

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360182

研究課題名(和文) 光学的計測技術によるインフラ構造物のマイクロ・メゾ・マクロレベルの劣化・健全度評価

研究課題名(英文) Studies on the evaluation method of deterioration and health in the micro-meso-macro level of infrastructure by optical measurement technology

研究代表者

松田 浩 (MATSUDA, Hiroshi)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：20157324

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：光学的計測技術を用いて、以下の研究開発を行った。
RC 構造物の表面ひび割れ発生状況をモニタリングする装置および内部ひび割れやひび割れ補修材の充填状況を直接観察できる装置を開発した。応力解放法によるPC 桁の現有応力測定法の実証実験を実施し、実構造への有効性を確認した。さらに、熱的負荷によるき裂検知装置の開発を行った。腐食環境インパクト評価手法を確立するために、暴露コンクリート試験体の塩分濃度の計測を継続して実施している。3D レーザスキャナと無人飛行機(UAV)を連動させた遠隔計測システムを開発し、インフラ構造物の劣化損傷の程度を遠隔で点検できる計測手法の開発を行なった。

研究成果の概要(英文)：In the present study, it was carried out research and development using the optical measurement technology.

We have developed a monitoring device to observe the surface cracks, internal cracks, and crack repair material of RC structures. We carried out stress measurement of PC girder using the stress release method and confirmed the validity to the actual PC structure. In addition, we have developed a crack detection device by providing a thermal load. In order to evaluate the corrosion environment impact factor, the salinity of the concrete specimens that exposure I have continuously measured. In order to evaluate the corrosion environment impact factor, the salinity of exposure concrete specimens have been measured continuously. Using a three-dimensional laser scanner and unmanned air vehicle (UAV), we did the development of remote measurement system of deterioration damage of infrastructures.

研究分野：土木工学

キーワード：光学的計測技術 インフラ構造物 劣化・健全土診断 デジタル画像相関法 棒状スキャナ 応力解放法 レーザドップラ速度計 全視野計測法

1. 研究開始当初の背景

申請者らは、2000年頃から、電子スペクトル干渉計測 (ESPI)、デジタル画像相関法 (DICM) などの光学的計測法に関する以下のような実験計測を実施してきた。

- ①鋼部材の溶接時の温度・変形・ひずみ計測
- ②異方性 FRP 複合材の振動・応力計測、接着不良等の欠陥検知
- ③張力膜リソール発生と薄肉円筒シェルのダイヤモンド座屈
- ④き裂を有する圧縮石こう板のひび割れ発生・進展の可視化
- ⑤フレッシュコンクリート硬化過程の収縮ひずみ計測
- ⑥模擬試験体を用いた塩害・ASR によるコンクリートの劣化メカニズム

これらの研究においては、“光計測は従前の計測法と比較してメリットはあるのか、またデメリットはないのか”に注目し、また、一研究室での研究遂行には限界があると考え、九州内の研究者との共同研究で実験・計測を実施してきた。具体的には、日本コンクリート工学会九州支部 (2004~06年度)、九州橋梁構造工学研究会 (KABSE、2007~10年度) に研究分科会を組織した。また、実験力学会に入会し、実験力学会とのジョイントセミナーを開催した (2005年)。2011年度からは実験力学会に「建設工学における計測技術」研究分科会を設置し、実験力学会 Vol.11.No.3 に《解説》「光学的計測法によるインフラ構造物の施工と維持管理」を掲載した。

前記の実験・計測により、建設分野においても、光計測が極めて有効であることが明確になった。しかし、計測環境が極めて良好な実験室での計測結果である。光計測が建設分野で普及するためには、実験室や工場ではない、過酷な計測環境にある建設現場での適用可能か否かにかかっている。

