

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04584

研究課題名（和文）強震で損傷した鋼橋の的確な早期復旧を可能とするハイブリッド補強設計法の研究

研究課題名（英文）EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY ON ESTIMATION OF REACTION FORCE BY STRAIN MEASUREMENT OF STEEL GIRDER

研究代表者

渡辺 孝一（watanabe, koichi）

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：90387762

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）：本研究は熊本地震などの強震で支承部が損傷した既設鋼橋の桁端部に対して、橋の機能を回復する過程をI桁模型実験によって再現した。そして、損傷した鋼I桁橋梁の支点周辺ウェブに「計測グリッド」と呼ぶ、ひずみゲージの設置条件を提案し、仮受けジャッキによる死荷重開放時の支点反力を高い精度で推定する手法を提案した。

提案手法は、ジャッキアップ対象となる鋼I桁ウェブの片側に貼付で精度を得ることができ、ゲージ施工性において非常に簡便である。このゲージ計測手法により、一般に用いられる応力測定機器によりジャッキアップを安全確実に制御可能であることを実験とFEM解析によって検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した桁のジャッキアップ時における荷重推定手法は、橋梁の応力測定で一般に用いられるひずみゲージを用いる。ゲージをウェブの断面鉛直方向へグリッド状に貼付することでセンサーとしての施工が完了し、計測機器の演算によって、ジャッキアップ時のジャッキ荷重ならびに、支点反力を高精度に推定可能なモニタリング手法である。

この推定手法をジャッキアップに適用することで、支承が損傷した橋梁の復旧工事において、安全・確実なジャッキアップを実施することが可能となる。また、解析による補強効果のシミュレーションを併用することで、ジャッキアップ時の桁の局所的な損傷を予防し、補強構造を設計可能である。

研究成果の概要（英文）：If a severe earthquake strike a steel bridge bearing, and the bridge loses its function, it is necessary to restore the function of the bridge as soon as possible. However, in the 2016 Kumamoto Earthquakes, strong earthquakes occurred continuously in a short period, so it is desirable to adopt a reinforcement structure that appropriately reflects the measured stress of the bridge, even for emergency repair reinforcement.

In this study, we investigated a method for estimating the fulcrum reaction force with high accuracy by measuring the change in external force during temporary receiving jack-up with a strain gauge by a test using a reduced model of a steel girder. The proposed method can be applied to one side of a steel I-girder web to be jacked up to obtain accuracy and is effortless gauge workability. This measurement method was verified through experiments and FEM analysis to show that jack-up can be safely and reliably controlled by commonly used stress measuring instruments.

研究分野：構造工学

キーワード：支承取替え ジャッキアップ モニタリング ひずみ測定 FEM解析

1. 研究開始当初の背景

本研究は図 1 に例示するように地震で損傷した橋梁のうち、落橋防止システムを有する桁橋端部の損傷に対して、「的確で安全」かつ「早期の復旧」を目的に、ハイブリッド補強設計法の構築に取り組むものである。これは、損傷した鋼橋に対して現場で行う補修補強工事の過程に、コンピュータ解析を融合することで、鋼橋機能の復旧と同時に補修補強工事の効果を高い精度で保証することを目指すものである。

損傷した桁橋の早期復旧のためには、桁のジャッキアップ操作が必須である。しかし、ジャッキアップ位置での予期せぬ応力集中の発生やその後の供用による疲労損傷等も考慮すると、応急的な補修・補強であっても、橋梁の実測応力を適切に反映した補強構造が適用されることは、橋梁を安全に使用する観点からも重要である。

2. 研究の目的

損傷した橋梁のジャッキアップに必要な荷重は未知であり、変動に備える必要がある。そのため、ジャッキアップ荷重が確実に対象橋梁へ伝達されることが重要であり、使用するジャッキアップ荷重が、橋梁に確実に入力されていることを、橋梁側からモニタリングできれば、不用意なジャッキアップによる仮受け点の損傷を回避可能である。本研究は、ジャッキアップ時の支点仮受で生じる橋の応力状態を把握するため、橋梁の桁部材表面にひずみゲージ(計測グリッド)を貼付し、その計測情報と FEM 解析で用いる部分数値モデルの力学的な境界条件として連動させるシステムを構築し、損傷した桁の補修・補強設計に設計に活用することである。

