

三主応力条件下での粘性土の 応力－ひずみ関係

池 浦 勲*・小 野 丘**

Stress-strain relationship of clay
under three-dimensional stress condition

Isao IKEURA and Takashi ONO

要 旨

飽和粘性土に対して、平均有効主応力一定条件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、その結果をもとに、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－ひずみ式を三主応力場に適用し、提案式の拡張を試みたので報告する。

Abstract

In order to investigate the influence of intermediate principal stress on the shear behavior of cohesive soil, several stress controlled drained shear tests were carried out under condition of constant mean principal stress.

The test result are compared with the predictions of elasto-plastic clay model proposed by Ikeura and Mitachi, and some attempt of extending the model to three dimensional stress space are shown.

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－ひずみ関係式は、特にその応力経路依存性について注目してきており、式中のパラメータ a が、圧密経路とせん断経路とのなす角と直線関係にあることなどの特性も分かってきている^{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なされていなかった。

実際の地盤では軸対称応力条件であることが少なく、むしろ三主応力が異なる場合が多いと考えられる。そこで既報においては、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結果をもとに、提案式を三主応力場に拡張して

適用することを試みた。今回は更に補強実験を実施し、考察を追加したので報告する。

2. 実験試料および実験方法

実験に用いた試料は、スラリー状態にした自然粘土を、鉛直圧密圧力80kPaで再圧密したものであり、その諸性質を表－1に示す。三主応力載荷装置は、偏差応力、中間主応力、最小主応力をそれぞれベロフラムシリンダー、プレッシャーバッグ、セル水で載荷するものである。供試体の寸法は、100×44×60mmであり、供試体の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

表 1 試料の性質

LL	60%	ρ_s	2.65
PL	24	λ	0.13
粘土分	58%	κ	0.03

* 教授 土木工学科

** 助手 土木工学科

からダイヤルゲージにより測定した。また、間隙水圧はペダスタル中央において測定し、吸排水は供試体に巻いたドレインペーパーを介して供試体上部から行い、二重管ビュレットと差圧計により測定した。圧密、せん断を通して100kPaの背圧を載荷している。

実験は、有効圧密圧力200kPaまで等方圧密した後、平均有効主応力一定のもとで中間主応力 σ_2 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せん断試験を行った。中間主応力の相対的大きさを表す b 値は(1)式で示される。

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

σ_1 , σ_2 , σ_3 : それぞれ最大, 中間, 最小有効主応力

三主応力空間内の平均有効主応力一定面上で、静水圧軸と σ_1 軸とを結んだ線から反時計回りに測った角度を θ とすると、 b 値と θ には(2)式の関係があるが、既報の $\theta = 0^\circ$ ($b = 0$), 15° (0.27), 30° (0.50), 60° (1.0)の他に今回は $\theta = 45^\circ$ (0.734)の実験を実施した。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3} b}{2 - b} \quad (2)$$

応力の載荷は24時間間隔で段階的に行った。図-1にせん断時の応力経路を示す。

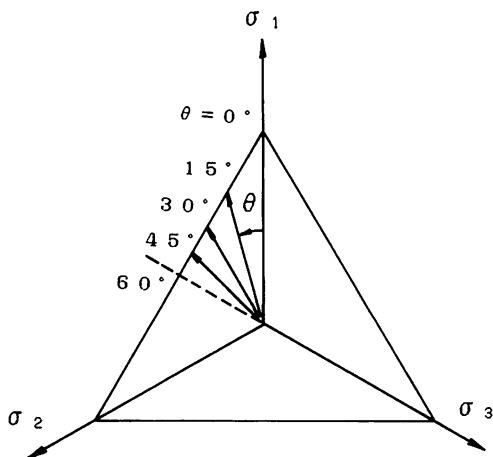


図1 応力経路

3. 応力-ひずみ式

池浦・三田地が提案している応力-ひずみ式¹⁾は平均有効主応力一定条件下(有効圧密圧力 $p_0 = 200\text{kPa}$)では次式のようなものである。

$$\begin{aligned} dv &= dv^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \frac{a(\eta - b) d\eta}{(M - b)^2 + (a - 1)(\eta - b)^2} \\ \varepsilon &= d\varepsilon^p + d\varepsilon^r = \frac{a(\eta - b)}{(M - b)^2 + (\eta - b)^2} \cdot dv^p \\ &\quad + \frac{p_0 d\eta}{3G} \quad (3) \end{aligned}$$

