

粒子破碎による時間依存挙動のDEM解析

西松建設（株） 正会員 武井 正孝
東京工業大学 正会員 日下部 治

1. はじめに

著者らは、地盤材料の粒子破碎による時間依存挙動について、主として室内模型実験を通して、その進行機構を考察し、図1に示すような連鎖的挙動により進展していくことを実証してきた¹⁾。また、このような挙動を数値的に再現することを目的として、破碎性土粒子のモデル化方法および解析方法についても検討を行っている。本報では、モデル化方法を提案し、そのモデルを組み込んだ個別要素法（DEM）による室内模型実験の解析の、初期的な検討結果を報告する。

2. 解析対象およびモデル化の方法

解析対象としたのは、著者ら¹⁾が行ったチョーク棒（白墨）を積層して作成した供試体の一次元圧縮試験である。この実験は、チョーク棒を模型破碎性粒子とし、これを鋼製容器内に2次元的に積層して供試体を作成することにより、破碎現象の可視化を図った上で行われた。実験の詳細は文献1)を参照されたい。また、チョーク棒単体の破碎試験（単粒子破碎試験）も併せて行い、破碎強さと剛性について、表1に示す統計量を得ている。解析モデルを図2に示す。破碎性粒子（チョーク棒）は、剛体微粒子（2次元剛体円板）の集合体としてモデル化される（以下、この集合体を“仮想集合粒子”と呼ぶ）。剛体微粒子同士は、各接触点において、ある結合強さを持って結合している。

今回の解析では、簡単のために剛体微粒子は全て同じ大きさとし、55個の微粒子を六方最密状に配列し、一つの仮想集合粒子を構成した。各微粒子間の接触・結合の構成関係は、図3に示すような線形関係とし、法線方向については、引張側についても圧縮側と同じ接触剛性を持つものとし、予め設定した結合強さに達した時点で、結合が破断するものとした。解析に用いた主なパラメータを表2に示す。微粒子間の結合強さおよび接触剛性は、1個の仮想集合粒子を用いて単粒子破碎試験の解析を試行錯誤し、実験で得られた荷重(F)～変形(w)曲線に近い曲線が得られる値を設定した。ひとつの仮想集合粒子内の結合は、全て同じ結合強さおよび接触剛性を持つものとするが、解析モデル全体を構成する100個の仮想集合粒子の結合強さと接触剛性には、表2に示した値の範囲でばらつきを持たせている。ばらつきは、パソコン上で発生させた擬似正規乱数を利用して与えた。その際、結合強さについては、平均値として試行錯誤の解析から得られた結合強さを、変動係数として表1に示した破碎強さの変動係数を用いた。一方、接触剛性についても同様に、平均値として試行錯誤の解析から得られた接触剛性を、変動係数として表1に示した特性初期剛性の変動係数を、それぞれ用いた。その他のパラメータについては、実験における平均的な値から決定した。微粒子間の摩擦係数については、摩擦角 30° を仮定した。

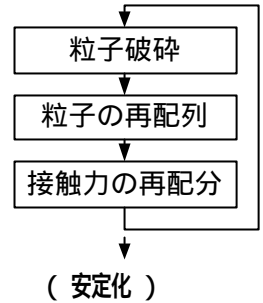


図1 粒子破碎の進行機構

表1 単粒子破碎試験結果

破碎強さ	平均値	0.667 MN/m ²	
$s_c = 2F_c / \pi DL$	変動係数	0.17	
特性初期剛性	平均値	95.8 MN/m ²	
($\sigma \sim \varepsilon$ カーブの初期勾配)	変動係数	0.27	

* $s = 2F / \pi DL$, $e = w / D$

(σ : 特性応力, ε : 特性ひずみ, F : 載荷荷重, D : チョークの初期径(9.5mm) L : チョーク長さ(30mm), w : 載荷板変位)

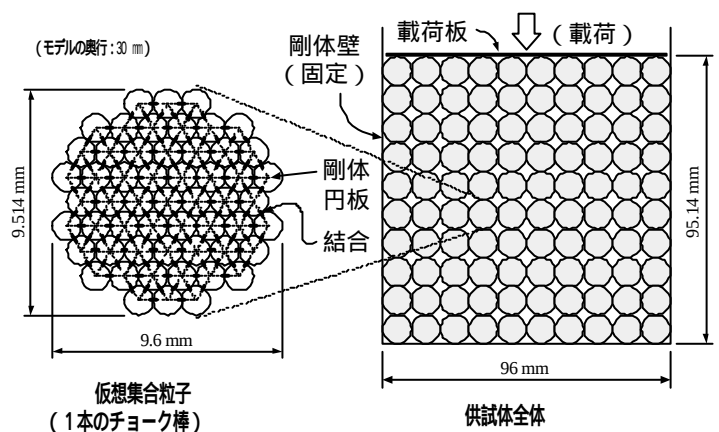


図2 解析モデル

キーワード：粒子破碎，時間依存性，個別要素法，一次元圧縮

〒242-8520 神奈川県大和市下鶴間2570-4 西松建設(株)技術研究所 Tel.046-275-0242 Fax.046-275-6796

3. 解析結果

単粒子破碎試験： 試行錯誤の解析から得られた $F \sim w$ 曲線を、実験の曲線と比較して図4に示す。解析では、荷重はピークに達した後に、急激にゼロまで低下しており、ピーク荷重後の実験の挙動は再現できていない。ピーク荷重直後の仮想集合粒子の状況を図5に示す。荷重がピークを示した直後に仮想集合粒子は、4つの破片に分かれ飛散した。

