

Ⅲ-37 数値解析による粒状材料の弾性特性の検討

八戸工業大学 学生会員 ○工藤匡晃
八戸工業大学 正会員 金子賢治
八戸工業大学 フェロー 熊谷浩二

1. はじめに

砂などの粒状材料の構成式は弾塑性体として取り扱われるが、これまでの研究の中心は塑性変形に関するものであり、弾性部分に関しては単に等方線形弾性体の構成式を適用していることが多い。塑性論に基づき構成式を定式化する場合には弾性マトリックスが塑性ひずみに影響を与えるため、弾性構成式も十分に検討する必要があると考えられる。本研究では、粒状体マルチスケールモデリングに基づく3次元微視スケール解析¹⁾を用いた数値実験により粒子集合材料の弾性特性について検討・考察する。

2. 解析手法の概要

粒状体マルチスケール解析手法の定式化²⁾によれば、粒子集合からなる構造体は数学的均質化理論により、等価均質体と微視構造に分離され、マクロとミクロといった2つのスケールの境界値問題として記述される。マルチスケール解析法はこれらマクロおよびミクロスケール問題を連成して同時に解く解析手法であり、粒状体マルチスケール解析法においてはマクロスケール問題には有限要素法を、ミクロスケール問題には粒状要素法を用いている。マルチスケール解析法においては通常の有限要素法における構成モデルの役割は周期境界制御粒状要素法によるミクロスケール解析が担うことになる。本研究ではミクロスケール解析が全体構造に対する構成関係を与えることに着目し3次元ミクロスケール解析により多くの数値実験を実施することで、粒状材料の弾性変形特性について検討する。

3. 数値実験

(1) 数値実験の概要

一般に、粒状材料の弾塑性構成式に用いる弾性部分は等方線形弾性体を仮定する。ここでは、まず、せん断载荷に伴う弾性挙動の変化を考察するための数値実験を行う。図-1に本研究に用いた粒状体モデルを示す。本モデルは、粒径0.03~0.07mmの範囲で1073個の球粒子を立方体領域にランダムに発生させ、等方応力100kPaによりつり合い状態を満足するように作成した。また、法線および接線方向剛性50kN/m、35kN/m、粒子間摩擦角15°を用いた。

まず、図-2に示したケース1、ケース2、ケース3の3つの経路のせん断载荷シミュレーションを実施する。ここで、 p は平均応力であり、 q は $q = \sqrt{2}(\Sigma_{zz} - \Sigma_{xx})/\sqrt{3}$ と定義されるせん断応力である。なお、 $p-q$ 面上での解析に

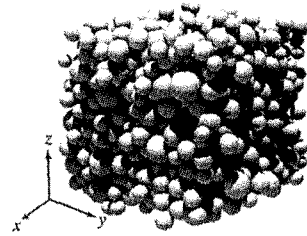


図-1 粒状体モデル

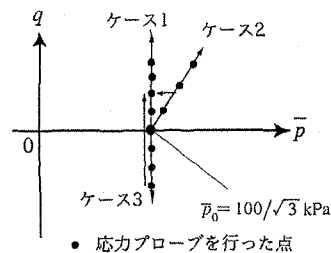


図-2 せん断载荷経路と応力プローブ点

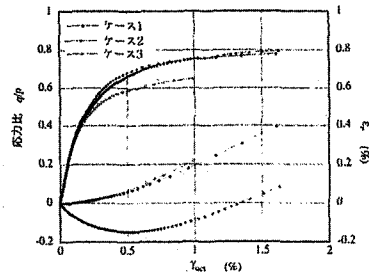


図-3 応力ひずみ関係（ケース1~3）

あたっては、 $\sqrt{p^2 + q^2} = \|\Sigma\|$ となるように $\bar{p} = \sqrt{3}p$ と補正した $\bar{p}-q$ 空間を用いて応力を制御した。なお、ケース1は平均応力一定3軸圧縮、ケース2は側圧一定3軸圧縮、ケース3は平均応力一定3軸伸張の経路である。次に、初期等方応力状態およびせん断载荷途中の応力状態において、 $p-q$ 面内で応力プローブ試験を行うことで弾性ひずみ増分を抽出した。応力プローブ試験は各平面内において応力増分を1kPaとし、1°毎360方向について行った。最後に、せん断履歴が弾性変形挙動に与える影響を考察するために、ケース2およびケース3の経路に一端载荷した後、ケース1のある応力状態に戻した場合のプローブ試験を行う。

