三次元離散解析手法による 多方向配筋時のRC定着性能の微細構造解析

林 大輔¹・長井 宏平²

¹正会員 清水建設技術研究所 研究員 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

E-mail: hayashi_d@shimz.co.jp

²正会員 東京大学准教授 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: nagai325@iis.u-tokyo.ac.jp

本研究では複雑な三次元配筋下における鉄筋の拔出し挙動及びひび割れ進展の再現と定着性能の評価を行うことを目的に、鉄筋端部形状、横方向筋量、鉄筋間のあきを変化させた場合の定着挙動を三次元離散解析手法を用いて解析し、実験との比較により検証した。結果、解析により得られたひび割れ性状が実験のものとも一致し、定着方法や配筋により異なる複雑な三次元的なひび割れ進展を再現可能であることを示した。また荷重 - 拔出し関係より、横方向筋による拘束効果が適切に考慮されていることを確認し、更に鉄筋間隔が非常に狭い過密配筋状態では、鉄筋間のコンクリートの材料特性を考慮し脆弱領域を導入することで適切にその定着性能を評価可能であることを示した。

Key Words : *RBSM, anchorage performance, transverse bar effect, multi-directional reinforcement, vulnerable area*

1. はじめに

耐震性能への要求が高まることでコンクリート構造物中の鉄筋量が増加している。それに伴い、特にラーメン高架橋の柱梁接合部など、多方向から鉄筋が輻輳している箇所では鉄筋が密に配筋され、鉄筋組み立て時間の増加と施工不良の可能性が増しているという問題が起きている(本論文では、この配筋状態を過密鉄筋と呼称する)。この要因の一つとして、コンクリート標準示方書¹⁾が性能照査設計法に移行するなか、鉄筋定着の設計基準は構造細目として仕様規定的な取り扱いとなっており、数値の根拠が不明瞭なまま残っている項目が多くあることが挙げられる²⁾。例えば定着長の算定式は、昭和61年版の示方書³⁾よりOrangunの提案した式⁴⁾を横方向筋の貢献分を修正して用いている。この修正の内容については、限界状態設計法指針(案)⁵⁾に記載があり確認できるものの、その妥当性については解説されていない。また、Orangunの提案式自体も継手部の曲げ試験から得られたものであり、これを基に基本定着長を算定し様々な配筋状態に適用することは合理的とはいえない。特に、柱梁接合部のような鉄筋が多方向に複雑に配筋された状態での力学的相互作用を考慮した定着性能は正確には評価されておらず、現行の主に実験や経験に基づくアプローチ

では過密配筋を緩和することは困難であると考えられる。

また近年、過密鉄筋を緩和することを目的に機械式定着具の適用が検討されており、土木学会より設計指針⁶⁾が発刊されるに至っている。しかし、接合部への適用法は示されておらず、また“機械式定着具が定着に必要とする範囲”と指針で定義されている定着体の範囲も不明である。これに対して吉武らは、柱梁接合部に機械式定着具を適用した場合に、破壊パターンや構造性能が変化することを実験より示したが、定量的な定着性能の把握はされていない⁷⁾。さらに田所らはかぶりが薄い個所に機械式定着具を用いる危険性を実験より示している⁸⁾。

以上のような背景から、定着性能のより合理的な設計基準体系への移行のためには、定着性能を力学的根拠に基づき評価する手法が必要となる。鉄筋の定着性能の評価に関して既往の研究では、鉄筋の拔出し挙動に関して島らはマッシュパネコンクリート中に埋め込まれた鉄筋の付着応力 - すべり - ひずみの関係式を提案しており⁹⁾、その式より拔出し量が算出可能である。また、飯塚らは、かぶりの薄い箇所に配置された鉄筋の両引き試験より、付着応力 - すべり - ひずみ関係式をより一般化するために、かぶり厚の影響を考慮する必要性を指摘している¹⁰⁾。しかしこれらは引抜け挙動をマクロに定式化したものであり、複雑な配筋状態における鉄筋の相互力学作用や、

かぶりに割裂ひび割れを発生させるテンションリングを考慮できず、またフックや機械式定着具のような端部で発生する支圧力の表現も困難である。これに対し、著者は鉄筋近傍の力学的特性を反映させる数値解析を用いることで、定着性能の評価や、接合部配筋の合理的設計が可能になると考えている。つまり、現状の経験的な設計法に、数値解析により評価した鉄筋間の力学的な相互作用を考慮することで鉄筋量を減少させ、複雑な配筋下での合理的な設計を行うアプローチである。

既往の解析的研究において、Salem & Maekawaは、鉄筋節形状を直接モデル中に取り入れたFEM解析を行い、マッシュな鉄筋に埋め込まれた一本の鉄筋の付着挙動を再現した¹¹⁾。また、離散解析手法を用いた既往の研究では、武藤ら¹²⁾や大胡・長井¹³⁾により、二次元で鉄筋の節形状を直接的に取り入れた付着挙動解析がおこなわれている。また三次元解析としては、小倉ら¹⁴⁾が機械式定着具の高応力繰返し性能に与える影響を明らかにしたが、鉄筋端部形状のみに着目し、鉄筋直線部とコンクリートとの付着は考慮していない。また、山本ら¹⁵⁾はRCループ継手の破壊機構を解析より評価したが、一連の梁要素としてコンクリート要素を結合し、鉄筋をモデル化しているため、鉄筋節から伝わる応力による破壊を想定していない。以上のように、付着・定着挙動を解析的に検討する試みは行われているものの、三次元的に配筋された鉄筋の定着性能を、鉄筋の節による応力伝達機構を考慮した上で評価する研究は過去に見当たらない。

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う。既往の研究において長井らは、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¹⁰⁾。本研究では、長井により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¹⁷⁾を対象に、解析を行った。過密鉄筋を想定したケースは、既報¹⁸⁾に新たな解析ケースを加え、検討を加えたものである。

2. 解析概要

(1) 解析手法

本研究では、川井¹⁹⁾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²⁰⁾。これに対し、著者は、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。

