

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 27 日現在

機関番号：52501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820211

研究課題名(和文)腐食劣化した高力ボルトの残存軸力評価法の確立を目的とする解析的検討

研究課題名(英文)Analytical investigation for evaluation method of residual axial force for corroded high-strength bolts

研究代表者

田井 政行(Tai, Masayuki)

木更津工業高等専門学校・その他部局等・助教

研究者番号：70646596

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：摩擦接合型高力ボルト継手部の高力ボルトは、鋼橋の腐食部位の中でも腐食劣化速度が著しく速い部位の一つである。本研究では腐食劣化した高力ボルトの残存軸力評価法を確立するために、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、腐食減肉形状が残存軸力に及ぼす影響を明らかにした。そして、ナット部とボルト頭部の両側で減肉が生じた高力ボルトの残存軸力評価法について検討を行い、ナット部とボルト頭部の減肉量の2乗平均値を用いることで、 $\pm 15\%$ 程度の精度で残存軸力を推定可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, an evaluation method of residual axial force for corroded high-strength bolts of friction joints was investigated. An elasto-plastic analysis clarified that the corroded bolt shape affects the residual axial force. Based on both experimental and analytical results, it was revealed that the square root mean value of thickness reduction near the washer for nut and bolt head can approximately estimate the residual axial force of corroded bolts with $\pm 15\%$ accuracy.

研究分野：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：高力ボルト 腐食 軸力 減肉形状

1. 研究開始当初の背景

鋼橋の摩擦接合継手の高力ボルトは、角が多いネジ部やナット部において防錆塗装の膜厚を確保しづらく、飛来塩分などの腐食促進因子が付着滞留しやすいため、他の部位に比べ腐食劣化が著しく進行しているものが見られる。高力ボルトの腐食減肉は、高力ボルトの軸力を低下させ、継手のすべり耐力を低下させるものと考えられる。腐食鋼橋の高力ボルト摩擦接合継手に対する耐荷力性能・耐久性能評価を確立するためには、腐食した高力ボルトの残存軸力の評価法の確立が急務である。

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の高力ボルトを対象とし、腐食劣化した高力ボルトの残存軸力の評価を行うことを目的とする。研究実施に際しては、腐食減肉に伴う高力ボルトの残存軸力低下を再現できる FEM 解析モデルの提案し、腐食減肉形状が残存軸力に及ぼす影響を解析的に明らかにした上で、腐食減肉が生じた高力ボルトの残存軸力評価法の提案を行う。

3. 研究の方法

本研究の解明概要および実施手順を以下に示す。

(1)腐食減肉に伴う高力ボルトの残存軸力低下を再現できる FEM 解析モデルの提案

ナット、座金、添接板、ボルト軸部とナット間のネジ部を再現した FEM 解析モデルを考案し、それぞれの部位同士の接触を考慮した解析モデルを作成する。そして、新材高力ボルトの残存軸力測定結果 (引用文献①) と本研究で考案する FEM 解析モデルの解析結果との比較検証を行い、腐食減肉に伴う高力ボルトの残存軸力低下を再現できる FEM 解析モデルの提案を行う。

(2) 残存軸力に及ぼす腐食減肉形状の影響

(1)で提案した解析モデルを用い、実橋で著しく腐食減肉するナット部の腐食減肉形状を模擬した解析モデルを作成し、腐食減肉形状が残存軸力に及ぼす影響を明らかにする。

(3) 腐食高力ボルトの残存軸力評価法の提案

腐食減肉量をパラメータとしたパラメトリック解析を行い、腐食高力ボルトの残存軸力評価パラメータの検討を行う。また、(2)の結果を踏まえ、腐食形状を考慮した高力ボルトの残存軸力評価法の提案を行う。

