

令和元年5月25日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04388

研究課題名(和文) 三次元微細構造解析による劣化した橋梁構造部材の残存性能評価と補修補強

研究課題名(英文) Evaluation of residual structural performance of damaged bridge members by three dimensional meso scale analysis and its retrofit

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) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：三次元微細構造解析システムに、ローカルな鉄筋腐食の影響を考慮する構成モデルを新たに実験をもとに開発し組み込むことで、鉄筋の局所的な腐食を直接的に考慮できる解析システムへと拡張した。鉄筋コンクリート部材の腐食分布を直接入力することで、残存構造的な評価が可能となる。これを部材の端部の定着部にも導入し、構造全体への影響も把握が可能となった。体積変化モデルについては、ASRとDEFを対象に体積膨張を考慮できるシステムを構築し、膨張によるひび割れ発生と、損傷後の強度低下について再現可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会基盤構造物の劣化が顕著となり、その維持管理は社会的な問題となっている。鉄筋コンクリート構造物の腐食による劣化は、その最も主たる問題であり、腐食が生じたのちの残存構造的な性能評価は、適切な維持管理や補修方法の決定に重要である。しかし、鉄筋の腐食は鉄筋軸に沿って一様でなく分布しており、それを考慮した評価方法が必要である。本研究で構築した解析システムは、約5mmごとの腐食を直接的に導入し鉄筋コンクリート部材の残存構造的な性能を評価可能としている。コンピュータの性能向上に伴い、この解析システムの実構造物への適用が広がると期待できる。

研究成果の概要(英文)：Three dimensional meso scale analysis system was expanded by introducing the local bond model for corrosion damage where the constitutive model was developed by the experiments. The local corrosion can be directly considered as the input of simulation that enable to evaluate the residual structural performance of damaged reinforced concrete. This system was applied to the case of corrosion damage at the anchorage part. The influence of anchorage damage on the overall structural performance was examined. For the expansion problems such as ASR or DEF, the expansion model was introduced to the simulation system and the residual strength reduction can be simulated.

研究分野：土木工学

キーワード：コンクリート 残存構造的な性能 離散解析 腐食 鉄筋付着

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

社会基盤構造物の老朽化が社会的に問題となっており、特に橋梁は重要構造物として合理的な性能評価、寿命予測と効率的な維持管理および補修補強が必要となっている。なかでも、損傷した鉄筋コンクリート(RC)及びプレストレストコンクリート(PC)部材は、ひび割れの状況が点検等で判明しても、残存の構造性能と耐久性能の評価は難しく、さらに近年の点検結果によると、橋梁の損傷のうち数割は支承部付近に生じており、複雑な配筋に起因する応力状態により、その評価は一段と難しく、合理的な補修ができる状況にはない。また、ASR や DEF、凍結融解などはひび割れがコンクリート部全体に分布しており、構造性能は配筋とも関係し、複雑である。日本の橋梁 70 万橋のうち 75% 以上を管理する市町村においては点検が長年行われていないために、損傷が非常に大きな事例も多い。このような場合、残存の構造性能と耐久性能は、ひび割れの幅や分布、内部腐食状態に大きく依存するため、ローカルな付着劣化や腐食度も考慮する必要がある。これに対して簡易な劣化評価指標などには限界があり、より精緻な検証には、内部ひび割れや応力状態を検証できる数値解析が有用である。その数値解析による評価には、ひび割れを個々に表現できる離散解析手法が適しており、さらにそれは、三次元かつ複雑な配筋状態を直接的にモデル化する微細構造を必要とする。一方、遠くない将来に予想される首都直下型地震など巨大災害時にはインフラ設備に甚大な損害が想定され、構造応答の予測のみならず、損傷後の残存性能評価が復旧の優先度や、継続使用可能性の検討には必要となる。ここでも、損傷は大きなひび割れ(0.3mm 程度以上)も含んでおり、これを考慮する必要がある。特に柱梁接合部などは繰り返し荷重により複雑な損傷が生じ、その性能評価は詳細な数値解析等を用いずには難しい。

2. 研究の目的

経年や地震動により劣化・損傷した橋梁の構造部材(鉄筋コンクリート及びプレストレストコンクリート)の残存構造性能と耐久性能、補修補強時の効果を離散解析手法による三次元微細構造解析を用いて評価することが本研究の目的である。これを検討可能にする数値解析システムを、申請者の開発してきた三次元微細構造解析システム(RBSM-トラスネットワーク融合大規模解析)を拡張することで構築する。補修補強法には、繊維補強コンクリートや連続繊維シートを適用する。具体的な経年劣化事例として、国内外の橋梁点検データを活用し、損傷の大小や種類を分類し、典型的な事例に対して解析を行うことで適用範囲を広げるとともに、それぞれの劣化シナリオを示し、構造物の維持管理において残存性能を考慮した合理的な対応の検討を可能とする。

