

個別要素法による低拘束圧下の一面せん断試験の再現解析とひずみの可視化

個別要素法 一面せん断試験 ダイレイタンスー

早稲田大学 学生会員 ○大竹浩太

早稲田大学 国際会員 赤木寛一

清水建設(株) 技術研究所 国際会員 桐山貴俊

1. はじめに

近年では大変形問題にも適用可能な、粒子法を用いた地盤変形の予測技術開発が期待される。また、著者らの既往の研究¹から、低拘束圧下でのアルミ棒積層体のダイレイタンスー特性に着目した。本稿では粒子法の一つである個別要素法 (Distinct Element Method, 以下 DEM) を用いて、アルミ棒積層体地盤を対象として低拘束圧下の定圧一面せん断試験の再現解析を実施した。得られた結果から DEM の適用可能性の検討を行った。また、粒状体で構成される供試体にメッシュを配置して、メッシュ格子点の近傍粒子の座標を用いてひずみを算出し、DEM の解析結果の可視化²⁾を検討した。

2. 一面せん断試験 DEM 解析の手順および条件

一面せん断試験のせん断箱の寸法は、高さ約 20(mm)、横幅 60(mm)である (図 1(a))。粒子は既往の研究¹で用いたアルミ棒の寸法を模擬しており、長さ 50(mm)の円形断面、直径 1.6(mm)、3.0(mm)の 2 種類をそれぞれ本数比 7:1 の割合で計 390 個とした。せん断箱にランダムに粒子を配置し、載荷板によりせん断時の鉛直圧力 (3 ケース) で圧縮する。よって、3 ケースでは粒子の配置が異なる。載荷板の鉛直運動が十分に減衰した時を、せん断開始の状態とする。載荷板による圧力とせん断開始時の初期間隙比について表 1 に示す。圧力が大きいほど初期間隙比が小さくなるのが予想されたが、その傾向は見られなかった。局所的な粒子間の間隙により case3 での初期間隙比が大きくなったと考えられる。せん断時は箱の下半分を右方向に 1.0(mm/s)で 6.0(mm)まで水平変位させる (図 1(a)~(c))。DEM におけるせん断時の各パラメータについて表 2 に示す。せん断応力 - せん断変位関係および体積ひずみ - せん断変位の関係を取得する。

表 1 載荷圧力と初期間隙比

	case1	case2	case3
載荷圧力 P(kPa)	2.0	5.0	10.0
初期間隙比 $e_0(-)$	0.219	0.218	0.221

表 2 DEM 解析各種パラメータ

積分時間間隔 $\Delta t (s)$	1.0×10^{-6}
粒子密度 $d (g/cm^3)$	2.7
法線ばね定数 $k_n (N/m)$	4.0×10^6
せん断ばね定数 $k_s (N/m)$	1.0×10^6
粘性減衰比 $h (-)$	0.8
ローカルダンピング $\alpha (-)$	0.1
摩擦係数 $u (-)$	0.29
転がり摩擦の係数 $b (-)$	0.02

3. 解析結果

せん断応力 - せん断変位関係を図 2 に、体積ひずみ - せん断変位関係を図 3 に示す。図 3 の体積ひずみは圧縮を正とする。図 2 の結果から、せん断応力の線形的増加はせん断変位 0.5(mm)程度までに終了した。また、載荷板圧力が大きいほどせん断応力の値が大きくなった。図 3 の結果から、正のダイレイタンスーが生じていることが分かる。載荷板圧力と体積ひずみでは相関関係が見られなかった。粒子数が 390 と少なく初期の粒子配置状況や局所的な粒子の移動による影響が大きいことが原因であると考えられる。

3-1. メッシュの配置によるひずみの算出方法

DEM はメッシュ配置をしない解析手法であるが、供試体部分にメッシュを配置しひずみの算出を行った。メッシュ配置によるひずみ算出手順を、例を挙げて説明する。ひずみは時刻 0 からの累積である。例では、図 4 に示した粒子とメッシュの配置 (時刻 0) が時間経過したことで、図 5 のように粒子が移動しメッシュが変形した (時刻 t) とする。

