

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 24 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560483

研究課題名（和文） 腐食劣化した高力ボルト継手の耐久性能評価に関する研究

研究課題名（英文） A study on evaluation for residual axial force of corroded high strength bolts

研究代表者

下里 哲弘 (SHIMOZATO TETSUHIRO)

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：90452961

研究成果の概要（和文）：重要な社会基盤である鋼橋の高力ボルトは著しく腐食劣化することから、残存性能評価の確立が急務である。本研究では実腐食した高力ボルトを用いて、腐食減肉形状と残存軸力との相関実験を行い、また、腐食減肉に伴う残存軸力の低下メカニズムの解明として FEM 解析を実施した。その結果、残存軸力は腐食減肉形状に依存することを示し、座金部近傍の減肉量に着目した評価により、腐食高力ボルトの残存軸力を評価できることを示した。

研究成果の概要（英文）：The residual axial force of corroded high strength bolts has been investigated. The corroded high strength bolts cut out from a collapsed steel girder bridge were classified from the viewpoints of shape and thickness reduction of nut. The results showed that the residual axial force seems to be affected by the shape, in addition to the thickness reduction. It was analytically indicated that the decrease in an axial force by the thickness reduction is caused by the local deformation of nut edge and hole circumference of splice plate. Moreover, it was revealed that the measurement of the thickness reduction near the washer can evaluate the residual axial force.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学／地震工学／維持管理工学

キーワード：腐食、高力ボルト、残存軸力、鋼橋、維持管理

1. 研究開始当初の背景

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強や通行止めなどが多く報告されるようになり、鋼橋の老朽化は加速的に進行している。そのような状況の中、2009 年 7 月に腐食環境の厳しい沖縄において、著しく腐食劣化した鋼桁橋が崩壊に至り、鋼橋の腐食劣化に対する適切かつ実用的な耐久性能評価の確立が急務となっている。

2. 研究の目的

本研究では、鋼橋の腐食部位の中でも腐食劣化速度が著しく速く、腐食劣化状況によっては橋の安全性が損なわれる危険性の高い摩擦接合型高力ボルト継手部を対象とし、腐食高力ボルト継手の残存耐力性能の評価を目的とする。

3. 研究の方法

研究実施に際しては、腐食で崩落した鋼桁橋の管理者から提供された腐食高力ボルト

継手部を用いて、その腐食減肉形状の分類と腐食減肉量を測定したのち、残存軸力の評価を行った。また FEM 解析を用いて高力ボルトの腐食減肉に伴う残存軸力低下メカニズム及び腐食減肉形状が残存軸力に及ぼす影響を検討した。そして解析結果と実験結果を比較検討し、高力ボルトの腐食減肉形状に着目した残存軸力評価手法の検討を行った。以下に研究のステップを示す。

- (1) 腐食減肉形状の分類と腐食減肉量の測定
- (2) 残存軸力実験による検討
- (3) FEM 解析を用いた残存軸力の検討
- (4) 腐食高力ボルトの残存性能評価の検討

4. 研究成果

(1) 腐食減肉形状の分類と腐食減肉量の特徴

本研究では高力ボルトのナットの腐食減肉形状に着目し、外観目視によってその腐食減肉形状を写真 1 に示す 4 つの腐食減肉形状に分類した。次に腐食減肉形状及び腐食減肉量の分類を行った。腐食減肉量は平均減肉量の割合が 0-25%、25-50%、50-75% の 3 つに分類した。その結果、腐食減肉量が小さい場合は一様減肉型の腐食減肉形状が多く、中程度では一様減肉型や砂時計型、大きい場合は台形型の腐食減肉形状が最も多い結果となった。

(2) 残存軸力実験による検討結果

① 残存軸力測定法の検討

高力ボルトの軸力推定法の一つにひずみゲージ法があり、写真 2 に示すように高力ボルトの頭部に 2 軸のひずみゲージを貼り付け、ボルトナットを緩める際のひずみの変化量を用いて軸力を測定する。しかしながら、腐食した高力ボルトにおいては、ナットの減肉や腐食の影響で、ナットを緩めることによる軸力解放は困難となる。そこで本研究では、写真 3 に示すようにボルト軸部とナットのネジ部をコア抜きにより切離すことで軸力を解放するコア抜き法を提案した。