3. 研究の方法

本研究では、RC・PC 部材に対して、ひび割れを直接的に表現できる離散解析手法 RBSM(剛体ばねモデル)を用いた三次元微細構造解析により、詳細な配筋を実構造部材と同様にモデル化し、ひび割れ幅の大小に関わらず統合的に損傷状態を評価し、トラスネットワークにより物質移動項をひび割れ部にも導入することで、荷重、収縮、腐食、ASR、DEF、凍結融解、地震動など、様々な要因に起因するひび割れがある状態での構造性能と耐久性能を適切に予測することを可能とする解析システムを、既存システムの拡張により構築する。解析対象を橋梁の点検データなどから選定し、実橋梁の部材全体または支承部など一部の解析を行い、適用性と汎用性を示す。さらに、繊維補強コンクリートや連続繊維シートなどによる補強の効果を検討可能にする。点検データを活用することで、典型的な損傷パターンごとに、残存構造性能・耐久性能の特徴と、有用な補修補強方法を示す。

4. 研究成果

3 次元微細構造解析システムの拡張を実施した。これまでに開発されている微細構造解析の構成則に、新たに腐食による膨張圧のモデル、断面減少、付着モデルが導入された。このモデルの構築は実験にもとづいている。本研究の微細構造レベルでは鉄筋の節形状までモデル化しており、このスケールで腐食を考慮した付着モデルは新規性が高く、また鉄筋の要素サイズは 5mm 程度であり、実際の鉄筋腐食で生じるランダムな腐食状況を直接的に考慮できる独自性の高い解析システムとなった。

鉄筋が腐食した際の付着の構成モデルを構築するための引抜試験の結果とモデル化を実施した。鉄筋の節形状の影響を考慮するために、異形鉄筋と丸鋼の引抜試験が行われた。さらに、鉄筋が腐食すると、腐食による付着劣化とともにコンクリートにもひび割れが生じ、同時に劣化が進む。解析モデル構築のためにこれらを分離する目的で、腐食した鉄筋をコンクリートから取り出し、それを新たなコンクリートに配置し引抜試験を実施した。これらの実験パターンから、各因子の影響度を抽出することで、鉄筋腐食後の付着モデルが構築された。これを検証するための解析を実施し、ひび割れを含んだ状況での有用性も確認された。

鉄筋の付着性状に関しては、腐食のみならず、水中での疲労耐力や、付着挙動の画像解析を用いた直接観察など、局所モデルを統合的に構築するための実験も行った。

これを基に、腐食した梁部材の解析が行われた。既往の実験で、X 線を用いて載荷試験前の腐食率が鉄筋軸に沿って 5mm 間隔で把握されている試験があり、これを対象に解析を実施した。解析では 5mm ごとの腐食率を全て同様に導入し、腐食無しの状況から腐食を発生させ、それに応じたひび割れが進展したのちに、載荷をした。実験と同様に、無損傷に比較して、梁の剛性と耐力が低下するとともに、損傷によりひび割れの開きが早く、これが剛性低下の原因

であることを示した。また、比較のために腐食を均質に導入した場合の解析も行い、局所的な腐食とひび割れの違いから、本研究のように実腐食分散を解析に取り入れることの必要性を示した。

さらに、定着部に腐食が導入された場合の梁の解析を実施した。既往の、梁中央のみと、梁端部の定着にのみ腐食が導入された梁の試験を対象に解析を実施した。梁端部が腐食すると定着機能が低下し、破壊が早期に起こることが実験と同様に示され、構造の脆弱性を評価するために、本解析システムが有効であることが示された。

このように本研究は、腐食した鉄筋コンクリートの構造性能を評価するために、微細構造スケールでの付着モデルを構築し、既存の三次元解析システムに導入した。これを梁レベルでの実験の再現から検証し、その有用性が示された。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

Koji MATSUMOTO, Hirofumi YAMAGUCHI, Kohei NAGAI: Fatigue Pull-out Failure of Deformed Bars in Concrete under the Effect of Liquid Water, Cement and Concrete Composites, Vol. 91, August, pp.198-208, 2018.

Liyanto EDDY, Koji MATSUMOTO, Kohei NAGAI, Piyaphat CHAEMCHUEN, Michael HENRY, Kota HORIUCHI: Investigation on Quality of Thin Concrete Cover using Mercury Intrusion Porosimetry and Non-destructive Tests, Journal of Asian Concrete Federation, Vol.4, No.1, pp.47-66, 2018.

Rajamurugan SUNDARAM, Koji MATSUMOTO, Kohei NAGAI, Anupam AWASTHI: Visual Investigation Method and Structural Performance Evaluation for DEF Induced Damaged Indian Railway PC Sleepers, Journal of Asian Concrete Federation, Vol.4, No.2, pp.103-115, 2018.

