

III-571 間隙水の移動を考慮した3次元DEMによる粒状体のせん断挙動の解析

豊橋技術科学大学

豊橋技術科学大学 大学院

新日本製鉄（株）

正 員 河 邑

学生員 大橋

○ 正 員 羽上田 裕章

1. はじめに これまで液状化現象に関し多くの解析が行われている。しかし、これら解析は地盤を連続体として捉え、モデル化されたものが多く、土粒子および間隙水の運動を考慮した微視的な機構を解明するに至っていない。

そこで本研究では、液状化現象の内部機構を解明するため、3次元での土粒子-間隙水の2相モデルを考慮した個別要素法（以下、DEMと略す）による解析手法¹⁾を考案し、これを用いて微視的見地よりこの現象の解明を試みた。また、一解析例として、飽和状態での非排水単純せん断を対象に行った解析を試みた。

2. 解析手法 本解析の概念図を図-1に示す。この図に示すように、本解析手法はDEM²⁾での要素間の計算時に間隙水の挙動を組み込んだものである。これは、要素間の力の伝達と間隙水の挙動とを並行に計算したのち、結合するものである。要素間の力の伝達は接触点での力-変位則で表され、間隙水の挙動は図-2で示す一連の計算系で表される。これら2系統への分離は力の分担で表され、接触点での重なり量と間隙体積の変化によって決定される。また、結合は力の合成で表され、それは独立して計算された各要素の2つの作用力を合成することによって計算される。

3. 解の安定性に関する条件 本解析には、時刻歴に関し2つの連成条件と、空間に関し全作用力に対する条件と間隙水圧の分布に対する条件との計3種4つの条件が設定されている。全作用力に対する条件は、各時間ステップにおいて、各要素の静的釣合条件がある一定の精度のもとで満足するために付加するものである。また、間隙水圧の分布に対する条件は、各時間ステップにおいて、2つの異なった間隙水圧分布および水量分布を作り出すのを防ぐためのものである。

4. 解析例 解析例として、本解析手法を用い非排水単純せん断の数値シミュレートを行う。本解析モデルとして、x方向16.0cm、y方向8.0cm、z方向4.0cmのせん断箱を想定し、その中に512個の半径0.5cmの要素を、

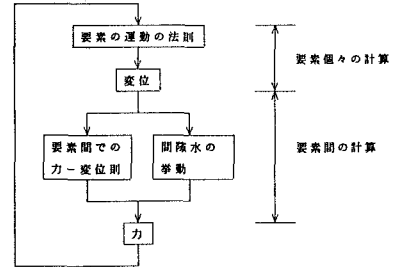


図-1 解析フロー

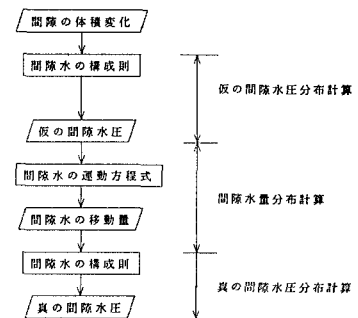


図-2 間隙水の挙動計算

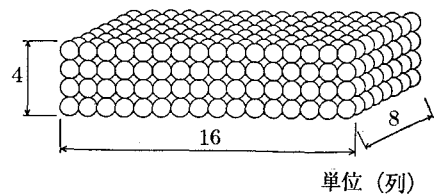


図-3 要素配列

表-1 材料定数

要素	半径	r	0.5 (cm)
	密度	ρ	2.5 (g/cm ³)
	粘着力	c	0.0 (kgf/cm ²)
	物理摩擦角	ϕ	45.0°
	要素間の垂直剛性	K_n	100.0 (kgf/cm)
	要素間のせん断剛性	K_s	50.0 (kgf/cm)
	要素と境界との垂直剛性	K_{nb}	100.0 (kgf/cm)
	要素と境界とのせん断剛性	K_{sb}	50.0 (kgf/cm)
間隙水	体積弾性係数	E_w	2.21 (kgf/cm ²)
	粘性	μ	10 ⁻⁶ (kgf·s/cm ²)

図-3に示すようにSimple Cubic Packingで充填したものをを用いる。せん断箱は、内部要素と同一の物性を持つ568個の境界要素で表現され、内部要素の外周に同様な配列で置かれるものとする。間隙は8個の要素からなる間隙モデルによって表現され、この間隙モデルはせん断モデル内の内部要素間や内部要素と境界要素との間に765個配置される。また、間隙間の連続性は仮想パイプによって表現され、間隙水の移動はこの中を通して生じるものとする。本解析に用いた材料定数を表-1に、各条件の精度を表-2にそれぞれ示す。

