

経年による軸力低下とばらつきが高力ボルト 摩擦接合の終局耐力に及ぼす影響

石原靖弘¹・小林剛²・狩野正人³・亀井正博⁴・谷平勉⁵

¹正会員 博(工) 片山ストラテック(株) 橋梁設計部 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島6-2-21)

²正会員 工修 片山ストラテック(株) 橋梁設計部 (同上)

³正会員 工修 JIPテクノサイエンス(株) 技術研究所 (〒600-8815 京都市下京区中堂寺粟田町93)

⁴正会員 工修 大阪市 ゆとりとみどり振興局 (〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-14-16)

⁵正会員 工博 近畿大学教授 理工学部 土木工学科 (〒577-1808 東大阪市小若江3-4-1)

著者らは鋼橋の代表的な接合構造である高力ボルト摩擦接合継手の耐久性に着目し、供用後、長年月経過した実橋を中心に残存ボルト軸力やすべり係数の調査を行ってきた。その結果、残存ボルト軸力が予想以上に低く、かつ軸力のばらつきも大きい継手が存在することがわかってきた。これらの低残存軸力やばらつきは高力ボルト摩擦接合の耐荷性に大きな影響を及ぼすものと考えられる。そこで、残存ボルト軸力が低く、かつ軸力にばらつきを有する高力ボルト摩擦接合継手の終局耐力を把握するため、桁載荷実験ならびに解析的な検討を行った。その結果、ボルト軸力の低下やばらつきが継手のすべり耐力に及ぼす影響を明らかにするとともに、高力ボルト摩擦接合継手のすべり以降の終局耐力についても言及した。

Key Words : *high-strength friction grip bolted joint, durability, reduction and dispersion of bolt tension, Slip strength, load carrying capacity after slip, FEM analysis*

1. はじめに

我が国では 1970 年代を中心に数多くの橋梁が建設され、それらが社会資本ストックとして有効に使われている。しかし、あと 20 年程度でこれらの橋梁が建設後 50 年近く経過することになり、維持管理の問題が顕著になりつつある¹⁾。建設投資が十分な時代であれば問題も少ないが、投資が縮小する中でいかに効率よく維持管理するかが問われている。そのため最近では BMS(ブリッジマネージメントシステム)や LCC(ライフサイクルコスト)といったテーマが話題となっている。これらは維持管理を効率的に行うためのシステムと考えられ、これらのシステムをより実用的に発展させていくために、要素技術の重要性が指摘されている²⁾。要素技術とは構造要素毎の点検、診断、補修方法等に関する技術である。

鋼橋においては、一般に鋼材そのものの素材劣化が無いものとみなせるので、部材レベルの損傷劣化が問題となる³⁾。すなわち、腐食、疲労亀裂、高力ボルト

のゆるみ、支承部の損傷、地震等異常外力による損傷等が考えられる。

著者らは、鋼橋の構造要素の一つである高力ボルト摩擦接合継手に着目し、主として実橋を中心にボルト軸力やすべり係数の経年劣化特性を調査⁴⁾⁵⁾してきた。また、調査結果からデータベース化を図るとともにその分析を行ってきた⁶⁾⁷⁾。一例として、図-1 に著者らが測定した実橋 40 継手における、ボルト軸力低下率とボルト軸力のばらつき(変動係数)の相関関係を示す。ここに、ボルト軸力低下率とは測定ボルト軸力(測定ボルト群の平均値)を設計ボルト軸力で除したものである。同図より、実橋継手の設計ボルト軸力は意外に低く、ばらつきも大きいことがわかる。

同様な問題は西村ら⁸⁾や西岡ら⁹⁾によっても指摘されている。文献 8)では、実構造物の調査結果からすべり係数は経年により若干上昇するものの、ボルト軸力は 20%程度低下するのではないかとしている。また、文献 9)では点検結果により多くの軸力不足ボルトが発見され、この原因は実橋の置かれた環境の厳し

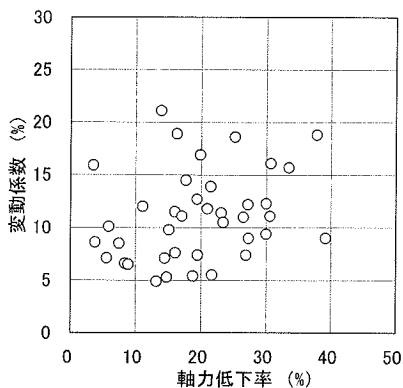


図-1 実橋における軸力低下率と変動係数

と、構造上ならびに施工管理上の問題ではないかとしている。

経年によりボルト軸力が低下すれば、すべり耐力は明らかに低下する。また一継手内においてボルト軸力のばらつきが大きい場合、低軸力ボルト部の部分すべりを起点として全体すべりに至る可能性も示唆される。一方、高力ボルト摩擦接合継手に過大な荷重が作用した場合、継手はすべり限界を超えて支圧状態となり、ボルトあるいは母材の破断等により終局限界に至ると考えられるが、上記のようなボルト軸力の低下やばらつきが継手の耐荷力にどのような影響を与えるかといった維持管理の観点から高力ボルト摩擦接合継手の耐荷性状を調査した研究例は少ない。

一方、高力ボルト摩擦接合の設計において、道路橋示方書¹⁰⁾(以下、道示という)では、母材が降伏する場合を除き、主すべりを終局限界状態としている。しかし、高力ボルト摩擦接合の構造特性からして、主すべりによって部材に局所的な変形は生じるものの崩壊に至るようなものではなく、相当な余剰耐力を有しているものと考えられる¹¹⁾。また、文献¹²⁾では、地震被害を受けた高力ボルト摩擦接合の特性調査を行うとともに、すべり荷重を上回る繰返し荷重を受けた継手の耐荷性状を実験的に検証している。