4. 研究成果

(1)腐食減肉に伴う高力ボルトの残存軸力低下を再現できる FEM 解析モデルの提案

図 1 に解析モデル概要を示す。モデル化の対象は M22 の高力ボルト軸部、ナット、座金、添接板及び母材とし、全てソリッド要素でモ

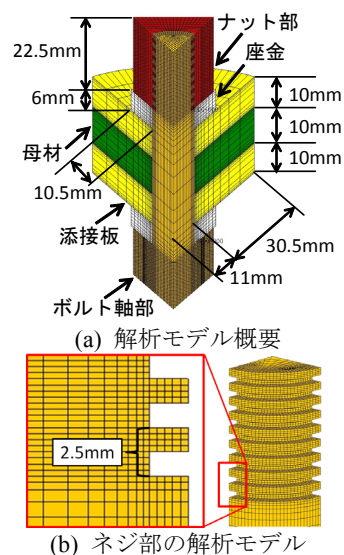


図 1 解析モデル

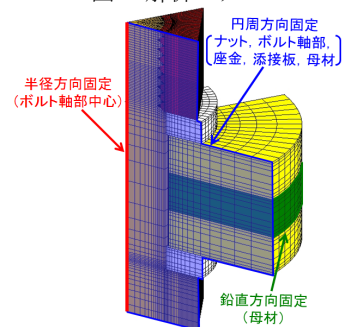
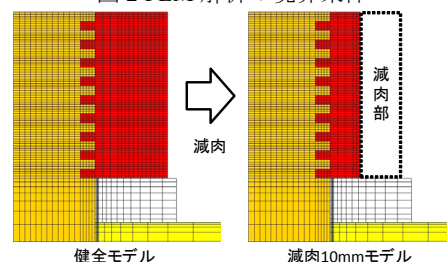
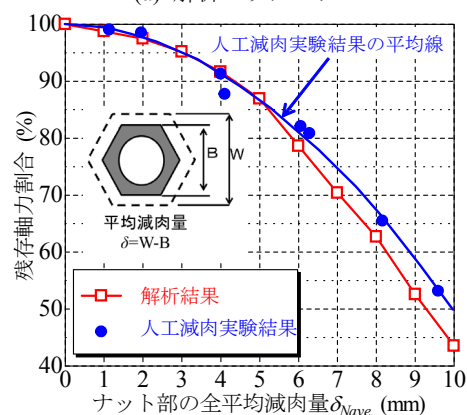


図 2 FEM 解析の境界条件



(a) 解析パラメータ



(b) 人工減肉試験結果と解析結果の比較

図 3 解析モデルの妥当性の検証

デル化した。ネジ部については、図 1(b)に示すように四角形の輪状の簡易的なモデルとした。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 245MPa とし、応力ひずみ関係は完全弾塑性体とした。

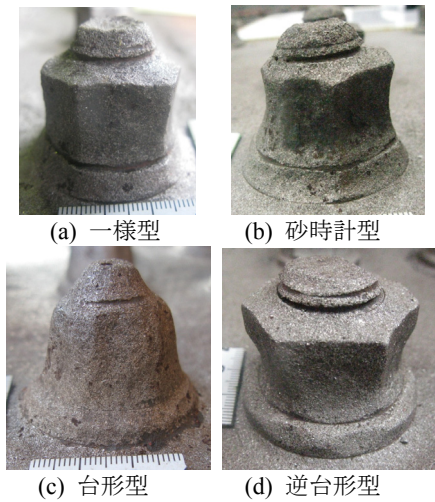


写真1 高力ボルトの腐食減肉形状の分類

図2に境界条件を示す．母材側面を鉛直方向に支持し，ボルト軸部中心を半径方向に固定，母材，添接板，座金，ナット，ボルト軸部の対称面を円周方向に固定とした．各部材の境界を接触面として定義し，直接拘束法により接触解析を行った．また，本解析では，接触面間の摩擦は無視した．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．

解析モデルの妥当性を検証するために，既往研究（引用文献①）で行われたナット部の人工減肉に伴う残存軸力計測結果と図3(a)に示す健全モデルからこの減肉を再現した解析結果の比較検討を行った．その結果，図3(b)に示すように既往研究の実験結果と解析結果は比較的良好一致を示しており，本解析モデルを用いることで，減肉に伴う残存軸力の低下現象を概ね再現できることを確認した．

(2) 残存軸力に及ぼす腐食減肉形状の影響

実腐食した鋼橋から採取した高力ボルトを調査した結果，写真1に示すように，一様型，砂時計型，台形型，逆台形型の4種類の腐食減肉形状に分類されることが明らかになった．図4に示すように，この4つの形状を対象にFEM解析モデルを作成し，腐食減肉形状と残存軸力との関係を検討した．なお，それぞれの解析モデルにおいて，ナット部の全平均減肉量（図5）を4，6，8mmとなるように腐食減肉形状モデルを作成し解析を行った．