図 1 に新材の高力ボルトを用いてコア抜き法により軸力を測定した結果を示す。横軸はひずみ値 ϵ (μm)、縦軸は導入軸力 N (kN) である。図に示すように、全ての試験体において 2 軸のひずみゲージの値は概ね一致しており、x 軸に対する y 軸のひずみの誤差は、最大で 10% 程度であった。また軸力と高力ボルト頭部のひずみの関係はほぼ線形であり、軸力導入時と解放時に差異はほぼないといえる。この結果を用いて軸力 N と解放ひずみ ϵ の関係を最小二乗法より求めた回帰直線及びその誤差 $\pm 10\%$ の補助線を図 1 に併記した。本研究では、この回帰直線を軸力と高力ボルト頭部のひずみの関係のキャリブレーションカーブとして用いることで、腐食高力ボルトの残存軸力を推定した。



(a) 一様型

(b) 砂時計型



(c) 台形型



(d) 逆台形型

写真 1 高力ボルトの腐食減肉形状の分類

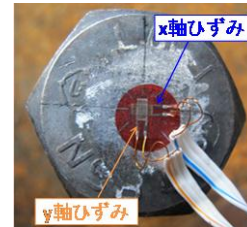


写真 2 高力ボルト頭部のひずみゲージ位置



写真 3 コア抜き法

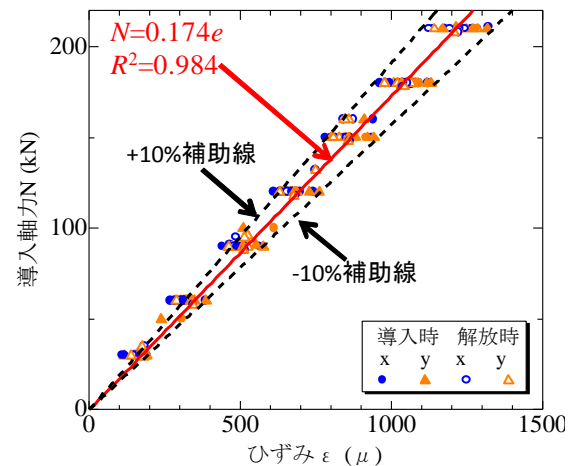


図 1 高力ボルトの導入軸力と頭部ひずみ

②腐食した高力ボルトの残存軸力測定結果

測定は腐食鋼橋より採取した高力ボルト12本に対して行った。12本の内訳は、一様型6本、砂時計型1本、台形型4本、逆台形型1本である。腐食高力ボルトの残存軸力割合と平均減肉量の関係を図2に示す。ここで縦軸の残存軸力割合とは、腐食した高力ボルトの初期導入軸力を210kNと仮定し、コア抜き法により測定された残存軸力に対する割合を示している。横軸は平均減肉量である。また、図には新材ボルトのナット側面を切削により人工的に一様減肉させた際の残存軸力実験結果とその平均線も併せて示す。

図より、腐食した高力ボルトの残存軸力割合は、平均減肉量が4mm程度(平均減肉量の割合25%)までは、新材高力ボルトの人工減肉の実験結果の平均線と同程度であるが、平均減肉量が大きくなるにつれてバラツキが大きくなり、新材ボルトの人工減肉実験結果の平均線より高くなる。次に、平均減肉量6mm付近で比較すると、台形型の腐食減肉形状は、他の腐食減肉形状に比べて残存軸力が大きく、次いで一様型、砂時計型、逆台形型の順に残存軸力が小さくなっている。これより、高力ボルトの残存軸力に腐食減肉形状が影響を及ぼしていると考えられる。

(3) FEM解析を用いた残存軸力の検討結果

①FEM解析での残存軸力メカニズムの解明

解析モデル化の対象は図3に示すように高力ボルトとナット、座金、添接板及び母材とし、全てソリッド要素でモデル化した。解析モデルではナットとボルト軸部の間にネジ部を設けた。ネジ部の断面は四角形とし、ネジの節も通常のネジのらせん状ではなく、輪状の簡易的なモデルとした。弾性係数は