そこで、本研究では耐久性評価の観点から、ボルト軸力が低下し、かつ軸力にばらつきを有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり限界およびすべり以降の挙動を明らかにすべく、実物大の桁載荷実験ならびにFEM解析による検討を行ったので以下に報告する。

2. 高力ボルト摩擦接合継手の純曲げ試験

(1) 試験桁の諸元

実験に用いた試験桁の形状寸法を図-2に示す。

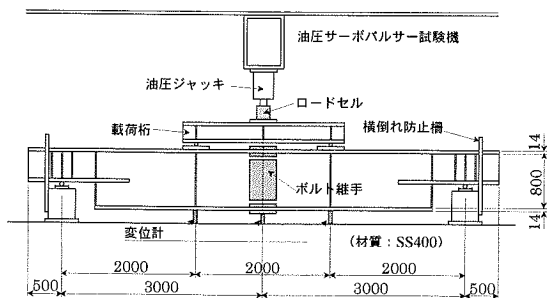


図-2 試験桁の諸元 (単位: mm)

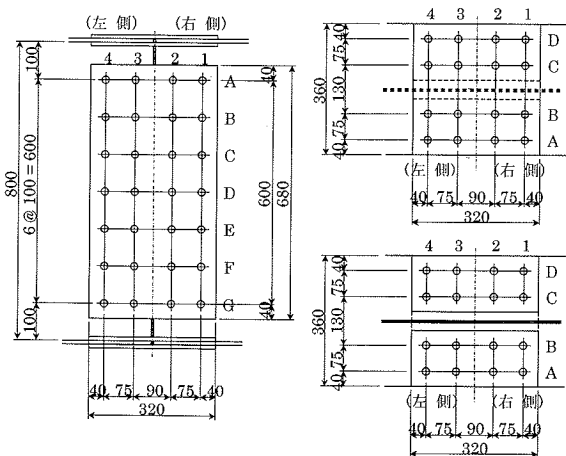


図-3 継手部詳細 (単位: mm)

試験桁の総桁高は828mm、載荷スパンは6mであり、試験桁中央部に摩擦接合継手を設け、載荷桁を介して2点集中荷重を載荷することにより、継手部を純曲げ状態とした。

試験桁の材質はSS400であり、フランジの寸法は360mm×14mm、ウェブは800mm×9mmである。また、継手部の詳細を図-3に示す。添接板の板厚はフランジ、ウェブとも9mmであり、使用ボルトは高力六角ボルト(等級F10T、サイズM22)で、ボルトの首下長さはフランジ部75mm、ウェブ部70mmである。

摩擦面はショットブラスト後に赤錆を発生させ、組立時に浮き錆を除去した。桁の組立に際しては、継手部のすき間を道示の規定に準拠して5mm以下としたが、面タッチ状態とならないように配慮した。

なお、今回の試験桁は長期暴露試験用⁹⁾に製作されたものを試験終了後に転用したもので、一般的な桁の高力ボルト摩擦接合継手部を代表したものではないが、軸力低下とばらつきの影響を把握するためのモデル実験であると考えている。

(2) 試験桁の分類

ボルト軸力低下とばらつき(変動係数)をパラメータ

表-1 初期導入ボルト軸力の一覧

試験桁		1		2		3		4	
		左側	右側	左側	右側	左側	右側	左側	右側
上フランジ	最大値 (kN)	130.9	136.3	92.1	91.6	149.0	155.9	101.0	106.2
	最小値 (kN)	123.0	125.1	87.4	86.5	109.9	104.3	76.2	72.4
	平均値 (kN)	126.5	129.1	88.8	88.6	128.4	128.8	88.4	89.3
	変動係数(%)	1.9	2.8	1.8	2.3	10.1	12.1	9.9	11.4
ウェブ	最大値 (kN)	130.6	130.0	91.0	90.8	146.9	148.5	106.5	99.7
	最小値 (kN)	124.0	124.1	85.7	86.2	102.2	104.2	72.2	73.4
	平均値 (kN)	127.4	127.1	88.2	88.7	125.9	125.2	85.6	87.2
	変動係数(%)	1.7	1.5	1.7	1.5	9.3	11.5	11.8	9.7
下フランジ	最大値 (kN)	133.7	130.0	95.3	94.0	148.8	145.4	101.4	102.5
	最小値 (kN)	123.3	124.9	84.4	82.6	108.3	109.5	73.2	75.2
	平均値 (kN)	129.4	127.3	88.5	89.0	127.3	124.0	88.0	88.8
	変動係数(%)	2.8	1.6	4.2	4.8	9.7	10.9	11.4	9.6

とした試験桁 4 体を準備した。各試験桁の初期導入ボルト軸力の最大値、最小値、平均値および変動係数の一覧を表-1 に示す。高力ボルト F10T-M22 の場合、設計軸力は 205kN であるが、経年変化によるボルト軸力低下を想定して、下記 2 ケースを導入軸力とした。

すなわち、導入軸力の設定にあたっては表-2 に示すように、摩擦接合のすべり強度と母材の降伏強度比パラメータ β ¹³⁾ にも留意し、引張側フランジの降伏と継手部のすべりがほぼ同時に発生するケース①(試験桁-1, 3~導入軸力 130kN)を決定し、さらに引張側フランジの降伏が生じる前にすべりが先行するケース②(試験桁-2, 4~導入軸力 90kN)を設定した。