申請者らは、2008~09年度に国土交通省建設技術研究開発助成により、コンクリート構造物診断のための光学的手法によるロボスタ性の高い計測・解析システムを開発するとともに実証実験に取り組んだ。建設現場でも適用可能な、DICM に基づく、変形・ひずみ・応力の実用的全視野計測装置を試作開発するとともに、全視野計測装置と応力解放法を併用して PC 桁の現有応力測定への適用性を検討した。さらに、3D 計測と FE 解析と常時微動計測による新しい構造物のモニタリング法を開発し、実証実験を実施するとともに、維持管理への応用性について検討した。

これらの研究成果は終了時評価結果において、「個々の研究の完成度が高く、“概ね目標を達成できた”ものと評価できる。光技術を用いた RC 構造物の診断法の開発に実用化レベルで成功しているため、さらなる拡張と光学的計測法の体系化が望まれる。」という評価を得た。また、これらの研究成果は、International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management

(IABMAS 2010) において Special Session “Optical Monitoring Techniques for Bridge Maintenance and Safety”を企画実施した。さらに、日本コンクリート工学会のコンクリート構造物のひび割れ進展評価手法に関する研究委員会に参画し、光学的手法によるコンクリート構造物のひび割れの発生・進展の計測方法について講演を行ない、高い評価を得た。

2. 研究の目的

提案する研究は、これまでの研究成果をさらにブラッシュアップし新展開を図るとともに、建設工学分野におけるマイクロ~メゾ~マクロスケールでの光学的計測法の体系化を図り、インフラ構造物の劣化・健全度の評価法の標準化を図ることを目的としたものである。具体的には以下を目的とする。

(1)ひび割れ劣化診断・補修システムの開発:

RC 構造物の長寿命化に大きく影響を与えるコンクリートのひび割れに着目し、これまで開発してきた計測装置をさらに改良して、表面ひび割れの発生状況をモニタリングする装置を試作するとともに、さらに、内部ひび割れ状況やひび割れ補修材の充填状況を直接管理できるシステムを開発する。

(2)応力解放法による PC 桁の現有応力測定と溶接残留ひずみ分布測定:

これまで開発してきた装置を用いた応力解放法による PC 桁の現有応力の測定方法の実証実験を実施し、実構造への活用法を構築する。さらに、同計測手法により溶接残留ひずみ分布の可視化へ拡張する。

(3)鋼・RC 構造物の劣化環境インパクト評価:

塩化物イオン濃度のマッピングによるコンクリート構造物の塩害劣化予測手法を開発するとともに、コンクリート中の腐食生成物の微視的観察技術等を用いて、鋼部材の腐食環境インパクト評価手法を確立する。

(4)実振動計測による耐震性能評価法の確立と構造物の遠隔劣化損傷点検手法の開発:

レーザードップラ速度計 (LDV) を複数台設置し、実構造物の復元力特性を算定するシステムを確立する。さらに、3D レーザスキャナと無人飛行機 (UAV) と全方位カメラを連動させた遠隔計測システムの開発し、インフラ構造物の劣化損傷の程度を遠隔で点検できる計測手法の開発を行なう。

(5)光学的計測法の体系化・標準化:

建設技術開発研究助成の外部評価項目にしたがって、建設工学分野におけるマイクロ~メゾ~マクロスケールでの光学的計測法の体系化を図るとともに、インフラ構造物の劣化・健全度の評価法の標準化を図る。

3. 研究の方法

(1)ひび割れ劣化診断・補修システムの開発

本研究開発では、表面ひずみ計測による鉄筋腐食モニタリングの可能性を検討する。これが確立できれば自然電位法に代わるモニ

タリング手法となり得る。また、実 RC 構造物を想定した、コンクリートの表面ひび割れの発生状況およびひび割れ発生のモニタリング装置を開発する。さらに、棒形スキャナを用いて、内部ひび割れやひび割れ補修材の充填状況を観察できるシステムを開発する。

