

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：18001

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13822

研究課題名（和文）腐食高力ボルト摩擦接合継手の実用的な残存耐荷力評価法の構築

研究課題名（英文）Evaluation of residual performance of corroded friction type joints with high-strength bolts

研究代表者

田井 政行 (Tai, Masayuki)

琉球大学・工学部・助教

研究者番号：70646596

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：腐食減肉が生じたトルシアボルトの残存軸力について、ボルト頭部とナット部の腐食減肉に伴う軸力低下メカニズムを解析的に明らかにした。そして、解析結果に基づき、ナット換算減肉量を用いた2乗和平方根減肉量による残存軸力評価法を提案した。実腐食したトルシアボルトの腐食減肉量と残存軸力の計測結果との比較より $\pm 15\%$ 程度の精度で残存軸力を評価できることを示した。腐食連結板を有する摩擦接合継手のすべり耐力を評価可能な解析モデルを構築した。その結果、減肉に伴い連結板で降伏が生じることで軸力を減少させ、すべり耐力を低下させることを示した。解析結果に基づき、腐食換算断面積によりすべり耐力を評価できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、重度の腐食劣化により大規模な補強や通行止め等が行われており、腐食劣化した鋼橋の安全性に対する適切な維持管理手法の構築が求められている。本研究結果は、鋼橋の中でも腐食劣化が著しい高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力評価における有益な知見を示している。提案している評価手法を用いることで、鋼橋において腐食減肉が生じた高力ボルトや連結板の取替えといった診断の一助になるものと考えている。

研究成果の概要（英文）：Mechanism of clamping force reduction for tension-control bolts was analytically clarified. Based on the analysis results, the evaluation method of residual clamping force by the root value of summation of square of thickness reduction was proposed. This method revealed that the residual clamping force of actual tension-control bolts can approximately estimate with $\pm 15\%$ accuracy. The analysis model which can evaluate the slip strength of friction type joints with corroded spliced plates was established. The analysis results showed that the yielding of corroded splice plates caused the clamping force reduction of high strength bolts, then the slip strength decreased. Based on the analysis model, the e diagnostics for the friction type joints with corroded spliced plate was proposed.

研究分野：鋼構造

キーワード：腐食 摩擦接合継手 ボルト軸力 すべり耐力

1. 研究開始当初の背景

近年、重度の腐食劣化により大規模な補強や通行止め等が行われており、腐食劣化した鋼橋の安全性に対する適切な維持管理手法の構築が求められている。鋼橋の高力ボルト摩擦接合継手は、他の部位に比べ腐食劣化が著しく進行している場合が多い。腐食減肉が生じた高力ボルト摩擦接合継手は、継手耐力を低下させるため、橋梁の安全性を確保するためにも、腐食減肉が生じた高力ボルト摩擦接合継手の残存性能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劣化速度が著しく速い、高力ボルト摩擦接合継手を対象に、継手を構成する各部材の腐食減肉量・減肉分布と耐荷力の関係を明らかにし、高力ボルト摩擦接合継手の残存耐荷力評価法を提案することを目的とする。研究の実施に際しては、実橋で実際に腐食した高力ボルト摩擦接合継手を用い、これまでの研究代表者らの研究成果である高力ボルトの腐食減肉量に応じた残存軸力評価の信頼性向上を目的とした実験及び解析的研究を行う。次に腐食高力ボルト摩擦接合継手の耐荷力特性を明らかにするために、腐食摩擦接合継手の耐荷力を評価可能な解析モデルを構築する。そして、構築した解析モデルを用いて、各部材の減肉をパラメータとしたパラメトリック解析を行い、腐食高力ボルト摩擦接合継手の残存耐荷力評価法を提案する。

