

腐食劣化した高力ボルト摩擦接合継手の耐荷力性能評価

Evaluation for Ultimate Strength of Corroded Friction Joints with High Strength Bolts

木更津工業高等専門学校環境都市工学科 助教 田井 政行

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. はじめに

近年，我が国の鋼橋において，重度の腐食劣化が原因で大規模な補修・補強が多く報告されている^{1), 2)}．今後も腐食劣化は進行し，老朽化した鋼橋が著しく増加することが予測されており，腐食レベルに応じた適切かつ実用的な耐荷力性能評価の確立が急務となっている．

鋼橋の腐食部位の中でも，高力ボルト継手部は図1に示すように著しい腐食減肉が生じている場合が多い．腐食により減肉した高力ボルトは，その軸力の低下が低下³⁾し，高力ボルト摩擦接合継手の耐荷力性能を低下させる危険性がある⁴⁾．したがって，鋼橋の安全性確保するためには腐食劣化した高力ボルト継手に対する耐荷力性能・耐久性能評価の確立が必要であり，腐食レベルに応じた高力ボルトの残存軸力評価手法の構築が求められている．

そこで本研究では，腐食劣化した高力ボルト摩擦接合継手の残存耐荷力性能の評価を目的としている．研究実施に際しては，実橋で実際に腐食劣化した高力ボルト摩擦接合継手を用い，摩擦接合継手の腐食特性を明らかにした上で，高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に及ぼす腐食減肉の影響及びすべり係数の変化について解析的・実験的に検討を行った．



図1 摩擦接合継手の減肉例

2. 摩擦接合継手の腐食特性の調査

実橋において腐食した摩擦接合継手より試験体の作成を行った．なお，試験体の作成に用いた摩擦接合継手は，桁端部において極めて激しい腐食損傷により架設から28年間で崩落に至った無塗装仕様の耐候性鋼橋²⁾(JIS-SMA)より採取した．作成した試験体を図2に示す．



図2 試験体

作成した試験体に対して以下の調査・計測を行った．

(1)摩擦接合継手の減肉状況調査

摩擦接合継手試験体を解体し，高力ボルト，添接板及び母材の腐食減肉状況の調査を行った

(2)表面粗さの計測

表面粗さ測定は，触針式表面粗さ測定器を用いて計測を行った．測定したパラメーターはすべり係数と相関関係が高いとされている算術平均粗さRaとした．

3. FE解析による摩擦接合継手のすべり耐荷力に及ぼす腐食減肉の影響

摩擦接合継手において腐食減肉が生じる座金や添接板等の腐食減肉が摩擦接合継手の耐荷力に及ぼす影響をFE解析により検討を行った．解析モデルを図3に示す．対象はM22の高力ボ

ルトと座金，添接板及び母材とし，全てソリッド要素を用い，対称性を考慮して1/2モデルとした．各部材間の間には接触を定義し，母材と添接板間の摩擦係数は0.4とした．材料定数として，弾性係数は210GPa，ポアソン比は0.3とした．降伏応力は，高力ボルト，ナット及び座金は900MPa，添接板及び母材は325MPaとし，構成則は完全弾塑性体とした．なお，解析にはMSC.Nastran2012を用いた．

境界条件は，対称面を固定するとともに，添接板端部も軸方向に固定した．解析は高力ボルトに軸力を導入した（ステップ1）後に，母材の端面に引張力を与えた（ステップ2）．なお，減肉については，図4に示すように要素を削除することで再現を行った．

