

過圧密状態の粘土の非排水強度推定法

Prediction of undrained shear strength of overconsolidated clay

み た ち とし ゆき お の たかし
三 田 地 利 之 小 野 丘**

1. はじめに

掘削・除荷等により過圧密状態にある粘土地盤の長期安定問題には、有効応力による強度定数 c' , ϕ' を用いるべきであるとされてきた。しかし、実際には過圧密粘土の c' の値を正確に求めることは困難であり、また、 $c'-\phi'$ 法による場合破壊時の間隙水圧を推定しなければならないという難点もある¹⁾。一方、除荷による非排水強度 S_u の減少率があらかじめ分かれば、それを用いて $\phi_u=0$ 法 (S_u 法) を適用するのがより实际的であるとの考えから、筆者らは Hvorslev (ボルスレブ) の破壊規準に基づいて過圧密状態にある粘土の原位置非排水強度と有効土かぶり圧の比 S_u/p_0 を等方圧密非排水三軸圧縮試験により推定する方法を提案した^{2),3)}。方法は異なるが、上記と同様の趣旨による過圧密粘土の非排水強度推定に関する研究が、中瀬ら¹⁾、Ladd (ラッド) ら⁴⁾ によってなされている。また、Mayne (メイネ)⁵⁾ は土質工学関係の文献に発表された約 100 種類の世界各国の粘土やシルトについての非排水強度に関するデーターをとりまとめ、Roscoe (ロスコー) らによって提案された限界状態の概念⁶⁾ に基づいて導かれた予測式による計算値と実測値との比較を示している。

筆者らの提案した S_u/p_0 —OCR の関係式が、後述するように、Mayne の用いた式と全く同形であって、広範囲の粘性土試料に適用可能なことがわかったこと、さらに最近不かく乱試料について多数の圧密(膨張)非排水三軸圧縮試験を実施する機会を得たことなどから、繰り返した試料を用いて理想的条件の下で行われた実験結果に基づく推定式が不かく乱試料による実験結果にも適用できるか否かを確かめてみた。また、既報の推定手法は等方および K_0 条件で圧密・膨張をうけた試料の非排水圧縮強度を対象としたものであるが、破壊が伸張状態で起こる場合の推定手法についても検討を加えたので、ここに報告する。

2. 過圧密粘土の S_u/p_0 2.1 等方過圧密試料の S_u/p_0 —OCR 関係式

筆者ら³⁾ は過圧密履歴をうけた粘土試料の S_u/p_0 と過圧密比 OCR との関係として次式を導いた。

$$(S_u/p_0)_O = (S_u/p_0)_N \cdot OCR^A \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに A は定数で、 O , N はそれぞれ過圧密および正規圧密条件を表す。(1)式は Roscoe らの限界状態(critical state)の概念を用いると以下のように導かれる。

図—1 に示すように $e-\ln p$ 平面 (e は間隙比, p は平均有効主応力) 上で等方圧密・等方膨張線 (NCL, OCL) がそれぞれ傾き $-\lambda$ および $-\kappa$ の直線で表されるとすると、

$$e_0 - e_m = \lambda \ln(p_m/p_e) = \kappa \ln(p_m/p_0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、過圧密比 OCR は次式で表されるから、

$$OCR = p_m/p_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

(2), (3)式より

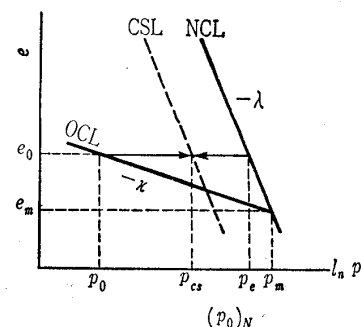
$$p_e/p_0 = (OCR)^{1-\kappa/\lambda} = OCR^A \quad \dots\dots\dots (4)$$

限界状態の概念に従えば、同一間隙比 (e_0) をもつ過圧密試料および正規圧密試料 (せん断前の有効応力はそれぞれ p_0 および $p_e = (p_0)_N$) を非排水せん断すると、 $p = p_{cs}$ で限界状態 (CSL) に達し、その時の非排水強度 S_u は両試料で等しい。そこで(4)式から、

$$\frac{S_u/p_0}{S_u/p_e} = \frac{(S_u/p_0)_O}{(S_u/p_0)_N} = OCR^A \quad \dots\dots\dots (5)$$

つまり、(1)式は $e-\ln p$ 平面上での等方圧密・膨張線の直線性と、同一間隙比における正規および過圧密試料の非排水せん断強度が限界状態において等しい、という二つの仮定のもとに成立している。

(1)式から分かるように、等方過圧密試料の S_u/p_0 と OCR の関係は両対数紙上で傾き A 、切片 $(S_u/p_0)_N$ の直線で表される。等方正規圧密非排水三軸圧縮試験は比較的簡単に実施可能であるから、 $(S_u/p_0)_N$ を実験的に求め、傾き A を予測することができれば、任意の OCR における $(S_u/p_0)_O$ を得ることができる。



図—1 等方圧密(膨張)による $e-\ln p$ 関係

*北海道大学教授 工学部土木工学科

**戸田建設(株) 松戸研究所

2.2 A の表現式

筆者らの過去の研究⁸⁾では A を次式で近似した。

$$A = A_0 = 1 - \frac{C_s}{C_c} \quad (6)$$

ここに、 C_c 、 C_s はそれぞれ標準圧密試験による圧縮指数・膨張指数であって A_0 のサフィックス0は標準圧密試験を意味する。また、 A は理論的には前述のように次式で表される。

$$A = A_I = 1 - C_{si}/C_{ci} (= 1 - \kappa/\lambda) \quad (7)$$

ただし、 C_{ci} 、 C_{si} はそれぞれ等方応力条件の下での圧縮・膨張指数($C_{ci} = \lambda \ln 10$, $C_{si} = \kappa \ln 10$)であって A_I のサフィックス I は等方応力条件を表す。(6)、(7)式による A の値の決定に問題がないわけではない。例えば、 C_s にしても C_{si} にしても過圧密比にある程度依存しており、膨張試験の $e - \log_{10} p$ 曲線の勾配として決定することが困難な場合がある。また、 C_{ci} 、 C_{si} を得るためには圧密圧力の異なる数回の等方圧密(膨張)試験を実施するか、または圧密(膨張)の各段階で吸排水量を正確に追跡して計算から求めるなどの方法をとる必要がある。したがって、(6)または(7)式をそのまま実際の非排水強度推定に用いるには問題があると思われる。そこで、これに代る方法を考えてみよう。

