

飽和粘土の応力～ひずみ式に関する考察

池 浦 勲*・小 野 丘**

Investigation on Stress-strain Equations of Saturated Clay

Isao IKEURA and Takashi ONO

要 旨

異方圧密粘土の排水せん断試験の結果をまとめ、応力～ひずみ式中のパラメータの特性について検討を加えた。

Abstract

Some drain shear tests was performed on saturated clay consolidated under various paths. The characteristics of parameter included in the stress-strain equations is examined.

1. ま え が き

筆者らはこれまで、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^{1),2)}、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。

それらの応力～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、及び塑性ひずみ増分ベクトルと降伏曲面との非直交の程度の両方を表すものと考えた。パラメータ a については、 a と圧密経路とせん断時の応力経路とのなす角度 α とが直線関係にあり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⁾。

しかしながらパラメータの物理的意味が不明確なこともあり、仮定の仕方によっては上述の関係が満たされないことが予想される。

そこで、本報告においてはふた通りの応力～ひずみ式によってひずみ予測を行い、パラメータの特性について検討を加えることとする。

2. 実 験

実験に用いた試料は、勇払郡早来町および虻田郡倶知安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。早来試料の物理的性質は液性限界 $LL=63\%$ 、塑性指数 $PI=30$ 、土粒子比重 $G_s=2.65$ であり、倶知安試料は $LL=81\%$ 、 $PI=41$ 、 $G_s=2.68$ である。実験は図-1(a), (b)に示すように所定の平均有効主応力まで等方圧密、 K_{or} 圧密(側方変位を生じさせない圧密)、 K_{oa} 圧密(鉛直変位を生じさせない圧密) および異方圧密した試料についての応力増分比一定の応力制御排水せん断試験である。

これらの実験は北大工学部と苫小牧高専で継続的に行われているものであり、以下においては各試験を例えば 81 H 1 (1981 年度、早来試料の Test-1) のように略記する。

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 η であってそれぞれ次式で表される。

$$p = \frac{\sigma_a' + 2\sigma_r'}{3}, \quad q = \sigma_a' - \sigma_r', \quad \eta = \frac{q}{p} \quad (1)$$

* 教 授 土木工学科

** 助 手 土木工学科

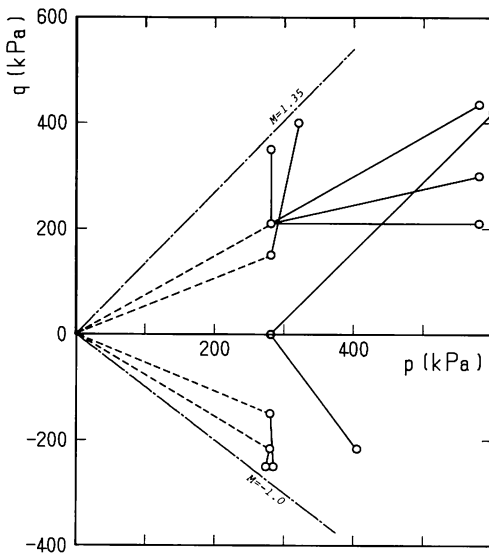


図1(a) 実験に用いた応力経路 (早来粘土)

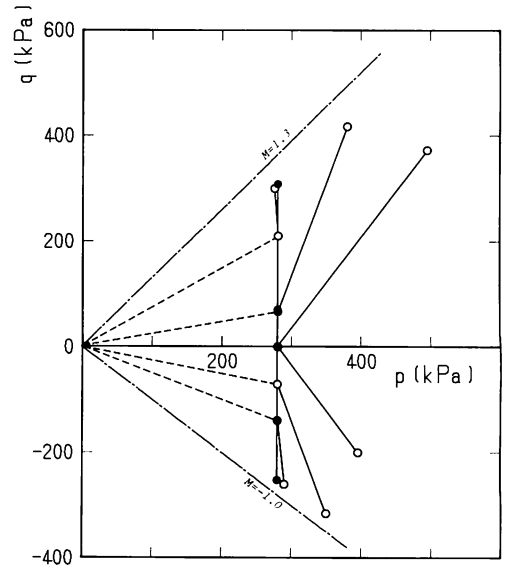


図1(b) 実験に用いた応力経路 (俱知安粘土)

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。

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

$$\varepsilon = \varepsilon_a - \frac{v}{3} \quad (2)$$

ここに ε_a : 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として次式 [(6), (7), (8)式] を提案した。