ここに $v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ (体積ひずみ)

$$\varepsilon = \frac{2}{3} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (\text{せん断ひずみ})$$

$$p = \frac{\sigma_1 - 2\sigma_3}{3} \quad (\text{平均有効主応力})$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3, \quad \eta = \frac{q}{p} \quad (\text{応力比})$$

$M = \eta_{max}$ (限界状態の応力比 η)

G : 粘土の剛性率 (9240kPa)

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$: 最大, 中間, 最小主ひずみ

添字 r, p はそれぞれひずみの可逆(弾性)成分, 塑性成分を示すが、 p 一定条件では v^r は無視できるので、得られた体積ひずみ v は全て塑性ひずみと仮定した。

(3)式は、ひずみの応力経路依存性を表すパラメータ a と、移動硬化と非直交性の程度を表すパラメータ b ((1)式の b 値とは別)とを導入し、cam-clayモデルと同様の誘導方法で得られた弾塑性構成モデルである。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 α と直線関係にあり、かつ、その関係は圧密時の応力比に依存しないことなどが分かっている²⁾。また、 b は等方圧密試料を対象とする本報告では零とする。

さて、(3)式を、三主応力が異なり、かつ p が一定という条件で考える場合に、本来塑性ひずみ増分比や直交性に関する仮定を改めて検討する必要があるが、ここでは軸対称条件との連続性を考えて(3)式のうちの q と ε を次式のように定義し直すこととする。

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$

(4)式に $\sigma_1 = \sigma_2$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ という軸対称条件を当てはめると(3)式の q, ε と等しくなってデータの連続性が保たれるからである。

なお、(4)式の q, ε と正八面体上のせん断応力やせん断ひずみ τ_{oct}, γ_{oct} とは次のような関係にある。

$$q = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_{oct}, \quad \varepsilon = \sqrt{2} \gamma_{oct} \quad (5)$$

4. 主応力条件下の変形

4. 1 応力-ひずみ関係

図-3(a)～(e)及び図-4(a)～(e)は、応力比 η と体積ひずみ v 、せん断ひずみ ε の実測値を示した。 $\theta=45^\circ$ までは θ が大きくなるにつれ ε が増大する傾向が見られる。 v については θ の影響はほとんど見受けられない。 $\theta=45^\circ$ の場合は前回に示した極端な挙動は見られないが、他と比べて v の発生が少ない結果となった。

図-3、図-4には(3)、(4)式による計算値を併記した。計算に用いたパラメータを表-2に示す

表2 計算に用いたパラメータ

θ°	b	M	e_0
0	0	1.32	1.19
15	0.27	1.08	1.27
30	0.50	0.93	1.24
45	0.73	1.16	1.35
60	1.00	-1.0	1.23

が、Mとしては各経路で得られた実測値を用いた。また、 α も、 θ に対する連続性を持っていると考えられる³⁾ので、図-2のように圧縮と伸張の実験値の間で直線近似して、各 θ (b値)に対応する値を計算に用いた。しかし、この方法では ε が過大に算定される傾向にあることがわかる。そこで、今回のような応力制御による排水せん断試験では、Mが正確には求められないことを考慮して、Mを圧縮側($\theta=0^\circ\sim 30^\circ$)と伸張側($\theta=60^\circ$)とでそれぞれ一定値($M_{comp.}=1.32$, $M_{ext.}=-1.0$)と考え、応力-ひずみ関係を計算し直したものが図中の破線である。提案式による計算値が

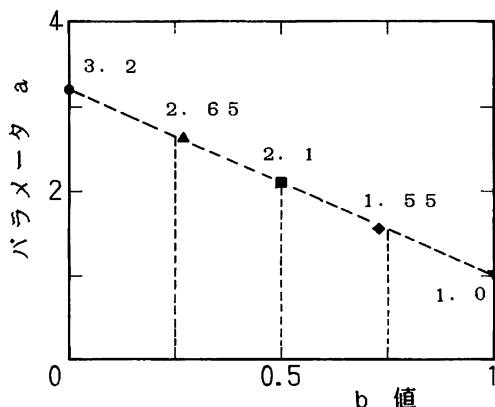


図2 パラメータ α とb値の関係

かなり改善されていることが分かる。つまり、Mの値は圧縮か伸張かだけを考慮すればよいと考えられる。

また図-3、4中の一点鎖線は松岡・中井らのtijModel⁴⁾による予測結果である。計算において、 $\phi'=32.8^\circ$ ($\theta=0^\circ$ に対応)、パラメータ $\alpha=0.6$ を用いた。図によればtijModelは、かなりの精度でせん断ひずみ ε を予測しているが、体積ひずみ v については θ の大きい($=45^\circ, 60^\circ$)場合に過大な値を与えるようである。