筆者らは粘性土のダイレイタンスーが応力比 η ($\eta = q/p$, $q = \sigma_1 - \sigma_3$)の関数で表すことができるとして、ダイレイタンスー関数 $F(\eta)$ を定義し、これを等方圧密後の非排水試験に適用して次式を得た⁷⁾。

$$\ln \frac{p}{p_0} = -\frac{1+e_0}{\lambda} \cdot F(\eta) \quad (8)$$

ここに、 p_0 、 e_0 は、それぞれ圧密終了時の平均有効主応力および間隙比を表す。限界状態(cs)での応力比を $M = q_{cs}/p_{cs}$ とすると、

$$\frac{p_{cs}}{p_0} = \frac{q_{cs}}{p_0 M} = \frac{S_u}{p_0} \cdot \frac{2}{M} \quad (9)$$

(8)、(9)式から限界状態では

$$\ln \left(\frac{S_u}{p_0} \cdot \frac{2}{M} \right) = -\frac{1+e_0}{\lambda} F(M) \quad (10)$$

また、 $e - \ln p$ 面上での等方膨張線の勾配($-\kappa$)は限界状態での条件から次式で表すことができる⁷⁾。

$$\kappa = \lambda - (1+e_0)MF'(M) \quad (11)$$

(7)、(10)、(11)式より

$$A = \frac{MF'(M)}{F(M)} \ln \left(\frac{S_u}{p_0} \cdot \frac{2}{M} \right) \quad (12)$$

したがって、 $F(\eta)$ の関数形が決まれば(12)式によって A を求めることができる。

筆者ら⁷⁾は等方正規圧密試料の非排水三軸圧縮試験におけるダイレイタンスーを η の一次関数で近似することによって応力-ひずみ挙動をよく推定できることを示した。RoscoeらのCam-Clay(カム・クレイ)理論や修正Cam-Clay理論ではダイレイタンスーに関する言及は直接には

なされていないが、応力経路の表現式から $F(\eta)$ の関数形を逆算的に求めると、例えば修正Cam-Clay理論⁹⁾では次式のようなになる⁹⁾。

$$F(\eta) = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \{ 1 + (\eta/M)^2 \} \quad (13)$$

(13)式を(12)式に代入すると、

$$A = -\ln \left(\frac{S_u}{p_0} \cdot \frac{2}{M} \right) / \ln 2 \quad (14)$$

ここで、

$$M = 6 \sin \phi' / (3 - \sin \phi') \quad (15)$$

と表されるから、 A は原理的には等方圧密非排水三軸圧縮試験を一回実施すれば、 S_u/p_0 と ϕ' から計算できる。

A の算定式(12)のもとになっている(8)式は非排水応力経路を表すものであるから、 $F(\eta)$ がダイレイタンスー挙動を忠実に表現できるような関数形であれば非排水強度を正確に表すことができるから、(12)式が A の最良の値を与えることになる。しかし、一般にこの関数形は単純ではなく、筆者らの研究によれば A を表すパラメーターの数やその決定のしやすさから考えて(12)式で近似するのが現実的であり、 S_u/p_0 の推定精度もよい¹⁰⁾。

2.3 K_0 過圧密試料の S_u/σ_{v0}'

原位置における粘土地盤の圧密・膨張は一次元的に進行し、側方ひずみが拘束されている場合が多い。また、一般に鉛直応力と水平応力が異なる異方応力状態にあり、その比 $K_0 (= \sigma_h'/\sigma_v')$ は過圧密比に依存することが分かっている。したがって、原位置における圧密圧力としては、平均有効主応力よりも鉛直有効応力 σ_v' をとる方が現実的であろう。そこで、圧密圧力として σ_v' をとって K_0 圧密試料の非排水強度の変化率を表した時にも(1)と同様の関係が成立するか否かについて考察を加える。

K_0 圧密-膨張をうけた試料の圧密圧力と間隙比との関係は図-2に示すように、圧密圧力として平均有効主応力 p をとるか鉛直有効応力 σ_v' をとるかによってその位置と傾きが異なることが分かっている。まず $e - \ln \sigma_v'$ での過圧密比は σ_v' で定義して、

$$\text{OCR}^* = \sigma_{vm}' / \sigma_{v0}' \quad (16)$$

過圧密状態での鉛直有効応力と水平有効応力との比を K_{0r} とすると、

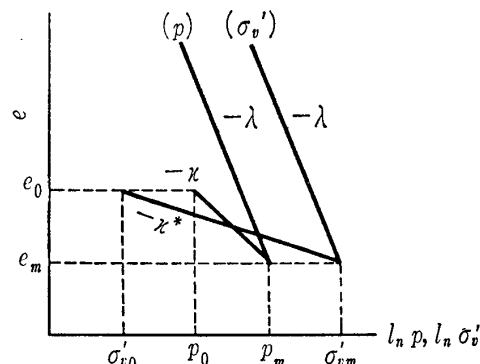


図-2 K_0 圧密(膨張)による $e - \ln p(\ln \sigma_v')$ 関係

$$p_m = \frac{1+2K_0}{3} \sigma_{vm}', \quad p_0 = \frac{1+2K_0}{3} \sigma_{v0}' \dots\dots\dots(17)$$

(16), (17)式より

$$\text{OCR}^* = \frac{1+2K_0}{1+2K_0} \cdot \frac{p_m}{p_0} = \frac{1+2K_0}{1+2K_0} \cdot \text{OCR} \dots\dots\dots(18)$$

したがって, (1), (17)および(18)式から

$$\left(\frac{S_u}{\sigma_{v0}'}\right)_0 = \left(\frac{S_u}{\sigma_{v0}'}\right)_N \cdot \left(\frac{1+2K_0}{1+2K_0}\right)^{\kappa/\lambda} \cdot (\text{OCR}^*)^{1-\kappa/\lambda} \dots\dots\dots(19)$$

一方, 図-2 から

$$\kappa \ln(p_m/p_0) = \kappa^* \ln(\sigma_{vm}'/\sigma_{v0}') \dots\dots\dots(20)$$

よって(17)および(20)式より

$$\frac{1+2K_0}{1+2K_0} = (\text{OCR}^*)^{1-\kappa^*/\kappa} \dots\dots\dots(21)$$