(2)応力解放法による PC 桁の現有応力測定および溶接残留ひずみ分布測定

これまでの開発装置を用いた応力解放法による PC 桁の現有応力の測定方法の実証実験を実施した。この研究成果をさらに発展させ、実構造物への適用性を検討するとともに、実証実験を重ね、PC 構造物の健全度診断への活用を確立する。なお、さらに、溶接残留ひずみ分布もデジタル画像相関法と応力解放法とを併用することにより求めることができるので、その研究へ拡張する。

(3)鋼構造物およびRC構造物の劣化環境インパクト評価

コンクリート構造物と鋼構造物は時間の経過とともに劣化が進行するが、外部の環境条件によりその劣化速度は大きく異なる。構造物の維持管理を適切に実施するためには、構造物の劣化速度を適切に評価する必要がある。そのためには劣化外力、すなわち環境条件を適切に評価しなくてはならない。本研究は、コンクリート工学、鋼構造学の中でも研究データの蓄積が進んでいない構造物の劣化環境の定量的な評価を実施するものである。九州大学（濱田、佐川）では、数年前から腐食生成物の微視的な観察を開始し、電子顕微鏡による観察技術を確立した。これにより、腐食生成物をマイクロオーダーで微視観察することができるようになった。この方法は独自のものであり、異なる環境条件下で生成した腐食生成物の微細構造の違いを検討できる。長崎大学（松田）も走査型電子顕微鏡を有しており共同で本研究を実施する。

(4)実振動計測による耐震性能評価法の確立と構造物の遠隔劣化損傷点検手法の開発

時刻同期を取ったレーザードップラ速度計（LDV）を複数台設置し、相対変位は時間積分により、力は加速度から算定し、実構造物の復元力特性算定システムを確立する。さらに、3D レーザスキャナと無人飛行機（UAV）と全方位カメラを連動させた計測システムを開発し、インフラ構造物の遠隔劣化損傷点検手法の開発を行なう。これまでに3D レーザスキャナによる軍艦島の3D デジタル画像化に成功している。本研究では30号棟アパート（1916年建設）を対象として捕捉計測のため上空から実地計測を行なう。

(5)光学的計測法の体系化・標準化

建設工学分野での実験・計測に光学的計測法を適用し、その適用可能性を追求してきた。従来の歪ゲージ法では計測できなかった歪分布が計測できることが明確になった。本研究では、さらに、①き裂を有する石こうのひび割れ発生・進展、②薄肉円筒シェル初期不整を考慮した座屈実験・解析を実施すると

ともに、これまで実施してきた建設分野における光学的計測法による種々の試験結果をさらにブラッシュアップして、建設分野における光学計測の体系化を図るためのさらなる実験・計測を実施する。

4. 研究成果

(1)ひび割れ劣化診断・補修システムの開発

①電食による鉄筋腐食モニタリング

腐食ひび割れ発生前のコンクリート表面ひずみ分布測定し、電食による鉄筋腐食のモニタリングを実施した。図1に示すように56時間後にひび割れが発生したが、それよりも前にひび割れ発生の兆候を観察することができた。

