

粘土の広範囲のひずみでの応力～ひずみ関係および非排水せん断強度の定式化

Formulating Stress-Strain Relations of Clay over Wide Strain Range and Its Link to Undrained Shear Strength

北海道大学大学院工学研究科 ○学 生 員 李 徳建 (Dejian LI)

同 正 会 員 澁谷 啓 (Satoru SHIBUYA)

同 フェロー会員 三田地利之 (Toshiyuki MITACHI)

1. はじめに

実測した土質材料のせん断時の応力～ひずみ関係を定式化するために、双曲線関数(Kondner, 1963)¹⁾が広く用いられてきた。本稿では粘性土の三軸試験結果に基づき、龍岡・澁谷²⁾(1991)が提案した関係式の粘土への適用性を検討している。また、荻野ら³⁾(2001)の提案式を用いて、粘性土試料せん断直前のせん断弾性係数 G_0 と非排水せん断強度の関係についても考察した。

2. 非排水三軸圧縮試験

2.1 試験方法

一連の実験にはベンダーエレメント(BE)を装着した多機能三軸試験装置⁴⁾を使用した。パソコンを利用して、直径 50mm、高さ 100mm の円柱供試体を所定の圧密方法($K_c = \sigma'_h / \sigma'_v$ 一定あるいは K_0)で圧密した後に、軸ひずみ速度一定でせん断した⁵⁾。供試体を三軸試験機内にセットしたあと、まず、二重負圧法⁶⁾により、供試体内部の空気を抜いた後に通水し、供試体の飽和化を試みた。圧密中、供試体には 200kPa の背圧を与え、軸応力増加速度一定($\dot{\sigma}_v = 0.1 \text{ kPa/min}$)で圧密した。途中適宜供試体を非排水にし、微小な繰返し軸ひずみ振幅 0.005%を与え、等価ヤング係数 E_{eq} を測定した。同様に、本研究室で開発された弾性波速度測定システム⁷⁾を利用して、せん断弾性波速度を測定し、せん断弾性係数 G_{BE} を算出

した。

2.2 試料と試験条件

試験には、市販の粉末粘土である NSF 試料及び自然粘土試料を用いた。

NSF 試料：市販の NSF 粘土に蒸留水を加え、含水比を液性限界の 2 倍程度になるように十分攪拌し、真空に近い状態に保った予圧セルで十分に脱気した後、鉛直応力 150 kPa で 10 日間一次元圧密した。

自然粘土の乱さない試料：シンガポール、韓国(乙淑島)および京都市(洛西 Ma4)でそれぞれ採取した自然粘土を用いた。Ma4 はデニソンサンプラーで採取した洪積粘土、その他はシンウォールサンプラーで採取した沖積粘土である。標準圧密試験より求めた過圧密比 OCR はシンガポール試料の SIN T-4 と SIN T-19 でそれぞれ 4.0 と 2.5 であり、K3-14 は 4.0 であった(表 1 参照)。したがって、これら OCR>1 の試料に関しては、原地盤の K_0 値を 1.0 と仮定して、 $K_c=1$ (等方)で再圧縮した、その他の試料は K_0 圧密した。

自然粘土の再構成試料：原地盤で採取した自然粘土試料を液性限界の約 2 倍程度の含水比で十分に練り返し、80 kPa の鉛直応力で一次元的に再圧密した。再構成試料 SIN R-1 は 'R' を用いて表記している。

