

竹中工務店(元名古屋大学部生)正員 古川一吉
名古屋工業大学 正員 松岡元
正員 中井照夫

これまでに土の応力・変形挙動が、空間滑動面(SMP)上で整理すれば統一的に規定されることを、多くの実験データによって検証してきた。しかし、提案している応力・ひずみ関係式¹⁾、クリープや応力緩和などの時間効果については考慮していない。そこで、過剰間隙水圧の消散時間が無視できる砂を試料として、平均主応力一定条件下でクリープ試験を行ない、SMP上で解析することによって1つの応力・ひずみ・時間関係式を導いた。

まず、三軸圧縮条件下のSMP上の応力、ひずみと主応力、主ひずみの関係およびSMP上の応力・ひずみ間の基本関係式を列挙すれば次の通りである。

$$\tau_{SMP}/\sigma_{SMP} = (\sqrt{2}/3) \cdot (\sqrt{\sigma_1/\sigma_3} - \sqrt{\sigma_3/\sigma_1}) \quad (1)$$

$$d\epsilon_{SMP} = (2\sigma_1 \cdot d\epsilon_3 + \sigma_3 \cdot d\epsilon_1) / (2\sigma_1 + \sigma_3) \quad (2)$$

$$d\delta_{SMP} = 2\sqrt{2}\sqrt{\sigma_1\sigma_3} (d\epsilon_1 - d\epsilon_3) / (2\sigma_1 + \sigma_3) \quad (3)$$

$$\tau_{SMP}/\sigma_{SMP} = \lambda \cdot (-d\epsilon_{SMP}/d\delta_{SMP}) + \mu \quad (4)$$

$$\tau_{SMP}/\sigma_{SMP} = \lambda \cdot (-\epsilon_{SMP}/\delta_{SMP}) + \mu' \quad (5)$$

$$\tau_{SMP}/\sigma_{SMP} = (\mu' - \mu) \ln \frac{\delta_{SMP}}{\delta_0} + \mu \quad (6)$$

$$\epsilon_{SMP} = \frac{\mu - \mu'}{\lambda} \delta_{SMP} (\ln \frac{\delta_{SMP}}{\delta_0} - 1) \quad (7)$$

なお、式(4)、(5)、(6)、(7)の中の λ 、 μ 、 μ' 、 δ_0 は土質パラメータである。

豊浦砂を試料として、平均主応力 σ_m 一定条件下で主応力比 $\sigma_1/\sigma_3 \equiv R$ を段階的に変えたクリープ試験を行なった。その主ひずみ ϵ_1 、 ϵ_3 ～時間 t 関係の一例を図-1、2に示す。また、これらをSMP上のせん断ひずみ δ_{SMP} 、垂直ひずみ ϵ_{SMP} ～時間 t 関係に変換した結果を

図-3、4に示す。これらの図より、初期に時間に無関係な即時ひずみ(Instantaneous Strain)が生じ、その後 $\log t$ に比例するひずみ(クリープひずみ; Creep Strain)が発生するのがうかがわれる。図-5、6は $t = t_i (= 0.1 \text{ min})$ と $t = t_\infty$ における $\frac{\tau_{SMP}}{\sigma_{SMP}} \sim \frac{d\epsilon_{SMP}}{d\delta_{SMP}}$ 関係、 $\frac{\tau_{SMP}}{\sigma_{SMP}} \sim \frac{\epsilon_{SMP}}{\delta_{SMP}}$ 関係を示している(添字 i は即時を、 ∞ は十分長時間を意味する)。これらの図より、土質パラメータ(λ 、 μ 、 μ')が $t = t_i$ と $t = t_\infty$ においてほとんど変化しないのがみられる。したがって、残るパラメータ δ_0 が、 $t = t_i$ と $t = t_\infty$ の間で変化すると想像される(δ_{0i} から $\delta_{0\infty}$ まで)。

