

名古屋工業大学

正員。松岡 元

〃

学生員 古川 一吉

〃

学生員 大西 俊之

過剰間げき水圧の消散時間が無視できる砂を試料として、せん断時(平均主応力一定)および圧密時(主応力比一定)のクリープ試験を行ない、空間滑動面(SMP)¹⁾に基づいて一般的な応力・ひずみ・時間関係式を誘導したので報告する。

1. 応力・ひずみ・時間関係式の誘導

土の変形は、等方圧密成分を除けば、せん断、異方圧密にかかわらず、方向性をもった土粒子間の相対ズレという同様のメカニズムに従って生じるものと考えられる。²⁾

主ひずみ増分ベクトルのSMPに平行な成分、垂直な成分をそれぞれ $d\delta_{SMP}^*$, $d\epsilon_{SMP}^*$ と表記すれば、土粒子間の相対ズレに基づく δ_{SMP}^* とSMP上のせん断・垂直応力比 $\tau_{SMP}/\sigma_{SMP} \equiv X$ の間には次のような関係が成立する。²⁾

$$\delta_{SMP}^* = \delta_0^* \cdot \left\{ \exp\left(\frac{X - \mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) - \exp\left(\frac{-\mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) \right\} \quad \text{-----(1)}$$

ここに、 μ^* , μ^* , δ_0^* は土質パラメータであるが、特に δ_0^* は粒子構造に関係するパラメータと考えられ、時間 t や平均主応力 σ_m との間に次に示す関係が成り立つことが実験により確かめられている。^{2), 3)}

$$\delta_0^*(t) = \delta_{00}^* + a_0 \cdot \log_{10} \frac{t}{t_0} \quad \text{-----(2)}$$

$$\delta_{00}^*(\sigma_m) = \delta_{00}^* + C_d^* \cdot \log_{10} \frac{\sigma_m}{\sigma_{mb}} \quad (t=t_0) \quad \text{-----(3)}$$

ここに、 δ_{00}^* は $t=t_0$ (クリープの終極時間) での δ_0^* , δ_{00}^* は $\sigma_m = \sigma_{mb}$ (基準とする平均主応力) での δ_{00}^* を意味し、 a_0 , C_d^* はパラメータである。したがって、 δ_{SMP}^* は X , σ_m , t の関数と考えられ、その全微分をとれば次式を得る。

$$d\delta_{SMP}^* = \frac{\partial \delta_{SMP}^*}{\partial X} \cdot dX + \frac{\partial \delta_{SMP}^*}{\partial \sigma_m} \cdot d\sigma_m + \frac{\partial \delta_{SMP}^*}{\partial t} \cdot dt \quad \text{-----(4)}$$

式(4)の右辺第1項を $d\delta_{SMP}^{XS}$, 第2項を $d\delta_{SMP}^{XC}$, 第3項を $d\delta_{SMP}^{XT}$ と表記すれば、式(1), (2), (3)より、

$$d\delta_{SMP}^{XS} = \frac{\delta_{00}^*}{\mu^* - \mu^*} \cdot \exp\left(\frac{X - \mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) \cdot dX \quad (t=t_0) \quad \text{-----(5)}$$

$$d\delta_{SMP}^{XC} = 0.434 \cdot C_d^* \cdot \left\{ \exp\left(\frac{X - \mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) - \exp\left(\frac{-\mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) \right\} \cdot \frac{d\sigma_m}{\sigma_m} \quad (t=t_0) \quad \text{-----(6)}$$

$$d\delta_{SMP}^{XT} = 0.434 \cdot a_0 \cdot \left\{ \exp\left(\frac{X - \mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) - \exp\left(\frac{-\mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) \right\} \cdot \frac{dt}{t} \quad \text{-----(7)}$$

なお、ここでひずみの応力経路依存性を表現するため、式(6)

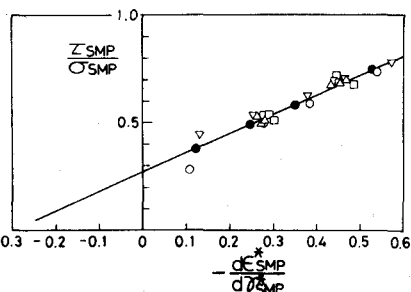


図-1 せん断時の $d\delta_{SMP}^{XS}/d\delta_{SMP}^*$ (○EP: Comp., ●EP: Ext.), 異方圧密時の $d\epsilon_{SMP}^{XC}/d\delta_{SMP}^*$ (□EP: Comp.), せん断クリープ(△EP: Comp.) および異方圧密クリープ(△EP: Comp.) 時の $d\epsilon_{SMP}^{XC}/d\delta_{SMP}^*$ と τ_{SMP}/σ_{SMP} の関係。