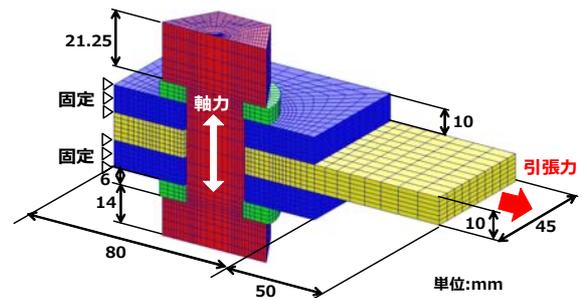


図3 解析モデルと境界条件

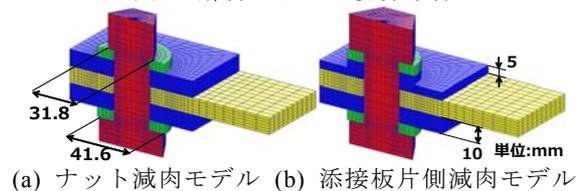


図4 減肉モデルの一例

4. 腐食減肉が生じた摩擦接合継手のすべり係数

摩擦接合継手試験体のすべり試験を行い，腐食減肉がすべり係数に及ぼす影響の検討を行った．すべり試験の試験状況を図5に示す．

すべり試験の試験フローを図6に示す．図に示すように，腐食高力ボルト1本を対象としたすべり試験を行った後に，新材の高力ボルトを所定の軸力で締め付け他後にすべり試験を行い，すべり係数の算出を行った．



図5 すべり試験状況

また，申請者らは既往の研究において，腐食した高力ボルトの形状から残存軸力を推定する手法を提案している．提案手法では腐食劣化した高力ボルトの頭部においては座金から8mmまで，ナット部においては12mmまで

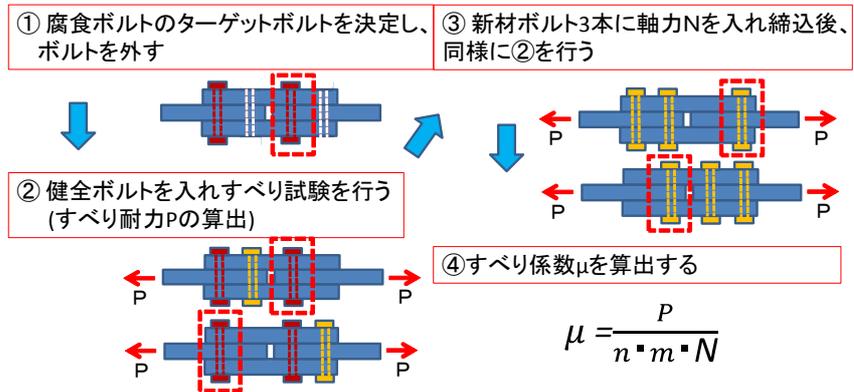


図6 すべり試験フロー

の範囲における腐食減肉量を計測することで，腐食減肉ボルトの残存軸力を±10%程度で評価出来ることを示している⁵⁾．本研究では推定した軸力及び実験より得られたすべり耐力を用いてすべり係数を算出し，実験より得られたすべり係数と比較も併せて行った．

