

異なる三主応力を受ける粘性土の応力-ひずみ特性

小 野 丘*・池 浦 勲**

Stress-strain behaviour of clay under three-dimensional loading condition

Takashi ONO and Isao IKEURA

要 旨

飽和粘性土に対して、平均主応力一定条件の下で、異なる三主応力を与えた排水せん断試験を実施し、その結果を示した。また、池浦・三田地によって提案されている弾塑性応力-ひずみ式と実験結果とを比較し、提案式の拡張を試みた。

Abstract

The results of three-dimensional drained test on saturated remoulded normally consolidated clay are presented under the condition of constant mean principal stress.

The observations are compared with the predictions of elasto-plastic clay model proposed by Ikeura and Mitachi, and some developments are shown relating to the stress paths on a plane of constant normal stress in principal stress space.

1. ま え が き

これまでに池浦・三田地¹⁾が提案している飽和粘性土の応力-ひずみ関係は、特にその応力経路依存性について注目してきており、圧密経路とせん断経路とのなす角と直線関係にある、式中のパラメータ α の特性もわかってきている^{2),3)}。しかしながら、この提案式は軸対称条件の下で導かれたものであり、三主応力の異なる場での検討は全くなされていない。今回、平均有効主応力一定の下で中間主応力の相対的大きさを変えた実験を実施し、データを若干得ることができたので、その結果をもとに三主応力場での提案式の検討を行なうものである。

2. 実験試料および実験方法

実験に用いた三主応力載荷装置は、偏差応力を外部のペロフラムシリンダーによりピストンロッドを介して載荷し、中間主応力はセル内の pressure bag 内の液圧により与えることができる。

また、最小主応力はセル水の圧力を変えることで、三主応力をそれぞれ独立に載荷することができるものである。供試体の寸法は100×44×60mmの角柱で、側方変位は供試体の短軸方向（最小主応力方向）変位を両側からダイヤルゲージにより測定した。また、間隙水圧はペDESTAL中央において測定し、吸排水は供試体上部から行き、二重管ピュレットと差圧計により測定した。圧密、せん断を通して100 kPaの背圧を載荷している。

用いた粘土試料は、自然粘土をスラリー状態にして実験室内で養生し、鉛直圧密圧力80 kPaで再圧密したもので、その諸性質を表-1に示す。

表-1 試料の諸性質

L L	6 0 (%)	G s	2. 6 5
P I	2 4	λ	0. 1 3
C F	5 8 (%)	κ	0. 0 3

実験は、有効圧密圧力200 kPaで等方圧密した後、平均主応力一定のもとで中間主応力の相対的大きさを一定に保ちながら、応力制御による排水試験を行なった。せん断時の応力経路を図-1に

*助手 土木工学科
**教授 土木工学科

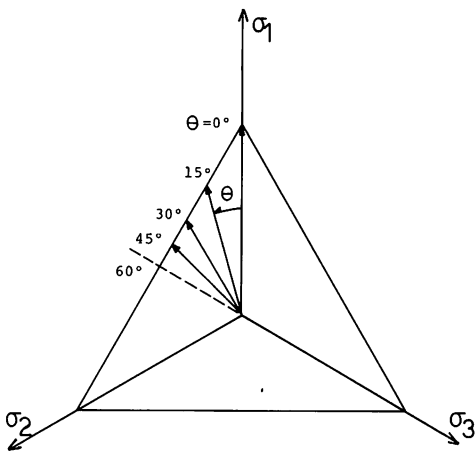


図-1 平均主応力一定面上の応力経路

示す。図中の θ は、三主応力空間の平均主応力一定面上で静水圧軸と最大主応力軸とを結んだ線から反時計回りに測った角度である。なお、 $\theta = 60^\circ$ （軸対称伸張試験）の結果は過年度実施された円柱供試体のデータである。

中間主応力の相対的大きさを表わす b 値は(1)式を用いる。

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (1)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: それぞれ最大, 中間, 最小主応力
なお, b 値と θ の関係は(2)式となる。

