

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 4日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656278

研究課題名（和文） 定着・施工性能融合による鉄筋コンクリート構造細目規定のパラダイムシフト

研究課題名（英文） An investigation of detailing of reinforced concrete by the evaluation of performance of anchorage and concrete compaction

研究代表者

長井 宏平 (NAGAI KOUHEI)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：00451790

研究成果の概要（和文）：

複雑な配筋状態での鉄筋コンクリートの定着性能を評価するために、三次元離散解析手法による微細構造解析プログラムを用いて数値解析を実施し、多方向配筋の鉄筋引抜け挙動への影響を再現した。また、施工性能の検討には、粒子法プログラムを適用し、過密配筋への流動の例として鉄筋間隔と骨材量をパラメータに流動解析を実施し、既往の実験との比較を行った。

研究成果の概要（英文）：

Three-dimensional mesoscopic analyses were conducted to evaluate the anchorage performance of reinforced concrete under multi-directional reinforcement arrangement. Also, particle model was adopted to simulate the flow of fresh concrete into the congested region where the concrete was modeled by two-phase model, mortar and aggregate.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート，過密配筋，離散解析

1. 研究開始当初の背景

土木学会コンクリート標準示方書は昭和6年に制定され現在まで改訂が続けられているが、構造性能を発揮するための定着等の構造細目については、経験則に基づき科学的な裏づけが無いまま半世紀以上にわたり改訂されない数値もみられ、根拠が不明になっているものが多く存在し、更には環境作用等により劣化した部材の構造性能を担保するものではない。一方、耐震性能への要求の高まりにより、過密配筋を余儀なくされるケースは増加し、特に部材接合部において鉄筋組立作業時間と施工不良の危険性が増している。構造細目に関しては近年新たな定着具や継ぎ手工法開発が行われる一方、定着長や曲げ、あき等について設計基準を見直すための研究は行われておらず改善の余地を残している。また、施工性能に対しては、材料分離抵

抗性を確保しながら流動性をもつ配合が提案されているが、三次元的な鉄筋配置における通過性などは不明で、鉄筋の配置と流動特性を組み合わせた施工性能評価には至っていない。

2. 研究の目的

本研究は依然として仕様規定に近い構造細目規定に対して、要求される構造部材機能を発揮するための部材定着性能の確保に、定着性能と施工性能の両面からアプローチする。

3. 研究の方法

本研究では離散解析手法の一種である剛体ばねモデルを用い、鉄筋節の幾何形状を直接取り入れたうえで三次元配筋状態における定着性能の検討を行った。既往の研究にお

いて研究代表者らは、コンクリートの微視的な破壊挙動を剛体ばねモデルによって再現することに成功した。本研究では、構築された解析システムに鉄筋要素を加え、付着モデルを組み込むことで、様々な配筋状態における RC 定着部の破壊挙動を解析的に再現、検討することを試みる。まず始めに、引抜き鉄筋を中心に埋め込んだ、かぶりの薄いシリンダー試験体の引抜き解析を再現し、実験と比較することで1本の引抜き挙動の再現性を確認する。その上で、横方向筋を有するかぶりの薄い矩形試験体に埋め込んだ端部形状の異なる鉄筋の引抜き解析を行い、破壊形態の違いと定着性能の検討を行った。さらに、横方向筋量を変化させた複数鉄筋の引抜き解析を行い、鉄筋による拘束効果の再現性の検討を行った。最後に、過密鉄筋下を想定し、鉄筋間のあきが狭い場合での定着性能を検討するため、吉武らにより行われた実験を対象に、解析を行った。

