

# 論文 鉄筋の腐食膨張によるコンクリートのひび割れ進展の FMM 解析

山城 建樹<sup>\*1</sup>・松原 仁<sup>\*1</sup>・伊良波 繁雄<sup>\*2</sup> 富山 潤<sup>\*3</sup>

**要旨**：鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れは、構造物の耐久性低下を加速させる原因の一つとされ、鉄筋コンクリートの耐久性を考える上で重要な要因の一つである。本研究では、節点に固有の材料値を持たせた点ベースによる解析手法を示し、鉄筋コンクリートの鉄筋の腐食膨張に伴う三次元ひび割れ解析を行った。また、本手法の妥当性を検討するため、三次元フリーメッシュ法を用いた鉄筋腐食膨張によるひび割れシミュレーションを示した。

**キーワード**：鉄筋腐食膨張, 三次元解析, フリーメッシュ法

## 1. はじめに

コンクリート中の鉄筋が塩害や中性化等の各種の要因により腐食すると体積膨張を起こし、その膨張圧によりひび割れが生じる。ひび割れが鉄筋コンクリートの表面に達すると、酸素や塩化物の進入が容易となり、鉄筋の腐食はさらに促進される。その結果、ひび割れの増加やかぶりコンクリートの剥離へと進展し、構造物の劣化状態をさらに進展させると考えられている。

このように鉄筋コンクリートのひび割れは、構造物の耐久性低下を加速させる原因の一つとされており、鉄筋の腐食に伴うコンクリートのひび割れ挙動を把握することは、構造物の耐久性を考慮する上で重要な要素の一つであると考えられる。

そこで、本研究では鉄筋の腐食膨張に伴う鉄筋コンクリートの三次元的なひび割れ挙動を解析するための一手法を提案する。本手法では、解析モデル内に存在する節点をコンクリート節点と鉄筋節点に分類し、点ベースで考慮することにより鉄筋コンクリートを表現した。また、鉄筋の腐食による体積膨張を、熱応力解析で用いられる膨張ひずみを利用し、鉄筋節点を含む要素にのみ与えることで鉄筋自体の膨張を表現

し、三次元フリーメッシュ法による鉄筋コンクリートのひび割れ解析を行った。

## 2. 三次元フリーメッシュ法<sup>1)</sup>

本研究において、求解法として用いた三次元フリーメッシュ法(3DFMM)について説明する。FMMの基本アルゴリズムは、領域内の各節点毎(中心節点)に、その付近の他の節点(衛星節点)と中心節点から、一時的に仮要素(局所要素)を自動的に生成する。これらの要素剛性マトリックスから中心節点に寄与する成分を求め、全体剛性マトリックスを生成する。具体的には、

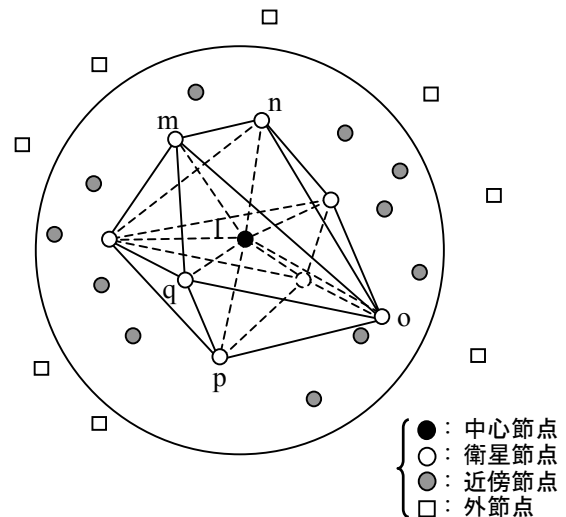


図-1 ローカル要素概念図

\*1 琉球大学大学院 理工学研究科 修士(工学) (正会員)

\*2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 博士(工学) (正会員)

\*3 琉球大学 工学部環境建設工学科助手 博士(工学) (正会員)