ケース①: 導入軸力 130kN …設計軸力より 37%減

ケース②: 導入軸力 90kN …設計軸力より 56%減

また、ボルト軸力のばらつき(変動係数)をパラメータとした下記 2 ケースを設定した。すなわち、ばらつきの無いケース(試験桁-1, 2~変動係数 0%)と有るケース(試験桁-3, 4~変動係数 10%)である。なお、ばらつきの有るケースでは、変動係数が 10%となるようにフランジ、ウェブとも個々のボルト軸力の乱数計算を行いランダムに設定した。両ケースとも、設定ボルト軸力を目標にトルクレンチで慎重に締め付け作業を行ったが、結果的には表-1 に示すように数%の誤差が生じた。

(3) 荷重載荷および計測方法

実験は近畿大学理工学部構造実験棟の 200tf 油圧サーボパルサー試験機を用いて行った。荷重方法は漸増繰返し載荷とし、各試験桁とも 1 回目のすべり確認後も荷重を増加し、試験桁が塑性変形を起こす状態ま

表-2 すべり強度・降伏強度比パラメータ β

試験桁	すべり強度 (kN)	降伏強度 (kN)	β
1, 3	832.0	855.4	0.973
2, 4	576.0	855.4	0.673

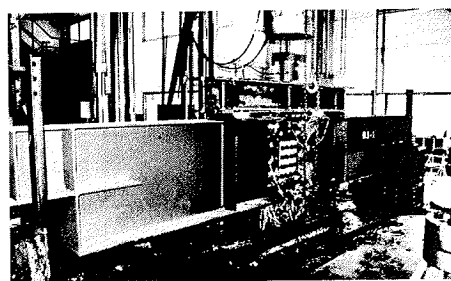


図-4 実験状況

で実験を行った。図-4 に実験状況を示す。

計測項目は載荷荷重、ボルト軸力、桁の鉛直変位、添接板の水平変位(相対ずれ)、試験桁および添接板のひずみである。載荷荷重は、油圧ジャッキと載荷桁の間に挿入したロードセルにより計測した。

高力ボルトの軸力は、ボルト頭部に貼り付けた 2 軸ひずみゲージにより測定した¹⁴⁾。あらかじめ引張試験装置でボルト軸力のキャリブレーションを行い、ひずみとボルト軸力の関係を求め、ボルトの初期導入軸力の管理および実験中の軸力測定に用いた。

また、桁の鉛直変位、添接板の水平変位は変位計により、フランジ、ウェブおよび添接板のひずみは表面に貼り付けた単軸ひずみゲージにより測定した。

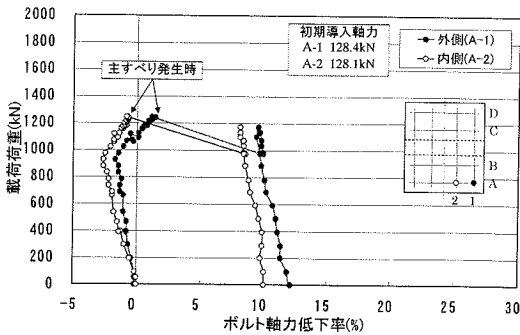


図-5 載荷荷重～ボルト軸力低下率(上フランジ)

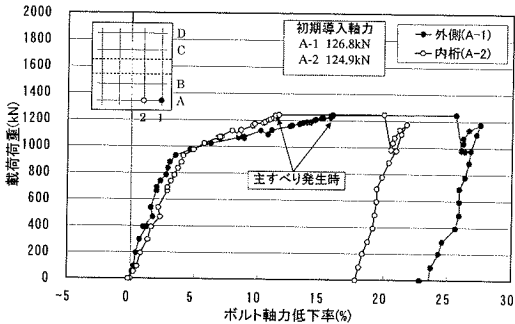


図-6 載荷荷重～ボルト軸力低下率(下フランジ)

表-3 各試験桁のボルト軸力低下率

試験桁		B ₁ (%)	B ₂ (%)
上フランジ	試験桁-1	1.4	8.3
	試験桁-2	1.9	8.4
	試験桁-3	0.7	11.1
	試験桁-4	4.9	9.9
下フランジ	試験桁-1	11.6	8.4
	試験桁-2	8.7	9.8
	試験桁-3	15.7	12.0
	試験桁-4	11.1	12.7

B₁——主すべり発生直前までのボルト軸力低下率

B₂——主すべり発生に伴うボルト軸力低下率

(4) 実験結果

a) ボルト軸力

実験結果の一例として、試験桁-1における上下フランジ部のボルト軸力の変動を図-5, 6に示す。上フランジ(圧縮側)に関しては主すべり発生時のみボルト軸力の急激な低下が見られるが、下フランジ(引張側)に関しては荷重載荷直後よりボルト軸力の低下が進行し主すべり発生直前時までに10～15%の軸力低下が確認できた。上下フランジとも主すべり発生に伴って約10%程度の急激な軸力低下が見受けられた。なお、他の試験桁においても、表-3に示すように同様の傾向

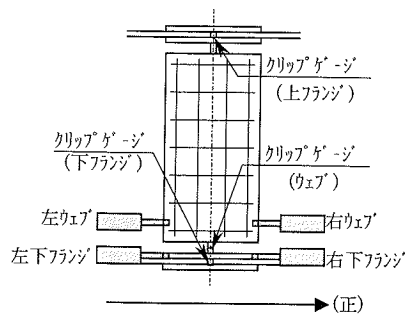


図-7 変位計の設置位置

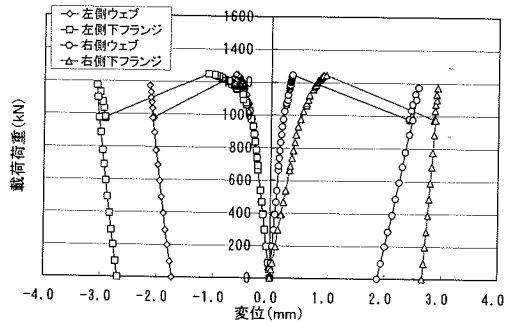


図-8 荷重～変位関係(変位計)

