

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01408

研究課題名（和文）鉄筋の付着・定着挙動とその応力伝達メカニズムの明確化

研究課題名（英文）Clarification of bond and anchorage behavior and its stress transfer mechanism of deformed reinforcement bar

研究代表者

中村 光（NAKAMURA, HIKARU）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：60242616

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）：コンクリート構造物の鉄筋の付着・定着に関わる各種問題に対して、実験ならびに数値解析により損傷進展挙動や応力伝達メカニズムを検討した。

その結果、定着フックに対しては、引抜き時に複雑な曲げ変形挙動が生じ、すべり挙動やフック内の応力伝達機構に影響を与えることを明らかにした。重ね継手に対しては、重ね継手間の応力伝達挙動や割裂破壊に至るひび割れ進展挙動を明らかにした。また、孔あき鋼板ジベル（PBL）のせん断耐力に孔内に設置する鋼材の付着が影響するメカニズムを明らかにした。さらに繊維補強コンクリートを扱える剛体バネモデルを開発し、繊維補強コンクリートの付着・定着性能を解析可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリート構造物では、鉄筋の付着・定着に係わる構造細目は、数10年前に規定されたものが殆どで、その幾つかはその力学的根拠も説明することが困難となっている。

本研究は、実験と付着やコンクリートのひび割れ進展挙動を精度よく評価できる剛体バネモデルを用いて、付着・定着に関わるいくつかの問題のメカニズムを明らかにした。これにより、従来「暗黙知」であった問題を「形式知」に変えることが可能になり、合理的なコンクリートの構造細目の設定や、構造細目の照査の道筋がつけられた。このことは、設計に対する貢献だけでなくコンクリート構造物の施工の合理化につながり、コンクリート工の生産性向上に寄与する。

研究成果の概要（英文）：The experiments and numerical analyses to investigate the damage propagation behavior and stress transfer mechanism of several problems related to the bond or anchorage of reinforcement bars in concrete structures were conducted.

As a result, regarding anchorage hook, it was clarified that complex bending deformation behavior occurs during pullout, affecting the slip behavior and stress transfer mechanism within the hooks. Regarding the lap splices, the stress transfer behavior between lap portion and the crack propagation behavior following to splitting failure was revealed. In addition, the mechanism by which the bond of reinforcing bars installed within holes affects the shear capacity of perforated steel plates was clarified. Furthermore, a rigid spring model capable to simulate fiber reinforced concrete (FRC) was developed, enabling the analysis of the bond and anchorage performance of FRC.

研究分野：コンクリート構造

キーワード：付着 構造細目 フック 重ね継手 損傷進展 応力伝達メカニズム 剛体バネモデル 繊維補強コンクリート

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の構造細目(かぶり、鉄筋のあき、鉄筋の配置、鉄筋の曲げ形状、鉄筋の定着、鉄筋の継ぎ手)は、経験的に決定された事項が多く、その根拠の明確化が望まれている。例えば、配筋詳細に関しては、耐震要求性能の高まりで配筋が過密となる場合が多く、良好な施工の実施や生産性向上の観点から、より合理的な構造細目の規定や妥当性の確認方法の検討が望まれている。しかしながら、構造細目は、かなり前の知見に基づき限られた実験や経験的に決定された事項が多く、規定された時代を考えれば内部のひび割れ進展など詳細な現象の理解を踏まえていない可能性が高い。例えば、土木学会コンクリート標準示方書設計編において、鉄筋定着に最も関係する鉄筋端部の標準フックの規定は、半円形フック・鋭角フックについては昭和42年版から、直角フックについては昭和49年版から現行と同様の記述が導入されており、現在まで変更されていない。

このような状況にも関わらず、従来、鉄筋の付着や定着問題を体系的に検討した研究は見当たらず、構造細目規定の見直しをするのに十分な実験データは存在しない。またある程度の実験データが存在しても、現在の規定の見直しには困難さが予想される。これは、現状の規定に従うことで、コンクリート構造物は問題なく構築されてきたため、その変更を限られた数のデータで行うモチベーションが起きにくいと考えられるためである。それ故、体系的な実験でデータの蓄積を行うとともに、構造細目規定時のデータが取られた過去には実施できなかった最新の計測技術や数値解析技術で、内部のひび割れ進展などの詳細な損傷進展挙動や応力伝達メカニズムを明らかにすることが求められている。損傷進展挙動とメカニズムの明確化は、構造細目規定を見直し、より合理的なコンクリート構造物を構築するという更なる学術的課題に結びつく。

