

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04585

研究課題名（和文）高力ボルト摩擦接合と接着接合の併用法の力の伝達の解明と設計法の確立

研究課題名（英文）Evaluation of sectional forces transfer and establishment of a design method for the combined method of high-strength bolt friction joint and adhesive bonding

研究代表者

石川 敏之（Ishikawa, Toshiyuki）

関西大学・環境都市工学部・准教授

研究者番号：00423202

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）：本研究では、接着剤と高力ボルトを併用した当て板補修の基礎的な検討として、接着剤と高力ボルトを併用した場合の力の伝達の評価を試みた。具体的には、接着と高力ボルト併用接合を、合成接合と混合接合に分類し、両者に対して、疲労き裂への当て板補修を想定した主板中央が切断されている切断鋼板の当て板補修のモデルに対して、一軸引張試験および有限要素解析を実施し、接着剤と高力ボルトが併用された場合の部材間の荷重伝達を明らかにした。その結果、はく離が生じるまでは、接着剤と高力ボルトの合成接合、混合接合ともに接着接合同様な力の伝達メカニズムになっていた。はく離が生じた後は、高力ボルト摩擦接合の限界状態に移行する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、接着と高力ボルトを併用した当て板補修に対して、接着剤による力の伝達と高力ボルト摩擦接合による力の伝達の挙動を載荷試験、FEM解析および理論的手法を用いて評価した。接着剤が健全ではく離が生じていない場合は、接着と高力ボルトを併用した当て板補修は、接着接合に近いことが明らかになったので、常時の繰返し応力に対しては接着接合による評価ができるため、有効な接着の併用法に繋がる成果であると考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, the authors attempted to evaluate the stress transmission of the combined joint of adhesive and high-strength bolts as a fundamental study for the repair of steel structures. Specifically, adhesive and high-strength-bolt combined joints were classified as composite or mixed joints, and uniaxial tensile tests, finite element analyses, and theoretical analysis were conducted on a model of a joint type of specimens and the stress transfer mechanism was clarified. The results showed that both composite and mixed joints with adhesive and high-strength bolts had a stress transmission mechanism similar to that of adhesive joints until debonding of patch plates occurred. After the debonding of patch plates occurs, the limit state of adhesive and high-strength bolts combined joint shifted to that of high-strength-bolt friction joining.

研究分野：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：高力ボルト 接着 補修 荷重分担

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、鋼橋では、疲労損傷や腐食損傷が数多く発生している。また、地震により局所的な変形などの損傷を受ける部材や、衝突(クレーンなどの)により損傷する部材がある。鋼橋では、著しく大きな損傷でない限り、一般に、当て板接合や損傷部材の新たな部材への取り換えなどが行われる。その際、溶接継手が用いられるケースもあるが、施工の観点から、高力ボルト摩擦接合(以後、高力ボルト接合)が一般的に用いられる。しかし、実橋では、補剛材が設けられていることによって十分なボルト本数が確保できない場合や、後付けの補強部材などの追加による局所的な変形により十分な摩擦面が確保できないこと、工場でのプラスト処理のような十分な接合面処理が行えないことなどにより摩擦係数が低い場合がある。

このような背景から、高力ボルト接合の力の伝達を補うため、あるいは見かけのすべり係数を向上させるために、高力ボルト接合と接着接合を併用した工法がいくつか提案されている^{1)~4)}。これまでの研究成果として、高力ボルト接合と接着接合を併用させることにより、力の伝達が向上し、見かけのすべり係数が向上することなどが明らかにされているが、接着接合と高力ボルト接合は力の伝達メカニズムが異なることが考慮されておらず、両者を併用した場合の力の伝達が正しく評価されてきていない。特に、接着接合では、接着部のはく離が生じると、力の伝達の効果を失うこと、はく離が脆性的に生じることなどの課題もある。このように、現在、高力ボルト摩擦接合と接着接合を併用させた場合の設計法が確立していないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、接着剤と高力ボルトを併用した当て板補修の基礎的な検討として、接着剤と高力ボルトを併用した場合の力の伝達の評価を試みる。具体的には、疲労き裂への当て板補修を想定した主板中央が切断されている切断鋼板の当て板補修のモデルに対して、一軸引張試験および有限要素解析を実施し、接着剤と高力ボルトが併用された場合の部材間の荷重伝達を明らかにする。

