

圧密履歴を受けた粒状体の個別要素法による弾性エネルギーの評価

東北大学 学生会員 ○森本大志 岡田直仁
東北大学 正会員 柳沢栄司 風間基樹

1. はじめに

近年、液状化問題に対して、室内試験においては繰返し非排水三軸試験における累積損失エネルギーに着目した液状化評価法が提案されている¹⁾。この累積損失エネルギーは、粒状集合体の塑性変形に費やされるエネルギー量を表している。このように、室内要素試験における供試体の内部エネルギーの変化の様子は、マクロな応力-ひずみ関係から論じられている。一方、供試体の構造に着目すると、液状化過程は繰返しせん断によって重力場で蓄積されたエネルギーが開放されることと捉えることができる。したがって、粒状集合体が地震を受ける以前の初期応力状態時に持つポテンシャルエネルギーは、液状化に対する潜在的な強さを表現しているとみなすことができる。本研究では個別要素法(DEM)²⁾を用いて、圧密履歴や種々の応力履歴を受けた粒状集合体のシミュレーションを行ない、集合体のポテンシャルエネルギーの変化について考察する。

2. DEMにおけるエネルギーの定義

DEMでは、各要素を剛体とみなし要素間にVoigtモデルを挿入することで粒子間の相互作用を表現している。そして各要素毎の運動方程式を時間領域で差分近似することで逐次解析を進める。DEMでは、接触面における要素間の相互作用は要素間ばねに支配されており、接触力はすべてこの要素間ばねを介して伝達されている。そこで本研究においては、要素間に生じるポテンシャルエネルギーを要素間ばねに蓄えられる弾性エネルギーとして考え、次のようにエネルギーを定義する。

$$E = E_n + E_s = \frac{1}{2}k_n x^2 + \frac{1}{2}k_s x^2$$

ここに、 k_n 、 k_s ：法線、接線方向ばね定数
 x ：ばねの変位量

3. 解析方法

(1) パラメータの決定

まず解析に必要なばね定数等の諸定数を得るために、標準圧密試験のシミュレーション行ない、実験値と最もよく合う定数を決定した。その結果を図1に、決定したパラメータおよびその他の定数を表1に示す。なお、実験は4.75~2.0mmと2.0~0.85mmに粒度調整した2種類の乾燥まさ土を用いて行なったものである。

(2) 供試体モデル作成

解析における供試体は、高さ2cm、底辺6cmの容器に要素をランダムに発生させ、重力でパッキングした。この時供試体サイズからはみ出した要素は取り除き、上部境界を最上端要素に接触しない位まで下げて初期状態とした。

(3) 载荷条件

境界は上部が定応力境界、その他は固定境界である。圧密試験では過圧密の影響を見るために、上部境界により9.8kPaから196kPaまで载荷し98kPaに除荷するもの(OCR=2.0)と、294kPaまで载荷し98kPaに除荷するもの(OCR=3.0)、また392kPaまで载荷し98kPaに除荷するもの(OCR=4.0)の3パターン行なった。また液状化時の挙動を模擬的に再現するため、荷重98kPaの正規圧密状態、過圧密状態における供試体から定体積のまま重力を開放し、各要素の接線パラメータをゼロにしてせん断力を消失させることで、要素を浮遊状態にした後、再圧密するシミュレーションも合わせて行なった。

キーワード：個別要素法、ポテンシャルエネルギー、液状化抵抗、過圧密比、再圧密

連絡先：宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06・022-217-7438・022-217-7435

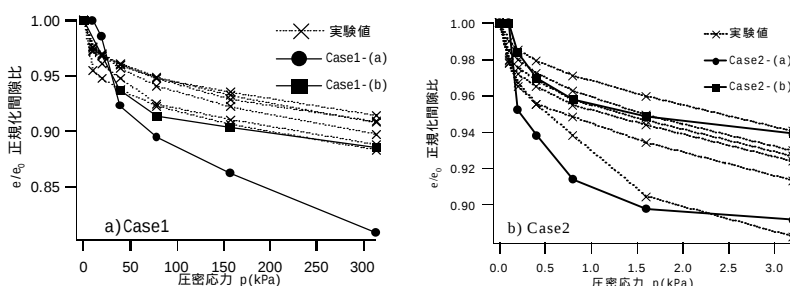


図1 標準圧密試験と解析の比較

表1 決定したパラメータ

	Case1-(b)	Case2-(b)
粒径(mm)	4.75~2.0	2.0~0.85
要素数(個)	109	587
法線方向ばね定数 k_n (N/m)	6.38×10^6	1.14×10^6
接線方向ばね定数 k_s (N/m)	6.38×10^6	1.14×10^6
法線方向減衰定数 η_n (N・sec/m)	9.87×10^1	4.43×10^6
接線方向減衰定数 η_s (N・sec/m)	1.00×10^1	
土粒子密度(g/cm^3)	2.620	2.632
粒子間摩擦角 ϕ (deg)	10	
時間刻み Δt (sec)	5.00×10^{-7}	

