

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02235

研究課題名（和文）超高耐久性メカニカルファスナーによる鋼構造物メンテナンスの改善

研究課題名（英文）Improving maintenance for steel structures with ultra-high durability mechanical fasteners

研究代表者

山口 隆司（Yamaguchi, Takashi）

大阪公立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50283643

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）：本研究は、鋼構造の防食性向上に資する無突出・砂時計型ボルトセット（以下、DSF）の開発を目的に、M22-F8T相当の締結能力を有し、ねじ形状や締付穴形状を解析的に検討した。また、その試作DSFを用いて引張・せん断・締結性能確認試験および摩擦接合継手への適用性の検討を行った。その結果、掛かり山数は少なくとも13山以上、回転角法による軸力管理などの条件を満たす場合に、DSFは目標とする性能を確保できることを明らかにした。また、DSFはボルトとナットが全区間に渡って嵌合する構造のため、長尺にすることでM22-F10T相当のせん断耐力を期待できることも明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の高力六角ボルトを用いた部材接合部では、ボルト頭部およびナットの角部を起点とした腐食進行が問題となる。I桁のような開断面部材の接合部に、本研究で提案したDSFを適用することで、部材形状に依存しない防食性能を大幅改善した摩擦接合継手を実現できる。これにより、鋼橋の損傷そのものを減少させることができ、鋼構造物メンテナンスに関わる人的・物的コストを大幅に削減することができる。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to develop a non-projecting, hourglass-shaped bolt set (hereafter referred to as "DSF") that improves the corrosion resistance of steel structures. Tensile, shear, and fastening performance tests were conducted using a prototype DSF, and its applicability to frictional joints was investigated. The results clarified that the DSF can achieve the target performance when 13 or more threads are engaged and the axial force is controlled using the rotation angle method. In addition, the DSF's structure, which allows the bolt and nut to engage along its entire length, can provide shear strength equivalent to that of an M22-F10T when extended to a longer length.

研究分野：構造工学・地震工学

キーワード：高力ボルト 摩擦接合継手 メカニカルファスナー

1. 研究開始当初の背景

日本の道路橋の多くは高度経済成長期に建設され、建設後 50 年を経過する道路橋 (2m 以上) の割合は今後更に増加する。また、全道路橋の 70% は市町村道にあり、地方公共団体が管理している。このような状況下にある構造物の維持管理方法は LCC の観点から損傷を早期に発見して補修する予防保全型が望ましい。その一方、地方公共団体では財政的な理由から、必ずしも点検直後に補修ができないことに加え、技術者の不足・不在から予防保全型のメンテナンスを実施するのは難しい。それ故、構造物の耐久性を高め、損傷そのものを減少させることが重要となる。本研究が対象とする鋼橋においては、部材接合部の耐腐食性能を大幅に改善することが効果的であり、突出部が多く腐食の起点となり易い高力ボルトセットの防食性を高めることが鍵となる。研究代表者らはこれまでに、ボルト頭部が平滑で部材表面の塗膜厚を確保できる皿型高力ボルトを開発し、内面施工が可能な閉断面部材を中心に、防食塗装の耐用年数を向上させている。皿型加工孔の加工方法や品質管理方法など製作上の課題も解決し、実構造物への適用事例も増えつつある。しかしながら、I 桁などの開断面部材ではナット部が腐食するため、高力六角ナットを用いる皿型高力ボルトでは完全な防食を期待できないのが課題である。

2. 研究の目的

本研究では、図 1 に示すような、ボルトとナットの両方が皿型形状を有する砂時計型ファスナー (以下、DSF: ダブルスピンドルファスナー) の開発に取り組んだ。従来の高力六角ボルトセットと同等の耐荷性・疲労耐久性を確保しつつ、部材形状に依らず卓越した防食性を発揮することで、鋼構造物のメンテナンス負荷を大幅に削減することを狙い、検討を進めた。また、DSF 単体の研究に留まらず、DSF を実装した部材継手の耐荷性も評価し、その実用性も検討した。

具体には、下記に示す項目に取り組んだ。

- 1) DSF のファスナー内部機構 (ねじ形状、ナット形状など) の開発
- 2) 安定した軸力導入を可能とする専用トルクレンチの開発、締付特性評価
- 3) DSF 自体の引張抵抗・せん断抵抗の評価
- 4) DSF 摩擦接合継手の限界状態の検討

