

正規圧密粘性土の弾性挙動について

京都大学防災研究所 正員 大 横 正 紀

1. はじめに 粘性土がある大きさのせん断応力をうけた後、このせん断応力を取り除く過程を除荷、また、同じ経路を除荷開始時の応力状態まで再せん断する過程を再載荷とよぶことができる。弾塑性理論では、これらの両過程でのひずみは弾性ひずみとして扱われる。このときの応力状態は降伏曲面内にあるか、降伏曲面上からその内方向に向かっている。一般に粘性土のような粒状材料では、このような弾性領域でもせん断変形による体積変化、すなわち、ダイラテンシーを生じるとともに、その応力～ひずみ関係は非線形である。ここでは、はじめに、 p 一定載荷－除荷過程および p 一定で載荷した後、 $dp > 0$ で応力比 η ($=(\sigma_a - \sigma_r)/p$)を減少させる場合の試験結果を示す。

2. 試験結果と解析

試験料および試験方法 試験料は市販粉末粘土（藤森粘土）の練り返し再圧密（ $\sigma_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ ）したものを用いている（ $w_0 \div 45\%$ ）。試験は、N. G. I.型三軸装置を用い、ペーパードレーンによる側方排水条件のもとに、応力制御で行なっている。試験中、供試体頂端面の鉛直方向変位および供試体の排水量を測定し、各ひずみを求めている。

平均主応力一定試験結果 はじめに、図-1 (a), (b)に示すような三軸圧縮と伸張にまたがる応力経路（各プロットを1日毎に載荷）および p 一定の普通の三軸圧縮、伸張試験結果の比較を行なう。図-2 (a)に、応力比 η_a ($=(\sigma_a - \sigma_r)/p$)と体積ひずみ v の関係を示している。（ σ_a ：軸方向応力， σ_r ：半径方向応力）。三軸圧縮および伸張の単調載荷試験では、 v は η_a とともに直線的に増加し、 v の最大値は両試験で同じとみなせる。他方、せん断応力の逆転する2つの試験では、せん断応力の逆転とともに v の出方はある応力比までは小さく、それを越えると大きくなっており、この点を境に塑性領域に入ったとみなせる。また、図より、除荷と再載荷の両過程で v は増加する一方である。同図(b)は、 η_a とせん断開始時からの偏差ひずみ ϵ （三軸

