

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04033

研究課題名(和文)鉄筋腐食によるコンクリートの内部ひび割れと表面ひび割れの関係評価

研究課題名(英文)Evaluation of relationship between internal crack propagation and surface crack width induced by 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) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート中の鉄筋腐食による内部ひび割れと表面ひび割れの進展挙動を実験ならびに数値解析により明らかにした。実験では、鉄筋径、鉛直かぶり、水平かぶり、腐食長さ、腐食速度などの要因による表面ひび割れ幅と内部ひび割れ挙動を明らかにした。一方、数値解析では、実験挙動を精度よく再現できる剛体バネモデルに基づく手法により、各種要因の数値解析実験を行い、解析結果から内部の水平ひび割れ長さや表面ひび割れ幅と腐食量の関係を評価できる式を作成した。さらに、腐食速度やコンクリート片の落下の危険性を評価する解析手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：The propagation behaviors of internal cracks and surface cracks due to rebar corrosion were clarified by experimental and numerical analysis method. In experiments, the surface crack width and internal crack behavior were clarified for the factors such as rebar diameter, vertical and horizontal cover length, corrosion length, corrosion rate and others. On the other hand, in numerical analysis, numerical analysis for many parameters were performed by the Rigid Body Spring Method that can reproduce the experimental behavior accurately. Based on the analytical results, the equation to evaluate internal crack length and the relationship between the surface crack width and corrosion amount were proposed. Moreover, advanced analytical method to evaluate the effect of corrosion rate and/or the risk of concrete spalling were developed.

研究分野：コンクリート構造

キーワード：鉄筋腐食 腐食長さ 腐食速度 表面ひび割れ幅 内部水平ひび割れ長さ 剛体バネモデル かぶり剥落

### 1. 研究開始当初の背景

トンネルや橋梁などからのコンクリート片の落下事例は、毎年、多数報告されている。幸いにして、コンクリート片が直撃して人命を失うような事故は現在まで起きていないが、今後は更なる中性化の進行や、スパイクタイヤ規制後の凍結防止剤の散布量の増加による潜在的内部浸透塩分量の増加などで、かぶりがある程度確保されている場合でも鉄筋の腐食が発生し、コンクリート片落下による第三者影響の危険性は大きくなっていくと考えられる。

コンクリート片の落下の原因となる鉄筋腐食による内部ひび割れの研究は、定性的なひび割れパターンの分類はなされているが、その結果は単一鉄筋などの比較的単純な断面や軸方向に様に腐食した場合を対象としたものが殆どであり、その検討も実験室での電食試験結果に多くは基づいている[1]。それに対して、実構造部では鉄筋かぶりやあき等の構造諸元、部分的な腐食長さ、長期にわたる腐食進展など、実験室内の実験ではあまり考慮されていない様々な要因が影響する。

そのため、コンクリート片落下につながる内部ひび割れ進展の研究を加速させ、様々な要因の影響を明確にした上で、その成果を実務レベルで役立つよう定量的かつ体系的に整理することが望まれている。特に点検では、ひび割れ幅が記録されているにもかかわらず、従来ひび割れ幅が部材の性能を評価する指標として扱われて来なかったため、適切かつ効率的な維持管理を実施するために、ひび割れ幅のコンクリート片落下の可能性への利用などの必要性が高まっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、様々な要因を考慮して鉄筋腐食による内部ひび割れと表面ひび割れの進展挙動を実験ならびに数値解析により明らかにする。数値解析に関しては、実験室内の実験結果の再現だけではなく、実構造における鉄筋腐食によるひび割れ進展やコンクリート片の落下の危険性を評価可能な解析手法の開発も併せて行う。その上で、かぶりなどの構造諸元、配筋詳細、鉄筋の腐食量や腐食領域等の要因に対して、表面ひび割れと内部ひび割れの関係を整理し、内部の水平方向ひび割れ長さの推定や、表面ひび割れ幅から腐食量を推定する方法を検討する。

