

応力誘導異方性を有する正規圧密粘土の非排水せん断特性

(Undrained Shear Characteristics of Normally Consolidated)
Clays with Stress Induced Anisotropy原 久 夫¹⁾ (Hisao Hara)上 原 方 成¹¹⁾ (Hōsei Uehara)キーワード：圧密非排水せん断／異方性／応力経路
／応力-ひずみ曲線／せん断強さ／粘土(IGC: D 6)

1. ま え が き

粘土や砂の異方性挙動に関する研究は、Roscoe らによる限界状態理論、Roweのストレス-ダイレイタンスモデルにはじまり、これら構成式を修正、拡張するというかたちで行われてきた。

砂質土に対しては、松岡ら¹⁾や落合ら²⁾が初期構造異方性を有する土の構成式を導いている。粘性土についても、初期構造異方性、応力誘導異方性に関する実験や、それに基づく構成式の研究が行われている。

異方性とは、ある特性値が等方的でなく方向によって異なることをいい、異方性を特徴付ける要因はその方向と大きさである。また異方性はその原因によって、固有異方性と誘導異方性とに分けられる。誘導異方性は、本来等方性であるものが重力加速度等のいろいろな原因によって見かけ上異方性挙動を示すことをいう。その原因が異方応力状態にあるとき、それを応力誘導異方性と呼ぶが、正規圧密粘土の場合特に顕著な応力誘導異方性を示す。固有異方性は、一般的性質として始めから備えている異方性である。金谷³⁾、矢富ら⁴⁾、太田ら⁵⁾は固有異方性と誘導異方性の違いを数学的に表し、粘性土の異方性挙動の多くは、応力誘導異方性によること、土の力学的特性値 c' , ϕ' 等は等方性であることを示した。

実験室において、攪乱再圧密法で準備された粘土供試体の異方圧密非排水せん断試験を行う場合について異方性の立場から状態説明を行うと次のようになる。

① 加水して攪乱、練返し直後は等方的。

② K_0 圧密終了後は、応力誘導異方性が存在する。なお自然地盤からの乱さない試料の場合には、この応力誘導異方性も土の堆積過程での初期構造異方性あるいは「固有異方性」と称することがある。ここでの「固有異

方性」は前述の固有異方性と異なるので注意が必要である。

③ いったん圧密箱から取り出された供試体は、過圧密状態であり、その後三軸セル室内で異方圧密される。②で受けた応力以上の圧密圧力で異方圧密されることによって正規異方圧密状態となるが、②の応力誘導異方性の影響を消すには先行圧密圧力の3倍以上の圧密圧力が必要⁶⁾とされている。

土の異方性に関する研究は上記ふたつのタイプの異方性によって区別できる。

初期構造異方性を扱った研究は砂質土に多い。Green et al.⁷⁾ は初期構造異方性をもつ砂供試体を使い、真の三軸試験機で σ_1 の方向を変化させた実験を行っている。山田ら⁸⁾ は、初期構造異方性を持つ立方体の堆積試料の σ_m 一定三主応力制御試験を行い、変形、強度特性の異方性について調べている。小田ら⁹⁾ は、砂の平面ひずみ試験を行い、固有異方性と変形挙動との関係を調べた。松岡ら¹⁰⁾ は、堆積異方構造試料を回転させ、異方性の方向と負荷応力の主方向との角度を変化させた実験結果から、SMP モデル（等方性モデル）を初期構造異方性土にも適用できる構成式を導いた。落合ら²⁾ は、堆積による初期構造異方性の主軸と主応力軸とのなす角度を変えた実験から、応力-ひずみ関係は、初期構造異方性の影響を受けることを明らかにしている。

応力誘導異方性を扱った研究は粘性土に多い。これは粘性土の場合自然地盤が K_0 圧密されている場合が多く、乱さない状態で採取された試料は、既に K_0 状態を保つ異方圧密応力履歴を有しているからである。この時、Wong et al.¹¹⁾、鬼塚ら¹²⁾、三笠ら¹³⁾ のように現地盤が既に有している応力誘導異方性を「固有異方性」として扱う場合が多い。

Wong は、鋭敏な東カナダ粘土が降伏時、破壊時に固有異方性を有することを確かめた。鬼塚らは、有明粘土の固有異方性が土の変形特性、応力-ひずみ関係、ダイレイタンスに及ぼす影響に関する実験を行っている。三笠らは、一次元圧密粘土と自然堆積粘土の強度と変形の異方性を一面せん断試験によって調べ、自然堆積粘土

i) 琉球大学工学部土木工学科 助手 (沖縄県中頭郡西原町字千原1)

ii) 琉球大学工学部土木工学科 教授
(1986, 10.8 原稿受付・討議期限 1989, 1.1, 要請があれば1か月の
期限延長可能)

は aging とその間に受けた地盤変動などの要因による三次元異方性を示すと報告している。中瀬ら^{14),15)}は、粒度調整して塑性指数を変えた粘性土の三軸試験を行い、異方性挙動は塑性指数が低下するほど顕著になることを明らかにした。

三田地ら¹⁶⁾、池浦ら¹⁷⁾は、同一の異方性圧密応力経路で圧密された異方圧密粘土に対して、その後の排水せん断応力経路に着目した実験を行い、応力経路が変形特性に及ぼす影響について考察している。その結果、排水せん断における応力へひずみ関係への影響因子として、異方圧密経路と排水せん断経路とのなす角度の重要性を指摘している。大槓¹⁹⁾は、応力履歴の異なる正規異方圧密粘土について、同一経路の応力比一定異方圧密試験を行い、異方圧密期間中の変形はそれ以前の圧密応力履歴の影響を受けることを実験的に確かめた。

これらの応力誘導異方性をもつ粘性土に関する研究は、 K_0 圧密粘土、等方圧密粘土を中心に行われており、応力誘導異方性の程度が、非排水せん断特性に与える影響を系統的に調べた例は少ない。これらのことを背景に本研究は、応力誘導異方性の程度が異なる正規異方圧密粘土の非排水三軸圧縮試験結果について考察したものである。

2. 実験方法

2.1 供試体作製

実験に用いた粘土試料は福山粘土、広島粘土、島尻粘土の三種類である。各粘土は液性限界の2倍以上の含水比で十分に練り返したあと、15cm モールド内で K_0 圧密する。鉛直圧密圧力は 49kPa、圧密期間は 20 日である。圧密完了後粘土塊を取り出し直径 5cm、高さ 10cm の円柱供試体を作製する。

