

過大孔・スロット孔を用いた高力ボルト摩擦接合の すべり係数に関する実験的研究

小原 泉 桂 大輔
佐々木 聡 永峰 頌子^{*1}
吉田 文久^{*1} 西出 俊夫^{*2}

概 要

鋼構造部材の建方精度の確保は久しく課題となっており、建方精度と施工性の向上のため接合部の合理化が求められている。鋼構造部材の接合部に用いられる高力ボルト摩擦接合部の孔径は、法令によりその径が定められている。本研究では内外装材の下地鉄骨に使用される一面せん断の摩擦接合部を対象に、過大孔およびスロット孔を有する高力ボルト摩擦接合部のすべり係数試験、リラクセーション試験を実施し、その力学的性状について検討する。これより以下の知見を得られた。①過大孔・スロット孔のすべり係数は、標準孔に比べばらつきが大きく、ばらつきを考慮したすべり係数の下限推定値が標準孔より小さく評価される。②外側に配置される標準孔を設ける部材の板厚が薄いほどすべり係数は低下する。③過大孔・スロット孔のボルトの軸力のリラクセーションは標準孔と同程度であった。

Experimental Study on High-strength Bolted Friction Joints with Oversized and Slotted Holes

Abstract

The rationalization of joints is required to improve erection accuracy and constructability. The diameter of holes used in high-strength bolt friction joints for steel structure is regulated by law. This study examines the mechanical properties of friction joints with oversized and slotted holes, used in single-shear connections for the substructure of interior and exterior members. Slip coefficient tests and relaxation tests were conducted. As a result, (1)the slip coefficient of oversized and slotted holes exhibits greater variability compared to standardized holes, and the lower bound estimate of the slip coefficient, considering this variability, is evaluated to be smaller than that of standardized holes. (2)The slip coefficient decreases as the thickness of the outer plate decreases. (3)The impact of oversized and slotted holes on the relaxation of bolt axial force is minimal.

キーワード：高力ボルト摩擦接合、過大孔、スロット孔、
すべり係数試験リラクゼーション試験

*1 大和ハウス工業
*2 大和リース

§1. はじめに

高力ボルト摩擦接合部の孔径は、建築基準法施行令第68条第2項において、高力ボルトの軸径が27mm未満の場合、軸径より2mmを超えて大きくしてはならないと規定されているが、同条第3項において、国土交通大臣の認定を受けた高力ボルト接合については第2項の規定を適用しないとされている。この規定により孔径が軸径+2mmを超える過大孔やスロット孔を採用できれば、鉄骨製作や建方時に生じる誤差を吸収することができ、工事現場における施工性を改善することができる。

特に内外装材の下地鉄骨等においては、その建て入れ精度を確保するためにガセットプレートの後付け溶接等様々な工夫がなされている。これを過大孔およびスロット孔を用いることで、建て入れ精度および施工性の向上を図ることができる。

既往の研究等^{1)~3)}においては、過大孔やスロット孔のすべり耐力の通常の孔（軸径+2mm、以下、標準孔とする）と比較した際の低下率について調査されている。しかし、これらの研究は二面せん断の摩擦接合部を対象としたものが多く、一面せん断の摩擦接合部を対象としたものは少ない。

本研究は内外装材の下地鉄骨に使用される一面せん断の摩擦接合部を対象に、過大孔およびスロット孔を

有する高力ボルト摩擦接合部のすべり係数試験、リラクセーション試験を実施し、その力学的性状について検討する。

§2. 接合部の構成

本研究で対象とする接合部の構成を図2.1に示す。接合部は標準孔を設けた母材（以下、外板とする）、過大孔またはスロット孔を設けたガセットプレート（以下、中板とする）、標準孔を設けたカバープレートからなる。過大孔およびスロット孔を一面せん断の摩擦接合部に用いる場合、過大孔またはスロット孔が露出して、高力ボルトの座金に接し、高力ボルトの軸力導入が不安定になることを防ぐ必要がある。ボルトの導入軸力を円滑に摩擦面に伝達するために標準孔を設けたカバープレートを高力ボルトの座金と中板の間に設置し、外板とともに過大孔またはスロット孔を有する中板を挟むように配置した。

過大孔およびスロット孔の形状を図2.2に示す。過大孔は軸径+4mmの円孔とし、スロット孔は短径が軸径+2mm、長径を軸径の2.5倍とする。長径の配置によるすべり係数への影響を確認するために、スロット孔は応力方向が長径方向に平行の場合と直交の場合について検討を行う。