### 2. 研究の目的

鉄筋の付着および定着挙動に関する現状の構造細目規定を力学的な根拠に基づいて合理的に見直すための知見を得るために、体系的な実験と最新かつ多様な計測方法に加え、最新の数値解析技術を用いて、各種要因に対する内部ひび割れなどの損傷進展を明らかにしながら、その応力伝達メカニズムの明確化を試みることを目的とする。

本研究では、鉄筋の付着および定着挙動に関する各種問題を対象とし、定着フック、重ね継手、孔あき鋼板ジベル(PBL)の孔内に設置する鉄筋、プレート定着型せん断補強筋(PHB)に対する内部のひび割れ進展などの損傷進展挙動や応力伝達メカニズムを明らかにする。さらに、近年活用が増えている繊維補強コンクリートを用いた場合の付着や重ね継手について、数値解析により損傷過程や繊維補強の効果を明らかにする。

### 3. 研究の方法

鉄筋の付着および定着挙動に関する各種問題に対し、各種要因を考慮した体系的な実験(載荷試験側面)、コンクリート供試体内面および表面のひび割れ等損傷計測(計測側面)、各種要因に対する内部損傷進展や応力伝達挙動の理解のための数値解析(数値解析側面)の3つの側面から検討を行う。

特に本研究では、コンクリートのひび割れ進展や鉄筋との付着挙動を精度よく評価できる3次元剛体バネモデル(3D-RBSM)を用いて、実験では検討できない内部のひび割れ進展挙動や応力分布を検討することで付着・定着メカニズムの明確化を試みる。

### 4. 研究成果

定着フック、重ね継手、孔あき鋼板ジベル(PBL)の孔内に設置する鉄筋、プレート定着型せん断補強筋(PHB)に対する内部のひび割れ進展などの損傷進展挙動や応力伝達メカニズムの検討、さらに、繊維補強コンクリートに対する解析手法を新たに開発し、繊維補強コンクリートに対する付着や重ね継手の検討を行った。紙面の関係上、定着フック、重ね継手、繊維補強コンクリート内の鉄筋付着に対する研究成果の一部を本報告書では記す。

#### 4.1 定着フックの引抜き挙動の各種要因の影響評価とメカニズムの明確化

定着フックの引抜き挙動に関しては、実験では直線鉄筋を含むフック形状、曲げ内半径、かぶり、端部定着長さなど様々な要因を変化させた実験と対応する数値解析を行った。また、測定に関しては、光ファイバーによるフック部の連続的なひずみ計測、画像相関法によるひずみやひび割れ進展計測を行った。ここでは、曲げ内半径を変えた実験と解析の結果とフックの定着メカニズムを検討した結果を示す。

##### (1) 実験方法

引抜き試験に用いた供試体の概要を図-1に示す。供試体は定着具としての半円形フックの定着性能を評価することを目的とした。使用した鉄筋はD22の高強度ネジ節鉄筋で、降伏応力は1031N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数は201kN/mm<sup>2</sup>である。コンクリートの圧縮強度は、31.2N/mm<sup>2</sup>である。供試体は、曲げ内半径1.5、2.5、3.5の3通りとし、余長4の半円形フックを端部に有す

る鉄筋を、埋め込み深さを 12 としてかぶりが 12 となる供試体中央に配置した。なお、曲げ内半径に関して示方書では、異形棒鋼を用いた軸方向鉄筋のフックでは、SD395 で 3.5 以上とされているが、施工性の観点からフックの曲げ内半径の縮小化が求められており、本試験では曲げ内半径を 3.5 以下のものも行った。フック部に十分な応力を伝達させるため、フック部以前の直線部については、鉄筋の節間を粘土で充填した上でビニールテープを巻くことで付着を除去した。荷重は手動のセンターホール型油圧ジャッキにより行い、引抜き荷重と鉄筋ひずみ分布を計測した。鉄筋ひずみ分布の計測は図 - 1 に示す位置のフック部の外縁側と内縁側にそれぞれ貼付することで、かぶり厚ならびにフック部の曲げによる鉄筋両側でのひずみ進展挙動の違いを確認出来るようにした。さらに、実験中はかぶり面の様子を連続的にデジタルカメラで撮影し、画像相関法を用いてかぶり面のひび割れ進展挙動を観察した。

