



Title	泥炭の三軸圧密非排水せん断特性
Author(s)	三田地, 利之; Mitachi, Toshiyuki; 藤原, 幸彦 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 129, 1-14
Issue Date	1986-01-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41964
Type	departmental bulletin paper
File Information	129_1-14.pdf



泥炭の三軸圧密非排水せん断特性

三田地 利之* 藤原 幸彦*
(昭和60年9月30日受理)

Consolidated Undrained Triaxial Shear Behavior of Peat

Toshiyuki MITACHI and Yukihiko FUJIWARA
(Received September 30, 1985)

Abstract

Peat soil is distributed so widely throughout Hokkaido island that civil engineers are frequently obliged to construct base structures on peaty ground. However, the mechanical properties of peat have been investigated mainly by means of in-situ tests, and fundamental shear behavior of peat has not been clarified.

A series of consolidated undrained triaxial compression and extension tests on two peat samples were performed to investigate the undrained stress-strain-pore pressure behaviors, together with effective stress paths and dilatancy characteristics, compared with those of clay.

Based on the test results, a method to predict the undrained shear strength of overconsolidated peat is proposed, and it is also shown that the predicted theoretical undrained strengths fairly well coincide with observed ones.

1. はじめに

北海道内には未分解で繊維分に富む泥炭が広範囲にわたって分布している。泥炭は植物繊維とその分解成分(腐植)を多量に含んでおり、工学的には砂質土、粘性土のようないわゆる「普通土」と比較すると、自然含水比、間隙比が極めて大きく圧縮性に富み、特異な力学的挙動を示す「特殊土」とされており、泥炭を主体とする地盤は軟弱地盤の最たるものとして、各種建設工事等においてその取り扱いを難しいものになっている¹⁾。これは、泥炭地盤自体の有する不均一性ととも、泥炭の基本的なせん断挙動に関する知見が十分蓄積されておらず、そのメカニズムが十分解明されていないため、泥炭の強度-変形特性を適切に評価し得る方法が確立していないことに起因する。

泥炭の基本的なせん断挙動を調べるには、粘性土と同様に「要素試験」としての三軸試験によるのが望ましいと考えられるが、国内外を問わずこの種の研究は粘性土のそれと比較すると非常に少ないのが現状である。近年、本州に分布する比較的分解の進んだ泥炭に関しては、三軸試験

* 土木工学科 土質工学講座

機を用いた研究^{2)~6)}などからその基本的なせん断挙動が徐々に明らかにされつつある。そしてそれらの研究によると、泥炭のせん断挙動は基本的には粘土のそれと類似しており、粘土の延長線上にあるとして議論されている。一方、北海道内に広く分布している未分解な繊維分に富む泥炭についてのこの種の研究はほとんどなされていない。

著者らは先に北海道内に分布する繊維分に富んだ泥炭への三軸試験の適用の可能性と試験実施にあたっての問題点を把握する目的で、等方応力条件下で正規圧密した泥炭の非排水三軸圧縮・伸張試験を実施したが⁷⁾本研究はその後に行った実験結果を含めて、泥炭のせん断挙動について検討を加えたものである。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

本研究で用いた泥炭試料は2種類で、江別市夕張川河川敷および稚内空港付近の泥炭地盤において、土質工学会基準「固定ピストン式シンウォールサンプラーによる土の乱さない試料の採取法」に準拠し、それぞれ地

Table 1. Physical properties of samples

Sample	EBETU PEAT	WAKKANAI PEAT
Natural water content w_n (%)	800~1060	1080~1165
Ignition loss Lig (%)	94~97	92~93
Degree of decomposition H (%)	23~67	44~50
Specific gravity G_s	1.47~1.52	1.50~1.52
Wet density ρ (Mg/m ³)	0.955~1.013	0.988~1.015

表面下 0.55~1.25 m, 0.40~1.08 m の深さより内径 75 mm, 長さ 1 m のシンウォールサンプラーを人力で鉛直に押込んで採取したものである。なお、採取時の採取地点における地下水位はほぼ地表面と一致しており、両試料とも飽和状態にあるとみなすことが出来る。試料の物理的諸性質は表-1 に示す通りである。両試料とも強熱減量 (Lig) が 90% 以上であって、その大部分が有機物で構成されており、無機物を主体とする粘土や砂とは全く異質な「土」である。

