

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02210

研究課題名(和文) 微細構造解析とAI画像分析を用いたRC内部の鉄筋腐食分布の推定とリスク評価

研究課題名(英文) Estimation and risk assessment of rebar corrosion distribution inside RC using mesoscale analysis and AI image analysis

研究代表者

長井 宏平 (Nagai, Kohei)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：00451790

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：観測された表面のひび割れ幅から、鉄筋の長さ方向の腐食分布を推定する計算手法を開発した。このアプローチは、モデル予測制御(MPC)によりガイドされて剛体バネモデル(RBSM)を用いた鉄筋コンクリートのメソスケールシミュレーションに基づくものである。異なるひび割れ開口部、複数の局所腐食の発生、およびスターラップの存在による追加の拘束を考慮することが可能である。開発した解析の精度を、コンクリート内の鋼材腐食の実験室試験と比較することで実証した。コンクリート表面で観察されるひび割れ分布は、メソスケールモデル内の内部拡張を最適化することで自動的に再現され、そこから腐食分布が推定される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄筋コンクリート構造物の損傷において最も問題になるのは鉄筋の腐食であるが、損傷後の合理的な対策は容易ではない。その主たる原因はコンクリート表面から鉄筋の腐食状況が確認できないことである。内部の腐食の状況が確認できれば、その腐食程度に応じて耐力等の構造性能を推定することができ、対策の要否や方法を合理的に検討することが可能になる。本研究は、表面ひび割れから内部腐食を逆推定する数値解析プログラムを逆推定するものであり、これを発展させ実構造物に適用できれば、推定した腐食状況に基づく合理的な維持管理に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：We have developed a computational approach for estimating the distribution of corrosion along the length of a reinforcing bar from the observed surface crack widths. The approach is based on mesoscale simulations of reinforced concrete, using rigid-body-spring models (RBSM), guided by Model Predictive Control (MPC). It is extended to account for differing (smaller) crack openings, multiple instances of localized corrosion, and added confinement due to the presence of stirrups. Accuracy of the proposed approach is demonstrated through comparisons with laboratory tests of steel corrosion within concrete. The crack distribution observed on the concrete surface is automatically reproduced by optimized application of internal expansion within the mesoscale model, from which the corrosion distribution is estimated. The estimated corrosion distribution is accurate when compared to the measured corrosion of bars removed from the test specimens.

研究分野：土木工学

キーワード：コンクリート 腐食 微細構造解析 内部推定

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート構造物の損傷において最も問題になるのは鉄筋の腐食であるが、損傷後の合理的な対策は容易ではない。その主たる原因はコンクリート表面から鉄筋の腐食状況が確認できないことである。内部の腐食の状況が確認できれば、その腐食程度に応じて耐力等の構造性能を推定することができ、対策の要否や方法を合理的に検討することが可能になる。しかし実構造物の維持管理においては、コンクリート表面にひび割れが確認された場合、コンクリート表面のひび割れや、腐食生成物析出の跡、水掛りの有無、周辺環境等を考慮しておおよその腐食度を推定したうえで、詳細調査が必要と判断されれば、かぶりコンクリートを除去し、実際の腐食度を確認している。かぶりコンクリートを除去してしまうと、腐食が想定ほどは進行していなかったとしても、補修もしくは原状回復の工事をするしかない。そのため必要な技術は非破壊によるコンクリート内部の鉄筋腐食の推定方法であり研究開発と実用化が進んでいるが、現状の非破壊計測による鉄筋腐食推定は定性的なものに留まっている。また、腐食は鉄筋に沿って一様に発生するのではなく分布しており、構造性能を決定するのは基本的には最も腐食している断面であるので、平均ではなく最大の腐食断面の情報が知りたい。

### 2. 研究の目的

コンクリート内部の鉄筋腐食分布推定には数値解析の活用が有用である。鉄筋コンクリート内部の配筋を実物と同様にモデル化した上で、鉄筋腐食とそれに伴うコンクリートの損傷プロセスを再現することとで、残存構造性能評価が可能になる。そこで本研究では、離散解析手法RBSMを用いた微細構造解析による鉄筋腐食の再現と構造性能評価を可能とすることを目的に、表面ひび割れ情報から内部の鉄筋腐食分布を推定するアルゴリズムを組み込み、基本的な問題にして適用可能性を検討した。推定には、制御工学分野で用いられるモデル予測制御(Model Predictive Control)のアルゴリズムを適用している。