これを(19)式に代入して

$$\left(\frac{S_u}{\sigma_{v0}'}\right)_0 = \left(\frac{S_u}{\sigma_{v0}'}\right)_N \cdot (\text{OCR}^*)^{1-\kappa^*/\lambda} \dots\dots\dots(22)$$

つまり, (22)式は圧密圧力として平均有効主応力と鉛直有効主応力のどちらを採用しても, それぞれに対応した OCR と κ を用いれば(1)式と全く同じ関係が成立することを示している。したがって, 以後(1)式の OCR および κ にはこの意味を持たせることとする。

上述のように K_0 過圧密試料の (S_u/σ_{v0}') は次式で表される。

$$\left(\frac{S_u}{\sigma_{v0}'}\right)_{K_0OC} = \left(\frac{S_u}{\sigma_{v0}'}\right)_{K_0NC} \cdot \text{OCR}^{A^*}, \\ A^* = 1 - \kappa^*/\lambda \dots\dots\dots(23)$$

ここに, $K_0OC(K_0NC)$ はそれぞれ K_0 過圧密 (正規圧密) 一圧縮条件を表す。すなわち, (23)式は K_0 正規圧密後の S_u/σ_{v0}' と A^* が与えられれば, 任意の過圧密比に対する S_u/σ_{v0}' を求めることが可能であることを示している。

つぎに(23)式における $(S_u/\sigma_{v0}')_{K_0NC}$ を推定する方法を考える。(8)式を導く際の初期条件 ($e=e_0$ のとき $p=p_0$, $\eta=0$) を K_0 圧密条件 ($e=e_0$ で $p=p_0$, $\eta=\eta_0$) に置き換えると, 応力比 η_0 で K_0 圧密された試料の非排水応力経路を得る。

$$\ln \frac{p}{p_0} = -\frac{1+e_0}{\lambda} \{F(\eta) - F(\eta_0)\} \dots\dots\dots(24)$$

$$\eta_0 = 3(1-K_0)/(1+2K_0) \dots\dots\dots(25)$$

(7), (11)および(24)式と限界状態の条件より,

$$\frac{S_u}{p_0} = \frac{M}{2} \exp \left[-\frac{A}{MF'(M)} \{F(M) - F(\eta_0)\} \right] \dots\dots\dots(26)$$

(24)式中の $F(\eta)$ として(13)式を用いると,

$$\frac{S_u}{p_0} = \frac{M}{2} \exp \left\{ -A \ln \left(\frac{2M^2}{M^2 + \eta_0^2} \right) \right\} \dots\dots\dots(27)$$

(27)式に圧密時の平均有効主応力と鉛直有効応力の関係を適用して,

$$\left(\frac{S_u}{\sigma_{v0}'}\right)_{K_0NC} = \frac{3M}{2(3+2\eta_0)} \exp \left\{ -A \ln \left(\frac{2M^2}{M^2 + \eta_0^2} \right) \right\} \dots\dots\dots(28)$$

(28)式中の A は(14)式によって計算されるから, K_0 正規圧

密試料の圧縮強度 $(S_u/\sigma_{v0}')_{K_0NC}$ は等方正規圧密試料から得られる $(S_u/p_0)_{INC}$, M および K_0 の三つの値から計算できる。

2.4 伸張状態における S_u/σ_{v0}'

K_0 過圧密状態にある試料の非排水伸張強度に關しても(23)式が成立するとすれば,

$$(S_u/\sigma_{v0}')_{K_0OE} = (S_u/\sigma_{v0}')_{K_0NE} \cdot \text{OCR}^{A^*} \dots\dots\dots(29)$$

ここで, K_0OE , K_0NE はそれぞれ K_0 過圧密, K_0 正規圧密一伸張条件を表す。

前述のように, K_0 圧密後の試料の圧縮強度の推定に等方正規圧密試料についての Roscoe らの構成関係を用いているが, 従来から指摘されているように, 降伏曲面が塑性変形とともに等方的に拡大するという Cam-Clay 理論の仮定は K_0 圧密後の試料では満足されず, 特にそれは伸張側において著しい¹¹⁾。そこで本来ならば, K_0 圧密試料についての伸張時の応力-ひずみ挙動を説明できるような構成式を用いるべきであるが, 現在のところ, 満足すべきモデルがないことから, 以下に示す三つの仮定を設けて, $(S_u/\sigma_{v0}')_{K_0NE}$ の推定を試みることにする。

- 1) 等方正規圧密試料が非排水圧縮および伸張をうけた時, 両者は同じ応力比 ($M_C = M_E$) で限界状態に達する。
- 2) K_0 正規圧密試料の非排水伸張時の有効応力経路は, $p-q$ 面上の $q < 0$ の領域で, 等方正規圧密試料の非排水伸張時の有効応力経路と相似形をなす (図-3)。
- 3) K_0 正規圧密試料の非排水伸張時の有効応力経路が p 軸と交わる点での p を p_q とすると (図-3), 含水比の異なる試料による $e-\ln p_q$ の傾きと正規圧密線の傾きは等しい。

仮定1)の限界状態での応力比は一般に伸張側の方が小さいようであるが, 強度推定に必要なパラメーターの数を極力少なくするという観点から, 便宜上両者を等置する。仮定2)の応力経路の形状は Parry (パリ) ら¹²⁾による実験においても観察される。

上記三つの仮定から $(S_u/\sigma_{v0}')_{K_0NE}$ を以下のようにして

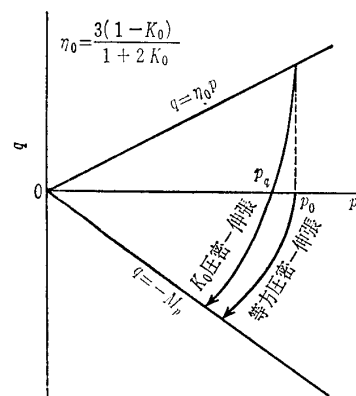


図-3 等方試料と K_0 試料の伸張状態における応力経路の相似

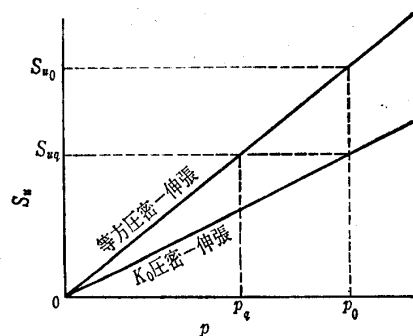


図-4 p_q による等方試料と K_0 試料の非排水強度 S_u の結びつけ

推定することができる。すなわち、非排水伸張時の有効応力経路が $p=p_q$ を通過する K_0 正規圧密試料の非排水伸張強度は、 $p=p_q$ で等方圧密をうけた試料の伸張強度に等しいとする。正規圧密試料の S_u/p_0 は一定としてよいから、図-4より、