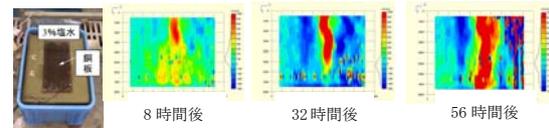


図1

②DICMによる変位・ひずみ計測

撤去PC桁の荷重試験でDICMを用いて変位、ひずみを計測し、ひずみゲージ・変位計なしでのひび割れ進展図を作成した。

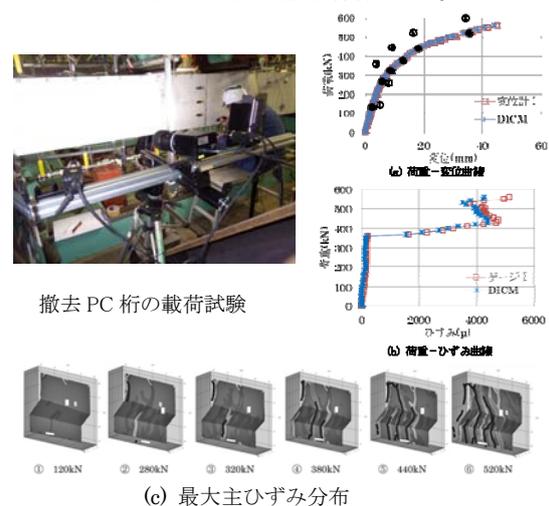


図2

③デジタル画像処理によるひび割れ図取得

ひび割れ図の取得には、クラックインデックスおよび木構造状画像フィルタを用いた手法について検討した。その結果を以下に示す。木構造フィルタでは、画像の特徴を階調値により分類し、対象画像に対して効果的なフィルタを構築した。

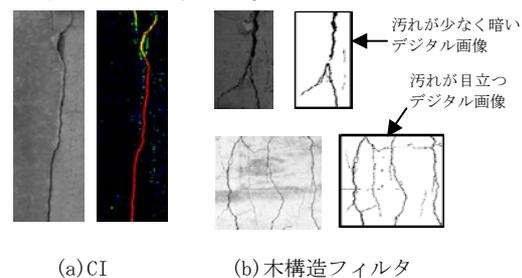


図3 ひび割れ図の取得

(2)応力解放法による PC 桁の現有応力測定お

よび疲労き裂検知法の開発

①応力解放法による PC 桁の現有応力測定
 ポストテンション PC 単純合成 I 桁橋 (S47 年建設) の現有作用応力計測を行った。G4 主桁の橋軸方向の現有作用応力計測結果から算出した有効プレストレス量の計測値/設計値は 0.95 となり、有効プレストレス量の大きな減少は確認されなかった。

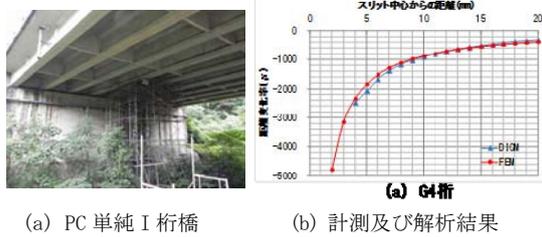


図 4 PC 桁現有応力測定

②疲労き裂検知法の開発

溶接残留応力測定法の研究から、熱的負荷による疲労き裂検知法の開発に取り組んだ。誘導加熱により鋼材のみを直接加熱して、亀裂を強制的に開口/閉口させ、そのひずみ変化を塗膜上から DICM により画像解析によって検出可能なことを確認した。

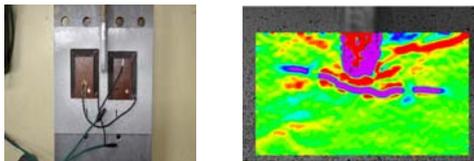


図 5 誘導加熱による疲労き裂検知

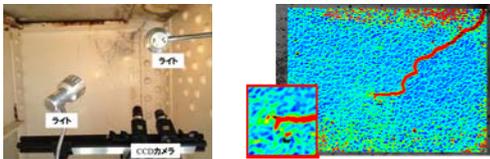


図 6 実鋼橋での疲労き裂検知

(3)鋼構造物およびRC構造物の劣化環境インパクト評価

九州地区から数か所の暴露場所を選定し、6 年前に暴露試験を開始している。今後も継続し図 8 に示すように検討していく。



図 7 九州地区における暴露箇所及び状況

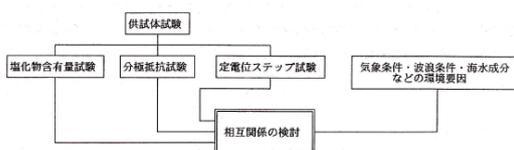


図 8 腐食量指標と環境要因の相互関係
 (4)実振動計測による構造同定法の確立と構

造物の遠隔劣化損傷点検手法の開発

①実振動計測による構造同定法
 実橋梁を対象として LDV による振動計測を実施し、FEM 解析結果と比較しほぼ同じ結果 (1 次振動 3.2Hz) が得られた。

