

画像解析を用いた RC はりに発生する内部ひび割れ進展挙動の計測

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

内部ひび割れは、部材表面でなく鉄筋近傍に発生するひび割れである。その発生位置は目視では確認できないため、内部ひび割れの発生、進展が部材に及ぼす影響を把握することは容易ではない。そのため、内部ひび割れの性状を知るための研究¹⁾が様々に行われている。

内部ひび割れを計測、可視化する研究は、試験後に試験体を切り出し、ひび割れを観察するというもの²⁾が多く、载荷中のひび割れ進展を計測している研究は少ない。岡崎ら³⁾は、鉄筋を部材表面に配置した試験体を作製し、引張载荷中における内部ひび割れの発生と進展の計測を試みた。しかし、この研究ではひび割れの計測をマイクロ스코プで行っており、計測する際は载荷をその都度止めなければならないため、詳細かつ連続的なひび割れ進展の計測は出来ていない。

そこで本研究では、鉄筋を部材表面に配置した RC はりの曲げ試験を行い、連続的にひび割れの計測が可能な画像解析を用いることで、表面に露出した内部ひび割れの進展を計測する。さらに、実験で得られたひび割れとひび割れ進展解析との比較を行い、本実験の妥当性の検証を行う。

2. 解析手法

2-1. 画像解析⁴⁾

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。本手法では、変形前の画像に設けた検査領域と類似した輝度値分布をもつ候補領域を、変形後の画像の検査領域内から探し出し、検査領域の変位量と方向を算出している。領域の輝度値分布の類似性は相互相関関数によって判断しており、この値が大きいほど類似性が高い。次式に相互相関関数を示す。

$$R(\Delta X, \Delta Y) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(X_i, Y_j)\} \{g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y)\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(X_i, Y_j)\}^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y)\}^2}} \quad (1)$$

ここで $f(X_i, Y_j)$ は変形前の画像の検査領域における輝度値分布、 $g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y)$ は変形後の画像における候補領

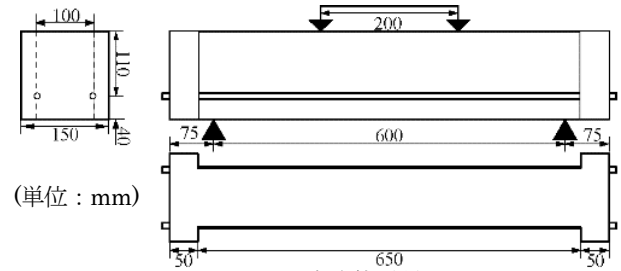


図-1 試験体寸法

域の輝度値分布である。変位量を算出後、B マトリックスを用いてひずみテンソルを計算し、求められた最大主ひずみによりひび割れを定量的に計測している。

2-2. 数値解析⁵⁾

ひび割れ進展解析ではコンクリートのひび割れ進展挙動を再現するため、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。

$$\sigma = (1 - D)c : \varepsilon \quad (2)$$

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り次式で示される。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-\nu)} I_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1\right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2} \quad (3)$$

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。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。

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{E\kappa_0 h_e}{G_f} (\kappa - \kappa_0)\right) \quad (4)$$

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。

非線形等方硬化則に基づき von-Mises 弾塑性モデルを鉄筋の材料モデルに適用する。次式に降伏関数 f を示す。

$$f = \sigma_e - \sigma_y - Q(1 - e^{-bp}) \quad (5)$$

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 は鉄筋の非線形硬化を再

キーワード 鉄筋コンクリート、画像解析、有限要素法、曲げ試験、内部ひび割れ

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. 0294-38-5280

現するための定数である。

3. 曲げ試験

3-1. 実験概要

試験体概要を図-1に示す。試験体は支点間において側面かぶりを取り除いてあり、鉄筋が表面に露出するようにしてある。主鉄筋はSD345, D10の異形鉄筋を使用している。コンクリートの配合は、単位セメント量を332.0 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48.0%とした。

載荷速度は4.0 kN/minとし、試験に伴い荷重とたわみを計測した。画像解析に使用する画像はデジタルカメラNikon D5200 (2410万画素)により撮影した。撮影範囲は載荷点付近の幅200 mm, 高さ150 mmの領域である。

3-2. 画像解析条件

画像解析の準備として、撮影画像を切り抜きグレースケール化した6000×4000 pixelの画像に検査領域40×40 pixel, 探査領域60×60 pixelを与えた。本研究ではサブピクセル解析⁴⁾を行うため最小計測量は0.1 pixelである。

3-3. 数値解析条件

モデルの要素数は約95万要素、節点数は約17万点である。各パラメータの値を表-1に示す。解析ステップ数は400 stepとし、計4.0 mmの強制変位を与えている。

4. 結果

図-2, 図-3に鉄筋ひずみ1500 μ (鉄筋応力300 MPa相当) 時において、画像解析で計測した最大主ひずみ分布を示す。ノイズを含んでおり鮮明ではないが、はり載荷点付近における曲げひび割れの近傍に、曲げひび割れに向かって斜めに進展しているひび割れが見られる、これは後藤ら¹⁾が示した内部ひび割れの特徴とほぼ一致している。図-4にひび割れ進展解析により得られた等価ひずみの分布を示す。鉄筋表面からひび割れが発生しており、実験に比べるとその本数は多く、発生位置も完全には一致していないが、実験で計測された内部ひび割れと形状はほぼ一致している。

5. まとめ

表面に露出した内部ひび割れの計測手法として画像解析がある程度有効であることを示した。また、画像解析とひび割れ進展解析によって得られたひび割れを比較することで、本実験が内部ひび割れを発生させる方法としておよそ妥当なものであることを示した。今後は、鮮明な画像解析結果の取得やより内部ひび割れが発生しやすい試験体の考案を目標とする。

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}

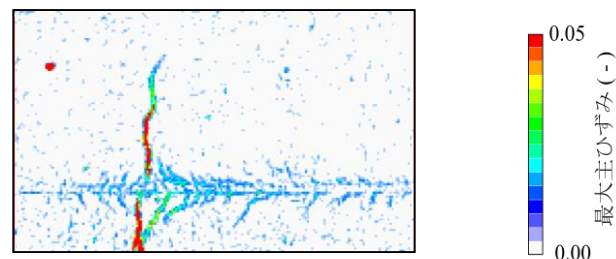


図-2 画像解析結果

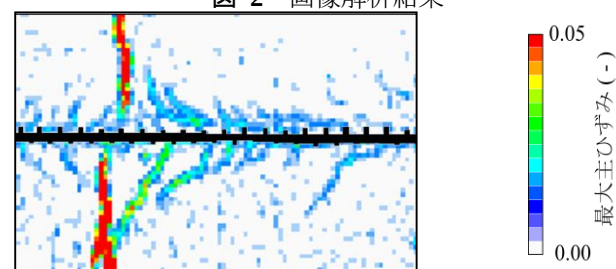


図-3 画像解析結果 (拡大)

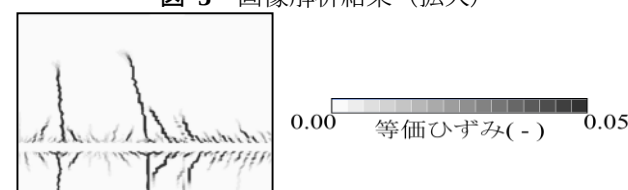


図-4 数値解析結果

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実験的研究, 土木学会論文報告集, Vol.294, 1980.
- 2) 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
- 3) 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.
- 4) 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
- 5) 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, 日本計算工学会論文集, Vol.2013, p.20130015, 2013.