

論文 RBSM-FEM 結合解析手法による異形鉄筋の付着機構のメゾスケールシミュレーション

井熊 晃司*1・山本 佳士*2・中村 光*3・三浦 泰人*4

要旨: 異形鉄筋の付着性状は、かぶり厚さ、周辺鉄筋の配筋状況など多くの要因の影響を受けることが知られているが、様々な条件下における付着性状を再現可能なモデルは未だ確立されていない。本研究は、コンクリートの不連続挙動を再現可能な RBSM と鋼材のモデル化に適した 3 次元立体 FEM 要素を連成させた解析手法を開発し、同手法を用いて、任意の条件下における付着性状を再現可能なメゾスケールモデルの開発を試みた。提案モデルを用いて、既往の RC 供試体の両引き試験の解析を行った結果、提案モデルはかぶり厚さおよびコンクリート強度が付着性状に与える影響を再現可能であることが分かった。

キーワード: メゾスケール解析, RBSM, 異形鉄筋, 付着性状

1.はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の数値解析には、耐力や変形性能の評価のみならず、維持管理の観点から、ひび割れ幅、間隔、角度等のひび割れ詳細情報の予測・評価が求められるようになってきている。ひび割れ詳細情報の再現のためには、それを再現可能な十分な解析解像度とともに、鉄筋とコンクリート間の付着性状の適切なモデル化が必要となる。数値解析の現状において鉄筋の付着性状のモデル化には、離散鉄筋モデルと、平均的な付着応力-すべり関係の導入により実現されるが、付着応力-すべり関係は、かぶり厚、コンクリート強度、拘束条件等様々な要因で変化することが知られており¹⁾、どのような条件下でも再現可能なモデルは確立されているとは言い難い。

一方、計算機性能の向上に伴い、鉄筋などの構成材料の幾何形状から直接モデル化するメゾスケール解析は実用的にも有効な手段になりつつある。たとえば林ら²⁾は鋼材の幾何形状を直接モデル化した 3 次元 RBSM を用いたメゾスケール解析により、複雑な 3 次元配筋下の鉄筋の拔出し挙動や、横方向鉄筋量の影響、鉄筋あきの影響、定着機構等を再現することに成功している。しかしながら、林らの手法は、鋼材を RBSM でモデル化しているため、鉄筋の材料非線形性までは再現できていない。

そこで本研究では、コンクリートのひび割れ進展挙動を簡易に再現できる 3 次元 RBSM³⁾と、RBSM と比べて鋼材のモデル化に適した 3 次元立体 FEM 要素を連成させた手法を開発するとともに、幾何形状から鉄筋をモデル化したメゾスケールモデルに適用することを試みた。特に本研究では、提案モデルの適用の基礎的な検討とし

て、かぶり厚および圧縮強度を変化させた既往の RC 供試体の引抜き実験を対象として解析を行い、提案モデルの妥当性確認およびモデルパラメータの感度解析を行った。

2. 解析手法

2.1 コンクリートモデル

本研究では、Voronoi 分割によるランダム形状要素を用いた RBSM によりコンクリートをモデル化した。RBSM は、対象を剛体要素と要素間のバネで離散化する手法であり、バネに破壊やすべり等の非線形特性を導入することにより、連続体解析手法と比較して容易にコンクリートのひび割れ等の不連続挙動を表現することができる。図-1 に示すように、各要素内の任意点(本研究では要素重心)に 6 自由度の 3 次元剛体変位を設定し、要素境界面上には、表面力の評価点としての積分点を設定する。積分点には、垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置する(垂直バネが 1 個、せん断バネが 2 個)。コンクリートの力学特性は、垂直バネに圧縮・引張挙動、せん断バネにせん断すべり挙動をモデル化することで表現している。本研究では、垂直バネの引張挙動は、図-2 のように 1/4 モデルでモデル化した。垂直バネの圧縮挙動は図-3 に示す、2 つの二次関数による逆 S 字曲線でモデル化した。せん断バネの強度は図-4 に示す