5. ま と め

飽和粘性土の p -一定排水せん断試験を異なる三主応力の下で実施した結果、中間主応力が存在する場合の α の値を軸対称圧縮・伸縮試験結果から θ に応じて推定することで、著者らの提案式が応力-ひずみ関係をよく表現できることが分かった。

結びに当たり、本報告における実験で苫小牧高専卒業生の市川、智司、岸梅、博君の多大な協力を得たことを記して謝意を表します。

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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) Nakai, T. and Matsuoka, H. (1986): "A Generalized Elastoplastic Constitutive Model for Clay in Three-dimensional Stresses" Soils and Foundations, Vol. 26, No. 3, 81-98

(平成3年11月30日受理)

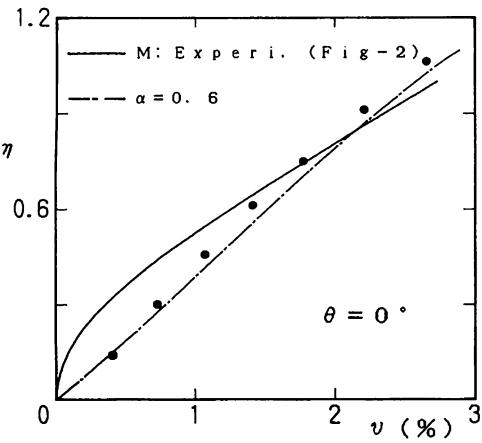


図3 (a)

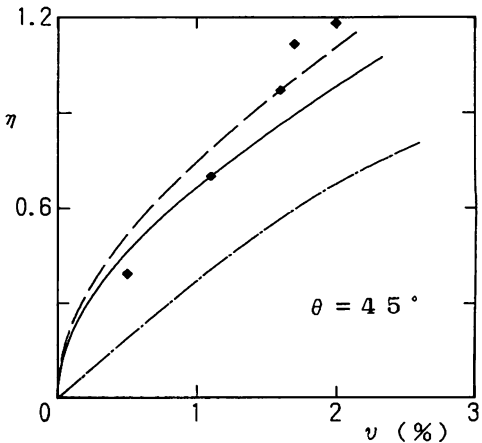


図3 (d)

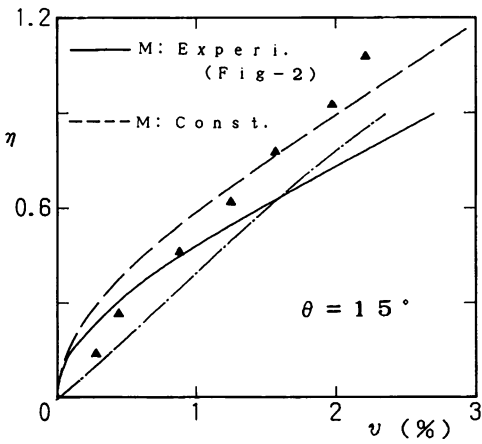


図3 (b)

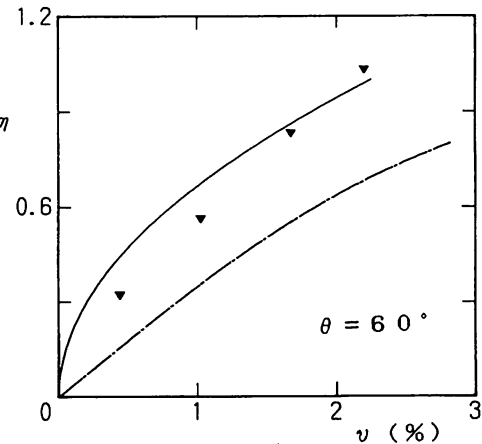


図3 (e) 体積ひずみと応力比の関係

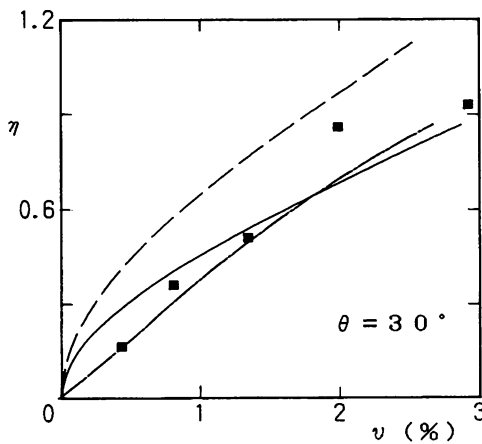


図3 (c)