安藤陽子, 片山哲哉, 浅本晋吾, 長井宏平: インドで発生した PC 枕木のひび割れの原因究明と ASR および DEF の相互作用, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.909-914, 2018.

Daisuke HAYASHI, Kohei NAGAI, Liyanto EDDY: Mesoscale Analysis of RC Anchorage Performance in Multidirectional Reinforcement Using a Three-Dimensional Discrete Model, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 143, Issue 7, July, 2017.

Anupam AWASTHI, Koji MATSUMOTO, Kohei NAGAI, Shingo ASAMOTO, Seishi GOTO: Investigation on Possible Causes of Expansion Damages in Concrete - a Case Study of Sleepers in Indian Railways, Journal of Asian Concrete Federation, Vol.3, No.1, pp.49-66, June 2017.

Liyanto EDDY, Kohei NAGAI: Numerical Simulation of Beam-column Knee Joints with Mechanical Anchorages by 3D Rigid Body Spring Model, Engineering Structures, Vol. 126, pp.547-558, 2016.

Liyanto EDDY, Koji MATSUMOTO, Kohei NAGAI: Effect of Perpendicular Beams on Failure of Beam-column Knee Joints with Mechanical Anchorages by 3D RBSM, Journal of Asian Concrete Federation, Vol. 2, No. 1, pp. 56-66, 2016.

Koji MATSUMOTO, Tao WANG, Daisuke HAYASHI, Kohei NAGAI: Investigation on the Pull-out Behavior of Deformed Bars in Cracked Reinforced Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.14, No.9, pp.573-589, 2016.

〔学会発表〕(計 11 件)

Liyanto EDDY, Koji MATSUMOTO, Kohei NAGAI, Zhen WANG: Investigation of Effect of Local Bond Model on Crack Propagation in RC using 3D RBSM, Proceeding of the Computational Modelling of Concrete and Concrete Structures (Euro-C 2018), pp.755-766, 2018.

Ahmed OKEIL, Koji MATSUMOTO, Kohei NAGAI: Investigation on Local Bond Deformations in Concrete and Cement Paste by Using DIC, Proceedings of Academicera 15th International Conference, pp. 32-37, 2018.

Punyawut JIRADILOK, Kohei NAGAI, Koji MATSUMOTO: Development of Spatial Corrosion Damage Simulation Based on Rigid Body Spring Model, Proceedings of 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, pp. 467-475, 2018.

Kohei NAGAI, Punyawut JIRADILOK, Koji MATSUMOTO: Development of Bond Deterioration Model in Corroded RC Member for Discrete Analysis Model, Proceedings of 17th International Symposium on New Technology for Urban Safety of Mega Cities in Asia (USMCA), Paper No.08, 2018. (in Conference USB).

Koji MATSUMOTO, Kohei NAGAI, Rajamurugan SUNDARAM, Anupam AWASTHI: Cause Estimation and Proposal of Inspection Method for Damaged PC Sleepers of Indian Railways, Proceedings of 17th International Symposium on New Technology for Urban Safety of Mega Cities in Asia (USMCA), Paper No.09, 2018. (in Conference USB).

Kohei NAGAI, Liyanto EDDY: A Study on the Effect of Diagonal Cracks Opening on the Failure Behavior of RC Beam-column Join with Mechanical Anchorage by 3D RBSM, Proceedings of the 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-9), 2016. (DOI 10.21012/FC9.114)

Daisuke HAYASHI, Kohei NAGAI: Meso-scale Approach to Investigate the Bond Performance of Anchorage in Reinforced Concrete, Proceedings of the 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-9), 2016. (DOI 10.21012/FC9.123)

Punyawut JIRADILOK, Kohei NAGAI, Koji MATSUMOTO, Liyanto EDDY: Development of Rebar Corrosion Expansion Model based on 3D RBSM Simulation, Proceedings of The 6th International Conference of ACF (ACF2016), 2016. (in Conference USB)

Anupam AWASTHI, Kohei NAGAI, Shingo ASAMOTO, Seishi GOTO: Study of Possible Causes of Premature Cracking of Sleepers in Indian Railways, Proceedings of The 6th International Conference of ACF (ACF2016), 2016. (in Conference USB) (in Conference USB)

Tao WANG, Koji MATSUMOTO, Kohei NAGAI: Effect of Transverse Bar on Anchorage Performance in Damaged RC with Mechanical Anchorage, Proceedings of the 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, pp.485-492, 2016.

Liyanto EDDY, Anupam AWASTHI, Koji MATSUMOTO, Kohei NAGAI, Shingo ASAMOTO: Mesoscopic Analysis of Different Expansion Causes in Concrete by 3D Rigid Body Spring Mode, Proceedings of 15th International Symposium on New Technology for Urban Safety of Mega Cities in Asia (USMCA), 2016. (in Conference USB)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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、研究者個人に帰属されます。