3. 研究の方法

橋桁の端部に着目した部分的数値解析モデルによって、部材の変形や応力分布を精度良く得るためには、実橋のサイズにより変動するものの、1辺約 30 mmの平面要素によるメッシュ分割が必要である。一方、計測グリッドに使用するひずみゲージは3軸タイプのゲージを用いて、データロガー側のロゼット回路を構築して利用する。つまり、解析モデルメッシュの1節点に対して、ロガーでは物理的に3チャンネル分の測定点数が必要であることから、多点同時測定でかつ高速に計測可能なデータロガーが必要となる。このような予備実験検討の結果から、当初の連携システムの構想を変更し、実橋梁の輪荷重作用下での応力頻度測定で一般に用いられる計測機器を利用して、本研究の成果を実用的に活用できるシステム構成の実用化を目指した。つまり、必要最小限のひずみゲージ貼付数により計測グリッドを構築し、損傷した桁のジャッキアップに必要な荷重情報を高精度に推定するシステム構築を目指した。具体的には、ひずみゲージをI桁のウェブに計測グリッドとして貼付し、仮受けジャッキ反力と支点反力を高い精度で推定する手法を構築し、重要なジャッキアップ点の補強では、部分 FEM 解析による構造検討を行った。

(1) 支点仮受け時の桁橋におけるせん断力の変化

本研究で対象とする I 桁橋の概念を図 2(a)に示す。桁の自重は一樣な分布荷重 q_0 で表現している。図 2(a)の左側支点を、支点から d の距離でジャッキアップする場合、図 2(b)および図 2(c)にせん断力図を示す通り、支点反力 R_0 はせん断力 Q_0 である。仮受けジャッキにより左側支点を受け変える。その結果、ジャッキ位置からみて左側は、桁端部が自由端となるのでせん断力 Q_0 が開放され、右側は仮受け後のせん断力 Q_1 でつり合い状態となり安定する。なお、分布荷重を受ける際に生じる桁のせん断力の勾配は、支点周辺のみに着目するため一定とする。

この仮受けで生じるせん断力の変化を、ウェブに貼付するひずみゲージ、すなわち計測グリッドを荷重モニタとして利用し荷重を取得することが出来れば、外的なジャッキ荷重 R_j の桁への伝達状況を、桁の内部的な情報から推定した荷重と比較しモニタリングすることができる。



図1 支承の破損事例11

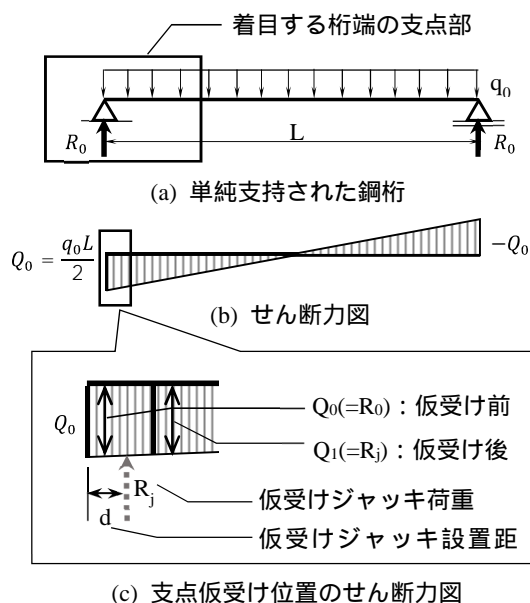


図2 支点受け変え時に着目するせん断力

(2) ひずみゲージ測定によるジャッキアップ時の反力推定

図3にひずみ測定とジャッキアップのプロセスをStep 0~3で示す。ジャッキ荷重 R_j は逐次モニタされる。Step 0 はジャッキアップ前の状態で、通常、支点反力 R_0 は未知である。ジャッキ設置およびひずみゲージ貼付後、Step 1 でジャッキアップを開始する。ひずみゲージの貼付距離 e や貼付数量は後述する。ひずみはジャッキ荷重が桁に伝わる直前にイニシャル処理して測定を開始する。図に示す通り、ジャッキの中心線から左右に距離 e の位置に貼付するひずみゲージで取得するせん断力を Q_0 と Q_1 と定義する。Step 2, Step 3 を経て、橋台と桁端部が離間すると、桁の自重が変化しなければジャッキ荷重 R_j は一定となるため、荷重を保持した状態で仮受けを完了しひずみ測定も終了する。

