

飽和粘土の変形特性に及ぼす応力履歴の影響

池 浦 勲*・小 野 丘**

Influence of Stress History on Deformation Characteristics of Cohesive soils

Isao IKEURA and Takashi ONO

要 旨

せん断経路が折線状をなす場合の飽和粘性土の変形特性を観察し、応力-ひずみ式の適用性を検討した。その結果、体積ひずみは応力経路履歴の影響を受けないが、せん断ひずみは影響を受けて一義的には定まらないことを示した。

Abstract

Several series of drain test on saturated clay were performed under the stress conditions including bend-up of stress path. It is concluded from those tests that volumetric strain does not depend on stress path history but shear strain depends on those. Also, applicability of proposed stress-strain equations were examined.

1. ま え が き

筆者らはこれまで、主として、水平方向の変位を拘束したいわゆる K_0 圧密履歴を与えた粘性土を対象として、各種応力経路のもとでの排水せん断試験を実施し、移動硬化と非関連流れ則の概念を用いた応力-ひずみ式を提案してきた¹⁾⁻³⁾。

それらの応力-ひずみ式で用いられるパラメータのうち、パラメータ a については、圧密経路とせん断時の応力経路（せん断経路）とのなす角度 α と直線関係にあり³⁾、しかもその関係が圧密経路に依らないことを示した⁴⁾。

また前報においては、パラメータ a と応力経路との関係が、塑性ひずみ増分比やパラメータ b の仮定の仕方により全く異なることを示した⁵⁾。

しかしながら、以上の報告は、応力増加比が一定のせん断経路下におけるものであり、応力増分比が一定でない経路下でのせん断に対する考察はなされていない。

そこで、本報告においては、せん断経路が折線状をなす場合の変形特性を観察し、応力-ひずみ式の適用性を検討するものである。

2. 実 験

実験に用いた試料は、勇払郡早来町から採取した自然粘土をスラリー状態にした後、鉛直圧力 80 kPa で再圧密したものである。その物理的性質は液性限界 $w_L = 63\%$ 、塑性指数 $PI = 30$ 、比重 $G_S = 2.65$ である。実験は応力制御排水せん断試験であり、所定の平均有効主応力 ($p = 280$ kPa 図-1 の A 点) まで等方圧密した試料についての p -一定試験（経路 OA-C、以下 ICP テストと呼ぶ）と、等方圧密後に p -一定経路を与えた試料についての応力比一定試験（経路 OAB-D、 $\eta = 0.765$ 、IPC η テスト）と応力増分比一定試験（経路 OAB-E、 $\Delta q / \Delta p = 1.71$ 、IPCIR テスト）、及び K_0 圧密試料の p -一定試験（経路 OB-C、 K_0 CP）と応力増分比一定試験（経路 OB-E、 K_0 CIR）の 5 種類である。排水は供試体に巻いたドレインペーパーにより行い、試験を通して 100 kPa の背圧を用いた。

* 教授 土木工学科

** 助手 土木工学科

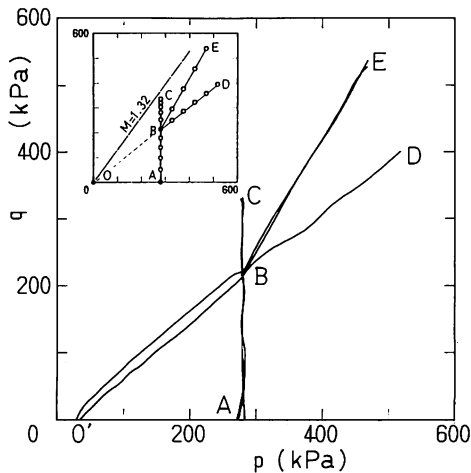


図-1 実験に用いた応力経路

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 と応力比 η であり、それぞれ次式で表される。

$$p = \frac{\sigma'_a + 2\sigma'_r}{3}, \quad q = \sigma'_a - \sigma'_r, \quad \eta = \frac{q}{p} \quad (1)$$

ここに σ'_a , σ'_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 ϵ であってそれぞれ次式で表される。

