

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04325

研究課題名(和文) 動的荷重下における劣化部及び断面修復部のかぶりコンクリート剥落危険性の定量評価

研究課題名(英文) Quantitative evaluation of the risk of cover concrete peeling off of deteriorated parts and cross-section repair parts under dynamic load

研究代表者

玉井 宏樹 (Tamai, Hiroki)

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：20509632

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)：本研究では、劣化したコンクリート構造物のかぶりコンクリートや断面修復部の剥落に伴う第三者被害を防ぐことを目的に、実際に劣化した部材を製作し、それに対して載荷実験を実施することで剥落に及ぼす影響因子の把握の他、剥落を推定可能な非破壊検査主力値を明らかとした。具体的には、一様に腐食している場合よりも、位置的に局所腐食が生じている場合に剥落危険性は高まり、さらに、腐食率が20%以上の場合には剥落部の自重のみでいつ剥落してもおかしくない状況に達することを明らかとした。なお、有限要素法によるFEM解析を実施して、それらの剥落のメカニズムをひび割れ進展から明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

かぶりコンクリートや断面修復部の剥落に及ぼす影響因子やその程度を明らかにした成果や、剥落推定のための非破壊検査出力値を明らかにした成果は、今後、剥落の事前察知のために重要な基礎資料になることは間違いなく、学術的にも意義のあるものである。また、この研究の成果をもとに、今後、現場で適用できる剥落危険性評価指標などを考案していくことで、実構造物での剥落などの第三者被害を防ぐことで社会的意義も有する。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to prevent damage to a third party due to the peeling of the cover concrete and the cross-section repair part of the deteriorated concrete structure, we actually manufactured the deteriorated member and conducted a loading experiment on it. In addition to understanding the factors that affect the peeling/falling, we clarified the main non-destructive inspection values that can estimate the peeling/falling. Specifically, the risk of peeling is higher when local corrosion occurs locally than when it is uniformly corroded. Furthermore, it was clarified that when the corrosion rate is 20% or more, it is possible to reach a situation where it is safe to peel off only by the weight of the peeled part. FEM analysis was carried out, and the mechanism of their peeling/falling was clarified from the crack growth.

研究分野：構造工学，維持管理工学，コンクリート構造，衝撃工学

キーワード：かぶりコンクリート 断面修復 剥落 電食 鉄筋腐食 FEM解析

1. 研究開始当初の背景

経年劣化したインフラストックの増加に対して限られた予算内で合理的かつ効率的な維持管理を実現することは我が国の重要課題であり、維持管理に関する研究は多角的に実施されているが、特に劣化した構造物の残存耐荷性能評価は余寿命予測の礎になるため極めて重要である。鉄筋腐食により劣化した RC 部材に関する申請者の過去の研究では、同一腐食程度であっても、静的荷重下に対し動的荷重下では全体破壊で終局に至るよりも先に局部破壊が生じることで耐荷性能低下が著しいことが明らかとなった。その局部破壊の一つがかぶりコンクリートの剥落であるが、かぶりコンクリートの剥落は、過去に JR 山陽新幹線福岡トンネルにおいて発生した走行車両への衝突 (平成 11 年) のように重大な事故に繋がるため、第三者の生命や財産に多大な影響を及ぼしかねないことから、剥落する可能性がある部位を適切に予測して対処する必要がある。そのためには、国土交通省令で義務付けられている近接目視や打音により得られる情報のみで剥落危険箇所を即座に判断することが求められるが、それを実現することは難しい、なぜなら、以下の学問的問いに答えを見つけないといけなためである。①表面ひび割れや変色などの視認できる損傷情報 (表面情報) と内部ひび割れや腐食程度などの視認できない損傷情報 (内部情報) を種々の非破壊検査により関連づけることは可能か? (⇒種々の特徴量の相関性による損傷情報の統一的解釈は?) ②車両通行時に想定される動的荷重下において、かぶりコンクリートの剥落危険性が高まるのは、損傷に関する表面情報と内部情報が如何なるときか? ③視認できる損傷情報を用いてかぶりコンクリートの剥落危険性を評価・推定できるか?

