

1. はじめに: - 飽和粘土の構成関係を確立しようとする際には、レオロジー的挙動を考慮する必要がある。
しかし、粘土のレオロジー特性は複雑であるので、現状では、何らかの構成仮説に基いて現象を系統的に整理し、さらにその結果に基いて理論を改良していくことが望まれる。本報告は、村山ら^{1), 2)}によつて粘土に対して提案されたレオロジー理論の K_0 圧密後のレオロジー的挙動への適用性について検討を加えるものである。

2. 理論— 等方圧密後の場合: - 軸対称非排水条件下における粘土のレオロジー的挙動を解析するために、村山らは次式の構成関係を提案している。^{1), 2)}

$$\sigma_d(t) = \sigma_d^{\infty} \{ \epsilon_d(t) \} + \sigma_d^R(t), \quad (1)$$

$$\sigma_m'(t) = \sigma_m'^{\infty} \{ \epsilon_d(t) \} + \sigma_m'^R(t), \quad (2)$$

$$\sigma_d^R(t) = (3/2) \int_0^t \mu(t-\tau; |\epsilon_a(t, \tau)|) \epsilon_a(t, \tau) d\tau, \quad (3)$$

$$\sigma_m'^R(t) = |\sigma_d^R(t)|/N, \quad N=3, \quad (4)$$

ここに、 $\sigma_d = \sigma_a - \sigma_r$, $\sigma_m' = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3$, $\epsilon_a(t, \tau)$ は時刻 τ の配位に相対的な時刻 t における相対軸ひずみ、 $\mu(t-\tau; |\epsilon_a(t, \tau)|)$ は相対ひずみ依存応答関数、 $\epsilon_d = \epsilon_a - \epsilon_r$ は等方圧密終了時の配位に相対的な主ひずみ差、 σ_a, σ_r は軸方向、半径方向の有効主応力をそれぞれ示している。

等方圧密後の平衡時のストレス・パスは次式で表現できようである。^{2), 3), 4), 5)}

$$|\sigma_d^{\infty}|/\sigma_m'^{\infty} = \frac{\lambda}{(1+\epsilon_0)D} \ln(\sigma_m'^0/\sigma_m'^{\infty}), \quad (5)$$

ここに、 $\lambda = -\partial \epsilon_0 / \partial \ln \sigma_m'$ は圧縮指数、 D はダイレイタンス係数⁶⁾、 ϵ_0 は初期間げき比、 $\sigma_m'^0$ は初期平均有効主応力である。有限のひずみ速度下のストレス・パスは、(1), (2), (4), (5)式より次式によつて求められる。²⁾

$$|\sigma_d - \sigma_d^R|/[\{\sigma_m' - |\sigma_d^R|/N\}] = \frac{\lambda}{(1+\epsilon_0)D} \ln \{ \sigma_m'^0 / (\sigma_m' - |\sigma_d^R|/N) \}. \quad (6)$$

相対ひずみ依存応答関数の具体的な形はつぎのように求められている。^{1), 2)}

$$\mu(t-\tau; |\epsilon_a(t, \tau)|) = \mu(t-\tau)/|\epsilon_a| \quad \text{for } |\epsilon_a(t, \tau)| \leq |\epsilon_a|, \quad (7)$$

$$\mu(t-\tau; |\epsilon_a(t, \tau)|) = \mu(t-\tau)/|\epsilon_a(t, \tau)| \quad \text{for } |\epsilon_a(t, \tau)| \geq |\epsilon_a|, \quad (8)$$

$$\mu(t-\tau) = \int_0^\infty \frac{H(\lambda)}{\lambda} \exp(-\frac{t-\tau}{\lambda}) d \ln \lambda, \quad (9)$$

$$H(\lambda) = H_0 \quad \text{for } \lambda_L \leq \lambda \leq \lambda_U, \quad H(\lambda) = 0 \quad \text{if otherwise}, \quad (10)$$

ここに、 ϵ_a : 限界軸ひずみ、 H_0 : 定数、 λ_U : 最長緩和時間、 λ_L : 最短緩和時間である。

K_0 圧密後の場合: - まず、(1)~(4)式および(7)~(10)式は、 K_0 圧密後にも成立すると仮定する。ただし、 ϵ_d としては、 K_0 圧密終了後の配位に相対的な主ひずみ差を考えることにする。