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

$$\epsilon = \epsilon_a - \frac{v}{3}$$

ここに ϵ_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

3.2 応力～ひずみ式

既報³⁾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式として次式 [(6), (7), (8)式] を提案した。

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

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

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

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

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

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

ここに e : 間隙比

λ : 自然対数表示による圧縮指数

κ : 自然対数表示による膨張指数

M : 限界状態の η

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

それらは Cam clay 理論を基本としつつも, 非関連流れ則 [(4)式] の立場から, 移動硬化¹⁾と非直交性²⁾の程度を表すパラメータ b [(3), (5)式] とひずみの応力経路依存性を表すパラメータ a とを導入して導かれたものである。

パラメータ b はせん断時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 $b = \eta_0$ と仮定した。

また三田地らは⁵⁾, 移動硬化を表すパラメータとして圧密終了時の応力比 η_0 を採用し [(9)式] (4), (5) と組み合わせる新たな応力～ひずみ式および状態曲面式 [(10), (11), (12)式] を導いた。

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

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

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

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

以下においては(3)式から(8)式までを, TH 1, (9)式から(12)式までを TH 2 と称しこれら応力～ひずみ式と実測値との適合性の比較をすることとする。なお前述のように等方圧密後のせん断では

$b = \eta_0 = 0$ と仮定しているから TH 1 と TH 2 は同義である。

4. 実験結果と考察

4. 1 応力経路

図-1は実験時の応力経路である。キースケッチに示した予定応力経路とほぼ一致した载荷が行われたといえよう。なお、 K_0 圧密は側圧 $\sigma'_r = 30$ kPaまで等方圧密した後に側圧を段階的に上げつつ側方変位が生じないように軸圧を増加させたものであるから、図の O' が K_0 圧密の出発点となる。

4. 2 体積ひずみ

図-2は実験で得られた含水比 w と $\log p$ の関係を示す。図中のA、B、Dは図-1の経路に対応している。 $p = 60$ kPa以上の p においては、 w と $\log p$ が直線関係にあり、その傾きは等方圧密過程OAと K_0 圧密過程OBとではほぼ等しいことがわかる。傾きから逆算される λ ($= C_c / 2.3$, C_c : 圧縮指数)は0.126であった。この値は、早来試料につきこれまで報告してきたもの($\lambda = 0.13$)とほぼ一致している。IPC η テストの η 一定経路(経路BE)においても、 w と $\log p$ は等方圧密時と同じ傾きの直線関係にある。即ち(等方圧密+ p 一定)という応力経路を経た後でも等方圧密時と同様の圧密性状を示すといえる。

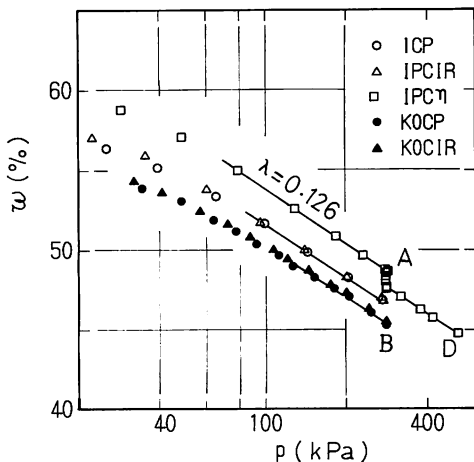


図-2 含水比と平均有効主応力の関係

図-3は各試験のB点(図-1)に至るまでの v と $\log p$ の関係を示す。前述のように K_0 圧密では O' ($p = 30$ kPa)をひずみの出発点としていることを考慮しても、等方圧密+ p 一定(経路OAB)のほうが K_0 圧密(経路OB)よりも同一

応力点Bでの v がやや大きいようである。いま、 v が p 成分(圧密、 η 一定)と η 成分(ダイレイタンシー、 p 一定)の和で構成されると仮定すると、その内の p 成分が図-2から推定されるように K_0 圧密と等方圧密とで等しいのであれば、経路ABでの η 成分だけ経路OABのほうが v の大きくなることはうなずけるところである。