各粘土の物理試験、標準圧密試験並びに等方圧密非排水三軸圧縮試験 (CIU 試験) により得られた結果を表-1 に示す。

2.2 異方圧密非排水三軸圧縮試験

この実験での異方圧密過程における応力経路は、平均

表-1 福山粘土、広島粘土、島尻粘土の物理試験結果および弾塑性パラメータ

粘 土	福山粘土	広島粘土	島尻粘土
G_s	2.68	2.59	2.78
L. L (%)	33	68	60
P. L (%)	29	38	32
IP	54	30	28
粘土分%	49	20	52
シルト分%	48	75	41
砂 分%	3	5	7
M	1.28	1.48	1.15
N	2.14	2.18	2.93
λ	0.261	0.187	0.170
κ	0.037	0.017	0.026

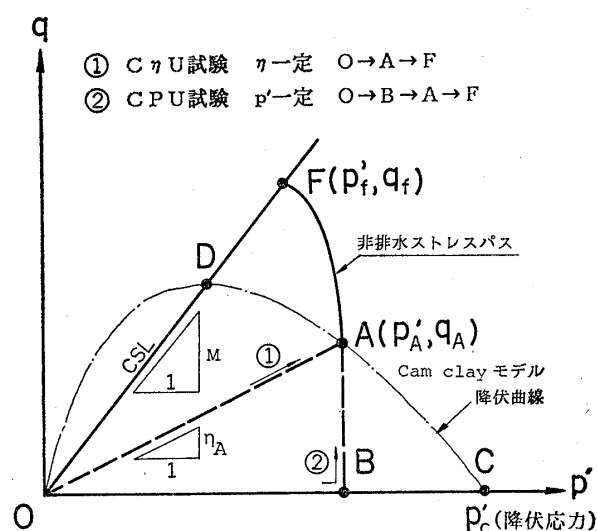


図-1 CηU, CPU 試験の異方圧密応力経路

有効応力 p' が一定の経路と応力比 η が一定の経路の二タイプである。前者を CPU 試験、後者を CηU 試験と呼ぶ。 p' および η は次式で与えられる。

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3}, \quad q = \sigma'_1 - \sigma'_3, \quad \eta = \frac{q}{p'} \quad (1)$$

ここに、 σ'_1 : 軸方向有効応力

σ'_3 : 半径方向有効応力 である。

図-1 は、両試験の応力経路を模式的に描いたものである。CPU 試験では $O \rightarrow B$ と等方圧密された後、 p' 一定排水三軸圧縮によって A に至り、 $A \rightarrow F$ の非排水ストレスパスをたどって限界状態に達する。CηU 試験では、 $O \rightarrow A$ と応力比一定条件で異方圧密され、 $A \rightarrow F$ の非排水ストレスパスをたどる。異方圧密終了後の非排水せん断試験は、すべて $\epsilon_1 \approx 0.1\%/min$ のひずみ制御方式で行った。

異方圧密の終了点 $A(p'_A, q_A)$ は所定の η でかつ Cam clay モデルによる降伏曲線 (圧密降伏応力 p'_c) の上に乗るように設定した。

応力誘導異方性の程度を表現するパラメータとして η_A/M を用い、実験では各粘土について $\eta_A/M \approx 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ とした。ただし、 M は図-1 における限界状態線の勾配である。 $\eta_A/M = 0$ は等方圧密状態であり、1 に近いほど応力誘導異方性が高くなり限界状態に近いことを示す。

異方圧密期間は、CPU 試験の OB 、 BA 間が各一日、CηU 試験の OA 間が一日である。 BA 、 OA 間の異方圧密は段階荷重方式によって行った。圧密応力の大きさを表すパラメータとして図-1 の圧密降伏応力 p'_c を用いた。CηU 試験は $p'_c = 98, 196, 294 \text{ kPa}$ の 3 シリーズ、CPU 試験では $p'_c = 196 \text{ kPa}$ について行った。

CPU 試験における BA 間の荷重区分の一例を表-2 に示す。各段階での荷重時間は 15~30 分であるが、間隙

表-2 CPU 試験の q の分割方法

η/M	分割方法	段階数
0.2	1/4×4	4
0.4	1/4×2+1/8×4	6
0.6	1/6×2+1/12×8	10
0.8	1/4×2+1/16×4+1/32×8	14

水圧の計測値がバックプレッシャーと等しくなることを確認した後、次の载荷段階へ進んだ。最終応力点Aまで達したらその荷重のまま一日間放置して圧密の完了を待った。

C η U 試験におけるOA間の異方圧密も段階载荷方式によった。 $\eta_A/M \div 0.2, 0.4, 0.6$ の場合には载荷段階数は4段階であり、各载荷時には更に前半部と後半部に分けて载荷した。前半部では所定の拘束圧と偏差応力の1/3を付加し、後半部で残り2/3の偏差応力を付加した。 $\eta_A/M \div 0.8$ の場合には経路が限界状態に近いので、上記の载荷区分を更に細分して8段階とした。一段あたりの载荷時間は30～60分であり、間隙水圧の消散を確認してから次の载荷段階へ進んだ。CPU試験と同様に最終応力点Aまで達したらそのまま一日間放置した。

表-3 に実験条件を示す。

3. 結果と考察

ここでは、島尻粘土に関する結果を中心に述べるが、福山粘土、広島粘土についても島尻粘土の場合と同じ結果が得られている^{18),19)}。

3.1 異方圧密過程における変形特性

図-2 はCPU試験、C η U試験での異方圧密期間中におけるひずみ経路を示している。

横軸は体積ひずみ v 、縦軸はせん断ひずみ γ であり、 v, γ は(2)式で定められるひずみである。

表-3 試験条件一覧表 (島尻粘土)

NO	圧密経路	p'_c (kPa)	η_A/M
IN 40	等方	100	0
EN 41	η -一定	97	0.20
EN 42	"	97	0.40
EN 43	"	98	0.61
EN 44	"	98	0.81
IN 50	等方	197	0
EN 51	η -一定	195	0.19
EN 52	"	198	0.39
EN 53	"	191	0.57
EN 54	"	189	0.76
PN 51	p -一定	195	0.19
PN 52	"	192	0.38
PN 53	"	190	0.57
PN 54	"	187	0.75
IN 70	等方	293	0
EN 71	η -一定	292	0.20
EN 72	"	292	0.41
EN 73	"	292	0.60
EN 74	"	293	0.81

$$v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3, \quad \gamma = (2/3)(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \quad (2)$$

