

地震によるすべり損傷を有する高力ボルト摩擦接合連結部の残存保有耐力に関する基礎的研究

Fundamental study on remaining capacity of high-tension bolted connections subjected to slipping damage by large earthquake

大阪公立大学 助教 林 巖

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. はじめに

鋼橋の部材接合部には、図-1 に示す高力ボルト摩擦接合継手（以下、摩擦継手）が多く用いられている。この摩擦継手の設計時に用いるすべり係数は、道路橋示方書（以下、道示）では、接合面に無機ジンクリッチペイント（以下、無機ジンク）を塗布した場合に 0.45 と規定されている。

アルミ溶射を有する接合面において、接触圧が高いほど、すなわちボルト軸力が高いほど連結板厚が小さいほど、すべり係数が低くなることを示した。

しかし、道示では、この接触圧増大によるすべり係数の低下を考慮していない。また、摩擦接合継手部は、すべり現象を許容しない設計であり、また、すべり後の挙動の知見が少なく、1度すべりが発生した継手部は新たに取換えられる。一方、損傷を受けた時の残存保有耐力を定量的に評価できると、設計作用力より大きな外力が作用し、損傷を受けた場合に、取換えに関する是非や復旧の優先順位などを判断することができると考えられる。

これらの背景を踏まえて、本研究の目的は、橋梁構造物の中で、摩擦力によって荷重伝達を行う高力ボルト摩擦接合連結部（以下、摩擦接合継手部）の面圧依存の摩擦挙動を実験結果から定式化し、大規模地震動のように設計作用力より大きな外力を受け、すべり（以下、すべり）損傷を生じた摩擦接合継手部における残存保有耐力を解析的に明らかにすることである。

具体的には、すべり損傷を受ける前後の摩擦挙動を評価するため、接触面圧および表面処理と、すべり挙動の関係を明らかにできる小型すべり試験を実施する。その後、FE 解析に用いる摩擦挙動を定式化し、解析的に損傷を受けた継手部の残存保有耐力を定量的に評価する。

2. 研究方法

2.1 小型すべり試験

小型すべり試験は、母板の降伏や接触圧分布等の影響を除いて、接触圧と摩擦係数の関係性を評価できる試験である。本研究では、図-2 に示す試験機に、図-3 に示す試験片を設置し、载荷を実施した。表-1 に試験ケースを示す。試験体[1]は、すべり後も接触面積を一定に保つために、外試験片が内試験片よりも大きい形状とした。試験パラメータは接合面処理と接触圧とした。無機ジンクの有無による違いを明らかにするために、接合面処理はブラスト処理のみ、およびブラスト処理後に無機ジンクを塗布した 2 ケースとした。接触圧は、過去に



図-1 高力ボルト摩擦接合継手

実施されていない 60N/mm^2 以下および 180N/mm^2 以上の範囲とした。小型鋼板すべり試験では、継手の母板・連結板に相当する内試験体・外試験体を水平ジャッキの軸力により密着させ、その状態のまま万能試験機により鉛直ユニットに載荷し、すべりを発生させる試験である。接合面の接触圧は水平ジャッキの軸力を調整し、鉛直荷重の載荷速度は 0.5kN/s 、計測間隔は 10Hz とした。試験体数は 3 体を基本とし、計測項目は、水平軸力、鉛直荷重、試験体間の相対変位である。

試験体の端は面取りを施しており、代表して 18 個の内試験体の接触面の面積は、平均面積で 484mm^2 であったため、この結果を用いて、平均接触圧を算出した。

ブラスト処理は ISO-Sa2.5、無機ジンクはブラスト処理 (ISO-Sa2.5) 後、膜厚 $75\mu\text{m}$ を目標に塗布した。膜厚計測の結果、外試験体と内試験体と接合させたときの合計膜厚が $150\mu\text{m}$ 以上となるものが多く、接合面処理として規定を満足していることを確認した。

載荷は、万能試験機により鉛直方向に載荷速度 $0.5\sim 1\text{kN/sec}$ を目標に載荷を行った。すべりの判定は、ピーク荷重あるいは荷重が一定となり、かつ両側 (A 側, B 側) とともに同時に相対変位が急増した時点とし、荷重が低下傾向にあるときを除荷のタイミングとした。相対変位の測定には DIC (Digital Image Correlation) による画像解析を採用したため、載荷中、カメラによる試験体のビデオ撮影を行った。計測した荷重と DIC 解析による相対変位は時間で合わせるため、荷重の計測開始とカメラの撮影開始のタイミングを誤差 1 秒以内で合わせる必要があったため、開始のタイミングは厳密に管理した。カメラ撮影を用いた載荷時の様子を 図-2 (a) に示す。

