

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04573

研究課題名(和文) 効率的な補修工法の開発とフレームワーク検討による実態に即した橋梁維持管理

研究課題名(英文) Bridge maintenance based on actual situation by development of effective repair method and framework investigation

研究代表者

宮下 剛 (Miyashita, Takeshi)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20432099

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)：橋梁の損傷形態として、点検が容易ではない部位に腐食損傷が見つかり始めている。本研究では、腐食損傷したトラス橋格点部を対象に、既往の実験結果を参考にしながら有限要素解析を通じて、残存耐力の評価や破壊形態の把握をするとともに、CFRPシートを用いた合理的な補修工法の確立に向けた検討を行った。

また、道路橋示方書の改定によりCFRPを積層した鋼部材を対象に、限界状態設計法の適用も想定される。そこで、本研究では、CFRP積層鋼部材が有する非線形のうち、鋼材とCFRPシートの接着層に挿入したポリウレタ製パテ材の使用による応力低減効果の変化とシートのはく離を再現することが可能な解析手法の検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実施された腐食損傷を有する鋼トラス橋格点部を対象とした解析的検討はこれまで行われておらず、得られた残存耐力やCFRP接着工法に関する情報は、今後の橋梁維持管理に向けた貴重な成果と言える。また、CFRPを接着貼付した鋼部材の非線形解析についても、接着層の構成則レベルから検討し、圧縮力を受ける部材でCFRPのはく離現象を精緻に再現していることから、学術的意義も高く、限界状態設計法の確立に向けて役立つことが期待される。

研究成果の概要(英文)：In recent years, corrosion damage has begun to be found as a damage form of bridges in areas that are not easily inspected. This study evaluated the residual load-carrying capacity and failure modes of corroded truss bridge girders through finite element analysis, referring to previous experimental results, and studied the establishment of a rational repair method using CFRP sheets.

In addition, the limit state design method is expected to be applied to CFRP-laminated steel members due to the revision of the specifications for road bridges. In this study, an analytical approach can reproduce changes in the stress reduction effect and delamination of the CFRP sheet due to the use of polyurea putty inserted in the adhesive layer between the steel and CFRP sheet, among the nonlinearities of CFRP-laminated steel members was investigated.

研究分野：鋼構造

キーワード：維持管理 鋼橋 補修 CFRP FEA

1. 研究開始当初の背景

平成26年に、全ての橋梁の点検を近接目視により5年に1回の頻度で行うことが法令化され、平成30年度に1サイクル目が終了した。確かに、これまで現況すら把握してこなかった橋梁の点検を法令化して実施することは重要である。しかし、問題は、老朽化する橋梁の数が確実に増加することが明らかな中で、現状は橋梁を「見る」ことに主眼が置かれ、限られた予算のもと、「見つかった損傷に対して、どのように具体的な措置を行うか」という議論が皆無なことである。ここでは、効率的な補修工法の開発が求められる。鋼橋に対しては申請者が開発を進めてきたCFRPシートによる補修工法が有効である。

2. 研究の目的

(1) 鋼トラス橋格点部のCFRP補修

近年、橋梁における損傷形態として、設計時点の想定が困難であり、かつ点検も容易ではない部位に腐食損傷が見つかり始めている。例えば、上路ワーレントラス橋におけるガセットプレートと下弦材が接続する溶接部の腐食損傷である。そこで、腐食損傷したトラス橋ガセットプレートを対象に、残存耐力力を把握するとともに、CFRPシートを用いた合理的な補修工法の確立に向けた検討を行う。

(2) CFRPを接着貼付した鋼部材の非線形解析

また、現在、CFRPシートにより補修または補強した鋼部材のFEAは応力分布の確認を目的とした弾性解析が一般的である。一方、道路橋示方書の改定によりCFRPを積層した鋼部材を対象に、限界状態設計法の適用も想定される。そこで、シートのはく離、繊維の破断といった種々の要因によるCFRP積層鋼材の非線形挙動を再現できる解析手法の確立に向けた検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 鋼トラス橋格点部のCFRP補修

