論文 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

林 大輔*1・長井 宏平*2・吉武 謙二*3・小倉 大季*4

要旨:鉄筋のあきが変化した際に定着性能に及ぼす影響を再現することを目的に三次元剛体ばねモデル (RBSM)を用いて,複数鉄筋の引抜き試験の解析を行った。鉄筋のあきが狭い場合,主にモルタルからなる 脆弱層が鉄筋間に形成されることを仮定しモデルに取り入れることで,実験で計測された抜出し挙動を解析 でも良好に再現することができた。また解析結果より,複雑で三次元的なひび割れ性状を解析でも同様に再 現できることを示し,得られた破壊性状と内部ひび割れ性状より,鉄筋のあきが定着性能に与える影響を検 討した。

キーワード: 剛体ばねモデル, 鉄筋あき, 定着性能, 割裂破壊

1. はじめに

近年,耐震性能への要求が高まることなどにより,柱 や梁といった部材単位での必要鉄筋量が増している。こ れに伴い,例えばラーメン高架橋などの接合部では,高 耐力化に伴い増加した鉄筋が集中するため過密鉄筋とな り,鉄筋組み立て時間の増加と施工不良の危険性が増し ている。更に,吉住らは現状の配筋仕様において,かぶ りの剥落により柱主鉄筋の定着性能が満足されない可能 性があること指摘しており¹⁾,鉄筋が多方向に複雑に配 筋された状態での定着性能は正確には把握されていない。 この要因のひとつとして,柱梁接合部内では,過密鉄筋 により鉄筋のあきが非常に小さくなっていることが挙げ られるが,鉄筋のあきと定着性能との関係は明確ではな い。

これらの現象を明らかにするには、鉄筋からコンクリ ートへの三次元的な応力伝達とひび割れ進展の局所挙動 を捉える必要があり、これに対し著者らは離散解析手法 を用いた微細構造解析によるアプローチが有用であると 考えている。例えば既往の研究において、井上らは三次 元の剛体ばねモデル(RBSM)を用いて、かぶりの薄い供試 体における定着性能の検討を行い、かぶりの厚さや鉄筋 端部の形状が破壊形態や内部応力状態に影響を与えるこ とを示している²⁾。

そこで本研究では、この解析システムを用いて、鉄筋 のあきが定着性能に与える影響を検討する。吉武らによ って行われた実験³⁾を対象に、配筋状態の違いによる定 着性能を解析で再現することを試みた。これは、部材接 合部において鉄筋が輻輳して収まらない場合に、梁主鉄 筋を柱主鉄筋からずらして配置することを想定し(図-1)、一方の鉄筋の位置をずらした場合の他方の定着性能

*1 東京大学大学院 工学系研究科 (正会員)
*2 東京大学 生産技術研究所 (正会員)
*3 清水建設 技術研究所 (正会員)
*4 清水建設 技術研究所 (正会員)

を確認したものである。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しており、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。本 研究では、鉄筋節から伝わる応力に起因した局所的な現 象を再現するために、鉄筋の幾何形状をモデル中に再現 した上で鉄筋コンクリートの引抜き試験の解析を行った。 鉄筋のあきをパラメータに設定した複数鉄筋の引抜き試 験の解析から得られた破壊形態や荷重-抜出し量関係よ り、鉄筋あきの影響について考察を行った。

2. 解析概要

2.1 解析手法

本研究では、川井⁴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⁵が存在する。これに対し,著者らは, ばねに与える構成則を数値モデルと捉え,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。コンクリートをモルタルと骨材 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,最大粗骨材径よりも小さい要素に空間 を代表させたばねのモデルを設定するものである。

2.2 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モデル化を次のように行う。

(1) 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,井上 ら²⁾の研究と同様に,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 - 2)。 鉄筋の垂直ばね及びせん断ばねは弾性挙動とし,降伏し ないと仮定した。また対象にした実験でも,コンクリー トの破壊以前に鉄筋の降伏は確認されていない。

(2) コンクリートモデル

RBSM では、剛体要素間の接触面が破壊面となるため 要素の形状が破壊現象を再現する上で大きく影響を与え る。したがって図 - 2に示すように、Voronoi 分割を用い 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。

また、コンクリートの垂直ばね及びせん断ばねの構成 則を図-3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低下させるモデル を適応させた(図-3(a))。なお、 $f_c \geq f_t$ は、それぞれコ ンクリートの圧縮、引張強度であり、 w_{max} は 0.003mmと 設定した。せん断ばねは弾塑性挙動(図-3(c))を示し、 ばねの降伏強度は武藤ら⁶⁰の研究を参考に式(1)で算出さ れるものと仮定した(図-3(b))。ここで $\phi=35^\circ$ 、 $c=f_t$ (1-tan ϕ)である。