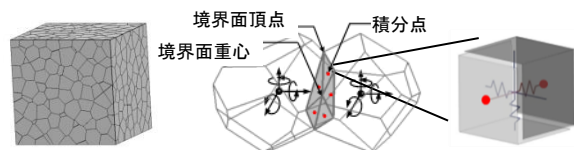


図-1 3次元 RBSM 概要

*1 名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 修士課程 (学生会員)
 *2 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 准教授 博士(工) (正会員)
 *3 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 教授 博士(工) (正会員)
 *4 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 助教 博士(工) (正会員)

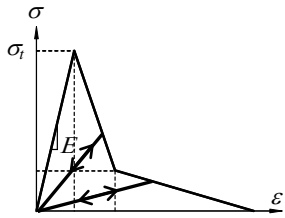


図-2 垂直バネ引張挙動

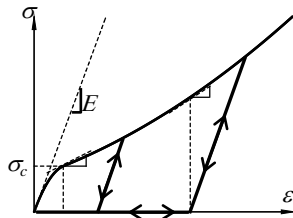


図-3 垂直バネ圧縮挙動

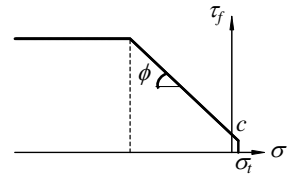


図-4 モール・クーロン型破壊基準

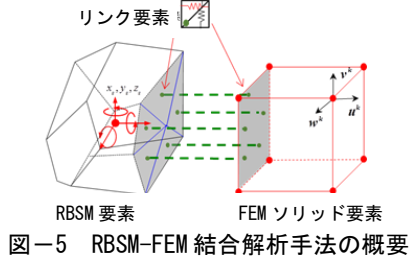


図-5 RBSM-FEM 結合解析手法の概要

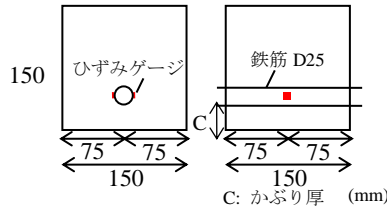


図-6 実験供試体概要

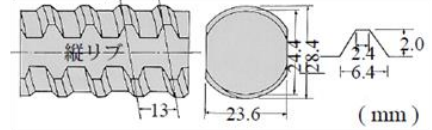


図-7 D25 鉄筋形状⁴⁾

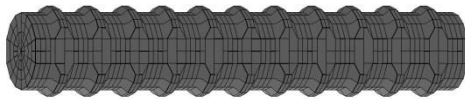


図-8 鉄筋解析モデル

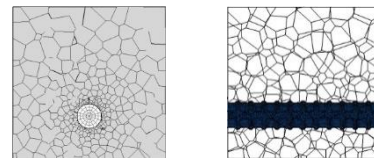


図-9 コンクリート解析モデル

ようなモール・クーロン型の破壊基準を仮定した。ここで、 σ_t はコンクリートの引張強度、 σ_c はコンクリートの圧縮強度に関する材料パラメータである。 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 τ_f はせん断強度、 E はコンクリートヤング係数である。材料パラメータの具体的な値を含む提案モデルの詳細は、紙面の都合上参考文献³⁾に譲るが、提案モデルは、Voronoi多面体を用い、かつ最大粗骨材寸法程度の要素寸法を用いることで、コンクリートの、引張および圧縮軟化・局所化挙動、拘束圧依存性挙動、体積膨張挙動、ひび割れ面せん断伝達挙動を定量的に再現することができる。

2.2 鉄筋および界面モデル

本研究では、鉄筋および鉄筋-コンクリート間の界面は、新たに開発した RBSM-FEM 連成解析手法を用いてモデル化した。提案モデルの概要を図-5 に示す。提案モデルでは、RBSM 要素と 8 節点立体 FEM 要素（ソリッド要素）を、リンク要素を介して結合する。リンク要素は、垂直バネとせん断バネからなり、図-5 に示すように、RBSM 要素境界面の重心および境界面頂点からなる三角形の重心に配置している。また、各リンク要素の伝達力は、この三角形の面積を用いて計算する。このように、リンク要素を配置することにより、1)要素分割作成時に、FEM 要素節点の位置に配慮する必要がなく、比較的メッシュ生成のコストを低減できること、2)RBSM 要素と FEM 要素とが相対回転する場合にもモーメントの伝達が可能になること、等の利点がある。

