

ボルト間隔および縁端距離が小さい高力ボルト摩擦接合継手の静的引張試験

(株)横河ブリッジ 正会員 ○清川 昇悟 名古屋大学 フェロー 館石 和雄
名古屋大学 正会員 判治 剛 名古屋大学 正会員 清水 優

1. 目的

鋼橋における高力ボルト摩擦接合継手の縁端距離およびボルト間隔（以降、ボルト配置という）は、被締結材の強度や板厚に関わらず、ボルト呼び径 D のみで最小値が規定されている。これらの規定は明治時代のリベット継手の規定がもとになっており、以来、大きな変更なく現在に至る。これまでに数多くの引張試験が実施され、現行規定で継手耐力に問題がないことが確認されている一方で、規定範囲外となるボルト配置の継手について検討した事例は多くはない。

本稿では、現行規定より狭い配置（以降、狭配置と呼ぶ）の高力ボルト摩擦接合継手について静的荷重試験を行い、そのすべり耐力およびすべり後耐力を調査した結果について報告する。なお、ここではボルト間隔 $3D$ 未満、縁端距離 $1.5D$ 未満のボルト配置を狭配置と定義する。

2. 試験体と実験方法

試験体のパラメータと設計値を表1に示す。すべり耐力 P_{ds} はすべり係数 $\mu_a=0.5$ として計算し、降伏耐力 P_{dy} の計算には鋼材の JIS 規格値を用いている。試験体の寸法諸元の例を図1に示す。使用した鋼板およびボルトの機械的性質（ミルシート値）を表2に示す。試験体にはすべり側と固定側を設定している。すべり側が試験対象部であり、主板と連結板が同厚の2面摩擦継手で、ボルト配置は2行2列である。固定側はすべり側が破断してもすべりを生じないように、固定側のすべり耐力をすべり側の破断耐力より大きくなるよう設計した。接合面には無機ジンクリッチペイント(目標膜厚 $75\mu\text{m}$)を塗布した。

試験体のパラメータは作用力方向の寸法（ピッチ p とはしあき e_1 ）、作用力直角方向の寸法（ゲージ g とへりあき e_2 ）、板厚 t 、である。すべり係数比 β を表中に示すが、L-1~3 はすべり先行型、T-1~3 は降伏先行型の継手となる。T-1N~3N は T-1~3 と同じ寸法であるが、すべり先行とするため所定のボルト軸力を導入していない。

表1 試験体のパラメータ

名称	ボルト		鋼板 (mm)					設計耐力 (kN)		すべり耐力比 β	備考
	規格	設計軸力 N_d (kN)	はしあき e_1	へりあき e_2	ピッチ p	ゲージ g	板厚 t	すべり耐力 P_{ds}	降伏耐力 P_{dy}		
L-1	M20x80(F8T)	133	30 (1.5D)	50	65 (3.3D)	65	14	532	596	0.89	作用力方向のボルト配置の影響 標準配置
L-2			22		50 (2.5D)		14		596	0.89	狭配置
L-3	M20x100(F8T)		(1.1D)				22		937	0.57	狭配置, 厚板
T-1	M20x80(F8T)	133	30 (1.5D)	50	65 (3.3D)	65	14	532	398	1.34	標準配置
T-2			22		50 (2.5D)		14		244	2.18	狭配置
T-3	M20x100(F8T)		(1.1D)				22		383	1.39	狭配置, 厚板
T-1N	M20x80(F8T)	0	30 (1.5D)	50	65 (3.3D)	65	14	0	398	0.00	作用力直角方向のボルト配置の影響 標準配置
T-2N			22		50 (2.5D)		14		244		狭配置
T-3N	M20x100(F8T)		(1.1D)				22		383		狭配置, 厚板

キーワード 高力ボルト, 摩擦接合, ボルト配置, すべり係数, すべり後耐力

連絡先 〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町2-3 (株)横河ブリッジ TEL:072-280-5707

表2 使用材料の機械的性質

鋼板	板厚 t (mm)	降伏強度 σ_{py} (N/mm ²)	引張強度 σ_{pu} (N/mm ²)	伸び ϵ_{pu} (%)
SM490Y	14	446	558	26
	22	469	573	28
ボルト	首下長さ (mm)	降伏強度 σ_{by} (N/mm ²)	引張強度 σ_{bu} (N/mm ²)	伸び ϵ_{bu} (%)
M20 (F8T)	80	840	880	21
	100	855	891	21