§3. すべり係数試験

3.1 試験概要

試験体一覧を表3.1に示す。実験パラメータは孔形状、摩擦面処理の方法（赤さび処理、ブラスト処理）、高力ボルトの径、母材の板厚である。ボルトの呼び径はM16、M20の2種類とし、母材の板厚は4.5~12mmとした。

試験体図を図3.2に示す。試験体は一面せん断とし、一方に標準孔、他方に過大孔またはスロット孔を設けた。標準孔を設けた板を外板、過大孔・スロット孔を設けた板を中板と呼ぶ。カバープレートには摩擦面処理をせず黒皮のままとし、板厚は6~9mmとした。中板と外板の鋼種はSM490A、カバープレートはSS400とした。試験体の端部は、偏心による付加曲げの影響を抑えるために鋼板を取り付けた。いずれの試験体も構造用トルシア形高力ボルト（S10T）2本を用い、孔に対してボルト芯がほぼ中央になるように配置した。試験体の板幅はボルト径および母材の板厚ごとに定め、スロット孔（加力直交方向）の有効断面の降伏耐力が、すべり荷重（すべり係数=0.6）にほぼ等しくなる条件で設計した。試験体のn数は、標準孔は3体、過大孔・スロット孔は5体または10体とした。

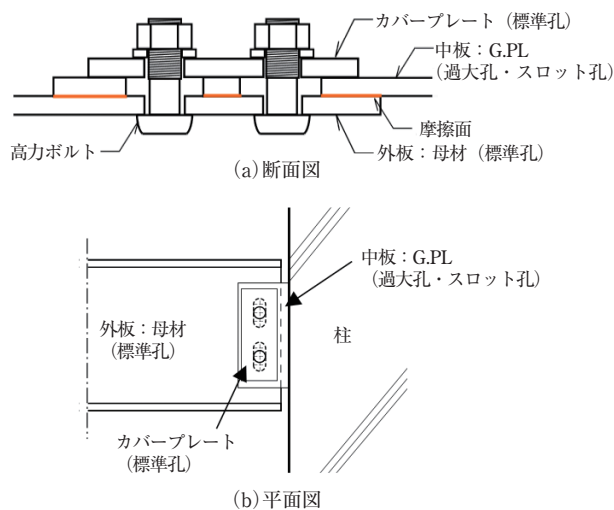


図 2.1 接合部の構成

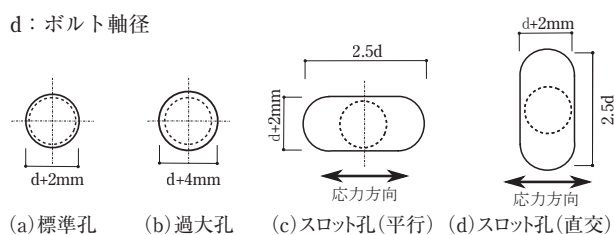


図 2.2 孔形状

表 3.1 試験体一覧

試験体名	孔形状	摩擦面処理	呼び径	板厚	板幅	首下長さ	試験体数
				外板+中板+カバーPL mm			
1R	標準孔	赤さび	M16	4.5+6	135	35	3
21R				6+6	110	40	3
11R				6+6	200	40	3
21S		ブラスト	M16	6+6	110	40	3
11S			M20	6+6	200	55	3
2R	過大孔	赤さび	M16	4.5+6+6	135	40	5
2RW				9+4.5+9	135	50	5
5R				6+6+6	110	45	10
8R			M20	12+12+6	90	55	5
12R				6+6+9	200	55	10
18R				12+12+9	105	65	5
2SW		ブラスト	M16	9+4.5+9	135	50	5
5S			M16	6+6+6	110	45	5
12S			M20	6+6+9	200	55	5
3R	スロット孔 (加力直交方向)	赤さび	M16	4.5+6+6	135	40	5
3RW				9+4.5+9	135	50	5
6R				6+6+6	110	45	10
9R			M20	12+12+6	90	55	5
13R				6+6+9	200	55	10
19R				12+12+9	105	65	5
3SW		ブラスト	M16	9+4.5+9	135	50	5
6S			M16	6+6+6	110	45	5
13S			M20	6+6+9	200	55	5
4R	スロット孔 (加力平行方向)	赤さび	M16	4.5+6+6	135	40	5
4RW				9+4.5+9	135	50	5
4RH				4.5+9+9	135	50	5
7R			M20	6+6+6	110	45	10
10R				12+12+6	90	55	5
14R				6+6+9	200	55	10
20R		ブラスト	M16	9+4.5+9	135	50	5
4SW			M16	6+6+6	110	45	5
7S			M20	6+6+9	200	55	5
14S			M20	6+6+9	200	55	5

