

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06187

研究課題名(和文) 地方における橋梁維持管理のための簡易点検診断法の提案と三次元解析モデルの構築

研究課題名(英文) Study on simple inspection diagnostic method and construction of three dimensional analysis model for maintenance of bridges in local region

研究代表者

森田 千尋 (MORITA, Chihiro)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：60230124

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)：本研究においては、まず、過去に長崎県が行った橋梁長寿命化修繕計画データを分析し、調査項目と健全度の相関評価を行った。また、長崎県の中核都市における同様のデータ分析も行い、地方公共団体でも点検が可能な簡易点検診断法を検討した。次に、耐候性鋼橋梁のさび外観評価を簡易かつ定量的に行うため、画像解析による定量評価を行った。さらに、写真計測により橋梁全体を忠実に三次元解析モデル化することを試みた。あらゆる方向から写真を撮ることにより、橋梁全体の三次元座標を取得し、橋梁の三次元解析モデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：In this study, bridge inspection data of Nagasaki prefecture was analyzed and the correlation between survey items and soundness was evaluated. Similar data in other cities were analyzed and simple diagnostic methods that can be used by local governments were examined. Next, in order to evaluate the rust appearance of weathering steel bridge, quantitative evaluation by image analysis was carried out. Furthermore, the bridge was faithfully modeled as a three dimensional analysis by photograph measurement. By taking pictures from all directions, three dimensional coordinates of the bridge were acquired and a three dimensional analytical model of the bridge was constructed.

研究分野：構造力学、維持管理工学

キーワード：地方公共団体 橋梁 維持管理 簡易点検 健全度 SfM技術

1. 研究開始当初の背景

我が国には、2m以上の道路橋は全国に約70万橋、道路トンネルは約1万本存在する。全国約70万橋の橋梁のうち、7割以上となる約50万橋が市町村道にあり、大部分は地方公共団体が管理するものである。そのうち、高度経済成長期以降に集中的に整備した橋梁やトンネルが、今後急速に高齢化し、10年後には建設後50年経過する橋梁が4割以上になると見込まれている。

道路構造物の老朽化は進行を続け、日本の橋梁の70%を占める市町村が管理する橋梁では、通行止めや車両重量等の通行規制が約2,000箇所及び、その箇所数はこの5年間で2倍と増加し続けている。地方自治体の技術者の削減とあいまって点検すらままならないところも増えている。

そこで、国土交通省は、「道路橋」、「道路トンネル」、「横断歩道橋」など5種類の定期点検要領を公開し、トンネルや2m以上の道路橋などを、5年に1回の頻度で点検することを平成26年に義務付けた。近接目視による点検の義務化と、その頻度などを定めた省令・告示を施行したが、予算や人材の面で苦境に立つ自治体には戸惑う声も少なくない。

これらを解決するため、地方公共団体の三つの課題（予算不足・人不足・技術力不足）に対して、橋梁の維持管理が効率的・持続的に行われる環境を創出する必要がある。

2. 研究の目的

本研究においては、まず、地方公共団体でも点検が可能な、簡易点検診断法を検討する。また、画像解析を用いて耐候性鋼橋梁の簡易な外観評価法を検討する。これにより、管理対象の橋梁の環境・使用条件や劣化状況を考慮した簡易診断法の構築を図り、維持管理の効率化や管理コスト縮減に向けた提案に繋げる。さらに、光学的計測手法を用いて、橋梁全体の三次元座標を取得し、三次元解析モデルを構築する。既存の三次元解析モデルと合わせ、より詳細な三次元解析モデルを構築することができ、橋梁の維持管理が効率的・持続的に行われる環境を創出するのが本研究の目的である。

橋梁の維持管理が効率的・持続的に行われる環境を創出するため、以下の点について検討する。

(1) 橋梁の簡易点検診断法の検討

過去に長崎県が行った橋梁長寿命化修繕計画データを分析する。15m以上の橋梁641橋に対して、調査項目と健全度の相関評価を行う。また、長崎県の中核都市における同様のデータ分析も行い、地方公共団体でも点検が可能な、簡易点検診断法を検討する。

