

令和元年6月21日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06461

研究課題名(和文) 日本版Manual for Bridge Evaluationの構築に向けた研究

研究課題名(英文) Research on Manual for Bridge Evaluation in Japan

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、諸外国で実施されている手法を参考にしながら、橋梁維持管理の効率化についての検討を行った。具体的には、通常の橋梁設計で使用されている解析手法よりも高度な解析手法を使用したり、橋梁の強度を最大限活用することで、いまある橋梁を有効活用できる可能性があることが分かった。また、腐食損傷した鋼橋の強度低下量に関する知見を得るとともに、道路橋を走行する車両の重量を簡易に推定する手法に関する検討も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Load Ratingの試計算から、旧設計基準で設計された橋梁でも、構造システムとしての強度や限界状態設計法を適用することで、維持管理のタイミングを遅らせられる可能性が分かった。次いで、強度評価と状態係数の精緻化に向けて、鋼桁端部と鋼トラス橋ガセットプレートに生じた腐食損傷が残存耐荷力に与える影響を把握した。さらに、効率的な活荷重係数の把握に向けて、伸縮装置を利用する新たなBWIM手法について検討した。これらの成果はいずれも部分係数法を用いる橋梁維持管理に対して有益な知見であり、橋梁維持管理の効率化に結びつく。学術的な意義と共に、財政がひっ迫する我が国においてはその社会的意義も非常に大きい。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the efficiency improvement of bridge maintenance management by referring to the methods implemented in other countries. Specifically, there is a possibility that the existing bridge can be effectively used by using an analysis method that is more advanced than the analysis method used in ordinary bridge design or utilizing the most of the strength of the bridge. In addition to obtaining knowledge about the strength reduction of a steel bridge damaged by corrosion, a method to easily estimate the weight of a vehicle traveling on a road bridge was also investigated.

研究分野：構造工学

キーワード：橋梁 維持管理 Load Rating

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、我が国では、道路橋示方書の部分係数版への改定が急ピッチで進められている。一方、AASHTO では、Load Resistance Factor Rating (LRFR) と称する、部分係数法を用いた橋梁維持管理の体系が、設計体系と合わせて既に整備されている。ここでは、Manual for Bridge Evaluation (MBE) というマニュアルを用いて、点検結果を反映させながらシステマチックに重量制限の評価 (Load Rating) を行うことも可能である。我が国でも、これから高齢化する橋梁の数が急増する状況を鑑みると、このタイミングに合わせて、部分係数を用いた性能照査型の維持管理体系、つまり日本版 MBE の整備を進めておくことは、時宜に適っている。

Load Rating では、劣化した強度 C から死荷重作用 D を減じて、活荷重作用 L で割った、下式で表される Rating Factor (RF) が用いられる。

$$RF = (C - D) / L$$

$$C = \Phi_c \Phi_s \Phi_n R_n, D = \gamma_{DC} DC + \gamma_{DW} DW, L = \gamma_{LL} (LL + IM)$$

ここに、 Φ_c は状態係数、 Φ_s はシステム係数、 Φ_n は抵抗係数、 R_n は公称強度、 DC は構造部材と附属物による死荷重作用、 DW は舗装による死荷重作用、 γ_{DC} と γ_{DW} はそれぞれ対応する荷重係数、 LL は活荷重作用、 IM は衝撃による活荷重作用、 γ_{LL} は活荷重係数である。

2. 研究の目的

本研究では、日本版 MBE の構築に向けた検討を行う。対象は申請者が専門とする鋼橋とする。

- (1) 諸外国で実施されている Load Rating に関する情報を収集、整理するとともに、Load Rating の試計算を実施し、課題を抽出する。
- (2) 腐食損傷した鋼橋部材を対象として、劣化した強度 C の評価の精緻化を図る。
- (3) 状態係数 Φ_c の精緻化ならびに活荷重係数 γ_{LL} の把握に向けて、実橋計測あるいは長期モニタリングを行うとともに、新たな Bridge Weigh In Motion (BWIM) 手法について検討する。

3. 研究の方法

(1) Load Rating の試計算

MBE の整備は、AASHTO の他、欧州各国やオーストラリア、カナダなどでも進められており、これら情報の収集、整理をする。また、わが国の鋼鉄桁橋を対象として、橋梁管理者から、一般図、断面構成図、設計計算書、点検結果などの提供のもと、Load Rating の試計算を実施する。対象橋梁のパラメータは、(a) 単純桁、連続桁、(b) 非合成桁設計、合成桁設計、などとする。

