

個別要素法を用いた砂地盤の圧縮破壊試験シミュレーション

吉田, 長行 / YOSHIDA, Nagayuki / MARU, Yuya / 丸, 裕也

(出版者 / Publisher)

法政大学情報メディア教育研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学情報メディア教育研究センター研究報告

(巻 / Volume)

34

(開始ページ / Start Page)

22

(終了ページ / End Page)

26

(発行年 / Year)

2019-07-18

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00022799>

個別要素法を用いた砂地盤の圧縮破壊試験シミュレーション

Simulation for Compression Test of Sand by Distinct Element Method

丸 裕也¹⁾ 吉田 長行²⁾

Yuya Maru and Nagayuki Yoshida

¹⁾ 法政大学大学院デザイン工学研究科建築学専攻

²⁾ 法政大学デザイン工学部建築学科

The purpose of this study is to simulate the direct shear test using the Distinct Element Method (DEM), and to investigate the characteristics of DEM. We performed the shear tests based on two conversion methods for the tangential force in contact, which is evaluated by the tangential distance between two particles or the tangential spring constant. The angle of shear resistance is obtained by use of these two methods, and numerical results are compared and examined.

Keywords : DEM, Direct shear test, Tangential force

1. はじめに

不連続体を扱う手法の一つとして、P. A. Cundall [1, 2] が提唱した個別要素法 (Distinct Element Method : 以降 DEM と略称する) が挙げられる。この手法の特徴は粒状体の個々の粒子に働くミクロな力の相互作用を考慮することで材料のマクロな力学挙動を再現できることにあり、連続体力学とは物の枠組みとなる手法である。この手法を用いれば、本来大がかりな機材や時間を有する土質試験をコンピュータ上でシミュレーションすることが可能である。また、その際に粒状体に生じる進行性破壊、ダイレイタンシー現象、せん断帯形成過程の視覚的な追跡が容易に行える。

本研究では、DEMにおける接線方向力の算定を従来のばねにより評価する方法と新たに距離により評価する方法 (以降ばね換算法、距離換算法と略称する) を用いてせん断試験シミュレーションを行い比較検討することで DEM の特性を抽出し、その有効性を検討する。

2. 解析手法

2.1 DEM

DEM の計算手法は伯野の文献 [5] および文献 [6] に詳しい。

本研究を行う上で、局所座標系として図 1 に示すように粒子 i と接触粒子 j の中心座標を結ぶ線を i から j に向かう外向き法線方向を \boldsymbol{n} とする。この方向から反時計回りの直角方向を接線方向 \boldsymbol{s} とする。また、粒子の回転角 θ は反時計回りを正とする。

2.2 接線方向の評価方法

2.2.1 ばね換算法

従来のばね換算法では接線方向相対変位増分 $\Delta \delta_s = \dot{\delta}_s \Delta t$ に応じた接線方向力として評価する。

$|f_{ji}^s| \leq C + \mu(-f_{ji}^n)$ の場合 :

$$\begin{aligned} f_{ji}^s &= k_s \dot{\delta}_s \Delta t \sqrt{|\dot{\delta}_s \Delta t|} + c_s \dot{\delta}_s, \\ T_{ji} &= f_{ji}^s a_i. \end{aligned} \quad (1)$$

$|f_{ji}^s| > C + \mu(-f_{ji}^n)$ の場合 :

$$\begin{aligned} f_{ji}^s &= \text{sgn}(\dot{\delta}_s) (C + \mu(-f_{ji}^n)), \\ T_{ji} &= f_{ji}^s a_i. \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、式(1)と式(2)の条件分岐はクーロンのせん断強度式に基づく。 C は粘着力と接触面積の積であるが、本論では与えていない。

2.2.2 距離換算法

粒子 j の粒子 i に対する相対並進と相対回転に伴う接触面上における移動量 $\dot{\delta}_t \Delta t$ 、 $\dot{\delta}_\theta \Delta t$ から接線方向力を評価する。移動量 $\dot{\delta}_t \Delta t$ が実現するための接線方向力はNewtonの第2法則により下式を満足する。

$$\text{並進量} = \frac{1}{2}(\text{力}/\text{質量})(\Delta t)^2$$

これにより接線方向力は以下のように得られる。

$$\dot{\delta}_t \Delta t = \frac{1}{2} \left(\frac{f_{ji}^t}{m_j} \right) (\Delta t)^2 \quad \rightarrow \quad f_{ji}^t = \frac{2m_j \dot{\delta}_t}{\Delta t} \quad (3)$$

