

長崎大学 正会員 〇棚橋 由考
新技術開発 K.K. 正 藤原 茂

1. まえびき

著者は地盤の応力変形解析結果に基いてのダイレタンシー特性を正確に反映させるべく、一連の研究を続けている。その主旨は、負荷をうけて生じる工管材料の後発異方性を評価することにより、土のダイレタンシーを表現しようとするものである。ここに後発の異方性を呈すると、大幅に増える変形係数は室内実験でどのように評価するか、また地盤の変形解析に必要な応力ミズミテンソルの増分関係をいかにして誘導するかの問題となる。上記の2つの問題を著者なりに解決し、その一部は地盤の変形解析も含めて既に報告した。⁽¹⁾ 本報告では、湾曲した応力径路試験を行ない、計算値と実測値の比較により、先に与えた3軸の異方増分関係の検証を行なった。あわせて、主応力一定試験、平面ミズミ・軸対称側圧一定試験の挙動を計算し、従来報告されている変形特性を説明し得るかを吟味することにより検討を加えた。

2. 異方性とダイレタンシー

等方性・異方性の正八面体応力ミズミ増分関係は、それぞれ(1)、(2)式で与えられる。

$$\text{等方性: } \begin{bmatrix} d\varepsilon_v \\ d\delta_{oct} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/K & 0 \\ 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\sigma_m' \\ d\tau_{oct} \end{bmatrix} \quad (1) \quad \text{異方性: } \begin{bmatrix} d\varepsilon_v \\ d\delta_{oct} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\sigma_m' \\ d\tau_{oct} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに $d\varepsilon_v$, $d\delta_{oct}$ はそれぞれ、体積ミズミ増分、正八面体せん断ミズミ増分、 $d\sigma_m'$, $d\tau_{oct}$ はそれぞれ、静水圧応力増分、正八面体せん断応力増分である。(1)式は $d\tau_{oct}$ が $d\varepsilon_v$ に寄与しないことを示しており、等方増分関係ではダイレタンシーを表現しえないことを意味する。一方(2)式は $d\tau_{oct}$ が $d\varepsilon_v$ に寄与することを示しており、異方増分関係によりダイレタンシーを表現できることは明らかである。

3. S_{ij} の決定

i) 一般論: S_{11} , S_{21} の関数形を求めるには、Fig.1(a)の径路をとる等方圧縮試験($d\tau_{oct}=0$)を行ない、結果をFig.1(b),(c)のようにプロットして関数近似すればよい。 S_{12} , S_{22} も同様に Fig.1(d)の径路をとる平均主応力一定試験($d\sigma_m'=0$)を行ない、結果をFig.1(e),(f)のように整理して得られる。一般論としては上述のとおりだが、実際に S_{ij} を決定するには多くの試験を行なわねばならず、またその関数近似も、必ずしも容易ではない。したがって従来いわれている次の4つの仮定を設け、所望試験の簡略化を試みる。

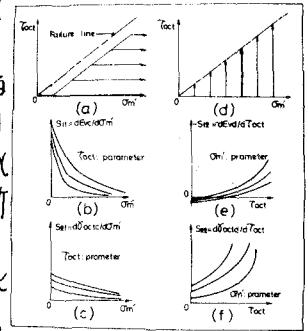


FIG.1 Demanded Stress Paths and Methods of Plotting to Determine the Function $S_{ij}(\sigma_m', \tau_{oct})$

1. $\varepsilon_v|_{d\tau_{oct}=0} = \varepsilon_{vc} = \varepsilon_{vc}(\sigma_m')$
 2. $\varepsilon_v|_{d\sigma_m'=0} = \varepsilon_{vd} = \varepsilon_{vd}(\tau)$
 3. $\delta_{oct}|_{d\tau_{oct}=0} = \delta_{octc} = 0$
 4. $\delta_{oct}|_{d\sigma_m'=0} = \delta_{octd} = \delta_{octd}(\tau)$
- *ここに τ は正八面体応力比 τ_{oct}/σ_m' であり、 ε_{vc} , ε_{vd} , δ_{octc} , δ_{octd} は、それぞれ (3)式で定義される。

