

メゾスケール解析によるコンクリートと異形鉄筋の付着解析

Analysis of Bond Characteristics between Concrete and Deformed Bar by Meso-Scale Analysis

武藤信太郎, 中村光, 田辺忠顕, スリソロ ワラポン, 李相勲

Shintaro Muto, Hikaru Nakamura, Tada-aki Tanabe, Worapong Srisoros, Sanghun Lee

学生会員 学(工), 名古屋大学大学院生, 社会基盤工学科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

正会員 博(工), 名古屋大学大学院教授, 社会基盤工学科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

フェロー 工博, 名古屋大学名誉教授 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

M.Eng, 名古屋大学大学院生, 社会基盤工学科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

正会員 博(工), 名古屋大学大学院助手, 社会基盤工学科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

This research was carried out in order to evaluate the bond characteristic between concrete and deformed bar in Macro level by meso-scale analysis using Rigid Body-Spring Model (RBSM). In the analysis, lugs of deformed bar were modeled considering the geometry. By the meso-scale analysis using the stress-strain relationship obtained from the tests in macro-scale, it was possible to understand the development of the internal cracks around the lugs as well as the development of the cracks and the bond behavior in macro-scale. Moreover, it was investigated the effect on the bond behavior of the lug spacing and the stiffness of the bar. As the results, the lug spacing was influence factor and the stiffness of the bar did not influence to the bond behavior.

Key Words: bond characteristic, RBSM, crack behavior, Meso-scale

1. はじめに

コンクリートは粗骨材, 細骨材, セメントマトリクス等からなる複合材料であり, 微視的にはかなりの不均質性を有する材料である。また, コンクリート構造物は異種材料の補強材と組合わされた複合構造であるため, 構造的にも局所的にかなりの剛性の偏りを有している。コンクリート構造物の挙動を有限要素法などの手法により解析的に評価する場合, 対象とする構造寸法に対して数値的に取り扱い可能な寸法で離散化し(数 cm~数 10cm), 力学的挙動に対しては局所的な不均質性を無視できる寸法(数 cm 以上)での平均的な挙動を表す材料構成則を用いて, マクロスケールレベルの解析が行われてきた¹⁾。それに対し, 近年, コンクリートの強度や応力-ひずみ関係, 破壊性状といった基本的な力学特性を数値解析的に評価する手法の一つとして, メゾスケール(数 mm オーダー: 準微視的)での解析が注目を浴びている。例えば, 従来実験によってその平均的な特性を評価してきたコンクリートを, 微細構造からその不均質性を考慮することで, 複合材料であるコンクリートの特性を解析的に評価しようとする試みがある^{2,3)}。すなわち, 「コンクリート」に対する視点を一つ落として, その「構成材料」およびそれらの「相互作用」からモデル化することにより, コンクリートの力学挙動を本質から理解しようと努めたり, 構成材料が変化した場合

のコンクリートの特性を解析的に検討したりすることである。

コンクリート構造物を考えた場合, その挙動はコンクリートと鉄筋の複合作用である付着特性に大きく影響される。すなわち, コンクリートに生じるひび割れ幅やひび割れ間隔, ひび割れ発生後の部材剛性は, 付着特性によって変化する。また, ひび割れに影響する付着特性は, 耐久性にも重大な影響を及ぼす。したがって, 付着特性はそのメカニズムからより明確にする必要があると考えられるが, 現状では, 実験的にマクロな付着応力-すべり関係などの挙動が評価されているに過ぎない。また, 実験結果に基づく幾つかの付着応力-すべり関係のモデルが提案されているが^{4,5)}, それらのモデルは対象とした境界条件の相違から相互に異なったものとなっており, いずれも普遍的なモデルとはいえない。また, 境界条件によらないモデルとして, 島ら⁶⁾が付着応力-すべり-ひずみ関係を提案しているが, 比較的な数に限られた実験結果に基づき得られたモデルであるため, 普遍性を有するかについては, さらなる実験結果との検証や提案モデルの意味する本質的なメカニズムの理解が必要と考えられる。このようなマクロな付着特性の評価に対し, 後藤ら^{8,9)}は異形鉄筋周辺の内部ひび割れ進展挙動を実験的に観察し, コンクリートと鉄筋の付着作用のメカニズムを明らかにしようとした。後藤らは, 実験結果より得られた内部ひび割れの形状を図-1に

示すように模式的に示した。図によれば異形鉄筋の節からの支圧的な応力伝達による機械的なメカニズムの存在と、節近傍に内部ひび割れが発生し、コンクリートと鉄筋に相対変形が生じることが示されている。このように付着挙動は、内部ひび割れの挙動を含む複雑な現象を伴って生じるものであり、内部の応力伝達機構や微細なひび割れの挙動を明確にすることが、その現象の理解に欠かすことが出来ないと考えられる。

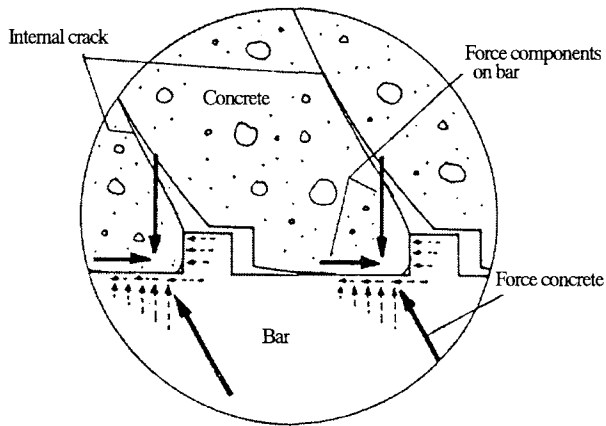


図-1 内部ひび割れ性状の模式図⁹⁾

そこで本研究では、異形鉄筋とコンクリートとの付着機構とそのマクロ挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、異形鉄筋の幾何形状を直接的にモデル化したメゾスケールの視点での解析を行った。解析手法には、メゾレベルからの付着特性を明らかにしようとする場合、微細ひび割れの影響を評価することが重要と考えたため、離散型の解析手法である剛体-バネモデル(RBSM; Rigid Body Spring Method)¹⁰⁾を用いた。解析結果に基づき、メゾスケール解析による付着特性評価への解析手法の適用性について検証し、さらに幾つかの要因に対し解析的に付着特性に及ぼす影響を評価した。なお、本解析は特に節の幾何形状について着目したため、コンクリートは均質体として扱った。

