

# 飽和粘土の応力～ひずみ関係におよぼす応力経路の影響

池 浦 勲\*

## Influence of Stress path on Stress-strain Relationships of Saturated Clay

Isao IKEURA

### 要 旨

各種経路で圧密した飽和粘性土を対象に、圧密経路と成す角度を揃えた応力経路で排水せん断試験を実施し、応力～ひずみ式中のパラメータと応力経路との関係に検討を加えた。

### Abstract

Some drain shear tests was performed on saturated clay consolidated under various paths. The angle between consolidation and shear stress path is unified to  $60^\circ$ . Correlation of the stress path with the parameter included in stress-strain equation is examined.

### 1. ま え が き

筆者らはこれまで、異方圧密履歴を受けた粘土の各種応力経路のもとでの排水せん断特性について報告し<sup>1)2)</sup>、移動硬化と非関連流れ則の概念を用いた応力～ひずみ式を提案した<sup>3)</sup>。

その際の異方圧密は、自然堆積地盤の状態に近似させるために一方向の変位を拘束したいわゆる  $K_0$  圧密を主体としたものであった。また提案した応力～ひずみ式で用いられるパラメータのうち、 $b$  は移動硬化の程度と非直交の程度の両方を表すものと考え、 $a$  は圧密経路とせん断時の応力経路とのなす角度  $\alpha$  と直線関係にあるとした。

本研究においては、各種の経路で異方圧密した後、角度  $\alpha$  が同一であるような応力増分比一定排水せん断試験を実施した。そしてパラメータ  $a$  の値が圧密経路に依らずに  $\alpha$  のみによって一義的に決定し得るか否かを検討した。

### 2. 実 験

実験に用いた試料は、北海道勇払郡早来町安平から採取した自然粘土をスラリー状態から鉛直圧力 80 kPa で再圧密したもので、その物理的性質は液性限界  $LL=63\%$ 、塑性指数  $PI=30$ 、土粒子比重  $G_s=2.65$  である。実験は図-1の実線に示すように平均有効主応力  $p=280$  kPa まで等方圧密（経路 OC）、 $K_0$  r 圧密（側方変位を生じさせない圧密、経路 OA）および異方圧密（経路 OB）した試料についての応力増分比一定圧縮試験（ICIR テスト—経路 CH  $K_0$  rCIR テスト—経路 AF C $\eta$ CIR テスト—経路 BG）の3種類の応力制御排水せん断試験である。圧密時の応力比  $\eta_0$  は表-1に示す通りである。これらの経路は、せん断経路と圧密経路との成す角  $\alpha$  が何れも  $60^\circ$  になるよう決定した。なお図-1の破線は前報<sup>4)</sup>の応力経路である。

圧密は6日間に亘って側圧を段階的に上げるもので、その間に  $K_0$  r 圧密と異方圧密では各々  $\epsilon_r=0$  および応力比一定（表-1参照）となるよう軸圧を調整した。せん断については、載荷を12時間間隔で段階的に行い、所定の応力点に達したのち初期応力点まで同一経路で除荷を行った。実験は圧密、せん断過程を通して 100 kPa のバックプ

\* 助教授 土木工学科

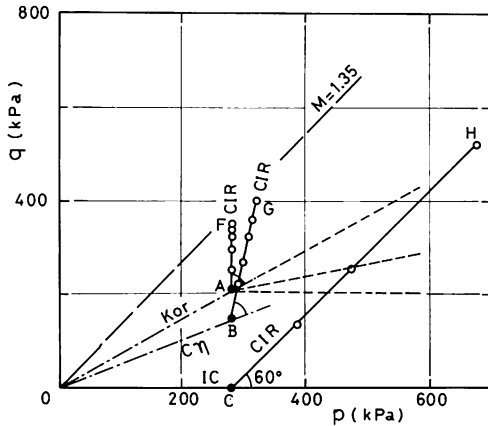


図-1 実験に用いた応力経路

レッシュャーのもとで実施した。その他の実験方法は前報と同様である。<sup>4)</sup>

### 3. 応力～ひずみ式

#### 3. 1 応力及びひずみパラメータ

以下において用いる応力パラメータは平均有効主応力  $p$ , 偏差応力  $q$ , 応力比  $\eta$  であってそれぞれ次式で表される。

$$p = \frac{\sigma'_a - \sigma'_r}{3}, \quad q = \sigma'_a - \sigma'_r, \quad \eta = \frac{q}{p} \quad (1)$$