(2) 損傷と耐荷力の関係

近年、腐食損傷を有する鋼鉄桁橋の桁端部の解析ならびに実験の研究が進められているものの、現場では腐食損傷を有する桁端部の対策の要否について定性的な判断によるところが多い。そこで、既往の実験および解析データを整理し、構造諸元から設定できる降伏耐力の低下率や残存板厚率等をパラメータとした腐食による桁端部の耐力への影響図を作成し、欠損状態の耐力を分析する。また、実橋において、トラスガセットと弦材の溶接部で深刻な腐食損傷が発見されたことから、溶接部の腐食損傷量がトラスガセットの耐荷力に与える影響について有限要素解析 (FEA) によるパラメトリック解析を行う。

(3) 実橋の挙動把握と新たな BWIM

実橋計測の対象は、供用下での挙動が十分に把握されているは言いがたい、わが国で、はじめて少補剛コンセプトのもとコンパクト断面設計が適用された鋼鉄桁橋とする。ここでは、車両を用いた載荷試験を行い、加速度やたわみの計測を通じて、動特性の同定ならびに実挙動の把握を行う。また、長期モニタリングの対象橋梁は、気温が橋梁の動特性に与える影響を把握するため、寒冷地にある鋼鉄桁橋とする。ここでは、すでに加速度と温湿度計測を行っているものの、さらなる実橋梁の状態と挙動の把握に向けて、支承の変位計測などを追加してモニタリングを継続する。

一方、本研究で検討する新たな BWIM 手法では、伸縮装置を利用する。すでに実橋梁の伸縮装置にひずみゲージを設置して、平成 27 年度から 28 年度で、定期的なデータ取得を行っている。本年度は、載荷試験車によるキャリブレーションデータをもとに、これまでに取得されたデータの分析を進め、方法論について検討する。

4. 研究成果

(1) Load Rating の試計算

ここでは、Load Rating (LR)の試計算の一例を示す。

a) 対象橋梁

対象橋梁は、単純合成I桁橋（支間長：39.25 m）であり、昭和55年の道路橋示方書に従ってL-20荷重により設計されている。図1に、その断面図を示す。

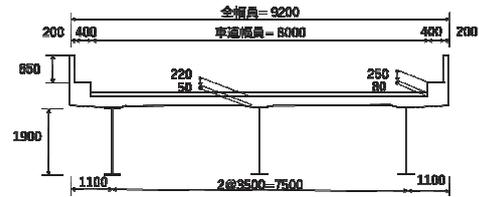


図1 対象橋梁

b) 格子桁解析による Load Rating

対象橋梁は、現行基準であるB活荷重では設計されていない。このため、設計荷重の変更による影響を把握するため、はじめに許容応力度設計法 (Allowable Stress Rating: ASR) によるLRを行う。LRは下式にもとづく。

$$RF = \frac{C - \gamma DL}{\gamma LL(1+i)}$$

ここで、 C は耐荷力であり、ASRにおいては許容応力度となる。 DL 、 LL はそれぞれ死荷重、活荷重による効果（応力）である。また、 i は衝撃係数、 γ は荷重の部分係数である。ただし、ASRでは部分係数を使用しない。なお、応力の算出では、通常の橋梁設計と同様に格子桁解析を行う。さらに、本研究では、比較のため、本研究では諸外国（アメリカ：HL-93、オーストラリア：S1600、カナダ：CL1-W）の活荷重も作用させた。図2に比較結果の一例を示す。

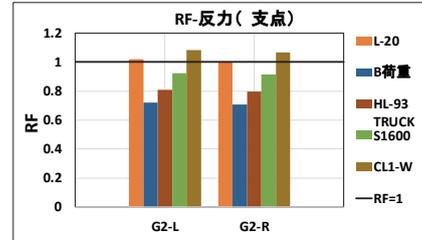


図2 ASRによる Load Rating

- ・ 反力についてはB活荷重が最も不利な結果を与え、 $RF \approx 0.75$ となる。
- ・ せん断力については、全ての活荷重に対して、 RF が1.0を大幅に超えている。
- ・ 曲げモーメントについては、L-20荷重のみが評価を満足する結果となるが、乾燥収縮、クリープ減少、温度差による応力度を考慮すると、全ての活荷重に対して、 RF が1.0を下回る。この理由は、荷重組合せにおける割り増し係数による影響である。