解析結果を図6に示す．図の縦軸は残存軸力割合，横軸はナット部の全平均減肉量 δ_{H_ave} である．図中には全平均減肉量を0から12mmまで変化させた場合の一様減肉モデルの解析結果を併せて示す．全ての解析ケースにおいて，残存軸力割合は大きいものから順に，台形型，砂時計型，一様型，逆台形型となった．また，一様減肉モデルの解析結果と比較すると，台形型及び砂時計型は上側にプロットされる結果となったが，逆台形型は大きく下側にプロットされている．これより，ナット部の腐食減肉形状は残存軸力に影響を及ぼすといえる．

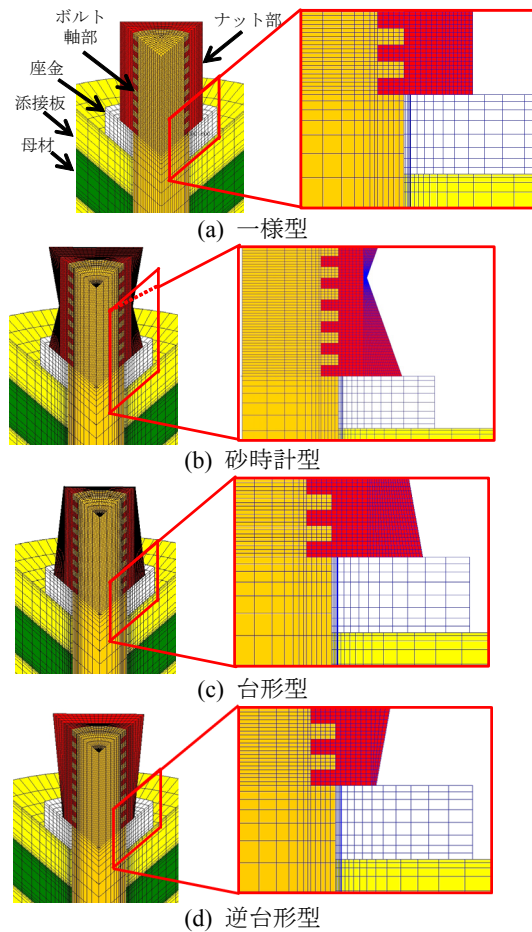


図4 腐食減肉形状別の解析モデル

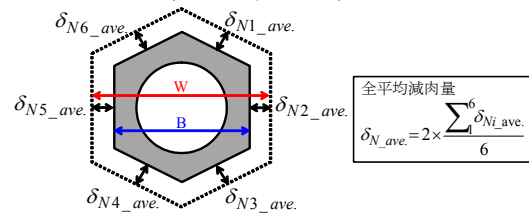


図5 全平均減肉量の定義

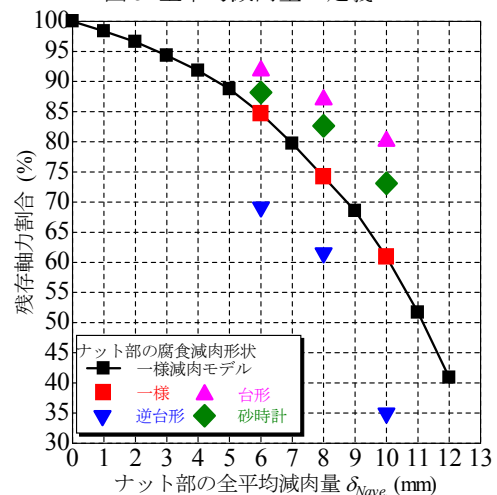


図6 減肉形状別の残存軸力割合と全平均減肉量の関係

ト部の腐食減肉形状は残存軸力に影響を及ぼすといえる。

次に，腐食減肉形状の影響をより詳細に検討することを目的に，ナット部とボルト軸部

との間の力の伝達はネジ部の接触によって行われることに着目して、図7に示すナット部のネジ山の上面の接触力の合計と腐食減肉範囲との相関に関する検討を行った。

図8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。表1に座金から5つ目までのネジ山で伝達される接触力の割合を示す。表より、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。

