

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13821

研究課題名（和文）過大荷重により損傷した高力ボルト継手の力学的挙動の解明とその補修法の開発

研究課題名（英文）Analysis of mechanical behavior and development of repair technic of high strength bolted joint exposed excessive forces and damaged

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・助教

研究者番号：00759433

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：高力ボルト摩擦接合継手に地震等の過大な荷重が作用して、すべりが生じたときの簡易な補修方法の確立のために検討を行った。すべりを生じさせた継手の補修をして再すべり実験を行うことで力学挙動や補修の効果を確認した。すべりが生じた接合面の補修塗装で再すべり時のすべり耐力の低下が抑制されること、設計すべり係数以上のすべり係数が期待されること、ボルト孔周辺のすべり痕の補修塗装の効果が高いこと、すべり時の接合面の接触圧は平均的にはボルト締付け時と変わらないことなどを実験的、解析的に確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

すべりが生じた高力ボルト摩擦接合継手の簡易な補修方法の確立のための検討を行った。社会的意義として、本研究により、すべりが生じた継手の補修が短期間で済み、補修費用の低減に寄与する知見が得られたことが挙げられる。学術的な意義として、継手の補修効果を実験的、解析的に示したことに加えて、接合面各部の補修効果の割合や、すべり前後の継手の荷重伝達機構の変化など実挙動の理解に寄与する詳細挙動を定量的に明らかにしたことが挙げられる。また、測定結果のばらつきの大い塗膜厚について統計的な観点から検討し、望ましい測定方法を示したことも挙げられる。

研究成果の概要（英文）：This study was conducted to develop a simple repair method of a high-strength bolted frictional joint that slipped and damaged due to excessive forces such as an earthquake action. The repair of a slipped joint was conducted, and detailed mechanical behavior of the repaired joint and the effects of the repair were evaluated by a re-slip experiment. Following conclusions were obtained experimentally and analytically: by repainting on the slipped contact surfaces, a slip coefficient higher than the design slip coefficient can be expected. The repainting the slip mark on the contact surfaces inhibits the reduction of the slip resistance at re-slip. The effect of repainting around the bolt holes of the connected plate is higher than those of other positions. The averaged distribution of the contact pressure at slip occurs on contact surfaces relates to slip resistance is same as to that at bolt tightened.

研究分野：構造工学

キーワード：高力ボルト摩擦接合継手 再すべり実験 すべり痕 補修 無機ジンクリッチペイント 高摩擦有機ジンクリッチペイント 塗膜厚 すべり耐力

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

社会基盤の整備は限られた予算を有効活用するため、より一層のコスト縮減が求められてきた。対して、高度成長期に一齐に整備されてきた社会基盤は経年による老朽化のため維持管理費用が増大している。また、道路橋をはじめ5年に1度の点検が義務化され費用の増大のつながっている。その一方で、自然災害に激甚化が挙げられる。その例として2011年の東日本大震災、2016年の熊本地震が挙げられる。特に後者では震度7の地震の発生2日後に再び震度7の地震が発生した。現状の設計体系で、供用期間中に発生する確率が低い強い地震動が、復旧や補修の対策を取るための時間を置かずに発生したことになる。このような背景により、構造物のより低廉でかつ簡易で短期間に補修できる技術の必要性が以前に増して高まっているのが現状である。

2. 研究の目的

本研究は、過大荷重を受けて損傷した高力ボルト継手を対象に簡易で短期間で対応可能な補修方法の開発を目的に検討を行なった。一度すべりが生じた継手の再すべり時の耐力は低くなる。すべり面の塗膜の損傷や、純断面の降伏、ボルト軸部とボルト孔の接触によるボルト孔縁の支圧変形などにより、接合面の密着性が低下するためすべり耐力が低下すると考えられる。これらの要因により損傷した継手をいったん解体し、再度組み立てたとしてもすべり係数が低くなる。要因に応じて適切に補修する必要がある。それらの影響の寄与やすべり耐力が低下するメカニズムは明らかになっていない。本研究ではこれらの要因を明らかにするとともに、補修方法の確立を目指してすべりが生じた継手の補修を行い、再すべり実験により補修効果を確認することで補修する上で参考となる知見を得るために検討を行なった。

