

## デジタル画像相関法を用いたデータ同化によるコンクリート弾性力学特性の同定

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 綿引 壮真  
 構造計画研究所 正会員 Shanthanu Rajasekharan

## 1. はじめに

コンクリート材料の弾性力学特性値であるヤング率やポアソン比を決定する場合、コンクリート円柱試験体の1軸圧縮試験を実施し試験体の外表面上で測定されるひずみと公称軸応力からそれらを推定するのが一般的である。しかしコンクリート1軸圧縮試験では載荷板と試験体との(端面摩擦)境界条件、球座の使用、試験体と試験機の軸芯偏差などの影響のため試験体には複雑な多軸の応力・ひずみ状態が生じていると考えられ、決定されるヤング率とポアソン比は見かけの計測値であり真の弾性力学特性値を表わすものではない可能性がある。本研究では、1軸圧縮試験においてデジタル画像相関法(Digital Image Correlation Method, 以下DIC法)によって計測された表面ひずみ場の情報を用いるとともにヤング率、ポアソン比、載荷境界条件を変化させた1軸圧縮試験の有限要素解析を実行することによって逐次データ同化を行ない、ヤング率とポアソン比を同定することを試みた。

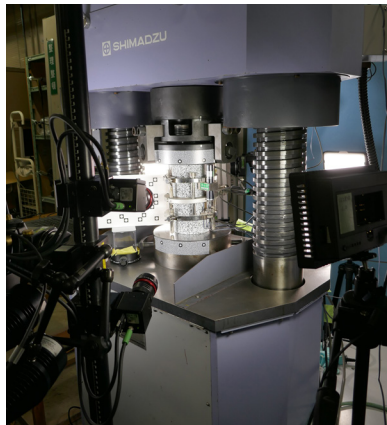


図-1 試験体 A1 のひずみ計測

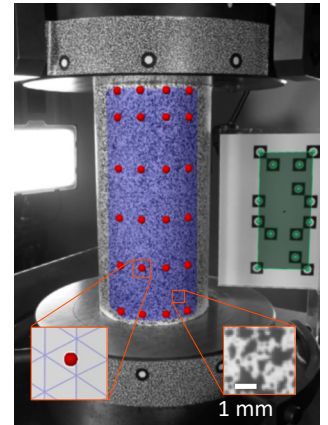


図-2 DIC の三次元計算格子

## 2. 実験の概要

表-1は使用したコンクリートの示方配合表であり、表-2は試験体の一覧である。1軸圧縮試験(図-1)はJIS A 1108:2018 コンクリートの圧縮強度試験方法に従って材齢31日および32日に実施した。

表-1 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法(mm)	目標スランプ(cm)	目標空気量(%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 AD	AE剤 AE
20	8.0~18.0	4.5±1.5	57.8	50.0	170	294	893	913	2.94	0.294

試験体はDIC計測のためにその表面に白色下地ペンキを塗布しその上に黒色ペンキスプレーでランダムな点群パターンを塗布したもの、黒色ペンキスプレーのみを塗布したもの、ペンキ塗布がまったくないものの3種類であり、試験体A(図-1)のみはDIC計測に加えて、ゲージ長60mmのひずみゲージを設置することによって、また変位計を用いて標点距離100mmの圧縮軸変位と直径方向変位を測定することによって軸圧縮ひずみとポアソンひずみを求めた。実験の載荷境界条件パラメータとしては、球座の使用・固定、試験体と載荷板の間の端面減摩の有無を考えた。端面減摩については2枚のテフロンシート(1mm厚)の間にシリコングリースを塗り込んだ端面減摩シートを用いた。DICの計測装置とソフトウェアにはGOM社製ARAMIS Adjustable Base 6MおよびARAMIS Professional 2018を使用し、4台のCCDカメラのステレオ撮影により試験体の前後両面から二方向同時三次元DIC計測を実施した。ARAMISによる三次元DIC計測では、図-2のように試験体の表面に三次元の計算格子を生成し、48点の観測点(図-2の赤点)を設置した。