### (2) 解析方法

解析は、名古屋大学コンクリート研究室が開発と適用を進めている 3 次元剛体バネモデル(3D-Rigid Body Spring Model、以下 3D-RBSM)を用いて行った。3D-RBSM は、剛体要素間に配置したバネにより対象の力学挙動をシミュレートする数値解析手法である。本研究では、Voronoi 分割によりランダム形状を有する剛体要素の各境界面にバネを配置することでコンクリートをモデル化した。組立筋を含む全ての鉄筋ははり要素の断面を分割したファイバー要素でモデル化し、コンクリート要素とはり要素は図 - 2 に示すようなリンク要素を介して応力を伝達する。Voronoi 要素でモデル化したコンクリートとはり要素でモデル化した鉄筋のリンク要素に図-2 中に示す付着応力すべり関係を導入することで、異形鉄筋を節までモデル化したメソスケール解析と同様の鉄筋直線部における付着挙動や付着ひび割れ進展挙動を精度よく再現できることが代表者らの研究で明らかになっている。

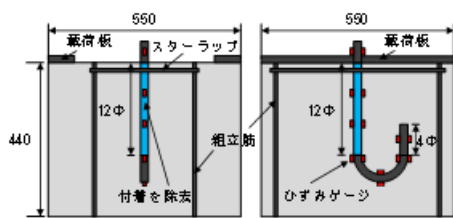


図 - 1 供試体概要

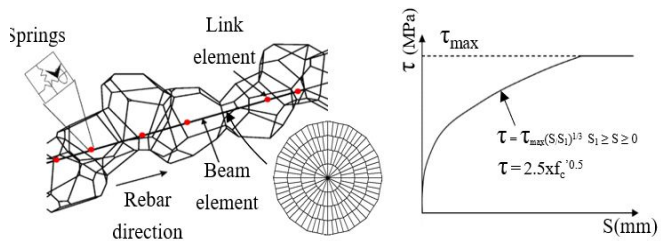


図 - 2 コンクリート・鉄筋要素および付着応力すべり関係

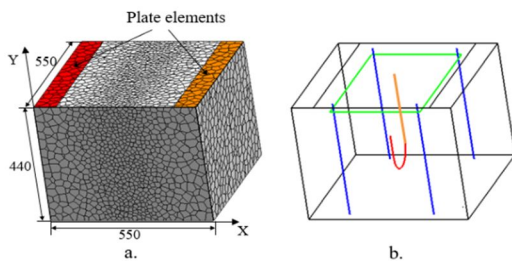


図 - 3 解析モデル

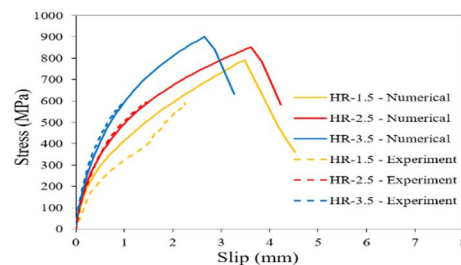


図 - 4 引抜き応力 - すべり関係

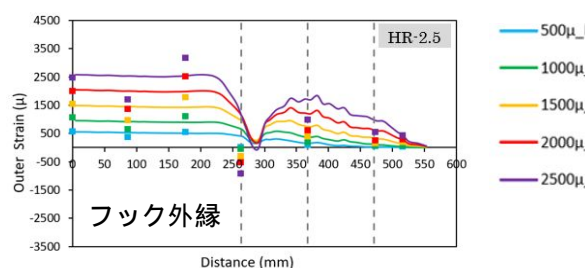
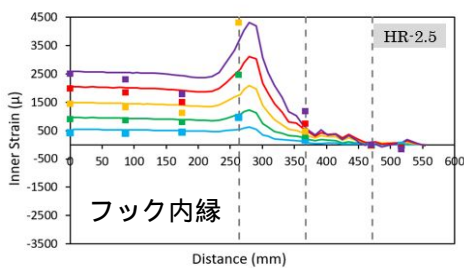


