

III-89 空間滑動面に基づいた土の応力・ひずみ・時間特性の解析

名古屋工業大学 学生員 ○古川一吉
正員 松岡元

提案している空間滑動面 (Spatial Mobilized Plane; SMP) に基づいた土の応力・ひずみ・時間関係式¹⁾ によって、非排水三軸圧縮条件下の応力・ひずみ関係、有効応力径路に及ぼすひずみ速度の影響、および非排水三軸圧縮条件下のクリープ特性を解析したので報告する。計算に用いた土質パラメータには粘土的な値を想定している。なお、解析結果は図2²⁾の成果と1, 2の点を除いて類似した傾向を示した。

1. 空間滑動面に基づいた応力・ひずみ・時間関係式

土の変形は、等方圧密成分と方向性をもった主軸方向の相対移動によって生じるダイレイタンシー成分から成ると考えられる。主ひずみ増大ベクトル ($d\epsilon_1, d\epsilon_2, d\epsilon_3$) の空間滑動面に平行な成分、垂直な成分を $d\delta_{SMP}, d\epsilon_{SMP}^*$ と表記すれば、ダイレイタンシーによる δ_{SMP} は次のように表わされる³⁾。

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

λ^*	μ^*	μ^*	$\delta_{ob}^*(\%)$	$C_d^*(\%)$	$K_c(\%)$
0.90	0.42	0.60	3.3	0.0	0.0
$C_s/(1+e_0)(\%)$			$Q_0(\%)$	$\delta_{SMP,\infty}^*(\%/min.)$	
7.0			0.45	10^{-5}	

表-1 解析に用いた土質パラメータ

ここに、 μ^*, μ^*, δ_0^* は土質パラメータであり、 X は SMP 上のせん断有効垂直応力比 τ_{SMP}/σ_{SMP} である。そして、パラメータ δ_0^* は時間 t と平均有効主応力 σ_m との間に次に示す関係が成立する¹⁾。

$$\delta_0^*(t) = \delta_{0\infty}^* + Q_0 \log_{10}(t/t_{\infty}) \quad (2)$$

$$\delta_{0\infty}^*(\sigma_m) = \delta_{ob}^* + C_d \log_{10}(\sigma_m/\sigma_{mb}) \quad (t=t_{\infty}) \quad (3)$$

ここに、 $\delta_{0\infty}^*$ は $t=t_{\infty}$ での δ_0^* 、 δ_{ob}^* は $\sigma_m = \sigma_{mb}$ (基準とする平均主応力) での $\delta_{0\infty}^*$ を意味し、 Q_0, C_d はパラメータである。ここで、式(2)中の t/t_{∞} とひずみ速度 $\dot{\delta}_{SMP}^*$ 、終局ひずみ速度 $\dot{\delta}_{SMP,\infty}^*$ との間に、式(1)、(2)より次の関係が成立する。

$$t/t_{\infty} = \dot{\delta}_{SMP,\infty}^* / \dot{\delta}_{SMP}^* \quad (4)$$

式(4)を式(2)に代入すると、式(1)は δ_{SMP}^* の t に関する微分方程式となる。そこで、 $t=0$ のとき $\delta_{SMP}^* = 0$ なる条件のもとに、式(1)を解きなおせば次式を得る。

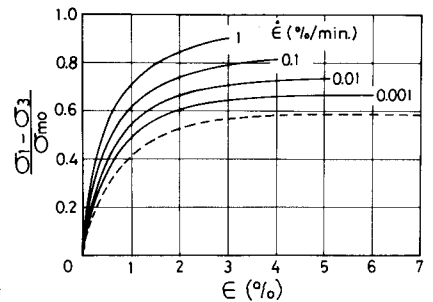
$$\delta_{SMP}^* = 0.434 Q_0 \ln \left\{ 1 + \frac{t}{t_{\infty}} \exp\left(\frac{\delta_{0\infty}^*}{0.434 Q_0}\right) \right\} \left\{ \exp\left(\frac{X - \mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) - \exp\left(\frac{-\mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) \right\} \quad (5)$$

