実験・計測・解析による RC はりの破壊力学挙動評価に関する基礎的研究

 茨城大学
 学生会員
 〇邊見
 哲一

 茨城大学
 正会員
 車谷
 麻緒

1. 目的

現在,鉄筋コンクリートの破壊力学挙動評価に関して, 数値計算による破壊シミュレーションが広く研究されて いる.破壊シミュレーションの精度検証は実験の計測結 果と比較することで行われるが,局所的に発生するひび 割れを試験体全域で計測することは非常に困難であり, 破壊シミュレーションの精度検証に十分利用できる計測 結果を得ることは難しい.

一方,実験により試験体に発生したひび割れを計測す る手法として,デジタル画像を用いた画像解析が注目さ れている.画像解析を用い試験体に発生する微細なひび 割れやひび割れの進展過程をひずみ分布として定量的に 計測した研究¹⁾もなされており,破壊シミュレーション の精度検証に画像解析が有用であることが期待できる. しかし,コンクリートにおける破壊シミュレーションの 精度検証に画像解析を用いた研究はほとんどない.

そこで本研究では、画像解析を用いて RC はりのひび 割れ進展を計測し、破壊シミュレーションの結果と比較 することで、その精度検証を行う.

2. 画像解析¹⁾

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.これは、2時刻間の画像から試験体表面の 変位量を算出する手法である.概要を図-1に示す.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 つ領域を変形後の画像の探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.その後,変位 量からひずみテンソルを算出した後スカラー値に変換 することでひび割れを定量的に可視化している.

3. 数值解析²⁾

破壊シミュレーション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²により数値解析を行う.利用する損 傷モデルの構成則を次式に示す.

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D)\boldsymbol{c} : \boldsymbol{\varepsilon} \tag{1}$$

ここで σ は応力テンソル, ε はひずみテンソル, cは弾

キーワード 鉄筋コンクリート,画像解析,破壊シミュレーション

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



図−1 画像相関法概要

性係数テンソル, D はスカラー値で表される損傷変数で あり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.

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

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

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.

鉄筋の降伏判定は von-Mises 弾塑性モデルで再現する. 次式に示す降伏関数 f を示す.

$$f = \sigma_{\rm e} - \sigma_{\rm y} - Q \left(1 - e^{bp} \right) \tag{4}$$

ここで σ_e は相当応力, σ_y は初期降伏応力, pは相当塑 性ひずみ, Qおよびbは材料により決定する定数である.

4. 4 点曲げ試験

試験体概要を図-2 に示す.実験で使用するはりはスタ ーラップ入りの鉄筋モルタルとした. 主鉄筋は SD345, D10の異形鉄筋,スターラップは SR235, *φ*6の丸鋼を使 用している.モルタルの配合は,単位セメント量を 591.7 kg/m³,単位水量を 213.1 kg/m³, w/c を 48.0 %とした.

実験において載荷速度は 2.0 kN/min とした. 計測デー タは、荷重と左右の荷重点および支点上部の変位量であ る. また実験に伴い、デジタルカメラ Nikon D5200 (2410 万画素)を用い撮影を行った.

5. 解析条件

5.1 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 6000×1728 pixel の画像に,検査領域 80×80 pixel, 探査領域 40×40 pixel を与えている.

5.2 数值解析条件

計算コストの削減のために,数値解析モデルは実際の 試験体を4分割して作成した.このモデルの要素数は約 145万要素,節点数は約26万点である.各パラメータの 値は,モルタルのヤング率を18 GPa,ポアソン比を0.2, 圧縮引張強度比を30,破壊エネルギーを0.09 N/mm,破 壊発生ひずみを1.0×10⁴としている.主鉄筋とスターラ ップは弾塑性モデルとし,ヤング率を200 GPa,ポアソン 比を0.3,降伏応力を400 MPa,非線形パラメータ*Q*を 190 MPa,非線形パラメータ*b*を15としている.また, 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4 mmの強制変位を与えている.

6. 結果

6.1 荷重変位関係の比較

図-3に実験と数値解析の荷重変位関係を示す.最大荷 重は実験において 58.3 kN,数値解析において 56.0 kN で あり,ほぼ同一の値をとっている.また,数値解析と試 験のどちらも曲げ破壊の挙動を示しており,全体の挙動 も一致していることから,数値解析は実験を概ね再現で きているといえる.

6.2 ひび割れの比較

次に数値解析と画像解析を比較する.画像解析結果は ひずみノルムで示されるため,それにあわせて数値解析 結果はひずみのスカラー値である等価ひずみで示した. 図-4 はひび割れを目視で計測した結果であり図-5 と図 -6 は画像解析と数値解析の最大荷重時の結果をそれぞれ

示したものである. 図-4 と図-5 を比較すると,画像解析 はひび割れを詳細に計測できている. また,図-5 と図-6 を比較すると数値解析はひび割れの発生位置,形状をほ ぼ再現できているといえる.

以上から、本研究での RC はりの破壊シミュレーションは実際の破壊挙動と概ね一致しており再現性は高い.

7. おわりに

RC はりの破壊力学挙動を画像解析によりとらえるこ とに成功した.また,破壊シミュレーションの結果が画 像解析および実験と概ね一致することが確認できた.以





図−6 数值解析結果

上から,破壊シミュレーションの精度検証において画像 解析が使用可能であるという結論が得られた.

参考文献

- 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.
- 2) 車谷麻緒,寺田賢二郎,加藤準冶,京谷孝史,樫山 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(2013), p.20130015, 2013.