高力ボルトの締め付けは、トルクレンチを用いて一次締めし、マーキングを行った。その後、シャーレンチを用いてピンテール破断まで本締めを行った。ボルト軸力は、高力ボルト全数に埋込み式ひずみゲージを用いて計測した。载荷はアムスラー型万能試験機による単調引張载荷とした。ボルト締め付け後24時間以上経過した後に実施した。摩擦面に十分なすべり変位（3 mm程度）が発生するまで载荷を行った。図3.3に変位の計測方法を示す。長ナットを溶接して変位計を取り付けて変位を計測し、荷重は試験機の値を用いた。

3.2 試験結果

すべり荷重は明確な主すべりが観測された時の荷重とした。明確な主すべりが観測されない場合はすべり変位0.2mm時の荷重、すべり変位0.2mmまでに最大荷重が生じた場合はその最大荷重をすべり荷重とした。すべり係数は、実験より得られたすべり荷重及び、2本の高力ボルトの初期導入軸力より求めた。

図3.4に高力ボルトがM16で外板・中板・カバープレートの厚さがすべて6 mmの試験体の荷重-変位関

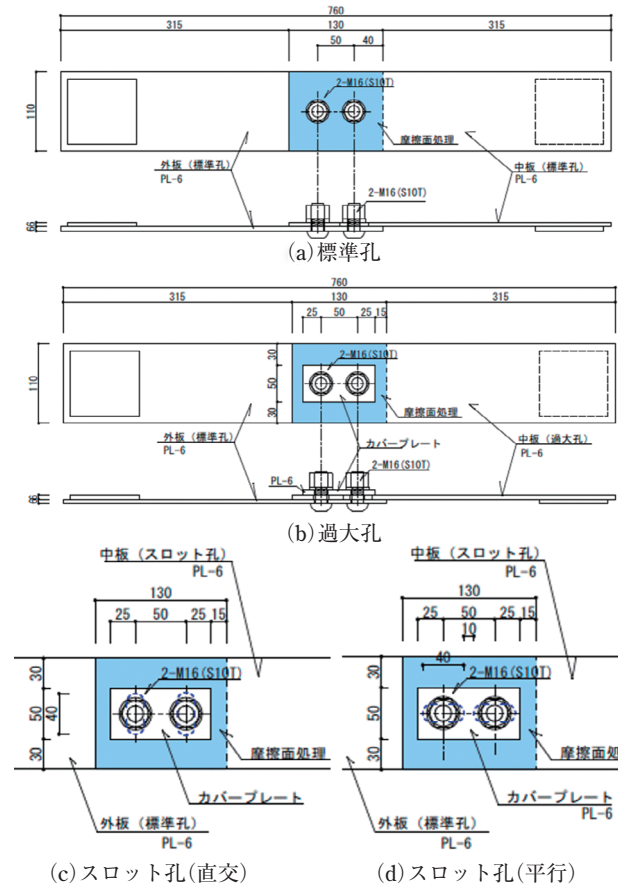


図 3.2 試験体形状

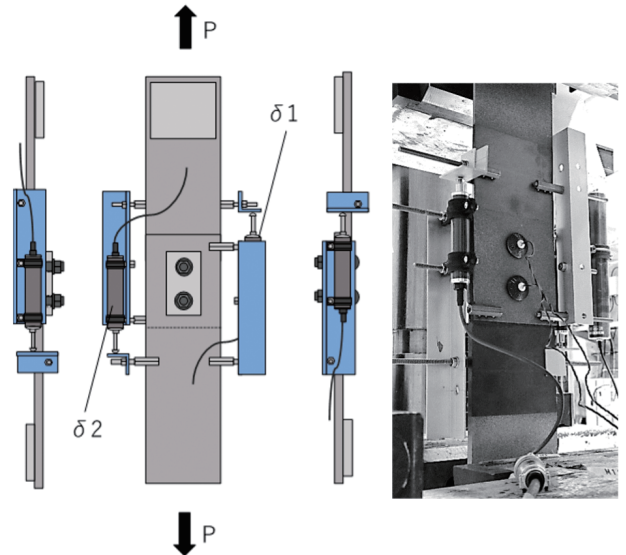


図 3.3 変位測定方法

係を示す。図中の実線は試験機のロードセル荷重とすべり変位の関係、破線はボルト軸力とすべり変位の関係を示す。摩擦面が赤さびの試験体は、明確な主すべりが発生して荷重が低下したが、ブラストの試験体は主すべりが明瞭に観察されなかった。ボルト軸力は、荷重が上昇するにつれて低下し、すべりが生じた後はほぼ一定となっている。