ここで δ_{SMP}^* は応力比 X 、平均主応力 σ_m 、時間 t の関数と考えられるので、全微分をとれば次式を得る。

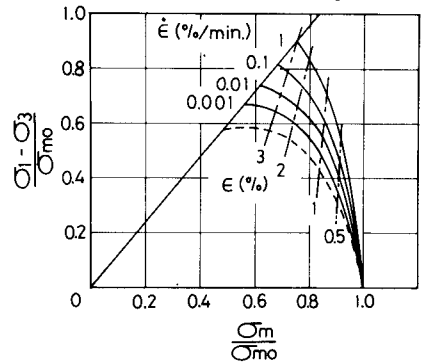
$$d\delta_{SMP}^* = (\partial \delta_{SMP}^* / \partial X) dX + (\partial \delta_{SMP}^* / \partial \sigma_m) d\sigma_m + (\partial \delta_{SMP}^* / \partial t) dt \quad (6)$$

式(5)、(3)より式(6)の全微分を行ない、応力径路依存性を考慮すれば³⁾次式を得る。

$$\begin{aligned} d\delta_{SMP}^* &= \frac{0.434 Q_0}{\mu^* - \mu^*} \exp\left(\frac{X - \mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) \ln \left\{ 1 + \frac{\dot{\delta}_{SMP,\infty}^*}{\dot{\delta}_{SMP}^*} \exp\left(-\frac{\delta_{0\infty}^*}{0.434 Q_0}\right) \right\} dX \\ &+ 0.434 K_c \left\{ \exp\left(\frac{X - \mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) - \exp\left(\frac{-\mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) \right\} \frac{1}{1 + \frac{\dot{\delta}_{SMP}^*}{\dot{\delta}_{SMP,\infty}^*} \exp\left(-\frac{\delta_{0\infty}^*}{0.434 Q_0}\right)} \frac{d\sigma_m}{\sigma_m} \\ &+ 0.434 Q_0 \left\{ \exp\left(\frac{X - \mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) - \exp\left(\frac{-\mu^*}{\mu^* - \mu^*}\right) \right\} \frac{1}{1 + \frac{\dot{\delta}_{SMP}^*}{\dot{\delta}_{SMP,\infty}^*} \exp\left(-\frac{\delta_{0\infty}^*}{0.434 Q_0}\right)} \frac{dt}{t} \end{aligned} \quad (7)$$



(a) $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_{mo} \sim \epsilon$ 関係



(b) $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_{mo} \sim \sigma_m/\sigma_{mo}$ 関係

図-1 非排水三軸圧縮条件下の応力・ひずみ関係、有効応力径路に及ぼすひずみ速度の影響

Kcの決定法については文献3)を参照されたい。なお、上式において $dX < 0$ のときには右辺第1項=0, $d\sigma_m < 0$ のときには右辺第2項=0 とする⁴⁾。また、ダイレイタンスーによる $d\epsilon_{SHP}^*$ は $d\delta_{SHP}^*$ より次式で与えられる¹⁾

$$d\epsilon_{SHP}^* = \frac{\mu^* - \chi}{\chi^*} \cdot d\delta_{SHP}^* \quad (8)$$

ここに、 χ^* は土質パラメータである。また主ひずみ増分 $d\epsilon_i$ は等方圧縮成るひずみダイレイタンスー成るひずみの和と考え次式で表わす³⁾

$$d\epsilon_i = \frac{0.434}{3} \cdot \frac{C_c}{1+e_0} \cdot \frac{d\sigma_m}{\sigma_m} + a_i \cdot d\epsilon_{SHP}^* + b_i \cdot d\delta_{SHP}^* \quad (9)$$

ニニ、 a_i, b_i はそれぞれ σ_{SHP}, τ_{SHP} の方向係数である。なお、 $d\sigma_m < 0$ の場合には C_c の代わりに C_s (膨張係数)を用いる。

