

密度・拘束圧依存性と初期異方性を考慮した砂の変形挙動

東北学院大学工学部 (学) ○久住 雅敏, 千葉 智徳

東北学院大学工学研究科 (学) 三塚 保法

東北学院大学工学部環境建設工学科 (正) 飛田 善雄, 山口 晶

1 はじめに

非線形数値解析による精度のよい予測が必要となり、構成モデルの提案が続いている。解析の実務では簡単で使いやすく、適用性の広い構成モデルが望まれるため、応力の不変量で構成され、パラメータの少ない弾塑性モデルがよく用いられる。しかし、このような不変量に基づくモデルでは材料の等方性を仮定しているため、異方性は表現できない。一方、実地盤では堆積の過程で異方性を持ち、また、載荷に伴っても異方性が変化する。異方性の有無によって応力-ひずみ関係が異なるという実験¹⁾も報告されていることから、異方性は地盤の解析において重要な特性の1つとして考えられる。

砂のような粒状体は粒子長軸の分布によるものと、粒子接点の分布によるものがあり、粒状体の異方性は初期異方性(長軸分布)と応力誘導異方性(粒子接触分布)とに分けて議論することが多い。

本研究では、初期異方性のみを考慮し異方性を表現し構造テンソルを定義した。材料挙動の異方的性質を導入する方法として修正応力法^{2),3)}を用いた。初期異方性を考慮した構造テンソルを構築した。この修正応力法を密度・拘束圧依存性を取り入れた Li and Dafalias(2000)⁴⁾が提案したモデルに導入し、検討することとした。

2 Li and Dafalias(2000)モデルの特徴

Li and Dafalias(2000)⁴⁾は、密度および拘束圧の影響を取り入れており、三軸圧縮単調載荷試験挙動を精度よく表現している。主な特徴として、限界状態の概念、変相線の密度・拘束圧依存性の表現、応力-ひずみ曲線の密度・拘束圧依存性の表現が可能である。

限界状態の概念の定義と密度・拘束圧依存性の表現について説明する。砂を様々な初期間隙比から様々な方法でせん断した場合、最終的に、拘束圧 p' と偏差応力 q は、 $q = Mp'$ で指定される直線上に位置することになり、最終的な状態での間隙比を限界間隙比 e_c と定義

する。この限界間隙比 e_c と拘束圧 p' の関係は一意的に定まるとする概念を限界状態の概念という。

Li and Dafalias(2000)は、状態変数 ψ により密度・拘束圧依存性を表現している。 ψ は以下の様に表現する。

$$\psi = e - e_c = e - \left[e_r - \lambda_c (p' / p_a)^\zeta \right] \quad (1)$$

ここで e_r は $p' = 1 \text{ kPa}$ における限界間隙比、 p_a は大気圧、 λ_c と ζ は物性パラメータである。

3 修正応力法について

内部構造を表現する2階の構造テンソルや構造を特徴付けるベクトルのデиаド積を用いて、釣り合い式とは関係しないという意味での仮想的な応力を修正応力として導入している^{2),3)}。

この修正応力を用いて、材料の異方的性質を構成モデルとして表現することになる。簡単な数学的構成とするために、以下のような便宜的な方法を考えることにする。

1)修正応力空間では、等方体の構成関係が成立する。

2)修正応力を応力に変換して、応力空間で考えたとき、応力ひずみ関係や等方的降伏関数は、修正応力を与える変換マトリクスの中に、内部構造の情報を持つ構造テンソルなどが含まれることにより、異方的性質を表現することになる。

異方性をこのような代数的演算で簡単に表現する方法を、修正応力法と呼んでいる。

修正応力法においての修正応力とは、応力を構造テンソルで線形変換したものと定義され、または内部構造の配置、状態を反映した応力と考えることができる。例えば、Tobita and Yanagisawa²⁾は、粒状体に関する研究より粒子同士の接触面積の分布が異方的であることが示されていることに着目し、次式で定義される修正応力を定義した。

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{\sigma}\mathbf{H} + \mathbf{H}\boldsymbol{\sigma}); \quad T_{ij} = \frac{1}{2}(\sigma_{ik}H_{kj} + H_{ik}\sigma_{kj}) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{H}$ は構造テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力を、 $\mathbf{T}$ は修正応力である。本研究では、式(2)の形で定義される修正応力を用いて定式化を行った。

4 解析結果

図-1,2,3 は異方性を取り入れた Li and Dafalias(2000)モデルを用いた解析結果であり, $q-\gamma$ 関係を示している. H_M と H_m によって定義される異方性の程度を, 0.8 と 1.1(強い構造), 1.0 と 1.0(等方), 1.1 と 0.8(弱い構造)として解析を行っている. それぞれの条件は以下の通りである.

