

ラチスモデルと損傷モデルによる異形鉄筋周辺の内部ひび割れの再現に関する研究

茨城大学大学院 学生員 ○田久智行 茨城大学 正会員 車谷麻緒
愛媛大学 正会員 岡崎慎一郎 愛媛大学 正会員 中畑和之

1. はじめに

後藤ら¹⁾は引張を受ける異形鉄筋周辺の内部ひび割れを実験により立証した(図-1)。内部ひび割れは、コンクリートの密実性を低下させ、劣化因子の侵入を容易にする。つまり、内部ひび割れの状況を把握することは、構造物のメンテナンスを考える際、重要な課題である。しかし、内部ひび割れの進展を実験的に観察することは困難である。解析的に内部ひび割れの再現を試みた研究²⁾は散見できるが、その数は少なく、モデルや解析手法の妥当性に関して十分検証されていない。そこで、本研究ではラチスモデルと損傷モデルにより内部ひび割れの再現を試みる。また、2つの手法の解析結果の比較を行い、各解析手法の特徴をまとめ、さらに、実験結果と比較することにより、再現性を検証することを目的とする。

2. ラチスモデル

2.1 ラチスモデルの概要

コンクリート内にバラバラに分布する破壊の発生源(図-2a)左図)を、幾何学的に任意な形状に分割できるボロノイ多角形の一辺にモデル化(図-2a)右図)する。これにより、分散して発生する微細ひび割れを表し、巨視的ひび割れは微細ひび割れの連結で表現できる(図-2b)。

また、コンクリートを多数のボロノイブロックから構成される離散体と仮定すると、コンクリートは互いに結合したボロノイブロックの集合体と考えられる。その結合を線状の要素にモデル化すると、図-3 左図のようなデローニー三角形のラチス(格子)ができる。また、結合を表す一本のラチス要素(デローニー三角形の一辺)とひび割れを表すボロノイ多角形の一辺は、幾何学的に一对一の関係があり、あるラチス要素が破壊判定された際に、対応するボロノイ多角形の辺にクラックが発生したとみなす。

2.1 解析手法と破壊の表現

ラチス要素にはビーム要素を採用し、マトリックス構造解析($\mathbf{f} = \mathbf{K}\mathbf{u}$)で解く。 $\mathbf{f}$ は部材力ベクトル、 $\mathbf{K}$ は剛性行列、 $\mathbf{u}$ は変位ベクトルである。要素剛性行列の成分に含まれる断面積 A と断面二次モーメント I は、モデル全体の弾性係数に影響を与える。そのため、解析対象となる材料をラチスモデル化するには適切な断面係数を設定する必要がある。そこで本研究では、図-3 右図のように、ボロノイ多角形の一辺の長さ h の比から適切な断面係数を決定する。ラチス要素は引張応力が引張強度に達した際に、剛性を低下させることで微視的な破壊を表現する。また、軟化挙動を再現する巨視的破壊モデルである Cohesive crack model をラチス要素の引張破壊に適用し、引張軟化則として次式を与える。

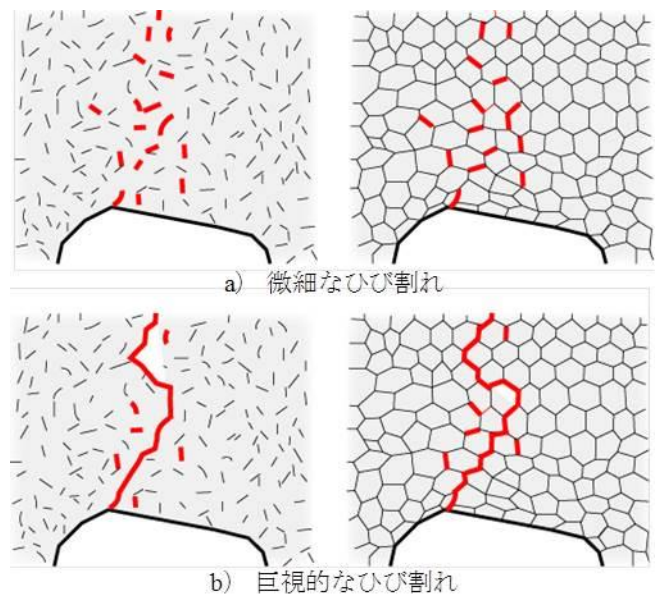
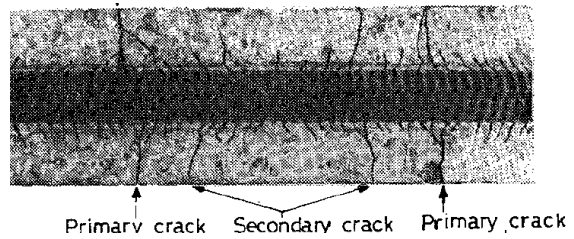


