

令和 3 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01510

研究課題名（和文）鉄筋腐食によるコンクリート片の剥落危険度判定法の作成

研究課題名（英文）Establishment of judgement method of spalling risk of concrete cover due to rebar corrosion

研究代表者

中村 光（NAKAMURA, HIKARU）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：60242616

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,700,000円

研究成果の概要（和文）：コンクリート片剥落の危険度判定のために、剥落に関する内部ひび割れの特定と内部ひび割れ部から剥離に至る場合の影響作用や剥離強度について検討した。その結果、内部ひび割れを特定するための非破壊検査法として電磁波レーダー波形を利用した評価方法を開発した。剥落に至る影響作用については、コンクリートの温度の変化の影響は大きく、荷重作用で剥落する時と同程度の内部ひび割れ幅の変化を与えていることを明らかにした。また、剥落強度を評価する実験方法および数値解析手法を開発し、剥落強度は残存かぶりの影響が最も大きい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

コンクリート構造物の維持管理で、コンクリート片の剥落は人命などを失うような事故につながる可能性もあり、最も避けなければいけない事象である。そのため、コンクリート構造物の点検では、打音検査による剥落に関する内部欠陥の把握とその危険性の評価に多くの労力がさかされている。本研究で内部欠陥を客観的手法により特定する手法の開発や、コンクリート剥落リスクを高める要因が温度変化や残存かぶりの大きさであることを明らかにしたことは、現在の点検の合理性・客観性・有効性を高めることに寄与するとともに、コンクリート構造物から生じる第三者影響度を低減し、インフラの信頼性を高めることに寄与する。

研究成果の概要（英文）：In order to determine the risk level of spalling of concrete pieces, the detection of internal cracks related to spalling, the action and the spalling strength to drive the spalling behavior from internal cracks were investigated. As a result, an evaluation method using electromagnetic radar waveform was developed as a non-destructive inspection method to identify the internal cracks. Regarding the action to drive the spalling, it was found that the effect of temperature change was significant and caused the same level of internal crack width change as that of spalling under load. In addition, the experimental and numerical methods to evaluate the spalling strength were developed, and it was clarified that the remaining cover was the most significant factor to influence the spalling strength.

研究分野：コンクリート構造

キーワード：かぶり剥落 鉄筋腐食 内部ひび割れ 鉄筋かぶり 剥離強度 環境作用 非破壊試験 剛体バネモデル

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の維持管理で最も考えなければならないことは、人命に影響を与える安全性の評価である。安全性は、構造の安全性とコンクリート片の剥落等による第三者影響の2種類があるが、このうち図-1に示すような鉄筋腐食によるコンクリート片の剥落事故の危険性は、膨大な数のすべてのコンクリート構造物が含有し、実際に毎年数多くの剥落事故の報告が行われている。

定期点検で近接目視や打音点検が行われているにもかかわらず、コンクリート片の剥落が多く生じているのは、①通常の点検だけでは判断できない剥落の危険性を有する事象があること、②剥落の危険性の判断基準や将来にわたる危険性の評価法が不明確であること、を意味する。従来の判定は、打音点検時での音の変化により浮き・剥離の存在を点検者の経験により判断したものであった。コンクリート片剥落の危険性をいち早くとらえ、剥落事故を未然に防ぐためには、点検者の経験に頼る方法ではなく、点検結果から得られる明確な物理的指標（ひび割れ幅、音響解析による周波数分布、電磁波データによる内部探査結果など）や、どのような作用により最終的に剥落に至るかという要因を明らかにして、コンクリート片剥落の危険性を評価できる手法を構築することが学術的課題として求められている。また、橋梁の定期点検ではすべての箇所近接目視が求められているが、点検の負担は大きくその合理化の必要性も求められている。



図-1 剥落事例

2. 研究の目的

鉄筋腐食によりひび割れが入った各種条件下のコンクリート片剥落の危険性を剥離強度により力学的に明確にするとともに、目視点検ならびに非破壊検査により得られる結果に基づきコンクリート片剥落の危険度判定を行うための知見を得ることを目的とする。

本研究では、鉄筋腐食によるコンクリート片剥落の危険度を、ある大きさのコンクリート片が剥落する可能性を剥落ハザードとして、剥落する可能性を高める要因を剥落リスクとして位置づけた。剥落ハザードを評価するために、剥落に関係する内部ひび割れを非破壊検査結果を用いて客観的に評価可能な手法の開発を行う。一方、剥落リスクを評価するために、内部ひび割れ上面のかぶり剥離する場合の剥離強度の明確化と、内部ひび割れ部から剥離に至る場合の影響作用として荷重作用以外に環境作用を取り上げ、内部ひび割れ幅変化に与える影響評価を行う。