上記のバネは、鉄筋-コンクリート間の界面の応力伝達挙動を表現するが、本研究では簡単に 2.1 で示したバネの構成モデルを適用した。バネの引張強度は、既往の

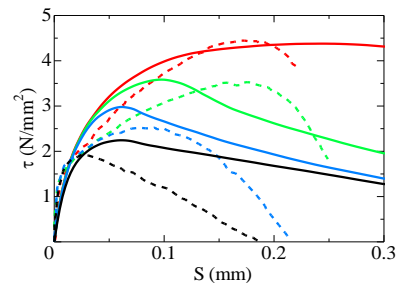


図-10 各かぶり厚の付着応力-すべり関係

RBSM を用いたメゾスケール解析²⁾における検討を参考に、コンクリートの引張強度の 1/2 とした。その他のパラメータはコンクリートと同じであると仮定した。

3. RC 供試体の両引き解析

3.1 実験概要

解析対象は、松本ら⁴⁾によって行われたかぶり厚を変化させた RC 供試体の両引き試験、および飯塚ら¹⁾によって行われたコンクリート強度を変化させた供試体の両引き試験である。図-6 に示すように、供試体寸法および形状は、一辺 150mm の立方体型であり、コンクリートに縦ねじ PC 鋼棒 D25 鉄筋を配置している。松本らの実験では圧縮強度 25N/mm² 程度のコンクリートを用いて、かぶり厚を 10mm, 30mm, 50mm, 100mm と変化させている。また、かぶり厚 100mm のケースでは、コンクリート断面を 250mm×250mm としている。飯塚らの実験では、かぶり厚を 30mm とし、コンクリートの圧縮強度を 11.2N/mm² から 55.8N/mm² まで計 7 ケースの実験を行っており、本解析ではそのうちの圧縮強度

11.2N/mm², 32.7N/mm², 55.8N/mm²の3ケースを対象とした。図-7に実験で使用された、鉄筋形状を示す。

3.2 解析概要

解析では、異形鉄筋をFEMモデルにより図-8のようにモデル化した。実験では、ねじ状に節が配置されているが、本解析では簡単に長手方向に垂直に節を設けた。付着応力を算定するために実験では、1mmのひずみゲージを使用し、供試体中央の断面での鉄筋のひずみを測定している。解析では、鉄筋中央部の13mm間(節間隔)の相対変位の平均から、鉄筋のひずみを算出した。また、すべり量は、実験では鉄筋荷端とコンクリート表面の相対変位としており、解析でのすべり量は、鉄筋全体の

変位の1/2とした。コンクリート部の解析モデルは、図-9に示すように、Voronoi多面体を用いて、鉄筋の形状に沿うようにモデル化している。RBSM要素の鉄筋周辺の要素寸法は節高さと同様な2mmとし、鉄筋軸から離れるに従って要素に勾配を与えた。

3.3 実験結果との比較による妥当性確認

(1) かぶり厚による影響

図-10に実験および解析によって得られた付着力-すべり関係を示す。実験では、かぶり厚が増加するに従い、最大付着応力(τ_{max})が増加していることがわかる。解析は、かぶり厚が小さいケースで最大付着応力をやや大きく評価しているものの、かぶり厚の増加に伴い最大

