

Ⅲ — 5

3次元プローブ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

東北大学 学生員 ○赤井澤裕幸
 東北大学 正 員 岸野 佑次
 東北大学 学生員 金子 賢治

1. はじめに

粒状体の構成則を合理的に定めるためには、微視的なメカニズムを考慮する必要がある。このためには、計算機によるシミュレーション解析が有効である。従来、粒状要素法による応力プローブシミュレーション解析¹⁾により、粒状体の増分弾塑性挙動に関する研究²⁾が行われており、粒状体に関しては古典的塑性論における非関連流動則は厳密には成立しないという結論が得られている。しかし、これらの研究は全て2次元解析で行われており、本来3次元構造を持つ現実の粒状体の弾塑性挙動を正確に把握するには、シミュレーション解析も3次元で行うべきである。本文では、新たに開発した3次元粒状要素法を用いた応力プローブ試験を行い、粒状体の増分弾塑性挙動の考察を行う。

2. 解析の概要

解析モデルは、粒子直径が0.2から0.5cm、粒子数376個の球形粒子集合体で、この内182個は境界の制御を行うための境界粒子とし、残りの194個を内部粒子とする。粒状供試体モデルの内部粒子配置図を図-1に示す。内部粒子は所定の球形領域に球形粒子をランダムにパッキングしたものとする。また、接点における法線および接線方向バネ定数はそれぞれ、 $k_n=100\text{kN/m}$ 、 $k_t=70\text{kN/m}$ 、粒子間摩擦角は 25° とした。初期状態は解析モデルを平均応力が0.5MPaになるまで等方圧縮したものとする。その後、側圧を一定に保ち、載荷方向の応力 σ_z のみを単調に増加させるような応力制御せん断載荷試験を行った。せん断載荷により得られた応力ひずみ曲線を図-2に示す。同図の応力比 $\tau_{oct}/p=0.1$ のA点において応力プローブシミュレーション試験を行った。応力プローブシミュレーション試験は、同一の粒状供試体モデルに対して、応力空間内のある点から出発して様々な方向に同じ大きさの応力増分の載荷・除荷を行い、ひずみ増分応答等を詳細に調べる一連の試験である。一般に、ひずみ増分のうち載荷・除荷の過程に

おいて回復する部分は弾性ひずみ増分 $\Delta\epsilon^e$ 、非回復部分は塑性ひずみ増分 $\Delta\epsilon^p$ と見なされる。本研究では、図-3に示すように $\Delta\sigma_x=\Delta\sigma_y$ となる軸を $\Delta\sigma_0$ とおき、この軸と $\Delta\sigma_z$ 軸とで形成される平面において、 5° 間隔72方向に応力増分の大きさ $|\Delta\sigma|=0.01\text{MPa}$ としてプローブ試験を行った。

3. 解析結果および考察

図-4にA点の弾性ひずみ増分応答をzx平面へ投影したものを示すが、ほぼ $\Delta\epsilon_x^e=\Delta\epsilon_y^e$ であるためyz平面へ投影したものも同様になる。同図より弾性ひずみ増分応答は楕円形をなし、等方弾性体の構成則で近似できることがわかる。次に、塑性ひずみ増分応答を図-5に示すが、本研究では塑性ひずみ増分応答に関してもほぼ $\Delta\epsilon_x^p=\Delta\epsilon_y^p$ となっているため、応力増分の場合と同様に、 $\Delta\epsilon_x^p=\Delta\epsilon_y^p$ となるような軸を $\Delta\epsilon_0^p$ とおき、この軸と $\Delta\epsilon_z^p$ とで形成される平面内に投影したものを示す。塑性ひずみ増分応答は、応力増分の方角によらずほぼ一直線上に並び、古典的塑性論における流動則の仮定が成立するとみなすことが可能であるといえる。同図の角度は前述の平面内において $\Delta\epsilon_0^p$ から反時計回りを正としており、塑性ひずみ増分方向 m は 126° 方向であることがわかる。次に、プローブ方向に対する塑性ひずみ増分の大きさを極座標上にプロットしたものを図-6に示す。同図の角度はプローブ方向に対応する角度である。塑性ひずみ増分の大きさを連ねた線は円形となり、この円の原点を通る接線を引くことにより、塑性ひずみ増分が生じる方向と生じない方向の境界線、すなわち降伏曲面の接線を定めることが可能である。同図にはこの降伏曲面の接線とその外向き法線方向 n を示した。降伏曲面の接線はプローブ平面内の σ_0 から反時計回りに 57° となり、外向き法線方向 n は 147° 方向となる。従って、粒状体に関しては近似的に非関連流動則が成立するとみなすことが可能である。