3. 研究の方法

剥落ハザードを評価するための研究として、内部ひび割れの正確な範囲を客観的に評価するために各種非破壊検査法の適用性を検討する。非破壊検査法として打音法と電磁波レーダー法を取り上げ、適用性ととも内部ひび割れ範囲評価法の検討を行う。

剥落リスクを評価するための研究として、剥離強度を評価するための実験方法および数値解析手法を開発し、剥離強度に影響する物理的要因を明らかにする。また、内部ひび割れ部から剥離に至る場合の影響作用として環境作用のうちの温度変化を取り上げ、温度変化が内部ひび割れに与える影響を評価する実験方法の開発と実験結果に基づく剥落リスクへの影響を評価する。

4. 研究成果

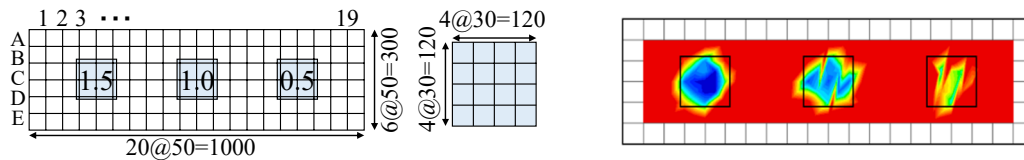
(1) 非破壊検査法による内部ひび割れ範囲評価法の構築

①打音法による内部ひび割れ範囲評価法

打音法による内部ひび割れ範囲評価の1次スクリーニング技術として、打撃による音をマイクروفオンで取得し、そのスペクトル分布を用いて客観的に欠陥部を評価する方法を開発した。打音実験結果の検討から、内部ひび割れが存在する欠陥部のスペクトル分布は、多くの要因に影響を受けることから、欠陥部の見逃しを可能な限り低減させるためには、欠陥部を直接評価するのではなく健全部を評価する方が適当との結論を得た。そこで、健全部の特徴的な打音特性から健全部判定を行い、健全部ではない領域を欠陥がある可能性がある領域として判別する評価手法を構築した。その評価手法の手順は以下の通りである。

- 点検前に健全部と思われる複数箇所打撃データを取得する。
- 取得した健全部の打撃データから健全部評価指標のヒストグラムを作成する。
- 健全部判定の閾値を決定する。
- 打音検査を対象部材に対して行い、健全部判定指標の閾値以上を健全部と判定し、それ以外を欠陥を有する可能性のある領域と判定する。

提案した手法を、鉄筋かぶり30mmの位置に広さ120×120mm、幅1.5、1.0、0.5mmの欠陥を有する供試体を作成し、提案法の確認を行った例を図-2に示す。図-2は実験を行った内部欠陥を有する供試体と構築した評価法による欠陥部探知結果であり、客観的手法で見落としが少ない内部欠陥位置評価法を構築できたことが分かる。



(a) 内部欠陥部を有する供試体 (b) 欠陥部評価結果
 図-2 打音法による健全部判定法による欠陥部評価例

②電磁波レーダーによる内部ひび割れ範囲評価法

電磁波レーダーは、鉄筋探査や空洞探査手法として一般的に用いられ、使用方法も簡便で汎用性の高い手法である。電磁波反射波形を探査方向に連続して受信することで、走査方向の内部情報を容易に画像として可視化することができるが、点検技術者が欠陥を可視化画像から判断することは、視認性と確認を行う個人の裁量に判断基準が依存するため、欠陥位置を特定する定量的な評価手法の確立が課題となっていた。

本研究では、電磁波反射波形データにディープラーニングの一種である自己組織化マップを適用し、内部ひび割れ領域を客観的に可視化して評価可能な方法を構築した。自己組織化マップを用いる場合、どのようなデータを用いるかが重要となる。そこで検討の結果、入力データとして、埋設物がない健全なコンクリート部の電磁波反射波形データと測定対象位置の電磁波反射波形データの関係性を評価する指標を用いる方法を提案した。

図-3は、構築した方法の一例として、かぶり60mmで鉄筋を一本設置した供試体の電食試験を行い、鉄筋腐食による内部ひび割れ位置を評価した結果である。図は、左から腐食前の供試体の電磁波データによる評価結果、鉄筋腐食率6.3%と11.1%時の電磁波データによる評価結果、実験終了後断面を切断して確認した内部ひび割れの平面分布をひび割れ幅分布として示したものである。これらの結果から、本研究で構築した手法を用いれば、0.1~0.4mm程度の内部ひび割れを検出可能であることを確認した。