3. 研究の方法

接着と高力ボルトの併用では、主板と当て板の接合面に接着剤を塗布し、そのまま高力ボルトを締付ける方法や、接着剤が硬化した後に高力ボルトを締付ける方法がある。また、当て板よりも小さなフィラープレートが当て板と主板の間に挿入し、継目部と当て板端部にフィラープレートの厚さ分の接着剤を充填する工法がある。本研究では、鋼・コンクリート複合構造の定義を参考にし、図-1に示す様に、接着と高力ボルトの併用法を、合成接合と混合接合とに分類し、その力の伝達を評価する。

研究の方法としては、接着と高力ボルトの合成接合、混合接合ともに、載荷試験と有限要素解析(FEM)を実施した。

4. 研究成果

(1) 接着と高力ボルトの合成接合の挙動

接着と高力ボルトの合成接合の効果を明らかにするために、図-2に示す寸法に対して、高力ボルト摩擦接合試験体FB、接着剤のみによる試験体FA、接着剤が硬化する前に高力ボルトの軸力を導入した試験体FBA、接着剤の硬化後に高力ボルトの軸力を導入した試験体FBAA、高力ボルトの軸力を導入せず、ラチェットレンチで手締めした試験体FBATに対して、一軸引張試験を実施した。

載荷荷重 P と主板と当て板端の相対変位 δ (両面の平均)の関係を図-3に、 P と主板切断部の開口変位 δ_c (両側の平均)の関係を図-4に示す。図には主板の純断面に対する降伏荷重 P_Y も示

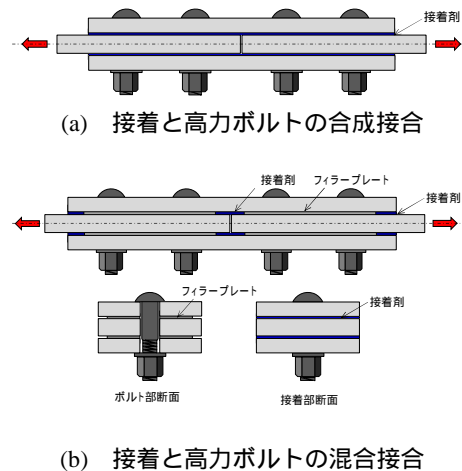


図-1 接着接合と高力ボルト接合の併用

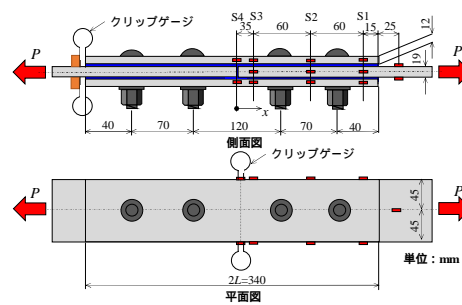


図-2 接着と高力ボルトの合成接合試験体

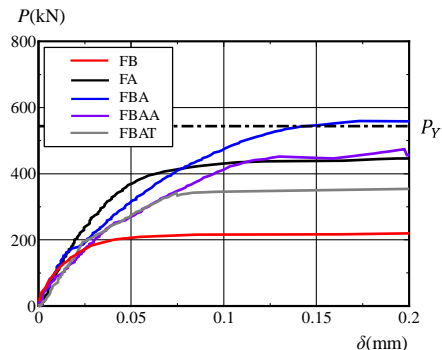


図-3 荷重と相対変位の関係

している。図-3より載荷荷重が小さい範囲では、接着剤を用いた試験体 FA, FBA, FBAA, FBAT は同程度の当て板端部の相対変位あるいは開口変位であった。高力ボルトのみの試験体 FB は、載荷荷重が 180kN より小さい範囲では、図-3 において当て板端部の相対変位が他の試験体と大きな差はないが、図-4 の載荷荷重と開口変位の関係の傾きの角度は、接着剤と高力ボルトを併用した試験体と比べて小さかった。これは、接着剤を用いた試験体では、主板の切断縁まで接着剤が塗布されているため、切断縁近傍でも接着剤によって当て板と主板の荷重伝達がなされたため開口変位が小さく、高力ボルトのみの場合よりも傾きの角度が高くなったと考える。