3. 研究の方法

本研究の解明概要及び実施手順を以下に示す。

(1) トルシアボルトの残存軸力評価法の構築

①有限要素解析を用いた腐食減肉に伴う軸力低下メカニズムの解明と軸力評価手法の提案

トルシアボルトにおける腐食減肉が残存軸力の低下に及ぼす影響を明らかにするために、有限要素解析を用いて腐食減肉に伴う軸力低下メカニズムの解明を行う。S10TM22のトルシアボルトを再現した解析モデルを図1に示す。ソリッド要素を用い、S10TM22のトルシアボルト、連結板及び母材について、対称性を考慮して1/6モデルで作成する。境界条件は、図1(b)に示すように母材及び連結板の側面を鉛直方向に支持し、母材、連結板、座金、ナット、ボルト軸の対称面を円周方向に、ボルト軸中心については半径方向を固定する。なお、各部材間には接触を定義している。ボルト軸力は設計軸力の10%割増である226kNとなるようボルト軸部に強制変位を与えている。材料定数は、弾性係数を206GPa、ポアソン比を0.3とし、降伏応力は高力ボルトでは900MPa、母材・連結板では250MPaとし、完全弾塑性体でモデル化している。解析パラメータを図2に示すように、ボルト頭部の側面減肉量 Δ_{HS} 、高さ減肉量 Δ_{HH} 、ナット部では側面減肉量 Δ_{NS} として、減肉部の要素を削除して解析を行う。

上記の解析結果に基づき、腐食トルシアボルトの残存軸力評価法の提案を行う。

②提案手法の評価精度の検証

①で提案した評価手法の評価精度を検証するために、実腐食トルシアボルトの減肉量及び残存軸力計測を行う。トルシアボルトは、2橋の塗装鋼橋から採取した。写真1に採取したボルト例を示す。なお、残存軸力計測には、ひずみゲージ法(写真2)を用いた。計測結果より、軸力評価精度の検証を行う。

(2) 腐食高力ボルト摩擦接合継手の残存耐荷力評価法の提案

①腐食連結板を有する摩擦接合継手のすべり耐力特性

腐食した高力ボルト摩擦接合継手の耐荷力を評価可能な有限要素解析モデルを構築するために、図3に示す模擬腐食連結板を有する摩擦接合試験体を作成し、減肉形状計測とすべり試験を行う。減肉形状計測には、自動レーザー形状計測装置を用いる。すべり試験では、母材間の開口変位を計測しながら載荷試験を行い、図4に示す荷重と開口変位の関係からすべり荷重を求め、下式を用いてすべり係数 μ を求め、②の解析モデルに用いることとした。

