# 一面せん断試験における砂のせん断挙動の可視化とその数値シミュレーション

岐阜大学 学生会員 野々山栄人

国際会員 八嶋 厚

国際会員 沢田 和秀

国際会員 森口 周二

学生会員 井上 裕

#### 1. はじめに

土の応力 - ひずみ関係等のマクロな情報と、微視的構造などのミクロな情報は、密接に関係していることが確認されている<sup>1)</sup>。マクロな情報に関して、数多くの室内実験が行われており、ミクロな情報に関しても、様々な試みが行われている。

ミクロな情報を得るための1つの方法として、走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope)が用いられている <sup>1)</sup>。 SEM は、土の微視的構造等を詳細に調べることが可能である。しかし、せん 断過程を直接観察することは難しく、せん断面の土粒子の挙動などは未解明な部分が多い。そこで、本研究では、砂のせん断挙動を観察するために、可視化型一面せん断試験機を新たに作成した(写真-1)。供試体は直方体とし、せん断箱の側面にアクリル板を用いた。試料には、豊浦砂を用いて、異なる垂直応力の一面せん断試験を行った。試験では、せん断荷重、せん断変位を計測すると同時に、せん断中の供試体をデジタルカメラで撮影し、粒子画像流速測定法 (PIV: Particle Image Velocimetry)を用いて画像解析を行った。画像解析で得られた変位をもとに、「ひずみ・変位マトリクス」を用いて、ひずみの可視化を行った。

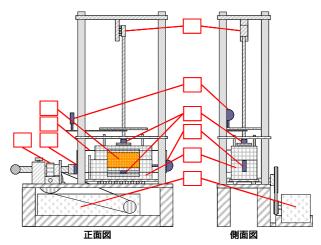
さらに、2次元個別要素法(DEM: Distinct Element Method)<sup>2)</sup>を用いて、本研究で実施した一面せん断試験の再現を試みた。せん断試験と同様に、解析で得られた各粒子の変位から、「ひずみ - 変位マトリクス」を用いて、ひずみの可視化を行った。上記の結果から、応力 - 変位関係から得られるマクロな情報と土粒子1つ1つの挙動のようなミクロな情報の関連性について検討を行った。



写真-1 可視化型一面せん断試験機

#### 2. 可視化型一面せん断試験機の概要

本研究で作成した可視化型一面せん断試験機の概略図を図-1 に 示す。上せん断箱を固定、下せん断箱を可動とした試験機は、 ん断箱、 垂直荷重載荷装置、 せん断荷重載荷装置、 で構成されている。試験機に、 せん断荷重ロードセル、 せん断 垂直荷重ロードセル(せん断箱の加圧側、反力側にそれ 変位計、 ぞれ1つ)、 垂直変位計を取り付けることで、せん断中の荷重お よび変位を測定した。 供試体は、幅 100mm、奥行き 60mm、高 さ70mmの直方体とした。 アクリル板を、せん断中の供試体の可 視画像を得るために、せん断箱側面に取り付けた。試験条件を表-1 に示す。表-1 に示すように、せん断速度を 1.0mm/min に設定し、 異なる3種類の垂直応力での試験を行った。試験試料には、豊浦砂 を用いた。豊浦砂の粒径加積曲線 3を図-2 に示す。緩詰め状態(相 対密度Dr 13%)と密詰め状態(相対密度Dr 78%)の2通りに対し、 それぞれ1回ずつ試験を行った。可視画像の撮影は、せん断試験の 開始と同時に、1回目の撮影を行い、以後、試験終了まで時間を確 認しながら20秒毎に1回撮影を行った。



せん断箱 垂直荷重載荷装置 せん断荷重載荷装置 モーター せん断荷重ロードセル せん断変位計 垂直荷重ロードセル(せん断箱の加圧側、反力側にそれぞれ1つ) 垂直変位計 供試体 アクリル板

図-1 可視化型一面せん断試験機の概略図

表-1 試験条件

ケース	case1	case2	case3	case4	case5	case6
供試体の状態	緩詰め(Dr 13%)			密詰め (Dr 78%)		
垂直応力 [kPa]	32	52	86	32	52	86
せん断速度 [mm/min]	1.0					

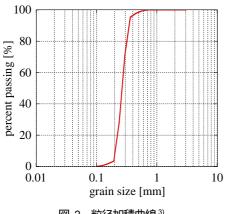


図-2 粒径加積曲線 3)