c) Load Rating 手法の比較

ここでは、諸外国の各基準（AASHTO ASR, AASHTO LFR, AASHTO LRFR, BLE Canada, BE Australia）で定められている耐荷力 C と部分係数 γ を用いることとし、活荷重にはB活荷重を用いる。比較結果の一例を図3に示す。反力については、L-20以外の活荷重で RF は1.0を下回る。しかし、曲げモーメントとせん断力については、 RF が1.0を大幅に上回る。

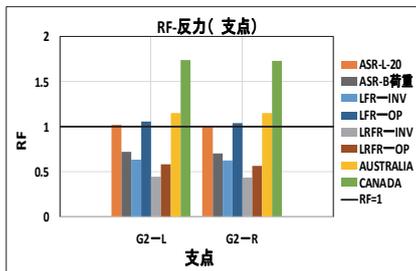


図3 Load Rating 手法の比較

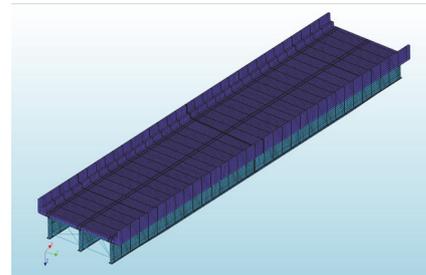


図4 FEA モデル

d) 三次元 FEA による Load Rating

格子桁解析では明らかにできない橋梁システムとしての挙動を把握するために、三次元 FEA による Load Rating を行う。図4に使用した FEA モデルを、図5に FEA による結果の一例を示す。例えば、支間中央の曲げモーメントについて、格子桁解析では RF が1.0を下回るような場合でも、三次元 FEA を用いて床版を含む橋梁システムとしての強度を評価することで、 RF が1.0を上回ることが分かる。

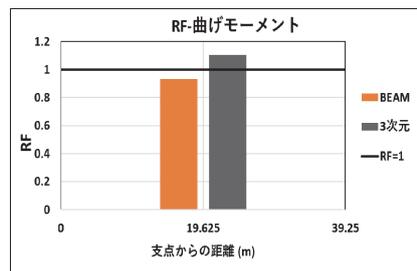


図5 解析手法による比較

(2) 損傷と耐荷力低下の関係

鋼桁橋の桁端部の腐食損傷と耐荷力低下の関係については発表論文 1) に詳しいため、ここでは、鋼トラス格点部ガセットにおける腐食損傷と耐荷力低下の検討について述べる。

a) はじめに

鋼トラス橋格点部ガセットプレートに、図 6 に示すような腐食損傷がみられた。ここは下弦材上フランジとガセットプレートの溶接部分であり、適切な維持管理を行うためには、腐食損傷が耐荷力に与える影響を評価する必要がある。はじめに、腐食量をパラメータとした载荷試験を行い（発表論文 2)）、次いで、実験の補完に向け、腐食量をパラメータとしたパラメトリック FEA を実施した。以下ではこの結果を述べる。

b) 対象モデル

実験供試体は、実橋を参考にした 1/2 モデルとし、ガセットプレートと下弦材の上フランジを接続位置に高さ h_z と幅 t_z の切削加工を施すことで腐食損傷を模擬した（図 7）。この供試体に载荷フレームをセットして、载荷試験を行った。以下に示すパラメトリック FEA では、 h_z と t_z をパラメータとする。

c) 解析モデル

作成した FEA モデルの一例を図 8 に示す。構造体には曲面シェル要素を基本としつつ、腐食損傷部にはソリッド要素を用いた。また、载荷フレームには梁要素を用いた。FEA モデルのメッシュサイズは、5 mm を標準とし、腐食損傷部は 1 mm とした。一例として、損傷がある場合の FEA モデルにおける節点数と要素数はそれぞれ 101,403 と 28,476 である。鋼材の材料モデルは、2 次勾配をヤング係数の 1/100 とするバイリニアモデルである。初期不正として、初期たわみならびに残留応力を導入する。そして、強制変位を漸増载荷させ、複合非線形解析を実施した。