各試料のプロパティと試験条件を表 1 にまとめている。

表 1 試料のプロパティ及び試験条件

項目	単位	NSF 粘土		シンガポール粘土			韓国(乙淑島)粘土		京都粘土
		NSF0009	NSF0101	SIN T-4	SIN T-19	SIN R-1	UJ1	UJ5	K3-14
採取深度	m	—	—	6.0~6.9	21.0~21.9	—	18.0~18.8	22.0~22.8	23.0~23.8
土粒子の密度 ρ_s	g/cm ³	2.76	2.78	2.64	2.73	2.67	2.72	2.73	2.75
液性限界 w_L	%	54	55	100.9	101.9	87.5	43.7	63.8	107.7
塑性限界 w_p	%	22	19	33.6	33.2	26.3	23.3	27.7	33.7
塑性指数 I_p		32	26	67	69	61	20	36	74
粘土分	%	99	99	79	73	—	37	55	75
初期含水比 w_0	%	49	48	66.6	60.9	62.6	35.3	47.7	57.4
有効土被り圧 σ'_{v0}	kPa	—	—	38	138	—	160	188	200
圧密時軸応力の増加率	kPa/min	0.5	0.2, 0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1, 0.1	0.1
最終圧密圧力 σ'_{ve}	kPa	300	150	38	140	400	160	380	200
過圧密比 OCR		—	—	4.0	2.5	—	1.0	1.0	4.0
圧密方法		$K_c=1$	$K_c=1$	$K_c=1$	$K_c=1$	K_0	K_0	$K_c=1$	$K_c=1$
せん断軸ひずみ速度	%/min	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.02
Bender 測定		せん断中	試験中	試験中	試験中	無し	試験中	無し	試験中

2.2 試験結果

2.2.1 有効応力経路及び応力～ひずみ関係

例として、NSF 粘土試料の有効応力経路及び応力～ひ

ずみ関係を図 1 に示す。その他の試料の有効応力経路及び応力～ひずみ関係図は紙面の都合上割愛する。

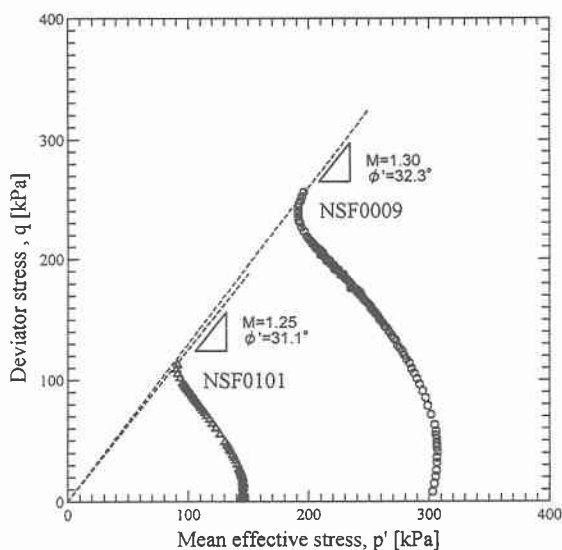


図 1(a) NSF 試料の有効応力経路

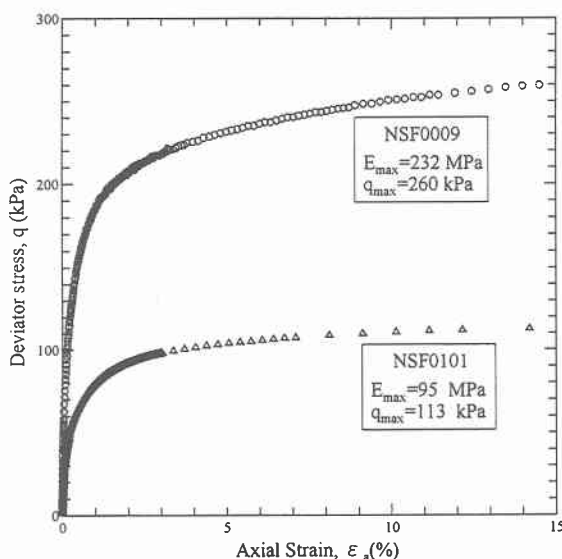


図 1(b) NSF 試料せん断時の応力～ひずみ関係

3. 双曲線関数による応力～ひずみ関係の定式化

龍岡らが土質材料の微小ひずみから破壊時までの広い範囲のひずみに対して、実測の変形係数に適合する修正双曲線モデル(龍岡・澁谷モデル)を提案した²⁾。実測のヤング弾性係数 $E_{\max}$ と圧縮強度 $q_{\max}$ を用いて、正規化された応力ひずみ関係は