### 3. 研究の方法

本研究の方法は、実験的研究と数値解析的研究に分けることができる。

実験的研究では、鉄筋配置などの構造諸元、部分腐食などの腐食状況、腐食速度などの実構造と実験供試体の違いを表す腐食速度などをパラメータとした電食実験を行う。電食実験により各種要因が内部ひび割れや表面ひび割れに及ぼす影響を明らかにする。一方、実環境下での挙動を評価するため海水循環

環境下の暴露試験による内部ひび割れ進展挙動を評価する。

数値解析的検討では、研究代表者が開発を進めている剛体バネモデルを用いて、各種要因を考慮した数値解析実験を行い、その結果に基づき、内部の水平ひび割れ長さや表面ひび割れ幅と腐食量の関係評価を行う。さらに、解析手法の高度化により、腐食速度やコンクリート片の落下危険度を評価可能なモデルへ拡張を行う。

### 4. 研究成果

本報告では、本研究課題で行った検討のうち、実験的検討では、部分腐食が生じた場合のひび割れ状況、正確な内部ひび割れ幅分布の測定結果、腐食速度が表面ひび割れ幅や内部ひび割れ進展に及ぼす影響、の成果結果を示す。一方、数値解析的検討では、数値解析結果に基づいた、内部進展長さの推定と、表面ひび割れと腐食量の関係評価結果を示す。

#### (1) 部分腐食による内部ひび割れの進展挙動評価

部分腐食の検討が可能な実験方法を考案し、鉄筋軸方向に部分的に腐食が生じた場合のひび割れ性状を実験的に検討した。供試体は、図1に示す比較的供試体幅が広い諸元を有するものであり、塩水水槽を供試体上部に配置することで、部分腐食の再現を行った。実験では電食試験終了後に供試体を切断し、内部ひび割れの分布・幅、鉄筋腐食量を計測した。

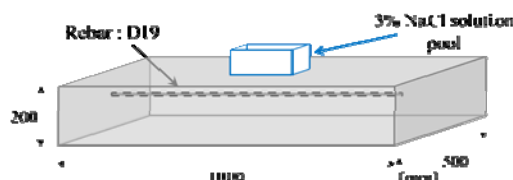


図-1 部分腐食供試体

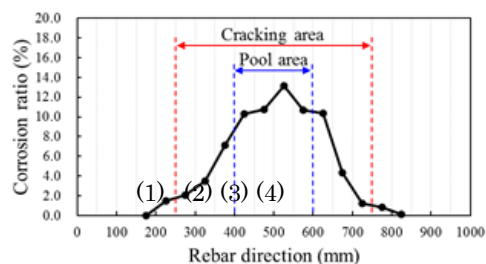


図-2 腐食量分布

かぶり 60mm の供試体の電食試験終了後の腐食量分布を図-2 に示す。対象とした供試体の最大腐食量は約 13% であり、塩水水槽を中心に明確に部分腐食が再現できていることが分かる。

図-3 に供試体の表面ひび割れ状況、図-4 に図-2 中に示す(1)～(4)の位置の断面内のひび割れ状況、図-5 に表面からの内部ひび割れ深さ位置の投影図を示す。