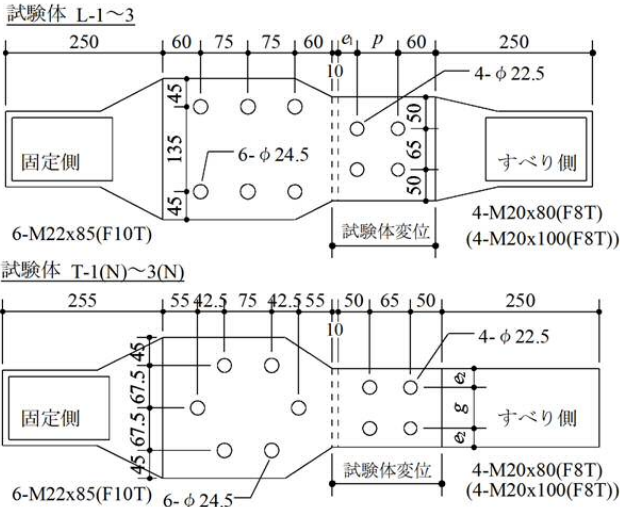


図1 試験体の諸元 (単位: mm)

具体的には、すべり側のボルトをスナッグタイトとした。ボルト締付け時は、ボルト頭部にひずみゲージを貼りボルト軸力をモニタリングしながら軸力管理を行った。実験には2,000 kN 万能試験機を使用し、試験体の両側をつかんで試験体が破断するまで引張荷重を載荷した。載荷速度は約 1 kN/秒とした。試験体変位の計測位置を図1中に示す。リラクセーションを考慮し、実験は試験体組立の1週間後に実施した。なお、接合面の塗装膜厚およびボルト軸力のリラクセーションには試験体間の有意差がなかったことを確認している。

3. 実験結果と考察

図2に破断後の代表的な写真を示す。L-1は主板の荷重分担が大きい端部側のボルト位置で主板が引張破断した。L-2は主板の引張とせん断が複合した中抜け破断となった。まず試験体中央での引張破断が発生し、その後にはしめけ破断が生じる2段階での破壊が生じた。L-3はボルトのせん断破壊であり、端部側の2本のボルトが破断した。T-1～3, T-1N～3Nはすべて主板の引張破断であり、すべて端部側のボルト位置で破断した。設計すべり荷重より設計破断荷重のほうが小さいL-2についてのみ、載荷中に明確なすべり音が確認されず破断した。

図3に各試験体の荷重～変位関係を示す。T-2を除き、すべての試験体ですべり発生時に荷重が低下し、ボルト孔クリアランスの2.5 mm程度まで荷重は横ばいとなる。その後、ボルトが支圧状態に移行し荷重は増加する。ボルトのせん断で破壊したL-3は、鋼板自体があまり変形していないため全体としての変形が他に比べ小さい。ボルト配置の影響については、標準配置であるT-1と狭配置であるT-2を比較すると最大耐力はT-2の方が小さくなる。しかし、狭配置でも板厚が厚いT-3はT-1と同程度の最大耐力まで向上している。この傾向はT-1N～3Nでも同様である。

表3に実験より得られたすべり耐力 P_{es} と最大耐力 P_{emax} の一覧を示す。すべり係数は実験開始時の初期軸力 N_{ei} で計算した。すべり係数は0.46～0.52の範囲に分布しており、狭配置の試験体を含め、すべての試験体で道路橋示方書に規定される0.45以上を確保できている。



(主板の引張: L-1) (引張+せん断: L-2) (ボルトせん断: L-3)

