

損傷モデルによる異形鉄筋周辺の3次元内部ひび割れの再現解析

茨城大学 学生会員 ○根本 優輝

茨城大学 正会員 車谷 麻緒

港湾空港技術研究所 正会員 岡崎 慎一郎

1. はじめに

土木材料として幅広く利用されている鉄筋コンクリートは、非常に複雑な構造を有した複合材料となりその力学的挙動はあらゆる条件下において極めて複雑に変化する。特にその力学的挙動に影響を及ぼすとされるのが異形鉄筋周辺に発生する無数の内部ひび割れである。この内部ひび割れは、後藤ら(1980)の実験により立証され Goto Crack と呼ばれる。Goto Crack は、コンクリートの非線形挙動の大きな原因となり鉄筋コンクリートの力学的挙動を把握するためには、第一に Goto Crack の観察を行う必要がある。また Goto Crack はあらゆる物質の移動経路となるため物質の浸透、拡散により鉄筋の腐食やコンクリートの強度低下等の問題を引き起こす。

そこで本研究では、コンクリート梁の中心に異形鉄筋を1本組み合わせた鉄筋コンクリートを対象に、損傷モデルを用いて鉄筋コンクリート部材表面からの観察が不可能な Goto Crack を3次元の数値解析で再現し、後藤らの実験結果と比較・考察することを目的とする。

2. 数値解析手法と解析条件

2.1 等方性損傷モデル

等方性損傷モデルは、ひび割れ部の結合力を各要素の応力で表現しスカラー変数である損傷変数 D を用いて次式で表される。

$$\sigma = (1 - D)c : \varepsilon \quad (1)$$

ここで σ はコーシー応力テンソル、 c は弾性係数テンソル、 ε は等価ひずみである。 D は損傷の度合いを $0 \leq D \leq 1$ で表す損傷変数である。損傷のない状態が0、完全に損傷した状態が1である。

2.2 等価ひずみ

本研究では、次式で表される等価ひずみを用いる。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-\nu)} + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1\right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2} \quad (2)$$

ここで、 ν はポアソン比、 k は圧縮引張強度比、 I_1 はひずみテンソルの第1不変量、 J_2 は偏差ひずみテンソルの第2不変量である。

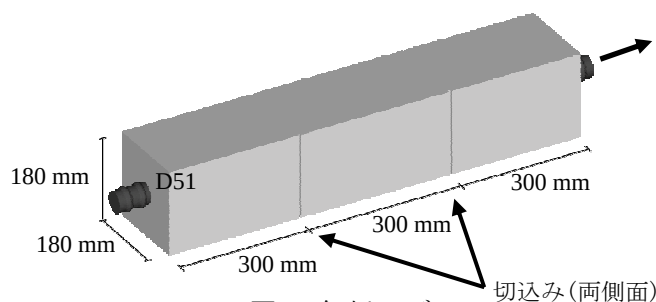


図-1 解析モデル

表-1 材料パラメータ

	コンクリート	鉄筋
ヤング率 E	30 GPa	200 GPa
ポアソン比 ν	0.2	0.3
圧縮引張強度比 k	10	破壊なし
破壊発生ひずみ κ_0	7.0×10^{-5}	
破壊エネルギー G_f	0.1 N/mm	

2.3 損傷変数

変形履歴における等価ひずみの最大値を $\kappa \geq 0$ で表すことにより、損傷変数 $D(\kappa)$ は次式で表される。

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

ここで κ_0 は破壊発生ひずみ、 G_f は破壊エネルギーである。

本研究では、解析対象とする鉄筋コンクリートを構成する要素に四面体を用いており、上式の損傷変数 $D(\kappa)$ に示す要素長さ h_e は次式で表される。

$$h_e = (12V_e)^{1/3} \quad (4)$$

2.4 解析条件

本研究で対象とする3次元鉄筋コンクリートモデルを図-1に、材料パラメータを表-1にそれぞれ示す。ここで本研究では、コンクリート部分のみを数値解析の対象としているため、異形鉄筋には破壊が生じないように材料パラメータを与えている。モデル寸法および異形鉄筋は、後藤らの実験による試験体を参考とし作成した。節点数は約60万節点、要素数は約300万要素である。また後藤らの実験同様に、まずコンクリート部分に横ひび割れが発生するようモデル表面に5×5 mmの切込みを300 mm間隔で設けた。

キーワード 内部ひび割れ, 損傷モデル, 損傷変数

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学工学部 TEL:0294-38-5004 FAX:0294-38-526

解析条件は異形鉄筋左端を完全固定とし、右端に図-1に示す矢印方向へ鉄筋降伏時の強制変位 1.58 mm を 400 step で与えた。なお本研究で作成した 3 次元鉄筋コンクリートモデルは、x, y, z 軸方向に対称であることから 1/8 モデルでの数値解析を行った。