3. 研究の方法

- 1) DSF のファスナー内部機構 (ねじ形状、ナット形状など) の開発

DSF は、図 2 に示すような皿型ボルトと皿型筒ナットを組み合わせた無突出・砂時計型ボルトセットである。皿型ボルトのねじ部呼び径は M16 と小さく、筒ナットの肉厚も薄いため、既存の高力六角ボルトと同等

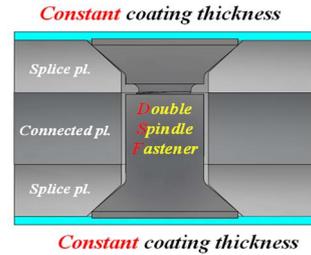


図 1 ダブルスピンドルファスナー

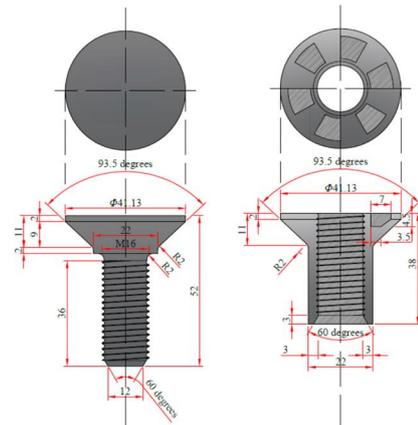
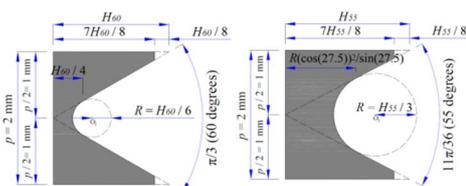


図 2 試作品の形状寸法 (単位: mm)



JIS (従来) NEW55 (提案)

