

令和元年6月18日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06463

研究課題名(和文) 既設劣化橋梁の耐荷力性能に及ぼす軸重変動の影響評価と走行荷重特性の解明

研究課題名(英文) Effect of wheel load variation on load carrying capacity of existing deteriorated bridge and investigation of moving load characteristics

研究代表者

深田 宰史 (Fukada, Saiji)

金沢大学・地球社会基盤学系・教授

研究者番号：10313686

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、ASRによる劣化が確認された鋼橋のRC床版を対象として、試験車走行試験を行うとともに、一般車を対象とした走行荷重、床版変位などを長期モニタリングした。その結果、劣化橋梁上を走行する大型車の軸重変動が劣化を助長していることを明らかにした。また、一般車の走行荷重実態と解析結果を比較することにより、現状のRC床版が健全時と比較して著しく剛性が低下していることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で行った試験車走行試験から、伸縮装置近傍における舗装上のバッチングなどの凹凸の影響により、大型車両の軸重変動が明らかになり、実験を行った時速60kmまでの範囲において静的荷重の4割増の動的増幅を確認できた。また、一般車を対象とした走行荷重実態と床版変位との関係を長期モニタリングし、有限要素解析の結果と比較したことにより、現状のRC床版の耐荷力評価および今後の劣化予測を行うことができた。

研究成果の概要(英文)：In the mountainous area of the Hokuriku region, bridges are experiencing early deterioration caused by salt damage, alkali-silica reactions (ASR), and frost damage. The reinforced concrete (RC) slab of a road bridge, which has deterioration caused by ASR, was investigated in this study. The vehicle running tests using a heavy test truck were also performed, and the displacements of the RC slab were measured. Long-term monitoring of the responses of the test bridge due to live load based on the bridge weigh-in-motion method was also performed for ordinary vehicles. Then, the stiffness of the RC slab was evaluated by comparing the results obtained from the tests and the numerical analyses. It was found that the stiffness of the slab remarkably decreased as compared with the results when the slab was sound.

研究分野：構造工学

キーワード：モニタリング BWIM 床版 剛性評価 耐荷力評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

北陸地方などの積雪寒冷地域の主要幹線道路における鋼道路橋では、ASR による劣化に加え、冬季に散布される凍結防止剤による塩化物イオンの浸透により、床版内部の鉄筋が腐食し、舗装上にポットホールが生じている(写真-1)。このような劣化に至るまでには、床版内部の材料的な劣化に加えて、外的な車両重量(軸重、輪荷重)や交通量などが大きく影響している。特に、大型車両の軸重は静的な荷重成分に加え、橋梁進入時および橋梁上を走行しているときの路面凹凸や橋梁振動との連成により、動的な増幅の影響で大きく変動している(図-1)。