4. 結果と考察

今回の解析では、液状化を接線パラメータをゼロにし、重力を開放することで表現した。それにより各要素はせん断抵抗を消失し、定体積にもかかわらず対流するような軌跡を描いて移動する挙動を観察することができた。図2はその時の粒子の軌跡を示している。重力の開放により、粒子が全体的に円軌道を描いている様子が確認できるが、初期構造の持つエネルギーがより安定する方向に移動するためである。図3は液状化前後の粒子配列を示している。分かりやすいように一部の粒子を黒く塗りつぶしておいた。これより粒子配列が液状化およびその後の再堆積によって再配列されている様子が分かる。図4～6に過圧密比（OCR）と静止土圧係数 K_0 と粒子に蓄積されるポテンシャルエネルギーの総および間隙比との関係を示す。図4から過圧密比が大きくなるほど K_0 が大きくなっていることから、平均主応力が増加していることが分かる。図5より過圧密比が大きいほど粒子間に蓄積されるエネルギーは増大している。また図7では、液状化前のポテンシャルエネルギーとOCRとの関係を示したが、これよりポテンシャルエネルギーとOCRの間にも要素試験から得られた実験式³⁾と同様の関係があり、粒子間エネルギーが液状化抵抗とみなせることを支持している。また図5、6より、過圧密状態から液状化および再堆積することで間隙比が減少するにもかかわらず、蓄積されるエネルギーが減少していることが分かる。この結果も液状化地盤が再液状化に対し弱いという実験事実と調和している。

5. 結論

1) 重力を開放し接線パラメータをゼロにすることで、定体積下で粒子が対流挙動を示すことが分かった。

2) 過圧密比（OCR）が大きくなるほど、供試体が保有するポテンシャルエネルギーは高くなり、その増加傾向はOCRの実験式と同様であった。これは過圧密比と液状化強度の事実関係に調和している。また K_0 の値も過圧密比と共に上昇するが、エネルギー増加との相関は見られなかったことから、内部構造の変化がエネルギー増加の原因と考えられる。

3) 液状化後の再堆積により供試体は密な構造に再配列されるが、逆にポテンシャルエネルギーは減少する。これは再配列による接触エネルギーの平均化が原因である。

4) 以上のことは、重力場において粒状集合体の持つポテンシャルエネルギーが液状化抵抗に対応することを支持する結果である。

<参考文献>

- 1) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳澤栄司: 地盤に入力された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用, 土木学会論文集 No.631, -48 pp 161-177, 1999.9.
- 2) 中瀬仁, 安中正, 片平冬樹, 興野俊也: 平面ひずみ圧縮試験に対する個別要素法の適用, 土木学会論文集, No.454, -20, pp.55-64, 1992.9.
- 3) Ishihara, K. and Takatsu, H.: Effects of Overconsolidation and K_0 Conditions on the Liquefaction Characteristics of Sands, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 4, pp. 59-68, 1979.

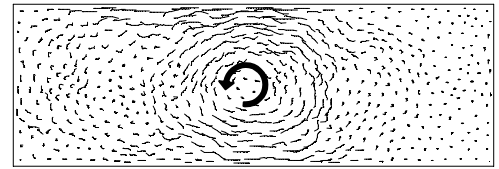
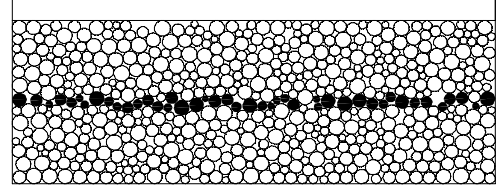
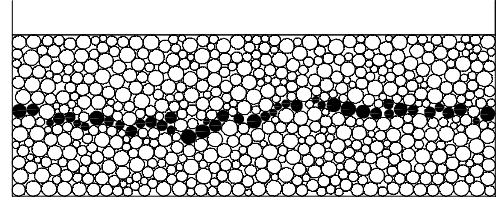


図2 液状化（重力開放）時の粒子移動の軌跡



(a) 98kPa過圧密状態



(c) 再堆積, 98kPa再圧密状態

図3 Case2の液状化 - 再圧密過程における粒子配置

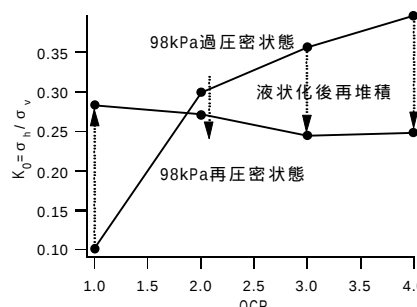


図4 OCRと K_0 の関係

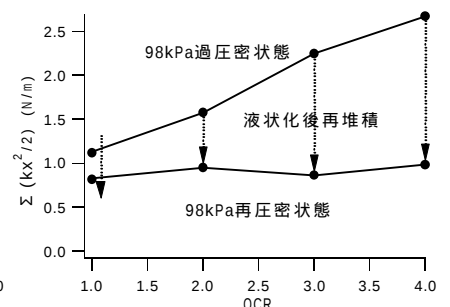


図5 OCRとポテンシャルエネルギーの関係

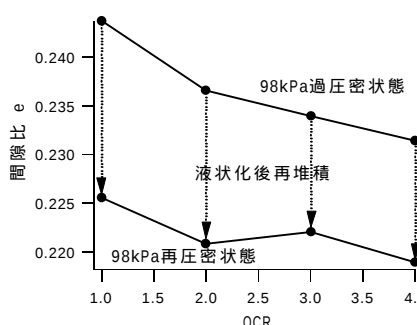


図6 OCRと間隙比の関係

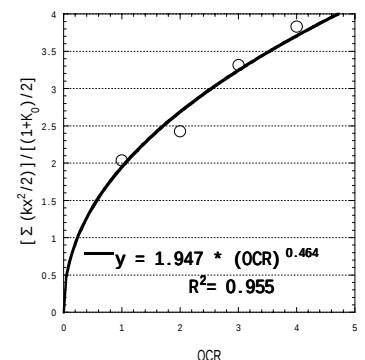


図7 ポテンシャルエネルギーの定式化