

鉄筋の腐食によるひび割れ性状の有限要素解析

北海道大学大学院 学生員 亀谷 英樹  
北海道大学工学部 正 員 佐藤 靖彦  
北海道大学工学部 正 員 上田 多門  
北海道大学工学部 正 員 角田與史雄

1. はじめに

メンテナンスフリーと言われる鉄筋コンクリート構造物の早期劣化が、最近クローズアップされてきている。早期劣化の典型的被害が塩害等による鉄筋の腐食である。鉄筋の腐食により体積膨張が起こり、コンクリート構造物のかぶりに縦ひび割れが発生し、さらには剥離等の損傷を与える。こうした問題に対して様々な実験的検討が行われ、その成果が数多く報告されているが、かぶりの力学的挙動に関する解析的なアプローチは問題の複雑さのためにごく少数である。しかし、近年、信頼性の高いコンクリートの構成則、破壊力学等の研究成果により、より現象を正確に捉えた解析が可能となってきた。本研究では、非線形有限要素解析において、コンクリートの引張軟化、ひび割れ発生条件といった構成則が鉄筋の膨張によるかぶりコンクリートのひび割れ性状に及ぼす影響を及ぼすものであるか検討を行う。

2. 解析の概要

2. 1 解析プログラム

本解析において、鉄筋コンクリート梁部材用2次元有限要素解析プログラムWCOMR<sup>1)</sup>を、平面ひずみ問題用に拡張したものを使用した。本プログラムは分散ひび割れモデルを採用している。

2. 2 解析モデル

解析モデルとして、1辺が200mmの正方形断面を有する半無限長の梁の中心に直径25mmの鉄筋を配置した部材を考える。その要素分割を図-1に示す。鉄筋部の要素は設けず、コンクリート要素に直接強制変位を与えることで鉄筋の膨張を表現した。コンクリートの材料定数を表-1に示す。

表-1 コンクリートの材料定数

| 圧縮強度       | 引張強度       | ポアソン比 | 弾性係数        |
|------------|------------|-------|-------------|
| 34.3 (MPa) | 3.43 (MPa) | 0.2   | 24500 (MPa) |

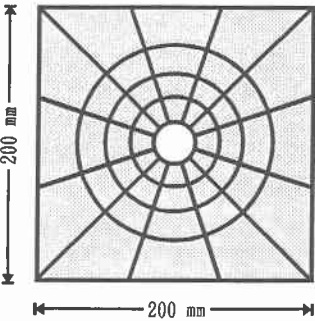


図-1 供試体断面

### 3 構成則のひび割れ性状への影響

#### 3. 1 ひび割れ発生条件の影響

ひび割れ発生条件を、最大主応力が1軸引張強度に達した時その直角方向でひび割れたと判定する場合と、2軸応力状態を考慮した2次元ひび割れ発生規準を用いた場合とのひび割れ性状の検討を行う。2次元ひび割れ発生規準は図-2に示す二羽モデルと青柳、山田モデルを組み合わせたモデル<sup>1)</sup>を使用した。鉄筋の膨張は鉄筋断面と同心円で半径方向で一様であるとした。解析によって得られたひび割れ性状を図-3、4に示す。両者ともに鉄筋の膨張量が0.32%の時のひび割れ性状を示すものである。かぶり表面にひび割れが到達する時の膨張量は2軸を用いたものの方が0.30%、1軸規準で0.32%と膨張量で若干の差異が見られたが、1軸、2軸両規準の違いがかぶりひび割れ性状に与える影響はほとんどないと言える。これは、解析結果において、ひび割れ発生時のガウスポイントの主応力状態が引張で約3.0MPa、圧縮で約3.0MPaという高引張－低圧縮場になっており、ひび割れ性状に差異が見られなかったと考えられる。この様な応力下では1軸と2軸の判定規準の違いはあまり見られない。これは、図-2からも明らかである。また、要素奥行き方向に0.5MPa程度の小さい圧縮力が生じているが、今回対象とした解析モデル(図-1)では影響はほとんどないと考えられる。

