

京都大学防災研究所 正の清水正喜
京都大学 大学院 学 三村 衛

はじめに 等方応力状態にある材料に軸荷重をかけて、ある大きさの変形を与えたのち、全荷重を取り除いたときに戻るひずみの中に塑性ひずみが含まれていることは、金属の分野では早くから認識されている。土質力学の分野においても、近年、地震等によって作用する複雑な応力経路に対する工の挙動を解明する必要性から、そのような Bauschinger 効果を取り入れることの重要性が認識され、kinematic hardening モデル等を用いた弾塑性論により、応力～ひずみ関係式が多く提案されている。本報告は、このような載荷方向を逆転したときの土の応力～ひずみ挙動を解明する目的で行ってきた一連の実験^{(2), (3), (4), (5)}から得た成果を、新たに行った実験により検討し、さらに発展させようとするものである。実験はすべて繰り返し再圧密粘性土（藤の森粘土）の三軸試験である。

1. 弾性領域の存在

図1、図2に一例を示すように、除荷時のせん断応力～せん断ひずみ関係に直線部分がみられ、その部分においては、ダイレタンスーが発生しないか、発生しても小さい。線型弾性体の応力～ひずみ式

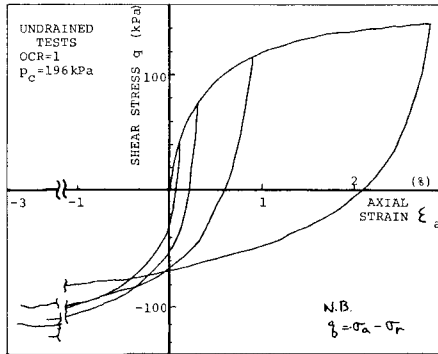


図1 非排水試験の結果（応力～ひずみ）

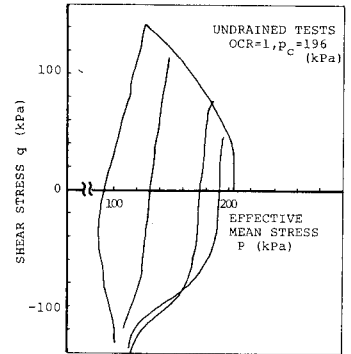


図2 有効応力応力経路

との対応から、この部分は弾性領域であると考えられる。

2. 弾性領域の大きさに対するせん断履歴の影響

せん断応力除荷時に現われる弾性領域の大きさともθなる角度（図3参照）で評価し、除荷するまでに与えたせん断履歴を除荷時のせん断ひずみで表わすと、 $\tan 2\theta$ と ϵ_R との間には、排水条件や圧密の履歴、圧密圧力に依らない、図4に示すような関係が存在する。

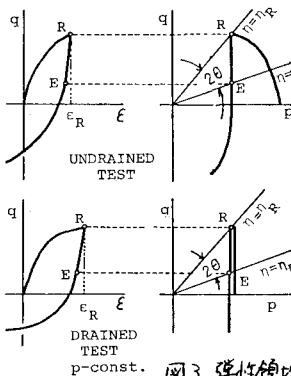


図3 弾性領域を表す角度θ

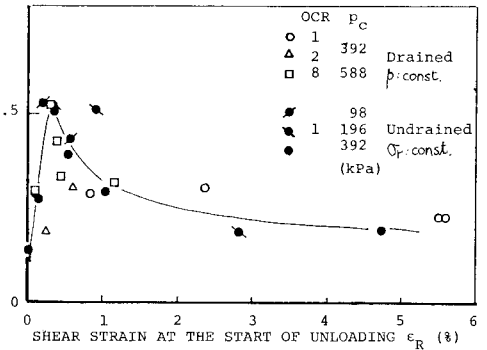


図4 $\tan 2\theta \sim \epsilon_R$

3. 正規圧密粘土の除荷後のダイレタンスー特性

正規圧密された土に与えたせん断の履歴は、 (p, q, e) 空間における状態境界面（State Boundary Surface : S.B.S.）上の状態変化として捉えることができる⁽⁴⁾。従来成果によれば、S.B.S.は $(q/p, e/p)$ 面上でひずみの曲線として表わされる。図5に示すように、せん断・除荷によるダイレタンスー挙動を $(q/p, e/p)$ 面上で比較すると、除荷後再びダイレタンスーの発生が顕著になる限界（ $\nabla, \nabla, \nabla, \nabla, \nabla$ ）は、排水条件や圧密圧力の相違によらず、1本の曲線（……で示す）で表わされる。このことは、S.B.S.面上でせん断履歴を与えることにより、S.B.S.内部に形成される、ダイレタンスーの発生しにくい領域は、 (p, q, e) 空間で排水条件や圧密圧力に依ら

