

令和 3 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2018～2020

課題番号：18KK0399

研究課題名（和文）三次元微細構造離散解析システムの拡張によるRC内部鉄筋腐食分布の逆推定への展開

研究課題名（英文）Estimation of internal corrosion degree of reinforcement in concrete using 3D meso-scale simulation

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） 12,000,000円

渡航期間： 18ヶ月

研究成果の概要（和文）：微細構造解析システム（RBSM）に、モデル予測制御（MPC）のアルゴリズムを導入することで、表面のひび割れ分布の情報から、内部の鉄筋腐食分布を自動的に予測するシステムを構築した（MPC-RBSM）。MPC-RBSMでは、目標とするひび割れ分布を再現するように内部の腐食膨張量を解析ステップごとに自動的に制御して与える。鉄筋は5mmごとにメッシュ分割されており、要素ごとに直上のひび割れを参照しつつ解析が進む。最終的に表面ひび割れを再現した際の鉄筋膨張量が推定された鉄筋腐食量となる。数値解析によって自動的に内部腐食量を推定するシステムを初めて構築することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インフラ構造物の劣化が社会的な問題にもなっており、その主たる劣化要因である鉄筋コンクリート構造物の腐食は、外観からは内部腐食状況が把握できないために、合理的な構造性能推定や維持管理ができていない。本研究は、数値解析を用いて表面のコンクリートひび割れ情報から内部の鉄筋腐食分を推定するものであり、この手法を発展させ実構造物に適用できれば有用性は非常に高い。学術的にも研究代表者の独自の三次元微細構造解析に新しいアルゴリズムを取り入れた新規性の高い研究である。

研究成果の概要（英文）：We have developed a simulation system for estimating the levels of internal corrosion along the reinforcing bar length from surface crack information. This innovative system is produced by integrating the technique of Model Predictive Control (MPC) with Rigid-Body-Spring Models (RBSM) of corrosion-induced cracking at the concrete meso-scale. MPC controls the simulated surface cracks such that they match the observed cracks by optimizing the internal expansions of springs representing the steel-concrete interface within the RBSM. The applicability of the system is verified using both synthetic crack width data and crack data collected from in-house laboratory testing. In the laboratory testing, corrosion levels were quantified by 3D scanning of the extracted reinforcing bars. The simulation results agree with the corrosion measurements, demonstrating the potential of the MPC-RBSM system for predicting the corrosion distribution along reinforcing bars using surface crack data.

研究分野：土木工学

キーワード：コンクリート 鉄筋腐食 内部推定 微細構造解析

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

RC 構造物の劣化と対策を含む維持管理は社会的な問題ともなり、特にコンクリートのひび割れについて、その原因推定や制御と対策に関する研究が進んでいる。しかし、既設構造物の維持管理に必要とされるのは残存構造性能評価に基づく判断であり、RC 構造物に関しては、ひび割れでなく内部鉄筋腐食量が本質的に必要な情報となる。表面ひび割れ情報と内部鉄筋腐食量の関係を求める研究は、これまで実験もしくは簡易な2次元解析によるもののみであり、コンクリートの物性、かぶり厚、複雑な配筋、帯鉄筋による拘束、鉄筋軸沿いにローカルに異なる腐食分布、更には腐食時の異形鉄筋の節からの3次元応力の発生、ひび割れの発生と進展に伴う力学相互作用など、複雑な条件を整理して推定可能な状況とはなっていない。現在、橋梁点検の技術開発が進み、高解像度カメラ、ドローン、画像分析、AI など、コンクリートの表面上情報を精緻に計測できる状況が整いつつあり、ここから内部腐食状況を推定できる技術が必要となっている。