2. 研究の目的

以上を踏まえて、本研究では、鉄筋腐食により劣化した RC 構造物・部材に生じる損傷に関する表面情報 (表面ひび割れ) と内部情報 (内部ひび割れや鉄筋の腐食程度) と動的荷重下のかぶりコンクリート剥落危険性の三者の関連性を定量的に明らかにすることが第一の目的であり、それを踏まえて、視認できる表面情報と打音情報のみでかぶりコンクリートの剥落危険性を推定可能な方法を確立することが第二の目的である。さらに、鉄筋腐食により劣化した構造物・部材に対して一般的に施される断面修復工法の効果についても力学的な解釈に基づいて検討する。

なお、本研究では劣化部材の状態を電気抵抗や打音などの非破壊検査により適切に評価し、軽衝撃を作用させることで動的荷重下の部材の力学特性や局部破壊を明らかにするために、構造工学や材料学の融合の他、電気化学的知識を要するといった学問的な面があり、また、上述の三者の関連性を定量的に明らかにした研究は国内外問わず存在せず、独自性を有している。

3. 研究の方法

上述の目的を達成するため、本研究では、まず、かぶり、鉄筋径や主鉄筋間隔の異なる扁平状 RC 梁を複数製作し、それらに対して、電食法による促進劣化を実施した。電食の制御により、腐食程度や腐食の位置的ばらつきを持たせた劣化供試体を製作し、それらに対して、漸増繰り返し衝撃実験を実施し、それぞれの回数において、目視によるひび割れ調査以外に、打音や表面加速度などの非破壊検査出力値の計測をするとともに、破壊に至る過程やかぶり部の剥落回数を計測した。また、断面修復部を模した供試体を製作した。

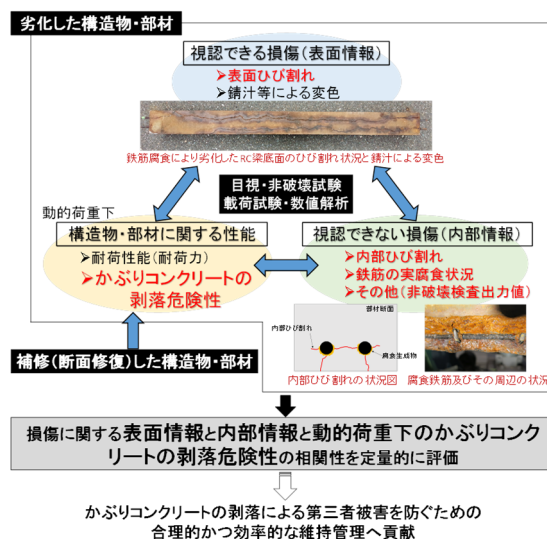


図-1 本研究の全体像

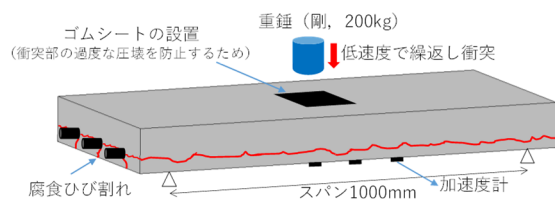


図-2 実験イメージ

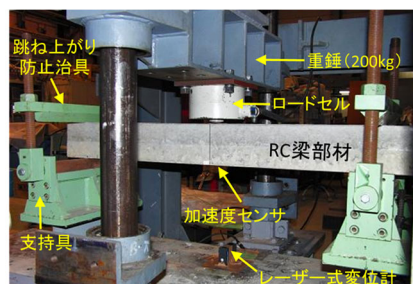


図-3 実験時の写真

次に、解析による検討ということで、3次元有限要素法（FEM）による検討も実施した。このFEM解析では、剥落の直接的表現はせず、ひび割れの進展によって剥落の可能性について定性的に明らかにすることを試みた。また、断面修復部を模したモデルをFEMにより構築する手法やモデル化について検討し、それを用いた動的過渡応答解析により、断面修復部の表面加速度に及ぼす影響因子について把握した。