3. 研究の方法

一度すべりが生じた継手の接合面にはすべり痕として塗膜が部分的にはがれて損傷する。塗膜の管理上の重要な要素として塗膜厚が挙げられる。しかし、すべりにより損傷した塗膜の厚さを計測する標準的な方法が定まっていないことから、計測値のばらつきをもとに適切な測定方法を検討した。また、ボルト孔縁の変形に着目して、再すべり耐力への影響を確認した。さらに、すべり試験を実施した試験体を活用してすべり痕の調査を行い、補修塗装を施し再すべり実験をすることで補修効果を確認した。また、接合面の各部の補修効果の割合も確認した。

(1) すべりにより損傷した塗膜の厚さの測定方法の検討

継手の接合面は無機ジンクリッチペイントで塗装されていることが多い。所要のすべり耐力を確保するために塗膜厚を一定の範囲内にする必要があり。塗膜厚の測定には写真1に一例を示す膜厚計が用いられる。計測される膜厚にはばらつきを伴い、通常、複数回計測して平均値が用いられる。特に、すべりが発生した後は、接合面の位置によって塗膜損傷の程度が異なり、標準的な計測方法は定まっていない。そこで、本研究では写真2に示すように継手のすべり試験を行い、写真3のすべりが生じた接合面を得て、塗膜厚を多数回計測し、式(1)により必要な計測回数と望ましい計測位置を確認した。



写真1 膜厚計の例

$$n = \frac{\lambda^2 c^2}{e^2} \quad (1)$$

ここに、 n : 必要な標本数、 λ : 信頼水準 (95%で $\lambda=1.96$)、 c : 母集団の変動係数、 e : 許容誤差率

(2) ボルト孔縁の支圧変形による再すべり耐力への影響

すべり後、ボルト軸部とボルト孔が接触し、さらに荷重が増加することでボルト孔縁が支圧変形する。ボルト孔縁に生じた支圧変形による突起は、継手の補修のためいったん解体し、再組立するときに接合面の密着性を阻害しすべり係数低下の要因になると考えられた。また、突起部があればグラインダー等で切削除去することが考えられるが、過剰な切削となれば、これも密着性およびすべり係数の低下の要因になると考えられた。過剰な切削は図1のように簡易い形状をモデル化した。このボルト孔縁の支圧変形の影響を確認するため、FEM解析を行い、すべり荷重の1.3倍の荷重を掛け、荷重除去後に再度荷重を掛け、すべり耐力への影響を確認した。

(3) 再すべり試験による再すべり挙動と、補修塗装の効果の確認

(1)の検討で行ったすべり試験の試験体を用いて、すべり痕を観察、計測し、刷毛塗りができ比較的塗装しやすい有機ジンクリッチペイントですべり痕の補修塗装を行なった。継手を組立てて再すべり実験を行い、再すべり

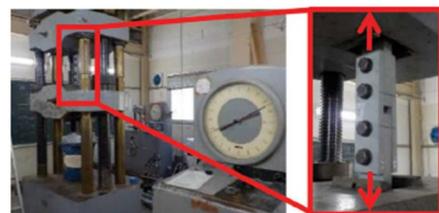


写真2 すべり実験の様子

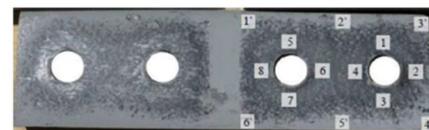


写真3 すべり痕の一例
(数字は膜厚計測位置)