ここに、 ε_1 : 軸方向ひずみ ε_3 : 半径方向ひずみである。

図中の矢印はCPU試験の等方圧密の終了点Bに対応している。原点からこの点までの変形は等方圧密期間中に生じた変形であるが、わずかにせん断変形が生じていることが分かる。これは、供試体が K_0 圧密されて作製されたことに起因する応力誘導異方性(前述③)によって径ひずみが卓越しているためである。

図-3 は異方圧密経路の差異によるせん断ひずみ、体積ひずみを比較したものである。各ひずみは所定の η_A/M での圧密が終了した時点(応力点A)での値である。図に示すように、せん断ひずみは異方圧密応力経路に依存し、限界状態に近い経路を通るC η U試験の場合のほうが、CPU試験の場合より大きなせん断ひずみが生じている。一方体積ひずみは、両試験での差がないことから非応力経路依存性であることが分かる。したがって体積ひずみは、応力変化の始点と終点の関数となることから、圧密変形時の (p', q, f) 空間における状態曲面の唯一性が確かめられる。ただし、 f は比体積である。

せん断ひずみが応力経路依存性であることから、C η U試験とCPU試験は、異方圧密応力経路が異なっていると同時にせん断ひずみ経路の異なる供試体に対する非排水せん断試験でもあることに注意すべきである。例えば、 $\eta_A/M = 0.8$ の場合、応力変化の始点と終点は同一であっても、応力比一定経路で圧密された供試体では、圧密終了後のせん断ひずみが $\gamma \div 11\%$ であるのに対し、平均有効応力一定経路の供試体では $\gamma \div 5\%$ であり、約1/2のせん断ひずみしか生じていない。つまり両供試体は、非排水せん断開始前の初期せん断ひずみ量に大きな

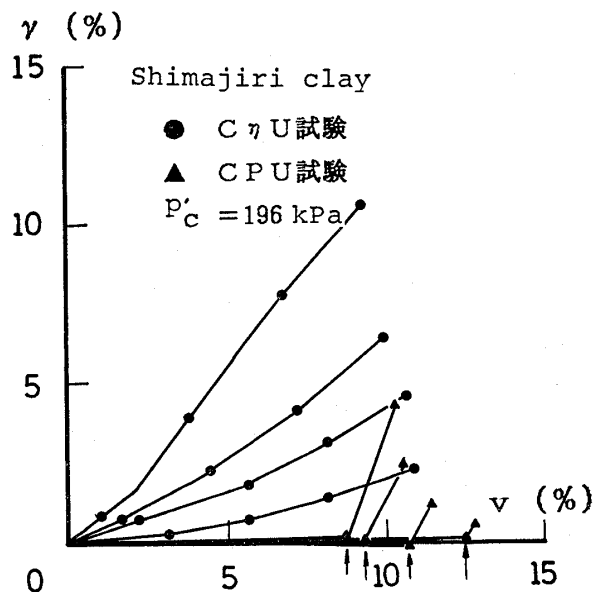
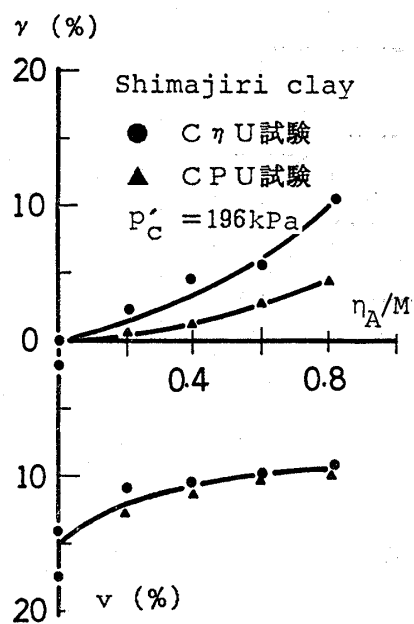
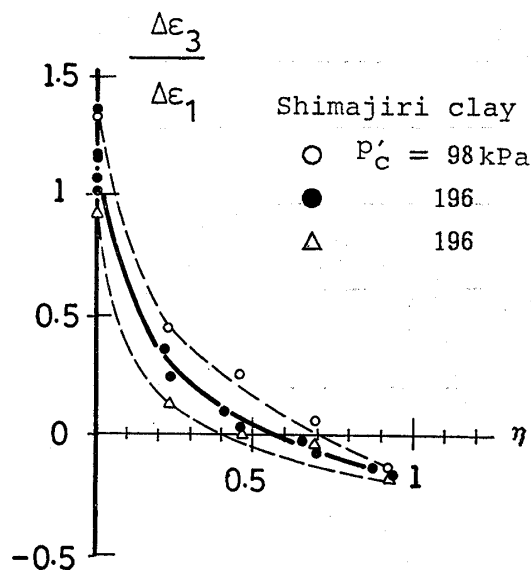


