

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289138

研究課題名(和文) 腐食環境と塗膜劣化の連成を考慮した鋼構造物の致命的損傷予知シミュレータの開発

研究課題名(英文) Development of simulator for predicting fatal corrosion damage in steel structures considering couples between corrosive environment and coating film deterioration

研究代表者

貝沼 重信(Kainuma, Shigenobu)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00262874

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、鋼構造物の部位レベルの致命的腐食損傷を予知するためのシミュレータを開発するために、申請者らが確立した腐食環境評価法と無塗装部材の経時腐食モデルに塗膜劣化機構の概念を新たに反映させることで、腐食環境と塗膜劣化の連成を考慮可能な塗装部材の時空間統計腐食モデルを構築した。また、このモデルを用いた腐食損傷シミュレーション手法を確立した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a simulator for predicting fatal corrosion damage at each part in steel structures. Spatial-temporal statistical corrosion model for coated steel members considering couples between corrosive environment and coating film deterioration was constructed by reflecting mechanism of coating film deterioration on established evaluation method of corrosive environment by author's previous study and time-dependent corrosion model for uncoated steel member. In addition to this, simulation method was also established by using the corrosion model.

研究分野：工学

キーワード：腐食 シミュレーション 空間統計学 鋼構造物

1. 研究開始当初の背景

我国では諸外国のように、人命が奪われる落橋事故は起きていないが、落橋に直結する致命的腐食損傷(図1)が報告されている。この損傷を維持管理レベルの高い鋼構造物であっても発見できず、予防保全できない場合がある。



図1

構造物を健全かつ安全な状態で供用し、維持管理費を縮減するためには、損傷の経時性や致命的損傷を的確に把握し、従来の過不及な維持管理計画を抜本的に見直すことが重要になる。そのためには、構造物の経時劣化を高精度に予測・評価でき、かつ実用に耐える手法を確立する必要がある。

申請者らは部材レベルの様々な腐食環境に相当する鋼材腐食表面の経時変化を4地点の大気暴露試験(図2)、腐食促進試験と実構造物の暴露試験により約8年間検討してきた。その検討結果に基づき、以下に示す①~④の構築に成功している。①と②の手法については、既に実用化されており、関門橋や都市内高架橋など10橋以上の鋼橋や鉄鋼プラント施設に採用されている。また、腐食原因の究明、腐食対策の選定やその効果確認にも活用されている。

①部位レベルの腐食環境評価法(図3)

②複雑な腐食形態を有する部材表面の分析手法

③部材レベルの腐食挙動の時空間統計モデル

④①~③を用いた塗膜劣化後の鋼部材の経時腐食挙動の空間統計数値シミュレーション手法(図4)



図2



図3

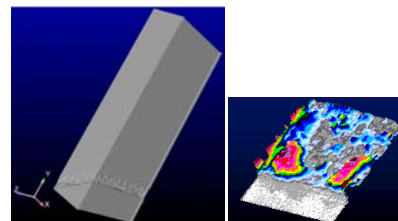


図4

しかし、申請者らは塗膜劣化後の鋼部材のみを対象としており、腐食環境と塗装劣化の連成に伴う腐食挙動を解明していないため、塗装構造物の腐食損傷シミュレータを開発する段階には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、鋼構造物の部位レベルの致命的腐食損傷を予知するためのシミュレータを開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 実施中の塗装劣化モデル試験体の大気暴露試験と腐食促進試験、および実構造物における試験体の大気暴露試験を継続した。腐食促進試験に用いた試験体の例と腐食促進サイクル(JIS K5600-7-9 サイクル D)をそれぞれ図5と図6に示す。