図 - 5 フック内外縁の鉄筋のひずみ分布の実験値と解析値

### (3) 実験結果および解析結果

解析モデルを図-3 に実験ならびに解析より得られた引抜き応力 - すべり関係を図 - 4 に示す。なお、実験では油圧ジャッキの関係で破壊までの荷重はできず、途中で荷重を中止している。図 - 4 より曲げ内半径に拘わらず解析は実験結果を精度よく評価できることが確認された。また、解析では最大荷重は割裂破壊で決定しているが、曲げ内半径が小さいほど引抜き量が大きくなるとともに、最大荷重が小さくなり割裂破壊が早期に生じることが示された。

図 - 5 に曲げ内半径 2.5 の場合のフックの曲げ内側(内縁)と外側(外縁)のひずみゲージの値と解析値の比較を示す。図には、引抜き部の鉄筋のひずみが 500 μ ~ 2500 μ (応力が約 100N/mm<sup>2</sup> ~ 500N/mm<sup>2</sup>) 間の段階的な実験値を四角印で、解析値を実線で示している。実験ならびに解析から、フック部内外のひずみの挙動は大きく異なりまた局所的に大きな値を示し、フック部は引抜き時に複雑な曲げ変形挙動を示していることが明らかになった。

### (4) フックの定着メカニズム



図-6 に数値解析により得られた曲げ内半径 2.5 の場合の最大荷重直後のコンクリートのひび割れ図および応力図、フック部の変形図を示す。内部のひび割れ図および応力図はフックを含む平面内の挙動を示している。フックの変形図から、ひずみ分布で確認したように引抜き時にフックは非常に複雑な曲げ変形挙動をしていることが分かる。また大きな曲げ変形部近傍にコンクリートに大きな応力が発生していることから、フック部の曲げ変形が引抜き抵抗機構と密接に関係していることが明らかになった。さらにフックの曲げ変形挙動は余長部が直線形状を保つことでフック内部に応力場を形成させていることが分かり、余長部がすべり挙動だけでなく応力伝達挙動に対し重要な役割を果たしていることが明らかになった。

以上の結果から、フック部の損傷進展挙動や応力伝達メカニズムを明らかにした。また、3D-RBSM を用いることでフックなどの付着・定着問題を数値解析により検討できるとともに、性能評価手法として活用できることを示すこともできた。