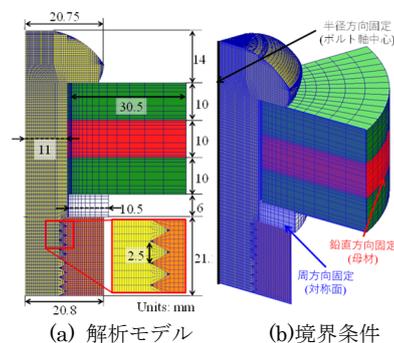


図1 解析モデル概要

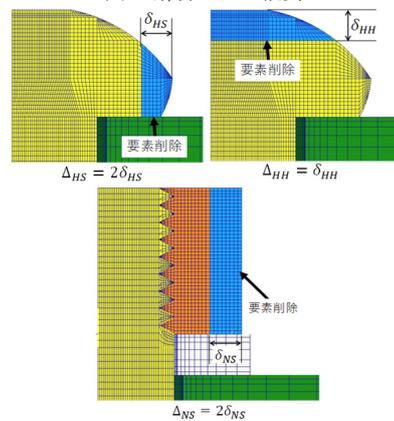


図2 解析パラメータ



写真1 採取したボルト例 写真2 ひずみゲージ法

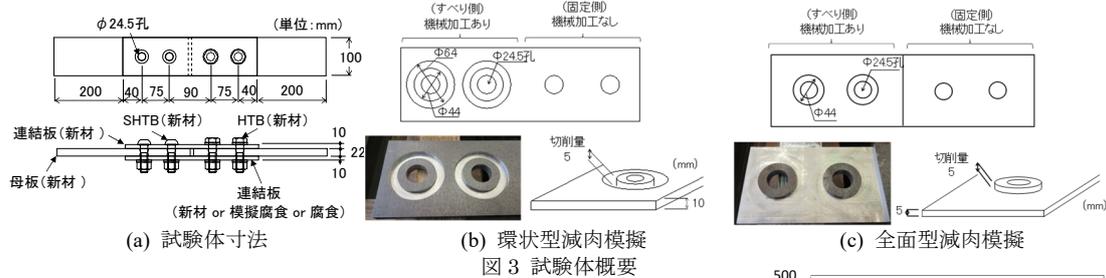


図3 試験体概要

$$\mu = \frac{P}{nmN} \quad (1)$$

ここで、 P :すべり荷重、 n :ボルト本数、 m :摩擦面数、 N :ボルト軸力(すべり発生時)である。

②有限要素解析を用いた腐食摩擦接合継手のすべり耐力低下メカニズムの検討

①で実施したすべり試験を再現した図5に示す有限要素解析モデルを作成し、すべり挙動を再現可能な解析モデルを構築する。なお、解析モデルは対称性を考慮して1/2モデルとする。減肉形状は図6に示すように、①の模擬腐食連結板と同様な環状型と全面型とし、ボルト軸力なども実験時と等しい値を導入し、有限要素解析を行った。解析結果より、連結板の降伏挙動やボルト軸力の低下特性を明らかにし、すべり耐力低下メカニズムを明らかにする。

③パラメトリック解析による腐食摩擦接合継手の残存耐力評価法の検討

②で構築した解析モデルを用いて、連結板の減肉量やすべり係数をパラメータとしたパラメトリック解析を実施し、腐食摩擦接合継手の残存耐力評価法の提案を行う。

4. 研究成果

本研究の研究成果を以下に示す。

(1) 実腐食高力ボルトの残存軸力評価法の構築

トルシアボルトのパラメトリック解析結果を図7に示す。横軸は側面及び頭部高さの減肉量 Δ 、縦軸は導入軸力226kNに対する減肉後の軸力との比より算出した残存軸力割合である。図より、ナット側面減肉量だけでなく、ボルト頭部高さ減肉量が増大するに従い、残存軸力が低下することがわかる。なお、ボルト頭部では側面減肉量と比べて高さ減肉量の方が残存軸力低下に支配的であった。また、ボルト頭側面とナット側面の減肉の影響を比較すると、ナット部の方が残存軸力の低下量が大きくなる傾向が得られた。この各部位の減肉量と残存軸力の低下量の違いについて、変形挙動に着目して検討を行った。

ボルト頭部及びナット部の減肉に伴う残存軸力低下メカニズムを解明するために、ボルト頭部及びナット部近傍の変形挙動に着目して検討を行った。図8に減肉前後の変形挙動の比較を示す。図中のコンターは変位量を示している。ボルト頭部に着目すると、側面の減肉によって連結板とボルト頭部との接触面積が減少することで、連結板の孔近傍で局所変形が生じていることがわかる。一方、ボルト頭部高さが減肉した場合、ボルト頭部の剛性が低下するため、ボルト頭部の変形が増大している。この変形により、ボルト軸部の伸びが減少することで、導入されたボルト軸力が低下したと考えられる。一方、ナット部では側面が減肉することで、ボルト頭部と同様に孔近傍の連結板で局所変形が生じることに加えて、ナットと連結板に挟まれる座金において回転変形が生じていることがわかる。ナット側では、この座金の回転変形の影響から、座金を使用されていないボルト頭側と比べて、残存軸力低下量が大きくなると考えられる。

減肉したトルシアボルトの残存軸力評価法を検討するために、図7の結果を減肉量の2乗値で再整理した結果を図9に示す。図中には各ケースの回帰直線も併せて示す。図より、減肉量の

