

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：16101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15076

研究課題名(和文) 腐食鋼桁端部のRapid-Response当て板補修工法とそのガイドラインの開発

研究課題名(英文) Development of Rapid One-sided Repair of Corroded Steel I-girder End with Bolted Connections and its Application Guideline

研究代表者

森山 仁志 (MORIYAMA, Hitoshi)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・講師

研究者番号：50825495

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)：本研究では、腐食損傷した鋼桁端部を、腐食形態および補修時の仮受けの有無などによる応力再分配を踏まえつつ、片面施工が可能なBlind Boltを活用することで、即時に補修する工法の開発に取り組んだ。具体には、健全・腐食・補修後の鋼桁端部の力学挙動をFEAにより調査し、損傷桁端部の崩壊モードと終局耐力が腐食形態に依存すること、当て板下端と下フランジの接触による荷重伝達が補修効果の向上に最も重要であり、両者を連結することが有効であること、仮受けや穿孔による応力再分配の影響は小さいことなどを解明している。Blind boltについては、国内外に存在するBlind boltを調査し、その耐荷性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、腐食鋼桁端部の補修効果を高める当て板の構造諸元や取付方法、現行の当て板設計よりもボルト本数を削減できる可能性を明らかにしており、構造部材レベルの当て板補修に関する知見を提示している。また、国外のBlind boltの性能評価を行い、論文として公表することで新しい情報を社会に提供した。その他、当て板補修部に不陸調整材を使用する状況を想定し、エポキシ樹脂と高力ボルトの併用接合の接合部耐力の実験実績調査を行い、施工時間に関係するボルト本数の削減に資する情報をまとめている。このように、本研究の学術的・社会的意義は大きく、基礎研究としての役割を十分に果たした。

研究成果の概要(英文)：This study investigates effective and quick one-sided repair method of corroded girder end with high-strength bolted doubler plate to recover its resistance to initial sound state. FEA was conducted to evaluate the resistance of intact, corroded and repaired girder and to investigate structural configurations of doubler plates for enhancing its repair effect. From obtained results, both high repair effect and resiliency can be secured with one-sided bolted and small plate, if the web plate and bearing stiffener is prevented from buckling. As contact force between doubler plate and lower flange is the most important to resisting mechanism, they should be touched with each other. The repair work such as jack-up and perforation has almost no influence on the ultimate strength.

This study also focuses on a kind of blind bolt used globally, which has not been used yet in Japan, and investigates its mechanical behaviour through some experiments and numerical analysis.

研究分野：構造工学

キーワード：ブラインドボルト ワンサイドボルト 補修・補強 当て板

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

我が国の道路橋の多くは高度経済成長期に建設され、建設後 50 年を経過した道路橋（2m 以上）の割合は 10 年後には 40%以上に到達する。また、全道路橋の 70%は市町村道にあり、地方公共団体により管理されている[1]。構造物の維持管理は、LCC の観点から、点検による損傷の早期発見と点検結果に基づいた補修を行う予防保全型とするのが望ましい。特に地方公共団体では、財政的な理由から架替え等の大規模更新が困難であること、橋梁技術者の不足・不在により技術的な判断・施策を独自でできずに時間と財源を要することから、ガイドライン形式の予防保全型メンテナンスマネジメントの確立が求められる。

ガイドライン形式の予防保全型マネジメントが必要な課題の一例として、鋼橋の主要損傷である「桁端部の腐食」が挙げられる。腐食損傷した桁端部には、図-1 に示すような高力ボルト摩擦接合を利用した当て板補修が広く行われているものの、損傷桁端部の残存耐力・当て板による耐力改善効果・当て板の構造詳細・接合位置の関係が不明確であるため、当て板寸法・位置等の補修設計のガイドラインが示されていないのが現状である。すなわち、損傷桁端部の補修前後の耐荷メカニズムを解明し、桁の腐食形態に応じた最適補修位置と必要最小補修面積を体系化することが必要となる。また、桁端部は、施工空間上、桁両面から補修できない場合が多く、片側のみで施工が完結する補修工法が求められている。その補修効果についても、支点反力による局所変形、借受けや穿孔による応力再分配の影響を踏まえ、評価する必要がある。