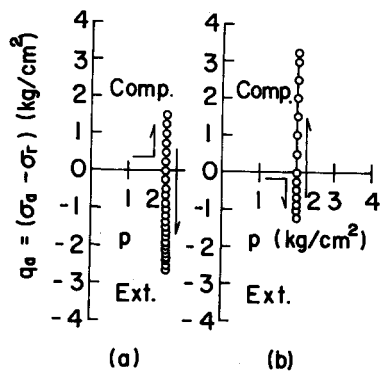


図-1 応力経路

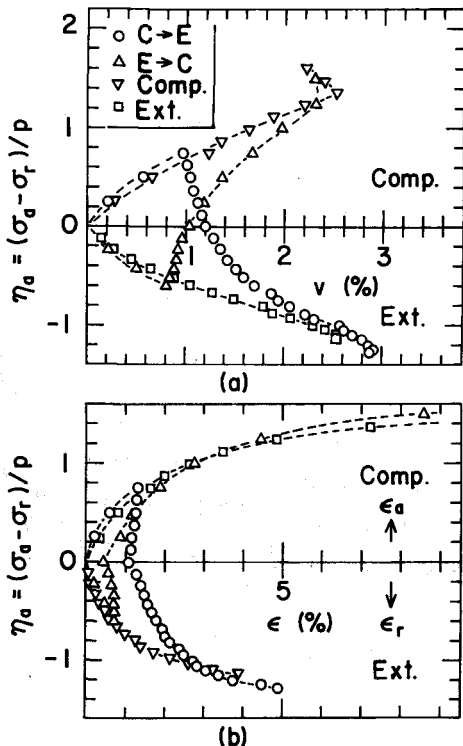


図-2 試験結果

圧縮では軸方向，伸張では半径方向のものをを用いている）の関係を示している。プロットは，除荷，再載荷時はほぼ直線的であり，再載荷後ある応力比以上に達すると単調載荷試験の曲線に一致して，塑性領域に入ったとみなせる。つぎに，図-3に示すように，平均有効主応力 p_i まで等方圧密後， p 一定で応力比 η_i までせん断し，この後 p 一定で除荷する試験結果を示す。図-4は，図-3に示した試験2～6のせん断開始時からの ϵ ， v と η の関係を示している。除荷時の挙動に着目するならば， $\eta \sim \epsilon$ ， $\eta \sim v$ 関係はともに η_i に関係なく，ほぼ平行とみなすことができ，直線で近似することができる。このような関係は試験1，4，7からもみられる。この関係を式(1)，(2)で表わす。式中，ひずみ増分の上添字 e は弾性成分を，下添字 p は p 一定下での成分を表わしている。また， $d\epsilon_a = \frac{2}{3}(d\epsilon_{axis} - d\epsilon_{rad})$ で， $d\epsilon_{axis}$ ， $d\epsilon_{rad}$ は軸方向および半径方向の主ひずみ増分である。 M は破壊時の $(\sigma_1 - \sigma_3)/p$ である。 d ， G は定係数であり，図から求めることができるが，ここに示した各試験からの平均値として， $d = 0.67 \times 10^{-2}$ ， $G = 0.65 \times 10^{-2}$ を得た。式(1)中の $d\eta_a$ についている絶対値は，除荷，再載荷で体積ひずみ増分が常に正であることを示すものであり，軽部¹⁾によるものである。