さて、任意時刻のひずみは即時ひずみとクリープひずみの和で与えられ、クリープひずみが $\log t$ に比例するものとする、

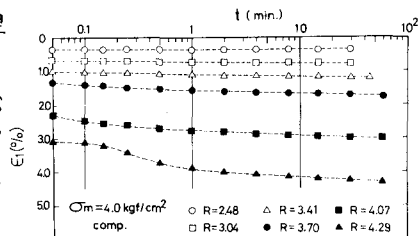


図-1 主応力比 R を段階的に上げた場合の最大主ひずみ ϵ_1 ～時間 t 関係

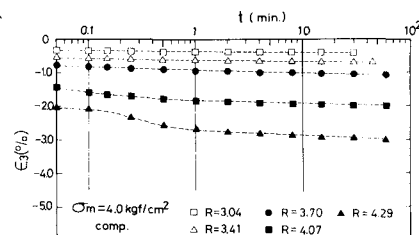


図-2 主応力比 R を段階的に上げた場合の最小主ひずみ ϵ_3 ～時間 t 関係

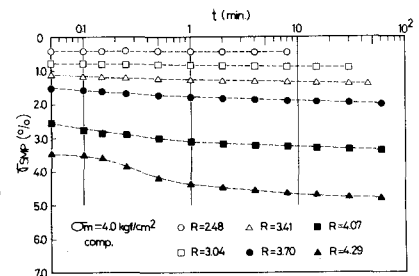


図-3 主応力比 R を段階的に上げた場合のSMP上のせん断ひずみ δ_{SMP} ～時間 t 関係

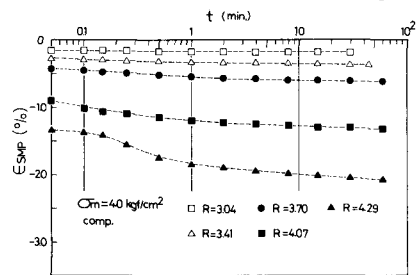


図-4 主応力比 R を段階的に上げた場合のSMP上の垂直ひずみ ϵ_{SMP} ～時間 t 関係

$\delta_{SMP} = \delta_{SMP,i} + \alpha (\log t - \log t_i)$ (α : 比例係数) (8)
 $t = t_{\infty}$ のときの $\delta_{SMP} = \delta_{SMP,\infty}$ とすると, α は次式で与えられる。

$$\alpha = (\delta_{SMP,\infty} - \delta_{SMP,i}) / \log \frac{t_{\infty}}{t_i} = (\delta_{0,\infty} - \delta_{0,i}) \exp \left(\frac{X - \mu}{\mu' - \mu} \right) / \log \frac{t_{\infty}}{t_i} \quad (9)$$

ここに, $X \equiv \tau_{SMP} / \sigma_{SMP}$ である。式(9)を式(8)に代入して整理すれば

$$\delta_{SMP} = \delta_0(t) \cdot \exp \left(\frac{X - \mu}{\mu' - \mu} \right) \quad (10)$$

$$\epsilon_{SMP} = \frac{\mu - \mu'}{\lambda} \delta_{SMP} (\ln \frac{\delta_{SMP}}{\delta_0(t)} - 1) = \delta_0(t) \cdot \frac{\mu' - X}{\lambda} \cdot \exp \left(\frac{X - \mu}{\mu' - \mu} \right) \quad (11)$$

ここに, $\delta_0(t) = \delta_{0,i} + \frac{\log(t/t_i)}{\log(t_{\infty}/t_i)} \cdot (\delta_{0,\infty} - \delta_{0,i})$ (12)

式(10),(11)は, 応力比が一定の場合にひずみが時間とともに進行する

というクリープ現象の表現式にあっている。式(10)をXについて解く

$$\frac{\tau_{SMP}}{\sigma_{SMP}} = (\mu' - \mu) \cdot \ln \frac{\delta_{SMP}}{\delta_0(t)} + \mu \quad (13)$$

式(13)はひずみが一定の場合に応力比が時間とともに低下するという

応力緩和現象の表現式になっている。なお, 三軸圧縮条件下における

SMP上のひずみ増分の主ひずみ増分への変換は次式で与えられる。

$$d\epsilon_1 = d\epsilon_{SMP} + \sqrt{2} \sqrt{\sigma_1/\sigma_3} \cdot \frac{d\delta_{SMP}}{2} \quad (14)$$

$$d\epsilon_3 = d\epsilon_{SMP} - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_3/\sigma_1} \cdot \frac{d\delta_{SMP}}{2} \quad (15)$$