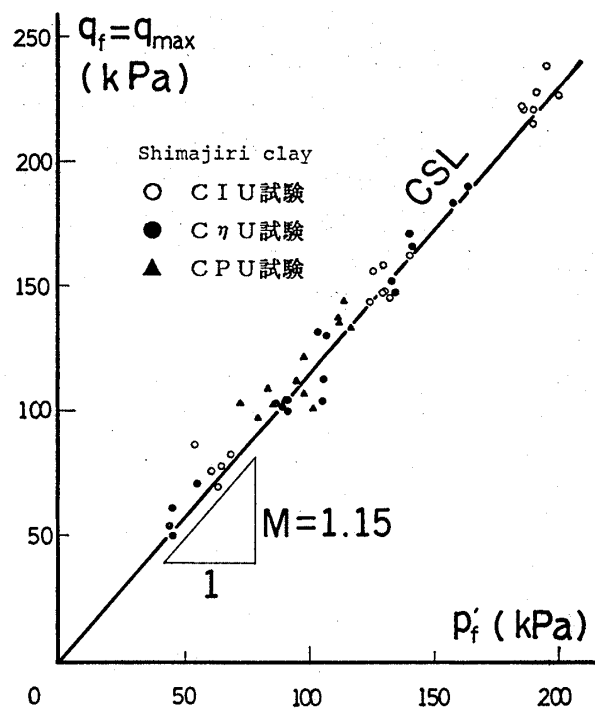
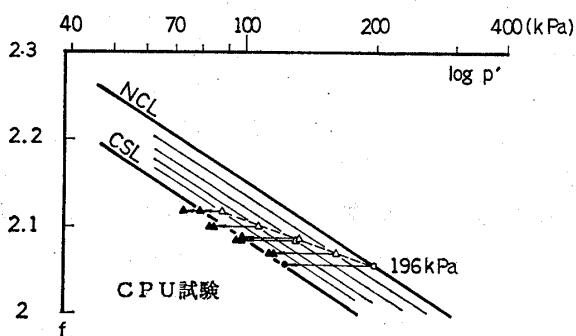
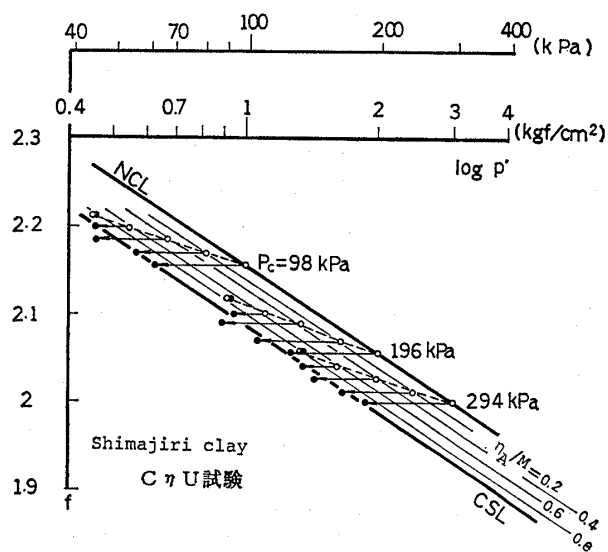
図-2 異方圧密過程のひずみ経路

図-3 異方圧密終了時点の γ, v と η_A/M の関係図-4 異方圧密過程における $\Delta\epsilon_3/\Delta\epsilon_1 \sim \eta$ 関係 CηU 試験表-4 K_0 値の実験値とモデル計算値との比較

粘 土	実 験 値	Cam K_0	Mod K_0
福山粘土	0.60	1.258	0.698
広島粘土	0.50	1.020	0.665
島尻粘土	0.56	1.457	0.720

違いのある供試体といえる。

図-4 は CηU 試験での異方圧密期間中における応力比 η と図-2 のひずみ経路の勾配から求めた $\Delta\epsilon_3/\Delta\epsilon_1$ との関係プロットしたものである。この関係から正規圧密状態での K_0 値を求めることができる。そのようにして求められた K_0 値と Cam clay, 修正 Cam clay モデルから計算される K_0 を表-4 に示した。修正 Cam clay モデルは比較的实验値に近い値を示すが, Cam clay モデルは実験値の 2 倍以上の値となり現実的にも認めがた

図-5 $p'_f \sim q_f$ 関係図-6 $f \sim \log p'$ 関係

い値となっている。この原因は、各モデルで仮定されている塑性ひずみ増分比と応力比との関係が実際と合致していないためである。またこの図から分かるように、 $\Delta\epsilon_3/\Delta\epsilon_1$ は横軸付近での勾配が小さいため K_0 値の確定は困難である。逆に言えば、わずかな側方ひずみによって応力比は大きく変化することを示しており、応力制御方式による正確な K_0 試験の困難さがうかがえる。

3.2 異方圧密非排水せん断特性

a. 限界状態

図-5, 6 は非排水三軸圧縮試験における破壊時の平均有効応力 p'_f , 偏差応力 q_f , 比体積 f の関係をプロットしたものである。ただし破壊については、偏差応力が最大となる点をもって破壊点と定義した。

図-5 は $q_f \sim p'_f$ 関係, 図-6 は $f \sim \log p'_f$ 関係である。

図-5 に示すように $p' \sim q$ 平面上に破壊時の応力をプロットすると、それらの点は原点を通る直線上に乗り、従来よりいわれているように (3) 式の関係が成立する。

$$q_f = M p'_f \quad (3)$$

図-5 には CIU, $C \eta U$, CPU 試験結果のすべてがプロットされており (3) 式の勾配 M は、異方圧密応力経路, p'_c の大きさによらない定数であることが分かる。

図-6 における比体積の値は、個々の供試体について、平均値からの偏差を補正した値を使っている。この図に見るように、限界状態線を含む応力比一定異方圧密線は、正規等方圧密線と平行になっている。 $\eta_A/M=0.8$ の場合に異方圧密終了時とほぼ同じ平均有効応力で破壊していることを除いて得られる限界状態線は、異方圧密応力経路, p'_c の大きさによらず、(4) 式によって表される (図-7 参照)。

$$f = \Gamma - \lambda \ln(p') \quad (4)$$

$(p' : \text{kPa})$

これらの関係から (p', q, f) 空間内における限界状態線は、異方圧密応力経路, p'_c の大きさに影響されず一本の曲線となることが分かる。

図-7 は、正規等方圧密線、限界状態線等の幾何学的関係を示す模式図である。これらの関係と、異方圧密の終了点 A が Cam clay モデルの降伏曲線状にあることから、 p'_f/p'_A と η_A/M の関係を求めると

$$\ln(p'_f/p'_A) = (1 - x/\lambda)(\eta_A/M - 1) \quad (5)$$

となる。

更に (5) 式より、異方圧密粘土の非排水せん断破壊までの偏差応力の増分 $q_f - q_A$, 破壊時の間隙水圧 Δu_f , 間隙水圧係数 A_f を求めると次のようになる。