- ・ 図-1 初期間隙比: $e_0 = 0.68$, 初期拘束圧; 1000kPa
経路; 三軸圧縮(軸ひずみ制御)試験
- ・ 図-2 初期間隙比: $e_0 = 0.68$, 初期拘束圧; 1000kPa
経路; 非排水せん断試験
- ・ 図-3 初期間隙比: $e_0 = 0.80$, 初期拘束圧; 1000kPa
経路; 非排水せん断試験

図-1 に比べて図-2, 図-3 の方が, 図-3 に比べて図-2 の方が異方性の影響が顕著に表れた.

5 結論

- 1) 修正応力法を用いて初期異方性を取り入れた Li and Dafalias(2000)モデルは, 異方性によって生じる挙動を表現することができた.
- 2) 三軸圧縮試験に比べて非排水せん断のほうが異方性の影響が顕著に生じた. これは経路による拘束条件に応じて異方性の影響が異なることを示唆している.
- 3) 非排水状態において, 緩い状態に比べて密な状態の方が異方性の影響が大きく生じた.

(参考文献)

- 1) S. Nemat-Nasser and Y. Tobita.: Influence of fabric on liquefaction and densification potential of cohesionless sand, Mechanics of Materials, Vol.1, 43-62, 1982
- 2) Tobita, Y. and Yanagisawa, E.: Modified stress tensors for anisotropic behavior of granular materials, Soils and Foundations, 32, 1, pp.85-99, 1992
- 3) 飛田善雄, 山口晶, 藤井伸晃, 金原瑞男: 工学材料の異方的挙動の簡易な表現方法: 修正応力法の地盤材料への適用, 応用力学論文集 Vol.6, pp.407-418, 2003
- 4) Li, X.S and Dafalias, Y.F.: Dilatancy for cohesionless soils, Geotechnique 50, No4, 449 - 460, 2000

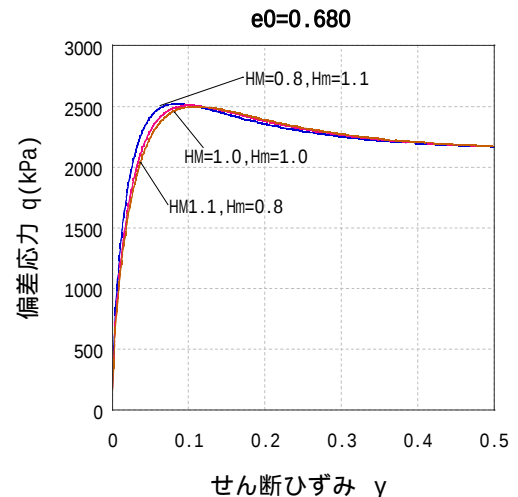


図-1 三軸圧縮試験, $e_0 = 0.680$ での $q-\gamma$ 関係

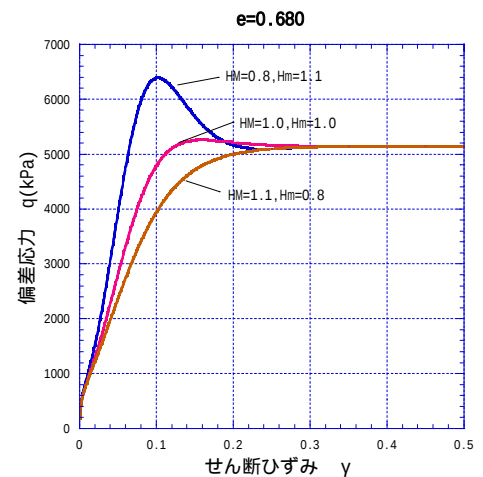


図-2 非排水せん断, $e_0 = 0.680$ での $q-\gamma$ 関係

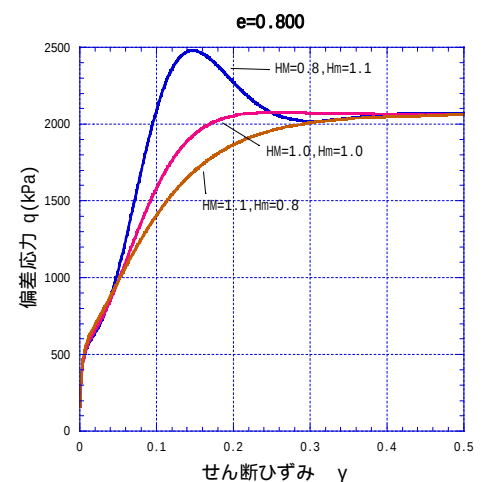


図-3 非排水せん断, $e_0 = 0.800$ での $q-\gamma$ 関係