(2) 画像解析による耐候性鋼橋梁の外観評価

耐候性鋼橋梁のさび外観評価を簡易かつ定量的に行うため、画像解析による定量評価を行う。採取したセロファンテープ試験に画像解析を適用して、さび粒径の大きさ、密度、

個数など分布状況等を調べ、簡易な評価方法を検討する。

(3) 写真計測による三次元解析モデルの構築

写真計測により橋梁全体を忠実に三次元解析モデル化することを試みる。あらゆる方向から数十枚の写真を撮ることにより、橋梁全体の三次元座標を取得できる。橋梁の三次元解析モデルへの可能性を検討し、既存の三次元解析モデルと合わせ、より詳細な三次元解析モデルを構築する。

3. 研究の方法

(1) 橋梁の簡易点検診断法の検討

長崎県の中核都市を対象として橋梁の維持管理手法の検討を行った。限られた予算の中で対応するため、公共施設等の維持管理方法の効率化の1つとして、対象都市にある橋梁の現状を分析し点検の効率化に向けて考察した。

対象都市が管理する橋梁の6割以上は架設年度が不明である。2015年時点、対象データ887橋のうち架設年度不明の585橋を除き、69橋が架設後50年以上経過したもので、233橋が架設後50年未満である。30年後は架設後50年以上経過するのが69橋から253橋となり、今後、高経年化橋梁の増大に対応した維持管理が求められる。

対象都市では、橋梁の健全度は長崎県の橋梁点検マニュアル¹⁾に基づいて評価しており、概略点検の記録を詳細点検に変換し、健全度(HI; Health Index)が算出されている。平成26年度までに実施された点検と健全度の算定結果を用いて、全887橋のデータを基に健全度評価の分析を行った。

図1は、橋長15m以上の橋梁HIの健全度と橋長15m未満の橋梁HIの健全度との比較である。橋長15m未満の対象橋梁705橋の内、640橋が健全度80点を超え、9割以上が健全度80点以上である。これより、橋長の短い小規模橋梁まで全ての橋梁について同じ評価を行うのは効率的ではなく、点検の簡易化の可能性が考えられる。

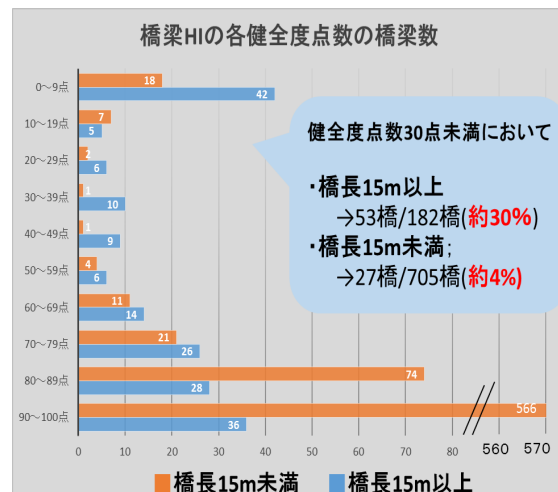


図1 橋梁HIの比較

(2) 画像解析による耐候性鋼橋梁の外観評価
 画像解析により得られたさびの粒径分布に関する情報と、専門家に依頼した判定結果をもとに、専門家が暗黙のうちに有する判定基準と画像解析結果を結びつけ、非専門家でも容易に行えるさび評価法を提案する。ただし、ここではさび評価の簡便性に重きを置き、精度よくさびの5段階評価を行うことではなく、維持管理上最重要である措置の必要性を判定する外観評点2と3を判別することを主眼とし、定量的なさび評価法構築を目指す。