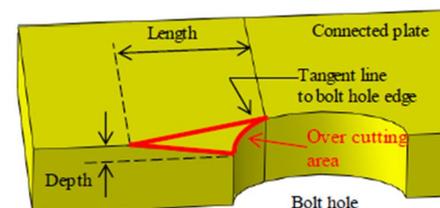


図1 ボルト孔縁の過剰切削のモデル化 (赤枠部分)

挙動および補修効果の確認を行った。試験のパターンとして、図2に示すように母板側、連結板側の塗装パターンを組み合わせた。写真4にボルト孔縁のみ補修塗装した一例を示す。実構造では母板側は交換が難しいが、連結板は母板と比較すれば交換が容易なため、連結板側の実験パターンには新規部品への交換も含めた。

(4)補修塗装の効果と、荷重伝達の詳細の検討

(3)の再すべり実験を踏まえ、接合面に生じるすべり痕の範囲とその各部を補修塗装した際に期待される効果の割合を整理した。また、すべり係数が接合面の接触圧と関係があるとの先行研究があることから、すべり係数をより精度よく予測するため、連結板厚と最大接触圧の関係を、ボルト締付け時点、すべり発生時点で確認した。また、補修塗装後の再すべり時のすべり係数は補修条件により異なり、継手の荷重伝達において摩擦の寄与の大小の影響があるため、すべりおよびすべり後の荷重伝達機構も検討し明らかにした。

4. 研究成果

(1)すべりにより損傷した塗膜の厚さの測定方法の検討

写真3に示した継手の接合面を対象に、すべり試験の前後で膜厚計を用いて塗膜厚を多数回測定して、得られた測定値のばらつきから望ましい測定回数、場所などの測定方法を検討した。図3にすべり後のボルト孔縁の1~8のそれぞれ地点を複数回測定した時の測定値の変動を、図4にボルト孔縁の8か所を複数回測定し平均した測定値の変動を示す。測定回数が同じでも図4のように複数個所を測定し平均する方が得られる結果のばらつきが小さいことを実際の測定結果を用いて示した。式(1)に必要な計測回数を検討したところ、すべり前の接合面では、信頼水準を95%、許容誤差率を5%としたとき、複数個所を11回以上測定して平均をとることが望ましいことを示した。また、すべり後の接合面では、ボルト孔縁の塗膜損傷がひどい箇所では19回以上、ボルト孔から離れた塗膜損傷が軽微な箇所では16回以上測定し平均をとることが望ましいことを示した。

(2)ボルト孔縁の支圧変形による再すべり耐力への影響

図1に示した過剰切削をモデル化した継手の解析で、過剰切削の深さが最大で2mmの場合でも、図5に示すように切削した部分のすべり時の摩擦応力は生じなくなるが、近傍の摩擦力が大きくなるため、結果的にはすべり耐力への影響が2%以下と小さいことを確認した。また、再すべり耐力の確認で、すべり/降伏耐力比 β が1.2の降伏先行型では、図6に示すように1度目のすべり時に降伏の影響が生じるため、再すべり時の純断面部分の応力分布が部分的に異なるが、全体的には差はあまりなく、再すべり耐力は初回のすべり耐力に対して2%程度の低下にとどまることが確認された。以上の結果から支圧変形による再すべり時の耐力低下は少なく、塗膜損傷による再すべり耐力の低下の要因が大きいことが示唆された。

(3)再すべり試験による再すべり挙動と、補修塗装の効果の確認

再すべり実験の結果を表1に示す。初回のすべり試験のすべり係数が0.738であるのに対し、再すべり実験で、すべり後の試験体を1度解体しそのまま再度組み立てたパターン1のすべり係数が0.233と低くなった。これは、すべり痕が生じたボルト孔縁近