(2) ばねの構成モデル

ひび割れの進展及び応力伝達の表現に適していると考えられる離散解析手法を用いて定着性能の検討を行うために、鉄筋コンクリートの構成モデルを以下のように設定する。

a) 鉄筋モデル

鉄筋コンクリートの破壊形態を再現するために、鉄筋の節形状を幾何的にモデル化することで鉄筋節から発生する応力を再現する(図-1)。破壊を終局まで追うために、鉄筋の垂直ばね及びせん断ばねは弾性挙動とし、降伏は生じないと仮定した。

b) コンクリートモデル

RBSMでは、剛体要素間の接触面が潜在的な破壊面であるため、要素形状が破壊現象を再現する上で大きく影

図-1 解析要素形状

響を与える。したがって、図-1(a)のように、Voronoi分割法を用いてコンクリート要素はランダムな形状になるように分割を行った。ただし、鉄筋周辺のコンクリート要素は鉄筋要素のモデル化の都合上、ランダムには設定していない。鉄筋表面より約 $0.5D$ (D :鉄筋径)の範囲外領域でのコンクリート要素のサイズは、ひび割れ面の粗さを再現するため、最大粗骨材径を基準に $2,000\sim4,000\text{mm}^3$ 程度となるように設定した。

コンクリートの垂直ばね及びせん断ばねの構成則を図-2に示す。垂直ばねは圧縮領域では弾性挙動を示し、引張領域では要素の引張強度まで弾性挙動、引張強度以降はひび割れ幅に応じて応力を線形に低下させるモデルを適用させた(図-2(a))。なお f_c と f_t は、それぞれコンクリートの圧縮、引張強度であり、 w_{max} は引張軟化曲線に1/4モデルを採用した場合の第一直線勾配を解析モデル中の鉄筋周りの要素サイズ 2.0mm に適用させた場合の値、 0.003mm と設定した。せん断ばねは弾塑性挙動を示し(図-2(b))、ばねの降伏強度は武藤らの研究¹²⁾を参考に式(1)で算出されるものと仮定した(図-2(c))。ここで $\phi=37^\circ$ である。

$$\tau = \begin{cases} c - \sigma \tan \phi & (\sigma \geq 0.5 f_c) \\ c - 0.5 f_c \tan \phi & (\sigma < 0.5 f_c) \end{cases} \quad (1)$$

$$c = f_t (1 + \tan \phi)$$

図-2 ばねの構成則

ひび割れ発生後には、図-2(b)で求めたせん断応力を、さらにひび割れ幅に応じて線形に低下させる(図-2(d))。また、Salem & MaekawaによるFEMを用いた付着解析¹¹⁾を参考に、鉄筋周辺のコンクリートの遷移帯²⁰⁾を解析でも再現するために、鉄筋表面より $1D$ (D :鉄筋径)の範囲内にあるコンクリート要素のばねの弾性係数を、通常の要素の1/2に設定した(図-3)。加えて本研究では、骨材が通過できないほど鉄筋のあきが小さい領域に強度低減を導入しているが、これについては6章にて記述する。

c) 鉄筋 - コンクリート界面モデル

鉄筋 - コンクリート界面の強度はコンクリートの引張強度以下で、コンクリートの引張強度と関係していると考えられる。定量的な強度は不明であるため、界面の垂直ばねのモデルはコンクリートと同じモデル(図-2(a))を用い、 f_t はコンクリートの引張強度の1/2とした。せん断ばねは圧縮領域で弾性挙動、引張領域では降伏強度をコンクリートの引張強度の1/2と設定して図-2(b)と同様の弾塑性モデルより計算した τ を、ひび割れ幅に応じて線形に低下させるモデルを適用することで付着応力の低減を再現した(図-2(d))。ここでの w_{max} は長井による解析¹⁶⁾での骨材 - モルタル界面を参考に、 0.01mm と設定した。

3. シリンダー試験体の引抜き解析

(1) 解析概要

微細構造解析により定着性能を再現するためには、リングテンションに起因する割裂ひび割れを表現する必要がある。まず、本解析手法の再現性を確認するために、大胡らにより行われたシリンダー試験体の引抜き試験¹³⁾を対象に解析を行った。

図-3 鉄筋周りの弾性係数の低減

表-1 解析入力値 (シリンダー)

コンクリート				鉄筋		最大荷重		解析要素数
$f'_c(\text{N/mm}^2)$	$f_t(\text{N/mm}^2)$	$E_c(\text{kN/mm}^2)$	ポアソン比	$E_s(\text{kN/mm}^2)$	ポアソン比	解析(kN)	実験(kN)	
52	3.7	33	0.18	190	0.3	221	198	40,409

(2) 解析ケース

解析入力値を表-1に、解析モデル形状を図-4に示す。既往の実験において大胡らは、図-5に示す装置を用いて鉄筋の引抜き試験を行った。鉄筋の定着長はコンクリート標準示方書中の算定式より、鉄筋の降伏強度を 295N/mm^2 、コンクリートの圧縮強度を 25N/mm^2 と仮定して得られた値を基に 450mm としている。載荷端近傍の拘束条件による影響をなくすために、鉄筋の節をなくし、付着を除去した 300mm の非定着区間を設けた。解析での載荷は、載荷端表面の要素を完全拘束し、鉄筋要素にのみ 0.02mm/step の増加率で強制変位を与えることで行った。

(3) 破壊形態と内部ひび割れ

解析結果より得られた破壊形態および内部ひび割れを既往の実験結果¹³⁾と比較して図-6に示す。また、図中のひび割れ幅は黄色が $0.1\sim 0.3\text{mm}$ 、橙色が 0.3mm 以上である。

実験では、鉄筋の節から発生する応力に起因するリングテンションにより、割裂ひび割れが生じ破壊に至った。解析より得られた破壊形態図より、鉄筋軸に沿ったひび割れが生じていることが確認できる。また、内部ひび割れ図より、このひび割れが鉄筋を中心に平面状に広が