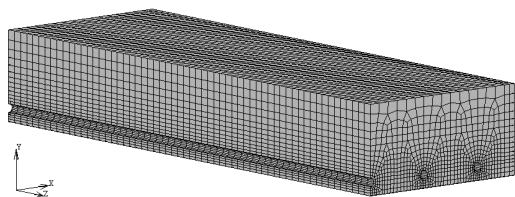


図-4 FEMによる解析モデル

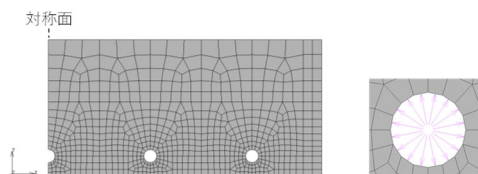


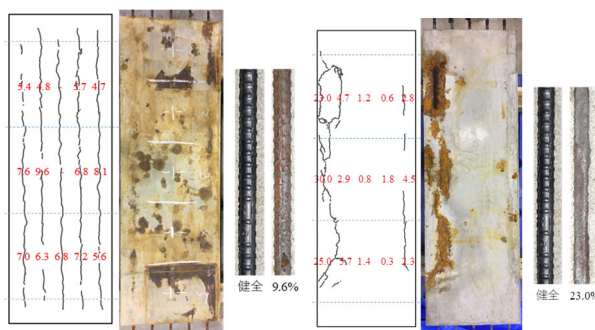
図-5 鉄筋腐食による膨張

4. 研究成果

まず、促進劣化の結果について記す。本研究では、主鉄筋が3本（R3）と5本（R5）の梁供試体に対して、一様に腐食させる場合と局所的に腐食させる場合の大別すると計4ケースの劣化供試体を製作した。鉄筋3本のケースでは各供試体をr1_1~r3_3の9エリアに、鉄筋5本のケースではr1_1~r5_3の15エリアに区分してそれぞれの実腐食率を計測し、それらのばらつきについて調査した。各供試体のエリア別の実腐食率の平均値とばらつきを表-1に、また、図-6には、供試体底面の写真、腐食ひび割れのスケッチ、エリア別実腐食率と代表的な鉄筋の除錆後状況を示す。表-1、図-6より、R3一様の場合標準偏差が1.1で分散が1.2、R5一様の場合標準偏差が1.3で分散が1.8であり、エリア別のばらつきが小さく、一様に腐食できていることがわかる。一方、R3局所の場合、標準偏差が5.8で分散が33.1、R5局所の場合標準偏差が10.1で分散が101.1であり、エリア別のばらつきが大きく、局所的な腐食を実現できていることがわかる。それらは、最大値と最小値を見ても明らかである。また、図-4を見ると、スポンジ設置位置以外でも腐食を呈していることがわかるが、スポンジ設置位置またはその周辺において実腐食率の値が大きいことがわかる。よって、当初の

表-1 エリア別の実腐食率(%)のデータ

	R3 一様	R3 局所	R5 一様	R5 局所
最大値 (エリア)	9.5 (r2_2)	18.0 (r1_2)	9.6 (r2_2)	30.0 (r1_2)
最小値 (エリア)	6.0 (r2_3)	2.9 (r3_2)	4.7 (r5_1)	0.3 (r4_3)
平均値	8.0	9.1	6.6	8.0
標準 偏差	1.1	5.8	1.3	10.1
分散	1.2	33.1	1.8	101.1