図-1のように中心節点1付近にある衛星節点(m, n, o, p, q, ...)を集め(中心節点1の節点密度関数で定義される半径Rの球領域), 中心節点1まわりで一時的な四面体要素(lmno, lmoq, lopq, ...)を作る。次に, 各四面体要素について有限要素法と同様に要素剛性マトリックスを作成し, 中心節点1に寄与する行成分のみを全体剛性マトリックスに足し込んでいく。得られた剛性マトリックスを元に連立一次方程式を解く方法は, 従来用いられている反復法の一つであるCG法(Conjugate Gradient Method)を用いた。

このようなフリーメッシュ法の特徴を生かすとフレッシュコンクリートの流動解析のような解析領域が大きく変動するような解析も可能である<sup>2)</sup>。

### 3. 鉄筋腐食膨張によるひび割れ解析

#### 3.1 節点材料判定方法

本手法では, 鉄筋自体の膨張による鉄筋コンクリートのひび割れ解析を行うため, 各節点に固有の材料値を持たせた点ベースによる考え方をを用いた。その具体的な方法として, まず図-2(a)のように解析モデル内に任意に発生させた節点群に対して, 図-2(b)に示す鉄筋中心位置と鉄筋半径により分類された各領域を対応させる。それにより, 鉄筋領域に含まれる節点を鉄筋節点, コンクリート領域に含まれる節点をコンクリート節点と判定する。

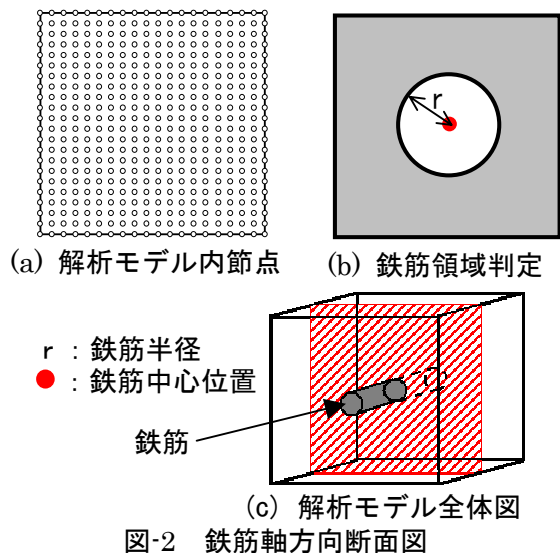


図-2 鉄筋軸方向断面図

この判定を図-2(c)のように鉄筋軸方向に対して行うことで解析モデル内の全節点に鉄筋とコンクリートの固有の材料値を持たせている。図-3にこの節点材料の判定方法により分類された節点材料分類図を示す。

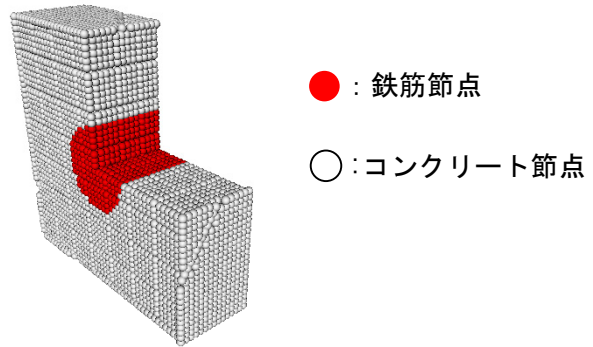


図-3 節点材料判別結果

#### 3.2 鉄筋腐食による膨張量

実現象において, 鉄筋の腐食により生じた錆の体積は元の体積の約2.5倍に膨張し, その膨張圧によって, 鉄筋コンクリートにひび割れが生じる。本研究では, 鉄筋の腐食により生じた錆による体積膨張を, 単純に鉄筋自体の膨張と仮定した。そこで, 3.1節の節点材料判定方法により鉄筋節点と判定された節点を含む局所要素に対して, 熱応力解析に用いられる熱ひずみによる見かけの節点荷重ベクトル $\{f_i\}$ を利用する<sup>3)</sup>。