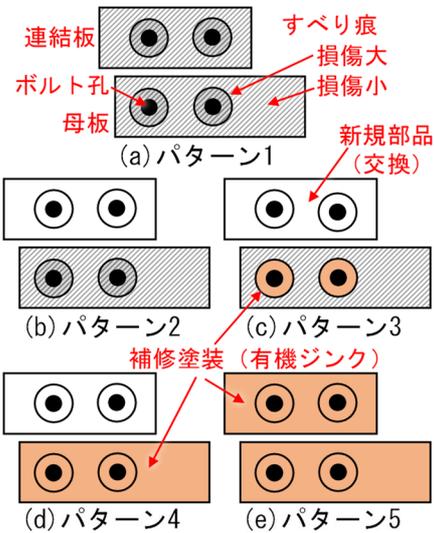


図2 再すべり実験のパターン

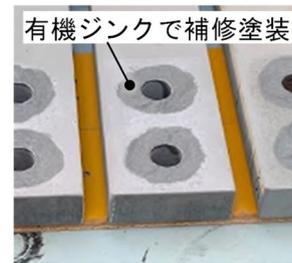


写真4 補修塗装の一例

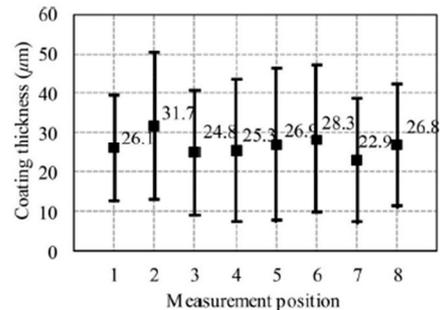


図3 ボルト孔縁の測定位置別の塗膜厚の測定結果のばらつき

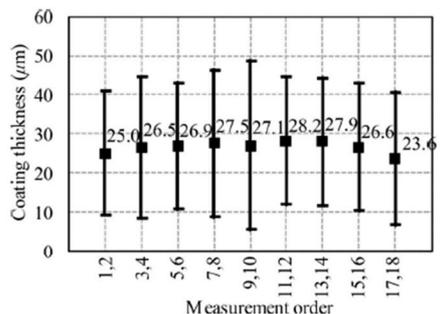


図4 ボルト孔縁の測定回数目別の塗膜厚の測定結果のばらつき

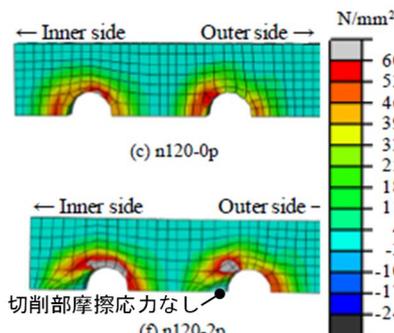


図5 すべり時の摩擦応力分布

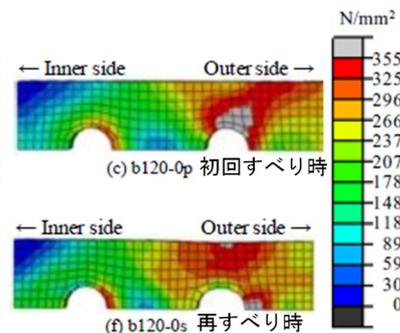


図6 すべり時の応力分布

傍の塗膜損傷のため再組立時の接合面の密着性が低下したためと考えられる。連結板を無機ジンクリッチペイントで塗装した新規部品に取替えることで設計すべり係数0.4と同等になる結果が得られた。有機ジンクリッチペイントで補修塗装をしたパターンはすべり係数が低くなったが、ボルト孔縁のみ補修塗装したパターン3、母板全体を補修塗装したパターン4のすべり係数の低下が同等であったことから、特にボルト孔縁の補修塗装の補修効果が高いことが実験結果から示唆された。