本研究では、川井によって開発された離散解析の一種である剛体ばねモデル(RBSM)を用いて解析を行う。この手法は分割した要素間にばね(垂直ばね,せん断ばね)を設定し、設定したばねが伝達する力の釣り合いを解くことで破壊挙動を再現しようとするものである。しかしながら、RBSMのような離散解析手法では、剛体要素間のばねの特性を材料のマクロな物性から一意に与えることが理論的に難しく、材料特性との等価性は明らかではないという欠点が存在する。これに対し、コンクリート要素のばねに与える構成則を、要素スケールでの材料特性を反映しつつ適切にばねのモデルを設定することで、破壊パターンの再現を試みる。コンクリートのモデル化に対して、モルタルと骨材の2層材料とモデル化することも考えられるが、解析要素数増加による計算コストも鑑み、コンクリート要素を採用する。即ち、骨材径程度の要素に空間を代表させたばねのモデルを設定するものである。

また、施工性能の検討には、以下について取り組んだ。

耐震化の影響で構造物中の鉄筋量が増えたことにより、柱梁接合部のような過密配筋部にフレッシュコンクリートを十分に充填することが困難になっている。この問題を解決する方法の一つとして、例えば、コンクリート材料をレオロジーモデルとみなしたフレッシュコンクリートの流動性の数値解析が行われてきた。そこではDEMやFEMなどに基づく解析手法が多く提案されてきたが、コンクリートを2相モデル(骨材とモルタル)と位置付け、鉄筋間の骨材の閉塞を考慮した解析はまだ行われていない。鉄筋間の骨材の閉塞を考慮するためには、3次元の多方向配筋下での2相モデルの解析が必要になる。こ

こでは、越塚により開発された粒子法の一つである3次元MPS法(Moving Particle Semi-implicit)を用いて、多方向配筋下でのフレッシュコンクリートの流動性と鉄筋間の閉塞を再現することである。解析ソフトとしては、「Particleworks」を用いた。構成則としてはビンガムモデルを適用している。

4. 研究成果

まず、コンクリート標準示方書の定着の規定がどのようにして現在の規定に変化していき、また規定中のパラメータの根拠について確認するため過去の示方書を確認し、その変遷を纏めた結果、定着の規定が現在の形となったのは昭和61年からであり、それ以降は変化していないことを確認した。従って、限界状態設計法のまま停滞しており、移行している性能照査型の設計指針に対応しきれていないことに大きな問題があると確認した。また、変遷を追ってもパラメータの根拠については明確でなく、仕様の的に定めたものであると確認した。

海外の設計基準とコンクリート標準示方書の比較を行った結果、コンクリート標準示方書は比較的単純な規定をとってはいるが、新たな技術が反映されていないことが確認できる。海外の設計基準は太径鉄筋に対応するため寸法効果を定着長算定式に反映しており、また特にACI Standardはエポキシ鉄筋にも対応しているため、新しい技術を設計に取り込むスピードが速いことが確認できる。ただし、その元となる定着長の算定式に関しては、設計基準ごとの大きな違いは確認されなかった。

鉄筋曲げフックの定着性能の把握を目的として鉄筋の引抜き実験を行った結果、定着長が異なる場合でも、フックの曲げ開始点のひずみレベルが等しい場合、フック部のひずみ分布は一致することを確認した。これより、フックは定着長に依存しないある一定の定着性能を有していることが確認された。

また、定着長を有していない場合でも、フックは鉄筋の降伏強度まで抜け出さず抵抗することができたが、応力集中の影響からフックの曲げ初め部において、局所的な曲げが確認された。今後、フックの定着性能が定量的に評価できるようになれば、定着長が低減でき、定着部の鉄筋量の減少につながるものと考えられる。

三次元のRBSM解析により破壊挙動を定量的に再現可能にするために、既往のモデルに対し修正を施した。既往のモデルでは、破壊形態の再現にのみとどまり、荷重-拔出し量関係といった定量的な評価はできなかった。そこで、鉄筋のひずみ分布に注目し、コンクリートの引張軟化挙動を適切にモデル化することによりすることで、鉄筋コンクリ

