

練り返し過圧密粘土の平均主応力一定条件下での応力～ひずみ挙動

京都大学防災研究所 正員 大 槻 正 紀

まえがき 現場において、自然状態で過圧密状態にある地盤、またはプレロード工法その他により、本盛土前に人工的に軽く過圧密される場合などのように、過圧密地盤を対象として変形解析を行なう必要がある場合に出会う。このような地盤の変形解析を行なうためには、中程度から軽く過圧密された粘性土の応力～ひずみ関係を調べる必要がある。本報告は、このような過圧密地盤の変形解析に用いる応力～ひずみ関係を求める手初めとして、練り返し再圧密の粘性土試料を用いて、三軸室で過圧密状態にした後、過圧密比を種々にかえて、平均主応力一定条件のもとにせん断した結果を示したものである。また、これらの結果から、偏差ひずみと過圧密比を独立変数として、応力比及び間けき比の変化を表わす理論式を導いた。

応力～ひずみ関係の理論式 図-1は、最大圧密圧力 p_p (P点)をうけた試料をC点またはD点まで等方膨潤した後、平均主応力 p を一定として三軸圧縮せん断したときの $e \sim \ln(p)$ 関係を示している。すなわち、勾配入の処女圧縮線(V.C.L.)に平行な限界間けき比線(C.V.R.L.)と勾配 K の等方膨潤線PCDとの交点、をQ(圧力 p_q)とする。いま、 p_q より大きい p (湿潤側)でせん断したとき、残留時の間けき比はBQ線上に至るが、 p_q より小さい p (乾燥側)でせん断したときは、Q点を通して入より小さい勾配 λ の直線(乾燥側限界間けき比線)上に至るとする。このとき、せん断開始時の等方応力状態から残留状態までの間けき比の減少量 Δe_f は、つぎのように表わされる。 $p_p \geq p \geq p_q$ のとき、

$$\Delta e_f = (e_a - \Gamma) - (\lambda - K) \ln(n) \quad (1)$$

$$p < p_q \text{ のとき } \Delta e_f = \frac{\xi - K}{\lambda - K} \{ (e_a - \Gamma) - (\lambda - K) \ln(n) \}$$

ここに、 $n = p_p/p$ は過圧密比、 e_a 、 Γ は図中に示している。図-2は、正規圧密状態($n=1$)と過圧密状態($n=n$)での応力比 η 、間けき比の等方応力状態からの減少量 $(-\delta e)$ を偏差ひずみ $\epsilon_d (= \epsilon_1 - \frac{1}{3}\epsilon_v)$ に対して示している。ここで、正規圧密状態($n=1$)の応力～ひずみ関係として式(2)、(3)を用いるが、式中、 $\delta = \sigma_1' - \sigma_3'$ 、 $p = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$ 、 η_{res} は残留時の応力比、 A 、 C は定数である。つぎに、過圧密比 n の試料図-2 η 、 $(-\delta e) \sim \epsilon_d$

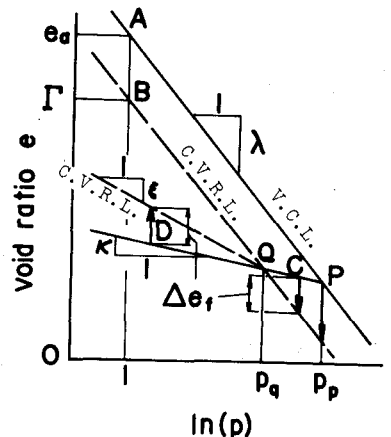


図-1 $e \sim \ln(p)$ 関係

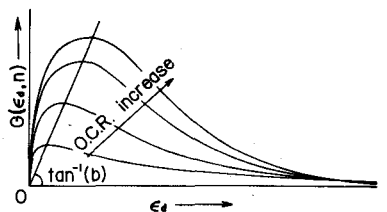
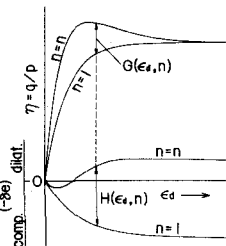