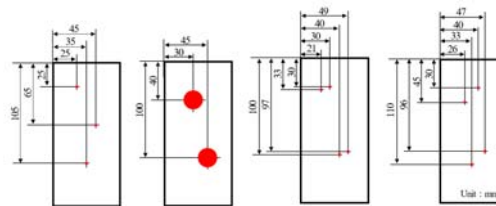


図5

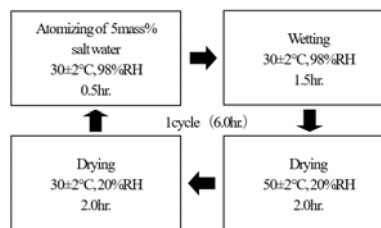


図6

(2) (1)の各試験の腐食環境モニタリングを実施した。モニタリングに用いたACM型腐食センサの測定システムを図7に示す。

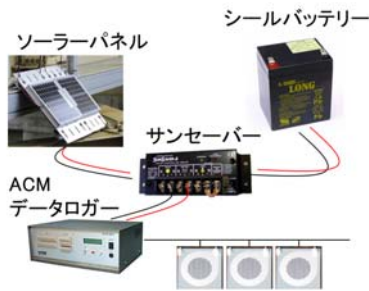


図 7

(3) (1)と(2)の結果に基づき、腐食環境と塗膜劣化の連成を考慮可能な時空間統計腐食モデルを検討した。また、このモデルを用いた腐食損傷の経時性に対するシミュレーション手法について検討した。

(4) (3)を WEB GIS に導入するためのシステムについて検討した。

4. 研究成果

(1) 塗膜の経時劣化挙動を明らかにするために、試験結果を化学、電気化学、材料科学、空間統計学を用いた複合領域の視点で分析した。図 6 で示したサイクルを 3600cycles した後の試験体の腐食生成物の除去前後の状態を図 8 に示す。これらの試験体における塗膜厚の経時性、光沢度の経時性、インピーダンスおよび位相差をそれぞれ測定した。その結果、本試験で用いた A-5 塗装系の塗膜は、1)3600cycles 程度の JIS K5600-7-9 サイクル D の腐食促進試験では、A-5 塗装の塗膜はほとんど劣化しないと言える。単欠陥と複合欠陥の鋼素地の腐食面積、平均腐食深さおよび最大腐食深さを図 9~図 11 に示す。複合の円形欠陥の腐食面積や腐食深さは、いずれも単体の円形欠陥に比して大きくなっている。これは腐食の進行が塗膜欠陥の結合の有無に関わらず、近傍の塗膜欠陥の影響を受けることが原因として推定される。近傍に塗膜欠陥が存在する場合、1 つの塗膜欠陥の内部のみで腐食が進行するのではなく、近接する塗膜欠陥の間で電気回路が形成されると考えられる。前述したように、3600cycles 後でも塗膜はほとんど劣化しておらず、インピーダンス値も高くなっていた。そのため、近接する塗膜欠陥の間で電気化学的反応が生じる場合は、塗膜内の回路ではなく、図 12 に示すような塗膜表面の水膜を介した電気回路が形成されると考えられる。

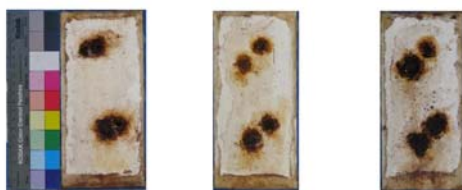


図 8

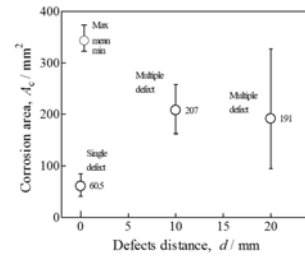


図 9

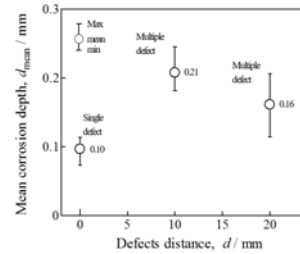


図 10

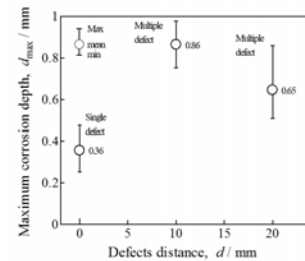


図 11

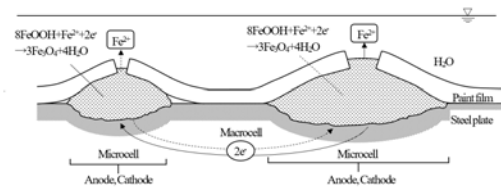
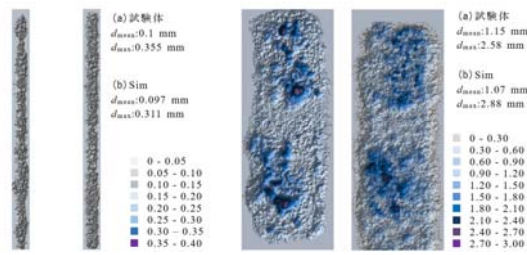