ートのテンションスティフニング効果に再現できた。加えて、鉄筋周辺に形成される脆弱な組織を解析でも考慮することで、実験で確認されたひずみ分布を再現可能であることを確認した。

修正したモデルを用い鉄筋端部の形状が定着性能に及ぼす影響を評価するため、大胡らが行った実験と本研究での実験を対象に解析を行った。

フックの試験体は、実験で得られた抜け出し挙動を解析でも良好に再現することができた。直鉄筋と機械式定着具のケースではモデル簡略化の影響で解析での破壊形態が変化した。内部ひび割れ性状や応力分布より形状の違いによる特性を解析で再現することができた。

柱梁接合部を想定し、三次元的な配筋状態での定着性能を解析で再現、評価を行った。対象を、清水建設が行った、鉄筋あきと横方向筋量を変化させた複数鉄筋の引抜試験と鉄道総研が行ったかぶりの薄い箇所での機械式定着具を有する複数鉄筋の引抜試験とし解析を行った。

あきを変化させたケースにて、骨材が通過できないほど鉄筋間が狭くなる場合に、鉄筋間に主にモルタルから成る脆弱な領域が形成されると仮定し解析を行った結果、実験で得られた抜け出し挙動を良好に再現することができた。今後、この現象については実験で検証する必要があるものの、充填性のよい高強度コンクリートを用いた場合、高い定着性能を発揮すると示唆される。

横方向筋量を変化させたケースより、横方向筋が鉄筋の抜き出し開始挙動に影響を与えず、最大荷重にのみ影響を与えるという既往の研究で確認されている効果を発揮することを解析でも同様に再現した。また、抜き出し開始挙動、最大荷重ともに良好に再現されていることから、複雑なひび割れの影響で理論的に解くことが困難だった現象を本解析システムは評価可能であることを確認した。

定着具を有するケースでは、かぶり厚、横方向筋量、軸方向のずれをパラメータに解析を行った。鉄筋端部の形状が異なる場合でも、本解析システムは破壊挙動を良好に再現可能であることを確認した。また解析結果より、かぶり厚よりも横方向筋による拘束効果が定着性能に及ぼす影響が大きく、横方向筋による拘束効果が弱い場合には、定着具にて破壊が局所的に進行し易いことを確認した。したがって、かぶりが薄い箇所に機械式定着具を用いる場合には、横方向筋による拘束状態が重要になると考えられる。

付着挙動に関する骨材の影響の基礎的検討を行うことを目的に、骨材を直接モデル化して解析を行った。まず、骨材量と骨材同士の接触数を変化させた圧縮試験を解析で再

現した結果、実現象と同様に、最大荷重は変化せず、ポストピークの軟化挙動に違いがあらわれることを確認した。

鉄筋 - 骨材間の接触モデルが十分でないため、鉄筋骨材間の接触を考慮せず解析を行った結果より、骨材量が増加すると弱点部となる境界面が増えるため最大荷重が低下する傾向となった。これは、実現象と整合しておらず、鉄筋 - 骨材の接触やモデル条件を変更した更なる検討が必要である。

以上の結果から、本解析システムが複雑な配筋状況下でも定着性能を定量的に評価できうことを確認した。本解析システムを将来的に性能予測が行えるレベルにまでブラッシュアップをするには、ブリージングと骨材の影響をどのようにして考慮するかが重要であると考えている。特に、骨材の影響は非常に大きいと考えられ、本解析システムはその効果を簡単に取り入れることができるものである。

今後、鉄筋の降伏やコンクリートの種類による材料特性など考慮すべき事項は多くあるが、定着性能を定量的に予測できるようになれば、本解析手法が設計における性能照査の役割の担えるものだと期待している。特に、経験的なデータが不足している高強度材料や新材料の使用に対しての門戸が広がるはずであり、より高品質な構造物の建設につながると期待している。