$$(q_f - q_A)/p'_A = M(p'_A/p'_f - \eta_A/M) \quad (6)$$

$$\Delta u_f/p'_A = 1 - p'_A/p'_f + M(p'_A/p'_f - \eta_A/M)/3 \quad (7)$$

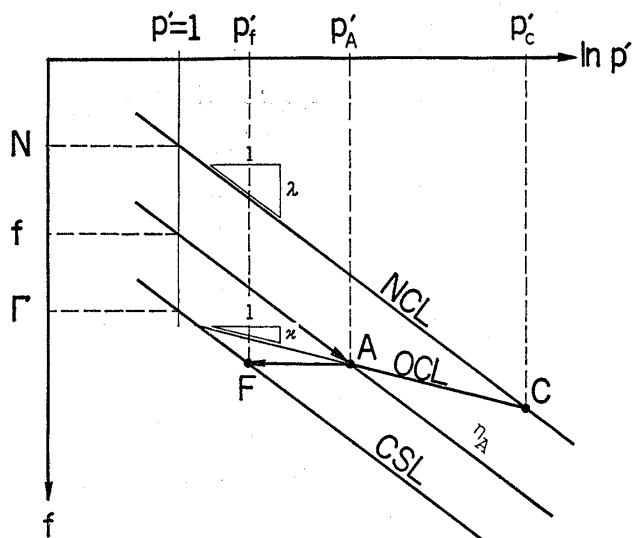


図-7 NCL, CSL, OCL, η_A 一定線の関係

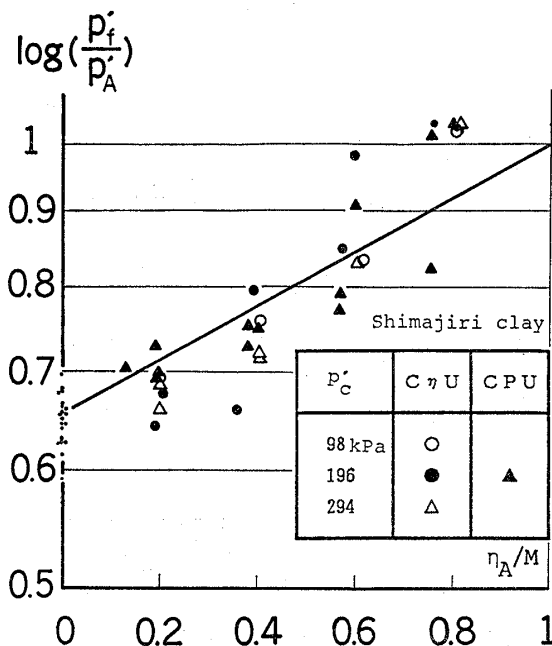


図-8 $\log(p'_f/p'_A) \sim \eta_A$ 関係

$$A_f = 1/3 + (1 - p'_A/p'_f) / \{M(p'_A/p'_f - \eta_A/M)\} \quad (8)$$

異方圧密粘土について (5) 式の関係が成立することを利用すれば、従来から一般的に行われている CIU 試験の結果だけから、正規異方圧密粘土の非排水強度の推定が可能となる。(5) 式は $\eta_A/M=1$ のとき $p'_f/p'_A=1$ を通る直線であるから CIU 試験での p'_f/p'_A が与えられれば直線が決まり、任意の応力比を持つ異方圧密粘土の p'_f/p'_A を求めることができる。更に (6), (7), (8) 式の関係から非排水強度、間隙水圧等も容易に計算できる。これらの諸量は先に述べたように、異方圧密の応力経路や p'_c の大きさに依存しないので、実際問題への適用する際には現地盤の応力比を求めるだけでよく、非常に便利な関係式である。

(5) 式は既に Schofield et al.²¹⁾ が示しており、三

田地ら²²⁾, 太田ら⁵⁾ によってその妥当性が確認されている。ただしこれらの例は異方圧密粘土としては K_0 圧密粘土がほとんどであり, 等方圧密に近い状態から限界状態付近までの広い範囲に渡る応力比での異方圧密粘土についてこの式の妥当性を検討した例は少ない。これを検討するため図-8 に, $\ln(p'_f/p'_A)$ と η_A/M との関係プロットした。図中の直線は CIU 試験からの推定を念頭に等方圧密粘土での p'_f/p'_A 値の平均値と限界状態点 ($\eta_A/M=1$, $p'_f/p'_A=1$) を結んで得たものである。実験値はこのまわりに分布するが応力誘導異方性が高い所で直線からの隔たりが大きくなっていることが分かる。特に $\eta_A/M=0.8$ の場合 p'_f/p'_A 値はほぼ 1 となっており, これは非排水ストレスパスがほぼ鉛直に立ち上がりそのまま限界状態に至るためである。従って $\eta_A/M=0.6$ 程度までは従来どおり (5) 式を適用できるものの, それ以上の異方圧密応力比には, (5) 式は適用できない。

またこの直線の勾配 $(1-\kappa/\lambda)$ は 0.431 であることから $\kappa/\lambda=0.569$ となり, この値は圧密試験によって得られる値の約 3.7 倍である。このことは, 圧密試験から得られる $(1-\kappa/\lambda)$ 値に対して, 非排水せん断試験から得られる $(1-\kappa/\lambda)$ 値のほうはそれより小さくなる²³⁾ という一般的傾向と一致している。図-9, 図-10 は偏差応力の増分 $(q_f - q_A)/p'_A$, 間隙水圧係数 A_f と η_A/M との関係を示している。図中の曲線は非排水せん断試験から得られる $(1-\kappa/\lambda)$ 値を使って, (6), (8) 式によって計算されたものであり, 実験値と良く一致していることが分かる。圧密試験から得られる $(1-\kappa/\lambda)$ 値と非排水せん断試験から得られる $(1-\kappa/\lambda)$ 値との違いが大きいため, 非排水せん断時における偏差応力, 間隙水圧等を計算する場合の κ/λ 値として単純に圧密試験によって