図-2 破壊の発生源のモデル化 (ボロノイ多角形)

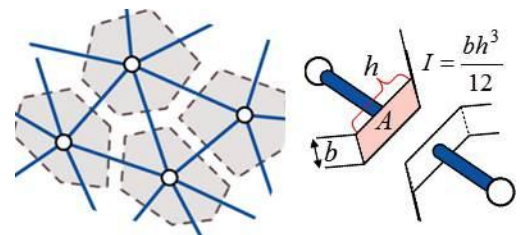


図-3 結合のラチスモデル化 (デローニー三角形)

$$\|\mathbf{t}^{\text{coh}}\| = f_t \exp\left(-\frac{f_t}{G_f} \kappa_t\right) \quad (1)$$

ここで、 $\|\mathbf{t}^{\text{coh}}\|$ は結合力ベクトルの大きさ、 f_t は微視的な引張強度、 G_f は微視的な引張破壊エネルギー、 κ_t は载荷履歴におけるひび割れの最大開口変位である。

3. 損傷モデル

損傷モデルとは、損傷を微視的欠陥の密度および分布を表す変数を導入した連続体モデルである。本研究では、損傷モデルにおける構成則を次式で定義する。

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D)\mathbf{H} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

キーワード 内部ひび割れ, ラチスモデル, 損傷モデル, 両引き試験

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1 茨城大学日立キャンパス TEL: 0294-38-5004 FAX: 0294-38-5268

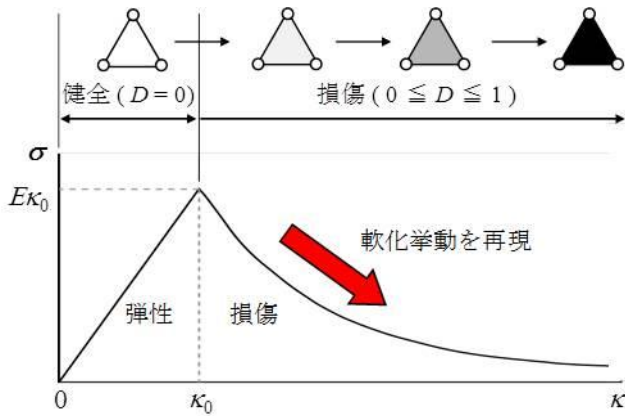


図-4 損傷モデルにおける応力変数関係図

σ はCauchy 応力, ε はひずみテンソル, $\mathbf{H}$ は四階の弾性テンソルである. D は損傷の進展を支配する損傷変数であり次式で表される.

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{E\kappa_0 l}{G_f}(\kappa - \kappa_0)\right) \quad (3)$$

$D=0$ は健全な状態であり, $D=1$ は完全に剛性を失った状態を表す(図-4). κ は最大の等価ひずみであり, κ_0 は弾性境界を示す等価ひずみである. 等価ひずみを破壊判定に用いるため, ポアソン効果で破壊が促進され強度が低下する. そこで, コンクリートのポアソン比はゼロに設定する.

