

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02302

研究課題名(和文)革新的応力測定技術に基づくコンクリート用補強材の形態最適化

研究課題名(英文)Form Optimization of Reinforcing Materials for Concrete Based on the Novel Stress Measurement Techniques

研究代表者

兼松 学 (Kanematsu, Manabu)

東京理科大学・創域理工学部建築学科・教授

研究者番号：00312976

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、最適な補強材の形態は何か？という問いに応えることを目的とし、革新的な非破壊測定技術である中性子回折法を核とした一連の実験的・解析的検討を行った。表面形状の異なる異形鉄筋の付着応力について、中性子回折法および3Dプリンティング技術を用いた自由形状の繊維補強材による実験的を行い、汎用FEMにおけるメソスケール解析により検証した。解析では形状変化が付着特性に及ぼす影響を定性的に評価可能であることを示した。自由形状の補強材を用いた実験では、形状変化が付着応力の増大に及ぼす影響は小さい一方で、機械式の定着機構を有する補強材はすべり挙動の抑制に影響を及ぼすことを実験的・解析的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、「表面処理や節形状、配筋方法が鉄筋コンクリートの付着にどのように影響を与えるか？」について、中性子回折法でしか得られない付着応力分布の非破壊分析により実験的・実証的に明らかにするとともに、FEMによるメソスケール解析による評価手法の構築を行った。これらは、現在の鉄筋コンクリート構造の評価につながるだけでなく、今後、環境対応コンクリートやジオポリマーコンクリート、3Dプリンティングコンクリートなど新たな材料の出現に伴い必要とされる新たな補強材の評価および最適形状の探求に貢献するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study conducted a series of experimental and analytical investigations using an innovative nondestructive measurement technique, neutron diffraction, as a core technique, aiming to answer the question, "What is the optimal form of reinforcement for RC?" The bond stress of deformed steel bars with different surface geometries was experimentally investigated using free-form fiber reinforcement by neutron diffraction and 3D printing techniques and verified by mesoscale analysis in a general-purpose FEM. The analysis showed that it is possible to evaluate the effect of shape change on adhesion properties qualitatively. Experiments with free-form reinforcement showed experimentally and analytically that shape change has little effect on the increase in bonding stress. In contrast, it is confirmed that the reinforcement with a mechanical anchorage mechanism affects the suppression of sliding behavior.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：中性子回折法 メソスケール解析 鉄筋 付着 自由形状補強材 応力測定

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(RC)構造物は複合構造物であることから、力学的挙動の評価においては、各材料の構成則と並んで付着構成則の取り扱いが重要となる。

一方で、実際の構造物には径や形状の異なる様々な補強材が用いられており、これらの形状の差異は、付着挙動に影響を及ぼすことが知られている。このような理由から、補強材の表面形状に着目した研究が古くから実施されているが、あらゆる形状の補強材を対象に実験を実施し、付着構成則を明らかにすることは困難である。加えて、新材料および新工法の社会実装に伴い、将来的には補強材の形状および配筋方法は、現在の RC 構造物とは大きく異なることも予測される。したがって、形状の異なる補強材の付着挙動を統一的に評価可能な解析モデルを構築することが可能となれば、将来的な RC 部材の力学的挙動評価における意義は大きい。

2. 研究の目的

以上を背景に、本課題では、次世代の補強材の可能性を探索すべく、革新的な非破壊測定技術である中性子回折法^{たとえば1)}により、「表面処理や節形状、配筋方法が鉄筋コンクリートの付着にどのように影響を与えるか？」について明らかにすることを目的とした。

具体的には、従来鉄筋コンクリート造を想定し、鉄筋の形状や表面処理が付着(応力伝達)に及ぼす影響を中性子回折法により完全非破壊で明かにし、メソスケールの3次元 FEM 解析モデルを構築して検証した。さらには、3D プリンティング技術を念頭に、提案モデルの適用性の検討と中性子回折法による検証を行い、構築モデルを用いた鉄筋の形状や表面処理の最適化手法について検討を行った。