$$Y = \frac{X}{1/c_1(X) + X/c_2(X)} \quad (1)$$

となる。ここで、 $Y=q/q_{\max}$, $X=\epsilon_a/(\epsilon_a)_r$, $(\epsilon_a)_r=q_{\max}/E_{\max}$ は基準ひずみで、 c_1 , c_2 は補正係数であり、(2), (3)式に示すような X の関数である。また、 $c_1=c_2=1$ の場合を原型双曲線関数(Original Hyperbolic Function, 以下 OHF)と呼ぶことにする⁸⁾。

$$c_1(X) = \frac{c_1(0) + c_1(\infty)}{2} + \frac{c_1(0) - c_1(\infty)}{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\alpha/X + 1}\right) \quad (2)$$

$$c_2(X) = \frac{c_2(0) + c_2(\infty)}{2} + \frac{c_2(0) - c_2(\infty)}{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\beta/X + 1}\right) \quad (3)$$

各パラメータの決定方法の詳細については参考文献

2)を参照されたい。例として、NSF0009 試料の各パラメータの求め方を図 2 に示す。

別途に行った解析結果から、等方有効拘束圧で再圧縮

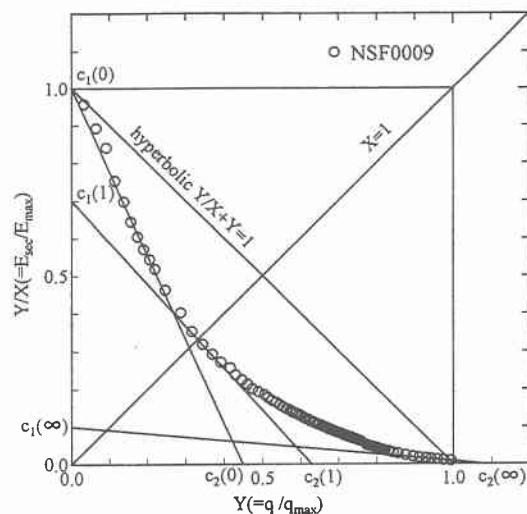


図 2 Y/X～Y 関係から求める
各種パラメータ(式(2), (3)の例)

して、正規圧密状態にある NSF 試料及び自然粘土試料(NSF009, NSF0101, UJ5)に対して、式(2), (3)は破壊前の広範囲のひずみにおける応力～ひずみ関係をうまくフィティングできる。一方、異方圧密(K_0)で再圧縮した自然粘土試料の(SIN R-1, UJ1)及び等方有効拘束圧で再圧縮して、過圧密状態にある自然粘土の乱さない試料(SIN T-1, SIN T-19)に対しては、パラメータが適切に決定できない。これは、 $Y/X \sim Y$ 曲線の形によるものと考えられる。異方圧密の場合では新たな基準応力とひずみおよび補正係数を定義すれば、定式化が可能になる。

そこで、基準応力を $Y=\Delta q/\Delta q_{\max}$ として、基準ひずみを $(\epsilon_a)_r = \Delta q_{\max}/E_{\max}$ とする。破壊までの応力～ひずみ関係に着目して、補正係数 c_1 , c_2 をそれぞれ式(4), (5)のような形式にする。