2.2 実験の種類

本研究では稚内泥炭については下記の7種類の実験を全て実施し、江別泥炭については1), 2), 5) を実施した。

- 1) CIUC 試験 : 等方応力条件下で正規圧密した試料についての非排水圧縮試験
圧密圧力 (最終有効側圧 p_c) : 20~150 kPa
- 2) CIUE 試験 : 等方応力条件下で正規圧密した試料についての非排水伸張試験
圧密圧力 (最終有効側圧) : 20~150 kPa
- 3) CIRIUC 試験 : 等方応力条件下で先行圧密圧力 p_{cmax} (有効応力) まで圧密後, 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
設定 OCR : 2~16 p_{cmax} : 75 kPa, 150 kPa
- 4) CIRIUE 試験 : 等方応力条件下で先行圧密圧力 p_{cmax} まで圧密後, 所定の OCR まで吸水膨張させた試料についての非排水伸張試験
設定 OCR : 2~8 p_{cmax} : 75 kPa
- 5) CIRI 試験 : 等方応力条件下で行う圧密・膨張試験
- 6) CK₀RK₀ 試験 : K₀ 条件下で行う圧密・膨張試験
- 7) CIPC 試験 : 等方応力条件下で正規圧密した試料についての排水条件下で行う平均主応力一定圧縮試験 p_c : 60 kPa

供試体は、1)～5)の試験についてはシンウォールチューブから抜き出したものをカッターナイフで上下端面のみ整形したもので、 $\phi 75$ mm、高さ150 mmの円柱形であり、6)～7)の試験についてはカッターナイフおよびワイヤーソーによって整形した $\phi 50$ mm、高さ120 mmの円柱形である。供試体のセットは水でぬらしたスリット入りのドレーンペーパーを供試体周面に巻いた後、1)～2)については空中で行ったが、3)～7)については三軸セルを水中に静置して行い、飽和度の低下を極力防いだ。なお、供試体上下端面には摩擦軽減のためシリコングリースを塗布したテフロンシートを置いた。1)～4)の等方圧密過程は既報⁷⁾と同様とし、膨張過程は所定のOCRが得られるように側圧を一回で減少させ、間隙水圧がほぼ消散した時点(2日後)をもって膨張終了とし、せん断は圧縮・伸張ともに全て側圧一定のひずみ制御で行い、ひずみ速度は0.04%/minとした。5)では段階的に側圧を増減させるが、各ステップの圧密(膨張)終了時点は間隙水圧の消散を待って、載荷(除荷)後2日目とした。6)の K_0 圧密・膨張は自動 K_0 圧密装置⁸⁾により行い、側圧を5～10 kPa ずつ12～24時間間隔(間隙水圧はほぼ消散)で段階的に増減させた。7)では所定の側圧まで3段階(1ステップ1日)に分けて等方圧密したのち、段階的(1ステップ1日)に応力比増分 $\Delta \eta = 0.25$ で $\eta = 1.75$ ($\eta = q/p$, $q = \sigma_v - \sigma_h$, $p = (\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3$)までせん断を行った。また、全ての試験で圧密過程からバックプレッシャー(B.P.)を載荷した。その大きさは原則として100 kPaとしたが、江別泥炭の一部でB値がやや低いものも(0.85～0.95)見られたため、B.P.=200 kPaとしたものもある。なお、試験中、軸力は三軸セル内にセットしたロードセルにより、間隙水圧は供試体下端中央部にて圧力変換器によって測定し、室温は $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に制御されている。

3. 実験結果と考察

3.1 圧密特性

図-1は CK_0RK_0 試験における軸ひずみ ϵ_a と体積ひずみ v の代表的な関係を示したものである。これを見ると $\epsilon_a = v$ であって、側方ひずみ ϵ_r を生じていないことになり、供試体は計算上 K_0 条件を満足しているときとみなせるが、 $\sigma'_v = 246$ kPa程度までの圧密で ϵ_a は65%もの大変形を生じる。そのため、供試体に巻いたろ紙およびメンブレンは供試体が圧密されるに伴い、図-2に模式的に

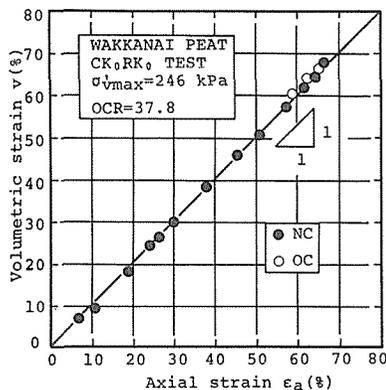


Fig. 1 Relationship between axial and volumetric strain during K_0 consolidation and swelling