太田³⁾は、(5)式を拡張し、 K_0 圧密後の平衡時のストレス・パスを求めている。しかし、受動の場合には、 σ_d/σ_m' の値は正から負の値まで変化するが、このような状況下のダイレイタンスについては、主動の場合に比してデータが少なくようである。そこで、次式で平衡時のストレス・パスを考えたい。

$$\sigma_d^{\infty}/\sigma_m'^{\infty} = \frac{\lambda}{(1+\epsilon_0)D_a} \ln \{ (\sigma_m')_{K_0}/\sigma_m'^{\infty} \} + \eta K_0 \quad \text{for active loadings}, \quad (11)$$

$$\sigma_d^{\infty}/\sigma_m'^{\infty} = -\frac{\lambda}{(1+\epsilon_0)D_p} \ln \{ (\sigma_m')_{K_0}/\sigma_m'^{\infty} \} + \eta K_0 \quad \text{for passive loadings}, \quad (12)$$

ここに、 $(\sigma_m')_{K_0}$ 、 ηK_0 は K_0 圧密状態における σ_m' 、 σ_d/σ_m' の値である。

なお、(11), (12)式で $D_a = D_p = D$ とすれば、太田による関係式と一致する。³⁾

(1), (2), (4), (11), (12) 式から、有限のひずみ速度下のストレス・パスとして次式を得る。

$$\frac{\sigma_d - \sigma_d^R}{\sigma_m' - \sigma_d^R/N} = \frac{\lambda}{(1+e_0)D_p} \ln \{ (\sigma_m')_{K_0} / (\sigma_m' - \sigma_d^R/N) \} + \eta_{K_0} \quad \text{for active loadings,} \quad (13)$$

$$\frac{\sigma_d - \sigma_d^R}{\sigma_m' + \sigma_d^R/N} = -\frac{\lambda}{(1+e_0)D_p} \ln \{ (\sigma_m')_{K_0} / (\sigma_m' + \sigma_d^R/N) \} + \eta_{K_0} \quad \text{for passive loadings.} \quad (14)$$

つぎに、非排水強度の異方性²⁾について考えてみる。破壊時の主応力比 $(\sigma_1'/\sigma_3')_f$ の値が、主動および受動で等しいものと考え、ひずみ速度効果がない場合における非排水強度の異方性を表わす次式が、(11), (12) 式より求められる。

$$(|S_u|/P_0)_p / (S_u/P_0)_a = \frac{17\eta_{fp}}{\eta_{fa}} \exp \left[\frac{\{\eta_{fa} - \eta_{K_0} + (D_p/D_a)(\eta_{fp} - \eta_{K_0})\}}{(1+e_0)D_a} \right] \frac{\lambda}{\lambda}, \quad (15)$$

ここに、 $S_u = (\sigma_d)_{\max}/2$, $\eta = \sigma_d/\sigma_m'$, $P_0 = (\sigma_1')_{K_0}$ である。

次節に述べる実験結果との比較を容易にするために、対応する理論式を示しておく。^{1), 2)}

$$\text{定速変形: } \sigma_d^R = (3/2)H_0 \frac{\epsilon_a}{|\epsilon_{ac}|} \left\{ 1 - E_i \left(-\frac{\epsilon_a}{\lambda u} \right) \right\} \quad \text{for } |\epsilon_a| \leq |\epsilon_{ac}|, \quad (16)$$

$$\sigma_d^R = (3/2)H_0 \frac{\epsilon_{ac}}{|\epsilon_{ac}|} \left\{ 1 - E_i \left(-\frac{\epsilon_{ac}}{\lambda u} \right) \right\} \quad \text{for } |\epsilon_a| \geq |\epsilon_{ac}|. \quad (17)$$

定速変形停止後の応力緩和:

$$\sigma_d^R = (3/2)H_0 \frac{\epsilon_a}{|\epsilon_{ac}|} \left\{ \exp \left(-\frac{t}{\lambda u} \right) + \frac{t}{\xi} E_i \left(-\frac{t}{\lambda u} \right) - \left(\frac{t}{\xi} + 1 \right) E_i \left(-\frac{t+t_c}{\lambda u} \right) \right\} \quad \text{for } |\epsilon_a| \leq |\epsilon_{ac}|, \quad (18)$$

$$\sigma_d^R = (3/2)H_0 \frac{\epsilon_{ac}}{|\epsilon_{ac}|} \left\{ \exp \left(-\frac{t}{\lambda u} \right) + \frac{t}{t_c} E_i \left(-\frac{t}{\lambda u} \right) - \left(\frac{t}{t_c} + 1 \right) E_i \left(-\frac{t+t_c}{\lambda u} \right) \right\} \quad \text{for } |\epsilon_a| \geq |\epsilon_{ac}|, \quad (19)$$

$$\xi = \epsilon_a/\epsilon_a, \quad t_c = \epsilon_{ac}/\dot{\epsilon}_a. \quad (20)$$