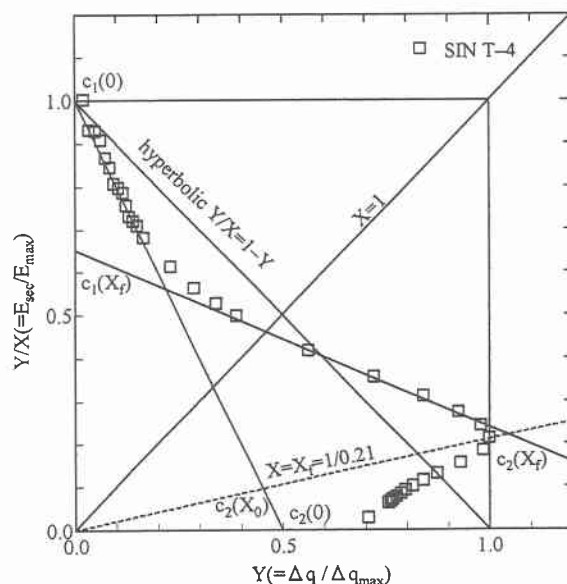


図 3 Y/X～Y 関係から求める
各種パラメータ(式(4), (5)の例)

$$c_1(X) = \frac{c_1(0) + c_1(\infty)}{2} + \frac{c_1(0) - c_1(\infty)}{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\alpha_f / X + 1}\right) \quad (4)$$

$$c_2(X) = \frac{c_2(0) + c_2(\infty)}{2} + \frac{c_2(0) - c_2(\infty)}{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\beta_f / X + 1}\right) \quad (5)$$

ここで、 α_f 、 β_f は $c_1(X_f)$ 、 $c_2(X_f)$ によって求める定数であり、 $\Delta q = q - q_0$ 、 $\Delta q_{\max} = q_{\max} - q_0$ であり、 q_0 はせん断直前の偏差応力である。

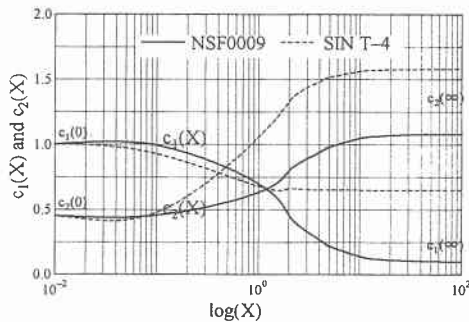
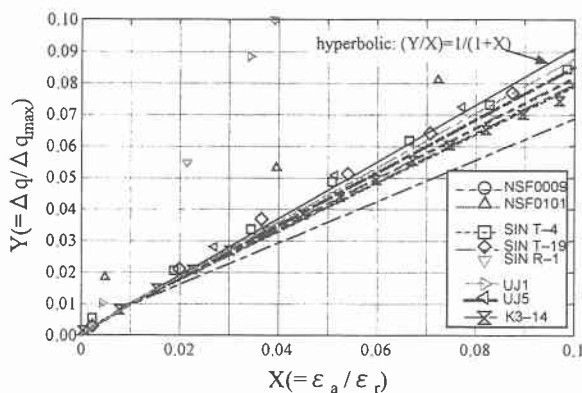


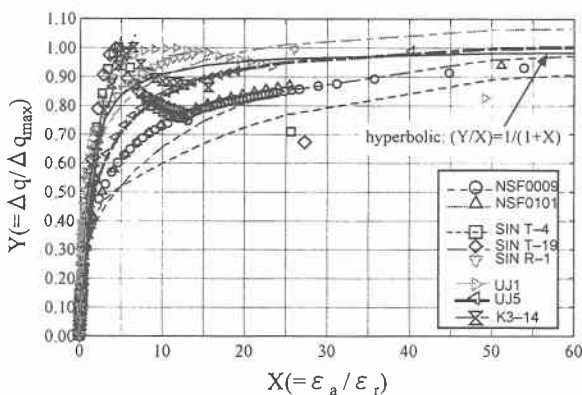
図4 $c_1(X)$ 及び $c_2(X)$ の例

タを使って計算した $c_1(X)$ 及び $c_2(X)$ の例を示す。

各試料の三軸試験における応力・ひずみレベル依存性 (X - Y 関係)、割線剛性率のひずみレベル依存性 (Y/X - X 関係) 及び割線剛性率の応力レベル依存性 (Y/X - Y 関係) の比較をそれぞれ図5、図6、図7に示す。各粘土試料の



