

繰返し圧縮を受ける粒状体の変形と配列の関連

豊橋技術科学大学 正員 河邑 眞
 豊橋技術科学大学 大学院 学生員 羽上田 裕章
 豊橋技術科学大学 学生員 ○船野 浩司

1. はじめに

粒状体は、砂のように互いに独立している個別の粒子の集合で構成されているものであり、粒子間の配列構造が粒状体の巨視的変形に深く関連していると考えられる。したがって、粒状体の力学特性については、まず粒状体の配列構造の変形特性に対する影響を明確に解明する必要がある。この目的を達成する有効な手段として、Cundallの提案した個別要素法 (Distinct Element method; 以下DEMと略記) による数値シミュレーションがある。そこで本研究においては、異なる初期配列構造をもつランダム配列3次元粒状体モデルでの、DEMによる三軸試験の数値シミュレーションを行ない粒子の配列構造と変形機構との関連性についての考察を示した結果について報告する。

2. 解析方法

DEMを用いた数値シミュレーションは、ニュートンの第2法則の粒子要素への適応と接触点での変位から接触力を得るのに用いられる力-変位則の適応を交互に行なうことによって行なわれる。三軸試験モデルとして、図-1に示されるような幅4cm、高さ4cm、奥行き4cmの範囲とする粒子の存在領域空間 (ボックス・エリア) すなわち供試体を想定する。粒子要素間の接触判定を行なう時、接触可能な粒子の存在領域を小さくすることにより演算数を削減できるため本解析では、 $DEL=1.33\text{cm}$ の27個の領域に分割を行なった。このボックス・エリア中に半径0.2cmの等径等質の粒子要素を352個発生させる。解析に用いた粒状体要素に関する材料定数を表-1に示す。

本解析は、粒子配列構造をランダム配列とし発生粒子個数を一定とした上で、初期配列構造が異なる3種類のランダム配列構造をもつ粒状体モデルの解析を行なった。これら3種類のモデルの間隙率は、制御圧縮終了時で43.85%であった。このモデルに用いた解析過程を表-2に示す。①粒子発生：ボックス・エリア内に粒子要素をランダムに互いに接触しないように352個発生させる。②圧縮過程：3方向より等方的に圧縮を行なう。③：制御圧縮過程：3方向の主応力の平均応力が $\sigma_0=18.75\text{kgf/cm}^2$ に達するまで等方的に圧縮を行なう。④繰返し圧縮過程：載荷過程として応力制御を保ちながら、X方向には圧縮作用、Y方向には引っ張り作用となるひずみ速度を与える。除荷過程として載荷とは逆向きの同等のひずみ速度を与える。再載荷過程一再除荷過程一再載荷過程は載荷過程、除荷過程と同等なもので行なう。なお解析過程中、重力の影響は考慮していない。

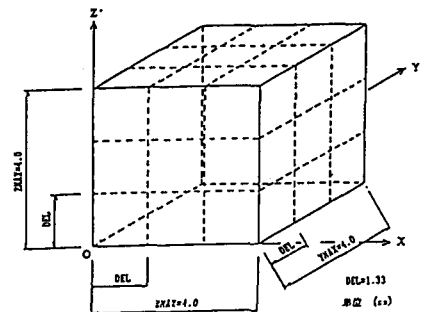


図-1 三軸試験モデル

表-1 要素諸元および材料定数

半径	R	0.2(cm)
密度	ρ	2.5(g/cm ³)
せん断弾性係数	K _s	250.0(kgf/cm ²)
体弾性係数	K _v	500.0(kgf/cm ²)
摩擦係数	μ	1.0
粘着力	σ	0.0(kgf/cm ²)
制荷応力係数	σ_0	18.75(kgf/cm ²)
時間間隔	Δt	$4.09 \times 10^{-6}(\text{sec})$

表-2 解析過程

過程	サイクル数	全サイクル数	ひずみ速度 EDOUSEI			応力制御 σ_0 (kgf/cm ²)
			(X,X)	(Y,Y)	(Z,Z)	
粒子発生	0	0	-	-	-	-
圧縮	2000	2000	-1.0×10^{-3}	-1.0×10^{-3}	-1.0×10^{-3}	-
解除	2000	4000	0.0	0.0	0.0	-
制御開始	200	4200	0.0	0.0	0.0	-
制御圧縮	4000	8200	-1.0×10^{-3}	-1.0×10^{-3}	-1.0×10^{-3}	18.75
除荷	3000	11200	-1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	0.0	18.75
再載荷	6000	17200	1.0×10^{-3}	-1.0×10^{-3}	0.0	18.75
再除荷	6000	23200	-1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	0.0	18.75
再載荷	6000	29200	1.0×10^{-3}	-1.0×10^{-3}	0.0	18.75
再除荷	3000	32200	-1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	0.0	18.75

