

骨格粒子モデルの動的追跡法 - 多様な要素形状による比較 -

Dynamic Analysis of Particle Models -A study on Particle Configurations-

松苗 尚人¹⁾ 神崎 壮一郎²⁾ 吉田 長行²⁾

Naoto Matsunae, Soichiro Kanzaki, 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

In this research, we simulate the dynamic behavior of soil by the discrete element method. The circular element is usually used because the computing time is economical for its simple procedure on the contact problem. On this paper, there are four main suggestions. First of all, we re-consider the analysis of elliptical model and establish its method. Using this method, we build a new program. Based on the numerical results, we propose a new model which consists of pair of circular elements with same size combination which have a similar effect with the elliptical element, in order to improve the computational efficiency. Through this method, we investigate the dynamic behavior and the void ratio of three different types of model. Finally, the relation between void ratios and the number of elements is made clear.

Keywords : D.E.M, elliptical model, circular element, void ratio

1 はじめに

崖崩れや地盤の液化化などは個別要素法によって研究されている。砂などの地盤材料は粒子が集まってできており、従来はこうした地盤を連続体の解析手法で検討してきた。個別要素法は不連続体の解析手法であり、地盤本来の粒子群の動きを直接扱うことができる点で地盤や岩盤崩壊の検討を行なう際に有効である[1]。

個別要素法における問題に、計算時間が挙げられる。従来の研究では、粒子間の接触判定に簡易な円形要素を用いた解析が主流である[2]。しかし、土を構成している粒子は複雑であり、円形[3]や楕円[4]の要素だけでは不十分である。

2 研究目的

本論では、同じ大きさの円要素を粘性結合させたものを「近似楕円要素」、大きさの異なる円要素 2

つを粘性結合させたものを「粘性結合円要素」と称する。これに「円要素」を加えた3種の要素を用いた地盤モデルに様々な振動外力を与え、形状の変化による粒子の挙動を解析結果より比較し考察する。

3 個別要素法の基本式

個別要素法 (Distinct Element Method) は Cundall によって提案された手法である。DEM では各要素を剛体と考える。各要素に作用する合力 \mathbf{F} から「Newton の運動の第二法則」($\mathbf{F} = m\ddot{\mathbf{u}}$) に基づいて要素の加速度 $\ddot{\mathbf{u}}$ 、速度、変位を求め、要素の移動後の位置関係から接触関係を調べ、接触に関する情報が更新される。続いて、要素間の相対変位から接触点の変位と接触力が算出される。その合力と合モーメントから、再び各要素の運動は質点の運動として計算される。各要素の運動方程式は次のように表される。

$$m_i \ddot{\mathbf{u}}_i = \sum_{j \neq i} \mathbf{F}_{ij} \quad (3.1.a)$$

$$I_i \ddot{\phi}_i = \sum_{j \neq i} \mathbf{M}_{ij} \quad (3.1.b)$$

ここで

- m : 要素*i*の質量
- I : 要素*i*の慣性モーメント
- $\ddot{\mathbf{u}}$: 要素*i*の並進変位ベクトル
- $\ddot{\phi}$: 回転角加速度
- \mathbf{F}_{ij} : 要素間の接触力ベクトル
- \mathbf{M}_{ij} : 接触力によるモーメントベクトル

上式を時間刻み Δt で差分近似することで要素の運動軌跡が算出される。接触力の計算方法、ばね定数、粘性定数、減衰定数の決定法などは文献[1], [3], [4]に譲る。

4 要素間の接触メカニズム

粒子群は近接粒子と衝突や摩擦を繰り返しながら運動している。粒子の接触は弾性的であったり、非弾性的であったりする。DEM では粒子を剛体要素とするかわりに、接触点間に弾性・非弾性、減衰、摩擦などの接触特性を表現するメカニズムを導入することで、不連続体のミクロレベルにおける構成則を記述する。接触メカニズムは接触面の法線方向と接線方向にそれぞれ配置される。ただし、摩擦特性はせん断方向にのみ与える。また、法線方向では引張力を伝達しないようノン・テンション・バインダーとする。以上から、要素間に挿入する接触メカニズムは Fig.1 のようになる。