（実験調査によって得られた新しい知見）

2. 摩擦接合継手の腐食特性の調査

(1)摩擦接合継手の減肉状況調査

図7に摩擦接合継手の腐食減肉状況を示す．高力ボルトのボルト軸部においては，発錆がほ

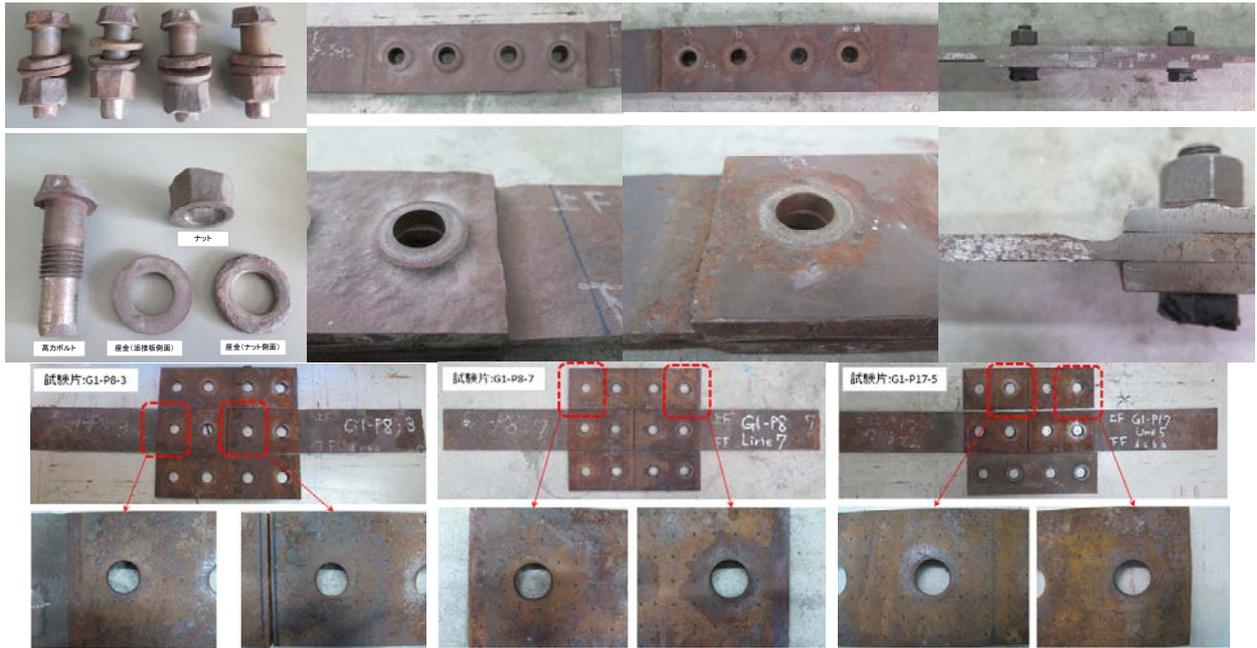


図7 摩擦接合継手の腐食減肉状況

とんど見られず、健全な状態であるといえる。一方、ナット部やボルト頭部、座金において著しい減肉が見られた。ただし、座金や添接板との接触面については、減肉はほとんど見られなかった。

添接板については、桁外面側と比較して桁内面側の腐食が進行しており、激しい腐食減肉により表面に凹凸が生じていた。添接板外面は座金が接触していた箇所については腐食減肉が生じていなかったが、座金周辺では約10mm幅のドーナツ状に2mm程度減肉していた。また、添接板と母材の境界部では腐食が激しく、母材や添接板コバ面について約2mm程度減肉している状態であった。座金周辺や添接板コバ面は、結露や降雨により主桁が濡れた場合に水みちとなること、また、僅かな隙間に飛来塩分等の腐食促進因子が滞留することが、腐食が激しい一要因であると推察される。

(2)ですべり試験を行った後に調査を行った摩擦面については、ボルト孔近傍ですべりにより生じた光沢が確認できた。また、発錆状態については添接板及び母材共にボルト孔近傍では点錆程度であり、錆が生じていない箇所も見られた。その一方で部材縁端部では層状の錆が生じていた。

(2)表面粗さの計測

図8に表面粗さのコンター図を示す。ボルト孔中心から15mmの範囲の平均粗さは $4.2\mu\text{m}$ ～ $10.3\mu\text{m}$ 、ボルト孔中心から30mmの範囲では $8.6\mu\text{m}$ ～ $15.8\mu\text{m}$ 、ボルト孔中心から40mm範囲の