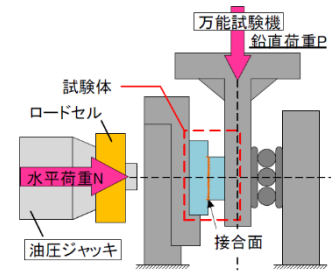
3.2 FE 解析

解析ソルバーには汎用非線形有限要素解析プログラム Abaqus/CAE2020 を用いて、境界非線形性を考慮した静的弾塑性有限変位解析を行った。解析モデルは、図-4 (a) に示すすべり試験の継手と同形状とした。解析モデルを図-4 (b) に示す。2 面摩擦、ボルト配列 1 行 2 列の摩擦接合継手であり、また構造対称性を考慮し、1/8 モデルとした。対称面の境界条件を図-4 (c) に示す。

解析に用いた高力ボルトおよび鋼板の構造諸元を表-2 に示す。ボルト等級は、溶融亜鉛メッキ高力六角ボルト (F8T)、高力六角ボルト (F10T)、超高力六角ボルト (F14T)、F10T の 6 割締め (F6T) の 4 種類である。実験結果と比較を行うため、構造諸元はすべて 図-4 (a) のすべり試験に基づいている。解析に導入するボルト軸力は、設計軸力でなく、図-4 (a) を実施した際のすべり試験の試験前軸力とした。実験された 3 体の試験体の平均の試験前軸力を 2 本のボ

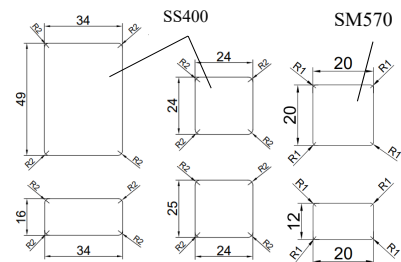


(a) 小型すべり試験



(b) 載荷メカニズム

図-2 小型すべり試験概要



(a) 試験体 [1] (b) 試験体 [2]

図-3 試験体形状

表-1 試験ケース

接合面処理	試験体の種類	鋼種	平均接触圧 (N/mm ²)	公称接触面積 (mm ²)	導入軸力 (kN)	試験体数
ブラスト処理			150	480	79	3
			200		106	3
			250		132	3
ブラスト処理 + 無機ジンク (目標塗膜厚 75μm)	試験体 [1]	SS400	15	480	8	3
			133		70	3
			150		79	3
			170		90	4
			180		95	5
	試験体 [2]	SM570	208	400	110	3
			200		83	3
			250		104	3
			300		123	3
			350		144	3
		400		163	3	
		450		183	3	

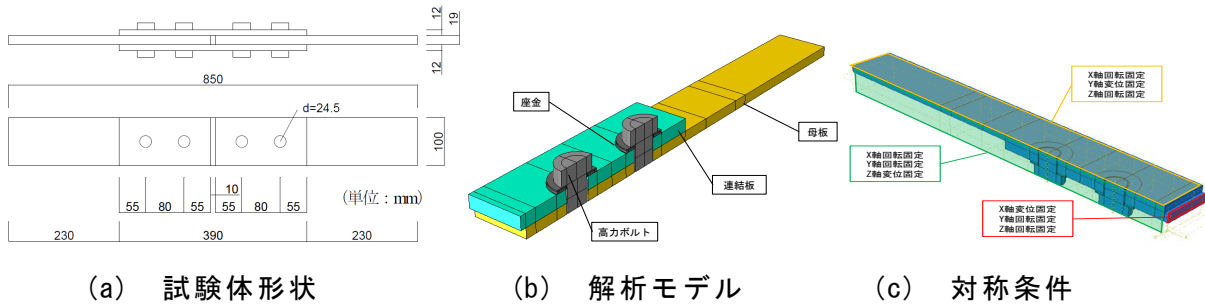


図-4 解析モデル概要

ルトに導入した。母板と連結板の接合面の摩擦係数には、小型すべり試験で求めた、接触圧に依存する摩擦係数を適用する(表-3, 図-6)。また、座金と連結板間の接触面では摩擦係数 0.01 とし、ボルトヘッドと座金間ではすべりが起こらないように、1.0 とした。

解析ステップは、ステップ 1 でボルト軸力を導入し、ステップ 2 で継手に引張荷重を与える 2 ステップで構成した。ボルト軸力は、z 軸方向の対称を考慮し、設計ボルト軸力の 1/2 の軸力を導入した。継手引張荷重は母板端部に強制変位 1mm を与えることで再現した。相対変位が急激に増加し最大荷重となったときをすべりとし、すべり耐力は、対称性を考慮し、最大荷重を 4 倍することで算出した。相対変位の測定位置は母板遊間部から 10mm の位置とする。

(実験調査によって得られた新しい知見)