(3)式を認めると、Fig.1(a),(d)の太実線に示した、わずか2つの径路をとる軸対称試験を行えば、 $S_{ij}(\sigma_m', \tau)$ を決定することとができる。 S_{ij} は(2),(3)式から、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} S_{11} &= S_c = d\varepsilon_{vc}/d\sigma_m' = d\varepsilon_{vc}(\sigma_m')/d\sigma_m' = \varepsilon_{vc}'(\sigma_m') \\ S_{12} &= S_d = d\varepsilon_{vd}/d\tau_{oct} = d\varepsilon_{vd}(\tau)/(\sigma_m' d\tau) = \varepsilon_{vd}'(\tau)/\sigma_m' \\ S_{21} &= S_{dis} = d\delta_{octc}/d\sigma_m' = 0 \\ S_{22} &= S_s = d\delta_{octd}/d\tau_{oct} = d\delta_{octd}(\tau)/(\sigma_m' d\tau) = \delta_{octd}'(\tau)/\sigma_m' \end{aligned} \quad (4)$$

*ここに S_c , S_d , S_s は正八面体異方変形係数であり、それぞれ、圧縮、ダイレタンシー、せん断ミズミ各増分のフレキシビリティを意味する。

ii) 具体例: (3)式の具体例として(5)式で与えられる豊浦砂($G_s=2.65$, $U_c=1.46$)を意味する

の正八面体応力 σ_m と τ の関係⁽²⁾を用いる。

$$\begin{aligned} \epsilon_{vc}(\sigma_m) &= \sigma_m' / (\lambda_1 + \lambda_2 \sigma_m') \\ \delta_{oct}(\tau) &= \lambda_1 \tau / (1 - \lambda_2 \tau) \end{aligned} \quad , \quad \begin{aligned} \epsilon_{vd}(\tau) &= \begin{cases} -[M_1 \lambda_1 \tau / (1 - \lambda_2 \tau) + M_2] : \tau > \tau_{cr} \\ 0 : \tau \leq \tau_{cr} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_1, \lambda_2, M_1, M_2$ は豊浦砂の非線形パラメータで、全て初期崩壊比 e_0 の1次式で与えられる。 τ_{cr} はダイレタンシー発生時の正八面体応力であり、Fig. 2のD-lineに相当する。(5)式を(4)式に代入して、豊浦砂の正八面体変形率 ϵ_v の係数(後変異性の評価式)が2次式で与えられる。

$$\begin{aligned} S_c &= \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2 \sigma_m')^2 \\ S_s &= \lambda_1 / \sigma_m' (1 - \lambda_2 \tau)^2 \end{aligned} \quad , \quad \begin{aligned} S_d &= \begin{cases} -M_1 \lambda_1 / \sigma_m' (1 - \lambda_2 \tau)^2 : \tau > \tau_{cr} \\ 0 : \tau \leq \tau_{cr} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式を(2)式に代入したのが、豊浦砂の正八面体増分関係である。

4. 3軸の異方増分関係

先に与えた3軸(主応力・主ひずみ)の増分関係を再掲する。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} d\epsilon_1 \\ d\epsilon_2 \\ d\epsilon_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{23} \\ C_{31} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{12} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\sigma_3 \end{bmatrix} \quad (7) \\ C_{11} &= (S_c + 3S_s) / 9, \quad C_{23} = (2S_c - 3S_s) / 18 \\ C_{22} &= (S_c + 3S_s) / 9, \quad C_{31} = (\quad) + 2/2 S_d / 18 \\ C_{33} &= (S_c + 3S_s) / 9, \quad C_{12} = (2S_c - 3S_s) / 18 \end{aligned}$$

豊浦砂の後変異性の特性は(6)式と(7)式に基づいて吟味できるが、細部の都合で省略する。 $\tau \leq \tau_{cr}$ でダイレタンシーがゼロの応力域C(Fig. 2)では、 $S_d = 0$ から(7)式は $C_{11} = C_{22} = C_{33} = (S_c + 3S_s) / 9$, $C_{23} = C_{31} = C_{12} = (2S_c - 3S_s) / 18$ となり、等方性の増分関係となる。一方 $\tau > \tau_{cr}$ の応力域D(Fig. 2)では、膨張のダイレタンシーが生じ、 $S_d \neq 0$ となり、異方弾塑性の増分関係となり、ひずみの応力依存性が考慮できる。(7)式に示すように、3軸の異方変形率 ϵ_{ij} ($i, j = 1 \sim 3$)は、 S_c, S_s, S_d の代数和で与えられ、更に σ_m' と e_0 の関係式である。