写真-1 舗装上のポットホール

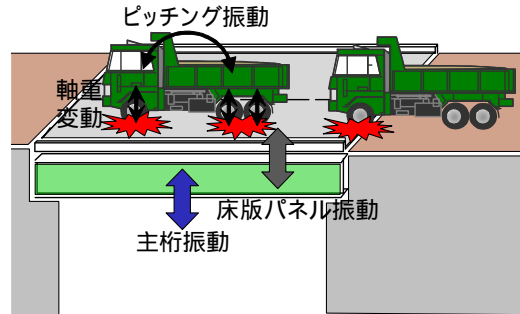


図-1 車両振動による軸重の変動

2. 研究の目的

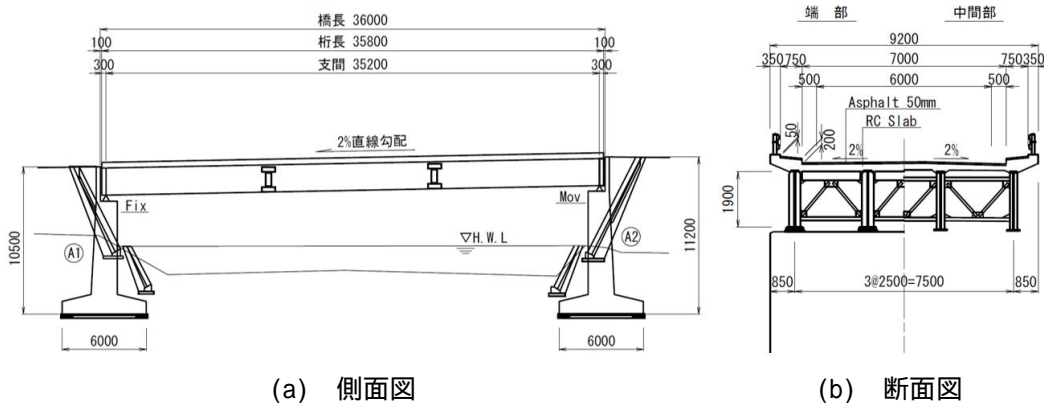
本研究では、早期劣化が確認された北陸地方の山間部の橋梁群から RC 床版を有する鋼道路橋を選定し、大型車両走行時の軸重(輪荷重)の変動を明らかにするとともに、試験車両走行試験および一般車を対象とした走行荷重モニタリングを行うことで、交通荷重実態を明らかにし、現橋の RC 床版における力学的特性を把握することにした。また同時に、有限要素解析(FEA)を行い、モニタリングで得られた走行荷重と床版変位の関係と比較することで、現橋の RC 床版における剛性を評価し、さらに弾塑性解析との比較により残存耐力を明らかにすることにした。

3. 研究の方法

3.1 対象橋梁

早期劣化が確認された北陸地方の山間部の橋梁群において、車両走行試験および走行荷重モニタリングの制約条件(規制条件や変位計測の可否等)を満足する橋梁を選定した。対象橋梁は、山間部(標高 559m)の国道に位置する 1973 年に竣工された 4 主桁を有する鋼単純合成桁橋である(図-2 参照)。当該橋梁は、60 度の斜角を有し、主桁間隔は 2.5m、標準床版厚は 180mm、床版防水工は未施工である。

劣化状況として、橋梁上面では、伸縮装置付近で舗装上にひび割れやポットホールが確認され、地覆部では橋軸方向にひび割れが多数存在していた。また、RC 床版の裏面では、漏水および白色の析出物(エフロレッセンスと ASR ゲルが混在したもの)が確認され、特に伸縮装置近傍の劣化が著しかった。



(a) 側面図

(b) 断面図

図-2 対象橋梁概要図 [単位: mm]

3.2 試験概要

対象路線において一般車を対象とした走行荷重モニタリング(走行荷重計測 BWIM と床版変位計測)を実施する前段階として、BWIM の換算係数を作成するために、車両走行試験を実施した。後述するモニタリングでは、作成した換算係数を一般車が走行した際に生じる応答波形のピーク値に乗じることで車両重量を推定した。

走行試験における測点配置を図-3 に示す。床版変位は対傾構の上支材に両端ピンの不動梁を設置し、その梁を不動点とした床版との相対変位を計測した(変位計: CDP-10(東京測器製))。

床版変位計測箇所の劣化状況は、いずれも水掛かりしている状況にあった。さらに、床版ひずみおよび主桁ひずみは走行荷重を推定するために設置し、端垂直補剛材ひずみと亀裂変位計(ゲージ)はそれぞれ走行速度、軸数判別を目的に設置した。

走行試験は、片側規制のもとで実交通の条件に近くなるように、走行速度(20, 40, 60km/h)と走行位置を変えて、路線ごとに複数回実施した。また、サンプリング周波数は200Hzとした。

試験車両は、リーフサスペンションを有する3軸トラックを用いた(試験車両はクレーン付トラックであるが、寸法図は平ボディとして記載した)。なお、各軸は、前輪70.4kN、後輪前軸84.7kN、後輪後軸84.3kN、総重量239.4kNである。

車両側の測点配置を図-4に示す。車両の走行荷重は、静的な荷重成分に加え、橋梁上を走行しているときの路面凹凸や橋梁振動との連成による動的な増幅の影響で大きく変動する。そのため、その走行荷重の変動を計測するために、各軸のばね上およびばね下に加速度計(鉛直方向)をそれぞれ設置するとともに、車軸位置にひずみゲージを添付して軸重の曲げひずみを計測することで走行荷重の変動を直接計測することにした。なお、車軸のひずみから荷重への換算係数を得るために、積載物の有無による各軸のひずみと分配される軸重との関係を別途計測した。これまでの知見から路面凹凸やジョイント段差などにより、軸重が大きく変動することが明らかになっており、走行速度の違いにより、静的な軸重に対してどの程度の増幅が生じるのか確かめる。

