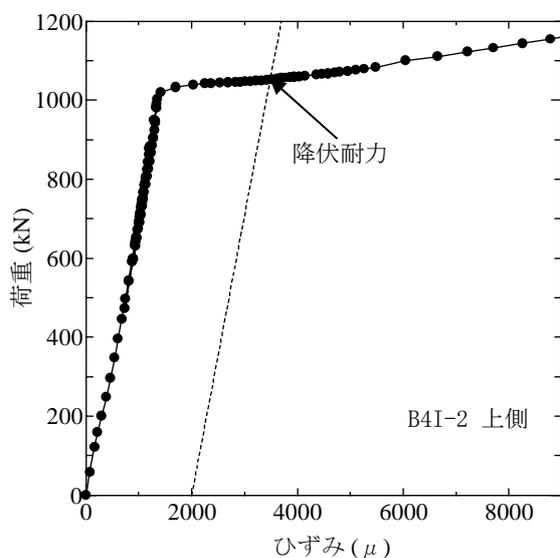


図-7 荷重 - ひずみ関係の例

ここではミルシートに示された母板の降伏応力に母板の純断面積を乗じることにより求めた耐力で無次元化している（降伏耐力比）。無曝露の試験体（B0、G0）での降伏耐力比は0.95～1.0程度あり、表面処理による影響は認められない。また、赤錆を有する試験体での降伏耐力比は、下地処理・曝露場所・曝露期間によらず、1.0～1.05となっている。このように、赤錆を有する継手と有さない継手で降伏耐力比は異なる傾向が認められる。これは、すべり後も赤錆を有する継手の摩擦による荷重伝達能力が無曝露の継手よりも高いためとも考えられるが、その詳細は現在のところ不明である。しかし、その違いは小さく、ほぼ0.95～1.05の範囲にある。このように、一旦すべりが生じた継手の降伏耐力は、母板の純断面積から計算される降伏耐力とほぼ等しい。

(3) 試験終了後の試験体

試験終了後の接合面の例を写真-3に示す。荷重の伝達機構からすべりの開始点は継手外側のボルト孔周辺と考えられる。いずれの試験体においても、母板と連結板の継手外側円孔周辺は錆で覆われている。このことは、母板と

