

3次元粒状要素解析に基づく粒状体の応力増分方向依存型流動則に関する考察

東北大学大学院 正会員 ○金子 賢治
 東北電力 正会員 赤井沢裕幸
 東北大学大学院 正会員 岸野 佑次

1. はじめに

粒状体の流動則に関しては、安定条件などを含めた関連・非関連、応力増分方向依存性等について従来より種々の議論がなされてきた。岸野ら¹⁾は、2次元粒状要素法による応力プローブ試験により、粒状体の流動則はほぼ非関連型に近いが厳密には応力増分方向に依存するという結論を導いている。本文では、3次元に拡張した粒状要素法を用いて応力プローブ試験を行い、2次元解析で得られたこれらの結論を再確認するとともに、特に塑性ひずみ増分の応力増分方向依存性に着目して粒状体の流動則に関して考察する。

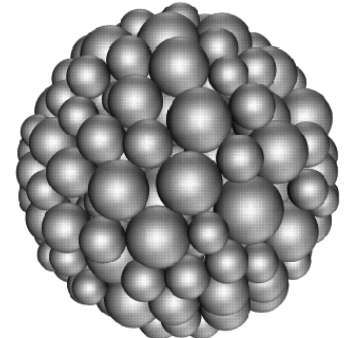


図-1 粒状供試体モデル

2. 解析の概要

本研究の解析は2次元粒状要素法を拡張し新たに開発した3次元粒状要素法を用いて行った。解析モデルは図-1に示すような粒子直径が2mmから5mm、粒子数376個の球形粒子集合体を用いた。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個を内部粒子とした。初期状態は所定の球形領域に球形粒子をランダムに配置した粒状供試体モデルを平均応力0.5MPaになるまで等方圧縮することで生成した。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。

初期状態生成後、図-2に示すように、側圧 σ_x 、 σ_y を一定とし応力 σ_z のみを単調に増加させるような応力制御3軸圧縮試験を行った。さらに、同図の載荷点B、C、Dにおいて応力プローブ試験を行った。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。本研究では、図-2に示すように3軸状態を保つ平面内、つまり $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y$ となる軸と $\Delta\sigma_z$ 軸とで形成される平面内において、 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。粒状供試体の変形応答として得られるひずみ増分のうち載荷・除荷の過程で回復する部分を弾性ひずみ増分 $\Delta\epsilon^e$ 、非回復部分を塑性ひずみ増分 $\Delta\epsilon^p$ とする。

3. 解析結果と考察

まず、側圧一定3軸圧縮載荷により得られた応力ひずみ曲線を図-3に示す。緩い砂の実験結果と良く適合した変形の傾向が表現されることがわかる。応力プローブ試験点B、C、Dは同図の応力比 $\tau_{oct}/p=0.1, 0.15, 0.2$ の載荷点である。次に、C点における応力プローブ試験により得られた塑性ひずみ増分応答を図-4に示す。ここでは、 $\Delta\epsilon_x^p - \Delta\epsilon_z^p$ 平面内に投影したものを示すが、塑性ひずみ増分はほぼ $\Delta\epsilon_x^p = \Delta\epsilon_y^p$ となっているため、 $\Delta\epsilon_y^p - \Delta\epsilon_z^p$ 平面内においても類

