

要旨: 本報告は、飽和粘土のダイレタンシー特性を調べる目的で通常行われる応力制御式排水せん断試験が実際には部分排水条件下の分段フリープ試験である、この立場から解析を進めたのである。その結果、飽和粘土の構造骨格の粘塑性に起因する時間依存ダイレタンシー特性のみを実質的に観測しうる時間領域の推定式を提示している。

1. 解析法の概要

(a) 土要素の構成関係: 飽和粘土の構造骨格の構成式としては筆者の提案する弾・粘塑性モデル¹⁾を用い、土中水の流動を規定する特性式としてはダルシー則を採用した。本解析に用いた土質パラメータ値は、九谷粘土を念頭において、つぎのように設定した: $\lambda = 0.169$, $K = 0.030$, $D = 0.0591$, $\phi_0 = 136.185/\text{cm}^2$, $\alpha = 0.0020$, $\phi_0 = 0.911$, $\rho_0 = 2.185/\text{cm}^2$, $\phi_0 = 1.6185/\text{cm}^2$, $\dot{\phi}_0 = 1.5 \times 10^{-6} \text{ min}^{-1}$, $\lambda_R = 0.169$, $\rho_0 = 7.5 \times 10^{-7} \sim 7.5 \times 10^{-9} \text{ cm/min}$.

(b) 三軸供試体モデル: 本解析では、初期半径 $a_0 = 1.7 \text{ cm}$ の円柱状供試体の上下端が、どこに滑らかで剛な不透水性の載荷板とベDESTALに接するものとし、供試体の側面はフィルター紙とゴム膜を介して液圧の作用を受けるものとしている。ただし解析の便宜上、フィルター紙とゴム膜の変形抵抗は無視し、かつフィルター紙の排水効率を100%としている。

(c) 有限要素メッシュ: 項目(b)に述べたことから予想されるところ、本解析で対象とする三軸供試体の変位速度と間隙水圧の分布形はつぎのようになる²⁾

$$u_r = g_1(r, t), \quad u_z = g_2(z) \cdot \frac{r - z}{R}, \quad p_w = g_3(r, t) \quad (1)$$

ここに r と z は円筒座標、 t は経過時間、 R は供試体の高さであり、 $g_1(\cdot)$, $g_2(\cdot)$, $g_3(\cdot)$ は、それぞれの引数の未知関数である。

本解析では式(1)にかんがみ、 r 軸方向へののみ5分割の有限要素分割を行っている。なお供試体の高さとしては、要素のアスペクト比を抑えるために $R_0 = 1.0 \text{ cm}$ を採用している。

(d) 剛性板を介したフリープ負荷に対する計算手法: 本解析では、平均有効主応力 $\bar{\sigma}_1$ 及び主応力差 $\bar{\sigma}_2$ のことで *pre-shear* を受けた試料に対し、剛性板を介して供試体の上面にフリープ荷重増分を印加する一方、平均主応力 σ_m の値が $\bar{\sigma}_1$ にどまりように所定量だけ側圧を減少させる形式の排水三軸フリープ試験を想定している。

したがってこの場合には、供試体の上面で応力と変位に関する境界条件を同時に満足させることが必要になるので、プログラム上、若干の工夫を要する。以下、このことについて簡潔に紹介しよう。

いま説明の便宜上、4節点をとつ1個の長方形要素を考え、節点における自由度を仮に r 軸方向の変位増分 Δu_r のみとすると、通常の問題では未知数は Δu_{r1} , Δu_{r2} , Δu_{r3} , Δu_{r4} の4個になる。しかるに、節点1, 2が剛性板を介して r 軸方向にフリープ荷重増分 ΔF を受ける場合には、 $\Delta u_{r1} = \Delta u_{r2}$ であることは自明であるが、その値自体は未知である。また対応する節点 θ 増分についても、 $\Delta f_1 + \Delta f_2 = \Delta F$ であることは自明であるが、その分担率は未知である。そこで本解析では、 Δf_1 , Δf_2 及び剛性板の変位増分 Δp を付加的な未知変数として、つぎのように剛性方程式を組み立てる手法³⁾を採用している。

$$\begin{bmatrix} K_{11} & -1 & K_{12} & 0 & 0 & K_{13} & K_{16} \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ K_{21} & 0 & K_{22} & -1 & 0 & K_{23} & K_{26} \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ K_{31} & 0 & K_{32} & 0 & 0 & K_{33} & K_{36} \\ K_{61} & 0 & K_{62} & 0 & 0 & K_{63} & K_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_{r1} \\ \Delta f_1 \\ \Delta u_{r2} \\ \Delta f_2 \\ \Delta p \\ \Delta u_{r3} \\ \Delta u_{r4} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta F \\ 0 \\ \Delta f_2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ただし式(2)中の K_{ij} , $4f_3$ 及 $2/4f_4$ は、通常の有限要素手法によって定式化される剛性行列と節点力増分であり、既知量である。