Figure 1. An example of the repair with high-strength bolts

2. 研究の目的

本研究は、腐食損傷した鋼桁端部を、腐食形態および補修時の仮受けの有無などによる応力再分配を踏まえつつ、片側施工が可能な Blind Bolt を活用することで、即時に補修する工法とその補修ガイドラインを開発するものである。具体にはボルト接合で当て板補修した桁端部の耐荷メカニズムを解明し、桁の腐食形態に応じた最適補修位置と必要最小補修面積を体系化することを目指した。

3. 研究の方法

以下に示す 5 つの項目に分けて、検討を進めた。

(1) 高力ボルト摩擦接合を用いた当て板補修部の引張挙動の検討

高力ボルト摩擦接合を用いた当て板補修工法は広く用いられているが、現状では設計基準が存在せず、継手の基準を準用して欠損部の耐力を無効としている。しかしながら、継手と当て板補修部の荷重伝達メカニズムは異なっており、母板と当て板の荷重分担率は、母板と当て板の軸剛性比とは一致しないことが知られており[2~4]、当て板による荷重分担が機能せず、欠損部が降伏することが懸念される。そのため、現状の設計では、欠損部が降伏・破断しても支障がないよう当て板総厚を母板厚以上としているが、供用下での作用力に対して十分安全側に補修されることも考えられる。

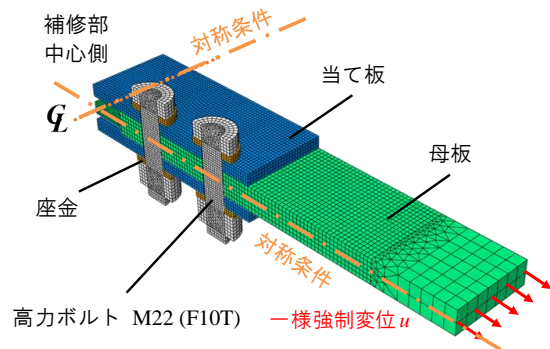


Figure 2. FE model for corroded tensile members repaired by high-strength bolts and doubler plates

当て板による補修効果を確実なものとするためには、当て板補修部の破壊に至るまでの限界状態の進展プロセス、母板と当て板の荷重伝達メカニズムといった力学挙動を調査し、当て板の荷重分担率を高める構造諸元を解明する必要がある。そこで、当て板補修部の力学挙動を解明するための基礎的な検討として、純引張応力下の当て板補修部を対象に静的引張解析（図-2）を行い、母板と当て板の荷重分担率と、接合部の断面構成（板幅・板厚）との関係を数値解析的に検討した。

(2) 健全・腐食・当て板補修後の鋼桁端部の力学挙動の解明

図-3 に示す単純支持された鋼 I 桁端部を対象に、健全・腐食・補修後の各状態での力学挙動を FEA により調査した。図-4 には FE モデルを示している。腐食形態は、図-5 に示すように、文献[5, 6]の結果を踏まえて、健全状態からの耐力低下が大きいと予想される 3 タイプを選定した。耐力低下が最も大きいのは、支点上補剛材の下端が腐食する場合であり、健全状態の耐力から 50%程度低下する[6]。そこで図-6 に示すように、支点上補剛材が腐食したケースに対して、死荷重下での穿孔やボルトの締結による応力再分配など、施工ステップの影響を検討した。

図-7 には、支点上補剛材が腐食した場合の当て板補修部のイメージ図を一例として示す。解析パラメータは当て板の寸法や枚数、ボルトの本数や配置間隔とした。

(3) 桁端部補修への適用が可能な Blind Bolt の国内外調査

土木構造物へ適用可能な Blind Bolt について、土木・機械・港湾分野を問わず、国際的に調査した。防食性に優れた高強度 Blind bolt UK（図-8）が存在することを確認した。文献[7]によれば、Blind bolt UK（以下、Blind bolt）は、橋、建築構造の柱梁接合部、コンクリート造やレンガ造への鋼部材の追加添接などに使用されている。Blind bolt はピン接合された非対称形状のアンカーを内部に有し、対象部材に差込