# 3. 一面せん断試験の結果

緩詰め状態および密詰め状態の「せん断応力 - せん断変位関係」 と「垂直変位 - せん断変位関係」を図-3、4 にそれぞれ示す。 せん断 応力が最大となるピーク時の内部摩擦角を求めた。また、せん断試 験終了時(せん断変位 15mm)を残留状態と仮定し、残留時の内部摩 擦角も求めた。試験より得られたそれぞれの内部摩擦角を表-2に示 す。

図-3、4に示すように、供試体が緩詰め状態と密詰め状態で、「せ ん断応力 - せん断変位関係」と「垂直変位 - せん断変位関係」に違い が現れ、負のダイレイタンシーと正のダイレイタンシーを確認でき た。しかし、得られた内部摩擦角は緩詰めで約 46°、密詰めで約 52°となった。豊浦砂のピーク時の内部摩擦角は緩詰めで30°程度、 密詰めで 35°程度と報告されている 4。したがって、内部摩擦角を 過大に評価していることになる。この原因として、アクリル板と上 せん断箱の間に砂漏れが生じ、そのため、摩擦力が大きくなったと 考えられる。今後は、アクリル板と上せん断箱の間に砂漏れが生じ ないように、試験機の改良を行う。

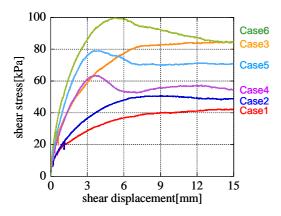


図-3 せん断応力 - せん断変位関係

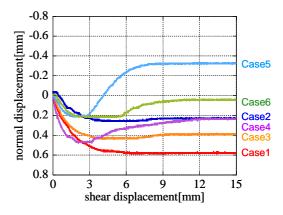


図-4 垂直変位 - せん断変位関係

表-2 得られた内部摩擦角

供試体の状態	緩詰め(I	Or 13%)	密詰め(I	Or 78%)
せん断力	ピーク	残留	ピーク	残留
内部摩擦角(°)	46.4	46.0	53.8	49.7

## 4. PIV 画像解析を用いたひずみの可視化

アクリル板を用いた砂のせん断試験より得られたデジタルカメ ラの画像を用いて PIV 画像解析を行った。 PIV 画像解析には、(株)ラ イブラリー社製の流体計測ソフト「FlowPIV」を使用した。デジタ ルカメラの撮影範囲および PIV 画像解析を行った範囲を図-5 に示 す。今回の PIV 画像解析では、格子数は 60×60 で、各格子のサイ ズは 1mm とした。PIV 画像解析によって得られた変位をもとに「ひ ずみ - 変位マトリクス」を用いて、「せん断ひずみ」および「体積ひず み」の可視化を行った。

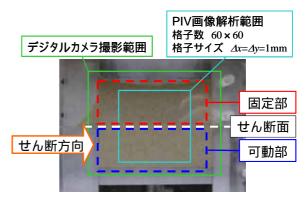


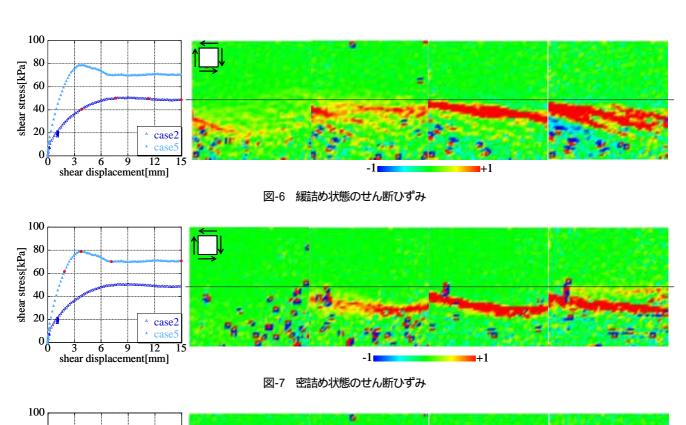
図-5 デジタルカメラの撮影範囲と PIV 画像解析を行った範囲

垂直応力 52kPa の、緩詰め状態(case2)と密詰め状態(case5)の「せ ん断応力 - せん断変位関係」、「せん断ひずみ」および「体積ひずみ」 のコンター図をそれぞれ図-6~9に示す。コンター図は、「せん断応 力 - せん断変位関係」のグラフから ~ ( :せん断初期からピー クまでの間、 :ピーク時、 : せん断応力減少後、 の4点を選出した。図-6、7に示す「せん断ひずみ」のコンター図中 のインデックスは、反時計回りを正とし、緑色が変化なし、青色が 負、赤色が正のひずみを示す。なお、「せん断ひずみ」は、工学ひず みを用いる。図-8、9 に示す「体積ひずみ」のコンター図のインデッ クスは、緑色が変化なし、青色が膨張、赤色が圧縮を示す。図中の