さらに、同じ Δt 間において粒子 j が粒子 i の球面上を相対回転することによって $\dot{\delta}_\theta \Delta t$ だけ並進する。これを実現するために作用させるトルクはNewtonの第2法則より下式を満足する。

$$\text{回転量} = \frac{1}{2}(\text{トルク}/\text{慣性モーメント})(\Delta t)^2$$

これよりトルクは以下のように得られる。

$$\Delta \theta = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{ji}}{I_j} \right) (\Delta t)^2 = \frac{\dot{\delta}_\theta \Delta t}{a_j} \quad \rightarrow \quad T_{ji} = \frac{2I_j \dot{\delta}_\theta}{a_j \Delta t} \quad (4)$$

このトルクを生み出す接触面上の接線方向力は、

$$f_{ji}^o = -\frac{2I_j \dot{\delta}_\theta}{a_j^2 \Delta t} \quad (5)$$

この二つの接線方向力の和を

$$f_{ji}^t + f_{ji}^o = \frac{2m_j \dot{\delta}_t}{\Delta t} - \frac{2I_j \dot{\delta}_\theta}{a_j^2 \Delta t} = \frac{2}{\Delta t} \left(m_j \dot{\delta}_t - \frac{I_j}{a_j^2} \dot{\delta}_\theta \right) \quad (6)$$

に減衰力を含めた量を

$$f_{ji}^s = \frac{2}{\Delta t} \left(m_j \dot{\delta}_t - \frac{I_j}{a_j^2} \dot{\delta}_\theta \right) + c_s (\dot{\delta}_t + \dot{\delta}_\theta) \quad (7)$$

接線方向力とする。

以下では、接線方向力の使い分けを示す。

$|f_{ji}^s| \leq C + \mu(-f_{ji}^n)$ の場合：

$$f_{ji}^s = \frac{2}{\Delta t} \left(m_j \dot{\delta}_t - \frac{I_j}{a_j^2} \dot{\delta}_\theta \right) + c_s (\dot{\delta}_t + \dot{\delta}_\theta), \quad (8)$$

$$T_{ji} = f_{ji}^s a_i.$$

$|f_{ji}^s| > C + \mu(-f_{ji}^n)$ の場合：

$$f_{ji}^s = \text{sgn}(\dot{\delta}_s) (C + \mu(-f_{ji}^n)), \quad (9)$$

$$T_{ji} = f_{ji}^s a_i.$$

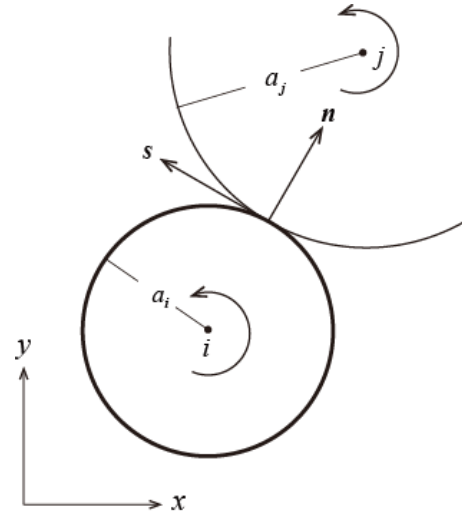


図1 局所座標系

Figure 1 Local coordinates system

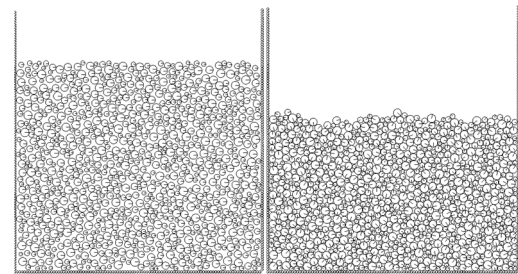


図2 充填

Figure 2 Packing

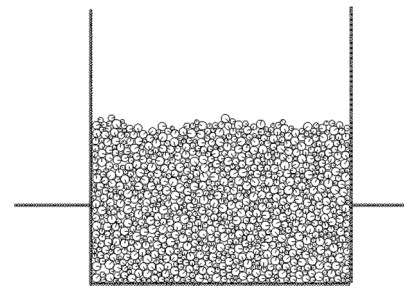


図3 締めめ

Figure 3 Compaction

2.3 モデル作成

初期配置を作成するために一時的に設置した箱にランダムで発生させた粒子を自然落下により充填する。その様子を図2に示す。充填完了後に供試体粒子上部を一体の板と設定しせん断箱を設定し、垂直力による締めめを行い、安定状態に移行するまで時間を置く。その様子を図3に示す。安定状態に達した後、せん断を行う。その様子を図4に示す。