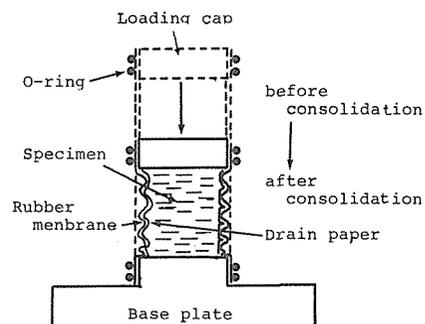


Fig. 2 Schematic representation of peat specimen during K_0 consolidation

示したようになり、供試体表面には多数の小さな凹凸が生じるようになって、微視的には供試体に ϵ_r が発生する。そのため、厳密な意味においては K_0 条件の成立について問題を残している。これは泥炭の K_0 圧密を、標準圧密試験の場合のように剛な円筒の中で行うような方法をとらない限り必ず生じる問題であって、今後の検討課題としたいが、今回の CK_0RK_0 試験においては一応 K_0 条件が成り立っているものとして以下に考察を進めることにする。

図-3 は稚内泥炭の CIRI 試験ならびに CK_0RK_0 試験から得られた圧密時の平均有効主応力 $p_c (= (\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3)$ 、鉛直有効圧密圧力 σ'_v と含水比 w の関係を両対数紙上に示したものである。著者らは⁷⁾ 等方正規圧密 (NC) 領域における泥炭の p_c と w の関係は $w-\ln p_c$ 図上では直線関係にあるとはみなせないが、両対数紙上で直線関係にあることを示した。今回行った試験から、 K_0NC 領域においても $\ln w$ と $\ln p_c$ は直線関係にあるとみなせ、その傾き C_e^* は等方圧密のそれとほぼ等しいことがわかる。また、 K_0 圧密は同一の p_c で比較すると等方圧密よりかなり低い含水比を与える。これは、粘土における $w-\ln p_c$ 関係⁸⁾ と定性的には同様な傾向とみなせ、泥炭の場合も K_0 圧密条件においては、偏差応力の付加に伴うダイレイタンスーに起因する体積変化が顕著に生じるためと考えられる。一方、過圧密 (OC) 領域においては、等方圧密条件下ではその膨張・再圧縮曲線にヒステリシスループが認められるが、 $\ln w$ と $\ln p_c$ はほぼ直線関係にあるとみなせる。ただし、その傾き C_e^* が先行圧密圧力 p_{cmax} によらない定数とみなせるかどうかについてはさらに実験的に検討する必要がある。なお、 K_0 圧密条件下では $\ln w$ と $\ln p_c$ は直線関係で表すことが出来ないが、 $\ln w$ と $\ln \sigma'_v$ の関係は直線で近似出来るようである。

図-4 は CK_0RK_0 試験における静止土圧係数 $K_0 (= \sigma'_h/\sigma'_v)$ と σ'_v の関係を示したものである。NC 領域ではやや変動はあるものの K_0 値はほぼ 0.29~0.30 程度の値を示し、 σ'_v によらず一定値をとることがわかる。Edil ら⁹⁾ は $\phi = 72.5$ mm、高さ 150 mm のステンレス製円筒内で一次元圧密を行い、ストレインゲージによって測定された円筒のひずみから側方応力を算定することによって、3種類の泥炭の K_0 値を測定している。その結果、泥炭の K_0 値は NC 領域ではほぼ一定値を示すが、分解度、 Lig によってかなり異なり、繊維質泥炭の K_0 値は 0.30 であるが分解が進んだ泥炭では 0.50 程度になると報告している。一般に粘土の NC 領域における K_0 値は 0.40~0.55 程度である¹⁰⁾ ことを考えると、稚内泥炭の K_0

