

Ⅲ — 11

応力主軸回転を受ける粒状体の増分非線形性

東北大学工学部 学生員 ○鳴海 渉
 東北大学大学院工学研究科 正会員 金子賢治
 東北大学大学院工学研究科 正会員 岸野佑次

1. はじめに

古典的な金属塑性論においては、塑性ひずみ増分の方向を一定とする流動則が仮定される。しかし、近年、粒状体に対してはこのような仮定が成立せず、塑性ひずみ増分の生じる方向は応力増分の方向に依存して変化すること、いわゆる増分非線形性の存在が報告されている。Daniel Pradel¹⁾らは、豊浦砂の中空ねじり試験により応力プローブ実験を行い、増分非線形性の発生およびその主たる要因が応力主軸の回転にあることを指摘した。本研究では、3次元粒状要素法²⁾により中空ねじり試験シミュレーションを行い、応力主軸回転を受ける粒状体の増分非線形性について考察する。また、実験結果との比較を通して、実材料の定量的な変形挙動評価に対する粒状要素法の適用性について検討する。

2. 実験との比較によるパラメータの決定

3次元粒状要素法²⁾を用いて Daniel Pradel¹⁾の実験と同等の載荷・除荷・再載荷シミュレーションを行い、実験結果と比較して、解析に用いるパラメータを決定する。

a) 解析条件

本研究の解析に用いた粒状体モデルの断面図を図-1に示す。このモデルの総粒子数は1698個で内部粒子、境界粒子がそれぞれ1340個、358個である。本解析モデルの初期間隙比は0.375である。

文献¹⁾に習って載荷・除荷・再載荷シミュレーションを行い、解析に用いるパラメータを同定する。載荷・除荷・再載荷シミュレーションの載荷経路を図-2のせん断応力空間上に示す。

b) 解析結果と実験値との比較・考察

図-3に載荷・除荷・再載荷シミュレーションの結果を文献¹⁾の実験結果と合わせて示す。粒状要素法においては、法線および接線方向の仮想バネ定数と粒子間摩擦角の3つのパラメータが必要となるが、ここでの結果は、法線方向バネ定数280kN/m、接線方向196kN/m、粒子間摩擦角は13°を用いたものである。これらのパラメータは実験結果に合うように試行錯誤で定めたものではあるが、図-2に示したような複雑な経路での載荷に対しては実験結果を非常に精度良くシミュレートできていることがわかる。このことから、3次元粒状要素法が実際の粒状材料の定量的な変形挙動の評価を行う上で非常に有効な解析手法であると言える。なお、以下の解析にはここで用いたパラメータを用いる。

3. 応力プローブ試験と増分非線形性の考察

次に、図-4における載荷経路O-A-Bのせん断載荷シミュレーションを行い、点Bにおいて応力プローブ試験シミュレーションを行う。図-4において点Oは初期等方応力状

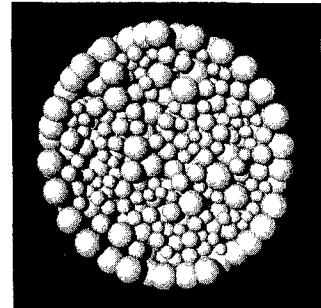


図-1 3次元粒状体モデル

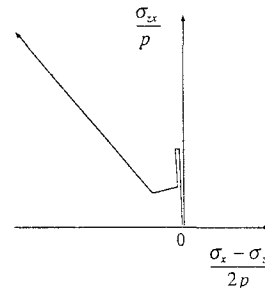


図-2 載荷・除荷・再載荷経路

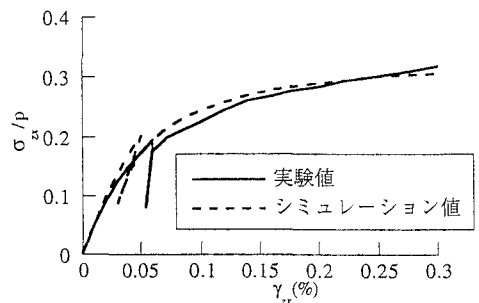


図-3 応力ひずみ曲線の比較

態(98.1kPa)，経路 O-A は3軸圧縮，A-B はせん断応力が作用し応力主軸が回転する経路である。また、応力プローブの方向を図-4に同時に示した。せん断応力空間内でのプローブ試験であることから応力主軸の回転を伴うことになる。ここでは、プローブ試験における応力増分の大きさは20kPaとした。