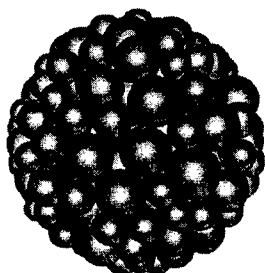


図-1 粒状供試体モデル

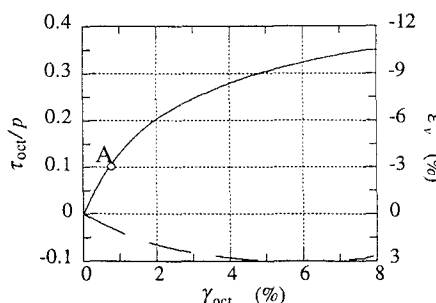


図-2 応力ひずみ曲線

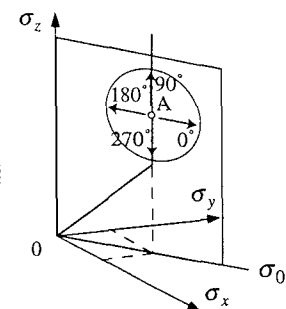


図-3 プローブ試験

しかしながら、非関連流動則を用いる場合、載荷方向によって不安定領域が生じることが指摘されている。古典的塑性論における流動則は次式で表される。

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

従って、2次の塑性仕事増分は次式のようになる。

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

塑性ひずみ増分が生じる条件は $n : \Delta \sigma > 0$ であるので、2次の塑性仕事増分の正負は $m : \Delta \sigma$ の正負によって定まる。2次の塑性仕事増分が正であれば、2次の弾性仕事増分は正であるので、これらを足した2次の全仕事増分は正となりHillの安定条件は必然的に満たされる。もし、非関連であれば $m : \Delta \sigma < 0$ となる載荷方向が必ず存在するのでHillの安定条件が満たされる保証がないことになる。図-7にプローブ点Aでの2次の仕事増分を算定した結果を示す。2次の塑性仕事増分は多少負になる部分もあるが、ほぼ正の値を示しておりDruckerの仮説が満たされている。そのため、これに弾性部分を加えた全仕事増分は完全に正となり、Hillの安定条件が満たされていることがわかる。図示は省略するが、流動方向について詳細に調べると、厳密には古典的塑性論

における流動則の仮定が成立せず、不安定領域において平均的流動方向からのずれが生じているためである。また、そのずれはHillの安定条件を満たすように生じているのがわかった。

4. まとめ

本研究では、新たに開発した3次元粒状要素法を用いた応力プローブシミュレーション試験を実施し、粒状体の増分弾塑性挙動について考察を行った。その結果、粒状体に対しては古典的塑性論における非関連流動則で近似できるが、厳密には流動方向は一定ではなく、増分非線形性が生じていることがわかった。今後は、本研究の結果を反映させた増分非線形構成則の定式化を行いたいと考えている。

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.

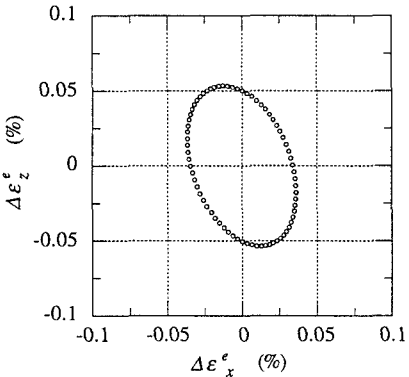


図-4 弾性ひずみ増分応答

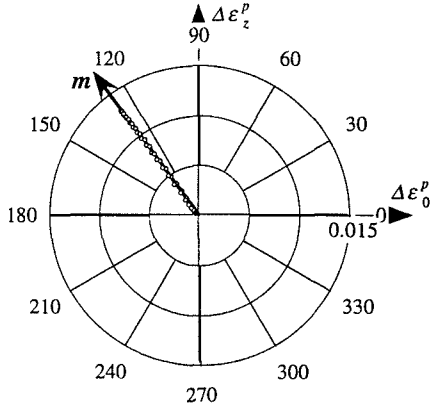


図-5 塑性ひずみ増分応答

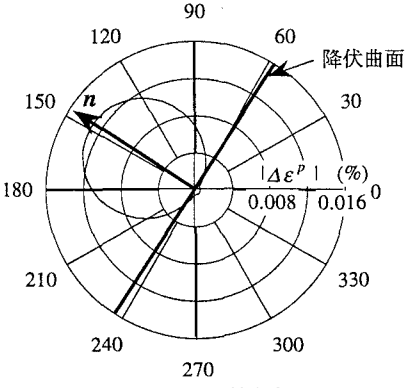


図-6 降伏曲面と外向き法線

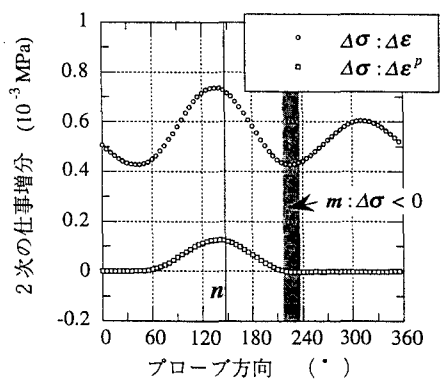


図-7 2次の仕事増分