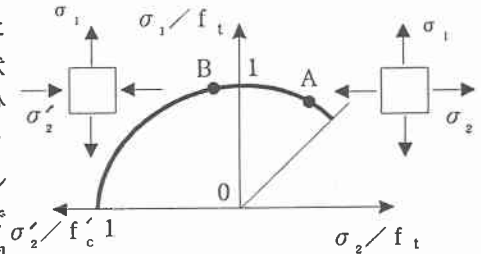


図-2 2次元ひび割れ発生規準

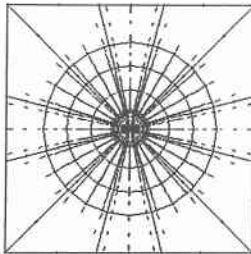


図-3 1軸ひび割れ発生規準のひび割れ性状  
(膨張率 0.32%)

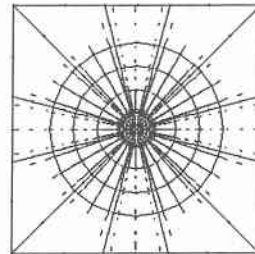


図-4 2軸ひび割れ発生規準のひび割れ性状  
(膨張率 0.32%)

#### 3. 2 引張軟化モデルの影響

有限要素法によるコンクリートの数値解析が始められた初期のころは、引張特性には図-5(a)のような脆性的破壊モデルが用いられていた。しかし、コンクリートにひび割れが発生しても応力は徐々に解放されていくという考え方が、現在一般的となっている。そこで、コンクリートのひび割れ発生後に、図-5(a)の様な脆性的モデルを適用した場合と、図-5(b)の様に指数

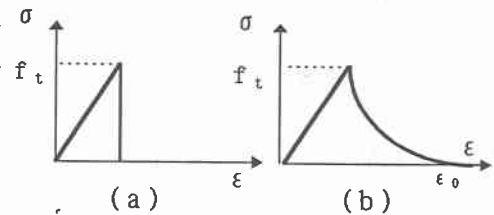


図-5 コンクリートの引張特性

関数で応力を減少させた引張軟化モデルを用いた場合でのひび割れ性状の違いについて検討した。  
使用した引張軟化モデルはReinhardtらの3乗モデル<sup>2)</sup>であり次式で表される。

$$\sigma = f_t \left\{ 1 + \left( c_1 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^3 \right\} \exp \left( -c_2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} (1 + c_1^3) \exp(-c_2)$$

ここで、 $C_1$ 、 $C_2$ は定数で、 $C_1=3.0$ 、 $C_2=0.693$ 、 $\varepsilon_0$ は応力解放時の引張ひずみを表す。本解析では、 $\varepsilon_0=1800\mu$ と仮定した。ひび割れ発生規準は両ケースとも2軸の規準(図-2)を用いている。図-5(b)のモデルの解析によって得られたひび割れ性状は図-4で示したものと同一である。図-5(a)における脆性的モデルのひび割れ性状を図-6に示す。この時のこのモデルの膨張量は0.29%であった。脆性的モデルの方が、かぶりに貫通ひび割れが若干早く発生するが、両モデルのひび割れ性状はほぼ一致している。解析結果から、引張軟化モデルにおいてかぶり貫通ひび割れ発生時には、その内側の鉄筋半径方向のすべてのガウスポイントが軟化域に分布していることが確認できた。

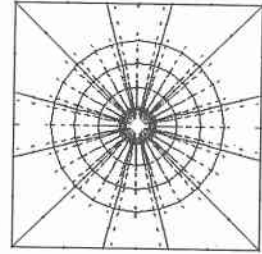


図-6 脆性的モデルを用いた時のひび割れ性状  
(膨張率 0.29%)

### 3.3 セン断剛性モデルによる影響

3.2まではパラメータ解析を行う上で、鉄筋膨張を等方であると仮定して解析をすすめてきたが、実際の現象において、RC部材の鉄筋の腐食膨張はブリージング等により鉄筋の上下面で不均一な膨張をすることが報告されている<sup>3)</sup>。そこで、同じ腐食量(膨張率)で等方と非等方な膨張でのひび割れ性状について検討し、同時に、この比較において影響があると考えられるせん断剛性モデルの有無によるひび割れ性状への影響についても検討した。鉄筋膨張モデルを図-7に示す。また、鉄筋の上面と下面の膨張量の比を1:2、1:4の2つケースについて解析した。解析結果としてそれぞれのケースについて、膨張量が0.24%の時のひび割れ図-8~12に示す。これらの図から、同じ膨張量でも非等方膨張はひび割れが局所化することが分かる。せん断剛性を考慮した非等方膨張の場合、ひび割れは下面、側面かぶりに卓越し上面の膨張率の割合によらず下面かぶりに貫通ひび割れが発生した。これに対して、せん断剛性を考慮しない非等方膨張の場合、ひび割れは側面かぶりにのみ卓越し、そのひび割れ幅はせん断剛性を考慮した時の側面ひび割れ幅よりも大きいことが分かった。こうした相違により、ひび割れ後にひび割れ近傍で両ケースの応力状態に変化が見られ、解析結果からせん断剛性を考慮した場合は引張-引張場(A点)、考慮しない場合は引張-圧縮場(B点)となることを確認しており、図-2のA、B点からせん断剛性を考慮する方がひび割れを起こしやすくなり、その分布が広範囲になったと考えられる。