具体的には, 鉄筋節点を含む局所要素に対してのみ, 式(1)で示される線膨張係数 $\alpha$ と任意の温度 $T$ を与えることで熱ひずみベクトル $\{\epsilon'\}$ を求める。この $\{\epsilon'\}$ を用いて, 式(2)に示す熱膨張力 $\{f_i\}$ を鉄筋節点を含む局所要素にのみ与えることで鉄筋自体の膨張を表現している。なお, 本研究では, 鉄筋の腐食による膨張を考慮しているため,  $T$ は上昇温度を与え, 局所要素の材料値は, その要素を構成する節点の平均値としている。

$$\begin{aligned} \{\epsilon^t\} &= \{\epsilon_x^t \quad \epsilon_y^t \quad \epsilon_z^t \quad \gamma_{xy}^t \quad \gamma_{yz}^t \quad \gamma_{zx}^t\}^T \\ &= \{\alpha T \quad \alpha T \quad \alpha T \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T \end{aligned} \quad (1)$$

$$\{f_t\} = \int_V [B]^T [D] \{\epsilon^t\} dV \quad (2)$$

$V$ : 要素体積

$[B]$ : ひずみ - 変位マトリックス

$[D]$ : 応力 - ひずみマトリックス

### 3.3 簡易ひび割れ進展解析法

本研究では、鉄筋コンクリートの鉄筋腐食膨張に伴う複雑なひび割れシミュレーションを行うため、簡略化した簡易ひび割れ進展解析法を用いた。この手法は、ひび割れ帯モデルの一つである固定ひび割れモデルを用い、コンクリートが引張強度に達した後のひび割れ面に対して、そのひび割れ面と垂直方向の応力は伝達しないと仮定している。

具体的には、ひび割れ節点を含む局所要素の要素剛性マトリックスが式(3)で表され、その応力-ひずみマトリックス $[D_{cr}]$ の $E_{cr}$ を0とすることにより表現した。(式(4))

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \\ \tau_{ns} \\ \tau_{st} \\ \tau_{tn} \end{Bmatrix} = [D_{cr}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_n \\ \varepsilon_n \\ \gamma_{ns} \\ \gamma_{st} \\ \gamma_{tn} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$[D_{cr}] = \begin{bmatrix} E_{cr} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \quad (4)$$

$E_{cr}$ : ひび割れ面と垂直方向の  
コンクリートのヤング率

$E_c$ : コンクリートのヤング率

$G$ : せん断弾性係数  $\beta$ : せん断弾性低減係数

また、ひび割れ節点を含まない健全要素に関しては、通常の有限要素法と同様に弾性理論から導かれる応力-ひずみマトリックス $[D]$ を用いた。ここで、簡易ひび割れ進展解析法による鉄筋コンクリートの鉄筋腐食膨張に伴うひび割れ解析の具体的な手順を以下に示す。

- (1) 3.1 に示した節点材料判別方法により、鉄筋の中心位置及び半径を設定し、各節点を鉄筋節点およびコンクリート節点に分類する。
- (2) 鉄筋節点を含む局所要素に対してのみ、任意の上昇温度を与えることにより、3.2 で示し

た熱ひずみによる膨張力 $\{f_i\}$ を求め、鉄筋部分のみを膨張させる。

- (3) 鉄筋の膨張により生じた各コンクリート節点の主応力を求め、式(5)を用いて各節点が、コンクリートの引張強度に達する比率を求める。

$$HM_i = \frac{\sigma_i}{f_t} \quad (5)$$

$HM_i$ : コンクリートの引張強度に達する比率

$\sigma_{max}$ :  $i$  節点の主応力

$f_t$ : コンクリートの引張強度

- (4) (3)で求めた各節点の比率 $HM_i$ の中から最大比率 $HM_{max}$ を決定し、その最大比率 $HM_{max}$ を持つ節点をひび割れ節点とする。
- (5) 最大の比率 $HM_{max}$ を式(6)により各節点の持つ全物理量に乘じ、ひび割れ後の物理量を決定する。