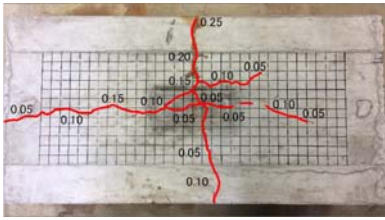


図-3 表面ひび割れ状況

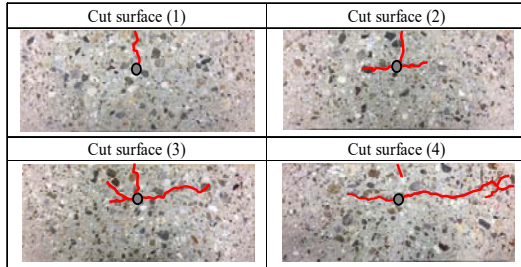


図-4 内部ひび割れ性状

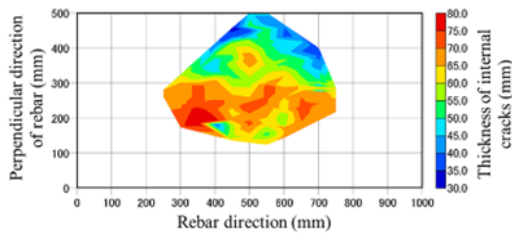


図-5 内部ひび割れ深さ分布

図-3 より、部分腐食が発生した場合は、表面ひび割れは鉄筋軸方向だけでなく、直角方向にも発生することは明らかになった。このことは2方向のひび割れが発生している場合その周辺で部分的に腐食が発生していることを示唆させるものであり、維持管理をする上での有用な知見を得ることができた。

図-4 より、腐食領域外の断面(1)では鉛直ひび割れのみが、腐食領域内の断面(2)(3)では鉛直ひび割れと水平ひび割れが、最大腐食量位置の断面(4)では水平方向ひび割れが支配的なひび割れ性状となり、軸方向に一樣な腐食の場合は腐食位置での内部ひび割れ性状の相違はないが、部分腐食が生じるとひび割れ性状が位置により大きく変化することを明らかにした。また、図-5 よりひび割れ深さは腐食領域から遠ざかるに従って浅くなることを明確にした。このことは、局所腐食位置を中心にして内部ひび割れはお椀状の形状を示すことを意味し、そのお椀部のひび割れが表面近くに達すれば、お椀部がブロックとなってコンクリートが剥落する可能性が高いことを明らかにした。この結果は、鉄筋コンクリート部材では、鉄筋の部分腐食の発生を早期に発見することが、コンクリート片落下の危険性の低減につながるという知見を得ることができた。

## (2) 表面ひび割れ幅と内部ひび割れ幅の関係評価

従来、内部ひび割れ幅の測定は、クラックゲージを用いた目視での計測が殆どであっ

たことから、走査電子顕微鏡 (SEM) を用い、ひび割れ内部への錆の滲出状況を確認するとともに、SEM 画像からひび割れ幅の正確な計測を行った。計測を行った供試体は、150mm × 150mm の断面でかぶり 30mm の位置に D19 鉄筋を配置したものである。腐食は鉄筋軸方向に一樣腐食させ、内部ひび割れへの腐食分布の影響は無くしている。