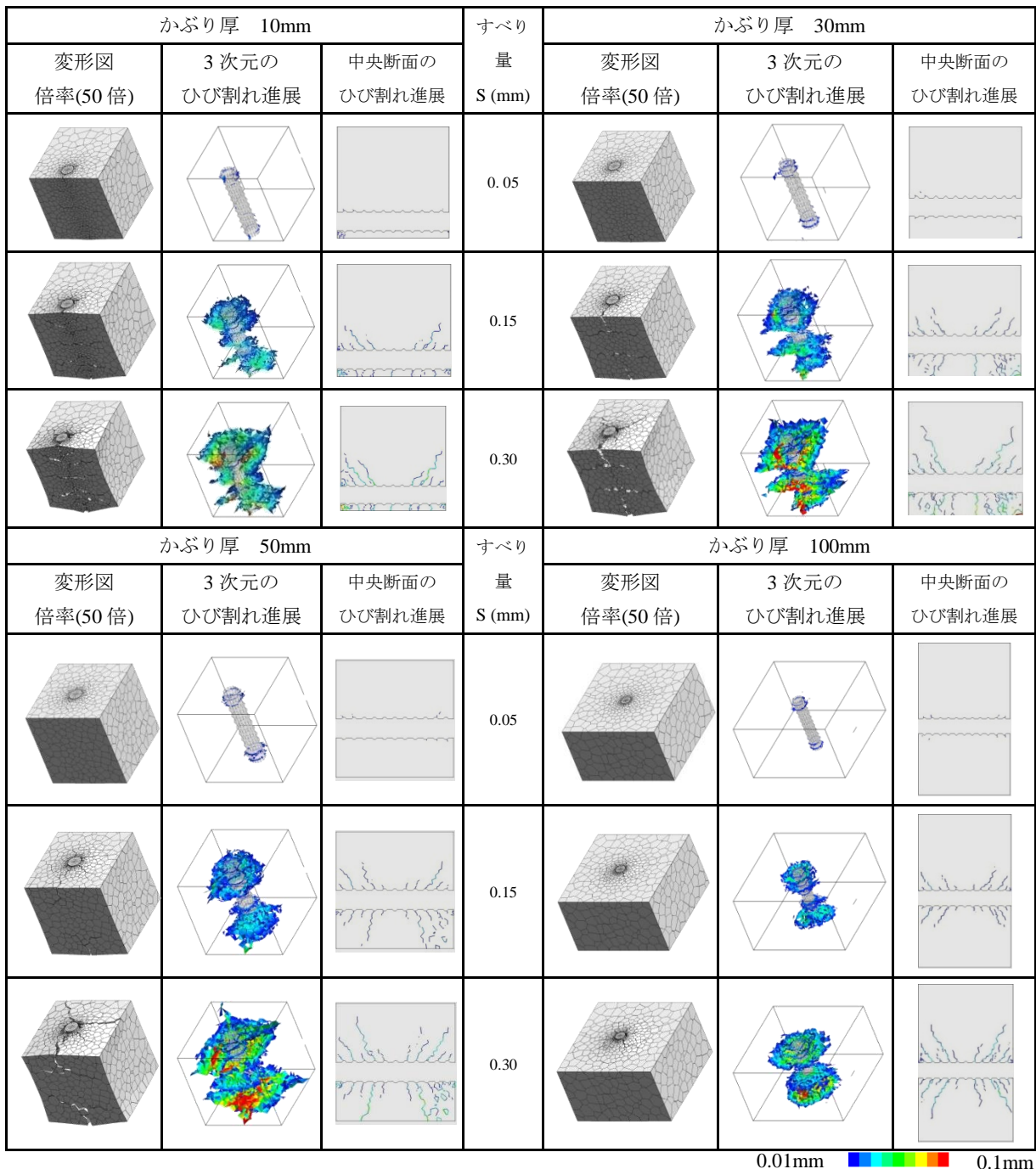


図-11 各かぶり厚の変形図・ひび割れ性状

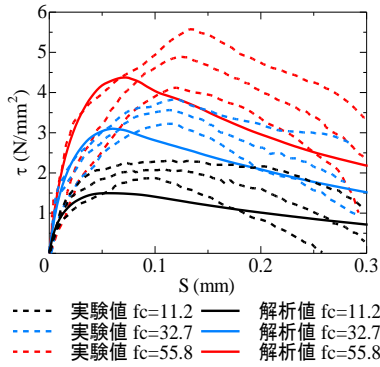


図-12 各コンクリート強度の
付着応力-すべり関係

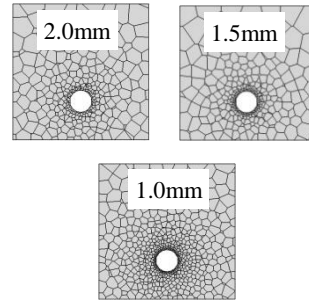


図-13 鉄筋近傍 RBSM 要素寸法

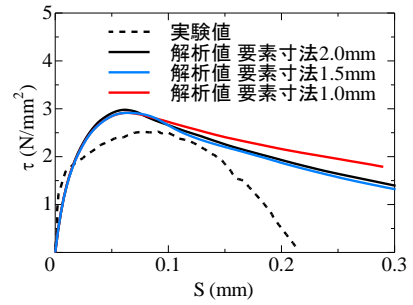


図-14 各要素寸法における
付着応力-すべり関係

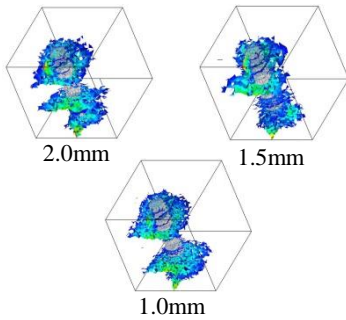


図-15 各要素寸法における
変形・ひび割れ性状

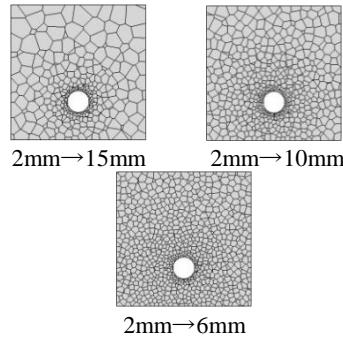


図-16 要素寸法変化勾配

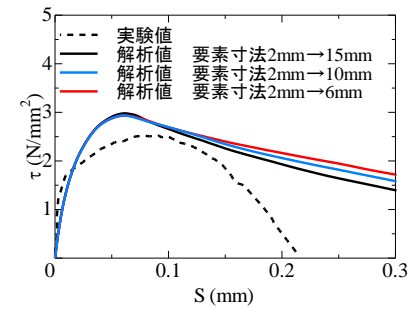


図-17 各要素寸法勾配における
付着応力-すべり関係

