

画像の多重解像度解析に基づく平面ひずみ圧縮試験の微視的観察

Microscopic observation of plane strain compression based on multiresolution analysis of Image

新潟大学大学院 学生会員 ○八重樫 啓生

新潟大学 正会員 大竹 雄

長岡技術科学大学 正会員 福元 豊

1. はじめに

近年、実験の観測技術や数値解析技術の向上により、土の微視的な観察や数値解析を実施した事例が報告されている。これらの検討で得られる現象は、短周期の信号を多く含むことにより、結果の解釈が視覚的に観察された定性的な解釈に止まることも少なくない。そこで、画像解析技術を応用することにより、土の挙動の本質を抽出し、現象の変化を定量的に評価することを目指している。

本研究では、個別要素法(DEM)を用いた平面ひずみ圧縮試験の再現解析を対象とする。解析結果を時系列信号と捉え、画像解析により、ひずみの進展や局所化などを効果的にモード分解することを試みる。なお、本研究での着目点は、下記の3つの可能性を考察するものである。1) ひずみの進展過程や局所化を含む非線形な空間分布特性の線形化の可能性、2) 次元削減による情報の低次元化(スパース近似)の可能性、3) モード分解による力学的解釈の明確化の可能性。

2. 研究方法

2.1. 平面ひずみ圧縮試験のDEMシミュレーション

図1(a)にシミュレーション条件を示す。試料の寸法は $100 \times 200 \text{ mm}$ であり、粒径 $350 \sim 450 \mu\text{m}$ の約13万個のDEM粒子で構成されている。初期間隙比は0.235である。4枚の剛な壁要素を用いて境界を再現し、上下壁は一定速度制御(0.5 mm/s)、左右壁は一定圧力制御(100 kPa)とした。時間刻みは $1.0 \times 10^{-6} \text{ s}$ とし、総計算ステップ数は1千万である。

図1(b)は、シミュレーションより得られた偏差応力と軸ひずみの関係である。また、以降の画像解析で用いるせん断ひずみの大きさに相当するスカラー値は、Hori and Sakaguchi¹⁾の方法にしたがって算出した。

2.2. 各解析方法

2.2.1. POD

PODは情報を縮約し、原データを最も効率よく展開するPODモード(POD基底)を求める。時系列データ $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ (n :各stepのデータ次元数、 m :step数)について中心化したものを $\mathbf{X}' \in \mathbb{R}^{n \times m}$ とすると、共分散行列は $\mathbf{A} = \mathbf{X}' \mathbf{X}'^T$ で求められる。 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ について固有値分解 $\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^T$ する。ここで $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は固有値を対角成分に持つ行列であり、 $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は固有値に対応する固有ベクトルを並べた行列である。固有値が大きい順にそれに対応する固有ベクトルを、第一主成分、第二主成分…第 n 主成分とする。また固有値は

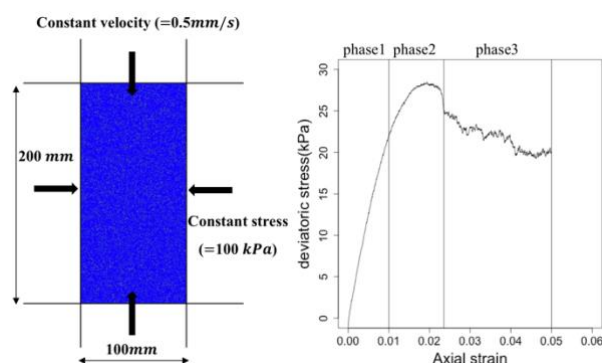


図1 (a)DEMシミュレーション条件と(b)偏差応力-軸ひずみ関係図

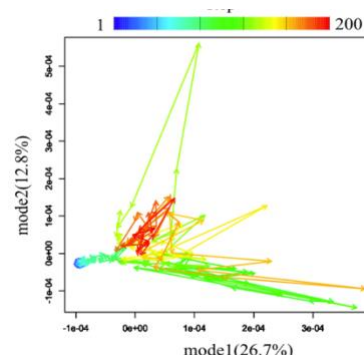


図2 mode1, mode2 に対する主成分得点図

その主成分(mode)が持つ情報の割合を表す。図2に全200stepでのPODの結果を示す。mode1, mode2までの累積寄与率は39.5%程度となった。

2.2.2. DCTとPOD

DCT, IDCTとはそれぞれ離散信号を周波数領域へ変換する方法、その逆変換を行う方法である。本研究では、各stepにおいて 8×8 画素のパッチ66個(各step 11×6 パッチ)に区切り、各パッチに対しDCTを行い、同じ周波数の基底の係数のみを時系列に並べ特徴(係数)空間でPODを行う。PODで得られた係数の各主成分に対してIDCTを行ったものを基底としてlasso推定(スパースモデリング)により基底選択を行う。スパースモデリングとは信号をある基底の下で多くの成分の大きさがゼロになるように表現するモデル化手法である。図3にスパースモデリングにより選択された各基底の係数の時系列変化と各stepで選択された基底にかかる係数の数の時系列変化を示す。

2.2.3. DWTとPOD

DWTは周波数解析の1つで空間領域、周波数領域の特徴を多重解像度で表現することが可能である。またIDWTはその逆変換である。各stepにおいて

16×16画素のパッチ 18 個(各 step 6×3パッチ)に区切り, 各パッチに DWT を行う. 時間 t の関数 $f(t)$ の離散ウェーブレット変換はマザーウェーブレット $\psi(t)$ から生成された整数 j, k に対応する分解関数 $\psi_{j,k}(t)$ により次式で表される.

$$f(t) = \sum_j \sum_k a_{j,k} \psi_{j,k} \quad (1)$$

ここで, $a_{j,k}$ は展開係数で次式により表される.

$$a_{j,k} = \int f(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (2)$$

また, 分解関数 $\psi_{j,k}(t)$ は次の条件を満たす.