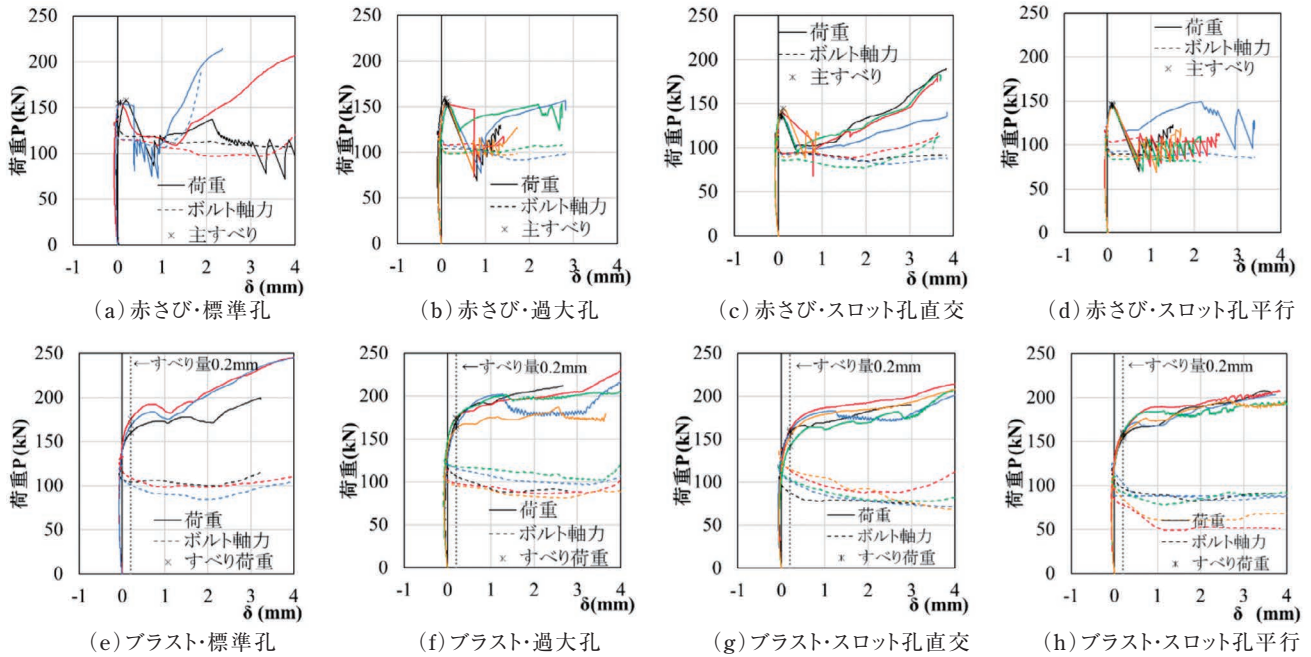


図 3.4 荷重 - 変形関係 (M16、外板 6mm + 中板 6mm + カバープレート 6mm)

3.3 すべり係数

表 3.2 に赤さび処理面の実験結果一覧を示す。得られたすべり係数の平均値に併せて、標準偏差およびばらつきを考慮した 99.7% 信頼区間の下限推定値 $\mu - 3\sigma$ を示す。

(1) 標準孔の試験体のすべり係数は平均値 μ_{ave} が 0.611~0.618、標準偏差 σ が 0.005~0.021、下限推定値 $\mu - 3\sigma$ が 0.548~0.603 であった。文献⁴⁾に示されている赤さび面で二面摩擦のすべり係数の実測値は平均値 0.609、標準偏差 0.053 である。本実験は一面摩擦であるがこれと同程度のすべり係数となった。

(2) 過大孔では、すべり係数は平均値 μ_{ave} が 0.561~0.688、下限推定値 $\mu - 3\sigma$ が 0.456~0.593 であり、一般に接合部のすべり耐力の計算に用いられているすべり係数 0.45 を上回っているものの、下限推定値は標準孔に比べて小さい傾向にある。

(3) スロット孔 (直交) ではすべり係数は平均値 μ_{ave} が 0.551~0.665、スロット孔 (平行) ではすべり係数は平均値 μ_{ave} が 0.564~0.644 である。スロット孔は直交・平行のいずれの場合も過大孔の場合と同様に、すべり係数の下限推定 $\mu - 3\sigma$ は 0.468~0.601 と設計で用いるすべり係数 0.45 を上回っているものの、標準孔に比べて小さい。