図 3 ねじ形状の検討

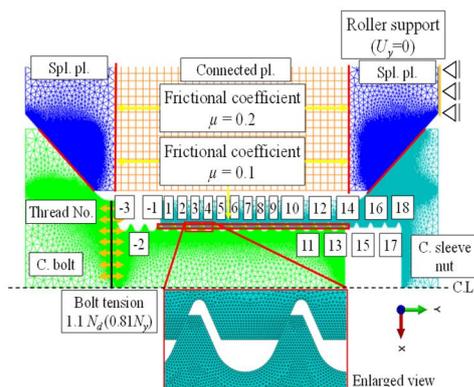


図 4 皿型ナットの検討モデル

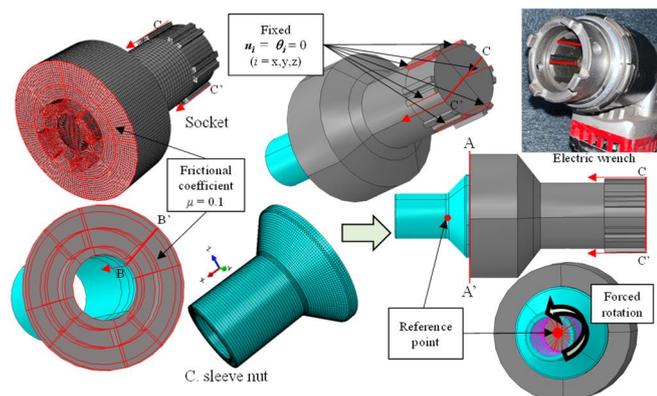


図 5 DSF のソケット差込口形状の検討モデル

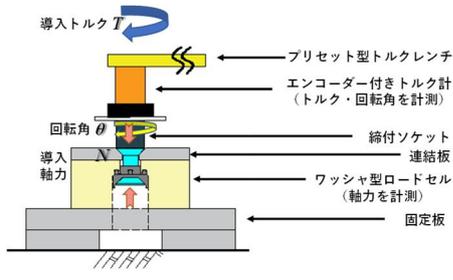


図 6 DSF の締付け試験

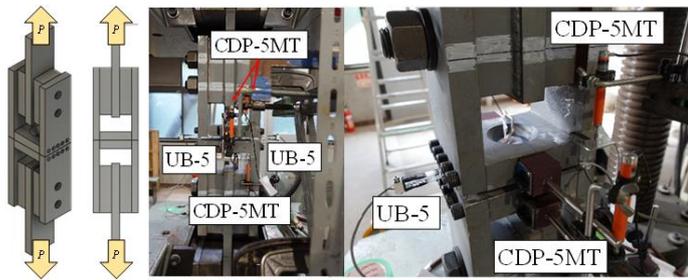


図 7 DSF の引張载荷試験

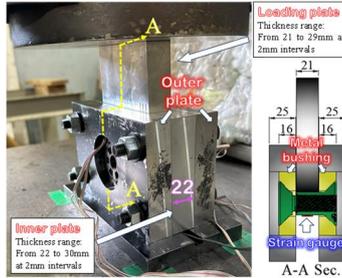


図 8 DSF の圧縮型せん断試験

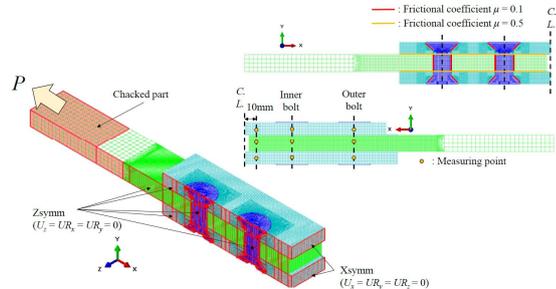


図 9 DSF 摩擦接合継手の検討モデル

の締結性能を期待するには、超高強度材料(降伏点 $\sigma_y: 1,260\text{MPa}$, 引張強度 $\sigma_t: 1,400\text{MPa}$)を用い、断面積の減少分を材料強度で補う必要がある。他方、超高強度材料を使用するには遅れ破壊への対策が必須である。そこで、破壊の起点となるねじ谷底の形状改良(図 3)を図 4 に示す軸対称モデルを用いて行い、遅れ破壊の要因となる応力集中の緩和に取り組んだ。加えて、貫通形式の皿型筒ナット、不完全ねじ部のフィレット、遊びねじ山数の確保など DSF 全体の寸法形状を評価し、決定した。

2) 安定した軸力導入を可能とする専用トルクレンチの開発、締付特性評価

無突出の DSF を供回りすることなく締結するには、筒ナットの皿頭に締付用ソケットの差込口を設ける必要がある。締付用ソケットは既存の電動レンチに着脱可能であり、汎用性のあるものにした。図 5 に示す FE モデルを用い、締付け効率に優れ、筒ナットが局所降伏しにくい差込口形状(円形・矩形・台形など)を検討した。その後、試作した DSF とソケットに対して図 6 に示すような締付け試験を行い、締結特性を評価した。

3) DSF 自体の引張抵抗・せん断抵抗の評価

DSF が既存の高力六角ボルトと同程度の引張抵抗・せん断抵抗を有しているかどうかを実験的に検証した。引張試験は、筒ナットの締結用差込口の有無をパラメータとして、引張耐力・破壊モードを確認した。载荷にあたっては、引張型治具(図 7)を用いた。せん断試験は、嵌合ねじ山数(遊びねじ山数)、皿型ボルトや筒ナットの長さをパラメータとして、せん断耐力・破壊モードを確認した。载荷にあたっては、圧縮型せん断治具(図 8)を用いた。

4) DSF 摩擦接合継手の限界状態の検討

DSF を用いた摩擦接合継手(以下、DSF 継手)の各種限界状態(すべり・降伏・終局)を、要素継手の引張数値解析(図 9)や载荷試験により検討した。要素継手の FEM 解析においては、ねじ部の影響は小さいと仮定し、皿型筒ナットと皿型ボルトは一体化してモデリングしている。

4. 研究成果

1) DSF のファスナー内部機構の開発

● ねじ山形状

本解析では、条件を揃えるため、すべての解析ケースで嵌合ねじ山数を 13 山とした。図 10 より、全体的な応力集中係数(以下、SCF)の傾向は、従来の JIS ねじよりも提案した NEW55 ねじの方が小さくなった。また、SCF 最大値は、断面急変部に位置するため、ねじ形状によらず 1 番ねじで生じていた。導入軸力 $N=0.24N_y$ (N_y : 皿型ボルトねじ部の降伏軸力)の時点にて NEW55 ねじと JIS ねじの SCF を比較すると、前者の SCF は後者のそれに対して約 30%低減しており、応力集中を大きく緩和していることを確認した。