$$P_i = \frac{p_i}{HM_{max}} \quad (6)$$

$P_i$ : ひび割れ後の $i$  節点の物理量

$p_i$ :  $i$  節点を持つ物理量

以上のステップをひび割れが十分に進展するまで繰り返し行う。

本研究では、ひび割れ解析をよりスムーズに行うため、手順(4)の段階において、ひび割れ節点以外の節点の中から式(7)によって、最大比率 $HM_{max}$ との差が1割以内であると判定された節点全てをひび割れ節点とし、比率の高い順にひび割れ順位を決定している。

$$\frac{HM_i}{HM_{max}} \geq 0.9 \quad (7)$$

このように簡易ひび割れ進展解析法を用いることで数値解析上不安定にならず、複雑なコンクリートのひび割れ解析を比較的スムーズに行うことが可能である。

## 4. 数値解析例

ここでは、以上に述べた解析手法を用い、三次元フリーメッシュ法による鉄筋コンクリートの鉄筋腐食膨張に伴うひび割れ進展解析を行っ

た。表-1 に本研究の数値解析に用いた鉄筋及びコンクリートの材料定数を示す。また、本研究では鉄筋の腐食による膨張を考慮するため、 $\alpha$  は鉄の線膨張係数  $1.3 \times 10^{-7}$ 、 $T$  は上昇温度  $+1^\circ\text{C}$  とし、鉄筋節点を含む局所要素にのみ与えた。

表-1 鉄筋・コンクリートの材料定数

	ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
鉄筋	200000	0.3
コンクリート	25000	0.2

#### 4.1 数値解析例その 1

ここで、鉄筋自体の膨張に違いがある場合のひび割れ挙動を調べるため、本解析手法を用いたシミュレーション結果と、鉄筋部分を円孔と仮定し、円孔縁に内圧を加えた手法でのシミュレーション結果を示す。解析モデルとして、縦 150mm、横 150mm、奥行き 150mm とした立方体形状の鉄筋コンクリートの中心位置に径 19mm の鉄筋が設置された状態を仮定し、図-4 に示すように供試体の対称性を考慮し、全体の 1/4 領域をモデル化した。なお、境界条件としては、解析モデルの底面及び左側面の垂直方向変位を固定し、鉄筋自体の膨張を考慮した本手法では鉄筋節点を含む要素に一律な膨張量を与え、鉄筋部分を円孔と仮定し内圧を加えた手法では、円孔縁全体に単位荷重を加えた。

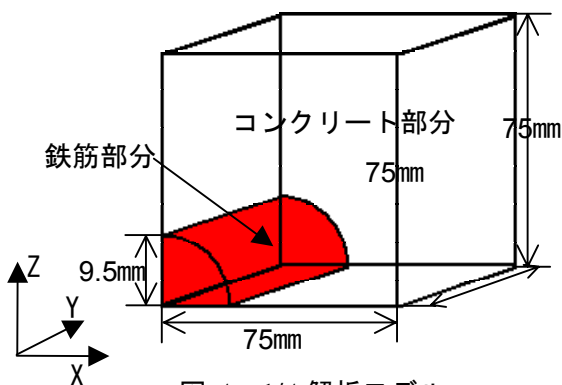
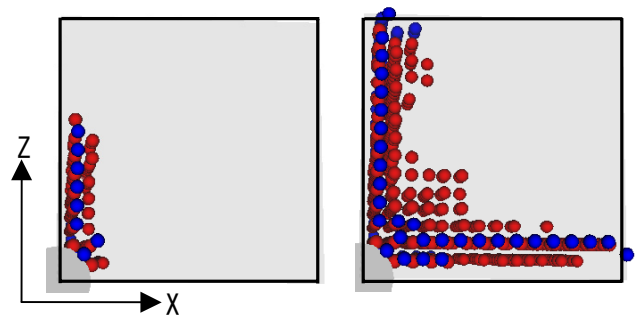