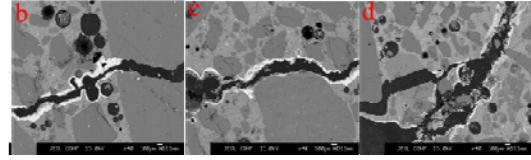


図-6 SEMにより内部ひび割れ画像の一例

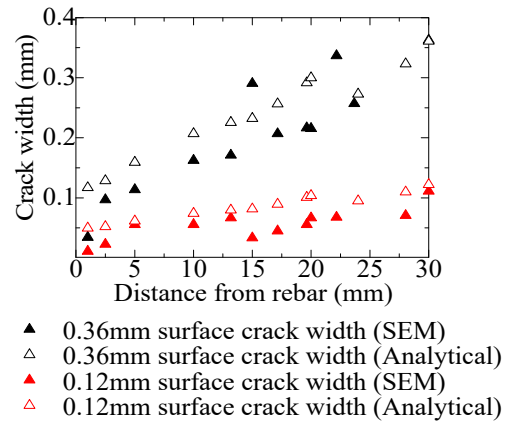


図-7 鉛直ひび割れ幅分布

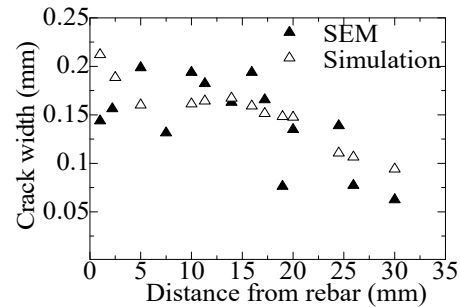


図-8 水平ひび割れ幅分布

図-6にSEMにより測定した内部ひび割れ画像の一例を示す。図-7に表面ひび割れ幅0.12mmと0.36mm時点の鉄筋位置からの鉛直ひび割れ幅分布、図-8に表面ひび割れ幅0.36mm時点の鉄筋位置からの水平ひび割れ幅分布を示す。鉛直ひび割れは、鉄筋位置から徐々に線形的に表面に向かって増加していくが、表面ひび割れ幅が小さい場合は鉄筋近傍と表面での幅の差は小さいが、表面ひび割れ幅が大きい場合でも鉄筋近傍のひび割れ幅の増加は少なく、ひび割れ幅の勾配が主に増加し結果として表面ひび割れ幅が大きくなることが明らかになった。一方、水平ひび割れ幅は鉄筋位置から徐々に減少すること、対象とした供試体では鉄筋近傍では内部ひび割れ幅の方が表面ひび割れ幅より大きく、コンクリート内部では、水平ひび割れにより注意すべきとの結果を得ることができた。



また、図中には本研究で高度化を図った解析手法により得られたひび割れ幅も合わせて示している。解析により内部ひび割れ幅が精度よく評価できることが確認され、本研究で開発した手法を用いれば、表面ひび割れ幅と、コンクリート内部の鉛直・水平方向ひび割れ幅を解析的に評価可能という成果が得られた。

### (3) 腐食速度が表面ひび割れ幅や内部ひび割れ進展に及ぼす影響評価

実験室で行う電食実験は、腐食を加速させるための電流量が多くなるほど生成される錆は液状になり、錆の種類も自然環境下で生成されるものと異なることが知られている。実験室と実構造物で異なる腐食速度の影響の知見を得るために、150mm×150mmの断面でかぶり30mmの位置にD19鉄筋を配置した供試体を用い、腐食電流量を変化させた実験を行った。

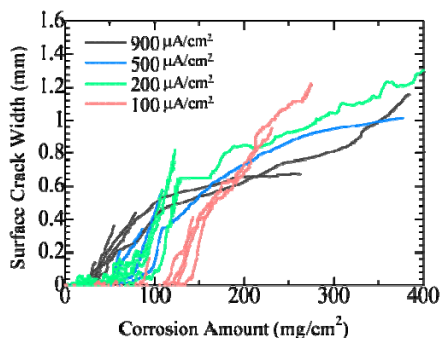


図-9 腐食速度が表面ひび割れ幅に及ぼす影響

図-9に腐食速度を $100 \mu A/cm^2$ から $900 \mu A/cm^2$ に変化させた場合の腐食量と表面ひび割れ幅の関係を示す。腐食速度が小さい場合は、ひび割れ発生時の腐食量が大きくなり、腐食速度がひび割れ発生限界腐食量に影響を与える結果を得ることができた。これは、腐食速度が小さいほど、生成した錆が鉄筋周辺の細孔に浸入することで、膨張力として働きにくくなったためと考えられる。一方、表面ひび割れ発生後は、表面ひび割れ幅0.5mm程度まではひび割れ幅進展の勾配は腐食速度によって変わらず、一度ひび割れが発生すればその後のひび割れ幅増加に腐食速度の影響が小さいという知見を得た。ただし、腐食速度が大きい場合はある程度のひび割れ幅からその進展速度が急激に小さくなるが、腐食速度が小さい場合は、ひび割れ幅は腐食に伴いそのまま拡大していく結果が示された。これは、腐食速度が大きい場合は、錆が液状であるため錆がひび割れ内を移動しやすく膨張力への寄与が小さくなったと考えられる。一方、腐食速度が遅い場合には、固体状の錆が多くなり、錆の移動が少なく生成した錆が膨張力としてひび割れ拡大に寄与したと考えられる。このことは、実構造物では、比較的電流量の大きな実験供試体の結果

