

固有異方性を有する地盤に対する FLIP プログラムの適用性検討

上田 恭平*

1. 研究の目的

砂の有する固有（初期構造）異方性は、土質工学的特性に無視できない影響を与えることが報告されている^{例え、¹⁾}。固有異方性の言葉の定義について、誘導異方性との比較から整理すると、例えば要素試験において、固有異方性を持たない供試体に対して任意の方向にせん断を加えたとなると、応力一ひずみ関係といった応答はせん断応力が作用する面の方向に依らず、等しくなる。しかし、せん断された方向への強度は高くなる。このせん断による強度分布の変化を誘導異方性と定義できる。一方、固有異方性を有する供試体に任意方向へのせん断を行った際には、出力される応答はせん断応力が作用する面の方向により異なる。これは固有異方性（粒子配列）の影響であり、誘導異方性と区別して考慮すべきものである。このように、地震時の地盤・構造物系の変形量を高精度に予測するためには、従来から考慮されてきた地盤材料の応力誘導異方性²⁾の影響に加えて、地盤の堆積環境等に依存した固有（初期構造）異方性を適切に考慮する必要がある。本研究は、固有異方性を有する地盤に対する FLIP プログラムの適用性に関して基礎的検討を行うものである。

2. 研究の方法

(1) 中空ねじりせん断試験

砂の構成式において固有異方性の影響を適切にモデル化するためには、まず、固有異方性を有する砂の力学挙動を把握する必要がある。そこで、非排水条件下におけるせん断方向による強度特性が固有異方性によりどのように変化するかを明らかにするため、豊浦砂を用いて中空ねじりせん断試験を実施した。試料は固有異方性の発現が確認されている空中落下法により作成し、飽和過程の後、排水条件下での等方圧密（100kPa）に引き続き、非排水単調せん断を行った。中空ねじり試験におけるせん断過程の载荷は、トルク力、軸荷重、外圧、内圧の4系統により行われるが、本研究ではトルク力と軸荷重のみを変化させ、外圧と内圧が等しい条件で実験を行った。

(2) 固有異方性を考慮するための構成則の改良

FLIP プログラムでは、砂のような粒状体に対する構成則として、応力誘導異方性の影響を考慮できるひずみ空間多重せん断モデル²⁾が用いられている。しかしながら、固有異方性の影響は考慮できないため、本研究では構成則の改良を行った。

まず、連続体に定義されるような粒状体の巨視的応力は、粒子間の接点力のある種の平均によって与えられる。平面内の円形粒子の集合体では、接点力 $\mathbf{P}$ は、接点垂直（もしくは粒子の中心を結ぶ枝）方向の成分 $\mathbf{n}$ およびこれに直交する接線方向成分 $\mathbf{t}$ に分解することができる²⁾。

$$\mathbf{P} = f_n \mathbf{n} + f_t \mathbf{t}, \mathbf{n}^T = (n_1 \ n_2) = (\cos \theta \ \sin \theta), \mathbf{t}^T = (\sin \theta \ -\cos \theta) \quad (1)$$

巨視的な応力は、代表体積要素（体積 V ）における接点力の平均として、以下の通り与えられる。

$$\boldsymbol{\sigma}' = \frac{1}{V} \sum l (f_n \mathbf{n} \otimes \mathbf{n} + f_t \mathbf{t} \otimes \mathbf{n}) \quad (2)$$

ここに、 l : 粒径を表現する枝長さである。ここで上式は、接点密度（単位体積当たりの接点数） m_v 、平均枝長さ $\bar{l}_0$ 、および接点分布関数 $E(\theta)$ を用いて以下のように表すことができる。

$$\boldsymbol{\sigma}' = m_v \bar{l}_0 \left[\int_0^{2\pi} F(\theta - \theta_0) f_n(\theta) E(\theta) \mathbf{n} \otimes \mathbf{n} d\theta + \int_0^{2\pi} F(\theta - \theta_0) f_t(\theta) E(\theta) \mathbf{t} \otimes \mathbf{n} d\theta \right] \quad (3)$$

*京都大学防災研究所・助教

$$\int_0^{2\pi} E(\theta) d\theta = 1, F(\theta - \theta_0) = 1 + a_1 \cos 2(\theta - \theta_0) + a_2 \cos 4(\theta - \theta_0) \quad (4)$$