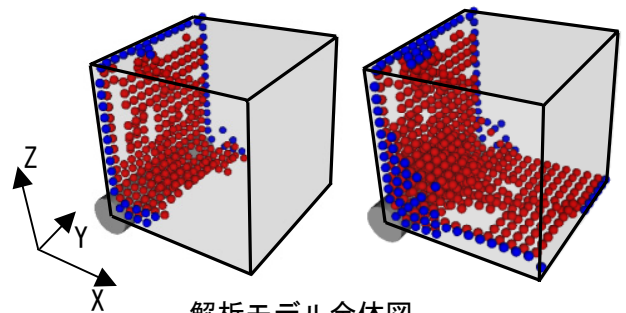
図-4 1/4 解析モデル

図-5 に鉄筋自体を膨張させた手法によるシミュレーション結果を示す。この図より初期のひび割れは、鉄筋表面から鉄筋軸に垂直な Z 軸方向に進展した。その後、鉄筋軸に垂直な X 軸方

向へと進展し、最終的には L 字型のひび割れ挙動を示した。



鉄筋軸断面方向



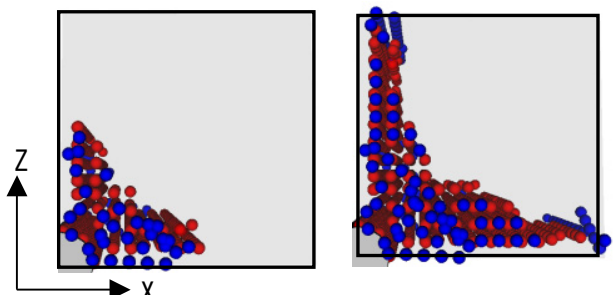
解析モデル全体図

●：内部節点 ●：表面節点

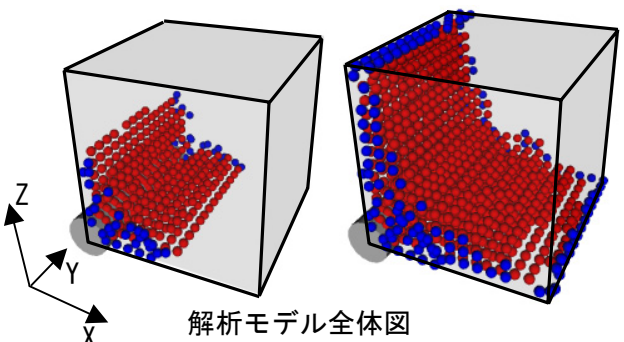
総節点数 3904

鉄筋節点：コンクリート節点=63：3841

図-5 鉄筋自体を膨張させた手法



鉄筋軸断面方向



解析モデル全体図

●：内部節点 ●：表面節点

総節点数 3854

図-6 円孔縁に内圧を加えた手法

図-6 に鉄筋部分を円孔と仮定した手法によるひび割れシミュレーション結果を示す。この図より、ひび割れの進行状況は本手法と違い、鉄筋軸に垂直な Z 軸方向および X 軸方向に同時に進展したが、最終的には先の結果同様、L 字型のひび割れが確認出来、両手法とも最終的なひび割れパターンとしてはほぼ一致した。なお、これらのひび割れの進展課程が両者間で異なる理由として、円孔壁面に垂直な方向の応力分布が異なるためであると考えられる。

#### 4.2 数値解析例その 2

ここでは、鉄筋コンクリート深部に縦、横に等間隔に設置された多数の鉄筋が同時に腐食すると仮定した場合のひび割れシミュレーションを行う。図-7 は、その一部分(180mm×180mm)を示しており、図-8 に示すように、中心部に設置された一本の鉄筋に着目し、縦 60mm、横 60mm、奥行き 40mm のコンクリートの中心位置に、径 20mm の鉄筋が設置された解析モデルを用い、ひび割れシミュレーションを行った。