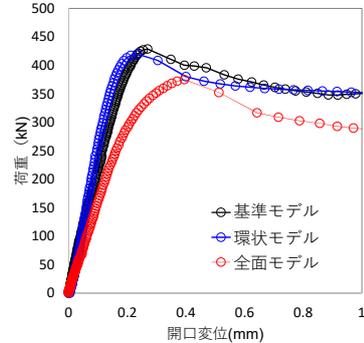


図4 荷重 - 開口変位の関係例

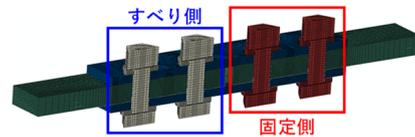


図5 摩擦接合継手解析モデル

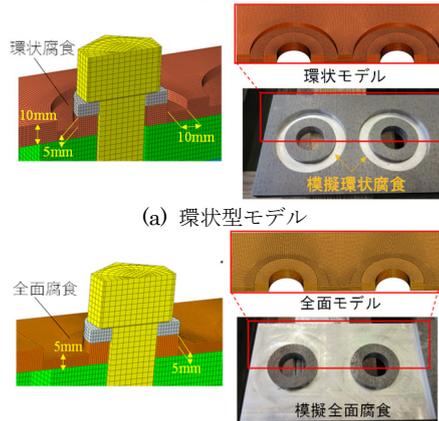


図6 模擬腐食連結板モデル

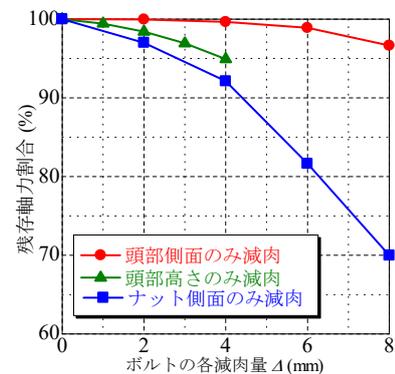


図7 トルシアボルトの各減肉量をパラメータとした解析結果

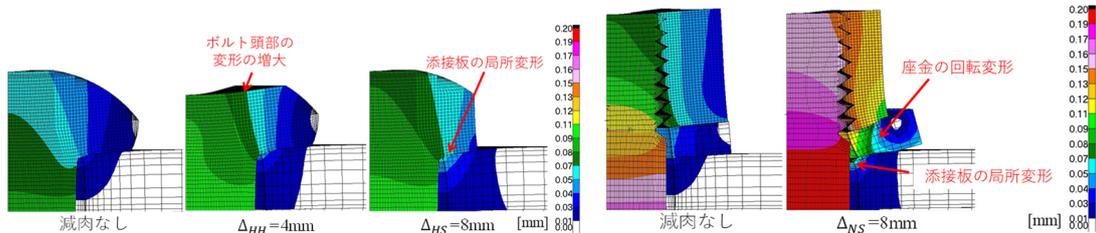


図8 減肉前後のボルト頭部とナット部の変形挙動の比較

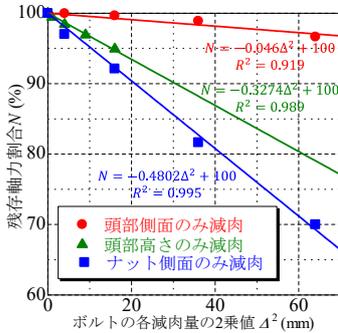


図9 減肉量の2乗値による
図7の再評価

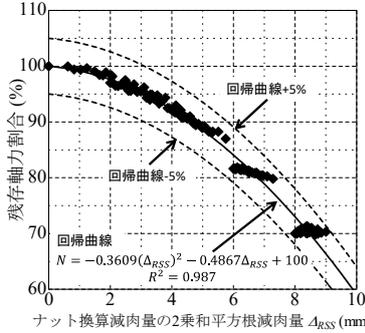


図10 ナット換算減肉量の
2乗和平方根減肉量と残存軸力割合

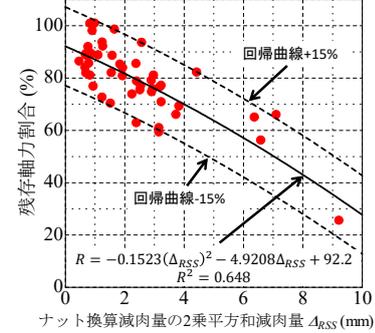


図11 提案手法による実腐食ボルトの
減肉量と残存軸力割合

2乗値と残存軸力の関係は線形関係にあるといえる。そこで、ナット部の減肉量の回帰直線の勾配に対する各ケースの勾配の比を式(2)及び式(3)より算出し、式(4)に示すそれぞれの減肉量の2乗値より算出した2乗和平方根減肉量 Δ_{RSS} を用いた評価手法の提案を行った。