2. 解析手法

2.1 剛体-バネモデル (RBSM)

本研究では、コンクリートの構造解析手法として、ひび割れ進展等の不連続現象を直接表現できる離散型の解析手法である Kawai¹⁰⁾により提案された剛体-バネモデルを用いた。コンクリート構造物への剛体-バネモデルの適用は、Ueda ら¹¹⁾や Saito ら¹²⁾によりなされ、RC 構造物のひび割れ進展挙動や荷重-変形関係を妥当に評価可能なことが示されている。

剛体-バネモデルでは、コンクリートのひび割れをバネの破壊によって表現するため、ひび割れは要素境界辺上に沿って発生する。このため、ひび割れの発生・進展がコンクリートの要素分割に大きく依存する。そこで図-2に示すように、計算幾何学の概念である Voronoi 多角形分割に

より、コンクリートおよび鉄筋をランダムな要素に分割し、コンクリートに発生するひび割れの要素依存性を低減した¹³⁾。また、Voronoi 分割されたコンクリート要素は3自由度を持つ剛体と仮定し、要素の境界辺上に垂直バネ(k_n)および、せん断バネ(k_s)を設けた。バネ定数には、コンクリートおよび鉄筋の弾性係数 E を二要素間の母点間距離 h で除したものを与えた¹²⁾。

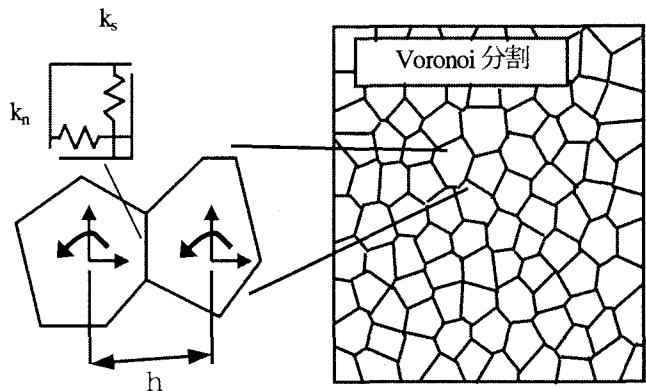


図-2 剛体-バネモデル

2.2 任意形状の Voronoi 分割

本研究の目的の一つとして、異形鉄筋の幾何学的な形状である節までをモデル化し、コンクリートと鉄筋との機械的な力の伝達に着目することで、付着特性が評価可能であるかを検証することにある。そのため、異形鉄筋の表面形状を再現するように、任意形状に対する Voronoi 分割を行う必要がある。そこで、Voronoi 分割の要素の辺は母点と母点の間にあるという特徴を利用し、母点をランダムに生成させず、図-3に示すように分割したい形状の辺の両側にひとつずつ置いていくという手法により任意の要素分割を行う方法を採用した。

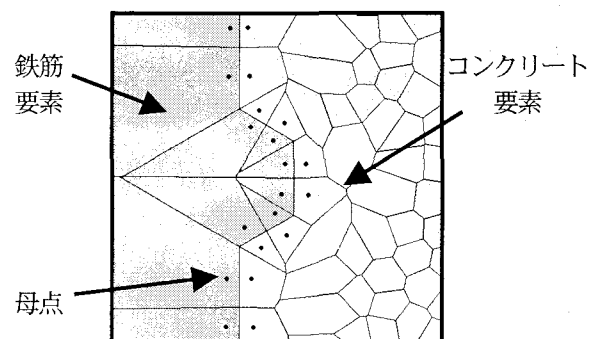


図-3 母点を囲った異形鉄筋の節の要素分割

2.3 材料モデル

コンクリートの材料モデルは、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した。

本研究では、コンクリート中に異形鉄筋が埋め込まれ、引張荷重を受ける場合の付着特性を解析対象としたため、圧縮応力の影響は小さいと判断した。そのため、解析を簡単にするため圧縮領域ではコンクリートは弾性と仮定した。弾性係数は $2.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ とした。

引張領域では、図-4に示すように垂直応力が引張強度 f_t に達するまでは線形弾性とし、その後は引張破壊エネルギー G_h によって軟化勾配を変化させる1/4モデルに従って応力を低減させた。また、除荷経路は原点指向型とした。なお、変位をひずみに変換するための特性長さは、二要素間の母点間距離 h とした。材料特性としては、コンクリートの引張強度は 30N/mm^2 、弾性係数は $2.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ とした。なお、引張破壊エネルギーは、本解析では次節で述べるように、解析パラメータとして扱った。