2. 研究の目的

腐食により損傷した鉄筋コンクリート(RC)部材の表面のひび割れの情報からの内部の鉄筋の腐食分布の推定を、これまでに開発した Rigid Body Spring Model(RBSM)による三次元微細構造離散解析システムにデータ同化解析を新たに導入し拡張することで可能とし、推定に基づき損傷した RC 部材の残存構造性能の評価を可能とすることが本研究の目的である。研究代表者が開発している解析システムでは、ローカルな腐食分布を入力値として与え、ひび割れを実験と同様に発生させることで残存構造性能の推定を可能としたが、本研究では表面ひび割れの情報から内部腐食分布を逆推定するシステムを開発する。この解析システムの拡張を滞在するカリフォルニア大学デービス校 John Bolander 教授と共同で行う。日本で行う RC の腐食実験では、時系列にひび割れの進展を 5mm 程度ごとに詳細に追い、解析システムの検証データとする。

3. 研究の方法

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として各ステップで鉄筋膨張量を制御する (図-1, 図-2)。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。

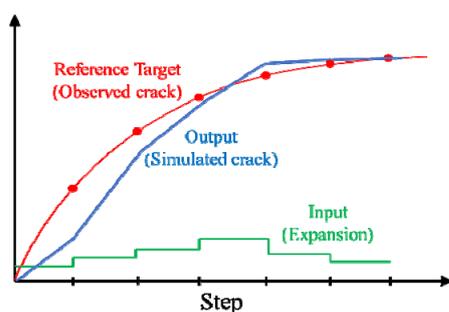


図-1 モデル制御予測 (MPC)

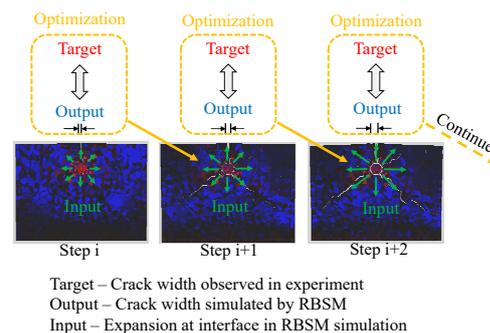


図-2 MPC-RBSM による最適化計算ステップ

4. 研究成果

解析例を紹介する。まだ解析システムを実構造の損傷個所に直接適用する段階には至っておらず、基本的なケースを実験結果との比較を通して検証している段階であるが、計算システムとしては複雑な配筋をモデル化し再現できるので拡張性がある。

図-3 に解析対象とする実験の試験体と腐食条件、図-4 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-5)。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律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-6 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及ぼし、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-7 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-8 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-9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が確認できる。

解析で与えた膨張量(図-9)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的ではないので、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-10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 η 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 η 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。

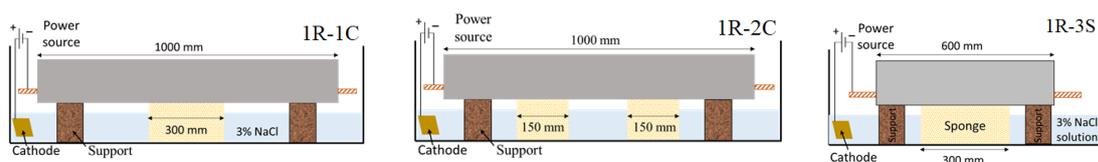


図-3 腐食試験体(実験)