外板の板厚が 4.5mm の 2R、3R、4R、4RH 試験体では他の試験体よりすべり係数が小さい傾向にある。

表 3.3 にプラスト処理面の実験結果一覧を示す。

(1) 標準孔の試験体のすべり係数は、平均値 μ_{ave}

表 3.2 実験結果一覧 (赤さび)

孔形状	ボルト径	板厚	すべり係数			試験体名
		外板+中板+カバーPL mm	平均値 μ_{ave}	標準偏差 σ	下限値 $\mu_{ave}-3\sigma$	
標準孔	M16	4.5+6	0.618	0.005	0.603	1R
		6+6	0.611	0.021	0.548	21R
	M20	6+6	0.614	0.014	0.573	11R
過大孔	M16	4.5+6+6	0.561	0.035	0.456	2R
		6+6+6	0.639	0.023	0.571	5R
		9+4.5+9	0.663	0.031	0.571	2RW
		12+12+6	0.688	0.040	0.567	8R
	M20	6+6+9	0.597	0.031	0.505	12R
		12+12+9	0.654	0.021	0.593	18R
スロット孔 (直交)	M16	4.5+6+6	0.551	0.020	0.492	3R
		6+6+6	0.600	0.042	0.474	6R
		9+4.5+9	0.658	0.031	0.566	3RW
		12+12+6	0.665	0.028	0.581	9R
	M20	6+6+9	0.560	0.031	0.468	13R
		12+12+9	0.620	0.023	0.552	19R
スロット孔 (平行)	M16	4.5+6+6	0.591	0.025	0.516	4R
		4.5+9+9	0.564	0.016	0.517	4RH
		9+4.5+9	0.641	0.032	0.543	4RW
		6+6+6	0.625	0.029	0.538	7R
	M20	12+12+6	0.644	0.015	0.599	10R
		6+6+9	0.606	0.016	0.558	14R
		12+12+9	0.635	0.012	0.601	20R

表 3.3 実験結果一覧 (プラスト)

孔形状	ボルト径	板厚	すべり係数			試験体名
		外板+中板+カバーPL mm	平均値 μ_{ave}	標準偏差 σ	下限値 $\mu_{ave}-3\sigma$	
標準孔	M16	6+6	0.659	0.005	0.645	21S
	M20	6+6+9	0.572	0.027	0.492	11S
過大孔	M16	6+6+6	0.689	0.051	0.535	5S
	M20	9+4.5+9	0.592	0.076	0.363	2SW
スロット孔 (直交)	M16	6+6+9	0.580	0.036	0.473	12S
	M20	6+6+6	0.619	0.055	0.455	6S
スロット孔 (平行)	M16	9+4.5+9	0.515	0.067	0.315	3SW
	M20	6+6+9	0.569	0.020	0.509	13S
スロット孔 (直交)	M16	6+6+6	0.658	0.033	0.560	7S
	M20	9+4.5+9	0.595	0.027	0.513	4SW
スロット孔 (平行)	M16	6+6+9	0.588	0.037	0.477	14S