を用いると表面ひび割れ幅の進展を過小評価する結果となることから、電食試験の結果を実構造物に適用する際の注意点としての知見を得ることができた。

### (4) 表面ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係評価

申請代表者が開発してきた腐食ひび割れ進展を評価可能な剛体バネモデルの、各種要因への適用性を実験結果と比較した上で数値実験を行い、その結果に基づき、内部の水平ひび割れの長さや、表面ひび割れ幅から腐食量を推定する式を作成した。

解析手法は、鉄筋とコンクリートをボロノイ分割した剛体でモデルし、鉄筋腐食は鉄筋とコンクリート間に腐食層をモデル化し、その腐食層に腐食量に応じた膨張圧を与えるモデルである。数値解析実験は、表面ひび割れ幅の進展が、実験および解析から、鉛直かぶり、水平かぶり、鉄筋径、コンクリート強度、腐食量に影響を受けることを確認したので、これらを要因として行った。

図-10は解析モデルの一例を、図-11はひび割れ進展挙動の解析結果の一例を示したものである。解析手法の特徴は、図-11に示すように、ひび割れ挙動が直接的に明確に表現できることである。

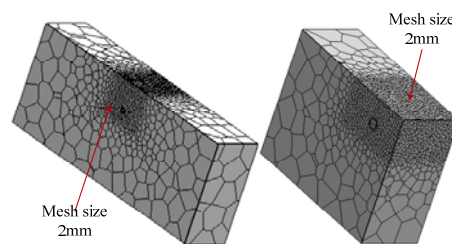


図-10 ボロノイ分割した解析モデルの一例

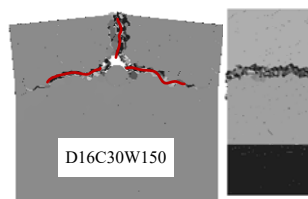


図-11 解析結果の一例（ひび割れ進展）

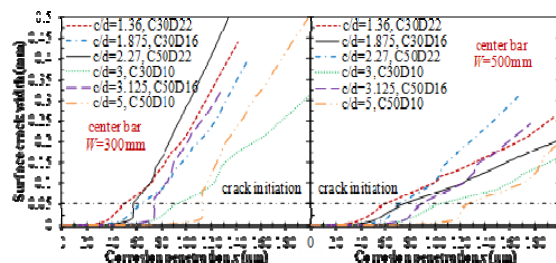


図-12 腐食量と表面ひび割れ幅の解析結果の一例

#### ① 鉄筋全長の一様腐食の場合

鉄筋全長に一様腐食が生じる場合を対象に検討を行った。図-12に数値解析実験より得られた腐食量と表面ひび割れ幅関係の一

例を示す。解析結果は、異なる供試体幅に対し、鉄筋径(D)とかぶり(C)を変化させ、C/Dの影響を考慮したものであり、いずれの要因も表面ひび割れ幅の進展に影響を与えることが分かる。図-9や図-12の結果から、表面ひび割れ幅と腐食量の関係は、表面ひび割れ幅が0.5mm程度までは図-13に示すように、表面ひび割れ発生時の腐食量  $x_0$  とその後のひび割れ幅の増加勾配  $\beta$  でモデル化するのが適当と考え、定式化を行った。なお  $\beta$  は、表面ひび割れ幅0.3mm時で評価した。