### 3. 研究の方法

これまで開発してきた解析システムは腐食情報を入力値として与え、腐食によりコンクリートに損傷が進むプロセスを追うものであり、鉄筋の詳細な腐食情報が与えられれば内部の変形や応力状態、表面ひび割れが解析結果として得られるものである。しかし必要とされているのは、表面ひび割れ情報からコンクリート内部の鉄筋腐食分布を推定することであり、逆の関係にある。

そこで、ここではRBSMに制御工学分野で用いられるモデル制御予測(Model Predictive Control, MPC)のアルゴリズムを組み込んだ(MPC-RBSM)。MPCは計算の各ステップにターゲットとなるアウトプットを設定し、そのアウトプットが得られるようにインプットを調整していくもので、自動車の自動運転技術などでは基本的なアルゴリズムである。ここではアウトプットは表面ひび割れで、インプットが鉄筋腐食である。つまり鉄筋の腐食量を解析のステップで調整しながら、最終的に目標のひび割れ幅と得るものであり、ここでは鉄筋直上のコンクリートのひび割れ幅をターゲットして各ステップで鉄筋膨張量を制御する。例えばあるステップで得られたひび割れ幅がそのステップのターゲットより大きければ、次のステップでは与える膨張量を減らすように自動調整する。各ステップの膨張量は線形増加であるので、解析全体での非線形性を表せるだけの十分に小さい値を設定する必要がある。最終的な表面ひび割れが再現された際の鉄筋の膨張量を腐食率に変換することで推定腐食分布となる。RBSM微細構造解析シ

システムは、鉄筋節形状までモデル化し、微細なひび割れが進展する複雑な解析システムであり、これに新たなアルゴリズムを導入するには、MPC のような比較的単純な方法の方が親和性が高く、計算が破綻しづらいので採用している。実際の解析では鉄筋とコンクリートの界面で制御されるバネの数は数千から数万に及ぶ。

#### 4. 研究成果

解析結果の例を示す。

図-1 に解析対象とする実験の試験体と腐食条件、図-2 にその解析モデルを示す。モデル 1R-1C と 1R-2C は同じ試験体形状で一本の鉄筋 (D19) が配置されており、それぞれ中央と端部に腐食箇所を設けている。1R-3S にはエポキシ塗装した腐食しない帯鉄筋 (D10) を 3 本配置し、軸方向筋 (D19) のみを腐食させた。帯鉄筋による拘束の影響を考慮するためのモデルで、帯鉄筋も腐食させると応力状態が非常に複雑になり検証が難しくなるので腐食をさせていない。実験では 3 週間の腐食試験を行い、鉄筋直上の表面ひび割れの分布を計測した (図-3)。1R-1C では試験体中央にひび割れが分布し、1R-2C ではひび割れのピークが腐食箇所に応じて 2 つ生じている。腐食は均一には生じないためにひび割れ分布は左右対称にはならない。1R-3S では試験体長さが短いこともあり広く分布するひび割れが計測された。この観察された表面ひび割れを MPC-RBSM のターゲットとして鉄筋腐食分布を推定する。解析では鉄筋の表面を徐々に膨張させてターゲットのひび割れ分布の再現を行う。ターゲットのひび割れは一様でなく分布しているので、それを再現するためには細かい解析ステップの分割が必要であり、今回の解析では最終ひび割れ分布を得るまでに 300~400 ステップに分割し、各ステップに対して計測されたひび割れ幅を線形に分割したターゲットのひび割れ幅を設定している。現在の解析システムでは時間軸は考慮せずに膨張量の増加ステップで解析が進む。解析 1 ステップ目では全ての鉄筋界面のバネにわずかな膨張を与え、その後は MPC のアルゴリズムに従い、次ステップのターゲットのひび割れを再現するためにそれぞれの界面のバネの膨張量が自動的に計算される。

図-4 は MPC-RBSM で再現された表面ひび割れ幅である。厳密に正確ではないが、おおよその表面ひび割れ分布の傾向を自動的に再現できていることが確認できる。ただし、例えば 1R-2C の端部では解析のひび割れが実験より大きい。これは直下の鉄筋の膨張の増分がゼロとなっても、別の箇所の鉄筋の膨張力は三次元的に広がり、他の箇所のひび割れにも影響をしており、これが特に端部ではコンクリートの拘束力が小さいこともあり顕著に出ている。図-5 は実験と解析のひび割れ図で、実験では 2 次的なひび割れ (赤線) も発生しているが、解析でも同様なひび割れが発生しており、内部の応力分布やひび割れ進展も同様なものであったと推測される。図-6 は 1R-3S の内部応力状態の変化である。帯鉄筋のある 1R-3S では、軸方向筋からの膨張圧により帯鉄筋に引張応力が生じ、ひび割れの進展が抑制されている。このような鉄筋による拘束など内部の力学相互作用を直接的に表現しながら推定のための解析が進む。解析において鉄筋に与えられた膨張量の分布を図-7 に示す。解析ステップに応じて、膨張量が表面ひび割れの大きい個所で大きくなることを確認できる。