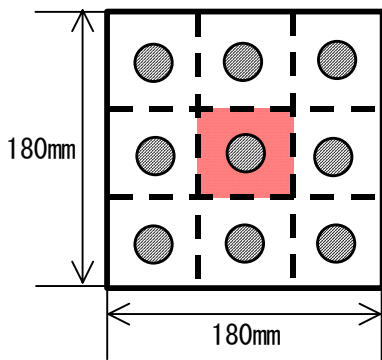


図-7 鉄筋の配置図(部分図)

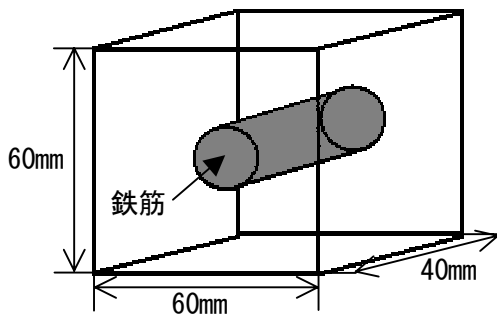


図-8 解析モデル

図-9 の(a)～(d)に、本手法を用いて行ったひび割れシミュレーションの鉄筋軸断面方向からのひび割れ進展状況を示す。図-9(a)に示すように、ひび割れは鉄筋表面を覆うように一様に発生した後、(b)、(c)段階で十字方向に進展している。しかし、(d)でひび割れが解析モデルの表面に達すると、鉄筋上部のひび割れは右方向へと進展していった。これは、本研究で求解法として用いたフリーメッシュ法により生成された要素が、全体をとおして様な形状ではないため、鉄筋の膨張による応力状態にバラつきが出たためと考えられる。

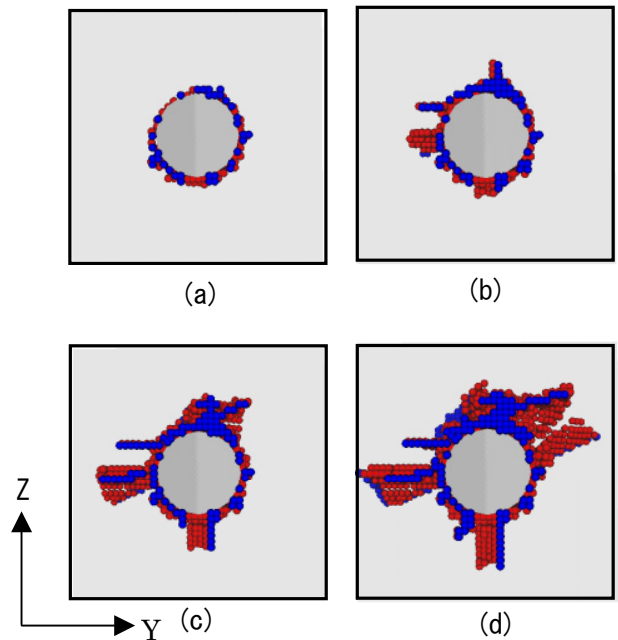
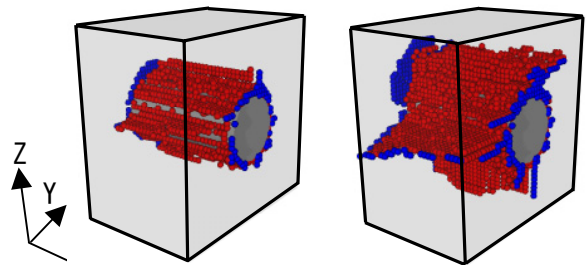