(a) 安素分割町面凶
 (b) 二次元鉄肋形状
 図 - 2 要素分割による鉄筋幾何形状のモデル化

また,Salemらの研究⁷⁾を参考に,鉄筋周辺のコンクリート組織の脆弱性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。さら に本研究では,骨材が通過できないほど鉄筋のあきが小 さい箇所に強度低減を導入しているが,これについては 次章にて記述する。

(3) 鉄筋 - コンクリート界面モデル

鉄筋-コンクリート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 - 3 (a))を用い, f_i 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 度の半分と設定して図 - 3 (c)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。

3. 解析モデル

3.1 解析ケース

吉武らによって行われた複数鉄筋の引抜試験³の再現 を試みる。図-1に示すような接合部内で鉄筋が輻輳し て収まらない場合に,梁主鉄筋を柱主鉄筋からずらして 配置することを想定し,梁主鉄筋を柱主鉄筋からずらす 量をパラメータとして,あきが変化することで定着性能 がどのように変化するかを評価する。実験では,図-4, 図-5のように,梁主筋となる鉄筋を設置し,柱主筋と なる鉄筋の引抜き試験を行っている。



解析ケース	定着鉄筋 仕様	引張鉄筋と定着鉄筋との 中心間距離(mm)		実験・解析コンクリート 強度(N/mm ²)		解析鉄筋弾性 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	Es	解析	実験	
No.1	なし	-	-	25	2.5	190	534.8	504.9	167,179
No.2	D25 × 3	32.5	0	25	2.5	190	589.1	545.6	288,601
No.3	D25 × 3	32.5	25 (1.0D)	25	2.5	190	413.9	409	288,445
No 4	D25 X 3	32.5	37.5 (1.5D)	25	25	190	513.2	511.5	288 445

表 - 1 解析ケース

解析ケースを表 - 1 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 はこの鉄筋のみに強制変位を与える。また定着鉄筋とは 梁主鉄筋を想定し,コンクリート内に定着させた鉄筋で ある。実際には,梁折り曲げ余長部である定着鉄筋にも 応力は発生すると考えられるが,鉄筋あきの影響を検討



-561-

する本解析対象の実験では、定着鉄筋には外力は加えら れていない。解析ケースとして、定着鉄筋を有さないケ ースを No.1,引抜鉄筋と定着鉄筋の鉛直あきを 0,1.0D, 1.5D と変化させたケースをそれぞれ No.2, No.3, No.4 とした。

3.2 モデル形状

解析のモデル形状を図 - 6に,実験の試験体形状を図 - 4にそれぞれ示す。実験の試験体は深さ方向に十分な 厚さを有しているが,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 である。また,載 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。引抜鉄筋と定着鉄筋 はすべて D25,横方向筋は D13 である。ただし本研究で は,横方向筋はモデルの簡略化のため丸鋼とした。

解析での境界条件を図 - 7に示す。載荷側表面の鉄筋 要素に強制変位を 0.02mm/step で与えた。実験では静的 載荷の途中で適宜徐荷をしているが,解析では最終ステ ップまで一方向に載荷を続けた。

3.3 脆弱領域のモデル化

鉄筋とコンクリートの付着に大きな影響を及ぼす要因 として骨材の存在が挙げられるが、過密鉄筋となる箇所 では、鉄筋間のあきが粗骨材が物理的に通過できないほ ど狭くなる。そこでは、鉄筋軸方向に沿って局所的に主 にモルタルから成る不均質な脆弱領域が発生すると考え られるが、定量的な評価には至っていない。そこで、こ の影響を解析中でも考慮するため、次のような仮定を行 った。鉄筋間のあきが 20mm 以下の場合は骨材分布に影 響があるとし、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。本 研究の解析では試験体 No.2 と No.3 に脆弱層が設定され る(図 - 8)。このモデル化の妥当性については、低減の 有無による全体挙動の変化を比較することで検討する。

4. 解析結果

4.1 荷重-抜出し量関係

解析と実験結果より得られた荷重 - 抜出し量関係のグ ラフを図 - 9と図 - 10にそれぞれ示す。グラフの荷重 は4本の鉄筋の合計の引抜き荷重,抜出し量は端部で計 測したコンクリートと相対すべり量の平均値である。

実験ではいずれのケースも 100~150kN でひび割れが 発生し、350~400kN でひび割れが進展し急激に増加した。 一方,解析でも過大評価する傾向はあるものの実験で確 認された鉄筋の抜出し開始挙動と最大荷重をすべてのケ ースで良好に再現することができた。最大荷重値を表 -1に示す。

鉄筋間に設定した脆弱層の影響を検討するために, No.2 および No.3 のモデルに対し脆弱層を設定しなかっ た解析ケースを図 - 9に合わせて示す。脆弱層を設定し ない場合,鉄筋の抜出しが開始する点で変化は確認でき るものの,その後も荷重が増加し続け,最大荷重が No.2 では 700kN 以上, No.3 では 531.1kN まで上昇した。この 原因として,鉄筋間では局所的に応力が集中するため, コンクリートのモデルを与えた場合は過大に抵抗性能を 発揮するものと考えられる。