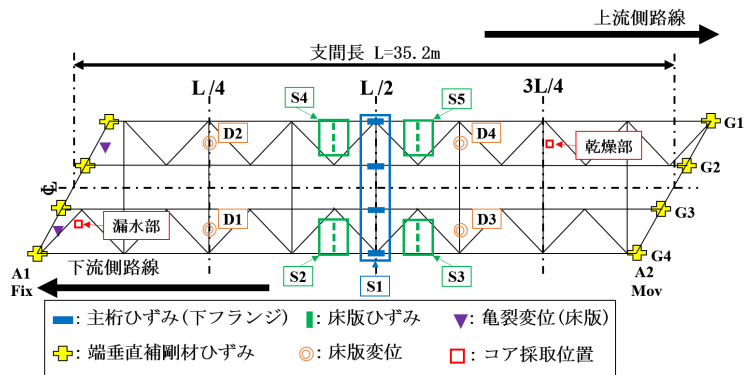


図-3 測点配置図(橋梁)

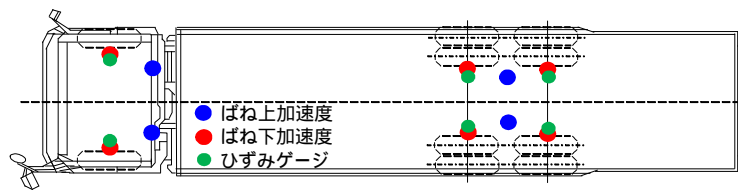


図-4 測点配置(車両)

3.3 解析概要

RC床版の版としての剛性と残存耐力を評価するために、汎用系解析ソフトDIANA10.2を用いて、数値解析を実施した。解析モデルは、床版変位を計測した断面を含む対傾構間(2パネル分)をモデル化した(図-5参照)。また、荷重は、試験車のタンデム軸を参考に、タンデム軸の中心が計測点直上となるように載荷した。床版、地覆および舗装はソリッド要素、主桁および補剛材をシェル要素、対傾構および横構を梁要素、鉄筋は埋込鉄筋要素としてモデル化し、橋軸方向の境界条件として対称条件を適用することでハーフモデルとした。

材料の構成則として、コンクリートは圧縮側挙動にThorenfeldt式を採用し、引張側はJSCE引張軟化式を用いた。ただし、引張強度および引張破壊エネルギーは、コンクリート標準示方書の式から推定した。また、ひび割れモデルは、全ひずみ理論に基づく回転ひび割れモデルを採用した。鋼材および鉄筋は、完全弾塑性体とし、アスファルト(舗装)は線形弾性等方性を適用した。解析は、荷重制御による増分解析とし、載荷面の圧縮縁にひび割れが生じるまで行った。解析ケースは、コンクリートの物性値のみ変化させ、設計時を健全とした場合、弾性係数比 $n=15$ の場合およびコア試験結果(乾燥部と漏水部)の4パターンとした。

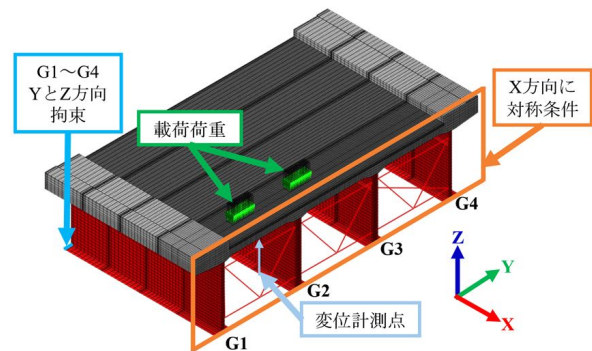


図-5 解析モデル

4. 研究成果

4.1 軸重変動

試験車が走行速度60km/hで走行した場合の後輪のばね上および後輪前軸のばね下加速度波形を図-6に示す。なお、横軸は走行速度を用いて距離軸に変換している。また、矢印は車両が橋梁上に入ると退去した位置を示している。

これより、試験車がジョイントを越えて5m,10m付近を走行した際に大きなばね下の加速度が生じている。また、36m 付近のジョイント手前にも大きな振動が生じている。このように床版には車両振動に伴う外力が作用していることがわかる。

つぎに、車軸に設置したひずみから走行荷重を算出し、各車軸重量で正規化して荷重増幅率としたものを図-7に示す。なお、同図では走行速度 20,40,60km/h の場合を比較として示している。