5. 検証

(7)式に与えた増分関係の妥当性を、計算値と、実験値または従来報告されている特性と比較することにより検討を加えた。Fig. 3は、主応力比一定試験の計算値、Fig. 5は、Fig. 4に示した2つの経路に沿うひずみ増分の計算値と実験値、Fig. 6は、平面ひずみと軸対称の側圧一定試験の計算値である。検討はFig. 3~6に則して会場で報告する予定に本一例を示すと、例えばFig. 3からは(7)式が、El-Sohby⁽³⁾により報告された主応力比一定試験における砂の変形特性をよく表現しているのがわかる。松岡⁽⁴⁾は正八面体面に対する相等のSMP面の優位性を示す論拠の1つに、正八面体面では、主応力比一定試験の挙動を説明できないことを掲げているが、Fig. 3は、松岡の論拠を支持していない。

6. あとがき

現在、(3)式に示した4つの仮定の再検討と、本研究に沿った粘性土の異方弾塑性増分関係の定式化を試みている。いずれも機会を改めて報告したい。

引用文献: (1) 棚橋: 土木学会講演要録, PP.145-166, 1977, (2) 棚橋: 長崎大学工学部研究報告第6号, PP.103-112, 1975
3) M.A. El-Sohby: Proc. 7th. Int. Conf. on SMFE, 1973, Moscow, (4) 松岡・中井: 京大防災研年報, 17号B, PP.1-15, 4冊, 1974

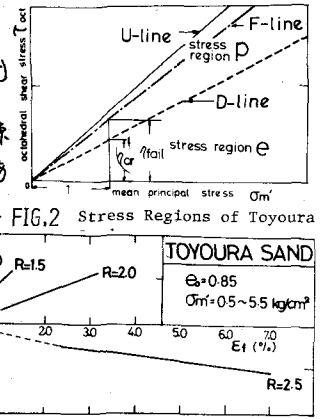


FIG. 2 Stress Regions of Toyoura Sand

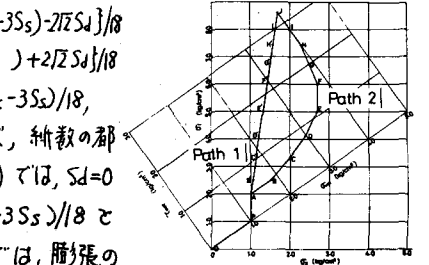


FIG. 3 Calculated Values of ϵ_1 and ϵ_v under Constant Stress Ratio Test ($\sigma_1/\sigma_3 = R$)

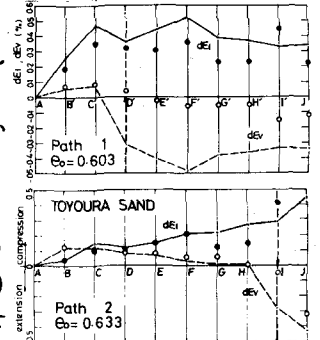


FIG. 4 Adopted Stress Paths to Verify Incremental Stress-Strain Relationship of Toyoura Sand

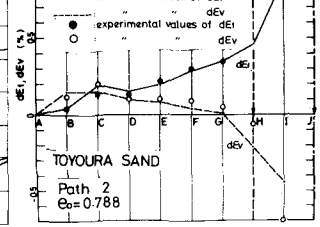


FIG. 5 Calculated and Observed Values of Strain Increment

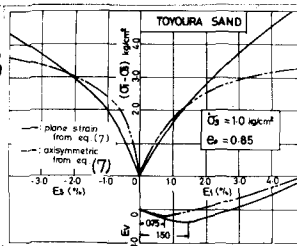


FIG. 6 Calculated Stress-Strain Behaviour of σ_3 -Const. Comp. Test under both Plane Strain and Axisymmetric Condition