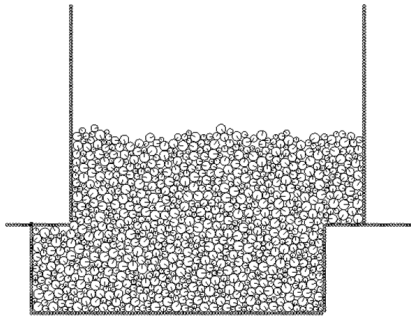


図4 せん断
Figure 4 shear

表1 物性値

Table 1 Analytical data

法線バネ定数	$k_n = 1.0 \times 10^6 [N/cm]$
接線バネ定数	$k_s = 2.5 \times 10^5 [N/cm]$
内部摩擦角	$\phi_i = 27[\text{deg}]$
静止摩擦力	$\mu = 0.51[-]$
粒子密度	$\rho = 2.65 \times 10^{-3} [kg/cm^3]$
減衰定数 (落下時)	$h_n, h_s = 1.0[-]$
減衰定数	$h_n, h_s = 0.215[-]$
時間増分	$\Delta t = 1.0 \times 10^{-6} [\text{sec}]$
せん断速度	$V_x = 1.0 [mm/sec]$

表2 解析条件

Table 2 Analytical condition

	解析条件			
	粒径 [cm]	粒子数 [個]	深さ [cm]	底面幅 [cm]
せん断試験	0.2~	1500,	10	20
	0.4	2000		

2.4 解析内容

本解析に用いたパラメータを表1、解析条件を表2に示す。

ここで、せん断応力の評価はせん断箱に作用する水平方向の力の総和をせん断箱の幅で除したものとし、これにより描いたせん断応力図の結果から、せん断応力 τ の最大値、せん断強度 τ_f を求め、次式からせん断抵抗角 ϕ を決定する。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (10)$$

ここで、 c は粘着力、 σ は拘束圧である。

3. 解析結果

3.1 せん断応力 - 水平変位関係

表2の条件で解析を行い、せん断抵抗角を算出する。鉛直荷重 100 [kPa]、200 [kPa]、300 [kPa]、400 [kPa] をかけてせん断試験を行った。

以下に解析結果を掲載する。図5～図8は粒子数を1500個、赤線はばね換算法、青線は距離換算法による結果である。

また、図9～図12は、粒子数を2000個、赤線はばね換算法、青線は距離換算法による結果を示したものである。

3.2 せん断強度・せん断抵抗角

せん断応力図から各拘束圧ごとにピーク値をプロットし、垂直応力-せん断応力関係の図からせん断抵抗角を算出する。図13、図14の赤線はばね換算法、青線を距離換算法による結果である。

2つの換算法によるせん断抵抗角を、粒子数1500 [個] の場合を表3、粒子数2000 [個] の場合表4に示す。

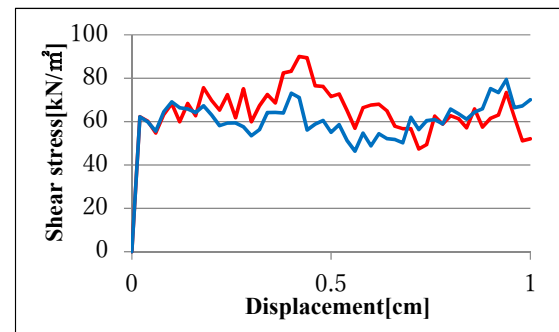


図5 鉛直荷重 100 [kPa]

Figure 5 Vertical load 100 [kPa]

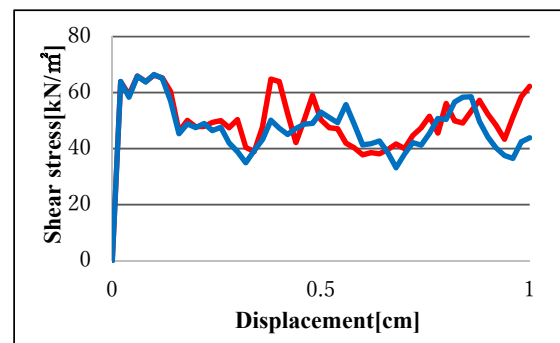


図6 鉛直荷重 200 [kPa]