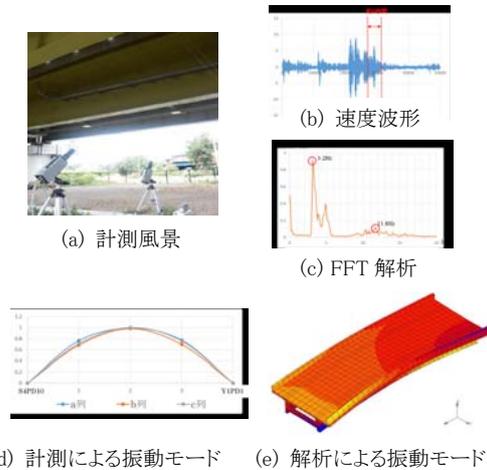


図 9 LDV による構造振動同定

②2 軸反射三角形ターゲットの開発

図 10 に示すような鉛直・水平振動数を計測できる三角形ターゲットを作成し、LDV を 2 台使用した同期計測を行った。加算処理により橋軸鉛直方向、減算処理により橋軸直角方向の振動数が加速度計による卓越振動数と概ね一致し、その有効性を確認した。

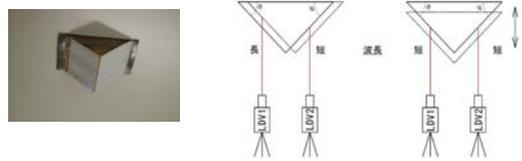


図 10 2 軸反射三角形ターゲットの原理

③構造物の遠隔劣化損傷点検手法の開発

遠方からデジタル画像を取得するための機器として UAV を使用した。

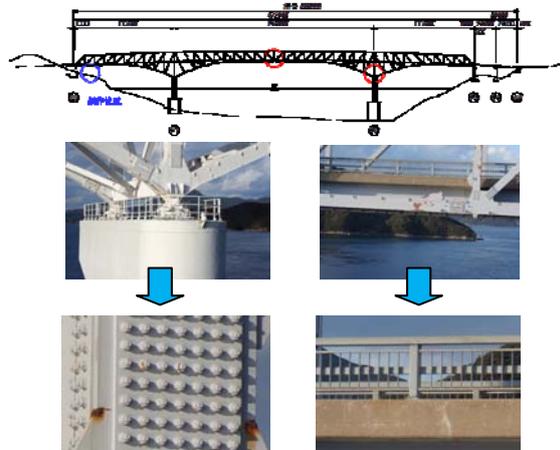
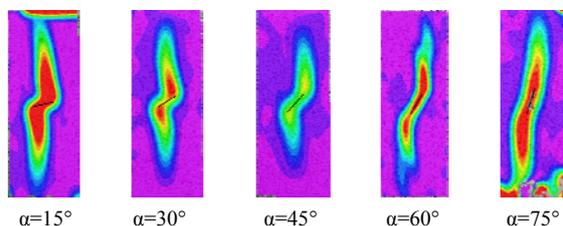


図 11 UAV による遠隔劣化損傷点検

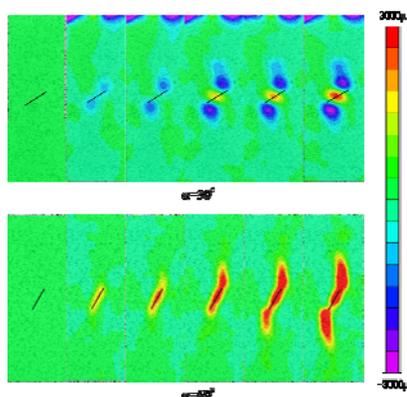
(5)光学的計測法の体系化・標準化

DICM を用いて、き裂を有する圧縮石膏板のき裂の発生・進展挙動の可視化を行った (図 12)。α=30°の試験体では、き裂先端か

ら Wing Crack が発生し、 α が大きくなると発生しにくくなり、 $\alpha=60^\circ$ ではせん断によるひび割れが確認された。このような実験結果を基に、今後さらに、光学的計測法の体系化・標準化に資するための基本データを蓄積していく予定である。