電磁波レーダーは、鉄筋の平面位置に加え深さ位置も分かるため、内部ひび割れの平面と深さ情報を併せることで、どの程度の大きさのコンクリート片が剥落するかを予想することができ、剥落ハザードを評価するのに適切な手法と考えられる。

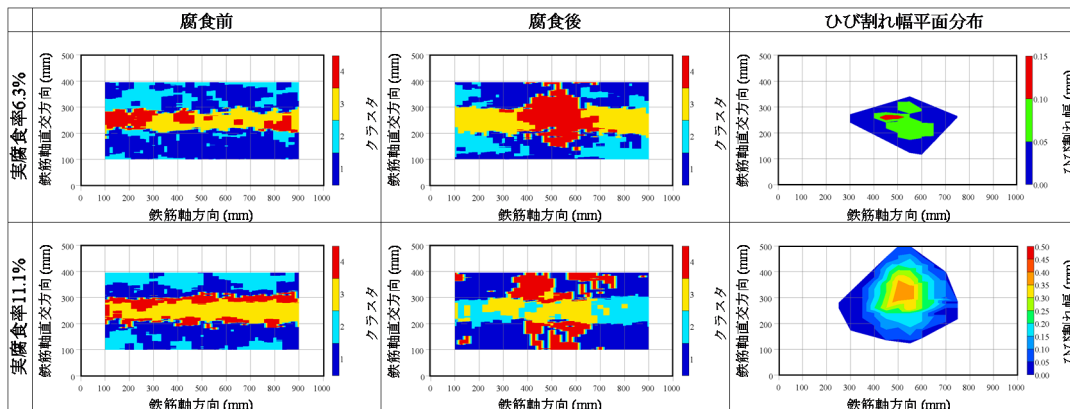


図-3 電磁波レーダー波形に自己組織化マップを適用する提案手法の適用結果例

(2) 内部ひび割れ上面かぶりの剥離強度評価法の構築

鉄筋腐食により内部ひび割れが発生した場合の剥離リスクに関係するかぶり部の剥離強度を評価するための実験方法の構築ならびに数値解析手法の開発をし、剥離時の局所挙動や剥離強度に影響を及ぼす各種要因について検討した。

図-4が構築した実験装置の概要であり、図-5が開発した数値解析手法の概要である。実験装置は、内部ひび割れ上部の供試体表面に鉛直力を載荷できるものである。剥離過程での荷重変位関係や内部ひび割れの幅を計測することで、剥離過程の力学挙動を明確にできる。さらに、剥離が生じる部分の詳細な挙動については、画像相関法で内部ひび割れ周辺のひずみ分布の測定も行った。また、供試体については、電食試験で腐食ひび割れを発生させるとともに、段ボールの波形部を利用した模擬ひび割れを設置する方法も考案した。これにより、場所・方向・形状・幅を制御した内部ひび割れを導入可能になり、内部ひび割れの影響を体系的に検討可能にした。

一方、数値解析手法は、研究代表者のグループが開発を進めている剛体バネモデルを用い、鉄筋腐食ひび割れ進展解析後に荷重載荷可能な方法や、任意の模擬内部ひび割れをモデル化できるように拡張した。

図-6はかぶり30mmで鉄筋を配置し、鉄筋腐食させて内部ひび割れを発生した供試体(C30-Cor1、C30-Cor2、C30-Cor3)と、かぶり30mmの位置に水平方向の模擬ひび割れを設置した供試体の荷重と載荷位置の変位関係である。本実験方法により明確に剥離強度が捉えられるとともに、体系的検討が可能な模擬ひび割れでも腐食ひび割れと同様の剥離挙動を再現できることが

示された。図-7は、剥離強度前、剥離強度時、剥離強度後のひび割れ進展とひずみ分布挙動を画像相関法で供試体側面から計測したものである。コンクリート片剥離時の局所挙動を確認することが本実験で可能になったことが分かる。この供試体作成方法と実験方法を用い、各種内部ひび割れの条件での剥離挙動を実験的に検討した。