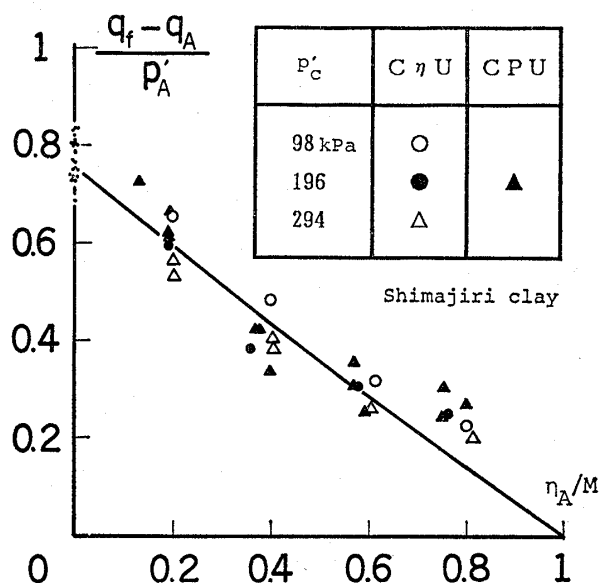


図-9 $\frac{q_f - q_A}{p'_A} \sim \frac{\eta_A}{M}$ 関係図

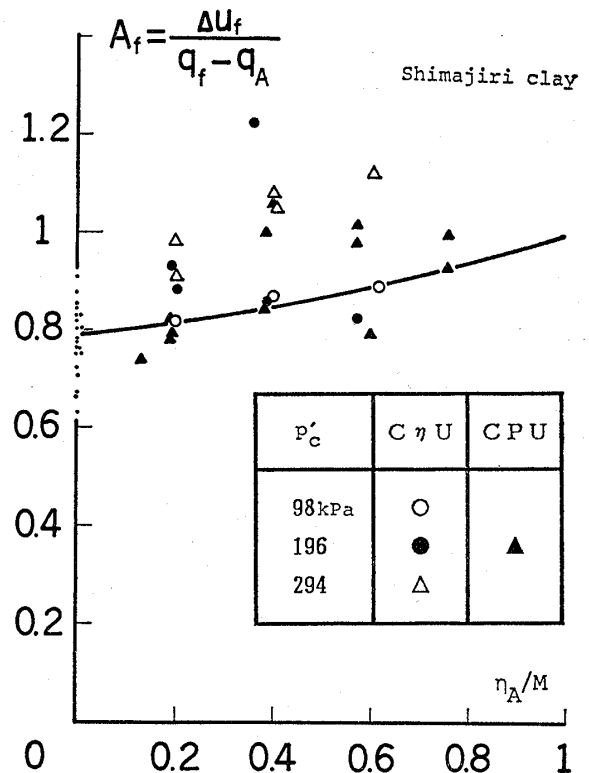


図-10 $A_f \sim \eta_A/M$ 関係

得られる C_s/C_c 値を使うことはできないようである。

b. 非排水せん断特性

図-11 に異方圧密粘土の非排水ストレスパスを示す。この非排水ストレスパスは, 平均有効応力, 偏差応力を p'_c で無次元化してある。図には $p'_c=294$ kPa の $C \eta U$ 試験を実線で, $p'_c=196$ kPa の CPU 試験を破線で示してある。非排水せん断の初期では弾性的挙動が卓越し, 非排水ストレスパスが p 軸に垂直に立ち上がる傾向を示すが, この性状は応力誘導異方性の高い場合も変わりがなく, $\eta_A/M=0.8$ 程度になるとほぼ一直線に CSL まで立ち上がりその後, CSL に添う軟化挙動を示す。しかしこの立ち上がりは, ひずみ速度を更に遅くした場合には緩やかになっていくものと考えられる。

また同図に示すように, 非排水ストレスパス全体の形状は, 応力誘導異方性の程度によって変わっている。等方圧密粘土の場合, 非排水ストレスパス形状は扇型に近い形状であるのに対し, η_A/M が大きくなるにつれて初期の立ち上がりの影響が強くなり, いびつな扇型となっていく。更に異方圧密粘土の非排水ストレスパス形状は, 等方圧密粘土の非排水ストレスパスと相似な曲線の一部とはなっていないことも分かる。したがって, 前述したようにこの挙動が応力誘導異方性の高い場合に, 非排水せん断強度推定式の適用できないことよりどころとなっている。

また図より η_A/M が同じであれば, 無次元化非排水

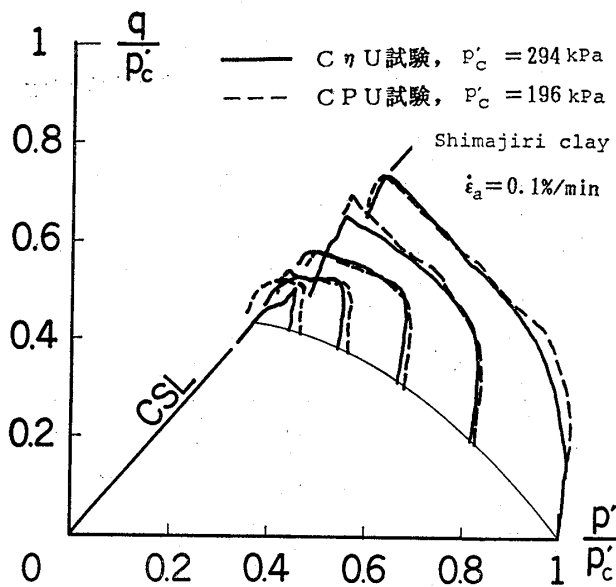


図-11 非排水ストレスパス

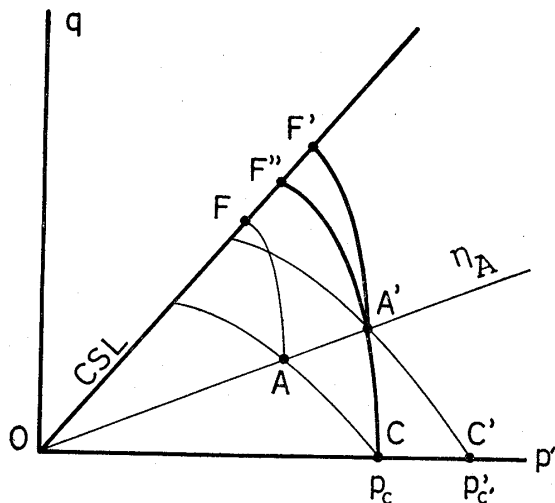


図-12 非排水ストレスパス

ストレスパスの形状は、異方圧密の応力経路、 p'_c の大きさによらず同じ形となること、更に異方圧密の終了時、すなわち非排水せん断の開始時点における応力比 η_A/M に依存することが明らかである。

しかしこの非排水ストレスパス形状が、 η_A/M の値だけに依存しているのかどうかは定かでない。仮に非排水ストレスパスが η_A/M にのみによって決まると仮定して、図-12 に示すような CIU 試験によって得られた非排水ストレスパス (CA'F') 上の点 A' にある異方圧密粘土の非排水ストレスパスを考えてみる。

非排水せん断によって CA' の経路で A' 点まできた供試体の A' 点以後の非排水ストレスパスは言うまでもなく A'F' である。一方 η_A 一定の異方圧密経路で A' 点に来た場合の非排水ストレスパスは、図-11 の結果から類推して、曲線 AF を p'_c/p'_c 倍した A'F' となり、A'F' とは異なった非排水ストレスパスになると予想さ