図-4は ϵ に関する同様の比較であるが、経路OABでは、経路OBを経た時の約2倍の ϵ となっている。

このように、ひずみ、とりわけ ϵ は応力(p , q)の大きさのみならず、そこに至るまでの経路にも依存しており、従ってその応力点以降の変形特性も応力経路履歴の影響があることが予想される。

なお、図-4のように、等方圧密(経路OA)であっても若干の ϵ が生じている($\epsilon_1 > \epsilon_3$)のは、スラリーからの再圧密の過程で試料が構造異方性を有するためと思われる。

図-5はB点(図-1)以降の v と $\log p$ の関係を示す。図-2の場合と同様に、 η 一定経路では等方圧密時と同じ体積変化特性を示している。図-5には K_0 圧密後の η 一定試験(K_0 C η テスト)結果³⁾を併記したが、それらも今回の結果とほぼ一致している。なお図中の実線や破線の意味については後述する。

図-6、図-7にはICPテストの等方圧密終了時(図-1A点)からの v と η の関係、及び各試験のB点以降の v と η の関係を示す。図-7によれば、(等方圧密+ p 一定)という応力経

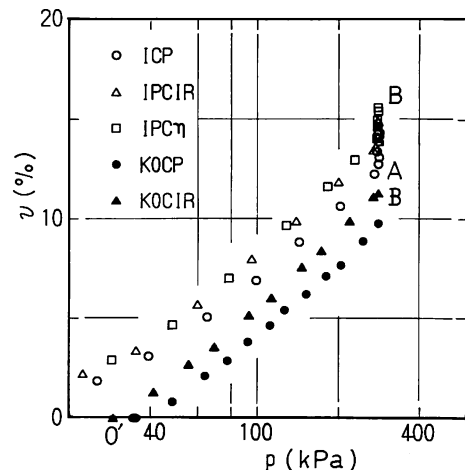


図-3 体積ひずみと平均有効主応力の関係 (B点以前)

路を経た供試体と (K_0 圧密即ち η 一定) 経路を経た供試体とでは, その後のダイレイタンシー挙動に差が見られない。

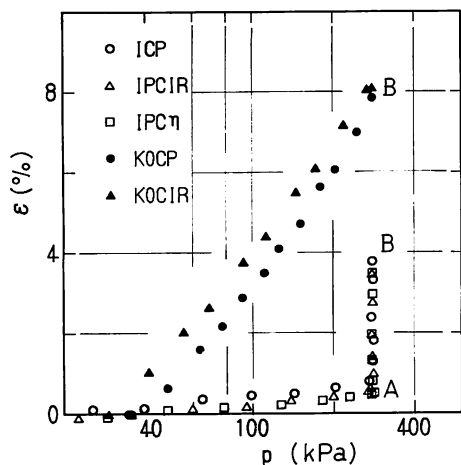


図-4 せん断ひずみと平均有効主応力の関係 (B点以前)

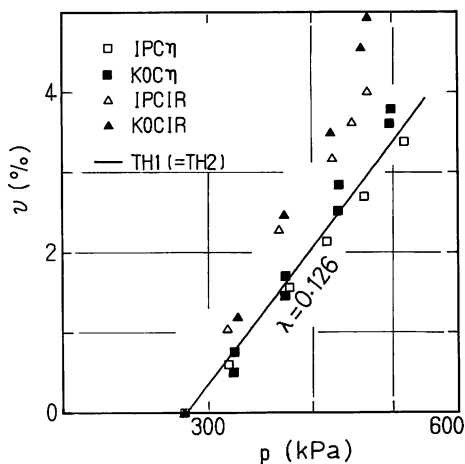


図-5 体積ひずみと平均有効主応力の関係 (B点以降)

4.3 状態経路

図-8は正規化した応力経路即ち状態経路を示す。

IPC η テストの状態経路はほぼ一点に集中し, ICP テストの経路とはほぼ一致している。このことは η 一定経路ではダイレイタンシーが存在せず, 従って, 体積変化は全て圧密成分と見なせることを示していると思われる。なお図中の鎖線は今回, 別途実施した等方圧密非排水せん断試験 (CIU テスト) で得られた状態経路であるが, 排水せん