d) 解析パラメータ

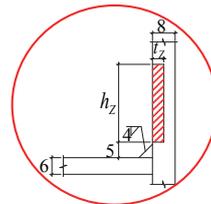
本研究の解析ケースは、腐食損傷部の高さ h_z を 25 mm と 50 mm に変化させた 2 ケース、さらに腐食損傷部の板厚欠損量 t_z を 1 mm から 6 mm まで段階的に変化させた 7 ケース（健全時の板厚は 8 mm）であり、合計 14 ケースとした。

e) 解析結果

腐食損傷部の高さ h_z をパラメータとして、板厚減少量と耐荷力低下量の関係を図 9 に示す。ここで、横軸は健全時の板厚に対する板厚の減少量を、縦軸は健全時の最大荷重 P^0_{max} に対する各解析ケースの最大荷重 P_{max} の比を表す。板厚減少量が小さいときの崩壊形態は圧縮力を受ける斜材直下の局部座屈が卓越し、板厚減少量が大きいときの崩壊形態は腐食損傷部でのせん断破壊となった。せん断破壊では、腐食損傷部の高さ h_z に依存しないことが分かる。これらの関係の簡易評価式は、発表論文 3) に詳しい。



図 6 鋼トラス橋ガセットプレートの腐食損傷



The detail of Groove section

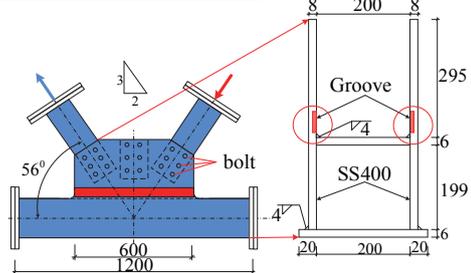


図 7 対象モデル

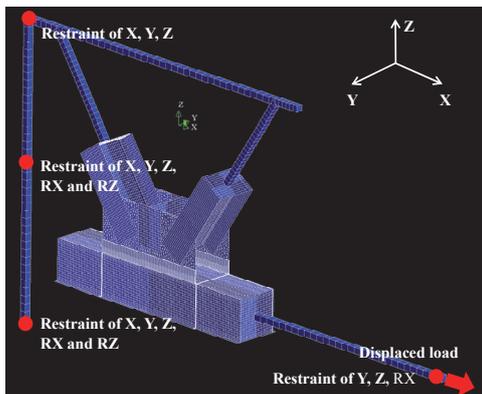


図 8 FEA モデル

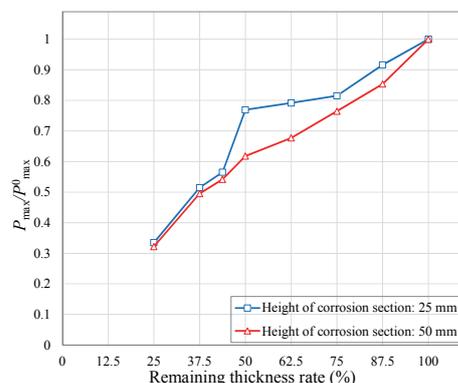


図 9 板厚減少量と耐荷力低下量の関係

(3) 実橋の挙動把握と新たな BWIM

a) 実橋の挙動把握

実橋計測と長期モニタリングについては、誌面の都合から、学会発表 1) と学会発表 8) を参照されたい。

b) 新たな BWIM

実交通を把握する方法として BWIM がある。現在、橋梁部材の応答を利用した計測方法が提案されているものの、橋梁形式によっては適用が難しいなどの問題点がある。そこで、橋梁形式を問わず、簡易に実施することが可能な BWIM が求められている。

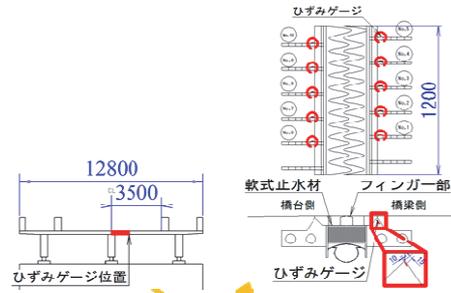


図 10 計測位置

本研究では、実交通の把握に向けて伸縮装置に着目する。これは、車重を直接受ける同部材の状態把握にも繋がる。手順としては、はじめに、伸縮装置にひずみゲージを貼付し、軸重や総重量が既知の車両を走行させて荷重とひずみ応答値の関係を得るキャリブレーション計測を行う。そして、自由交通流下の計測を実施して、走行車両の総重量など実交通の把握を行う。

