

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01525

研究課題名(和文) 腐食した高力ボルト継手構造の耐力診断法の構築と高耐久防食技術の開発

研究課題名(英文) Development of diagnosis method of load capacity of high strength bolted joint structure with corrosion and high endurance corrosion prevention technology

研究代表者

下里 哲弘 (SHIMOZATO, TETSUHIRO)

琉球大学・工学部・教授

研究者番号：90452961

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、腐食した高力ボルト継手構造の耐力診断法の構築および高耐久性の防食補修技術の開発を目的とし、大気環境下の高力ボルトでは異なる腐食減肉形状となることを示し、その腐食減肉形状と実験及び解析で得られた残存軸力との相関分析を行い、残存軸力評価法を導いた。また、高力ボルト周辺で激しく腐食減肉する連結板特有の腐食形状が継手構造の残存耐力に与える影響を評価した。以上の成果より、腐食した高力ボルト継手構造の耐力診断法を構築した。さらに、さび除去効果を持つアルミナと犠牲防食効果を持つ亜鉛の混合粉体を用いた新防食技術であるCS技術に関して各種実験で検証し、実用的且つ高耐久性の防食補修技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、腐食した高力ボルト継手構造の実用的な耐力診断法の構築および腐食した高力ボルト継手構造の高耐久性の防食補修技術の開発を目的として、耐力診断と防食補修技術の両方の成果を達成し、腐食した高力ボルト継手構造の維持管理技術を確立した。

本研究の成果に対する学術的意義としては、先ず、高力ボルトおよび連結板ともに特徴的な腐食減肉形状を示すことから、その耐力評価は容易ではなく、鋼構造工学・維持管理工学の分野で研究途上であったが、本研究により、その腐食減肉形状に応じた残存軸力および継手耐力評価法の構築により、鋼構造物の腐食の弱点である高力ボルト継手構造の安全性評価法を提示したことは学術的価値が高い。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to construct a strength diagnosis method for corroded high-strength bolt joint structures and to develop highly durable anticorrosion repair technology. Corrosion analysis between the corroded thinning shape and the residual axial force was performed, and a method for evaluating the residual axial force was derived. In addition, the effect of the corrosive shape peculiar to the connecting plate, which is severely corroded and thinned around the high-strength bolt, on the residual yield strength of the joint structure was evaluated. Based on the above results, a diagnostic method for corroded high-strength bolt joint structures was constructed. Furthermore, we verified the Cold Spray technology, which is a new anticorrosion technology using a mixed powder of alumina, which has a rust removing effect, and zinc, which has a sacrificial anticorrosion effect, in various experiments, and developed a practical and highly durable anticorrosion repair technology.

研究分野：鋼構造工学、橋梁工学、維持管理工学、腐食防食学

キーワード：腐食 高力ボルト継手構造 高力ボルト軸力 連結板耐力 耐力診断 防食 低温低圧型金属溶射

1. 研究開始当初の背景

重要なインフラである鋼橋や発電施設などの鋼構造物は高度経済成長期に多く建設され、供用から約 50 年経過し、全国で老朽化が問題となっている。鋼構造物の重大な老朽化現象として腐食があり、現在、腐食度と耐力に関する研究が推進されている。鋼構造物の腐食部位は、構造物の耐力上の最重要構造部である高力ボルト継手構造に多く発生しており、特に高力ボルトと連結板で激しく腐食する。それらの腐食原因として、ボルト部はねじとナットの角部の塗膜厚が確保しづらいこと、連結板はボルト周りに飛来塩分や濡れの腐食促進因子が付着滞留しやすいことに起因している。高力ボルトの腐食は軸力低下、連結板の腐食は継手耐力低下が懸念され、腐食したボルト本数によっては構造不安定状態に至る恐れがある。したがって、鋼構造物の安全性に関して腐食した高力ボルト継手部の耐力診断法の構築が急務となっている。

これまでの研究成果として、実環境下の高力ボルトは異なる腐食減肉形状となることを示し、高力ボルトの腐食減肉形状と実験及び解析で得られた残存軸力との相関分析を行い、残存軸力評価法を導いた。今後の課題としては相関性の向上を図り、信頼性のある実用的な耐力診断法の構築である。また、連結板においては高力ボルト周辺で激しく腐食減肉する特徴があるが、この連結板特有の腐食形状が継手構造の残存耐力に与える影響を評価することも求められる。