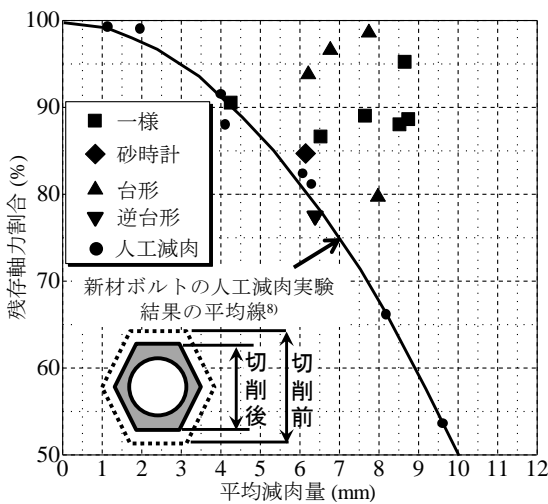
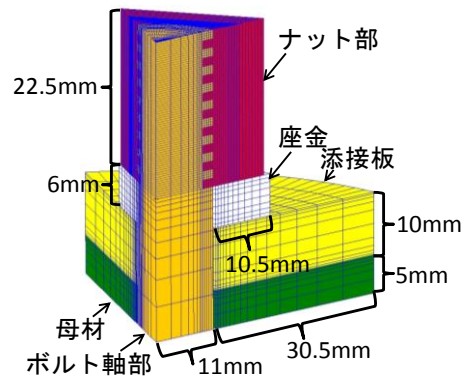


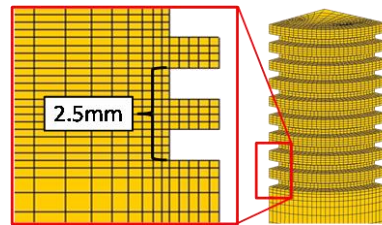
図2 実腐食高力ボルトの残存軸力

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245MPaとし、応力ひずみ関係は完全弾塑性体とした。

解析結果より、ナット部の減肉によって座金近傍のナット部に塑性ひずみが増大し、局所変形を生じた。これは減肉に伴い座金での接触面積が減少したため、座金近傍のナットでの力の伝達が増加したためであると考えられる。また、添接板と座金の挙動に着目すると、添接板の孔周辺が座金によって押しつぶされ局所変形を生じ、座金が回転変形をした。これより、ナット部の減肉に伴い、これらの局所変形・回転変形が生じ、ナットとボルト頭部の間の長さが短くなることで残存軸力が低下するメカニズムとなると考えられる。



(a) FEMモデル概要



(b) ネジ部のFEMモデル

図3 FEMモデル

②腐食減肉形状と残存軸力の相関検討

写真1に示す4種類に分類した腐食減肉形状をモデル化し、FEM解析を行った。解析結果より、腐食減肉形状の影響を考慮して残存軸力の評価を行うためには、座金直上や座金近傍の減肉量に着目した評価が有効であることが得られた。

(4)腐食高力ボルトの残存性能評価

座金近傍減肉量を用いて図2に示した残存軸力測定実験結果を再整理したものを図4に示す。図には平均減肉量を用いて整理した結果及び一様減肉モデルの解析結果も併せて示す。