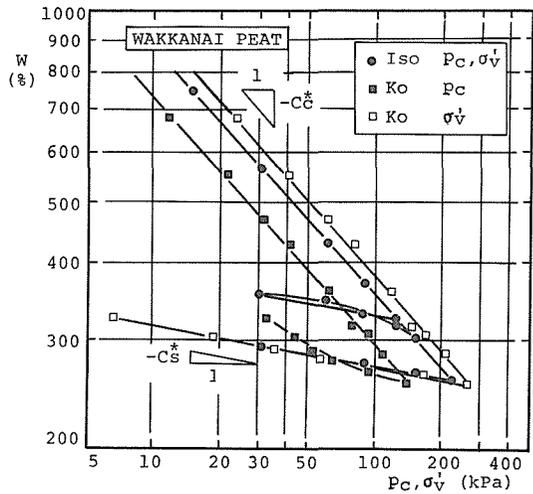


Fig. 3 Effective consolidation (swelling) pressure vs. water content

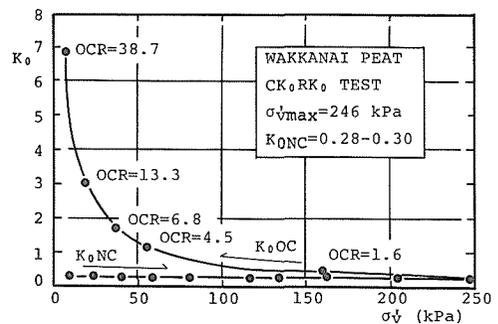


Fig. 4 Coefficient of earth pressure at rest vs. effective vertical pressure

値は粘土と比較してかなり小さな値と言えよう。これは、泥炭の形成過程から想像される顕著な初期構造異方性、繊維の絡み合いによる引張り強度の存在が、鉛直方向には圧縮しやすいが、水平方向には変形しにくくさせているためと推定される。図-5はOC領域における静止土圧係数 K_{or} と過圧密比 (OCR) の関係を示したものである。 $1 + 2K_{or}$ と OCR の関係は、粘土の場合⁸⁾と同様に先行鉛直圧密圧力 σ'_{vmax} によらず両対数紙上で直線関係にあるとみなされ、OC領域の膨張過程における K_{or} 値は OCR の関数として次式で表すことが出来る。

$$(1 + 2K_{or}) = (1 + 2K_0) \cdot (OCR)^n \quad (1)$$

ここで n は実験定数である。

泥炭は粘土と比較して、非常に圧縮性が大きく、供試体を構成している有機物が多種にわたっていること、また大間隙が多いことから等方応力条件下における圧密過程においても不均一な変形を生じ、その後のせん断試験が要素試験足りうるかどうかが問題となる。写真-1は等方圧密終了時の稚内泥炭 ($p_c = 149 \text{ kPa}$, $v = 66\%$) の変形状態を示したものであるが、供試体全体としては近似的には円柱形を保っており、供試体は一応「要素」とみなしても良いと考えられる。しかし、メンブレンが供試体に貫入し供試体表面にはかなりの凹凸が生じており、平均的な断面積を用いて行う通常の応力計算法の可否についての問題が残る。また、伸張試験においても、供試体表面に食い込む形となっているメンブレンおよびドレーンペーパーの発揮する引張り抵抗の程度によっては、試験データの補正を行わなければならないと推測される。著者ら¹¹⁾は粘性土の伸張試験における非排水強度がドレーンペーパーとして用いるる紙の形状にかなり影響されることを明らかにした。しかし、泥炭の場合、写真-1にも示したように圧密段階での圧縮量が非常に大きく、圧密段階でしわを生じたる紙やメンブレンが伸張試験時に引張り力を受ける形になるから、この引張り抵抗が供試体そのものの伸張強度にどの程度寄与しているのかを定量的に把握することは極めて困難であって、現段階ではこれらの影響を考慮した泥炭のせん断過程全般にわたっての定量的な補正方法は確立されていない。以上のような理由から、本研究においては試験データに対する補正は行わなかった。

3.2 応力-ひずみ-間隙水圧挙動

図-6(a), (b)はそれぞれ稚内泥炭、江別泥炭のNC領域における非排水圧縮、伸張時の軸差応力 q と軸ひずみ ϵ_a の関係を見たものである。これより両試料とも圧縮、伸張によらず $\epsilon_a = 5\%$ 付近までに q は急激に増加し、 $\epsilon_a = 10\%$ 以降、 q は ϵ_a に対してゆるやかに直線的に増加(減少)しているのがわかる。なお、この $\epsilon_a > 10\%$ における応力-ひずみ曲線の傾き $\Delta q / \Delta \epsilon_a$ は伸張試験のほうが大きいようである。また、せん断は $\epsilon_a = 25\%$ 付近まで継続しているが、江別泥炭の一部の伸張試験を除いて q のピークは認められなかった。このように、乱さない正規圧密泥炭が明確な

