

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：55503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06547

研究課題名(和文)地域の老朽化鋼橋における耐荷性能の解析的検証～「あと 年」のニーズに応える～

研究課題名(英文)Analytical verification on remaining load bearing capacity of regional aging steel bridge -Responding to needs on remaining service life-

研究代表者

海田 辰将(Kaita, Tatsumasa)

徳山工業高等専門学校・土木建築工学科・教授

研究者番号：10390519

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、地域の老朽化鋼トラス橋を対象とし、架け替えや補修までの「あと 年」を意識した維持管理計画に有用な知見を得るため、供用中のトラス橋2橋について、橋梁全体の耐荷力解析、実橋載荷試験と解析結果の比較、腐食進展予測モデルによる耐荷力低下予測を実施した。については、ポ
ニートラスとプラットトラスについて腐食損傷調査と全橋解析を行い、実際の通行ニーズに対する実質的な耐荷力の余裕分について論じた他、過去の科研課題で実施した実橋載荷試験との比較により、解析モデルの妥当性や設計実務への適用性に言及した。については圧縮部材に生じている腐食を進展させた場合の耐荷力の低下に関する予測例を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、地域の市町管理橋における「あと 年もたせたい」とのニーズに応えるため、中山間地域で約100年間供用中の高齢鋼トラス橋(2橋)を対象とした構造解析と実橋載荷試験を行い、補修や架け替えといった措置までの間の比較的短期間(概ね10年程度)における安全性を確保するための省力的かつ経済的な維持管理に対する考え方に資するための解析的ケーススタディを示した。
本研究では、解析モデルに対する考え方、橋梁の現有耐荷力推定、実際の通行ニーズを想定した荷重に対する安全性、損傷が進展した場合の将来予測の観点から解析結果を考察している。

研究成果の概要(英文)：This analytical study has 3 main contents ((1) whole bridge analyses for clarifying remaining load bearing capacity, (2) Comparison of load proof test with analytical results, (3) Remaining strength analysis using corrosion progress model) for obtaining the useful knowledge about future planning which becomes conscious of remaining service life. Main results of this study are as follows;

- (1) Practical margin of load bearing capacity considering actual corrosion damages and traffic needs was clarified for 2 types of aging truss bridge. From the comparison of load proof test and analytical results, axial live load stresses and vertical displacement were almost matched.
- (2) Even if the corrosion progress of an actual corrosion damage for 30 years was assumed, decrease of load bearing capacity on whole bridge was less than 5%. In corrosion progress model, assuming of control parameter for generating corrosion surface should be more discussed depending on actual corrosion environment.

研究分野：鋼構造学，維持管理工学

キーワード：鋼構造 腐食 耐荷力 維持管理 トラス橋 活荷重倍率 有限要素解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 橋梁の老朽化問題については国や県管理橋よりも市町村といった自治体管理橋の方が深刻化しやすい傾向にある。しかし、地域が抱える橋梁には小規模橋が多いという特徴があり、自治体の財政状況を鑑みると、よほどの緊急性が無い限り、補修補強や架け替え等の対策に対して事実上の「順番待ち」となっている現状がある。

(2) 中山間地域や過疎化地域を多く抱える自治体では、たとえ交通量の少ない橋梁であっても、地域住民の生活・防災基盤である以上は撤去や通行止め、歩道橋への転用等の判断には慎重にならざるを得ない側面も同時に抱えている。

(3) (1)(2)より、長寿命化修繕計画で定められた対策実施予定年度までの比較的短期間での供用を想定した維持管理方法や維持管理方針に関する技術的ニーズが高まっている。具体的には、中程度以上の腐食損傷を有する老朽化鋼橋に対して「●年後に架け替える（補修する）ことになっているのだけれども、それまでの供用期間内の安全性を担保したい。そのためにどのような維持管理をすれば良いか？」という声を管理者から耳にすることが多い。