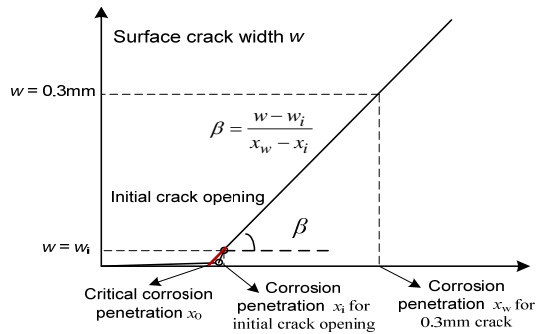


図-13 腐食量と表面ひび割れ幅の関係モデル化の考え方

定式化に当たっては、図-14に示すように、表面変形領域が内部ひび割れ進展長さとも関係する知見を解析結果から得たことから、表面変形領域を重要な指標の一つとして取り上げた。さらに、内部ひび割れ長さとも関係する表面変形領域を指標として取り上げることは、かぶりが剥落するコンクリート片の大きさの情報も間接的に与えることになる。実験および数値解析結果より図-15に示す水平かぶり長と表面変形長さの関係を得た。この結果は、鉄筋片側の水平ひび割れ長さは、水平方向のかぶりに従って増加するが、その長さには上限があり、約175mm程度であることを示している。このことは、複数の鉄筋が同時に腐食する場合は、鉄筋あきが350mm以下では両鉄筋から発展した水平ひび割れが連結することを示唆しており、かぶり剥落の危険性に対する貴重な情報を与えている。

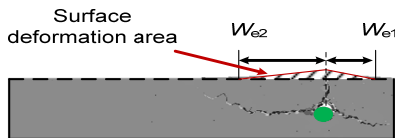


図-14 内部の水平ひび割れ長さと表面変形長さの関係のイメージ

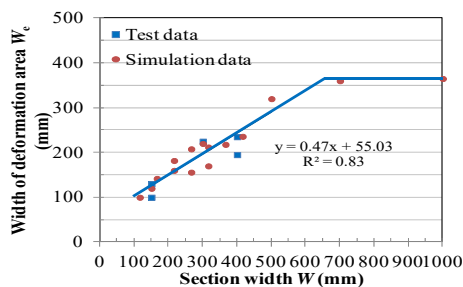


図-15 水平かぶり長と表面変形長さの関係

これらの結果に基づき、定式化した表面ひび割れ幅と腐食量の関係が次式となる。

$$w = \beta(x - x_0) \quad (1)$$

$$x_0 = (18.07c/d + 5.11)(f_t/2.5)^{0.38}$$

$$\beta = 0.024c/W_e$$

$$W_e = 3.46W_1^{0.68} + 3.46W_2^{0.68}$$

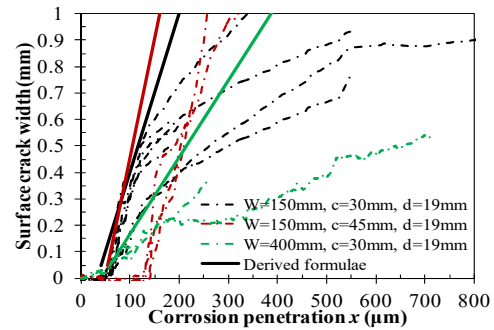


図-16 提案式と実験結果との比較

提案式を本研究で行った実験結果と比較した結果を図-16に示す。提案式は、供試体幅の影響を妥当に評価可能なことが分かる。表面ひび割れ幅から鉄筋量を推定する式は、既に幾つか提案されているが[2]、今回定式化したような内部の水平ひび割れ長さの影響を考慮したものは存在せず、実構造物の多様な諸元を考慮できる新たな知見を含んだ定式化に成功したと言える。