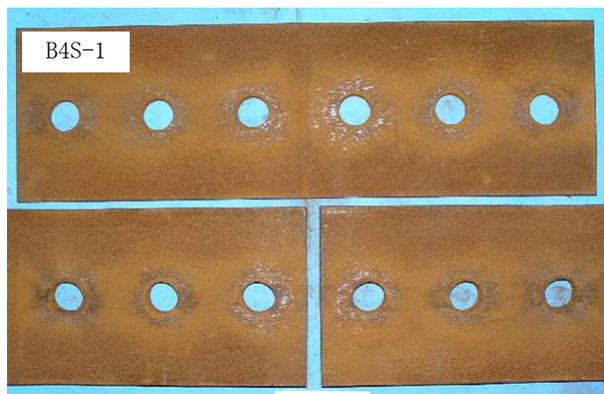


写真-3 試験後の接合面の例

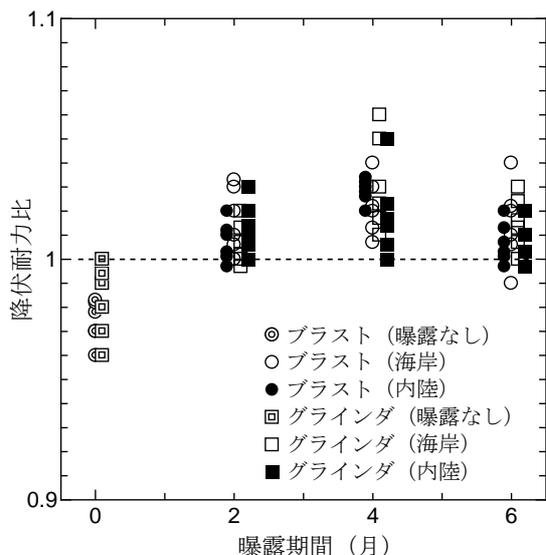


図-8 降伏耐力比

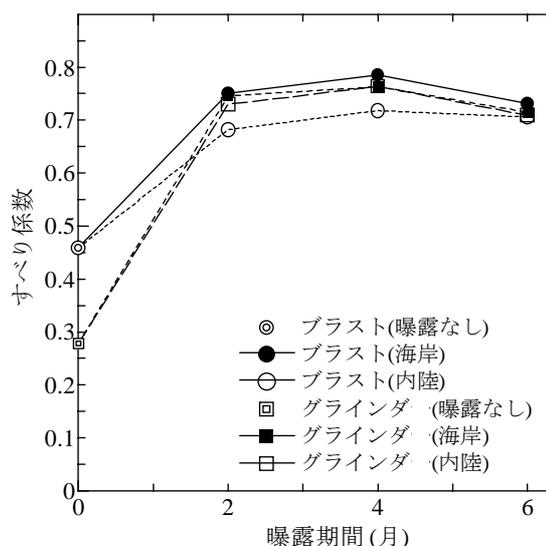


図-9 すべり係数と曝露期間の関係

連結板間のすべりは、錆層内で生じ、錆のせん断強度がすべり耐力の支配因子の一つとなることを意味しているとも考えられる。継手内側の円孔周辺では、錆が除去されている部分もあるが、その位置は母板と連結板でほぼ同じとなっており、また一部に錆の存在も認められる。このことから、すべりは主として錆層内で生じると考えられる。

4.3 すべり係数の検討

引張試験より求めた継手試験体の種類ごとのすべり係数の平均値(3体, 両側)と曝露期間の関係を図-9に示す。曝露期間0(赤錆なし)では、下地処理によってすべり係数が大きく異なり、グリットブラスト処理で0.46、グラインダ処理で0.28となっている。この結果は、道路橋示方書に従った設計を行う場合には、接合面をディスクグラインダ処理のままとすることは不適切ということの意味している。いずれの下地処理においても、赤錆を発生させるとすべり係数が高くなり、錆の発生後は曝露期間、曝露場所、下地処理によるすべり係数の規則的な差は認められない。

赤錆接合面を有する継手のすべり係数と粗さの関係を図-10に示す。錆面の算術平均粗さは $8.0 \sim 20.0 \mu\text{m}$ 程度となっているが、すべり係数と表面粗さの関係に相関は認

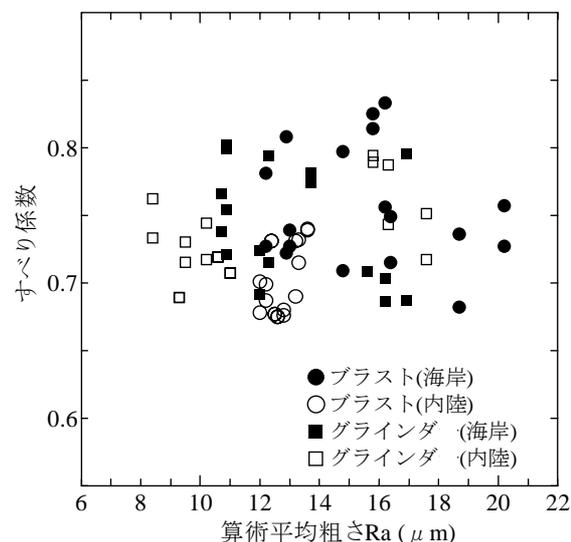


図-10 すべり係数と表面粗さの関係

められない。錆層の厚さとすべり係数(各種試験体の平均値)の関係を図-11に示す。このように、ある程度の錆厚(ここでは $35 \sim 100 \mu\text{m}$)があれば、すべり係数に対する錆厚の影響も認められない。

以上のように、赤錆面を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数は、曝露期間、曝露場所、下地処理、表面粗