2. 非排水三軸圧縮条件下の応力・ひずみ関係、有効応力経路に及ぼすひずみ速度の影響

式(7)において、偏差ひずみ速度 $\dot{\epsilon} (= \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_3)$ と一定のパラメータとし、非排水条件を考慮して $(\sigma_1 - \sigma_3)$ と σ_m のつに因する連立常微分方程式を導びき、ルンゲ・クッタ・ギル法で解析した。土質パラメータは表-1の値を用いた。図-1(a)に偏差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_{m0}$ と偏差ひずみ ϵ 関係、図-1(b)に $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_{m0}$ と σ_m/σ_{m0} 関係の解析結果を示す。図-2 非排水三軸圧縮条件下のクリープ特性

なお、 σ_{m0} はせん断応力載荷直前の平均有効主応力と意味する。両図中の破線は $t = t_{\infty} (\delta_{SHP}^* = \delta_{SHP\infty}^*)$ における関係を示している。これらの解析結果は、偏差ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が大くなるにつれて偏差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_{m0}$ が増加するという特性をよく表現している。また、図-1(b)中の一点鎖線は等ひずみ線を表わしているが、 $\epsilon = 0.5\%, 1\%, 2\%, 3\%$ と大くなるに従って傾きが少々小さくなるようである。

3. 非排水三軸圧縮条件下のクリープ特性

式(7)において、 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ を一定のパラメータとし、非排水条件を考慮して σ_m と ϵ のつに因する連立常微分方程式を導びき、上記と同じ方法で解析した。図2-(a)に $\epsilon \sim t$ 関係、図2-(b)に $\epsilon \sim \log_{10} t$ 関係の解析結果を示す。この解析では上限降伏値は $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_{m0} = 0.59$ で与えられるが、上限降伏値より小さい応力ではクリープがやがて止まり、上限降伏値より大きい応力ではクリープ破壊を生じるのがみられる。また、最小ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{min}$ と破壊時間 t_f との関係は青藤・上沢⁵⁾によつて与えられた範囲内にはいっており興味深い。

謝辞 印頭御援助をいただいている本学山内武彦教授、有益な助言をいただいた金沢大学関口秀雄助教授、本学中井照夫講師に謝意を表します。

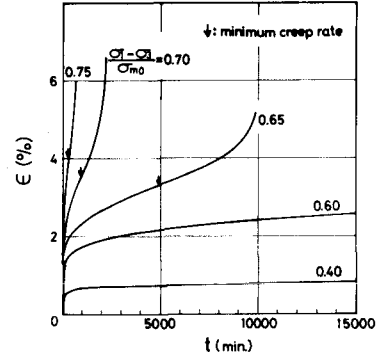
参考文献 1) 松岡・古川・平尾(1981); オ16回土質工学研究発表会 投稿中。

2) H. Sekiguchi (1977); Proc. 9th Int. Conf. S.M.F.E., Vol. 1, pp. 289 - 292.

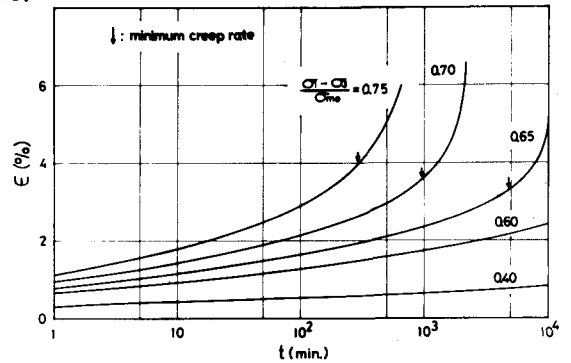
3) 中井・松岡(1981); 土木学会論文報告集, オ306号, pp. 23 - 24.

4) 中井(1980); オ15回土質工学研究発表会, pp. 785 - 788.

5) Saito, M. and H. Uezawa (1961); Proc. 5th Int. Conf. S.M.F.E., Vol. 1, pp. 315 - 318.



(a) $\epsilon \sim t$ 関係



(b) $\epsilon \sim \log_{10} t$ 関係