図 12

(2) 腐食環境と塗膜劣化の連成を考慮可能な時空間統計腐食モデルを構築した。また、このモデルを用いた腐食損傷の経時性に対するシミュレーション手法を構築した。これらのモデルとシミュレーション手法を用いて塗膜欠陥を有する鋼板試験体の空間統計数値シミュレーションを実施した。ここでは、図 6 で示したサイクルで 2400cycles 試験した線状および帯状の欠陥を有する試験体を対象としたシミュレーション結果と試験体の腐食表面性状を比較した結果を図 13 に示す。シミュレーションの結果は、試験体の腐食領域の形状や局部腐食が生じている箇所などについて傾向を良く表している。

(3) (2)の時空間統計シミュレーション手法を WEB GIS に導入する際の課題点を抽出した。



左：試験体，右：シミュレーション

図 13

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 25 件)

1. S. KAINUMA, J. H. AHN, Y. S. JEONG, Investigation on The Stress Concentration Effect at The Corroded Surface Achieved by Atmospheric Exposure Test, Materials Science & Engineering A, Vol. 602, No. 25, pp. 89-97, 2014.
2. 貝沼重信, 山本悠哉, 林秀幸, 伊藤義浩, 押川渡, Fe/Ag 対 ACM 型腐食センサを用いた大気環境における無塗装普通鋼板の経時腐食深さの評価方法, 材料と環境, Vol. 63, No. 2, pp. 1-8, 2014.
3. S. KAINUMA, Y. YAMAMOTO, Y. ITOH, Practical Method for Estimating Corrosion Depth of Uncoated Carbon Steel Using Thickness of the Corrosion Product Layer, 12th International Conference on Fracture and Damage Mechanics, Sardinia, Italy, Key Engineering Materials, Vol. 577-578, pp. 201-204, 2013.
4. J. H. AHN, S. KAINUMA, I. T. KIM, Y. S. JEONG, Assessment of Shear Behaviors of a Web Panel with Free lower boundary, 2013 AMEE Workshop on Civil Engineering and Materials Science, CD-ROM, Hong Kong, China, Advanced Materials Research, Vol. 684, pp. 116-119, 2013.
5. Y. S. JEONG, S. KAINUMA, J. H. AHN, Investigation on Corroded Figuration of Weathering and Carbon Steel Using Spatial Statistics, 2013 AMEE Workshop on Civil Engineering and Materials Science, CD-ROM, Hong Kong, China, Advanced Materials Research Vol. 684, pp. 120-124, 2013.
6. 伊藤義浩, 貝沼重信, 炭酸ガス環境における Fe/Ag 対 ACM センサの出力特性の調査 — 転炉配管内の腐食環境評価に対する ACM センサの適用性に関する基礎的研究 —, 防錆管理, Vol. 57, No. 11, pp. 14-19, 2013.
7. 林秀幸, 貝沼重信, 山本悠哉, 伊藤義浩, 腐食生成物が鋼板さび厚の電磁膜厚計による測定精度に及ぼす影響, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 21, pp. 862-868, 2013.
8. 木下優, 貝沼重信, 山上哲示, 塚本成昭, コンクリート系材料の地際における鋼部材の腐食挙動に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 21, pp. 185-192, 2013.
9. J. H. AHN, S. KAINUMA, I. T. KIM, Shear Failure Behaviors of A Web Panel with Local Corrosion Depending on Web Boundary Conditions, Thin-Walled Structures, Vol. 73, pp. 302-317, 2013.
10. S. KAINUMA, J. H. AHN, I. T. KIM, Corrosion pattern for Critical Shear Buckling Load of A Web Panel with Local Corrosion Damage, Applied Mechanics and Materials, Vol. 421, pp. 778-783, 2013.
11. J. H. AHN, S. KAINUMA, T. IMAMURA, Repair Method and Residual Bearing Strength Evaluation of A Locally Corroded Plate Girder at Support, Engineering Failure Analysis, Vol. 33, pp. 398-418, 2013.
12. J. H. AHN, I. T. KIM, S. KAINUMA, M. J. LEE, Residual Shear Strength of Steel Plate Girder due to Web Local Corrosion, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 89, pp. 198-212, 2013.
13. J. H. AHN, S. KAINUMA, I. T. KIM, Shear Buckling Strengths and Post Buckling Behaviors of Steel Webs with Local Corrosion, Journal of JSCE, Vol. 1, pp. 251-261, 2013.
14. I. T. KIM, M. J. LEE, J. H. AHN, S. KAINUMA, Experimental Evaluation of Shear Buckling Behaviors and Strength of Locally Corroded Web, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 83, pp. 75-89, 2013.
15. Y. S. JEONG, S. KAINUMA, J. H. AHN, Structural Response of Orthotropic Bridge Deck Depending on the Corroded Deck Surface, Construction & Building Materials, No. 43, pp. 87-97, 2013.
16. S. KAINUMA, J. H. AHN, Y. S. JEONG, Investigation on The Stress Concentration Effect at The Corroded Surface Achieved by Atmospheric Exposure Test Materials Science & Engineering A, Vol. 602, No. 25, pp. 89-97, 2014.
17. 道野正嗣, 貝沼重信, 林秀幸, 鄭暎樹, 板井麻理子, 大気環境における無塗装鋼板の腐食挙動に及ぼす熱容量の影響に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 22, pp. 938-942, 2014.
18. 坂本達朗, 太田達哉, 貝沼重信, 室内促進劣化試験における塗装さび鋼板の質量変化量評価鋼構造年次論文報告集, Vol. 22, pp. 504-509, 2014.
19. 貝沼重信, 大気環境における構造用鋼材

