

III-218

構造異方性を考慮した砂の弾・塑性構成モデル

大成建設(株) 正員 ○ 瀧 治雄

名古屋工業大学 正員 中井 照夫, 松岡 元

すでに提案されている砂の弾・塑性構成モデル(t_{ij} -sand model)¹⁾は、初期構造に異方性を持たない等方性砂に対する構成モデルである。そこで、本報告では、新たに“構造異方性テンソル”を導入することにより、従来、等方性砂を対象としていた構成モデルを、初期構造に異方性を有する砂にも適用可能な構成モデルに拡張することを試みる。そして、その妥当性を異方性砂特有の変形・強度特性に関して検討した。

1. 構造異方性を考慮した砂の弾・塑性構成モデル

構造異方性を考慮するひとつの方法として、応力テンソルを修正することが試みられる^{2), 3)}。ここでは、応力テンソル σ_{ij} と“構造異方性テンソル” b_{ij} を用いて、次式のような修正された応力テンソルを定義する。

$$\bar{\sigma}_{ij} = (1/2)(\sigma_{ik}b_{kj} + \sigma_{jk}b_{ki}) \quad (1)$$

この修正された応力テンソル $\bar{\sigma}_{ij}$ を用いれば、力学量 t_{ij} は次式のように修正される。

$$\bar{t}_{ij} = \bar{\sigma}_{ik}\bar{a}_{kj} \quad (2)$$

なお、修正されたものにはすべて上付き-を付けることとする。

さて、従来の等方性砂を対象とした構成モデルでは、全ひずみ増分を次式のように与えていた。

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^{p(IC)} + d\epsilon_{ij}^{p(AF)} \quad (3)$$

ここで、異方性砂の変形・強度特性を説明するために、塑性ひずみ増分の等方的な圧縮成分 $d\epsilon_{ij}^{p(IC)}$ 、および関連流動則成分 $d\epsilon_{ij}^{p(AF)}$ をそれぞれ次式で与える。

$$d\epsilon_{ij}^{p(IC)} = \frac{\delta_{ij}}{3} \bar{K} \langle d\bar{p} \rangle \quad (4) \quad d\epsilon_{ij}^{p(AF)} = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \bar{t}_{ij}} \quad (5)$$

ここに、降伏関数 f は次式で与えられる。

$$f = \ln \bar{t}_N + \frac{-\alpha}{1-\alpha} \ln \left| 1 - (1-\alpha) \frac{\bar{K}}{M^*} \right| - \frac{1}{m+1} \ln \left(\frac{W^* \bar{p}}{K_1} + \bar{t}_{N0}^{m+1} \right) = 0 \quad (6)$$

以上の定式化においては、従来の等方性砂を対象としていた構成モデルの応力パラメーターを、“構造異方性テンソル” b_{ij} によって修正された応力パラメーターに置き換えている。なお、関連流動則は t_{ij} 空間ではなく $\bar{t}_{ij}$ 空間で仮定し、ひずみ硬化パラメーターも“塑性仕事相当量” W^* ではなく $W^* \bar{p}$ ($= \int \bar{t}_{ij} d\epsilon_{ij}^p$)を用いている。

2. 異方性砂に対する解析結果の検討

解析は、図-1に示すように、軸対称の異方性を有する砂質土を想定し、その土質パラメーターは既報¹⁾と同一とした。“構造異方性テンソル” b_{ij} については、 $\text{tr}(b_{ij})=3.0$ とし、異方性の程度に応じて

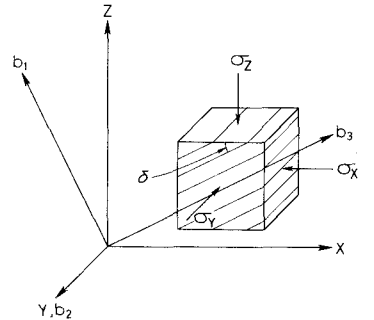


図-1 一般座標系と異方性の主方向

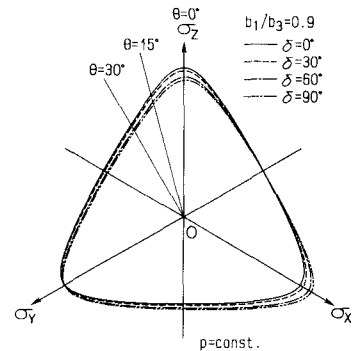


図-2 異方性砂の破壊規準(oct面上)

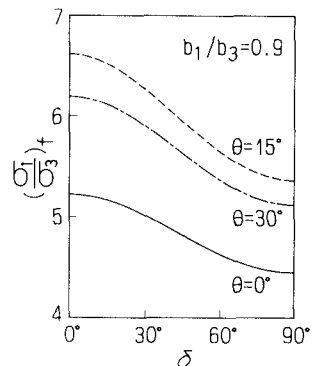


図-3 堆積角度と破壊時の主応力比の関係

b_1/b_3 を決定することにより、異方性砂に対する解析が可能となる。ここでは、 $b_1/b_3=0.9$ として解析を行っている。なお、当然のことながら、 $b_1/b_3=1.0$ とすれば、等方性砂に対する解析となる。