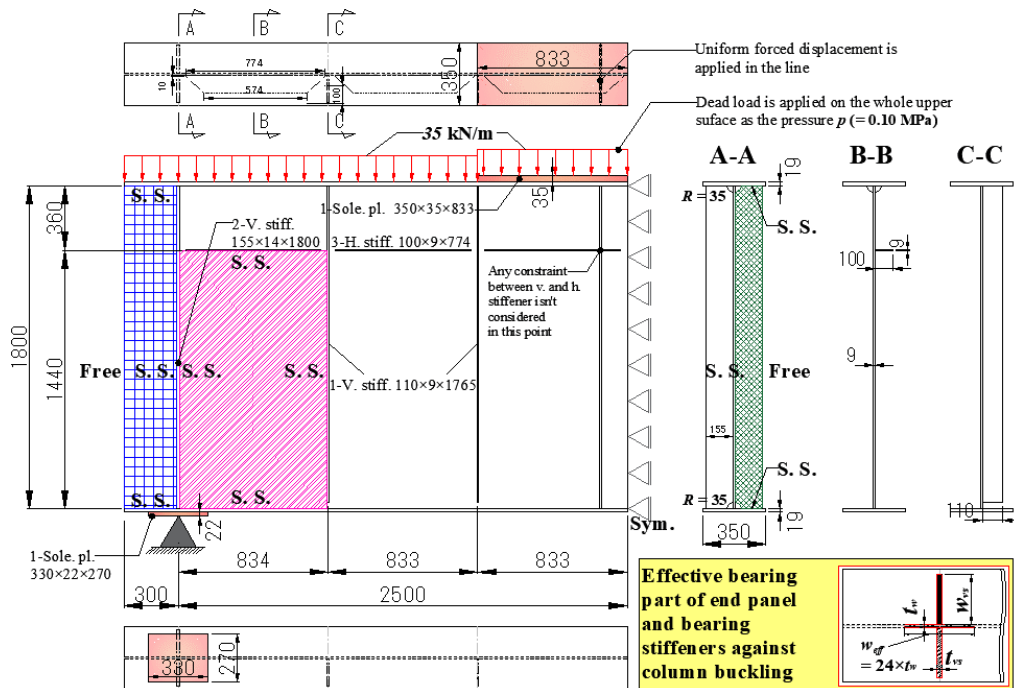


Figure 3. Dimensions of FE model (unit : mm)

み自身を回転させると、重心移動でアンカーが展開され、片側からナットで締結できる機構となっている。ボルト軸方向に図-8の締付確認用ゲージを通すスリットが設けられていることや、ジオメット処理 (Geomet 500B) により防食性が期待できることが特徴であり、締付確認用ゲージをスリットに通し、アンカーが支障なく展開されていることを確認できる。アンカーが正しく展開されていない場合は、ゲージ全長がスリットに収まらず、一目でその様子を判断できる。

(4) Blind Bolt の引張耐力・せん断耐力の評価

blind bolt はアンカー格納用のスロット孔が存在することから、導入できる軸力量は大きくない。そのため、摩擦抵抗による荷重伝達ではなく、支圧抵抗やせん断抵抗による荷重伝達や補剛目的の追加部材添接への適用が想定される。そこで、設計軸力・引張耐力・せん断耐力を評価するべく、Blind bolt の引張実験・せん断実験を行った。せん断実験は一面せん断治具を用いて実施した。引張実験については、再現解析も併せて行った。