- の腐食表面性状とその経時性予測表面科学, Vol. 36, No. 1, pp. 35-40, 2015.
20. 坂本達朗, 貝沼重信, 小林淳二, 塗装した腐食炭素鋼のさび性状と塗膜耐久性の関係に関する検討, 材料と環境, 速報論文, Vol. 64, No. 7, pp. 307-310, 2015.
 21. 渡邊亮太, 貝沼重信, 鄭映樹, 化学的素地調整が鋼材の表面性状に及ぼす影響に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 23, pp. 372-377, 2015.
 22. 北川尚男, 貝沼重信, 小林淳二, 郭小龍, 水性塗膜剥離剤を用いた塗替え塗装鋼板の耐久性に関する基礎研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 23, pp. 489-492, 2015.
 23. S. KAINUMA, Y. S. JEONG, J. H. AHN, Stress Distribution on the Real Corrosion Surface of the Orthotropic Steel Bridge Deck, Steel and Composite Structures, Vol. 18, No. 6, pp. 1479-1492, 2015.
 24. 貝沼重信, 大気環境における構造用鋼材の腐食表面性状とその経時性予測, 表面科学, Vol. 36, No. 1, pp. 35-40, 2015.
 25. S. KAINUMA, Y. S. JEONG, J. KOBAYASHI, Influence of Size and Proximity of Paint Coating Defects on Corrosion Behavior of Carbon Steel Plates, 14th International Conference on Fracture and Damage Mechanics, Budva, Montenegro, Key Engineering Materials, Vol. 665, pp. 125-128, 2015.
- [学会発表] (計 35 件)
1. 貝沼重信, 吊橋の腐食環境モニタリングと構造部位のミクロ腐食環境の総合的定量評価, 平成 25 年度全国大会, 第 68 回年次学術講演会, 日本大学, 2013. 9
 2. 坂本達朗, 腐食した塗装鋼材のさび厚と腐食深さの相関定量評価に関する基礎研究, 平成 25 年度全国大会, 第 68 回年次学術講演会, 日本大学, 2013. 9
 3. 林秀幸, 腐食生成物が電磁誘導式膜厚計の測定精度に及ぼす影響平成 25 年度全国大会, 第 68 回年次学術講演会, 日本大学, 2013. 9
 4. 塚本成昭, 腐食鋼部材に対する科学的素地調整の適用性に関する基礎研究, 平成 25 年度全国大会, 第 68 回年次学術講演会, 日本大学, 2013. 9
 5. 松尾和哉, 鋼部材地際部に対するマクロセル腐食環境センサに関する基礎的研究, 第 68 回年次学術講演会, 日本大学, 2013. 9
 6. 木下優, コンクリート系材料が鋼部材の地際腐食挙動に及ぼす影響に関する基礎的研究, 平成 25 年度全国大会, 第 68 回年次学術講演会, 日本大学, 2013. 9