2. 研究の目的

(1) 解析モデルの構築方法や腐食損傷が橋梁全体として耐荷力や終局挙動に与える影響の評価
シェル要素または梁要素を用いて対象橋梁の全橋解析モデルを作成し、腐食減肉や残留変形を考慮した弾塑性非線形解析を行うことでそれぞれの損傷が橋梁全体の終局挙動や耐荷力に与える影響を明らかにする。また、想定する活荷重の大きさや位置をパラメトリックに変化させることで、個々の部材の作用応力を求め、実際に発現しうる崩壊パターンを予測する。

(2) 解析結果の妥当性検証

想定荷重と同じ車両を用いた実橋載荷試験を行う。載荷位置を変化させた静的載荷を行い、一部の腐食部材のひずみ、橋梁全体のたわみ等の物理量を測定して解析結果と比較し、解析モデルの改善や導入している仮定の見直しを図る。

(3) 崩壊トリガー部材の同定・設計実務との比較

活荷重倍率の観点から崩壊のトリガーとなる部材を同定し、橋梁の現有耐荷力を評価する。また、設計実務（平面骨組計算）に基づく部材応力の計算結果と解析結果を比較することで、供用年限内の荷重制限、補修方針に関する技術的提案を行う。

(4) 腐食進展モデルを用いた解析の手法による将来的な残存耐荷力の低下予測に関する検討

時間とともに進展する腐食表面形状を数値的に再現することで数十年先までの減肉状況を予測し、(1)~(3)で示した解析モデルに考慮してパラメトリック解析を実施することで、耐荷力の低下曲線を描くための手法を提案する。

(5) 上記の目的を達成することで、概ね10~20年程度の比較的短期間での供用を想定した場合に、実際の通行ニーズ（最大活荷重）に対して安全性を確保するためのポイントを絞った維持管理を考える際に有用な知見を提供する。

3. 研究の方法

本研究では、中山間地域で約100年間供用中の既設鋼トラス橋（写真1）を対象とした調査・解析・実験を行い、研究目的の達成を目指した。具体的な方法は、以下の通りである。

(1) 腐食損傷および寸法調査

対象橋梁は約100年前に建設されており、設計図面がほとんど残っていないことから、現地にて寸法調査を数回実施し、補修や点検の際に作成された図面と照合しながら解析モデルを作成するための図面を製作した。また、これらの橋梁の主構には多くの腐食損傷が発現しており、一部は貫通孔にまで達しているため、アプローチでできなかった一部の床組部材を除く主構造部材の腐食損傷について「最大深さ」「腐食面積」「位置」を測定し、腐食マップを作成した。

(2) 有限要素法による全橋解析

(1)の結果に基づいて、全橋解析モデルを構築し、主荷重（活荷重+死荷重）を想定した終局強度解析を実施した。荷重は、活荷重倍率によって活荷重を漸増させる形



A 橋 (L=50m)



B 橋 (L=30m)

写真1 対象橋梁

の Load Rating 法によって与え、解析モデルが終局を迎えたときの最大活荷重倍率を橋梁全体の耐荷力と定義した。解析に用いた要素は 4 節点シェル要素およびはり要素（2次）である。腐食損傷は、(1)の結果に基づいてシェル要素の板厚変化として与えている。



写真2 実橋載荷試験(A橋)

(3) 実橋載荷試験 (写真2)

研究期間中に補修工事が入ったためB橋の実橋載荷試験はできなかったが、A橋の実橋載荷試験を実施しており、その結果と解析結果の比較を通して解析モデルの検証と改善を行った。A橋は現状 8tf の重量制限が設けられているため、8tf に重量調整したトラック 2 台に対する部材の活荷重応力および橋梁全体のたわみなどを測定した。

4. 研究成果

(1) B橋の腐食損傷調査 (図1) および全橋解析による現有耐荷力評価 (平成29年度)