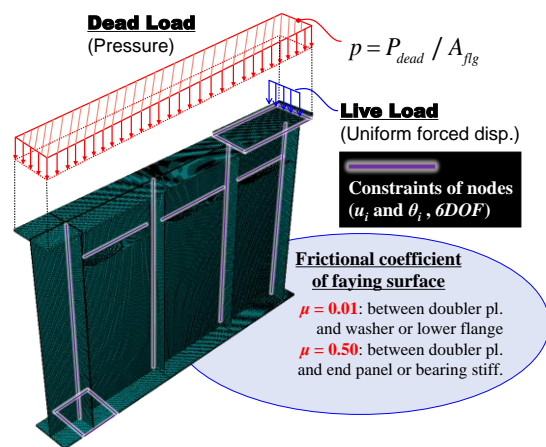


Figure 4. Overview of FE model (Case: Intact)

(5) 不陸調整材として用いるエポキシ樹脂と高力ボルトの併用接合の耐力評価

当て板補修部に不陸調整材を使用する状況を想定し、エポキシ樹脂と高力ボルトによる併用接合継手の実験実績調査を行い、即時補修工法の開発に資する情報をまとめた。接着強度を考慮した当て板設計が可能となれば、補修面積やボルト本数の削減が期待できる。

実績調査は、土木・建築分野の論文・学術講演会概要集、技報および報告書を対象に実施した。抽出した情報は、鋼材・接着剤・ボルトの材料強度、ボルト軸力、供試体の構造諸元、接着剤塗布とボルトの締付などの施工順序、併用接合継手の剥離荷重である。

実績調査の結果、エポキシ樹脂と高力ボルトによる併用接合継手に関する文献は約 50 文献あった。そのうち、引張力を受ける場合の実験結果が記載されていたのは、13 文献存在した。本研究ではこの 13 文献の実験結果を基に、接合面の接触圧と平均せん断強度の関係を調査した。

4. 研究成果

(1) 高力ボルト摩擦接合を用いた当て板補修部の引張挙動の検討

- ① 当て板補修した引張部材の限界状態の順序は、最初に純断面降伏、欠損部降伏のいずれかが発生し、欠損部降伏後にすべりが発生していた。このことから、当て板補修部は、すべりが先行する摩擦接合継手と異なる挙動を示すといえる。
- ② 当て板の荷重分担率から、補修できているケースと補修できていないケースでは限界状態の発生順序に違いがあった。荷重と強制変位の関係から、欠損部降伏が先行するケースでは補修ができていないことが確認された。