このプロセスでひずみ変化に着目すると、Step 2 の通りジャッキアップ点から桁端部側は、せん断力が除荷される。ひずみは除荷に伴って変化し、ジャッキアップ完了時で得られるせん断ひずみをせん断力 Q_0 に換算すると、 Q_0 は、すなわち支点反力 R_0 となる。また、支間中央方向側のひずみはジャッキアップ中、常に R_0 と R_j の合計値が一定で変化しないことから、仮受けジャッキを新たな支点とする反力 R_j と R_0 の差分によって生じるひずみが検出される。このひずみから同様にせん断力 ΔQ_1 を求める。このように、ひずみゲージで推定するせん断力 $Q_0, \Delta Q_1$, 推定ジャッキ荷重 R_m とすれば、式(1a), (1b)で定義することができる。

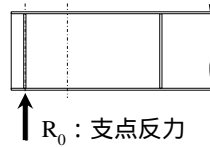
(3) 計測グリッドを用いたせん断力の推定

桁のウェブに生じるせん断力 Q は、簡便な表現では、せん断応力 τ とウェブ断面積 A_w の積により式(2a)で表わされ、これをせん断弾性係数 G とせん断ひずみ γ の積で表現すると、式(2b)で表現される。

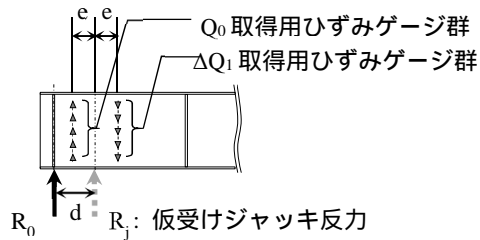
ここで、 γ : せん断ひずみ、 t_w : ウェブ断面厚さ、 h_w : ウェブ高さである。式(2)によって、ウェブに貼付したひずみゲージ測定値からせん断力を求める場合、ウェブに生じるせん断ひずみはウェブ高さ方向に一樣に分布しないことから、計測グリッドの設置方法として、本研究ではせん断ひずみ分布を図4(a), (b)に示す「平均法」と「加重法」の仮定から算定する。

図4(a)に示す平均法はひずみを単純平均し、ウェブ断面積を乗じる方法である。図4(b)の加重法は、ひずみに乗じるウェブ断面積を分割して重みづけする方法であり、1点のせん断ひず