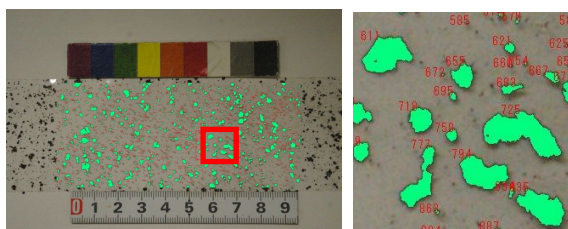
本研究では、粒子解析ソフト²⁾を用いてさびの粒径等の解析を行った。セロファンテープ試験の粒子解析の手順を以下に示す。

セロファンテープ試験で採取したさびの資料(図2)をデジタルカメラで撮影またはスキャナで読み込む(いずれの場合も資料と共に長さ見本も併せて撮影、スキャンする)。



図2 セロファンテープ試験資料の一例

粒子解析ソフトで画像を読み込む。画像内での基準となる長さを画像中の長さ見本を用いて設定する。計測領域を矩形測定に設定し、画像中にて範囲を設定する。なお、今回用いたセロファンテープ資料は、幅は50mmで、長さは約230mmと約110mmの2種類あり、この資料の全面を計測範囲とした。図3に示すように、計測範囲内を2値化(計測対象部分とそうでない部分)したのち、自動解析させる。なお、解析後、それぞれ解析された粒子には番号が振り分けられ、同時にそれぞれ対応する計測結果が出力される。



(a) 解析対象部分の2値化 (b) 拡大部分
 図3 粒子解析後

今回着目した項目は、最大径、最小径、平均値、分散、密度、さびの個数の6つである。

(3) 写真計測による三次元解析モデルの構築
 近年注目されている三次元計測技術の一つであるSfM (Structure from Motion) を用いることによる効率的なインフラ点検手法の検討を目的とする。まず、SfMによる

3Dモデルを用いたコンクリート供試体および実橋梁のひび割れ計測手法に関する検討を行う。次に、図面や資料のない橋梁について、効率的にリスクや安全性評価を行うため、SfMによる3DモデルをFEM解析モデルとして活用する手法の検討を行う。

SfMは画像を用いた三次元形状復元技術であり、異なる位置から撮影された複数の写真をもとに3D点群を取得する(図4)。基本原理は従来の写真測量と同様であるが、SfMではほとんどの工程が自動化されている。SfMは画像から自動で数百点から数千点の特徴点を抽出し、画像間のマッチングを行い、その点と撮影位置の三次元座標を特定する。特徴点とは、画像上で周囲と比較して色彩や濃淡などが異なる画素のことである。特徴点と撮影位置の推定値から生成された粗い点群を用いて画像の各ピクセルについて三次元座標を計算し、より高密度な3D点群データを取得する。この点群を接点とする三角形要素を構築し、モデルのテクスチャを作成することで、対象を再現した3Dモデルが作られる³⁾。

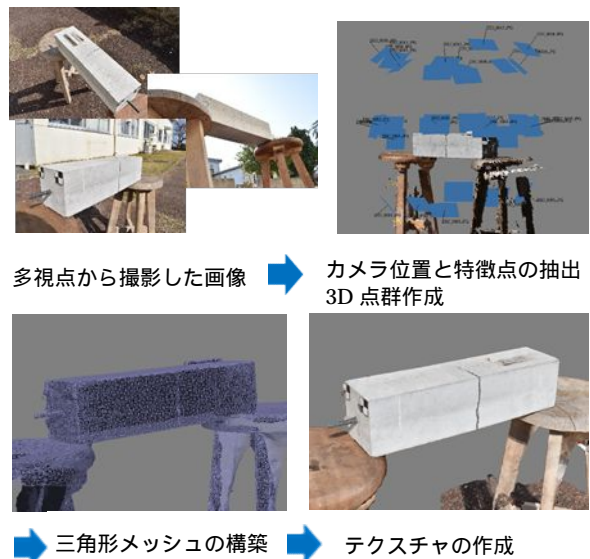



図4 3Dモデル構築の手順

今回、モデル化の対象とした橋梁の詳細を表1に示す。この橋梁はコンクリート床版とH鋼による2本の主桁から構成されている。用いたSfMソフトウェアはAgisoft社製のphotoscanである。