解析で与えた膨張量 (図-7) を腐食率に換算するとそれが推定の腐食分布となる。しかし膨張量と腐食率の関係は一意では無いので、ここでは簡単のためにそれが比例関係であると仮定し、それぞれのピークを合わせた関係から変換できることとした。実験では試験後に鉄筋を取り出し、3D レーザースキャナを用いて詳細な鉄筋腐食分布を計測した。ここでは腐食率を断面積減少量から計算している。図-8 が解析における膨張量と実験の腐食率を同じグラフに載せたもので、ピークを合わせているので膨張量が腐食率に変換 (図中の  $\eta$  は変換係数) されている。ここから、鉄筋軸に異なるピークがある場合 (1R-1C, 1R-2C) も、帯鉄筋による拘束がある場

合（1R-3S）もおおよその鉄筋腐食率の分布を解析で推定できていることが確認できた。また  $\eta$  の値は理想的には同一腐食条件では同じ値となるものであるが、ケースにより異なっている。実験におけるばらつきや腐食膨張の非線形性が原因と考えられ、今後も検討が必要である。今回の解析は基礎的で仮定を用いながらの解析であり、今後もモデル精度の向上、適用性の確認、実構造物への試行と課題も多いが、力学モデルを用いた解析からコンクリート内部の鉄筋腐食分布を推定する方法の可能性を示した。

