

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）（令和3（2021）採択分）

研究期間：2021～2023

課題番号：21KK0072

研究課題名（和文）損傷後に補修したRC構造性能評価のための微細構造解析システムの構築

研究課題名（英文）Development of mesoscale simulation system for evaluating the performance of repaired RC structures

研究代表者

長井 宏平（NAGAI, Kohei）

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：00451790

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,700,000円

研究成果の概要（和文）：研究のコアとなる微細構造解析プログラムに連続繊維シートのモデルを組み込み、引張試験による付着挙動の解析を行った。微細スケールにおいてはコンクリート側にもひび割れが進展し損傷が蓄積されることでマクロな付着挙動にも影響を与える。繊維補強コンクリートを用いたRC梁の疲労載荷下における繊維の貢献分の変化のモデル化について検討を行い、材料強度や繊維混入率で変化を考慮できるものとした。連続繊維シートFRPによる補強については、これをRC梁の補強に適用した実験の再現から検証を行った。水分移動のモデル化についても、既往の水分移動、物質移動モデルから、本解析システムに組み込むモデルの高度化を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

劣化した鉄筋コンクリート構造の残存性能と補修効果を、開発した離散解析手法RBSMによる三次元微細構造解析プログラムに水分移動や鉄筋腐食をモデル化し劣化現象を再現したうえで残存構造性能を解析により示し、損傷後の構造に対して繊維補強コンクリートや連続繊維（FRP）により補修した効果も直接モデル化することで評価可能とするシステムの開発を進めた。現在、鉄筋コンクリート構造物の劣化を詳細に評価することが困難なうえ、補修した後の効果や、その後の再劣化について予測する技術は整っておらず、本研究のような数値解析によるアプローチは計算機性能の向上とともに、研究レベルから実用に近づく可能性が高まっている。

研究成果の概要（英文）：A continuous fiber sheet model was incorporated into the mesoscale analysis program, which is the core of the study, to analyze bond behavior by tensile testing. The macroscopic adhesion behavior is also affected by crack propagation and damage accumulation on the concrete side at the micro scale. The modeling of the change in fiber contribution under fatigue loading of RC beams with fiber reinforced concrete is discussed, and the change can be considered in terms of material strength and fiber ratio. The reinforcement with continuous fiber sheet FRP was verified by reproducing the experiment in which it was applied to the reinforcement of RC beams. The modeling of water movement was also improved from the existing water movement and mass movement models to be incorporated in this analysis system.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：鉄筋コンクリート構造 補強 FRP 微細構造解析

1. 研究開始当初の背景

日本においてはインフラ構造物の劣化が顕在化し、その骨格をなす鉄筋コンクリート構造物には様々な損傷が生じており、その維持管理のためには残存構造性能を評価し、補修した場合にもその効果や将来予測が重要であるが、劣化現象の再現や補修後の性能評価は精緻には行われていない。それは鉄筋コンクリート構造に生じる劣化現象が多様であること、局所的である場合が多いこと、内部の状態が外観からは分からないこと、補修後も再劣化が生じることなどが原因として挙げられる。これらの複雑な現象を体系化して扱うには数値解析が有用である。また現象の解明や再現、補修効果を検討するには、ひび割れを直接的に表現できる微細構造スケールからのアプローチが、材料の微視的变化を考慮しつつ構造部材スケールの評価を行うために適している。

2. 研究の目的

劣化した鉄筋コンクリート構造物の残存性能と補修効果を、申請者が開発した離散解析手法 RBSM による三次元微細構造解析プログラムに水分移動、鉄筋腐食、凍害の影響をモデル化し劣化現象を再現したうえで残存構造性能を解析により示し、損傷後の構造に対して繊維補強コンクリートや連続繊維 (FRP) により補修した効果も直接モデル化することで評価可能とすることが本研究の目的である。海外研究者と共同で解析フレームワークに個々の劣化現象を表現するモデルの開発と導入を行い、さらに劣化、補修、構造性能評価の一連の解析を効率的に稼働できるシステムの構築を行う。解析上で劣化により構造性能が低下した状態に、補修材要素を追加し適切な材料特性と界面の付着特性を導入したうえで、新たに劣化促進 (再劣化) や外力を与えることで、劣化後に補修した構造の性能評価を可能とする。

3. 研究の方法

解析フレームワークに個々の劣化現象を表現するモデルの開発と導入を行い、さらに劣化、補修、構造性能評価の一連の解析を効率的に稼働できるシステムの構築を行う。解析上で劣化により構造性能が低下した状態に、補修材要素を追加し適切な材料特性と界面の付着特性を導入したうえで、新たに劣化促進 (再劣化) や外力を与えることで、劣化後に補修した構造の性能評価を可能とする。

4. 研究成果

(1)

繊維補強コンクリートを用いた RC 梁の疲労載荷下における繊維の貢献分の変化のモデル化について検討を行い、材料強度や繊維混入率で変化を考慮できるものとした。疲労載荷において、荷重の増加によりひび割れが開いた際に繊維の引抜き量が増えることで分担応力が増すことを実験から抽出し、使用材料による違いを明らかにしている。具体的な研究成果を以下に示す。