4. 両引き試験

後藤ら¹⁾によると, 鉄筋周囲の破壊プロセスは, 第一にコンクリート表面まで貫通する横ひび割れが入り, その後節部から50~60度の角度で内部ひび割れが最寄りの横ひび割れ方向に進展すると述べられている.

4.1 解析モデル

図-5にD25の異形鉄筋を含むコンクリートの両引き試験の解析モデルを示す. 鉄筋の左端部を拘束し, 右端部に軸方向の強制変位0.60 mmを300ステップで与える. コンクリートの破壊エネルギー G_f は0.1 N/mmに設定し, 損傷モデルにおいてコンクリートの圧縮引張強度比は10, 鉄筋の弾性係数は $E=200$ GPaとした. また, 事前に行った性能確認試験より, ラチスモデルは靱性が大きくなる傾向があったため, 適当な挙動となるように0.4掛けの値に設定した.

4.2 両引き試験結果

ラチスモデルによる結果であるひび割れ分布図を図-6上に, 損傷モデルの結果を示した損傷分布図を図-6下に示す. 解析結果を見ると, 約60度の角度で最寄りの横ひび割れ方向へ進展する内部ひび割れを確認できる. また, 岡崎らが行った半割供試体を用いた両引き試験の実験結果を図-7に示す. 本研究の解析は2次元であるのに対し実験は3次元であるため条件は多少異なるが, 破壊プロセスだけでなく横ひび割れ同士の間隔も近い結果を示した.

5. 結論

両引き試験の解析では内部ひび割れを再現できたと考えられる結果を得た. ラチスモデルはひび割れの開閉・幅を表現できるため, それらを実験結果と比較する場合に有用であると考ええる. 損傷モデルは, FEMがベースであるため,



節点数: 4576 ラチス要素数: 9038 三角形要素数: 13613

ラチスモデルのパラメータ

E	f_t	G_f
20 GPa	2.0 MPa	$(0.05, 0.1 \text{ N/mm}) \times 0.4$

損傷モデルのパラメータ

E	ν	ε_f	G_f
20 GPa	0.0	0.0001	0.05, 0.1 N/mm

図-5 両引き試験解析モデル

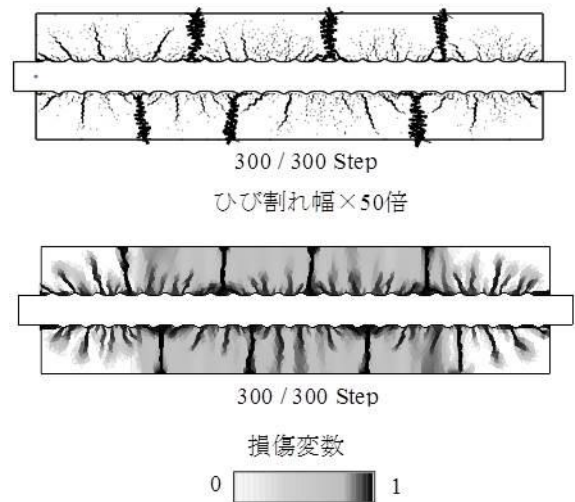


図-6 両引き試験解析結果



95 kN (約240 Stepに相当)

図-7 半割供試体を用いた両引き試験実験結果

精度に対する信頼性は高い. 要素サイズを十分小さくすることが可能で応力の分布など力学挙動の精度を求める際には有用であると考ええる.

今後の課題としては, 異形鉄筋周辺の内部ひび割れの解析に関しては, 実験と同様に三次元解析への拡張や, 鉄筋の直径に対してコンクリートが大きい場合に自由面付近に発生するコーン状の破壊の再現が挙げられる.

【参考文献】

- 1) 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実験的研究, 土木学会論文報告集, Vol. 294, 1980.
- 2) 武藤信太郎, スリソロ ワラポン, 中村光, 国枝稔, 李相勲: メゾスケール解析による異形鉄筋の付着挙動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No.2, 2005.