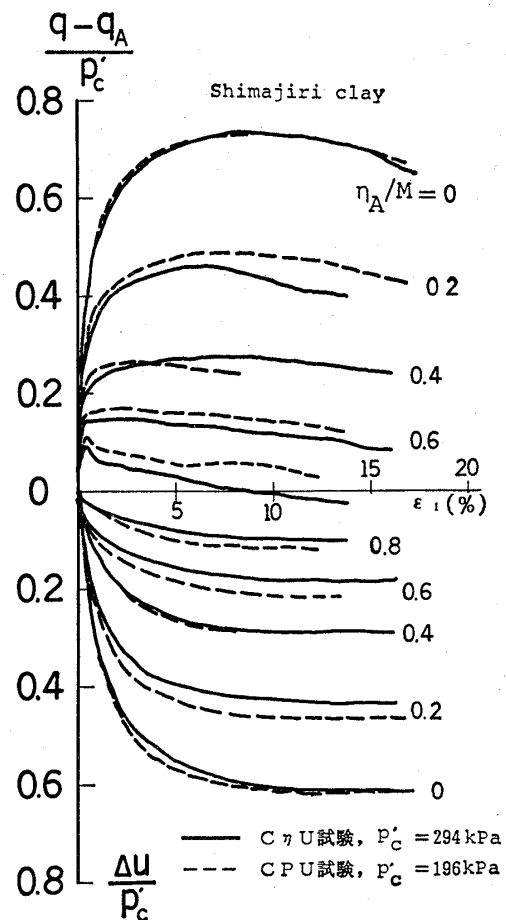


図-13 応力～ひずみ～間隙水圧関係図

れる。

したがって非排水ストレスパスの形状は単に η_A/M の値だけでは決まらなると考えられる。この考察において、非排水ストレスパスに差が生じる原因としては、A' 点に至るまで、一方は非排水状態、他方は排水状態であることが挙げられる。しかしこの場合には、排水、非排水の条件の違いよりもその応力点 A' における停留時間のほうがより重要であろうと思われる。このような時間効果の問題を含め、異方圧密粘土のひずみ速度依存性については今後の実験によって明らかにしていきたい。

図-13 は、島尻粘土の異方圧密粘土の応力～ひずみ～間隙水圧関係を示している。縦軸は、せん断過程での偏差応力の増加分 $(q - q_A)$ 、間隙水圧を p'_c で無次元化したものである。横軸のせん断ひずみは、せん断の開始点をゼロとして表した。図では、 $p'_c = 294 \text{ kPa}$ の CηU 試験を実線で、 $p'_c = 198 \text{ kPa}$ の CPU 試験を破線で示した。

図では CPU 試験のほうが偏差応力、間隙水圧共にわずかに大きく見えるが、同粘土のその他の実験シリーズも含めて考えると、応力～ひずみ～間隙水圧関係も非排水ストレスパスの場合と同じように、異方圧密の応力経路、 p'_c の大きさに影響されないことが分かる。

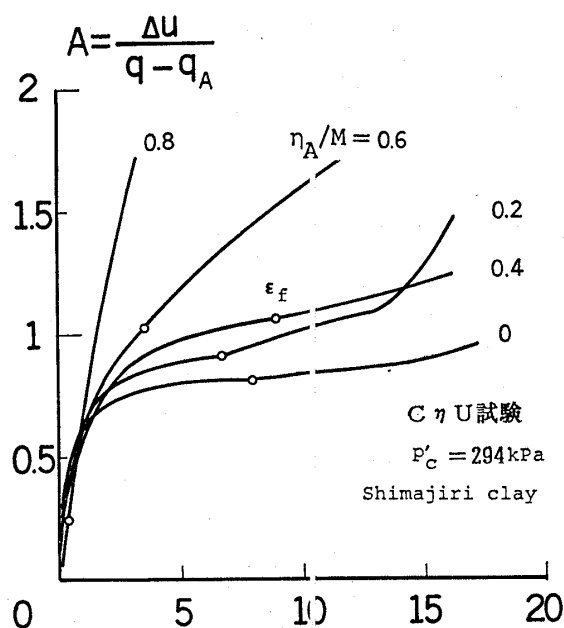


図-14 間隙水圧係数～ひずみ関係図

応力～ひずみ関係から分かるように応力誘導異方性が進むほど、破壊ひずみ ϵ_f が小さくなりピーク点が明瞭になる傾向がある。 ϵ_f を過ぎるとひずみ軟化が生じる。これに対し間隙水圧は、応力誘導異方性の大きさに係わりなく、ひずみの進行に伴って増加する。

破壊時の間隙水圧係数は、応力誘導異方性が進むほど大きくなることは既に述べたとおりであるが、せん断中およびひずみ軟化過程での間隙水圧係数の変化の様子を図-14 に示す。図に示すようにせん断中も間隙水圧係数は、応力誘導異方性が進むに従って増加することが分かる。図中の丸印は、ピーク強度点における間隙水圧係数を示しており、その点以降はひずみ軟化が進行し、偏差応力が減少する。逆に間隙水圧はひずみと共に増加するために間隙水圧係数も漸増する。

応力誘導異方性が小さい場合、ひずみが小さい範囲内では間隙水圧に対して偏差応力が急激に大きくなるために間隙水圧係数は小さい。ひずみが徐々に大きくなるにつれて偏差応力の変化はなくなるが、間隙水圧は上昇し続けるために、間隙水圧係数が漸増する。ピーク点以降は、ひずみ軟化による偏差応力の減少によって更に間隙水圧係数が増加する。

応力誘導異方性が大きいと間隙水圧がまだ十分に発達していない内に偏差応力のピークが現れ、軟化過程となるため間隙水圧係数は急激に増加する。

このように、間隙水圧係数とひずみの関係は、応力誘導異方性による影響を強く受けることからその特徴を表すひとつの目安となり得る。

4. あとがき

応力誘導異方性の程度が異なる正規異方圧密粘土に対して、非排水三軸圧縮試験を行った。その際、異方圧密の応力経路は、平均有効応力一定経路と応力比一定経路の二タイプとし、圧密応力経路の違いによる比較も行った。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 応力誘導異方性の程度が大きくなるにつれて応力～ひずみ関係におけるピーク点が明瞭になる。また等方圧密粘土と同じく、異方圧密粘土でも、間隙水圧はひずみの進行と共に増加する。

(2) 応力誘導異方性の程度によらず、非排水ストレスパスは、せん断の初期において立ち上がる傾向を示す。その結果として、非排水ストレスパスの形状は、応力誘導異方性の程度に応じて異なった形となる。