破壊エネルギーの高いコンクリート圧縮強度は、より長い疲労寿命とより高い残留能力を持つ中、スパンたわみ、鉄筋、およびコンクリートひずみのレベルを低下させることにより、SFRC 梁の曲げ繰返し応答にプラスの影響を与える。その結果、繊維/マトリックス界面における結合の低下が緩やかになり、最大鉄筋ひずみに対する亀裂架橋応力の劣化速度が低下した。

SFRC 梁のたわみ、ひずみレベル、および繰返し荷重時の最大鉄筋ひずみに対する亀裂架橋応力劣化率において、材料スケールの異なる SFRC 混合物の破壊エネルギーレベルが同じであることは、SFRC 構造梁の曲げ劣化応答が同じであることに影響する。さらに、より高いコンクリート圧縮強度とダブルフック端形状の繊維を用いた SFRC 梁では、より高い残留曲げ耐力と剛性が決定された。

ダブルフック端の鋼繊維は、SFRC 構造梁の曲げ繰返し劣化を減速させる効果は比較的軽微であり、破壊エネルギーレベルが低いシングルフック端の鋼繊維の梁よりも、ミッドスパンたわみ、鉄筋ひずみ、ひび割れ架橋劣化率のレベルが高い。Dramix®5D 鋼繊維のダブルフックの役割は、比較的高いコンクリート強度内で、より高い引張繰返し応力とより大きなひび割れ幅を通して、ひび割れ架橋応力に対して効果的に達成されるため、しかし、SFRC 構造の疲労挙動は、耐用年数にわたって、より小さなひび割れ幅を通してより低い設計応力レベルが支配的である。従って、繊維の異なる形状に関する更なる調査をより広範囲に実施すべきである。

SFRC 梁の軸方向鉄筋比の低減は、鉄筋ひずみレベルの上昇、疲労寿命の短縮、曲げ耐力の低下を通じて、曲げ繰返し応答に悪影響を及ぼす。従って、繊維/マトリックス界面での剥離プロセスに影響を与えることなく、鉄筋ひずみの成長率が高くなるため、疲労寿命の最大鉄筋ひずみに対する亀裂架橋応力の劣化率が低くなった。

5. 最大鉄筋ひずみに対するクラックブリッジング劣化ダイアグラムは、コンクリート圧縮強度、破壊エネルギーレベル、および縦方向鉄筋比を含む異なる材料パラメータ効果を提

えるのに適切であり、曲げ繰返し応答に対する梁の抵抗部の強化パラメータを反映している。

(2)

連続繊維シート FRP による補強については、これを RC 梁の補強に適用した実験の再現から検証を行った。コンクリートと FRP の付着モデルの高度化を行い、ローカルな FRP の付着滑りと、全体の剥離進展プロセスの再現を行った。微細構造解析ではローカルにはシンプルな付着モデルが適用されている。実験の再現が可能なことを確認するとともに、RC 梁の載荷においてはローカルには FRP を面外方向に押し出す力と FRP を引張る力が作用することを直接的に解析で表現できた。具体的な研究成果を以下に示す。

モデルのパラメータは物理的な意味を理解しやすく定義されており、計算方法も簡単である。シミュレーション結果は、荷重-変位関係、ひび割れ形状、応力分布、ひずみ分布、局所挙動を反映し、実験結果と見事に一致した。重要なことは、メソスケールの 3 次元 RBMSM システムが、メソスケールの FRP 接合モデルが単純化された条件下でも、曲げ破壊を確実にシミュレーションできる能力を実証した。これは既存の方法論に対する決定的な進歩であり、3D RBMSM アプローチの堅牢性と汎用性を示している。さらに、このモデルは内部応力レベルのシミュレーションに優れているため、複雑な構造挙動を調べるための包括的かつ合理的な方法を提供する。

シミュレーション結果から、FRP とコンクリート f_{int} 間の界面引張強度は、FRP 強化梁の曲げ挙動を決定する重要な要素である。FRP-コンクリート界面の引張強度が f_t (コンクリート要素間に設定された引張強度) 未満、例えば $f_{int} = 0.5f_t$ に設定された場合、この界面で早期に損傷が発生する。逆に、 $f_{int} = 2.0f_t$ の場合、界面結合強度がコンクリート強度を上回り、コンクリート材料内での剥離が容易に発生する。重要なことは、剥離挙動のパラメトリックシミュレーションにより、局所結合モデルが荷重-変位特性などの巨視的挙動に大きな影響を及ぼすことが確認されたことである。

FRP シートに沿ったひずみ分布がモデルによってよくシミュレートできた。本研究の特筆すべき成果は、このひずみ分布をモデルが正確にシミュレートできることにある。実験では、FRP 補強梁は長さ方向にひずみ値のばらつきを示したが、本研究のモデルはこの傾向を忠実に再現している。