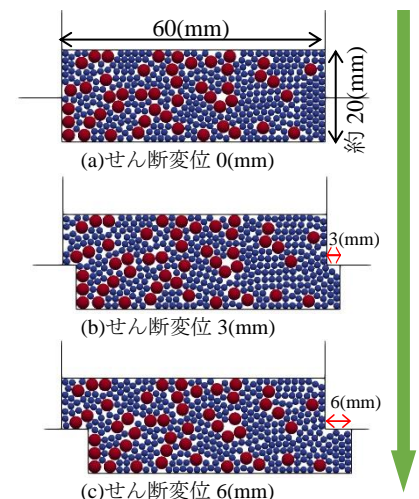


図 1 せん断変位過程

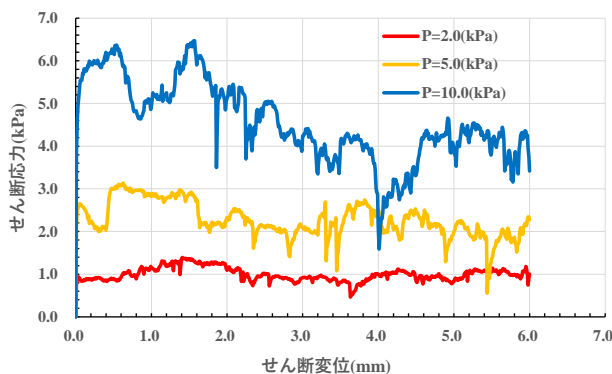


図 2 せん断応力 - せん断変位関係

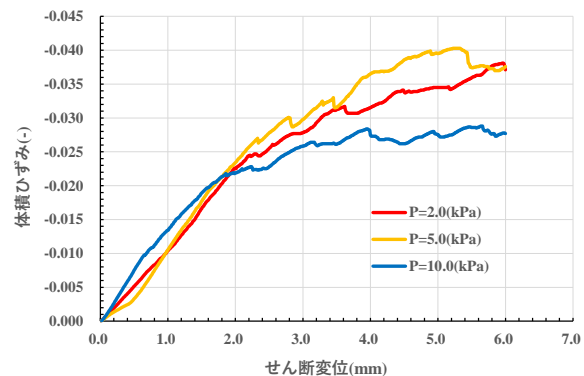


図 3 体積ひずみ - せん断変位関係

なお、図4以降で現れる文字について、時刻 t における粒子 i の中心座標の位置ベクトルを $\mathbf{x}_i(t)$ 、時刻 t における格子点 j の位置ベクトルを $\mathbf{X}_j(t)$ としている。

【ひずみ算出手順】

- ①時刻 0 において、各格子点の位置ベクトル $\mathbf{X}_j(0)$ とその近傍の粒子中心座標の位置ベクトル $\mathbf{x}_i(0)$ の距離を計算する。各格子点について、最近傍の粒子を探索し、その中心座標の位置ベクトルを記憶させる。例えば、図4における各格子点とその最近傍粒子の対応は表4のようになる。
- ②時刻 0→時刻 t における、粒子の変位ベクトル $\mathbf{u}_i(t) = \mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_i(0)$ を算出する(図6)。ただし、必要なベクトルのみ(この例では表4に示された粒子についてのみ)でよい。
- ③各格子点に対して、対応する最近傍粒子の変位ベクトル $\mathbf{u}_i(t)$ を用いてひずみ算出を行う。図7に初期のメッシュ(赤色)、移動後のメッシュ(水色)をそれぞれ示す。時刻 t の各格子点の位置ベクトル算出について表5に示す。

3-2. 一面せん断試験のDEM解析におけるひずみの可視化

今回の解析について、メッシュ幅を1(mm)として3-1で示した手順のようにひずみを算出した。メッシュ配置により算出した体積ひずみのコンター図を表3に示す。コンター図は正が圧縮(赤)、負が膨張(青)である。ただし、図3での体積ひずみは供試体全体を一要素としているのに対し、表3での体積ひずみはメッシュ一つ一つを一要素としている。表3から、いずれの圧力においても供試体せん断面付近が青く、正のダイレイタンスが発現していることが確認できる。

4. まとめ

本稿ではDEMを用いた低拘束圧下の定圧一面せん断試験の再現解析とひずみの可視化を行った。せん断応力の発現や正のダイレイタンス特性について再現できたが、粒子数が小さく、粒子の局所的な配置状況の違いが結果に影響した。アルミ棒積層体地盤における一面せん断試験の実験、寸法を大きくした場合の再解析を実施し、実験との比較や寸法の影響を受けない条件での考察を行いたい。

<参考文献>

- 1) 大竹浩太, 赤木寛一, 桐山貴俊, 拡底杭引抜き時における低拘束圧地盤の変形挙動—PIVによる杭周辺地盤の画像解析—, 第55回地盤工学研究発表, 2020.
- 2) 野々山栄人ら, 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, 中部地盤工学シンポジウム論文集, 21st, 25-30, 2009.