ここに  $\sigma'_a$ ,  $\sigma'_r$ : 有効軸圧, 有効側圧  
応力において下添字 0 はせん断開始時の値であることを示す。

ひずみパラメータは体積ひずみ  $v$  と, せん断ひずみ  $\varepsilon$  であってそれぞれ次式で表される。

$$\varepsilon_a = 100 \ln\left(\frac{H_0}{H}\right), \quad v = 100 \ln\left(\frac{V_0}{V}\right) \quad (2)$$

ここに  $\varepsilon_a, v$ : 軸ひずみ, 体積ひずみ(自然ひずみ)

$H_0, H$ : 初期およびせん断中の供試体高さ

$V_0, V$ : 初期およびせん断中の供試体体積

ひずみにおいて上添字 r は可逆成分, p は塑性成分を表すものとする。

#### 3. 2 応力～ひずみ式

既報<sup>3)</sup>においては異方圧密履歴を受けた粘土の応力～ひずみ式および状態曲面として次式 [(6), (7), (8)式] を提案した。それらは Cam clay 理論を<sup>5)</sup> 基本としつつも, 非関連流れ則 [(4)式]<sup>6)</sup> の立場から, 移動硬化と非直交性の程度を表すパラ

メータ  $b$  [(3), (5)式] を導入して導かれたものである。

$$\frac{d\varepsilon^p}{dv^p} = \frac{a(\eta-b)}{(M-b)^2 - (\eta-b)^2} \quad (3)$$

$$\frac{d\varepsilon^p}{dv^p} = -\left(\frac{1}{A}\right) \cdot \left(\frac{dp}{dq}\right) \quad (4)$$

$$A = \frac{1}{[1 - b(d\varepsilon^p/dv^p)]} \quad (5)$$

$$dv^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \left[ \frac{dp}{p} + \frac{a(\eta-b)d\eta}{(M-b)^2 + (a+1)(\eta-\eta_0)^2} \right] \quad (6)$$

$$d\varepsilon^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \cdot \frac{a(\eta-b)}{(M-b)^2 - (\eta-b)^2} \left[ \frac{dp}{p} + \frac{a(\eta-b)d\eta}{(M-b)^2 + (a-1)(\eta-b)^2} \right] \quad (7)$$

$$\ln\left(\frac{p}{p_e}\right) = \left(\frac{\kappa}{\lambda} - 1\right) \int_{\eta_0}^{\eta} \frac{a(\eta-b)d\eta}{(M-b)^2 + (a-1)(\eta-b)^2} \quad (8)$$

ここに  $e$ : 間隙比

$\lambda$ : 自然対数表示による圧縮指数

$\kappa$ : 自然対数表示による膨張指数

$M$ : 限界状態の  $\eta$

$p_e$ : 等価圧密応力  $= p_0 \cdot \exp[(e_0 - e)/\lambda]$

以上においてパラメータ  $b$  はせん断中に応力の反転が無い場合(主働せん断)は  $b=0$ , 反転が有る場合(受働せん断)は  $b=\eta_0$  とした。しかしながら, 主働せん断においてのみ移動硬化が生じるとするのは不合理とも考えられる。三田地らは<sup>7)</sup>, 移動硬化を表すパラメータとして圧密終了時の応力比  $\eta_0$  を採用し [(9)式], (4), (5)と組み合わせて新たな応力～ひずみ式および状態曲面 [(10), (11), (12)式] を導いた。

$$\frac{d\varepsilon^p}{dv^p} = \frac{a(\eta-\eta_0)}{(M-\eta_0)^2 - (\eta-\eta_0)^2} \quad (9)$$

$$dv^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \left[ \frac{dp}{p} + \frac{a(\eta-\eta_0)d\eta}{(M-\eta_0)^2 - (\eta-\eta_0)^2 + a(\eta-b)(\eta-\eta_0)} \right] \quad (10)$$