点線よりも上側がせん断箱の固定部側、下側がせん断箱の可動部側 である。

図-6、7の「せん断ひずみ」の分布から、せん断応力がピークをむかえるまで(せん断開始~)は、緩詰め状態では、「せん断ひずみ」が増加を示す範囲が可動部に広く生じる。一方、密詰め状態では、増加を示す範囲が狭く直線状に生じることが確認できる。せん断応力がピークをむかえた後から試験終了時まで(~)は、増加を示す範囲は可動部に生じ、緩詰め状態では密詰め状態よりも広範囲と

なる。図-8、9の「体積ひずみ」の分布から、せん断断応力がピークをむかえるまで(せん断開始~)は、緩詰め状態では、圧縮を示す範囲が可動部に広く生じる。一方、密詰め状態では、圧縮を示す範囲は狭い範囲に生じる。せん断応力がピークをむかえた後から試験終了時まで(~)は、せん断面付近で膨深と圧縮が繰り返し現れることがわかった。「せん断ひずみ」の分布と「体積ひずみ」の分布を比較すると、緩詰め状態と密詰め状態ともに、「せん断ひずみ」が増加を示す範囲と同じ範囲で体積変化が起こることがわかった。



100 80 40 40 20 3 6 9 12 15 shear displacement[mm]

図-8 緩詰め状態の体積ひずみ

図-9 密詰め状態の体積ひずみ

## 5. 2次元個別要素法(DEM)による一面せん断解析

#### 5.1 2 次元個別要素法(DEM)

砂の一面せん断試験を模擬するために、2次元個別要素法(DEM)<sup>2)</sup> を用いた解析を実施した。本研究では、図-10 に示すような粒子間 カモデルを用いる。二粒子間に対して法線方向と接線方向にそれぞれバネとダッシュポットを持ち、さらに接線方向にスライダーの効果を設定している。上述の粒子間カモデルにより、各粒子に作用する力を求め、以下の運動方程式により粒子の運動を表現する。

$$m\frac{d\mathbf{V}}{dt} = mg + \mathbf{F} \tag{1}$$

$$I\frac{d\omega}{dt} = T\tag{2}$$

ここで、 $\mathbf{V}$  と $\omega$  は粒子の並進速度ベクトルと角速度、 $\mathbf{F}$  とT は粒子同士の接触による力のベクトルとトルク、m は質量、g は重力加速度、I は慣性モーメントである。

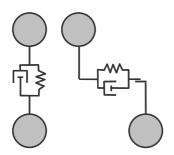


図-10 粒子間力モデル

## 5.2 DEMによる一面せん断試験の結果

DEM を用いて、密詰め状態の一面せん断試験の再現を試みた。解析モデル、解析パラメータを図-11 および表-3 に示す。図-12 に示すように、解析に用いる粒子の粒径を、豊浦砂の粒径加積曲線上の4種類の平均粒径を代表粒径として用いた。この4種類の粒子を表-4 に示す割合で、95752 個の粒子を用いて供試体の作成を行う。まず、せん断箱と同じ幅で、高さは2倍程度の領域に、4種類の粒子を発生させた。次に、発生させた粒子を上方から、一定の垂直応力で載荷し、供試体を作成した(図-13)。得られた供試体を用いて、せん断変位が8mmまで、一面せん断試験を行った。なお、本解析では、重力の影響を考慮していない。

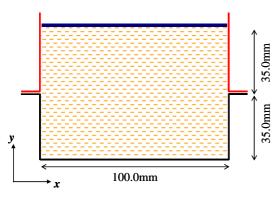


図-11 解析モデル

表-3 解析パラメータ

接線方向のバネの係数[N/m]	1.0e+7
接線方向のダッシュポッドの係数[N/m]	5.0e+3
	1.0e+7
法線方向のダッシュポッドの係数[N/m]	5.0e+3
粒子間摩擦力 [deg]	30
垂直応力[kPa]	100