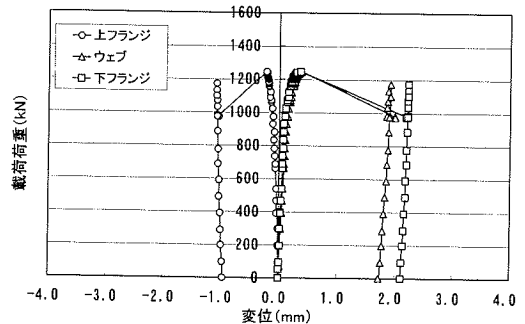


図-9 荷重～変位関係(クリップゲージ)

が確認できた。

b) 継手部の変形量

荷重増加に伴う継手部各部の変形状況を確認した。

図-7に測定位置と変位計の詳細を示す。

実験結果の一例として、図-8に試験桁-1における母材と添接板の相対変位量(変位計により測定)を示す。測定位置は左右のウェブ(下フランジ側)および下フランジである。なお、変位量の符号は右側を正、左側を負とした。同図より、荷重の増大とともに変形量も増大し、下フランジ側の主すべりとほぼ同時にウェブ側の主すべりが生じている。当然、ウェブに比べて下フランジの変形量は大きいのが、ほぼ左右対称である。

また、図-9にクリップゲージにより測定した継手

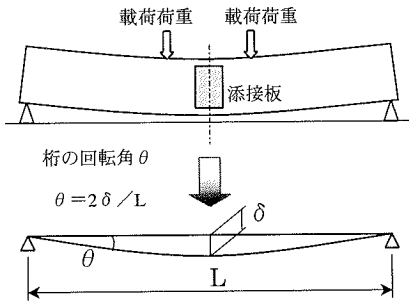


図-10 桁の回転角 θ

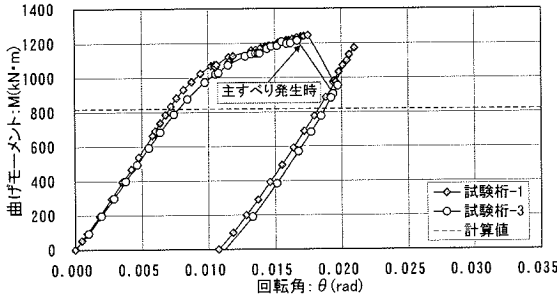


図-11 M~ θ 関係 (試験桁-1,3)

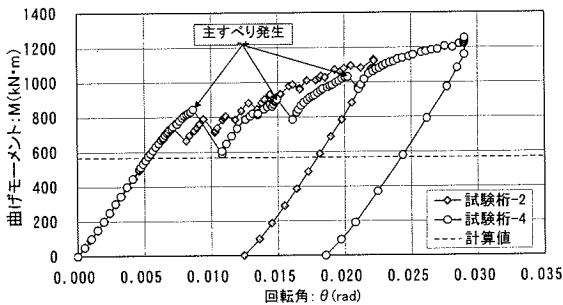


図-12 M~ θ 関係 (試験桁-2,4)

突き合わせ部における変位量を示す。なお、クリップゲージの変位量は引張を正、圧縮を負とした。同図より、上下フランジの変位量を比較すると、主すべりはほぼ同時に発生しているが、下フランジ(引張側)の変位量が上フランジ(圧縮側)より大きいことがわかる。

他の試験桁においても同様な傾向が得られた。すべり量に関しては、単純な引張試験であれば、最大でボルト軸部とボルト孔の余裕量 2.5mm まですべり、すべり以降はボルト軸部とボルト孔が支圧状態になる。しかし、桁載荷試験の場合、ボルトとボルト孔の相対位置関係や圧縮フランジどうしの衝突により変位量が制限される。

c) 桁の回転角 θ

継手部の主すべり発生に伴って、桁に回転角が生

表-4 各試験桁の直線近似勾配

	直線近似勾配	
	(載荷時)	(除荷時)
試験桁-1	114442	113911
試験桁-2	106226	113549
試験桁-3	105658	112298
試験桁-4	106263	111433

表-5 すべり発生時のモーメントの比較

	計算値	実験値	比
試験桁-1	818.9	1245.3	1.521
試験桁-2	566.9	737.6	1.301
試験桁-3	818.9	1214.5	1.483
試験桁-4	566.9	844.8	1.490

(モーメントの単位: kN·m)

じ、部材としての連続性が損なわれる。限界状態を論ずる場合、その程度が問題となるため、荷重増加に伴う桁の回転角 θ (図-10参照)に着目し、回転角と曲げモーメントの関係(M~ θ 関係)を検討した。ここに、回転角 θ は試験桁中央で測定した鉛直変位を載荷スパンの1/2で除して求めた。また曲げモーメントは載荷荷重とスパンの関係から計算したものである。

図-11に試験桁-1, 3(導入軸力130kN)、図-12に試験桁-2, 4(導入軸力90kN)のM~ θ 関係を示す。図中には、すべり発生モーメントの計算値も点線で記入しておいた。ここで、すべり発生モーメントの算出は、任意の荷重値における試験桁の断面計算結果よりフランジのボルト1本あたりの伝達力を算出し、各試験桁のすべり荷重値(道示による)を比例計算して求めた。

