

III-46 構造変化を考慮した砂の繰返し構成モデルの開発と応用

東北学院大学工学部 学生会員 ○西村 修
 東北学院大学工学部 学生会員 太田 雅彦
 東北学院大学工学部 正会員 飛田 善雄

1. はじめに

砂の構成モデルに関する研究の目標は地盤の応力・変形解析への適用である。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、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、この様な不変量に基づくモデルでは等方硬化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を持ち、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。

材料の挙動は内部構造に依存するので、材料挙動を厳密に表現するには内部構造を考慮する必要がある。しかし土の力学特性を支配する粒子間接点に関係する内部構造は刻々と変化するので、その発展則までを視野に入れると、この様な作業はほとんど不可能である。

比較的簡易に、内部構造に起因する材料挙動の異方の性質を導入する方法として、修正応力法²⁾がある。本研究では、Biares³⁾の研究で、載荷方向に対し接点数の増加が起こる事が示されている点を考慮し、粒子間接点の法線方向の分布によって特徴付けられる応力誘導異方性の発展則を構築する。

2. 修正応力法と構造テンソルについて

修正応力法で用いられる構造テンソルとは、物体の内部構造の変化を考慮した変換を行うテンソルである。

砂の内部構造として、粒子長軸の配向性や粒子接平面の配向性、間隙の形状と配向性などを考慮することができる。ここで、応力誘導異方性を表す構造テンソルは式(1)で定義される³⁾。

$$H_y = (\mathbf{F})_y^{-1} \quad (1)$$

$(\mathbf{F})_y^{-1}$ は式(2)で定義されるコンタクトの逆行列からなる変換テンソルである。

$$F_y = \frac{2}{tr(\mathbf{C})} C_y \quad (2)$$

ここで C_y は粒子間接点方向を表すコンタクトテンソルである。

構造テンソルの座標系は必ずしも応力の座標系との共軸性を有するわけではないので、応力誘導異方性や主応力軸回転時の材料挙動を表現することが可能である。構造テンソルの座標系が応力の座標系と一致した場合、構造テンソルは対称になるので数学的な議論が非常に簡易になるという特徴を持つ。

修正応力法における修正応力とは、応力を構造テンソルで線形変換した応力と定義され、また物性的には内部構造の配置を除去した応力と考えられる。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。

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{\sigma}\mathbf{H} + \mathbf{H}\boldsymbol{\sigma}); T_y = \frac{1}{2}(\sigma_k H_{ky} + H_{ky} \sigma_{ky}) \quad (3)$$

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。

3. 応力誘導異方性の発展則の定式化

Oda⁴⁾ は応力誘導異方性に関する実験を行い、次の関係が成立することを見いだした。

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = C_1 \frac{S_1}{S_3} \quad (4)$$

ここで、 C_1 は定数である。また、構造指標 S_i は構造テンソルの主値 H_i とは逆数の関係にあり、

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = C_1 \frac{H_3}{H_1} \quad (5)$$

すなわち、応力誘導異方性の発展則も式(5)を満足しなければならない。そのため本研究も式(5)を用いている。次に発展則について説明する。

載荷時の負のダイレイタンス領域では、載荷方向に接点数の増加、載荷直交方向には接点数の減少が起こると設定し、発展則の形を次のように定義する。

$$\dot{H}_i^* = h\dot{\sigma}_i \quad h = \frac{tr(\mathbf{T})}{\alpha} \quad (6)$$

ここで、 $\dot{H}_i^*$ は負のダイレイタンス領域での発展則、

α は定数, $\hat{\sigma}_i$ は実応力である.