そこで、座金から距離12mmまでのナット部の平均減肉量をナット部の座金近傍減肉量 δ_{NW} と定義して検討した。図9にナット部の座金近傍減肉量 δ_{NW} を用いて図-15を再評価したFEM解析結果を示す。縦軸は残存軸力割合、横軸はナット部の座金近傍減肉量 δ_{NW} である。図より、ナット部の座金近傍減肉量 δ_{NW} を用いた場合、各減肉形状の解析結果は一樣減肉モデルの結果と良好一致を示した。これより、ナット部の腐食減肉形状の影響を考慮した残存軸力の評価には、ナット部の座金近傍減肉量 δ_{NW} を適用した方が有効であると考えられる。

(3) 腐食高力ボルトの残存軸力評価法の提案

写真2に示すように、実橋の高力ボルトの腐食減肉は、ナット部だけでなくボルト頭部でも生じている。腐食損傷を受けた高力ボルトの残存軸力を評価するパラメータとして、ナット部の減肉量に加えてボルト頭部の減肉量を考慮した評価パラメータを検討するためにFEM解析を行った。解析パラメータには、ナット部及びボルト頭部の側面の減肉量とした。それぞれの平均減肉量を0-10mmまで1mmピッチで変化させて解析を行っており、総解析ケース数は100である。

①ナット部とボルト頭部の減肉量の合計を用いて評価を行った場合

100ケースの解析より得られた残存軸力を評価するパラメータとして、ナット部とボルト頭部の平均減肉量の合計 δ_{sum} ($=\delta_{N,ave.}+\delta_{H,ave.}$)を用いて評価を行った。評価結果を図10に示す。縦軸は残存軸力の割合、横軸はナット部とボルト頭部の平均減肉量の合計 δ_{sum} である。図より、ナット部とボルト頭部の減肉量の合計を用いた場合、減肉量の合計が等しくとも残存軸力の割合に差異が生じていることがわかる。つまり、両者の平均減肉量の合計 δ_{sum} を残存軸力評価パラメータとして用いることは、適切とはいえないことがわかる。