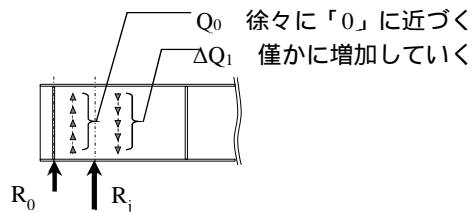
Step 0: ジャッキ準備・ひずみゲージ準備



Step 1: ジャッキアップ開始・ひずみモニタリング



Step 2: ジャッキアップ中



Step 3: ジャッキアップ完了・ひずみ測定終了

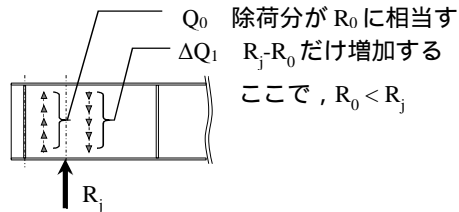


図3 支点の仮受けとひずみ測定のご概念

×: 3軸ひずみゲージ

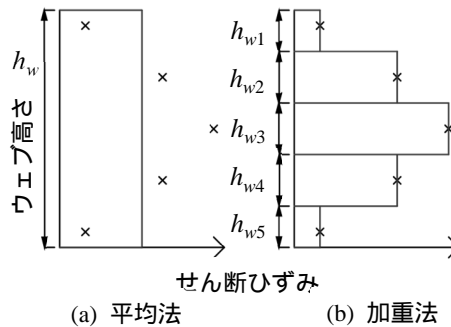


図4 ウェブせん断ひずみ分布の仮定

$$R_0 = Q_0 \quad (1a)$$

$$R_m = R_0 + \Delta Q_1 \quad (1b)$$

$$Q = \tau A_w \quad (2a)$$

$$Q = G \gamma t_w h_w \quad (2b)$$

みが隣り合うせん断ひずみの貼付距離の 1/2 まで等しく分布すると仮定して算定する。ひずみゲージは 3 軸ゲージを使用し、口ゼット演算によりウェブ高さ方向のせん断ひずみとして用いる。せん断弾性係数 G は材料試験値 ($G=76.1\text{GPa}$) もしくは、道路橋示方書の基準値 ($G=77.0\text{GPa}$) を用いる。このせん断ひずみから算定するせん断力 Q について、平均法は Q_{AM} 、加重法は、 Q_{WM} と表記し、式(3)、式(4)で表す。

ここで、 γ_{ave} : せん断ひずみの平均値、 γ_i : 個々の測定せん断ひずみ値である。

$$Q_{AM} = G \cdot \gamma_{ave} \quad (3)$$

$$Q_{WM} = G \cdot t_w \sum \gamma_i h_{wi} \quad (4)$$

本提案式(1)~(4)は、ひずみゲージの貼付部位が荷重作用に対して弾性状態である場合にのみ適用される。

4. 研究成果

(1) ジャッキ反力推定精度の検証

本研究で提案する計測グリッドによるジャッキ反力推定手法は、対象となる桁のウェブ断面積とせん断弾性係数を用いる。実橋を対象とする場合など材料試験値が得られない場合、鋼製橋梁であれば道路橋示方書記載の基準値を利用可能である。本研究では、図5に示す実験用鋼桁模型に対して、弾性限度の死荷重を仮定して、仮受けジャッキ荷重 R_j を推定した場合の推定精度を実験ならびに解析的に検証した。

図7に 1MN ジャッキ載荷で死荷重が安定した後、図3により前述した Step1~3 の損傷側支点部から仮受けジャッキ点への荷重の受け変わりを、ジャッキ荷重 R_j と支点反力 R_0 の各ロードセル測定値により対比し、この支点反力の変化を、計測グリッドを用いて推定した。

図8に、仮受けジャッキアップ進行時のジャッキ荷重 R_j と推定荷重 R_m について、実験結果をもとに推定した結果を示す。縦軸は仮受けジャッキ荷重 R_j であり、横軸はひずみゲージから平均法 (Q_{AM}) と加重法 (Q_{WM}) でそれぞれ算定した推定ジャッキ荷重 R_m である。実験結果を比較すると、道路橋示方書基準値を用いた場合、加重法で誤差 3.3% の精度で推定しており、材料試験値を用いた誤差 (2.1%) と大差ない推定精度となった。図から、計測グリッドによる推定手法のうち、加重法 Q_{WM} を用いた場合の推定精度が最も高く、また、道路橋示方

