

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420488

研究課題名(和文) 腐食劣化した高力ボルト継手の残存性能評価法に関する研究

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では鋼橋の腐食部位の中でも腐食速度が速い高力ボルト継手の残存耐力評価を目的として、実腐食高力ボルトの腐食減肉形状および減肉量データとひずみゲージコア抜き実験で得られる残存軸力との相関分析により、腐食高力ボルトの腐食減肉量を用いた残存軸力の定量評価法を構築した。また、ナット部とボルト頭部の腐食減肉形状をモデル化した弾塑性FEM解析を行い、それらの腐食減肉形状と残存軸力との相関分析を行い、ナット部とボルト頭部の座金近傍範囲における平均腐食減肉量を適用することで、実腐食減肉形状を有する高力ボルトの残存軸力特性を明らかにし、腐食劣化した高力ボルト継手の安全かつ実用的な残存性能評価法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a residual axial force for corroded high-strength bolts has been investigated. Corroded high-strength bolts cut from a steel bridge were used for the measurement of thickness reduction and residual axial force. An FE analysis examined the effect of the corroded shape of bolts on the residual axial force. Based on both experimental and analytical results, it was revealed that the summation of the thickness reduction near the washer for nut and bolt head can approximately estimate the residual axial force of corroded bolts, and an applicable evaluation method was proposed.

研究分野：維持管理工学

キーワード：腐食 高力ボルト 残存軸力 腐食減肉形状 FEM

1. 研究開始当初の背景

近年、我が国の重要インフラである鋼橋において、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、鋼橋の老朽化に伴う安全対策の必要性が強く求められている。そのような状況の中、腐食環境の厳しい沖縄において、著しく腐食劣化した鋼橋の崩壊事故が生じるなど事態は深刻化しており、腐食劣化した鋼橋に対し安全かつ実用的な耐久性評価法の確立が急務となっている。本研究では鋼橋の腐食部位の中でも腐食速度が速く、橋の安全性が著しく損なわれる危険性のある高力ボルト継手を対象に、腐食高力ボルト継手の残存耐力性能と疲労耐久性の評価を目的とする。

2. 研究の目的

本研究では鋼橋の腐食部位の中でも腐食速度が速い高力ボルト継手の残存耐力評価を目的として、実腐食高力ボルトの腐食減肉形状および減肉量データとひずみゲージコア抜き実験で得られる残存軸力との相関分析により、腐食高力ボルトの腐食減肉量を用いた残存軸力の定量評価法の提案を目的とした。また、ナット部とボルト頭部の腐食減肉形状をモデル化した弾塑性 FEM 解析を行い、それらの腐食減肉形状と残存軸力との相関分析を行い、ナット部とボルト頭部の座金近傍範囲における平均腐食減肉量を適用することで、実腐食減肉形状を有する高力ボルトの残存軸力特性を明らかにする。以上のことより、腐食劣化した高力ボルト継手の安全かつ実用的な残存性能評価法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 実腐食高力ボルトの減肉形状特性

本研究では、写真-1 に示すように実橋より採取した腐食した摩擦接合継手の高力ボルトの腐食減肉形状を計測した。先ず、計測に先立ち、採取した腐食高力ボルトの錆を除去するためにブラスト処理を行った。腐食減肉形状の計測は、ナット部とボルト頭部の両部を対象に、ノギス、直角定規、およびテーパゲージを用いた。なお、この方法は実橋現場で腐食減肉形状を容易に計測できる方法である。計測した腐食高力ボルトは 54 本である。

(2) 実腐食高力ボルトの残存軸力特性

実腐食した高力ボルト 54 本を対象に、残存軸力を計測する方法を検討した。本研究で対象とした腐食減肉した高力ボルトでは、軸力解放のためにナットを緩めることが困難であったため、残存軸力計測にひずみゲージ法を応用したコア抜き法を適用した。この方法は、写真-2 に示すようにナット側から $\Phi 25\text{mm}$ のコア抜きを行い、そのコア抜き後の軸力解放に伴うボルト頭頂部の横ひずみの変化量から残存軸力を求める方法である。この方法の計測精度については、新材高力ボルトを用いて、ボルト頭部に貼りつけた 2 軸のひずみゲージから得られる横ひずみと軸力計を用いて導入した軸力との相関分析を行ってお