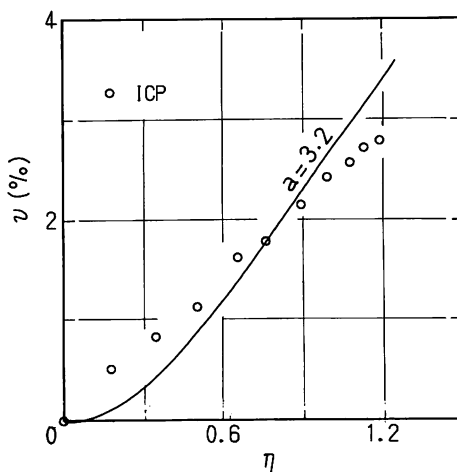


図-6 体積ひずみと応力比の関係 (ICP テスト)

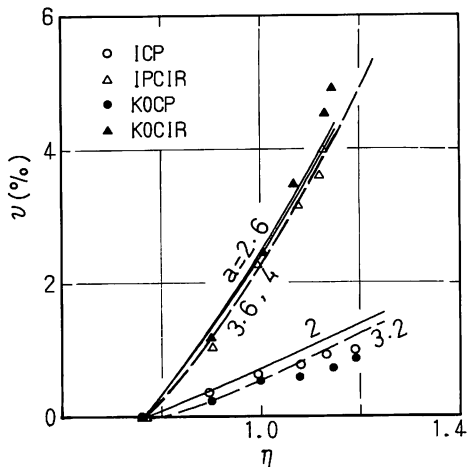


図-7 体積ひずみと応力比の関係

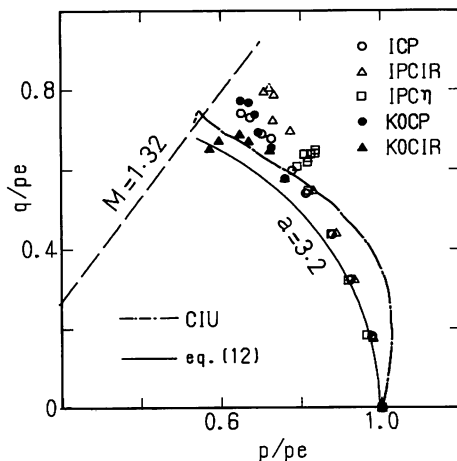


図-8 状態経路

断の場合とはほぼ一致している。

以上の4.2, 4.3をまとめると、体積変化挙動は過去に受けた応力経路の影響を受けないという結果となった。

4.4 せん断ひずみ

図-9はB点(図-1)以降の ϵ と $\log p$ の関係を示す。IPC η テストの ϵ は、 $K_0C\eta$ よりも大きな値を示した。

図-10, 図-11にはICPテストのA点(図-1)以降の ϵ と η の関係、及び各試験のB点以降の ϵ と η の関係を示す。図-11によれば、今回のICPテストでの関係は $K_0C\eta$ の時よりも大きな ϵ を示している。ある応力での ϵ の大きさは、過去の応力経路の影響を受け、一義的には決まらないといえよう。

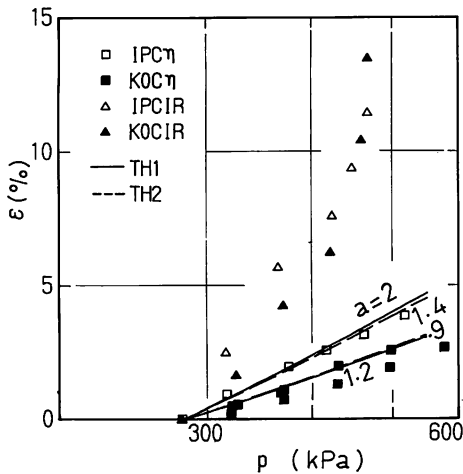


図-9 せん断ひずみと平均有効主応力の関係 (B点以降)