っており、実験で確認された割裂ひび割れと再現できていることが認められる。

(4) 鉄筋のすべり量とひずみ分布

解析より得られた、荷重-すべり量関係を図-7に、引抜き鉄筋軸方向ひずみ分布を図-8にそれぞれ実験と比較して示す。ここでのすべりは定着区間のひずみ分布の積分値である。また、解析と実験の最大荷重を表-1に示す。

図-7に示す荷重-すべり量関係より、実験では最大荷重付近で荷重の増加がなくなり、すべり量のみが増加する挙動を示した。これは、鉄筋から割裂ひび割れが進展し、破壊に至ることを表している。一方、解析も完全に一致はしないものの、荷重の増加が緩やかになり、すべり量の増加が大きくなる傾向をとらえている。また、荷重-すべり量関係の初期の傾きに注目すると、解析は実験とほぼ一致していることがわかる。これより、解析は、ひび割れの進展が大きくない初期段階では、すべり量を精度よく再現でき、加えて割裂ひび割れを伴う場合でも、その傾向を追従できることが確認できた。

また、図-8に示すひずみ分布より、解析にて載荷端側より順に鉄筋のひずみが進展していく挙動をとらえていることが確認できる。また、ひずみの値を比較しても、解析は実験での結果と良好に一致していることが示された。

以上より、直鉄筋を埋め込んだ際の一軸の抜出し挙動を精度よく再現できることを確認できたため、本モデルを用いて三次元配筋状態での鉄筋の定着性能の検討を次章以降に行う。

図-4 解析モデル形状 (シリンダー)

図-5 実験載荷装置

図-6 解析破壊形態と内部ひび割れ (左上: 内部ひび割れ, 左下: 破壊形態)

4. 鉄筋端部形状を変化させた引抜き解析

(1) 解析概要

現行の示方書では、フックや機械式定着具などの鉄筋の端部形状の違いに依らず、一律の定着性能を有すると定め定着長を減ずる設計を行っている。しかし、厳密に言えば、形状が異なれば定着性能は異なるはずであり、定着性能の違いを解析で検討するため、著者らが行った引抜き試験^{22),23)}を対象に解析を行った。

(2) 解析ケース

解析ケースを表-2に、解析モデル形状を図-9に示す。

図-7 荷重-すべり量関係

これは実験と同じサイズである。

3章での実験と同様に引抜き鉄筋にはD25を用い、基本定着長を450mmとしている。直鉄筋を埋め込んだST450は、基本定着長をコンクリート中に埋め込んだモデルである。また、鉄筋端部に機械式定着具、フックを有する場合は指針⁶⁾、示方書⁷⁾に従い基本定着長より10φ減じて200mmの埋め込み直線長さとした。ここでフックの曲げ内半径は3.5φ、機械式定着具は拡張部の直径が2.5φ、厚さ25mmの鉄筋先端拡張型である。ただし、本来ならば機械式定着具を用いる場合は、定着具を含めず定着長を設ける必要があるが、本解析では既往の研究²²⁾の試験体形状に準拠し、200mmの定着長に定着具部を含用いられており、横方向筋ははすべてD13である。ただ

図-8 解析・実験ひずみ分布

表-2 解析ケース（端部形状シリーズ）

解析 ケース	鉄筋端部 形状	定着長 (mm)	横方向筋本数 (定着区間内)	コンクリート				鉄筋		要素数	最大荷重 (kN)	
				f_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	ポアソン比	E_s (kN/mm ²)	ポアソン比		ANA	EXP
ST450	直鉄筋	450	4	25	2.4	19	0.18	190	0.3	154,669	209	205
T200	機械式	200	2	52	3.7	25	0.18	190	0.3	97,960	294	270
H200	180° フック	200	2	42	3.2	20	0.18	190	0.3	73,737	425	287 (降伏)

図-9 解析モデル形状（端部形状シリーズ）

し、引抜き鉄筋とは異なり、解析における補強筋の節角度はすべて 90° になっている。

すべてのケースで、荷重反力の影響を除去するために、荷重端側に150mmの付着を除去した非定着区間を設けた。引抜き荷重方向も3章での実験と同じく図-5に準じている。

(3) 荷重 - 変位関係

解析より得られた荷重 - 拔出し変位関係を図-10に、実験より得られた結果を図-11に示す。また、実験と解析の最大荷重を表-2に示す。ここでの拔出し量は直鉄筋のST450と定着具のT200のケースは鉄筋自由端部で、フックのH200ではフックの曲げ始め位置での拔出し変位である。実験ではH200は鉄筋が降伏することで実験が終了した。しかし解析では鉄筋の降伏を考慮していないので、鉄筋の降伏強度以上でも荷重が増加し続ける。また、H200のケースで曲げフック加工時に生じる残留ひずみの影響については考慮していない。

コンクリートが破壊することで荷重を終了したST450、T200は、解析は最大荷重と拔出し挙動を良好に再現することができている。このように設計上は同じ定着性能と計算される定着端部の影響を、実験と同様に解析により示すことができた。

(4) 破壊形態と内部ひび割れ

解析で得られた最大荷重における破壊形態と内部ひび割れ図を図-12に示す。また、実験でコンクリートが破壊することで試験を終了したST450、T200については、実験より得られた定着具周辺のひび割れ性状を合わせて示す。H200のケースは実験では鉄筋が降伏しており、ひび割れを伴う破壊には至っていないため、参考としてモルタルを用いた実験の結果を示す。

直鉄筋を埋め込んだST450の破壊形態より、引抜き鉄筋軸方向に沿ったひび割れが確認できる。これは節から

伝わる応力に起因するもので、かぶり厚の最も薄いモデル上面にひび割れが進展し形成された。また、内部ひび割れ図より、かぶり方向に進展するV字型のひび割れが確認できる。このひび割れパターンは、かぶりの薄い箇所に埋め込まれ、相対的な鉄筋の影響を受けない割裂パターンの典型的なもので²⁴⁾、解析で配筋パターンに応じた破壊形態が再現可能であることが確認できる。

