

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と可視化

茨城大学 学生会員 ○邊見 哲一
 茨城大学 正会員 車谷 麻緒
 香川大学 正会員 岡崎 慎一郎

1. はじめに

内部ひび割れは、異形鉄筋の節部から発生する。RC 部材の内部で発生することから、直接観察することは難しく、内部ひび割れの発生や進展が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。

既往の内部ひび割れに関する研究²⁾では、内部ひび割れの計測手法として、インク注入法が用いられてきた。これは、発生した内部ひび割れにインクを浸透させ染色し、内部ひび割れを観察するという手法である。この手法は、観察の際に試験体を破壊するため、载荷中の内部ひび割れの進展を観察することができない。そこで岡崎ら³⁾は、鉄筋を半分露出させ、内部ひび割れが試験体表面に露出するような引張試験体を作製し、载荷中における内部ひび割れ発生と進展過程の観察を試みた。しかし、この研究で用いた試験体は、鉄筋が試験体の片側に偏った非対称なものであるため、偏心が内部ひび割れの発生や進展に影響を与える可能性がある。

そこで本研究では、载荷中の内部ひび割れを観察可能で、なおかつ偏心がない試験体を提案する。さらに、提案した試験体における内部ひび割れの発生と進展を、詳細なひび割れ計測が可能な、画像解析を用い計測する。また、数値解析による再現と計測結果を比較し、試験体に発生した内部ひび割れが妥当なものであるか確認する。

2. 提案試験体

提案する試験体の概要を図-1 に示す。試験体は、RC はりの支点間の側面かぶりを取り除いたような形状とした。主鉄筋が表面に露出しているため、载荷中における内部ひび割れの進展を直接観察することが出来る。また、左右対称になるように両側の側面かぶりを取り除いてあるため、偏心のない試験体となっている。

3. 解析手法

3-1. 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

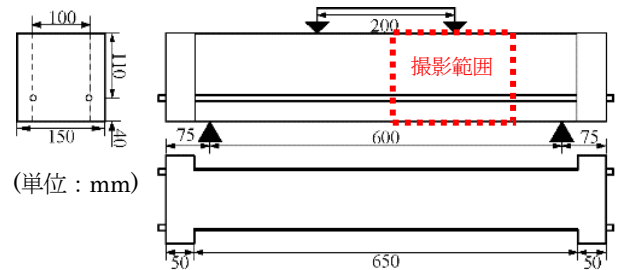


図-1 試験体寸法

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。

3-2. 数値解析⁵⁾

数値解析では、車谷らの研究に基づき、コンクリートのひび割れ進展挙動を、準脆性材料の破壊力学を考慮した等方性損傷モデルにより再現する。損傷モデルの構成則を次式に示す。

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

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、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみテンソル、 $\mathbf{c}$ 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。

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

キーワード 内部ひび割れ, 鉄筋コンクリート, 画像解析, 有限要素法, 曲げ試験

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

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.

4. 曲げ試験

4-1. 実験概要

試験体に内部ひび割れを発生させるために4点曲げ試験を行う. これにより, 試験体の主鉄筋に引張を作用させ, 内部ひび割れを発生させる. 使用したコンクリートの配合は, 単位セメント量を 332.0 kg/m^3 , 単位水量を 159.0 kg/m^3 , 最大骨材寸法を 20 mm , 水セメント比を 48.0% である.

4-2. 画像解析条件

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. 撮影範囲は図-1に赤線で示す, 載荷点付近の幅 200 mm , 高さ 150 mm の領域である. 画像解析の準備として, グレースケール化した $6000 \times 4000 \text{ pixel}$ の撮影画像に検査領域 $40 \times 40 \text{ pixel}$, 探索領域 $60 \times 60 \text{ pixel}$ 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. 実際の長さに換算すると, 0.004 mm 程度の変位量まで計測できる.

4-3. 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.

5. 結果

図-2に鉄筋ひずみ 1500μ (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-3に数値解析により得られた最大主ひずみ分布を示す. 本数や進展長さなどに差異はあるが, 実験で計測された内部ひび割れとほぼ同じ傾向を示している.

6. まとめ

偏心がなく, 載荷中の内部ひび割れの進展を直接観察可能な試験体を提案し, 露出した内部ひび割れの進展過程を画像解析により計測可能であることを示した. また,

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}

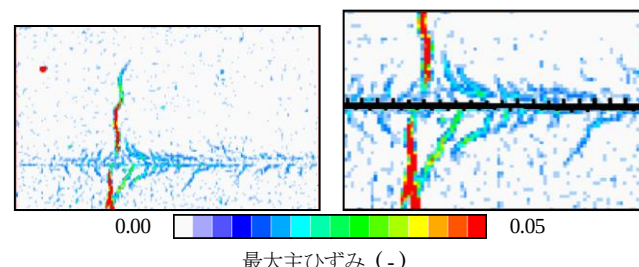


図-2 画像解析結果と拡大図

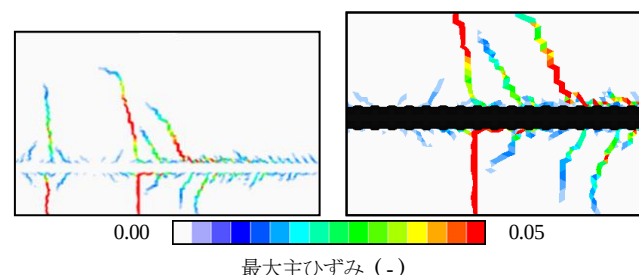


図-3 数値解析結果と拡大図

数値解析による再現結果と, 画像解析による計測結果がほぼ一致したことから, 提案試験体に発生したひび割れは内部ひび割れとして妥当なものであることを示した.

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, 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