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{3}b}{2-b} \quad (2)$$

3. 弾塑性応力一ひずみ式

池浦・三田地が提案している弾塑性応力一ひずみ式¹⁾は次式のようなものである。

$$dv = dv^p + dv^r = \frac{\lambda}{1+e} \left[\frac{dp}{p} + \left(1 - \frac{\kappa}{\lambda} \right) \frac{a(\eta-b)d\eta}{(a-1)(\eta-b)^2 + (M-b)^2} \right] \quad (3)$$

$$d\epsilon = d\epsilon^p + d\epsilon^r = \frac{a(\eta-b)}{(M-b)^2 - (\eta-b)^2} \cdot dv^p + \left(\frac{p_0}{3G} \right) d\eta \quad (4)$$

dv^p : 塑性体積ひずみ増分

$d\epsilon^p$: 塑性せん断ひずみ増分

dv^r : 可逆(弾性)体積ひずみ増分

$d\epsilon^r$: 可逆(弾性)せん断ひずみ増分

$$\eta = q/p \quad (\text{応力比})$$

$$q = (\sigma'_a - \sigma'_r) \quad (\text{偏差応力})$$

$$p = (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3 \quad (\text{平均有効主応力})$$

σ'_a : 有効軸圧, σ'_r : 有効側圧

M : 限界状態 (Critical state) での応力比

a : 塑性応力増分比の影響を表わすパラメータ

b : 異方圧密履歴を表わすパラメータ

((3)式とは別)

G : 剛性率 (9240 kPa), p_0 : 有効圧密圧力

(3)式および(4)式は、Cam-clay モデルをその基礎にしているが、非関連流れ則の立場をとり、ひずみの応力経路依存性を表す a と、移動硬化と非直交性の程度を表す b とを導入した構成モデルである。

(3), (4)式中のパラメータ a は、 p - q 平面上で圧密経路とせん断経路とのなす角度と直線関係にあり、かつその関係は圧密時の応力比 (応力経路) に依存しないことなどが分かっている⁴⁾。また、パラメータ b は、圧密からせん断に移る際に主応力の反転がある場合 (受働せん断) は η_0 (異方圧密軸), ない場合 (主働せん断) は 0 とする。

さて、(3)式、(4)式を三主応力が異なり、かつ平均主応力一定という条件で考える場合、本来塑性ひずみ増分比や直交性に関する仮定を三主応力条件下で改めて検討する必要があるが、ここでは単に、応力を次式のように定義しなおして軸対称条件との連続性を保つこととする。

$$\eta = \frac{q}{p} \quad (5)$$

$$p = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

また、せん断ひずみ ϵ は、次式とする。

$$\epsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (6)$$

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$: それぞれ最大, 中間, 最小主ひずみ
つまり、(3), (4)式における応力比, せん断ひずみを(5), (6)式とし、限界状態での応力比 M も限界状態での(5)式とする。

4. 三主応力条件下の変形・強度

4. 1 応力一ひずみ関係

図-2(a)~(e)および図-3(a)~(e)は、(5)式による応力比 η と(6)式によるせん断ひずみ ϵ および体積ひずみ v の各応力経路ごとの実験値と(3), (4)式による計算結果である。計算に用いた M を表-2に示す。 $\theta = 45^\circ$ の体積ひずみに見られる挙動は、排水経路の漏れが原因であると考えられる。 $\theta = 30^\circ$ までは、伸張側へ向かうにつれてひずみの増大する傾向のあることがわかる。

図-2, 図-3では、限界状態での応力比 M

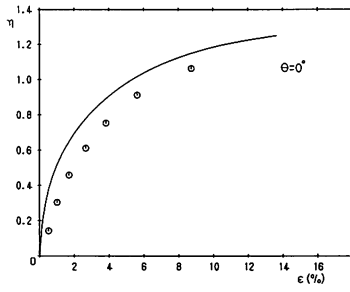


図-2 (a)