$$S_{u0}/p_0 = S_{uq}/p_q \quad (30)$$

したがって、

$$S_{uq}/p_0 = (S_{u0}/p_0)(p_q/p_0) \quad (31)$$

(31)式の左辺は K_0 正規圧密試料の伸張強度の増加率を表す。

仮定1)より、(30)式の左辺は

$$S_{u0}/p_0 = (S_u/p_0)_{INC} \quad (32)$$

また、仮定3)より

$$\ln(p_q/p_0) = \text{const.} = \omega \quad (33)$$

(31)、(32)および(33)式から

$$\left(\frac{S_u}{\sigma_{v0}'}\right)_{K_0NE} = \frac{3}{3+2\eta_0} \left(\frac{S_u}{p_0}\right)_{INC} \cdot e^\omega \quad (34)$$

(34)式は ω と η_0 (または K_0) の値を適当に定めると等方圧密非排水試験結果から K_0 正規圧密試料の非排水伸張強度の推定が可能であることを示している。

表-1 練返し粘土試料の物理的性質 (420 μm 以下)

	LL (%)	PI (%)	G_s	粘土分 (%)
早来粘土	63	30	2.65	60
大願粘土	86	53	2.77	88

3. 三軸試験

3.1 実験試料

実験に用いた試料は北海道勇払郡早来町安平と同空知郡北村大願で採取した2種類の練返し試料と苫小牧港で採取した不かく乱試料の計3種類である。練り返した試料の物理的性質は表-1に示すようであり、蒸留水に浸し、420 μm のふるいを通して泥水状にした試料を直径200 mm、高さ400 mmの予圧密容器に真空で導き、鉛直圧密圧力0.8 kgf/cm²で約2週間一次的に予圧密して自立限界程度の含水比とし、圧密中の排水方向と直角方向に直径50 mm、高さ120 mmの円柱形に切り出して供試体とした。

苫小牧粘土の物理的性質と採取深度は表-2に示す通りである。試料は固定ピストン型のシンウォールサンプラーで採取されたもので、手動で鉛直方向に押し出した後、直径50 mm、高さ100 mmの円柱形に成形して供試体とした。

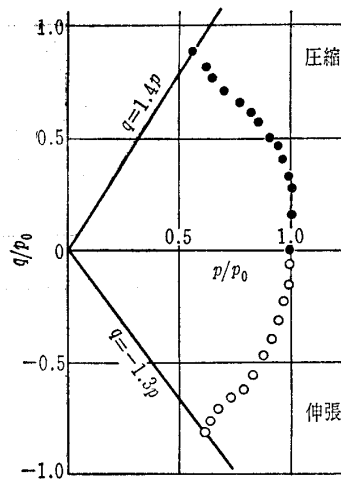
3.2 実験方法

早来粘土については下記の8種類の圧密非排水三軸試験のすべてを実施し、大願粘土については(1)、(5)、(6)を実施した。また、不かく乱苫小牧粘土については(1)、(2)の試験を実施したが、実験条件が練返し試料の場合と若干異なる。試験条件は以下の通りである。

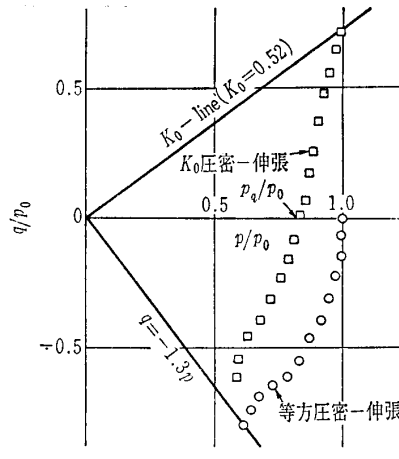
- (1) INC 試験：等方応力条件の下で正規圧密した試料についての非排水圧縮試験
- (2) IOC 試験：等方応力条件で圧密後、所定のOCRまで吸水膨張させた試料についての非排水圧縮試験
- (3) INE 試験：等方圧密後の非排水伸張試験

表-2 不かく乱苫小牧粘土の物理的性質

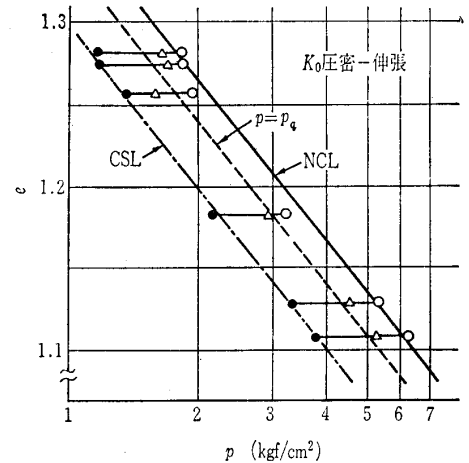
試料番号	採取深度 (m)	粒 度 特 性			LL (%)	PI	日本統一分類	比 重	自然含水比 (%)	C_c	C_s	M
		シルト分 (%)	粘土分 (%)	最大粒径 (mm)								
T-1-6	16.5~17.3	43.7	30.0	4.76	46	23	CL	2.70	44.3	0.386	0.034	1.439
T-1-7	17.5~18.3	50.5	45.0	2.00	53	18	VH ₁	2.72	44.5	0.476	0.046	
T-1-8	19.0~19.8	52.4	37.3	2.00	52	30	CH	2.72	44.2	0.511	0.062	1.235
T-1-9	20.0~20.7	56.5	32.5	4.76	55	31	CH	2.70	38.3	0.414	0.064	
T-1-10	21.0~21.8	68.6	30.5	2.00	46	22	CL	2.70	35.6	0.289	0.037	1.401
T-1-11	22.0~22.8	76.4	22.0	2.00	64	29	C'H	2.68	42.5	0.493	0.071	
T-5-8	19.0~19.8	48.0	44.5	4.76	51	31	CH	2.70	44.4	0.535	0.086	1.228
T-5-9	20.0~20.8	43.5	45.5	4.76	47	24	CL	2.67	47.2	0.465	0.047	
T-5-11	22.5~23.3	56.4	42.4	2.00	52	23	CH	2.70	39.7	—	—	1.388
T-5-12	23.5~24.4	40.4	59.0	2.00	66	40	CH	2.70	45.1	0.382	0.047	
T-6-7	18.0~18.8	40.1	44.4	4.76	51	28	CH	2.74	44.5	—	—	1.347
T-6-8	19.0~19.8	40.8	53.0	4.76	55	11	VH ₁	2.76	46.3	0.542	0.059	
T-6-10	21.5~22.3	47.3	46.8	2.00	45	25	CL	2.74	34.6	0.368	0.050	1.354
T-6-11	22.5~23.3	56.2	43.0	2.00	52	30	CH	2.75	38.0	0.333	0.042	