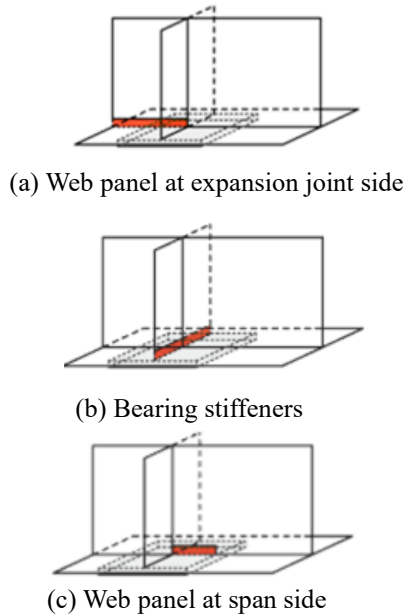


Figure 5. Considered corrosion distribution

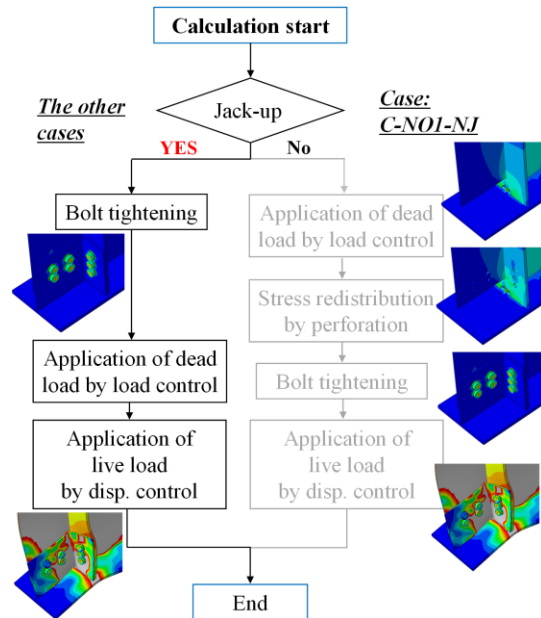


Figure 6. Flow chart of numerical analysis

- ③ すべりが発生した後、支圧状態に完全に移行すると当て板への荷重分担が顕著にみられた。
- ④ 純断面降伏荷重と欠損部降伏荷重の荷重比 P_{yc}/P_{yn} と、各ケースの最大荷重 P_{max} とボルト孔を有した健全時母板の最大荷重 P_{max-h} の比との関係より、荷重比 P_{yc}/P_{yn} が 1.0 より大きいケースを補修成功と見做した。当て板補修部の構造詳細を適切に決定することができれば、補修は可能であった。

(2) 健全・腐食・当て板補修後の鋼桁端部の力学挙動の解明

- ① 損傷桁端部の崩壊モードと終局耐力は腐食形態に依存した。本研究の FE モデルは完全欠損状態を対象としたため、荷重伝達経路となる未腐食側のウェブパネルと支点補剛材が座屈する傾向にあった。
- ② 当て板下端と下フランジの接触による荷重伝達が補修効果の向上に最も重要であり、両者を連結することが有効であった。この場合、当て板補修後の終局耐力は、健全状態のそれ以上となり、補修さらには補強が達成できていた。
- ③ 仮受けや穿孔による応力再分配が当て板補修後の桁の耐荷力に及ぼす影響は小さい。
- ④ 支点上補剛材の下端が完全欠損している場合において、当て板端面と下フランジの隙間が支点上補剛材の有効断面で評価した柱の降伏変位より大きい場合には、下フランジが当て板に接触する前に、支点直上のウェブパネルが座屈し補修効果を期待出来なかった。
- ⑤ ④の結果より、当て板端面が下フランジとメタルタッチできるように、また、支点上補剛材の溶接部を避けるために、当て板部材と腐食桁の接合にはフィラーを挿入することが想定される。腐食減肉部の不陸調整は、エポキシ樹脂で行う方法が考えられる。
- ⑥ 当て板が支点反力で局部座屈を起こすことはなく、当て板厚の増加による終局耐力の増大は期待できなかった。
- ⑦ 片側施工で当て板補修を行う場合、当て板と支点上補剛材の接合は2面摩擦形式とするのが望ましい。これにより、支点上補剛材およびウェブパネルの面外変形が拘束され、当て板補修の効果が增加する。

(4) Blind Bolt の引張耐力・せん断耐力の評価

- ① 素材の引張強度の値を考慮した最大荷重の平均値は、F8T-M16 高力ボルトの引張耐力の約 90% であり、概ね同等の引張抵抗を期待できると考えられる。一方、破断位置を踏まえてアンカー用ピンの公称断面積と素材の公称引張強度の積で計算した Blind bolt の引張耐力に対しては約 40% 小さい結果となった。これは、アンカー用ピンでの応力集中が原因と考えられる。
- ② アンカーの非対称形状および Blind bolt とアンカーの接触に起因して、Blind bolt には引張力だけでなく二軸の曲げモーメントが作用し、垂直応力分布は一樣となっていないこと、曲げモーメントは反力を取るピンを起点に生じ、ねじ部下端に向けて線形的に漸減していることを明らかにした。
- ③ FEM の荷重 - 標点間伸び関係および荷重 - 軸ひずみ関係において非線形が表れ始めた初期降伏荷重が 78.9 kN であることから、ボルト締付け時のねじり応力の影響を考慮して降伏荷重の 75% とした場合に、Blind bolt に導入可能な軸力量は 60 kN 程度と考えられる。
- ④ Blind bolt はその長さや当て板厚を調整しせん断面をねじ部に設けることで、F10T 級の高力ボルトと同等のせん断抵抗を期待できると考えられる。せん断終局耐力は、導入軸力の影響は小さい一方、スロット孔の向きの影響は無視できなかった。せん断面がスロット孔あるいは不完全ねじ部に位置し、作用力直角方向にスロット孔が配置される場合、せん断終局耐力は 30% 程度低下した。
- ⑤ 本工法で使用する blind bolt UK (10.9 Class, M24) は、引張抵抗は F8T-M16 高力ボルト相当、せん断抵抗は F10T-M24 高力ボルト相当、導入可能な軸力は 60kN 程度の性能を有している。また、ヒアリング調査から、本ブラインドボルトは再利用ができ締付け・取り外しが容易であることから、片側施