ここに、 $F(\theta - \theta_0)$ は固有異方性を表現するための関数であり、 a_1, a_2 は異方性の程度（大きさ）を、 θ_0 は異方性の発現する方向を規定するパラメータである。 $\omega = 2\theta$ として式(4)をさらに変形すれば、固有異方性を考慮したひずみ空間多重せん断モデルの基本形が最終的に以下のように与えられる（なお、 q_{Iso} は従来モデルの仮想単純せん断応力 q に相当）。

$$\boldsymbol{\sigma}' = -p\mathbf{I} + \int_0^\pi q \langle \mathbf{t} \otimes \mathbf{n} \rangle d\omega, \langle \mathbf{t} \otimes \mathbf{n} \rangle = \mathbf{t} \otimes \mathbf{n} + \mathbf{n} \otimes \mathbf{t} \quad (5)$$

$$q = F(\omega - \omega_0) q_{\text{Iso}} + q_{\text{Aniso}} \quad (6)$$

$$F(\omega) = 1 + a_2 \cos 2\omega, q_{\text{Aniso}} = -a_1 \cos(\omega - \omega_0) p / \pi$$

3. 得られた成果

中空ねじり試験の結果を、解析結果と併せて図-1 に示す。実験では主応力軸からの異方性角度 α が小さくなると、収縮的な挙動よりも膨張的な挙動が卓越するようであり、同時に破壊線の傾きが大きくなるのがわかる。一方、解析では、異方性角度に依らず、せん断初期において収縮的な挙動が卓越する結果となった。このように実験結果を完全に再現するまでには至っていないものの、異方性角度の違いによる破壊線の傾きの大小関係は適切に表現できているのがわかる。収縮的・膨張的挙動の違いは、構成則におけるダイレイタシーの定式化に依る部分が大きく、今後改良が必要な点であると考えられる。

図-2 には Symes ら¹⁾の実験結果との比較を示す。変相点付近での挙動の表現には改善の余地があるものの、異方性角度による変相領域に至るまでの挙動の違いや、破壊線の傾きの相違等は、提案モデルにより適切に考慮できているものと考えられる。

発表論文

増田達, 上田恭平, 飛田哲男, 井合進: 初期構造異方性を有する砂の非排水せん断挙動特性に関する要素試験と有効応力解析, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016.

参考文献

- 1) Symes, M. J. P. R., Gens, A., Hight, D. W.: Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand, *Geotechnique*, 34(1), 11-27, 1984.
- 2) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K.: Dilatancy of Granular Materials in a Strain Space Multiple Mechanism Model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 35(3), pp.360-392, 2011.

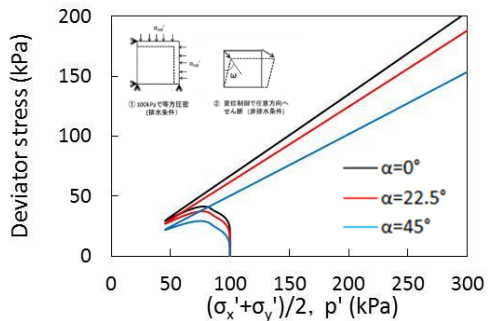
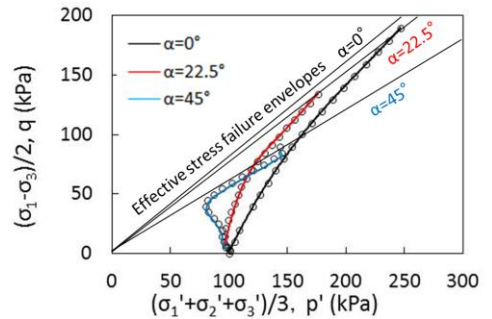


図-1 本実験と解析結果の比較

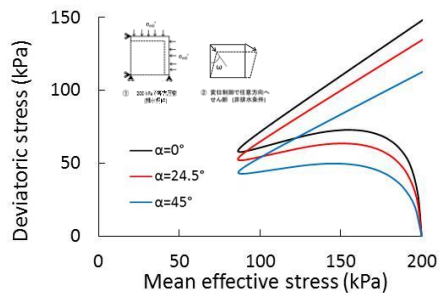
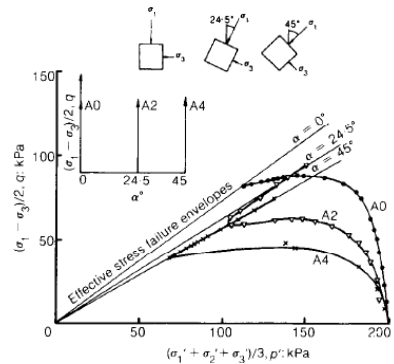


図-2 実験 (Symes ら) と解析結果の比較