

異形鉄筋まわりに形成する内部ひび割れを再現するための試験方法の提案

茨城大学 学生会員 ○邊見 哲一
茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

鉄筋コンクリートに発生するひび割れは、劣化を促進する原因の一つとなるため、ひび割れ幅を考慮した評価式¹⁾によりその影響が照査される。鉄筋コンクリートには、後藤ら²⁾により明らかにされた、内部ひび割れと呼ばれる鉄筋近傍から発生し表面に顕在化しないひび割れが存在する。内部ひび割れは鉄筋コンクリートの劣化を促進させる可能性がある。しかし、発生位置が試験体内部の鉄筋近傍であることが、その形状や進展の計測を困難なものとし現状の評価式において内部ひび割れを考慮できない理由の一つとなっている。そこで今日まで、様々な手法により内部ひび割れの計測が試みられてきた。

白川ら³⁾はインク注入法を用い内部ひび割れを計測した。インク注入法は、内部ひび割れにインクを注入し染色することでその形状の計測を容易にする。しかし、染色されたひび割れの確認には、試験体を切断する必要があるため、試験中の内部ひび割れの進展経過を計測することはできない。

これに対し岡崎ら⁴⁾は、試験体表面に鉄筋を配置し、内部ひび割れの進展経過や形状、幅を直接計測できる手法を提案した。しかし試験体の構造上、試験の対称性が失われているため、計測されたひび割れの形状は後藤らが示した内部ひび割れの特徴を明確には示していない。

そこで本研究では、試験体表面に鉄筋を配置した場合でも対称性が維持できる試験として、RCはりを用いた曲げ試験を提案する。ひび割れ計測には画像解析を使用し、詳細な計測を行う。また、コンクリートの破壊力学を考慮した数値解析により、画像解析では計測できない試験体内部のひび割れを再現する。

2. 内部ひび割れ再現試験

鉄筋の引張により内部ひび割れを発生させる際、引張以外の要因がその発生に影響を与えることを避けるためには、試験の対称性を維持したまま鉄筋を引張る必要がある。鉄筋を露出させない通常の引張試験では、対称性を維持することは容易いが、試験体表面に鉄筋を露出さ

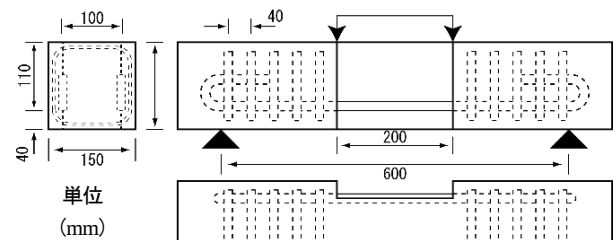


図-1 RCはり試験体寸法



図-2 RCはり試験体(写真)

せる場合、対称性を維持した状態で引張試験を行うことは難しい。そこで、曲げモーメントを与えることで鉄筋に引張を作用させ、対称性を維持したまま内部ひび割れを発生させる。試験体は、試験の対称性が維持できるよう側面のかぶりを除去したRCはりを用いることで、内部ひび割れの発生と進展を直接計測する。

試験体の概要を図-1、図-2示す。試験体の前後両面において、中央から左右100 mm間、計200 mmの範囲にわたり鉄筋を露出させた。この区間で鉄筋が内部ひび割れを発生させる様子を直接計測する。主鉄筋にはSD345のD10を使用し、せん断補強筋にはSR295のφ9を使用した。かぶりの除去による鉄筋の付着力低下を補うため、主鉄筋端部には標準フックを設けている。コンクリートの配合は、単位セメント量を353.3 kg/m³、単位水量を159.0 kg/m³、最大骨材寸法を20 mm、水セメント比を45.0%とし、気中養生にて28日間養生した。曲げ試験は2点載荷とし、載荷点は試験体中央から左右100 mmとした。

3. 計測および検証方法

3-1. 画像解析⁵⁾

画像解析では車谷らの研究に基づき、直接相互相関法を使用する。計測は、デジタルカメラ Nikon D5500 (2410

キーワード 内部ひび割れ, 鉄筋コンクリート, 曲げ試験, 画像解析, 損傷モデル

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. 0294-38-5151 FAX. 0294-38-5268

万画素)により撮影した 5632×3200 pixel の画像に, サブピクセル解析を考慮し行った. 撮影範囲は鉄筋が露出している, 載荷点間の幅 200 mm, 高さ 150 mm の領域である.

3-2. 数値解析⁶⁾

数値解析ではコンクリートのひび割れを再現するため準脆性材料の破壊力学を考慮した等方性損傷モデルを使用する. 損傷モデルの構成則を次式に示す.

