

画像解析によるコンクリートのひび割れ進展計測に関する基礎的研究

茨城大学 正会員 ○車谷 麻緒
 茨城大学 学生会員 松浦 遵
 茨城大学 学生会員 根本 忍
 茨城大学 正会員 呉 智深

1. はじめに

計算力学の分野では、様々なひび割れ進展解析手法が提案されている¹⁾。破壊の解析では不連続な境界が発生するうえ、コンクリートの場合は破壊進行領域を伴いながら準脆性的にひび割れが進展することから、一般にコンクリートのひび割れ進展挙動を数値解析で再現するのは容易ではない。実験結果から、微細ひび割れ挙動を計測・可視化することも容易な作業ではないため、ひび割れ進展解析に対する妥当性の検証(V&V)²⁾も進んではいない。非接触で全視野計測が可能なひずみ分布の計測手法の高度化によって、目視できない微細ひび割れから巨視的なひび割れへの成長を可視化することができれば、コンクリートのひび割れ進展解析の高度化に寄与することになる。

本研究では、画像相関法における誤差を低減させ、かつ高解像度のグリッドでひずみ分布を計測するための画像解析手法を構築し、コンクリートのひび割れ進展挙動の計測・可視化について検討する。具体的には、検査領域の重複や階層化、物質点の追跡と変位ベクトルの更新を画像解析に実装し、モルタルとコンクリート供試体の圧縮試験の結果について比較・検討する。

2. 画像相関法による変形計測

2.1 直接相互相関法

画像相関法は、図-1に示すように、画像を検査領域と呼ばれる小領域に分割し、異なる2時刻の画像の間で、領域内の輝度値パターンが類似している領域を探索することにより、領域内の平均移動量を算出する方法である³⁾。主に、直接相互相関法とFFT相互相関法があり、本研究では測定精度の点で有利な直接相互相関法を採用する。

直接相互相関法では、輝度値パターンの移動を相互相関関数により評価する。本研究で使用する相互相関関数 $R_{fg}(\Delta X, \Delta Y)$ は、次式で表される。

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

ここで、 ΔX は X 方向の移動量、 ΔY は Y 方向の移動量、 $f(X, Y)$ は第一画像の輝度値関数、 $g(X, Y)$ は第二画像の輝度値関数である。

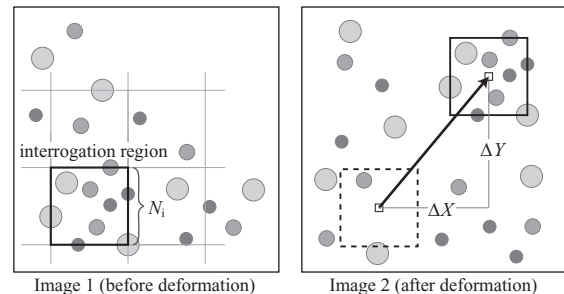


図-1 画像相関法の概要

2.2 変位ベクトルとひずみの測定方法

検査領域と測定点は正方形格子状に設定すると、正方形状の測定グリッドができる。ひび割れ挙動を捉えるには、可能な限り測定グリッドは細かい方がよい。しかし、検査領域を小さくすると、画像相関法の精度が低下する。検査領域を半領域オーバーラップさせることにより、輝度値パターンの独立性は低下するものの、検査領域を小さくすることなく、測定グリッドの解像度を高くすることができる。本研究では、検査領域を重複させて測定グリッドを作成する方法を pivfem、検査領域を重複させて測定グリッドを作成する方法を pivfcm と便宜上呼ぶこととする。

画像相関法では、検査領域を小さくすると、測定グリッドは高解像度になるが、誤った変位ベクトルが検出される。逆に、検査領域を大きくすると、測定精度は高くなるが、測定グリッドの解像度が下がる。このトレードオフの関係を改善するために、本研究では、検査領域を段階的に小さくしていく階層化手法を取り入れる。これにより、検査領域を小さくして、測定グリッドを高解像度にすることができる。

計測対象にひび割れの発生・進展があると、不連続面の形成や応力の再分配により、画像の乱れや大きな変位を生じる可能性がある。本研究では、時刻の進行毎に変位場を求め、初期の測定点(物質点)を追跡して、変位ベクトルを更新する方法を導入する。

さらに、0.1 pixel の精度で輝度値パターンの移動量を測定するために、ガウス関数近似による簡易なサブピクセル解析を導入する。測定された変位ベクトルからひずみを求めるに際し、四角形有限要素の変位 - ひずみ関係式を用いてひずみを算出する。

キーワード：画像相関法，ひずみ計測，ひび割れ進展計測，コンクリート，モルタル，V&V

〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1，茨城大学工学部，TEL: 0294-38-5162，FAX: 0294-38-5268

