

デジタル画像相関法による石膏圧裂試験の面的ひずみ分布の計測と弾性解との比較

山口大学大学院 学生会員 ○田中寿璃
山口大学大学院 正会員 中島伸一郎

1. はじめに

空洞掘削時の地山の力学挙動や岩盤構造物の安定性を評価する上で、岩盤内部における亀裂の発生と進展を適切に表現することは重要である。特に硬岩の場合、亀裂の発生進展は極めて短時間で生じるため、その過程を実験的に観察することは容易ではない。近年ではデジタルカメラの性能が向上し、高速度・高解像度で岩石破壊実験を撮影できるようになってきている。画像処理によりひずみ分布を面的に計測することができれば、ひずみの局所化や破壊の発生・進展を追跡することが可能である。

本研究では、画像処理により面的なひずみ分布を求める手法であるデジタル画像相関法を石膏圧裂試験に適用し、弾性解による応力分布と比較した。

2. デジタル画像相関法の概要¹⁾²⁾

デジタル画像相関法は、試験体表面に塗装されたスペckルパターン（不規則斑点）をカメラで撮影し、変形前後の画像の相関から変位分布やひずみ分布を計測する手法である。

実際の解析では、デジタル画像を小さな領域（相関窓）に分割して各領域を自動的に追跡して対象領域全域の変位を算出する。基本的な手順は以下のとおりである。

- 1) 変形前後のデジタル画像を取得する。
- 2) 変形前の画像内に基準となる節点群を設定する。
- 3) 各節点を中心に相関窓のサイズを定義する。本研究では、半径16 pixelの円形の相関窓を定義した。
- 4) 変形後の画像で相関窓を動かしながら相関係数を算定する。
- 5) 相関が最も高い位置を移動後の領域と決定する。この状態でピクセル単位の移動量が求まる。
- 6) 5)で得られた整数ピクセル単位での移動量に対してサブピクセル（小数点ピクセル）補正を行う。これにより実数での変位分布を求めることが可能になる。本研究ではBスプラインによる補間を

行っている。

- 7) 得られた変位場をもとに、相関窓の伸縮量および変形量を用いて直ひずみ、せん断ひずみを求める。

本研究では、上記の解析手順を自動化したMATLAB プラグインの Ncorr³⁾を用いている。

3. 石膏圧裂試験の高速度カメラによる撮影

(1) 実験概要

石膏の供試体（直径50 mm、長さ50 mm）表面に市販の黒スプレーを30 cm離して吹き付けスペckルパターンを作成し、圧裂試験を行った。斑点の平均サイズは約0.5 mmであり、画像の1 pixelは実寸だと0.2215 mmである。供試体の寸法および撮影条件を表-1に、スペckルパターンを図-1に示す。高速度カメラには、キーエンス社のハイスピードマイクロコープVW-9000（カメラはVW-600C）を使用した。載荷速度は3.0 kgf/sとし、200 kgfごとに載荷を一時停止して動画撮影を行った。実験の様子を図-2に示す。

表-1 供試体の寸法および撮影条件	
直径 (mm)	48.60
長さ (mm)	49.85
フレームレート (fps)	4,000
シャッタースピード (秒)	1/8,000
画像サイズ (pixel)	640×480

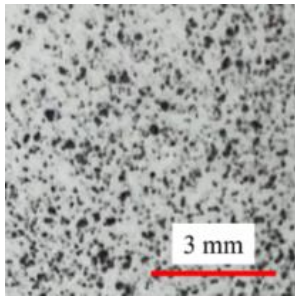


図-1 スペckルパターン

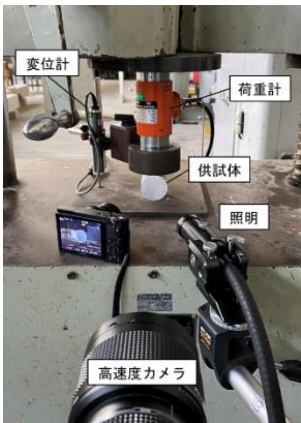


図-2 実験の様子

(2) デジタル画像相関法による解析結果

デジタル画像相関法により石膏表面のひずみ分布を求めた。図-3(a)に供試体No.1の亀裂発生1コマ(250 microsec)前のX方向直ひずみ分布を、図-3(b)にY方向直ひずみ分布を、図-3(c)にせん断ひずみ分布を示す。ここで、全てのひずみ分布に関して、右向きを正とするX軸、下向きを正とするY軸をとっており、直ひずみは引張が正、圧縮が負となっている。なお、動画を連続画像に変換したもののうち、目視で亀裂が入ったと見なせる1枚を亀裂発生時とした。

図-3(a)より、供試体中央部の白丸部で正のX方向直ひずみが生じており、直後に発生する縦割れ亀裂に整合するラインに沿って大きな水平引張りひずみが発生している。図-3(b)では、供試体の上下端に負の直ひずみ(圧縮ひずみ)が集中的に広がっている。載荷版による集中荷重が作用していることを示している。また、図-3(c)では、供試体上下端に2箇所ずつのせん断ひずみが生じていることが確認できる。

4. 圧裂試験の理論解による応力分布との比較⁴⁾

直径方向に集中荷重を受ける弾性円板の応力分布に関する理論解を図-4に示す。理論解は(1)式である。また、応力は $2P/\pi D l$ で除すことによって正規化して表示している。