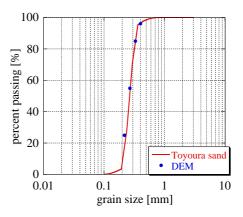


図-12 解析に用いた粒子の粒径と豊浦砂の粒径加積曲線

表-4 粒径とその割合

粒径[mm]	割合[%]	
0.217	37	
0.268	30	
0.331	30	
0.400	3	

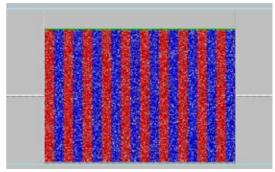


図-13 作成した供試体

「せん断応力・せん断変位関係」および「垂直変位・せん断変位関係」をそれぞれ図-14、15に示す。密詰め状態になるように供試体を作成したため、「せん断応力・せん断変位関係」では、粒状体の挙動であるせん断応力のピークおよびせん断応力が低下する残留を表現することができた。また、「垂直変位・せん断変位関係」では、正のダイレイタンシーを表現することができた。本解析の供試体モデルが、密詰めであることは、図-15の結果より確認できるが、2次元供試体モデルにおける最大・最小間隙比を解析で再現していないため、解析の相対密度は不明である。そのため、図-14、15の定量的な情報については、解析と実験で比較を行わず、ひずみの分布等について、実験との比較を行う。

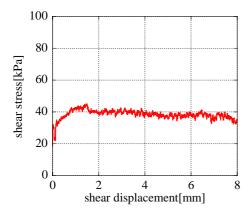


図-14 せん断応力 - せん断変位関係

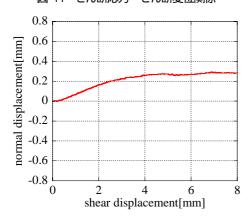


図-15 垂直変位 - せん断変位関係

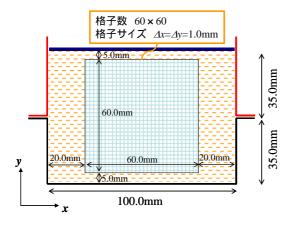


図-16 ひずみを求めるための格子位置とそのサイズ

一面せん断試験と同様に、DEMによる解析で得られた変位をもとに「ひずみ・変位マトリクス」を用いて、「せん断ひずみ」および「体積ひずみ」の可視化を行った。変位を求めるために、解析領域内に正方格子を設定し、初期状態で各節点に最も近い粒子を記憶し、その粒子の移動を追って、初期の粒子位置と変形後の粒子位置との差から変位を求めた。ひずみを求めるための格子位置とその格子サイズを図-16に示す。格子数は60×60で、各格子のサイズは1.0mmとした。

解析で得られた「せん断応力 - せん断変位関係」および供試体の変形図を図-17に示す。得られた変位から、「ひずみ - 変位マトリクス」を用いて得られた「せん断ひずみ」および「体積ひずみ」を求めた。「せん断応力 - せん断変位関係」と「せん断ひずみ」および「体積ひずみ」のコンター図をそれぞれ図 18、19に示す。供試体の変形図およびコンター図は、せん断応力 - せん断変位関係のグラフから ~ ( :せん断初期からピークまでの間、 :ピーク時、 :せん断応力減少後、 :試験終了時)の4点を選出した。図-18、19に示す「せん断ひずみ」および「体積ひずみ」のコンター図中のインデックスは、図 -6~9のインデックスと同じである。

図-17 の供試体の変形図から、せん断面付近の粒子が大きく移動していることが確認できる。図-18 の「せん断ひずみ」の分布から、せん断応力がピークをむかえるまで(せん断開始~ )は、増加を示す範囲が明確に現れず、せん断面で、増加を示す範囲が直線状に生じることが確認できる。図-7 に示した実験結果と比較すると、増加を示す範囲が異なり、これは、実験で、アクリル板と上せん断箱の間に砂漏れが生じ、せん断面より上側のせん断挙動を正確に可視化できなかった可能性がある。図-19 の「体積ひずみ」の分布から、せん断断応力がピークをむかえるまで(せん断開始~ )は、「せん断ひずみ」の分布同様に、体積変化を明確に確認することができない。せん断応力がピークをむかえた後から試験終了時まで(~ )は、せん断面付近で膨張と圧縮が繰り返し現れている。図-9 に示した実験結果と比較すると、「せん断ひずみ」と同様に、体積変化が起こった範囲が異なるが、両者の結果は膨張と圧縮が繰り返し現れている。