試験体 FB では 200kN 程度で、変位が急激に増加しており、すべりが生じたと考える。試験体 FA, FBA, FBAA, FBAT では、接着剤のはく離が生じてから変位が急増していることがわかる。試験体 FBAT に比べ試験体 FBA, FBAA が高い荷重で相対変位が増大していることから高力ボルトの軸力導入によってはく離荷重が高くなると考える。また接着のみの試験体 FA は試験体 FBAT に比べてはく離荷重が高かった。これは試験体 FA がボルト孔を設けていないことにより、接着面積が試験体 FBAT よりも大きかったためであると考えられる。試験体 FBA, FBAA の開口変位は同程度であった。

はく離やすべりが生じるまでの試験体の高力ボルトおよび接着剤による荷重伝達を評価するために FEM 解析を行った。解析モデルの一例を図-5 に示す。解析モデルは試験体の対称性を考慮した 1/8 モデルとし、8 節点ソリッド要素を用いた。FEM 解析では、試験体 FBA, FBAA は同じモデルの解析結果を用いて評価する。

全試験体ではく離やすべりが生じていない載荷荷重 180kN 以下の $P - \varepsilon$ が線形性を示した範囲のうち、載荷荷重 100kN に対する実験、解析により導出した主板軸方向の応力 σ_s の分布を図-6 に示す。図では、縦軸の主板側面の応力 σ_s が、作用応力 $\sigma_{sh} (= P/A_s, A_s$ は主板の断面積) で無次元化されており、横軸の切断位置からの距離 x が当て板の半長さ L で無次元化されている。図-6(b)には、文献 5) で与えられている接着接合の場合の分布も示されている。図-6 より、全ての試験体で断面 S1 ~ S3 の実験値が解析値の分布に近い値であった。また、接着と高力ボルトの合成接合した試験体では、切断縁に近い位置の応力が高力ボルト接合試験体 FB よりも接着接合試験体 FA に近い値のため、はく離が生じるまでは、接着接合同様な力の伝達メカニズムになっていると言える。

はく離が生じた後は高力ボルト摩擦接合同様に、支圧状態に移行するため、高力ボルト接合の限界状態と同等になると考える。ただし、接着接合のはく離強度が摩擦接合の強度よりも高い場合には、接着剤の脆性的なはく離が生じるため、注意が必要である。

(2) 接着と高力ボルトの合成接合の挙動

接着と高力ボルトの混合接合の効果を明らかにするために、図-7 に示す寸法に対して、高力ボルト摩擦接合試験体 C-BF、接着と高力ボルトの混合接合試験体 C-BFA に対して、一軸引張試験を実施した。接着範囲の影響を評価するために、切断部の接着長さを 40mm と 80mm に対して試験を実施している。フィラープレートの厚さは 2.3mm である。樹脂の注入方法は、図-8 に示すように、5mm の注入孔から充填した。