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

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

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

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

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

$$\frac{a(\eta-b)d\eta}{(M-b)^2 + (a-1)(\eta-b)^2} \quad (7)$$

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

ここに e : 間隙比

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。

上式は応力増分比一定の, 広範な応力経路のものとでの粘土の変形特性を良く表してはいるものの, b をその様に扱うことにより

1) 同じ異方圧密を受けた粘土でも受働せん断においてのみ移動硬化が生じることになる

2) 従って降伏曲面が異方圧密軸 ($\eta=\eta_0$) で尖点を有し応力経路の変化に伴うひずみ増分方向の滑らかな変化を表現できない

といった不合理が生じてくる。そこで三田地らは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 [(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(3)式から(8)式までを TH2, (9)式から(12)式までを TH1 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。なお受働せん断では $b = \eta_0$ であるから TH1 と TH2 は同義である。

4. 実験結果と考察

4.1 実験結果

図-2(a), (b)のプロット点は実験で得られた応力～ひずみ関係の一例を示す。図中の実線と破線は、併記した a の値を用いた TH 1, TH 2 による予測値である。

表-1には図-2のようにひずみを最も良く表し得るように定めた a 値の一覧をひずみ毎に示した。表中の α は圧密経路とせん断時の応力経路とのなす角度であり、 a 値の括弧書きは後述する実測塑性ひずみ増分比 η との関係から得られたものである。

表-1に見るように主働せん断では TH 1 は TH 2 より大きな a 値を示す。

4.2 実測塑性ひずみ増分比について

図-3は(3)式または(9)式の(右边/ a)に対して実測の塑性ひずみ増分比をプロットしたものの一例である。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。

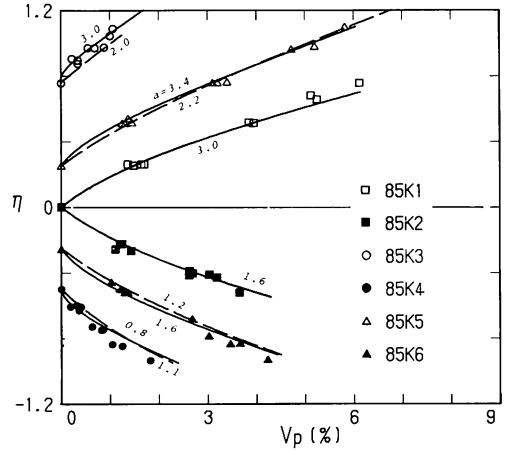


図2(a) 応力比と塑性体積ひずみの関係

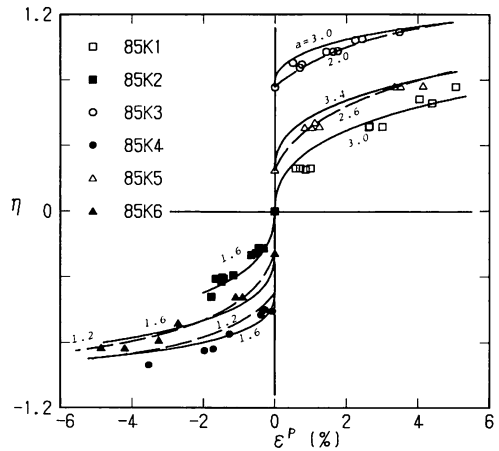


図2(b) 応力比と塑性せん断ひずみの関係

図-3の各点が原点を通る直線上にあればその傾きが a 値を示すことになるが、 $b = \eta_0$ とした場合は原点から離れる傾向が見受けられるので、せん断後半部分を重視して a を求め、それを表-1の括弧内に示した。表-1によれば塑性ひずみ増分比から求めた a は前節で述べた、ひずみの予測に適した a と近似した値を示すようである。

4.3 パラメータ a と α の関係について

図-4(a) (K試料), (b) (H試料) はせん断経路が圧密経路と成す角 α とパラメータ a との関係を示す。 a はひずみの種類 (v, ε) により必ずしも一致しないが(表-1)ここではそれらの平均値をプロットした。