● 応力集中を低減できるナット形状

各ねじ谷底および不完全ねじ部の SCF を有孔板の SCF である 3.0 程度とする、すなわち、DSF の応力集中をボルト接合において必ず生じる応力集中の程度とすることを目標に、ナット形状の改良や不完全ねじ部へのフィレット適用、遊びねじ山数の確保を考えた。その結果、貫通型ナット、フィレット 2R、遊びねじ山数を 2 山以上とすれば、DSF の全箇所 SCF を 3.0 以下に留めることができ、1 番ねじの塑性ひずみを大幅に減少することができた。

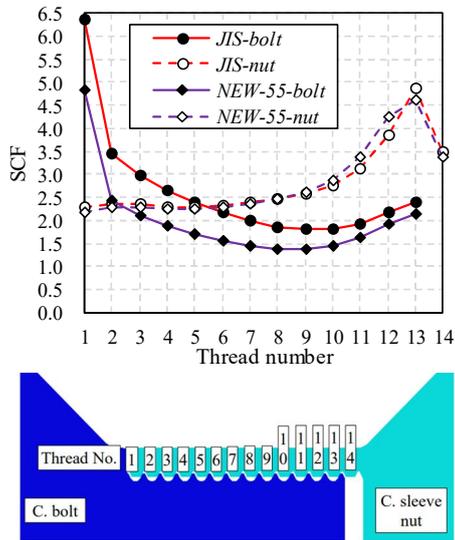


図 10 ねじ谷底の SCF 分布 ($N=0.24N_{y-DSF}$)

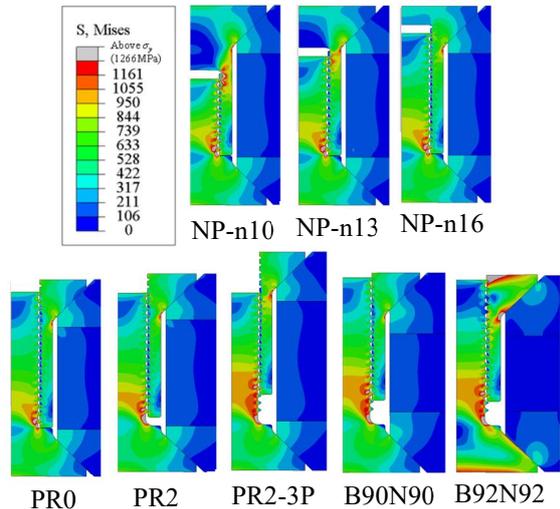


図 11 嵌合ねじ山数の違いによる解析の Von Mises 応力コンター ($N = 0.81 \times N_{y-DSF}$ 時, 単位: MPa, 変形倍率 1 倍)

図 11 には、 $N=0.81N_{y-DSF}$ 時の Von Mises 応力コンターを示す。非貫通型式のナットにおいて、ねじ底から皿頭にかけての塑性域は、ねじ山数が増加するほど小さくなった。これは、ねじ山数の増加により、連結板皿型加工部下端とねじ端部の位置関係が変化し、DSF の変形形状が変化するためである。これは、皿頭部分が DSF の軸心側に沈み込む変形が顕著となり、荷重分担の大きい掛かり山端部の荷重分担が減少することが理由であり、この傾向が最も顕著となるのが非貫通型ナットであった。また、非貫通型にした場合、皿型筒ナットはねじタップのための下穴が生じる。下穴深さの精度を一定確保・管理することは困難であることに加え、下穴深さを考慮するために最低締結板厚が大きくなり、適用可能なグリップレンジが狭まるため、筒ナットは貫通型式が望ましいと判断した。

2) 安定した軸力導入を可能とする専用トルクレンチの開発、締付特性評価

皿型筒ナットのソケット差込口形状は、ソケット凸部の数（支圧面数）や断面形状（円形・矩形・台形など）をパラメータとして変更し、図 12 に示す台形形状の凹部を 6 つ設けることとした。解析結果では、支圧面数が多いほど耐荷力は向上し、支圧面数が 8 面以上の場合には、DSF の降伏トルクは F8T-M22 ボルトのそれの 2 倍以上となった。生産性や製作精度も加味し、最終的には、6 面で 2 倍の降伏トルクを確保できた台形の凹部（図 12）を 6 つ設けることとした。