端部に機械式定着を有するT200は、実験で定着具付近のかぶりコンクリートが浮き上がるようにして破壊する挙動が確認された。一方、解析の破壊形態も、同様にかぶり定着具周辺のかぶりコンクリートが浮き上がっている。これは定着具から伝わる局所的な応力によるもので、定着具を用いる場合は、かぶりの浮き上がりに対する抵抗力が、定着性能に大きな影響を及ぼすことがわかる。

フックを有するH200のケースは、モデル上面のかぶり面に形成される割裂ひび割れに加え、内部ひび割れ図より、フック曲げ内断面にひび割れが形成されていることが確認できる。これは鉄筋を引抜くことで、フック内側がコンクリートに押し付けられ生じる、支圧によって形成されたものであり、著者らにより行われたモルタルを用いた実験²³⁾で同様のひび割れパターンを確認している(図-12(c)右上図)。

以上のように、定着端部形状によるひび割れパターンの違いも本数値解析によって合理的に再現可能である。

5. 横方向鉄筋を有する複数鉄筋の引抜き解析

(1) 解析概要

かぶりの薄い定着部での定着部破壊は、かぶりコンクリートが割れ裂け、ひび割れが開くことで破壊に至る。そのため、ひび割れ開口に抵抗する横方向筋は定着性能に大きな影響を与えるが、示方書ではこの効果を潜在的な破壊面に存在する横方向筋の断面積をパラメータ

図-10 荷重 - 拔出し変位関係 (解析)

図-11 荷重 - 拔出し変位関係 (実験)

にし、経験を基に平均的な効果に換算し更に修正を加えて定着長算定式中に取り入れている^{14,15)}。そのため現状では、配筋位置やひび割れ進展といった影響が設計式で

は考慮できず、それらの効果についても明確にはなっていない。

前章では、横方向筋を有する試験体の単鉄筋引抜き解

図-12 破壊形態と内部ひび割れ

析を行った。その上で本章では、本解析手法が横方向筋による拘束効果を定量的に評価できているか検証するため、吉武らにより行われた引抜き試験¹⁷⁾と同実験シリーズの複数鉄筋の引抜き実験を対象に解析を行う。対象の実験は、藤井・森田の引抜き実験²⁴⁾を参考に横方向筋量を変化させることで引抜き鉄筋の拘束状態に変化を与えたものである。

(2) 解析ケース

解析ケースを表-3に、解析モデル形状を図-13に示す。また、実際の载荷試験に用いた試験体形状を図-14に示す。解析モデルは、計算コストを鑑み上面より150mmの範囲をモデル化した。実験ではこの深さ位置に、2段目の鉄筋が密に配筋されており、引抜き鉄筋より進展するひび割れが、それ以深に影響を及ぼさないと考えられる。

定着長500mmを有するD25の引抜き鉄筋を4本配置し、引抜き解析を行った。また、载荷端部での反力や支持反力の影響を除去するため、実験と同様に引抜き鉄筋の両

端部にそれぞれ200mmの非定着区間を設け、鉄筋の節を除去した。横方向筋はD13である。ただし、本ケースでは、横方向筋はモデル簡略化のため丸鋼とし、モデル底面を固定することで鉄筋の拔出しを防いだ。横方向筋の拔出しが無い場合拘束効果が発揮でき、丸鋼をモデル化したことによる、想定されるひび割れ進展・破壊形態への影響は少ないと考えられる。横方向筋による拘束効果を変化させるため、定着区間内で横方向筋を3本有するTR3のケース、5本有するTR5のケース、9本有するTR9のケースを解析で検討する。加えて、解析のみ横方向筋を有さないTR0のケースも検討した。

解析の境界条件を図-15に、実験での载荷装置を図-16に示す。モデル化領域下側の、鉄筋が密に配筋された部分を表現するため、解析ではモデル底面を完全拘束とした。また、载荷端側の面も、底部のみを固定し、実験と同様に引抜き鉄筋周辺に载荷反力の影響が小さくなるように考慮した。先のケースと同様に、解析では0.02mm/stepの強制変位を与えることで载荷を行う。なお、

表-3 解析ケース一覧 (横方向筋シリーズ)

解析 ケース	横方向筋 本数	横方向筋 間隔(mm)	コンクリート強度 (N/mm ²)		鉄筋弾性係数 (kN/mm ²)	最大荷重(kN)		解析 要素数
			f'_c	f_t		解析	実験	
TR3	D13×3	200	25	2.5	190	451.2	411.2	147,255
TR5	D13×5	100	25	2.5	190	534.8	504.9	167,179
TR9	D13×9	50	25	2.5	190	675.6	696.1	183,931
TR0	0	-	25	2.5	190	303.3	-	141,532

図-13 解析モデル一覧 (横方向筋シリーズ)

図-14 実験試験体形状

図-15 解析境界条件

図-16 実験载荷装置

実際の実験では載荷実験中に適宜、除荷・再載荷を行っているが、解析では一方向にのみ載荷している。

(3) 荷重 - 変位関係

解析より得られた鉄筋端部での荷重 - 拔出し変位関係を図-17に、実験結果を図-18に比較して示す。また、解析と実験での最大荷重を表-3に示す。ここで、荷重は4本の鉄筋を引抜く際の合計荷重、拔出し変位は各鉄筋の自由端部での変位量の平均値である。拔出し挙動の比較を行うために、各ケースの鉄筋の拔出しを開始する点と最大荷重に着目する。

まず、鉄筋の拔出し開始の挙動に着目すると、解析、実験ともに350kN付近で拔出し変位が大きくなり始める。これを拔出し開始点と判断する。既往の研究²⁴⁾で確認されているように、横方向筋量が変化した場合でも、鉄筋の拔出し開始挙動に影響を与えないことが、解析でも示された。実験でのTR3のケースは、他のケースよりも拔出し開始時の荷重が若干高いが、横方向筋量は少ないケースであるので、横方向筋の影響ではないと判断した。また、解析のみ行ったTR0の挙動より、横方向筋を有さない場合でも、拔出し開始時での荷重レベルは横方向筋があるケースと同程度であることがわかる。