筆者らは既に TH 2 の場合について、 a が α と直線関係にあり、圧密経路に依らず α のみによ

Test No.	α (度)	a (TH1)				a (TH2)			
		$\eta \sim \eta$	η^p	ε	ε^p	$\eta \sim \eta$	η^p	ε	ε^p
81H 1	53	3.0		3.0		2.0 (2.0)		2.0	
	2	3.0		3.0		1.4 (1.2)		1.4	
82H 1	104	1.4		1.4		1.4		1.4	
	2	1.7		1.7		1.7		1.7	
83H 1	118	3.1		3.1		3.1 (3.1)		3.1	
	2	1.2		1.2		0.7		0.7	
	3	1.2		1.0		0.8 (0.8)		0.8	
84H 1	-20					1.2	0.8	1.0	1.0
	2	-37				1.2	0.6	0.9	0.6
85H 1	53	3.4 (3.1)	3.4	3.4	3.4	2.4 (2.6)	2.4	2.4	2.4
	2	53	3.4 (3.4)	3.4	3.4	3.4 (3.4)	3.4	3.4	3.4
	3	53	3.4 (3.2)	3.4	3.0	2.0 (2.3)	2.4	2.0	2.0
	4	60	(1.2)	1.4		(1.2)	1.4		1.4
	5	61	(0.5)	1.0		(0.4)	0.8		0.6
	6	61	(1.3)	1.0		(1.0)	0.6		0.8
85K 1	60	(1.9)	3.0		3.0	(1.9)	3.0		3.0
	2	60	(1.1)	1.6		(1.1)	1.6		1.6
	3	59	(4.6)	3.0		(3.3)	2.0		2.0
	4	60	(1.0)	1.6		(1.0)	0.8		1.2
	5	60	(2.5)	3.4		(2.1)	2.2		2.6
	6	60	(1.0)	1.6		(1.0)	1.2		1.2
86H 1	53	3.6	3.6	3.6	3.6	2.0	2.0	2.4	2.4
86K 1	127	1.4		1.8	1.6	1.4		1.8	1.6
	2	76	3.6	3.8	3.6	2.4		3.6	3.1
	3	90	3.6	3.8	3.6	3.6		3.8	3.8
	4	90	1.4	1.6	1.6	1.4		1.6	1.6
	5	104	1.4	1.2	1.4	1.0		1.2	1.2
	6	104	2.4	4.0	3.4	2.4		4.0	3.4

表-1 計算に用いたパラメータa

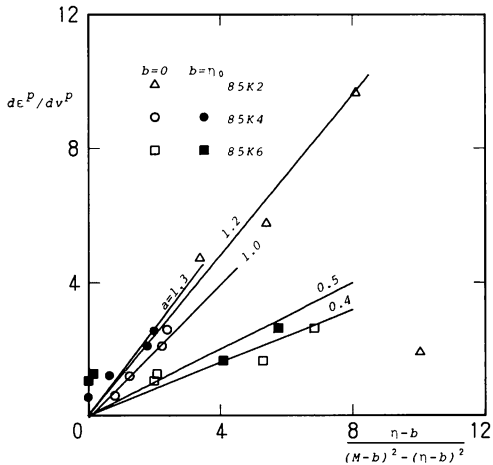


図3 応力比と塑性ひずみ増分比の関係
て一義的に決定し得ることを示した⁴⁾。一方、水上らは⁶⁾TH 1によるaがαと無関係であると報告している。

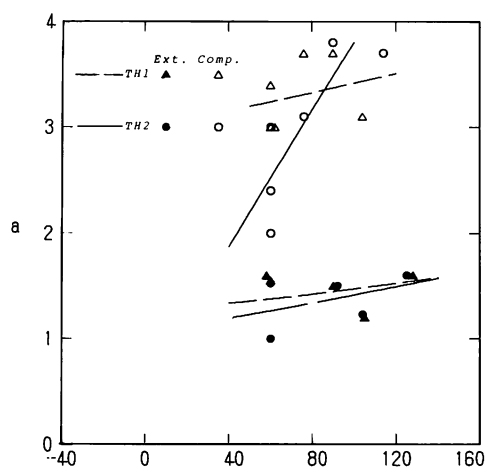
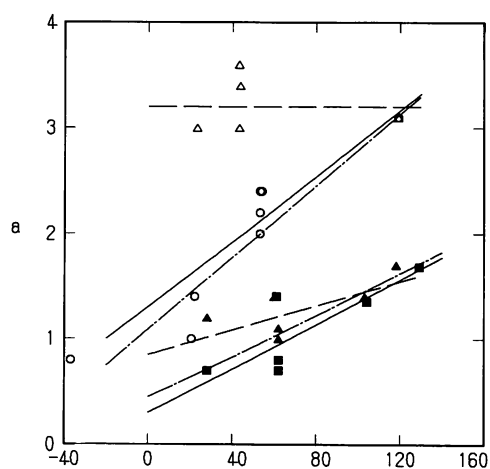
図-4によると実線のようにTH 2 (○, ●)のaはαに依存していると考えられる。なお図中の一点鎖線は既報³⁾において示したa~αである。一方、TH 1 (△, ▲;破線)のaはαが変化してもあまり変わらない。すなわち塑性ひずみ増分比の仮定 ((3)式か(9)式か) によってaとαと

の関係が変わってくることになる。この点に関しては、広範囲のαでの実測塑性ひずみ増分比に基づいての検討（前節）が必要と思われる。

5. む す び

これまでの実験結果をまとめ、応力~ひずみ式中のパラメータaと応力経路との関係が、塑性ひずみ増分比の仮定の仕方により全く異なることを示した。

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北大大学院修士および苫小牧高専卒業生の多大な協力を得た。記して謝意を表する次第である。

図 4(a) a と α の関係 (倶知安粘土)図 4(b) a と α の関係 (早来粘土)

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)
- 6) 水上純一; 異方応力経路下の飽和粘土の応力～ひずみ挙動に関する研究, 北海道大学大学院工学研究科修士論文 (1987)

(昭和 62 年 12 月 1 日受理)