図-3 $G(\epsilon_d, n)$ の曲線形

では、図に示したように、ある E_d において、正規圧密試験の応力比 η_{n-1} からの応力比の過剰分を $G(E_d, n)$, 固けき比変化の差を $H(E_d, n)$ として、応力比および固けき比の変化を式(4), (5) のように表わす。ここで、 $G(E_d, n)$ は図-3に示したように、その最大の点か、原点を通り勾配 b の直線上にあるとして式(6)~(9) のように表わす。式中、 G_{max} , E_{dmax} は $G(E_d, n)$ の最大となる点の $G(E_d, n)$ および E_d の値である。式(8), (9) の関係は、実験結果にもとづいて仮定した。式(5)中の $H(E_d, n)$ は、式(10)のように表わす。ここで、 B , β は定数であるが、 Δe_f は式(1)に示したように過圧密比の関数である。以上、式(1)~(10)により、 p -一定条件下での過圧密粘土の応力 $\sim$ ひずみ関係が計算される。

$$\eta_{n-1} = \left(\frac{q}{p}\right)_{n-1} = \eta_{res} \{1 - \exp(-A E_d)\} \quad (2)$$

$$(-\delta e)_{n-1} = (e_a - P) \{1 - \exp(-C E_d)\} \quad (3)$$

$$\eta_{n=n} = \eta_{n-1} + G(E_d, n) \quad (4)$$

$$(-\delta e)_{n=n} = (-\delta e)_{n-1} - H(E_d, n) \quad (5)$$

$$G(E_d, n) = a_1 E_d \exp(-a_2 E_d^\alpha) \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= b \exp\left(-\frac{1}{\alpha}\right) \\ a_2 &= \frac{1}{\alpha} \left(\frac{b}{G_{max}}\right)^\alpha \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$G_{max} = \eta_{res} \cdot G_0 \cdot \ln(n) \quad (8)$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_1 (-\text{定}) & \text{for } E_d \leq E_{dmax} \\ \alpha_2 \ln(n) & \text{for } E_d > E_{dmax} \end{cases} \quad (9)$$

$$H(E_d, n) = (e_a - P - \Delta e_f) \{1 - \exp(-B E_d^\beta)\} \quad (10)$$

試料及び試験方法 試験に用いた試料は、市販粉末粘土(藤森粘土, $LL = 43.6$, $PL = 26.1$, $PI = 17.5$)を練り返した後、大型圧密リングで圧密した練り返し再圧密試料($w_0 = 46.0\%$)である。試験は、N.G.I. 型三軸圧縮試験機を用いて、ひずみ制御と応力制御の両条件のもとで行なっている。前者は、予備圧密試験と本試験より成る。予備圧密試験は、大型圧密リングより取り出した練り返し再圧密試料を側圧 25 kg/cm^2 まで圧密できる中圧三軸室で所定の最大圧密圧力 p_p まで等方圧密して過圧密供試本を作製するのである。本試験は、この過圧密試料をN.G.I. 型三軸試験機にセットし直して、 $p = 2 \text{ kg/cm}^2$ まで等方的に再圧密した後、周面排水条件のもとに p -一定でせん断($\dot{\epsilon}_1 = 0.7 \sim 0.9 \times 10^{-3} \text{ \% / min.}$)するのである。一方、応力制御試験は、練り返し再圧密試料をN.G.I. 型三軸室にセットした後、最大圧密圧力 $p_p = 2 \text{ kg/cm}^2$ まで等方圧密した後、所定の過圧密比になるまで等方膨潤して、 p -一定で1日毎に応力を変化させてせん断するのである。

試験結果および理論式との比較

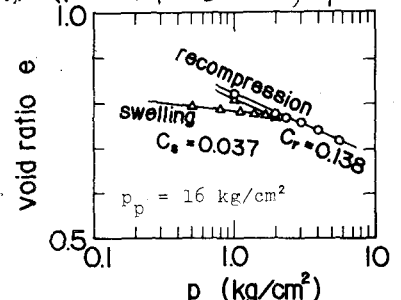
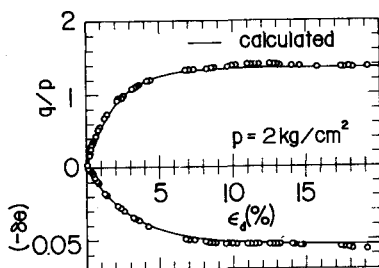