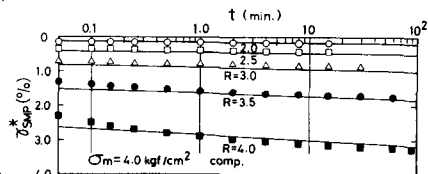


図-2 せん断クリープ試験 ($\sigma_m = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$, Comp.) における $\delta_{SMP}^* \sim \log t$ 関係 (R: 主応力比)。

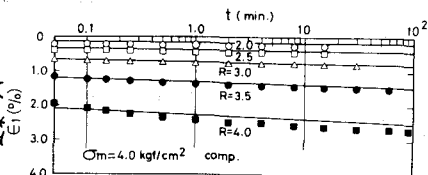


図-3 せん断クリープ試験 ($\sigma_m = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$, Comp.) における $\epsilon_1 \sim \log t$ 関係 (R: 主応力比)。

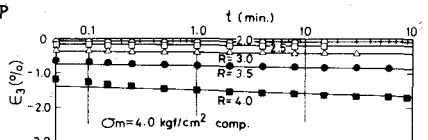


図-4 せん断クリープ試験 ($\sigma_m = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$, Comp.) における $\epsilon_3 \sim \log t$ 関係 (R: 主応力比)。

の C_d^* を K_c と置き換え、 K_c は C_d^* と等しくない係数とする(式(4)のような完全微分形では、ひずみは応力経路に依存しないことになるから、便宜上このように定めた)。

以上より、

$$\begin{aligned} \therefore d\delta_{SHP}^* &= d\delta_{SHP}^{*S} + d\delta_{SHP}^{*C} + d\delta_{SHP}^{*T} \\ &= \frac{\delta_{00}^*}{\mu^* - \mu^{**}} \cdot \exp\left(\frac{X - \mu^*}{\mu^* - \mu^{**}}\right) \cdot dX \\ &\quad + 0.434 \cdot K_c \cdot \left\{ \exp\left(\frac{X - \mu^*}{\mu^* - \mu^{**}}\right) - \exp\left(\frac{-\mu^*}{\mu^* - \mu^{**}}\right) \right\} \cdot \frac{d\sigma_m}{\sigma_m} \\ &\quad + 0.434 \cdot a_0 \cdot \left\{ \exp\left(\frac{X - \mu^*}{\mu^* - \mu^{**}}\right) - \exp\left(\frac{-\mu^*}{\mu^* - \mu^{**}}\right) \right\} \cdot \frac{dt}{t} \quad \text{---(8)} \end{aligned}$$

ここで、せん断による $d\delta_{SHP}^{*S}$ 、異方圧密による $d\delta_{SHP}^{*C}$ 、クリープによる $d\delta_{SHP}^{*T}$ は全て土粒子間の相対ズレに基づくものと考えられるので、次の応力比・ひずみ増分比関係を満足すると推察される。

$$X = \lambda^* \left(-\frac{d\epsilon_{SHP}^{*S}}{d\delta_{SHP}^{*S}} \right) + \mu^* \quad \text{---(9)}, \quad X = \lambda^* \left(-\frac{d\epsilon_{SHP}^{*C}}{d\delta_{SHP}^{*C}} \right) + \mu^* \quad \text{---(10)}$$

$$X = \lambda^* \left(-\frac{d\epsilon_{SHP}^{*T}}{d\delta_{SHP}^{*T}} \right) + \mu^* \quad \text{---(11)} \quad (X \equiv \tau_{SHP} / \sigma_{SHP})$$