続いて、試作 DSF の締付試験を行い、トルク法と回転角法のどちらが DSF の締付管理方法に適しているかを確認した。その結果、トルク係数（軸力ートルク関係の傾き）、回転係数（軸力ー回転角関係の傾き）は高力六角ボルトのそれらより大きいこと、ばらつきは回転係数のほうが小さいことを確認した（図 13）。これは、トルク係数が皿型ボルト・皿型筒ナットの皿頭表面と連結板皿型加工面の接触位置や摩擦係数に影響されるためである。

以上の結果を踏まえ、締付方法は回転角法を採用することとした。

3) DSF 自体の引張抵抗・せん断抵抗の評価

引張載荷試験より得た荷重 P と試験機変位 δ の関係を図 14 に示す。図中の NH がソケット差込口あり、WH が差込口なしのケースである。 P - δ 関係の概形および傾きは、差込口の有無に依らず概ね一致した。破断位置は 1 番ねじであり、ねじ山せん断破壊など避けるべきモードは確認されなかった。最大荷重 P_{max} についても、差込口の有無の影響はなく、既存式に基づく引張耐力 P_{td} で安全側に評価することができた。

嵌合ねじ山数や DSF の長さをパラメータとしたせん断試験の結果を図 15 に示す。図 15(a)では、同形状の DSF を用いて、負荷板の厚さ (22mm, 24mm, 26mm) の変更により、嵌合ねじ山数を変更している。最大荷重 P_{max} は、嵌合山数が少なくなるにつれて減少し、破壊モードは、嵌合山数が 13 以上かどうかで、2 面せん断破壊と 1 面せん断破壊の 2 つに分類された。これらの結果は、負荷板の板厚が厚くなるにつれて、遊びねじ部の曲げ降伏と各金属ブッシュから負荷中心までの距離により、ナット側とボルト頭部側の反力比が異なるためと考えられる。また、従来型ボルトの設計せん断抵抗力 P_{bod} と比較すると、「DSF22」、「DSF24」、「DSF26」の平均最大荷重 P_{max} は、10.9Class-M20, 8.8Class-M22 の抵抗力 P_{bod} を上回った。

図 16 のイメージ図は、負荷板厚を 30mm とし、皿型ボルトと皿型筒ナットの長さを増加させた長尺型 DSF の実験ケースを示している。図 15(b)において、最大荷重 P_{max} の平均値は DSF30-LL が最大となり、DSF30-NL, DSF30-LN, DSF30 の順であった。DSF30-NL は、DSF22 と嵌合



図12 DSFの試作品

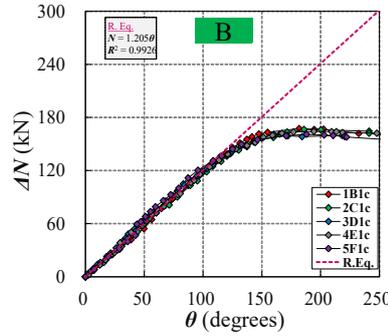


図13 縮付試験結果

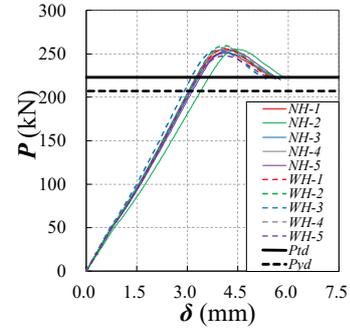
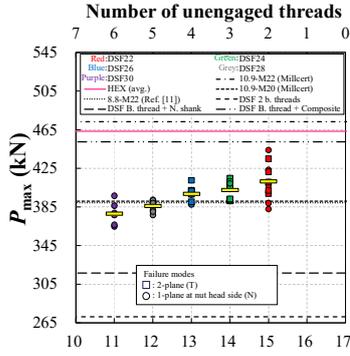
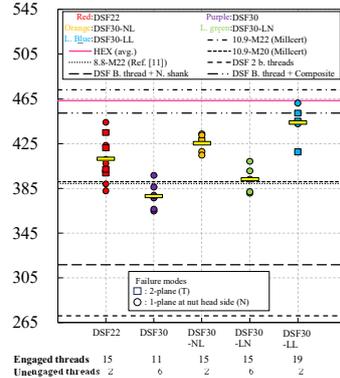