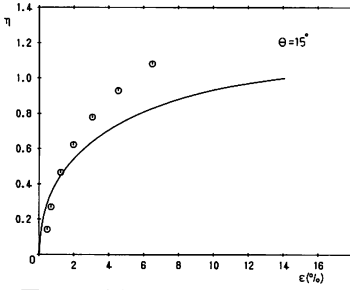


図-2 (b)

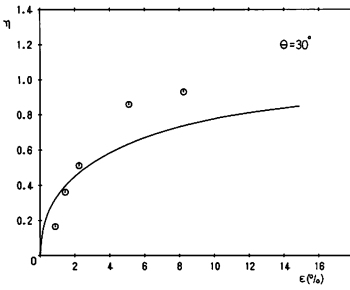


図-2 (c)

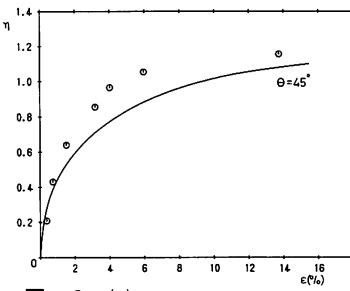


図-2 (d)

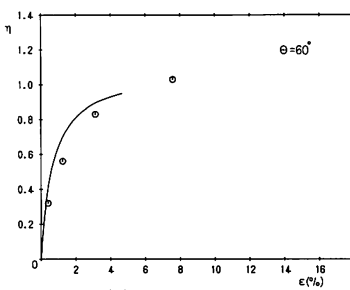


図-2 (e)

応力比とせん断ひずみ

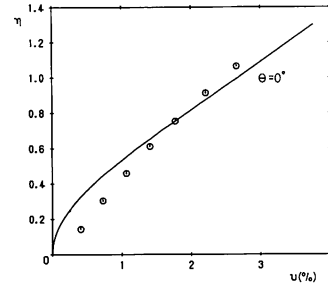


図-3 (a)

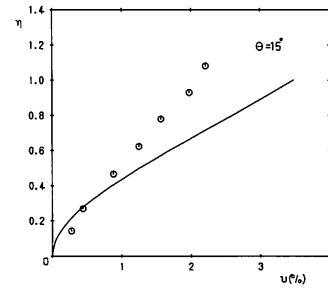


図-3 (b)

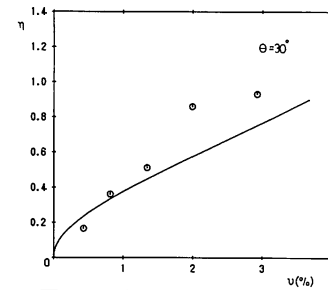


図-3 (c)

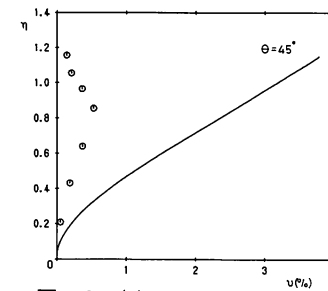


図-3 (d)

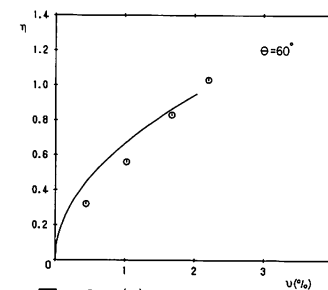
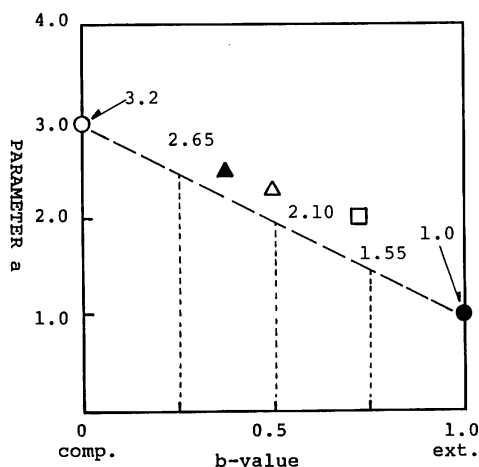