腐食損傷したトラス橋ガセットプレートを対象に、既に実施した実験結果を参考にしながら有限要素解析(FEA)を通じて、残存耐力力の評価や破壊形態の把握をするとともに、CFRPシートを用いた合理的な補修工法の確立に向けた検討を行う。

(2) CFRPを接着貼付した鋼部材の非線形解析

CFRP積層鋼部材が有する非線形のうち、鋼材とCFRPシートの接着層に挿入した弾性で伸び性能が高いポリウレア製パテ材の使用による応力低減効果の変化とシートのはく離を再現することが可能な解析手法の構築に資する検討を行う。

4. 研究成果

(1) 鋼トラス橋格点部のCFRP補修

はじめに、本研究で対象とする既往実験の試験体について説明する。試験体のサイズは実橋の1/2であり、損傷形態として腐食による断面欠損を想定した。試験体の形状や寸法は腐食損傷が確認された実橋に基づいている。表1に、試験ケースを示す。試験体Nは、健全なガセットプレートを有する試験体である。試験体Sは、実橋に発生した損傷を想定して、ガセットプレートにザクリ加工により断面欠損(腐食部の高さ h_z : 25 mm, 板厚減少量 t_z : 50%)を与えたものである(図1(e)を参照)。試験体S1とS2は、試験体SをCFRPシート補修したものであり、S1ではガセットプレートの外側のみを補修し、S2ではガセットプレートの外側と内側の両側を補修した。ここで、CFRPシートの積層数は、CFRPを鋼換算して、断面欠損部の剛性を回復するように決定した。また、CFRPシートの貼付方向は、主応力方向を考慮した $\pm 45^\circ$ 方向、斜材の取付け角方向とした $\pm 56^\circ$ 方向、施工性を考慮した 90° 、 0° 方向である(図1)。

載荷試験の結果から、CFRPシート補修によって耐力力の向上がみられ、補修効果を確認した。過年度までに、断面欠損量に応じた残存耐力力ならびに破壊モードの変化を明らかにするために、断面欠損量をパラメータとしたFEAを実施した。この中で、CFRPシート補修をしていない試験体N、Sについて、FEAモデルを作成し、荷重-変位関係、終局強度、崩壊形態等について、実験結果と解析結果の比較から、解析の妥当性を確認した。本研究では、合理的なCFRP補修工法の開発に向け、CFRPシート補修を施した試験体について、FEAを用いた解析的検討を行うこととした。ここでは、CFRPシートや接着剤の厚さが薄いことからモデル化が難しく、CFRPシートのはく離や接着界面の付着モデルを十分に考慮した解析手法に関する研究はほとんど行わ

れていない状況にある。

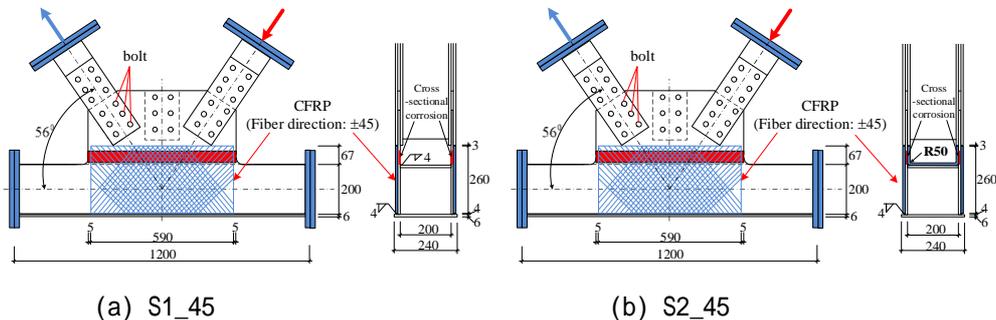
載荷試験の結果、破壊の起点は、CFRP シートのはく離防止を目的として、鋼材と CFRP 間に挿入されたポリウレアパテ材のはく離であることが確認された。このため、FEA モデルでは、このはく離現象を表現するために、断面欠損を有するガセットプレートと CFRP 間の接着層をソリッド要素で、ガセットプレート以外の鋼構造部分と CFRP シートをシェル要素で、ポリウレアパテ材をインターフェース要素で、それぞれモデル化することとした（図 2）。メッシュサイズは、断面欠損近傍で 1 mm 程度、その他の部分で 5 mm 程度を基準とし、ソリッド要素とした接着層についてはその厚さ方向に 10 分割とした。初期不整については、初期たわみは実測値に基づいた正弦波を、残留応力は本ケースでは影響が小さいことを確認した上で導入していない。