現存する橋齢98年の鋼ポニーラス橋を対象とした全橋解析モデルをシェル要素で構築し、現橋に生じている腐食損傷を解析モデルに考慮した複合非線形有限要素解析を実施した。本解析では、地域の交通実情および通行ニーズを踏まえた車両荷重を活荷重として想定し、解析結果から得られる作用応力、変形状態に基づく本橋の安全性と車両荷重の大きさの関係について考察した。また、活荷重倍率の概念を用いた終局強度解析を実施して、本橋の崩壊性状を明らかにするとともに、崩壊のトリガーとなりうる部材や維持管理で注視すべき腐食損傷を予測した。平成29年度に実施した全橋解析から得られた主な知見は以下の通りである。

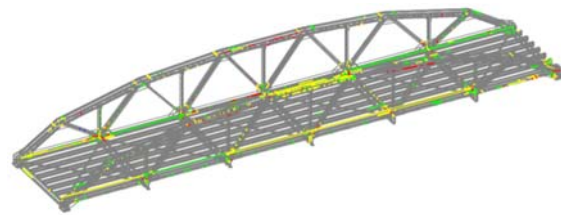
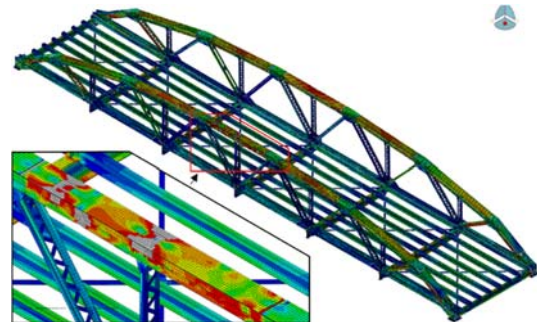
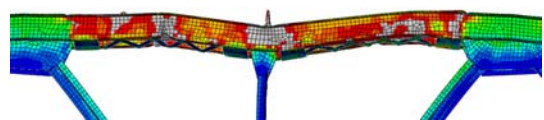


図1 3次元腐食損傷マップ



(a) 上弦材の降伏



(b) 上弦材の座屈状況

図2 解析結果 (腐食モデル)

- 1) 車両1台分の活荷重を想定した解析結果より、腐食損傷を考慮した解析モデルではスパン中央の上弦材継手部の溝状腐食に応力が集中したことから、T-4荷重に対する降伏安全率は1.3程度と推定され、維持管理の際に注視すべき腐食形態と考えられる。
- 2) L荷重 (p2のみ) を想定した終局強度解析では、腐食の有無によって限界活荷重倍率に約24%の差が生じることが確認された。
- 3) 終局時の崩壊性状については、腐食の無い場合にはスパン中央の上弦材における面外座屈であったが、腐食を考慮した場合には、まず上フランジの孔食内で局部座屈が発生し、次いで下フランジとウェブの断面欠損部が断面内部に座屈することで終局状態に達し、部材の面内座屈を生じて崩壊した (図2)。

(2) 面外変形および支持条件が橋梁全体の耐荷力に与える影響 (平成30年度)

平成29年度の解析結果より、支承部の境界条件における解析上の仮定と実際の挙動の違いが部材の応力評価結果と変形状態の双方に対して、荷重レベルの増加にともなって無視できない影響を及ぼすことが明らかになった。そこで、平成30年度はB橋を解析対象とし、支承部の劣化損傷や主構の面外変形の影響を考慮した全橋解析を実施することで、これらの解析条件が耐荷力や崩壊性状の推定結果に与える影響を明らかにした。橋梁の支持条件については、ローラー支点の固着やアンカーボルトの腐食といった経年劣化によって、設計当初の機能が必ずしも維持されていない可能性が高く、地域の老朽化鋼橋に多く見られるような、ベースプレートがアンカーによって橋座に直止めされた形式の橋梁においては、実際にはピン支持と固定支持の中間的な挙動を示すと考えられ、双方を想定した場合の耐荷力を推定しておく必要がある。本年度に実施した全橋解析から得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 境界条件として単純支持を仮定した場合、下弦材や縦桁の主荷重応力が増大し、橋全体の終