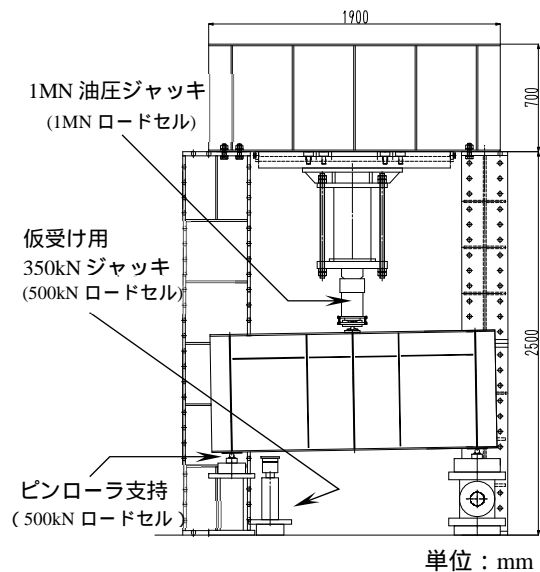


図5 実験装置の概要

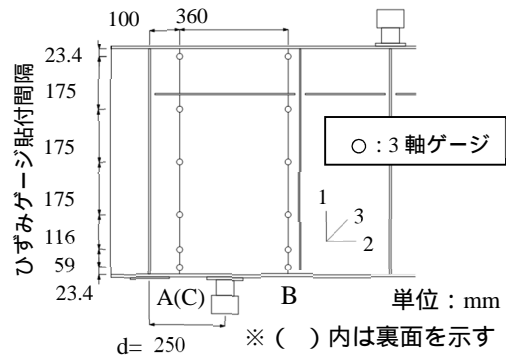


図6 ひずみゲージと仮受けジャッキ位置

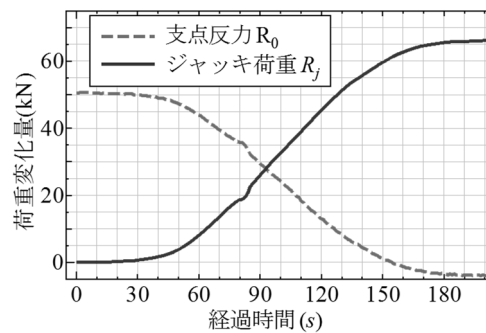


図7 仮受け時の支点反力の推移

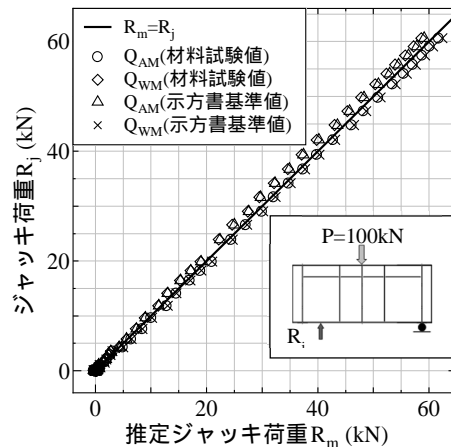


図8 ジャッキ荷重推定結果

書の基準値を用いても大きな乖離は見られない。以上から、ジャッキアップ開始から、完了までジャッキアップ荷重を線形的に推定し、追跡できることを確認した。

(2) ジャッキアップを受ける桁の補強検討

続いて、ジャッキアップ作用を受ける桁断面に必要なウェブおよび下フランジ周辺部に対する応急補強について、実験と解析による検討を行った。図9にFEM解析モデルを例示する。解析モデルは、実験桁の断面サイズに配慮して、アングル部材を高力ボルト接合することにより、ウェブをリブ補強した。補強時の検討パラメータは、アングル部材の高さおよび配置形式（桁の表裏）である。

検討の結果、図10に例示する通り、安全で確実なジャッキアップのために、鋼桁に支点受け替え箇所両面リブ補強を施すことで、ウェブに生じる局所応力の弾性限度内に軽減させる効果があることを確認した。なお、本検討の想定荷重は、仮受けによる桁本体の死荷重であるため、高力ボルトによるアングルと桁ウェブの摩擦接合モデルを適用せず、部材が完全に結合されているモデルを対象としている。従って、今後、アングルをウェブに接合するためのボルト配置、本数にまで配慮した検討を継続して研究する予定である。

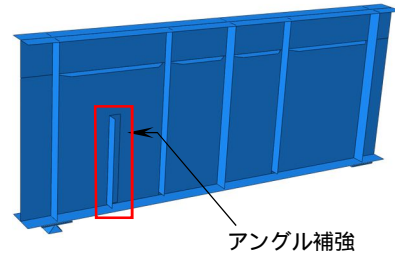


図9 鋼I桁のFEM解析モデル

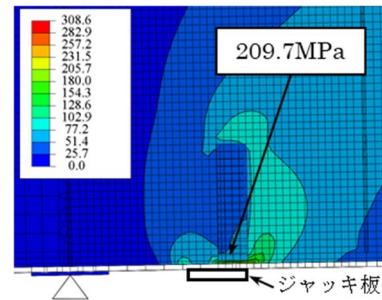


図10 補強した桁の応力状態
(ジャッキアップ直後)

