

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14233

研究課題名（和文）強度が高く、粘り強い高力ボルト継手と当て板補修工法の開発および設計法の提案

研究課題名（英文）Development and design of bolted joint and stiffening plate repair with high load capacity and ductility

研究代表者

高井 俊和 (Takai, Toshikazu)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00759433

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地震等により過大な荷重が作用した際に、強度が高く、粘り強い構造を実現するため、高力ボルト摩擦接合継手や高力ボルト当て板補修部の塑性変形時のエネルギー吸収挙動を確認した。最大荷重時の終局モードとエネルギー吸収量の関係に着目し挙動を整理した。その結果、複数の破断モードが達成する遷移領域においてエネルギー吸収量が高くなることを確認し、さらに諸元とエネルギー吸収量の回帰分析から、エネルギー吸収量を予測する式を求めた。この式により諸元から期待されるエネルギー吸収量がおおむね求められることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高力ボルト摩擦接合継手と高力ボルト当て板補修部を対象に、過大な荷重が作用したときの最大荷重やそのときの伸び、エネルギー吸収量の傾向を最大荷重時の終局モードに着目して整理した。エネルギー吸収量が高くなる諸元の条件を明らかにし、諸元から期待されるエネルギー吸収量の予測式を求めた。この式によりエネルギー吸収量の高い諸元で設計することが可能となる。構造主部材の高力ボルト継手、当て板補修部以外にも、構造の似たエネルギー吸収部材への本知見の活用も考えられる。これらにより、粘り強い構造の実現につながると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the energy absorption in plastic deformation of high-strength bolted connections and stiffening plate repair with high-strength bolts was investigated to improve the load-carrying capacity and ductility of structures, assuming the application of extreme force due to an earthquake. The results of the energy absorption of bolted connections were organized, focusing on the ultimate mode of bolted connections in tension. It was found that the dimension of the bolted connection in the transition range between two ultimate modes gave high energy absorption. The prediction formulae of energy absorption were obtained by regression between the dimensions of bolted connections and energy absorption. The expected energy absorption of designed bolted connections can be obtained by the formulae.

研究分野：橋梁工学

キーワード：高力ボルト継手 当て板補修 終局挙動 最大荷重 エネルギー吸収

### 1. 研究開始当初の背景

平成29年改定の道路橋示方書で限界状態設計法が導入された。高力ボルト摩擦接合継手は、限界状態1と3に対して設計される。限界状態3では、継手のすべり後の母材降伏や、ボルトのせん断破断に対して設計、照査される。そのため、母材の強度は、設計で最大荷重まで考慮されておらず、設計と実際の最大荷重の差は余裕代として残っており、本来持ち合わせている強度を設計上有効活用されていない。この余裕代を活用することで強度の高い継手の実現できると考えた。また、震度7の地震が短時間のうちに繰り返された熊本地震の例もあり、エネルギー吸収が高い構造は、粘り強い構造を実現するうえで有効である。しかし、継手の最大荷重を含む終局挙動に関する研究は、すべりや降伏と比較すると少なく、また塑性変形によるエネルギー吸収の挙動に関しても不明な点が多い。これらを明らかにすることによって、強度が強くなり、さらに粘り強い構造が実現可能になると考えられた。

### 2. 研究の目的

本研究では、高力ボルト摩擦接合継手やよく似た構造である高力ボルト当て板補修部を対象に、設計降伏荷重から最大荷重までの余耐力とそのときの挙動を明らかにし、強度の高い構造や、粘り強い構造を実現する際に参考となる知見を得るために検討を行った。高力ボルト継手や当て板構造の最大荷重時の終局モードに着目して、エネルギー吸収量を整理し、エネルギー吸収機構を明らかにして、諸元からエネルギー吸収量を予測する式を提案することを目的に検討を行った。

### 3. 研究の方法

高力ボルト摩擦接合継手や高力ボルト当て板構造のエネルギー吸収挙動を検討するにあたり、終局挙動に関する種々の不明な点を調査し、さらに終局挙動およびエネルギー吸収挙動そのものを明らかにする検討を行った。研究の手段は、3次元非線形FEM解析、構造実験、測定などによる。

