3 次元 RBSM によるかぶり厚が付着性状に及ぼす影響の解析的評価

名古屋大学大学院　学生会員　○山本　尚文
名古屋大学大学院　　正会員　　中村　光　上田　尚史　国枝　稔

1. はじめに

コンクリートと鉄筋の付着特性は，異形鉄筋の節近傍の応力伝達と微細ひび割れの進展の結果として発生するため，その特性を解析的に評価するためには節の幾何形状までモデル化を行ったメゾスケールでの解析を行なうのが望ましいと考えられる．また，付着特性については，曲げ部材のようなかぶり厚が小さい場合は，かぶり厚により付着応力が変化することが報告されている [1)]．そこで本研究では，ひび割れなどの不連続挙動を扱うのに適していると考えられる剛体バネモデル（以下，RBSM）を鉄筋の節形状までモデル化したメゾスケール解析に適用し，かぶり厚変化が付着性状に与える影響について解析的な評価を行なった．

2. 解析手法

2.1　ＲＢＳＭ

RBSM を用いたメゾスケール解析による付着性状の評価は 2 次元モデルで行なわれているが [2)]，本研究で対象とするかぶり厚さ変化を解析するためには，3 次元のモデル化が必要となる．そこで，図－1 に示すような 3 次元 RBSM により，解析を行なった．剛体要素は要素重心に 6 自由度の 3 次元剛体変位を設定し，要素境界面上には，境界面法線方向と接線方向に垂直バネ, およびせん断バネを配置した. また，多角形の境界面上の母点と頂点を結んで出来る領域の各重心に垂直バネとせん断バネを配置した.すなわち境界面上で複数の垂直バネおよびせん断バネを設定することで隣接要素の回転相対変位に対する非線形抵抗特性を表現した．また，要素分割方法はボロノイ分割を用いたランダムな要素形状でコンクリートおよび鉄筋をモデル化した．なお，メゾスケールのモデル化では，要素は骨材寸法よりも小さくなるが，本研究では，骨材等のモデル化は行なわず，一相材料であるコンクリートとして扱った．

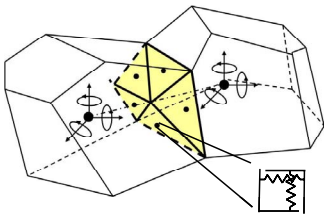


図-1　剛体要素の自由度および境界面の評価点

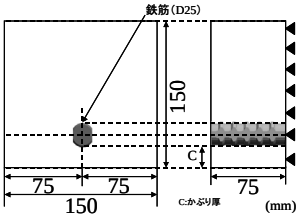
2.2 コンクリートの材料モデル

コンクリートの材料モデルとして，圧縮領域では弾性と仮定した場合と，圧縮強度に到達するまでは弾性，到達後は圧縮強度を保つと仮定した場合の 2 通りのモデル化を行い，節近傍の支圧応力による圧縮挙動の影響を評価した．一方，引張領域では，破壊エネルギーを考慮した 1/4 モデルを用いた．せん断バネについては，モールクーロン型の破壊基準を仮定し，強度後はひずみ軟化するものとした．鉄筋は，弾性と仮定し，降伏はしないものとした．

鉄筋とコンクリートの界面のモデルは，垂直方向のバネについては強度，剛性共にコンクリートと同じものと仮定した．せん断バネについては垂直方向のバネの引張ひずみが引張強度に達した時にせん断バネの強度は 0 とし，圧縮ひずみが生じた時には圧縮応力に従いせん断バネの強度は増加するモールクーロン型の破壊基準を仮定した．なお，せん断強度は丸鋼の付着強度により決定した．

2.3 解析モデル

解析は，松本らにより行なわれた一軸方向の両引き試験を対象とした．対象とした実験供試体は断面 150×150mm, 長さ 150mm であり, かぶり厚が 10mm と 50mm の 2 体とし，鉄筋は総ねじ PC 鋼棒 D25 が用いられた．モデル概要を**図 - 2** に示す．供試体モデルは対称性を考慮して長さ方向に対し，実験供試体の 1/2 モデル（断面 150×150mm，長さ 75mm）とした．鉄筋は総ねじ PC 鋼棒 D25 とし，図－3 に示すように節の幾何形状までモデル化を行い，弾性係数を 1.89×10^5N/mm^2 とした．コンクリートの材料諸元を**表－1** に示す．