次に、高力ボルトの残存軸力診断と連結板の耐力診断の結果、安全性が確認された後に行われる防食補修には、早期に再腐食しない高耐久性の防食技術が求められる。その課題として、角部と部材交差の多い高力ボルト継手構造は、完全にさび除去することが困難であり局所に残存さびが存在する。その残存さび状態では現行防食技術の塗装や金属溶射では早期の再腐食が発生する。そこで本研究では、腐食鋼材面に対して高い防食性能を示した亜鉛とアルミナ混合金属粒子を用いた低温低圧型金属溶射「Cold Spray 表面処理技術、以下、CS)」の防食性を検証する。

2. 研究の目的

本研究では、腐食した高力ボルト継手構造の実用的な耐力診断法の構築および腐食した高力ボルト継手構造の高耐久性の防食補修技術の開発を目的としている。この耐力診断と防食補修技術の両方の成果達成により、腐食した高力ボルト継手構造の維持管理技術の確立を目標としている。

3. 研究の方法

研究では、高力ボルト特有の腐食減肉形状に応じたボルト残存軸力評価法および連結板特有の腐食減肉形状が継手耐力に与える影響を明らかにし、腐食した高力ボルトおよび連結板の取替判定に適用可能な耐力診断法を構築する。また、さび除去効果を持つアルミナと犠牲防食効果を持つ亜鉛の混合粉体を用いた新たな防食技術である CS 技術を適用し、局所に残存するさび状態下に対する防食性能を評価し、腐食した高力ボルト継手部の実用的かつ高耐久性の防食補修技術の開発を行う。以上を達成するための研究方法を以下に示す。

(1) 実腐食減肉形状を有する高力ボルトの残存軸力評価

本評価では、実腐食データと実腐食減肉形状を有する高力ボルトに対して、精緻な FEM 解析により、腐食減肉形状と残存軸力の相関分析を行い、実腐食減肉形状を有する高力ボルトの実用的な残存軸力評価法を構築する。

(2) 実腐食減肉形状を有する連結板の残存耐力評価

写真 1 に示すように連結板は、ボルト孔周辺 (座金部周辺) で局所的に腐食減肉が生じ、その影響で継手部の耐荷力低下が懸念される。本評価では、連結板の腐食減肉量と形状を 3D スキャナーで詳細に計測し、図 1 のソリッド要素を用いた FEM 解析を行い、腐食した連結板の荷重伝達特性を明らかにし、実腐食減肉形状を有する連結板の残存耐力評価法を構築する。

(3) 高力ボルト継手部の新防食技術

写真 2 に示す残存するさびに対する CS 技術の防食性を評価する。評価方法は、CS 皮膜形成後、CS 皮膜厚の SEM 観察、アドヒージョン試験で密着力を評価する。なお、CS はアルミナ：亜鉛＝40%：60%、CS ノズル径 5mm、粒子速度 300m/s・ガス圧力 0.5MPa・瞬間温度 400℃とする。