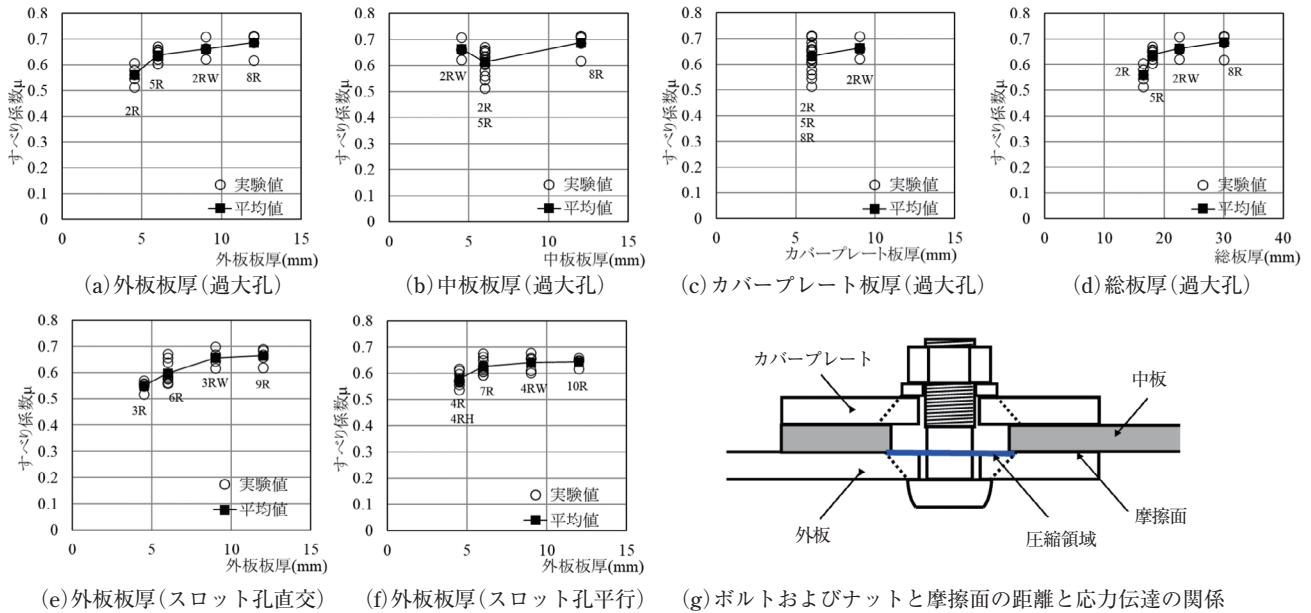


図 3.5 すべり係数と外板の板厚の関係 (M16、赤さび)

が0.572~0.659、標準偏差 σ が0.005~0.027であり、赤さび面に比べてややばらつきが大きい。

(2) 過大孔では、平均値 μ_{ave} が0.580~0.689、下限推定値 $\mu-3\sigma$ は0.363~0.535であった。中板が4.5mmの試験体(2SW)はばらつきが大きく、下限推定値 $\mu-3\sigma$ は0.363で0.45を下回っている。

(3) スロット孔(直交・平行)では、平均値 μ_{ave} が0.515~0.658、下限推定値 $\mu-3\sigma$ は0.315~0.560であった。中板が4.5mmの試験体(3SW)はばらつきが大きく、下限推定値 $\mu-3\sigma$ は0.315で0.45を下回っている。過大孔・スロット孔を設けた場合、すべり係数の平均値は標準孔と同程度となるが、ばらつきが大きく下限推定値 $\mu-3\sigma$ がやや低く評価される。また、スロット孔の配置によるすべり係数への影響は小さい。

下限推定値 $\mu-3\sigma$ が0.45を下回った試験体は、いずれも過大孔・スロット孔を設けた中板の板厚が4.5mmのものである。これは、ショットブラスト加工時に板に変形が生じて摩擦面の密着性が悪かったことや、中板と外板の板厚差が大きいために偏心曲げの影響が大きかったことなどが要因と考えられる。

高力ボルトがM16、摩擦面が赤さびの試験体について、図3.5に部材の板厚とすべり係数の関係を示す。横軸は板厚、縦軸はすべり係数で、○は各試験体の実験値、■は平均値である。過大孔の場合、外板の板厚および総板厚が厚くなるにつれて、すべり係数は大きくなる傾向がみられスロット孔でも同様の傾向を示す。一方、中板とカバープレートの板厚とすべり係数は明確な関係は示さない。これは、図3.4に示すよう

