

画像計測と数値解析によるRCはりの破壊進展挙動の比較考察

茨城大学 学生会員 ○小坪 祐輔
 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

コンピュータ関連技術の進歩によりコンクリートの破壊進展挙動を計算により再現する数値解析の研究が広く行われている。その再現の妥当性の評価には実験との比較が必要である。再現したひび割れの妥当性を評価する方法として接触式では部材や材料の変形を計測するなどが挙げられるが、コンクリートではひび割れの発生位置を予測することが困難であり、ひび割れの発生・進展により変化していくひずみ分布を部材全体で計測することは不可能である。そのため、デジタル画像を用いることで移動量を計測する画像計測が注目されている。渡辺ら¹⁾はRCはりの曲げ試験において、画像解析を適用させ、得たひずみの集中域がひび割れ位置と一致したことから、画像解析がひび割れの発生・進展状況を十分に計測できることを示した。しかし、再現したひび割れを画像解析との比較により評価した研究は少なく、ひび割れの本数や発生位置の比較に留まっている。

そこで、本研究ではRCはりの曲げ試験を行い、画像計測を用いてひび割れを可視化し、数値解析と比較を行うことで、数値解析により再現したひび割れの妥当性を評価することを目的とする。

2. 本研究で用いる手法

2.1 画像解析²⁾

本研究では車谷らの研究に基づき、画像相関法に分類される直接相互相関法を用いる。画像相関法は画像を小領域に分割し、異なる2時刻の画像の領域内で輝度値パターンから最も類似している領域を探索し、領域内の平均移動量を算出する方法であり、その中でも直接相互相関法は相互相関関数を用い、領域内で輝度値パターンの相関値が最も大きい領域から平均移動量を算出する。分割した小領域の中心点を節点とし、要素を構成する。測定された移動量からBマトリックスを用いて、各要素の中心点でのひずみを算出する。ひび割れは最大主ひずみ

により可視化する。

2.2 損傷モデル³⁾

本研究では数値解析に有限要素法を利用する。損傷モデルの構成則を次式に示す。これは要素の結合力を応力で表す式である。

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

ここで 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 はスカラー値で表される損傷変数で等価ひずみの関数である。等価ひずみはスカラー値であり次式で示される。

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

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。損傷変数 D は各要素の損傷の程度を表したものであり、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。

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

ここで κ 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。式(3)は $0 \leq D \leq 1$ をとり、損傷がない場合 $D=0$ 、完全に破壊している場合 $D=1$ となる。鉄筋の塑性化後の弾性応力は von-Mises 弾塑性モデルを用い弾性ひずみを ε^e 、塑性ひずみを ε^p として次式で表現できる。

$$\sigma = c : \varepsilon^e = c : (\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (4)$$

さらに鉄筋の降伏は次式に示す降伏関数 f で表される。

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

ここで σ_e は von-Mises 相当応力、 σ_y は降伏応力、 p は相当塑性ひずみである。この解析では塑性化後の挙動を非線形で表す、 Q 及び b は材料によって決定する定数である。

3. 曲げ試験概要及び解析条件

3.1 曲げ試験概要

図-1に示すような、主筋に異形鉄筋D16を用いたRC

キーワード 画像解析, ひび割れ, 鉄筋コンクリート, 数値解析, 損傷モデル

はりの試験体を作製し、4点曲げ試験を行った。

試験は荷重速度 2 kN/min の荷重制御とした。

試験に伴い、デジタルカメラ Nikon D5200 (2410 万画素) により画像解析に使用する画像を撮影した。撮影領域は試験機の全域を対象とすると試験体の中央が試験機に隠れるため試験体の半面を対象とし、試験体からの撮影距離は 500 mm とし、撮影間隔は 5 秒に 1 回とした。また、2 台の LED スタンド照明により撮影面の明度を一定に保っている。

3.2 画像解析条件

画像解析では、撮影したデジタル画像の試験体部分を切り抜きグレースケール化により数値化した。5920×2176 pixel の画像に、検査領域 80×80 pixel、探索領域 80×80 pixel を与えている。