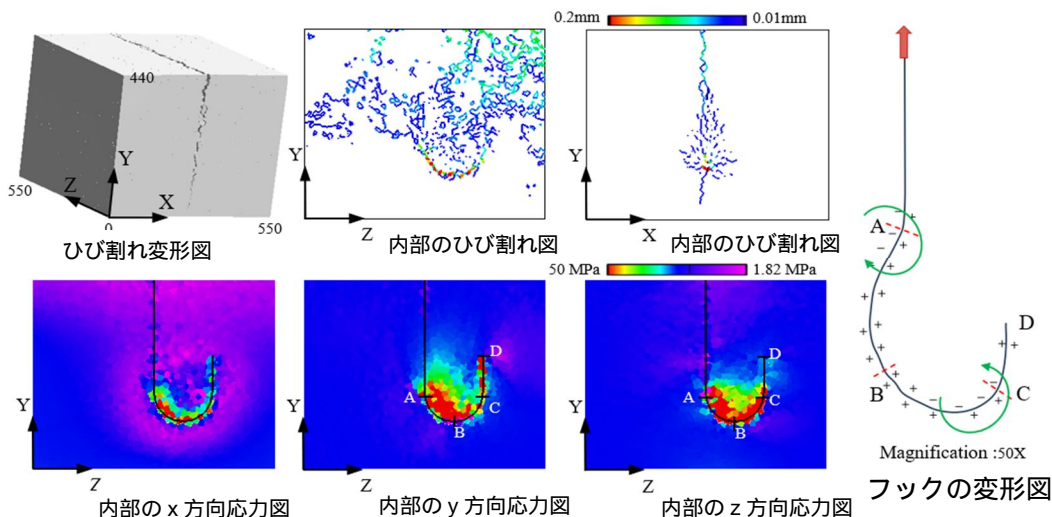


図 - 6 曲げ内半径 2.5 の最大荷重直後の各種挙動

#### 4.2 重ね継手の損傷進展挙動とメカニズムの明確化

重ね継手のあき間隔やかぶりを変えた既往の実験結果を 3D-RBSM で評価可能なことを確認したうえで、重ね継手長さ、あき間隔、かぶりを変えた系統的な数値解析を行い、内部のひび割れ進展などの損傷進展挙動や応力伝達メカニズムの検討を行った。以下では、解析結果の一例を示し、本研究で明らかにしたひび割れ進展挙動や応力伝達メカニズムを示す。

##### (1) 解析モデルとひび割れ進展・応力伝達挙動

図-7 に解析対象モデルを示す。供試体は、幅 400mm、高さ 150mm、長さ 520mm s w、D16 鉄筋をかぶり 75mm で配置し重ね継手長さは 320mm とした。鉄筋の重ね継手区間以外は付着除去区間（図中緑部）とし、その長さは 100mm とした。コンクリートの圧縮強度は 30N/mm<sup>2</sup>、引張強度は 2.2N/mm<sup>2</sup> とした。荷重は、供試体端部の鉄筋全てに引張力を作用させる両引き荷重とした。

図-8 に最大荷重時および荷重低下直後の重ね継手鉄筋位置断面におけるひび割れ図および鉄筋軸方向に働く応力分布、重ね継手区間中央部の断面内のひび割れ性状と断面幅方向に働く応力分布を示す。最大荷重時では継手区間全域に内部ひび割れが生じ、応力図も重ね継手鉄筋間に緑色の圧縮ストラット応力域を形成している。また、2 組の重ね継手それぞれの周辺部に、点対称な引張応力域が形成されている。これは、それぞれの重ね継手の組に着目すると、鉄筋の両引きを行うことで偶力が働くことになり、その結果として応力図に示すような引張応力域が形成されたと考えられる。荷重低下後、重ね継手部の内部ひび割れが、上記の引張応力域に進展し、側面表面にまで到達していることが分かる。一方断面内では、最大応力時に重ね継手鉄筋周囲に内部ひび割れが発生するとともに、重ね継手の上下部では幅方向の引張応力が発生している。その後、重ね継手鉄筋間を通り、上下方向に進展する割裂ひび割れが発生し、荷重低下が生じることが明らかになった。

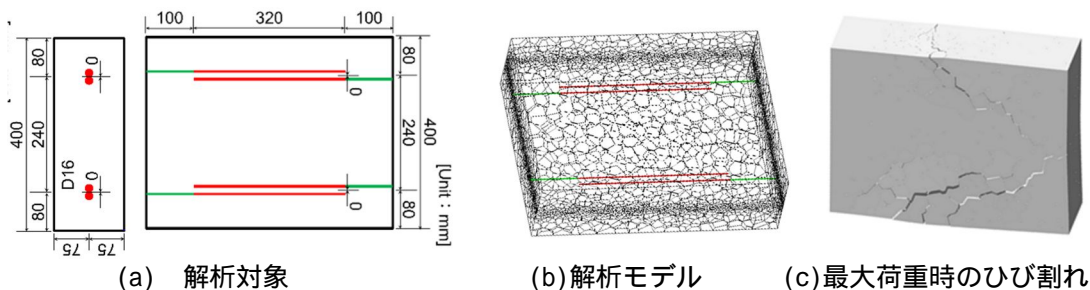
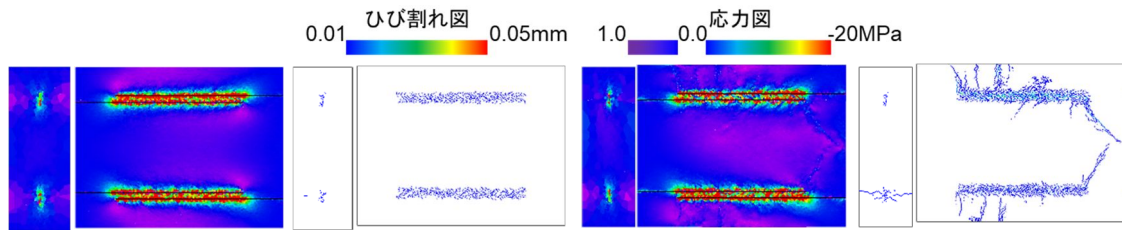