図-4 $e \sim \log p$ プロット

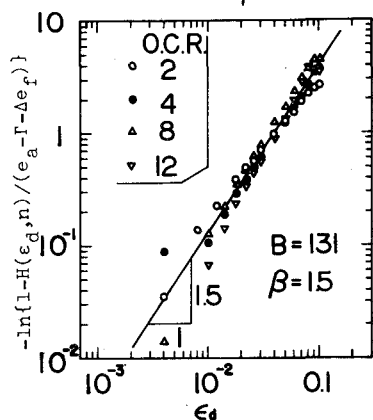
ひずみ制御試験結果

図-4は、 $p_p = 16 \text{ kg/cm}^2$ まで予備圧密した試料の本試験での等方圧縮および等方膨潤試験結果を $e \sim \log p$ 図上に示したものである。図中には、再圧縮指数 C_r 、膨潤指数 C_o を示している。



ひずみ制御試験では、いずれも再圧縮した後、 p -一定でせん断試験を行なっているので、図-1の K としては C_r より求めた値 ($C_r / \ln(10)$) を用いた。図-5は、正規圧密試料の p -一定せん断試験結果と式(2)、

図-5 $\bar{q}/p, (-\delta e) \sim \epsilon_d$ 関係



(3)による計算結果

図-7 $-\ln\{1-H(\epsilon_d, n)/(e_a - p - \Delta e_f)\} \sim \epsilon_d$ 関係

を示している。式(2)、(3)中の定数 A 、 C は試験結果の $\log(1 - \eta_{n=1}/\eta_{res})$, $\log\{1 - (-\delta e)_{n=1}/(e_a - p)\} \sim \epsilon_d$ プロットの勾配より決定した。これらの定数値は、後の表-1に示している。図-6(a)は、各試験より求めた $G(\epsilon_d, n)$ の最大値を G として、 $(G + \eta_{res})/\eta_{res}$ と過圧密比の関係を片対数紙上に示している。図中の直線の勾配より式(8)中の G_0 が求まる。同図(b)は、各試験の $\epsilon_d > \epsilon_{dmax}$ での $G(\epsilon_d, n) \sim \epsilon_d$ プロットより求めた α と過圧密比の関係を片対数紙上にプロットしたものである。これより、式(9)中の α_2 が求まる。 α_2 も同様に決定できるが省略する。これらの定数値は、いずれも後にまとめて表-1に示している。図-7は、各試験より求めた $-\ln\{1-H(\epsilon_d, n)/(e_a - p - \Delta e_f)\}$ と ϵ_d の関係を両対数紙上にプロットしたものである。この直線の

勾配および切片から式(10)中の係数、図-10 $G(\epsilon_d, n) \sim \epsilon_d$ プロット

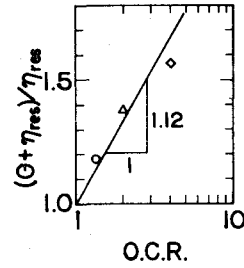
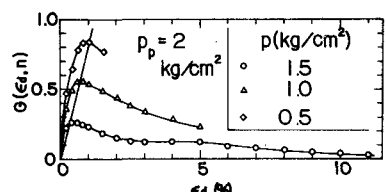


図-11 $(G + \eta_{res})/\eta_{res} \sim \ln(n)$

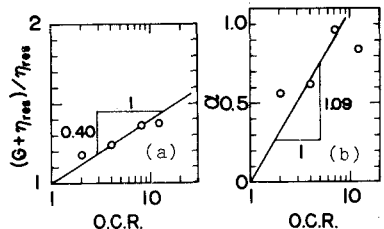


図-6 $(G + \eta_{res})/\eta_{res}, \alpha \sim \log(n)$ プロット

図-8 $\bar{q}/p, \epsilon_v \sim \epsilon_d$ 関係の実験結果と理論曲線の比較

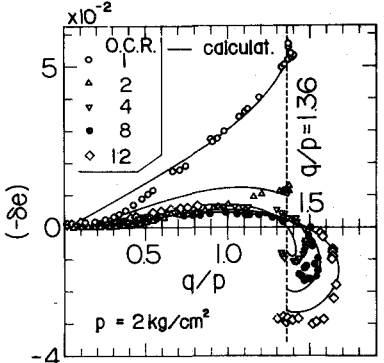
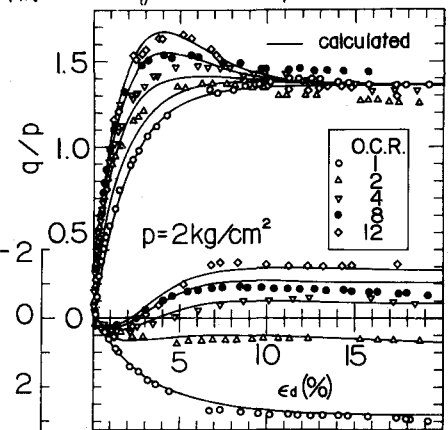