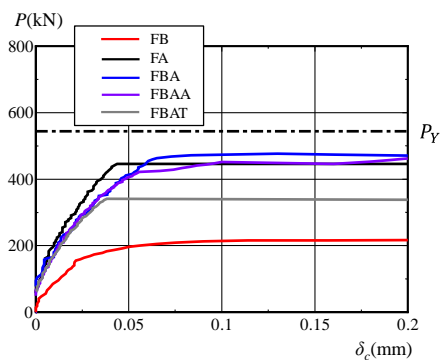


図-4 荷重と開口変位の関係

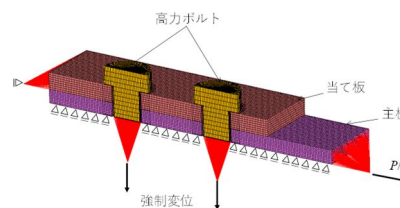


図-5 解析モデルの要素分割と境界条件

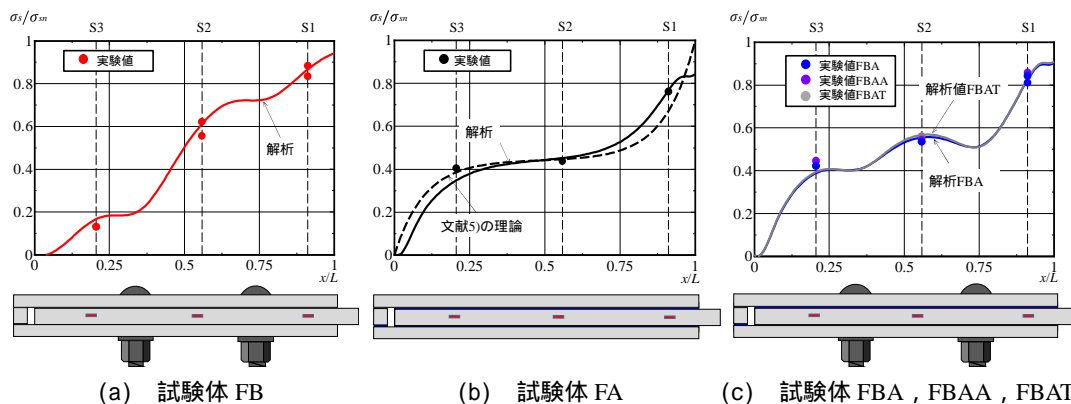


図-6 主板側面の応力分布

図-9 に各切断試験体の載荷荷重 P と主板の開口変位 δ の関係を示す．図には、主板の純断面に対する降伏荷重 P_Y も示している．図より接着剤のはく離および高力ボルトのすべりが発生すると、荷重が大きく低下し、主板の開口変位が増加する．接着剤を併用していない試験体 C-BF(40), C-BF(80)は共に荷重が 300kN 付近で開口変位が増加したが、その際、明確なすべりは見られなかった．その後、荷重を増加させるとすべりを繰り返したので、載荷を終了した．一方、接着剤を併用した試験体 C-BFA40, C-BFA80 は接着剤のはく離が発生するまで荷重と開口変位の関係がほぼ線形を示している．切断部近傍の接着長が 80mm の試験体 C-BFA80 と接着長が 40mm の試験体 C-BFA40 を比較すると、はく離荷重に差は見られなかった．この原因は、試験体 C-BFA80 は切断部近傍のはく離ではなく、当て板端部からのはく離であったためである．また、試験体 C-BFA40, C-BFA80 は試験体 C-BF(40), C-BFA(80)よりも主板の開口変位が小さいことがわかる．これは切断部近傍の接着剤により荷重が伝達されたことにより、主板間の開口が抑制されたためと考える．これより切断部近傍に接着剤を併用することにより、主板の開口を抑制することや接着長の違いが試験体の強度に影響することが明らかとなった．接着剤のはく離後は高力ボルトのみの試験体同様、すべりを繰り返す挙動となった．

切断試験体の荷重伝達を確認するために試験体 C-BFA40, C-BFA80 に対して FEM 解析を行う．解析モデルおよび境界条件を図-10 に示す．試験体 C-BFA シリーズに対しては、接着と摩擦接合が混合されているため、それぞれの荷重伝達モデルを図-11 に示すようにバネと文献 5)と同様な接着の混合モデルを考えた．このようなモデル化により、力の伝達に関する微分方程式を用いて力の伝達が計算できる．

図-12, 13 に試験体 C-BFA40, 80 に対して、載荷荷重 $P=100\text{kN}$ に対する実験値、主板側面の応力の解析値(FEM)、断面 S1~S3 の幅方向の断面の応力を平均した解析値(FEM 平均)および簡易モデルの鋼部材の分担軸力 N_s を主板の断面積 A_s で除した主板軸方向の応力 σ_s の分布を示す．図では σ_s を主板の作用応力の計算値 σ_{sn} で除した値が示されている．また、図には主板と当て板を合成断面として算出した応力の計算値 σ_s を σ_{sn} で除した値も示している．合成断面の計算値はフィラープレートが挿入されている断面では主板、当て板およびフィラープレートの合成断面、フィラープレートが挿入されていない断面では主板および当て板の合成断面を用いて算出した．図-12, 13 より、試験体 C-BFA40, 80 の実験値は断面 S1~S3 で FEM とほぼ一致していることがわかる．一方、簡易モデルの推定値は FEM および実験値に対して、摩擦接合面の応力分布の傾向が異なっていることがわかる．これはボルト孔の影響により主板の幅方向の断面の応力分布が一様ではなく、ひず