図-11において、荷重増加に伴い回転角は線形的に増加するが、載荷荷重が1100kN・m付近から主すべり発生前までに非線形性が顕著となっている。これは、最初に実験を行った試験桁-1および試験桁-3において支点近傍のウェブパネルがせん断座屈し始めた影響であり、継手部のすべりとは無関係のものである。そのため、1回目のすべりで載荷を止めた。

なお、試験桁-2および試験桁-4についてはウェブに垂直補剛材を追加して補強したため、図-12に示す通り、せん断座屈の影響は出ていない。

なお、両図ともボルト軸力のばらつきを変えた試験桁-1,3 および試験桁-2,4 において M~ θ 関係に大きな相違点は無く、ばらつき(変動係数 10%程度)による影響は少ないと考えられる。また図-12 より主すべり発

生に伴い曲げモーメントは一時的に低下するが、耐荷性能は持続することがわかる。ただし、主すべり以降、荷重除荷後には残留回転角が生じる。表-4 に荷重時および除荷時それぞれの線形区間における近似直線の勾配を示す。同表より荷重勾配と除荷勾配はほぼ同じといえる。

d) 軸力低下とばらつきの影響評価

表-5にすべり発生モーメントの計算値と実験値を比較し示す。全試験桁において、実験値は計算値を上回っており、軸力低下による極端なすべり耐力の低下は認められない。ボルト軸力90kNの試験桁-2において実験値が比較的小さいが、すべり強度は大きくばらつき傾向があるため¹³⁾、今回の実験結果からのみでは軸力低下の影響とは断定できない。

また、ばらつきの影響について、ボルト軸力130kNの試験桁-1(変動係数0%)と試験桁-3(変動係数10%)の比較では、ばらつきの少ない試験桁-1のすべりモーメントが若干大きい。しかし、ボルト軸力90kNの試験桁-2(変動係数0%)と試験桁-4(変動係数10%)では、試験桁-2の方がすべりモーメントが小さくなっており今回の結果からでは、ボルト軸力のばらつきによる影響は見いだせない。

なお、計算値に比べて実験値が大きいのは、設計すべり係数(0.4)に比べて実すべり係数が大きいこと、ならびにフランジとウェブの協同作用によるすべり抵抗強度の上昇¹⁵⁾が考えられる。

e) 桁の残留回転角 θ_r

曲げモーメントと桁の回転角の関係より、主すべり以降も継手部は耐荷性能を保有し、かつ荷重勾配と除荷勾配がほぼ同じであることがわかったため、図-13に示すように、すべりによる継手変形を表す残留回転角 θ_r に着目した検討を行った。

図-14 に試験桁-1, 3(導入軸力 130kN)、図-15 に試験桁-2, 4(導入軸力 90kN)の $M \sim \theta_r$ 関係を示す。図-14において、主すべり発生以降、荷重を増加しても θ_r が増加しないように見受けられるが、これは支点部近傍でウェブのせん断座屈が影響したためである。一方、図-15においては1回目のすべり以降も荷重増加に伴い、残留回転角がほぼ線形的に増加する傾向が見受けられる。

上記の結果より、試験桁の支点部のせん断座屈の影響を除外して概念化した $M \sim \theta_r$ 関係を図-16に示す。高力ボルト摩擦接合継手においてすべり以降の耐荷性能を有効に評価するためには、図-16のように定式化し、許容残留回転角(θ_m)を決めることにより終局耐力を定義するといったことも考えられる。

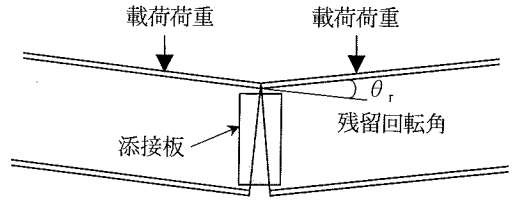


図-13 桁の残留回転角 θ_r

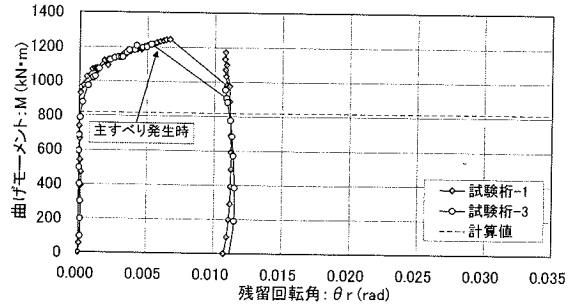


図-14 $M \sim \theta_r$ 関係 (試験桁-1,3)

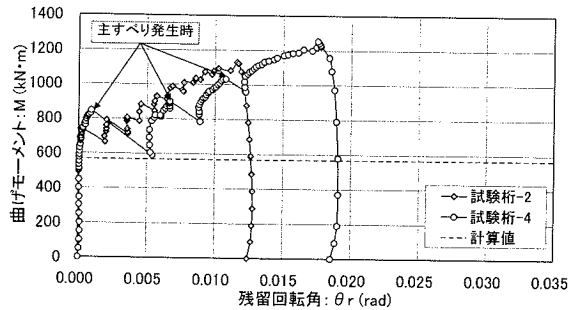


図-15 $M \sim \theta_r$ 関係 (試験桁-2,4)