次に正のダイレイタンシーが発生すると, 載荷方向には式(6)と同じ発展則で与え, 載荷直交方向には式(6)以外に, 式(5)を満たすような大きな粒子接点数の減少があると仮定する. 式(5)を微分したものに式(6)を代入して, 正のダイレイタンシーだけで起こる載荷直交方向の発展則 $\dot{H}_3^\sigma$ について求めると, 以下となる.

$$\dot{H}_3^\sigma = \left(\frac{H_3}{\sigma_1} + \frac{\text{tr}(\mathbf{T})H_3}{\alpha H_1} \right) \hat{\sigma}_1 - \frac{H_3}{\sigma_3} \hat{\sigma}_3 \quad (7)$$

この $\dot{H}_3^\sigma$ の発生により, 正のダイレイタンシー領域での異方的な構造の発達が生現されることになる. よって, 載荷時の載荷直交方向の発展則は $\dot{H}_3 = \dot{H}_3^\epsilon + \dot{H}_3^\sigma$ で表される.

次に, 除荷時は載荷時とは逆に, 載荷方向には粒子接点数の減少, 載荷直交方向には粒子接点数の増加が起こるとし, 発展則の形は式(6)と同じ形と仮定した. しかし, 載荷軸方向に大きな間隙が発生すると考えられる. そこに, 載荷直交方向から圧縮力が発生すると, 構造の崩壊が考えられる. そこで, 修正応力空間で $T_1 = T_3$ となった時, 間隙が塞がれることによるひずみが発生すると考え, 構造ひずみ ϵ^f を加えることにした.

図1は構造テンソルの初期値を1.0とし, 載荷・除荷による構造テンソルの主値の変化を示したものである. 細い実線が載荷方向(H_1)で, 太い実線が載荷直交方向(H_3)である. 横軸は計算回数で, 計算回数404回からが除荷である.

本研究では, 飛田・吉田モデル⁵⁾に修正応力法を導入した.

図2は, 主応力一定試験における, 載荷・除荷時のせん断応力-せん断ひずみ関係で, 細い実線が修正応力, 太い実線が実応力である. この結果より載荷時には大きいせん断応力が発生し, 接点数の増加に伴う強度増加が現れていることが, そして, 除荷時には構造の崩壊によるひずみが生現しているのが表現できていることがわかる.

4. 結論

粒子接点数の変化に伴う異方性の出現を構造テンソルを用いて等方状態の修正応力空間に写像することによって表現した. その結果以下の結論が得られた.

- 1) 粒子接点数に依存する発展則を構築できた.

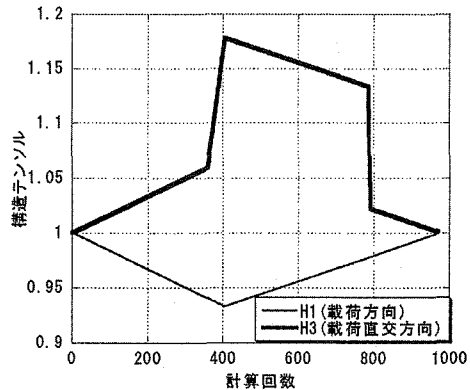


図1 構造テンソルの変化

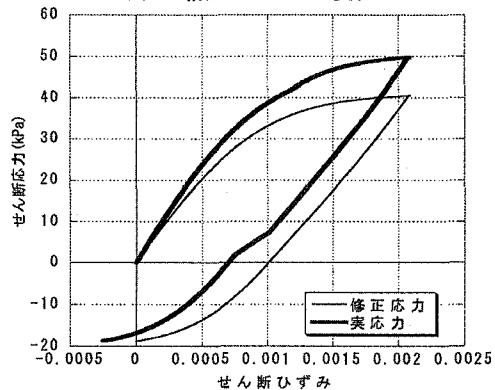


図2 せん断応力-せん断ひずみ関係

- 2) 物性的に満足している発展則を利用し, 応力誘導異方性のみを追及した表現ができた.

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) 社団法人 土質工学会: 粒状体の力学, 社団法人 土質工学会 粒状体力学に関する国内委員会, 1993
- 4) Oda, M.; Fabrics and their effects on the deformation behavior of sand, 埼玉大学基礎工学研究報告特別号, 1976
- 5) Tobita, Y. and Yoshida, N.: An isotropic bounding surface model for cyclic behavior of sand; Limitation and modification, Proc. of Int. Conf. on Prefailure behavior of sands, Sapporo, Balkema, pp.457-462, 1994