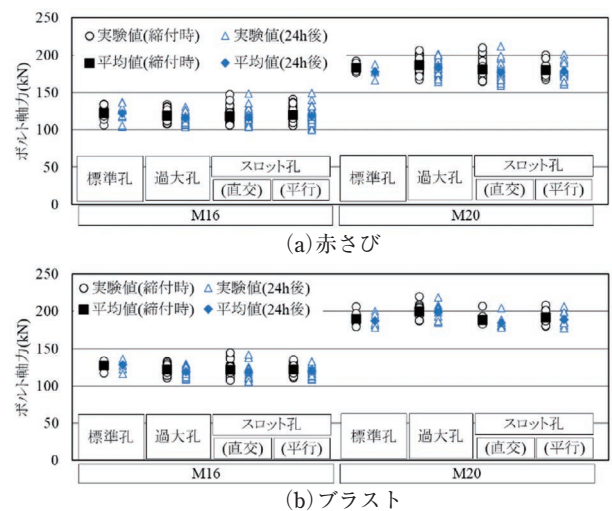


図 4.1 すべり係数試験の導入軸力

表 4.1 すべり係数試験の24時間後のボルト軸力

摩擦面処理	孔形状	呼び径	締付時(1分後)		24時間後(載荷時)		低下率 R_d
			平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
			N_{ave} (kN)	σ	N_{Lave} (kN)	σ	
赤さび	標準孔	M16	123	8.41	122	12.79	0.992
		M20	184	6.37	178	8.79	0.967
	過大孔	M16	119	7.09	116	6.78	0.972
		M20	187	10.02	183	10.14	0.980
	スロット孔(直交)	M16	119	8.41	117	8.73	0.984
		M20	181	11.75	177	12.06	0.978
	スロット孔(平行)	M16	120	7.78	118	9.08	0.987
		M20	181	7.85	178	9.26	0.986
ブラスト	標準孔	M16	128	6.44	128	7.51	1.006
		M20	190	10.19	187	8.69	0.985
	過大孔	M16	122	7.03	119	6.90	0.975
		M20	201	10.79	199	11.01	0.993
	スロット孔(直交)	M16	122	10.38	119	11.01	0.974
		M20	189	7.40	184	7.66	0.977
	スロット孔(平行)	M16	123	7.54	120	7.73	0.980
		M20	192	9.93	189	10.05	0.984

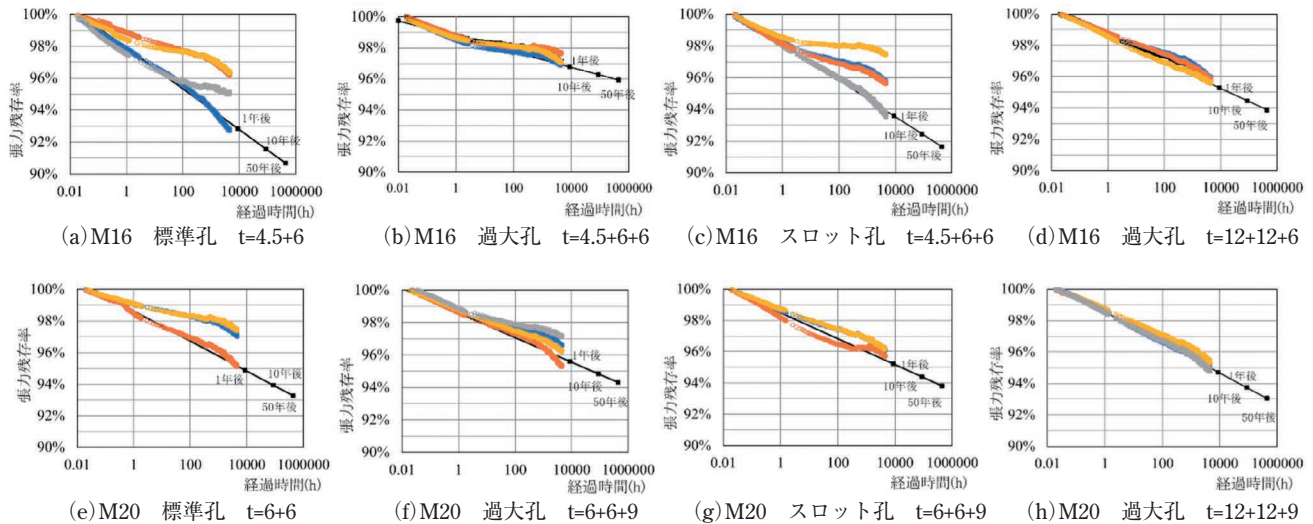


図 4.2 経過時間とボルト軸力残存率の関係

に摩擦面に接する外板が厚くなるにしたがって、高力ボルトから伝達される、摩擦接合面におけるボルト軸力による圧縮領域が大きくなるためと考えられる。

§ 4. リラクセーション試験

4.1 試験の目的

高力ボルトの本締め後、時間の経過とともに高力ボルトの導入軸力が徐々に減少していくリラクセーションについて検討する。過大孔・スロット孔が導入軸力に与える影響を確認するために、3節に示したすべり係数試験の試験体における、高力ボルトの締付けから約24時間後の載荷時のボルト軸力の低下の程度を確認した。また、すべり係数試験と同様の試験体を対象に6か月間のリラクセーション試験を実施した。

4.2 すべり試験のボルト軸力の低下

3節に示したすべり係数試験の試験について、締付け時(本締めの1分後)のボルト軸力 N_{0ave} と載荷時(約24時間後)のボルト軸力 N_{Lave} を図4.1および表4.1に示す。ボルト軸力の低下率 Rd は次式で求めた。

$$Rd = N_{Lave} / N_{0ave} \quad (1)$$

ボルト軸力は約24時間で1～3%程度低下したが、標準孔と過大孔・スロット孔の間に差異は見られなかった。一般にボルト軸力の低下は24時間で2%程度と言われており⁴⁾、実験結果は既往の研究結果と同程度となっている。

