

III-43 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 学正員 ○森本 大志 岡田 直仁
東北大学 正会員 風間 基樹 柳澤 栄司

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、室内要素試験中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を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。仮に、粒度分布や圧密履歴によって粒状体の持つエネルギーの変化を表すことができれば、液状化抵抗の評価に大きく貢献できるものと考えられる。しかしながら応力履歴を受けた粒状体のポテンシャルエネルギーの変化については今までほとんど検討されていないのが現状である。

本研究では個別要素法（DEM）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、集合体のエネルギーの変化について考察を行なう。

2. DEMにおけるエネルギーの定義

DEMでは、図1に示すように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。

図から分かるように、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。

$$\text{法線方向: } E_n = \frac{1}{2} k_n x^2 \quad \text{接線方向: } E_s = \frac{1}{2} k_s x^2$$

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、標準圧密試験を実験と解析の両方で行ない、パラメータを変化させながら解析を行なって、実験値と最もよく合う定数を決定した。その結果を図2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、実験はふるい目により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、図3に示すように容器に要素をランダムに発生させ(a)、浮遊状態から重力をかけることでパッキングした(b)。この時点で高さ2cm、底辺6cmの供試体サイズからはみ出す余分な要素を取り除き、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(c)。

(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)。

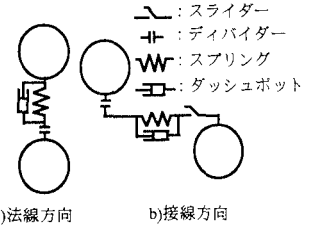


図1 モデル概念図

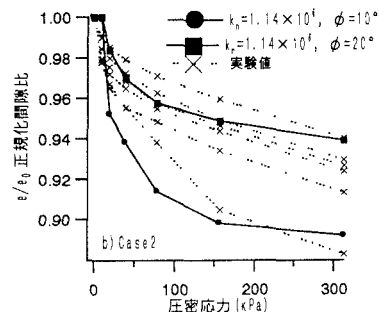
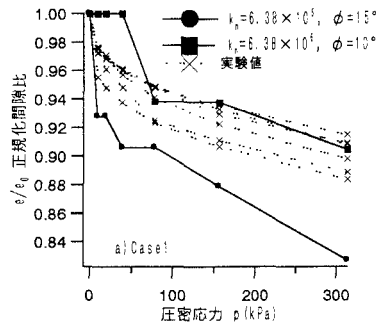


図2 標準圧密試験と解析の比較

表1 決定したパラメータ

	Case1		Case2	
粒径 (mm)	4.75~2.0		2.0~0.85	
土粒子密度 (g/cm ³)	2.620		2.632	
法線方向ばね定数 k_n (N/m)	6.38×10^5	6.38×10^6	1.14×10^6	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	
接線方向ばね定数 k_s (N/m)	6.38×10^5	6.38×10^6	1.14×10^6	1.14×10^6
接線方向減衰定数 η_s (N·sec/m)	1.00×10^1		1.00×10^7	
粒子間摩擦角 ϕ (deg)	15	10	10	20
時間刻み Δt (sec)	5.00×10^{-7}			

また 392kPa まで載荷し 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。

4. 結果と考察

今回の解析では、液状化を有効主応力をゼロにし、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運動を起こして

あたかも液状を呈したような挙動を観察することができた。図4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が、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5、6に過圧密比 (OCR) と粒子に蓄積されるポテンシャルエネルギーの総和および間隙比との関係を示す。図5から過圧密比が大きいくほど粒子間に蓄積されるエネルギーが大きくなっていることが分かる。これは、過圧密比が大きくなるほど液状化強度が高くなる²⁾ことと調和的である。また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が、これは再配列で密になることにより接触エネルギーが分散したためと考えられる。

5. 結論および今後の方針

1) 重力を開放し有効主応力をゼロにすることで、二次元平面内における要素の対流挙動を確認できた。このことから、液状化現象を模擬的に再現することができたと考えられる。

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る。これは過圧密比と液状化強度の関係に調和している。

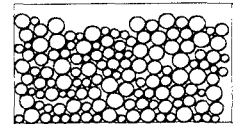
3) 液状化後の再堆積により供試体は密な構造に再配列されるが、逆にポテンシャルエネルギーは減少する。これは再配列による接触エネルギーの分散が原因であると考えられる。

今後は、間隙水圧を考慮した液状化シミュレーションを行なうことで、液状化強度とエネルギーの関係について検討していく予定である。

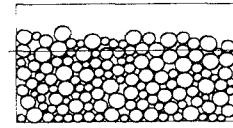
<参考文献>

1) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳澤栄司: 地盤へ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, III-48, pp161-177, 1999.9.

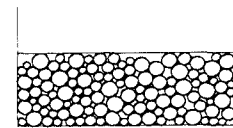
2) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化, 技報堂出版株式会社, 1991.



a) 粒子浮遊状態



b) 重力堆積状態



c) 初期状態

図3 供試体作成方法

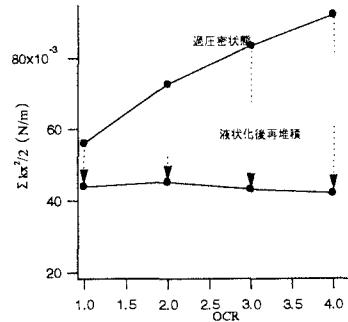
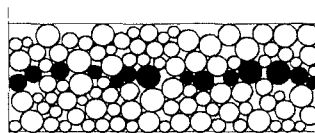
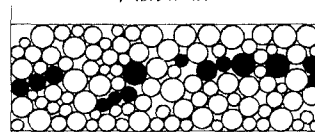


図5 OCRとポテンシャルエネルギーの関係



a) 液状化前



b) 液状化後再堆積

図4 液状化前後の粒子配列の変化

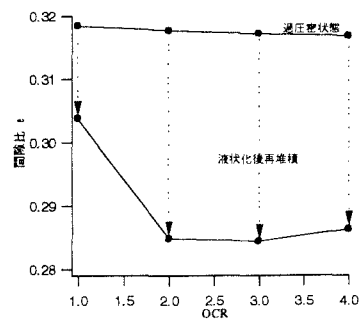


図6 OCRと間隙比の関係