

III - 12

3次元粒状体シミュレーション試験による塑性ひずみ増分応答の解析

東北大学 学生員 ○石井 建樹
東北大学 正 員 金子 賢治
東北大学 正 員 岸野 佑次

1. はじめに

砂のような粒状体の変形特性を合理的に把握するためには、微視的なメカニズムを考慮する必要がある。このような目的達成のためには、微視的力学量を算出可能な計算機による離散要素シミュレーション解析が有効であり、その1つの手法として従来より粒状要素法¹⁾による数値シミュレーション解析を用いられてきた。とくに、粒状体の増分弾塑性挙動に関する研究が2次元²⁾および3次元³⁾に対して行われており、粒状体に関する非関連流動則の適用性が議論されている。しかし、これらの解析は2軸的なものであり、より一般的な真3軸増分弾塑性挙動に関する検討が必要である。本文では、3次元粒状要素法に基づく数値シミュレーションを用いて2種類の応力プローブ試験を行い、粒状体の3次元的な塑性ひずみ増分応答について考察する。

2. 解析の概要

粒状供試体モデルの断面図を図-1に示す。このモデルは粒径 2.0～6.0 mmの球形粒子をランダムに発生させた粒子数1698個の球形粒子集合体で、内部粒子1340個を境界制御のための境界粒子358個で覆ったものである。また、接触点における法線および接線方向バネ定数はそれぞれ、 $k_n=200\text{kN/m}$ 、 $k_t=140\text{kN/m}$ 、粒子間摩擦角は 15° とした。この供試体を100kPaの等方応力状態にした後、図-2に示す経路で側圧一定三軸圧縮試験を行った。载荷開始時の間隙比は0.375であり、比較的安定な構造を有する粒状供試体である。図-3はせん断载荷により得られた载荷曲線である。縦軸は応力比（偏差応力のノルム/平均応力）、横軸は最大せん断ひずみ（偏差ひずみのノルム）を表す。

図-4に応力プローブ試験の概念図を示す。応力プローブ試験は主応力空間内の2つの面内で行い、それらは任意の試験点Aに関して基底ベクトル (l_A, m_A, n_A) によって特徴づけられる。

$$l_A = \frac{\sigma_A}{|\sigma_A|}, n_A = \frac{\sigma_A - \sigma_0 - (\sigma_A - \sigma_0) \cdot l_A \cdot l_A}{|\sigma_A - \sigma_0 - (\sigma_A - \sigma_0) \cdot l_A \cdot l_A|},$$

$$m_A = n_A \times l_A$$

応力プローブ(1)は l_A, n_A を含む面内のプローブ試験であり、側圧は常に等方的である。応力プローブ(2)は m_A, n_A で張られる面内のプローブ試験であり、側圧に主応力差を伴う試験である。各プローブ試験においては 5° 間隔72方向への载荷除荷を行う。これらのプローブ試験ではいずれも载荷時に応力主軸の回転は生じない。なお、試験点はA点（応力比0.5）とし、応力増分の大きさは $|\Delta\sigma|=0.1\text{kPa}$ とした。

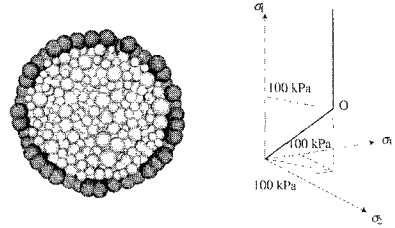


図-1 解析モデル

図-2 载荷経路

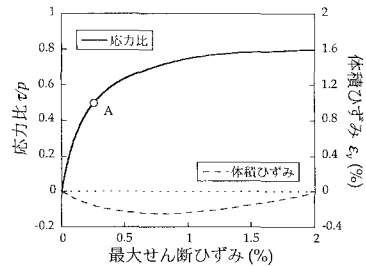


図-3 载荷曲線

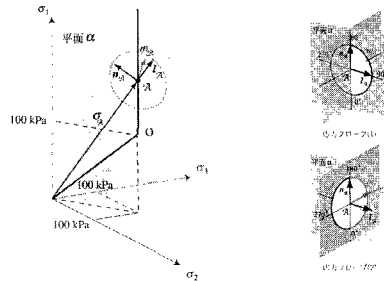


図-4 応力プローブ

3. 解析結果および考察

古典的塑性論における流動則は一般に、

$$\Delta \epsilon^p = \frac{1}{h} m n : \Delta \sigma \quad (1)$$

で表される。ここに、 m は塑性ひずみ増分の方をを表す単位テンソル、 n は降伏曲面の外向き法線を表す単位テンソル、 h は硬化状態により定まる正值スカラー量である。 $m=n$ であれば関連流動則、 $m \neq n$ であれば非関連流動則である。式(1)によれば塑性ひずみ増分は応力増分の方をによらず常に一定の方を m を向き、増分線形性を示すことになる。

図-5には、試験点Aでの塑性ひずみ増分応答を3次元空間に示した図である。塑性ひずみ増分テンソルのせん断ひずみ成分は垂直ひずみ成分に比べ小さく、図の垂直ひずみはほぼ主ひずみと見なすことができる。