対象橋梁は、橋長が 180 m、幅員が 12.8 m の 5 径間鋼鈹桁橋であり、ひずみゲージを貼付する伸縮装置の形式は、鋼製フィンガージョイントである。図 10 にひずみの計測位置を示す。キャリブレーション用の試験車両は三軸の大型ダンプカーであり、車両の総重量は約 20 tonf で、各車軸重量を事前に計測している。そして、車速を 0, 4, 10 km/h とし、各速度について 3 回または 4 回ずつ計測を行う。さらに、実交通の把握に向けて、自由交通流下における伸縮装置のひずみ応答を計測する。データ計測は 3 日間行うものとし、1000Hz とし計測を行った。計測結果の一例を図 11 に示す。同図より、車両の走行の際に、車軸ごとの応答が明確に検出されていることが分かる。

はじめに、一般交通の計測結果から、鋼製フィンガージョイント部の疲労損傷度について検討する。疲労損傷度は鋼材の疲労設計曲線を参考にする。図 12 に計測から得られた伸縮装置の疲労損傷度分布を示す。これより、位置に応じて疲労損傷度には大きな違いがあることが分かり、伸縮装置でのひずみ測定は、伸縮装置の損傷箇所や劣化順序の予測にも利用できる。

次に、キャリブレーション計測をもとに、ひずみと車重の関係を求め、自由交通流下における車両重量を推定する。ひずみと車両重量の関係を求める手順は、はじめに、キャリブレーション計測から得られた計測値を重量ごとにプロットして近似線を求める。次いで、得られた式から単位荷重あたりのひずみの変化量を求める。最後に計測値をキャリブレーション計測の計測値で除して推定車重を算出する。なお、この際に用いる計測値は、複数のひずみゲージから得られた合計値とする。図 13 に、車重推定値と実荷重の関係を示す。これより、ひずみと車両重量の関係には高い相関性が確認され、10%未満の誤差範囲で車両の総重量を求めることが可能である。さらに、一般交通の計測結果から、時間帯ごとの通過車両の分布 (図 14) を求めた。これより、幅広い車種の車両通過が確認され、時間に応じた通行量の推移も分かる。