#### (1) 簡易な応力-ひずみモデル

FEM解析で精度よく非線形を含む終局挙動や最大荷重を再現するには、応力-ひずみ関係はモデル化の重要な点の1つである。高精度に応力-ひずみ関係を測定しモデル化することが難しい場合もあることから、鋼材の製品検査証(ミルシート)の降伏点、引張強さの情報からモデル化できるように、材料特性値間の関係式[1]を用いて図1に示すトリリニア型の応力-ひずみ関係をモデル化した。図2に示す金属材料引張試験の再現解析および継手引張実験の再現解析により、エネルギー吸収量の整合性の観点から、再現性の高い応力-ひずみモデルを確認した。

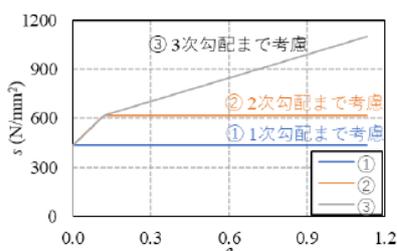


図1 応力-ひずみモデル

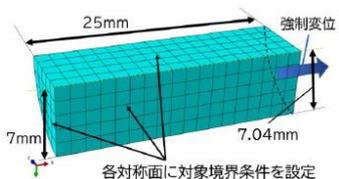


図2 解析モデル

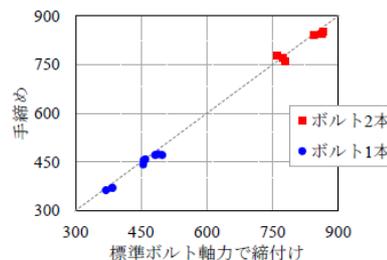


図3 継手の最大荷重の比較

#### (2) 荷重作用下のボルト軸力変動の影響

既往の研究[2]の高力ボルト継手の引張実験で、高力ボルトを標準ボルト軸力で締め付けた場合と手締めした場合で、締め付けボルト軸力が違いにより期待される摩擦伝達が異なっても図3のように最大荷重がほとんど変わらない結果が得られている。ボルト軸力の継手終局挙動への影響を明らかにするため、締め付けボルト軸力が異なる継手のFEM解析を実施し、ボルト軸力の変化とその影響を確認した。

#### (3) 表面粗さの計測条件

継手のすべり係数は接合面の表面処理により異なり、摩擦伝達される荷重が異なるとすべり以降の耐力にも差が生じる。接合面処理の状態の指標の1つに表面粗さがある。表面粗さは図4に例を示す粗さ計で測定される。検出器先端のスタイラスで表面をなぞり測定するため、局所的な値が得られ、測定箇所が違えば測定値にばらつきを伴う。ブラスト処理をした鋼板の表面粗さを図5のイラストのように位置を変えて測定してばらつきを得て、測定箇所や回数などの測定条件と測定値の平均値の精度との関係を確認した。

#### (4) 曲げ引張

継手や当て板構造の力学挙動は引張荷重で確認されることが多いが、橋梁の主桁を想定すると曲げも作用している。そのため曲げ作用下での挙動も確認しておく必要がある。高力ボルト継

手の曲げ载荷の実験は、I 桁の曲げ実験[3]や、ボルトを複数行配置し継手端部と中央部で偏心させた供試体の引張実験[4]が行われた事例はあるが、いずれの場合も供試体が大きく実験が大掛かりとなる。図 6 に示すボルトを 1 行配置し偏心させた小型の供試体で曲げ挙動が得られるか、引張実験と FEM 解析により確認した。