脆弱層の影響を受けている No.2 と No.3 のケースを比較すると, No.2 は引抜鉄筋と定着鉄筋が同じ断面高さ位置にあるため, 脆弱層が鉄筋間で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, No.3 のケース では定着鉄筋の位置をずらしたことで脆弱層に引張応力 が作用し易くなり, 定着性能が大幅に低減したものと考 えられる。この結果については,後に示す内部ひび割れ 図からも考察する。



4.2 破壊形態

解析より得られた破壊形態を図-11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。解析の 破壊形態は,変位を20倍で表示したものである。

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断続的な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⁸⁾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,図-12に示す内部ひび割れと合わせる ことで,モデル中段を貫通するひび割れが支配的である ことが確認できる。

また,すべてのケースでかぶり面中央位置に鉄筋軸方 向に沿った割裂ひび割れの発生を確認できる。これは解 析中でも横方向筋の拘束効果が適切に発揮されているた め,鉄筋高さ位置を連続するひび割れが発生した後に2 次的に発生する割裂ひび割れである。さらに中央から外 側へ斜め方向に延びるひび割れも含め,解析は実験と同 様のひび割れパターンを再現できている。これより,複 雑な三次元応力下で発生するひび割れに支配される現象 を再現可能であることを確認した。

4.3 内部ひび割れ

解析より得られた内部ひび割れ図を図 - 12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 - 1 3にそれぞれ示す。

実験で得られた試験体の断面図から, No.1, No.2, No.4 の試験体では引張鉄筋の上下面に沿って, No.3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 べ抜出し量が小さいため引抜鉄筋上面に沿ったひび割れ は確認できないが, 引抜鉄筋下面に沿った割裂ひび割れ の発生を確認できる。

解析内部ひび割れ(図-12)より,自由端側にモデ ル上面のかぶり側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 No.1







と鉛直あきのない No.2 のケースでは、この斜めひび割れ が鉄筋より下部のコンクリートにまで進展しているのに 対し、定着筋をずらした No.3 と No.4 のケースでは定着 鉄筋の深さ位置で停止している。これより、定着鉄筋を ずらしたケースでは引張鉄筋から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。 また、最大荷重の結果より、No.4 のケースでは鉄筋あき が十分にあるため定着性能への影響は小さく、引張鉄筋 と定着鉄筋に沿うひび割れは形成がされなかったが、 No.3 のケースでは鉄筋あきが小さく、脆弱層の影響もあ り定着性能の低下につながったと考えられる。

5. 結論

柱梁接合部を想定し,鉄筋間のあきを変化させた複数 鉄筋の引抜き試験を三次元 RBSM 解析により再現し,定 着性能について検討を行った本研究で得られた結論を以下に纏める。

- (1) 接合部を想定した複数鉄筋の引抜試験の解析において、鉄筋間のあきが狭くなる場合に脆弱層が形成されることを仮定することで、実験と同様の荷重-抜出し挙動を再現することができた。
- (2) 解析で得られた破壊形態より、本解析システムを用いて実験で確認されたサイドスプリットパターンの破壊形態を再現できることを確認した。また2次的に形成される割裂ひび割れも再現でき、離散解析手法による微細構造解析の有用性を示した。
- (3) 解析で得られた内部ひび割れ図より,鉄筋をずらして配置したケースではひび割れが定着鉄筋の下部まで進展しておらず,これより定着鉄筋の存在が引張鉄筋から進展するひび割れの挙動に影響を及ぼすこ





(a) No.1(定着筋なし)

(b) No. 2(鉛直あき Omm)

:あき Omm) (c)No.3(鉛直あき 25mm) 図 - 1 3 試験体切断面

(d) No. 4(鉛直あき 37.5mm)

とを確認した。

(4) 鉄筋あきが小さく局所的な脆弱層が形成されている 場合でも、鉄筋位置をずらさなければ脆弱層に圧縮 応力が集中するため定着性能が低下しないことを 確認した。一方鉄筋位置をずらした場合は、脆弱層 に引張応力が作用し易くなるため、定着性能に顕著 な影響が生じる。

参考文献

- 吉住陽行ら: RC ラーメン高架橋の柱梁接合部にお ける柱軸方向鉄筋の定着性能に関する実験的検討, 第64回土木学会年次学術講演会, V-500, pp.997-998, 2009
- 井上友,長井宏平:三次元 RBSM 解析による鉄筋コンクリートの定着性能の評価、コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.643-648, 2011
- 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

- Kawai, T. : New Discrete Models and Their Application to Seismic Response Analysis of Structure, Nuclear Engineering Design, 48, pp.207-229, 1978
- 5) 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
- 武藤信太郎, Worapong Srisoros, 中村光, 国枝稔:メ ジ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
- Hamed M. Salem, Koichi Maekawa : Pre- and Postyield Finite Element Method Simulation of Bond of Ribbed Reinforcing Bars, Journal of Structural Engineering, ASCE, 130, pp.671-680, 2004
- 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