

Ⅲ－46

粒状体の非可逆的変形に関する微視力学的研究

東北大学大学院 学生員 ○金子賢治  
東北大学大学院 正会員 岸野佑次

1. はじめに

粒状体の連続体モデルを構築する際には、その非均質性・離散性に起因する微視的変形機構を反映させる必要がある。個別要素法<sup>1)</sup>に代表される離散的数値シミュレーション手法は、粒状体の微視的変形の解明のために有用であり、特に、粒状要素法<sup>2),3)</sup>は、粒子個々の運動の追跡のみならず応力、ひずみを正確に算出及び制御することが可能である。

本研究では、粒状体の変形特性を考察することを目的とし、粒状要素法の周期境界制御<sup>4)</sup>による数値シミュレーション試験を行い連続体モデルの理論背景と併せて考察する。

2. 数値シミュレーション解析

材料の力学的挙動を知るための要素試験は、実験・数値シミュレーションに関わらず理想的には境界条件の影響を極力排除する必要がある。土質実験で要素試験として行われている3軸圧縮試験等も一境界値問題の解でしかないと考えられる。本研究では、周期境界制御を用いることにより粒状体本来の力学特性を抽出する。

本研究で用いたパッキングの初期状態を図-1に示す。黒線で表された230個の粒子が解析対象となる基本単位領域内部の粒子、その周囲にある灰色線で表された粒子が基本単位領域に隣接する領域に属する粒子を示している。また、解析に用いた諸定数を表-1に示す。

(1) せん断载荷シミュレーション試験

図-1の初期パッキング（等方応力状態）から、図-2に示す主応力空間上の载荷経路に沿ってせん断载荷を行い、得られた载荷曲線を図-3に示す。

図-3において、最大せん断ひずみ3%付近で応力ひずみ曲線、ダイレタンシー曲線が共に傾き始め、7%付

近で応力のピークに至ると共に正のダイレタンシーが生じ始める。ここでは、図-2中の○で示した4点に関して応力プローブ試験を行い、回復ひずみ増分の変化及び非回復ひずみ増分について詳細な検討を行う。

(2) 応力プローブ試験<sup>3)</sup>

上述の4点について図-4主応力空間上に示す40方向の载荷・除荷を行うが、全くすべりが無いと仮定したプローブ試験も同様にを行う。

図-5に各応力プローブ試験における回復ひずみ増分の結果を示す。初期状態（ $\gamma_{\max} = 0.0\%$ ）においては、等方線形弾性体と同様に長軸が45°方向を向く楕円体となるが、せん断载荷が進むに従って長軸方向がず

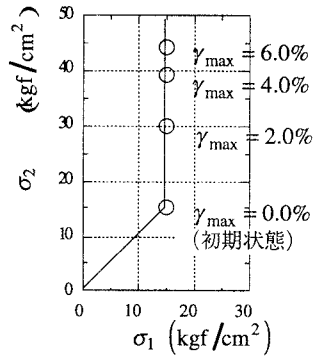


図-2 せん断载荷経路

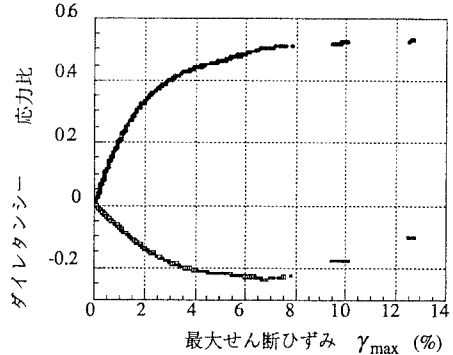


図-3 载荷曲線

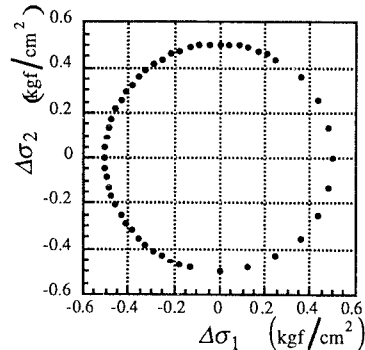


図-4 応力プローブ経路

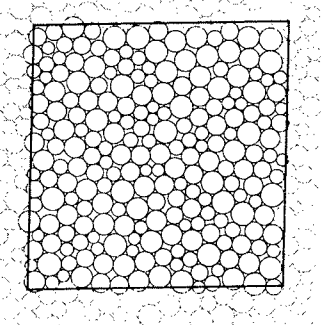


図-1 供試体初期パッキング

表-1 解析に用いた諸定数

|         |                                  |
|---------|----------------------------------|
| 法線方向接触力 | $k_n = 1000 \text{ kgf/cm}^2$    |
| 接線方向接触力 | $k_t = 800 \text{ kgf/cm}^2$     |
| 内部摩擦角   | $\phi = 25^\circ$                |
| 初期等方応力  | $\sigma^0 = 15 \text{ kgf/cm}^2$ |

れていき、その大きさも長軸方向に増大する。このことは、粒子間の摩擦に伴う非回復性の内部構造変化に起因すると考えられる。図-6には、 $\gamma_{\max} = 6.0\%$ の場合の回復ひずみ増分とすべりなしと仮定したプローブ試験で得られる弾性ひずみ増分との比較を示す。図-6はすべりがある場合の方が回復する変形が大きいことを示している。紙面の都合上ここでは示さないが、載荷初期段階ではこのような差はほとんどなく、変形が進むに従って顕著になることを確認している。