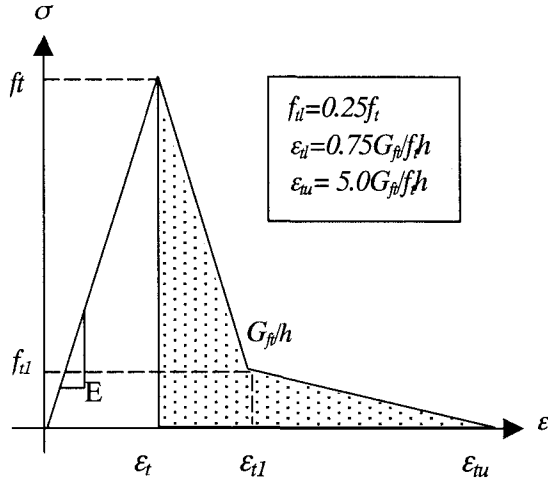


図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係

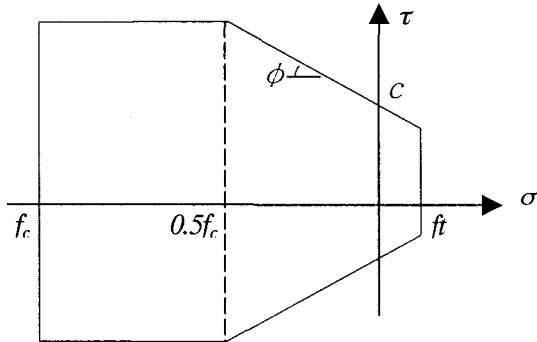


図-5 モール・クーロン型の破壊基準

せん断バネについては、斉藤らのモデル¹²⁾に基づきコンクリートのせん断伝達機構のモデル化を行った。せん断強度は、図-5に示すようなモール・クーロン型の破壊基準を用いて、式(1)で算出されるものと仮定した¹¹⁾。

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

ここで、 $c=0.14f_c$ 、 $\phi=37^\circ$ とした。破壊線到達後は、終局せん断ひずみ ($\gamma_u=0.004$) に達するまで破壊線上を移動するものとした。ただし、ひび割れ面においては、ひび割れの開口に伴うせん断剛性の低下を表現するために、せん断剛性低減係数 β を導入し、次式で示すようにせん断剛性を仮定してせん断軟化モデルを導入した¹⁴⁾。

$$G_{cr} = \beta G$$

$$\beta = 1 - \omega = \begin{cases} 1 & (\varepsilon \leq \varepsilon_t) \\ \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon} \exp \left[-\frac{\kappa}{\varepsilon_{mu}} (\varepsilon - \varepsilon_t) \right] & (\varepsilon > \varepsilon_t) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 G は初期せん断剛性である。 κ はせん断低減係数の低下率を表す係数であるが、引張応力下の引張破壊エネルギーと同様に解析パラメータとして扱った。

せん断バネの除荷・再負荷は、初期せん断剛性に従うものと仮定した。

鉄筋の材料モデルは、弾性と仮定し、弾性係数は $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ とした。

3. メソスケール解析に用いる応力-ひずみ関係の検討

本解析では、鉄筋の節形状までモデル化したメソスケール解析を行うため、Voronoi 要素の大きさは骨材寸法よりも小さい数 mm オーダーとなっている。一般にコンクリート構造物の解析に用いる応力-ひずみ関係は、骨材などの局所的な不均質性を排除するため、数 10cm オーダーの寸法を持つ供試体の実験から得られた結果に基づきモデル化されている。そのため、マクロなスケールの実験から得られた材料の応力-ひずみ関係の数 mm オーダーで離散化したメソスケール解析への適用性は保証されないため、解析の際にはマクロ挙動を再現可能な適切なメソスケールでの材料モデルを仮定する必要がある。そこで本章では、2章で示した材料の応力-ひずみ関係に対し、材料定数を変化させたパラメトリック解析を行い、解析結果を既往のマクロスケールの知見と比較することで、今回対象としたモデルのメソスケール解析に適用可能な材料の応力-ひずみ関係を検討した。

3.1 解析モデル

解析は、図-6に示すように、長さ 200cm、直径 12cm の円柱コンクリートの中心に D32 異形鉄筋が配置されている RC 一軸供試体の両引き試験を仮定して行った。

解析モデルおよび解析条件を図-7に示す。本解析は 2次元の剛体-バネモデルを用いているため、3次元構造を直接モデル化できない。そこで、鉄筋中心位置から半径 r の地点の供試体厚さを、円周方向の長さ $2\pi r$ として与えることで供試体をモデル化した。また、解析は供試体の 1/4 をモデル化して行った。鉄筋は節間隔 20mm とし、節の高さを 2.2mm、節の角度を 60° とし、図-7に示すようにその幾何形状をモデル化している。境界条件として、鉄筋下端の水平・鉛直方向および側面の水平方向を固定し、コンクリート下端を鉛直方向に固定した。载荷は鉄筋上端を鉛直上向き方向に変位を制御して行った。

なお本解析モデルは、後藤ら⁹⁾が異形鉄筋の節間隔、節高さ、節角度を変化させて、節形状が付着特性に及ぼす影響を検討した一辺 12cm の正方形断面を有する RC 部材の一軸引張試験供試体を参考にモデル化した。解析モデルは、