4.3 リラクセーション試験の概要

表4.2にリラクセーション試験の試験体一覧を示す。孔形状は標準孔、過大孔、スロット孔の3種類である。試験体形状はすべり係数試験と同様である。摩擦面は

表 4.2 試験体一覧

試験体名	孔形状	呼び径	板厚	板幅 (mm)	高力ボルトの首下長さ (mm)	試験体数 n
			外板+中板+カバーPL (mm)			
1R	標準孔	M16	4.5+6	135	35	4
11R		M20	6+6	200	40	3
2R	過大孔	M16	4.5+6+6	135	40	4
8R			12+12+6	90	55	4
12R		M20	6+6+9	200	55	4
18R			12+12+9	105	65	4
3R	スロット孔	M16	4.5+6+6	135	40	4
13R		M20	6+6+9	200	55	3

全て赤さびとした。高力ボルトはトルシア形(S10T)とし、径はM16とM20の2種類とした。中板と外板の鋼種はSM490A、補強板はSS400とした。中板と外板の厚さは4.5～12mm、カバープレートの厚さはM16は6mm、M20は9mmとした。試験体は2体ずつ用意し、高力ボルトの n 数は4本としたが、一部で計測不具合のため3本となっているものもある。

実験は20℃に保たれた恒温実験室で実施し、約6か月間に亘って計測を行った。ボルト軸力は高力ボルトに埋め込んだ歪ゲージの値を換算して求めた。本締め後1分が経過した時点の値を初期導入軸力とし、1時間経過までは10秒ごと、以降は1時間ごとに計測した。

4.4 試験結果

図4.2に経過時間とボルト軸力残存率(初期導入軸力で無次元化した値)の関係を示す。縦軸はボルト軸力残存率で、横軸は経過時間を対数表示している。6か月経過時点でのボルト軸力の低下率は3～5%程度であり、孔形状や板厚、ボルトの軸径による差は見られなかった。

各試験シリーズで最も残存率の低い試験体の回帰曲

表 4.3 ボルト軸力残存率

孔形状	ボルト 径	板厚	試験 体名	6ヶ月後 (実測・平均)	1年後 (推定)	10年後 (推定)	50年後 (推定)
		外板+中板+カバー孔					
標準孔	M16	4.5+6	1R	95.1%	92.9%	91.6%	90.7%
	M20	6+6	11R	96.5%	94.9%	93.9%	93.3%
過大孔	M16	4.5+6+6	2R	97.2%	96.8%	96.3%	95.9%
		12+12+6	8R	95.7%	95.3%	94.5%	93.9%
	M20	6+6+9	12R	96.3%	95.6%	94.8%	94.3%
		12+12+9	18R	95.1%	94.7%	93.7%	93.1%
スロット 孔	M16	4.5+6+6	3R	95.6%	93.6%	92.5%	91.7%
	M20	6+6+9	13R	96.0%	95.2%	94.4%	93.8%

線を図4.2に併せて示す。この回帰曲線を用いて、1年後、10年後、50年後のボルト軸力の残存率を推定した結果を表4.3に示す。1年後のボルト軸力の残存率は93～97%と推定される。文献³⁾ 1年後の軸力残存率は94～98%であり、これと同程度の軸力残存率となった。

§5. まとめ

過大孔・スロット孔を有する一面摩擦高力ボルト接合部のすべり係数試験およびリラクセーション試験を行い、孔形状が与える影響について検討した。得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 過大孔・スロット孔のすべり耐力係数の平均値は標準孔と同程度であるが、ばらつきが大きく、ばらつきを考慮したすべり係数の下限推定値 $\mu-3\sigma$ は、標準孔に比べて小さい。
- 2) 外板の板厚が薄いほどすべり係数は小さくなる。
- 3) 過大孔・スロット孔によるボルトの軸力のリラクセーションは標準孔と同程度であった。

謝辞

本研究は、東京理科大学、大和ハウス工業株式会社、大和リース株式会社、株式会社フジタの共同研究として実施した。実験実施にご協力頂いた東京理科大学伊藤研究室の関係各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会；鋼構造接合部設計指針
- 2) 桑原進、加藤あゆみ、安原慎吾；スロット孔を使用した高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼす諸変数の影響、構造工学論文集、Vol.67B、pp.351-356、2021.3
- 3) 田中淳夫、増田浩志、脇山廣三；過大孔・スロット孔を有する高力ボルト摩擦接合部の力学性状、鋼構造論文集、第5巻第20号、pp.35-44
- 4) 日本鋼構造協会；高力ボルト接合技術の現状と課題、JSSCテクニカルレポートNo.96、pp.78-82、2013.3

ひとこと

鉄骨工事の施工性と品質の向上に役立てれば嬉しいです。



小原 泉