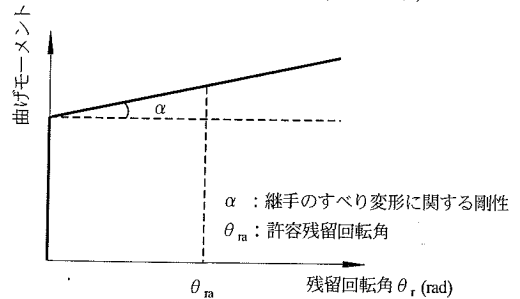


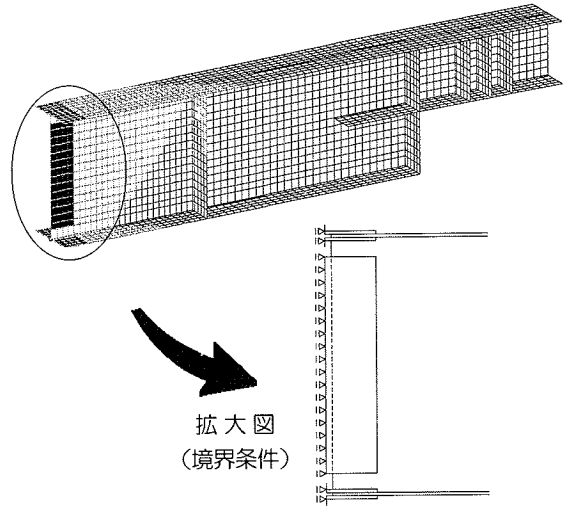
図-16 $M \sim \theta_r$ 関係の定式化

高力ボルト摩擦接合継手の場合、すべりが生じた継手を完全修復するには、支保工を用いて残留変形を元の状態に戻し、ボルトを取り替えて締め直す必要がある。この場合、大規模な補修工事になるとともに、立地条件によっては支保工の設置が困難なケースも想定される。

従って、一時的な荷重により継手にすべりが生じて

も残留回転角が許容値以内であり、全体構造系の耐荷力に問題がなければ、補修は不要とする考え方もある。直接当てはまる訳ではないが、このような考え方はレベル2地震動のような大地震により被害を受けた橋脚の性能照査に用いられている。道示・耐震設計編¹⁶⁾では、許容残留変位を1/100としている。

ただし、今回の結果は限られた試験体から得られた結論であり、高力ボルト摩擦接合継手に関しては、特にすべり強度・降伏強度比パラメータ β が終局強度に影響を与えると考えられるため β に着目した検討が必要であり、もちろん残留回転角が構造全体系の安全性に及ぼす影響も検討する必要があると考えられる。



拡大図
(境界条件)

3. FEM 解析による検討

(1) 解析諸元

実験においてはボルト軸力のばらつきの影響を評価するため、0%と10%のケースを比較した。しかし実橋測定結果ではさらにボルト軸力のばらつきが大きいケースも多い(図-1 参照)。実験結果からは、ボルト軸力に変動係数10%程度のばらつきがあっても継手のすべり性状にそれほど大きな差異は出なかったが、さらに大きなばらつきがあった場合はすべり耐力が低下するのではないかといった懸念もある。そこで、高力ボルト摩擦接合継手におけるボルト軸力のばらつきがさらに大きくなった場合の力学的挙動を把握するためFEM解析を実施した。

図-17に解析モデルを示す。ここでは対称性を考慮して、桁全体の1/2を解析対象とした。母材、添接板、および補剛材は平面の4節点アイソパラメトリックシェル要素でモデル化し、板の座屈や材料の降伏は考慮していない。境界条件は、解析モデル上の端部に相当する添接板の中央断面に対称条件を与え、母材側は対称面に突っ込まない条件下でフリーとした。高力ボルトは、母材-添接板間のせん断力を伝達し、かつ、すべり挙動が表現できる非線形のばね要素でモデル化した。したがって、ボルト孔はモデル化していない。

図-18に模式図を示す。

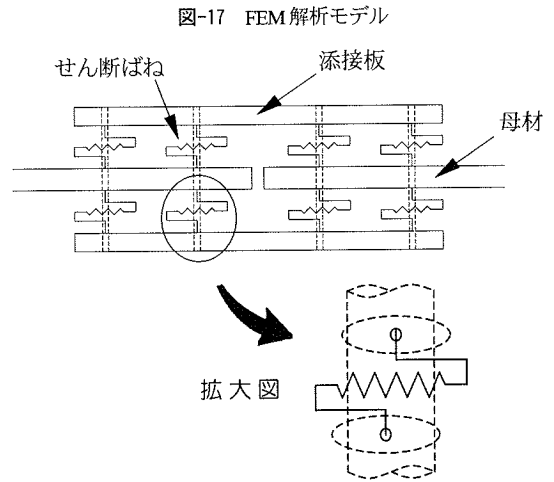


図-18 非線形ばね要素によるボルトのモデル化

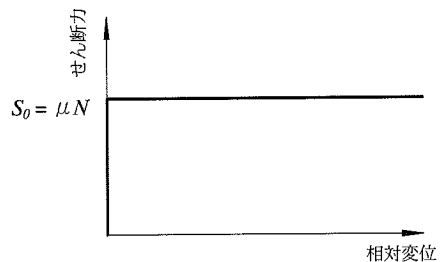


図-19 せん断ばねの非線形化

せん断ばねの非線形性は図-19に示すように¹⁷⁾、ボルト軸力 N ×すべり係数 μ に相当するすべり限界せん断力 S_0 までは、ばね定数 $k = \infty$ とし、すべり限界せん断力 S_0 に達すると、すべりが発生し、ばね定数 $k = 0$ とする。板のせん断変形、鋼板のポアソン比に起因するボルト軸力の変動、およびすべり限界せん断力の変動は考慮していない。すべり係数は文献11)を参考に0.59とした。またボルト径およびボルトの孔