後藤らの実験供試体とは、断面形状のみが矩形と円形で異なるものであるので、解析結果の妥当性は後藤らの実験から得られた知見と比較することで判断できると考えている。

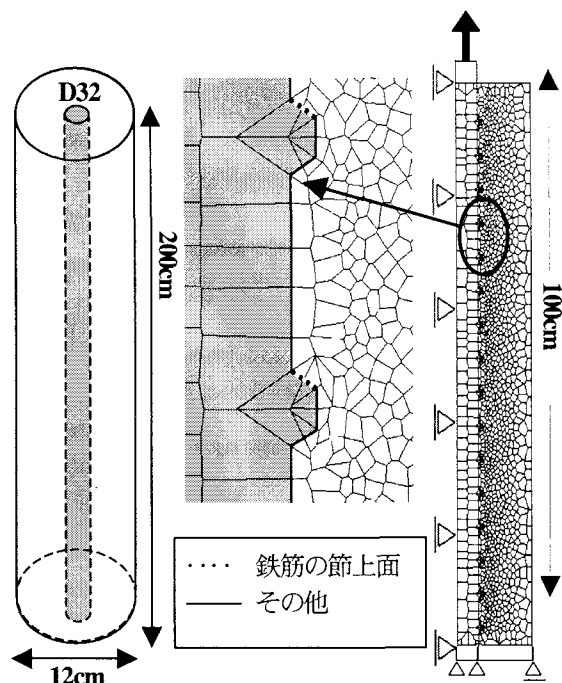


図-7 解析モデルおよび解析条件

コンクリートの材料モデルとしては、引張破壊エネルギーは、普通強度のコンクリートに対し一般に約 0.1N/mm^2 程度の値が用いられることから、 $G_R=0.1\text{N/mm}^2$ を基準値とした。一方、式(2)に示すせん断低減係数の低下率を表す係数 κ は、齊藤¹²⁾が山田・青柳モデル¹⁵⁾と低下率が近似的に一致するように決定した値 $\kappa=0.3$ を基準値とした。

鉄筋とコンクリートの界面の材料モデルとしては、既往の知見が少ないため、コンクリートの材料モデルを基本とすることとした。ただし、図-7に示すように圧縮応力が卓越すると考えられる鉄筋の節上面とコンクリートの境界では、コンクリートと鉄筋との機械的な力の伝達に着目するために、出来るだけ剛結に近づけることとし、弾性剛性を鉄筋の剛性($2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$)と等しいと仮定した。一方、鉄筋の節上面以外の部分とコンクリートとの境界は、鉄筋表面の微細な凹凸へ付着したセメントペーストが硬化とともにせん断キイとなって表面の付着抵抗力を発揮すること¹⁶⁾を簡単に考慮するために、コンクリートの剛性($2.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$)と等しいと仮定した。

解析は、引張破壊エネルギーは、基準値に対して1/5倍、5倍の3通りに変化させ、せん断低減係数の低下率を表す係数 κ も同様に、基準値に対して1/5倍、5倍の3通りに変化させて行った。

3.2 解析結果および考察

図-8に、引張破壊エネルギーを変化させた場合の平均応力-平均ひずみ関係を示す。平均応力は荷重を断面積で

除したものとし、平均ひずみは部材変位を部材長さで除して算出したものである。また図中には、鉄筋単体および鉄筋コンクリートそれぞれの弾性剛性による平均応力-平均ひずみ関係とひび割れ発生後のテンションスティフニング効果を式(3)の異形鉄筋に対する岡村らのモデル³⁾により算定した結果を併せて示している。

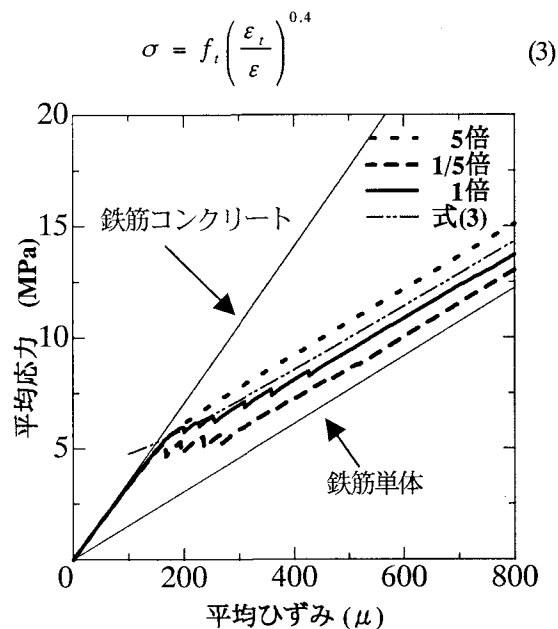


図-8 引張破壊エネルギーが平均応力-平均ひずみに及ぼす影響

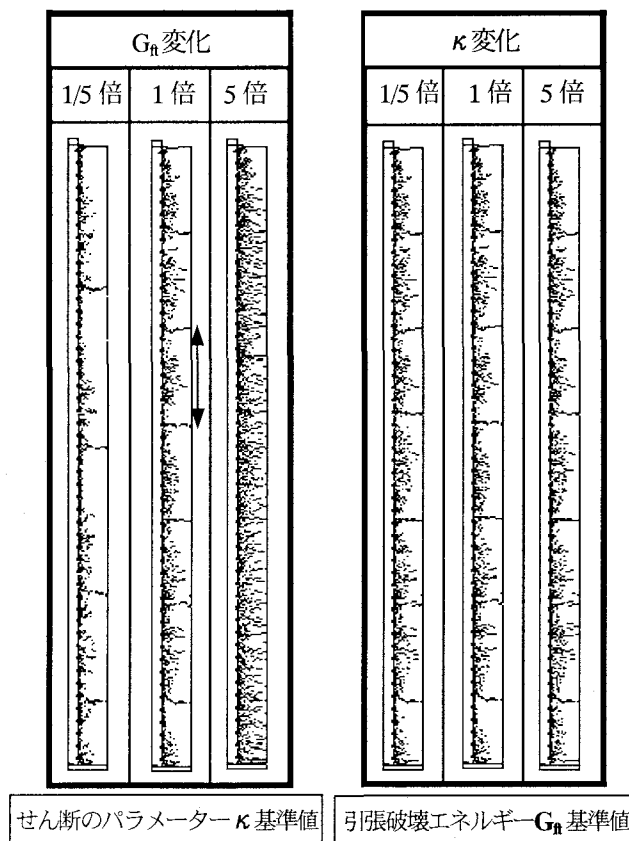


図-9 ひび割れ性状

解析結果は、いずれのケースでもひび割れ発生後、応力が徐々に鉄筋単体の挙動に近づくテンションスティフニング効果を示す。引張破壊エネルギーを変化させると、ひび割れ発生後の曲線は変化し、その値が小さいほど鉄筋単体の挙動により近づく傾向を示す。また、既往のテンションスティフニングモデルと比較すると、基準値を用いた場合が最も近い傾向を示すことが分かる。一方、せん断低減係数の低下率を表す係数 κ を変化させた場合は、平均応力-平均ひずみ関係はほとんど変化しなかった。