付着応力が増加する傾向を再現できていることがわかる。付着応力-すべり関係における、軟化勾配を比較すると、実験ではかぶり厚が大きくなるに伴い、脆性的になるが、解析ではすべてのケースで延性的であった。図-11に各かぶり厚での変形図および内部のひび割れ進展過程を示す。かぶり厚 10mm, 30mm および 50mm では、供試体端近傍のかぶり部に、リングテンションによる縦ひび割れが生じて最大付着応力を迎える様子が観察された。また、鉄筋の節近傍からコーン状に進展する内部ひび割れ、いわゆる後藤クラック⁵⁾が発生・進展しながら付着応力が低下する様子が観察された。一方、かぶり厚 100mm のケースでは、リングテンションによる縦ひび割れは生じなかった。実験では、かぶり厚 50mm および 100mm のケースで縦ひび割れは発生せず、10mm および 30mm のケースのみ縦ひび割れが確認された。また、解析では、かぶり厚が小さいケースにおいて後藤クラックがそのまま、供試体表面まで進展している様子が確認できる。このひび割れは、岡崎らによって実施された実験⁶⁾でも確認されているものである。

(2) コンクリート強度による影響

図-12 に実験と解析によって得られた付着応力-すべり関係を示す。図より、提案モデルは、コンクリートの圧縮強度 f'_c の増加とともに最大付着応力 τ_{max} も増加する挙動を再現できている。