図-17 荷重 - 拔出し変位関係 (解析)

図-18 荷重 - 拔出し変位関係 (実験)

図-19 破壊形態 (横方向筋)

次に、最大荷重の比較を行う。ここでは、最大荷重の値とその際の拔出し変位量を解析と実験と比較することで判断を行う。TR0のケースでは、拔出し開始時に最大荷重に達し、その後荷重低下が急激に生じる。この最大荷重のレベルは、すべてのケースでの拔出しが開始する荷重レベルと一致するため、コンクリートにひび割れが進展し、横方向筋のないTR0は破壊に至り、横方向筋を有する他のケースは横方向筋量に従って定着性能が向上している。

(4) 破壊形態

解析より得られた最大荷重付近での破壊形態を図-19に示す。ただし、TR0についてはひび割れが十分に進展したポストピークでの結果を示す。

横方向筋を有さないTR0では、モデル側面にひび割れが発生している。このひび割れが進展し、横方向筋がない場合では、かぶりコンクリートの拔出しに対する抵抗力急激に弱まることで破壊に至った。

また、横方向筋を有するTR3, TR5, TR9のケースと比較すると、かぶり上面に引抜き鉄筋に沿ったひび割れを確認することができる。これは、横方向筋が拘束効果を発揮しつつ鉄筋軸に沿って割裂ひび割れが生じたもので、次章で示す同種類の実験結果と同様に、この縦ひび割れから試験体側面に繋がる斜め方向のひび割れの形成を解析できている。

ここで、解析より得られた鉄筋1本当たりの平均定着耐力を現行の設計基準と比較する。図-20に、解析・実験より得られた各ケースの定着耐力の平均値を、横方向筋量 - 定着耐力関係の式と合わせて示す。図-20中の実線は示方書中に定義されている基本定着長 l_0 の式(2)に、実験での試験体諸元を代入することで定着耐力を得たものである。ここで、 ϕ は鉄筋径、 c はかぶり、 A_t は横方向

筋断面積、 s は横方向筋間隔、 f_{yd} は鉄筋の降伏強度、 f_{cd} はコンクリートの設計圧縮強度である。ここでは、 l_0 を500mmとして求めた f_{yd} の値を、条件における定着耐力へと換算して比較を行った。なお、本比較ではコンクリートの設計圧縮強度のかわりに、実験での実測の圧縮強度25N/mm²を代入している。

$$l_0 = \frac{\left(\frac{f_{yd}}{1.25\sqrt{f'_{cd}}} - 13.3 \right) \phi}{0.318 + 0.795 \left(\frac{c}{\phi} + \frac{15A_t}{s\phi} \right)} \quad (2)$$

図-20より、解析で得られた値のプロットと示方書中の式(2)が良好にその傾向を一致させていることが確認できる。すなわち、解析結果は示方書と同程度に横方向筋の拘束効果を捉えられていることが示された。

(5) ひび割れ進展

図-17に示した荷重 - 拔出し変位関係に着目すると、拔出し開始後から0.4~0.6mmまで荷重が増加する領域と、それ以降増加が停滞する領域が確認できる。この変化を内部ひび割れの進展より考察し、実験でのひび割れ図と比較することで本解析と実験結果の整合性を確認する。

図-21~22に、解析でのTR5の拔出し量ごとの内部ひび割れの変化を、同じ拔出し変位での試験体写真と合わせて示す。加えて、図-23に各荷重レベルでの幅0.1mm以上のひび割れ図を示す。ただし、解析モデルでの載荷端側の非定着領域は、実験ではコンクリートの除去された領域となっている。

図-21左の鉄筋拔出しが開始した付近にあたる変位0.1mmの内部ひび割れより、自由端側にわずかなひび割れが発生していることが確認できる(図中の赤丸)。つまり、拔出しの挙動は、鉄筋端部にまで引張応力が作用したことで開始したと考えられ、ひび割れ図からも試験体自由端側にひび割れの発生が確認できる(図-23左)。拔出し変位0.3mmの内部ひび割れを、拔出し変位0.1mmと比較すると、鉄筋下側に発生する斜めひび割れが進展していることが確認できる(図-21右・矢印)。一方、かぶり側のコンクリートには、着目しているひび割れ幅では、大きな変化は見られない。

次に、図-22に解析で荷重の増加が緩慢になる拔出し変位0.4mmと0.8mmでの内部ひび割れを示す。拔出し変位0.4mmの時の内部ひび割れを、図-21(b)の0.3mm時のものと比べると、鉄筋下側のひび割れ進展が停止し、かぶり側のコンクリートにひび割れが進展していることが確認できる。拔出し変位0.8mmでは、かぶりコンクリートにさらにひび割れが進展し、モデル側面にもひび割れが

図-20 横方向筋量と定着耐力の関係

進展している。以上より解析では、拔出し開始後の荷重が増加する領域では鉄筋から発生する試験体内部方向への斜めひび割れが進展し、その後かぶりコンクリートに鉄筋軸に沿ったひび割れの発生することで荷重増加が緩やかになり、ひび割れが試験体側面にも進展しながら破壊に至るというプロセスが示された。

一方実験では、図-23中央のひび割れ図より、拔出し変位が0.35mmの時点で試験体中央に割裂ひび割れが確認でき、解析での割裂ひび割れ発生の変位と大きくは異なる。ただし同じ変位に対する荷重が、実験と解析で100kN程度異なるため、引抜き荷重に対するひび割れ進展の過程を正しく再現できているとはいえない（図-

図-21 荷重増加域の内部ひび割れ性状

図-22 荷重増加停滞域の内部ひび割れ性状

図-23 実験ひび割れ図

17, 18) . 加えて, 解析では割裂ひび割れの発生後, 荷重の上昇が緩慢になったのに対し, 実験では割裂ひび割れ発生後, 最大荷重まで約100kN程度上昇した. 以上より, 解析はひび割れの進展プロセスは再現できたものの, 引抜き荷重レベルも含んだ再現には至らず, 今後の課題である.