②ナット部とボルト頭部の2乗平均減肉量を

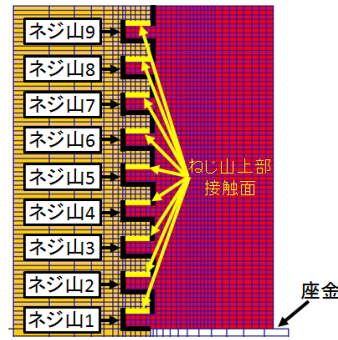


図7 ネジ山番号と接触面

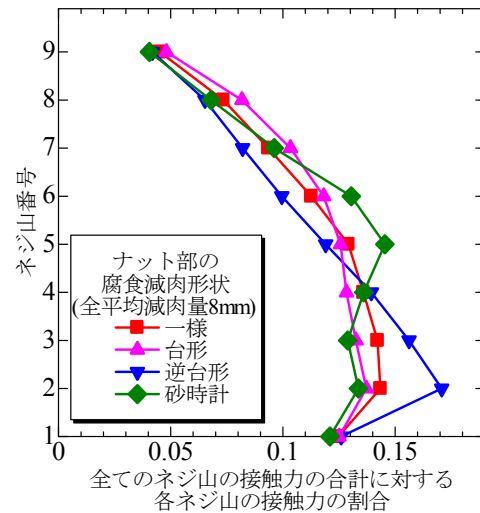


図8 ネジ山番号と接触面

表1 5つ目までのネジ山の接触力の割合

形状	一樣	台形	逆台形	砂時計
ネジ山5つ目までの接触力の割合	68%	65%	71%	67%

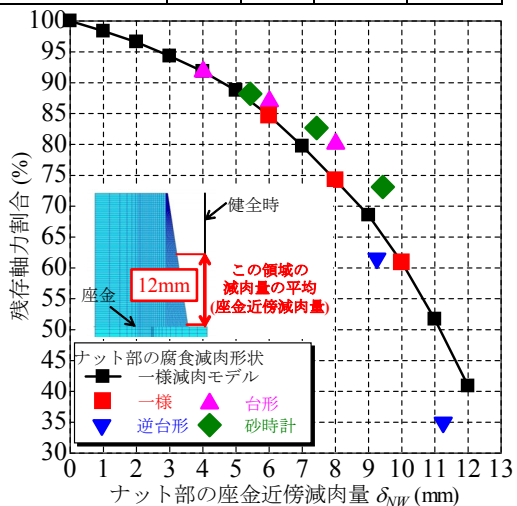


図9 減肉形状別の残存軸力割合と座金近傍減肉量の関係

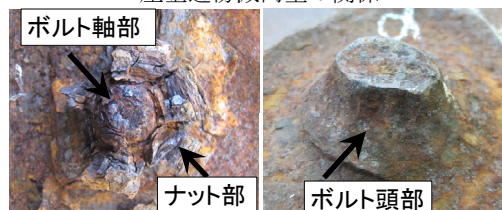


写真2 ナット部とボルト頭部の腐食減肉例

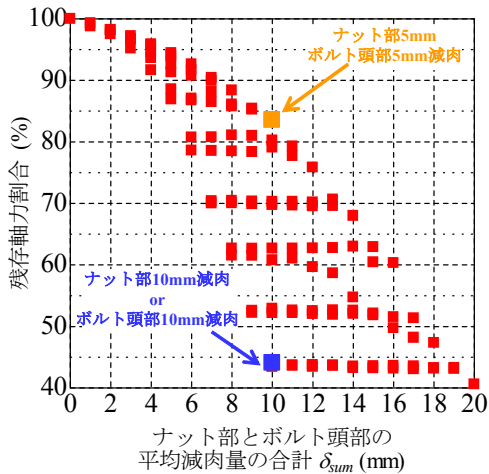


図 10 平均減肉量の合計による解析結果の評価

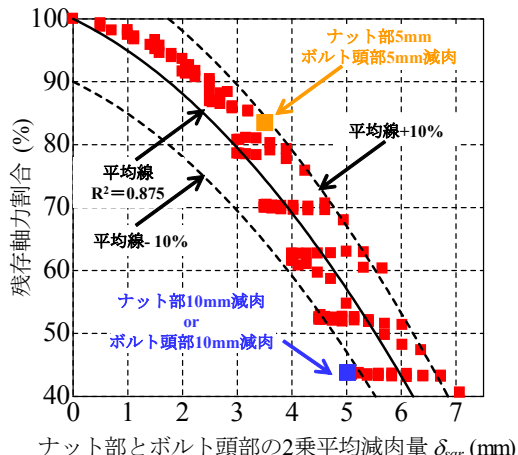


図 11 2 乗平均減肉量による解析結果の評価

用いて評価を行った場合

(2)で得られた結果より、残存軸力の割合は減肉量の2乗に比例して変化していると考えられる。これより、ナット部及びボルト頭部の両側に減肉が生じた場合の評価パラメータとして、式(1)に示す2乗平均減肉量を用いて評価を行った。

2 乗平均減肉量 δ_{sqr}

$$\delta_{sqr} = \frac{\sqrt{(\delta_{N_ave})^2 + (\delta_{H_ave})^2}}{2} \quad (1)$$

図 11 の解析結果について、2 乗平均減肉量 δ_{sqr} を用いて再評価を行った結果を図 10 に示す。図中には2次関数を用いて最小二乗法より算出した回帰曲線とその回帰曲線より±10%とした曲線も併せて示す。この回帰曲線の相関係数は0.88程度であり、高い相関性を示しており、ほとんどのプロットが±10%の範囲内に入っていることがわかる。これより、本節で提案した2乗平均減肉量を用いることで、ナット部及びボルト頭部の両側が減肉した場合の残存軸力の割合を、±10%程度の範囲で評価できると考えられる。

提案した2乗平均減肉量の適用性を検討するために、著者らがこれまでにを行った、実橋において腐食減肉が生じた高力ボルトの残存軸力計測結果と比較検討を行った。2乗平均減肉量を用いて実腐食高力ボルトの残存