3. K_0 圧密後のレオロジー試験による検討: - N & I 型³⁾軸試験

装置を用いて、圧縮・伸長両条件下で非排水定速変形、ならびに定速変形停止後の応力緩和試験を行なっている。初期有効応力 $\{(\sigma_d)_{K_0}, (\sigma_m)_{K_0}\}$ としては、等方圧密応力 $\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$ の試料と同一の割げき比²⁾が得られるように、 $\eta = \eta_{K_0}$ と $\eta = 1.739 \ln \{ 2/(\sigma_m)_{K_0} \}$ との交点の座標を選んだ。用いた試料は、文献2)に報告されている稗返し大阪南老粘土で、その物理特性は、 $LL = 110.5\%$, $PL = 41\%$, $\zeta_s = 2.69$ である。Table 1. に試験条件を示している。

Table 1. Test conditions of the remolded Osaka-Nanko clay

Test No	$1 + e_0$	$(\sigma_1')_{K_0}$ kg/cm ²	$(\sigma_3')_{K_0}$ kg/cm ²	K_0	$\dot{\epsilon}_a$ %/min
1	2.597	1.930	0.97	0.50	0.057
2	2.605	1.950	0.97	0.50	0.055
3	2.577	1.934	0.97	0.50	-0.056
4	2.647	1.951	1.06	0.54	0.055

図-1に定速変形試験結果を示す。図中の $\widehat{AB}$ は(5)式にもとづく平衡時のストレス・パスである。²⁾ $\widehat{BC}$ は、(11)式による主動における平衡時のストレス・パスである。 $\widehat{BF}$, $\widehat{BG}$ は(12)式による受動における平衡時のストレス・パスである。なお、ここで $D_a = D$ を仮定している。パス $\widehat{BDE}$ は $\dot{\epsilon}_a = 5.5 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ の場合の理論曲線で、(13), (17)式に文献2)に報告された定数値を代入したものである。実験値と理論値とが対応していることが認められる。また、(14), (17)式によれば、受動において平衡時のストレス・パスは有限のひずみ速度下のストレス・パスと $|\epsilon_a| \geq |\epsilon_{ac}|$ 領域では平行になるべきである。実験によれば、このことが満足されるには、 D_p/D_a が大略0.6程度の値をとる必要があるようである。

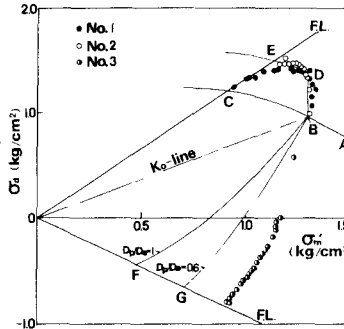


図-1 定速変形試験における有効応力経路

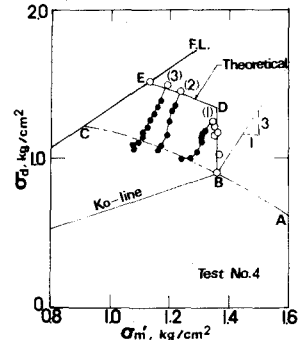


図-2 定速変形と応力緩和を組合せた試験における有効応力経路

図-2は、定速変形と応力緩和を組合せた試験の結果である。○印は定速変形時の実験値であるが、ほぼ(13), (17)式にもとづく理論曲線上にプロットされている。●印は応力緩和時のストレス・パスであるが、ほぼ勾配3:1で σ_d と σ_m' は減少しており、主動では、 K_0 圧密後(4)式が成立することがわかる。

図-3は、定速変形後の応力緩和曲線である。上側3本の実線は、(1), (19)式にもとづく理論曲線、最下側

の実験は、(1)、(18)式にもとづく理論曲線である。定数値は、 $\frac{2}{3}H_0 = 0.0652 \text{ kg/cm}^2$, $\epsilon_{ac}/\lambda_u = 5.5 \times 10^{-6} \text{ min}^{-1}$, $\epsilon_{ac} = 0.4\%$ で、 $t = 1 \text{ min}$ においてフィットを行なっている。図から、実験と理論が対応していることがわかる。