3.4 要素寸法の影響評価

RBSM は、バネの破壊によってひび割れを表現するた

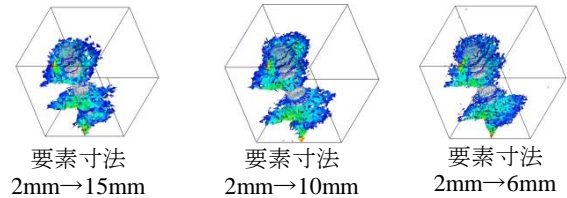


図-18 要素寸法変化勾配における変形・ひび割れ性状

め、特にひび割れの進展経路は要素寸法の影響を受ける。そこで、3.2 の検討で行った両引き試験供試体の内、かぶり厚 30mm、コンクリート圧縮強度 25N/mm²のケースを基本として要素寸法が付着性状に与える影響を評価した。

(1) 鉄筋近傍の要素寸法の影響

付着性状への影響が大きいと考えられる、鉄筋近傍の RBSM の要素寸法を変化させた解析を行った。鉄筋の節高さと等しい、要素寸法 2mm を基準に、鉄筋近傍の要素寸法を、図-13 に示すように、1.0mm, 1.5mm, 2.0mm と変化させて検討を行った。解析によって得られた付着応力-すべり関係を図-14 に示す。また、図-15 に付着応力-すべり関係における軟化域 ($S=0.15$ mm) での内部のひび割れ性状を示す。最大付着応力に達する前は、要素寸法の影響はほとんど見られない。最大付着応力以降の軟化域では、若干ではあるが要素寸法の影響が見られた。ひび割れ性状に着目すると内部ひび割れの間隔や形状に変化が生じているが顕著な変化は見られなかった。

(2) 要素寸法の変化勾配の影響

本研究では計算負荷軽減の為、鉄筋から離れるに従い

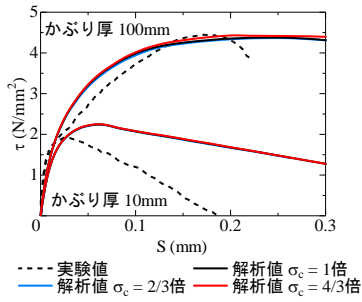


図-19 圧縮バネの影響評価

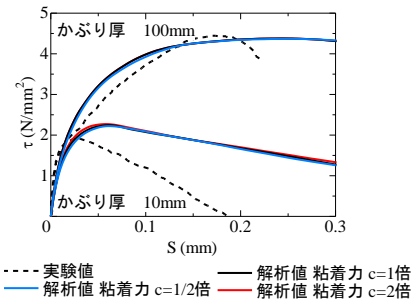


図-20 粘着力の影響評価

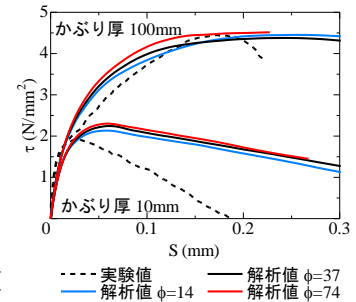


図-21 内部摩擦角の影響評価

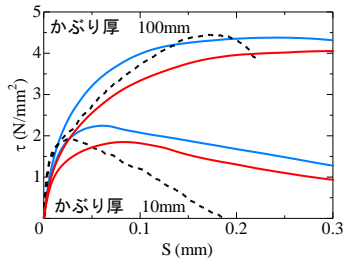


図-22 鉄筋周辺コンクリート強度の影響評価

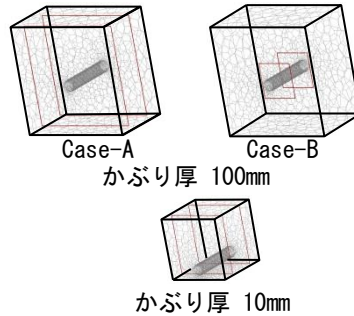


図-23 スターラップの配置

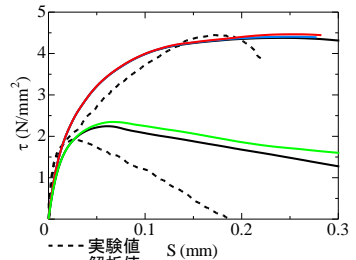


図-24 スターラップの配置

その距離に応じて RBSM 要素の寸法を大きくしている。ここでは、要素寸法の変化の勾配が付着性状に与える影響を検証した。図-16 に解析モデルを示す。かぶり厚 30mm のケースを基準に、鉄筋近傍の要素寸法を 2mm とし、供試体端部において要素寸法が約 6mm, 10mm, 15mm となるように勾配を設けて要素寸法を変化させた 3 ケースで解析を行った。