断面図　　側面図

図-2　モデル概要

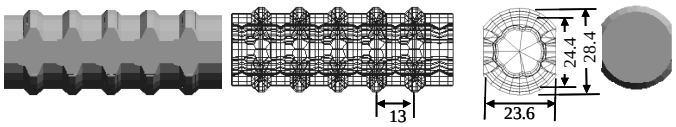


図-3　鉄筋モデル形状および寸法

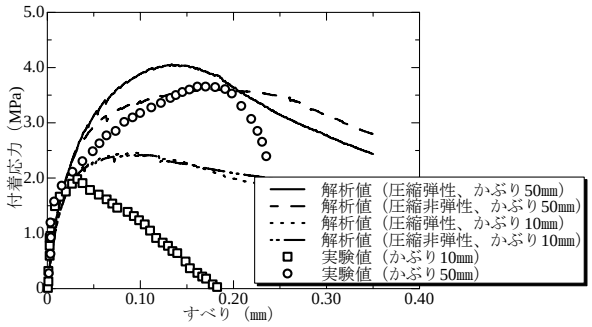
表－1　コンクリート材料諸元

かぶり (mm)	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)
10mm	25.2	2.45	2.00×10^4
50mm	25.3	2.54	2.00×10^4

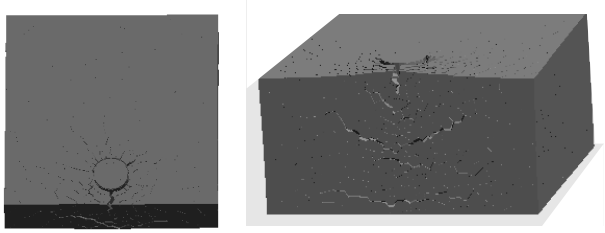
3. 解析結果および考察

図－4 にかぶり厚 10mm と 50mm の付着応力－すべり関係を示す．ここで付着応力とは平均付着応力であり，すべり量は載荷端変位とした．また，**図 - 5**，**図 - 6** にひび割れ性状を示す．付着応力－すべり関係はかぶり厚 10mm，50mm ともに，付着応力の増加に伴い剛性が低下し始め，曲線の勾配を低下させながらピークに達した．また，最大付着応力は実験同様にかぶりの影響を明確に受けることが示されており，本解析手法が定性的にかぶりの影響を表現可能であることが分かる．

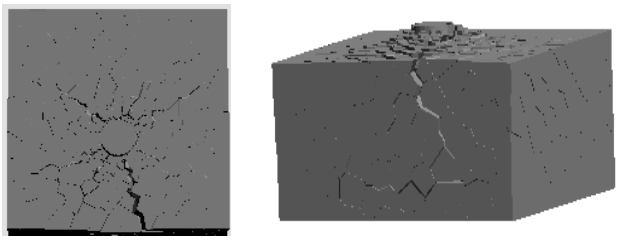
かぶり 50mm のケースでは，コンクリートの圧縮挙動を弾性と仮定した場合は，最大付着応力を過大に評価するとともに，付着応力 $1.5N/mm^2$ 付近での剛性の変化を必ずしも表現していないことがわかる．一方，圧縮強度後，その応力を一定としたモデルでは，付着応力 $2N/mm^2$ 付近で剛性が変化すると供に最大付着応力も実験値に近い値を示している．この結果から，実験において，節近傍ではモルタルのみが存在するが，支圧応力によりモルタルが圧縮破壊をしていることが推測される．本解析では，一相材料としてコンクリートのモデル化を行ったが，節近傍のコンクリートモデルについてはさらに詳細な検討が必要であると考えられる．かぶり 10mm のケースに対しては，解析は実験値のようなピーク後の急激な付着応力の低下は示さなかった．この理由としては，実験ではピーク時点で縦ひびわれが発生していることが報告されており，解析でも縦ひび割れは認められるが，発生後縦ひびわれが発達しなかったためと考えられ，この点についてもモデルの詳細な検討が必要と考えられる．コンクリートの圧縮挙動のモデルの相違は，かぶり 10mm のケースでは認められなかった．これは比較的応力の小さい段階で，付着応力が低下したため節近傍の支圧応力がそれほど卓越しなかったためと考えられる．



図－4　付着応力－すべり関係



図－5　ひびわれ性状（かぶり厚 10mm）



図－6　ひびわれ性状（かぶり厚 50mm）

4. まとめ

本研究では，3 次元 RBSM を用いて，かぶり厚変化が付着性状に与える影響について解析的な評価を行なった．その結果，かぶり厚さ変化の影響を定性的には再現できることが示された．しかしながら，定量的には相違が見られるため，メゾスケールの材料モデルについてより詳細に検討する必要があると考えられる．

5. 参考文献

1）松本隆明・檜貝勇ら：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，No2，pp.823-828，2004

2）武藤信太郎：メゾスケール解析による異形鉄筋の付着挙動評価，応用力学論文集 Vol.7 pp11-13，2004