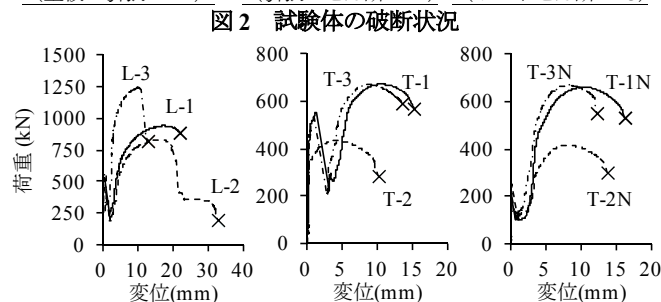


図3 荷重～変位関係

表3 実験のすべり耐力と最大耐力

試験体	L-1	L-2	L-3	T-1 (T-1N)	T-2 (T-2N)	T-3 (T-3N)
初期ボルト軸力 N_{ei} (kN)	133	132	133	134 (未計測)	132 (未計測)	132 (未計測)
すべり耐力 P_{es} (kN)	526	483	546	555 (211)	- (250)	538 (255)
最大耐力 P_{emax} (kN)	941	827	1240	671 (660)	432 (414)	668 (668)
すべり係数	0.50	0.46	0.51	0.52 (-)	- (-)	0.47 (-)

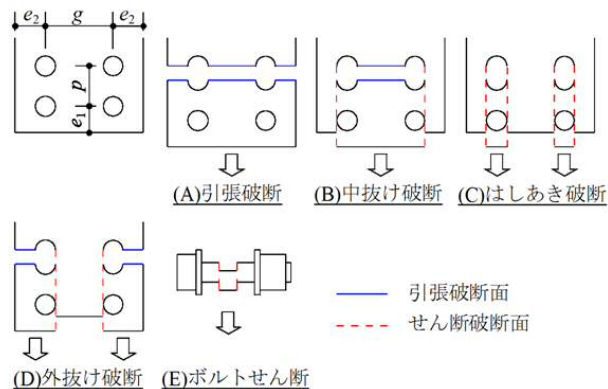


図4 想定される破壊モード

表4 推定耐力値と誤差

破壊モード	推定した破断耐力 P_u (kN)					
	L-1	L-2	L-3	T-1 (T-1N)	T-2 (T-2N)	T-3 (T-3N)
(A)	937	937	1513	625	383	618
(B)	1074	894	1443	1230	1113	1796
(C)	1484	1125	1815	1797	1797	2899
(D)	1348	1168	1885	1191	1066	1721
(E)	1327	1327	1344	1327	1327	1344
実験での破壊モード	(A)	(B)	(E)	(A)	(A)	(A)
P_{emax} との誤差(%)	-0.4	8.2	4.3	-6.9 (-5.3)	-11.2 (-7.5)	-7.5 (-7.5)

試験体の破断について、図4に示す5つの破壊モードが考えられる¹⁾。それぞれ、引張抵抗断面積 A_{nt} とせん断抵抗断面積 A_{ns} 、ボルト軸部の断面積 A_b に鋼材強度を掛け、それらを合計することで各モードの破断耐力 P_u を計算した。計算に用いる強度 σ_{pu} 、 σ_{bu} には表2に示すミルシート値を、断面積には実測値ではなく設計値を用いた。

(A)～(D) 鋼板の破断

$$P_u = A_{nt}\sigma_{pu} + 0.5A_{ns}\sigma_{pu} \quad (1)$$

(E) ボルトのせん断破断

$$P_u = 2 \times 4 \times 0.6 \times A_b\sigma_{bu} \quad (2)$$

鋼板のはしめけ破断の推定については、有効断面積を用いる方法と等価せん断断面積を用いる方法があるが、結果に大きな差がなかったため、ここでは前者を用いた。

表4に各試験体の推定破断耐力を示す。いずれのケースでも実験で観察された破壊モードの推定耐力が最も小さく、実験値を±10%程度の誤差で推定できた。

縁端距離や導入軸力はボルト孔周辺の支圧変形の拘束に影響し、はしめけ破断耐力に影響を与えられている。計算において実測値ではなく鋼材のミルシート値や断面積の設計値を用いていることも、推定誤差に影響を与えている可能性がある。これら要因の影響の程度は不明であるが、狭配置の試験体を含め、鋼材単体の計算強度で最大耐力を誤差約10%の精度で推定できており、今回はそれらの影響が比較的小さかったといえる。

以上が今回の実験で得られた知見である。試験体数が少ないため、今後さらなる検討を行い、信頼性を向上させることが必要と考えている。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，丸善，2012.3.