同図より、応力プロープ(1)では塑性ひずみ増分応答がほぼ同一直線上に並ぶ一方で、応力プロープ(2)では、塑性ひずみ増分応答は増分非線形性を示すことがわかる。このように、応力主軸非回転時においても、粒状体の塑性ひずみ増分応答はへら状に拡がり増分非線形性を示すことが確認される。

図-6に (l_A, m_A, n_A) 成分をそれぞれプロットする。図中の実線および点線は非関連流動則を仮定した場合の成分を示したものである。両プロープ方向ともに塑性ひずみ増分がほぼ 180° において最大となることから降伏曲面の外向き法線ベクトル $n = n_A$ とし、塑性ひずみ増分の方向 m は応力プロープ(1)による解析結果より算定した。文献 3)においても指摘されているように、応力プロープ(1)では非関連流動則により比較的精度良く近似できる。一方、応力プロープ(2)では、塑性ひずみ増分の m_A 方向成分が正弦曲線のような挙動を示し、応力増分の降伏曲面接線方向成分(m_A 方向)に依存するような塑性ひずみ増分が生じる。これは、側圧に主応力差が発生し、新たなせん断メカニズムが生じたことに起因する現象であると考えられる。このようなせん断メカニズムは先の三軸圧縮過程において形成された異方的な内部構造を座屈させるように作用し、初期不整的な役割を果たす応力増分の m_A 方向成分に依存した非線形挙動を示すと考えられる。

また、同図において、塑性ひずみ増分が生じる応力増分増分方向は、応力プロープ(1)ではほぼ $90^\circ \sim 270^\circ$ の間であるのに対して、応力プロープ(2)では $60^\circ \sim 300^\circ$ の間で塑性ひずみ増分が生じている。つまり、粒状体においては古典的塑性論の降伏基準が適用できないこと示しており、粒状体の増分弾塑性挙動を考える上で非常に重要な現象であると考えられる。なお、この現象は、応力増分の m_A 方向成分が比較的小さいときには m_A 方向への応力増分依存性が発揮されないという感覚的にも合致する現象である。

4. おわりに

3次元粒状要素法に基づく3次元粒状体シミュレーション試験を実施し、2次元モデルでは再現できない真3軸の応力プロープ試験を行い、粒状体の3次元的な塑性ひずみ増分応答を示した。その結果、応力主軸非回転時においても、粒状体は塑性ひずみ増分において増分非線形性を示すことが確認された。

参考文献

- 1) 岸野佑次：新しいシミュレーション方を用いた粒状体の準静的挙動の解析，土木学会論文集，No.406 / III-11, pp.97-106, 1989.
- 2) 岸野佑次，武建勳：Hillの安定条件の粒状体への適用について，土木学会論文集，No.631 / III-48, pp83-95, 1999.
- 3) 赤井澤裕幸，岸野佑次，金子賢治：3次元プロープシミュレーション試験による粒状体の増分弾塑性挙動の研究，平成12年度（社）土木学会東北支部研究発表会講演概要集，pp.274-275, 2001.

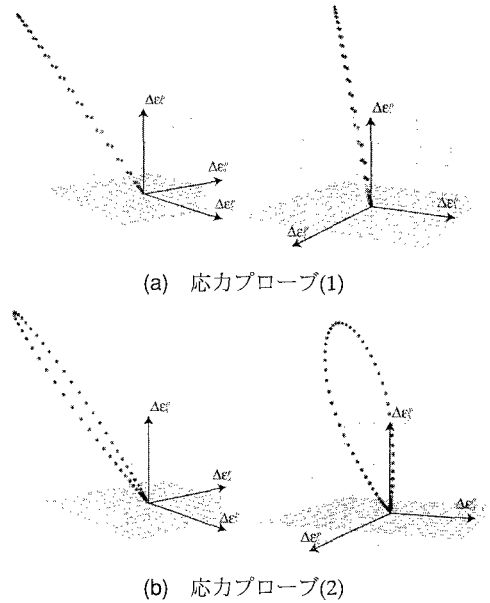


図-5 塑性ひずみ増分応答（3次元空間）

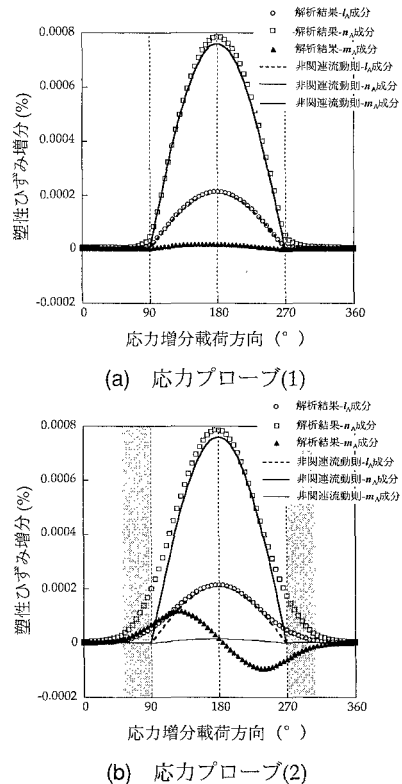


図-6 塑性ひずみ増分応答