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

この式は引張破壊によるひび割れ部の結合力を要素の応力で表現しており, σ は応力テンソル, ε はひずみテンソル, c は弾性係数テンソル, D は等価ひずみの関数で表される損傷変数である. 等価ひずみはひずみテンソルをスカラー値に置き換えたものである. 損傷変数 D は変形履歴における等価ひずみの最大値 κ を用い, $\kappa \geq 0$ において次式で表される.

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{E\kappa_0 h_e}{G_f}(\kappa - \kappa_0)\right) \quad (2)$$

ここで κ_0 は破壊発生ひずみ, h_e は要素長さ, G_f は破壊エネルギーである.

鉄筋の材料モデルは非線形等方硬化則に基づく von-Mises 弾塑性モデルとする. 次式に降伏関数 f を示す.

$$f = \sigma_e - \sigma_y - Q(1 - e^{-bp}) \quad (3)$$

ここで σ_e は von-Mises 相当応力, σ_y は初期降伏応力, p は相当塑性ひずみ, Q および b は非線形硬化を再現するための定数である.

数値解析モデルの要素数は約 133 万, 節点数は約 24 万である. パラメータの値を表-1 に示す. 解析ステップ数は 400 とし, 4.0 mm の強制変位を与えている.

4. 結果

図-3 に鉄筋ひずみ 2000 μ における画像解析で計測した最大主ひずみ分布を示す. 曲げひび割れに向かい, 鉄筋の節から斜めに進展するひび割れが見られる. これは後藤らが示した内部ひび割れの特徴とほぼ一致している.

図-4 には数値解析より得られた最大主ひずみの分布のうち, 図-3 の青線で示した範囲の結果を示す. 試験で計測した内部ひび割れの形状とほぼ一致している. また, 図-4 における青線の範囲を別角度から見た場合の内部の損傷変数を図-5 に示す. こちらでも同じく内部ひび割れの特徴を示している. 以上から, 本試験が, 内部ひび割れを再現し計測するものとして有用であるといえる.

5. まとめ

本研究では, RC はりの 4 点曲げ試験を用いた, 内部ひ

表-1 数値解析パラメータ

鉄筋		コンクリート	
ヤング率 E_s	200 GPa	ヤング率 E_c	29 GPa
ポアソン比 ν_s	0.3	ポアソン比 ν_c	0.2
降伏応力 σ_y	400 MPa	強度比 k	20
硬化パラメータ Q	190 MPa	破壊エネルギー G_f	0.1 N/mm
硬化パラメータ b	15	破壊発生ひずみ κ_0	1.0×10^{-4}

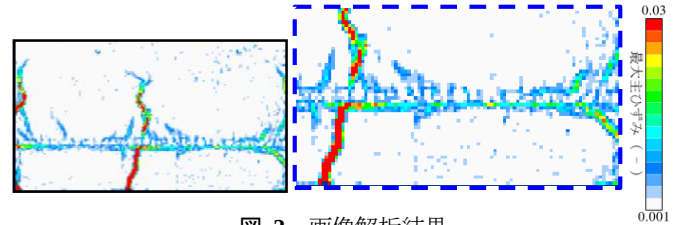


図-3 画像解析結果

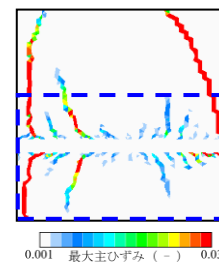


図-4 数値解析結果

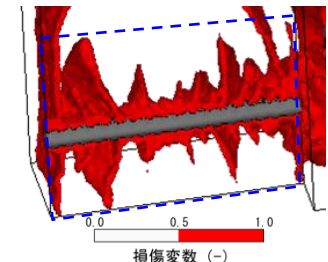


図-5 数値解析結果 (内部)

び割れの再現手法を提案した. また提案した手法が, 内部ひび割れを計測するものとして有用であることを, 画像解析による計測および数値解析により確認した.

参考文献

- 1) 土木学会編: コンクリート標準示方書 設計編, 丸善(株), p.119, 2007.
- 2) 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実験的研究, 土木学会論文報告集, Vol.294, 1980.
- 3) 白川裕之, 林和彦, 細田暁, 椿龍哉: 繰返し荷重を受けた RC 部材における鋼材腐食と内部損傷に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008.
- 4) 岡崎慎一郎, 車谷麻緒, 氏家勲, 高本直樹: 内部ひび割れを可視化するための新奇な手法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, 2008.
- 5) 車谷麻緒, 松浦遵, 根本忍, 呉智深: コンクリートのひび割れ進展計測のための画像解析手法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.70, No.2 (応用力学論文集 Vol.17), I_135-I_144, 2014.
- 6) 車谷麻緒, 根本優輝, 相馬悠人, 寺田賢二郎: コンクリートの破壊力学を考慮した鉄筋コンクリートの 3 次元破壊シミュレーションとその性能評価, 日本計算工学会論文集, Vol.2016, p.20160004, 2016.