一次元圧縮試験： 解析モデルへの载荷は、図6に破線で示したような载荷板荷重の制御により行った。解析から得られた载荷板変位（供試体の圧縮量）の経時変化を図6に実線で示す。非常に短時間の間にはあるが、時間の経過とともに供試体の圧縮が進行している様子が再現されている。ある2つの時刻における微粒子間の結合の破断位置の分布図（一部分）を図7に示す。(a)図において、左上と右下の仮想集合粒子が破碎（多数の結合が破断）しており、一方、時間の経過した(b)図の時刻においては、図の中央の仮想集合粒子が破碎している。(b)図での破碎には、(a)図での2つの仮想集合粒子の破碎により、接触力が図の中央の列に集中した影響が寄与しているものと考えられる。このような挙動は、図1で説明した連鎖的挙動に相当する。

4. おわりに

以上の解析から、地盤内の粒子破碎による連鎖的挙動を、DEM解析により再現できる可能性を示すことができたと考えている。今後は、解析結果を、実際の挙動に近付けられるように、モデルの改良および各パラメータの設定方法の検討を行う必要がある。

参考文献： 1) Takei et al. : Soils and Foundations, Vol.41, No.1, pp.97-121, 2001.

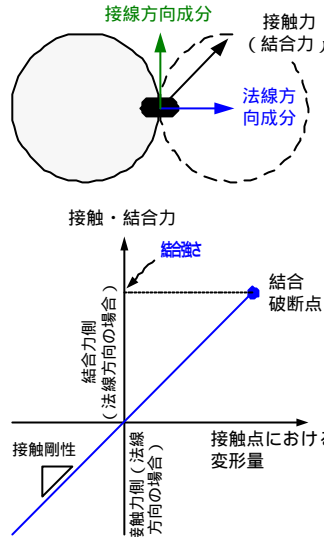


図3 剛体微粒子間の接触構成関係

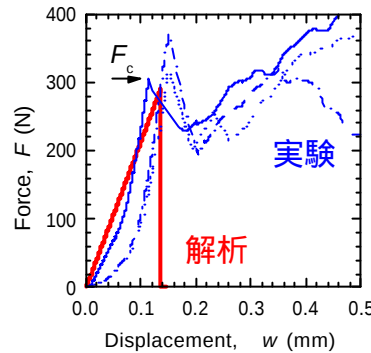


図4 解析結果（単粒子破碎試験）

表2 解析に用いた主なパラメータ

剛体円板	径	0.6 mm
	奥行方向長さ	30 mm
	密度	1630 kg/m ³
	摩擦係数	0.5
	接触剛性	法線方向 2.1×10 ⁶ N/m
		接線方向 2.1×10 ⁶ N/m
剛体壁	結合強さ	法線方向 16.4~35.7 N
		接線方向 16.4~35.7 N
剛体壁	接触剛性	1.0×10 ⁶ N/m
	摩擦係数	0
重力加速度		9.81 m/s ²

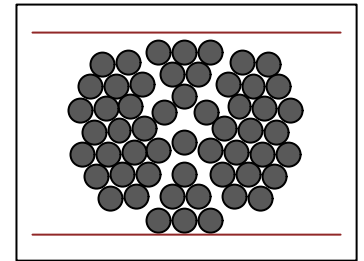


図5 仮想集合粒子の挙動（ピーク荷重直後）

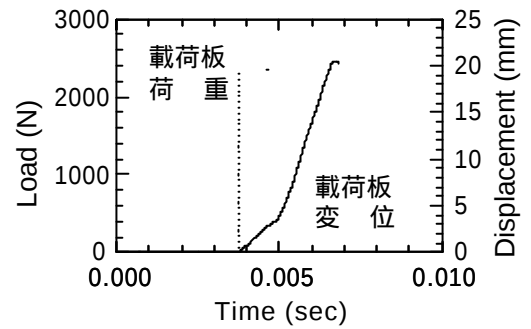
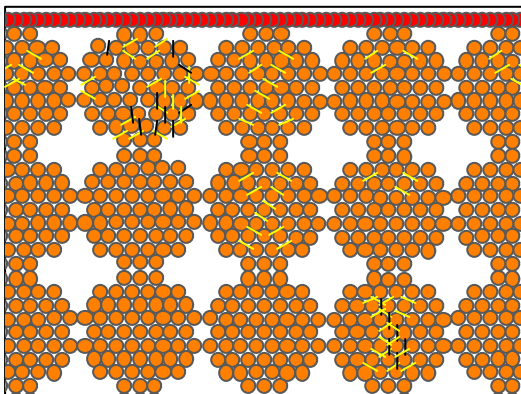
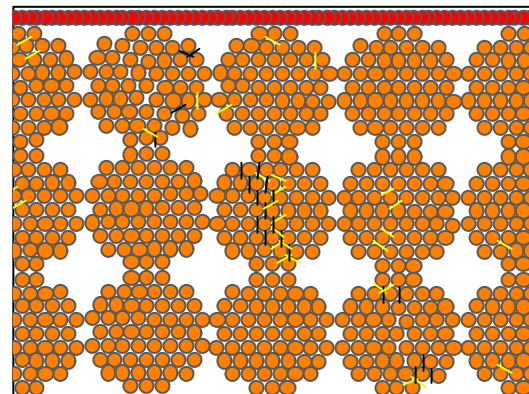


図6 解析結果（一次元圧縮試験）



(a) 時刻：0.00397sec



(b) 時刻：0.00405sec

図7 結合破断位置分布図（解析モデルの右上部分，引張破断箇所を黒の線分で表示）