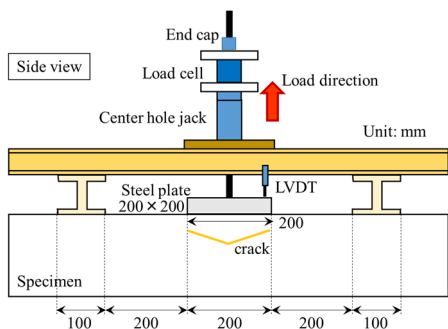


図-4 剥離強度試験装置の概要

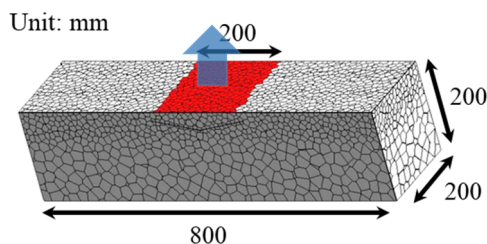


図-5 剛体バネモデルによる剥離強度解析モデル

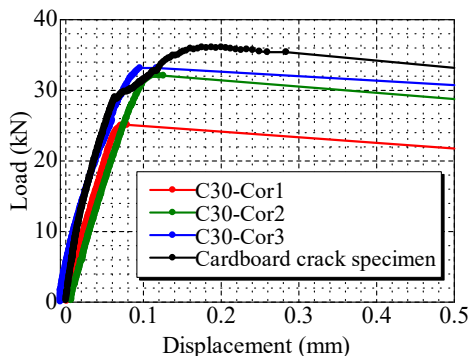


図-6 荷重-変位関係 (実験)

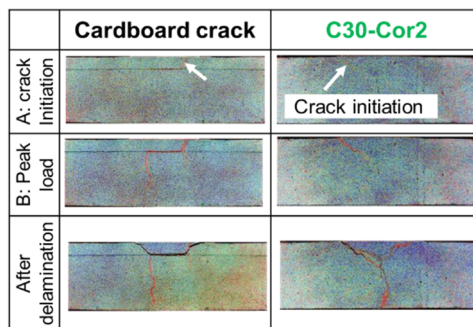


図-7 かぶり部のひび割れとひずみ分布

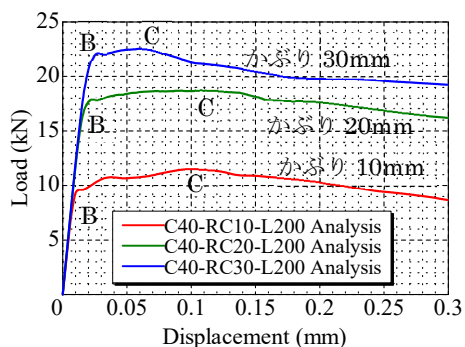


図-8 荷重-変位関係 (解析)

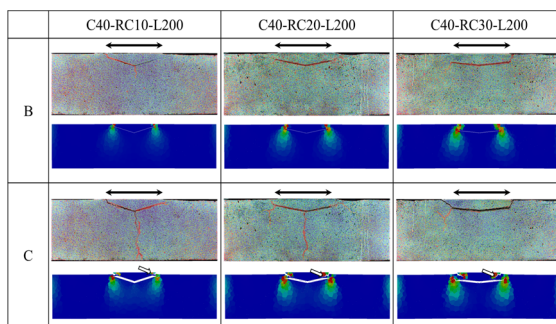


図-9 実験のひずみ分布と解析の応力分布

一方、解析的検討では、開発した手法を用いて、内部ひび割れの深さ、内部ひび割れの長さ、内部ひび割れ端部の残るかぶり、内部ひび割れの角度を変化させ、実験結果を包含しながらより多くの内部ひび割れパターンに対する解析を行った。これらの解析結果から、剥離強度に最も影響を及ぼす要因は、残るかぶりであることを明らかにした。図-8は、斜め方向に内部ひび割れが進展した場合を想定して、長さ200mmの模擬ひび割れの中心をかぶり40mmの位置として、模擬ひび割れの端部の位置(残るかぶり)を10mm、20mm、30mmと変化させた解析モデルを用い、残るかぶりの影響を検討した結果を示したものである。残るかぶりに従って剥離挙動が変化し、残るかぶりが小さいと剥離強度が著しく小さくなることが分かった。また、剥離強度時の変位量は、0.1mm程度以下である。このことは、剥離直前にコンクリート表面はほとんど変動せず、剥離の予兆を目視で把握することはほぼ不可能であることを意味する。そのため、打音点検以外に内部ひび割れの範囲や深さを正確に把握できる非破壊検査手法の活用が重要であることも示唆する結果と言える。図-9は、荷重変位関係の荷重の急変点(B点)と最大荷重点(C点)の解析より得られた応力分布を示している。また本供試体は実験も行っているので同時点での画像相関法で得られたひずみ分布も示した。荷重急変点(B点)でひび割れ端に応力集中によるひび割れが生じ、その部分にさらに応力が集中していくことで剥離荷重に至ることが分かった。これらの解析結果より、残るかぶりの剥離強度の影響や残るかぶりが剥離強度に最も大きな影響を及ぼすメカニズムが明確になった。