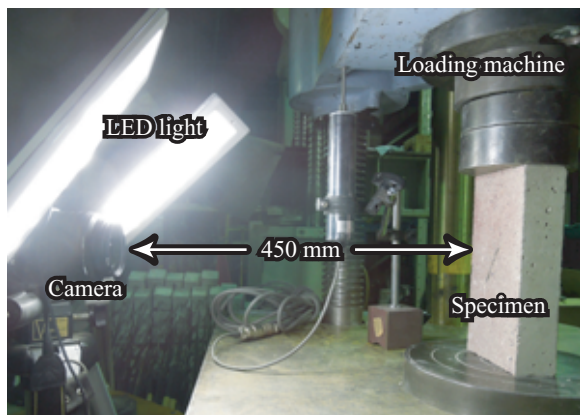


図-2 圧縮試験と撮影の様子

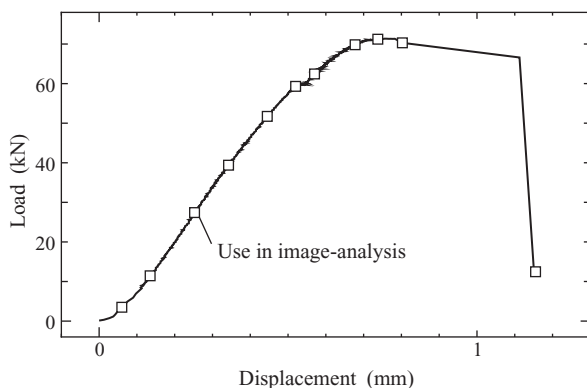


図-3 モルタル供試体の荷重 - 変位関係

3. ひび割れ進展計測の比較・検討

3.1 圧縮試験と撮影の条件

図-2 に、不連続面を持つモルタル供試体の圧縮試験と撮影の様子を示す。供試体の撮影には、Nikon D3100 のデジタル一眼レフカメラを使用した。画素数は、約 1400 万画素 (4608×3072) である。撮影間隔は 2 秒に 1 回とし、載荷前から供試体が破壊するまで撮影を行った。モルタル供試体の圧縮試験の荷重 - 変位関係を図-3 に示す。撮影画像のうち、図に示す 11 枚を画像解析に使用した。

前節で示した方法のうち、ここでは検査領域を重複させず階層化を行わない pivfem-0 と検査領域を重複させて階層化を 2 回行う pivfcm-2 について比較・検討する。作成される測定グリッドの解像度が、2 ケースでほぼ同じになるよう設定した。

3.2 モルタル供試体のひび割れ進展計測の結果

図-4 の左の列は供試体の実画像、中央の列は pivfem-0 による画像計測の結果、右の列は pivfcm-2 による画像計測の結果である。計測結果の可視化には、次式で示すひびみノルムを用いた。

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (2)$$

9/10 ステップ目を比較すると、実際の画像では目視でひび割れを判別できないが、画像解析の結果ではひび割れが見え始めていることが分かる。10/10 ステップでは、実際の画像に見えているひび割れと、画像解析の結果が一致し

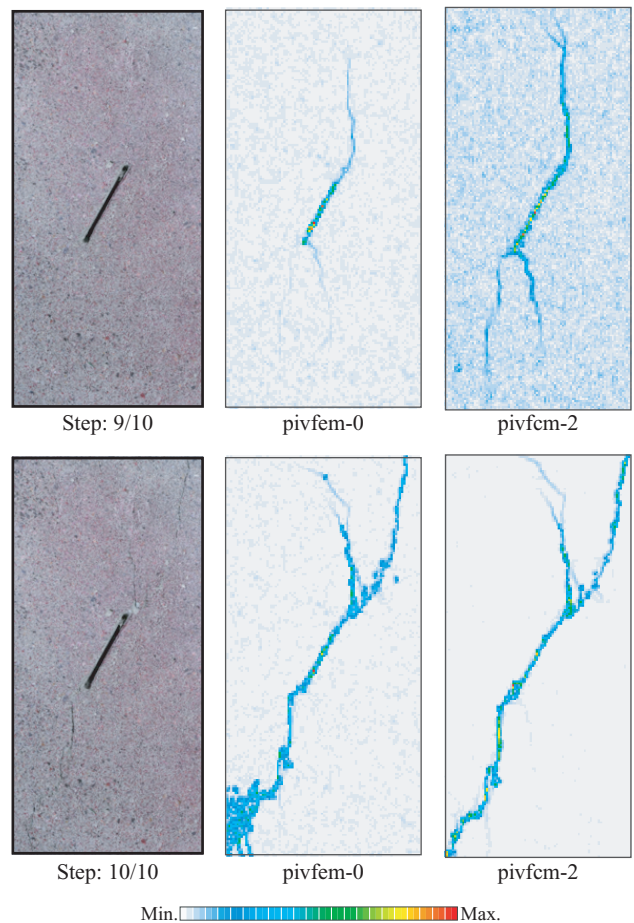


図-4 モルタル供試体の圧縮試験の画像解析結果

ていることが確認できる。また、pivfem-0 よりも pivfcm-2 の方がひび割れを鮮明に捉えている。

pivfem-0 の 10/10 ステップ目の結果を見ると、左下の部分に測定誤差の集積のようなものが見られる。ひび割れの進展によって、画像の乱れや大きな変位が生じたために、相関が適切に評価されず、誤った変位ベクトルが検出されたと考えられる。しかし、階層化を 2 回行った pivfcm-2 の結果の同じ箇所を見ると、誤差の集積は見られない。階層化の効果により、誤った変位ベクトルの検出が回避されることが確認できる。

4. おわりに

本研究では、画像相関法における検査領域の重複や階層化、物質点の追跡と変位ベクトルの更新を実装した画像解析手法を構築した。モルタル供試体の圧縮試験を対象に、本研究で構築した画像解析を適用した結果、階層化によって画像相関法における誤差の発生を抑えられることに加えて、検査領域を重複させる pivfcm の方が、微細なひび割れ進展挙動の計測に有効であることを例示した。

参考文献

- 1) 応用力学委員会 計算力学小委員会: 土木工学における計算力学手法の研究動向, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68, No.1, pp.31-50, 2012.
- 2) 白鳥正樹, 越塚誠一, 吉田 有一郎, 中村 均, 堀田亮年, 高野直樹: 工学シミュレーションの品質保証と V&V, 丸善出版, 2013.
- 3) 可視化情報学会 (編): PIV ハンドブック, 森北出版, 2002.