図14 引張試験のP-δ関係

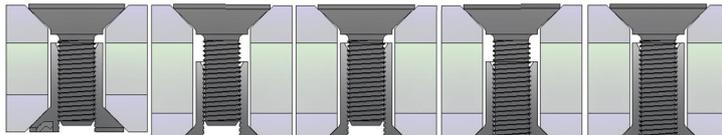


(a) DSF



(b) 長尺DSF

図15 せん断耐力



(a) DSF22 (b) DSF30 (c) DSF30-NL (d) DSF30-LN (e) DSF30-LL

図16 図15(b)における長尺DSFの嵌合位置

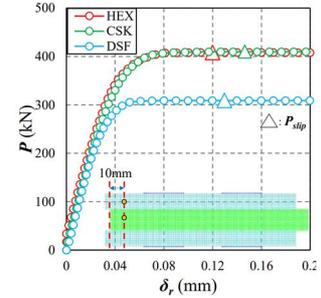


図17 荷重-相対変位関係

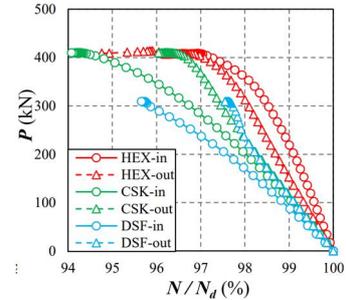


図18 荷重-軸力関係

ねじ山数は同数であるが、DSFの全長が長くなることによって、曲げ変形性能が向上するため、耐力が高くなったと考えられる。また、DSF30とDSF30-LN、DSF30とDSF30-NL、およびDSF30-NLとDSF30-LLを比較することにより、嵌合山数の増加（遊びねじ山数の削減）が、終局耐力の向上には有効であることがわかる。DSF30-LLの P_{max} の平均値は、皿型ボルトと皿型筒ナットの完全合成断面に対する設計耐力（図15(b)中の2点鎖線）と概ね一致した。また、F10T-M22の P_{max} の平均値に対しては若干小さいものの、DSFの全長を更に伸ばせば、F10T-M22よりも優れたせん断耐力を期待できる可能性がある。

4) 試作ファスナーによる摩擦接合継手の限界状態の検討

すべり限界に関する検討を示す。引張数値解析により得た荷重-相対変位関係を図17に、荷重-軸力関係を図18にそれぞれ示す。図中の凡例において、「CSK」は皿型高力ボルト、「HEX」は高力六角ボルトのケースを意味する。接合面の摩擦則には、クーロン摩擦則を採用した。

荷重-相対変位関係の初期剛性は、ボルト種類によらず同程度であったが、すべり荷重 P_{slip} には差異があった。CSK・DSFとHEXの軸力低下傾向を比較すると、連結板に皿型加工部を有するCSK・DSFでは、内側ボルトの低下量が外側ボルトのそれより大きい。外側ボルトの軸力低下率をCSK・DSFで比較すると、DSFの方が小さい。これは、皿孔加工部では軸力導入による接触圧分布が広範となり、継手端部での母板と連結板の離間が抑制されることが関係しており、両側連結板を皿孔加工したDSFでその効果がより大きくなったためと考えられる。

初期導入軸力で評価したすべり係数 μ_1 は、HEX、CSK、DSFの順にそれぞれ0.498、0.500、0.514であった。すべり時軸力で評価した場合のすべり係数 μ_2 はそれぞれ0.514、0.525、0.533であった。この結果は、すべり荷重 P_{slip} の違いに伴うボルト孔周辺の塑性化の影響を含むが、DSFのすべり係数 μ_1, μ_2 が前述のすべり挙動より、HEXやCSKよりも大きく低下しないことを示唆している。すなわち、使用限界状態においては、DSF継手は高力六角ボルトを用いた継手と同程度の耐荷性を期待できることがわかった。