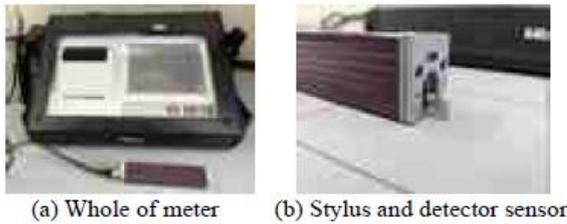


図 4 表面粗さ計

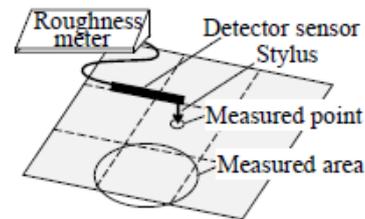


図 5 鋼板の粗さ計測のイメージ



図 6 偏心継手供試体

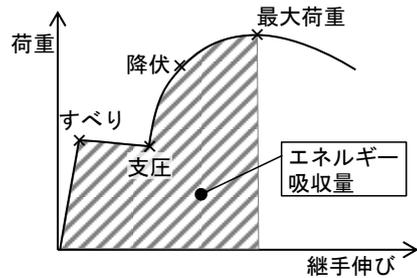


図 7 エネルギー吸収量のイメージ



図 8 継手引張実験の様子

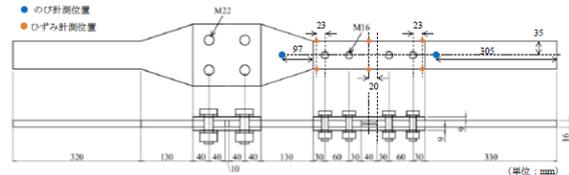


図 9 当て板引張供試体

#### (5) 継手のエネルギー吸収

高力ボルト継手の各種諸元を変化させ、純断面引張、ボルト軸部せん断、縁端せん断の各終局モードを含むパラメトリック解析を実施した。実験の再現解析を実施し、実験結果との整合性から解析モデルの妥当性を確認した。図 7 にイメージを示す最大荷重までのエネルギー吸収量を評価し、終局モードとエネルギー吸収量の関係を確認した。複数の終局モードが連成する遷移領域の諸元においてエネルギー吸収量が高くなることが示唆されたため、遷移領域の前後の諸元を対象に図 8 のように引張実験を実施し挙動を確認した。さらに、再現解析により実験との整合性を向上させて追加のパラメトリック解析を実施して、得られた結果から諸元をもとにエネルギー吸収量を予測する式を求めた。

#### (6) 当て板のエネルギー吸収

エネルギー吸収に関する基本的な挙動は、荷重の流れが明解な高力ボルト継手を対象に終局モードとの関係を確認したが、高力ボルト当て板構造でも確認した。継手と、腐食損傷がない状態で当て板を設置した場合の中間の挙動となる諸元の当て板構造を対象に図 9 に供試体を示す引張载荷実験を行い、引張荷重化のエネルギー吸収挙動を確認した。再現解析により実験との整合性を確認した。

### 4. 研究成果

#### (1) 簡易な応力ひずみモデル

引張強さ以降で図 10 に示すくびれ変形が得られ、FEM 解析でも実挙動と同様の挙動が再現された。図 11 に示すように、3 次勾配を付与したトリリニア型の真応力-真ひずみモデルが、FEM 解析で得られた公称応力-公称ひずみ関係の応答値、エネルギー吸収量とも整合性が高くなることを確認した。同様にボルト継手の引張実験の再現解析でも、応力-ひずみ関係に着目しエネルギー吸収量の整合性を確認した。

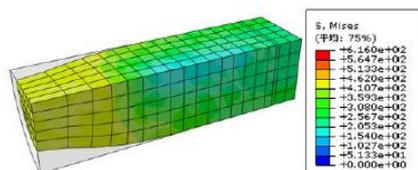


図 10 くびれ変形の例

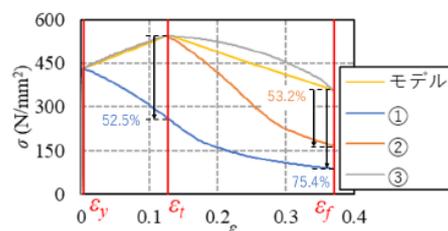


図 11 応力-ひずみ関係 (応答値)