(a) R5 一様 (b) R5 局所

図-6 各供試体の劣化状況（代表例）

表-2 剥落に関する実験結果のまとめ

供試体名	剥落の有無	剥落が生じた 衝突回数/衝突速度	剥落が生じた エリア/実腐食率	備考
R3 一様	有り	16回/2.0m/s	r1_2/9.3%	剥落片は小さく、動的加振時の振動よりも、荷重による曲げ破壊に依る。
R3 局所	有り	12回/1.6m/s	r2_2/12.0%	剥落片は大きく、動的加振時の振動に依る。
R5 一様	無し	—	—	終局回数（20回）まで剥落は生じなかった。
R5 局所*	有り	2回/0.6m/s	r1_3/25%	剥落片は非常に大きく、動的加振時の振動に依る。

*電食による促進劣化だけで局所腐食が生じた一部のエリアでは剥落が生じた。

予定通り、一様腐食と局所腐食の2種類の劣化供試体を製作できたと言える。

次に、繰り返し衝撃載荷実験の結果を示す。表-2 に剥落に関する実験結果のまとめを記す。この表には、各供試体の剥落の有無、剥落が生じた衝突回数及び衝突速度、剥落が生じたエリア及びその実腐食率、剥落の要因について整理されている。剥落の有無について、R5 一様の場合を除き、すべての供試体において設定した衝突回数 20 回までに剥落が生じる結果となった。R3 一様の場合には衝突回数 16 回、R3 局所の場合には 12 回、R5 局所の場合には衝突回数 2 回で剥落が生じた。それぞれの供試体の状況を詳細に考察する。R3 一様の場合、衝突回数 16 回目で実腐食率 9.3%であったエリア r1_2 において剥落が生じた。また、図-7 に R3 一様と R3 局所のケースにおける最大加速度の推移を示す。ここで示す最大加速度は、スパン中央に貼付した加速度計により得られた加速度応答の最大値である。この図より、健全と R3 一様で剥落が生じなかった結果を踏まえると、剥落が生じた R3 局所の場合のみ剥落直前に大きな値を示すことが確認できた。また、図中に示すように、R3 局所の場合、衝突回数 10 回までは衝突回数 6 回目のデータを除外するとほぼ一定勾配で推移し、その後、衝突回数 11 回に勾配が一気に変わっていることを考えると、剥落の事前察知のためのモニタリングに加速度応答を利用することは可能であるといえる。続いて、図-8 に R3 一様と R3 局所のケースにおける振幅比の推移を示す。この図より、健全の場合に比較して、剥落が生じた R3 一様と R3 局所では振幅比は相対的に大きな値を示しているものの、衝突回数ごとで振幅比の値はばらつきが大きく、一定の傾向を示すものではないことが確認できた。この理由として、本実験では、予め打撃点を定めて収集した単打音を計測したが、単打音では位置が少しずれるだけでも振幅比は異なる値を示すため、本来であれば、単打音ではなく、連続打音など面的な広がりを網羅したデータ収集を実施すべきであると考えられる。