3. 研究の方法

本研究では、まず、メソスケール解析モデルの構築を目的とし、実験および解析の両面から補強材の形状が付着挙動に及ぼす影響を検討した。具体的には、表面形状が異なる補強材および自由な形状の補強材を対象に、実験的検討として引抜試験(3.(1))および中性子回折法(3.(1))を、解析的検討(3.(2))として汎用 FEM 解析ソフトウェアによるメソスケール解析を行うことで、補強材の形状と付着挙動の関係に関する詳細な検討を行った。

次に、CFRP および金属の 3D プリンティング技術を用いて作製した自由形状の鉄筋の付着特性を、引抜試験および中性子回折法を用いて検証(3)するとともに、構築したメソスケール解析により結果を検証(3)し、鉄筋形状の最適化の可能性を探った。

(1) 鉄筋の表面形状が付着挙動に及ぼす影響の評価

市販の表面形状の異なる異形鉄筋(図1)を対象に、引抜試験および中性子回折法を実施し、表面形状が付着挙動に及ぼす影響を検討した。引抜試験の水準は、鉄筋径(D13, D16)および拘束の有無とした。引抜試験の試験体概要を図2に、中性子回折法に用いた試験体の概要を図3に示す。試験体は打設後24時間で脱型し、材齢14日まで20%の水中養生を行い、その後、材齢28日まで60%の機械乾燥を実施した。

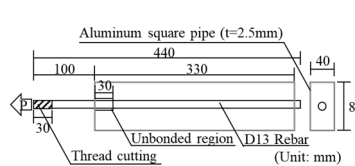
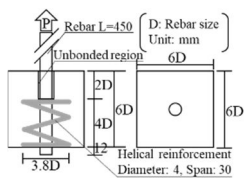


図1 鉄筋の表面形状

図2 引抜試験体の概要

図3 中性子回折法に使用した試験体

引き抜き試験

引き抜き試験による実験では、試験台に乗せた試験体から鉄筋を引抜く際に生じる荷重を専用の引き抜き試験機により測定し、付着応力を算出した(式(1))。また、自由端部においては、鉄筋の自由端すべり量(Sf)を測定した。

$$\tau = P / (4 \cdot D^2) \quad (1)$$

ここで、 τ : 付着応力, P : 引張荷重, D : 鉄筋の公称直径。

中性子回折法

鉄筋の応力測定には、日本原子力研究開発機構の中性子応力測定装置(RESA)を用いた。RESAでは、載荷前後における鉄筋の格子ひずみの変化から、コンクリート内部の鉄筋応力を完全非破壊・非接触で測定することが可能である。鉄筋応力は、付着区間のはじまりを0mmとして10mmから180mmまでの範囲を10mm間隔、180mmから260mmまでの範囲を20mm間隔で測定し、載荷応

力は 8MPa および 250MPa の 2 水準とした。なお、実験の実施に当たっては改めて中性化回折法の精度検証を行い、同手法の測定プロトコルを同定した²⁾。

(2) メソスケール解析の検討

3.(1)で実施した付着試験を対象に、汎用 FEM 解析ソフトウェアを用いたメソスケール解析を実施し、形状の異なる補強材の付着挙動評価におけるメソスケール解析の適用性を検討した。解析モデルの一例を図 4 に示す。コンクリートには、ひび割れ、塑性変形等の機能を有する 8 節点の 3D ソリッド要素³⁾を使用し、補強材には、大変形等の機能を有する 8 節点の 3D ソリッド要素を使用した。本解析におけるコンクリートと補強材の応力-ひずみ関係は実測および文献調査により設定し、補強材とコンクリートとの界面には、接触、すべり等の機能を有する界面要素を使用し³⁾、界面における摩擦係数等のパラメータは Zhao et al.³⁾の報告を参考に設定した。

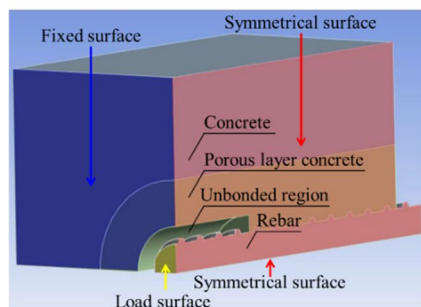


図 4 解析モデルの一例 (D13 竹節)