 7. 香川紳一郎, 都市内高速道路橋への腐食環境評価技術の適用と評価について, 平成 25 年度全国大会, 第 68 回年次学術講演会, 日本大学, 2013. 9
 8. 安鎮熙, Investigation of the shear buckling strength of the web panel with local corrosion, 平成 25 年度全国大会, 68 回年次学術講演会, 日本大学, 2013. 9
 9. 鄭映樹, 貝沼重信, 指宿幸平, 腐食損傷を有する鋼床版デッキプレート の応力集中に関する解析的検討, 材料と環境 2013, CD-ROM, 2013. 5
 10. 坂本達朗, 太田達哉, 貝沼重信, 塗装試験鋼板を用いた実構造物の局所環境評価に関する基礎的検討, 第 33 回防錆防食技術発表大会, CD-ROM, 2013. 7
 11. 小林淳二, 貝沼重信, 合田広樹, 坂本達郎, 塗膜欠陥の近接度が鋼材の腐食挙動に及ぼす影響に関する基礎的研究, 材料と環境 2014, CD-ROM, 2014. 5
 12. 道野正嗣, 貝沼重信, 今村壮宏, 香川紳一郎, 小川重之, 吊橋の腐食環境モニタリングと構造部位の腐食性評価, 第 34 回防錆防食技術発表大会, 2014. 7
 13. 土橋洋平, 貝沼重信, 木下優, 石原修二, 鋼部材地際部におけるマクロセル腐食の速度評価センサの開発に関する基礎的研究, 第 34 回防錆防食技術発表大会, 2014. 7
 14. 小林淳二, 貝沼重信, 合田広樹, 塗膜欠陥の寸法・近接度が鋼材の腐食挙動に及ぼす影響に関する基礎的研究, 第 34 回防錆防食技術発表大会, 2014. 7
 15. Y. S. JEONG, S. KAINUMA, T. IMAMURA, Investigation for Effect of Local Corrosion Environment on Structural Member International Conference on Applied Science and Engineering, CD-ROM, Soul, Korea, 2014. 9
 16. Y. S. JEONG, S. KAINUMA, S. TSUKAMOTO, Assessment on Deformable Behaviors of The Orthotropic Steel Deck Stiffened by Bulb Rib Depending on Corrosion Damage 7th International Conference on Thin-Walled Structures CD-ROM, Soul, Korea, 2014. 10
 17. 道野正嗣, 貝沼重信, 藤岡靖, 藁科彰, 高木真一郎, 内野雅彦, 高腐食性環境における無塗装耐候性鋼上路トラス橋の各構造部位の腐食性評価, 第 61 回材料と環境討論会, 2014. 11
 18. 小林淳二, 貝沼重信, 鄭映樹, 線・帯状塗膜欠陥を有する鋼部材の腐食挙動の空間統計シミュレーション, 第 61 回材料と環境討論会, 2014. 11
 19. 小川重之, 香川紳一郎, 片山英資, 貝沼重信, 暴露鋼板の腐食生成物層厚を用いた鋼道路橋の部位レベルの腐食性評価, 第 61 回材料と環境討論会, 2014. 11
 20. 坂本達朗, 貝沼重信, 小林淳二, 塗装