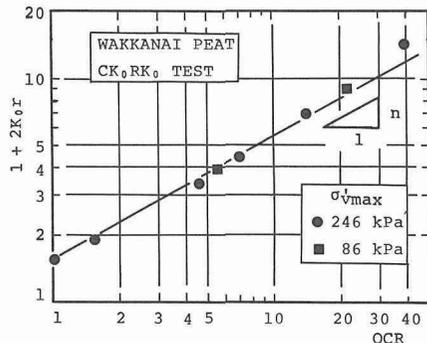


Fig. 5 Coefficient of earth pressure at rest vs. overconsolidation ratio



Photo 1 Specimen after isotropic consolidation

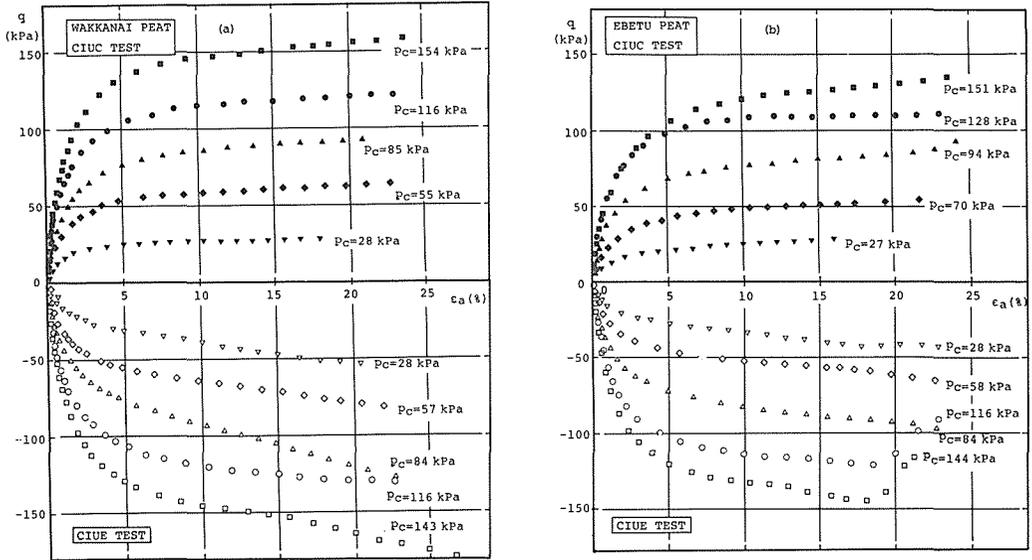


Fig. 6 (a), (b) Stress-strain relationship for NC peat during undrained shear

q のピークを示さない傾向にあることは及川ら²⁾によっても報告されている。一方、図-7は稚内泥炭のほぼ同一の先行圧密圧力 (p_{cmax}) を持つ過圧密供試体の q と ε_a の関係を示したものである。圧縮、伸張とも OCR が大きくなる、すなわち膨張の程度が大きくなるほど同一軸ひずみにおいて動員される q は小さくなるが、 OCR の大きさによらず、正規圧密の場合と同様に q のピークは認められず、 $\varepsilon_a=10\%$ 以降 q は ε_a に対して直線的に増加(減少)が続いているのがわかる。現在までのところ、過圧密領域における泥炭のせん断特性を調べた研究は非常に少ないが、このような挙動は本州の泥炭についても認められている。¹²⁾

図-8(a), (b)はNC領域における、図-9は稚内泥炭のOC領域における ε_a とせん断時の発生間隙水圧 Δu の関係を見たものである。ここで Δu は全て p_c で正規化されている。これらの図より、NC領域における江別泥炭の一部の圧縮試験、稚内泥炭のOC領域における一部の圧縮試験でせん断の進行とともに $\Delta u/p_c > 1.0$ となるものがあることがわかる。このような挙動を示す試験では試験中メンブレンと供試体が離れ、その間に供試体から水が排水される現象が観察された。このことは、試験中、供試体の「非排水条件」が成立していないことを意味し、試験データを非排水試験のそれとして取り扱うことについて検討の余地を残している。これは、用いた泥炭が極めて圧縮性に富んでいること、繊維組織が引張り強度を有しているためせん断時に側方に変形しにくいこと、さらに圧密圧力の大きさの影響等が複雑にからんでいるためと考えられる。なお、今回上述のような現象が見られたのは一部の試

