岐阜大学	学生会員	野々し	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¹⁾。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¹⁾。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)²⁰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。



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、 Ħ ん断箱、 モーター 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。





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		



写真-1 可視化型一面せん断試験機

Visualization for shear behavior of sand using box shear apparatus and its simulation

Hideto NONOYAMA, Atsushi YASHIMA, Kazuhide SAWADA, Shuji MORIGUCHI and Yutaka INOUE (Gifu University)



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-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	Dr 13%)	密詰め(I	Dr 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、 :試験終了時) 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、せん断面付近で膨張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。



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)²⁾ 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。上述の粒子間力モデルにより、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、V と ω は粒子の並進速度ベクトルと角速度、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、/は慣性モーメントである。



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。



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
	30
	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。



60.0mm 60.0mm <u>60.0mm</u> <u>60.0mm</u> <u>20.0mm</u> <u>60.0mm</u> <u>20.0mm</u> <u>60.0mm</u>

図-16 ひずみを求めるための格子位置とそのサイズ

100.0mm

у

x

ー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-19 体積ひずみ

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.