- した腐食炭素鋼のさび性状と塗膜耐久性の関係に関する基礎検討, 第 61 回材料と環境討論会, 2014. 11
21. M. MICHINO, S. KAINUMA, Y. YAMAMOTO, Y. S. JEONG, Y. FUJIOKA, A. WARASHINA, S. TAKAGI, M. UCHINO, Investigation for Corrosion Characteristic of Structural Members on Unpainted Weathering Steel Bridge, 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, CD-ROM, Inchon, South Korea, 2015.
 22. J. KOBAYASHI, S. KAINUMA, Y. S. JEONG, Investigation on Correlation and Acceleration Coefficients of Accelerated Corrosion Tests to Atmospheric Exposure Tests, 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, CD-ROM, Inchon, South Korea, 2015.
 23. T. SAKAMOTO, S. KAINUMA, Fundamental Research on Factors Affecting the Under-Film Corrosion Behavior of Coated Steel Members, 18th International Conference on Chemistry and Chemical Engineering, CD-ROM, Amsterdam, Netherlands, 2016.
 24. 坂本達朗, 鈴木実, 貝沼重信, 屋外暴露した塗装さび鋼板の腐食挙動調査, 材料と環境 2015, CD-ROM, 2015. 5
 25. 小林淳二, 貝沼重信, 大気環境と JIS サイクル D 腐食促進試験における裸普通鋼材の腐食挙動の相関性と腐食促進倍率に関する基礎的研究, 材料と環境 2015, CD-ROM, 2015. 5
 26. Y. S. JEONG, S. KAINUMA, Corrosivity Evaluation for Each Structural Part of Steel Deck Truss Bridge Before and After Dam Construction, The 2015 International Conference on Innovative in Structural Engineering and Mechanics, CD-ROM, Inchon, Korea, 2015. 8
 27. SKAINUMA, Y. S. JEONG, J. KOBAYASHI, Influence of Size and Proximity of Paint Coating Defects on Corrosion Behavior of Carbon Steel Plates, 14th International Conference on Fracture and Damage Mechanics, Key Engineering Materials, Vol. 577- 578, pp. 201-204, Budva, Montenegro, 2015. 9
 28. Y. S. JEONG, S. KAINUMA, Spatial Statistical Simulation for Time-Dependent Corrosion Surfaces of Uncoated Steel Plates under Atmospheric Corrosion Environments, 第 62 回材料と環境討論会, pp. 205-208, 2015. 11
 29. 郭小竜, 貝沼重信, 小林淳二, 篠原正, 大気暴露試験の開始時期が裸鋼板の腐食挙動に及ぼす影響に関する基礎的研究, 第 62 回材料と環境討論会, CD-ROM, 2015. 11
 30. 小林淳二, 貝沼重信, 坂本達朗, 近接した複数の塗膜欠陥を有する普通鋼板の腐食挙動に関する電気化学的検討, 第 62 回材料と環境討論会, pp. 217-220, 2015. 11
 31. 郭小竜, 貝沼重信, 小林淳二, 篠原正, 大気暴露試験の開始時期が裸鋼板の腐食挙動に及ぼす影響に関する基礎的研究, 第 62 回材料と環境討論会, pp. 425-428, 2015. 11
 32. 土橋洋平, 貝沼重信, 石原修二, 鋼部材の地際部における腐食速度評価センサの開発に関する研究, 第 62 回材料と環境討論会, pp. 239-242, 2015. 11
 33. 道野正嗣, 貝沼重信, 板井麻理子, 仲健一, ダム建設前後における鋼上路トラス橋の各構造部位の腐食性評価, 第 62 回材料と環境討論会, pp. 209-212, 2015. 11
 34. 平尾みなみ, 貝沼重信, 道野正嗣, 今村壮宏, 鋼道路橋の各部位に設置した裸鋼板の腐食生成物層の厚さと平均腐食深さの相関評価, 第 62 回材料と環境討論会, pp. 213-216, 2015. 11
 35. 坂本達朗, 貝沼重信, 塩の影響を受けた腐食炭素鋼のさび性状に関する検討, 第 62 回材料と環境討論会, pp. 223-224, 2015. 11
- 〔図書〕 (計 1 件)
共著, (社) 土木学会, 鋼・合成構造標準示方書【維持管理編】 2013.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
貝沼 重信 (KAINUMA SHIGENOBU)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 00262874
 - (2) 研究分担者
三谷 泰浩 (MITANI YASUHIRO)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 20301343
- 押川 渡 (OSHIKAWA WATARU)
琉球大学・工学部機械システム工学科・准教授
研究者番号: 80224228