Figure 6 Vertical load 200 [kPa]

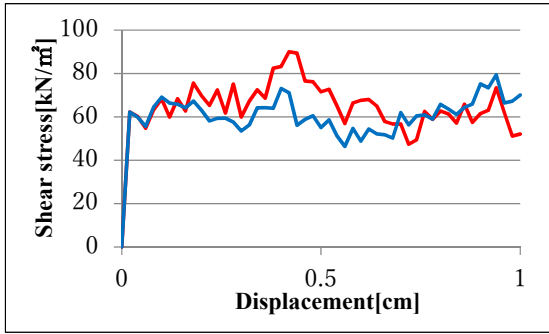


図 7 鉛直荷重 300 [kPa]
Figure 7 Vertical load 300 [kPa]

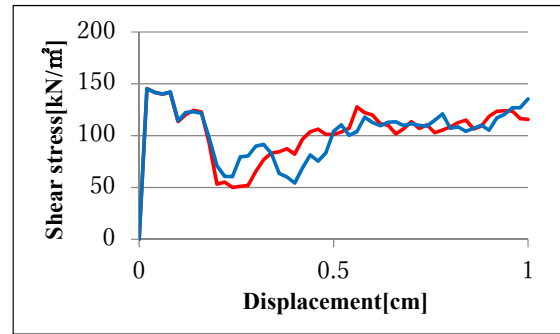


図 11 鉛直荷重 300 [kPa]
Figure 11 Vertical load 300 [kPa]

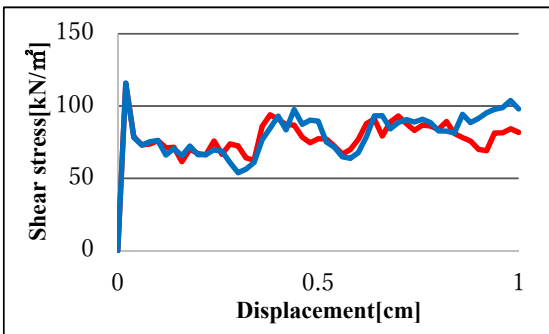


図 8 鉛直荷重 400 [kPa]
Figure 8 Vertical load 400 [kPa]

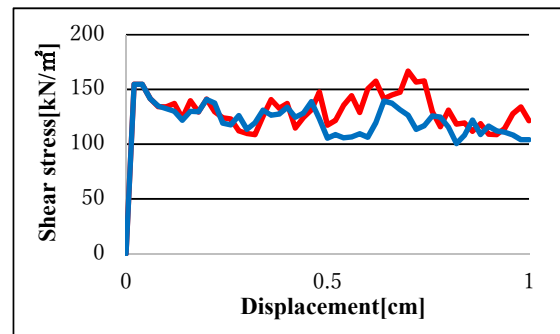


図 12 鉛直荷重 400 [kPa]
Figure 12 Vertical load 400 [kPa]

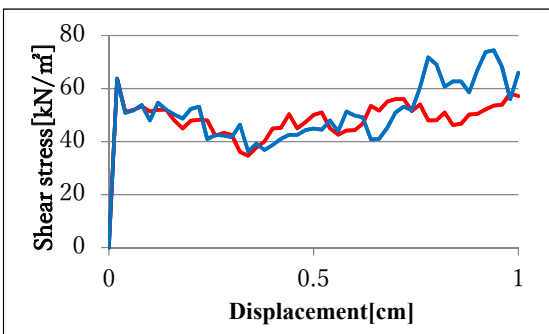


図 9 鉛直荷重 100 [kPa]
Figure 9 Vertical load 100 [kPa]

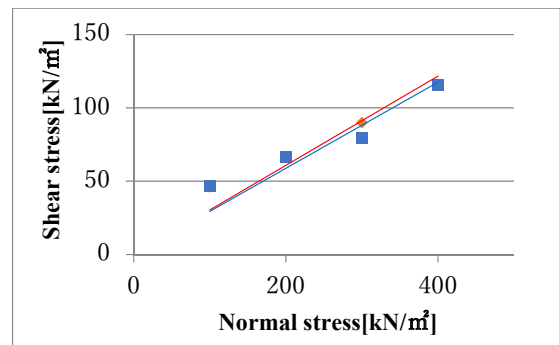


図 13 せん断抵抗角 粒子数 1500 [個]
Figure 13 Angle of shear resistance and Number of particles 1500 pieces