(a) $X: 0 \sim 0.1$



(b) $X: 0 \sim 60$

図5 各試料の三軸圧縮試験における X - Y 関係

三軸試験結果に対して、弾性域 $Y_e = X_e = 0$ として修正双曲線関係で近似した場合の各種パラメータを表2にまとめた。

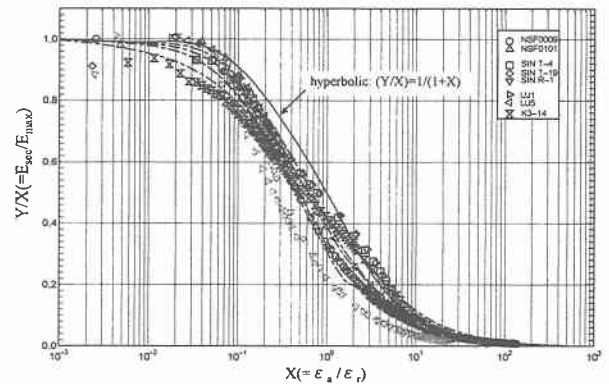


図6 各試料の $Y/X(=E_{\text{sec}}/E_{\text{max}}) \sim X(=\varepsilon_a/\varepsilon_r)$ 関係

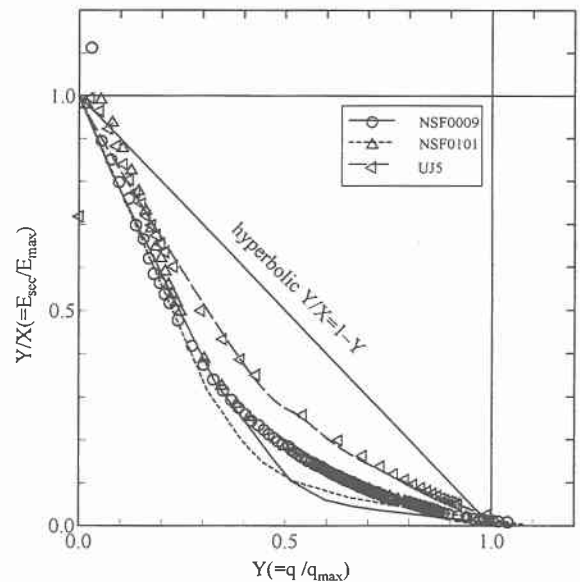


図7(a) 各試料の $Y/X \sim Y$ 関係(式(2),(3)で定式化)

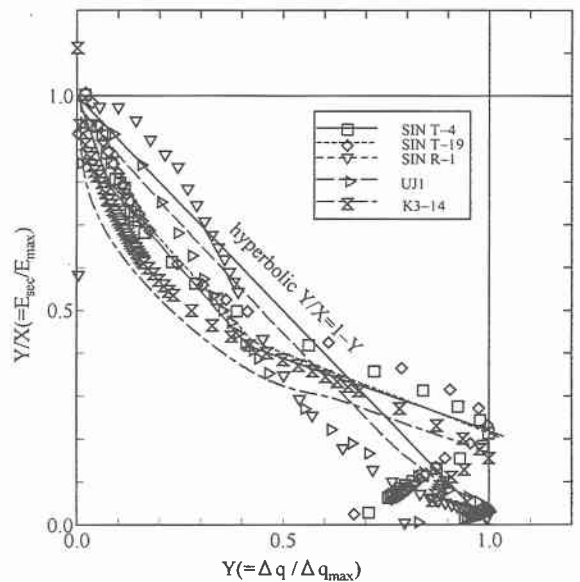


図7(b) 各試料の $Y/X \sim Y$ 関係(式(4),(5)で定式化)