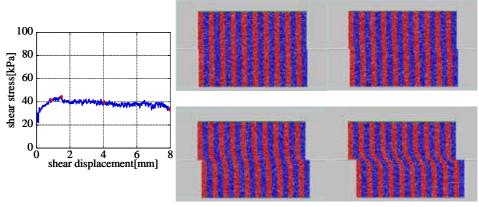
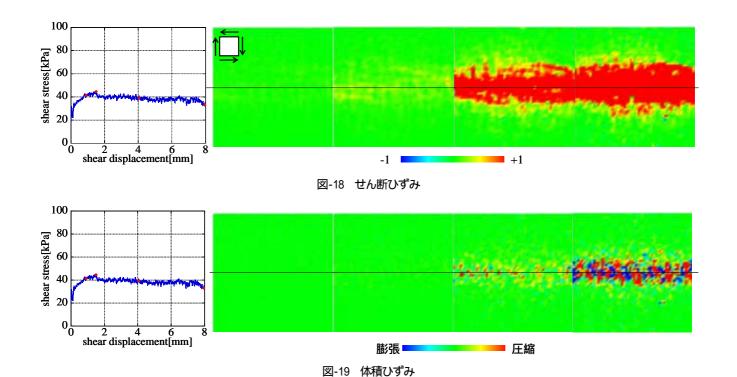


図-17 供試体の変形図



### 6. まとめ

本研究では、砂のせん断挙動について、実験と解析からミクロな情報とマクロな情報の関連性について検討を行った。

一面せん断試験結果から、供試体が緩詰め状態と密詰め状態それぞれに、負のダイレイタンシーと正のダイレイタンシーを確認できた。 しかし、得られた内部摩擦角は緩詰め状態で約 46°、密詰め状態で約 52°となり、内部摩擦角を過大に評価した。

PIV 画像解析を用いたひずみの可視化結果から、「せん断ひずみ」は、緩詰め状態では、増加を示す範囲が可動部に広く生じた。一方、密詰め状態では、増加を示す範囲が狭く直線状に生じることが確認できた。「体積ひずみ」は、せん断面付近で、膨張と圧縮が繰り返し現れることが確認できた。

DEM による解析結果から、「垂直変位 - せん断変位関係」では、密詰め状態の粒状体の挙動を確認できた。「せん断ひずみ」は、せん断応力がピークをむかえた後から試験終了時までは、せん断面で、増加を示す範囲が直線状に生じることが確認できた。実験結果と比較すると、増加を示す範囲が異なった。実験で、アクリル板と上せん断箱の間に砂漏れが生じ、せん断面より上側のせん断挙動を正確に可視化できなかった可能性がある。「体積ひずみ」は、せん断応力がピークをむかえた後から試験終了時まで、せん断面で膨張と圧縮が繰り返し現れることが確認できた。体積変化が起こった範囲が異なるが、実験でも膨張と圧縮が繰り返し現れることが確認された。今後の課題として、せん断試験では、アクリル板と上せん断箱の

間に砂漏れを防ぐために、試験機の改良を行う。また、PIV 画像解析を用いた可視化について、PIV 画像解析の際、格子の大きさや画像解析を行う範囲を変えて計測を行う。せん断箱の端面での画像解析や、せん断面付近のみに着目した画像解析を行うことで、せん断帯の形成過程やせん断帯を観察できる。解析では、一面せん断試験の結果と比較のため、相対密度を設定できるようにプログラムの修正を行う。

## 謝辞

本論文を執筆するにあたり、試験機を作成して頂いた有限会社西濃 建機の岩田悟氏に心から感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 八嶋厚ら: 上部大阪洪積粘土の力学特性と構造変化, 土木学会論文集, No.624/ -47, pp.217-229, 1999.
- 2) P. A. Cundall and O. D. L. Strack: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol.29(1), pp.47-65, 1979.
- 3) 余川弘至: 杭基礎を有する構造物と液状化時の地盤の相互作用 に関する振動台試験と数値シミュレーション, 岐阜大学修士論 文,2007.
- 4) (社)地盤工学会: 一面せん断試験, 土質試験の方法と解説, 第一回改訂版, pp.564-600, 2000.