り、98%と高い相関性を示す結果が得られた。

(3) FEM 解析による検討

実腐食高力ボルトで見られる腐食減肉形状は、一様型、台形型、逆台形型、砂時計型の 4 つに分類される。この 4 つの形状を対象に FEM 解析モデルを作成し、腐食減肉形状が残存軸力特性に及ぼす影響を検討した。図-1 に解析モデルを示す。ボルトの軸力は、ボルト軸部に強制変位を与えることで導入し、その導入軸力の算出には添接板と接している座金の接触面の接触力の合計を用いた。FEM 解析は MSC.Nastran2012 で行った。



写真-1 研究に用いた高力ボルト継手部



(a) コア抜き作業 (b) コア抜き後
写真-2 コア抜き法

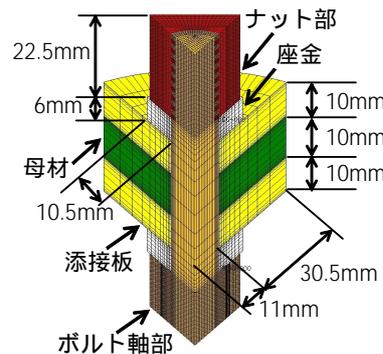


図-1 解析モデル

4. 研究成果

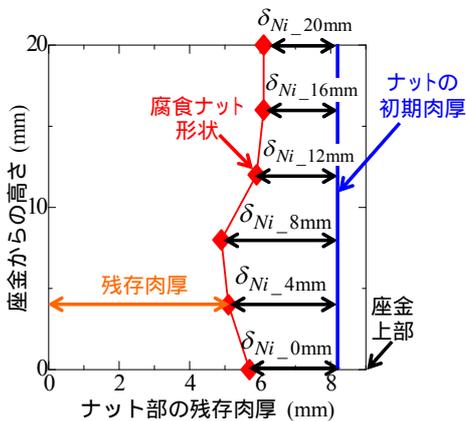
(1) 実腐食高力ボルトの減肉形状特性

図-2 及び図-3 にナット部及びボルト頭部の腐食減肉形状の計測結果例を示す。図の縦軸は座金面からの高さ、横軸がナット部及びボルト頭部の残存肉厚であり、ナット部 1 側面及びボルト頭部 1 側面の計測例である。図のような計測結果より、腐食高力ボルト 54 本の 6 面における全平均減肉量を算出した。全

平均減肉量の算出は、各面の平均減肉量を算出した後に、全面の平均減肉量を求め、その平均減肉量に2を乗じることで、全平均減肉量を求めた。図-4 に全平均減肉量の算出結果を示す。図の横軸はナット部の全平均減肉量 $\delta_{N_ave.}$ 、縦軸はボルト頭部の全平均減肉量 $\delta_{H_ave.}$ である。