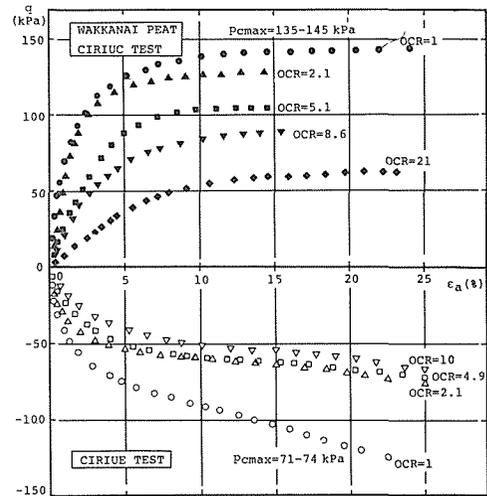


Fig. 7 Stress-strain relationship for OC peat during undrained shear

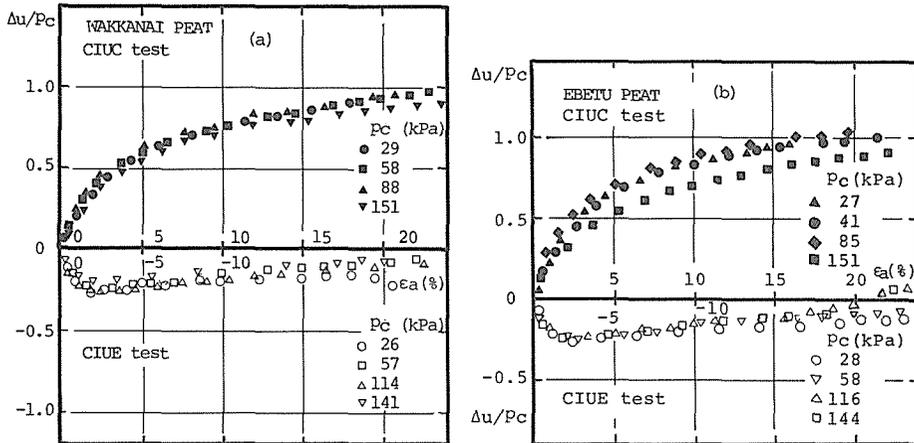


Fig. 8 (a), (b) Pore pressure development of NC peat during undrained shear

験のみであったが、他の圧縮試験においても $\epsilon_a > 15\%$ では $\Delta u/p_c$ は 0.85~0.98 程度の値となり、 ϵ_a とともにさらに増加する傾向にあって、せん断をさらに継続していくと $\Delta u/p_c > 1.0$ となる可能性がある。このような泥炭の非排水圧縮試験における大きな間隙水圧の発生は他の研究者によっても報告されている^{2),13)}一方、伸張試験においてはせん断の進行とともに $\sigma'_v < 0$ となる場合がかなり多く見られた。過去の研究において泥炭の三軸伸張試験を行った例はほとんどないが、このような傾向は山口ら⁴⁾によっても報告されている。これは、 $\sigma'_v < u$ となることを意味しており、物理的には泥炭が引張り強度を有するためと解釈されるが、前述したように伸張試験結果におよぼすメンブレンならびにろ紙の影響 (σ'_v が真値より低めに計測される) が現在のところ不明確なため、今後さらに検討する必要がある。

3.3 有効応力経路と等ひずみ線

図-10 は稚内泥炭の正規圧密領域における有効応力経路 (ESP) を等ひずみ線とともに示したものである。なお、江別泥炭については稚内泥炭と定性的に同様の傾向を示していたので図は省略した。これを見ると、圧縮・伸張時ともに ESP は p_c によらずほぼ相似形をなしていることが認められる。また、圧縮の ESP と伸張のそれとを比較すると p 軸について対称形にはなっていない。これは応力系の相違¹⁴⁾ と泥炭の有する構造異方性に起因するものと考えられる。つぎに図中に描いた等ひずみ線についてみると、圧縮、伸張ともに原点は通らないが q 軸に切片を持つ直線群となることがわかる。ところで、泥炭にも粘性土などと同様に Mohr-Coulomb の破壊規準が適用出来ると考え、図-11 に模式的に示すように任意のひずみで動員される c , ϕ の成分をそれぞれ c_m , ϕ_m とし、 q - p 図上でのこれらに対応する成分をそれぞれ μ_m , M_m とすると次式が得られる。

$$\text{圧縮 } \phi_{mc} = \sin^{-1} [3 \cdot M_{mc} / (M_{mc} + 6)] \quad c_{mc} = (3 - \sin \phi_{mc}) \cdot \mu_{mc} / (6 \cdot \cos \phi_{mc}) \quad (2)$$

$$\text{伸張 } \phi_{mE} = \sin^{-1} [-3 \cdot M_{mE} / (M_{mE} + 6)] \quad c_{mE} = (3 + \sin \phi_{mE}) \cdot \mu_{mE} / (6 \cdot \cos \phi_{mE}) \quad (3)$$