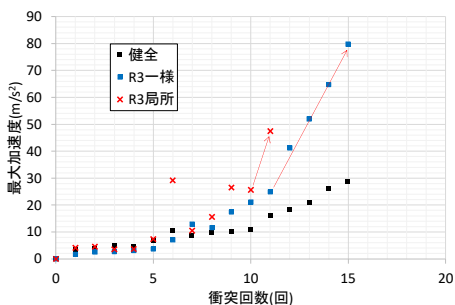


図-7 供試体裏面の最大加速度の推移

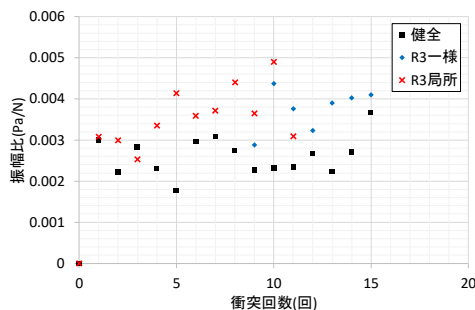
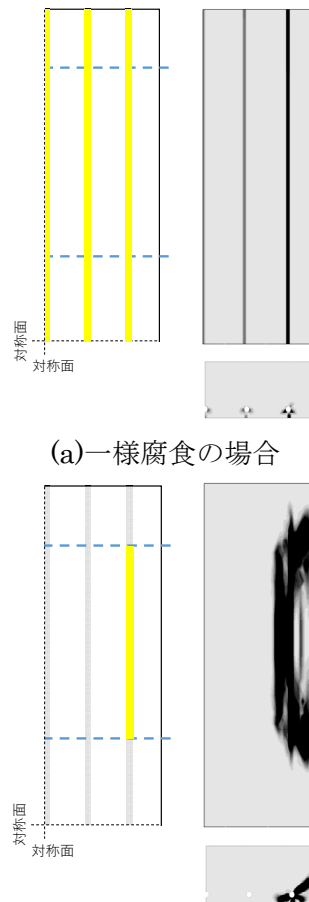


図-8 振幅比の推移

図-9 に解析結果の一例として、ひび割れ分布図を示す。この分布図は仮定したひび割れモデルにおいてひび割れと判定された要素を黒色のコンターで示したものである。なお、図中左側の黄色で塗りつぶされている部位に膨張圧を作用させた。まず、図-9(a)に膨張圧 8.2MPa 作用時の一様腐食の場合のひび割れ分布図を示すが、この図より、一様腐食の場合、実験と同様に、鉄筋に沿った軸方向のひび割れが生じていることがわかる。本解析では、膨張圧を 12MPa まで作用させたが、軸方向ひび割れ幅が大きくなるだけで、ひび割れ分布が大きく変わることはなかった。次に、図-9(b)に膨張圧 9.0MPa 時の局所腐食の場合のひび割れ分布図を示すが、明らかに一様腐食の場合と傾向が異なることがわかる。局所腐食の場合、軸方向にひび割れが生じるとともに、作用位置端部において側面に向かった斜め方向のひび割れが生じることが確認できた。また、図中に膨張圧を作用させた位置の断面図を示すが、剥離ひび割れが生じていることもわかる。これらのひび割れは剥離片を形成するのを容易にすることが考えられる。

以上をまとめると、本研究の成果は下記の通りである。

- 1) 平均腐食率 6~8%で扁平 RC 梁部材全体で一様腐食した場合、動的加振によるかぶりコンクリートの剥離・剥落は生じないことが確認できた。一方、平均腐食率 8~9%、最大腐食率が 20%前後で局所的に腐食した扁平 RC 梁部材では、動的加振によって早期にかぶりコンクリートの剥離・剥落が生じることが確認できた。また、この結果は鉄筋本数に関係ないが、鉄筋本数が多く鉄筋間隔が小さい場合のほうが、剥落までの衝突回数が少なかった。つまり、剥落危険性が高いと言える。
- 2) 腐食率 20%を超えるエリアでは、鉄筋腐食のみで剥離・剥落が生じることが確認できた。
- 3) 腐食後のかぶりコンクリートの剥落を事前に察知して、剥



(a)一様腐食の場合

(b)局所腐食の場合

図-9 ひび割れ分布図

落危険性を推定するためには、変位応答や打音法による出力値よりも加速度応答の計測が適していると言える。ただし、実構造への適用を考える上では、広範囲の加速度計測の方法やモニタリングの方法について別途検討が必要である。

4) FEM 解析の結果、部材全体に渡って鉄筋が一樣に腐食膨張する場合は、軸方向ひび割れが生じるのみであったが、局所的に腐食膨張する場合は、軸方向ひび割れとともに、作用位置端部において斜め方向のひび割れが生じることで剥離片を形成しやすくなることが確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tamai Hiroki, Sonoda Yoshimi, Bolander John E.	4. 巻 263
2. 論文標題 Impact resistance of RC beams with reinforcement corrosion: Experimental observations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 120638 ~ 120638
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conbuildmat.2020.120638	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 該当する