6. 鉄筋あきが狭い場合の複数鉄筋の引抜き解析

(1) 解析概要

前章では, 本解析システムが三次元配筋状態での横方向筋の拘束効果を評価可能であることを確認した. 本章では, 過密配筋を想定し鉄筋のあきが定着性能に与える影響について検討を行う.

解析対象として, 吉武らにより行われた実験¹⁷⁾を再現する. これは, 部材接合部において鉄筋が幅轉して収まらない場合に, 梁主鉄筋を柱主鉄筋からずらすことを想定しており (図-24), 一方の鉄筋の位置をずらした際の他方の鉄筋の定着性能を確認したものである. これは示方書でのほりにおける鉄筋の最小あき20mmより過密な配筋状態を再現している. 実験結果からは, 鉄筋位置をずらした量により定着性能が変化することが確認されており, 局所的な応力伝達とひび割れ進展が全体挙動に影響を与えている. このような挙動の再現と評価に本研究で用いる離散解析手法は適していると考えられ, ここでは過密配筋状態における鉄筋あきの影

図-24 接合部配筋図

響の評価を試みる.

(2) 解析ケース

図-24に示すような部材内で鉄筋が幅轉しおさまらない場合を想定して, 梁主鉄筋を柱主鉄筋からずらす量をパラメータとする.

解析ケースを表-4に, 解析のモデル形状を図-25に, 実験での試験体形状を図-26に示す. ここで, 引張鉄筋とは柱主鉄筋を想定した引抜き力が作用する鉄筋であり, 解析ではこの鉄筋にのみ強制変位を与える. また, 定着鉄筋とは柱主鉄筋を想定し, コンクリート内に定着させた鉄筋である. 解析ケースとして定着鉄筋を有さない

図-25 解析モデル形状 (鉄筋あきシリーズ)

図-26 実験試験体概要

表-4 解析ケース一覧 (鉛直あきシリーズ)

解析ケース (脆弱領域)	定着鉄筋仕様	引張鉄筋と定着鉄筋との 中心間距離(mm)		コンクリート強度 (N/mm ²)		鉄筋弾性係数 (kN/mm ²)	最大荷重(kN)		解析要素数
		水平方向	鉛直方向	f'_c	f_t		解析	実験	
NVC	なし	-	-	25	2.5	190	534.8	504.9	167,179
VC0 (VC0v)	D25×3	32.5	0	25	2.5	190	790以上 (589.1)	545.6	288,601
VC5 (VC5v)	D25×3	32.5	12.5 (0.5D)	25	2.5	190	656.8 (488.4)	418.8	288,509
VC10 (VC10v)	D25×3	32.5	25 (1.0D)	25	2.5	190	531.1 (413.9)	409.0	288,445
VC15	D25×3	32.5	37.5 (1.5D)	25	2.5	190	513.2	511.5	288,445

図-27 荷重 - 拔出し変位関係 (解析・修正前)

図-28 荷重 - 拔出し変位関係 (実験)

NVC, 引張鉄筋と定着鉄筋の鉛直あきを0, 0.5D, 1.0D, 1.5Dと変化したケースをそれぞれVC0, VC5, VC10, VC15とした。ここで, NVCは前節の横方向筋を変化させたケースでの, TR5である。またVC0vのように, 解析ケースの末尾にvが追加されたケースは, 後述する脆弱領域の影響を解析で考慮した結果である。

前章と同様に, 解析では計算コストを考慮した上で, 深さ150mmの領域をモデル化し計算を行った。

引張鉄筋の定着長はすべて500mmであり, 引張鉄筋と定着鉄筋はすべてD25, 横方向鉄筋はD13である。前ケースと同様に, モデル簡略化のため横方向筋を丸鋼とし, モデル底面を完全拘束とした。載荷は図-15の境界条件で行い, 載荷端表面の鉄筋要素に0.02mm/stepの強制変位を与えることで再現した。ただし, 実験では静的載荷の途中で適宜除荷をしているが, 解析では最終ステップまで一方向に載荷を続けた。

図-29 脆弱領域の設定

図-30 荷重 - 拔出し変位関係 (解析・脆弱領域考慮)

(3) 脆弱領域の考慮と全体挙動の変化

a) 荷重 - 変位関係

解析で得られた各ケースの荷重 - 変位関係を図-27に, 実験で得られた結果を図-28, 最大荷重を表-4に示す。ここで, 荷重は4本の鉄筋の引抜き荷重の合計, 変位は自由端で計測されたコンクリートと鉄筋の相対変位量の平均値である。

実験では100~150kNでひび割れが発生し, 350~400kNでひび割れが急激に増加した。鉄筋あきに注目すると, 鉄筋のあきの最も小さいVC0のケースが最大荷重が最も高いのに対して, 鉄筋あきを0.5D (12.5mm)および1D (25mm)ずらしたVC5, VC10のケースは定着鉄筋を有さないNVCと比べて最大荷重が大きく低下していることが確認できる。さらに鉄筋あきをずらしたVC15のケースでは, 最大荷重がVC10に比べて上昇し, NVCとほぼ同等の値であることが読み取れる。これより, 定着鉄筋位置がわずかにずれることで引抜き耐力は低下し, ある

程度鉄筋間隔が離れれば影響は小さくなることが分かる。

一方, 解析のケースを比較すると, すべてのケースで鉄筋の拔出しが始まり始める荷重レベルは再現できているものの, 鉄筋あきの小さなVC0, VC5, VC10では, 拔出し開始以降の挙動が再現できておらず過大評価している。特にVC0のケースは計算の最終ステップまで荷重が上がり続けた。そこで, VC0, VC5, VC10のような鉄筋間隔が狭くなる場合に鉄筋間の材料特性に変化が生じるとして次のような仮定を検討する。

b) 脆弱領域を考慮した再モデル化

鉄筋とコンクリートの付着に大きな影響を及ぼす要因として骨材の影響が挙げられるが, 過密鉄筋が生じる箇所では, 骨材が物理的に通過できないほど鉄筋間のあきが狭くなる。そこでは, 鉄筋軸方向に沿って局所的に主にモルタルや空隙から成る不均質な脆弱領域が発生すると考えられる。そこで, この影響を解析中でも考慮する