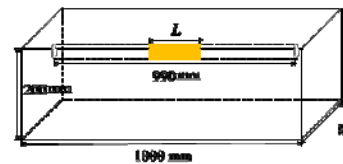


図-17 部分腐食を考慮した解析モデル

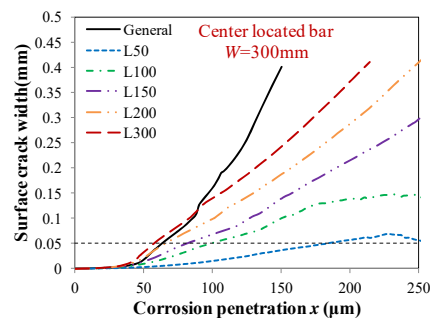


図-18 部分腐食がひび割れ幅に及ぼす影響

## ② 部分腐食が生じた場合

腐食長さはひび割れ進展挙動に大きく影響することから、図-17に示す供試体に対し、鉄筋の腐食長さを変化させた解析を行い、その影響を評価した。図-18に腐食長さを変化させた場合の腐食量と表面ひび割れ幅の関係を示す。解析結果から、表面ひび割れ発生腐食量は、腐食長さに影響を受けないが、表面ひび割れ幅進展は腐食長さの影響を顕著に受けることが明らかになった。この結果に

基づき、腐食長さの影響を考慮する方法を検討し、式(2)に示すように、表面ひび割れ幅進展の勾配 $\beta$ に腐食長さ $L_c$ と何らかの係数 $K_f$ を乗ずることで評価可能になる結果を得た。

$$\beta = k_f L_c (c/W_e) \quad (2)$$

<引用文献>

- ① Tran, K. K. et al., Analysis of Crack Propagation due to Rebar Corrosion Using RBSM, Cement Concrete Composite, Vol. 33, 2011, 906-917.
- ② Vidal, T., Castel, A. and François, R., Analyzing Crack Width to Predict Corrosion in Reinforced Concrete, Cement & Concrete Research, Vol. 34, 2004, 165-174.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

- ① Di Qiao, Hikaru Nakamura, Yoshihito Yamamoto, Taito Miura, Geometric parameters relating corrosion penetration to surface crack width, Annual proceedings of Japan Concrete Institute (査読有), Vol. 38, No. 1, pp. 1143-1148, 2016, [http://data.jci-net.or.jp/data\\_html/38/038-01-1186.html](http://data.jci-net.or.jp/data_html/38/038-01-1186.html)
- ② Di Qiao, Hikaru Nakamura, Yoshihito Yamamoto, Taito Miura, Modeling of corrosion-induced damage in reinforced concrete considering electro-mechanical coupling (査読有), Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 14, pp. 664-678, 2016, <https://doi.org/10.3151/jact.14.664>
- ③ Di Qiao, Hikaru Nakamura, Yoshihito Yamamoto, Taito Miura, Crack patterns of concrete with a single rebar subjected to non-uniform and localized corrosion, Construction and Building Materials (査読有), Volume 116, 30 July 2016, pp. 366-377, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.149>
- ④ Di Qiao, Hikaru Nakamura, Yoshihito Yamamoto, Taito Miura, Experimental and analytical evaluation of concrete cover spalling behavior, Journal of Structural Engineering (査読有), Vol. 61A, pp. 707-714, 2015, <https://doi.org/10.11532/structcivil.61A.707>

[学会発表] (計8件)

- ① 大島直樹, 中村光, 山本佳士, 三浦泰人, 鉄筋腐食によるコンクリート片の剥離強度および剥離領域解析手法の開

発, 土木学会中部支部研究発表会, 2018. 3, 名古屋 (日本)

- ② Hikaru Nakamura, Zhara Amalia, Qiao Di, Development of simulation method for crack propagation and corrosion products movement during rebar corrosion process, Annual conference of Japan Society of Civil Engineers, 2017. 9, Fukuoka (Japan)
- ③ Hikaru Nakamura, Di Qiao, Yoshihito Yamamoto, Taito Miura, Experimental and numerical evaluation of corrosion induced crack of concrete, 5<sup>th</sup> ASEP convention on concrete engineering practice and technology, 2016. 5, Manilla (Philippines)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://concrete-lab.civil.nagoya-u.ac.jp/homepage/j/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 光 (NAKAMURA, Hikaru)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 60242616

### (2) 研究分担者

山本 佳士 (YAMAMOTO, Yoshihito)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 70532802

三浦 泰人 (MIURA, Taito)  
名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 10718688

### (3) 連携研究者 なし

### (4) 研究協力者

DI Qiao (DI Qiao)