1. 著者名 玉井 宏樹、畠中 玲、園田 佳巨、櫛原 弘貴	4. 巻 第36号
2. 論文標題 局所的に生じた鉄筋腐食が扁平 RC 梁のかぶりの剥離・剥落に及ぼす影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木構造・材料論文集	6. 最初と最後の頁 53 ~ 63
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 -

1. 著者名 Hiroki Tamai, Yoshimi Sonoda	4. 巻 1
2. 論文標題 A Study on Impact Resistance Performance of RC Member Deteriorated by Reinforcement Corrosion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Modern Developments in Performance of Structures under Extreme Loading ~Proceedings of PROTECT 2019~	6. 最初と最後の頁 352-363
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 -

1. 著者名 曾健恒, 玉井宏樹, 園田佳巨, 小尾 博俊	4. 巻 41
2. 論文標題 NUMERICAL STUDY ON FAILURE BEHAVIOR OF RC BEAM RETROFITTED BY CFC PANEL UNDER IMPACT LOAD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 703-708
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 -

1. 著者名 曾健恒, 園田佳巨, 玉井宏樹	4. 巻 1
2. 論文標題 CFパネル補強したRC 梁の耐衝撃性能に関する数値研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第12回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 1-6
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 -

1. 著者名 Hiroki Tamai, Chi Lu, Yoshimi Sonoda	4. 巻 216379
2. 論文標題 An experiment study on the impact resistance of RC members with reinforcement corrosion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 1, 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5176/2301-394X_ACE18.128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 梶原淳史、玉井宏樹、園田佳巨
2. 発表標題 有限要素法による鉄筋腐食を有するRC梁のモデル化とそれによる静的耐荷性能評価
3. 学会等名 令和2年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古賀智史、園田佳巨、玉井宏樹、原紘一郎
2. 発表標題 動的加振下の断面修復部の剥落危険性に及ぼす相対湿度と付着特性の影響
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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 畠中 玲, 園田 佳巨, 玉井 宏樹, 樋原 弘貴
2. 発表標題 鉄筋腐食起因のひび割れによるRC 構造物のかぶり剥落に関する基礎的研究
3. 学会等名 第7回九州橋梁・構造工学研究会シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 畠中 玲, 玉井 宏樹, 園田 佳巨
2. 発表標題 鉄筋腐食により劣化した部材のかぶりコンクリート剥落に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原 紘一朗, 玉井 宏樹, 園田 佳巨
2. 発表標題 動的荷重作用下における断面修復部の剥落危険性に関する解析的検討
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 畠中 玲, 玉井 宏樹, 園田 佳巨, 樋原 弘貴
2. 発表標題 鉄筋を腐食させたRC床版の動的荷重下におけるかぶりの剥落の基礎的研究
3. 学会等名 土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古賀 智史, 原 紘一朗, 玉井 宏樹, 園田 佳巨
2. 発表標題 相対湿度と付着特性を考慮した断面修復部のモデル化とその剥落危険性に関する一考察
3. 学会等名 土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Tamai, Yoshimi Sonoda
2. 発表標題 A Study on Impact Resistance Performance of RC Member Deteriorated by Reinforcement Corrosion
3. 学会等名 7th International Colloquium on Performance, Protection & Strengthening of Structures Under Extreme Loading & Events (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 楊尚橙
2. 発表標題 塩害劣化の進展状況の違いが四点電極法による比抵抗に与える影響に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会西部支部研究発表会
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
研究 分担 者	樺原 弘貴 (Hazehara Hirotaka) (70580182)	福岡大学・工学部・准教授 (37111)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	宗本 理 (Munemoto Satoru) (70737709)	愛知工業大学・工学部・准教授 (33903)	

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