図—5 等方圧密試料の非排水圧縮および伸張応力経路(早来粘土)



図—6 等方および K_0 圧密試料の非排水伸張応力経路(早来粘土)



図—7 $e \sim \ln p_q$ と正規圧密線、限界状態線との位置関係(早来粘土)

- (4) IOE 試験：等方圧密・膨張後の非排水伸張試験
- (5) K_0 NC 試験： K_0 条件で圧密後の非排水圧縮試験
- (6) K_0 OC 試験： K_0 で圧密・膨張後の非排水圧縮試験
- (7) K_0 NE 試験： K_0 圧密後の非排水伸張試験
- (8) K_0 OE 試験： K_0 圧密・膨張後の非排水伸張試験

K_0 圧密・膨張は微量の吸排水量を検知してそれに見合う軸変位を与えるように軸応力を調節して供試体断面積を一定に保つ方式の自動 K_0 圧密装置³⁾により行い、6～12時間間隔で側圧を 0.102～0.306 kgf/cm² ずつ段階的に増減させた。等方圧密・膨張では、 K_0 圧密・膨張の場合とほぼ同じ平均主応力の変化量となるように圧力を増減させた。ただし、不かく乱試料の場合は圧密・膨張とも24時間で終了させた。

供試体のセットは、練返し試料については水中で、不かく乱試料の場合は空中で行い、いずれの場合も周面にスリット入りのドレーンペーパーを巻き、排水を半径方向に強制した。また、供試体の上下端面にシリコングリースを塗布したテフロンシートを敷いて、端面摩擦の軽減を図り、間隙水圧は供試体底部中央で圧力変換器によって測定した。軸力の測定は三軸セル内部に置かれたロードセルによってなされた。

せん断は圧縮・伸張ともすべて側圧一定のひずみ制御で行い、ひずみ速度は練返し試料については 0.04%/min、不かく乱試料については 0.1%/min とした。また、圧密時からバックプレッシャーを適用したが、練返し試料については 1.02 kgf/cm² とした。不かく乱試料の T-1 系列では 1 kgf/cm² としたが、Skempton(スケンプトン)の間隙圧係数 B 値が低いことが多かったので T-5 および T-6 系列の試験では 2 kgf/cm² とした。結果 $B > 0.95$ を得た。このように不かく乱試料に対して練返し試料と異なる条件を採用したのは、通常業務として行う場合の圧密非排水三軸圧縮試験の実験条件に合わせるためである。なお、不かく乱試料の場合、隣り合う深度の試料は同一と見なして一連の実験を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 伸張強度の推定に関する仮定の検証

K_0 正規圧密伸張条件での $(S_u/\sigma_{vo}')_{K_0NE}$ を推定する上で設けた三つの仮定を検証したのが図—5, 6, 7 である。図—5 は仮定 1) に対応するもので、早来試料を等方圧密後非排水せん断した場合の有効応力経路の一例であるが、圧縮側・伸張側の応力経路が p/p_0 軸に関して対称とみることができ、ほぼ同じ応力比で限界状態に達している。仮定 2) の $q < 0$ の領域における応力経路の相似性は図—6 で確かめられる。 K_0 圧密試料の応力比が限界状態で若干小さめであるが、これは限界状態付近で供試体内で発生するひずみや間隙水圧の不均一性に起因するものと考えられる。図—7 から、 $p = p_q$ の点を結んだ直線は正規圧密線(NCL)にほぼ平行であることがわかる。これは仮定 3) を支持するものである。

③4式の ω の値と塑性指数 PI との関係について、既往のデーターによって調べたのが図—8 である。これによると、 ω の値は PI によらずほぼ一定としてよいようである(図中の番号は参考文献番号に対応する)。以上から、 $(S_u/\sigma_{vo}')_{K_0NE}$ を③4式で近似することは妥当であると考えられ、 ω の値として -0.155 を用いる。

4.2 非排水強度変化率 S_u/σ_{vo}'

図—9 は早来試料について圧密(膨張)圧力 σ_{vo}' と非排水強度 S_u の関係を示したものである。正規圧密・過圧密を問わず、等方圧密試料により K_0 圧密試料、圧縮条件より、伸張条件の方が S_u/σ_{vo}' (過圧密状態での S_u/σ_{vo}' は測定点と原点とを結んだ直線の傾きとする) は小さい。

図—10 は③3式を用いて、等方試料のデーターから K_0 試料の $(S_u/\sigma_{vo}')_{K_0NC}$ を算定したもので、 $K_0 \div 1 - \sin \phi'$ の関係を用いている。引用したデーターの物理的性質は表—3 に示す通りで、図—10 の番号と表—3 のそれとが対応している。図から③3式が $(S_u/\sigma_{vo}')_{K_0NC}$ をよく推定していることがわかる。また、伸張条件における $(S_u/\sigma_{vo}')_{K_0NE}$ を

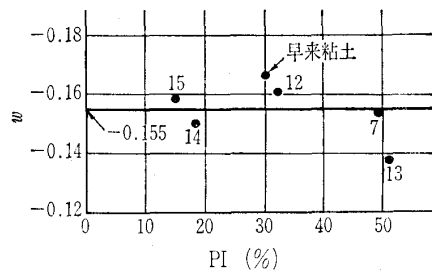
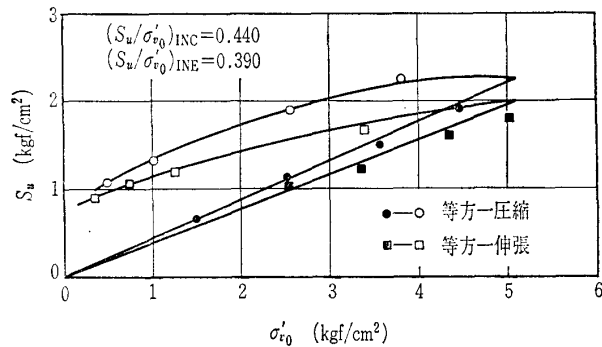
図-8 PI と w の関係