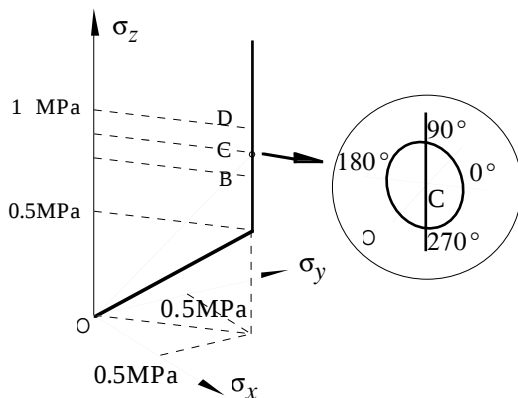


図-2 載荷経路と応力プローブ方向

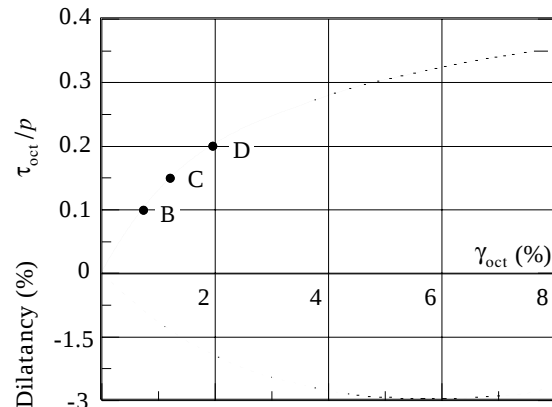


図-3 応力ひずみ関係

キーワード：粒状体，3次元粒状要素法，流動則，応力増分方向依存性，応力プローブ試験

連絡先：仙台市青葉区荒巻字青葉06 東北大学大学院土木工学専攻材料力学研究室 Tel: 022-217-7425 Fax: 022-217-7423

似した結果が得られている。同図より塑性ひずみ増分は応力増分の方
向によらずほぼ一直線上に並んでおり、その方向は約 127° 方向であることが観察される。本解析においては、降伏曲面の外向き法線 n の方向は 150° 方向であるため、C 点において $m \neq n$ であり応力と塑性ひずみの主軸はほぼ一致していたため、少なくとも関連流動則が成立するとは見なすことができない。粒状体に関して近似的に非関連流動則が成立すると見なすことが可能であるように思われるが、ここでは安定条件に関する議論などを念頭において、流動方向のより詳細な検討を行うこととする。

応力増分方向に対する塑性ひずみ増分空間上の塑性ひずみ増分の方
向を $\Delta \varepsilon_x^p$ 軸から反時計回りの角度で図-5 に示す。もし古典的流動則に従うとすれば塑性ひずみ増分の方
向は図中の破線で示したように一定値となるが、解析結果は厳密には一定ではなく平均値から若干のずれが生じ流動則の応力増分方向依存性が観察される。特に、非関連流動則を用いる場合に問題となる Drucker の安定条件を満たさない方向への応力増分に対してより大きくずれることがわかる。以上に示したような、粒状体の流動則が関連型で近似できないことや塑性ひずみ増分方向が応力増分の方
向に依存して変化することなどは、2 次元解析の結果¹⁾とほぼ同様の傾向を示している。

ここで、塑性ひずみ増分の偏差成分、体積成分と応力増分方向との関係を図-6 に示す。図-6 より、偏差成分の大きさは降伏曲面の単位法線 n の方向 (約 150°) を頂点とする $\sin$ 曲線となり $n:\Delta\sigma$ にほぼ比例するが、体積散逸ひずみ速度は $n:\Delta\sigma$ に比例しないことがわかる。これは、塑性ひずみ増分の体積成分が応力増分の降伏面の法線方向成分 $n:\Delta\sigma$ のみではなく接線方向成分にも依存するためであると考えられる。以上のことから、塑性ひずみ増分の応力増分方向依存性は、偏差成分ではなく体積成分が降伏面の接線方向成分にも依存するために生じるといえる。本文では紙面の都合上 C 点の結果のみしか示さないが、载荷の初期ほど応力増分方向依存性の度合いが大きい結果が得られている。これは、载荷初期ほど塑性ひずみ増分の体積成分の影響がより大きいためであり、ピークに近づくほど偏差成分が卓越するため流動方向はより一定値に近づく。

このような応力増分方向依存性は塑性ひずみ増分が完全に $n:\Delta\sigma$ に比例する古典的な金属塑性論流動則では表現することはできない。応力増分方向依存性を厳密に表現するためには、塑性ひずみ増分の体積成分が応力増分の降伏面の接線方向成分にも依存する新しい流動則の導入が不可欠である。

4. おわりに

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、粒状体の流動則は古典的塑性論における非関連型で概ね近似できるが、厳密には流動方向は一定ではなく、応力増分方向に依存する。さらに、塑性ひずみ増分の応力増分方向依存性はその体積成分が降伏面の接線方向成分にも依存するためであることがわかった。今後、種々の応力状態における解析による豊富なデータを基に考察を行うとともに、それに基づく合理的な粒状体の連続体構成モデルの定式化を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 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.

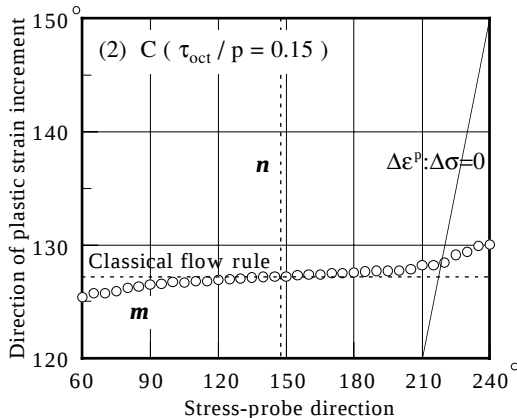


図-5 応力増分方向に対する塑性ひずみ増分方向

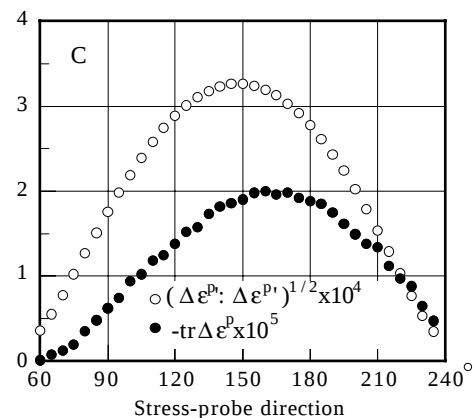


図-6 偏差塑性ひずみ増分と体積塑性ひずみ増分