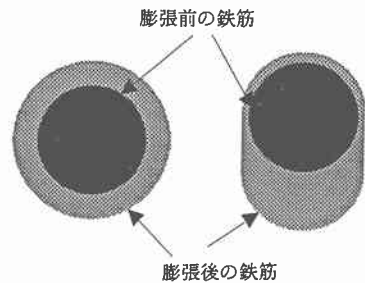


図-7 鉄筋膨張モデル

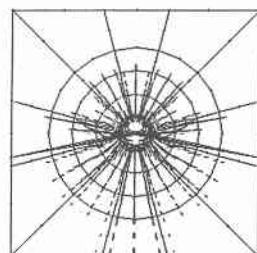
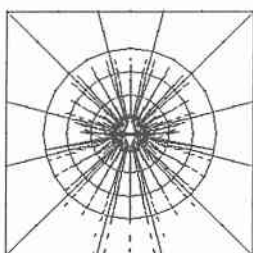
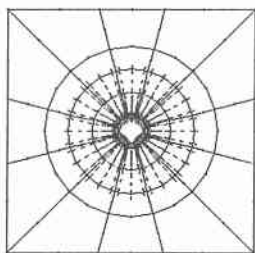


図-8 等方な膨張によるひび割れ性状      図-9 セン断剛性考慮下でのひび割れ性状      図-10 セン断剛性考慮下でのひび割れ性状  
(膨張率 0.24 %、上下面の腐食率 1 : 1)      (膨張率 0.24 %、上下面の腐食率 1 : 2)      (膨張率 0.24 %、上下面の腐食率 1 : 4)

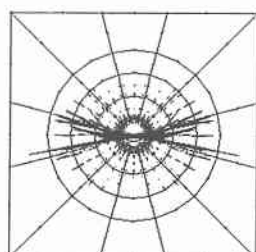
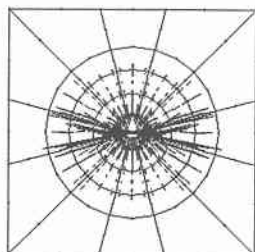


図-11 セン断剛性無考慮でのひび割れ性状      図-12 セン断剛性無考慮でのひび割れ性状  
(膨張率 0.24 %、上下面の腐食率 1 : 2)      (膨張率 0.24 %、上下面の腐食率 1 : 4)

#### 4 まとめ

- 1) ひび割れ発生規準の違いによるひび割れ性状への影響はあまり見られなかったが、これは応力状態がひび割れ発生時に高引張-低圧縮状態にあるためであった。
- 2) 引張軟化モデルと脆性的モデルの検証においてもひび割れ性状に大きな違いは見られなかった。かぶりに貫通ひび割れが発生した時には、その内側の半径方向ですべてのガウスポイントが引張軟化モデルの軟化曲線上に分布していた。
- 3) セン断剛性モデルの有無によりひび割れ性状が変化することが解析的に確認できた。よって、適切なセン断剛性モデルを用いることが必要であると考えられる。

#### 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
- 2) Reinhardt, H., Cornelissen H. and Hordijk D. : Tensile Tests and Failure Analysis of Concrete, Journal of Structural Engineering, pp2462-2477, 1986
- 3) 角本周、梶川康男、川村満紀：コンクリート中の鉄筋腐食による膨張挙動の弾塑性解析とその適用性、土木学会論文集、第402号/V-10、1989年、2月
- 4) 横関康祐、MISURA Sudhir、本橋賢一：腐食ひび割れ発生期間に関する解析的検討 土木学会第49回年次学術講演会、平成6年9月