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_x}{2P/\pi D l} &= \frac{((D/2)-y)Dx^2}{((D/2)-y)^2+x^2} + \frac{((D/2)+y)Dx^2}{((D/2)+y)^2+x^2} - 1 \\ \frac{\sigma_y}{2P/\pi D l} &= \frac{((D/2)-y)^3 D}{((D/2)-y)^2+x^2} + \frac{((D/2)+y)^3 D}{((D/2)+y)^2+x^2} - 1 \\ \frac{\tau_{xy}}{2P/\pi D l} &= \frac{((D/2)-y)Dx}{((D/2)-y)^2+x^2} + \frac{((D/2)+y)Dx}{((D/2)+y)^2+x^2}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 σ_x はX方向の応力、 σ_y はY方向の応力、 τ_{xy} はせん断応力、Pは荷重、lは供試体の長さ、Dは供試体の直径を指す。また、原点は供試体の中心であり、X軸は右方向が正、Y軸は上方向が正である。図-4の黒丸部を図-3の白丸部とそれぞれ比較すると、図-3(a)、図-4(a)より、供試体中央部にX方向の引張力が分布している点、図-3(b)、図-4(b)より、供試体上下端にY方向の圧縮力が分布している点が類似している。図-3(c)、図-4(c)からは、供試体上下端の4箇所にてせん断力が分布している点は類似しているものの、図-3(c)では、図-4(c)のように供試体中央部のせん断力0の分布は見られなかった。理由としては、図-4の理論解では供試体上下端に荷重を点载荷しているのに対し、図-3の実験による解析では供試体上下端に面的な荷重がかかっており、供試体下端

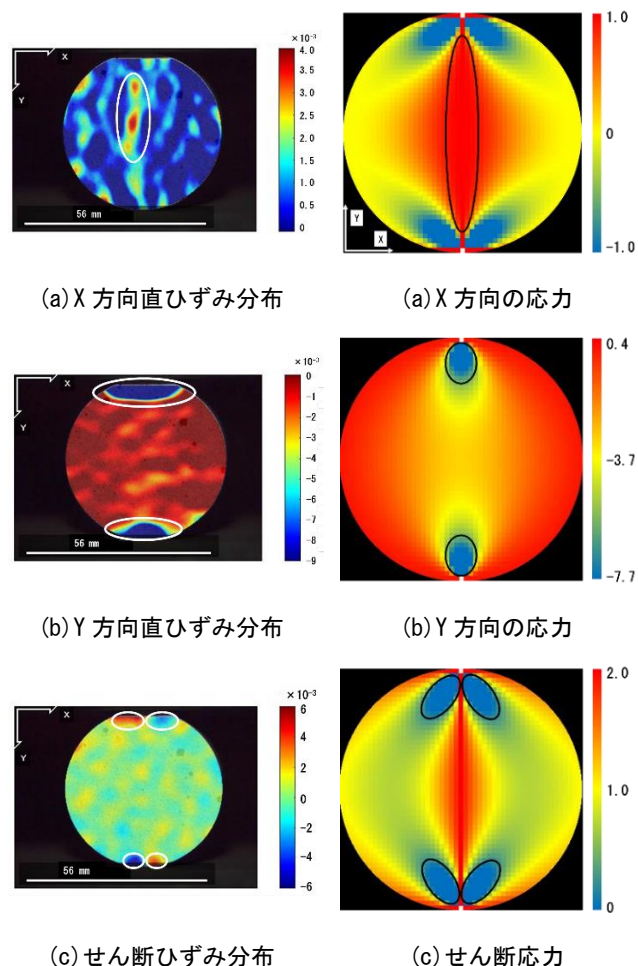


図-3 デジタル画像相関法による圧裂破壊直前のひずみ分布

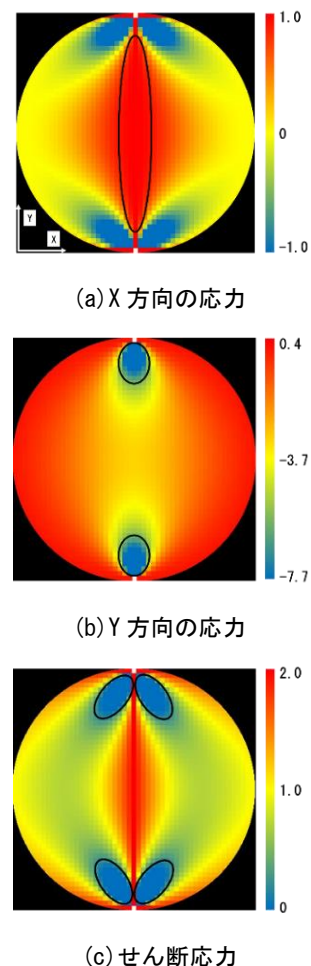


図-4 弾性解に基づく圧裂試験の応力分布 ($2P/\pi D l$ により正規化している)

での微小破壊が供試体中央部に先行して起こったからであると考えられる。

5. まとめ

石膏の圧裂試験を高速度カメラにより撮像し、デジタル画像相関法を用いて面的なひずみ分布を求めるとともに、弾性解による応力分布と比較した。その結果、圧裂試験での亀裂発生直前のひずみ増加箇所は、弾性解に基づいた応力増加箇所と一致するということが明らかとなった。

参考文献

- 1) Pan, B., Lu, Z., Xie, H. : Optics and Lasers in Engineering, 48, pp.469-477, 2010.
- 2) 高野大樹, 大谷順: 材料, Vol.62, No.10, pp.654-659, 2013.
- 3) Blader, J., Adair, B., Antoniou, A. : Experimental Mechanics, pp.1105-1122, 2015.
- 4) Jianhong, Y., Wu, F, Q., Sun, J, Z. : International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 46, pp.568-576, 2009.