$$dv_p^e = \frac{d}{M} |d\eta_a| \quad (1)$$

$dp > 0$ ， $d\eta < 0$ の応力

経路の試験結果

図

$$(d\epsilon_a)_p^e = \frac{G}{M} d\eta_a \quad (2)$$

-5に三軸圧縮下で p_i

まで等方圧密

後， p 一定で

η_i までせん

断した後の σ_1

一定の応力経

路 ($dp > 0$ ，

$d\eta < 0$) を示

している。図

-6に，試験

2～6の結果

を示す。同図

中には同時に

実線で図-4

の p 一定除荷

試験の結果を

，破線で後述

する解析結果

を，いずれも

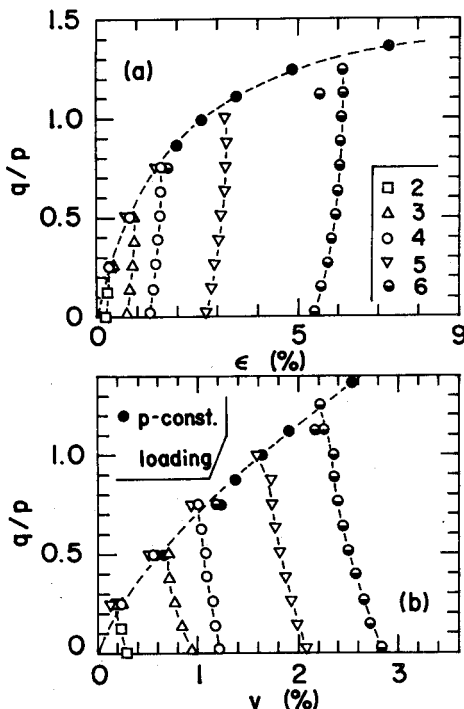


図-4 p 一定除荷試験結果

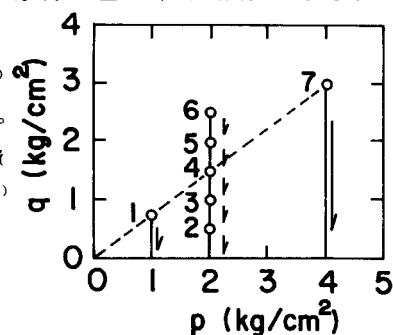


図-3 応力経路

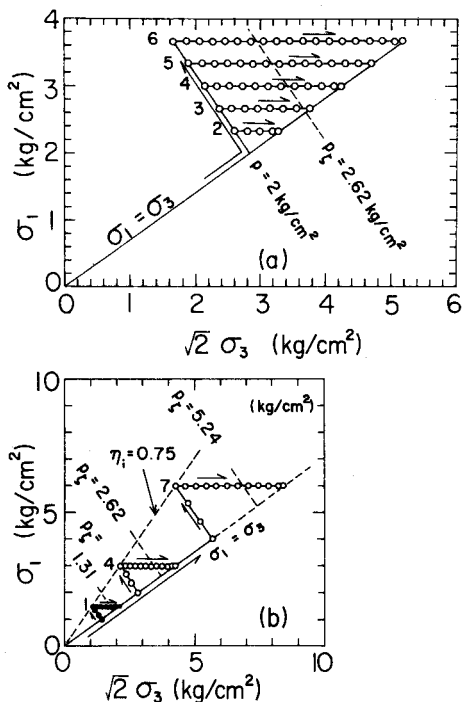


図-5 σ_1 一定応力経路

除荷開始時の点を同じにして示している。 $\eta \sim \epsilon$ 関係では、 p 一定試験結果との差異はほとんど認められない。図-7は図-5の各試験の $(-\delta e) - (-\delta e)_p$ と $(-\delta e)_\eta$ の関係を示している。ここに、 $(-\delta e)$ は、図-5の各試験の除荷開始時からの間げき比の減少量であり、 $(-\delta e)_p$ は同じ η_i をもつ p 一定除荷試験(図-4)の同じ η までの間げき比の減少量である。また、 $(-\delta e)_\eta = \lambda \ln(p/p_i)$ である。ここに、 λ は $e \sim \ln(p)$ 図上での圧縮指数であり、 $\lambda = 0.106$ を用いている。図より、各プロットは、 $(-\delta e) = (-\delta e)_p + (-\delta e)_\eta$ の関係を示す破線上に位置せず、これよりかなり下にある。ここではこれを図に示した2本の直線で表わす。両直線の交点の縦軸座標を Δe_0 とすると、これは図に示したように η_i 、 p_i に無関係にほぼ一定とみなせる。これらの関係を $e_\eta \sim \ln(p)$ 図上で示すと図-8のようになる。ここに、 e_η は間げき比の η 一定成分である。

図より $e_\eta \sim \ln(p)$ 関係は除荷とともに、はじめ、勾配 ζ ($< \lambda$)の直線上を移動

$$(-\delta e)_\eta \leq \Delta e_0 \text{ のとき: } (-\delta e)_\eta = \zeta \frac{dp}{p} \quad (3)$$

し、 $p = p_c$ から勾配 λ

$$(-\delta e)_\eta > \Delta e_0 \text{ のとき: } (-\delta e)_\eta = \lambda \frac{dp}{p} \quad (4)$$

の直線上を移動することになる。これは、せん断応力の逆転または応力増分を小さくしたことによる一種の p_c -効果とみなせ、式(3)、(4)のように表わせる。図-6の $\eta \sim v$ 関係の解析結果はこれらのことを考慮に入れて求めたものである($\zeta = 0.040$, $\Delta e_0 = 0.0106$)

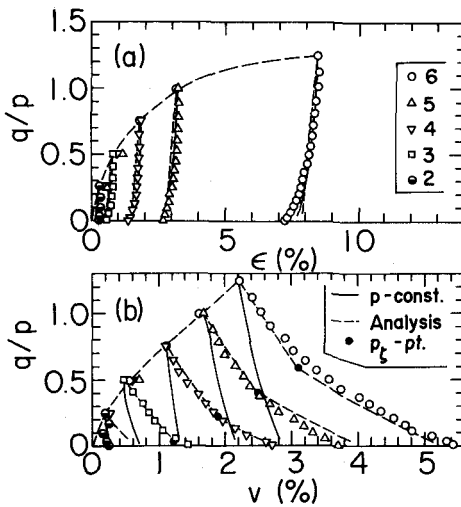


図-6 σ_1 一定除荷試験結果

。なお、 $\eta \sim \epsilon$ 関係の解析結果は、 $d\epsilon$ は p 一定下でのものと同じとして式(2)より計算している。つぎに、除荷時の応力経路の勾配が種々に異なる場合の試験結果を示す。図-9に、各試験の応力経路を、図-10に試験結果と解析結果の比較を示す。図