径を考慮して支圧状態の判定を行い、支圧状態に達すると同時に解析終了とした。なお解析にはMSC/NASTRANを用いた。解析に用いたパラメータは変動係数であり、変動係数を0%(ボルト軸力のばらつきなし)、10%、20%、30%に変化させて解析を行った。

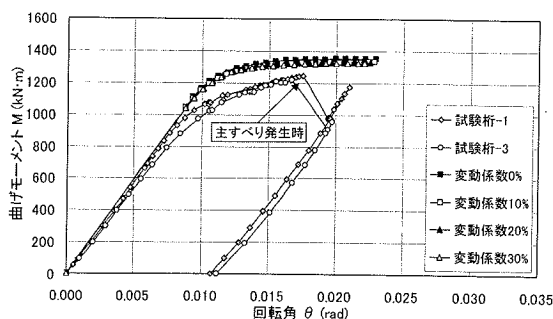


図-20 実験および解析結果（導入軸力 130kN）

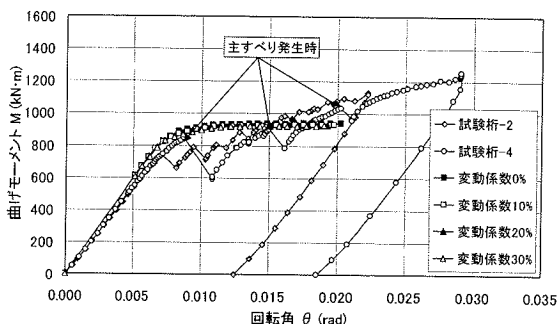


図-21 実験および解析結果（導入軸力 90kN）

表-6 解析結果一覧表（支圧状態）

変動係数		0%	10%	20%	30%
ボルト軸力 130kN	M	1351.4	1330.7	1328.7	1325.7
	θ	0.0229	0.0228	0.0225	0.0221
ボルト軸力 90kN	M	941.1	930.0	928.2	924.3
	θ	0.0203	0.0198	0.0193	0.0190

【単位：M (kN·m), θ (rad)】

(2) 解析結果

導入軸力 130kN および 90kN における解析結果と実験結果を、それぞれ図-20, 21 に示す。また、表-6 に支圧状態となった時の曲げモーメントと回転角の値を示す。両図および同表より、ボルト軸力のばらつきの影響について、何れの解析結果においても変動係数を増加させるにしたがって初期のすべりが発生する荷重の低下は見られるものの、すべり耐力の低下は非常に小さいことが分かる。

すべり耐力の評価について、導入軸力 130kN の実験では、支点部付近でウェブのせん断座屈が発生したため、荷重-変位曲線が比較的早い段階から非線形性を示しているが、この点を割り引けば、すべり耐力の評価という点では、解析結果は比較的簡単なモデル化にも関わらず、まずまずの精度を有していると言える。

せん断ばねの非線形特性について、導入軸力 90kN の実験では、部分的なすべりが生じることによって荷

重が大きく減少し、部分的な支圧状態に至った後、さらに荷重が増加している。このような複雑なすべり挙動を解析的に捉えるためには、図-18 に示した非線形特性モデルを、すべり発生によってせん断力が低下し、かつ支圧状態を表現できるようなモデルに改良する必要があると思われる。

4. おわりに

本研究では耐久性評価の観点から、ボルト軸力が低下し、かつ軸力にばらつきを有する高力ボルト摩擦接合継手の耐荷性能を調査するため、実験的・解析的に検討を行った。また、主すべり以降の終局限界状態にも言及した。得られた結論を要約すると下記の通りである。

- 荷重の増加に伴い引張フランジ側のボルト軸力は徐々に低下し（10%～15%程度）、主すべり発生と同時にさらに 10%程度の軸力低下が生じた。一方、圧縮フランジ側のボルト軸力は荷重増加に伴う軸力低下は見られず、主すべり発生時のみ 10%程度の急激なボルト軸力低下が見られた。
- 添接部の変位を計測したところ、上下フランジおよびウェブの主すべりはほぼ同時に発生した。また、上フランジ(圧縮側)に比べて下フランジ側(引張側)の変位量が大きい(約2倍)。
- 主すべり発生に伴って桁に回転角が生じ、部材の連続性が失われる。従って、荷重増加に伴う桁の回転角と曲げモーメントの関係(M～ θ 関係)に着目した検討を行った結果、継手部は主すべり以降も耐荷性能を保有しており、載荷勾配と除荷勾配はほぼ等しいことがわかった。
- すべり発生時の曲げモーメントを比較したところ、全ての試験桁で実験値は計算値を大きく上回った。また、ボルト軸力低下による極端なすべり耐力の低下、ならびにボルト軸力のばらつき(変動係数 10%)がすべり耐力に及ぼす影響は見いだせなかった。
- 主すべり以降の耐荷性能を評価するため、桁の残留回転角と曲げモーメントの関係(M～ θ_r 関係)を検討した。その結果、M～ θ_r 関係を定式化し、終局耐力として許容残留回転角を定義する考え方を提案した。すなわち、継手にすべりが生じた場合、現場計測結果から残留回転角を求め、当面の耐荷安全性を判定する管理値(例えば 1/100)を採用することを示唆した。ただし、そのためにはもう少し広範な研究が必要である。

⑥ ボルト軸力のばらつきの影響をさらに検討するため、ボルト部を非線形バネ要素でモデル化した立体 FEM 解析を行った。この時、変動係数を 0%~30%まで 10%ずつ変化させて耐荷性状の相違を検討したが、ボルト軸力のばらつきがすべり耐力の低下に与える影響は小さいという結果となった。

