画像解析と数値解析による RC はりのひび割れ進展挙動の比較・考察

茨城大学 学生会員 〇邊見哲一 学生会員 根本忍 茨城大学 正会員 車谷麻緒

1. はじめに

近年,有限要素法を用いた数値解析による構造物のひ び割れ再現の研究が進められている.しかしその解析精 度の検証において,ひずみゲージ等による従来手法では 試験体の局所的な計測しか行えないという問題がある. そこで,2013年に松浦ら¹⁾は,画像解析手法における直 接相互相関法²⁾に着目し,撮影領域全域のひずみ計測が 可能なひび割れ進展の評価手法を開発した.しかしこの 研究は手法の開発に留まっており,数値解析との比較は 行われていない.

本研究では、松浦らの手法をはりの4点曲げ試験に適 用させ、破壊性状の確認及び画像解析と数値解析で再現 したひび割れ進展の結果の比較を行い、数値解析による ひび割れ再現の妥当性を検証する.

2. 画像解析

直接相互相関法は、画像を検査領域と呼ばれる小領域 に分け、2 画像間における検査領域同士の輝度値分布の 相関を相関関数により直接求め、変位量を算出するとい う手法である.相関関数は、領域の輝度値分布が類似し ているほど大きな値をとる.これが最大値をとるときの 変位量を、検査領域の変位量としている.松浦らの開発 した手法は、得られた変位量から B マトリックスを用い てひずみを求め、以下の式からひずみノルムを算出し、 ひび割れを可視化している.

$$\|\varepsilon\| = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_{xy}^2} \tag{1}$$

3. 数值解析

数値解析で利用する多次元損傷モデルは、次式で表される.これはモデルの結合力を応力で表す式である

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

 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は損傷変数である.

モデルの損傷は、スカラー値である等価ひずみを用い た損傷変数 *D* で表される.等価ひずみは次式で表される.



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

ここで, kは圧縮引張強度比, Lはひずみテンソルの第1 不変量, L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 を $\varepsilon \ge 0$ とし、次式で表される.

$$D(\varepsilon) = 1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \exp\left(-\frac{E\varepsilon_0 h_e}{G_f} (\varepsilon - \varepsilon_0)\right)$$
(4)

ここで ε_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. Dは値域 $0 \leq D \leq 1$ をとり、D=0で損傷 なし、D=1で完全に損傷と定義される.

鉄筋モデルの塑性後の応力は von-Mises 弾塑性モデル を用い次式で表現できる.

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{c} : \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{e}} = \boldsymbol{c} : \left(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{p}}\right) \tag{5}$$

さらに鉄筋の降伏は次式に示す降伏関数fで表される.

$$f = \sigma_{\rm e} - \sigma_{\rm y} - Q(1 - e^{bp}) \tag{6}$$

ここで σ_e は相当応力, σ_y は降伏応力,pは相当塑性ひず みである.この解析では塑性後の挙動を非線形で表して おり,Qとbは材料によって決定する定数である.

4. はりの4点曲げ試験

4.1 試験概要

試験体の寸法を図-1 に示す.数値解析モデルにおいて 不均一材料であるコンクリートを再現するのは難しいと 考え,曲げ試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, φ6 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 %としている.

画像解析で使用する画像は、デジタルカメラ Nikon

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 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

表-1 数值解析条件

鉄筋		コンクリート	
Es	210 GPa	Ec	25 GPa
v	0.3	v	0.2
降伏応力 σ_y	450 MPa	強度比 k	15
Q	190	破壊エネルギー	0.09 N/mm
b	15	破壊発生ひずみ	1.0×10 ⁻⁴



図-2 撮影画像 荷重 58.3 kN



参考文献

- 松浦遵,根本忍,車谷麻緒: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研究,計 算工学講演会論文集,2014-06.
- 可視化情報学会編: PIV ハンドブック,森北出版株式 会社, pp.68-72,2002
- 東広憲,渡辺健,三木朋広,二羽淳一郎:画像解析を 用いた鉄筋コンクリートはりの破壊性状の予測,コン クリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, 2008.

D5200(2410 万画素)で撮影している.このとき、2 枚の画 像間で輝度値分布に極端な変化が発生しないよう、撮影 面を LED 照明で照らし、撮影面の明るさを一定にしてい る.画像の撮影速度は、はりのひび割れ進展を細かく観 測するために 2 秒間に 1 枚とし、それに合わせ載荷速度 は 2 kN/min とした.

4.2 画像解析条件

画像解析を行うにあたり撮影画像を 5475×1360 pixel にトリミングし,さらにグレースケール化することで, 効率的な画像解析が行えるよう加工している.その後検 査領域 40×40 pixel,探査領域 160×160 pixel,余白領域 80×80 pixel を与えて画像解析を行った.

4.3 数值解析条件

数値解析の条件は表-1 に示す.数値解析は要素数約23 万要素のモデルに400ステップに分けて4mmの変位を 加えた.

5. はりの実験結果と解析結果の比較

5.1 ひび割れ進展挙動の比較

はりに使われたモルタルの圧縮強度を計測したところ, 35.3 MPa であった.これを利用して計算した曲げ終局荷 重とせん断終局荷重はそれぞれ 48.6 kN と 64.2 kN である.

図-2, 図-3, 図-4 はそれぞれ撮影画像, 画像解析結果, 数値解析結果であり, 画像解析ではひずみノルムを, 数 値解析では等価ひずみを可視化している. 画像解析で可 視化されたひび割れ形状から, はりは斜め引張破壊に至 ったことが確認できる. 次に数値解析と画像解析を比較 すると, はり中央部のひび割れは発生位置や本数におい て類似性が確認できるが, 斜めひび割れの発生位置には 大きな差がある. 特にもっとも外側に発生しているひび 割れは数値解析ではうまく再現できていない.

5.2 荷重変位関係の比較

図-5に実験と数値解析によるはり荷重点の荷重と変位 量を示す.実験に比べ数値解析は剛性が大きいといえる. 特に10kN程度までの初期剛性は数値解析が実験を大き く上回っている.しかしそれ以降は若干数値解析の剛性 が大きいものの,おおよそ同じ挙動を示している.

6. おわりに

本研究では、画像解析によるはりの詳細な破壊性状の 確認と、数値解析によるひび割れ再現のある程度の妥当 性を検証できた.しかし、荷重変位関係やひび割れ発生 位置等の妥当性の検証については不十分な点が多いので、 今後の課題としていく.