3. 結果および考察

3.1 小型すべり試験

すべり時の接触圧 σ_{slip} と摩擦係数 μ_{slip} の関係を図-5 に示す。なお、図-5 には文献 2)の結果も併せて示す。摩擦係数およびすべり時の接触圧は式(1), (2)により算出した。すべり時の接触圧はすべり時のボルト軸力を公称接触面積で除して算出した。すべりは、荷重低下時あるいは荷重が増加せず両側ともに相対変位が急増した時点とした。公称接触面積 A は、形状計測により算出した接触面の面積とした。

$$\mu_{slip} = \frac{F_{slip}}{mN_{slip}} \quad (1)$$

$$\sigma_{slip} = \frac{N_{slip}}{A} \quad (2)$$

ここに、 μ_{slip} : 摩擦係数, F_{slip} : すべり時の鉛直荷重(N) m : 接合面数(=2), N_{slip} : すべり時の軸力(N), σ_{slip} : すべり時の接触圧(N/mm²), A : 公称接触面積(mm²)である。

図-5 より、無機ジンクの場合、 $\sigma_{slip}=45 \sim 450$ N/mm²の範囲で接触圧と摩擦係数は負の相関関係にある。

表-2 構造諸元

(a) 高力ボルト

ボルト等級	呼び径	孔径 [mm]	導入軸力	
			試験前軸力 [kN]	設計軸力 [kN]
F6T	M22	24.5	113	123
F8T			170	165
F10T			206	205
F14T			340	286

(b) 鋼板

	板厚 [mm]	幅 [mm]	長さ [mm]	ピッチ [mm]	はしあき [mm]	鋼種
連結板	12	100	390	80	55	SM490Y
母板	20		420			

表-3 接合面の摩擦係数

	接触圧 σ [N/mm ²]	摩擦係数 μ
依存摩擦	0-45	0.912
	50-417	$\mu = 5.604 \times \sigma^{-0.477}$
	417~	0.315

接触圧 200 N/mm² および 450 N/mm² の試験後の接合面の状態を図-7 に示す。図-7(a) では凝集破壊 (図-8(a)), (b) では界面破壊 (図-8(b)) が発生し、接触圧 350 N/mm² 付近を境に破壊モードが変化する傾向が見られた。これは接触圧が高くなることで無機ジンク層の多軸応力度が増加すること (特に鋼材粗面との接触面近傍)、無機ジンク-鋼材粗面間の摩擦係数が低下することによって、片側の無機ジンクがそぎ取られながら、界面破壊となったと考えられる。

図-6 に示すように累乗近似を用いて算定した無機ジンクの接触圧と摩擦係数の関係式を式(3)に示す。接触圧 45 N/mm² 以下の範囲では摩擦係数が増加する傾向が見られなかったため、0~45 N/mm² の範囲では 45 N/mm² のときの摩擦係数 0.912 で一定とした。同様に、接触圧 400 N/mm² 以上については、摩擦係数の変化がほとんどないことから、試験を実施していない 417 N/mm² 以上の範囲を 417 N/mm² のときの摩擦係数 0.315 で一定とした。45~417 N/mm² の範囲での近似曲線の決定係数 R² は 0.927 であった。

$$\begin{aligned} \sigma \leq 45 & \quad \mu = 0.912 \\ 45 < \sigma < 417 & \quad \mu = 5.604 \times \sigma^{-0.477} \\ 417 \leq \sigma & \quad \mu = 0.315 \end{aligned} \quad (3)$$

一方、ブラストの場合、試験ごとの摩擦係数の違いは見られるが、同一試験内では接触圧によらず摩擦係数はほぼ一定である。

3.2 FE 解析

解析結果および文献 1) の実験結果を表-4 に、従来用いられていたクーロン摩擦と、本研究で提案した式を用いた場合の荷重-相対変位関係を図-9、すべり耐力比較したものを図-10 に示す。実験結果のすべり耐力は 3 体の平均値である。また、図-9 は、代表して F10T の荷重と相対変位の関係である。

図-9 に示すように、荷重が一定となる前の最大荷重をすべり荷重とした。また、よりクーロン摩擦を適用した場合と接触圧依存の摩擦係数を適用した場合で、荷重-相対変位の傾きは等しいことが分かる。この結果から、継手としての耐力は、面圧の影響を受けることがわかり、特に、すべり時に面圧が変化するとき大きく影響を受けることがわかる。この結果を用いてすべり耐力を算出したものが、図-10、表-4 となる。

図-10、表-4 の結果より、いずれのボルト等級においても、解析値は実験値より低い、誤差が 6%~12%に収まっていることから、実験値のボルト等級に対する変化に解析値が対応できていると言える。