高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力は、すべり係数とボルト軸力の総和の積で表されることが明らかとなっているが、主すべりが生じるまでは継手外縁ボルトの分担荷重が大きくなることが知られている¹⁸⁾。ボルト軸力のばらつきにより、継手外縁部に低軸力ボルトが配置されると、継手全体のすべり耐力が低下することも考えられたため、本研究ではボルト軸力のばらつきに着目した検討も行ったが、結果的にはすべり耐力に大きな差は出なかった。ただし、今回検討した継手は2列配置であるため、多列配置されたボルト継手等に関しては今後の課題となる。

今回の結論は、限られた範囲の実験および解析から得られたものであるが、更なる広範囲な検討、特にすべり強度・降伏強度比パラメータに着目した検討を行う必要がある。

また、本研究では継手の主すべりおよびすべり以降の挙動に着目しており、ボルトや母材の破断といった終局限界状態までは言及できていない。将来的に導入されるであろう限界状態設計法や性能設計法を勘案し、主すべり以降の終局限界状態を明らかにしていくことも必要と考える。

謝辞：本研究は関西道路研究会道路橋調査研究委員会耐久性小委員会(委員長：谷平 勉)で行った研究を著者らが代表してとりまとめたものである。委員会の中で貴重なご意見をいただいた委員各位、ならびに実験の際にご協力いただいた学生諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集 No.501/ I -29, pp.1-10, 1994.10.
- 2) (社)日本鋼構造協会：既設鋼橋部材の耐力・耐久性診断と補修・補強に関する資料集（鋼橋の維持管理とそれを支える要素技術，JSSC テクニカルレポート No.51,2002.
- 3) 市川篤司：鋼構造物の耐久性能と維持管理，土木学会誌，Vol.86, pp.38-40, 2001.12.
- 4) 谷平勉，亀井正博，石原靖弘，田井戸米好：17年間供用された高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に関する実験，土木学会構造工学論文集，Vol.36A, pp.1087-1096, 1990.3.
- 5) 谷平勉，狩野正人，石原靖弘，小林剛：高力ボルト摩擦接合の耐久性評価に関する一考察，鋼構造年次論文報告集，Vol.10, pp.247-254, 2002.11.
- 6) Kobayashi, G., Ishihara, Y., Kamei, M., Kano, M. and Tanihira, T.: A Research to Evaluate the durability of Existing Bridge's Bolted Joint, Proc. of the 7th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, pp.525-530, 1999.8.
- 7) 小林剛，石原靖弘，狩野正人，宮本文穂，中村秀明，山下雅和：ニューラルネットワークを用いた高力ボルト軸力推定システム，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，I -B162, 2002.9.
- 8) Nishimura, A., Tajima, J., Yamasaki, T., Kikukawa, S.: Aging of High Strength Bolted Joints in Long Service, Proc. of IABSE Symposium on Maintenance, Repair and Rehabilitation of Bridge, pp.149-154, 1982.
- 9) 西岡敬治，乙黒幸年，八幡健，長沼敏彦，吉川紀：施工後 10 数年経過した橋梁の高力ボルト継手の維持管理に関する諸問題，土木学会構造工学論文集，Vol.43A, pp. 961-966, 1997.3.
- 10) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2002.3.
- 11) 西村宣男，秋山寿行，亀井義典：高力ボルト摩擦接合継手に関する最近の研究動向，土木学会論文集，No.675 / I -55, pp.1-14, 2001.4.
- 12) 石原靖弘，小林剛，皆田理，西村宣男：地震被害を受けた高力ボルト摩擦接合継手の特性調査と繰り返すべり試験，土木学会論文集，No.745 / I -65, pp.53-64, 2003.10.
- 13) 秋山寿行，西村宣男，亀井義典，池端文哉：高力ボルト摩擦接合引張継手の限界状態の区分，鋼構造年次論文報告集，Vol.3, pp. 289-296, 1995.11.
- 14) 例えば 谷平勉，石原靖弘，小林剛，西岡敬治：30年近く供用された鋼橋の高力ボルト摩擦接合の耐久性，鋼構造年次論文報告集，Vol.10, pp.239-246, 2002.11.
- 15) 秋山寿行，西村宣男：曲げを受ける鋼 I 桁高力ボルト継手のすべり機構と限界強度の評価，鋼構造年次論文報告集，Vol.4, pp. 287-294, 1996.11.
- 16) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2002.3.
- 17) 長嶋文雄，伊藤文人：剛体一ばねモデルを用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動解析，土木学会論文集，No.350, pp.341-350, 1984.10.
- 18) 亀井義典，松野正見，西村宣男：多列高力ボルト摩擦

THE INFLUENCE OF REDUCTION AND VARIATION OF BOLT TENSIONS BY AGING
ON LIMIT STATES OF HSFG BOLTED JOINT

Yasuhiro ISHIHARA, Go KOBAYASHI, Masato KANO,
Masahiro KAMEI and Tsutomu TANIHIRA

The authors had been taken notice of durability of high-strength friction grip (HSFG) bolted joints in steel bridges and investigated bolt tensions and slip coefficient in existing bridges. As results, existing bolt tensions were decreased more than they expected and had more variation.

Then in order to make clear the limit states, the experiment using testing girders and FEM analysis of HSFG bolted joints considered the reduction and the variation of bolt tension were carried out. As results, the influence of reduction and variation of bolt tension on slip strength are clarified, and the ultimate limit state after slip of HSFG bolted joints is supposed.