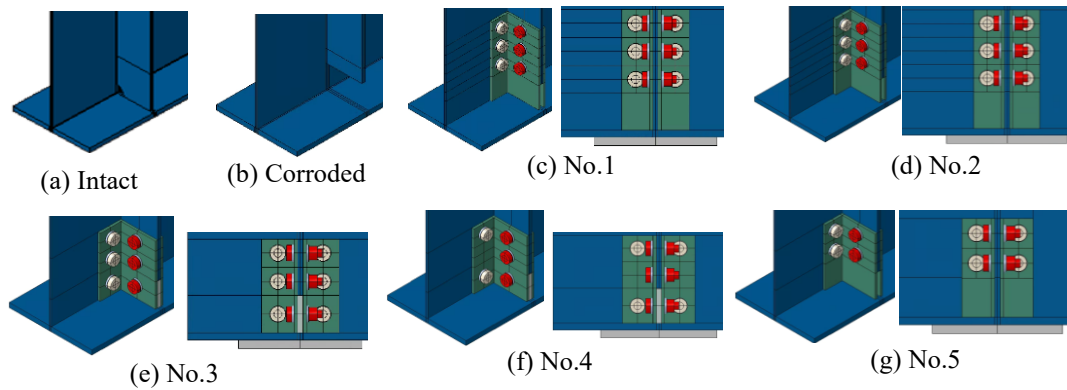


Figure 7. Schematic illustrations of doubler plate connections in cases with the bearing stiffener's corrosion (Examples)

工を要する部材接合部の仮ボルトにも使用できる可能性が示された。すなわち、既存の高性能なワンサイドボルトと本ブラインドボルトを組合わせて使用することによっても、効果的な当て板工法が可能である。

(5) 不陸調整材として用いるエポキシ樹脂と高力ボルトの併用接合の耐力評価

- ① エポキシ樹脂と高力ボルトによる併用接合継手の実験は、二面摩擦継手でのみ実施されていた。接合面処理は素地調整程度1種、素地調整程度2種、無機ジンクリッチペイントが対象になっており、金属溶射の検討例は存在しなかった。ブラスト粗面と無機ジンクリッチペイント塗布面による異種接合面での検討例は存在した。一方、ボルトの締付け・緩め（仮ボルトの交換を含む）がエポキシ接着層の残留応力やせん断強度に及ぼす影響を検討した事例は存在しなかった。
- ② 剥離荷重を接合面積で除した平均せん断強度は、ボルト孔周辺の接触圧よりも高力ボルトの導入軸力を接合面積で除した平均接触圧と良い相関を示した。したがって、エポキシ樹脂と高力ボルトによる併用接合継手は、高力ボルト摩擦接合継手よりも接着接合継手に近い力学特性を有するものと予想される。
- ③ 平均せん断強度と平均接触圧の関係式は、複数の高力ボルトを有する継手の結果を基に導出している。近似式の精度や適用範囲については継続検討が必要であるが、この関係を考慮した設計を行うことで、ボルト本数を削減することができる。



Figure 8. Blind bolt UK [7]