表-2 試験体

試験体	球座	端面減摩	試験体表面ペンキ塗布	ひずみの測定	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	備考
A1	使用	無	白色下地 黒色スプレー	ひずみゲージ 変位計 DIC	41.3	圧縮強度まで載荷
A2	使用	無	黒色スプレー	ひずみゲージ 変位計 DIC	40.3	圧縮強度まで載荷
A3	使用	無	無	ひずみゲージ 変位計 DIC	41.4	圧縮強度まで載荷
B1	使用	無	白色下地 黒色スプレー	DIC	41.7	圧縮強度まで載荷
B2	使用	無	黒色スプレー	DIC	40.5	圧縮強度まで載荷
B3	使用	無	無	DIC	43.9	圧縮強度まで載荷
C1	使用	有	白色下地 黒色スプレー	DIC	-	1.13N/mm <sup>2</sup> まで載荷
C2	使用	有	黒色スプレー	DIC	-	1.01N/mm <sup>2</sup> まで載荷
C3	使用	有	無	DIC	-	3.92N/mm <sup>2</sup> まで載荷
D1	固定	有	白色下地 黒色スプレー	DIC	-	31.3N/mm <sup>2</sup> まで載荷
D2	固定	有	黒色スプレー	DIC	34.2	圧縮強度まで載荷
D3	固定	有	無	DIC	37.4	圧縮強度まで載荷
E1	固定	無	白色下地 黒色スプレー	DIC	38.3	圧縮強度まで載荷
E2	固定	無	黒色スプレー	DIC	40.2	圧縮強度まで載荷
E3	固定	無	無	DIC	38.7	圧縮強度まで載荷

キーワード：コンクリート、1軸圧縮試験、ひずみ計測、ヤング率、ポアソン比、FrontISTR有限要素解析  
 〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3 TEL 03-5342-1137 FAX 03-5342-1237

3. 有限要素解析とデータ同化の概要

データ同化のための構造解析シミュレーションとしてオープンソース大規模並列有限要素非線形構造解析プログラム FrontISTR<sup>1)</sup> を用いた三次元線形弾性解析を実施した。図-3は試験体の有限要素メッシュであり DIC 計測における三次元計算格子の観測点の座標 (図-2) はこの有限要素メッシュの座標と一致させている。本研究では逐次データ同化手法の一つであるアンサンブルカルマンフィルタに基づいたデータ同化<sup>2)</sup> を実施し、ヤング率とポアソン比を推定することとした。荷荷境界条件は、実験条件としても、有限要素解析の条件としても、データ同化問題の推定パラメータとしても最も重要であるが、試験体 A および B を対象とした最初の最も単純な条件として等分布荷重と端面摩擦なしの荷荷境界条件 I ならびに等分布荷重と端面完全拘束の荷荷境界条件 II (表-3) に基づいたデータ同化を試みることにし、端面摩擦拘束の有無の影響に関して検討した。

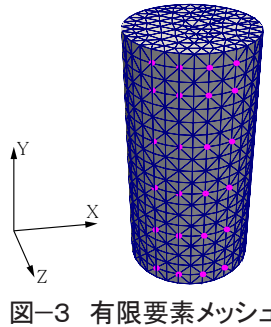


図-3 有限要素メッシュ

表-3 荷荷境界条件

境界	方向	荷荷境界条件 I	荷荷境界条件 II
上端面	X	自由	拘束
	Y	等分布力	等分布力
	Z	自由	拘束
下端面	X	自由	拘束
	Y	拘束	拘束
	Z	自由	拘束

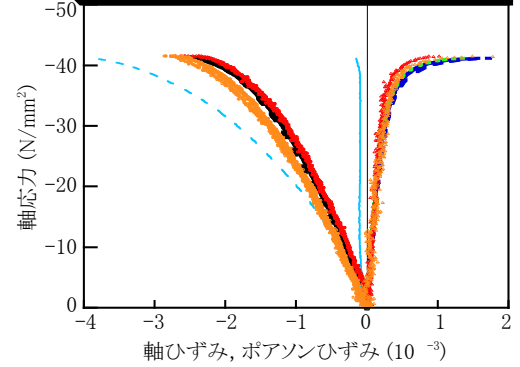
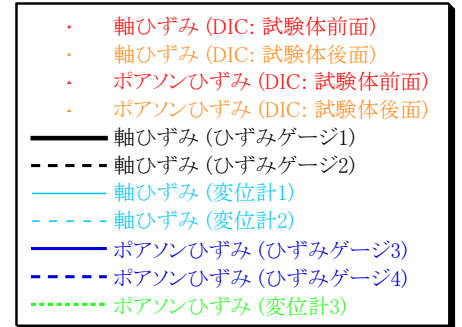