図 - 7 重ね継ぎ手の解析対象



(a)最大荷重時の応力とひび割れ図 (b) 最大荷重直後の応力とひび割れ図  
 図 - 8 重ね継手部周辺の応力分布とひび割れ状況

### (2) 重ね継手の破壊メカニズムの明確化

解析結果から重ね継手では図 - 9 に示すようなメカニズムで破壊が生じることが明らかとなった。まず、重ね継手のそれぞれの鉄筋は両引きを受けると、異形鉄筋のふしによる機械的な抵抗によって、図のような青い方向に放射応力が発生する。重ね継手鉄筋間では、2本の鉄筋からのこの放射応力が交わることにより、鉄筋軸に対しておおよそ  $45^\circ$  方向の圧縮ストラット応力が形成される。ひび割れは一般に圧縮主応力方向に沿って生じるため、重ね継手鉄筋間に圧縮ストラット応力の流れに沿った内部ひび割れが発生する。それとともに重ね継手の上下部では鉄筋軸に直交する幅方向の引張応力が発生しており、これら2要因が引き金となり、内部の重ね継手部から表面にかけてほぼ同時に割裂ひび割れが発生して、脆性的な割裂破壊が生じる。

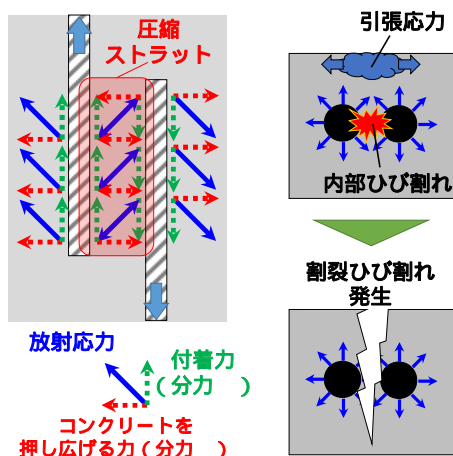


図 - 9 重ね継手部の破壊メカニズム

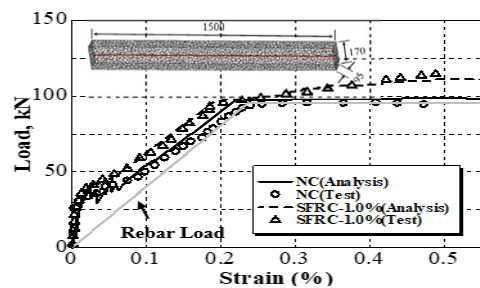
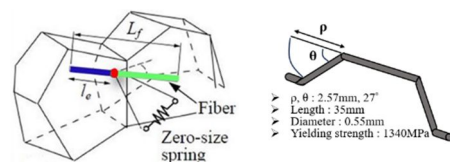


図 - 10 繊維補強コンクリートのモデル化とテンションスティフニング解析

### 4.3 繊維補強コンクリートに対する付着・定着解析が可能な手法の開発

3D-RBSM を鋼繊維および有機繊維を混入した繊維補強コンクリートにも適用できるように拡張した。手法は、RBSM のボロノイメッシュ上に繊維がランダムに分布した際に、図 - 10 に示すように繊維が仮想的に配置され、交差するボロノイメッシュの界面にゼロサイズのバネを割り当てる。界面における力は繊維の直線部の付着特性や鋼繊維であれば端部の機械的なフック作用を組み合わせて与えられるモデル化を行った。