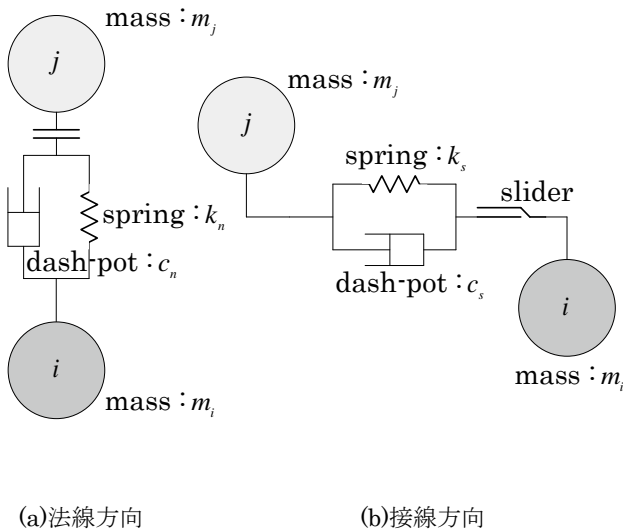


Fig.1 接触メカニズム

円要素における接触判定は次式により行われる。

$$\delta_{ij} = (r_i + r_j) - o_i o_j \geq 0 \quad (4.1.1)$$

ここで

- δ_{ij} : 相対変位量
- r_i : 要素*i*の半径
- r_j : 要素*j*の半径
- $o_i o_j$: 要素*i, j*の中心点間距離

要素間の相対変位増分と要素に作用する力の総和に関する計算法は文献[1], [3], [4]に譲る。

5 近似楕円要素と粘性結合円要素

多様な要素形状を円要素で表現するために、円要素を結合させる手段として、粘性結合を用いる。近似楕円要素と粘性結合円要素は円要素が常時接触状態にあり、ダッシュポットを介して粘性力により結合している。二つの要素の違いは Fig. 2 に示すように、前者では同一円の結合、後者では異なる大きさの円の結合である。粘性結合円要素の詳細は参考文献[9]に譲る。

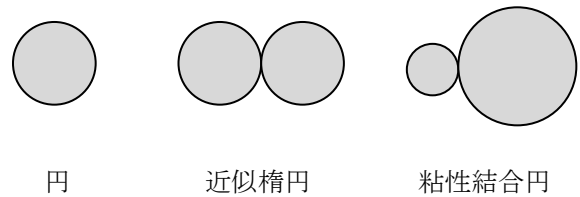


Fig.2 モデル形状

6 解析結果

6.1 間隙比

解析は要素のサイズを指定範囲内でランダムに定め、要素数は Fig. 3 に示した 3 種とも 3000 個とした。要素の充填には、要素を容器内に均等配置した後、自然落下させる落下法[1]を用いた。円要素における初期の均等配置と充填後の一例を Fig. 5 に示す。充填後の容器に与える水平方向の振動加速度を調和波とする。その振幅を 400gal, 800gal, 1200gal の 3 種、周波数を 1Hz, 2Hz, 10 Hz の 3 種とした。以上により合計 27 個の解析結果を採取した。解析に用いた物性値ならびに計算条件を Table 1 に示す。

ここで、間隙比 e は式(6.1.1)を用いて算出する。

$$e = V_v / V_s \quad (6.1.1)$$

$$V_v : \text{空隙面積} [cm^2] \quad V_s : \text{全要素面積} [cm^2]$$

計算の結果、間隙比 e は Table 2 のようになった。Fig.4 は Table 2 の間隙比 e をグラフで表したものである。なお、Table 2 の解析結果は周波数が 10Hz の場合のものである。

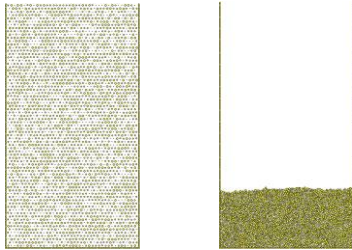


Fig.3 円要素の充填

Table 1 解析モデルに用いたデータ

ポアソン比	0.3	[-]
摩擦係数	0.252	[-]
摩擦係数	0.505	[-]
せん断波速度	1.5×10^4	[cm/sec]
減衰定数	0.215	[-]
要素面積	0.5~3.0	[cm ²]
要素密度	2.48×10^{-3}	[kg/cm ³]
時間刻み	1.0×10^{-6}	[sec]
要素数	3000	[-]

Table 2 解析結果

		落下	400gal	800gal	1200gal
円	間隙比[-]	0.234	0.209	0.199	0.196
	変化率[%]	/	10.589	15.222	16.220
近似楕円	間隙比[-]	0.247	0.215	0.202	0.210
	変化率[%]	/	13.200	18.422	15.165
粘性結合円	間隙比[-]	0.228	0.204	0.202	0.204
	変化率[%]	/	10.652	11.598	10.843