鋼材（SS400）の材料モデルは、降伏点（317 MPa）以降の応力 - ひずみ関係として、弾性係数（200 GPa）の 1/100 の勾配を有するバイリニアモデルとし、ミーゼスの降伏条件を適用した。接着層ならびに断面欠損部を充填するエポキシパテ材については、載荷過程で大きな損傷が見られなかったこと、計算負荷を考慮して、本検討では、等方線形弾性体と仮定した。また、CFRP シートについても、繊維方向をふまえた直交異方性を考慮するものの、線形弾性体と仮定した。ポリウレアパテ材については、法線方向とせん断方向にボンドスリップモデルを設定し、材料試験から物性値を同定した上で材料モデルを決定した。ここで、特にせん断方向について、材料試験から同定された物性値にばらつきが見られたことから、せん断強度や相対変位をパラメータとした感度解析を行うこととした。その結果、はく離後の相対変位が、荷重 - 変位関係といった構造挙動に与える影響が大きいことが確認された。

図 3 に、実験結果と解析結果を比較した荷重 - 鉛直変位関係の一例を示す。本解析では、実験の初期剛性ならびに 1300 kN 付近の荷重で発生したガセットプレートの局部座屈に起因する荷重 - 鉛直変位関係の変化が再現されている。この荷重を超えると、実験と解析には、残留応力の影響によると考えられる両者の差が生じている。しかし、最大荷重の比（解析/実験）は、S1_56 で 1487 kN / 1460 kN = 1.02、S2_90 で 1769 kN / 1733 kN = 1.02 と非常に小さくなった。また、破壊形態の比較から、FEA では CFRP シートの破断を再現しきれていないものの、応力集中が発生している様子や鋼材の座屈、ポリウレアパテ材のはく離に起因する CFRP シートのはく離状況が再現されており、非常に高い精度の解析が実現されたと言える。

表 1 試験ケース

試験体	損傷タイプ	CFRP 補修		
		有無	CFRP 貼付方向	CFRP 積層数
N	損傷無	無	-	-
S			-	-
S1_45	断面欠損 ($h_z = 25 \text{ mm}$, $t_z = 4 \text{ mm}$)	有	$\pm 45^\circ$	外側各 9 層
S2_45				内側各 4 層, 外側各 5 層
S1_56			$\pm 56^\circ$	外側各 9 層
S2_56				内側各 4 層, 外側各 5 層
S2_90			$90^\circ \& 0^\circ$	内側各 4 層, 外側各 5 層