## (2) 荷重作用下のボルト軸力変動の影響

図 12 に荷重、ボルト軸力と変位との関係を示すように、すべりから支圧に移行するまでは締付けボルト軸力の違いが見られたが、降伏、最大荷重と引張荷重が進むにつれてボルト軸力が変化して差が減少し、結果的に最大荷重の段階に到達すると締付けボルト軸力の違いの影響が見られないことが分かった。この傾向は、パラメトリック解析により、すべり先行型、降伏先行型、ボルト列数が 2 列、3 列、降伏、終局モードが純断面引張、ボルト軸部せん断、縁端せん断のいずれの場合でも同様であった。

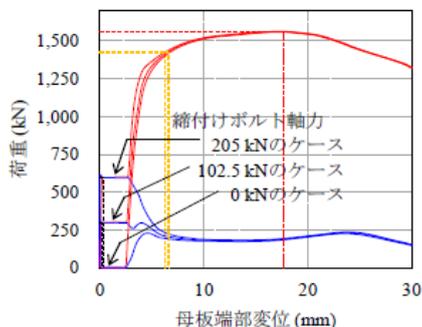
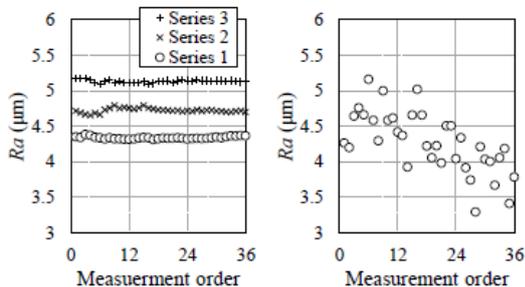


図 12 荷重、ボルト軸力-変位関係



(a) 検出器を位置固定 (b) 測定毎に位置変更  
図 13 表面粗さの測定値のばらつき

## (3) 表面粗さの計測条件

図 13 に表面粗さ計の検出器を複数回の測定中置いたままとした場合と、測定ごとに置き変えた場合の測定値のばらつきを示す。局所的ではなく、ある程度の範囲の平均的な表面粗さを得るには測定ごとに置き変える必要があることを確認した。平均値で評価するときの必要測定回数  $n$  は、信頼水準  $\lambda$  (95% のとき 1.96)、変動係数  $c$ 、許容誤差率  $e$  としたとき、 $n = \lambda^2 c^2 / e^2$  の式 [5] で求められる。この式は、ばらつきを正規分布と仮定しているため、測定結果の分布をカイ 2 乗適合度検定で正規分布と確認したうえで、必要測定回数  $n$  を求めたところ、信頼水準 95%、許容誤差率 5% としたとき約 18 回であることを確認した。

## (4) 曲げ引張

偏心継手の引張荷重により、左右コバ面の応力が異なり曲げが作用していることを確認した。ただし、図 14 に示す曲げ応力は理論値より小さく、理論値の 1/4 倍程度となった。その要因として、FEM 解析により、継手端部のチャック固定の影響であることを明らかになった。実験で、引張荷重のため端部をチャックでつかむ際は、固定の影響で曲げ応力が小さくなることを考慮して供試体を設計する必要があることが明らかとなった。