- ・ボルト頭部側面減肉量の2乗値のナット減肉量への換算

$$(\Delta_{HSmod})^2 = 0.0460/0.4802 \cdot (\Delta_{HS})^2 = 0.096(\Delta_{HS})^2 \quad (2)$$

- ・ボルト頭部高さ減肉量の2乗値のナット減肉量への換算

$$(\Delta_{HHmod})^2 = 0.3274/0.4802 \cdot (\Delta_{HH})^2 = 0.682(\Delta_{HH})^2 \quad (3)$$

- ・各部位のナット換算減肉量の2乗和平方根減肉量

$$\Delta_{RSS} = \sqrt{(\Delta_{NS})^2 + (\Delta_{HSmod})^2 + (\Delta_{HHmod})^2} \quad (4)$$

各部位のナット換算減肉量の2乗和平方根減肉量による評価手法の妥当性を検証するために、ボルト頭部高さ減肉量、ボルト頭部側面減肉量、ナット側面減肉量の各減肉量を組み合わせた125ケースのパラメトリック解析を行った。提案手法による評価結果を図10に示す。図の横軸はナット換算減肉量の2乗和平方根減肉量、縦軸は残存軸力割合である。図中には回帰曲線と回帰曲線の $\pm 5\%$ とした領域についても併せて示す。図より全ての結果が $\pm 5\%$ の領域にプロットされており、提案手法により減肉したトルシアボルトの残存軸力を評価できる可能性が示された。

提案手法の評価精度を検証するために、腐食トルシアボルトの減肉量と残存軸力の計測を行った。腐食トルシアボルトの Δ_{RSS} と設計軸力205kNに対する計測軸力の残存軸力割合の関係を図11に示す。図中には回帰曲線を実線で、回帰曲線の $\pm 15\%$ を破線も併せて示す。回帰曲線の決定係数は0.648で、バラつきを有するもののほとんどの計測結果が破線内にプロットされており、 Δ_{RSS} を用いることで腐食トルシアボルトの残存軸力を $\pm 15\%$ の精度で推定できることが示唆された。

(2) 腐食高力ボルト摩擦接合継手の残存耐荷力評価法の提案

模擬腐食連結板を有する摩擦接合継手のすべり試験における母材の開口変位と荷重の関係を図12に示す。図中には解析結果も併せて示す。図よりいずれのケースにおいても実験・解析結果は概ね等しい結果となっており、本解析モデルにより概ねすべり挙動を再現できると考えられる。すべり耐力を比較すると、健全モデルでは409kN、環状片側では397kN、全面片側では368kNとなり、健全モデルと比較して環状片側では約3%、全面片側では約10%のすべり耐力低下がみられた。そこで、この解析モデルを用いてすべり耐力の低下メカニズムの検討を行った。

高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力は、ボルト軸力に依存することが知られている。それゆえ、ボルト軸力が低下した場合、すべり耐力が低下するといえる。そこで、载荷中のボルト軸力に着目し、連結板の減肉がすべり耐力を低下させた要因について検討を行った。図13に実験及び解析より得られた高力ボルトの軸力変化を示す。それぞれの挙動に着目すると、外側ボルトの軸力低下率は3つのケースでほとんど差異はなく、初期軸力の4%程度であった。一方、内側ボルトについては、健全モデルでは4%程度であったが、環状モデルでは6%、全面モデルでは7%と、軸力低下量に差異が見られた。このボルト軸力低下が連結板の減肉に伴うすべり耐力低下の主要因であると考えられる。そこで、ボルト軸力の低下要因について、減肉の有無による連結板の応力状態の比較により検討を行った。

図14にすべり発生時の連結板のvon Mises応力分布を示す。各ケースを比較すると、健全モデルと比較して、環状モデルや全面モデルの外側ボルト孔付近では、降伏領域が若干大きくなっ