- 局耐荷力も低下する。
- 解析モデルの境界条件として単純支持と固定支持を仮定した解析結果の比較より、支承部の経年劣化によって本橋の支承機能が低下し、固定支持から単純支持に近い挙動に変化した場合、腐食損傷を有する状態で最大約 20%の耐荷力低下が生じる可能性がある。
 - 境界条件として単純支持を仮定した場合には、支承部付近の下弦材および端柱に発生する二次応力が卓越するため、これらの部材に生じる腐食損傷には、特に注意が必要である (図3)。
 - 現地計測の結果から、本橋には主構に最大 $L/750$ (L :スパン) の面外変形が生じていた (図4) が、この変形が橋全体の終局耐荷力に与える影響はほとんど無かった。

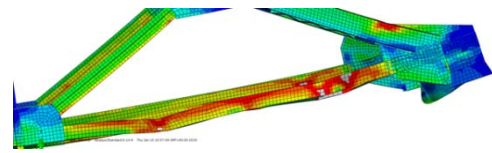


図3 下弦材の腐食による崩壊

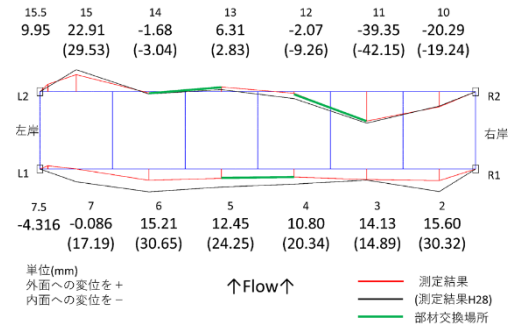


図4 面外変形の測定結果

(3) A橋の現有耐荷力評価と補修設計実務との相違点の検証全橋解析 (平成30~令和1年度)

実橋載荷試験とシェル要素を用いた FEM による全橋解析 (図5) の結果から、上弦材、鉛直材及び斜材の平均軸応力については、実験結果と設計実務時の平面骨組計算結果も概ね一致しており (図6)、補修および腐食による部材間の応力バランスの変化は確認できなかった。下弦材の軸応力は、平面骨組み計算結果より小さくなる傾向であったが、実橋では縦桁が主荷重の一部を負担するためと考えられる。当て板補修部では、当て板の追加によって活荷重による偏心曲げモーメントが生じることが確認された。

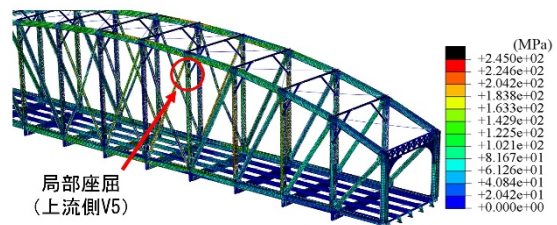


図5 全橋解析結果

(4) 腐食が進展した場合の終局耐荷力に関する解析的な将来予測 (令和1年度)

過去の科研課題において申請者らが提案した腐食進展予測モデルを適用した橋齢99年の既設トラス橋の圧縮部材および骨組モデルによるパラメトリック FEM 解析を実施し、現状生じている局所腐食をさらに30年間進展させて場合の橋

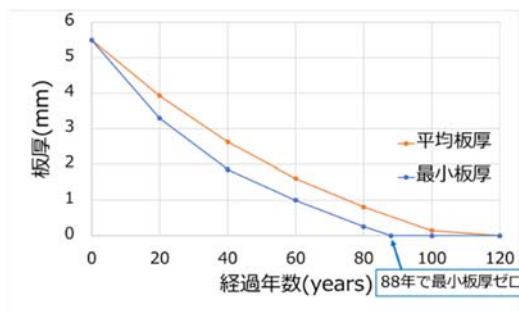
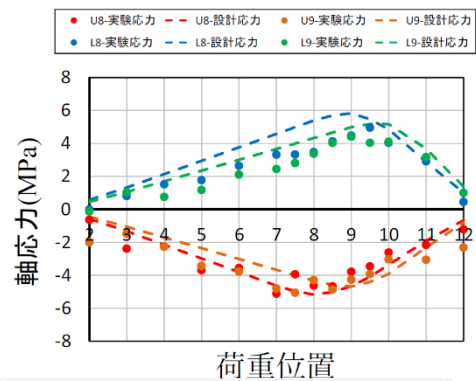