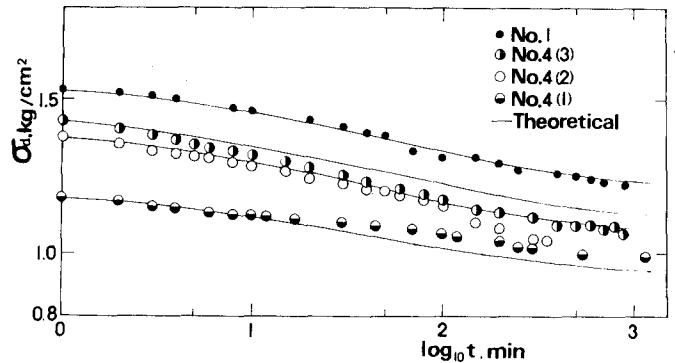


図-3 定速変形停止後の応力緩和曲線, ϵ_a : ● 2.00, ○ 1.75 (%), ○ 0.75, ● 0.30

4. ディスカッション:一、図-4に、 K_0 圧密後の $\sigma_d \sim \epsilon_a$ 関係を示す。図中の破線は、太田にもとづく平衡時の応力-ひずみ曲線である。用いた基礎式は、次式と(11)、(12)式で $D_p = D_a = D$ といった式である。

$$\epsilon_a = \frac{KD}{\lambda} \ln \left[\frac{\frac{\lambda-K}{1+\epsilon_0} D - \eta_{K_0}}{\frac{\lambda-K}{1+\epsilon_0} D - \eta} \right] \text{ for active loadings,} \quad (21)$$

$$\epsilon_a = -\frac{KD}{\lambda} \ln \left[\frac{\frac{\lambda-K}{1+\epsilon_0} D + \eta_{K_0}}{\frac{\lambda-K}{1+\epsilon_0} D + \eta} \right] \text{ for passive loadings.} \quad (22)$$

上式中の定数値としては、等方圧密後の $\sigma'_m =$ 一定の排水圧縮試験から $\bar{\lambda} = 0.231$, $D = 0.053$, $K = 0.0425$ を求め、さらに、 $1+\epsilon_0 = 2.607$, $\eta_{K_0} = 0.75$ なる初期値を用いた。主動側の実験は、平衡時の応力-ひずみ曲線に、(16)、(17)式のレオロジー的寄りを重ね合わせたもので、実験値との対応はまずまずのようである。しかし、受動側では、破線の理論曲線は実験値よりもかなり小さなひずみで、 $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ に達することから、理論を改良すべき余地があるように思われる。

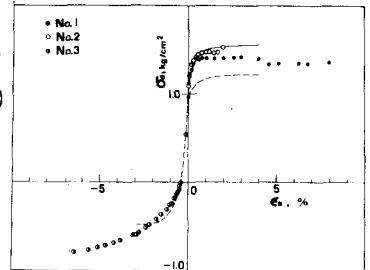


図-4 主動および受動における $\sigma_d \sim \epsilon_a$ 関係

図-5は、非排水強度比と D_p/D_a との関係を(15)式にもとづいてプロットしたものである。定数値は、練土・南港粘土について算んでいる。図から、 $D_p/D_a = 0.6$ では、受動の場合の強度は主動の場合の約54%であることがわかる。このように、 D_p 値の決定は、図-1、図-5に示されているように、時間効果、異方性を考えるうえに重要であり、今後、さらにその物理的意味を追求するべきであると考え。

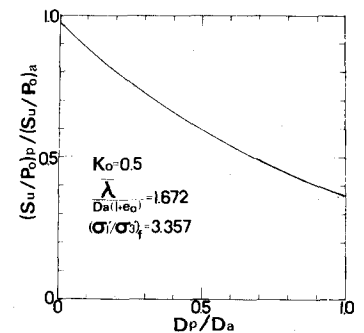


図-5 非排水強度比と D_p/D_a との理論的關係

5. まとめ:一、 K_0 圧密後の飽和粘土のレオロジー的挙動を解析するために、文献1)、2)に述べられた理論を拡張し、主動の場合には、このモデルの妥当性を正規圧密粘土について、実験的に確かめた。受動の場合については、今後、さらにデータを集積したい。

謝辞 御指導を賜わっている京都大学防災研究所・村山朔郎教授、実験を共同で行なっている京都大学・院生 鳥井原誠氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Murayama, S., Sefuguchi, H. and Ueda, T. (1974), Soils and Foundations, Vol. 14, No. 2.
- 2) 村山朔郎・関口秀雄・辻類則 (1974), 第9回土質工学研究発表会.
- 3) Ohta, H. (1971), Dr. Eng. Thesis, Kyoto University.
- 4) 足立和尙・安藤信夫 (1973), 第8回土質工学研究発表会.
- 5) 軽部大蔵・栗原則夫 (1966), 土木学会論文集, 第135号.
- 6) 柴田徹 (1963), 京都大学防災研究所年報, 第6号.
- 7) たとえば, Berre, T. and Bjerrum, L. (1973), Proc. 8th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 1-1.