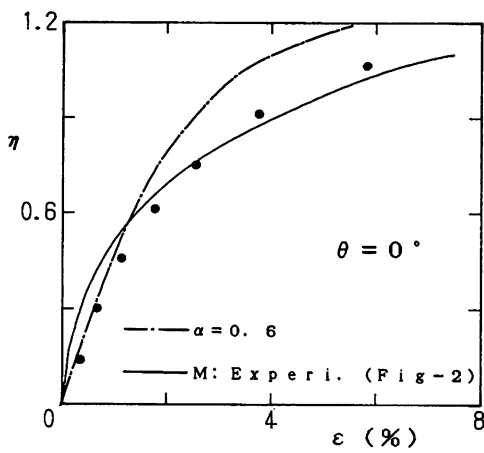


図 4 (a)

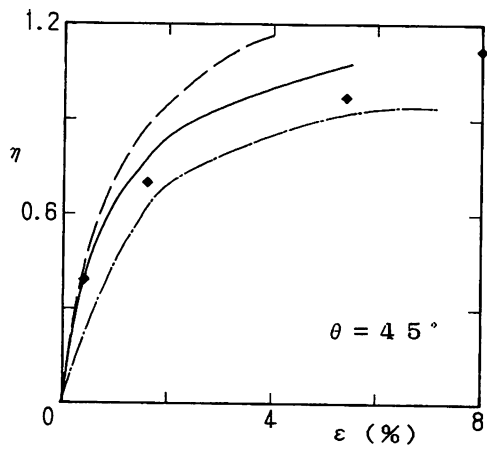


図 4 (d)

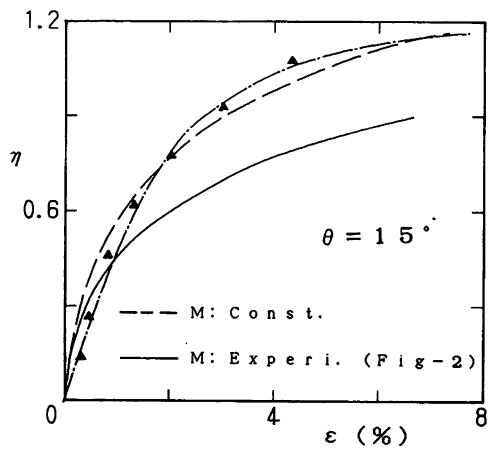


図 4 (b)

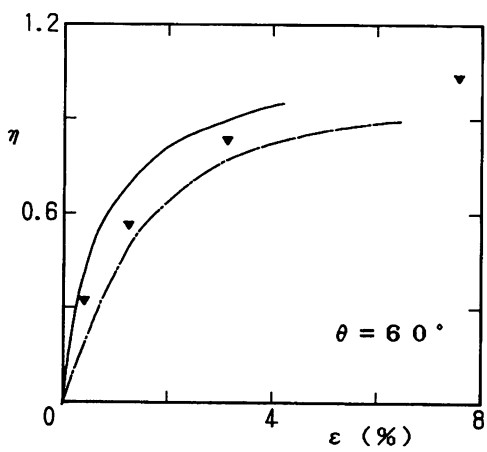


図 4 (e) せん断ひずみと応力比の関係

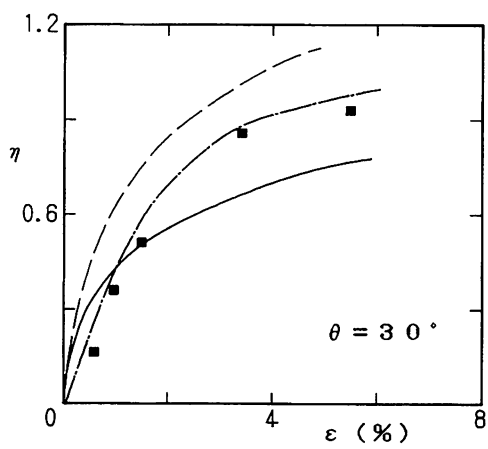


図 4 (c)