表1 対象橋梁

橋梁	橋長	幅員
	8.7m	4.3m

また、撮影に用いたカメラは一眼レフデジタルカメラ Nikon-D5500 (2,400万画素)であり、モデル作成に使用した写真の枚数は192枚である。

4. 研究成果

(1) 橋梁の簡易点検診断法の検討

図5は、橋長15m未満の橋梁に対して、橋梁全体のHIと主構、下部工、支承部のそれぞれのHIとの関係を示したものである。主構HIは橋梁全体のHIとある程度の相関性は見られ、下部工のHIはほとんどが健全で相関性はなく、支承部のHIはある決まった値に集中しており、相関性はあまり見られない。

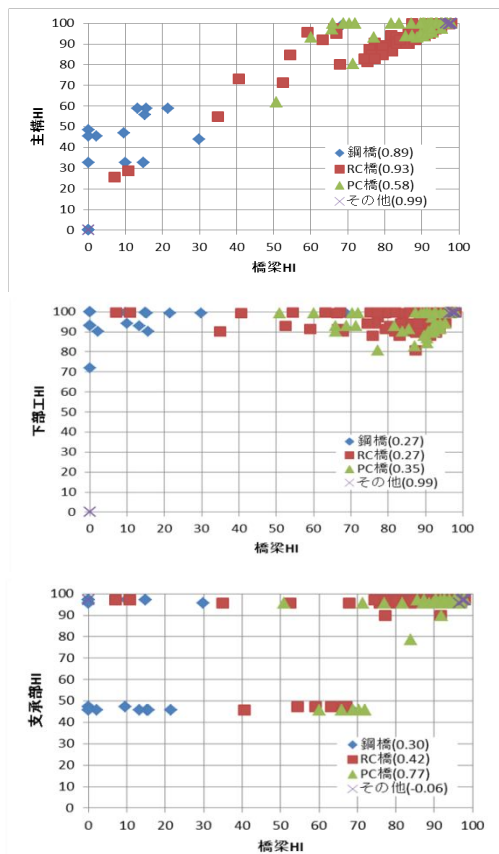


図5 橋梁全体のHIと主構、下部工、支承部のHIの関係

点検の効率化を検討するため、サンプル橋梁を選び長崎県の橋梁点検マニュアル¹⁾に従って目視点検を行い、前節に示した既往の調査との比較を行った。サンプル橋梁は、「架替え検討が必要」と判定された28橋の内、目視点検可能な22橋(全て鋼橋)と「予防的な修繕が必要」か「早期の修繕が必要」と判定されたPC橋5橋、RC橋8橋である。

図6には、鋼橋の主構HIにおける既往の調査との比較を示す。22橋の内14橋において、今回の現地調査結果の健全度が高い結果となった。既往の主構HIが低い橋梁の劣化状況を見ると、主構に亀裂や断面欠損は確認されなかったが錆や塗膜劣化は激しく、その

ため錆や塗膜劣化からの腐食の評価だけで主構の健全度の低下につながったと考えられる。

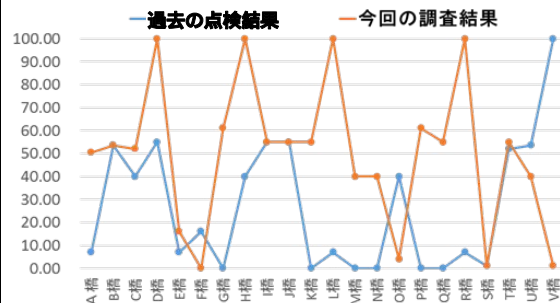


図6 鋼橋(主構)の健全度の比較

図7には、RC橋の主構HIにおける既往の調査との比較を示す。8橋の内6橋において、今回の現地調査結果の健全度が低い結果となった。今回調査した主構HIが低い橋梁の劣化状況を見ると、鉄筋露出やひび割れが多く見られた。経年による劣化を考慮しても健全度が大きく低下しており、その損傷が部分的なのか全体なのかの判断によって、差異が出たものと考えられる。なお、PC橋の主構HIについては、大幅な差異は出なかった。

