

# 平面ひずみ状態における土の応力ひずみ関係とせん断帯の発生

## Stress-strain relationship and shear band generation for the soil in plane strain condition

○横山 かな\*, 王 博涵\*\*, 毛利 栄征\*\*\*

Nana Yokoyama, Bohan Wang, Yoshiyuki Mohri

### 1. 背景

近年、豪雨や地震による斜面、ため池堤体や河川堤防の崩壊が頻発している。土構造物が崩壊する際には、地盤にすべり面を形成することが知られているが、そのすべり面で発揮されるせん断強度やひずみ量は十分に解明されていない。また、一般的な土質試験では、供試体内部のひずみを一様であるとみなして平均的な応力ひずみ関係を求めている。そのため、ひずみが局所化する土のせん断破壊現象に関する適切な議論が展開できていない。本研究では、平面ひずみ圧縮試験を実施し、土の破壊に重大な影響を及ぼすひずみの発生と進展過程を明らかにすることを目的とする。

### 2. 試験方法

本研究では、せん断帯の挙動を観測することが可能な平面ひずみ圧縮試験を実施した。供試体は幅 8cm×奥行 16cm×高さ 20 cmの四角形とし、試料には佐原砂を用いた。Table1.に佐原砂の物理的特徴を示す。最小主応力  $\sigma_3$  を 30kPa、背圧を 50kPa 程度とし、載荷速度は約 0.2mm/min. で軸ひずみ 6.29%までせん断した。試験中の供試体をアクリル製の拘束板(縦 20cm×横 8cm)を通して約 2,400 万画素のデジタルカメラで記録した。局所的な変形とひずみ分布を明らかにするために、画像解析を導入した。

### 3. 画像解析の概要

画像解析には、オープンソースの二次元画像相関 (2D-DIC) プログラムである Ncorr<sup>1)</sup> を使用する。DIC 法では、変形前の画像に多数のサブセットと呼ばれる中心位置座標情報を持った領域を定義し、変形前後画像におけるサブセット領域の明暗分布 (輝度情報) を比較して求まる相互相関係数を判断指標として移動ベクトルを追跡し、ひずみ分布を得る。Ncorr では、サブセットの大きさを Subset Radius、隣接するサブセット同士の距離を Subset Spacing というパラメータで設定する。Fig.1 に解析の流れを示す。

Ncorr で算出するひずみは以下の eq.1~eq.3 から求められる。

$$E_{xx} = \frac{1}{2} \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right) \quad (\text{eq.1})$$

\*茨城大学大学院農学研究科, Ibaraki University Graduate School of Agriculture, \*\*東京農工大学連合農学研究科, United Graduate School Of Agriculture Science, Tokyo University of Agriculture and Technology, \*\*\*茨城大学農学部, College of Agriculture, Ibaraki University  
キーワード: 土質試験、せん断帯、すべり面

Table1. 佐原砂の物理的特徴

Physical characteristics of Sawara

土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.755
乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.637
D値(%)	95
試験前含水比(%)	15.67

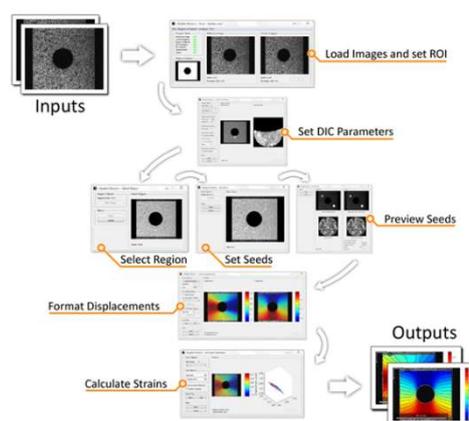


Fig. 1 画像解析の流れ

Image analysis flow

$$E_{yy} = \frac{1}{2} \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (\text{eq.2})$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (\text{eq.3})$$

#### 4. 試験結果・考察

Fig.2 に示すように、供試体の破壊時には局所的なひずみの集中が進み、明確なせん断帯が形成されて、残留強度まで強度低下することが確認できる。Fig.3 には、応力-ひずみ関係と各軸ひずみ時の最大せん断ひずみ分布を示した。