図-5, 6の結果は、弾性マトリクスが非回復変形に伴い変化していることを示しており、粒状体の連続体モデルを構築する場合、熱力学におけるGibbsの自由エネルギー関数 $G$ が応力 $\sigma_{ij}$ と共に非回復性パラメータ $\alpha_{ij}$ の関数で表されるべきであると考えられる。

$$G = G(\sigma_{ij}, \alpha_{ij}) \quad (1)$$

また、ひずみ速度は式(1)をGibbsの自由エネルギー関数を用いて

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial^2 G}{\partial \sigma_{ij} \partial \sigma_{kl}} \dot{\sigma}_{kl} + \frac{\partial^2 G}{\partial \sigma_{ij} \partial \alpha_{kl}} \dot{\alpha}_{kl} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (2)$$

と表さる。ここで、 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ は弾性ひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ は塑性ひずみ速度である。 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ は、粒状体のプローブ試験においては図-6中のすべり無しで表されるひずみ増分に相当すると考えられる。プローブ試験で実際に載荷・除荷

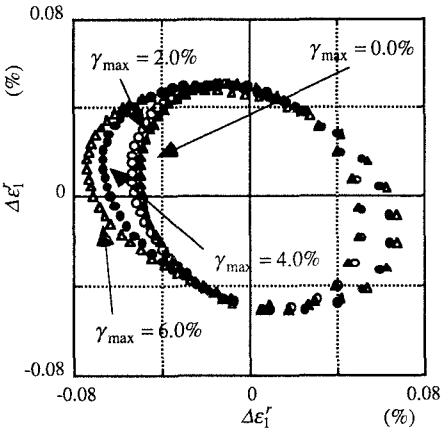


図-5 回復ひずみ増分

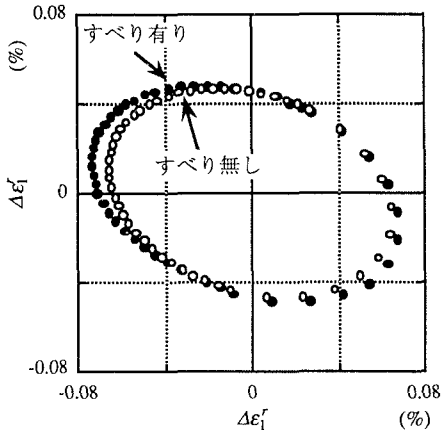


図-6 回復ひずみ増分と弾性ひずみ増分

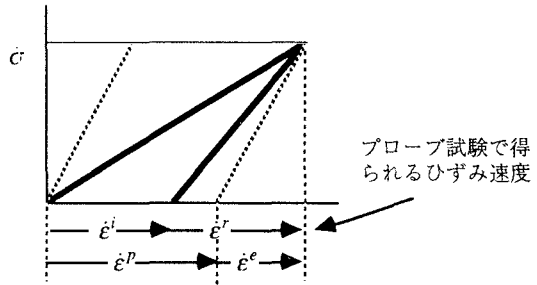


図-7 各ひずみ増分の概念図

して得られる回復ひずみ増分を $\Delta \epsilon_{ij}^r$ 、非回復ひずみ増分を $\Delta \epsilon_{ij}^i$ とし、式(1)中のパラメータ $\alpha_{ij} = \epsilon_{ij}^i$ とすれば、式(2)を用いて

$$\dot{\epsilon}_{ij}^r = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^i = \frac{\partial^2 G}{\partial \sigma_{ij} \partial \sigma_{kl}} \dot{\sigma}_{kl} + \left( \frac{\partial^2 G}{\partial \sigma_{ij} \partial \alpha_{kl}} - \delta_{ij} \delta_{kl} \right) \dot{\epsilon}_{ij}^i$$

と書くことができる。右辺第2項がすべり有りとなしによって生じるひずみ増分の差に相当すると考えられる。図-7に各ひずみ増分の概念図を示す。

最後に、応力プローブ試験で得られた非回復ひずみ増分の方を図-8に示す。ほぼ非関連流れ則に従うが、非関連流れ則においてDruckerの安定条件が成り立たないようなプローブ方向に関しては、Druckerの条件が成り立つような方向にずれていくことが分かり、いわゆる増分非線形性が観察される。このような増分非線形性を連続体モデルに取り込むためには、熱力学における散逸関数を応力増分の関数にする等の試みが考えられる。

#### 参考文献

- 1) Cundall, P. A. and Stack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol.1, No.2, pp.293-298, 1973.
- 2) 岸野佑次: 新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析, 土木学会論文集, Vol. 406/III-11, pp.97-106, 1989.
- 3) 武建勲, 岸野佑次, 京谷孝史: 改良粒状要素法による粒状体の断層性挙動の研究, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp.403-412, 1997.
- 4) 金子賢治, 岸野佑次, 林直宏, 京谷孝史: 粒状要素解析による地盤材料損傷モデルの定式化, 応用力学論文集, Vol. 2, pp.427-438, 1999.

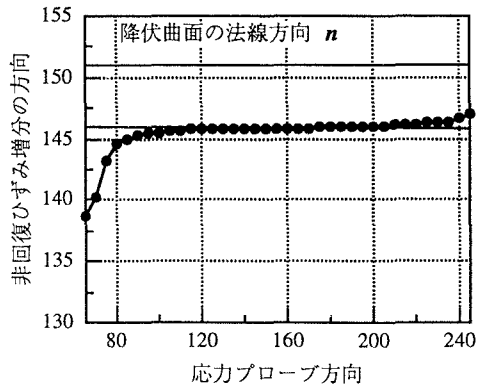


図-7 非回復ひずみ増分方向