これより、大きな加速度を生じていた場所において、静的な荷重も加えると 1.3 倍程度の動的荷重が生じていることがわかる。

とくに、36m 付近のジョイント手前にあったパッチング箇所では荷重が 1.4 倍になっていることから、増幅された荷重により、さらに損傷を拡大させることにより、損傷の悪循環が繰り返されているため、耐荷性や耐久性を大幅に減少させているものと推察される。また、20km/h 走行の低速でも 1.2 倍程度の変動をしており、このような動的な変動分は BWIM による走行荷重の軸重推定にも誤差として大きな影響を及ぼすため、荷重推定の際には注意が必要である。

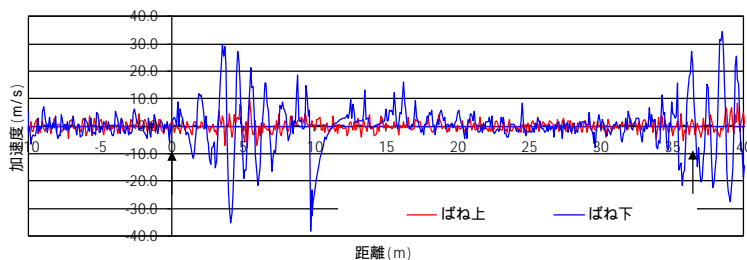


図-6 ばね上およびばね下の加速度 (60km/h 走行)

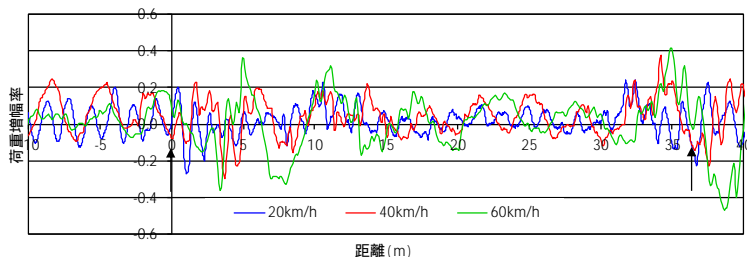


図-7 走行荷重 (後輪前軸) の増幅率

4.2 走行試験の結果

試験車が約 40km/h で下流側車線 (A2 から A1) を走行した際の床版変位、主桁ひずみおよび床版ひずみの応答波形を図-8 に示す。なお、応答波形には動的成分を除去するために、ローパスフィルタを施しており、主桁ひずみと床版ひずみのみ走行位置による荷重推定誤差を軽減するために、複数のひずみゲージ (図-3 の四角で囲まれている箇所ごと) の合計値を用いた。図-8 から床版変位は、二つの山型の波形となり、観測点の概ね前後 2 パネル分の範囲で変位が生じていることが判明した。さらに、床版変位に大きな影響を与えているのは、後輪 2 軸分の荷重である。また、同図から主桁ひずみは、一つの大きな山型の波形となり、床版ひずみは、床版変位と同様に二つの山型の波形が確認でき、各応答波形のピーク値は、車両重量 (車両総重量、軸重あるいは軸重和) に対応している。従って、BWIM の換算係数は、車両重量と対応する複数回取得した各応答波形の相関から作成した。

4.3 走行荷重モニタリングの結果

対象橋梁上を走行する一般車両の走行荷重実態を把握すると同時に、当該床版の剛性および耐荷力を評価し、荷重-変位関係を確認することにした。計測期間は 11 日間とし、サンプリング周波数は走行試験と同様に 200Hz とした。車両総重量は、フィルタ処理後の主桁ひずみ波形のピーク値と車両重量との相関から推定した。軸重および軸重和は、床版ひずみのピーク値から車両総重量と同様の手法で推定した。また、本研究では、対象橋梁上を走行する全ての車両を計測するのではなく、主桁ひずみから推定した車両総重量が 40kN 以上の車両のみ分析対象とした。

11 日間の走行荷重モニタリングで観測された総重量が 40kN 以上の車両は、下流側路線で 1121 台、上流側路線では 1298 台であったため、橋梁上を走行した車両の合計は 2419 台となり、日交通量は 220 台となる。また、得られた日交通量は、平成 27 年度交通センサスで観測された大型車の日交通量 (259 台) と概ね一致していた。

