

農林水産省水産工学研究所 大 横 正 紀
不 動 建 設 (株) 松 浦 彰 男

要 旨 正規圧密粘性土の応力～ひずみ関係¹⁾を用いて、排水条件下での正規圧密粘性土の平面ひずみ条件下での挙動の解析結果を示した。この中で、有効応力経路方向を種々に変えた場合と破壊時の内部摩擦角を種々に変えた場合の解析結果を示している。

解析方法 著者は軸対称条件下での Stress Probe 試験結果をもとにした応力～ひずみ関係より、一般応力下での等方正規圧密粘性土の応力～ひずみ関係を求めた。¹⁾ ここでは、この関係を用いて、等方応力状態から平面ひずみ条件のもとにせん断したときの変形挙動を解析する。ここでは主応力状態について考える。文献¹⁾よりひずみ増分は主応力状態では次のように書ける。

$$d\varepsilon_i = C_{1i} d\eta + C_{2i} d(\cos 3\theta) + C_{3i} dp \quad (i = x, y, z) \quad (1)$$

$$\text{ここに, } C_{1i} = C_p \left[\frac{\Delta e_f}{3(1+e)M_c} + h_p \frac{\partial g_p}{\partial p} \frac{d\eta_c}{d\psi} \left\{ \frac{1}{p} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial q}{\partial \sigma_i'} + \frac{\partial \psi}{\partial (\cos 3\theta)} \frac{\partial (\cos 3\theta)}{\partial \sigma_i'} \right\} \right] \frac{d\eta_c}{d\psi} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \quad (2)$$

$$C_{2i} = C_p \left[\frac{\Delta e_f}{3(1+e)M_c} + h_p \frac{\partial g_p}{\partial p} \frac{d\eta_c}{d\psi} \left\{ \frac{1}{p} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial q}{\partial \sigma_i'} + \frac{\partial \psi}{\partial (\cos 3\theta)} \frac{\partial (\cos 3\theta)}{\partial \sigma_i'} \right\} \right] \frac{d\eta_c}{d\psi} \frac{\partial \psi}{\partial (\cos 3\theta)} \quad (3)$$

$$C_{3i} = C_\eta \left[\frac{\lambda - \kappa}{3(1+e)p} + h_\eta \frac{\partial g_\eta}{\partial \eta} \frac{d\eta_c}{d\psi} \left\{ \frac{1}{p} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial q}{\partial \sigma_i'} + \frac{\partial \psi}{\partial (\cos 3\theta)} \frac{\partial (\cos 3\theta)}{\partial \sigma_i'} \right\} \right] + \frac{\kappa}{3(1+e)p} \quad (4)$$

式中、 C_p 、 C_η はそれぞれ塑性ひずみの p 成分、 η 成分が載荷、除荷過程のとき、1 および 0 となる。また、 p 、 q 、 θ はそれぞれ 3 次元応力状態での平均有効主応力、せん断応力、有効応力ベクトルの π 面上での偏角である。¹⁾ $\eta = q/p$ である。 h_k 、 g_k ($k = p$ または η) は塑性成分の k 成分に対する硬化関数および塑性ポテンシャルである。¹⁾ η_c 、 M_c は三軸圧縮下での η 、 M である。式(1)～(4)は軸対称下で得られた応力～ひずみ関係を松岡、中井²⁾の空間滑動面の概念を用いて一般化したものである。式(1)は式(5)のように書ける。ここに、式(6)の関係がある。このとき、排水条件下で変位を拘束する方向のひずみを ε_y とし ($d\varepsilon_y = 0$)、 x 、 z 方向の有効応力が $\sigma_x' \rightarrow \sigma_x' + d\sigma_x'$ 、 $\sigma_z' \rightarrow \sigma_z' + d\sigma_z'$ と変化する場合を考える。このとき、式(5)より式(7)を得る。