ため、次のような仮定を取り入れた。鉄筋間のあきが20mm以下の場合は均質性に影響を与えとし、その鉄筋間に存在するコンクリート要素同士のばねの引張強度を設定値の2/3に低下させる。この低下率の定量的な検討は十分には行われておらず、脆弱性を定性的に表す値として導入した。本ケースの解析ではVC0、VC5とVC10に脆弱領域が設定される(図-29)。このモデル化を取り入れた場合の解析結果を次項に示す。

c) 荷重 - 変位関係(脆弱領域考慮)

解析より得られた荷重 - 変位関係を図-30に、実験での荷重 - 変位関係は図-28に示す。脆弱領域を考慮した解析ケースをそれぞれVC0v、VC5v、VC10vと称する。

脆弱領域を考慮したVC0v、VC5v、VC10vのいずれの解析においても、考慮しない場合と比較して耐力が低下

し、実験と同様の結果を得られた。VC0vは引張鉄筋と定着鉄筋が同じ断面高さ位置にあるため、脆弱領域が鉄筋間で重ね継手のような働きをし、高い定着性能が発揮された。これに対しVC10vでは、定着鉄筋の位置をずらしたことで、脆弱領域にひび割れが発生しやすくなり、定着性能が大幅に低減したものと考えられる。ずらし量がVC0vとVC10vの間にあるVC5vも、過大評価しているものの、実験と同様の荷重低下傾向を再現できている。この過大評価の要因として、0.5DずらしたVC5vでは、定着鉄筋による拘束の影響をVC10vに比べて受けやすく、拔出し初期に荷重が増大したと考えられる。

このように、示方書では考慮されていない過密配筋状態に対して材料特性を考慮し脆弱層を導入することで、その定着性能を解析により再現できることを示した。

(4) 破壊形態

解析より得られた破壊形態を図-31に、実験で観察された最大荷重時の試験体写真とあわせて示す。

実験で観察された試験体側面に形成される、鉄筋軸に沿った斜めひび割れが解析結果よりも確認できる。実験での破壊パターンはいずれのケースもサイドスプリットモードの破壊パターンであり、試験体が上下に割り裂けることで荷重が低下した。この特徴は解析でも再現できており、モデル中段を貫通するひび割れの発生を確認した。

(5) 内部ひび割れ

解析より得られた内部ひび割れ図を図-32に、実験で載荷終了後に試験体を切断して撮影した写真を図-33にそれぞれ示す。

実験で得られた試験体の断面図よりNVC, VC0, VC15の試験体では引張鉄筋の上下面に沿って、VC10の試験体では引張鉄筋底面と定着鉄筋上面に沿ってひび割れが形成された。一方解析結果では、実験の載荷終了時

と比べ拔出し量が小さいため、引張鉄筋の上面に沿ったひび割れは確認できない。しかし、引張鉄筋下面に沿ったひび割れの発生が確認できた。

すべてのケースで、自由端側にモデル上面から試験体深さ方向に斜めひび割れが形成されていることが確認できる。定着鉄筋のないNVCと鉛直あきのないVC0のケースでは、この斜めひび割れが鉄筋の下部まで進展しているのに対し(図-32中A)、定着筋をずらしたVC10とVC15のケースでは定着鉄筋の深さ位置で停止している(図-32中B)。これより、定着鉄筋をずらしたケースでは引張鉄筋より進展した斜めひび割れが、定着鉄筋に沿うように変化することが考えられる。ここで図-28と図-30の荷重-拔出し関係のうちNVCとVC15の結果をみると、実験と解析の両方において最大荷重には両者にほとんど違いはないが、拔出しは定着鉄筋のあるVC15の方が荷重レベルに対して遅れている。これは本節で示したように、VC15では内部ひび割れ進展が定着鉄筋位置で止められたため変形が進まず、その結果荷重が増加したと考えられる。ただし最大荷重は主にかぶり

図-34 付着強度 - 鉄筋あき関係

側のひび割れに支配されるので違いは無い。このように複雑な配筋状態ではひび割れ進展が変形能にも影響を与えることが、解析から確認された。

(6) 付着強度 - 鉄筋あき関係

最後に、実験と解析で得られた付着強度 - 鉄筋あきの関係を図-34に示す。ここで付着強度は、最大荷重を鉄筋定着長と鉄筋周長で除して求めた値である。また示方書から計算される付着強度もあわせて示す。実験は鉄筋の鉛直あきを大きくしていくと、一旦は付着強度が低下する傾向を示し、鉛直あきが十分に大きくなると付着強度が回復する傾向が確認される。解析でもその傾向は再現されており、密に配筋されている場合に、材料への影響を数値解析モデルに導入することで定着性能を評価可能であることを示した。

7. まとめ

三次元離散解析手法を用いた微細構造解析により、過密配筋を含んだ三次元多方向配筋状態での定着性能を再現、検討した本研究により得られた知見を以下に纏める。

- (1) 鉄筋を一本配置したシリンダー試験体の一軸引抜き解析より、鉄筋の軸方向ひずみ分布とすべり量を定量的に再現した上で、割裂ひび割れによる破壊を解析することができた。
- (2) 鉄筋端部の形状を変化させた引抜き解析より、設計上は等価とみなされる鉄筋形状でも、実際の定着性能は異なることを実験と同様に解析でも示した。加えて、定着端部形状に応じたひび割れパターンを再現した。
- (3) 複数鉄筋の引抜き解析より、横方向筋量の変化により拔出し開始荷重は変わらないこと、またその後の