図-9 に各解析ケースより得られた平均ひずみが 800 μ 時点のひび割れ性状を示す。なおひび割れは、鉛直バネのひずみが引張強度以降の軟化経路上にある Voronoi 要素の辺を描くことで表現している。せん断低減係数の低下率を表す係数 κ を変化させた場合は、平均応力-平均ひずみ関係同様にひび割れ挙動がほとんど変化していない。引張破壊エネルギーを変化させた場合には、ひび割れの挙動は大きく変化し、引張破壊エネルギーが大きくなるほど、コンクリート内部のひび割れが増加し部材全体にわたって分布し、部材表面に達して卓越するような横ひび割れは生じなくなる。一方、引張破壊エネルギーが小さくなると、部材表面に達する横ひび割れが顕在化するとともに、そのひび割れ間隔が大きくなっていることが分かる。

RC 部材のひび割れ間隔については、土木学会コンクリート標準示方書「構造性能照査編」¹⁷⁾では、内外の研究成果を参照して最大ひび割れ間隔 l の算定式として式(4)を与えている。

$$l = 4c - 0.7(c_s - \phi) \quad (4)$$

ここで、 c はかぶり、 c_s は鉄筋の中心間隔 ($c_s=0$)、 ϕ は鉄筋の直径である。式(4)より求められる最大ひび割れ間隔は 153.6mm となる。本解析結果では、引張破壊エネルギーに基準値を用いた場合に、最大ひび割れ間隔が 148.8mm となり、式(4)と最もよく整合する結果となった。このときの最大ひび割れ間隔は図-9 の矢印で示した。

以上の結果から、今回の解析対象に対しては、数 mm オーダーの要素分割で行うメソスケール解析においても、数 10cm オーダーの寸法を持つ供試体の実験より得られた材料の応力-ひずみ関係を用いればよいと考えられる。したがって、本節以降の解析では基準値を用いた材料の応力-ひずみ関係による結果により各種検討を行うこととする。

4. メソスケール挙動が付着特性に及ぼす影響

本章では、3 章で行った材料の応力-ひずみ関係に基準値を用いた結果を詳細に検討することで、メソスケールの挙動がマクロな付着特性に及ぼす影響について検討する。

図-10 に平均応力-平均ひずみ関係、図-11 に図-10 中の①～⑨の状態に対応するときのひび割れ状況を示す。ひび割れ発生応力の約半分の応力時点から ①、剛性が弾性剛性より若干小さくなる傾向を示す。この時点は、ひび割れ図から節近傍に微細なひび割れが発生する状態に対応する。その後、微細なひび割れは供試体に広がりはじ

め、ひび割れ発生応力近傍では、供試体全域にわたり発生していることが分かる ②。分布する微細なひび割れのうち一カ所に部材表面部である程度のひび割れ幅が観察できるような横ひび割れが発生すると、剛性は急激に低下する ③。この時点が実験でひび割れの発生を目視で観察できる時点と考えられる。また、横ひび割れ周辺では微細なひび割れが消え、応力が除荷されていることが分かる。その後は、提案されているテンションスティフニングモデルとほぼ同様の挙動を示し、徐々に応力が鉄筋単体の挙動に近づく傾向を示す。一方、ひび割れ状態は、ある間隔で既に発生している横ひび割れのほぼ中間位置に新たな横ひび割れが順次発生し ④、⑤、⑥、ある本数の横ひび