(a) 計測対象ナット部

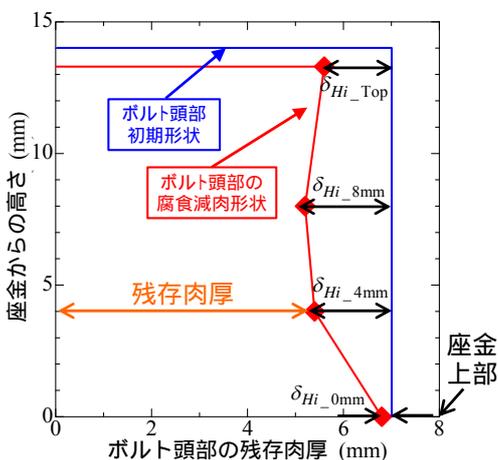


(b) 計測結果

図-2 ナット部の減肉形状計測結果例



(a) 計測対象ボルト頭部



(b) 計測結果

図-3 ボルト頭部の減肉形状計測結果の例

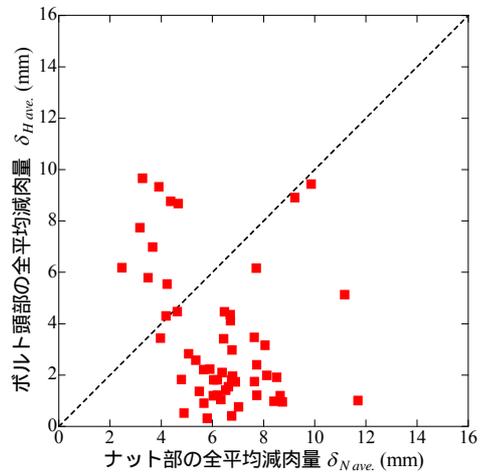


図-4 ボルト頭部とナット部の全平均減肉量

(2) 実腐食高力ボルトの残存軸力特性

実腐食した高力ボルト 54 本のうち、ボルト頭部高さの減肉量 H が 6mm 以下の 51 本を対象に、コア抜きによる高力ボルト頭部のひずみ値に対し、実腐食ボルト頭部の減肉高さ H の補正式を用いて、残存軸力の算出を行った結果を図-5 に示す。図の縦軸は残存軸力割合を示し、横軸はナット部とボルト頭部の全平均減肉量の合計 $\delta_G = (\delta_{N_ave.} + \delta_{H_ave.})$ を示す。図より、ナット部とボルト頭部の全平均減肉量の合計 δ_G が増加するほど、残存軸力割合が減少する力学性状上、妥当な傾向が得られた。これより、ナット部とボルト頭部の全平均減肉量の合計 δ_G を用いることで、残存軸力を概ね評価できることを示した。なお、図-5 で示された実験結果に 2 次関数を用いて最小二乗法より回帰曲線を求め、図中に併記しているが、この回帰曲線の相関係数は 0.51 であり、バラつきは多い結果である。このバラつきの要因の一つとして、腐食減肉形状の影響であると考えられる。

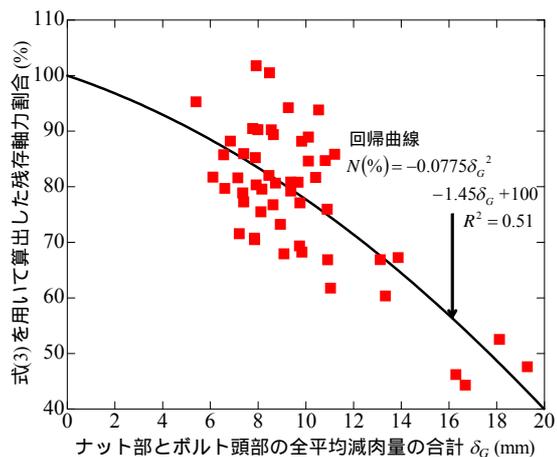


図-5 残存軸力割合とボルト全平均減肉量

(3) FEM 解析による検討

図-6 に各腐食減肉形状の全平均減肉量が

8mm となるモデル化に対して、ネジ山の上面の接触力の合計に対する各ネジ山の接触力の割合を示す。図より、腐食減肉形状によらず、座金から5つ目までのネジ山の接触力はほぼ一定であり、それより上のネジ山の接触力はほぼ直線的に減少している傾向が得られた。また、座金から5つ目までのネジ山で伝達される接触力の割合より、軸力 65%~70%程度が座金側から5つ目までのネジ山で伝えられている結果が得られた。これより、ネジピッチは2.5mmであることから、座金から5つ目のネジ山までの距離約12mmまでの範囲が残存軸力に顕著な影響を及ぼすと考えられる。同様の傾向がボルト頭部ににおいても生じていると考えられる。そこで、高力ボルト頭部の側面を一様に減肉させた解析モデルを用い、減肉前後の von Mises 応力分布の違いの比較を行った。その結果、高力ボルト頭部においては、座金から距離 8mm 程度までの平均減肉量として算出した座金近傍減肉量 δ_{HW} を用いた残存軸力評価が有効であると考えられる。

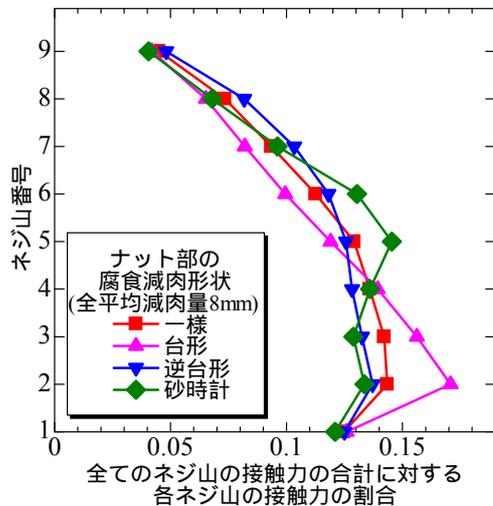


図-6 各ネジ山の接触力の割合(FEM)