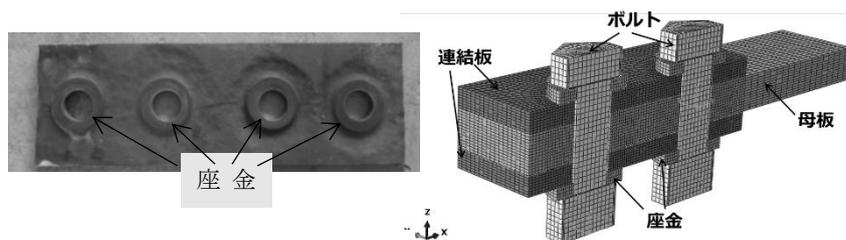


写真 1 連結板の腐食減肉形状

図 1 FEM 解析モデル

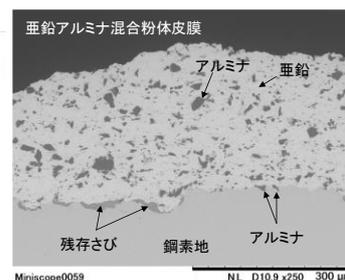


写真 2 さび面の CS 皮膜

4. 研究成果

(1) 実腐食減肉形状を有する高力ボルトの残存軸力評価

本評価では、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目的に、精緻な FEM 解析により、ナット部とボルト頭部の両側に減肉が生じた場合及び腐食減肉の影響が考慮可能な残存軸力評価法の検討を行い、残存軸力計測結果と腐食高力ボルトの減肉量の相関性の分析を行った。本研究で得られた成果を図 2、図 3 および図 4 に示し、その結論を以下に示す。

- ① 図 2 の FEM 解析より、ナット部とボルト頭部の両方に腐食減肉が生じた高力ボルトの残存軸力評価法は、ナット部とボルト頭部の減肉量の 2 乗和平方根減肉量を提案した。
- ② 3D スキャナを用いて実腐食減肉形状を再現した FEM 解析より、図 3 に示す座金から 8mm の高さの範囲の平均減肉量を用いることで、残存軸力に及ぼす減肉形状の影響を考慮可能であることを示した。
- ③ 図 4 に示すボルト頭部とナット部の座金から 8mm の高さの範囲の減肉量を用いて算出した座金近傍の 2 乗和平方根減肉量 δ_{RSSW} を用いることで、実腐食した高力ボルトの残存軸力を $\pm 15\%$ 程度の精度で評価できることを示した。

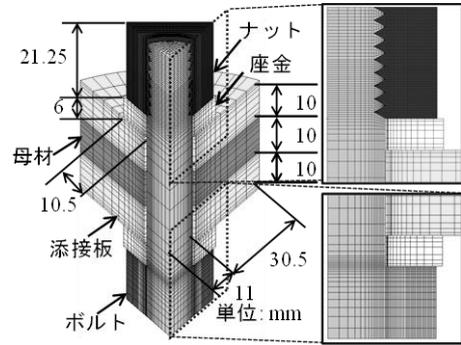


図 2 FEM モデル

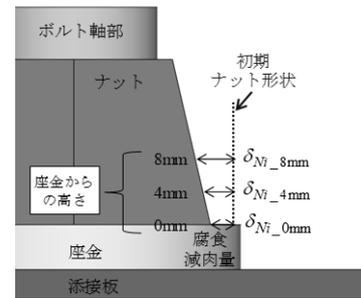
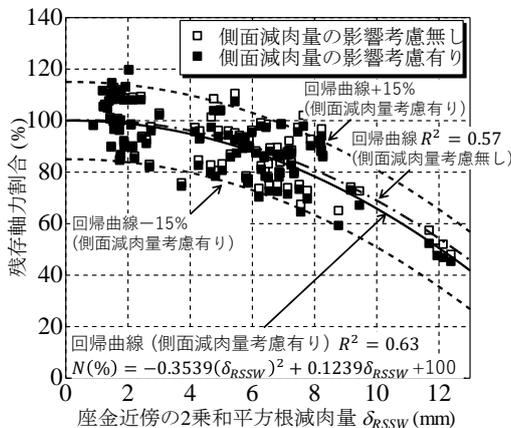
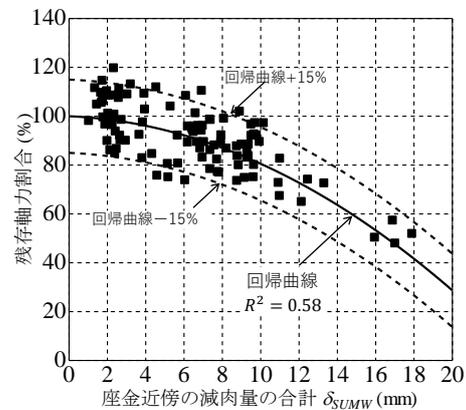


図 3 減肉量の計測位置と定義

なお、上記結論は実橋より採取した高力ボルト(首下長さ 70mm 及び 75mm)の残存軸力及び減肉量の調査結果に基づくものであり、他の首下長さのボルトへの適用に当たっては、さらなる検討が必要である。