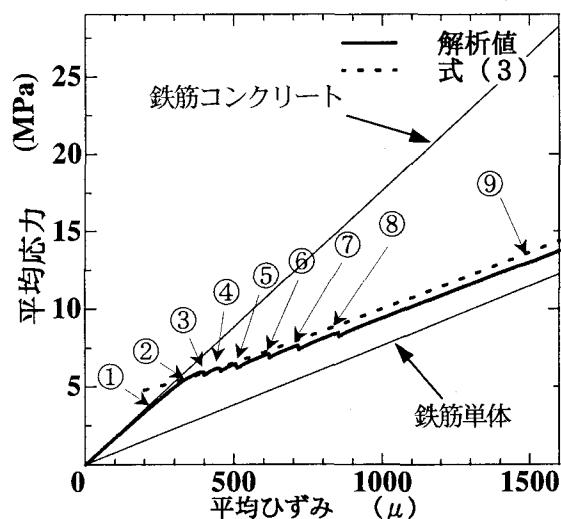


図-10 平均応力-平均ひずみ関係

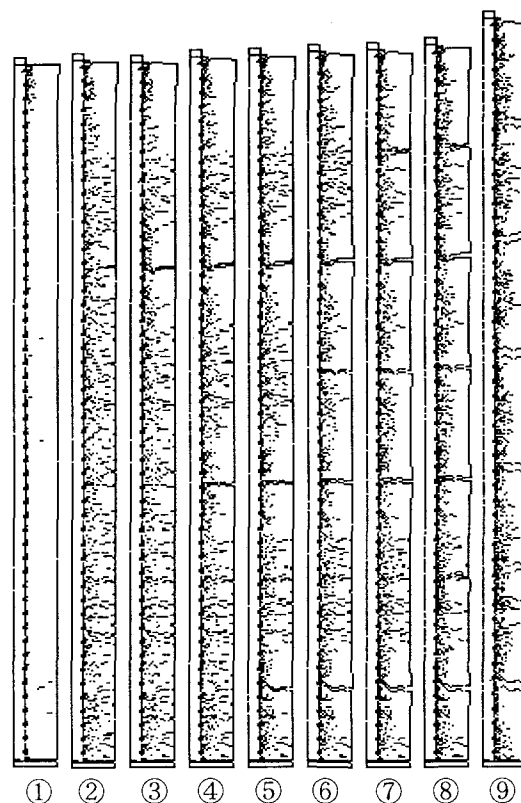


図-11 ひび割れ状況図

割れが発生すると定常状態となる。その後は、既に発生しているひび割れのひび割れ幅のみが増加していく挙動を示すことが分かる(⑦, ⑧, ⑨)。また部材表面に達する横ひび割れとともに、節周辺に内部ひび割れが存在する。

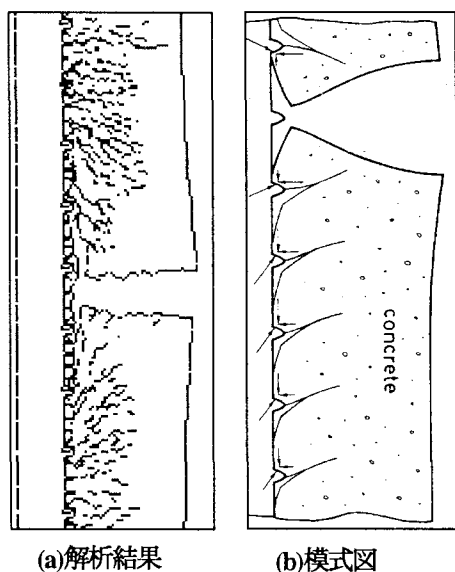


図-12 横ひび割れと内部ひび割れ

図-12 に横ひび割れ周辺を拡大した内部ひび割れ状況を示す。また、解析モデルと断面形状のみ異なる実験より観察された内部ひび割れを、後藤ら⁹⁾が模式的に示した図をあわせて示す。後藤らによれば、内部ひび割れは各節部から約 60° の角度で最寄りの横ひび割れの方角に発生することが明らかにされている。また、横ひび割れと鉄筋との接点付近の鉄筋表面には、鉄筋とコンクリートのはく離によって生じた隙間が存在することを示している。図-12 に示す解析結果も実験で得られた挙動とほぼ同様の挙動が再現されていることが分かる。

以上の結果より、本解析手法で既往の実験で得られた異形鉄筋近傍の内部ひび割れ挙動や部材表面に達する横ひび割れの挙動およびひび割れ発生後のテンションステッピング効果をおおむね妥当に再現できることが分かる。今回の解析の特徴は、鉄筋の幾何形状をモデル化し、異形鉄筋の節からの応力伝達を直接的に解析したことであるが、実験結果をおおむね妥当に再現することは、付着機構は節近傍の支圧的な挙動が支配的であることを推測させる。したがって、今回行ったようなメソスケール解析をさらに3次元に拡張し現実に近い解析手法とすることで、付着メカニズムを今後より詳細に検討することが可能になると考えられる。

5. 異形鉄筋の幾何学的および力学性状の影響評価

本章では、前章で用いた解析モデルに対し、部材長さだけを半分にしたモデル(50cm)により付着挙動への鉄筋の節の間隔および鉄筋の剛性の影響を解析的に評価する。

5.1 異形鉄筋の節間隔(lug)の影響

鉄筋の節間隔 lug を 10mm, 20mm, 30mm の3通りに変換させ、付着挙動に及ぼす影響を検討した。

節間隔の影響については、後藤ら⁹⁾の実験によれば、(1)節間隔が小さくなるほど最大ひび割れ間隔 L_{max} は小さくなり、横ひび割れの分散性がよくなる、(2)節間隔が小さくなれば長さの短い内部ひび割れが数多く発生する、(3)内部ひび割れの鉄筋軸とのなす角度に及ぼす節間隔の影響はあまりない、等が明らかになっている。