図7 腐食進展にともなう板厚の経時変化

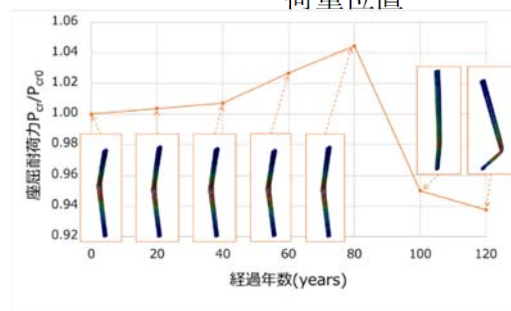


図9 鉛直材 (A橋) の耐荷力低下

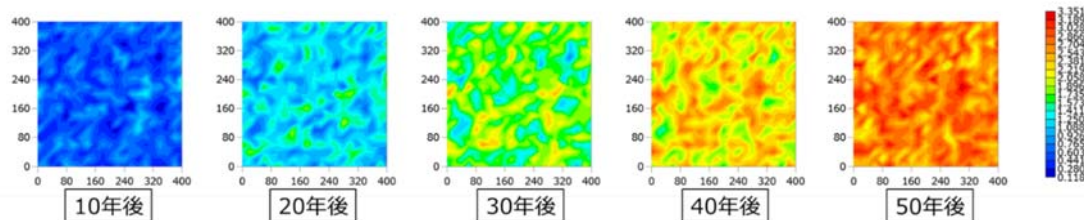


図8 10年毎に生成した腐食表面形状

梁全体および部材レベルの耐荷力低下予測を試みた。その結果、これらの局所腐食が 30 年進展したとしても耐荷力は約 4%しか低下しない結果となったが、トリガーとなった圧縮部材の座屈性状が腐食によって局部座屈や連成座屈に変わるケースがあることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9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 川見周平, 海田辰将, 加納匠, 平原義之, 福田洋頭, 山根達郎, 佐竹亮一, 藤井堅	4. 巻 Vol. 65A
2. 論文標題 実橋載荷実験による高齢化したブラットラス橋の軸応力評価と力学挙動	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 90-97
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 Kawami, S., Kaita, T., Yamane, T., Fukuda, H., Satake, R., Hirahara, Y., Kanou, T. and Fujii, K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Applicability and Constructing of Whole Analytical Model for Aging Truss Bridge to Evaluate Load Bearing Capacity in Maintenance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of BEI-2019	6. 最初と最後の頁 438-441
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 Hirahara, Y., Kawami, S., Kaita, T., Kanou, T., Fukuda, H., Yamane, T., Satake, R., and Fujii, K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Field loading test on aging Pratt truss bridge with severe corrosion damages	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of BEI-2019	6. 最初と最後の頁 442-446
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 Kanou, T., Kaita, T., Kawami, S., Hirahara, Y., Yamane, T., Fukuda, H., Satake, R. and Fujii, K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Consideration on corrosion damage investigation and maintenance of Pratt Truss Bridge using for 97 years	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of BEI-2019	6. 最初と最後の頁 129-133
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 Yamane, T., Kaita, T., Fukuda, H., Kawami, S., Satake, R. Hirahara, Y., Kanou, T. and Fujii, K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Analytical Study of Ultimate Load Bearing Capacity for an Aging Pratt Truss Bridge using FEM	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of BEI-2019	6. 最初と最後の頁 709-713
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 Koyama, R., Kaita, T., Yamane, T. and Imai, T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Analytical Estimation on Remaining Load Bearing Capacity of Aging Truss Bridge by Using Whole Bridge Modeling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of BEI-2019	6. 最初と最後の頁 714-718
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 Koyama, R., Kaita, T., Yamane, T., Kaneshige, K. and Imai, T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Analytical Estimation on Load Bearing Capacity for Aging Pony Truss Bridge Considering Actual Traffic Conditions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of EASEC-15	6. 最初と最後の頁 1914-1922
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 Yamane, T., Kaita, T. and Fujii, K	4. 巻 -