(3) 異方圧密粘土の圧密時の応力比が同じ場合、異方圧密の経路によって排水変形時のせん断ひずみに大きな差が生じる。

(4) それにもかかわらず、異方圧密粘土の非排水せん断特性は、異方圧密の応力経路や圧密応力の大きさに影響されない。異方圧密粘土の非排水せん断特性を特徴づける主因は、異方圧密終了時の応力比である。

(5) 応力誘導異方性の高い場合を除いて、限界状態における平均有効応力、偏差応力、比体積の関係は、応力誘導異方性、異方圧密経路、圧密応力の大きさに依存しないことが確認された。そのことから、CIU 試験結果を利用して異方圧密粘土の非排水強度を推定することができる。

謝 辞

本研究における実験に際し、本学卒業生久場清教、蛭原宏之、嘉手刈雅夫、金城一史君らの協力がありました。ここに記して感謝の意を表します。

記 号 説 明

- e = 間隙比
- f = 比体積 $f = 1 + e$
- p' = 平均有効応力
- q = 偏差応力
- p'_A, q_A = 圧密終了時あるいは非排水せん断直前の p', q
- $p'_c = p'_A, q_A$ を含む Cam-clay モデル降伏曲線が $q=0$ 軸と交わる時の p'
- p'_f, q_f = 破壊時 (最大偏差応力) の p', q
- v = 体積ひずみ
- CIU 試験 = 等方圧密非排水三軸圧縮試験
- CPU 試験 = 平均有効応力一定異方圧密非排水三軸圧縮試験
- C η U 試験 = 応力比一定異方圧密非排水三軸圧縮試験
- K_0 = 静止土圧係数
- γ = せん断ひずみ
- ϵ_1, ϵ_3 = 軸方向, 径方向ひずみ
- $\dot{\epsilon}_a$ = 軸ひずみ速度
- η = 応力比
- η_A = 圧密終了時あるいは非排水せん断直前の応力比

η_f = 破壊時の応力比

λ = 圧密試験による $e - \ln p'$ 線の勾配

κ = 圧密試験による膨潤時の $e - \ln p'$ 線の勾配

σ_1', σ_3' = 軸方向, 径方向応力

$M = p - q$ 面における限界状態線の勾配

参考文献

- 1) 松岡 元・中井照夫・石崎 仁 (1980): 複合滑動面に基
づいた異方性土の応力・ひずみ関係, 「土木学会論文報告
集」, No.300, pp. 57~67.
- 2) 落合英俊・棚橋由彦 (1983): 構造異方性をもつ砂の三次
元強度特性, 「土木学会論文報告集」, No.339, pp. 147~
154.
- 3) 金谷健一 (1982): 誘導異方性とその表現, 「土質工学会論
文報告集」, Vol.22, No.2, pp. 136~140.
- 4) Yatomi, C. and Nishihara, A. (1984): "Principles for
constitutive equations and expressions of anisotropy
in soil materials," Soils and Foundations, Vol.24,
No.3, pp. 15-26.
- 5) Ohta, H. and Nishihara, A. (1985): "Anisotropy of
undrained shear strength of clays under axi-symme-
tric loading conditions," Soils and Foundations, Vol.
25, No.2, pp. 73-86.
- 6) Parry, R. G. H. and Wroth, C. P. (1981): Shear Stress-
Strain Properties of Soft Clay, Elsevier, Soft Clay
Engineering Chapter 4.
- 7) Gree, G. E. and Reades, D. W. (1975): "Boundary
conditions, anisotropy and sample shape effects on
the stress-strain behaviour of sand in triaxial com-
pression and plane strain," Geotechnique, Vol.25, No.
2, pp. 335-356.
- 8) Yamada, Y. and Isihara, K. (1979): "Anisotropic
deformation characteristics of sand under three dimen-
sional stress conditions," Soils and Foundations,
Vol.19, No.2, pp. 79-94.
- 9) Oda, M., Koishikawa, I. and Higuchi, T. (1978):
"Experimental study of anisotropic shear strength of
sand by plane strain test," Soils and Foundations,
Vol.18, No.1, pp. 25-38.
- 10) 松岡 元・中井照夫・石崎 仁 (1980): 空間滑動面に基
づいた異方性土の応力ひずみ関係, 「土木学会論文報告集」,
No.304, pp. 105~111.
- 11) Wong, P. K. K. and Mitchell, R. J. (1975): "Yielding
and plastic flow of cemented clay," Geotechnique, Vol.
25, No.4, pp. 763-782.
- 12) 鬼塚克忠・林 重徳・平田登基男・村田重之 (1976): 有
明粘土の異方性について, 「土質工学会論文報告集」, Vol.
16, No.3, pp. 111~121.
- 13) 三笠正人・高田直俊・中村祐造 (1984): 二次的応力を受
けた粘土の強度異方性, 「第19回土質工学研究発表会講演
集」, pp. 433~434.
- 14) Nakase, A. and Kamei, T. (1983): "Undrained shear
strength anisotropy of normally consolidated cohesive
soils," Soils and Foundations, Vol.23, No.1, pp. 91-
101.
- 15) Nakase, A. and Kamei, T. (1984): "Influence of aniso-
tropy of deformation modulus on effective stress
path," Soils and Foundations, Vol.24, No.2, pp. 106-
110.
- 16) Mitachi, T. and Kitago, S. (1979): "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.
- 17) 池浦 勲・三田地利之 (1986): 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」, Vol.26, No.3, pp. 157~168.
- 18) 大槻正紀 (1981): 正規圧密粘土の変形特性に及ぼす応力
経路履歴の影響, 「土木学会論文報告集」, No.316, pp. 97
~109.
- 19) 原 久夫 (1986): 正規異方圧密粘土の非排水せん断特性,
「琉球大学工学部紀要」, No.31, pp. 11~30.
- 20) 原 久夫 (1986): 応力比一定異方圧密粘土の非排水せん
断挙動, 「土木学会西部支部研究発表会講演集」, pp. 344~
345.
- 21) Schofield, A. N. and Wroth, C. P. (1968): Critical
State Soil Mechanics, McGraw Hill.
- 22) 三田地利之・小野 丘 (1985): 過圧密状態の粘土の非排
水強度推定法, 「土と基礎」, Vol.33, No.3, pp. 21~28.
- 23) Mayne, P. W. (1980): "Cam-clay predictions of un-
drained strength," Proc. ASCE, Vol.100, GT 7, pp.
763-786.