(4)補修塗装の効果と、荷重伝達の詳細の検討

再すべり実験の結果から、各部補修塗装のすべり耐力への寄与を求めたところ、図7に示すように、母板のボルト孔縁の寄与が75%と、補修塗装の対象とする重要箇所であることが確かめられた。また、高摩擦有機ジンクリッチペイントの期待されるすべり係数は、既往の文献を調査したところ、平均で0.485となり、この塗料を使用した場合、補修塗装後のすべり係数が設計すべり係数を上回り0.47前後となることが予測された。また、図8のようなボルト軸力による母板と連結板の接触圧を確認したところ、図9のように左右と上下方向でボルト締付け時は同等であるが、すべり時は異なることを確認した。ただし、すべり時も図10に示すように上下左右方向を平均することでボルト締付け時と同等の接触圧となったことから、すべり時もボルト締付け時と同様の接触圧の評価ができる可能性が示された。

この結果をもとに、図11~13に示す連結板厚と、平均接触圧、最大接触圧、接触圧範囲の関係性を明らかにした。また図14に示すようにすべり前とすべり後、降伏時における摩擦伝達を含めた継手の荷重伝達機構を明らかにした。これらの検討の過程で、図15のようにボルト列数が2列の場合で縁端のせん断で降伏、終局となる場合、縁端とボルト間のせん断ではなく、母板と連結板の両縁端でせん断が生じる特異なモードがあることが明らかとなった。

以上のように、すべりが生じた継手の補修を想定した実験とFEM解析を実施し、再すべり時のすべり耐力低下は母板と連結板の接合面の塗膜損傷の影響が大きいこと、損傷した塗膜の厚さの望ましい計測方法や、再接合時の力学挙動への影響の程度、補修塗装をする際の重要な部位やその効果の割合を示すことができた。このようにすべりが生じた継手の簡易な補修を実施する上で参考となる知見が得られた。また、本研究では、すべり係数と関連があるとされる母板と連結板の接合面の接触圧と連結板厚との関係や、継手に荷重が作用した時の荷重伝達機構、両縁端のせん断などすべり発生以降のモードなど、継手の力学挙動をより詳細に解明する際に参考となる知見も合わせて得られた。

表1 すべり実験結果

すべり試験(初回)		すべり係数
すべり試験(初回)		0.738
再すべり 実験	パターン1	0.233
	パターン2	0.410
	パターン3	0.279
	パターン4	0.270
	パターン5	0.234