(a) 座金近傍の 2 乗和平方根減肉量による評価



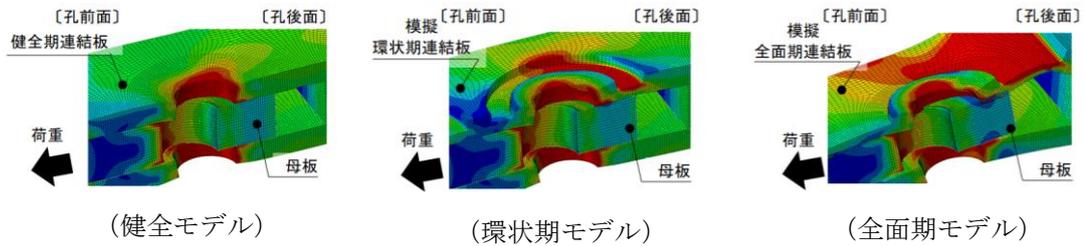
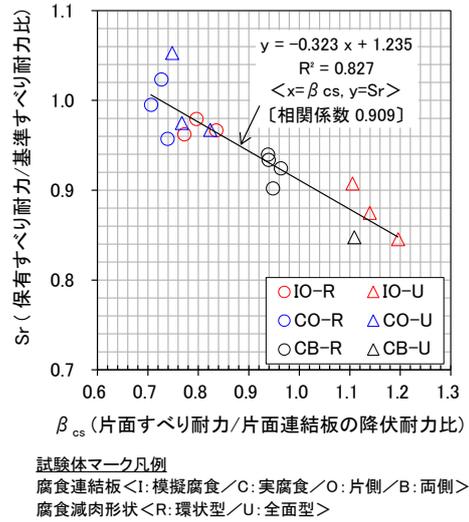
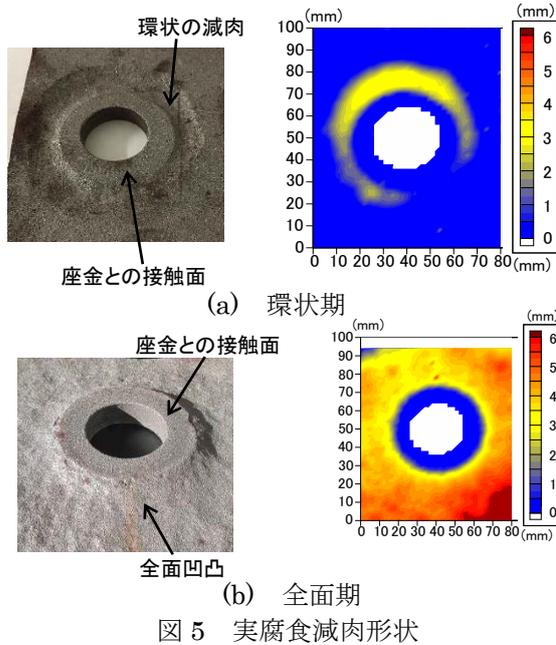
(b) 座金近傍の減肉量による評価

図 4 座金近傍の減肉量と残存軸力の関係

(2) 実腐食減肉形状を有する連結板の残存耐力評価

本評価では、腐食連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手におけるすべり耐力解析を行い、連結板の腐食減肉形状に応じた連結板の応力性状及び降伏性状と変形状、さらに、それに伴う軸力低下が連成した挙動について検証した。本研究で得られた成果を図 5、図 6 および図 7 に示し、その結論を以下に示す。