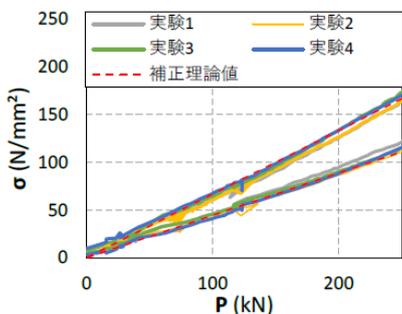


図 14 曲げ応力

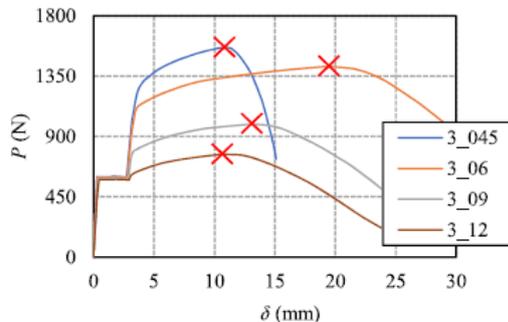


図 15 荷重-継手伸び関係の例

## (5) 継手のエネルギー吸収

実験の再現解析により、荷重-伸び関係が最大荷重まで整合していることを確認したのちにパラメトリック解析を実施した。終局モードに着目すると、図 15 に荷重-伸び関係の例を示すように、純断面引張モードは最大荷重が低いが、最大荷重時の伸びが大きくエネルギー吸収量が大きくなった。その一方で、ボルト軸部せん断モードや縁端せん断モードは最大荷重が高いものの、最大荷重時の伸びが小さく、エネルギー吸収量が小さくなることが明らかとなった。純断面引張モードはすべり/降伏耐力比  $\beta$  が小さいほど、ボルト軸部せん断モードと縁端せん断モードは  $\beta$  が大きいほどエネルギー吸収量が大きくなった。

終局モードが異なるとエネルギー吸収量の傾向が異なったため、複数の終局モードが連成する諸元の実験を実施した。その再現解析により解析の精度向上を図り、パラメトリック解析を追加実施した。図 16 に一例を示すように諸元とエネルギー吸収量の関係を求めたところ、ボルト軸部せん断モードと純断面引張モードの設計最大荷重の比、または縁端せん断モードと純断面引張モードの設計最大荷重の比が 1 に近いとエネルギー吸収量が大きくなることを確認した。さらに、継手の諸元からエネルギー吸収量を予測する式を回帰分析により求めた。主部材の継手や当て板補修部は、エネルギー吸収のための諸元の調整は他の要件により制約を受けやすいと考えられるが、エネルギー吸収部材のように設計の制約が少なく自由度が高い部材には本知見を活用したエネルギー吸収の向上が期待される。

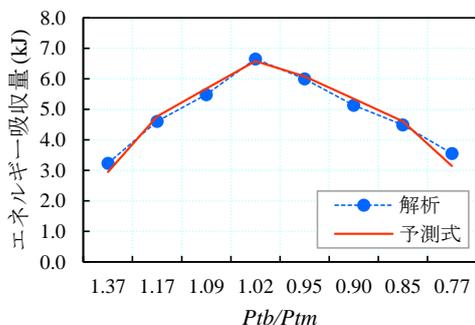


図 16 エネルギー吸収量と諸元の関係



図 17 当て板実験の破断状況

#### (6) 当て板のエネルギー吸収

当て板補修部の引張実験で図 17 に示すように母板純断面引張モードが生じることを確認した。腐食厚に着目したパラメトリック解析より、腐食厚が板厚の半分程度を超過した場合は、引張時に腐食が伸びが顕著になり、継手に近い挙動となって同程度のエネルギー吸収量が期待される一方で、腐食厚が小さい場合は母板が連続しているため、当て板にすべりが生じずエネルギー吸収量が少なくなることを確認した。

#### (7) まとめ

以上のように、高力ボルト継手や当て板補修部の終局挙動やエネルギー吸収に関連して、基礎的な視点から検討を行い各種の知見が得られた。高力ボルト継手の終局モードに着目してエネルギー吸収量の傾向を整理し、諸元からエネルギー吸収量を予測する式を求めた。強度が高く、粘り強い構造を実現するための知見が得られ、高力ボルト継手や当て板補修部の終局挙動やエネルギー吸収機構を明らかにするという当初の目的は達成したと考えている。

なお、得られた知見は高力ボルトを 1 行配置した小型の継手によるものとどまっている。実構造物として強度が高く、粘り強い構造を実現するには、継手部を有する部材レベルや構造全体レベルを対象に、継手部とそれ以外の一般部との連成も考慮して挙動を確認する必要がある。