荷重増加は拘束効果により変化することを解析でも再現した。また、定着耐力を示方書の定着長算定式から計算される値と比較すると、同様の傾向を示すことを確認した。

- (4) 横方向筋量を変化させた複数鉄筋の引抜き解析より、実験で確認できた軸方向鉄筋に沿った割裂ひび割れと側面方向へ進展する斜めひび割れを、解析で共に再現することができた。また、解析で得られた内部ひび割れ進展を、実験でのひび割れ図と比較することで、ひび割れの進展プロセスの再現性を確認した。
- (5) 過密鉄筋を想定して鉄筋のあきの影響に注目した解析結果より、鉄筋間のあきが非常に狭い場合に脆弱領域が形成されることを仮定することで、実験で確認された鉄筋あきの大きさに応じた定着性能の変化を再現することができた。また、鉄筋配置によりひび割れ進展に変化が生じ、これが荷重 - 拔出し関係にも影響を与えることを解析より示した。

謝辞：本研究で用いた実験データの一部は、清水建設（株）から提供頂いた。また本研究を実施するにあたり、吉武謙二氏、小川晃氏、小倉大季氏（清水建設（株））より助言頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編【2007年制定】，2007。
- 2) 土木学会：鉄筋コンクリート構造物の設計システム - Back to the Future -，コンクリート技術シリーズ95，2011。
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編【昭和61年制定】，1986。
- 4) Orangun, C. O., Jirsa, J. O. and Beem, J. E.: A Reevaluation of Test Data on development Length and Splices, *Journal of ACI*, Vol.74, No.3, pp.114-122, 1977。
- 5) 土木学会：コンクリート構造物の限界状態設計法指針

- (案), コンクリートライブラリー52, 1983.
- 6) 土木学会: 鉄筋定着・継手指針【2007年度版】, コンクリートライブラリー126, 2007.
  - 7) 吉武謙二, 小倉大季, 小川晃: はり主鉄筋の定着仕様が柱はり接合部の構造性能に及ぼす影響, 第66回土木学会年次学術講演会講演概要集, V-474, pp.947-948, 2011. (in CD-ROM)
  - 8) 田所敏弥, 谷村幸裕, 徳永光宏, 米田大樹: 高架橋接合部における機械式定着具を用いた定着部の静的引張特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.691-696, 2009.
  - 9) Shima, H., Chou, L. L. and Okamura, H.: Micro and macro models for bond in reinforced concrete, *Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo* (B), Vol.39, No.2, pp.133-194, 1987.
  - 10) 飯塚敬一, 檜貝勇, 斉藤成彦, 高橋良輔: かぶり厚が小さい異形鉄筋の付着性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.655-660, 2008.
  - 11) Salem, H. M. and Maekawa, K.: Pre- and Postyield Finite Element Method Simulation of Bond of Ribbed Reinforcing Bars, *Journal of Structure Engineering*, ASCE, pp.671-680, 2004.
  - 12) 武藤信太郎, Worapong Srisoros, 中村光, 国枝稔: メゾスケール解析による異形鉄筋の付着挙動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.763-768, 2005.
  - 13) 大胡賢一, 長井宏平: 機械式定着具からの応力伝達に注目した破壊形態及び定着体の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.607-612, 2010.
  - 14) 小倉大季, 吉武謙二, 小川晃, 前之園司: Tヘッド鉄筋の定着具形状が高応力繰返し性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.649-654, 2009.
  - 15) 山本佳士, 岩田道春, 黒田一郎, 古谷信明: RBSM解析によるRCループ継手の破壊機構の評価, 構造工學論文集, Vol.56, pp.915-927, 2010.
  - 16) Nagai, K., Sato, Y. and Ueda, T.: Mesoscopic simulation of failure of mortar and concrete by 3D RBSM, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.3, No.3, pp.385-420, 2005.
  - 17) 吉武謙二, 小倉大季, 小川晃: 接合部内の柱と梁主鉄筋の鉛直・水平位置関係が鉄筋付着特性に及ぼす影響, 第65回土木学会年次学術講演会, V-555, pp.947-948, 2010.
  - 18) 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, Vol.34, No.2, pp.559-564, 2012.
  - 19) Kawai, T.: New Discrete Models and Their Application to Seismic Response Analysis of Structure, *Nuclear Engineering Design*, Vol.48, pp.207-229, 1978.
  - 20) 小国健二, 堀宗朗, 坂口秀: 破壊現象に適した有限要素法の提案, 土木学会論文集, No.766/I-68, pp.203-217, 2004.
  - 21) Otsuki, N., Hisada, M., Diola, N. B. and Uddin Md, T.: Experimental Study on Interfacial Transition Zones in Reinforced Concrete, *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*, JSCE, No.592, V-39, pp.157-167, 1998.
  - 22) 長井宏平, 大胡賢一: 機械式定着具を用いた定着部の損傷時における静的定着性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.601-606, 2010.
  - 23) 林大輔, 井上友, 長井宏平: 定着長を変化させたフックのひずみ分布と三次元解析による検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.589-594, 2011.
  - 24) 藤井栄, 森田司郎: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究(第1報), 日本建築学会論文報告集, 第319号, pp.47-55, 1982.

(2012.7.3 受付)

MESOSCOPIC SIMULATION OF RC ANCHORAGE PERFORMANCE IN MULTI-DIRECTIONAL REINFORCEMENTS BY 3D DISCRETE ANALYSIS

Daisuke HAYASHI and Kohei NAGAI

Three-dimensional mesoscopic simulations of anchorage performance under multi-directional reinforcement conditions were conducted in this study to evaluate the effect of hook and mechanical anchorage, transverse bars and the clearance of reinforcements in congested reinforcement area on the anchorage capacity and crack propagation. Discrete analysis method, Rigid Body Spring Model (RBSM), was adopted to present the cracking directly. The rib of reinforcement bars were modeled to simulate the crack from rib and splitting cracking. Analysis reasonably reproduced the confinement effect of the transverse bars on the pull out capacity as well as the cracking pattern observed in the experiments. Furthermore, vulnerability was introduced to the area where the reinforcements were closely arranged to consider the heterogeneity and worse compaction of concrete. This assumption successfully evaluated the anchorage performance in the congested rebar arrangement area. Three-dimensional internal crack propagation was simulated reasonably according to the reinforcement arrangement and the anchorage type.