以下の解析ではさらに軸方向の変位増分及び要素間隙水圧を未知数として加わてくるが、考え方は基本的には同一である。

2. 結果と考察

σ_m —一定の排水フリーブ試験の目的は、構造骨格自体の粘塑性に起因する時間依存ダイレタンシー特性を見出すことであろう。そこで、実験時に測定されるダイレタンシー量 $\frac{V_0-V}{V_0}$ の経時変化特性に及ぼす土要素の透水性の影響を調べた結果を図-1に示す。図中の実線は、ダイレタンシーに関するintrinsic curveで、次式のように表わされる¹⁾

$$\frac{V_0-V}{V_0}(t) = \alpha \cdot \ln \left[1 + \frac{\dot{\epsilon}_0 \cdot t}{\alpha} \exp \left\{ \frac{D \cdot (8/p_0 - 8.0/p_0)}{\alpha} \right\} \right] \quad (3)$$

ここに α は二次圧縮速度、 D はダイレタンシー係数²⁾、 $\dot{\epsilon}_0$ は規準体積ひずみ速度である。

図-1において、透水係数 $k_0 = 7.5 \times 10^{-9}$ cm/min のときでは観測ダイレタンシー曲線はintrinsic curveから相当かけはなれていることがわかる。そして $k_0 = 7.5 \times 10^{-8}$ cm/min の場合には、長時間領域において実質的に観測ダイレタンシー曲線がintrinsic curveと一致していることよみえよることがわかる。

さて、観測ダイレタンシー曲線が実質的にintrinsic curveと一致しはじめる経過時間の値を t_d と定義すると、 t_d に及ぼす土要素の透水性の影響は表-1のようにまとめることができ。そして、圧密における時間係数の定義を参考にして、 t_d に関する一般式を推定してみると、つぎのようになる。

$$t_d = 0.75 \alpha_0^2 / c_{v0}, \text{ ただし } c_{v0} = \frac{k_0 \cdot \sigma_{v0}^2 \cdot (1+e_0)}{\lambda \cdot \gamma_w} \quad (4)$$

ここに α_0 は供試体の初期半径、 σ_{v0} はpre-shear時の鉛直有効応力、 λ は圧縮指数である。

また興味深いことは、 $t = t_d$ なる時点において供試体内に残留している間隙水圧の値は、本解析の場合、 0.03 kgf/cm²以下であり、対応する非排水フリーブ試験において発生するであろう間隙水圧値 $(p_w)_u = 0.36$ kgf/cm²の10%以下にほどまることである(図-2参照)。

参考文献

- 1) Seraguchi (1977), Proc. 9th ICSMFE, Vol. 1.
- 2) Seraguchi, Nishida & Kanai, Soils and Foundations (to be appeared).
- 3) 田村・関根 (1979), 土木学会関西支部第24次講演会, III-38.
- 4) 柴田 (1963), 京都大学防災研究所年報.

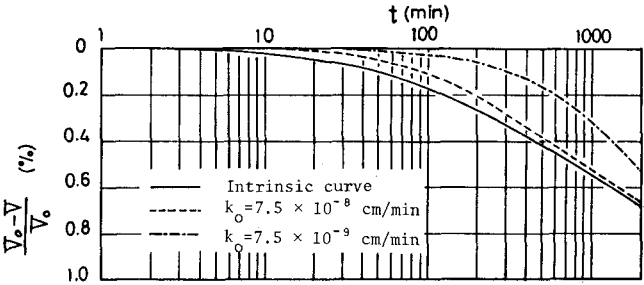


図-1 ダイレタンシーの時間依存性を示す計算曲線
($48 = 0.2$ kgf/cm²; $p_0 = 2.0$ kgf/cm², $8_0 = 1.6$ kgf/cm²)

表-1 t_d に及ぼす透水性の影響

Run No.	k (cm/min)	t (min)	U* (%)
1	7.5×10^{-9}	-	-
2	7.5×10^{-9}	800	95
3	1.5×10^{-7}	400	95
4	3.0×10^{-7}	200	94
5	7.5×10^{-7}	80	94

* $t = t_d$ の時点における観測ダイレタンシー量のintrinsic valueに対する割合

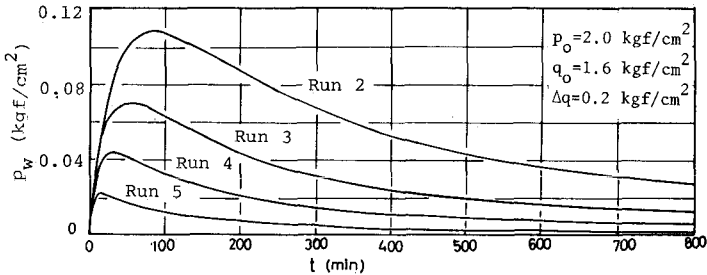


図-2 排水フリーブ試験時に供試体中心部に発生する間隙水圧