法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-12-27

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 現できるところにあり、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上 をiからjに向かう外向き法線方向を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。

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

$$f_{ji}^{s} = k_{s} \dot{\delta}_{s} \Delta t \sqrt{|\dot{\delta}_{s} \Delta t|} + c_{s} \dot{\delta}_{s},$$

$$T_{ji} = f_{ji}^{s} a_{i}.$$

$$(1)$$

Copyright © 2019 Hosei University

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 $\delta_i \Delta t$ 、 $\delta_0 \Delta t$ から接線方向力を評価する。移動量 $\delta_i \Delta t$ 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。

並進量 =
$$\frac{1}{2}$$
(力/質量)(Δt)²

これにより接線方向力は以下のように得られる。

$$\dot{\delta}_t \Delta t = \frac{1}{2} \left(\frac{f_{ji}}{m_j} \right) (\Delta t)^2 \longrightarrow f_{ji}^t = \frac{2m_j \dot{\delta}_t}{\Delta t}$$
(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 $\delta_{\theta}\Delta t$ 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。

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

これよりトルクは以下のように得られる。

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

このトルクを生み出す接触面上の接線方向力は、

$$f_{ji}^{\theta} = -\frac{2I_j \delta_{\theta}}{a_j^2 \Delta t} \tag{5}$$

この二つの接線方向力の和を

$$f_{ji}^{t} + f_{ji}^{\theta} = \frac{2m_{j}\dot{\delta}_{t}}{\Delta t} - \frac{2I_{j}\dot{\delta}_{\theta}}{a_{j}^{2}\Delta t} = \frac{2}{\Delta t} \left(m_{j}\dot{\delta}_{t} - \frac{I_{j}}{a_{j}^{2}}\dot{\delta}_{\theta} \right)$$
(6)

に減衰力を含めた量を

$$f_{ji}^{s} = \frac{2}{\Delta t} \left(m_{j} \dot{\delta}_{t} - \frac{I_{j}}{a_{j}^{2}} \dot{\delta}_{\theta} \right) + c_{s} (\dot{\delta}_{t} + \dot{\delta}_{\theta})$$
(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。 $|f_{ii}^{s}| \leq C + \mu(-f_{ii}^{n})$ の場合:

$$f_{ji}^{s} = \frac{2}{\Delta t} \left(m_{j} \dot{\delta}_{t} - \frac{I_{j}}{a_{j}^{2}} \dot{\delta}_{\theta} \right) + c_{s} (\dot{\delta}_{t} + \dot{\delta}_{\theta}),$$

$$T_{ji} = f_{ji}^{s} a_{i}.$$
(8)

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

$$f_{ji}^{s} = \operatorname{sgn}(\dot{\delta}_{s}) (C + \mu(-f_{ji}^{n})),$$

$$T_{ji} = f_{ji}^{s} a_{i}.$$
(9)



図3 締固め 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 力による締固めを行い、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。



Figure 4 shear

表1 物性值 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	$\phi_{\mu} = 27[\text{deg}]$
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	粒子数	深さ	底面幅
	[cm]	[個]	[cm]	[cm]
ナンド学校	0.2~	1500,	10	20
セん町武映	0.4	2000	10	20

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 ん断応力での最大値、せん断強度でを求め、次式から せん断抵抗角φを決定する。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \tag{10}$$

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の赤線はバネ換 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]



Figure 6 Vertical load 200 [kPa]







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



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



Figure 10 Vertical load 200 [kPa]

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

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

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

- 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.