(a) 最大主ひずみ分布



(b) せん断ひずみ分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 68 件)

- ① Md. A. Hasib and A. Saimoto : Interaction of Multiple Planar Cracks under Mixed-mode Loading, 3rd International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering, CD-ROM, 2014.12 (査読有)
- ② Md. A. Hasib and A. Saimoto: Versatile Analysis of Mixed-mode 3D Planar Crack, Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, pp. 349-352, 2014.10 (査読有)
- ③ 岡本佳樹, 草野老俊, 松田浩, 出水亨, 伊藤幸広: 熱的負荷による鋼部材のき裂の欠陥検知法に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol.22, pp.284-291, 2014.11 (査読有)
- ④ 中村聖三, 村田勇司, 原田宗育, 奥松俊博, 西川貴文: 長崎県における耐候性鋼無塗装橋梁の錆生成状況とその経年変化, 鋼構造年次論文報告集, 第 22 巻, pp.489-495, 2014.11 (査読有)
- ⑤ 村山康雄, 元井邦彦, 福永靖雄, 中村聖三: 道路構造物へ金属溶射を適用するための基礎耐久性試験, 鋼構造年次論文報告集, 第 22 巻, pp.496-503, 2014.11 (査読有)
- ⑥ 草野老俊, 緒方宇大, 松田浩, 森田千尋, 古賀掲維: 薄肉円筒シェル部材の座屈挙動に関する実験・解析的研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol.22, pp.95-101, 2014.11 (査読有)
- ⑦ T. Okumatsu, S. Nakamura, T. Nishikawa, T. Kojima and Y. Mitsui: Temperature effect for natural frequencies of a steel ligger truss girder bridge, Proc. of 4th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, (in CD-ROM) 2014.11 (査読有)
- ⑧ 長島和輝, 上阪康雄, 松田浩: 道路橋床版の上面増厚補強における継手部の構造検討, 第八回道路橋床版シンポジウム論文集, pp61-62, 2014.10 (査読有)
- ⑨ 出水亨, 松田浩, 伊藤幸広, 肥田研一: カメラ装置とコア応力解放法によるプレテンション PC 桁の現有作用応力測定, 第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, No.23, pp.123-128, 2014.10 (査読有)
- ⑩ Shozo Nakamura, Toshihiro Okumatsu, Takafumi Nishikawa and Takatoshi Okabayashi: Fatigue Damage of a Diagonal Member in a Steel Truss Bridge Due to Wind-Induced Vibration (iBridge 2014 book of selected papers) 2014.10 (査読有)
- ⑪ 博多屋智志, 前田玄輝, 松田浩, 出水亨, 趙程: 一軸圧縮荷重を受ける複数の初期き裂を有する石膏板のひび割れ進展挙動に関する研究, 日本実験力学学会年次講演会, pp.31-36, 2014.8 (査読無)
- ⑫ 岡本佳樹, 草野老俊, 松田浩, 出水亨, 伊藤幸広: 熱的負荷による鋼部材のき裂の欠陥検知法に関する研究, 日本実験力学学会年次講演会, pp.113-117, 2014.8 (査読無)
- ⑬ 草野老俊, 緒方宇大, 戸次翔, 松田浩, 森田千尋, 古賀 掲維, 趙程: 薄肉円筒シェル部材の座屈挙動に関する実験・解析的研究, 日本実験力学学会年次講演会, pp.164-169, 2014.8 (査読無)
- ⑭ 長島和輝, 松田浩, 森田千尋, 出水亨, 藤岡靖, 大石義成, 高橋洋一, 遠隔非接触振動計測装置を用いた鋼道路橋の振動特性に関する研究, 日本実験力学学会年次講演会, pp.333-338, 2014.8 (査読無)
- ⑮ 蔵本駿介, 長島和輝, 中原勇氣, 西川貴文, 出水亨: 光学的手法によるコンクリート構造物のひび割れ幅および進展挙動の計測と可視化, 日本実験力学学会年次講演会, pp.344-348, 2014.8 (査読無)
- ⑯ 緒方宇大, 草野老俊, 松田浩, 森田千尋, 出水亨, 上阪康雄, 稲田裕: 無人飛行体(UAV)を用いた橋梁の目視点検手法の開発に関する研究, 日本実験力学学会年次講演会, pp.349-352, 2014.8 (査読無)
- ⑰ Nurazuwa MD NOOR, 濱田秀則, 佐川康貴, 山本大介: Strength Characteristics and