(3) 自由形状の補強材の表面形状が付着挙動に及ぼす影響の評価

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)および金属 3D プリンティング技術を用い、市販の異形鉄筋とは異なる自由な形状の補強材を作製した。形状水準は、竹節を模擬したもの(3DP(B))に加え、波型形状のもの(3DP(W))、ねじり形状のもの(3DP(T))の 3 水準とした。図中に補強材の名称を合わせて示す。これらの付着特性を、引抜試験および中性子回折法を用いて検証した。引抜試験および中性子回折法による付着特性評価は、3.(1) および に準じて同様の手法により行った。

さらに、3.(2)で構築したメソスケール解析により測定結果を検証した。

4. 研究成果

(1) 鉄筋の表面形状が付着挙動に及ぼす影響

3.(1) の引抜試験により得られた実験結果の例として、D13 の場合の付着応力-自由端すべり量 ($-S_f$) 関係を図 5 に示す。また、中性子回折法により鉄筋応力分布を得るとともに、図 5(b) の $-S_f$ 関係を用いて局所 $-S(-S_{local})$ を算出した。さらに、 $-S_{local}$ 関係を逐次積分⁴⁾することにより鉄筋応力分布を得た。

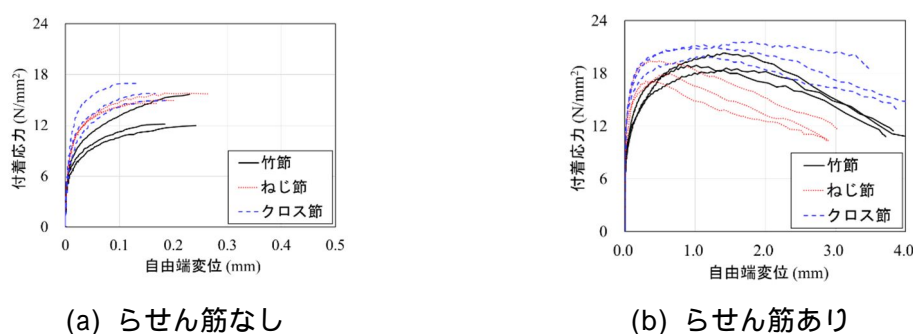


図 5 $-S_f$ 関係 (D13)

一連の結果より、クロス節における鉄筋応力の減少勾配は、その他の表面形状と比較して緩やかな傾向にあるものの、全体として表面形状が応力分布に及ぼす影響は小さく、 $-S_{local}$ 関係においてすべり量の小さい範囲 ($S < 0.1\text{mm}$) の付着挙動のみしか応力分布に影響を及ぼさないことが確認された。一方で、引抜試験においては、節形状の高さと節間隔の比 (H/L) に着目した分析を行い、棋王研究と同様に表面形状の異なる異形鉄筋の付着挙動については H/L が影響を及ぼすことを確認した。また今回用いた市販の鉄筋形状の中では、 H/L の大きいねじ節においては、節頂部を結ぶせん断破壊が生じるため、らせん筋を有する試験体の最大付着応力は小さくなることが明らかとなった。

(2) 自由形状の補強材の付着特性評価

形状の自由形状の CFRP ロッドおよび鉄筋に対して、引抜試験による載荷応力-自由端すべり

量(σ - σ_f)を得た。また,中性子回折法により自由形状の補強材の応力分布を得た。

一連の実験結果から, σ - σ_f 関係に着目すると,同応力における σ_f は 3DP(W) 3DP(T) Reb(B), 3DP(B)の順に大きく,3DP(W)の σ_f はその他と比較して約3倍大きい結果となった。一連の実験結果より,波打ちやねじり等の形状が付着応力の増大に及ぼす影響は小さいこと,機械式定着は補強材のすべり挙動を抑制すること,市販の鉄筋形状はその他の水準と比較して高い付着性能を有することなどが明らかとなった。