図-9 $(-\delta e) \sim \bar{q}/p$ 関係の実験と理論との比較

数 β , B が求まる。図-8 は, 各試験結果と式(1)~(10)を用いた計算結果を示したものである。計算に用いた定数はまとめて表-1に示した。残留時における $q/p \sim E_d$ 関係の試験結果にかなりのばらつきがあるが, 理論式と実験結果はよく合っている。また, 体積ひずみの計算曲線も実験値によく合っており, 特に残留

表-1 計算に用いた各定数値

	Strain Controlled Test	Stress Controlled Test		Strain Controlled Test	Stress Controlled Test
e_{a1}	1.0373	1.0128	A	50.0	41.1
Γ	0.9838	0.9645	B	131	40.8
λ	0.123	0.106	C	31.3	40.8
κ	0.063	0.0187	b	23.7	84.0
ξ	0.079	0.079	G_0	0.174	0.486
η_{res}	1.36	1.50	α_1	0.30	0.30
			α_2	0.47	0.47
			β	1.5	1.0

時で両者がよく合っていることは, ここで新しく示した乾燥側限界割けき比線の仮定が妥当であることを示している。図-9 は, 同じ試験結果をせん断開始時からの割けき比の減少量 ($-\delta e$) と応力比の関係で示したものである。理論曲線は実験結果によく一致している。

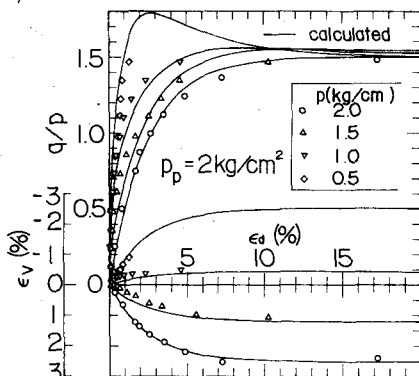


図-12 $q/p, e_v \sim E_d$ 関係

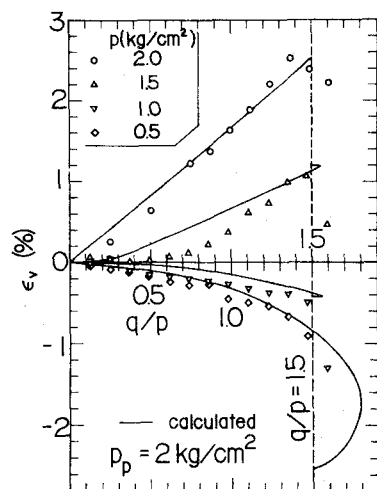


図-13 $e_v \sim q/p$ 関係の実験と理論の比較

応力制御試験結果 図-10 は, 各試験結果から求めた $G(E_d, \eta)$ を E_d に対してプロットしたものである。各曲線のピーク点は原点を通る直線上にあり, この直線の勾配より式(7)中の b を求めることができる。図-11 は, 図-6(a)と同様の関係を応力制御試験結果について示している。これより, 式(8)中の G_0 が求まる。図-12 は, $q/p, e_v \sim E_d$ 関係の試験結果および計算結果を示した。計算に用いた各定数値はまとめて表-1に示している。 α_1, α_2 , β の値はひずみ制御試験と同じ値を用いている。この図からわかるように, 体積ひずみは, E_d に対して単調に増加または減少しており, ひずみ制御試験の場合と異なる。このため, 計算では $B = C, \beta = 1$ としている。図-13 は, 同じ結果を $e_v \sim q/p$ 関係で示したものである。いずれも理論曲線は実験結果によく合っている。

おわりに 繰り返し過圧密粘土を用いた平均主応力一定試験結果を示した。また, これをもとにして, η 一定せん断中の $\eta, (-\delta e)$ と E_d, η の関係を表わす理論式を導き, 実験結果と比較した。理論式に含まれる定数の数は少ないとはいえないが, これらは正規圧密試験および1つの過圧密試験の試験により基本的には決定されるものである。

謝辞 御指導頂いている京都大学防災研究所 柴田 徹 教授, 実験で協力を得た同 清水博樹 技官に深謝の意を表します。