

デジタル画像相関法と有限要素解析の逐次データ同化による コンクリート圧縮試験のモデルパラメータ推定

構造計画研究所 正会員 ○綿引 壮真
 構造計画研究所 正会員 長谷川 俊昭
 構造計画研究所 正会員 Shanthanu Rajasekharan

1. はじめに

社会インフラ等の重要構造物の高齢化が社会問題となっており、今後20年で日本のほとんどの地域における道路橋梁の半数以上が建設後50年を迎える。これらの既設構造物の適切な維持管理には構造物の状態推定が重要であるが、時空間で変化する材料定数や境界条件、劣化や損傷などの複雑かつ不確実なパラメータをすべて観測から決定することは困難である。特にコンクリートは非均質性が高く、その複雑な力学状態の詳細な把握は容易ではない。

近年、数値解析と観測データを融合的に活用するデータ同化¹⁾(DA)と呼ばれる方法論に注目が集まっている。DAは主に気象予測分野で発展してきた技術であり、様々な数値解析上のパラメータの推定に利用されているが、多量の観測情報を必要とする。一方、画像解析を用いるデジタル画像相関法²⁾(DIC)は計測範囲全体の変位やひずみを非接触で計測でき、幅広い材料に適用できることから、DICを利用したDA手法を確立することで将来的に多くの構造物の状態推定が可能になると期待される。本研究では、DICとDAを組み合わせた有限要素解析(FEM)のモデルパラメータ推定手法を構築し、材料定数が既知のコンクリート試験体に適用することで有効性を検証した。

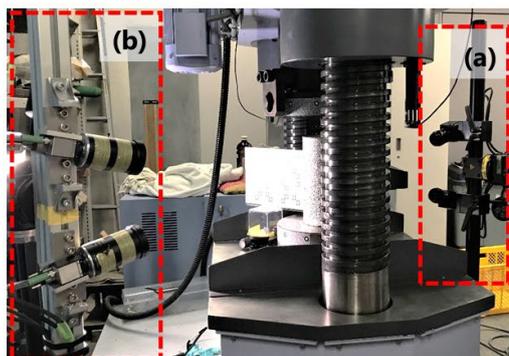


図-1 実験外観

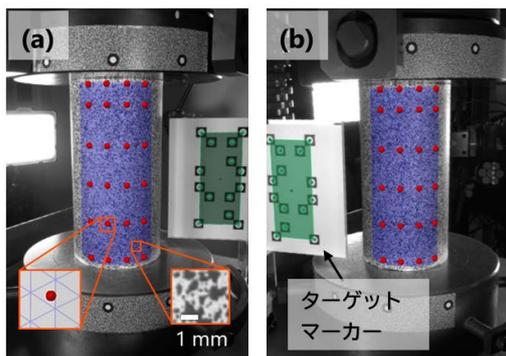


図-2 撮影画像と DIC の計算格子

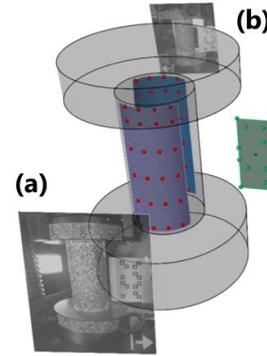


図-3 DIC の 3D 表示

2. 実験概要

DAの検証のためにコンクリート試験体の一軸圧縮試験を実施した。実験の外観を図-1に示す。試験はJIS A 1108:2018に従い、高さ200mm、直径100mmの円柱試験体を用いた。試験は材齢31日目に実施し、載荷速度は0.2 N/mm²/secとした。本研究では、試験時における試験体の偏芯や変形の偏りを詳細に観測するため、4台のCCDカメラで2つのステレオカメラを構成し、2方向同時3D-DIC計測システムを構築した。カメラにはGOM社製ARAMIS Adjustable Base 6M(図-1(a))と、Baumer社製VCXU-123Mを2台(図-1(b))用いた。カメラの制御とDIC計算にはGOM社製ARAMIS Professional 2018を用いた。各カメラは共通のトリガー信号で同期し、試験機の荷重と変位は電圧値でサンプリングした。DICは物体表面の模様を時系列で追跡して変位やひずみを計算するため、基準となる模様が試験体の表面に必要である。今回は試験体表面に追跡精度を向上させるための白黒のランダムなパターンを塗布して試験を実施した(図-2(a)右下)。各カメラの共通視野内に、透明アクリル板にプリントしたターゲットマーカーを設置し、このマーカー位置を基にステレオカメラ間の座標系を統合した。図-2に、撮影画像上にDICで生成した計算格子をマッピングした結果をそれぞれ示す。図-2(a)左下はDICの計算格子であり、図-2(a),(b)中の緑の四角形部分がターゲットマーカーである。図-3は座標系を統合したDICの計算格子と3D-CADモデルの同時表示である。試験体表面の広い範囲に計算格子を生成できていることが確認できる。

キーワード データ同化, デジタル画像相関法, コンクリート, 一軸圧縮試験, 有限要素法

〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3 TEL 03-5342-1046 FAX 03-5342-1047