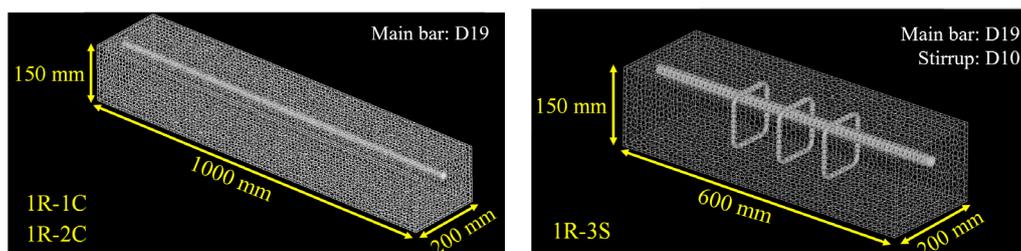


図-4 MPC-RBSM 解析モデル

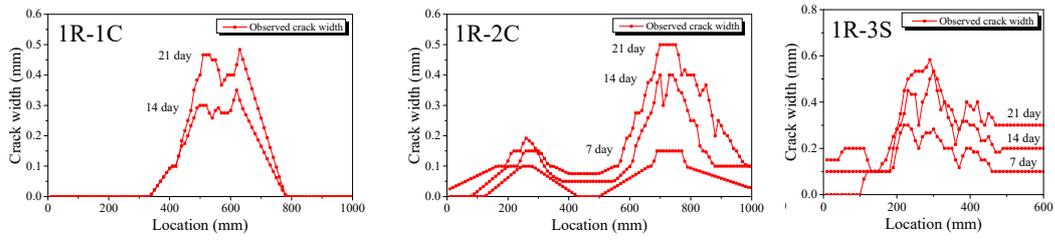


図-5 実験での鉄筋軸上の表面ひび割れ幅

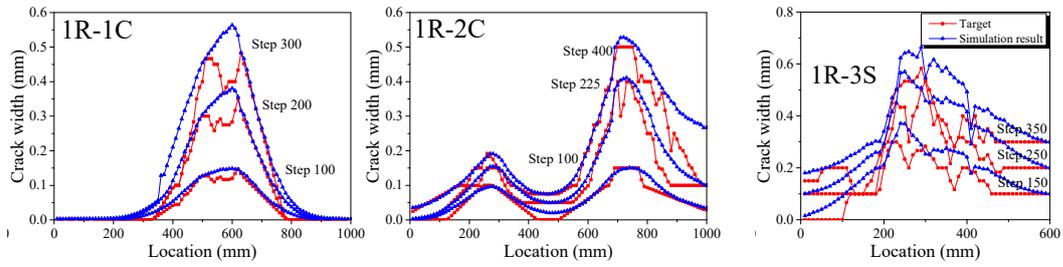
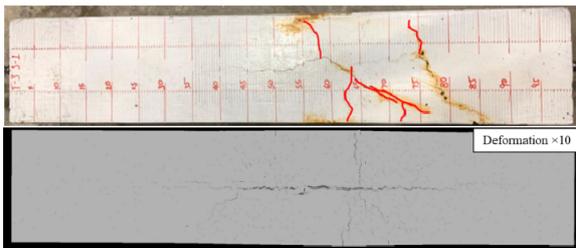
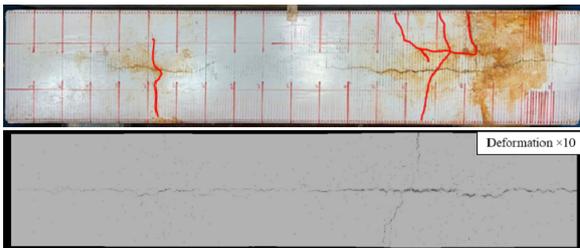


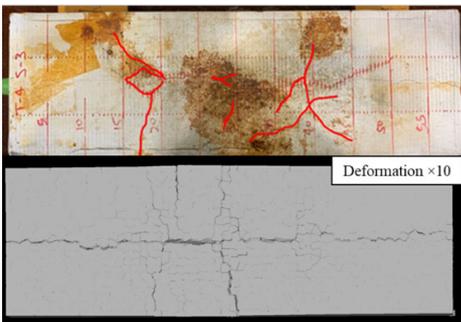
図-6 MPC-RBSM で再現された表面ひび割れ幅 (赤：ターゲット，青：解析結果)