ここで, 土質パラメータを $\lambda = 1.0$, $\mu = 0.20$, $\mu' = 0.35$ (図-5, 6

参照), $\delta_{0,i} = 0.075\%$, $\delta_{0,\infty} = 0.10\%$ として, 式(10)~(12)により算定

した計算値と実験値の比較を図-7に示す。また, 式(14)(15)を用い

て主応力比~主ひずみ関係に変換した結果を図-8に示す。

なお, 図-7, 8は応力比と段階的に上げた場合の結果であるが, もし

一度に大きな応力比を載荷するとどうなるであろうか。実験結果によ

ると応力比の上げ幅の大小にかかわらず, 同じ応力比であればひず

みの $\log t$ に対する傾きはほぼ同一となるようである。このことは,

同一の試料の場合, ある応力比に対する最終ひずみ($t = t_{\infty}$ でのひずみ)

は同じと考えられるので, 応力比に対応して即時ひずみ, フリープひ

ずみがユニークに規定されることを意味している。それでは, 1つ前

の載荷段階($j-1$ 段階)での最終ひずみが j 段階での即時ひずみより

も大きい場合(j 段階の $\delta_{SMP,i} < j-1$ 段階の $\delta_{SMP,\infty} < j$ 段階の $\delta_{SMP,\infty}$)には,

j 段階への載荷によって即時ひずみは発生せず, 全てフリープひずみ

になるのであろうか。実験結果によれば, 上記のような場合には即時

ひずみがあまり発生しないことが確かめられている。そして, この場

合にはひずみの出力が, 図-1の $R = 4.29$ の場合のように初めのうち

$\log t$ に対して逆S字形に進行するという実験結果が得られている。²⁾

SMP上の整理によれば, 相異なる主応力下の土の応力・ひずみ

挙動が統一的に表現されるので, 今後は三軸圧縮条件のみならず, 三

軸伸張条件, 平面ひずみ条件などでも検討していきたい。

謝辞 砂と粘土のクリープ特性について有益な助言をいただいた金沢

大学 関口 彦雄 助教授に謝意を表します。

参考文献 1) 松岡・中井(1977): Proc. of Specialty Session 9, 9th Int. Conf.

SMFE, 2) 関口(1973): S & F, Vol. 13, No. 1.

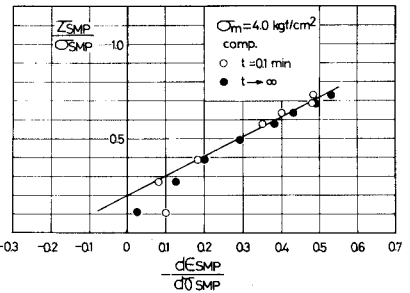


図-5. $t = 0.1 \text{ min.}$ および $t \rightarrow \infty$ における

$\tau_{SMP} / \sigma_{SMP} \sim -d\epsilon_{SMP} / d\sigma_{SMP}$ 関係。

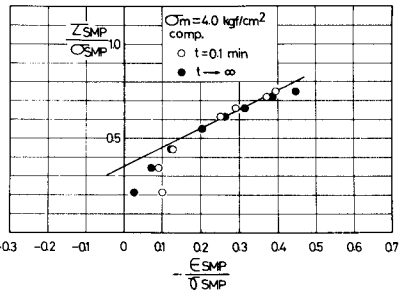


図-6. $t = 0.1 \text{ min.}$ および $t \rightarrow \infty$ における

$\tau_{SMP} / \sigma_{SMP} \sim \epsilon_{SMP} / \sigma_{SMP}$ 関係。

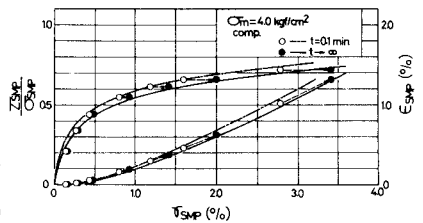


図-7. $t = 0.1 \text{ min.}$ および $t \rightarrow \infty$ における

$\tau_{SMP} / \sigma_{SMP} \sim \delta_{SMP}, \epsilon_{SMP} \sim \delta_{SMP}$ 関係。

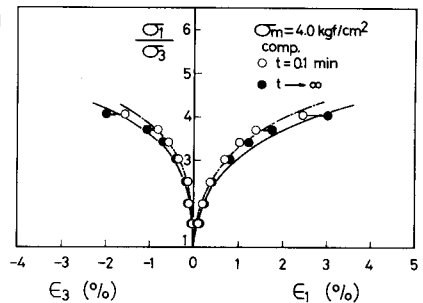


図-8. $t = 0.1 \text{ min.}$ および $t \rightarrow \infty$ における

主応力比~主ひずみ関係。