図-4 試験体 A1 の応力 - ひずみ関係

4. 実験結果とデータ同化解析結果

図-4は、試験体 A1 についてひずみゲージと変位計の計測に基づく公称の軸圧縮応力と軸ひずみ、ポアソンひずみの関係を DIC 計測に基づく結果と比較したものであり、DIC 計測が良好な精度を有することがわかる。なおコンクリート材料の非均質性に起因する特性長 (characteristic length) を考慮して粗骨材最大寸法の 2 ~ 3 倍程度の計測領域長について DIC 計測ひずみを計算している。試験体 B1 のデータ同化解析について圧縮強度の 1/3 の軸圧縮応力レベルにおいて推定されたヤング率とポアソン比は、端面摩擦なしの荷荷境界条件 I の場合に 37.4kN/mm<sup>2</sup> と 0.169 で、端面摩擦ありの荷荷境界条件 II の場合には 36.0kN/mm<sup>2</sup> と 0.302 となった。これらの値は試験体 A の実験におけるひずみゲージ計測に基づくヤング率とポアソン比の平均値 (28.2kN/mm<sup>2</sup> と 0.198) とかけ離れており、実際の荷荷境界条件をデータ同化解析において精度よく再現することが重要であると考えられる。図-5および図-6は、試験体 B1 の圧縮強度の 1/3 の軸圧縮応力レベルにおける圧縮軸方向の直ひずみおよび水平方向の直ひずみの分布を DIC 計測結果とデータ同化の結果について比較したものであり、端面摩擦ありの荷荷境界条件 II の場合の方が実現に近いひずみ状態であると思われる。

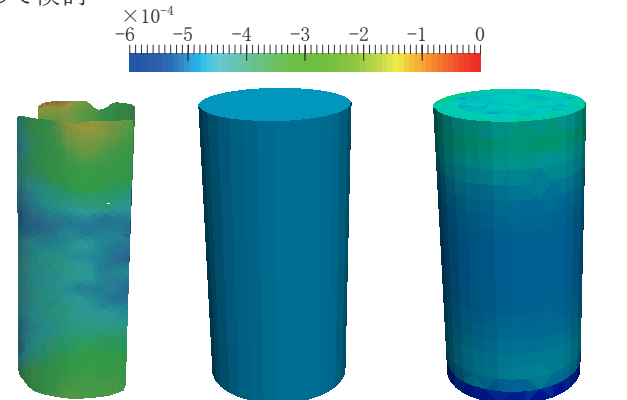
3. まとめ

DIC 法によるコンクリート1軸圧縮試験のひずみ場計測データを用いるとともにヤング率、ポアソン比、荷荷境界条件を変化させた1軸圧縮試験の有限要素解析を実行して逐次データ同化を行ないヤング率とポアソン比の同定を試みた。その結果、データ同化解析における荷荷境界条件の重要性が確認された。

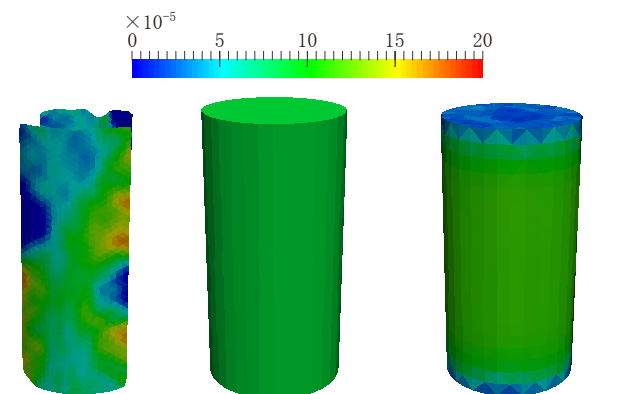
[参考文献]

- 1) 奥田洋司：並列有限要素解析 II, 並列構造解析ソフトウェア FrontSTR を使いこなす, 培風館, 2008 年.
- 2) 綿引壮真, 佐々木健吾：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 年.

[謝辞] 荷荷実験に御協力頂いた株式会社中研コンサルタントの鈴木康範技術顧問に謝意を表す。



(1) DIC 計測 (2) 荷荷境界条件 I (3) 荷荷境界条件 II  
図-5 DIC 計測とデータ同化における垂直ひずみ分布



(1) DIC 計測 (2) 荷荷境界条件 I (3) 荷荷境界条件 II  
図-6 DIC 計測とデータ同化における水平ひずみ分布