Effective Chloride Diffusion Coefficient of Rubberized Concrete、コンクリート工学年次論文集、第 36 巻、2014.7 (査読有)

- ⑱ Muhammad Akbar CARONGE, 濱田秀則, 佐川康貴, 山本大介: Effect of Curing and Crack width on Potential Performance of Steel with Sacrificial Anode in Cracked Concrete、コンクリート工学年次論文集、第 36 巻、2014, 2014.7 (査読有)
- ⑲ Nurazuwa MD NOOR, Daisuke Yamamoto, 濱田秀則, 佐川康貴: Potential in usage of used tire as sand replacement in high strength mortar, セメント・コンクリート論文集, 2014.3 (査読有)
- ⑳ 森田千尋, 平田司, 松田浩, 出水享, 牧野高平: 長崎県内の小規模鋼橋の腐食状況調査と健全度評価に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 21 巻, pp.856-861, 2013.11 (査読有)

紙面の都合上以下省略

[学会発表] (計 128 件)

- ① 草野尨俊, 森崎雅俊, 出水享, 松田浩, 伊藤幸広: デジタル画像関連法を用いた鋼部材の欠陥検知法の開発に関する研究, 平成 25 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, I-040, pp.79-80, CD-ROM, 2014.3

多数あり、紙面の都合上省略

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 2 件)

名称: ひずみ計測方法、ひずみ計測装置およびプログラム

発明者: 伊藤幸広、井上賢優、松田浩、内野正和

権利者: 佐賀大学、長崎大学

種類: 特許

番号: 5458262

出願年月日: 2009.09.03

国内外の別: 国内

名称: 変位/ひずみ計測装置

発明者: 伊藤幸広、松田浩

権利者: 佐賀大学、長崎大学

種類: 特許

番号: 5458263

出願年月日: 2010.03.08

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.st.nagasaki-u.ac.jp/ken/matsuda/research/research-1.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 浩 (MATSUDA, Hiroshi)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号: 20157324

(2) 研究分担者

濱田 秀則 (HAMADA, Hidenori)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号: 70344314

佐川 康貴 (SAGAWA, Yasutaka)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号: 10325508

伊藤 幸広 (ITO, Yukihiro)

佐賀大学・工学系研究科・教授

研究者番号: 90223198

一宮 一夫 (ICHIMIYA, Kazuo)

大分工業高等専門学校・都市環境工学科・教授

研究者番号: 00176306

藤垣 元治 (FUJIGAKI, Motoharu)

福井大学・工学研究科・教授

研究者番号: 40273875

中村 聖三 (NAKAMURA, Shozo)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号: 40315221

才本 明秀 (SAIMOTO, Akihideo)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号: 00253633

森田 千尋 (MORITA, Chihiro)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 60230124

奥松 俊博 (OKUMATSU, Toshihiro)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 30346928

西川 貴文 (NISHIKAWA, Takafumi)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号: 50512076

出水 享 (DEMIZU, Akira)

長崎大学・工学研究科・技術職員

研究者番号: 00533308

牧野 高平 (MAKINO, Kohei)

長崎大学・工学研究科・技術職員

研究者番号: 80568478