(3) 温度変化が内部ひび割れに与える影響評価

荷重載荷時の剥離強度は、残存かぶりに密接に関係することを実験・数値解析から明らかにしたが、実構造物はかぶり部に直接荷重は作用しない。そこで荷重作用以外で、常時構造物に作用する環境作用がコンクリート片剥離に与える影響を実験的に検討した。環境作用としては、その変動が比較的大きいと考えられる温度変化を対象とした。

図-10 は対象とした供試体であり、図-8 に示した C40-RC10-L200 供試体と同一の諸元である。図-11 は温度変化を与える試験方法を示す。温度変化試験は、供試体上面にプールを設置し、そこに温水・冷水の給水・排水を30分毎に繰り返して供試体上面に繰り返し温度変化を与えた。ここでは、温度変化が供試体表面で最大で約40℃、最小で約20℃の結果を示すが、同様の試験方法で、不凍液を使って氷点下の表面温度を与えることも可能にしている。なお、ひび割れ位置の温度変化量は約5℃であった。温度変化実験中は、図-10 に示す位置でひび割れ幅変化を調べた。また、同一の諸元を持つ供試体を同時に作成し、荷重載荷を行い荷重載荷時のひび割れ幅変化を調べた。

図-12 は、荷重変位関係とともに荷重載荷時のひび割れ幅変化を示しているが、剥離荷重時のひび割れ幅変化は0.015mm~0.035mmであり、非常に小さいことが分かる。図-13 に温度変化作用時のひび割れ幅変化を示す。温度変化を30分1サイクルで繰り返しているので、1サイクル内のひび割れ幅変化が縦軸、サイクル数に時間に関する時間を横軸に示している。表面で20℃程度、内部ひび割れ部で5℃程度の温度変化を受けると、内部ひび割れ幅は0.02mm~0.03mmの変動をしていることが明らかになった。このひび割れ幅変化量は、図-12 に示した荷重載荷による剥離強度時のひび割れ幅変化とほぼ同様である。このことから、コンクリート構造物内の内部ひび割れは、温度変化により常時剥離強度に対応する程度のひび割れ幅変化をしており、環境作用が最終的な剥離挙動に大きく関係していると考えられる結果を得ることができた。