従って図-10 において等ひずみ線が直線で表されるということは、正規圧密領域においては p_c の

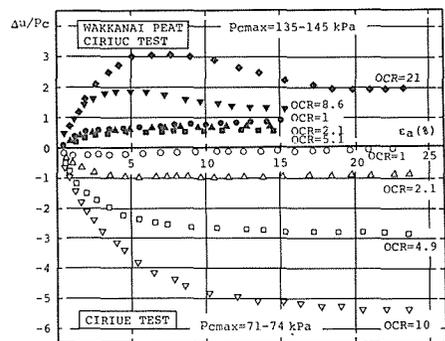


Fig. 9 Pore pressure development of OC peat during undrained shear

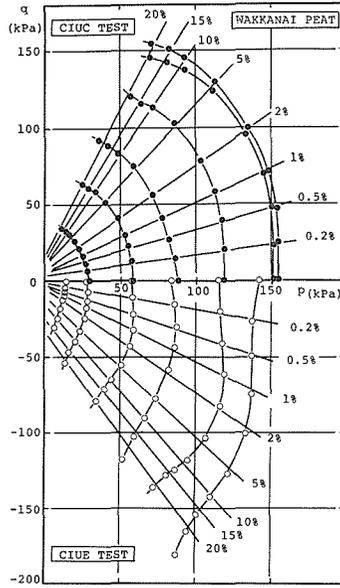


Fig. 10 Effective stress paths and strain contours during undrained shear test on NC peat

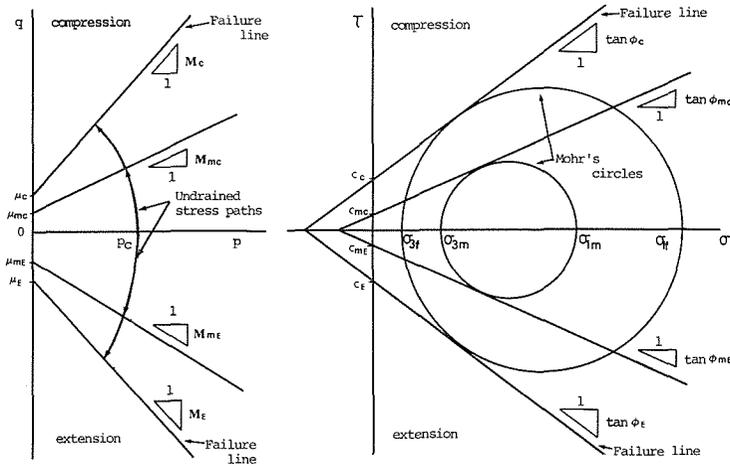


Fig. 11 Schematic diagram of interrelationship between p - q plot and τ - σ plot

大小によらず、任意のひずみにおいて動員されるせん断抵抗角と粘着力は等しいことを意味する。すなわち、このことは正規圧密領域における泥炭の非排水せん断時に動員される強度成分を軸ひずみ量によって規定し得ることを示している。

図-12 は稚内泥炭の過圧密領域における ESP を等価圧密圧力 p_e で正規化し、等ひずみ線とともに示したものである。ここで p_e で正規化する意味は、各供試体間の OCR の大小にもとづく間隙比 e の相違を消去することであり、同一の e で異なる OCR を持つ供試体の ESP を比較すること、すなわち OCR が ESP の形状に及ぼす影響を見るために行うものである。まず圧縮側について見

ると、 $OCR=2.1$ の供試体はほぼ p 一定で、 $OCR=5.1$ では p が増加しながら q は増加してゆくが、ともにせん断終期にはNC供試体のESPとほぼ同一点で交わり、定性的には過圧密された粘土の場合¹⁵⁾と類似した挙動を示すと言えよう。しかし、 OCR がさらに大きくなると、ESPは最終的には OCR が小さい場合と同じように $q-p$ 図上のある一点に収束しようとする傾向は認められるものの、せん断初期に原点側にいったん膨らみ、 $OCR=2.1$ では計算上 $p < 0$ となる場合もみられる。これは前述したように、 $OCR > 8.6$ の圧縮試験においては $\Delta u/p_c > 1.0$ となり、 Δu が p の増分 $\Delta p (= \Delta q/3)$ より大きく発生しているためであるが、今後はさらに p_c を変えて実験的に検討してゆく必要がある。一方、伸張側についてみると、過圧密領域においてはせん断開始よりESPは OCR によらず p が増加する形状を示している。そして、 ϵ_a が10~15%付近から p は減少に転じ、NC供試体のESPに沿う形で一点に収束する傾向にある。つぎに等ひずみ線についてみると、圧縮・伸張試験ともにその等ひずみ線群はややばらつきは認められるがせん断初期においてほぼ p 軸に平行な形状をなしている。このことは、 e が同一であるならば非排水せん断時に発揮する q は OCR によらず ϵ_a のみに依存することを意味している。しかし、せん断が進んでくると($\epsilon_a > 10\%$)、等ひずみ線は不規則な形状を呈する。この理由としては、過圧密供試体ではせん断が進むと、供試体内のひずみ状態が不均一になること¹⁵⁾さらに前述したように圧縮試験では $\Delta u/p_c > 1.0$ となること、伸張試験ではメンブレン、ろ紙の引張り抵抗の影響などが挙げられる。