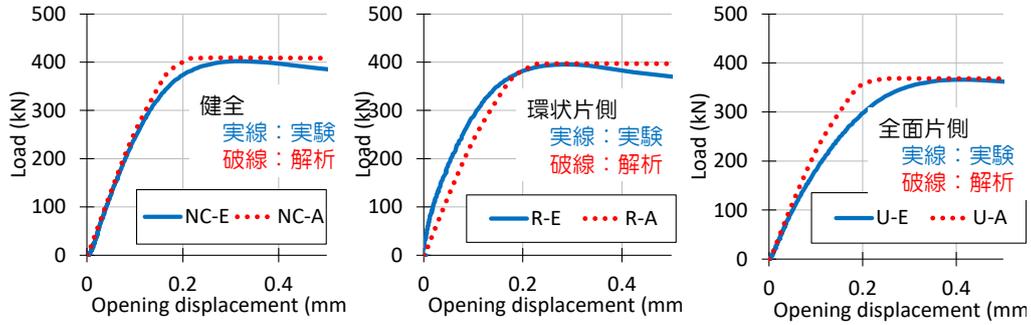


図 12 すべり試験及び解析による荷重と開口変位の関係

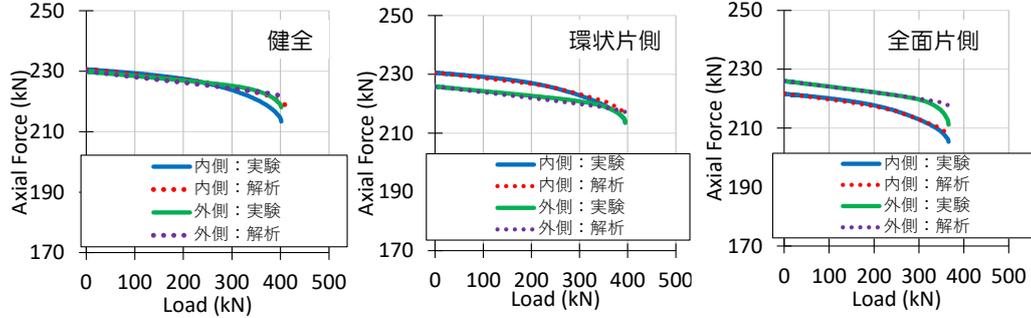


図 13 载荷中のボルト軸力の変化

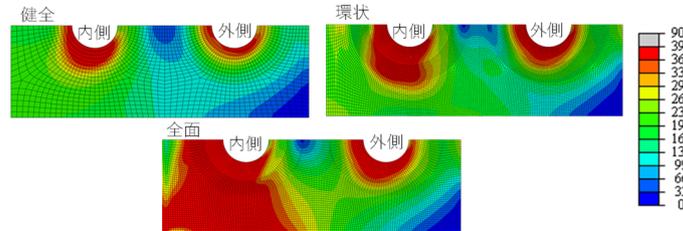


図 14 すべり発生時の連結板の von Mises 応力分布

ている程度で、大きな差異が生じていなかった。一方、内側ボルト孔付近では健全モデルとの差異が顕著に表れ、その挙動は断面が最小である純断面位置から孔後面に沿って広がっているといえる。ボルト軸力の低下挙動と比較すると、降伏領域の大きさにそれほど差異がなかった外側ボルトでは、ボルト軸力の低下率も3つのケースで同程度であったが、内側ボルトでは、この降伏領域の違いが軸力の低下に影響を与えていると考えられる。すなわち、降伏領域が広がることで、ポアソン効果によって、連結板の板厚が減少し、軸力の低下を誘発することですべり耐力の低下を引き起こしたと推察される。

上述するように、内側ボルト孔近傍の降伏範囲の拡大がボルト軸力の低下を誘発し、すべり耐力低下を生じさせていたと考えられることから、この孔周りの減肉量よりすべり耐力の評価を行う。本研究では、図 15 に示す内側ボルトの孔後面の範囲について腐食換算断面積 $A_c (= A_r + A_w)$ を算出し、片側連結板片面のすべり耐力 $P_{cb} (= \mu n N)$ と腐食減肉が大きい片側連結板の降伏耐力 $F_{cy} (= \sigma_y A_c)$ との比 $\beta_{cs} (= P_{cb}/F_{cy})$ と保有すべり耐力 P_h と基準すべり耐力 $P_b (= \mu n m N)$ との比 S_r により評価を行うこととした。