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k) \quad (3)$$

ここで, k はシフトパラメータ, j はスケーリングパラメータである. 離散ウェーブレット変換は解析波形を低周波成分, 高周波成分に分解する. 低周波成分をさらに, 高周波成分, 低周波成分に分解することで多重解像度解析が可能である.

本研究では, 求めた係数を解像度ごとに時系列に並べ特徴(係数)空間で POD を行う. POD で得られた係数の各主成分に対して IDWT を行ったものを基底として, スパースに基底選択を行った. 図 4 に lasso 推定により選択された各基底の係数の時系列変化と各 step で選択された基底にかかる係数の数の時系列変化を示す.

3. 結果考察

原データではひずみ分布が非線形データであるため線形性を要求する POD では特徴の分類は困難であった. DCT や DWT を行うとその係数の分布は原データと比較し線形性を有することが確認された. なお, スパースモデリングにより, 選択された基底の数を見るとその特徴に明瞭な差が見られた. DCT では, ひずみの進展にともない再構成に必要な基底は増加する傾向があるが, DWT では選択される基底の数が減少する傾向がある.

紙面の都合上詳細は省略するが, 基底の特徴から次の 3 つのフェーズに分割して整理できることがわかった. 1)初期~軸ひずみ 1%, 2)軸ひずみ 1%~ピーク 2%, 3)ピークひずみ 2%以後.

Phase-1 は, 明確なせん断面が観察されない「潜伏期」である. 非常に短周期な信号成分が全体に広がっている状態である.

Phase-2 は, 共役なせん断面が形成され, 破壊が進展する面は明確ではない状態である.

Phase-3 は, 破壊が進展するせん断面が明確となり, 軸ひずみは局所化していく状態である.

なお, Phase-3 の基底の係数をみると, 係数が波のように振動し, 定期的に明瞭なピークを持つことが読み取れる. これは, 図 5 下の図の Phase3(a), Phase3(b)が交互に卓越するなど, ステックスリップ現象が生じながら破壊が進展していく状況が数値化された結果となっている.

4. 今後の展望

本研究では, DEM 解析結果の軸ひずみ空間分布の時系列データを複数の方法によりモード分解を行った. モード分解により, 現象の特徴量を定量化できる可能性を示した. 今後は, 学習を行うなど, よりスパースな基底空間を探索するなどして, より力学的な考察につながるモード分解の可能性を検討する予定である.

参考文献

- 1) Takane Hori, Hide sakaguchi, Mechanism of decollement formation of subduction in zones, Geophysical Journal International, Geophys. J. int. (2011) 187, 1089-1100
- 2) 富山和也・城本政一・川村彰, 離散ウェーブレット変換による路面平坦性の劣化特性を考慮した評価方法, 土木学会論文集 E1, vol67, No.3

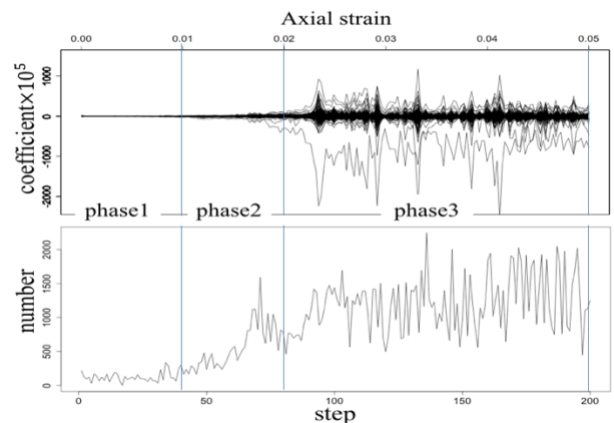


図 3 上: 選択された基底にかかる係数 下: 選択された基底の数

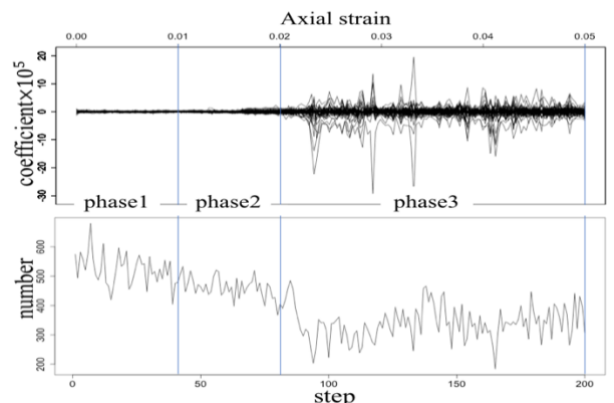


図 4 上: 選択された基底にかかる係数 下: 選択された基底の数

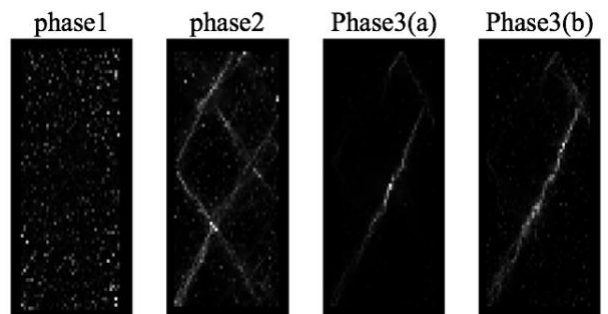


図 5 左から phase1, phase2, phase3(a), phase3(b)

キーワード POD(固有直交分解), DWT(離散ウェーブレット変換)

連絡先 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 番地 新潟大学大学院