$$d\varepsilon^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \cdot \frac{a(\eta-\eta_0)}{(M-\eta_0)^2 - (\eta-\eta_0)^2} \left[ \frac{dp}{p} + \frac{a(\eta-\eta_0)d\eta}{(M-\eta_0)^2 - (\eta-\eta_0)^2 + a(\eta-b)(\eta-\eta_0)} \right] \quad (11)$$

$$\ln\left(\frac{p}{p_e}\right) = \left(\frac{\kappa}{\lambda} - 1\right) \times \int_{\eta_0}^{\eta} \frac{a(\eta - \eta_0) d\eta}{(M - \eta_0)^2 - (\eta - \eta_0)^2 + a(\eta - b)(\eta - \eta_0)} \quad (12)$$

以下においてはこれら応力～ひずみ式と実測値との適合性を検討することとする。

## 4. 実験結果

### 4. 1 体積変化量の補正

供試体の体積変化を供試体内からの水の出入り量で測定する場合、排水路として供試体周面に巻かれたろ紙からの側圧の変化に伴う吸・排水量、およびゴムメンブレンが半透膜の性質を示すことによる供試体から側液（グリセリン）への水の移動が問題となる<sup>8)</sup>。特に本報告の実験のように、圧密、せん断過程ともに側圧の変化を伴い、かつ3週間に互る実験においては、それらの量を適切に考慮することが必要となる。三田地らは測定排水量の補正式として次の実験式を得ている<sup>9)</sup>。

$$\Delta V = -(2.34 \log \sigma'_r - 4.03) + 1.84 \times 10^{-4} \times t \quad (\text{ml}) \quad (13)$$

ここに  $\sigma'_r$ : 有効側圧 (kPa)

$t$ : 実験に要した時間 (min)

上式の右辺第一項はろ紙からの側圧の変化に伴う吸・排水量、第二項は供試体から側液への水の移動を示すが、本実験においても同じ性質のろ紙、ゴムメンブレン、側液を使用していることから以下においては(13)式によって補正した体積変化量を用いることとする。

### 4. 2 実験結果

図-2～図-3のプロット点は各試験で得られた応力～ひずみ関係を示す。実線は載荷時、破線は除荷時の関係である。

図-2によれば  $K_{or}$  CIR,  $C_{\eta}$  CIR テストの体積ひずみには弾性成分が存在していない。これは両テストは ICIR テストに較べて応力経路が急なために  $v$  の内に占める  $\eta$  成分（ダイレタンシー）の割合が  $p$  成分（圧密）より大きいことと、ダイレタンシーには弾性成分が存在しない<sup>1)</sup> ことによると解される。