試験では、軸ひずみ 1.67% でピーク強度に至り、その後軟化して軸ひずみ 6.29% で残留強度を示した。最大せん断ひずみの分布は供試体の上下約 25 mm を除いた縦 175 mm × 横 80 mm 程度の範囲を示している。軸ひずみ 1.01%, 1.60% においては供試体に不均一性は見られるものの、ひずみの集中は起こっていない。軸ひずみ 1.94% では、供試体の左上から右下にひずみの集中が連続している。軸ひずみ 2.68% においては、連続したひずみの集中部がより鮮明になっている。その後、4.01%, 5.00%, 6.01% と軸ひずみの増加に伴って、供試体の左上から右下に至る領域のひずみの集中がより顕著になり、ひずみの局所化を示している。ひずみが局所化している部分がなす角度は、約 74.6° である。

Fig.4 には、供試体中央を縦断する位置での体積ひずみ  $\varepsilon_v$  と最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  の分布を示す。

y 座標が 150 から 220 (ピクセル値) の約 35 mm の範囲で  $\varepsilon_v$  は負の値から正の値へと膨張に転じ、 $\gamma_{max}$  は約 20% から最大値 75.0% に増加している。このことから、この範囲にせん断帯が形成されていると考えられる。他の部分の  $\varepsilon_v$  は負で収縮領域にあり、 $\gamma_{max}$  は 6% 以下で比較的安定している。したがって、供試体内部のひずみはせん断帯とその周辺部分に集中し、他の部分は比較的剛体的な動きをしているように見える。

#### 5. まとめ

以上のように、平面ひずみ圧縮試験で得られる応力ひずみ関係は、せん断帯の形成と進展に大きく依存しており、キャップの移動量に基づいて整理している応力ひずみ関係だけでは、土の真の応力ひずみ関係を表現できていないことが示唆される。

#### 参考文献

- 1) J. Blaber, A. Antoniou. "Ncorr v1.2". <http://ncorr.com/> .(参照 2021-4-16).
- 2) 吉田輝砂の平面ひずみ圧縮試験におけるせん断層の観察. 東京大学, 1992, 修士論文.

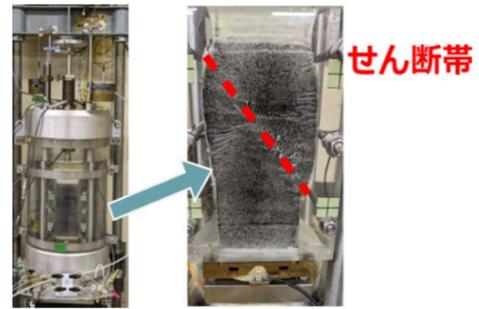


Fig. 2 試験装置と試験後の供試体  
Test equipment and specimen after test

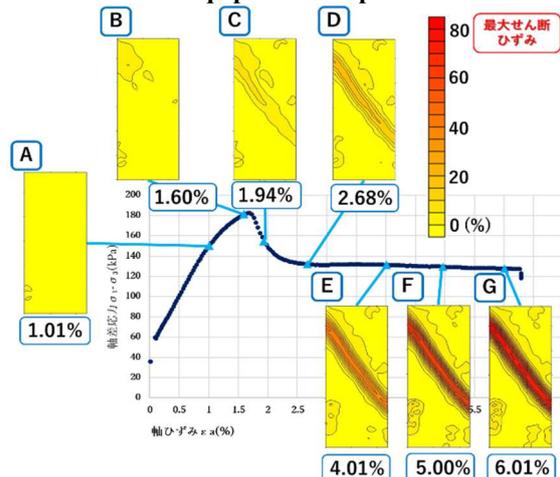


Fig. 3 最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  の分布と応力ひずみ関係  
Distribution of maximum shear strain  $\gamma_{max}$  and stress-strain relationship

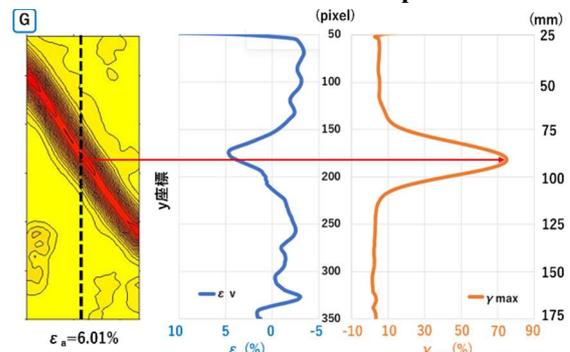


Fig. 4 供試体中央を縦断する体積ひずみ  $\varepsilon_v$  と  
最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  の分布  
Distribution of volumetric strain  $\varepsilon_v$  and maximum  
shear strain  $\gamma_{max}$  traversing the center of the specimen