$$d\varepsilon_i = \left\{ C_{1i} \frac{\partial \eta}{\partial \sigma_i'} + C_{2i} \frac{\partial (\cos 3\theta)}{\partial \sigma_i'} + C_{3i} \frac{\partial p}{\partial \sigma_i'} \right\} d\sigma_j' = F_{ij}' d\sigma_j' \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial \sigma_j'} &= \frac{1}{3}, \quad \frac{\partial q}{\partial \sigma_j'} = \frac{3s_j}{2q}, \quad \frac{\partial \eta}{\partial \sigma_j'} = \frac{1}{p} \left(\frac{\partial q}{\partial \sigma_j'} - \frac{\eta}{3} \right) \\ \frac{\partial (\cos 3\theta)}{\partial \sigma_j'} &= 9 \left\{ 3t_j - q(\cos 3\theta) s_j \right\}, \quad s_j = \sigma_j' - p, \\ t_j &= s_j^2 - (s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)/3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

解析結果と考察 式(7)を用いて数値計算を行ない、排水条件下での正規圧密粘性土の平面ひずみ下での挙動の解析を行なった。計算方法としては、 σ_x' 、 σ_y' 、 σ_z' および $d\sigma_x'$ 、 $d\sigma_z'$ を与え、 $\sigma_x' \rightarrow \sigma_x' + d\sigma_x'/2$ 、 $\sigma_z' \rightarrow \sigma_z' + d\sigma_z'/2$ として F_{ij} の値を求め、この F_{ij} を用いて、 $\sigma_x' \rightarrow \sigma_x' + d\sigma_x'$ 、 $\sigma_z' \rightarrow \sigma_z' + d\sigma_z'$ のときの $d\varepsilon_x$ 、 $d\varepsilon_z$ 、

$$\begin{pmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_z \\ d\sigma_y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{F_{11}F_{22} - F_{12}F_{21}}{F_{22}} & \frac{F_{13}F_{22} - F_{12}F_{23}}{F_{22}} \\ \frac{F_{31}F_{22} - F_{32}F_{21}}{F_{22}} & \frac{F_{33}F_{22} - F_{32}F_{23}}{F_{22}} \\ -\frac{F_{21}}{F_{22}} & -\frac{F_{23}}{F_{22}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\sigma_x' \\ d\sigma_z' \end{pmatrix} \quad (7)$$

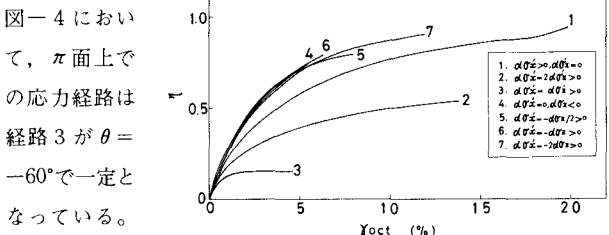
dey' の値を計算することとした。解析に用いた各係数値を表一に示す。表中、 e_a は $e \sim \log p$ 直線における $p = 1 \text{ kg/cm}^2$ での間げき比である。また、他の係数値については文献¹⁾で示している。

表一 解析に用いた係数値

e_a	0.9882	A'	21
Δe_f	0.043	D	0.5
λ	0.106	ϕ'	25.4°
κ	0.0187	$(M_c = 1.0)$	

まず、図一に示した応力経路に対して

解析した結果を示す。図二に各応力経路での η と八面体面上のせん断ひずみ γ_{oct} の関係を、図三に η と体積ひずみ v との関係を、また、図四に π 面上での応力経路を示している。図二、三より、 $\eta \sim \gamma_{oct}$ 曲線、 $\eta \sim v$ 曲線は、ほぼ図一に示した応力経路の順になっている。