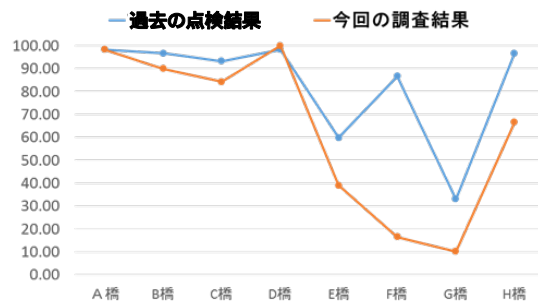


図7 RC橋(主構)の健全度の比較

以上のことから、以下のことが明らかとなった。主構HIは橋梁全体のHIと高い相関性がある。防食機能の低下は健全度が低くなる傾向にある。劣化範囲の取り方により健全度が大きく異なる。

これより、地方公共団体における橋梁点検の効率化を図る上で、点検における重点的監視部位のしぼり込み、劣化状況や範囲の健全度への影響度合いの見直しなどの解決策が考えられる。また、点検者により損傷の捉え方が異なるため、点検項目を明瞭にすることも重要である。

(2) 画像解析による耐候性鋼橋梁の外観評価

6つの項目の解析結果において、すべての組み合わせによる関係を求めたが、ここでは代表的なもののみを示す。図8は最大径の最大値と平均値の関係である。評点が悪いほど上側にプロットされている傾向があるが相関性は見られない。同様に、さびの個数、密度とは無関係のようであった。

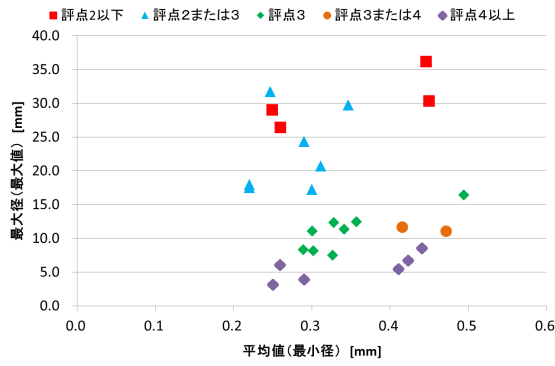


図8 最大径と平均値の関係

図9は最も相関性が見られた、最小径の最大値と分散の関係である。評点別に値がまとまっている傾向が確認でき、評点判別で最も重要とされている評点2と評点3の判別は、最小径の最大値は9.0mmでしきい値が作れるのではないかと考えられる。また、最小径の分散は 0.3mm^2 以下であれば、確実に評点2以下が排除できる。

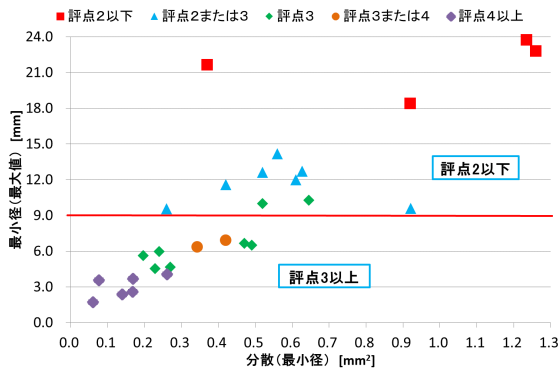


図9 最小径と分散の関係

今回提案するしきい値の実用性を確認するため、九州橋梁・構造工学研究会(KABSE)に設置された「九州・山口地区における耐候性鋼橋の調査・研究分科会」の活動^{4),5)}として、2001年～2003年に調査を行った福岡県の耐候性鋼橋のセロファンテープ試験資料の59枚を集め粒子解析を行った。これらの資料は前述の専門家に依頼した資料とは別のものである。資料59枚のさびの最小径の最大値と最小径の分散の関係を図10に示す。