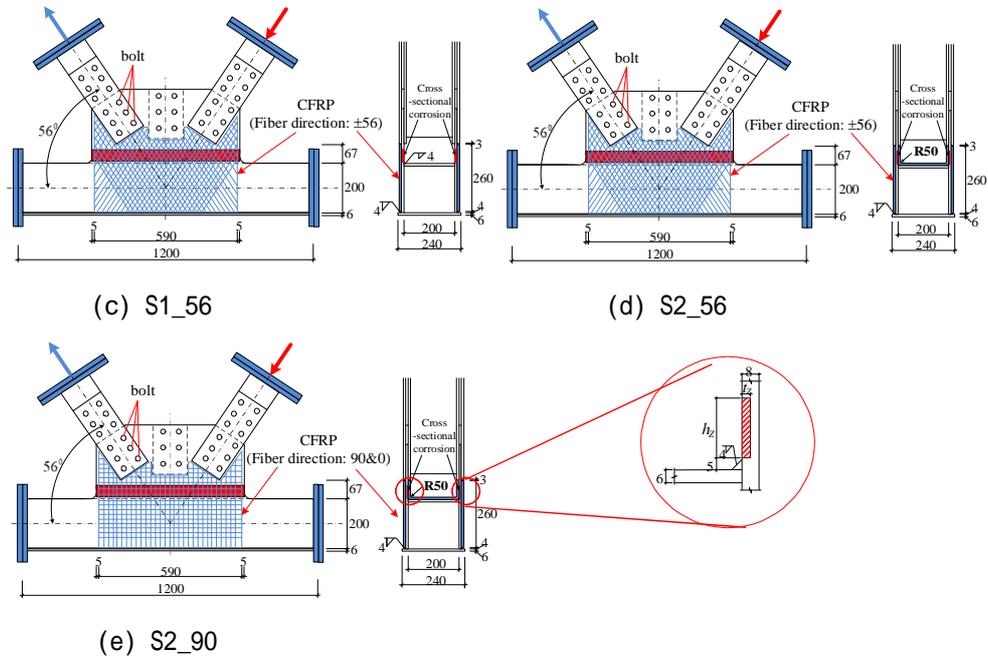


図1 試験ケース（断面欠損は全て同様）

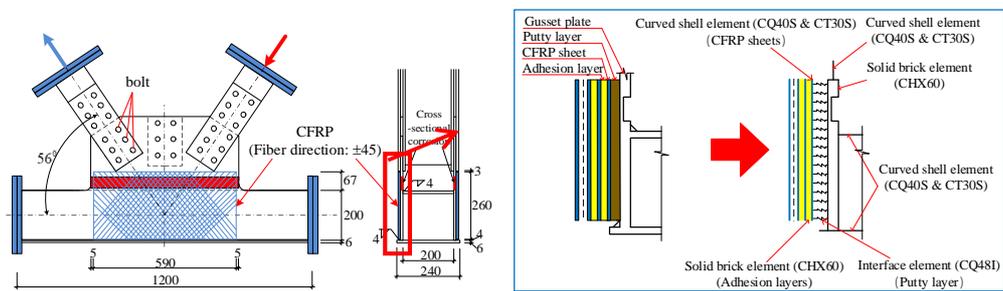


図2 CFRP 貼付部分のモデル化

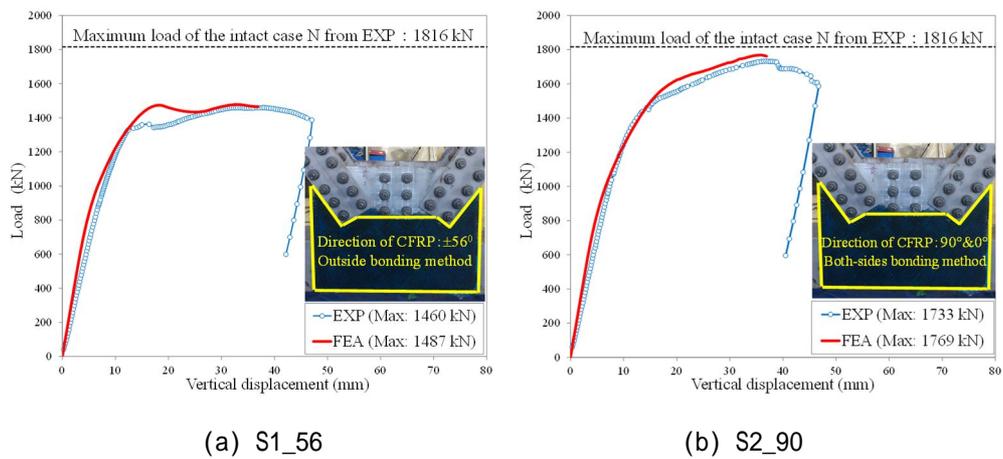


図3 荷重 - 鉛直変位関係の比較（一例）

(2) CFRP を接着貼付した鋼部材の非線形解析

鋼部材の CFRP 接着工法では、高応力下や座屈が生じた場合に CFRP シートのはく離が生じる。これを抑制するために、鋼材と CFRP シートの接着層に低弾性で伸び性能が高いポリウレアパテ樹脂製パテ材(以下、パテ材)を挿入する工法が一般的に用いられる。パテ材を用いた場合、鋼部材から CFRP への応力伝達に遅れが生じ、さらに、パテ材の非線形性に起因して応力の増大とともに鋼部材の応力低減効果がさらに低下する。本研究では、CFRP 積層鋼部材が有する非線形のうち、上述したパテ材の使用による応力低減効果の変化とシートのはく離を再現することが可能な FEA モデルの構築を目的とする。