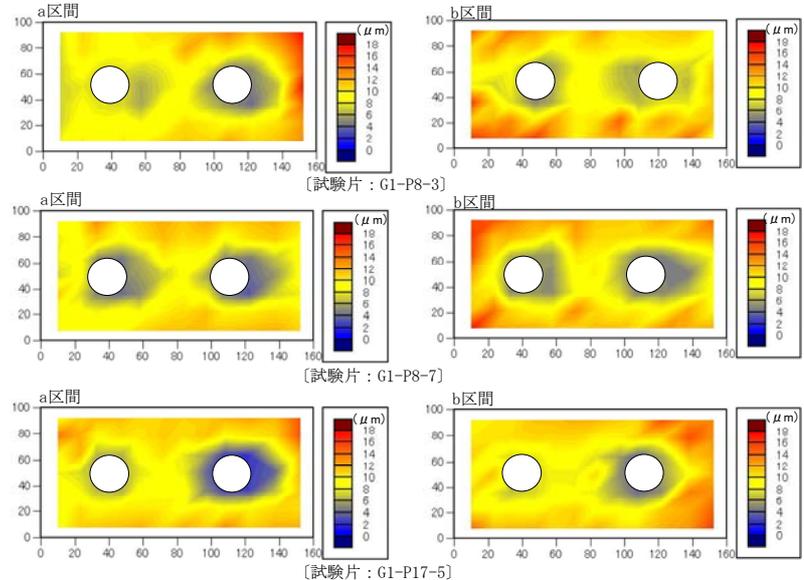


図8 表面粗さ (Ra) のコンター図

添接板縁端部においては $10.8\mu\text{m}\sim 18.8\mu\text{m}$ であった。ボルト孔近傍においてはすべり試験により表面が平滑化されており、試験片を切出す前の状態と比較して表面粗さが低下しているものと考えられる。また、表面粗さのコンター図と図7に示す摩擦面の腐食状況を比較すると、粗さが大きい箇所と発錆箇所が概ね一致しており、ボルト縁端部においては、発錆の影響により表面が粗くなっていると考えられる。

上述したように、摩擦接合継手ではボルト頭部やナット部だけでなく、添接板での減肉も顕著であることがわかる。また、摩擦面ではボルト孔付近では発錆は見られないが、ボルト孔から離れるにしたがって発錆し、腐食が生じる傾向にあることがわかる。

3. FE解析による摩擦接合継手のすべり耐荷力に及ぼす腐食減肉の影響

摩擦接合継手の母材に荷重を与えた場合、母材と添接板間にすべりが生じる。このすべりが発生した際の荷重がすべり耐力である。解析的にこのすべり耐力を判定するために、図9に示すように引張荷重を与えた母材と添接板の2点間の相対変位を用いた。すべり発生前は母材の点①と添接板の点②の相対変位は徐々に大きくなるが、すべり発生後は著しく増加するような挙動を示すと考えられる。それゆえ、図10に示すように載荷荷重とこの相対変位の関係をプロットすると、ある荷重で相対変位が著しく増加する。本研究ではこの相対変位が 1mm を超えたときの荷重をすべり耐力とした。なお、このすべり耐力の判定によって得られた健全状態のすべり耐力は下式から求められる理論値と概ね一致することは確認している。

$$\begin{aligned} \text{すべり耐力 } P &= \mu \cdot N \cdot m \\ &= 0.4 \times 113 \times 2 = 90\text{kN} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで μ は摩擦係数(0.4)、 N は高力ボルト軸力(設計軸力+10%=226kNの1/2)、 m は摩擦面数(2)である。

解析より得られた各部位の減肉モデルのすべり耐力を図11に示す。これより健全モデルと添接板の片側を減肉させたモデルのすべり耐力はほぼ等しいことから、添接板の減肉はすべり耐荷力にほとんど影響を及ぼさないといえる。一方、ナット部やボルト頭部、座金の減肉を再現した解析モデルでは、大幅にすべり耐力が減少しているといえる。これは既往の研究^{2), 3)}からも示されているように、ナット部の減肉に伴い軸力が減少したためであるといえる。