モデルから抽出された FRP の局所的な鉛直・水平変位は、シミュレーションの局所的挙動が実験の曲げおよびせん断力とよく一致していることを示している。FRP 補強梁の曲げ実験では、鉛直方向の相対変位がはく離の発生に重要な影響を及ぼしていた。さらに、剥離が発生した後、シミュレーションした相対変位曲線は大きな散乱を示し、離散的な挙動を示す。コンクリートの非連続的な性質を考慮すると、局所的なひび割れ挙動がこのような複雑な結果につながる可能性がある。我々の 3 次元 RBMSM モデルは、FE モデルでは困難であることが判明しているこの複雑な挙動をシミュレートするのに長けていることが明らかである。

(3)

水分移動のモデル化についても、既往の水分移動、物質移動モデルから、本解析システムに組み込むモデルの高度化を進めた。鉄筋腐食については、腐食後の付着挙動をより正確に再現するために、研究代表者が過去に行った試験の観察動画から画像相関法を用いて界面の挙動をより詳細に分析し、鉄筋からコンクリートへの応力伝達の変化と鉄筋表面の腐食生成物の影響について調査した。鉄筋腐食と水分移動モデルについて高度化を図り、それらを統合することで、鉄筋腐食後の FRP 補強効果を評価できるスキームを構築した。水分移動モデルについての具体的な研究成果を以下に示す。

コンクリート中の水分輸送を正確にシミュレーションするために、RBMSM コンジットモデルと呼ぶ 3 次元メソスケールモデルを開発した。湿潤および乾燥過程に関与するさまざまなメカニズムについて、このモデルでは、水分の輸送方向に基づいて、各導水管に適切な水分輸送方程式が選択されます。開発したモデルを用いてコンクリート中の水分輸送のいくつかのシナリオをシミュレートした。

湿潤過程において、水分輸送は急速に起こり、水セメント比 (w/c) と密接な関係がある。 w/c 比が高いコンクリートは、 w/c 比が低いコンクリートに比べて、より多くの内部細孔を有し、その結果、水分輸送が速くなる。RBMSM コンジットモデルは、この挙動のシミュレーションにおいて高い精度を示し、シミュレーションが可変拡散係数モデルで良好に機能することを示した。

乾燥過程では、湿潤過程に比べて水分の輸送が著しく遅くなる。自然条件下では、コンクリートの乾燥には数百日を要することがある。RBMSM コンジットモデルは、時間ステップを調整することで計算効率と精度のバランスを効果的にとり、長時間の乾燥シミュレーションでも高い精度を確保する。

局所的な湿潤シミュレーションにおいて、RBMSM コンジットモデルは、コンクリート内の水分分布の時間変化に関する詳細なデータを提供する。このモデルは、3 次元空間での水分輸送をシミュレートし、複雑な非線形境界条件を正確にシミュレートする能力を実証しており、実際のシナリオにおける水分の浸透に関する詳細な調査の基礎を築いている。

コンクリートの湿潤-乾燥サイクルは複雑な水分分布をもたらすため、コンクリート供試体内には乾燥状態と湿潤状態の両方が共存するため、湿潤状態と乾燥状態の間の移行には遅延が生じる。乾燥過程と湿潤過程では水分輸送速度が大きく異なるため、モデルパラメータが複雑になる。RBSM コンジットモデルはこのプロセスを離散化し、各マイクロスケールコンジットのパラメータを動的に調整することで、湿潤-乾燥サイクルを正確にシミュレートします。湿潤から乾燥に移行する間、コンクリート内部は一定量の水分を保持します。このため、コンクリート内部への湿潤領域の拡張が続く。しかし、乾燥が進むにつれて、コンクリート内部の水分量は徐々に減少し、湿潤プロセスはもはや深部へと膨張せず、代わりに徐々に収縮する。最終的に、湿潤過程は完全に乾燥過程に変わり、コンクリート内部にはもはや湿潤過程の領域は存在せず、内部全体が乾燥した状態になる。

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 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Cheng Jiang, Kumar Avadh, Kohei Nagai	4. 巻 304
2. 論文標題 A mesoscale simulation of the FRP-to-concrete interfacial debonding propagation process by 3D RBSM	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 116336
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compstruct.2022.116336	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 Mohamed Adel, Koji Matsumoto, Tamon Ueda, Kohei Nagai	4. 巻 339
2. 論文標題 Material comparative analysis of crack-bridging degradation of SFRC structural beams under flexural fatigue loading	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 127642
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.conbuildmat.2022.127642	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 Wenliang Yin, Cheng Jiang, Kohei Nagai	4. 巻 310
2. 論文標題 Mesoscale discrete simulation of flexural behavior of FRP-strengthened RC beams using 3D RBSM	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 118131
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.engstruct.2024.118131	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 Suhas S. Joshi, Vikas Singh Kuntal, John E. Bolander, Kohei Nagai	4. 巻 292
2. 論文標題 Reproducible estimations of internal corrosion distribution from surface cracks using MPC-RBSM	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 109642
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.engfracmech.2023.109642	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
研究分担者	松本 浩嗣 (Matsumoto Koji) (10573660)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	
研究分担者	鎌田 知久 (Kamada Tomohisa) (70804194)	東京大学・生産技術研究所・助教 (12601)	
研究分担者	金澤 健 (Kanazawa Takeru) (80823773)	北海学園大学・工学部・准教授 (30107)	

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