解析過程は、要素発生過程、圧縮過程およびせん断過程の3過程からなる。要素発生過程は、所定の配列で要素をせん断箱モデル内に発生させる。圧縮過程は、鉛直方向の全応力 $\sigma_{zz} = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ を得るように載荷速度 180 kgf/sec で載荷する。せん断過程は、最大せん断ひずみ $\gamma = 2.5\%$ とし、全応力 $\sigma_{zz} = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ を保ちつつ、底部境界要素に x の正の方向にせん断速度 0.2 cm/sec を与える。また、 z 方向の各境界層には上部境界要素を 0.0 cm/sec として上部境界要素からの距離に対して比例配分したせん断速度を与える。なお、全解析過程中、重力の影響は考慮していない。

5. 解析結果および考察 圧縮過程では、接触力の方向は間隙水がない場合³⁾と等しく、鉛直方向のものが卓越しているが、その大きさは代表的な一接触点で比較すると約4%小さくなっている。これは、間隙水による影響であると考えられる。また、この接触力の空間平均として求まる鉛直方向の有効応力 σ_{zz} は、圧縮過程終了時で 0.48283 kgf/cm^2 であり、このときの間隙水圧は 0.01899 kgf/cm^2 である。したがって、全応力は 0.50182 kgf/cm^2 となり、約0.36%の誤差が生じている。これは、2相の結合時に生じたものである。

せん断過程の結果として、図-4に有効応力 σ_{xx} , σ_{zz} , τ_{zx} およびダイランシーを示す。本来、非排水単純せん断での体積変化は微小であるが、本解析においてはある大きさの体積変化が生じている。これは、計算時間の制約より、間隙水の体積弾性係数を 10^4 オーダ小さくしていることに原因がある。また、図-5にせん断に伴う鉛直方向の有効応力 σ_{zz} および間隙水圧の変化を、図-6にせん断ひずみ $\gamma = 2.5\%$ での間隙水圧による作用力をそれぞれ示す。

3次元DEMに間隙水の運動を組み込んだものであり、間隙水の移動や間隙水圧の変化を再現することが可能である。この解析手法の一例として行った非排水単純せん断の解析より、本解析手法がせん断に伴う有効応力および間隙水圧の変化を評価することが可能であることを確認した。

＜参考文献＞

- 1) 羽上田裕章：間隙水の運動を考慮したDEMによる粒状体のせん断挙動の解析，豊橋技術科学大学修士論文，平成4年
- 2) Cundall, P.A. and Strack, O.D.: The Distinct Element Method as a Tool for Research in Granular Media, Part II, Report to National Science Foundation Concerning NSF GRANT ENG76-20711, 1979
- 3) 森本重徳：粒状土のせん断機構の3次元数値シミュレーションに関する考察，豊橋技術科学大学修士論文，平成元年

表-2 各条件の精度

	規定対象	規定値
達成条件	接触力による許容増分作用力	要素半径の0.0001%
	間隙水圧による許容増分作用力	要素半径の0.0001%
解の安定性	全作用力	要素半径の0.001%
	間隙水の移動量	間隙水量の0.0001%

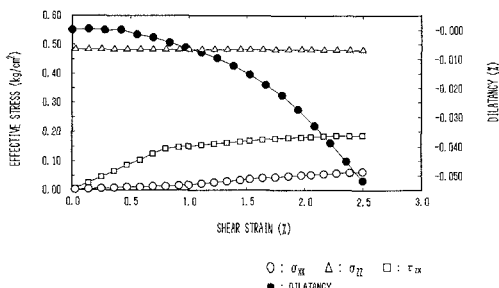


図-4 有効応力およびダイランシー—せん断過程—

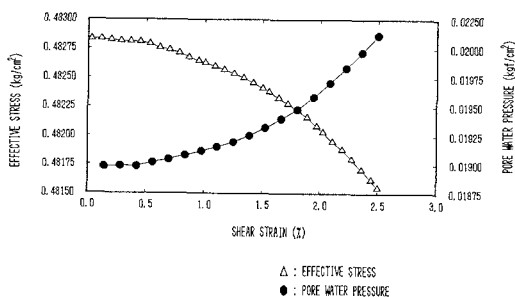


図-5 有効応力 σ_{zz} および間隙水圧—せん断過程—

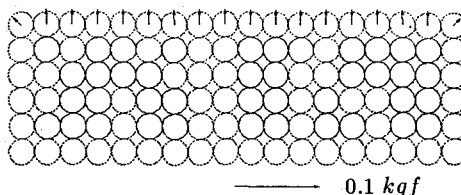


図-6 間隙水圧による作用力—せん断ひずみ $\gamma = 2.5\%$ —

6. おわりに 本研究において考案した解析手法は、