最後に、本研究は九州工業大学 構造工学研究室の皆さんの協力のもと進めました。特に、各種の検討にあたって、発表論文、学会発表に氏名のある学生の皆さんから、構造実験の実施にあたって、研究室の学生の皆さんから協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] 高井 俊和, 大塚 貴広: 鋼材の真応力-真ひずみ関係の簡易なモデル化方法の 1 提案, 鋼構造年次論文報告集, 第 29 巻, pp. 158-167, 日本鋼構造協会, 2021.11
- [2] 舟山 耕平, 高井 俊和, 三ツ木 幸子, 山口 隆司: 片側 2 本ボルトの高力ボルト継手の終局挙動, 鋼構造論文集, 第 23 巻, 第 89 号, pp. 23-35, 日本鋼構造協会, 2016.3
- [3] 佐倉 亮, 森山 仁志, 山口 隆司, 青木 康素: 高力ボルト摩擦接合鋼桁連結部の純曲げ載荷実験による孔変形を指標とした支圧限界状態に関する研究, 構造工学論文集 A, Vol. 68A, pp. 428-440, 土木学会, 2022.3
- [4] 細谷 誠二, 稲田 育朗, 滝口 一, 小川 幸治: 高力ボルト継手の遅れ破壊調査・補修工法, 横河ブリッジ技報, No. 22, pp. 160-173, 1993.1
- [5] 松井 博: 標本調査法入門, 日本統計協会, 2005.9

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7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 3件）

1. 著者名 Takai Toshikazu, Tanii Kenshin	4. 巻 na
2. 論文標題 Stress-strain Model Adapted to Bolted Connection in Ultimate Behaviour Considering Energy Absorption	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of IABSE Congress Nanjing 2022	6. 最初と最後の頁 1465-1472
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2749/nanjing.2022.1465	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 谷井 健信, 高井 俊和	4. 巻 30
2. 論文標題 FEM解析による高力ボルト継手のエネルギー吸収に関する研究	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 728-741
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 高井 俊和	4. 巻 68A
2. 論文標題 高力ボルト摩擦接合継手の締付けボルト軸力がすべり後挙動における摩擦荷重伝達に及ぼす影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 410~427
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11532/structcivil.68A.410	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Masudome, S., Takai, T.	4. 巻 1
2. 論文標題 Energy absorption of bolted patch plate repaired member in ultimate behavior	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th German-Japanese Bridge Symposium	6. 最初と最後の頁 218-224
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 Takai, T., Harakawa, S.	4. 巻 1
2. 論文標題 Mechanical behavior of bolted connection in bending evaluated with small-scale specimen	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 8th World Multidisciplinary Civil Engineering Architecture Urban Planning Symposium	6. 最初と最後の頁 1-8
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takai, T., Morimoto, K.	4. 巻 1
2. 論文標題 Surface roughness measurement of blast cleaned structural steel plate considering measurement deviation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 12th International Symposium on Steel Structures	6. 最初と最後の頁 311-314
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 原川 進平, 高井 俊和	4. 巻 11
2. 論文標題 小型の偏心した試験体を用いた高力ボルト摩擦接合継手の曲げ引張に関する基礎的研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第11回・KABSE創立40周年記念九州橋梁・構造工学研究会シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 87-92
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 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 谷井 健信, 高井 俊和
2. 発表標題 高力ボルト摩擦接合継手のエネルギー吸収に関する解析的研究
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増留 蒼太, 高井 俊和
2. 発表標題 当て板補修部の再現解析による応力 - ひずみモデルに着目した解析条件の検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷井 健信, 高井 俊和
2. 発表標題 エネルギー吸収の整合性を考慮した応力-ひずみ関係の簡易なモデル
3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古市 大陽, 高井 俊和
2. 発表標題 高力ボルト継手のFEM解析における計算収束性向上のためのモデル化の検討
3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堤 風統, 高井 俊和
2. 発表標題 高力ボルト当て板補修部の終局挙動とエネルギー吸収特性に関する実験的検討
3. 学会等名 令和5年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2024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
---------	---------