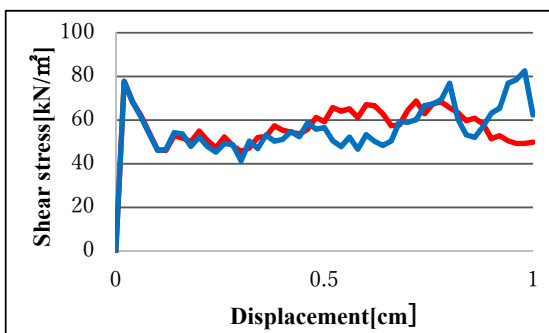


図 10 鉛直荷重 200 [kPa]
Figure 10 Vertical load 200 [kPa]

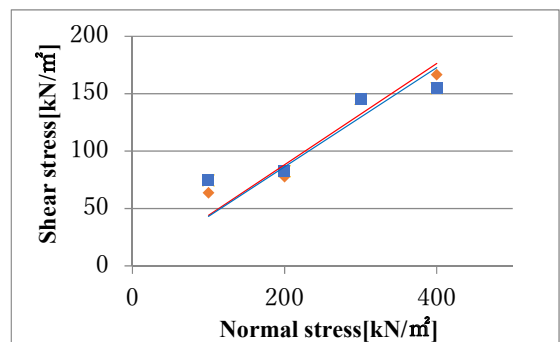


図 14 せん断抵抗角 粒子数 2000 [個]
Figure 14 Angle of shear resistance and Number of particles 2000 pieces

表3 せん断抵抗角 粒子数1500 [個]
Table 3 Angle of shear resistance and
Number of particles 1500 pieces

		せん断強度[kN/m ²]	
		spring	distance
垂直 応力	100[kPa]	46.2	47
	200[kPa]	66.2	66.4
	300[kPa]	90	79.4
	400[kPa]	116	115.9
せん断抵抗角[deg]		16.7	16.2

表4 せん断抵抗角 粒子数2000 [個]
Table 4 Angle of shear resistance and
Number of particles 2000 pieces

		せん断強度[kN/m ²]	
		spring	distance
垂直 応力	100[kPa]	63.8	74.4
	200[kPa]	77.8	82.5
	300[kPa]	145.4	145.4
	400[kPa]	166.7	154.8
せん断抵抗角[deg]		23.3	23.7

4. 考察・結論

本解析では、二つの接線方向力の換算法を用いて一面せん断試験の数値シミュレーションを行い、せん断抵抗角の算定とその比較検討を行った。せん断抵抗角は換算法別でほとんど差は見られない。このことは、法線方向力がクーロン線を越えない範囲では、粒子間に滑動が発生しにくいこと、言い換えれば粒子接触面で接線方向の相対変位がほとんど生じないことを示している。

なお、距離換算法では、ばね換算法に比べ評価式が増えるため解析時間が伸びる。

換算法によらず出力結果である砂地盤のせん断抵抗角は、入力データである粒子間の内部摩擦角を下回るが、粒子数の増加と共に漸近する傾向にある。採用した粒子個数では両者の数値にやや差はあるが、この傾向は解析法の有効性を示している。

以上から、本論ではDEMにおける接線方向接触力の異なる換算法を提案し、これを用いたせん断シミュレーションによってDEMの特性把握とその有効性を確認した。

参考文献

- [1] P. A. Cundall, "A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock system", ISRM, Nancy, France. Proc., 1971.
- [2] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies" Géotechnique, 1979.
- [3] 林貞夫, "建築 基礎構造", 共立出版, 2002.
- [4] 板谷知洋, 大西泰史, 吉田長行, "個別要素法による粒状体群のせん断シミュレーションにおける摩擦処理", 法政大学情報メディア教育センター研究報告, Vol.29, 2015.
- [5] 伯野元彦, "「破壊のシミュレーション」—拡張個別要素法で破壊を負う—", 森北出版, 1997.
- [6] 粉体工学会編, "粉体シミュレーション入門—コンピュータで粉体技術を創造する—", 産業図書, 1998.