図 - 10 中に RC 一軸部材の引張試験で鋼繊維補強コンクリートのテンションスティフニング効果を検討した実験を数値解析で再現した結果を示す。解析手法は、繊維の架橋効果によりテンションスティフニング効果が大きくなる傾向と鉄筋降伏後に更なる荷重増加が生じる効果を再現することに成功した。この結果は、今回の検討で繊維補強コンクリートの定着・付着問題を数値解析で検討することを可能にしたことを意味する。

### 4.4 まとめ

鉄筋の付着および定着挙動に関する各種問題を対象とし、実験を行うと共に、鉄筋をはり要素でモデル化し適切な付着応力 - すべり関係を導入するだけで、付着・定着に関する挙動解析を可能にする 3D-RBSM による数値解析結果を踏まえ、定着フック、重ね継手などの従来暗黙知として扱われていた問題の、損傷進展や破壊メカニズムを明確にすることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Abdullah Muhammad, Nakamura Hikaru, Kawamura Keisuke, Takemura Masashi, Miura Taito	4. 巻 58
2. 論文標題 Experimental study on the effect of different shear reinforcement shapes and arrangement on 3D crack propagation and shear failure mechanism in RC beams	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Structures	6. 最初と最後の頁 105453 ~ 105453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.istruc.2023.105453	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 Shoaib Karam Muhammad, Nakamura Hikaru, Yamamoto Yoshihito, Tahir Muhammad, Hameed Rashid	4. 巻 295
2. 論文標題 Mesoscopic evaluation of the bond behavior of concrete with deformed rebar subjected to passive confinement employing 3D discrete model	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 109790 ~ 109790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfracmech.2023.109790	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 Sarraz Atik, Nakamura Hikaru, Miura Taito	4. 巻 139
2. 論文標題 Mesoscale modelling of SFRC based on 3D RBSM considering the effects of fiber shape and orientation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composites	6. 最初と最後の頁 105039 ~ 105039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cemconcomp.2023.105039	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 Sarraz Atik, Nakamura Hikaru, Kanakubo Toshiyuki, Miura Taito, Kobayashi Hiroya	4. 巻 131
2. 論文標題 Bond behavior simulation of deformed rebar in fiber-reinforced cementitious composites using three-dimensional meso-scale model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composites	6. 最初と最後の頁 104589 ~ 104589
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cemconcomp.2022.104589	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 森大輔、中島達也、中村光、三浦泰人	4. 巻 Vol.44, No.2,
2. 論文標題 端部にフックを有する重ね継手部の数値解析的評価	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 829-834
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 Farooq Usman, Nakamura Hikaru, Miura Taito	4. 巻 252
2. 論文標題 Evaluation of failure mechanism in lap splices and role of stirrup confinement using 3D RBSM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 113570 ~ 113570
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engstruct.2021.113570	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7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 中島 達也
2. 発表標題 曲げ内半径の異なるフックの付着・定着挙動および応力伝達メカニズムの明確化
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会年次学術講演会概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hikaru Nakamura
2. 発表標題 Numerical evaluation on effect of reinforcement detailing of concrete structures using Meso-Scale simulation
3. 学会等名 21th ASEP International Convention (21AIC3) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Atik Sarraz
2. 発表標題 Applicability of proposed steel fiber model based on 3D RBSM to simulate the mechanical behavior of steel fiber reinforced concrete
3. 学会等名 fib Symposium 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Muhammad Abdullah
2. 発表標題 Numerical investigation on influence of vertical shear leg stirrups to shear failure behavior in wide beams using 3D-RBSM
3. 学会等名 fib Symposium 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 濱千代晃平
2. 発表標題 3次元剛体バネモデルによる90度および180度フックの定着メカニズムの考察
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Atik Sarraz
2. 発表標題 Numerical investigation of influence of fiber orientation distribution on bond performance of FRCC using 3D RBSM
3. 学会等名 International Conference Bond in concrete (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 森大輔
2. 発表標題 付着強度が重ね継手部の挙動に及ぼす影響の数値解析的評価
3. 学会等名 令和3年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Research Map、中村光 <a href="https://researchmap.jp/hikaru219">https://researchmap.jp/hikaru219</a>
---

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	三浦 泰人  (Miura Taito)  (10718688)	名古屋大学・工学研究科・准教授    (13901)	

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