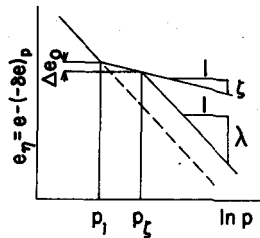


図-8 $e_\eta \sim \ln p$

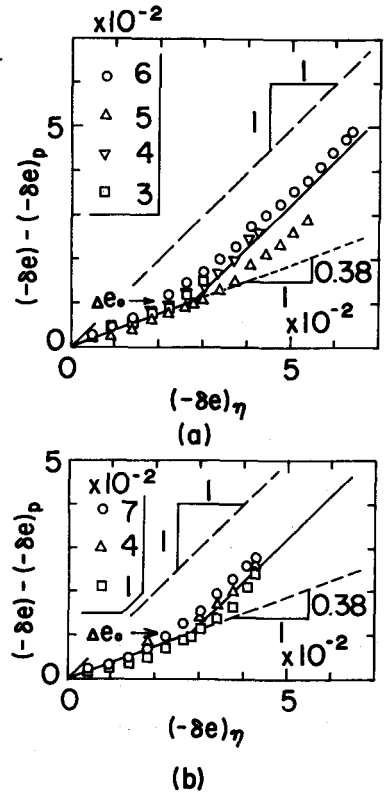


図-7 間げき比の変化

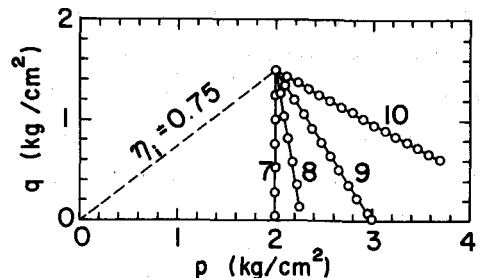


図-9 応力経路

-10 (a)において応力経路がかなり異なっているにもかかわらず $\eta \sim \epsilon$ 関係はほぼ同じとみなせる。このような関係は、Balasubramaniam²⁾によっても示されている。解析は式(1)~(4)を用い、 σ_1 一定除荷試験と同じ係数値を用いて行なっているが、試験結果とよく合っていると思われる。

3. 考察とまとめ ここでは、 $d\eta < 0$, $dp \geq 0$ のような応力経路での変形特性について考える。間げき比および偏差ひずみの変化をつぎのように表わす。式中、上添字 e , p はそれぞれ弾性成分, 塑性

$$(-de) = (-de)_p^e + (-de)_\eta^e + (-de)_\eta^p \quad (5)$$

$$d\epsilon = d\epsilon_p^e + d\epsilon_\eta^p \quad (6)$$

成分を, 下添字 p , η は p 一定成分, η 一定成分であることを示す。ここでは、 $d\eta < 0$ の応力経路を考

えているから、 $(-de)_p^p = 0$, $(d\epsilon)_p^p = 0$ である。ま 図-10 試験結果と解析結果の比較

た、 $d\epsilon_\eta^e = 0$ を仮定している。式(5)の間げき比の各成分のうち、 $(-de)_\eta^e = \kappa dp/p$ (κ : 膨潤指数)とすると、 $(-de)_p^e$ は式(1)より計算され、 $(-de)_\eta^e + (-de)_\eta^p = (-de)_\eta$ は式(3)、(4)で表わされている。また、式(6)の偏差ひずみ成分のうち、 $d\epsilon_p^e$ は式(2)で表わされた。また、図-6, 10の(a)図より $d\epsilon_\eta^p = 0$ と考えることができる。図-11は、 η 一定の応力

増分ベクトルに対して、載荷のみの場合と、載荷-除荷の履歴を含んだ場合の塑性ひずみ増分ベクトルの方向を示している。塑性ひずみ増分ベクトルの方向は、前者の場合は p 軸と正の鉛角で交わるが、後者の場合は p 軸に平行になり、塑性ひずみ増分ベクトルの方向が応力履歴の影響をうけることがわかる。

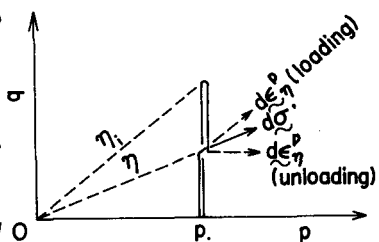
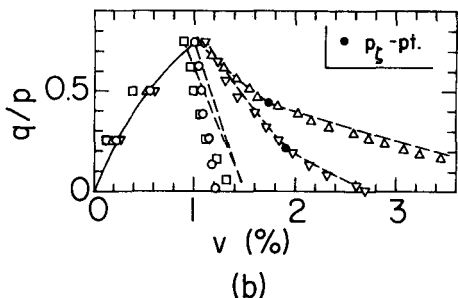
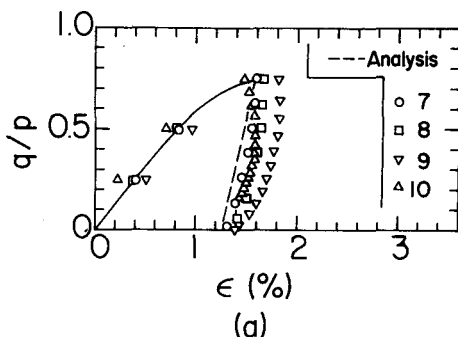


図-11 塑性ひずみ増分

謝辞：末筆ながら、御指導頂いている京都大学防災研究所 柴田徹教授、実験で援助を頂いた 同 清水博樹技官に深謝の意を表します。

参考文献：1) 軽部大蔵, 栗原則夫 (1966), 「練り返し粘土のダイラタンシーとせん断強度について」, 土木学会論文報告集, 第135号, pp. 10~24.

2) Balasubramaniam, A. S. (1975), "Stress-Strain Behaviour of a Saturated Clay for States below the State Boundary Surface", Soils and Foundations, Vol. 15 No. 3, pp. 13~26.