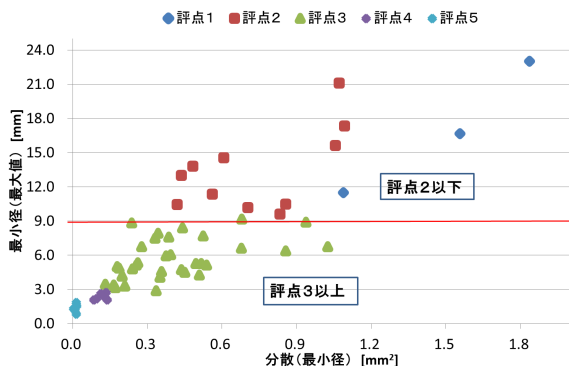


図10 他の資料での最小径と分散の関係

同図より、評点5になるほどプロットは左下に位置し、逆に評点1になるほど右上に位置していることが分かる。また提案するしきい値である、最小径の最大値9.0mmで評点2と評点3がはっきりと区別されていることがわかり、最小径の分散 0.3mm^2 以下であれば、確実に評点2以下が排除できている。

(3) 写真計測による三次元解析モデルの構築

SfMのモデル作成過程で得られた高密度3D点群データについて、FEM解析で必要となるコンクリート床版部分以外の3D点群を編集する。点群データの編集はSfMソフトウェア上で行うか、もしくは3D点群処理ソフトウェアのCloudCompareを用いると効率的な作業が可能である。3D点群の編集前と編集後の状態をそれぞれ図11と図12に示す。

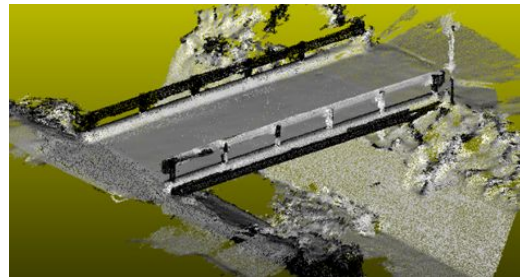


図11 3D点群編集前

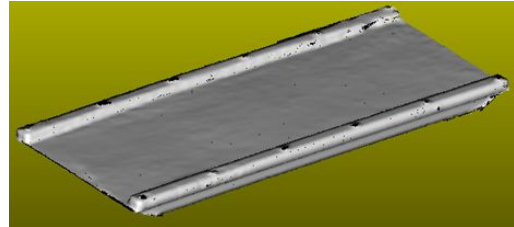


図12 3D点群編集後

SfMによって得られた点群からモデルを作成する場合、モデルの重心部分と原点が大きくずれ、モデルの三次元座標軸に対する向きも不明確な状態である。これは、SfMで点群を作成する際、ソフトウェア側が自動的に点群の座標を設定しているためである。位置の調整は、MeshLabを用いてモデルのメッシュに囲まれる体積から重心座標を解析し、その値をもとにモデルを原点へ移動させる。傾きについては、モデルのSTLファイルから得られる各面の法線ベクトル成分の数値をもとに、三次元座標軸との角度を計算し、その角度分モデルを回転させて修正した。

橋梁はSfMによるモデル化の際に主桁の再現性が不十分であった(図13)。そのため、今回は主桁のモデル化は行わず、3D点群編集段階で主桁の位置座標を取得し、コンクリート床版のみをモデル化した。その後、汎用有限要素解析ソフトMarcにて解析モデルへ加えた(図14)。SfMにより作成したモデルの面は11,000面であった。解析モデルは要素数32,355要素、節点数56,885点で構成した。図15に強制変位を加えた結果を示すが、