表2 定式化のパラメータ

	NSF0009	NSF0101	SIN T-4	SIN T-19	SIN R-1	UJ1	UJ5	K3-14
q_{max} (kPa)	260	113	79	198	200	125	299	247
q_u (kPa)	0	0	0	0	124	81	0	0
E_{max} (MPa)	232	94.8	33.9	90.1	95.8	103	192	134
λ_e	0	0	0	0	0	0	0	0
$c_v(0)$	1	1	1	1	1	1	1	1
$c_v(0)$	0.45	0.48	0.50	0.5	1.5	0.70	0.58	0.20
$c_v(\infty)$	0.1	0.15	0.65	0.7	0.33	0.40	0.40	0.53
$c_v(\infty)$	1.08	1.10	1.58	1.50	1.05	1.12	1.05	1.50
$c_v(1)$	0.7	0.70	0.65	0.70	1.30	0.90	0.80	0.60
$c_v(1)$	0.63	0.63	1.58	0.50	0.68	0.76	0.76	1.40
α (式2)	1.55	1.15	0	0	—	2.74	1.55	0.34
β (式3)	1.79	2.06	0	0	—	3.05	1.35	0.22
$1/X_0$	—	—	0.21	0.23	—	0.04	—	0.15
$c_v(X_0)$	—	—	0.45	0.45	—	0.68	—	0.19
$c_v(X_0)$	—	—	1.05	1.04	—	1.00	—	1.04
$c_v(X_0)$	—	—	1.05	1.04	—	1	—	1.05
α_1 (式4)	—	—	0.23	0.23	—	0.23	—	0.38
β_1 (式5)	—	—	0.92	0.90	—	0.56	—	0.67

4. 非排水せん断強度とせん断直前の弾性せん断係数 G_0 の関係

荻野ら(2001)³⁾はベンダーエレメントを装着した一面せん断試験結果からせん断直前のせん断弾性係数, 圧密応力及び過圧密比と最大せん断強度の関係として式(6)を導いている。

$$\tau_{max} = \left\{ \frac{\tau_{max}}{p_0'} \right\}_{NC} \cdot G_0^{\frac{\nu}{\lambda}} \cdot OCR^{\frac{\nu}{\lambda} \cdot \frac{\kappa}{\lambda}} \cdot \exp\left(\frac{\Gamma - \Delta}{\lambda}\right) \quad (6)$$

ここで, p_0' は圧密終了時の平均有効主応力である。正規圧密, 過圧密状態における $e \sim \ln p'$ 及び $e \sim \ln G$ 関係をそれぞれ線形関係で近似している。 $e \sim \ln p'$ 関係における正規圧密, 過圧密時の傾きをそれぞれ λ , κ とし, $e \sim \ln G$ 関係における正規圧密, 過圧密時の傾きを ν , μ とした。また, $p' = 1 \text{ kPa}$, $G = 1 \text{ MPa}$ に相当する正規圧密時の間隙比をそれぞれ Γ , Δ とした。

式(5)を三軸試験の結果に適用すると式(6)となる。

$$s_u = \left\{ \frac{s_u}{p_0'} \right\}_{NC} \cdot G_0^{\frac{\nu}{\lambda}} \cdot OCR^{\frac{\nu}{\lambda} \cdot \frac{\kappa}{\lambda}} \cdot \exp\left(\frac{\Gamma - \Delta}{\lambda}\right) \quad (7)$$

各試料のパラメータを表3にまとめ、測定データと計

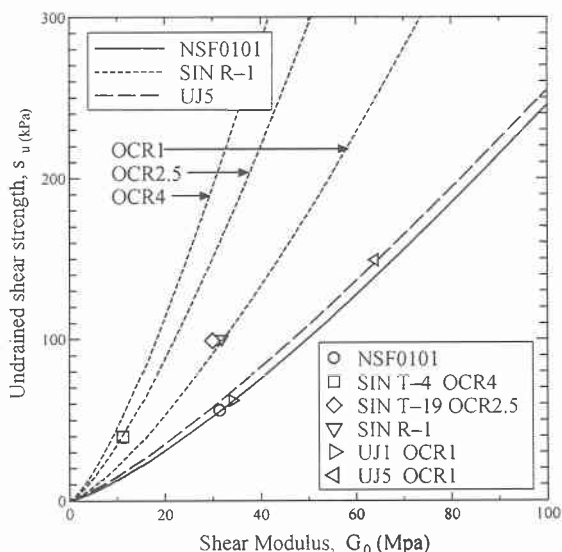


図8 非排水せん断強度の推定(7式)