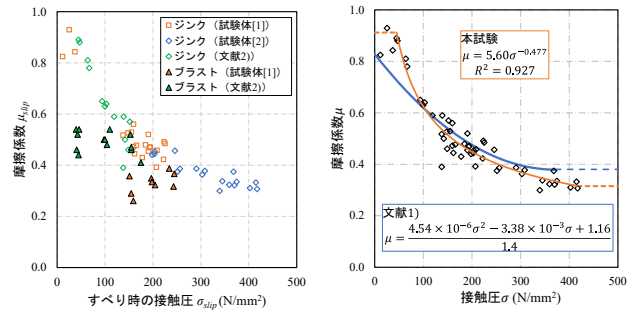
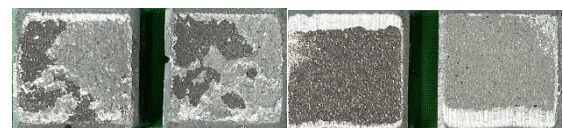
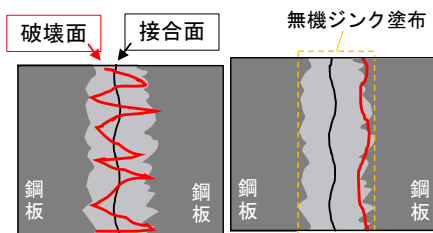


図-5 $\sigma_{slip}-\mu_{slip}$ 関係 図-6 接触圧と摩擦係数の関係式



a) 接触圧 200 N/mm² b) 接触圧 450 N/mm²

図-7 試験後の試験体



(a)凝集破壊 (b)界面破壊

図-8 破壊モードの種類

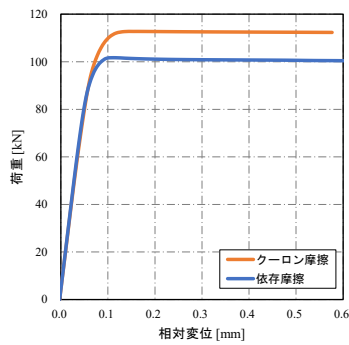


図-9 荷重-相対変位関係

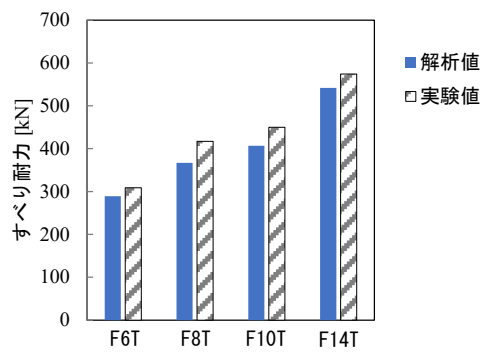


図-10 すべり耐力比較

表-4 すべり耐力比較

	解析値 [kN]	実験値 [kN]	誤差
F6T	289	309	6%
F8T	367	417	12%
F10T	407	450	10%
F14T	542	574	6%

本研究では、すべり損傷を受けた高力ボルト摩擦接合継手の残存耐力を解析的に明らかにするために、まず、解析時に用いる摩擦係数の面圧依存性を明らかにするために小型すべり試験を実施して、定式化を行い、FE解析にてすべり挙動に及ぼす影響を明らかにした。その結果、従来提案されていた計算式よりも精度良くすべり耐力を再現できることを明らかにした。当初の最終目的である損傷を有する接合面の摩擦係数は、面圧依存およびボルト締結期間を調査するための試験に時間を多く要してしまい、一部のケースでしか実施できておらず、継手としての残存耐力までは得ることができなかった。しかしながら、すべり損傷後の摩擦係数は、同試験体で複数回すべり試験を実施して、傾向を掴んでいることから、今後は、異なる実験結果との比較を通して、本研究で提案した摩擦係数の計算式の妥当性をさらに検討するとともに、損傷後の継手の解析も実施する予定である。

参考文献

- 1) 東清三郎, 熊井隆: 添板摩擦面にアルミ溶射を施した高力ボルト摩擦接合部の平均接触圧と摩擦係数に関する研究, 鋼構造論文集, vol23, No.90, pp.117-131, 2016.
- 2) 森山仁志, 高井俊和, 山口隆司: 小型鋼板すべり試験による高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動に対する接触圧の影響の検討, 土木学会全国大会第75回年次学術講演会, Vol175, I-79, 2020.

(発表論文)

高木夢菜, 佐倉亮, 堀井いずみ, 山口隆司, 林巖: 高力ボルト摩擦接合継手無機ジンク接合面における接触圧と摩擦係数の関係式の提案に関する実験的検討, 令和5年度土木学会年次学術講演会, 2023.

R., Sakura, Y., Takagi, G., Hayashi, T., Yamaguchi: Influence of Contact Surface Pressure on Friction Coefficient of Faying Surface and Slip Resistance of Friction Type Bolted Joints, 12th International Symposium on Steel Structures.