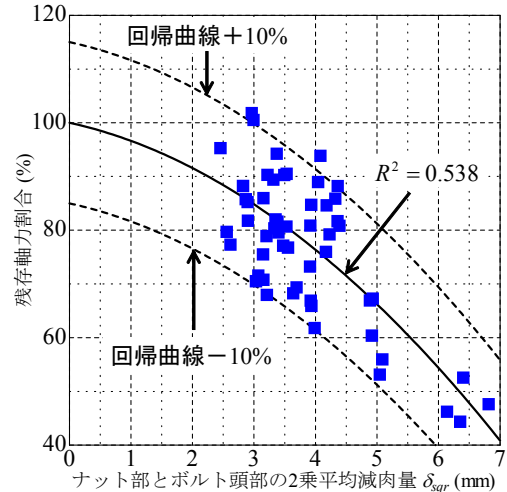


図 12 2 乗平均減肉量による計測結果の評価

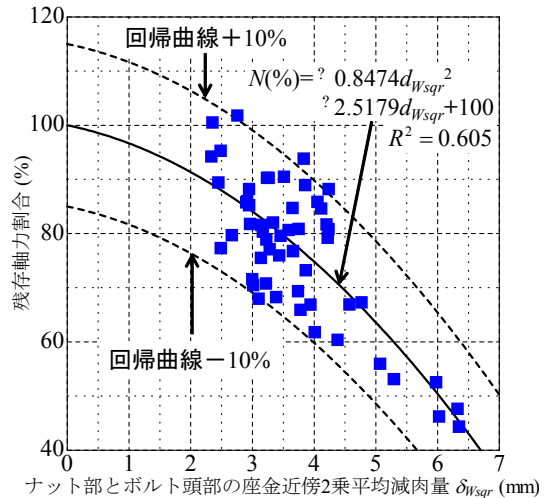


図 13 座金近傍減肉量を用いた

2 乗平均減肉量による解析結果の評価

軸力割合の評価結果を図 12 に示す。図中には最小二乗法を用いて算出した回帰曲線とその回帰曲線より±15%とした曲線も併せて示す。図より、2 乗平均減肉量の値が増加するに従い、残存軸力割合も低下していることがわかる。また、評価結果には、バラつきが見られ、この要因としては、添接板や座金といったナット部やボルト頭部以外の腐食減肉の影響やナット部やボルト頭部の腐食減肉形状の影響であると考えられる。

そこで、腐食減肉形状の影響を考慮するために、座金近傍の減肉量を用いて図 10 の腐食高力ボルトの残存軸力計測結果の再評価を行った。図 13 に再評価結果を示す。全平均減肉量を用いた図 12 と比較して、相関係数が0.538から0.605に向上しており、座金近傍減肉量による2乗平均減肉量を用いることで、腐食減肉量と残存軸力の相関性が向上する傾向が得られたといえる。また、図中の破線で示す±15%の範囲に多くの実験結果がプロットされており、提案した手法を用いることで、減肉に伴う残存軸力を概ね±15%程度の範囲で推定できるといえる。なお、本提案手法は全平均減肉量と比べて計測範囲が少なく、ノギス等を用いて簡易に計測が可能なた

め、汎用性の高い実用的な評価法であると考えられる。

<引用文献>

- ① 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集, No.668/I-54, pp.299-311, 2001.

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, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.503-513, 2016. (査読有)
- 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, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.725-735, 2013. (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 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, St-80, November 25th, 2015.
- ② 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, St-74, November 25th 2015.
- ③ 田井政行, 下里哲弘, 有住康則, 山下修平, 大塚恵: 腐食により偏って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 回年次学術講演会, I-332, 2015 年 9 月 18 日.
- ④ 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, I-494, 2015 年 9 月 16 日.
- ⑤ 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, I-16, 2015 年 3 月 7 日.
- ⑥ 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部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, I-17, 2015 年 3 月 7 日.
- ⑦ 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縄会第 4 回技術研究発表会, pp.104-105, 2014 年 10 月 30 日.

- ⑧ 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に基づく残存軸力評価法の解析的検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, I-608, 2014 年 9 月 12 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田井 政行 (TAI, Masayuki)
木更津工業高等専門学校・環境都市工学科・助教
研究者番号: 70646596

(2) 連携研究者

有住 康則 (ARIZUMI, Yasunori)
琉球大学・工学部環境建設工学科・教授
研究者番号: 90109306

下里 哲弘 (SHIMOZATO, Tetsuhiro)
琉球大学・工学部環境建設工学科・准教授
研究者番号: 90452961

(3) 研究協力者

山下 修平 (YAMASHITA, Shuhei)
琉球大学・工学部環境建設工学科・博士後期課程学生