それぞれの減肉モデルのすべり耐力と導入軸力より算出した推定すべり耐力の比較結果を表1に示す。健全モデルでは解析から得られたすべり耐力

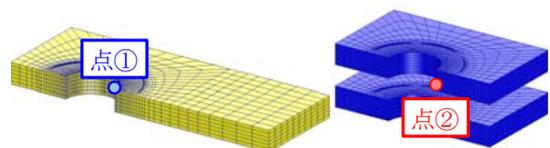


図9 すべり耐力の判定のための参照点

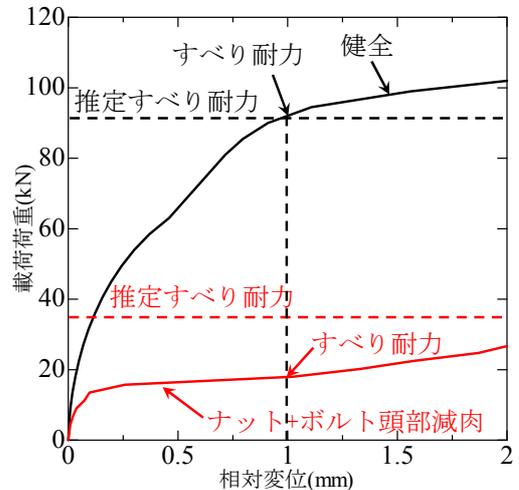


図10 すべり耐力の定義



図11 すべり耐力の比較

と初期軸力から推定したすべり耐力がほぼ等しい結果となった。一方、減肉を再現したモデルの解析結果では、減初期軸力から推定したすべり耐力の90%程度となっており、10%程度低下した結果が得られた。これは偏った減肉が生じることで、荷重が偏心して部材に作用したためであると考えられるが、今後詳細な検討が必要である。

また、図12に示すように摩擦面に生じる接触応力に着目すると、ボルト軸力によって接触が生じている箇所は、ボルト孔周辺のみであることがわかる。【2. 摩擦接合継手の腐食特性の調査】において示したように、ボルト孔周辺では腐食減肉が生じていなかったことから、摩擦面に与える腐食損傷の影響は低いものと考えられる。

4. 腐食減肉が生じた摩擦接合継手のすべり耐力とすべり係数の変化

すべり試験結果の一例を図12に示す。すべり耐力の定義は、図に示すように試験時の引張荷重と試験体側面に取り付けたクリップゲージの値の関係が急激に変化した時の荷重とした。

推定軸力とすべり試験結果を表2に示す。表より、推定軸力より得られたすべり係数は一部を除き、0.8を超えるような大きな値が得られたが、実験より得られたすべり係数は0.4~0.5程度に推移していることがわかる。この違いとしては、軸力推定値の誤差に加え、すべり試験では、腐食高力ボルトを用いてすべり試験を行った後に、同じ面を用いて新材高力ボルトを用いてすべり試験を行ったため、すべり係数が低下してしまったことや腐食によって摩擦面が固着した可能性などが考えられる。しかしながら、少なくともすべり係数0.4以上は確保できると考えられるため、腐食減肉が生じた摩擦接合継手の残存耐荷力は、高力ボルトの残存軸力を腐食減肉量から推定し、すべり係数を0.4として算出することで安全側に推定できると考えられる。

表1 すべり耐力と初期軸力から推定したすべり耐力の比較

解析ケース	解析から得られたすべり耐力 P_A (kN)	初期軸力から推定したすべり耐力 P_E (kN)	P_A / P_E (%)
健全	91	90.6	100.4
添接板片側減肉	82	90.6	90.5
ナット減肉	39	42.7	91.3
ナット+ボルト頭側減肉	31	36.2	85.6
ナット+座金減肉	30	33	90.9