(3) メゾスケール解析による検証

図 5(a)には,それぞれの各実験に対応する解析結果を示した。また,得られた局所 σ (σ_{local})および σ - σ_{local} 関係を逐次積分することにより得た鉄筋応力分布の解析結果から,竹節およびクロス節の付着応力の大小関係を定性的に評価可能であることが分かる。一方で,詳細な検証によりねじ節などに見られたコンクリートのせん断破壊の影響は評価できないなどの課題が見いだされた。解析結果における応力減少勾配は,3DP(B),3DP(T)および 3DP(W)の順に大きく,本研究の解析モデルは補強材の形状変化に起因する応力減少勾配の大小関係を定性的に評価可能であることが確認された。

- 1) 兼松 学,野口貴文,安田正雪,鈴木裕士:残留応力解析用中性子回折装置(RESA)による鉄筋応力の非破壊測定,コンクリート工学年次論文集,Vol.30,No.2,pp.775-780,2008.7
- 2) Ayumu Yasue, Mayu Kawakami, Kensuke Kobayashi, Junho Kim, Yuji Miyazu, Yuhei Nishio, Tomohisa Mukai, Satoshi Morooka, Manabu Kanematsu; Accuracy of Measuring Rebar Strain in Concrete Using a Diffractometer for Residual Stress Analysis, Quantum Beam Science, vol.7, No.2, pp.15-, 2023.4
- 3) W. Zhao et al.: Basic Parameters Test and 3D Modeling of Bond between High-Strength Concrete and Ribbed Steel Bar after Elevated Temperatures, Struct. Concr., Vol.18, No.5, pp.653-667, 2017

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 小林謙祐, 西尾悠平, 兼松学	4. 巻 -
2. 論文標題 異形鉄筋の節形状がコンクリートとの付着特性に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 233 234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 Yasue Ayumu, Kawakami Mayu, Kobayashi Kensuke, Kim Junho, Miyazu Yuji, Nishio Yuhei, Mukai Tomohisa, Morooka Satoshi, Kanematsu Manabu	4. 巻 7
2. 論文標題 Accuracy of Measuring Rebar Strain in Concrete Using a Diffractometer for Residual Stress Analysis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Quantum Beam Science	6. 最初と最後の頁 15 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/qubs7020015	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 小林 謙祐, 安江 歩夢, KIM JUNHO, 西尾 悠平, 宮津 裕次, 向井 智久, 兼松 学	4. 巻 -
2. 論文標題 中性子回折法の測定時間が鉄筋応力測定精度に及ぼす影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 161-162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 小林謙祐, 安江歩夢, 諸岡聡, 兼松学	4. 巻 44
2. 論文標題 異形鉄筋の表面形状が鉄筋コンクリートの付着性能に及ぼす影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 208 - 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 川上真由, 安江歩夢, 小林謙祐, 兼松学	4. 巻 45
2. 論文標題 メソスケール解析による表面形状の異なる異形鉄筋の付着挙動評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 190-195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 小林謙祐
2. 発表標題 異形鉄筋の節形状がコンクリートとの付着特性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林 謙祐
2. 発表標題 中性子回折法の測定時間が鉄筋応力測定精度に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川上真由
2. 発表標題 メソスケール解析による表面形状の異なる異形鉄筋の付着挙動評価
3. 学会等名 コンクリート工学年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ayumu Yasue
2. 発表標題 Influence of Rib Pattern of Deformed Bars on Bond Performance of Reinforced Concrete
3. 学会等名 International Conference on Regeneration and Conservation of Structures (ICRCS 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022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	諸岡 聡 (MOROOKA SATOSHI) (10534422)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター・研究副主幹 (82110)	
研究分担者	西尾 悠平 (YUHEI NISHIO) (20793334)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任研究員 (12601)	
研究分担者	向井 智久 (TOMOHISA MUKAI) (30318208)	国土技術政策総合研究所・建築研究部・室長 (82115)	
研究分担者	宮津 裕次 (YUJI MIYAZU) (70547091)	東京理科大学・創域理工学部建築学科・准教授 (32660)	

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