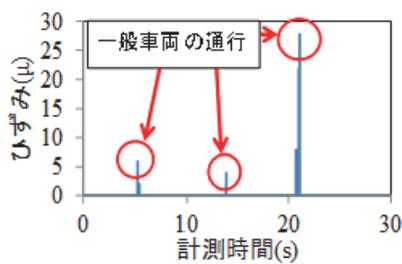


図 11 実交通のひずみ応答

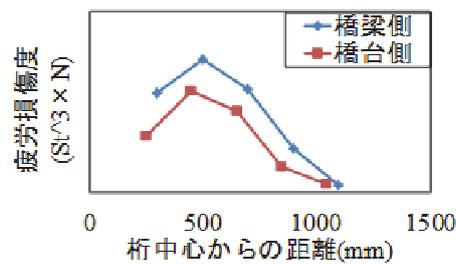


図 12 位置ごとの疲労損傷度

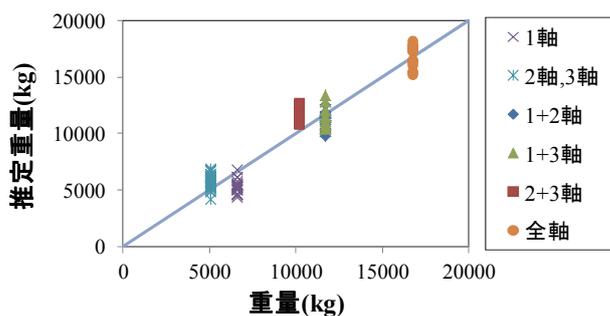


図 13 推定値と実荷重の関係

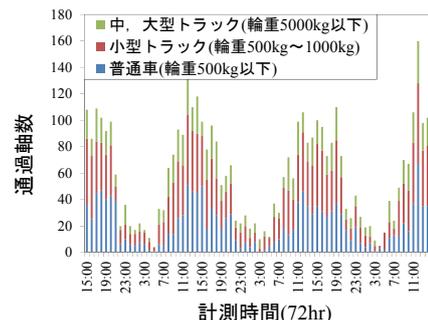


図 14 車両通過量 (計測時間 72hr)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- 1) 白倉誠, 宮下剛, 佐々木栄一, 三ツ木幸子, 山崎努, 杉山俊幸: 腐食損傷を有する鋼 I 桁端部の耐力推定方法に関する一検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.3, pp.560-578, 2017.11. (doi.org/10.2208/jscejsee.73.560)
- 2) N. V. Pham, T. Miyashita, K. Ohgaki, Y. Okuyama, A. Kobayashi, Y. Hidekuma, T. Hirose and T. Harada: Repair method using CFRP sheet for corroded gusset plate connection in truss bridges, Journal of JSCE, Vol.6, No.1, pp.91-109, 2018.9. (doi.org/10.2208/journalofjsce.6.1_91)
- 3) N. V. Pham, T. Miyashita, K. Ohgaki, Y. Okuyama, A. Kobayashi, Y. Hidekuma, T. Hirose and T. Harada: Analytical study on remaining capacity of corroded gusset plate connection in truss bridges, Journal of JSCE, Vol.6, No.1, pp.127-146, 2018.11. (doi.org/10.2208/journalofjsce.6.1_127)

〔学会発表〕(計11件)

- 1) 中村雅範, 宮下剛: コンパクト断面を採用した鋼道路橋(金谷郷高架橋)の実挙動計測, 第71回土木学会年次学術講演会, 2016.9.
- 2) 高橋政宏, 宮下剛, 利根川太郎, 松野正見, 衣川扶: 伸縮装置を用いた Bridge-Weigh-In-Motion に関する研究, 第71回土木学会年次学術講演会, 2016.9.
- 3) 有馬直秀, 深田宰史, 鈴木啓悟, 宮下剛, 戎家隆: 北陸自動車道における活荷重の実態把握に関する一検討, 第71回土木学会年次学術講演会, 2016.9.
- 4) G. R. Jonathan, 宮下剛, 奥井義昭: 既設橋の性能評価 (Load Rating) に関する研究, 第72回土木学会年次学術講演会, 2017.9.
- 5) 劉翠平, 牛島栄, 宮下剛: 下フランジの腐食をもつ鋼桁の耐荷力に関する解析的研究, 第72回土木学会年次学術講演会, 2017.9.
- 6) 富岡昭浩, 玉田和也, 宮下剛, 有馬直秀, 黒木孝司: 固有振動数測定のみならず低減に向けて, 第72回土木学会年次学術講演会, 2017.9.
- 7) ファム ゴック ヴィン, 宮下剛, 大垣賀津雄, 奥山雄介, 秀熊佑哉: EXPERIMENTAL STUDY ON REPAIR METHOD USING CFRP FOR CORRODED GUSSET PLATE CONNECTION IN TRUSS BRIDGE, 第72回土木学会年次学術講演会, 2017.9.
- 8) 小川大智, 高橋友弥, 宮森保紀, 大胡拓矢, 富岡昭浩, 宮下剛: 長期橋梁モニタリングによる少数主桁橋の固有振動数の変動, 土木学会北海道支部平成29年度論文報告集, 2018.1.
- 9) N. V. Pham, T. Miyashita, K. Ohgaki, Y. Okuyama, A. Kobayashi, Y. Hidekuma, T. Hirose and M. Hattori: Repair Method for Corroded Gusset Plate Connection in Truss Bridge by Using CFRP Sheet, Proc. of the 9th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2018), Paris, 2018.7.
- 10) Md Niamul Islam, Ngoc Vinh Pham, T. Miyashita, K. Ohgaki, Y. Okuyama, A. Kobayashi, Y. Hidekuma, T. Hirose, T. Harada: Study on Remaining Load-carrying Capacity Of Corroded Gusset Plate Connection by FEM Analysis, 第73回土木学会年次学術講演会, 2018.8.
- 11) Ngoc Vinh Pham, T. Miyashita, K. Ohgaki, Y. Okuyama, A. Kobayashi, Y. Hidekuma, T. Hirose and T. Harada: Method Evaluating Local Buckling Strength Of Gusset Plate Connection With Cross-sectional Corrosion Section, 第73回土木学会年次学術講演会, 2018.8.

〔図書〕(計0件)

なし

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※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、研究者個人に帰属されます。