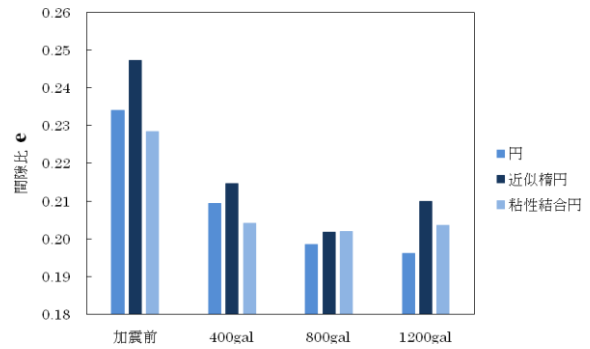


Fig 4 間隙比 e の比較

以上の結果から、次のことが言える。

<円要素>

充填直後、及びどの入力加速度に対しても円要素の間隙比 e が最も低い。

<近似楕円要素>

加振前の状態では、間隙比 e が他の要素と比較して大きく、加振後の変化も 800gal レベルまでは大きい。すなわち、他の形状よりも自然落下後の空隙量は多い（充填率が低い）が、逆に加振により締め固まる余地も大きいと言える。一方、1200gal の大加速度入力を受けると、要素が離散して跳ね上がるため、自然落下状態が部分的に発生する。これにより、他の要素と比べて間隙比 e は高めとなる。

<粘性結合円要素>

形状がシンプルな他の要素よりも複雑な形状でありながら、充填直後と低加速度入力では最も低い間隙比を示した。

以上から、円要素を 2 つ結合させた二つの要素を比較すると、より複雑な形状の粘性結合円要素の方がより締め固まる傾向にある。一方、要素形状が最もシンプルな円では、加振振幅に比例して一様な空隙比の減少（締め固り度合いの増大）が見られる。

5.2 要素形状による軌跡の比較

Fig. 5~7 は振幅 400gal、周波数 10Hz の水平振動加速度を容器に与えた際に、注目した要素の軌跡を示したものである。各図の 9 組は、注目した要素の大まかな位置に対応している。

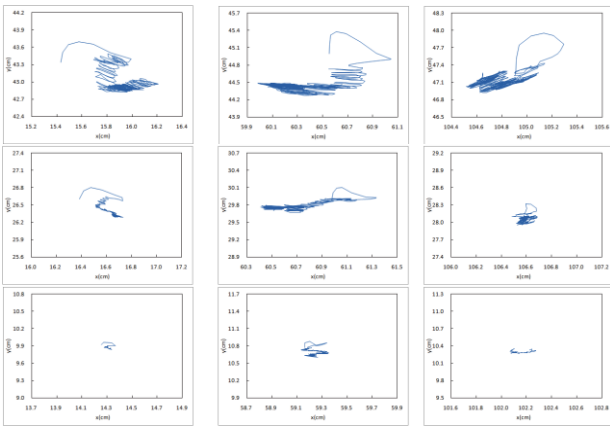


Fig.5 円要素

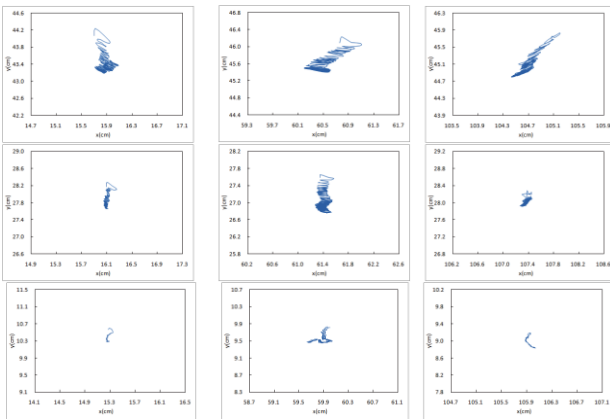


Fig.6 近似楕円要素

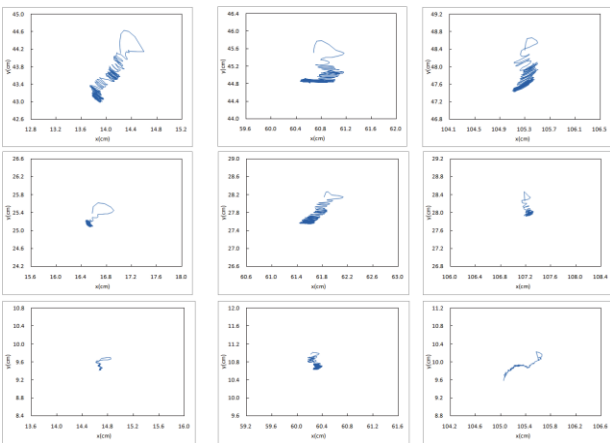


Fig.7 粘性結合円要素

結果から円要素では、水平方向への挙動が大きく、その他の要素では垂直方向への挙動が大きいことがわかる。複雑な形状の要素では乗り上げに伴う垂直方向への変位が大きくなると考えられる。