応力プローブ試験を行うためのせん断載荷シミュレーションにより得られた応力ひずみ曲線を図-5に示す。文献¹⁾中にはこの経路の応力ひずみ関係が示されていない

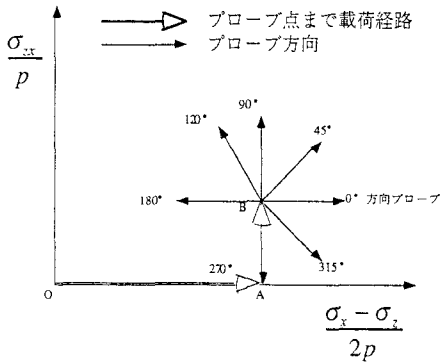


図-3 セン断載荷経路と応力プローブ方向

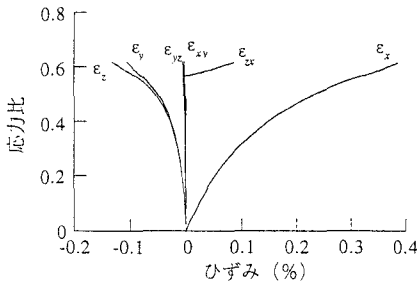


図-5 応力ひずみ曲線

いため、同図には応力プローブ試験を行う点Bに相当する応力比までの解析結果のみを示す。

図-6は応力プローブ試験の結果得られた塑性ひずみ増分のせん断ひずみ増分空間表示である。シミュレーションの結果得られた塑性ひずみ増分は実験値と比較してその大きさは異なるが、類似の塑性ひずみ増分応答を示している。すなわち、塑性ひずみ増分の向きが塑性論で予測される一定方向とはならず（プロットが一直線上に並んでいない）、応力増分の向きに依存する、いわゆる増分非線形性の挙動が観測される。ただし、シミュレーションではほぼ全ての方向において塑性ひずみ増分が大きく現れているが、ここで用いた応力増分の大きさは文献中の模式図から判断して定めたものであり、実際の実験とは異なる可能性もある。また、初期等方応力98.1kPaに対して20kPaといった相対的に非常に大きな応力増分を与えていることから、文献¹⁾およびここでの目的である増分型の構成則の考察には適さない可能性もある。

そこで、B点において応力増分を2, 1, 0.2, 0.1kPaとしてプローブ試験を行った結果を図-7に示す。応力増分の大きさに関わらず図-7に示される塑性ひずみ増分応答の形状がほぼ相似形になるが、この形状と図-6に示される形状は異なっている。このことから、応力増分が2kPa以下の場合にはほぼ増分と見なした考察が可能であるが、図-6の増分20kPaは大きすぎると言えよう。

最後に、塑性ひずみ増分が増分非線形を示す理由について考察する。図-8に図-3のO点（初期等方応力状態）

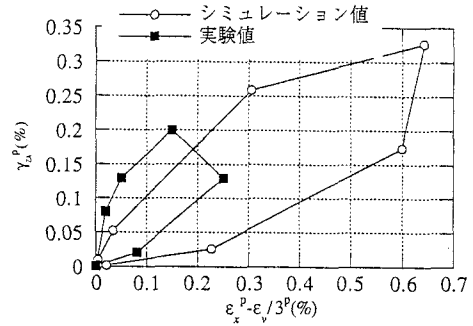


図-6 プローブ試験結果の比較

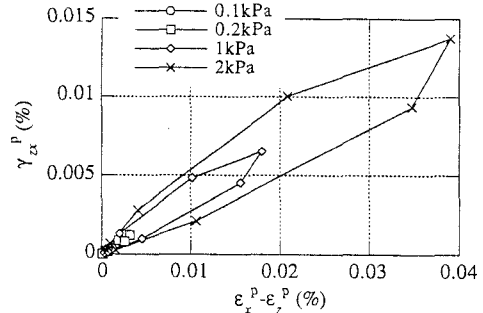


図-7 2kPa以下のプローブ試験結果

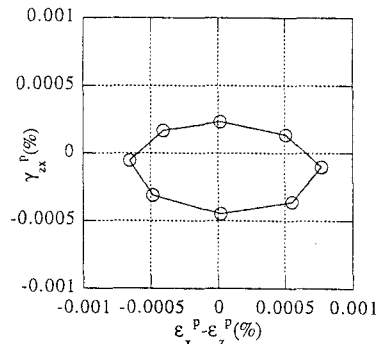


図-8 O点における塑性ひずみ

でのプローブ試験を応力増分2kPaで行った結果を示す。この結果より、せん断履歴を受けていない状態の場合、このようにそれぞれの応力増分方向に対応した塑性ひずみが増分が表れる。粒状体における増分非線形性は、せん断載荷によって生じる供試体中の構造変化が原因となり現れると考えられる。

参考文献

- 1) Daniel Pradel, Kenji Ishihara and Marte Gutierrez : Yielding and flow of sand under principal stress axes rotation, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.30, pp.87-99., 1990.
- 2) 赤井澤裕幸：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，東北大学修士学位論文，2001.