一方、せん断ひずみにおいては、Cam clay 理論の仮定と異なり、何れの経路でも弾性成分が認められた。（図-3）

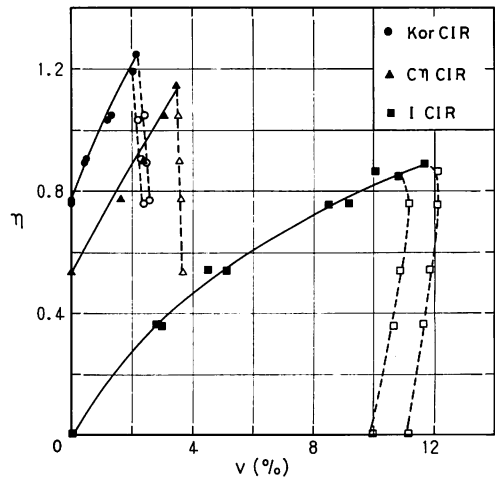


図-2 応力比と体積ひずみの関係

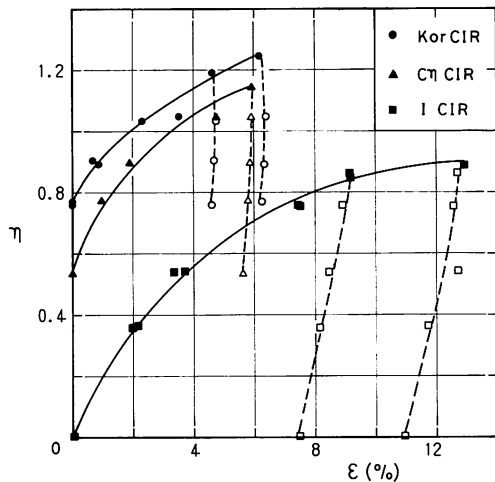


図-3 応力比とせん断ひずみの関係

## 5. 実測値と予測値の比較

### 5. 1 塑性ひずみについて

前述の応力～ひずみ式による予測に際して、パラメータ  $\lambda$  と  $\kappa$  は等方圧密・膨張試験で決定し、限界状態の応力比  $M$  は等方圧密非排水圧縮試験結果から得た。パラメータ  $b$  は応力反転の無い本実験のケースでは全て  $b=0$  とした。これらパラメータの一覧を表-1に併記した。

図-4～図-5のプロット点は各試験で得られた応力比～塑性ひずみ関係である。ここに塑性ひずみは載荷時のひずみから、除荷により求められた可逆成分を差し引いた値である。また白抜きの点は前述の体積変化補正を施さない場合のものである。

表-1 計算に用いたパラメータ

|           | $K_{0r}$ CIR | $C\eta$ CIR | ICIR     |
|-----------|--------------|-------------|----------|
| $\eta_0$  | 0.765        | 0.536       | 0        |
| $a$       | 3.2(2.2)     | 3.2(2.0)    | 3.0(3.0) |
| $e_0$     | 1.24         |             |          |
| $\lambda$ | 0.144        |             |          |
| $\kappa$  | 0.029        |             |          |

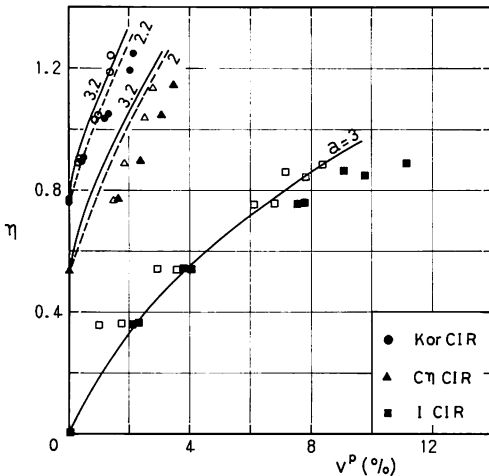


図-4 応力比と塑性体積ひずみの関係

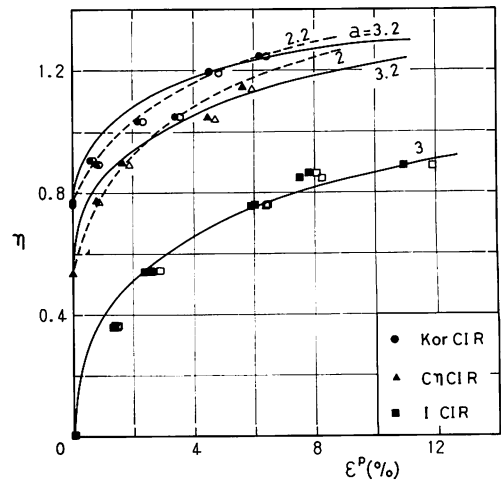


図-5 応力比と塑性せん断ひずみの関係

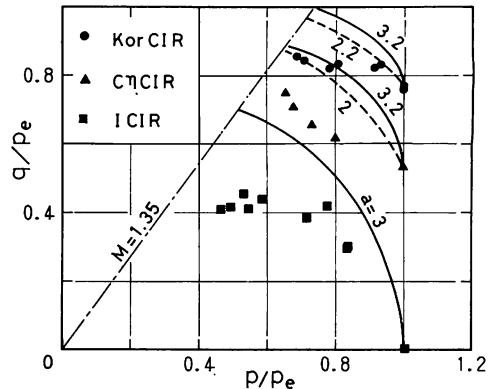


図-6 状態経路

図-4～図-5の実線は、(10)、(11)式による予測値であり、破線は(6)、(7)式による予測値である。図中に示したパラメータ $a$ は実測の $\eta \sim \epsilon^p$ 関係に最も良く合うように決定した。ICIRテストでは $b = \eta_0 = 0$ であるから実線と破線の区別は生じない。