今後は、研究期間中に実施できなかった疲労耐久性・防食性評価と桁端部の当て板補修部など実構造規模への適用検討を行い、実装に向けた検討を行う。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5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 郎 宇、森山 仁志、山口 隆司	4. 巻 29
2. 論文標題 母板孔径と継手板厚が皿型ボルト継手のすべり耐力に及ぼす影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 114_1 ~ 114_10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11273/jssc.29.114_1	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 橋本 達也、森山 仁志、林 巖、山口 隆司、吉見 正頼	4. 巻 30
2. 論文標題 鋼構造接合部のための突出の無い高強度・高耐久ボルトの数値解析的検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 118_45 ~ 118_56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11273/jssc.30.118_45	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 T. HASHIMOTO, G. HAYASHI, T. YAMAGUCHI and H. MORIYAMA	4. 巻 -
2. 論文標題 Prototype of no-projected and Sandglass-shaped Bolt with High-Strength and Durability for Efficient Steel Structures Maintenance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 the IABSE Symposium Prague2022 Reports	6. 最初と最後の頁 602-609
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 H. MORIYAMA, T. HASHIMOTO, Y. Chen, T. YAMAGUCHI, M. YOSHIMI and A. TABATA	4. 巻 -
2. 論文標題 Anticorrosive Performance of High-strength Bolts with Hexagonal, Cup and Countersunk Head	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the Eleventh International Conference on Advances in Steel Structures	6. 最初と最後の頁 1261-1275
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 M. TAKAYAMA, H. MORIYAMA, M. YOSHIMI, T. YAMAGUCHI, and G. HAYASHI	4. 巻 -
2. 論文標題 Slip tests of double-lap joints Consisting of Non-projected and Sandglass-shaped Bolts with High strength and Durability	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th Japanese-German Bridge Symposium	6. 最初と最後の頁 107-112
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 無
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 M. TAKAYAMA, H. MORIYAMA, M. YOSHIMI, T. HASHIMOTO, T. YAMAGUCHI, and G. HAYASHI	4. 巻 -
2. 論文標題 Tightening Properties of Non-projected and Sandglass-shaped Bolt with High strength and Durability	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the Eleventh International Conference on Advances in Steel Structures	6. 最初と最後の頁 1437-1451
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8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 橋本達也, 森山仁志, 林巖, 山口隆司
2. 発表標題 両端に皿頭を有する高耐久・高強度ボルトセットを用いた摩擦接合継手のすべり挙動
3. 学会等名 第78回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高山昌士, 森山仁志, 橋本達也, 山口隆司, 林巖, 吉見正頼
2. 発表標題 両端に皿頭を有する高強度・高耐久ボルトセットの締付実験
3. 学会等名 第78回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高山昌士, 森山仁志, 橋本達也, 山口隆司, 林巖, 吉見正頼
2. 発表標題 両側に皿頭を有する高強度・高耐久ボルトセットの引張実験
3. 学会等名 令和5年土木学会四国支部年次講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 橋本達也, 森山仁志, 林巖, 山口隆司
2. 発表標題 両側に皿頭を有する高耐久・高強度ボルトセット(ダブルスピンドルファスナー)の締付穴形状の提案
3. 学会等名 第77回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本達也, 山口隆司, 林巖, 森山仁志
2. 発表標題 双皿型高耐久性高力ボルトセット(ダブルスピンドルファスナー)に使用するねじ形状の検討
3. 学会等名 土木学会 関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本達也, 山口隆司, 林巖, 森山仁志
2. 発表標題 双皿型高耐久性ボルトセット(ダブルスピンドルファスナー)のナット形状に関する解析的検討
3. 学会等名 土木学会 第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本達也, 山口隆司, 林厳, 森山仁志
2. 発表標題 双皿型高耐久性高力ボルトセット(ダブルスピンドルファスナー)に使用するねじ形状の検討
3. 学会等名 土木学会 関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本達也, 山口隆司, 林厳, 森山仁志
2. 発表標題 双皿型高耐久性ボルトセット(ダブルスピンドルファスナー)のナット形状に関する解析的検討
3. 学会等名 土木学会 年次学術講演会
4. 発表年 2021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	林 厳 (HAYASHI Gen) (10869530)	大阪公立大学・大学院工学研究科・助教 (24405)	
研究 分担者	森山 仁志 (MORIYAMA Hitoshi) (50825495)	徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・講師 (16101)	

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