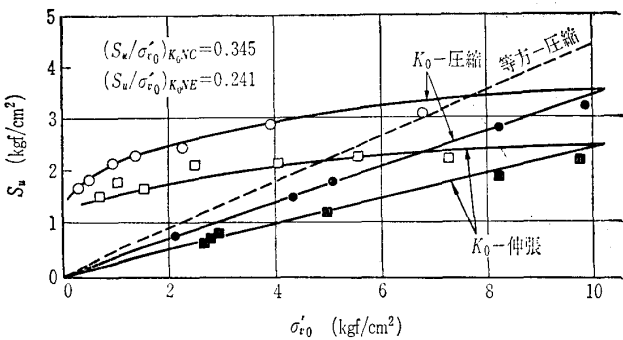
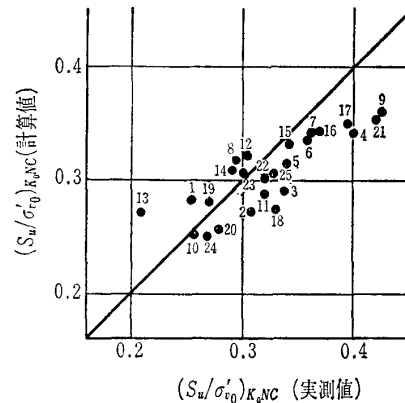
図-9(a) 等方圧密(膨張)試料の非排水強度と鉛直圧密圧力(早来粘土)

34式で計算して実測値と比較したのが図-11である。図中の番号は参考文献番号に対応する。引用データが少なく、最大で20%程度の差異はあるものの、比較的良好一致しているといえる。

4.3 過圧密粘土の S_u/σ_{v0}' の予測

以上述べて来たことから任意の OCR における S_u/σ_{v0}' を推定する方法をまとめると以下ようになる。

I. 基本式

図-9(b) K_0 圧密(膨張)試料の非排水強度と鉛直圧密圧力(早来粘土)図-10 K_0 正規圧密粘土の圧縮強度の予測値と実測値の比較

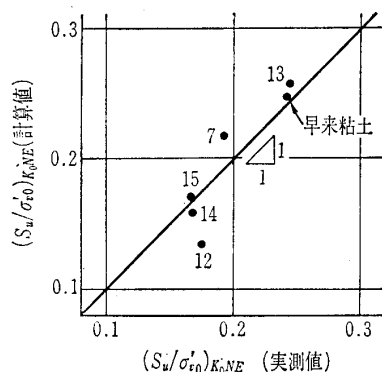
$$(S_u/\sigma_{v0}')_O = (S_u/\sigma_{v0}')_N \cdot OCR^A$$

II. 等方圧密 - 圧縮条件

$$(S_u/\sigma_{v0}')_N = (S_u/\sigma_{v0}')_{INC}$$

表-3 試料の物理的性質

No.	LL (%)	PI (%)	INC		K_0 NC			繰返し試料(R) 不かく乱(U)	文献番号
			ϕ'	S_u/σ_v'	K_0	ϕ'	S_u/σ_v'		
1	46	22	25.9	0.323	0.59	25.0	0.256	R	16
2	72	31	23.5	0.313	0.75	22.0	0.308	R	17
3	88	53	27.0	0.338	0.48	27.0	0.338	U	18
4	52	21	37.2	0.42	0.45	35.1	0.40	R	3
5	51	21	35.1	0.36	0.45	34.9	0.34	R	3
6	72	32	36.1	0.41	0.47	34.0	0.36	R	3
7	55	27	34.3	0.426	0.49	35.0	0.361	R	19
8	78	51	29.4	0.370	0.56	26.6	0.293	R	19
9	94	51	35.9	0.474	0.51	33.1	0.425	R	19
10	79	53	21.7	0.282	0.67	18.8	0.258	R	20
11	57	36	26.7	0.335	0.50	24.9	0.320	R	20
12	86	49	30.5	0.392	0.51	26.9	0.304	R	21
13	57	27	30.7	0.280	0.50	—	0.210	U	22
14	95	66	27.4	0.37	0.56	29.0	0.30	R	23
15	63	30	36.1	0.440	0.50	29.0	0.345	R	早来粘土
16	108	52	38.0	0.412	0.50	32.6	0.368	U	
17	64	30	32.3	0.456	0.46	32.3	0.394	U	1
18	33	15	27.5	0.30	0.54	26.5	0.33	R	15
19	46	24	26	0.32	0.61	26	0.27	R	15
20	63	39	24	0.28	0.54	23.5	0.28	R	15
21	80	38	37	0.45	0.52	33	0.42	U	15
22	39	18	30.5	0.35	0.47	27	0.32	U	15
23	52	29	30	0.32	0.47	26.5	0.32	U	15
24	44	18	26.0	0.26	0.55	21.4	0.268	U	14
25	86	53	27.0	0.361	0.56	26.5	0.315	R	大瀬粘土



図—11 K_0 正規圧密粘土の伸張強度の予測値と実測値の比較

$$A = -\ln\left\{\left(\frac{S_u}{\sigma'_{v0}}\right)_{\text{INC}} \cdot \frac{2}{M}\right\} / \ln 2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

III. 等方圧密 - 伸張条件

$$(S_u/\sigma'_{v0})_N = (S_u/\sigma'_{v0})_{\text{INE}}, \quad A = (14\text{式})$$

IV. K_0 圧密 - 圧縮条件

$$(S_u/\sigma'_{v0})_N = (S_u/\sigma'_{v0})_{K_0\text{NC}}$$

$$= \frac{3M}{2(3+2\eta_0)} \exp\left\{-A \ln\left(\frac{2M^2}{M^2 + \eta_0^2}\right)\right\} \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$\eta_0 = 3(1-K_0)/(1+2K_0), \quad A = (14\text{式})$$