図-9 鉄筋軸断面方向のひび割れ進展図



解析モデル全体図

●: 内部節点 ●: 表面節点

総節点数 53394

鉄筋節点 : モルタル節点 = 4365 : 49029

ひび割れ節点 3583

図-10 ひび割れシミュレーション

図-10に、解析モデル全体図でのひび割れ進展状況を示す。この図より、解析モデルの左側面には鉄筋軸に沿ったひび割れが確認出来た。

図-11にひび割れの発生位置となった鉄筋端部(X=40mm)での、鉄筋表面付近コンクリートの主応力変化状態を示す。これより鉄筋の腐食膨張により生じた主応力値は240°から270°の範囲に集中している。図-9に示した鉄筋軸断面方向からのひび割れシミュレーション結果においても、ひび割れは鉄筋の下部周辺より発生し、鉄筋を覆うように進展していくのが確認出来た。

以上の結果より、ひび割れは鉄筋を中心に十字型に進展し、隣り合う鉄筋同士を結ぶように進展していくと考えられる。このような十字型のひび割れパターンは、静的破砕材を用いた一様な内圧を受けるコンクリートの破壊実験<sup>5)</sup>においても報告されている。よって、本手法を用いて鉄筋の腐食膨張に伴うひび割れパターンを表現することが可能であると考えられる。

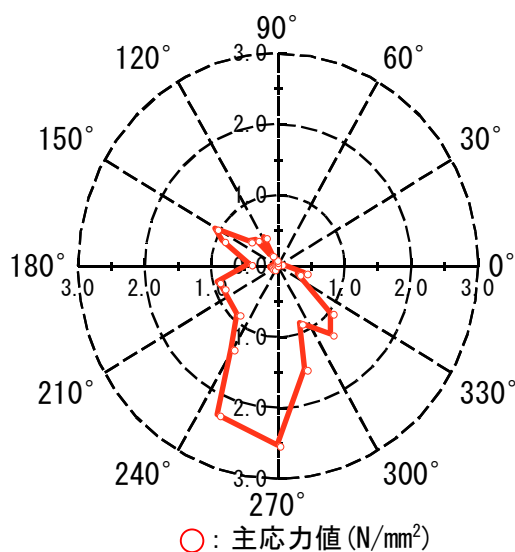


図-11 鉄筋円孔縁法線方向応力図

## 5. まとめ

本研究では三次元フリーメッシュ法を用い、鉄筋コンクリートの鉄筋腐食膨張に伴うひび割れ解析を行った。ここで、本研究により得た結果を以下にまとめる。

(1) 解析モデルで鉄筋領域を設定し、各節点に固有の材料値を持たせることで鉄筋コンク

リートのひび割れ解析を行った。

- (2) 1/4モデルを用いた数値解析例において、鉄筋自体を膨張させる手法のひび割れシミュレーションと、鉄筋部分を円孔と仮定し内圧を加えた手法でのひび割れシミュレーションとの比較により、膨張圧分布の違いによるひび割れパターンの変化を示した。
- (3) 数値解析例その2のモデルにおいて、コンクリート深部に鉄筋が設置された状態でのひび割れシミュレーションおよび、ひび割れ発生時の鉄筋表面付近のコンクリートに作用する主応力値を示し、本手法の妥当性を示した。

以上本研究により得られた結果を示したが、今回記した数値解析例は解析モデルを局所化し、簡略化した状態でのひび割れシミュレーションであるため、実構造物におけるひび割れ解析に対して、今後検討する必要がある。また、現段階では数値解析のみに留まっているが今後実験結果との比較検討も行う予定である。

## 参考文献

- 1) 矢川元基・細川孝之：フリーメッシュ法の三次元問題への適用，日本機械学会論文集(A編)，64巻，1998
- 2) 富山潤・伊良波繁雄・山田義智・松原仁，矢川元基：フリーメッシュ法によるフレッシュコンクリートの流動解析法に関する研究，土木学会論文集，No.746,V-61,pp.91-101,2003.
- 3) 矢川元基，宮崎則幸：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析，サイエンス社，1985
- 4) 安和守史，伊良波繁雄，富山潤，矢川元基：3次元フリーメッシュ法を用いたコンクリートの破壊解析手法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，CD-ROM,2002
- 5) 堤 智明・松島学・村上祐治・関博：腐食ひび割れの発生機構に関する研究，土木学会論文集，No,532,V-30,1996