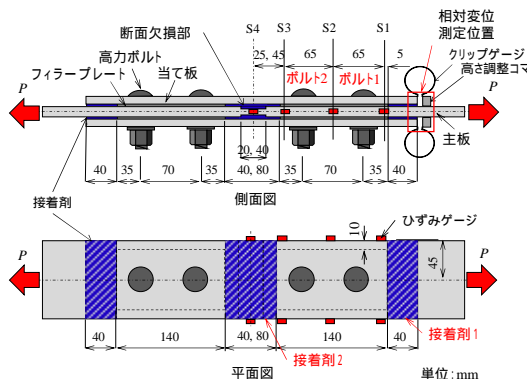


図-7 接着と高力ボルトの混合接合試験体

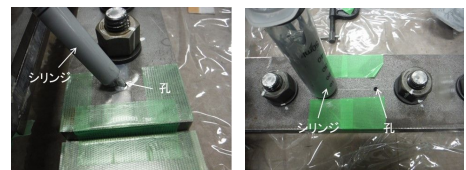


図-8 樹脂の注入状況

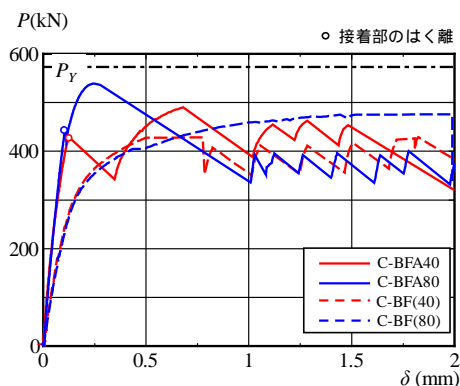


図-9 荷重と開口変位の関係

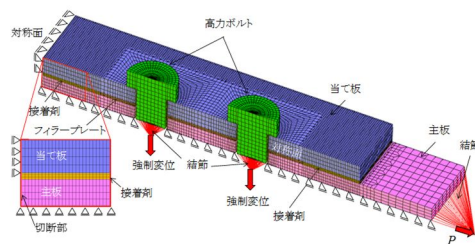


図-10 解析モデルの要素分割と境界条件

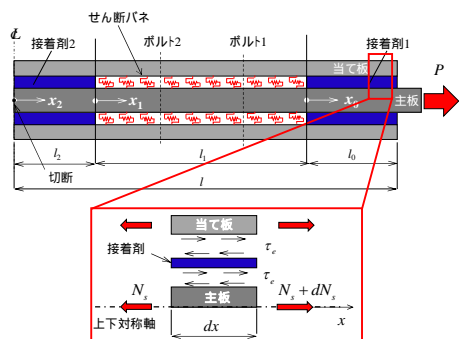


図-11 荷重伝達の簡易モデル

みゲージを貼付した主板の側面の応力が高くなるためである。しかし、断面 S1～S3 の主板の幅方向の断面の応力を平均した FEM 平均は、推定値とよく一致していることがわかる。

以上より、接着と高力ボルトの混合試験体に対しても、はく離が生じた後は高力ボルト摩擦接合状態となり、支圧状態に移行するため、高力ボルト接合の限界状態と同等になると考える。

(3) 接着と高力ボルトの合成接合によるストップホールへの応力集中の低減効果

接着と高力ボルトを併用した場合、接着剤が力を伝達するため、高力ボルト近傍以外の接着範囲で力が伝達されることが明らかになった。したがって、き裂部への当て板補修の際に、接着と高力ボルトの合成接合を用いることで、き裂近傍の接着剤によって力が伝達されるため、き裂の開口を抑制する効果が考えられる。そこで、接着と高力ボルトの合成接合を用いた、ストップホールへの応力集中の低減効果を検討した。

試験体を図-14 に示す。当て板の厚さ 9mm、16mm の高力ボルト接合試験体をそれぞれ B2-9、B2-16、接着と高力ボルトを併用した試験体を B2A-9、B2A-16 とした。比較のために、ストップホールへのみの試験体 SH も準備した。

公称応力 σ_{sn} とストップホール壁のひずみ ε_{SH} の関係を図-15 に示す。この図には、FEM 解析の結果も示している。図-15 からわかるように、接着と高力ボルトを合成接合することにより、高力ボルトのみの当て板補修の場合よりも、ストップホール壁のひずみを低減する効果が高いことが明らかとなった。