図-3 (e)

応力比と体積ひずみ

表-2 限界状態応力比

θ (deg)	M
0	1. 3 2
1 5	1. 0 8
3 0	0. 9 3
4 5	1. 1 6
6 0	- 1. 0 0

図-4 パラメータ a の直線近似

を中間主応力の大きさによって変えてあるものの、パラメータ a は、一定として計算してある。

しかし、 a の値も θ に対する連続性を持っていると考えられ⁵⁾、図-4のようにパラメータ a を圧縮と伸張の実験値の間で直線近似して、各 θ (b 値) に対応する a の値を求めることで、応力-ひずみ関係を計算しなおしたのが図-5(a)~(c)および図-6(a)~(c)である。 $\theta = 45^\circ$ の体積ひずみを除いて、提案式による計算値がかなり改善されていることが分かる。なお、図-4にプロットしてある点は、 $M_{\text{comp.}} = 1.32$ 、 $M_{\text{ext.}} = -1.0$ に固定した場合、応力ひずみを最もよく表わすように選んだ場合の a の値である⁵⁾。

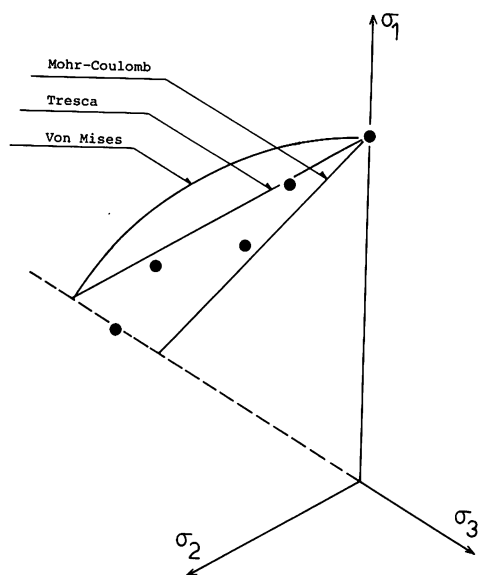


図-7 破壊時の応力点と破壊規準

4.2 破壊規準

図-7は、破壊点とみなされる応力点を各破壊規準とともに平均主応力一定面上に示したものである。一般に言われているように Mohr-Coulomb の破壊規準は中間主応力が存在する場合安全側の値を示すことが確認された。

5. ま と め

飽和粘性土に対する平均主応力一定排水試験を異なる三主応力の下で実施し、池浦・三田地の提案している応力-ひずみ式による予測と比較した結果、提案式中の a および M の値を応力経路に応じて定めることで応力-ひずみをよく表現できることが分かった。また、軸対称圧縮試験と伸張試験から求められる a の値を使って、中間主応力が存在する場合の a を近似することは有効な方法である。

なお、本実験データを得るにあたり本校卒業生 角谷英一郎君、門口貴美君、梶原誠君、渡会正晃君の多大な協力を得たことに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 池浦勲・三田地利之 (1986) : 異方圧密粘土の応力-ひずみ関係に及ぼす応力経路の影響, 土質工学会論文報告集, Vol. 26, No. 3, 157-168

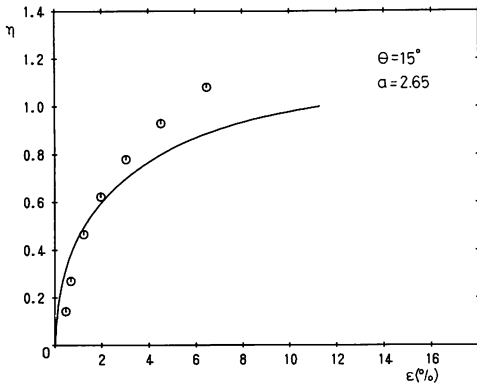


図-5 (a)