図二 $\eta \sim \gamma_{oct}$ 関係

他の経路につ

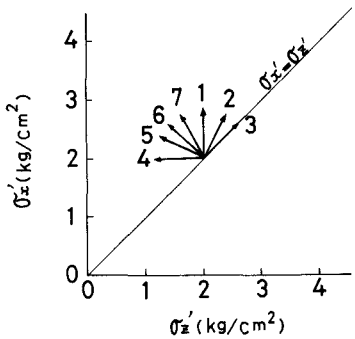
いては、図一の応力経路の勾配の順に偏角 θ が大きくなっている。普通に行なわれる経路1では最終的に $\theta \approx 10^\circ$ である。

つぎに、他の係数値は表一に示したものと同じとして、破壊時の内部摩擦角 ϕ' のみを変化させた時の解析結果についてみる。図五は π 面上での応力経路である。図から分かるように ϕ' の大きい程、応力経路の偏角 θ は小さくなっている。これは、 ϕ' が大きい程、塑性ポテンシャル曲線の円からのゆがみが大きくなっていることによると思われる。図六中の実線は、各 ϕ' の解析結果を等方応力状態からの応力増分で示したものである。図から分かるように、 ϕ' の増加とともに θ に $\Delta \sigma'_y \sim \Delta(\sigma'_x + \sigma'_z)$

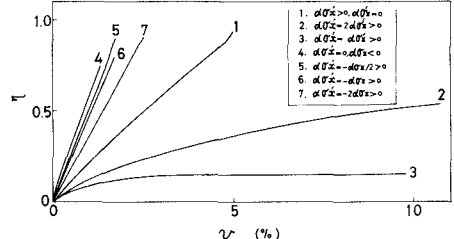
$/2$ 曲線の勾配は小さくなっている。Bishop³⁾、その他の研究者により、平面ひずみ試験中には $\sigma'_y / (\sigma'_x + \sigma'_z) = \frac{1}{2} \cos^2 \phi'$ が成立することが示されている。ここでは等方応力状態からのせん断を考えているので、

$$\frac{\Delta \sigma'_y}{\Delta(\sigma'_x + \sigma'_z)} = \frac{1}{2} \cos^2 \phi' \quad (8)$$

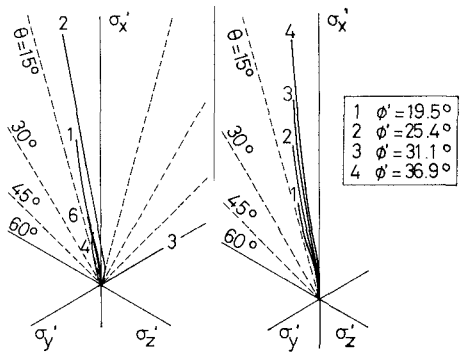
式(8)の関係を破線で示した。解析結果と比較して、同じ傾向を示しているが、勾配がかなり異っている。



図一 解析に用いた応力経路

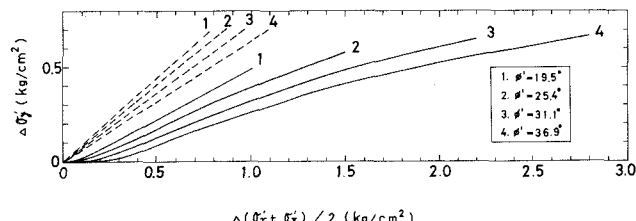


図三 $\eta \sim v$ 関係



図四 応力経路

図五 ϕ' の影響



図六 $\Delta \sigma'_y \sim \Delta(\sigma'_x + \sigma'_z)/2$ 関係 (実線: 解析結果)

謝辞 本研究は京都大学防災研究所で行なわれたものである。御指導頂いた同研究所、柴田徹教授、足立紀尚助教授に対し深謝の意を表します。

参考文献 1)大横(1979):第14回土質工学研究発表会講演集(投稿中), 2)松岡, 中井(1974):土木学会論文報告集, No.232, pp. 59~70. 3)Bishop (1966): Geotech. Vol. 16, pp. 91~130.