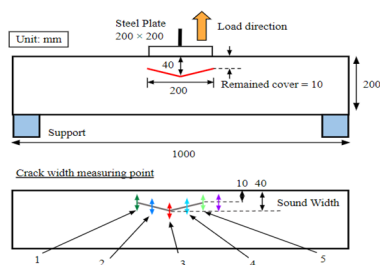


図-10 供試体と試験方法

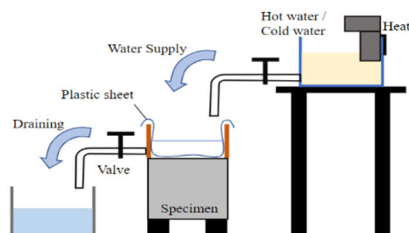


図-11 温度変化試験方法

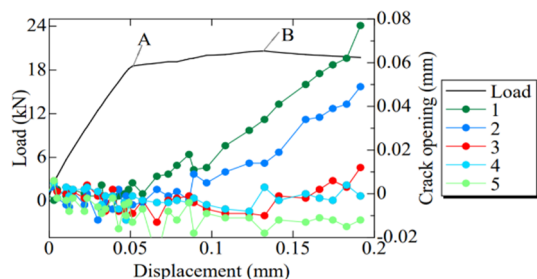


図-12 荷重載荷時の内部ひび割れ幅の変化

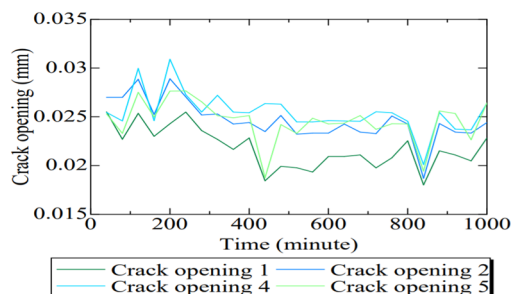


図-13 温度変化時の内部ひび割れ幅の変化

(4) まとめ

コンクリート片剥落の危険度判定のために、剥落ハザードと剥落リスクに関する事項として、内部ひび割れの特定と内部ひび割れ部から剥離に至る場合の剥離強度や影響作用について実験ならびに数値解析により検討した。その結果、①剥離強度には内部ひび割れ端の残存かぶりが最も影響する、②剥離強度時の変形は非常に小さく目視点検では剥落の予兆を発見困難であり非破壊検査の活用が望ましい、③コンクリート片の剥落範囲を特定するには電磁波レーダー波形を用いた開発手法が有効である、④日常の温度変化で内部ひび割れは剥離強度時と同程度のひび割れ幅変化が生じている、などの新たな知見を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 多田 祐希、三浦 泰人、中村 光	4. 巻 76
2. 論文標題 自己組織化マップを用いた電磁波レーダによる内部ひび割れ領域ならびに鉄筋腐食領域の検出に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造）	6. 最初と最後の頁 158～170
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejmcs.76.3_158	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 -
1. 著者名 木山直道、中村光、Zahra Amalia、三浦泰人	4. 巻 41
2. 論文標題 鉄筋腐食の軸方向分布と表面ひび割れ幅関係の解析的検討	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 953～958
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 木山直道、中村光、三浦泰人、山本佳士	4. 巻 28
2. 論文標題 軸方向腐食分布およびかぶりの違いが腐食ひび割れ挙動に及ぼす影響評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 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論文集	6. 最初と最後の頁 145～150
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 大島直樹、中村光、三浦泰人、山本佳士	4. 巻 28
2. 論文標題 鉄筋腐食によるコンクリート片の剥離強度評価解析手法の構築	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 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論文集	6. 最初と最後の頁 151～156
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yang Yizhou, Nakamura Hikaru, Miura Taito, Yamamoto Yoshihito	4. 巻 20
2. 論文標題 Effect of corrosion induced crack and corroded rebar shape on bond behavior	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Structural Concrete	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/suco.201800313	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 三浦泰人、新田益大、和田秀樹、中村光	4. 巻 65A
2. 論文標題 打音機構を搭載した飛行ロボットによる橋梁点検の適用性評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 607~614
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.65A.607	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 -

1. 著者名 Amalia Zahra, Qiao Di, Nakamura Hikaru, Miura Taito, Yamamoto Yoshihito	4. 巻 190
2. 論文標題 Development of simulation method of concrete cracking behavior and corrosion products movement due to rebar corrosion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 560~572
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.100	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 鈴木理絵、多田祐希、中村光、三浦泰人	4. 巻 40
2. 論文標題 弾性波法による健全部判定に基づくコンクリートおよび断面修復部内部の欠陥検出	5. 発行年 2018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 1617~1622
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 多田祐希、中村光、三浦泰人	4. 巻 40
2. 論文標題 自己組織化マップを用いた電磁波伝搬特性での内部ひび割れの検出に関する研究	5. 発行年 2018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 1671 ~ 1676
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 LINGYU SU、Hikaru Nakamura、Naoki Oshima、Taito Miura
2. 発表標題 Effect of external load and temperature change on delamination behavior and internal crack development
3. 学会等名 JSCE annual conference
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hikaru Nakamura
2. 発表標題 Simulation of degradation of bond stress and slip relationship with corrosion induced crack
3. 学会等名 16th fib Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hikaru Nakamaura
2. 発表標題 Evaluation of corrosion area of rebar and corrosion-induced crack by using electro-magnetic wave radar
3. 学会等名 19th ASEP International Convention (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hikaru Nakamura
2. 発表標題 Crack propagation due to rebar corrosion and nondestructive test to detect the crack
3. 学会等名 Concrete and Steel Technology, Engineering and Design (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hikaru Nakamura
2. 発表標題 Development of simulation method for crack propagation and corrosion product movement due to rebar corrosion
3. 学会等名 6th European Conference on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoki Oshima
2. 発表標題 Numerical Study on the Concrete cover spalling strength and spalling Area due to rebar corrosion
3. 学会等名 8th International Conference of Asian Concrete Federation (国際学会)
4. 発表年 2018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	三浦 泰人 (MIURA TAITO) (10718688)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	

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	山本 佳士 (YAMAMOTO YOSHIHITO) (70532802)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	

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