2. 論文標題 Basal Study on Analytical Prediction of Original Load Bearing Capacity for an Aging Truss Bridge by Using Whole Bridge Model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of EASEC-15	6. 最初と最後の頁 1906-1913
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 Fujinaga, R., Kaita, T., Koyama, R., and Imai, T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Finite Element Analyses on Corroded Pony Truss Bridge for Reasonable Maintenance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of ASEA-SEC-5	6. 最初と最後の頁 掲載予定
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 Teranishi, S., Kaita, T., Yamane, T., Kawami, S. and Fujii, K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Buckling Strength Analyses of Corroded Truss Member with Combined Cross Section	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of ASEA-SEC-5	6. 最初と最後の頁 掲載予定
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 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 作本英梨, 海田辰将, 小山諒子, 今井努
2. 発表標題 老朽化ポネートラス橋の腐食損傷調査と復元設計に基づく主構部材の応力評価
3. 学会等名 第70回土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小山諒子, 今井努, 山根達郎, 海田辰将
2. 発表標題 腐食した鋼ポネートラス橋の残存耐荷力に関する解析的研究
3. 学会等名 第70回土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山根達郎, 福田洋顕, 海田辰将, 藤井堅
2. 発表標題 高齢化した鋼ブラットトラス橋の実橋載荷試験と橋梁全体のFEM 解析
3. 学会等名 第70回土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山根達郎, 福田洋顕, 川見周平, 佐竹亮一, 平原義之, 加納匠, 海田辰将, 藤井堅
2. 発表標題 FEM 解析による高齢化した鋼ブラットトラス橋の残存耐荷力推定
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小山諒子, 今井努, 山根達郎, 海田辰将
2. 発表標題 全橋解析による腐食した鋼ポニートラス橋の耐荷力推定
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺西冴映, 海田辰将, 山根達郎, 藤井堅
2. 発表標題 組み合わせ断面を有する腐食鋼トラス部材の座屈耐荷力解析
3. 学会等名 第71回土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤永りさ, 海田辰将, 小山諒子, 今井努
2. 発表標題 腐食したボニートラス橋の全橋解析における支持条件についての検討
3. 学会等名 第71回土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 作本英梨, 海田辰将, 小山諒子, 今井努
2. 発表標題 老朽化ボニートラス橋の腐食損傷調査と復元設計に基づく主構部材の応力評価
3. 学会等名 第70回土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小山諒子, 今井努, 山根達郎, 海田辰将
2. 発表標題 腐食した鋼ボニートラス橋の残存耐荷力に関する解析的研究
3. 学会等名 第70回土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山根達郎, 福田洋顕, 海田辰将, 藤井堅
2. 発表標題 高齢化した鋼プラットラス橋の実橋載荷試験と橋梁全体のFEM 解析
3. 学会等名 第70回土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山根達郎, 福田洋顕, 川見周平, 佐竹亮一, 平原義之, 加納匠, 海田辰将, 藤井堅
2. 発表標題 FEM 解析による高齢化した鋼プラットラス橋の残存耐荷力推定
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小山諒子, 今井努, 山根達郎, 海田辰将
2. 発表標題 全橋解析による腐食した鋼ポニートラス橋の耐荷力推定
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺西冴映, 海田辰将, 山根達郎, 川見周平, 藤井堅
2. 発表標題 腐食進展を考慮した鋼トラス橋の全橋解析による耐荷力低下予測に関する基礎研究
3. 学会等名 第72回土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

徳山高専地域支援シーズ集 http://nit-tokuyama.jp/seeds/data/2018/kaita.pdf

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
研究協力者	藤井 堅 (Fujii Katashi)		
研究協力者	今井 努 (Imai Tsutomu)		
研究協力者	盛谷 忠弘 (Motitani Tadahiro)		