6.3 要素数による比較

振幅 400gal, 振動数 10Hz において要素数を増やして同じ解析を行い、要素数による間隙比の変化を比較する。結果を Fig.8 に示す。

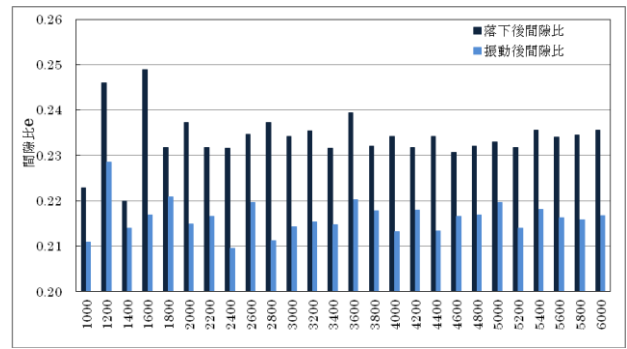


Fig.8 要素数の違いによる間隙比eの変化

本論で採用した容器形状では、要素数が 3000 個以上では、間隙比 e が落下後で $0.23 \leq e \leq 0.24$ 、加振後で $0.21 \leq e \leq 0.22$ の間に収まるようになることが Fig.11 から分かる。この調査は本論で採用した要素数に根拠を与えるものでもある。

7 結論

本論では、円要素、近似楕円要素、粘性結合円要素の 3 種のモデルを用い、2 次元 DEM シミュレーションにより要素形状の違いによる間隙比 e 、要素の軌跡に関する比較、要素数による間隙比 e の変化を調査した結果、以下の知見を得た。

- 1) 円要素を 2 つ結合させた要素を比較すると、より複雑な形状の粘性結合円要素の方がより締め固まる傾向にある。一方、要素形状が最もシンプルな円では、加振振幅に比例して空隙比の減少が見られ、大振幅入力では最も締め固まる。
- 2) 加振時における要素の軌跡に関し、円要素では水平方向の変位が、他の結合要素では垂直方向の変位が大きい。要素形状の扁平化により垂直方向への変位が大きくなったと考えられる。
- 3) 要素数が一定値以上になると外乱後の間隙比 e はある範囲内に収まる。

今後は、結合方法の改良及び結合円の数に関する調査が課題である。また、文献[6], [7]の楕円要素の結果を正解として、近似楕円要素の精度と計算時間について検討する必要がある。

参考文献

- [1] 伯野元彦:破壊のシミュレーション, 森北出版, 1997.
- [2] 澤田純男, 岩崎好規, プラダンテージ B.S.: 楕円要素を用いた個別要素法による砂のせん断挙動の解析, 第26回土質工学研究発表会, 1991.
- [3] 木村英朗, 藤村尚: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文報告集, 第333号, 1983.
- [4] 下山千里, 宮崎明日佳, 吉田長行: 骨格粒子モデルの動的追跡法, 法政大学情報メディア教育研究センター研究報告, Vol.21, 2008.
- [5] 粉体工学会: 粉体シミュレーション入門, 産業図書, 1998.
- [6] Kao-Shing Hwang, Ming-Dar Tsai: On-Line Collision-Avoidance Trajectory Planning of Two Planer Robots Based on Geometric Modeling, Journal of Information Science Engineering, Vol.15, 1999.
- [7] 宮田正史, Graham G. W. Mustoe, Masami Nakagawa, 菅野高弘: 個別要素法による粒状体の荷重支持機構に関する研究, 国総研資料, 第33号, 2002.
- [8] 土質工学会: 地盤の破壊とひずみの局所化, 土質工学会, pp.258-269, 1994.
- [9] 助川智洋, 松苗尚人, 吉田長行: 骨格粒子モデルの動的追跡法, 法政大学情報メディア教育研究センター研究報告, Vol.23, 2010.