V. K_0 圧密 - 伸張条件

$$(S_u/\sigma'_{v0})_N = (S_u/\sigma'_{v0})_{K_0\text{NE}}$$

$$= \frac{3}{3+2\eta_0} \left(\frac{S_u}{\sigma'_{v0}}\right)_{\text{INC}} \cdot e^{\omega} \quad \dots\dots\dots (34)$$

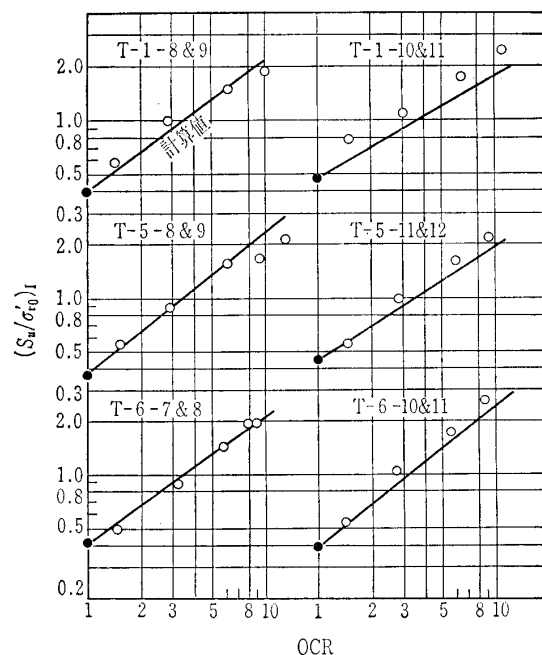
$$\omega = -0.155, \quad A = (14\text{式})$$

$(S_u/\sigma'_{v0})_{\text{INC}}, (S_u/\sigma'_{v0})_{\text{INE}}, M$ は等方圧密非排水圧縮 (伸張) 試験から得られ, II, III のケースに用いられる。ケースIV, V の場合の η_0 には, K_0 の実測値を用いるかまたは, $K_0 \div 1 - \sin \phi'$ とすればよい。

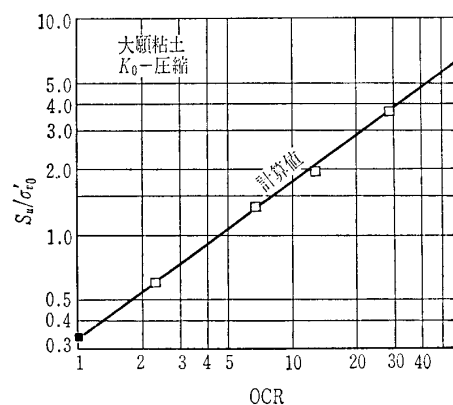
図—12~14は以上の手法で予測した $(S_u/\sigma'_{v0})_o$ と本実験から得られた実測値との比較を示したものである。不かく乱の苦小牧試料も含めて予測値と実測値とのよい一致がみられる。また, 図—15~17は既往の文献の中から $K_0\text{OC}$ および $K_0\text{OE}$ に相当する実験データを選び, S_u/σ'_{v0} の値を読みとって $\log S_u/\sigma'_{v0} - \log \text{OCR}$ の形に整理したものである。不かく乱試料の場合 (図—15), 予測値と実測値との差が大きいが, 全体として実測値の傾向をよく表している。

5. おわりに

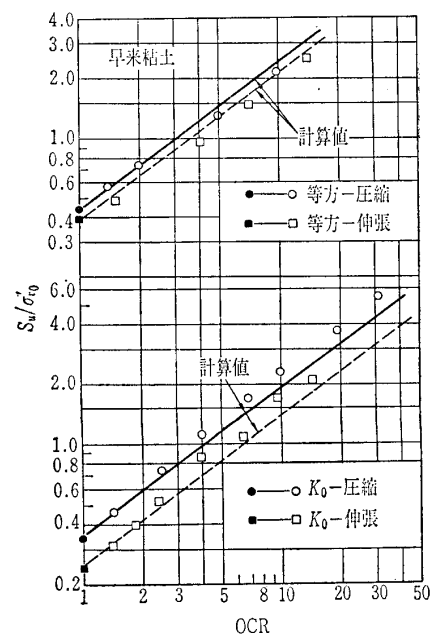
本研究は北郷 繁北大名誉教授 (北海学園大学教授) の御指導の下に, 昭和57年度北大工学部卒業生市川喜久男 (神奈川県庁), 芳岡良一 (清水建設), 同58年度小林利通 (守谷商会), 中嶋 徹 (北大大学院), 同59年度荒牧隆一 (大成建設), 池田 清 (北海道開発局) の諸君の卒業研究として行われた実験結果の一部をとりまとめたもので, 実験に



図—12 $S_u/\sigma'_{v0} \sim \text{OCR}$ 関係 (不かく乱苦小牧粘土)



図—13 $S_u/\sigma'_{v0} \sim \text{OCR}$ 関係 (大願粘土)



図—14 $S_u/\sigma'_{v0} \sim \text{OCR}$ 関係 (早来粘土)

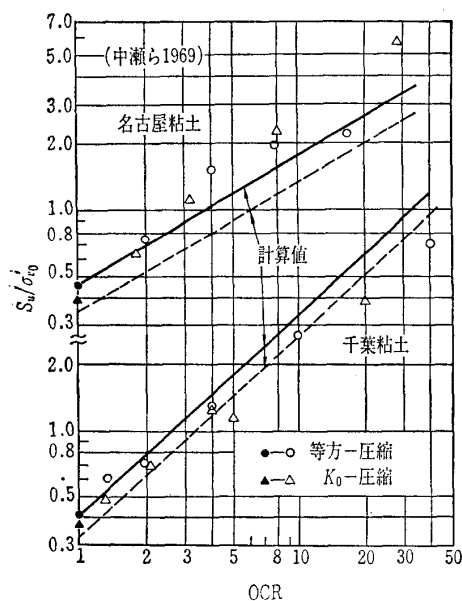


図-15 $S_u/\sigma'_{v0} \sim OCR$ 関係 (中瀬ら, 1969のデータによる)