モデルのインポートから解析までに問題はなく、解析結果からも適切な挙動が見られた。



図 13 SfM モデル

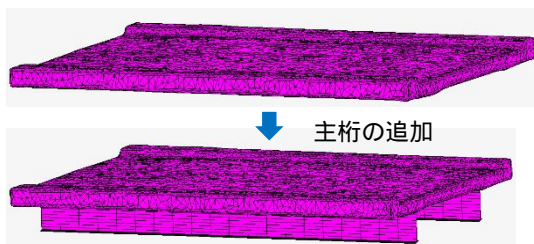


図 14 FEM モデルの作成

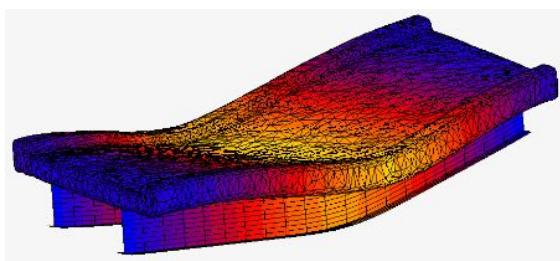


図 15 FEM 解析結果

<引用文献>

- 1) 長崎県土木部道路維持課: 橋梁点検マニュアル(案)、2015
- 2) 日鉄住友テクノロジー: 粒子解析 Version 3.5 USER'S GUIDE、2013
- 3) 小沼恵太郎他: 多視点画像 3D モデル構築システムの橋梁調査への適用性について、土木学会第 69 回年次学術講演会、2014
- 4) 山口栄輝、中村聖三、廣門公二、森田千尋他: 九州・山口地区における耐候性鋼橋梁の実態調査、土木学会論文集 A、Vol.62、No.2、pp.243-254、2006
- 5) 九州橋梁・構造工学研究会 (KABSE): 九州・山口地区における耐候性鋼橋の実態調査デジタル報告書、2004

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

奥松俊博、伊達慶介、中村聖三、西川貴文、温度変化および交通振動に伴う三径間連続鋼桁橋の振動特性変化、構造工学論文集、査読有、Vol.64A、pp.315-324、2018
森田千尋、野中拓海、大木翔太、宮崎県における耐候性鋼橋梁の現状について、鋼構造年次論文報告集、査読有、Vol.25、2017、

pp.559-565

木本啓介、松田浩、中小橋梁の点検における SfM の活用方法の比較・検証、実験力学、Vol.17、No.4、査読有、2017、pp.290-297、<https://doi.org/10.11395/jjsem.17.290>
松田浩、小金丸暁、草野吉俊、伊藤幸広、森田千尋、塗膜除去不要な鋼部材疲労亀裂の熱的負荷による光学的全視野探傷法、土木学会論文集 A2(応用力学)、査読有、2016、Vol.72、No.2、pp.I_643-I_652
https://doi.org/10.2208/jscejam.72.I_643
森田千尋、出水享、木本啓介、松田浩、岩吹啓史、遠隔非接触振動計測装置を用いた橋梁の振動計測に関する研究、実験力学、Vol.16、No.3、査読有、2016、pp.243-249、<https://doi.org/10.11395/jjsem.16.243>

[学会発表](計30件)

福岡優吾(奥松俊博) 支承部に着目した橋梁維持管理に関する検討、平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会、2018
池畑雄太(森田千尋) シンズ構造の力学特性に関する研究、第 5 回九州橋梁・構造工学研究会シンポジウム、2017
河村太紀(松田浩) 橋梁の構造同定による性能評価と安全性評価に関する研究、土木学会第 72 回年次学術講演会、2017
野中拓海(森田千尋) 宮崎県における耐候性鋼橋梁の実態調査、平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会、2017
森田千尋、地方における橋梁の維持管理の現状と点検の効率化について、土木学会第 71 回年次学術講演会、2016
高倉弓彩子(森田千尋) 耐候性鋼材の画像解析によるさび外観評価に関する検討、平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会、2016
木本啓介(松田浩) SfM を用いた橋梁点検手法の検証、第 18 回応用力学シンポジウム、2015

6. 研究組織

(1)研究代表者

森田 千尋 (MORITA, Chihiro)
宮崎大学・工学部・教授
研究者番号: 60230124

(2)研究分担者

松田 浩 (MATSUDA, Hiroshi)
長崎大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 20157324

奥松 俊博 (OKUMATSU, Toshihiro)
長崎大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30346928

出水 享 (DEMIZU, Akira)
長崎大学・大学院工学研究科・技術職員
研究者番号: 00533308