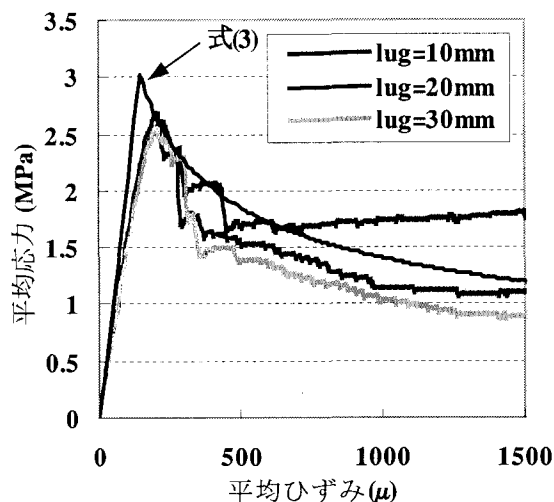


図-13 コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

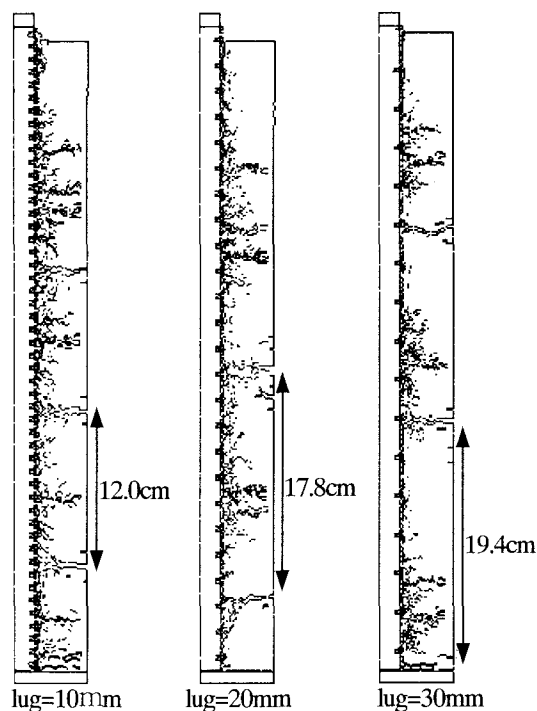


図-14 ひび割れ挙動と応力図

図-13 に荷重－変位関係から鉄筋の負担分を差し引いた平均応力－平均ひずみ関係を示す。この関係が、一般にテンションスティフニング曲線と呼ばれ、付着の影響をコンクリートの平均応力－平均ひずみ関係に含めてモデル化するものである。また図中には、岡村ら⁹⁾が提案した異形鉄筋に対するテンションスティフニングモデルを併せて示している。図によれば、節間隔が小さいほど付着が良好となりひび割れ後の応力が大きくなることから分かる。

図-14 に平均ひずみが 1500μ 時点のひび割れ状況を示す。節間隔が小さくなるほど横ひび割れが多数発生しひび割れの分散性がよくなっていることが分かる。また節間隔が小さいほど内部ひび割れが多数発生している。

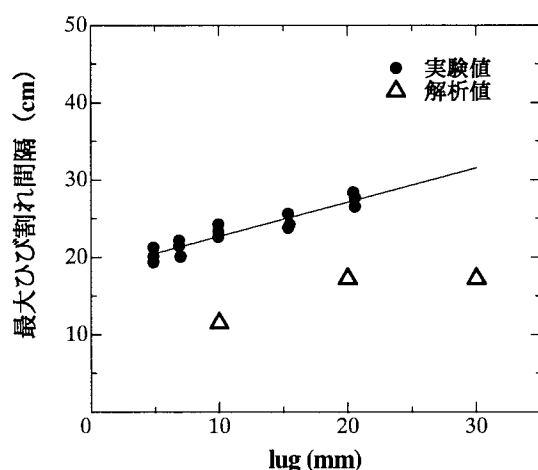


図-15 節間隔と最大ひび割れ間隔の関係図

図-15 に解析および後藤らの実験⁹⁾から得られた節間隔 lug と最大ひび割れ間隔 L_{max} の関係を示す。解析モデルと同様の諸元を持つ後藤らの実験では、節間隔を 5mm から 22mm まで変化させた場合、最大ひび割れ間隔はほぼ直線的に変化することが示されている。一方、解析結果は最大ひび割れ間隔を実験より小さめに評価しているが、節間隔が 20mm 以下の場合実験結果とほぼ同じ傾きで変化している。ただし節間隔が 20mm 以上では、節間隔が大きくなっても最大ひび割れ間隔はそれほど増加しない結果となった。

以上の結果から、異形鉄筋の幾何学的形状についての影響を解析的に評価することが可能と言える。このことは、本解析手法により、ひび割れの局所化を防ぎ、ひび割れの分散性をあげるなど鉄筋とコンクリート間の付着作用の影響を、異形鉄筋の節の形状設計の観点から解析的に検証が可能になると考えられる。

5.2 鉄筋の剛性の影響

近年、耐久性の観点から鉄筋の代替として FRP 材やステンレス筋の使用が検討されているが、今後も鉄筋に変わる新たな材料特性を持つ補強材が開発される可能性がある。そこで、鉄筋の剛性 E を $1.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $3.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ の 3 通りに変化させ、補強材の剛性が付着挙動に及ぼす影響を検討した。

図-16 に荷重－変位関係から鉄筋の負担分を差し引いた平均応力－平均ひずみ関係を、図-17 に平均ひずみが 1500μ 時点のひび割れ状況を示す。鉄筋の剛性を変化させても、ほぼ同様の平均応力－平均ひずみ関係およびひび割れ状況を示しており、鉄筋の剛性は付着特性にほとんど影響を及ぼさないことが分かる。このことは付着特性は図-1に示されているような節近傍のコンクリートの内部ひび割れに大きく依存していることを示唆するものと考えられる。