パテ材の材料特性を検討するために、既往の研究で実施された CFRP 接着鋼板の一軸引張試験の試験片をモデル化し、非線形解析を実施した。また、シートのはく離発生とその後の挙動の再現性を有するパテ材の材料特性を検討するために、既往の研究で実施された CFRP 積層鋼板の一軸圧縮試験の試験片をモデル化し、非線形解析を実施した。樹脂材料であるパテ材とエポキシ樹脂を界面要素、炭素繊維をシェル要素でモデル化することで、要素サイズの依存性を有さないモデルとなることを確認した。

応力低減効果変化の再現性

パテ材の材料特性は、界面要素の法線・せん断方向の応力 - 相対変位関係に導入する。図 4 にシート 10 層、定着長 200 mm、ずらし量 10 mm のモデルにおける応力低減係数 C_n の解析値と実験値の比較を示す。まず、法線方向の剛性成分に弾性係数 E を塗布厚さ t で除した値、せん断方向にせん断弾性係数 G を t で除した値を用いた三角形分布の結果を見る。低応力下で、解析値は実験値と概ね一致するが、実験値で 150 N/mm^2 以降に生じる C_n の低下が再現できていない。そこで、せん断方向の応力 - 相対変位関係を、鋼材応力 150 N/mm^2 において FEA モデルの定着長端部で生じた応力 τ_e で剛性が低下する四角形分布とした上で、剛性低下率をパラメータとして検討した。この結果、剛性低下率が 90% であるモデルが実験結果の再現性を有した。

シートのはく離の再現性

上記の検討から得られた応力 - 相対変位関係をもとに、各方向の応力の最大値(最大付着応力 σ_y, τ_y) とその後の軟化挙動を一軸圧縮試験のモデル化から検討した。この結果、図 5 に示すモデルを得た。法線方向では最大付着応力を鋼材付着強度とし、材料試験結果を参考に初期剛性の 1.3 倍の傾きを有する軟化挙動とする分布を得た。また、せん断方向は最大付着応力を 2.46 N/mm^2 とし軟化挙動が傾きを有さないカットオフとする分布を得た。このモデルを用いた解析結果と実験結果の比較を図 6 に示す。解析値と実験値は概ね一致する結果となった。

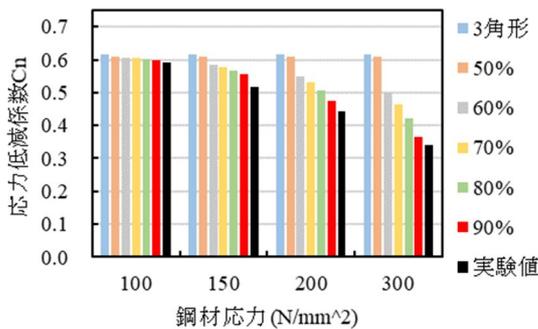
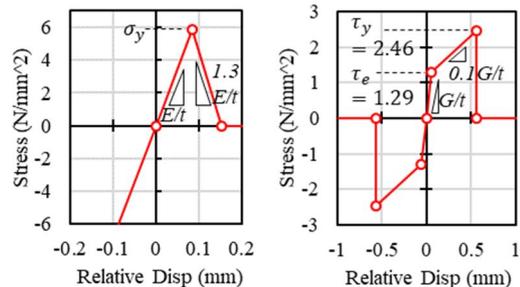


図 4 応力低減係数 C_n の比較

($n = 10$, 定着長 200mm, ずらし量 10mm)



(a) 法線方向

(b) せん断方向

図 5 パテ材の応力-相対変位関係

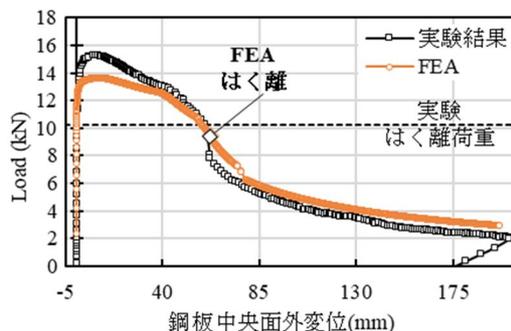


図 6 荷重-面外変位関係 (実験値との比較)