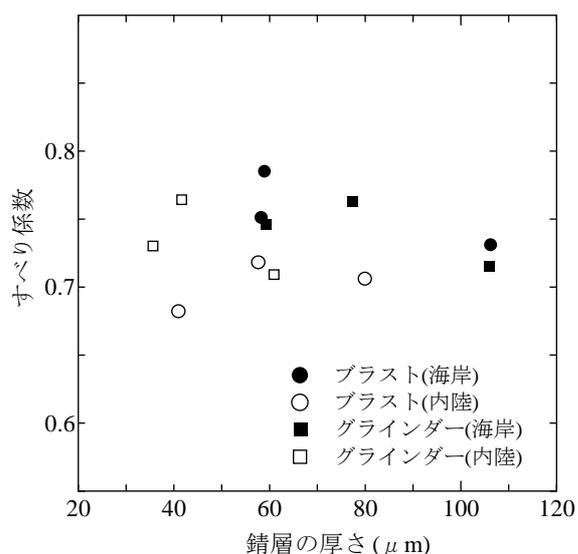


図-11 すべり係数と鍍厚の関係

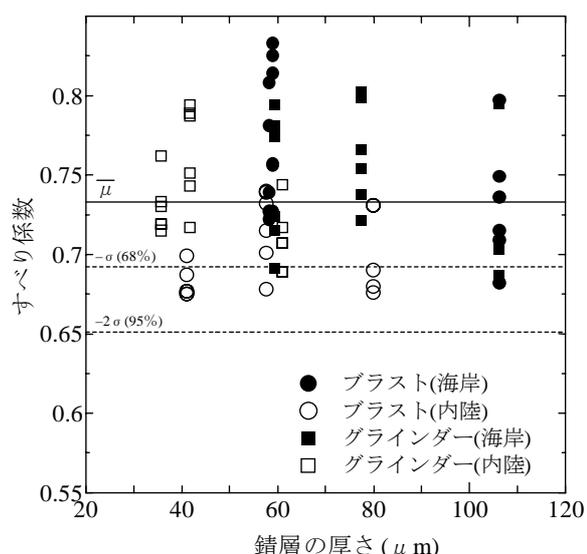


図-12 全試験データ

さ、鍍厚の影響を受けない。これは、ある程度の鍍厚があれば、前項で示したようにすべりは鍍層で発生し、継手のすべり耐力は鍍層のせん断強度に依存するためと予想される。ここで用いた赤錆を有するすべての継手試験体のすべり係数を図-12 に示す。すべり係数の平均値は 0.73 である。設計に用いるすべり係数にどの程度の安全率を見込むかは、今後の課題であるが、仮に平均 -2σ 標準偏差の値を用いるとしても、その値は 0.65 である。なお、本実験で用いた試験体の鍍層の厚さは、35~100 μm 程度の範囲にあったことに注意願いたい。

4.2 節で示したように、すべり挙動は海岸曝露試験体と内陸部試験体で異なった。しかし、両者で鍍成分に顕著な違いは認められず、すべり係数も同程度であった。曝露場所によってすべり挙動が異なる原因については、さらに検討が必要と考えている。

5. 結論

本研究では、下地処理（グリッドブラスト、ディスクグラインダ）、曝露場所（海岸部、内陸部）、曝露期間（0, 2, 4, 6ヶ月）を変えて赤錆を生じさせた鋼板の錆性状調査と、それらの鋼板を用いて作成した高力ボルト摩擦接合試験体の引張試験を行い、赤錆面を有する継手のすべり係数について検討した。本研究で得られた結果は以下の通りである。

- (1) ディスクグラインダで表面処理した鋼板を用いた継手（赤錆なし）のすべり係数は、道路橋示方書の規定 0.4 を満たさない。
- (2) 赤錆の厚さおよび量は、曝露期間が長くなるにしたがって増加する。その程度は、内陸部に比べて海岸部で顕著である。

- (3) 赤錆を発生させた接合面を有する継手では、赤錆の発生条件（下地処理、曝露場所、曝露期間）によらず、すべりは鍍層で生じる。しかし、海岸部曝露の継手の滑り挙動は、内陸部曝露の継手や赤錆を有さない継手とは異なる。
- (4) 接合面にある程度の厚さの赤錆（本実験では 35~100 μm ）を有する継手のすべり係数は、平均で 0.73、平均 -2σ 標準偏差で 0.65 であった。これに対する鍍面の粗さ、下地処理、曝露場所、曝露期間の影響は認められなかった。

謝辞：本研究は、鋼橋技術研究会・施工部会の活動の一環として行なったものである。実験およびその整理には法政大学の大学院生で杉谷 隆夫 氏、学生であった寺内 啓 氏に協力いただいた。ここに記して、深謝します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，2002。
- 2) ISO：ISO 1072 - 1，Steel Structures - Part 1：Materials and design，1997。
- 3) AASHTO：Standard Specifications for Highway Bridges，17th Edition，2002。
- 4) prEN 1993-2：Eurocode 3 - Part 2：Steel Bridges，2003。
- 5) 日本建築学会：鋼構造設計規準（SI 単位版），2002。
- 6) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2005。
- 7) 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，2001。

（2006年9月11日受付）