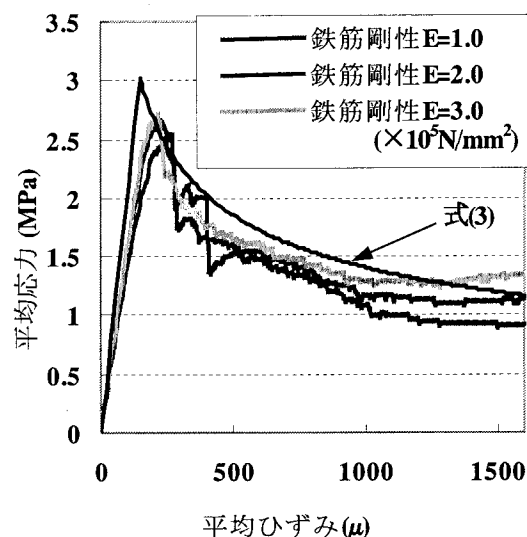


図-16 平均応力－平均ひずみ関係

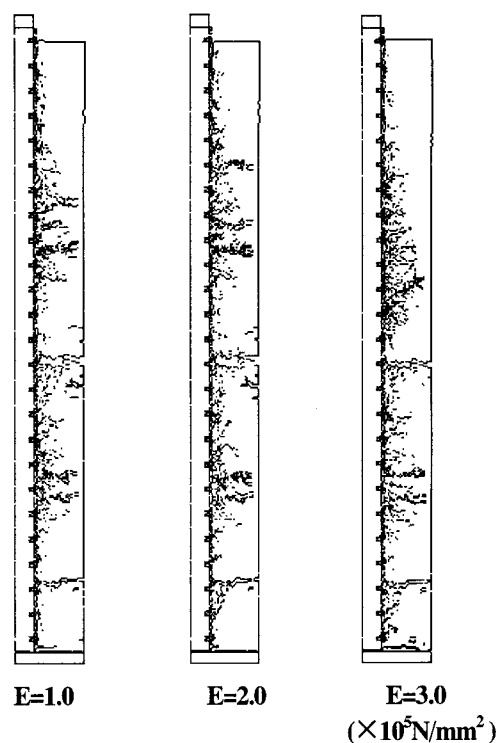


図-17 ひび割れ状況図

6. 結論

本研究では、鉄筋の幾何形状までをモデル化したメソスケール解析により、付着特性とそのメカニズムに対する評価の可能性について検討を行った。

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 数 mm オーダーの寸法の要素分割による解析でも、今回対象とした解析モデルでは数 10cm オーダーの寸法を持つ供試体の実験より得られたマクロな材料特性を適用できると考えられる。
- (2) 本解析手法のように、鉄筋の幾何形状を直接モデル化し、コンクリートと鉄筋との機械的な力の伝達に着目すれば、鉄筋コンクリートの付着性状やひび割れ状況をおおむね再現し、内部の損傷進展状況を可視化できることを示した。このことは、異形鉄筋の形状設計や新材料が開発された場合の付着特性を解析的に評価可能にするものである。
- (3) 引張破壊エネルギーが大きくなるとひび割れ分散性が向上し、横ひび割れが顕在化しにくくなることを示した。
- (4) 異形鉄筋の節間隔は、付着特性および最大ひび割れ間隔に影響を及ぼし、節間隔が小さくなるほど、付着特性がよくなるとともに内部ひび割れが多数発生し最大ひび割れ間隔が小さくなることを解析的に示した。
- (5) 補強材の剛性は、付着特性やひび割れ性状にほとんど影響を及ぼさないことから、付着特性は節近傍のコンクリートの内部ひび割れに大きく依存している可能性があることを示した。

なお今後の課題としては、以下が挙げられる。

- ・ メゾレベルでの材料モデルについて、適切なものを検討すること。
- ・ 鉄筋とコンクリートの界面について、適切な境界条件の設定。
- ・ より実現象に近い挙動についての評価が行えるようにするために 3 次元解析を行う必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、(社)日本コンクリート工学協会「コンクリート構造の微細構造解析委員会」の委員の方と貴重な意見交換を行った。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.
- 2) Schlangen, E. and van Mier J.G.M.: Experimental and numerical analysis of micromechanisms of fracture of cement-based composites, Cement and concrete composites, Vol.14, pp.105-118, 1992.
- 3) Nagai, K., Sato, Y., Ueda T. and Kakuta, Y.: Numerical simulation of fracture process of concrete model by rigid body spring method, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.163-168, 2002.
- 4) 森田司郎, 角徹三: 鉄筋コンクリート柱はり接合部におけるはり主筋の付着特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1777-1778, 1977.
- 5) Ciampi, V., Eligehausen, R., Bertero, V.V. and Popov, E.P.: Analytical model for deformed bar bond under generalized excitations, IABSE Colloquium Delft, Report of the Working Commissions, Vol.34, pp.53-67, 1981.
- 6) Hawkins, N.M., Lin, I.J. and Jeang, F.L.: Local bond strength of concrete for cyclic reversed loadings, Bond in concrete, Proceedings of the international conference on bond in concrete, Applied Science Publishers, London, pp.151-161, 1982.
- 7) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり関係, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, pp.165-174, 1987.
- 8) 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割れに関する研究, 土木学会論文報告集, 第 294 号, pp.85-100, 1980.
- 9) Goto, Y.: Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars, Jour. Of ACI, Vol.68, pp.244-251, April, 1971.
- 10) Kawai, T.: New discrete models and their application to seismic response analysis of structure, Nuclear Engineering and design, Vol.48, pp.207-229, 1978.
- 11) Ueda, M., Takeuchi, N., Higuchi, H. and Kawai, T.: A discrete limit analysis of reinforced concrete structures, Computer-aided analysis and Design of concrete structures, Pineridge Press, pp.1369-1384, 1984.
- 12) Saito, S.: Fracture analysis of structural concrete using spring networks with random geometry, Doctor Thesis of Kyushu University, 1999.
- 13) Ueda, M., Kambayashi, A., Kito, H. and Takeuchi, N.: Size effect analysis using RBSM with voronoi elements, Size effect in concrete structures, E&FN Spon, pp.221-232, 1994.
- 14) Saito, S. and Hikosaka, H.: Numerical analysis of reinforced concrete structures using spring network models, Journal of Materials, concrete structures, and pavements, JSCE, V-44, pp.289-303, 1999.
- 15) 山田一字, 青柳征夫: ひび割れ面におけるせん断伝達, RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム, コンクリート工学協会, pp.19-28, 1983.
- 16) 田辺忠顕, 檜貝勇, 梅原秀哲, 二羽淳一郎: コンクリート構造, 朝倉出版, 1992.
- 17) (社)土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002.

(2004 年 4 月 16 日 受付)