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 PHAM Ngoc Vinh, Miyashita Takeshi, Ohgaki Kazuo, Okuyama Yusuke, Hidekuma Yuya, Harada Takuya	4. 巻 147
2. 論文標題 Load-Carrying Capacity of Corroded Gusset Plate Connection and Its Repair Using CFRP Sheets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003030	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 TAKAMORI Atsuya, MIYASHITA Takeshi, PHAM Ngoc Vinh, HARADA Takuya, HIDEKUMA Yuya, OHGAKI Kazuo	4. 巻 77
2. 論文標題 CFRP SHEET REPAIR FOR STEEL GIRDER WITH CORRODED DAMAGE NEARBY CONNECTIONS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))	6. 最初と最後の頁 165 ~ 179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.77.1_165	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 Pham Ngoc Vinh, Miyashita Takeshi, Ohgaki Kazuo, Hidekuma Yuya, Harada Takuya	4. 巻 147
2. 論文標題 Repair Method and Finite Element Analysis for Corroded Gusset Plate Connections Bonded to CFRP Sheets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002862	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 PHAM Ngoc Vinh, MIYASHITA Takeshi	4. 巻 8
2. 論文標題 NONLINEAR STRESS ANALYSIS FOR CFRP-SHEET-BONDED STEEL PLATES UNDER UNIAXIAL TENSILE LOADING	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 127 ~ 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/journalofjsce.8.1_127	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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 高森敦也, 宮下剛, PhamNgocVinh, 大垣賀津雄
2. 発表標題 鋼桁添接板近傍の腐食損傷に対するCFRP シートを用いた補修
3. 学会等名 第38回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高森敦也, 宮下剛, PhamNgocVinh, 原田拓也, 秀熊祐哉, 大垣賀津雄
2. 発表標題 添接板近傍に腐食損傷を有する鋼桁の曲げ耐力
3. 学会等名 第75回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田拓也, 長谷俊彦, 大垣賀津雄, 下前照, 宮下剛, Pham Ngoc Vinh, 奥山雄介, 秀熊佑哉, 西野晶弘
2. 発表標題 トラス橋下弦材格点ガセットプレート腐食部のCFRPによる補修工法に関する実験研究 (その2)
3. 学会等名 第75回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi MIYASHITA
2. 発表標題 Remaining Capacity of Corroded Gusset Plate in Steel truss Bridge
3. 学会等名 the 12th Pacific Structural Steel Conference (PSSC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeshi MIYASHITA
2. 発表標題 Remaining Capacity of Corroded Gusset Plate Connection
3. 学会等名 IABSE Congress New York City (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大垣賀津雄
2. 発表標題 腐食損傷のあるトラス橋下弦材のFRP補修による圧縮強度に関する実験研究
3. 学会等名 第74回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ngoc Vinh PHAM
2. 発表標題 一軸引張を受けるCFRPシートが接着された鋼板の非線形解析に関する研究
3. 学会等名 第74回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. P. Fernando
2. 発表標題 鋼構造物連結部の炭素繊維シートによる補修
3. 学会等名 第74回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 眞保憲靖
2. 発表標題 圧縮を受けるH形断面部材のCFRP補強に関する実験的研究
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高森敦也
2. 発表標題 高伸度弾性パテ材を用いて炭素繊維シートを接着した鋼板の解析モデル化に関する検討
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高森敦也
2. 発表標題 FRP接着工法による圧縮を受けるH形断面部材の耐震補強に関する実験的検討
3. 学会等名 第76回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秀熊佑哉
2. 発表標題 引張を受けるH形断面部材のCFRPシートによる耐震補強に関する実験的研究
3. 学会等名 第76回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下前照
2. 発表標題 鋼桁腹板のCFRPシートによる補強に関する解析的研究
3. 学会等名 第76回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷俊彦
2. 発表標題 CFRPシート工法により補強した鋼H形断面部材の繰返し交番載荷実験
3. 学会等名 第76回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

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