□母板孔周辺 □母板孔周辺以外
□連結板孔周辺 ■連結板孔周辺以外

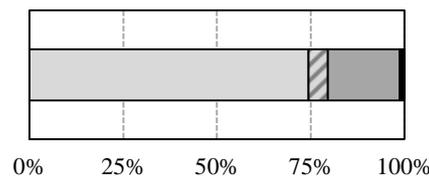


図7 接合面の各部位のすべり耐力への寄与

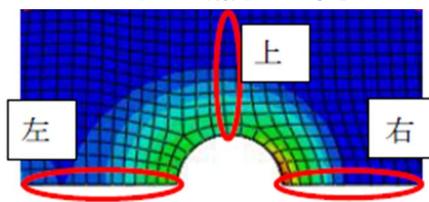


図8 接合面の接触圧と位置の定義

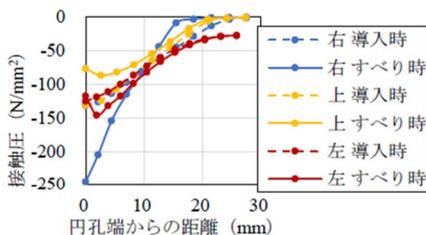


図9 接合面の位置別の接触圧分布

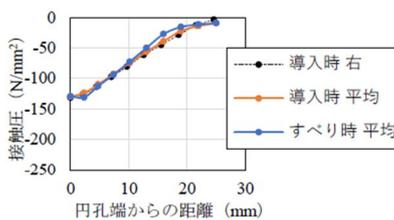


図10 接合面の平均した接触圧分布

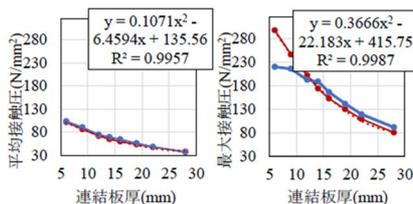


図11 平均接触圧-板厚 図12 最大接触圧-板厚

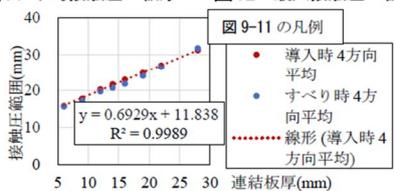


図13 接触圧範囲-板厚

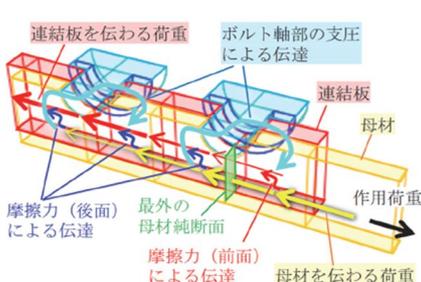
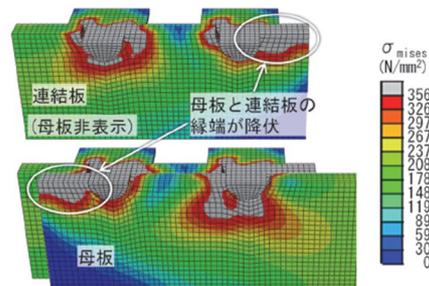


図14 継手の荷重伝達の概要



降伏時 (灰色が降伏領域) 図15 両縁端のせん断モード

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5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 2件）

1. 著者名 Toshikazu Takai, Soichiro Araki	4. 巻 12
2. 論文標題 Influence of Contact Conditions of Frictional Surfaces on Re-slip Behavior of Slipped High Strength Bolted Frictional Joint Applied an Excessive Force	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 12th Pacific Structural Steel Conference (PSSC ' 19)	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, 森山 仁志	4. 巻 35
2. 論文標題 母板遊間部の開口変位に着目した高力ボルト摩擦接合継手のボルト取替えに関する数値解析的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木構造・材料論文集	6. 最初と最後の頁 79-89
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 Toshikazu TAKAI, Yumi MATSUMOTO	4. 巻 1
2. 論文標題 Measurement method of coating thickness of slipped high strength bolted frictional joint considering statistical characteristics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2020)	6. 最初と最後の頁 3931-3939
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, 中村 悠紀	4. 巻 76
2. 論文標題 母材の引張降伏に着目した高力ボルト摩擦接合継手のすべり後の荷重伝達特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1	6. 最初と最後の頁 401-410
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 高井 俊和	4. 巻 67A
2. 論文標題 アンボトニング現象に着目した高力ボルト摩擦接合継手のすべり後のボルト軸部のせん断挙動	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集A	6. 最初と最後の頁 282-295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.67A.282	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 -

〔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 高井 俊和, 森山 仁志, 山口 隆司, 古財 千寿
2. 発表標題 高力ボルト摩擦接合継手のすべり後の荷重低下を再現する簡易的な FEM解析手法の一提案
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 中村 悠紀, 高井 俊和
2. 発表標題 すべりが生じた高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力低下要因に関する解析的研究
3. 学会等名 令和元年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村 悠紀, 高井 俊和
2. 発表標題 高力ボルト摩擦接合継手のすべり後の荷重伝達機構に関する基礎的研究
3. 学会等名 令和元年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本 結実, 高井 俊和, 荒木 壮一郎
2. 発表標題 無機ジンク塗装された高力ボルト継手の変動を考慮した塗膜厚測定法に関する一考察
3. 学会等名 平成30年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木 壮一郎, 松本 結実, 高井 俊和
2. 発表標題 すべりにより変形した高力ボルト継手のすべり係数低下要因の解析的検討
3. 学会等名 平成30年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂東 駿哉, 高井 俊和
2. 発表標題 高力ボルト摩擦接合継手における連結板厚と, 接触圧とその範囲の関係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

〔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
---------	---------