次に軸間距離の頻度分布を図-9 に示す。ここで、横軸は軸間距離を示している。軸間距離は床版ひずみあるいは亀裂変位から各軸の通過時間を求め、端垂直補剛材ひずみから推定した走行速度を乗じることで算出した。図-9 から最も多い軸間距離は、いずれの路線も 1.4m (1.35 ~ 1.45) であるため、タンデム軸を有する一般的な大型貨物車両が多く走行していることが明らかになった。また、軸間距離 5m 付近の頻度が大きい要因としては、2 軸車が多く走行していたことなどが挙げられる。

各路線で得られた最遠軸距と車両総重量の関係を図-10 に示す。車両総重量は主桁ひずみから推定した結果をプロットしている。総重量が特例 8 車種の許可限度重量 431.2kN (44tf) を違反している車両は、上流側路線で計測された 1 台 (480.3kN) のみであった。したがって、対象路線の日交通量は少なく、疲労損傷が当該床版の主な劣化原因とは考えにくい。さらに、車両総重量を考慮すると、床版に重大な損傷を与える過積載車両は、ほとんど存在しないと考えら

れる。また、タンデム軸を有する車両が多く走行していることから FEA を実施する際には、1 軸のみ載荷するのではなく、図-8 の床版ひずみから明らかなように、タンデム軸を考慮して載荷する必要があると考えられる。

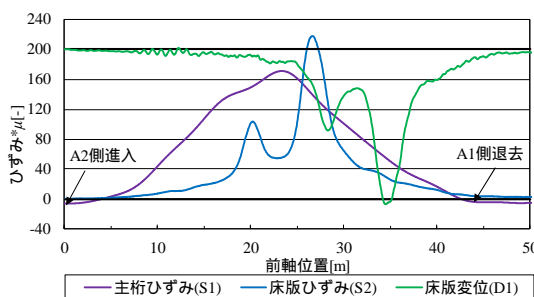


図-8 応答波形例

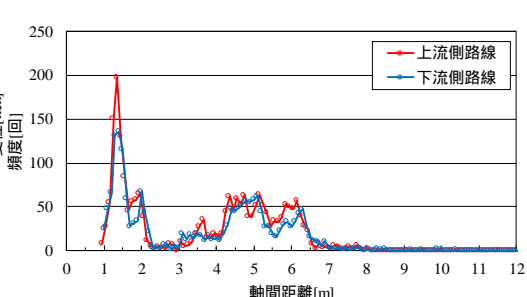
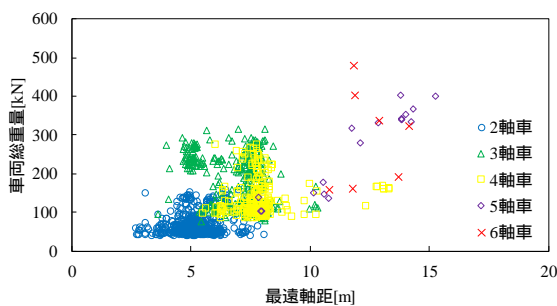
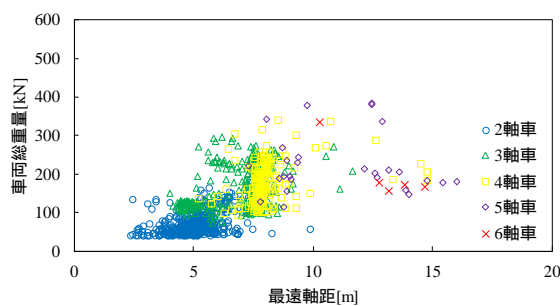


図-9 軸間距離の頻度分布



(a) 上流側路線



(b) 下流側路線

図-10 最遠軸距と車両総重量の関係

4.4 剛性評価

一般車による走行荷重モニタリングから、床版変位と走行荷重の関係についてまとめた。図-11 に両路線の支間 1/4 地点における床版変位と走行荷重の関係と数値解析の結果(弾性範囲)を示す。ここで、走行荷重とは車両ごとに床版ひずみから推定した最も大きい軸重あるいは軸重和のことで、床版変位はそれに対応する値をプロットした。

下流側路線は、解析結果と比較して、引張無視の弾性係数比 $n=15$ とした場合の結果 ($E=13.3\text{GPa}$) 付近に概ね分布しており、上流側路線は、漏水部のコア試験結果 ($E=10.0\text{GPa}$) 付近に分布していた。この結果には、一般車両の走行位置と解析の載荷位置による乖離が考えられるが、いずれの路線も健全時と比較して著しく剛性が低下していると考えられる。