図-17 に解析によって得られた付着応力-すべり関係を示す。図-18 に各ケースの軟化域 ($S=0.15\text{mm}$) での内部のひび割れ性状を示す。解析では、要素寸法が細くなることで付着応力-すべり関係における軟化勾配がやや緩やかになる傾向を示した。これは、要素寸法が小さくなること、ひび割れ面の面積が大きくなることによる影響である。なお、本研究で用いている、コンクリートのバネの構成モデルおよび材料パラメータは、要素寸法が 10mm から 30mm 程度で、コンクリートの巨視的・平均的な、引張・圧縮軟化挙動、局所化挙動、拘束圧依存性挙動を定量的に再現できるものである³⁾。それより要素寸法が小さくなると、同じバネの構成モデルと材料パラメータを用いた場合、弾性挙動、強度特性に大きな変化は見られないが、同じ長さだけひび割れが進展しても、ひび割れ面積が大きくなる都合上、破壊エネルギーはやや増加する傾向があることがわかっている。したがって、厳密には、再キャリブレーションを行う必要があるが、要素寸法を 2mm と小さく設定しても、定性的には本研究で得られる結果に大きな影響は与えないと考えている。

3.5 リンク要素バネ（界面バネ）の材料モデルの影響

ここでは、界面バネの各材料パラメータが、解析結果に及ぼす影響を検証する。まず、2.2 で示したパラメータを基準として、圧縮バネに関するパラメータを変化させる。また、せん断バネに対しては、図-4 に示す、モール・クーロンの破壊基準に関するパラメータを変化させ、せん断バネの強度の影響を検証した。本検証では、破壊モードが異なる、かぶり厚 10mm と 100mm の 2 ケースを対象とした。

図-19 に、垂直バネの圧縮側の材料パラメータ σ_c を基準の 2/3 倍, 1 倍, 4/3 倍と変化させた場合の結果を示す。図より同パラメータの影響はわずかであった。図-20 に、モール・クーロンの破壊基準の粘着力 c を 1/2 倍, 1 倍, 2 倍としたときの結果を示す。粘着力 c の増加とともに、付着応力は増加しているが、増分はわずかであった。図-21 にモール・クーロンの破壊基準の内部摩擦角を、 $\phi=14$, $\phi=37$, $\phi=74$ と変化させた場合の解析結果を示す。内部摩擦角の増加に伴い、付着応力が増加しているが、ここでも顕著な増加は見られなかった。

以上のことより、付着応力-すべり特性に対する、界面バネの材料特性の感度は小さいことが確認された。

3.6 鉄筋周辺のコンクリート強度の影響

既往の解析的研究⁷⁾では、鉄筋周辺のコンクリートの遷移体をモデル化する必要性が示されている。そこで、林らのモデル²⁾を参考に、鉄筋表面から $1/2D$ (D : 鉄筋径) の範囲のコンクリートの圧縮強度を 1/2 に低減しコンクリートの遷移体における材料特性の低下を表現した。なお、提案モデルは、コンクリートの圧縮強度の関数とし

て各材料パラメータの値を設定しているため、圧縮強度を低減させると、弾性係数、引張強度、粘着力等の値も同時に低下する。

図-22 に解析により得られた付着応力-すべり関係を示す。鉄筋周辺のコンクリート強度を低減することで、付着応力値が低下していることがわかる。3.5 の検証を踏まえると、提案手法は、鉄筋界面の接着作用や摩擦作用にかかわる界面モデルの影響は小さく、鉄筋周辺のコンクリートの材料モデルの影響が大きいことが確認された。しかしながら、軟化勾配への影響は小さかった。軟化勾配の過大評価に関しては、界面バネの構成モデルの高度化、鉄筋節の詳細な幾何形状のモデル化の影響などを今後より詳細に検討していく予定である。