図-5の $\epsilon^p$ についてみれば(7)式(破線)は実測値を良く表現出来るが、(11)式(実線)はせん断初期部分でやや過小な予測値を与えるようである。

一方、 $v^p$ (図-4)については(6)、(10)式共に過小な予測値を与えているが、体積変化補正を施さない値に対しては良く予測している。

図-6には状態曲面の実測値と予測値を示した。状態曲面の形状はダイレイタンス特性を表すものであるから、図-4や図-6の実測値と予測値の隔たりは予測式におけるダイレイタンス項(例えば(10)式の右辺第二項)に不足があるかとも思われる。しかしながら、 $v^p$ の予測値は $\epsilon^p$ に較べて $a$ の変化に鈍感であり図中に示した $a$ の値が両ひずみの予測に最適のものであることと、体積

変化補正を施さない値に対しては良く予測されていることを考え合わせると、むしろ体積変化の補正方法を更に検討する必要があると思われる。

## 5. 2 パラメータ $a$ について

前述の応力～ひずみ式において、パラメータ $a$ はダイレイタンス特性を規定する重要な役割を有する。筆者らは既に $a$ が圧密経路とせん断経路との成す角 $\alpha$ と直線関係にあることを示した<sup>3)</sup>。しかしながら、その際の圧密経路は $K_0$ 圧密(側方変位を許さない $K_{0r}$ 圧密、または軸方向変位を許さない $K_{0a}$ 圧密)に限られていたので、この直線関係が圧密時の応力比 $\eta_0$ の影響を受けないことを確認する必要がある。

図-4、図-5に併記した $a$ をみるとパラメータ $b$ と $\eta_0$ とを区別した場合(実線)の方が $b = \eta_0$ とした場合(破線)よりも大きな値を必要とすることが分かる。また、前者の $a$ は $\eta_0$ の異なる何れ

のせん断経路においてもほぼ等しい値であることは注目される。今回のせん断経路は全て  $\alpha=60^\circ$  に統一しているのであるから、このことは、角度  $\alpha$  とパラメータ  $a$  との関係が圧密経路の影響を受けずに一義的に決定されることを示していると思われる。

影響, 第 20 回土質工学研究発表会 (1985)。

(昭和 61 年 12 月 1 日受理)

## 6. む す び

各種経路で圧密後に、圧密経路と成す角度を揃えた応力経路で排水せん断試験を実施し、応力～ひずみ式中のパラメータ  $a$  が圧密経路に依らずに、圧密経路とせん断応力経路との成す角度と一義的な関係にあることが確認された。

むすびにあたり、日頃ご指導いただいている北海道大学 三田地利之教授に謝意を表します。また、実験およびデータ整理においては苫小牧高専卒業生 遠藤 勉、大川 渉、川村譲治、末村正幸君および苫小牧高専 柳谷 豊技官の多大な協力を得た。記して謝意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 池浦勲, 北郷繁, 三田地利之, 下越仁: 伸張状態における異方圧密粘土の変形特性について, 土木学会第 38 回年次学術講演会講演概要集(1983)。
- 2) 池浦勲, 三田地利之, 芳岡良一: 異方圧密粘土の応力～ひずみ関係, 土木学会第 39 回年次学術講演会講演概要集 (1984)。
- 3) 池浦勲, 三田地利之: 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, 第 26 巻 3 号 (1986)。
- 4) 池浦勲: 限界状態に向かわない応力経路での異方圧密粘土の応力～ひずみ関係, 苫小牧工業高等専門学校紀要, 第 21 号 (1986)。
- 5) Roscoe, K. H and Burland, J. B ; "On the generalized stress-strain behaviour of 'wet' clay", Engineering Plasticity, Cambridge univ. Press (1968).
- 6) Jain, S. K ; Fundamental Aspects of the Normality Rule, Engineering Publications (1980).
- 7) 三田地利之, 水上純一: 粘性土の応力～ひずみ挙動関係におよぼす異方圧密経路の影響, 第 21 回土質工学研究発表会 (1986)。
- 8) 三田地利之, 成田孝: 三軸試験の体積変化測定におよぼすろ紙の圧縮性およびゴム膜の透水性の