3.3 数値解析条件

モデルの要素数は約 66 万、節点数は約 12 万とし、各パラメータの値は表-1 に示す。荷重の際、急激なひび割れ進展を起こさないよう、解析ステップ数を 400 step とし、計 5 mm の強制変位を与えている。

4. 結果

4.1 荷重変位関係の比較

実験と数値解析の荷重点の荷重と試験体中央部の変位量を図-2 に示す。全体的な挙動は概ね一致している。

4.2 ひび割れの比較

荷重終了後の目視でのひび割れ計測結果と荷重 60, 70, 80 kN における数値解析による等価ひずみ、そして画像解析による最大主ひずみの結果を図-3 に示す。実験と数値解析、画像解析に見られるひび割れの発生位置、形状、本数が概ね一致している。また、画像解析と数値解析の結果を比較すると、ともに 70 kN で斜めひび割れが発生していることから、ひび割れの発生時期も再現できていることから画像解析による計測及び、数値解析によるひび割れの再現性が妥当なものであると評価できる。

5. おわりに

本研究では画像解析を用いて、数値解析により再現された破壊進展挙動の妥当性を評価するために、荷重変位関係、ひび割れの発生本数、位置、形状、発生時期を比較し概ね一致することを示した。今後はひび割れの開口の様子などを比較することで、数値解析の評価が可能であるかを検討していく。

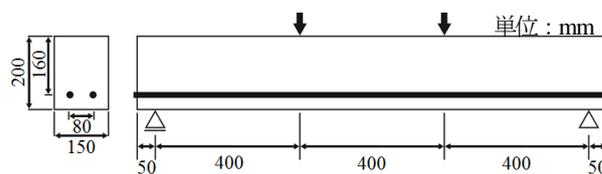


図-1 試験体概要

表-1 数値解析モデルの材料パラメータ

コンクリート		鉄筋	
ヤング率 E_c	29 GPa	ヤング率 E_s	200 GPa
ポアソン比 ν_c	0.2	ポアソン比 ν_s	0.3
強度比 k	20	降伏応力 σ_y	360 MPa
破壊エネルギー G_f	0.1 N/mm	非線形パラメータ Q	250 MPa
破壊発生ひずみ ϵ_c	1.0×10^{-4}	非線形パラメータ b	20

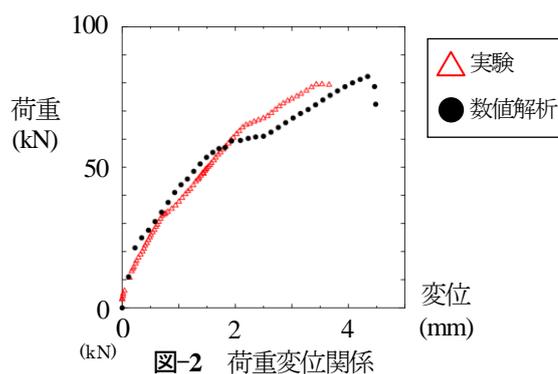


図-2 荷重変位関係

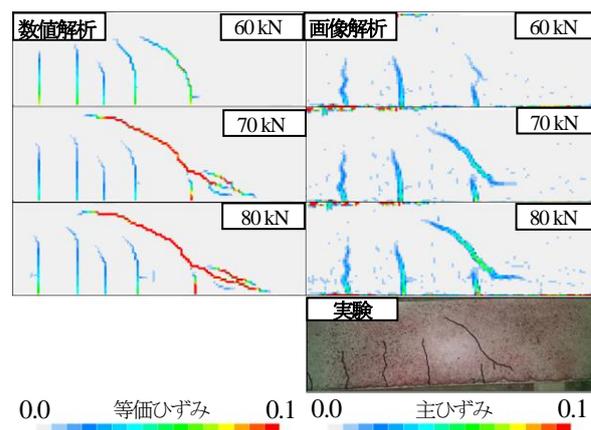


図-3 実験結果と解析結果の比較

参考文献

- 1) 渡辺健, 東広憲, 三木朋広, 二羽淳一郎: コンクリート構造実験を対象としたリアルタイム画像解析システムの開発, 土木学会論文集, Vol.66, No.1, pp94-106, 2010
- 2) 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, ppI_135-I_144, 2014
- 3) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 櫻山和男: 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, pp.20130015, 2013