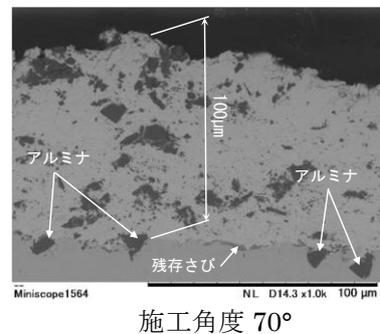
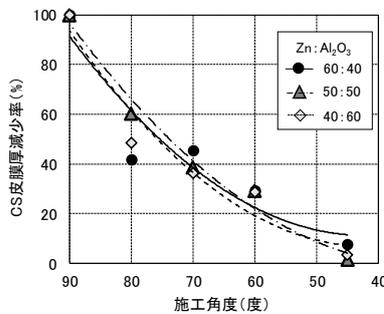
- ① 図 5 に示す連結板の腐食減肉が健全期→環状期→全面期と進行するに伴って、孔後面の直応力と孔前面のせん断応力が増加し、塑性域の拡がりは大きくなり、軸力が低下し、図 6 に示すように連結板の耐力の低下に至る。
- ② 腐食の進展により異なる腐食減肉形状の連結板を有する高力ボルト摩擦接合の軸力低下メカニズムは、図 7 に示す接触面における孔後面側の塑性域の拡がりにより連結板が圧縮変形し、高力ボルトの軸長が短くなるためである。よって、腐食減肉が健全期→環状期→全面期と進行するに伴い接触面の塑性域は拡がるため、軸力低下も大きくなり、連結板の耐力も低下する。



(3) 高力ボルト継手部の新防食技術

本研究では、さび除去効果を持つアルミナと犠牲防食効果を持つ亜鉛の混合金属粉体を用いた低温低圧型金属溶射技術 (Cold Spray) を適用し、残さび面に対する CS 防食技術の検証を目的に、写真 3 に示すように実構造物の施工条件下での CS 皮膜性能の検証を行った。本研究で得られた成果を図 8 に示し、その結論を以下に示す。

- CS ノズル径を 5mm と 7mm を用いて、そのノズル径に応じた粒子速度を計測した結果、粒子速度は超音速より遅くなる結果となったが、防食性の評価指標である CS 皮膜の密着性は低下しなかった。なお、ノズル径の拡張により金属粒子の噴出量が多くなるため、CS 皮膜厚の増加や CS 施工速度を向上できる可能性を確認できた。また、施工角度が 90° から角度が小さくなる程、成膜性は低下した。よって、防食性維持の観点により、施工角度は施工面に対して 90° を基本とし、70° までを許容角度とすることを提案した。
- 施工時の移動速度が速いほど、皮膜厚が低下する傾向が認められた。残さび部への防食技術としては成膜性・効率性・防食性の確保の観点から、施工速度 5mm/s での施工が最適であると考えられる。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 田井政行, 長嶺由智, 鶴田滉, 下里哲弘	4. 巻 Vol. 27, No. 106
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 -

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 土木学会構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 487-496
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 日和祐介, 下里哲弘, 加藤祐介, 小野秀一, 木村雅昭, 中野麻衣子	4. 巻 66A
2. 論文標題 腐食した鋼桁端部へのCold Spray防食技術に関する実証	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 388-399
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 Vo. 74, No. 3
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 (構造・地震工学)	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) 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 田井政行, 加藤祐介, 下里哲弘, 淵脇秀晃	4. 巻 第26巻
2. 論文標題 高力ボルトへの防食皮膜成膜手法と膜厚測定に関する試み	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 365-370
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 大城泰樹, 山下修平, 田井政行, 下里哲弘, 有住康則	4. 巻 第26巻
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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 新田健太, 坂崎稜, 田井政行, 下里哲弘
2. 発表標題 低温低圧型溶射 (コールドスプレー) の施工速度と防食皮膜の成膜特性に関する研究
3. 学会等名 土木学会西部支部沖縄会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂崎稜, 下里哲弘, 田井政行
2. 発表標題 鋼橋の高力ボルト継手部に対する防食皮膜性能の基礎的研究
3. 学会等名 土木学会西部支部沖縄会
4. 発表年 2020年

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 土木学会令和元年度全国大会 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 土木学会令和元年度全国大会 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, 矢吹哲哉
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 加藤祐介, 下里哲弘, 田井政行, 有住康則, 押川渡
2. 発表標題 亜鉛アルミ混合のCold Spray 工法におけるアルミナの防食機能に関する電気化学特性
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

〔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
研究分担者	田井 政行 (TAI MASAYUKI) (70646596)	琉球大学・工学部・助教 (18001)	
研究分担者	押川 渡 (OSHIKAWA WATARU) (80224228)	琉球大学・工学部・教授 (18001)	
研究分担者	有住 康則 (ARIZUMI YASUNORI) (90109306)	琉球大学・工学部・教授 (18001)	

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
---------	---------