(a) 1R-1C



(b) 1R-2C



(c) 1R-3S

図-7 実験と解析の表面ひび割れ

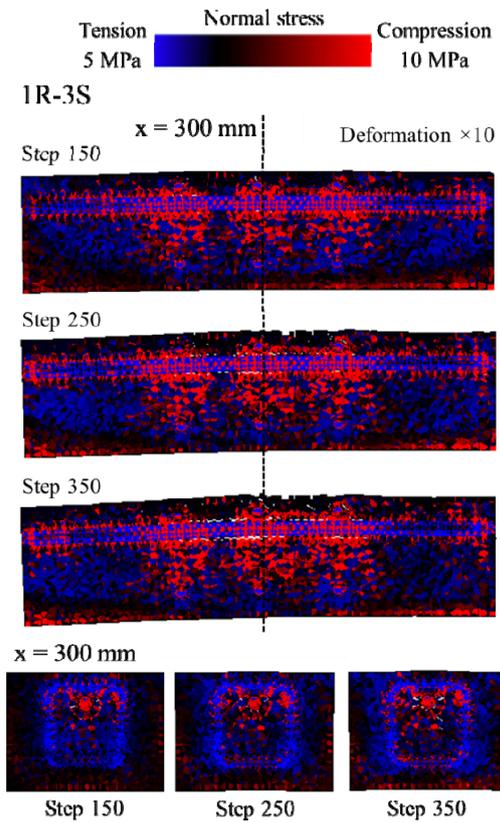


図-8 解析における内部応力状態

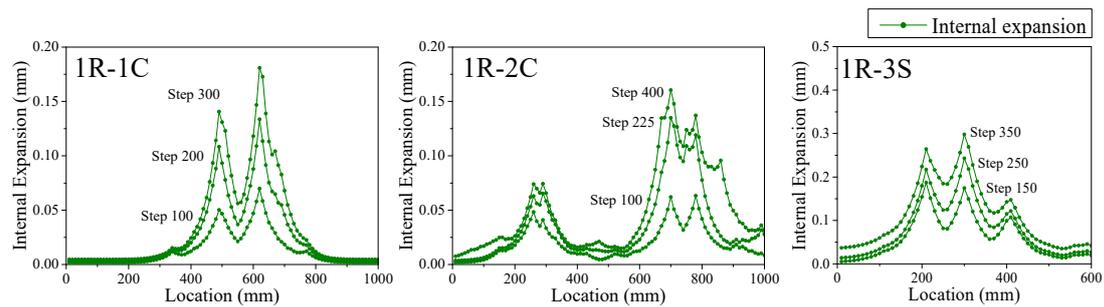


図-9 解析における鉄筋膨張量

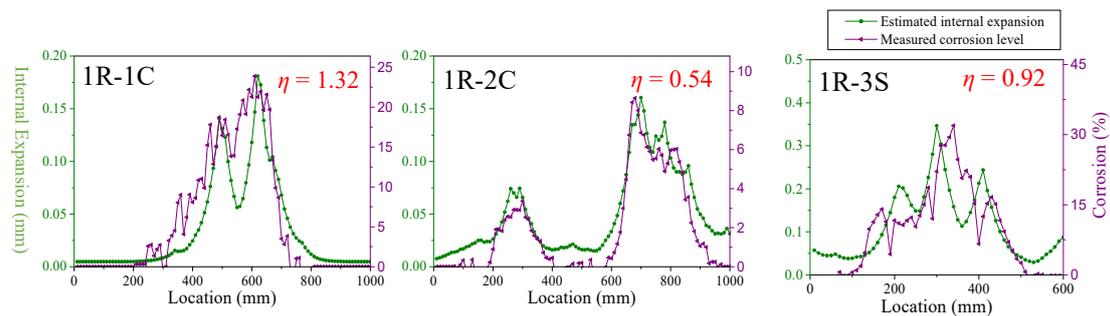


図-10 腐食率分布の推定値 (緑：解析による予測値，紫：実験の計測値)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Vikas Singh Kuntal, Punyawut Jiradilok, John E Bolander, Kohei Nagai	4. 巻 Vol.36, Issue5
2. 論文標題 Estimation of internal corrosion degree from observed surface cracking of concrete using meso-scale simulation with Model Predictive Control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 544-559
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/mice.12620	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 Kumar Avadh, Punyawut Jiradilok, John E Bolander, Kohei Nagai	4. 巻 116
2. 論文標題 Mesoscale simulation of pull-out performance for corroded reinforcement with stirrup confinement in concrete by 3D RBSM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composites	6. 最初と最後の頁 103895
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cemconcomp.2020.103895	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

〔学会発表〕 計0件

〔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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ボランダー ジョン (Bolander John)	カリフォルニア大学デビス校・土木環境工学科・教授	

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