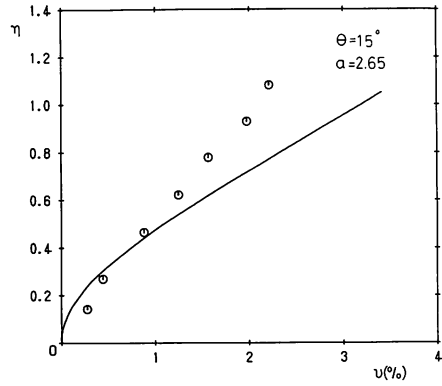


図-6 (a)

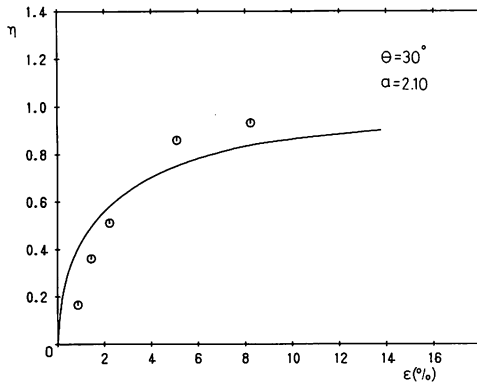


図-5 (b)

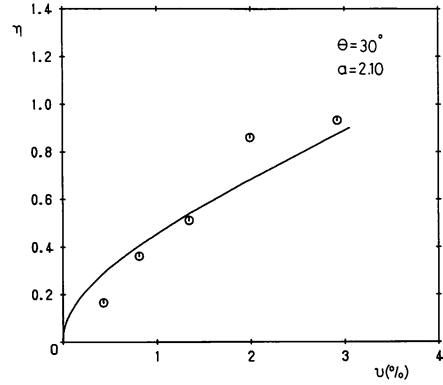


図-6 (b)

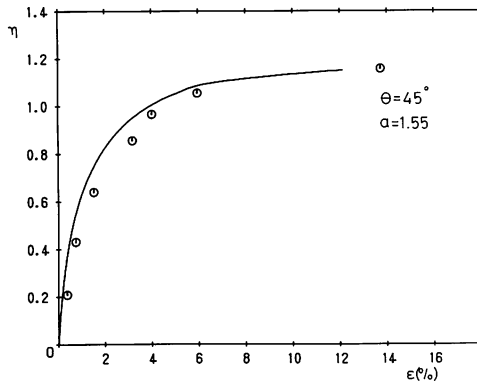


図-5 (c)

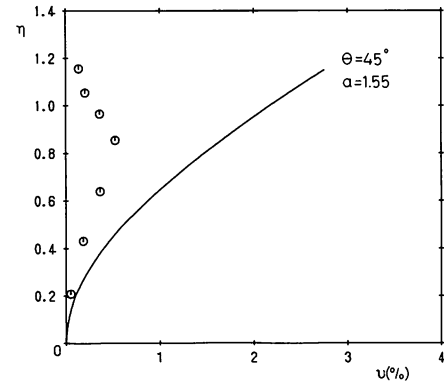


図-6 (c)

パラメータ a を考慮した応力比-せん断ひずみ

パラメータ a を考慮した応力比-体積ひずみ

- 2) 池浦勲・小野丘 (1989) : 異方圧密粘土の応力-ひずみ挙動について (第4報), 土質工学会北海道支部技術報告集, Vol. 29, 113-118
- 3) 池浦勲・小野丘 (1989) : 粘性土の変形特性に及ぼすせん断経路の影響, 第44回土木学会年次講演会概要集, 430-431
- 4) 池浦勲・三田地利之・水上純一 (1986) : 異

- 方圧密粘土の応力-ひずみ関係 (第3報), 第41回土木学会年次講演会概要集, 311-312
- 5) 小野丘・池浦勲 (1989) : 三主応力下における粘性土のせん断特性, 第44回土木学会年次講演会概要集, 431-432

(平成元年12月1日受理)