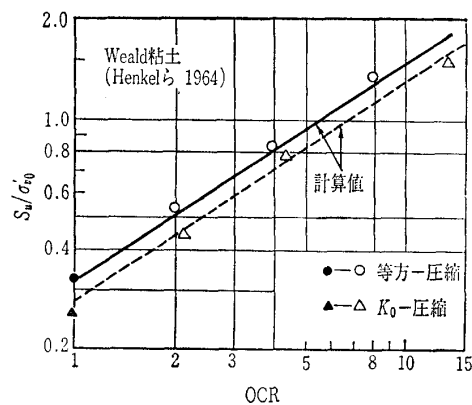


図-16 $S_u/\sigma'_{v0} \sim OCR$ 関係 (Henkelら, 1964のデータによる)

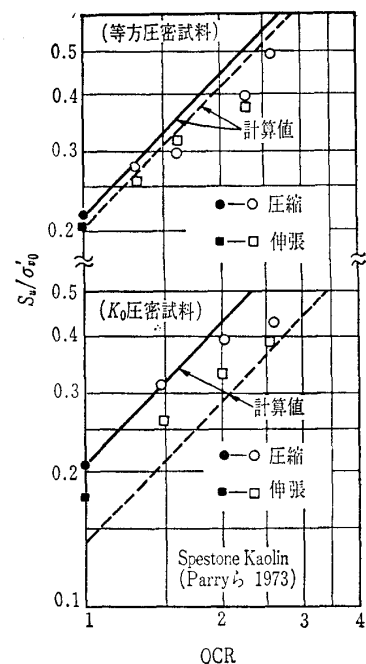


図-17 $S_u/\sigma'_{v0} \sim OCR$ 関係 (Parryら, 1973のデータによる)

あたって北大工学部工藤豊技官の協力を得た。また、不かく乱試料の採取にあたっては、北海道開発局苫小牧港湾建設事務所ならびに北海道土質コンサルタント(株)の御協力を戴いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中瀬明男・小林正樹・勝野 克：圧密および膨張による飽和粘土のせん断強度の変化，港湾技術研究所報告，第8巻，第4号，pp. 103~141，1969。
- 2) 三田地・北郷・川島・武田：圧密・膨張による飽和粘土の非排水強度特性について，土質工学会北海道支部技術報告資料，第15号，pp. 33~42，1975。
- 3) Mitachi, T. and Kitago, S.: Change in Undrained Shear Strength Characteristics of Saturated Remolded Clay due to Swelling, Soils and Foundations, Vol. 16, No. 1, pp. 45~58, 1976。
- 4) Ladd, C.C. and Foott, R.: New Design Procedure for Stability of Soft Clays, Proc., ASCE, Vol. 100, GT7, pp. 763~786, 1974。
- 5) Mayne, P.W.: Cam-Clay Predictions of Undrained Strength, Proc., ASCE, Vol. 106, GT11, pp. 1219~1242, 1980。
- 6) Roscoe, K.H., Schofield, A.H. and Thurairajah, A.: Yielding of Clays in States Wetter than Critical, Geotechnique, Vol. 13, No. 3, pp. 211~240, 1963。
- 7) Mitachi, T. and Kitago, S.: The Influence of Stress History and Stress System on the Stress-Strain-Strength Properties of Saturated Clay, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 2, pp. 45~61, 1979。
- 8) Roscoe, K.H. and Burland, J.B.: On the Generalized Stress-Strain Behavior of Wet Clay, Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press, pp. 535~609, 1968。
- 9) Mitachi, T. and Kitago, S.: Undrained Triaxial and Plane Strain Behavior of Saturated Remolded Clay, Soils and Foundations, Vol. 20, No. 1, pp. 13~28, 1980。
- 10) 北郷 繁・三田地利之・小野 丘：不攪乱粘性土の圧密非排水せん断特性，土質工学会北海道支部技術報告集，第22号，pp. 117~124，1982。
- 11) 北郷・三田地・池浦・下越・趙：各種応力経路下における異方圧密粘土の変形特性について，土質工学会北海道支部技術報告集，第23号，pp. 129~136，1983。
- 12) Parry, R.H.G. and Nadarajah, V.: Observations on Laboratory Prepared, Lightly Overconsolidated Specimens of Kaolin, Geotechnique, Vol. 24, No. 3, pp. 345~358, 1973。
- 13) 大木晴雄・亀井健史・中瀬明男：飽和粘性土の非排水せん断強度，第18回土質工学研究発表会講演集，pp. 413~414，1983。
- 14) Vaid, Y.P. and Campanella, R.G.: Triaxial and Plane Strain Behaviour of Natural Clay, Proc., ASCE, Vol. 100, GT3, pp. 207~224, 1974。
- 15) Ladd, C.C.: Stress Strain Behaviour of Anisotropically Consolidated Clays during Undrained Shear, Proc., 6th ICSMFE, Vol. 1, pp. 282~286, 1965。
- 16) Henkel, D.J. and Sowa, V.A.: The Influence of Stress History on Stress Paths in Undrained Triaxial Tests on Clay, Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM, STP, No. 361, pp. 280~291, 1963。
- 17) Amerasinghe, S.F. and Parry, R.H.: Anisotropy in Heavily Overconsolidated Kaolin, Proc., ASCE Vol. 101, No. GT12, pp. 1277~1293, 1975。
- 18) Crooks, J.H. and Graham, J.: Geotechnical Properties of the Belfast Estuarine Deposits, Geotechnique, Vol. 26, No. 2, pp. 293~315, 1976。
- 19) 佐野・北郷・三田地・高橋・橋本：粘性土の強度特性におよぼす応力履歴の影響，土質工学会北海道支部技術報告資料，第16号，pp. 23~32，1976。
- 20) Donaghe, R.T. and Townsend, F.C.: Effects of Anisotropic versus Isotropic Consolidation in Consolidated-Undrained Compression Tests of Cohesive Soils, Geotechnical Testing Journal Vol. 1, No. 4, pp. 173~189, 1978。
- 21) 北郷・三田地・武田・近藤：飽和粘性土の強度特性におよぼす応力系・応力履歴の影響，土質工学会北海道支部技術報告資料，第18号，pp. 31~38，1978。
- 22) Andersen, K.H., Pool, J.H., Brown, S.F. and Rosenbrand, W.F.: Cyclic and Static Laboratory Tests on Drammen Clay, Proc., ASCE, Vol. 106, GT5, pp. 499~530, 1980。
- 23) 北郷繁・三田地利之・浅見秀樹：異方圧密粘性土のせん断特性，第16回土質工学研究発表会講演集，pp. 349~352，1981。

(原稿受理 1984.12.3)