表3 体積ひずみの可視化

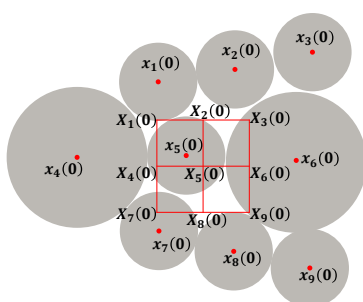
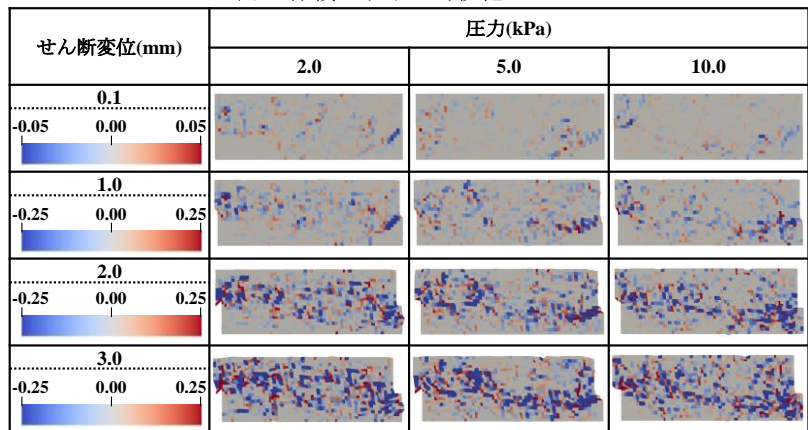


図4 粒子とメッシュの配置(時刻0)

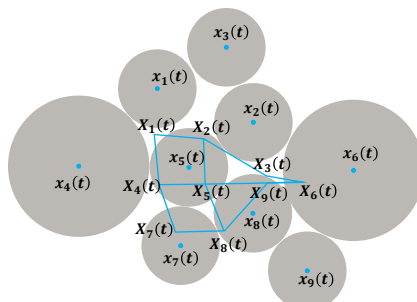


図5 粒子とメッシュの配置(時刻t)

表4 時刻0における各格子点と最近傍粒子の対応

格子点j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
粒子i	1	5	2	5	5	6	7	7	8

表5 時刻tの各格子点の位置ベクトル算出

格子点	計算式
$\mathbf{X}_1(t)$	$= \mathbf{X}_1(0) + \mathbf{u}_1(t)$
$\mathbf{X}_2(t)$	$= \mathbf{X}_2(0) + \mathbf{u}_5(t)$
$\mathbf{X}_3(t)$	$= \mathbf{X}_3(0) + \mathbf{u}_2(t)$
$\mathbf{X}_4(t)$	$= \mathbf{X}_4(0) + \mathbf{u}_5(t)$
$\mathbf{X}_5(t)$	$= \mathbf{X}_5(0) + \mathbf{u}_5(t)$
$\mathbf{X}_6(t)$	$= \mathbf{X}_6(0) + \mathbf{u}_6(t)$
$\mathbf{X}_7(t)$	$= \mathbf{X}_7(0) + \mathbf{u}_7(t)$
$\mathbf{X}_8(t)$	$= \mathbf{X}_8(0) + \mathbf{u}_7(t)$
$\mathbf{X}_9(t)$	$= \mathbf{X}_9(0) + \mathbf{u}_8(t)$

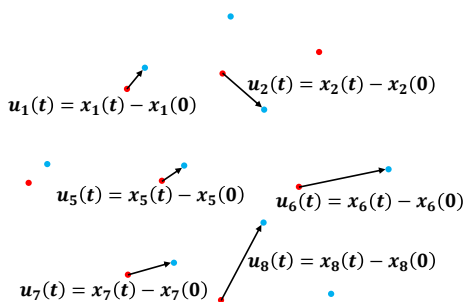


図6 粒子の変位ベクトル $\mathbf{u}_i(t)$ の算出

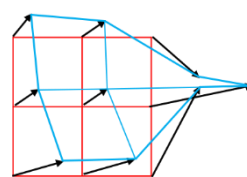


図7 メッシュの変形前後の様子