図より、全ての腐食減肉形状において、座金近傍減肉量を用いることで、残存軸力割合はナット全体の平均減肉量を用いた

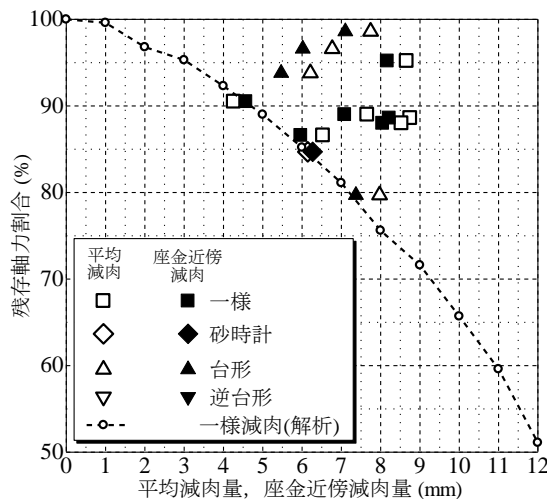


図4 腐食した高力ボルトの残存軸力割合と座金近傍の減肉量との関係

場合よりも一様減肉モデル解析結果に近づいたといえる。以上のことから、座金近傍の減肉量を用いることにより、腐食減肉形状を有する腐食高力ボルトの残存軸力を評価することが可能と考えられる。

(5) まとめ

本研究では、実腐食した摩擦接合継手の高力ボルトを用いて、その腐食減肉形状と腐食減肉量を測定し、残存軸力の測定を行った。また、腐食減肉に伴う残存軸力の低下メカニズム及び腐食減肉形状が残存軸力に及ぼす影響をFEM解析を用いて検討した。以下に、本研究で得られた結論を示す。

- ①腐食減肉形状を4種類に分類した場合、腐食減肉量が小さい場合は一様減肉型の腐食減肉形状が多く、中程度では一様減肉型や砂時計型、大きい場合は台形型の腐食減肉形状が最も多くなった。
- ②実験結果より高力ボルトの導入軸力とボルト頭部のひずみの大きさはほぼ線形関係にあり、これを用いて本研究ではコア抜き法による高力ボルトの軸力測定法を提案した。そして、コア抜き法による高力ボルトの軸力測定は、残存軸力を評価可能な測定精度を有することを確認した。
- ③平均減肉量を用いて実腐食した高力ボルトの残存軸力を評価した場合、平均減肉量が4mm程度(平均減肉量の割合25%程度)までは人工減肉させた新材高力ボルトの残存軸力と同程度であった。しかしながら、平均減肉量が大きくなるに従いバラつきが大きくなり、人工減肉させた場合の残存軸力よりも高くなる傾向を示した。これらは、高さ方向及び円周方向にバラつきを持つナット部の腐食減肉形状の影響や座金や添接板等の腐食減肉量とその形状の影響によるものであると考えられる。

④実験結果及びFEM解析結果より、残存軸力の大きさは、腐食減肉形状に依存する傾向があり、今回用いた試験体では、平均減肉量が等しい場合でも、台形型は人工減肉させたものよりも残存軸力が大きく、逆台形型は小さくなる傾向を示した。

⑤FEM解析の結果より、ナット部の減肉に伴う高力ボルトの残存軸力の低下の要因は、座金近傍のナット部の局所変形及び添接板の孔周辺の局所変形に伴う座金の回転変形であると推察された。

⑥平均減肉量を用いて残存軸力を評価する場合、腐食減肉形状によっては危険側の評価を与える可能性がある。座金部近傍の減肉量に着目して評価を行うことで、腐食減肉形状を考慮して減肉に伴う残存軸力の低下割合を評価できる考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- 1) 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、日本学術会議・土木学会構造工学論文集、査読有、Vol.59A、2013年3月、pp.725-735

[学会発表] (計3件)

- 1) 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、第68回土木学会全国大会、査読無、2013年9月
- 2) 田井政行、下里哲弘、有住康則、大城進太郎：腐食劣化した高力ボルトの残存軸力推定に関する解析的研究、土木学会西部支部沖縄会 第2回技術研究発表会、査読無、2012年09月25日
- 3) 大城進太郎、下里哲弘、有住康則、田井政行：腐食高力ボルトの残存軸力評価に関する実験的研究、土木学会西部支部沖縄会 第2回技術研究発表会、査読無、2012年09月25日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下里 哲弘 (SHIMOZATO TETSUHIRO)
琉球大学・工学部・准教授
研究者番号：90452961

(2) 研究分担者

有住 康則 (ARIZUMI YASUNORI)
琉球大学・工学部・教授
研究者番号：90109306

(3) 連携研究者

村越 潤 (MURAKOSHI JUN)
独立行政法人土木研究所・構造物メンテナンス研究センター・上席研究員
研究者番号：60355881