算結果を図8に示す。(7)式により、室内再構成粘土では、せん断直前のせん断弾性係数 G_0 (あるいは $E_{max}/3$) からせん断強度 s_u が推定できそうである。年代効果のため、乱さないシンガポール粘土試料は(7)式の関係から大きくずれていることがわかる。

表3 非排水せん断強度推定用のパラメータ

試料番号	λ	κ	Γ	ν	μ	Δ	E_{max} (MPa)	q_{max} (kPa)
NSF0009	0.31	0.07	1.88	—	—	—	232	260
NSF0101	0.28	0.04	1.84	0.36	0.09	1.77	95	113
SIN T-4	—	—	—	—	—	—	34	79
SIN T-19	—	—	—	—	—	—	90	198
SIN R-1	0.24	0.05	2.52	0.29	0.08	2.13	96	200
UJ1	—	—	—	—	—	—	103	125
UJ5	0.15	0.03	1.91	0.19	0.05	1.78	192	300
K23R	0.38	0.07	3.60	0.46	0.12	3.02	134	247

5. まとめ

①原型双曲線(OHF)を用いると微小ひずみから破壊に至るまでの広い範囲の応力レベルで実測の変形係数を過大評価している(図6参照)。

②等方圧密かつ正規圧密状態まで再圧縮した試料には、龍岡・澁谷モデル(式(1)、(2)、(3))が全ての応力レベルに対して実測の応力ひずみ関係を十分に再現している。

③ K_0 圧密かつ過圧密状態でせん断した試料には式(4)、(5)を導入すると、変形係数を若干過小評価しているが、破壊までの応力レベルに対して実測の応力ひずみ関係を再現できる。

④特例として、シンガポール粘土の再構成試料(SIN R-1)の応力ひずみ関係を再現できなかった。

以上のことからわかるように、双曲線によって粘性土の応力ひずみ関係を定式化できるが、うまく表現できない場合がある。今後の更なる検討が必要である。

⑤式(7)で再構成試料のせん断直前の弾性せん断係数 G_0 から非排水せん断強度を推定できるようである。

参考文献

- 1) Kondor, R. B. (1963): Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soil, Jour. of the SMF Div., ASCE, 89-SM1, pp. 115-143.
- 2) 龍岡 文夫・澁谷 啓(1991): 地盤材料の広い範囲のひずみでの応力・ひずみ関係式について, 第26回土質工学研究発表会, pp. 537~540.
- 3) 荻野俊寛・三田地利之・澁谷啓・及川洋(2001): 圧密定体積一面せん断試験による粘性土の変形・強度特性 -ベンダーエレメントによるせん断弾性係数の測定, 土木学会論文集, No.673/III-54, pp.15-26.
- 4) 黄 聖春・三田地利之・澁谷 啓・館市弘達(1998): 微小ひずみレベルから破壊に至るまでの乱さない粘土の変形と非排水強度特性, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.305~319.
- 5) 小田 美明・三田地利之(1992): 飽和粘土の三軸 K_0 圧密試験法について, 土木学会論文集, No.448/III-19, pp. 45~52.
- 6) 龍岡 文夫 (1986): 土質せん断試験機の設計と製作 -試験法あれこれ-, 連載第12回, 地質と調査, 1986年, 第3号, pp.53~58.
- 7) 川口 貴之・三田地利之・澁谷 啓・佐野 佑房(2001): 室内ベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数 G の評価, 土木学会論文集, (12月掲載予定).
- 8) 澁谷 啓・龍岡 文夫・安部 文洋・金 有性・朴 春植(1991): 地盤材料の広い範囲のひずみでの応力・ひずみ関係, 第26回土質工学研究発表会, pp. 533~536.