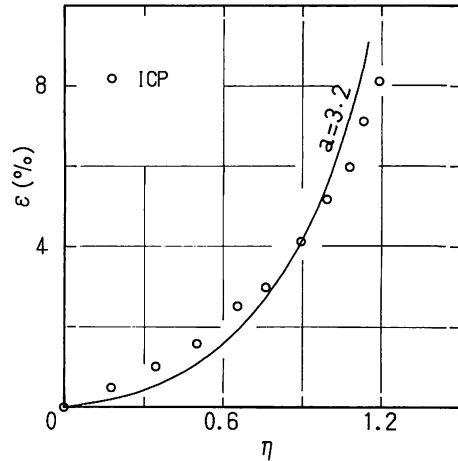


図-10 せん断ひずみと応力比の関係 (ICPテスト)

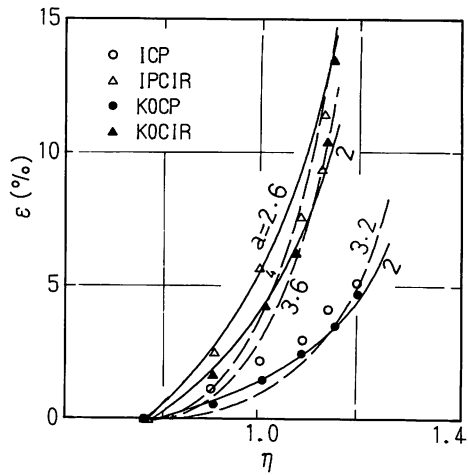


図-11 体積ひずみと応力比の関係

表-1 計算に用いたパラメータ α

	α	
	TH 1	TH 2
ICP	3.2	3.2
IPC η	2.0	1.4
IPCIR	2.6	4.0
K0CP	2.0	3.2
K0CIR	2.0	3.6
K0C η	1.2	0.9

4.5 応力～ひずみ式の適用

図-5から図-11における実線と破線はそれぞれ(6)～(8)式と(9)～(12)式によって計算したひずみや状態経路である。ただし今回の実験では可逆成分の分離を行っていないため、ここでは可逆成分を次式のように仮定した³⁾。

$$dv^r = \frac{\kappa}{1+e} \cdot \frac{dp}{p} \quad (13)$$

$$d\epsilon^r = \frac{dq}{3G} = \frac{p d\eta + \eta dp}{3G}$$

計算に際して用いたパラメータの値は $M = 1.32$, $e = 1.23$, $\lambda = 0.13$, $\kappa = 0.03$, $G = 9300$ (kPa), $b = 0$ である。また TH 2 では IPC η

テストで $\eta_0 = 0$, K_0 CP および K_0 C η テストで $\eta_0 = 0.765$ を用いた。パラメータ a はひずみを最も良く表し得るように定めたが、その値は図中に併記した。表-1 には各試験の a の値の一覧を示すが、経路 OAB (等方圧密 + p 一定) を経た方が経路 OB (K_0 圧密即ち η 一定) を経た場合よりも大きな a となっている。このことと、TH1 で用いるべき a は、圧密経路とせん断経路のなす角度 α と共に増大するとの結果³⁾ を考え合わせると、経路 OAB (図-1) を経た供試体の B 点以降のひずみを予測する場合には、経路 OA で圧密されたと考え、B 点を通る水平線からせん断経路に向かって角度 α をとるべきであろう。

5. む す び

本報告では途中で向きが変化するようなせん断経路の場合の応力-ひずみ関係を考察した。そして体積ひずみ v は過去に受けた応力経路の影響を受けないが、ある応力でのせん断ひずみ ϵ は、そこに至るまでの応力経路の影響を受けて一義的に定まらないことを示し、応力-ひずみ式の適用法について若干の考察を行った。しかしながら、実施された実験数はまだ少なく、今後も実験ケースを増しながら、さらに考察を進めて行いたいと考えている。

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本校卒業生 谷口拓也 (地崎工業)、長谷川健一 (鴻池組) 両君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 (1982)
- 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, 三田地利之, 水上純一; 異方圧密粘土の応力-ひずみ関係 (第3報), 土木学会第41回年次学術講演会講演概要集 (1986)
- 5) 三田地利之, 水上純一; 粘性土の応力-ひずみ挙動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)

(平成元年11月30日受理)