(2) 解析結果とその考察

図-3に、ケース1~3のせん断载荷シミュレーションの結果得られた応力ひずみ関係を示す。なお、応力プローブ

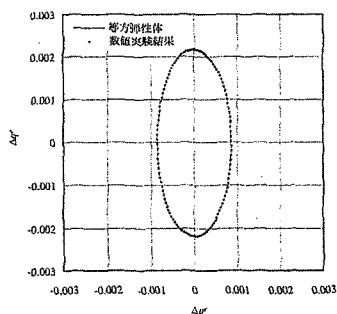


図-4 初期状態の弾性ひずみ増分応答

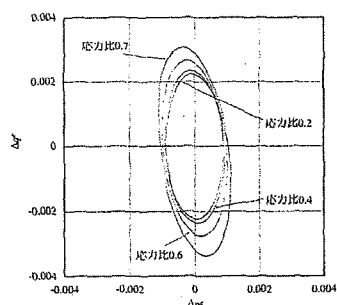


図-5 弾性ひずみ増分応答 (ケース 1)

試験はケース 1 の場合には応力比 0.2, 0.4, 0.6, 0.7 の応力状態において行い、ケース 2 の場合は応力比 0.29, 0.52, 0.69, ケース 3 の場合は 0.2, 0.4, 0.6 の応力状態において行った。

図-4 に初期等方応力状態の場合の応力プロープ試験結果を示す。ここで、 Δp^e および Δq^e は応力パラメータ p, q にそれぞれ対応した弾性ひずみ増分のパラメータである。図中にはヤング率 51.1MPa, ポアソン比 0.122 の等方弾性体を仮定した場合の弾性ひずみ増分応答も同時に示しているが、等方応力状態の場合には粒状体の弾性ひずみ増分応答はほぼ等方弾性体の構成式で表現できることがわかる。

図-5-7 にケース 1~3 において行ったせん断载荷中の応力プロープ試験により得られた弾性ひずみ増分応答を $\Delta p^e - \Delta q^e$ 空間上に示す。全てのケースにおいて、せん断载荷が進むにつれ弾性ひずみ増分が大きくなり、初期状態の等方弾性体に近い応答に比べ異方的になることがわかる。また、どのケースにおいても、ある応力比を超えると弾性ひずみ増分が急激に大きくなっている。これらの傾向は粒状体内部の微視構造の誘導異方性に起因するものと考えられるので、今後、ファブリックテンソルなどの微視構造に関するパラメータや粒状体内部の微視的なエネルギー変化との関連性について考察したいと考えている。また、せん断载荷に伴う弾性マトリックスの変化についても詳細に検討することが今後の課題といえる。

図-8 は同じ応力状態ではあるがせん断履歴の異なる 3 つ

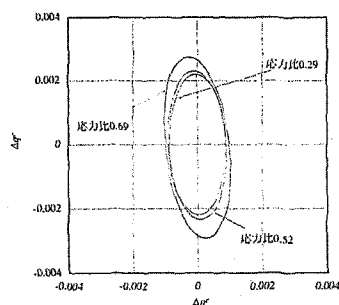


図-6 弾性ひずみ増分応答 (ケース 2)

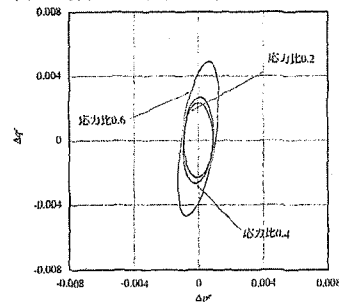


図-7 弾性ひずみ増分応答 (ケース 3)

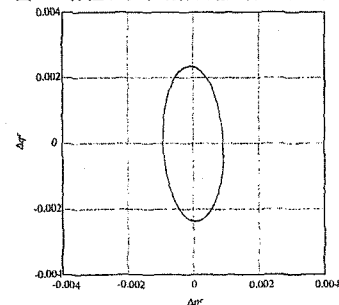


図-8 弾性ひずみ増分応答 (载荷経路の影響)

の場合の応力プロープ試験の結果得られた弾性ひずみ増分応答を示す。同図より、全てほぼ重なっており、せん断履歴が異なっても等しい応力状態であれば同様の弾性挙動を示すことがわかり、弾性マトリックスは履歴に依存せずほぼ応力のみ関数で表現することが可能であると思われる。

4. まとめ

本研究では、粒状材料の弾性変形特性を考察するために数値実験を行った。初期状態はほぼ等方弾性挙動を示すがせん断が進むと弾性挙動が異方的に変化することを示した。また、せん断履歴は弾性挙動に殆ど影響しないことを示した。詳細な考察と構成式の定式化などが今後の課題である。

参考文献

- 金子賢治・豊島一也・熊谷浩二: 均質化理論に基づく粒状体マルチスケール解析法の平面ひずみ問題への拡張, 第 50 回地盤工学シンポジウム論文集, pp.183-190, 2005.
- Kaneko, K., Terada, K., Kyoya, T. and Kishino, Y.: Global-local analysis of granular media in quasi-static equilibrium, *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 40, pp.4043-4069, 2003.