3. 解析結果

解析に用いたモデルの繰り返し圧縮前の制御圧縮終了時における配列構造のY-Z断面を図-2に示す。

繰り返し圧縮に伴う応力の変化を表-3に示す。3種類のモデルで応力の大きさの違いはあるが同様の応力変化が見られた。これは、配列の違いの影響からであると考えられる。X、Y方向で再載荷、再除荷過程の応力が載荷、除荷過程の応力に比べ増加している。これは、繰り返し圧縮によって粒子配列構造が変化したためであり、安定した粒子の位置が決まれば、増加はなくなり平衡状態を保つと考えられる。

図-3にX軸方向の応力-軸ひずみの関係を示す。これは、X軸方向における各応力と軸ひずみの関係を表わしたものであり、圧縮された量(+)にとっている。また、縦軸の値は計算された実際の応力から制御応力 18.75kgf/cm^2 を引いたものである。3種類のモデルを比較した場合、配列による影響は見られず同様な軌道を描いている。図-3において、載荷時と再載荷時を比べた場合、応力と軸ひずみは共に増加している。しかし、除荷と再除荷の場合は、応力と軸ひずみは共に減少している。これは、配列構造の変化による影響と圧縮方向に比べ引張り方向の粒子の移動は、小さくなるということによるものである。このことは、Y軸方向の場合にも同様な傾向がある。この関係は、安定した配列となった時、同じ軌道を描くようになると考えられる。

4. 結語

DEMによる3次元粒状体モデルの繰り返し三軸試験を行ない、その結果、次のようなことが認められた。

- (1) ランダム配列で粒子の大きさ、個数が一定の場合、粒子の初期配列の違いによる変形特性への大きな影響は今回のシミュレーションからはみられなかった。
- (2) 繰り返し圧縮によりX、Y軸方向での1サイクル中の最大応力の増加傾向が見られた。

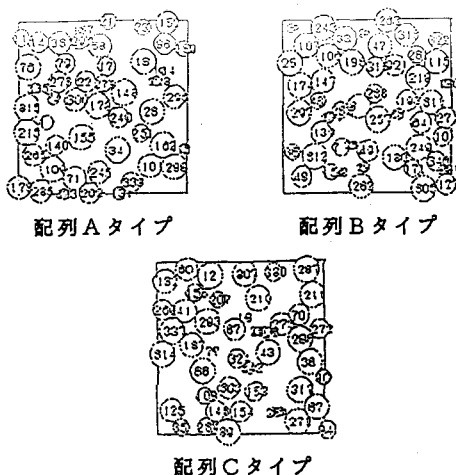
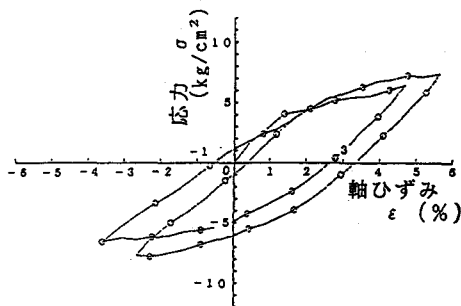


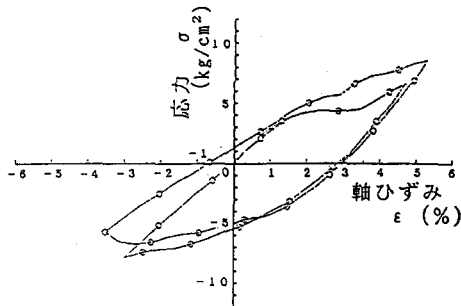
図-2 配列構造 (Y-Z断面)

表-3 応力の変化

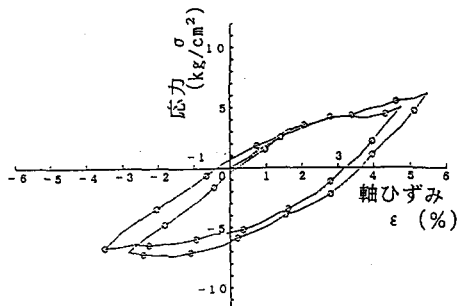
過程	X軸方向 σ_{xx} (kgf/cm^2)			Y軸方向 σ_{yy} (kgf/cm^2)		
	配列A	配列B	配列C	配列A	配列B	配列C
載荷終了時	25.20	23.78	25.34	12.60	13.08	12.56
除荷終了時	12.18	12.08	13.00	28.21	28.10	24.83
再載荷終了時	28.19	25.03	27.35	12.54	13.03	11.55
再除荷終了時	11.07	11.78	10.83	27.38	28.58	27.09
再再載荷終了時	23.35	22.14	22.75	14.04	15.53	15.08



配列Aタイプ



配列Cタイプ



配列Bタイプ

図-3 応力-軸ひずみ (X軸方向)