一連の研究によって得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 計測グリッドを利用した仮受けジャッキ荷重推定方法について、平均法と加重法を提案した。検討の結果、加重法によって高い精度でジャッキ反力を推定でき、実際のジャッキ反力をジャッキアップ開始から完了まで線形的に推定できることを示した。
- 2) 仮受けジャッキ点から桁端部側に貼付したひずみゲージを利用し、加重法により誤差0.8%の精度でジャッキアップ前の当初の支点反力を推定できることを示した。
- 3) 計測グリッドを構築するために必要なひずみゲージ測定点数について、本研究ではウェブ高さ等分する間隔で5箇所以上の測定箇所を確保すれば、誤差3.3%以内の精度でジャッキ反力を推定可能であることを示した。事前に解析を実施して応力分布状態を推定し、ひずみゲージ貼付位置を確定すれば精度はさらに向上する。
- 4) 仮受けされる鋼I桁のジャッキアップ位置では、桁の下フランジおよびその直上のウェブが局所的な圧縮荷重が作用するため、適切な補強が必要である。本研究では、アングルを高力ボルトで接合する補強構造を提案し、その効果を解析的に検討した。

<引用論文リスト>

[雑誌論文] (計1件)

川上 峻幸, 渡辺 孝一, 田中 啓太: ひずみ測定による鋼桁の反力推定手法に関する実験および解析的検討, 鋼構造論文集, Vol.114, (査読付)(印刷中)

[学会発表]

田中啓太, 渡辺孝一: 鋼I桁の借受け点補強時のひずみゲージによる荷重推定精度の検討, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会(2022)

田中啓太, 渡辺孝一, 川上峻幸: 鋼I桁の借受け支点部のリブ補強効果に関する解析的検討, 令和3年度土木学会中部支部研究発表会1-19(2022)

川上峻幸, 渡辺孝一, 田中啓太: 鋼桁ジャッキアップ時のひずみ変化による支点反力推定手法の検討, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会1-18(2022)

田中啓太, 渡辺孝一, 川上峻幸: 鋼桁の支点受け替え時に生じるウェブのせん断応力変化に関する解析的検討, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会1-18(2022)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 川上 峻幸, 渡辺 孝一, 田中 啓太	4. 巻 114
2. 論文標題 ひずみ測定による鋼桁の反力推定手法に関する実験および解析的検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 -
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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中啓太, 渡辺孝一
2. 発表標題 鋼1桁の借受け点補強時のひずみゲージによる荷重推定精度の検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中啓太, 渡辺孝一, 川上峻幸
2. 発表標題 鋼1桁の借受け支点部のリブ補強効果に関する解析的検討
3. 学会等名 令和3年度土木学会中部支部研究発表会I-19
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 川上峻幸, 渡辺孝一, 田中啓太
2. 発表標題 鋼桁ジャッキアップ時のひずみ変化による支点反力推定手法の検討
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会I-18
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 田中啓太, 渡辺孝一, 川上峻幸
2. 発表標題 鋼桁の支点受け替え時に生じるウェブのせん断応力変化に関する解析的検討
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会I-19
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 田中啓太, 渡辺孝一
2. 発表標題 鋼桁ジャッキアップ時の荷重バランスとせん断力の変化についての実験・解析的検討
3. 学会等名 令和2年度土木学会中部支部研究発表会I-21
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 川上峻幸, 渡辺孝一
2. 発表標題 鋼桁ジャッキアップ時のひずみ状態と作用力の推定精度に関する検討
3. 学会等名 令和2年度土木学会中部支部研究発表会I-22
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 川上峻幸, 渡辺孝一
2. 発表標題 鋼桁のひずみ測定による作用力の推定に関する基礎的検討
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会I-385
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 川上峻幸, 渡辺孝一
2. 発表標題 鋼桁のひずみ測定による桁の応力推定精度に関する実験的検討
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2019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
---------	---------