3.7 スターラップが付着性状に与える影響

ここでは、RC 部材への適用を想定し、周辺のスターラップが付着性状に与える影響の検証を行った。解析対象は、3.1 に示したかぶり厚 10mm および 100mm の供試体とした。図-23 に示すように、スターラップははり要素を用いてモデル化し、³⁾スターラップに用いた鉄筋は、鉄筋径 D13、降伏強度 390N/mm² を仮定した。

図-24 に付着応力-すべり関係を、図-25 にかぶり厚 10mm のケースの、最大応力時および S=0.3mm におけるかぶり部のひび割れ性状を示す。図よりかぶり厚 10mm のケースでは、スターラップを配置することで、最大付着応力はわずかに増加し、軟化性状が緩やかになる様子が確認できる。ひび割れ性状に着目すると、最大付着応力到達時に供試体端部で生じる縦ひび割れの発生に、スターラップはほとんど影響しない様子が確認できる。その後、縦ひび割れが供試体中央部へ進展する挙動をスターラップが抑制している様子が確認できた。これにより、最大付着応力到達以降は延性的に付着応力を受け持つことが出来ることがわかる。一方、かぶり厚 100mm のケースでは、コーン状の内部ひび割れのみ発生し、スターラップによる影響はあまり見られなかった。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 提案モデルは、かぶり厚およびコンクリート強度が、付着性状、ひび割れ性状および破壊モードに与える影響を概ね再現することができる。
- (2) RBSM および FEM の界面のパラメータの感度解析を行った結果、付着応力-すべり関係およびひび割れ性状に対して、界面の材料パラメータの影響は小さいことがわかった。一方、鉄筋近傍のコンクリート強度の感度は顕著であった。このことから、提案モデルの付着特性は界面の摩擦や接着作用と比較

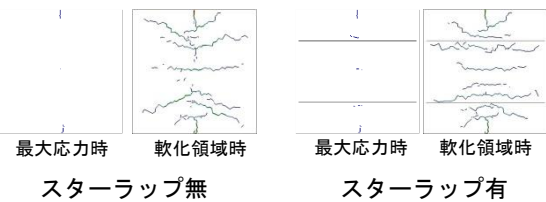


図-25 かぶり部のひび割れ性状

し、節形状による機械的なかみ合いの影響が大きいことが確認できた。

- (3) 提案モデルを用いてスターラップが付着性状に与える影響を検証した。検証の結果、かぶり厚の小さいケースではリングテンションによるひび割れの進展をスターラップが抑えることで、付着特性が向上する様子が確認された。一方、かぶり厚が大きい場合では、コーン状の後藤クラックに対してスターラップによる拘束の影響は見られなかった。

参考文献

- 1) 飯塚 敬一, 檜貝 勇, 斉藤 成彦, 高橋 良輔: かぶり厚の影響を考慮した異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集 E2, Vol. 67, No. 2, pp.280-296, 2011
- 2) 林 大輔, 長井 宏平: 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, 土木学会論文集 E2, Vol. 69, No. 2, pp.241-257, 2013
- 3) 山本 佳士, 中村 光, 黒田 一郎, 古屋 信明: 3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集 E, Vol. 64, No. 4, pp.612-630, 2008.11
- 4) 松本隆明, 檜貝 勇, 斉藤 成彦: かぶり厚が異形鉄筋の付着性状に及ぼす影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No. 2, pp.823-828, 2004
- 5) 後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 294 号, pp.85-100, 1980
- 6) 岡崎 慎一郎, 車谷 麻緒, 氏家 勲, 高本 直樹: 内部ひび割れを可視化するための新奇な手法の提案, コンクリート工学年次論文集, vol.36, No.1, pp.406-411, 2014
- 7) Salem, H. 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