これらの式より、 $d\epsilon_{SHP}^* = d\epsilon_{SHP}^{*S} + d\epsilon_{SHP}^{*C} + d\epsilon_{SHP}^{*T}$ --- (12) も算定される。以上より、主ひずみ増分 $d\epsilon_i$ ($i=1, 2, 3$) は等方圧密成分を加えて次のように表現される。²⁾

$$\begin{aligned} d\epsilon_i &= \frac{0.434}{3} \cdot \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot \frac{d\sigma_m}{\sigma_m} + a_i \cdot (d\epsilon_{SHP}^{*S} + d\epsilon_{SHP}^{*C} + d\epsilon_{SHP}^{*T}) \\ &\quad + b_i \cdot (d\delta_{SHP}^{*S} + d\delta_{SHP}^{*C} + d\delta_{SHP}^{*T}) \quad (i=1, 2, 3) \quad \text{---(13)} \end{aligned}$$

ここに、 a_i, b_i は σ_{SHP}, τ_{SHP} の方向余弦である。^{2), 3)} これらの関係式は一般応力面上の応力・ひずみ・時間関係式に変換することができる。

2. 提案式の実験による検証

豊浦標準砂を試料として、三軸圧縮・伸張条件下のせん断クリープ試験($\sigma_m = \text{一定}$)、異方圧密クリープ試験(主応力比 $R = \text{一定}$)を行ない、上記提案式を検証した。まず、図-1はせん断による $\tau = \tau_{\infty}$ での $d\epsilon_{SHP}^{*S} / d\delta_{SHP}^{*S}$ (○印: Comp., ●印: Ext.), 異方圧密による $\tau = \tau_{\infty}$ での $d\epsilon_{SHP}^{*C} / d\delta_{SHP}^{*C}$ (□印: Comp.), せん断クリープ(▽印: Comp.)および異方圧密クリープ(△印: Comp.)時の $d\epsilon_{SHP}^{*T} / d\delta_{SHP}^{*T}$ と $\tau_{SHP} / \sigma_{SHP}$ の関係をプロットしたものである。これより式(9), (10), (11)がほぼ成立するのがみられる。図-2, 3, 4 および図-5, 6, 7はそれぞれ三軸圧縮条件下のせん断クリープ試験($\sigma_m = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$)および異方圧密クリープ試験($R=4.0$)における式(8), (13)の検証データを示したものである。理論値(実線)は $\lambda^* = 0.9, \mu^* = 0.27, \mu^{**} = 0.41, \delta_{00}^* = 0.14\%, \frac{C_c}{1+e_0} = 1.00\%, K_c = 0.118, a_0 = 0.007, t_{\infty} = 100 \text{ min.}$ として算定した。なお、 K_c は K_0 値($K_0 = 1 - \sin \phi$ を用いれば ϕ)から決定される(この場合 $\phi = 40^\circ$ として決めた)。²⁾ 三軸伸張条件下のデータについては当日発表する。

謝辞: 御援助をいただいている本学山内教授、議論をいただいた中井助手に謝意を表する。

文献: 1) 松岡・中井: 土木学会論文報告集, No. 232, 1974.

2) 中井・松岡: 土木学会論文報告集(投稿中). 3) 松岡・中井・古川: 名工大学報, Vol. 31, 1979.

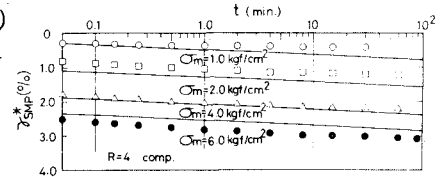


図-5 異方圧密クリープ試験($R=4.0$, Comp.)における $d\epsilon_{SHP}^* \sim \log t$ 関係(σ_m : 平均主応力)。

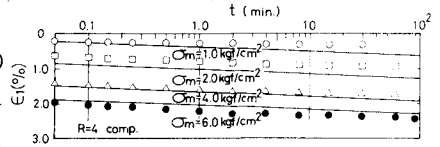


図-6 異方圧密クリープ試験($R=4.0$, Comp.)における $d\epsilon_i \sim \log t$ 関係(σ_m : 平均主応力)。

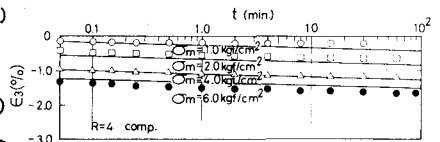


図-7 異方圧密クリープ試験($R=4.0$ Comp.)における $d\epsilon_3 \sim \log t$ 関係(σ_m : 平均主応力)。