(6) 終わりに

本研究により、引張部材および鋼 I 桁端部を対象とした当て板補修部の耐荷メカニズム、効果的な補修位置や当て板構造諸元に関する知見を得ることができた。また、当て板補修部の設計に継手の設計法を準用せず、残存部材と当て板の合成断面に対して構造設計をしても、鋼 I 桁端部の耐荷力は健全状態まで回復できることを確認したことは貴重な検討結果である。併せて、携行性・ハンドリング性・価格に優れた Blind bolt UK を活用することで、即時性に優れた当て板工法が実現可能であることを示したことは、本研究の代表的な成果の一つと考えている。今後の課題としては、当初目標の一つである補修ガイドラインの作成が挙げられる。ガイドラインの作成に当たっては、①当て板端部と下フランジのメタルタッチ方法の検討、②Blind bolt の軸力管理方法の確立、③blind bolt の緩み耐性・リラクセーション特性の評価などの課題を解決することがまずは必要となる。

参考文献

- [1] 国土交通省社会資本整備審議会道路分科会：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，2014。
- [2] 石川敏之，清水優，服部篤史，河野広隆：断面欠損した鋼板の当て板補修効果，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.69, No.2（応用力学論文集 Vol.16），I_595-I_604，2013.3。
- [3] 永田和寿，町田幸大，小川麻美，山口隆司：引張を受ける高力ボルト鋼板当て板接合部の荷重伝達機構に関する解析的検討，鋼構造論文集，Vol.23, No.90，pp.27-37，2016.6。
- [4] 永田和寿，小川和花，小川麻美，山口隆司：高力ボルト鋼板当て板補修部の荷重伝達機構に関する検討，構造工学論文集，Vol.64A，pp.468-478，2018.3。
- [5] 玉越隆史，中洲啓太，石尾真理，武田達也，水津紀陽：鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究，国土技術政策総合研究所資料，No. 294，国土交通省国土技術政策総合研究所，2006。
- [6] 白倉誠，鈴木康夫，山口隆司，三ツ木幸子：腐食した桁端部の耐力特性を踏まえた崩壊プロセスからの分類とその分析，土木学会論文集 A1，Vol. 73, No. 2，pp.443-455，2017。
- [7] Henry Venables Products Ltd. and Blind bolt UK company: <https://www.blindbolt.co.uk/applications/>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Hitoshi MORIYAMA, Yu LANG, Takashi YAMAGUCHI	4. 巻 -
2. 論文標題 One-sided Repair of Corroded Steel Girder End with High-Strength Bolted Doubler Plate and Evaluation of its Resiliency after the Repair	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IABSE Congress2020 Reports (Proceedings)	6. 最初と最後の頁 597-604
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 Hitoshi MORIYAMA, Takashi YAMAGUCHI	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental Database on Resistance of Hybrid Joints with High-Strength Bolts and Epoxy Adhesive	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 the IABSE Symposium Prague2022 Reports	6. 最初と最後の頁 165-172
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 Hitoshi MORIYAMA, Yu LANG, Gen HAYASHI, Takashi YAMAGUCHI	4. 巻 -
2. 論文標題 One-sided Repair of Steel Girder End Having Corroded Bearing Stiffeners with High-Strength Bolted Doubler Plate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th International Conference on Bridge Maintenance	6. 最初と最後の頁 1670-1678
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 山根克稔, 森山仁志, 松村政秀	4. 巻 30
2. 論文標題 国外で流通している片側施工高力ボルトの純引張挙動に関する検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 717-727
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山根克稔, 森山仁志, 松村政秀
2. 発表標題 高力ボルト摩擦接合により当て板補修した引張部材の耐荷性能に関する解析的研究
3. 学会等名 令和2年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山根克稔, 秦子策, 森山仁志, 松村政秀
2. 発表標題 国外で流通している片側施工高力ボルトの一面せん断実験
3. 学会等名 第78回土木学会年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 秦子策, 森山仁志, 松村政秀
2. 発表標題 既設リベット橋のリベットの頭部形状および機械的性質に関する基礎調査
3. 学会等名 第78回土木学会年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2023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
---------	---------