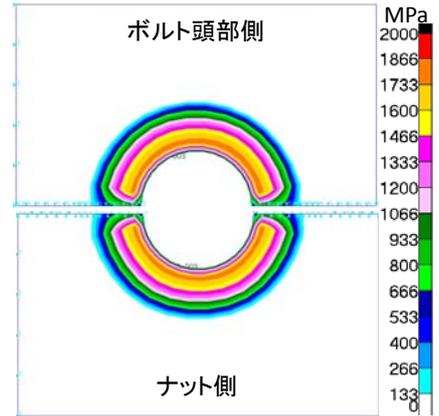


図12 添接板摩擦面の接触応力

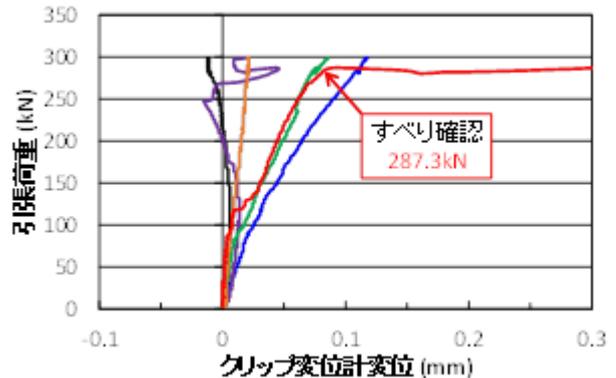


図12 すべり試験におけるすべり耐力の定義

表2 すべり係数の比較

試験体番号	腐食ボルト推定軸力 (kN)	腐食ボルトすべり耐力 (kN)	新材ボルト導入軸力 (kN)	新材ボルトすべり耐力 (kN)	すべり係数	
					推定軸力より	すべり試験より
1	186.8	310.3	228.8	214.2	0.830	0.468
2	109.2	105.6	216.2	202.8	0.483	0.469
3	173.8	304.4	222.3	175.1	0.876	0.394
4	143.7	147.4	226.6	184.5	0.513	0.407
5	96.8	232.7	214.6	181.3	1.203	0.422
6	143.2	287.3	221.3	184.9	1.003	0.418
7	135.3	271.6	219.2	239.2	1.003	0.546

5. まとめ

本研究は腐食減肉が生じた摩擦接合継手のすべり耐力に着目し、腐食減肉特性やすべり耐力に及ぼす腐食減肉の影響の検討を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- a) ボルト頭部やナット部だけでなく、添接板での減肉も顕著である。摩擦面ではボルト孔付近での発錆は見られないが、ボルト孔から離れるにしたがって腐食が生じる。
- b) 添接板の片側など偏って減肉が生じることで、荷重が偏心しすべり耐力が低下する可能性がある。しかしながら、その影響は10%程度であり、すべり耐力はすべり係数とボルト軸力により概ね推定可能である。
- c) 激しい腐食減肉が生じたとしても、すべり係数は少なくとも0.4を有すると考えられる。それゆえ、腐食減肉量より高力ボルトの残存軸力を算出し、すべり係数を0.4としてすべり耐力を推定することで、腐食減肉が生じた高力ボルトのすべり耐力を安全側に評価できるといえる。

・参考文献

- 1) 山田健太郎：(速報) 国道23号木曾川大橋の斜材の破断，橋梁と基礎，Vol.41，pp.54-55，2007.9
- 2) 下里哲弘，村越潤，玉城喜章，高橋実：腐食により崩落に至った鋼橋の変状モニタリングの概要と崩落過程，橋梁と基礎，Vol.43，pp.55-60，2009.11.
- 3) 下里哲弘，田井政行，有住康則，矢吹哲哉，長嶺由智：腐食劣化した高力ボルトの残存軸力評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.59A，pp.725-735，2013.
- 4) 橋本国太郎，築地貴裕，杉浦邦征：腐食劣化した高力ボルト摩擦接合継ぎ手の残存耐力に関する研究，土木学会論文集A1，Vol.69，No.2，pp.159-173，2013.
- 5) 田井政行，下里哲弘，有住康則，大城進太郎，長嶺由智：腐食高力ボルトの残存軸力評価法に関する実験的研究，土木学会第68回年次学術講演会，2013.

(発表論文)

- [1] 田井政行，長坂康史，竹渕敏郎，下里哲弘，有住康則：実橋における高力ボルトの腐食減肉計測による残存軸力の推定，土木学会西部支部沖繩会第4回技術研究発表会，pp.104-105，2014.
- [2] 山下修平，大塚恵，下里哲弘，有住康則，田井政行：過酷な環境下で暴露された高力ボルト摩擦接合継手部の腐食形態に関する調査，土木学会第70回年次学術講演会，2015.(投稿済)
- [3] Shuhei YAMASHITA, Tetsuhiro SHIMOZATO, Yasunori ARIZUMI, Masayuki TAI and Tetsuya YABUKI: Corrosion behavior of friction plate surfaces connected by high-strength bolts, The Eighth International Structural Engineering and Construction Conference, November 2015. (投稿済)
- [4] M. TAI, T. SHIMOZATO, Y. ARIZUMI, S. YAMASHITA and T. YABUKI: Proposal of Evaluation Method for Residual Axial Force of Corroded High Strength Bolts, The Eighth International Structural Engineering and Construction Conference, November 2015. (投稿済)