4.5 耐荷力評価

つぎに、終局耐力を評価するため、さらに解析的に荷重を載荷した弾塑性解析の結果を図-12 に示す。なお、同図にはモニタリング結果も付記した。図から床版の耐力は、いずれの路線も健全時と比較して約 3 割程度低下しているが、モニタリングで観測された最大荷重 (208kN) を大きく上回っている。加えて、観測された最大荷重は、漏水部において最初にひび割れが生じたときの荷重 P_{crack} (338kN) を下回っていたため、安全に対して余裕があると推察される。

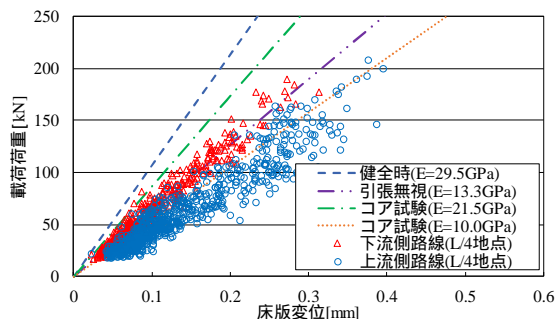


図-11 剛性評価

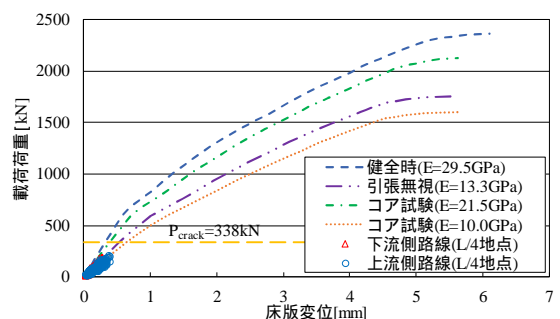


図-12 耐荷力評価

このように劣化橋梁上を走行する荷重の軸重変動および一般車を対象とした BWIM による走行荷重実態を明らかにするとともに、解析結果と比較することにより、現状の床版剛性および残存耐力を明らかにすることができた。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Y. Maki, T. M. Ha, S. Fukada, K. Torii, R. Ono: Stiffness Evaluation and Current Status of a Degraded Road Bridge Slab Located in a Mountainous Area, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, Vol.17, pp.62-78, 2019.1.

小野凌平, 牧祐之, 深田宰史, 鳥居和之, 鈴木啓悟: 山間部に位置する早期劣化した道路橋床版の走行荷重実態と耐荷力評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, Vol.18, pp.41-46, 2018.10.

牧祐之, 深田宰史, 鳥居和之, 小野凌平: 山間部に位置する早期劣化した道路橋床版の現状と剛性評価, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.40, No.2, pp.379-384, 2018.7.

〔学会発表〕(計 4 件)

小野凌平, 牧祐之, 深田宰史, 鳥居和之, 鈴木啓悟: 山間部に位置する早期劣化した道路橋床版の走行荷重実態と耐荷力評価, 第73回土木学会年次学術講演会, I-089, 2018.8.

Y. Maki, T. M. Ha, S. Fukada, K. Torii, R. Ono: Current status of degraded road bridge slab located in mountainous area, Proceedings of the 2nd International Conference on Civil Engineering, 2018.5.

K. Suzuki, K. Kawai, S. Fukada: Development of Bridge Weigh-In-Motion Using Acceleration Response, Proceedings of the 8th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, RS3-4, 2017.12.

深田宰史, 鈴木啓悟, 浜博和: 大型車の動的走行荷重が劣化床版に与える影響, 第72回土木学会年次学術講演会, I-362, 2017.9.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 鈴木啓悟

ローマ字氏名:(SUZUKI, Keigo)

所属研究機関名: 福井大学

部局名: 学術研究院 工学系部門

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 40546339

(2)研究協力者

研究協力者氏名: Ha Minh Tuan

ローマ字氏名:(Ha Minh Tuan)

研究協力者氏名: 牧 祐之

ローマ字氏名:(MAKI, Yuji)

研究協力者氏名: 小野 凌平

ローマ字氏名:(ONO, Ryohei)

研究協力者氏名: 濱 博和

ローマ字氏名:(HAMA, Hirokazu)