施工性能に関する数値解析については、過密配筋下にフレッシュコンクリートを流し込む際に、閉塞などが生じ、その施工性が問題となっているため、ここでは3次元におけるMPS法によって、既往の実験を模擬したフレッシュコンクリートの流動解析を行った。その際の変数としては、フレッシュコンクリート中の粗骨材量と配筋である(1方向配筋or多方向配筋)。実験結果との比較の結果、実験結果を完全に再現することは出来なかったが、3次元配筋におけるフレッシュコンクリート中の粗骨材による閉塞を再現する事に成功した。また、今後の課題として以下の3つが挙げられる。1つは、骨材表面に付着している薄いフレッシュコンクリート層を導入すること、2つは、フレッシュコンクリートの条件によってビンガムモデルにおけるレオロジー定数を変化させること、3つは、材料間の摩擦係数の妥当性をチェックすることである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6件)

① Daisuke HAYASHI, Kohei NAGAI, Benny SURYANTO "Investigating the effects of reinforcement arrangement on the anchorage of reinforcement using the

three-dimensional discrete analysis” Proceedings of the 4th Bond in Concrete Conference, 査読無し, Vol.1, pp.185-192, 2012.

② Kohei NAGAI, Daisuke HAYASHI “An Analytical Investigation of Anchorage Performance of Mechanical Anchorage by 3D Discrete Model” Proceedings of The 4th Asia-Pacific Young Researchers & Graduates Symposium, 査読無し, Vol.1, pp.130-138, 2012.

③ 林大輔, 長井宏平, 吉武謙二、小倉大季 “三次元離散解析による鉄筋あきが定着性能に及ぼす影響の評価” コンクリート工学年次論文集, 査読有り, Vol.34, No.1, pp.559-564, 2012.

④ Koichiro IKUTA, Kohei NAGAI “Three-Dimensional Analysis of Flow of Fresh Concrete as Two Phase Model by MPS” 土木学会第67回年次学術講演会, 査読無し, Vol.67, pp.135-136, 2012.

⑤ 林大輔, 井上友, 長井宏平 “3次元離散解析による定着法と構成材料の定着部破壊性状への影響の検討” コンクリートと補強材の付着挙動と付着構成則に関するシンポジウム論文集, 査読無し, Vol.1, pp309-319, 2011.

⑥ Daisuke HAHASHI, Kohei NAGAI, Yu INOUE “Three-dimensional Analysis of Anchorage Failure of RC by Discrete Analysis Method” Proceedings of International Conference on Recent Advances in Nonlinear Models CoRAN2011, 査読無し, 2011. (in CD-ROM)

[学会発表] (計 6件)

① 長井宏平 “An Analytical Investigation of Anchorage Performance of Mechanical Anchorage by 3D Discrete Model” The 4th Asia-Pacific Young Researchers & Graduates Symposium, 2012年12月5日, 香港, 中国

② 生田浩一郎 “Three-Dimensional Analysis of Flow of Fresh Concrete as Two Phase Model by MPS” 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年9月5日, 名古屋

③ 林大輔 “三次元離散解析による鉄筋あきが定着性能に及ぼす影響の評価” コンクリート工学年次講演会, 2012年7月4日, 広島

④ 林大輔 “Investigating the effects of reinforcement arrangement on the anchorage of reinforcement using the three-dimensional discrete analysis” 4th Bond in Concrete Conference, 2012年6月18日, プレシア (イタリア)

⑤ 林大輔 “Three-dimensional Analysis of Anchorage Failure of RC by Discrete Analysis Method” International Conference on Recent Advances in Nonlinear Models CoRAN2011, 2011年11月24日, ポルト (ポルトガル)

⑥ 林大輔 “3次元離散解析による定着法と構成材料の定着部破壊性状への影響の検討” コンクリートと補強材の付着挙動と付着構成則に関するシンポジウム, 2011年9月16日, 東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長井 宏平 (NAGAI KOUHEI)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号: 00451790