図-2は、種々の堆積角度 δ (δ の定義は図-1参照)を有する異方性砂の破壊規準($\alpha \equiv \tau_s/\tau_N = \text{const.}$)をoct面上に示したものである。さらに、図-3は、図-2で σ_z 軸からなす角度 θ がそれぞれ、 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ の θ -一定経路における、堆積角度 δ と破壊時の主応力比(σ_1/σ_3) $_r$ の関係を示している。これらの図より、堆積角度の違いによって、異方性砂の破壊強度は異なることがわかる^{4), 5)}。

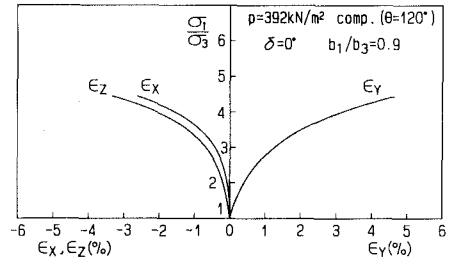
図-4(a),(b)は、それぞれ水平堆積($\delta=0^\circ$)した異方性砂の三軸圧縮($\sigma_y > \sigma_z = \sigma_x$)および三軸伸張($\sigma_z = \sigma_y > \sigma_x$)試験の本提案モデルによる解析結果を、主応力比(σ_1/σ_3) $\sim$ 主ひずみ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$)関係で示したものである。この場合、応力の主軸と異方性の主軸は一致する。図-4(a)より、 $\sigma_z = \sigma_x$ であるにもかかわらず、 $\epsilon_z < \epsilon_x$ (圧縮側を正)となっている。同様に、図-4(b)より、 $\sigma_z = \sigma_y$ であるにもかかわらず、 $\epsilon_z < \epsilon_y$ となっている。このように、提案モデルは、異方性試料特有の変形特性を表現できることがわかる。

図-5は、種々の堆積角度($\delta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)を有する異方性砂の三軸圧縮($\sigma_z > \sigma_x = \sigma_y$)試験の解析結果を、主応力比(σ_1/σ_3) $\sim$ Z方向の鉛直ひずみ(ϵ_z) $\sim$ 体積ひずみ(ϵ_v)関係で示したものである。ダイレタンシーの差異は十分表されていないものの、 δ の違いによる変形特性の差異を解析結果は表現している。また、図-6は、 $\delta=60^\circ$ の場合の解析結果を、主応力比(σ_1/σ_3) $\sim$ X, Y, Z方向の鉛直ひずみ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$)関係で整理したものであり、 $\sigma_x = \sigma_y$ であるにもかかわらず、 $\epsilon_x < \epsilon_y$ となることがわかる。ここで、 $\delta=30^\circ, 60^\circ$ の場合のように、応力の主軸と異方性の主軸が一致しないときには、 ϵ_x および ϵ_z は主ひずみとはならない。つまり、主応力 σ_x および σ_z が作用している面にはせん断ひずみも発生している。

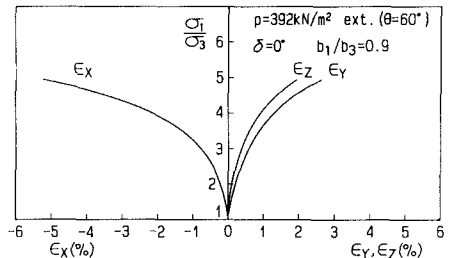
以上、ここでは、従来の等方性土に対する構成モデルを、“構造異方性テンソル” b_{ij} だけを付け加えることにより、異方性土の構成モデルに拡張した。

参考文献

- 1) Nakai(1989):S & F, Vol. 29, No.1 (to appear)
- 2) 佐武(1984):土と基礎, Vol. 32, No. 11, pp.5-12
- 3) 大楨(1982):第37回土木学会年講, III-97, pp.193-194
- 4) Oda et al. (1978):S & F, Vol. 18, No. 1, pp.25-38
- 5) 松岡 他(1984):土と基礎, Vol. 32, No. 11, pp.31-36



(a) 三軸圧縮 ($\sigma_y > \sigma_z = \sigma_x$)



(b) 三軸伸張 ($\sigma_z = \sigma_y > \sigma_x$)

図-4 主応力比 $\sim$ 主ひずみ関係 ($\delta=0^\circ$)

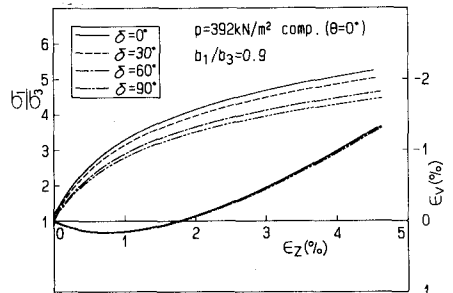


図-5 三軸圧縮 ($\sigma_z > \sigma_x = \sigma_y$) 試験の主応力比 $\sim$ Z方向の鉛直ひずみ $\sim$ 体積ひずみ関係 ($\delta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)

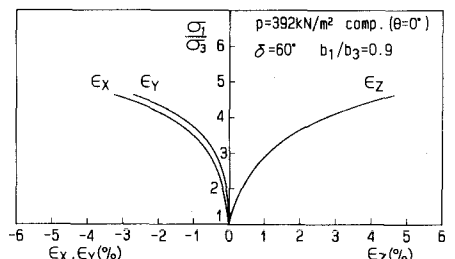


図-6 三軸圧縮 ($\sigma_z > \sigma_x = \sigma_y$) 試験の主応力比 $\sim$ X, Y, Z方向の鉛直ひずみ関係 ($\delta=60^\circ$)