(4)残存軸力評価法の提案

ナット部は座金からの高さ 0, 4, 8, 12mm の座金近傍減肉量 δ_{NW} 、ボルト頭部は 0, 4, 8mm の座金近傍減肉量における平均減肉量を求め、それらの合計を 3 で除して算出した。座金近傍減肉量 δ_{NW} で評価した結果を図-7 に示す。図より、図-5 と比べてバラつきが抑えられており、2 次関数を用いて最小二乗法で求めた回帰曲線の相関係数は 0.51 から 0.62 となり、相関性が向上していることがわかる。これより、腐食減肉形状を有する高力ボルトの残存軸力評価として、ナット部とボルト頭部の座金近傍減肉量の合計 δ_{GW} を用いる方法を提案する。

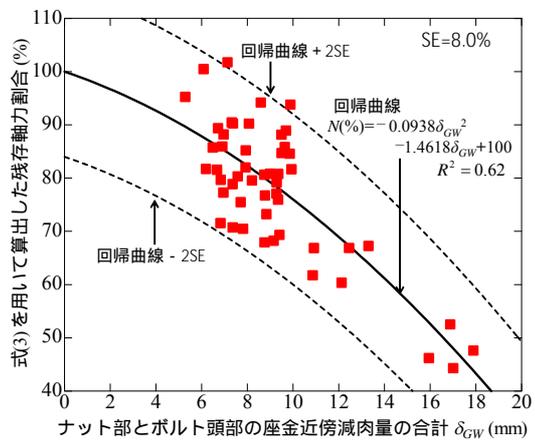


図-7 腐食劣化した高力ボルトの残存軸力評価法

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- 1) 下里哲弘, 田井政行, 長嶺由智, 有住康則, 矢吹哲哉: 実腐食減肉形状を有する摩擦接合用高力六角ボルトの残存軸力特性, 日本学術会議構造工学論文集, Vol.62A, pp.503-513, 2016.3.
- 2) 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, 日本学術会議構造工学論文集, Vol.59A, pp.725-735, 2013.4.

〔学会発表〕(計9件)

- 1) 山下修平, 下里哲弘, 有住康則, 田井政行, 大塚恵: 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研究, 土木学会第70回学術講演会, -494, pp.987-988, 2015.9. 岡山大学, 岡山県
- 2) 田井政行, 下里哲弘, 有住康則, 山下修平, 大塚恵: 腐食により偏った減肉が生じた高力ボルトの残存軸力評価法の検討, 土木学会第70回学術講演会, -332, pp.663-664, 2015.9. 岡山大学, 岡山県.
- 3) 田井政行, 長坂康史, 竹淵敏郎, 下里哲弘, 有住康則: 実橋における腐食高力ボルトの残存軸力計測, 平成26年度土木学会西部支部研究発表会 -16, pp.31-32, 2015.3. 琉球大学, 沖縄県.
- 4) 山下修平, 下里哲弘, 有住康則, 田井政行: 腐食鋼橋の高力ボルト摩擦接合継手における摩擦接触面の発錆特性, 平成26年度土木学会西部支部研究発表会 -17, pp.33-34, 2015.3. 琉球大学, 沖縄県.
- 5) 林田卓也, 下里哲弘, 有住康則: 腐食した高力ボルト摩擦接合継手の摩擦面状態とすべり耐力の関係, 平成26年度土木学会西部支部研究発表会 -18, pp.35-36, 2015.3. 琉球大学, 沖縄県.
- 6) 林田卓也, 下里哲弘, 有住康則, 山下修平: 高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に関する研究~実橋から切出した試験

- 片によるすべり試験（その1）～，土木学会西部支部沖縄会第4回技術研究発表会 pp.96-97, 2014.10. 琉球大学, 沖縄県.
- 7) 山下修平, 下里哲弘, 有住康則, 林田卓也: 高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に関する研究～実橋から切出した試験片によるすべり試験（その2）～，土木学会西部支部沖縄会第4回技術研究発表会, pp.98-99, 2014.10. 琉球大学, 沖縄県.
- 8) 田井政行, 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縄会第4回技術研究発表会, pp.104-105, 2014.10. 琉球大学, 沖縄県.
- 9) 田井政行, 小間貴紀, 下里哲弘, 有住康則, 矢吹哲哉: 腐食劣化した高力ボルトの減肉量の基づく残存軸力評価法の解析的検討, 土木学会第69回学術講演会, -608, pp.1215-1216, 2014.9. 大阪大学, 大阪府

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 (ARIZUMU, Yasunori)
琉球大学・工学部・教授
研究者番号: 90109306