3. 実験結果と解析結果の比較考察

3.1 実験結果¹⁾

後藤らは、図-2 に示すように異形鉄筋周辺に発生する内部ひび割れをひび割れ発生時の負圧を利用した赤インク注入法により再現することに成功した。この実験結果から異形鉄筋周辺に発生する内部ひび割れは、図-3 に示すように各ふし部分からコーン状に進展するという推測を行った。しかし、この推測されたコーン状に進展する内部ひび割れを 3 次元の数値解析で再現した例はこれまでにない。

そこで本研究では、後藤らの実験結果と同様の内部ひび割れが 3 次元鉄筋コンクリートモデルを対象にした数値解析で再現可能であるか、および後藤らが推測したコーン状に進展する内部ひび割れが形成されるのかという点について実験結果と解析結果の比較・考察をする。

3.2 解析結果

図-4 に内部ひび割れの進展状況を可視化した図を示す。強制変位を与えた後に 30/400 step でコンクリート両端部から損傷が始まり、両側面に設けた切込み部に貫通ひび割れによる破壊面が形成された。その後 60/400 step で破壊面に向かい異形鉄筋ふし部分からそれぞれ内部ひび割れが発生した。100/400 step では、60/400 step で発生した内部ひび割れが成長し後藤らが推測したコーン状に進展していく様子が確認できた。

以上の解析結果より本研究では、損傷モデルを用いた 3 次元の数値解析によりこれまでに例のなかった、実験結果と同様の内部ひび割れを再現することができた。さらに後藤らにより推測されたコーン状に進展する内部ひび割れを精度よく再現することができた。

4. おわりに

本研究では、損傷モデルを用いた 3 次元の数値解析により異形鉄筋周辺に発生する内部ひび割れの再現を行い、後藤ら(1980)の実験結果とほぼ同様の解析結果を再現可能であることを示した。また、後藤らが実験結果から推測した、コーン状に進展する内部ひび割れを再現することにも成功した。今後は要素数を増加させた数値解析および、ふし間隔の異なる D51 異形鉄筋を用いた数値解析を行う。

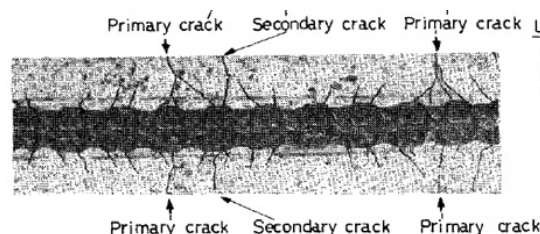


図-2 異形鉄筋周辺の内部ひび割れ¹⁾

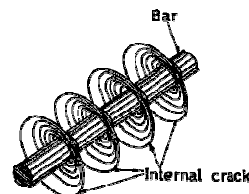


図-3 コーン状に進展する Goto Crack¹⁾

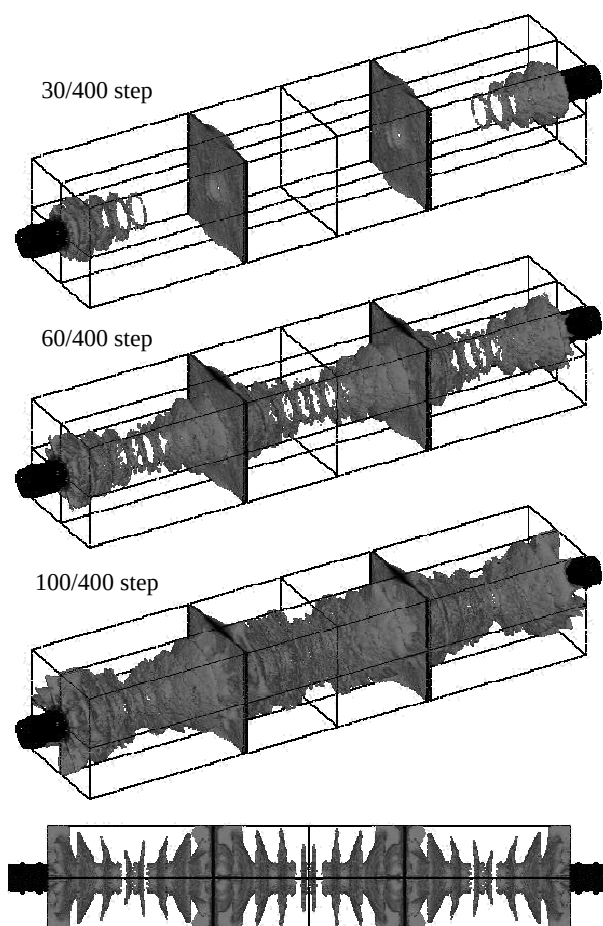


図-4 各 step における内部ひび割れ

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) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 檜山和男: コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価, JSCES, No.20130015, 2013.