【参考文献】

- 1) 村越淳, 田中良樹, 舟木孝仁: 接合面にエポキシ樹脂を塗布したボルト継手の力学的挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.563-574, 2008.
- 2) 丹波寛夫, 行藤晋也, 山口隆司, 杉浦邦征, 飛ヶ谷明人, 田畑晶子: 腐食孔を模擬した凸部を有する接合面に接着剤を塗布した高力ボルト継手の力学的挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.703-714, 2014.
- 3) 丹波寛夫, 行藤晋也, 山口隆司, 杉浦邦征: 接着剤と高力ボルトを併用した軸方向力を受ける当て板補修に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.585-596, 2015.
- 4) 池田拓也, 石川敏之, 堀井久一: 当て板端部に接着接合を併用した高力ボルト摩擦接合の荷重伝達, 鋼構造論文集, Vol.25, No.99, pp.1-9, 2018.
- 5) 清水優, 石川敏之, 堀井久一, 服部篤史, 河野広隆: 当て板接着された突合せ鋼板のはく離強度の評価, 鋼構造論文集, 第 22 巻, 第 86 号, pp.1-11, 2015.

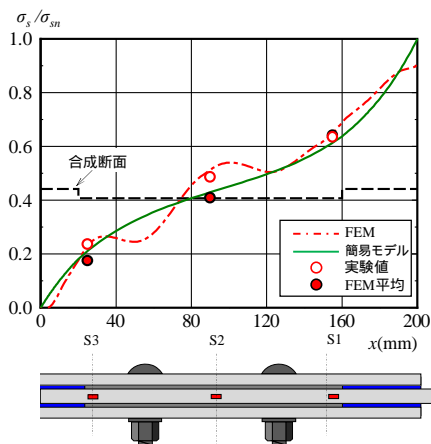


図-12 応力分布(C-BFA40)

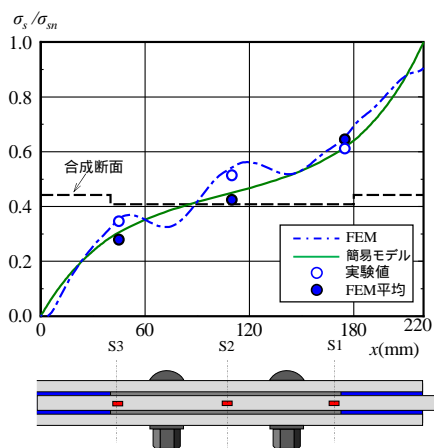


図-13 応力分布(C-BFA80)

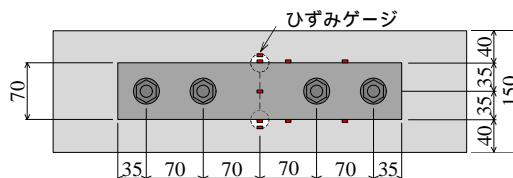


図-14 接着と高力ボルトの合成接合によるストップホールへの応力集中の低減の評価試験体

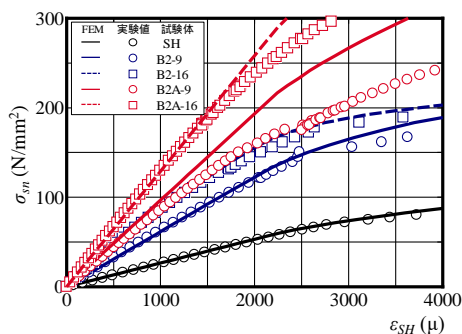


図-15 σ_{sn} と ε_{SH} の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 石川敏之, 池田拓矢, 堀井久一	4. 巻 67A
2. 論文標題 接着と高力ボルト摩擦接合の混合による鋼部材の補修に関する基礎的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 384-397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.67A.384	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 玉利仁, 石川敏之, 政家諒	4. 巻 28
2. 論文標題 当て板ボルト補修と接着を併用したストップホールの応力低減効果	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 530-537
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 石川敏之, 堀井久一	4. 巻 68A
2. 論文標題 接着剤と高力ボルトの併用による当て板補修鋼部材の荷重伝達評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 25-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.68A.25	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1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石川敏之
2. 発表標題 当て板ボルト補修と接着を併用したストップホールの応力集中低減効果
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020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
---------	---------