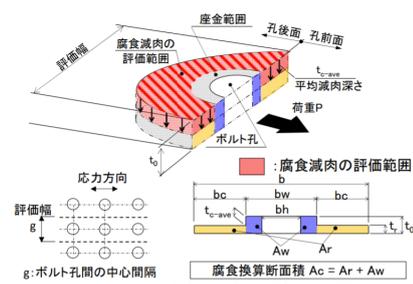


図 15 腐食換算断面積の定義

上述の解析モデルを用いて、すべり係数を 0.4 及び 0.6、連結板の減肉深さ 2,4,6mm、連結板の減肉の組み合わせ(片側, 両側, 環状, 全面)としたパラメトリック解析(56 ケース)を実施し、縦軸を S_r 、横軸を β_{cs} として評価した結果を図 16 に示す。図より連結板の降伏により終局に至ったケースを除き、ほとんどの結果が一直線上にプロットされており、本手法により腐食連結板を有する摩擦接合継手のすべり耐力を評価できる可能性が示唆された。

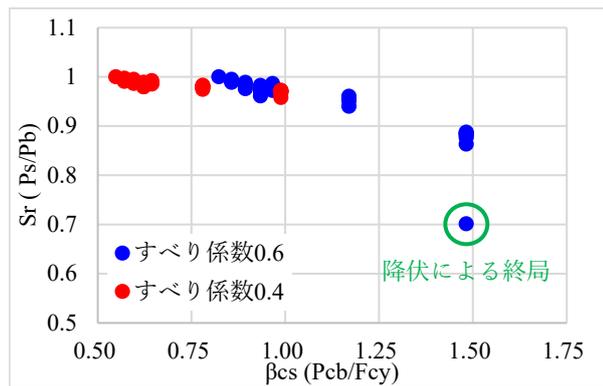


図 16 S_r と β_{cs} による解析結果の評価

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 長嶺由智, 田井政行, 川添優人, 下里哲弘	4. 巻 27
2. 論文標題 架設から17年が経過した高力ボルトの残存軸力	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 316-322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 山下修平, 下里哲弘, 田井政行, 大城泰樹	4. 巻 66A
2. 論文標題 腐食減肉した連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力低下メカニズムに関する解析的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 486-496
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 山下修平, 下里哲弘, 田井政行, 有住康則, 矢吹哲哉	4. 巻 74
2. 論文標題 高力ボルト摩擦接合継手における連結板の腐食減肉形状とすべり耐力特性に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1	6. 最初と最後の頁 359 ~ 375
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.74.359	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 大城泰樹, 山下修平, 田井政行, 下里哲弘, 有住康則	4. 巻 26
2. 論文標題 腐食連結板を有する摩擦接合継手のすべり耐力に関する解析的研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 542 ~ 547
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tai Masayuki, Shimozato Tetsuhiro, Nagamine Yoshitomo, Arizumi Yasunori, Yabuki Tetsuya	4. 巻 144
2. 論文標題 Dependence of Residual Axial Force on Thickness and Shape in Corroded High-Strength Bolts	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002078	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山下 修平、下里 哲弘、田井 政行、大城 泰樹	4. 巻 66A
2. 論文標題 腐食減肉した連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力低下メカニズムに関する解析的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 486 ~ 496
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.66A.486	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田井政行, 長嶺由智, 鶴田滉, 下里哲弘	4. 巻 27
2. 論文標題 腐食減肉量に基づく高力六角ボルトの残存軸力評価手法の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 大城泰樹, 田井政行, 下里哲弘, 山下修平
2. 発表標題 高力ボルト摩擦接合継手の連結板減肉とすべり耐力評価に関する解析的検討
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田井政行, 川添優人, 長嶺由智, 下里哲弘
2. 発表標題 減肉したトルシア形高力ボルトの残存軸力特性に関する解析的検討
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鶴田晃, 田井政行, 下里哲弘, 長嶺由智, 有住康則
2. 発表標題 実腐食減肉形状を考慮した高力ボルトの残存軸力評価法に関する研究
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川添優人, 田井政行, 下里哲弘, 有住康則, 長嶺由智
2. 発表標題 腐食減肉が生じたトルシア型高力ボルトの残存軸力評価に関する解析的検討
3. 学会等名 土木学会西部支部沖縄会第8回技術研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------