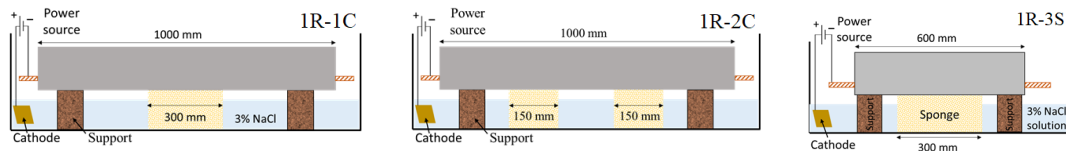


図-1 腐食試験体（実験）

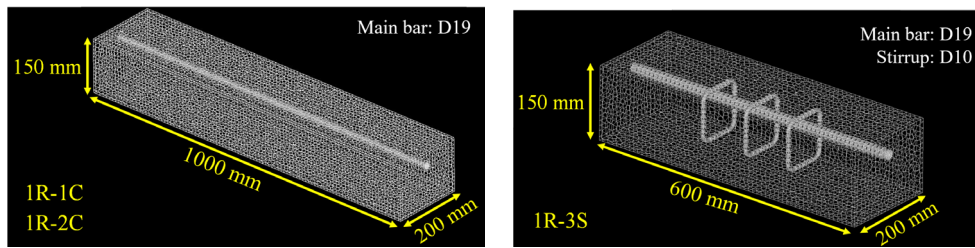


図-2 MPC-RBSM 解析モデル

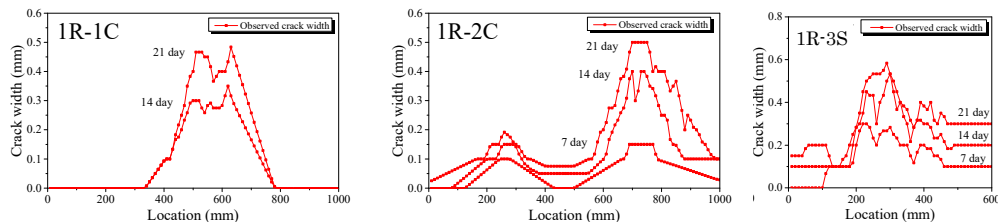


図-3 実験での鉄筋軸上の表面ひび割れ幅

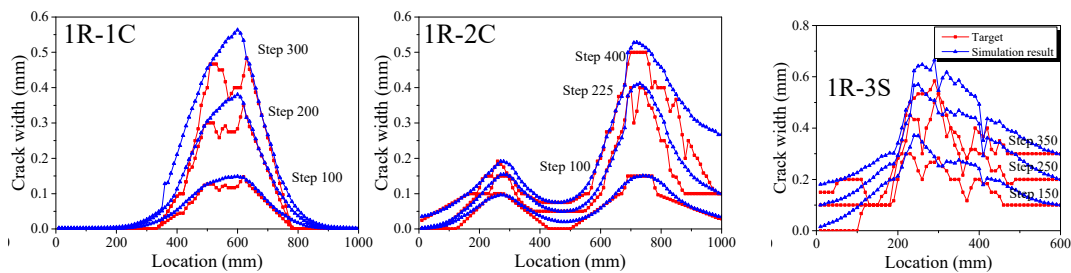
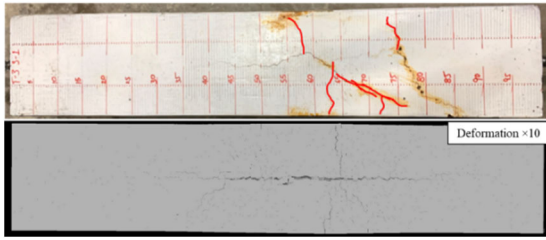
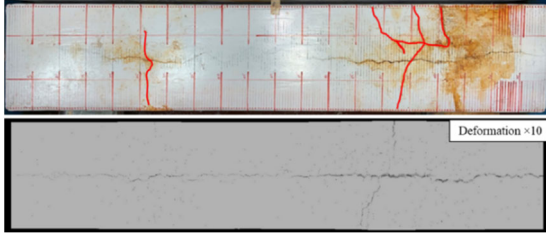


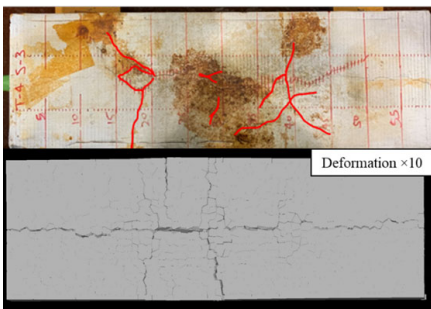
図-4 MPC-RBSM で再現された表面ひび割れ幅（赤：ターゲット、青：解析結果）



(a) 1R-1C



(b) 1R-2C



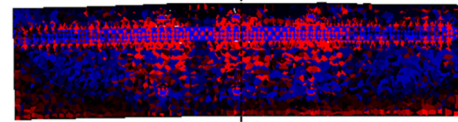
(c) 1R-3S

図-5 実験と解析の表面ひび割れ

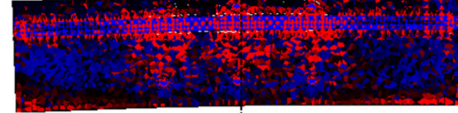
Tension Normal stress Compression  
5 MPa 10 MPa