ずにあることを意味する。

4. セン断弾性定数Gとセン断の履歴

1. で述べたように、除荷時に現われる $\sigma \sim \epsilon$ 関係の直線部分は弾性体の特性と合致するので、その直線の勾配からセン断弾性定数 G を決定することが出来る。 p -一定の排水試験においては、 G はセン断履歴の大きさに依存せず、 p が減少するような非排水試験においては、 G はセン断とともに減少する。⁵⁾ 図6は、セン断弾性定数 G と弾性領域における p (非排水試験では p_R を用いた) の関係である。同じ記号は、同じ圧密履歴と同じ排水条件のもとでセン断履歴を与えられているが、セン断履歴の大きさが異なるものである。この図で興味深いことは、セン断により p が減少しようが、圧密の履歴により p が減少しようが、それによる p の減少の傾向が同じである点である。試験作製バッチが同じであるもの (● と ○) を比較すると、セン断に伴って p が減少すると、小さい圧密圧力で圧密してセン断したときの G と等しくなっている。

5. 載荷・除荷くり返し試験におけるセン断弾性定数の変化

図7, 8, 9 は、図6の●と同じ材料であり、同じ圧密圧力 $p_c = 98 \text{ kPa}$ で圧密した後、非排水で圧縮割でのみ載荷・除荷くり返し試験の結果である。応力-ひずみ (図7), 有効応力経路 (図8) は除荷時のみを示した。この実験においても、1. で述べた特性が見られる。図9は各除荷段階における G の値 (図7の直線の勾配から決定) と除荷開始時の p との関係を示したものである。同図の G と p の関係は、図6に示した●, ○の G と p の関係線の延長線にあることがわかる。連続的にセン断の履歴を与えて除荷過程を繰り返しても、 G の p に対する変化の傾向は変わらないといえる。

謝辞 本研究の一部は、発表者一人 (三村) が京都大学卒業研究として遂行したものであり、御指導を賜り、京都大学防災研究所柴田徹教授、同是立紀前助教授に心より謝意を表します。

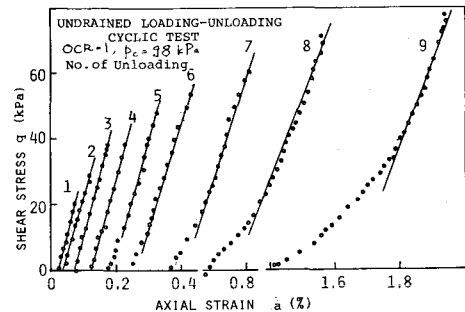


図7. 圧縮割載荷除荷くり返し試験: 除荷時の応力-ひずみ。

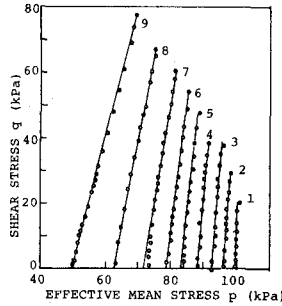


図8. 除荷時の有効応力経路。

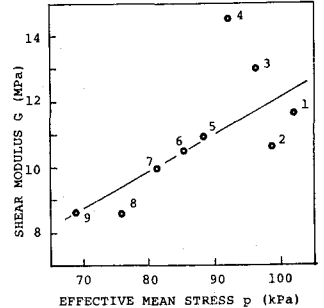


図9. セン断弾性定数の変化。

- 1) Hill (1950) Mathematical Theory of Plasticity; 2) 清水 (1980) 京大防災研年報 22-B2; 3) 清水・今里 (1980) 第15回土工学会研究発表会; 4) 清水・三村 (1981) 土木学会関西支部年報; 5) 清水・三村 (1980) 第16回土工学会研究発表会; 6) Reese, Burland (1968) On the generalization of the stress-strain relationship for soils.

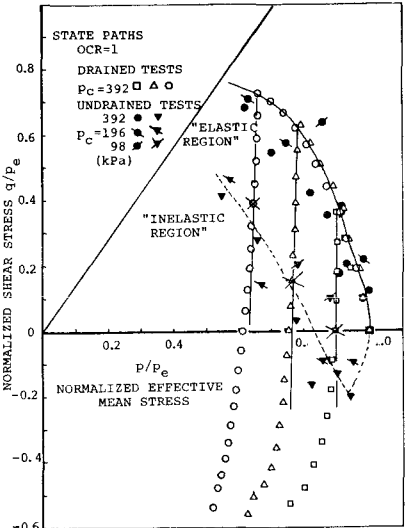


図5. 正規圧密粘性土の σ - ϵ 内部パラメーター

Test Type	OCR	P_c	Batch	$w(\%)$
Drained	1	392	(1)	28.99
P -const.	2		(2)	30.22
	8	588	(4)	26.92
			(3)	27.92
Undrained		392	(3)	27.92
σ_r -const.	1		(2)	24.76
		196	(5)	31.75
		98		34.17

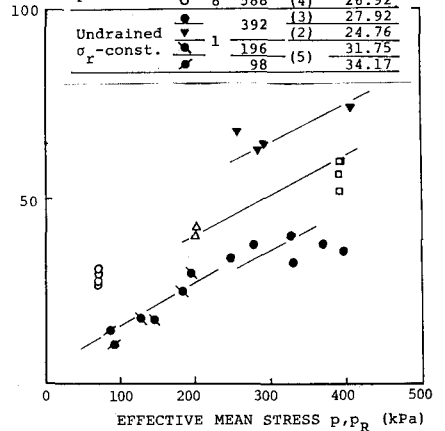


図6. G と平均有効応力の関係