3. デジタル画像相関法と有限要素解析の逐次データ同化

逐次型 DA の一種である Ensemble Kalman Filter ³⁾ (EnKF) に基づいて DA を実施した。FEM にはオープンソース大規模並列 FEM 非線形構造解析プログラム FrontISTR ⁴⁾ の 3 次元線形弾性解析を用いた。DIC 計測結果を EnKF へ取り込むために FEM の計算格子から任意の節点を選択し、対応する観測点を DIC の計算格子の要素内に設置した。観測点は DIC 要素内の重心座標を用いて追跡し、観測点上の物理量は要素内節点上の値から線形補間で取得した。この観測方法により、DIC と FEM の計算格子を一致させずに DA を実施可能である ⁵⁾。設置した観測点を **図-3 (a), (b)** の赤点に示す。観測点は試験体裏表に合計 48 点設置し、各観測点での DIC の縦および横ひずみの値から EnKF の観測ベクトルを作成した。本稿では、ヤング率とポアソン比を推定対象とした場合の検証結果を抜粋して示す。参照値には同時に制作した別の 3 つの試験体の圧縮試験で得た値の平均値を使用し、参照値の誤差 140 % から DA を実施して参照値の推定を試みた。FEM の境界条件は各観測ステップにおける試験機荷重をモデルの上端部に等分布荷重として与え、下端を完全固定、上端の水平方向を固定とした。

4. 結果と考察

図-4 (a), (b) に、ARAMIS および Baumer カメラの DIC で得られた縦ひずみの分布をそれぞれ示す。ひずみは骨材寸法に合わせて計算節点の周辺で平均化している。縦ひずみが鉛直および周方向に分布を持つことが確認できる。**図-5** に DA で推定されたヤング率とポアソン比の推移を示す。横軸は公称応力、黒点はアンサンブル平均値、灰色範囲はアンサンブルの標準偏差である。破壊強度の 1/2 より小さい公称応力では各パラメータは参照値に対して大きい値で算出され、応力の上昇に伴って参照値に近づく傾向が確認された。これは、応力が小さい状態では試験体表面のひずみが DIC の精度に対して小さいことや、境界条件の水平固定が推定結果に影響していると考えられる。また、応力が高い状態では線形弾性の近似から乖離している可能性が高く、今後より詳細な分析が必要である。

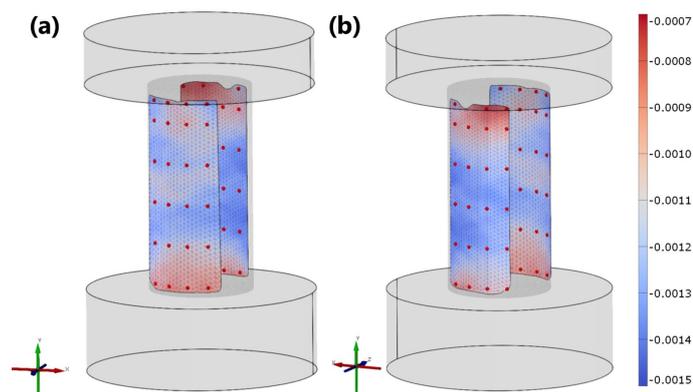


図-4 DIC 計測結果 (公称応力 30.2 MPa)

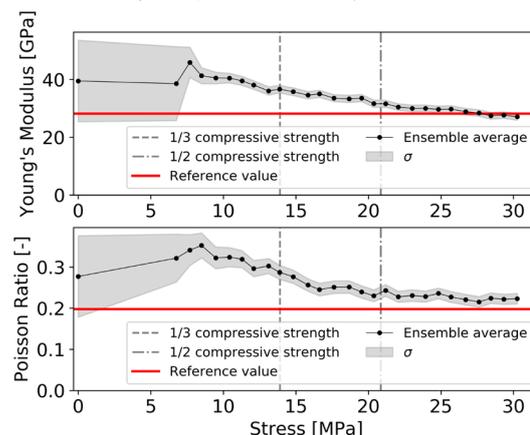


図-5 DA によるヤング率とポアソン比の推定結果

5. まとめ

本研究では、3次元 DIC と逐次型 DA を組み合わせた 3次元 FEM のモデルパラメータ推定手法を構築し、コンクリートの一軸圧縮試験に適用することで有効性を検証した。その結果、FEM の各材料パラメータに 140 % と大きな誤差を与えた場合においても、本手法を用いることで適切な値を推定できる可能性が示された。今後は、端部の摩擦や荷重分布等の境界条件、非線形解析のパラメータなどの複雑な推定に関する検討を進める予定である。

参考文献

- (1) 樋口知之 他, “データ同化入門 -次世代のシミュレーション技術-”, 朝倉書店, (2011).
- (2) Sutton, M.A., et al., “Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements”, Springer, (2009).
- (3) Evensen, G., “The Ensemble Kalman Filter: Theoretical Formulation and Practical Implementation”, Ocean Dynamics, Vol 53 (2003), pp. 343-367.
- (4) 一般社団法人 FrontISTR Commons, <https://www.frontistr.com/>, 令和2年4月3日閲覧.
- (5) 綿引壮真 他, “デジタル画像相関法を用いた逐次データ同化による材料パラメータと境界条件推定”, 日本機械学会第32回計算力学講演会講演論文集, 090, (2019).