1R-3S

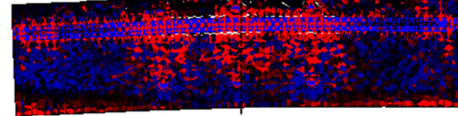
Step 150 x = 300 mm Deformation x10



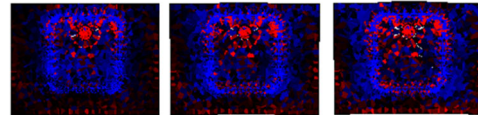
Step 250



Step 350



x = 300 mm



Step 150

Step 250

Step 350

図-6 解析における内部応力状態

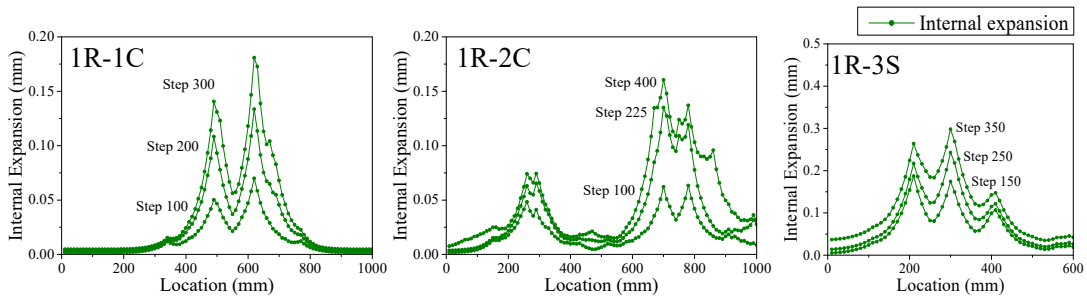


図-7 解析における鉄筋膨張量

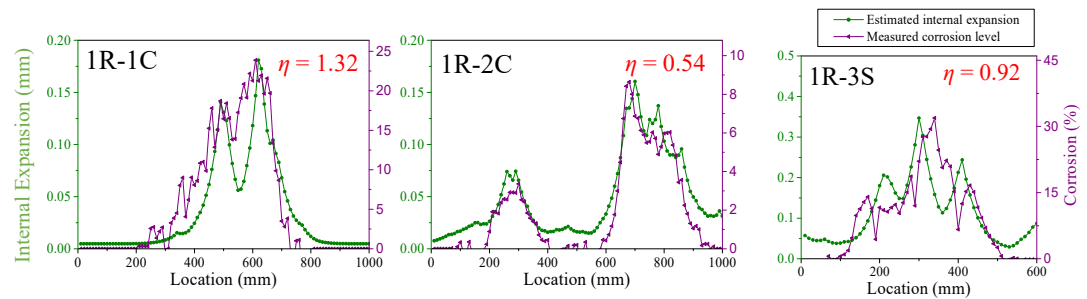


図-8 腐食率分布の推定値 (緑：解析による予測値，紫：実験の計測値)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Punyawut JIRADILOK, Yi WANG, Kohei NAGAI, Koji MATSUMOTO	4. 巻 236
2. 論文標題 Development of discrete meso-scale bond model for corrosion damage at steel-concrete interface based on tests with/without concrete damage	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 Article117615
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.conbuildmat.2019.117615	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 Wenlong Deng, Yongli Mou, Takahiro Kashiwa, Sergio Escalera, Kohei Nagai, Kotaro Nakayama, Yutaka Matsuo, Helmut Prendinger	4. 巻 110
2. 論文標題 Vision Based Pixel-level bridge Structural Damage Detection Using a Link ASPP Network	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Automation in Construction	6. 最初と最後の頁 Article102973
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.autcon.2019.102973	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 該当する
1. 著者名 Punyawut JIRADILOK, Koji MATSUMOTO, Kohei NAGAI	4. 巻 197
2. 論文標題 Meso-scale Modeling of Non-uniformly Corroded Reinforced Concrete Using 3D Discrete Analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 Article109378
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.engstruct.2019.109378	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 Helmut Prendinger, Juanjo Rubio, Takahiro Kashiwa, Yutaka Matsuo, Kohei Nagai, Teera Laiterapong, Wenlong Deng, Kotaro Nakayama, Sergio Escalera	4. 巻 112
2. 論文標題 Multi-class Structural Damage Segmentation Using Fully Convolutional Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computers in Industry	6. 最初と最後の頁 Article103121
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compind.2019.08.002	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 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Punyawut JIRADILOK, Vikas Singh KUNTAL, Kohei NAGAI, Koji MATSUMOTO
2. 発表標題 Analytical Investigation of the Influence of Rebar Arrangement on Corrosion Crack Pattern By RBSM
3. 学会等名 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-X) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ahmed Okeil Mohamed Atia, Rhea UPADHYAY, Koji MATSUMOTO, Kohei NAGAI
2. 発表標題 Investigation of Local Opening-sliding Relationship in the Vicinity of Deformed Bar in Concrete by Using DIC Technique
3. 学会等名 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-X) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke ASAHINA, Mikio TAKEDA, Kohei NAGAI
2. 発表標題 Simulating Hydraulic Fracturing Processes in Cement Composites Using Tough-RBSM
3. 学会等名 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-X) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Vikas Singh KUNTAL, Punyawut JIRADILOK, Kohei NAGAI
2. 発表標題 Discrete Analysis System for Estimation of Corrosion Level in Concrete from Surface Crack Using Model Predictive Control
3. 学会等名 3rd ACF Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kumar AVADH, Ahmed Okeil Mohamed Atia, Punyawut JIRADILOK, Kohei NAGAI
2. 発表標題 Visualization of Local Bond Behavior of Corroded Reinforced Concrete by Using DIC Technique
3. 学会等名 3rd ACF Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Punyawut JIRADILOK, Kumar AVADH, Kohei NAGAI
2. 発表標題 Effect of Stirrup Confinement on Residual Bond Performance of Corroded RC by 3D RBSM
3. 学会等名 18th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia (USMCA) (国際学会)
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	酒井 雄也 (Sakai Yuya)  (40624531)	東京大学・生産技術研究所・准教授   (12601)	

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
---------	---------