3.4 ダイレイタンスー特性

側圧一定条件での非排水試験においては、偏差応力($\sigma_v - \sigma_h$)が付加されるに伴い平均主応力 $\sigma_m = (\sigma_v + 2\sigma_h)/3$ も変化することになる。一般に非排水試験中に発生する間隙水圧 Δu は偏差応力の増分に起因する量 Δu_d と平均主応力の増分 $\Delta \sigma_m$ に起因する量 Δu_c の和で表すことが出来る。

$$\Delta u = \Delta u_d + \Delta u_c \quad (4)$$

ここで、試料が飽和されているならば $\Delta u_c = \Delta \sigma_m$ となるから、

$$\Delta u_d = \Delta u - \Delta \sigma_m \quad (5)$$

となり、 Δu_d はダイレイタンスー挙動を表す指標とみなせる。

稚内泥炭の $\Delta u_d/p_e$ と応力比 $\eta (= q/p)$ との関係を見たのが図-13である。まず圧縮側についてみると、NCでは $\Delta u_d/p_e$ は η に対してほぼ一定の割合で増加しており、顕著な負のダイレイタンスーを示しているのに対して、 $OCR=2.1$ ではほとんど $\Delta u_d/p_e$ は η に対して変化せず、 $OCR=5.1$ では $\Delta u_d/p_e < 0$ となり正のダイレイタンスーを示す。一方、伸張側においてもNCではせん断初期に正のダイレイタンスー領域が見られるが、その後は η に対して $\Delta u_d/p_e$ は一定の割合で増加し

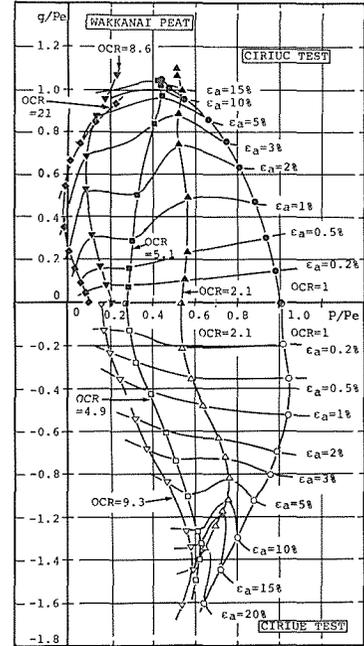


Fig. 12 Effective stress paths normalized by equivalent mean normal stress p_e and strain contours during undrained shear test on OC peat

てゆく。また、過圧密領域においては $OCR = 2.1$ のものであっても正のダイレイタンスーを示し、さらにある η に達するとダイレイタンスーの変化する方向が変わる傾向が認められる。以上のことから、圧縮側と伸張側では多少傾向が異なるものの OCR は泥炭のダイレイタンスー挙動に顕著な影響を及ぼし、その影響の仕方は粘土の場合と同様である。

ところで、排水せん断試験における間隙比 e の変化量 de は一般に平均有効主応力 p の増分に起因する量 $(de)_c$ と偏差応力 q の増分に起因する量 $(de)_a$ の和であると仮定される場合が多い。

$$de = (de)_c + (de)_a \tag{6}$$

ここで、泥炭のダイレイタンスー量を粘土の場合と同様に q の増分による体積ひずみ $(v)_a$ とみなし、それが η の関数 $F(\eta)$ で表されると仮定すると、

$$(v)_a = (\Delta V / V_0) = F(\eta), \quad V_0: \text{供試体の初期体積} \tag{7}$$

上式と $\Delta V / V_0 = -\Delta e / (1 + e_0)$ の関係などから、

$$(de)_a = -(1 + e_0) \cdot F'(\eta) \cdot d\eta \tag{8}$$

また、正規圧密された泥炭の $(de)_c$ は $\ln e - \ln p$ 平面上の NCL の直線関係を認めると次式で表される。

$$(de)_c = -C_c \cdot e_0 \cdot (p/p_0)^{-C_c} \cdot dp/p, \quad p_0: \text{せん断開始時の } p \tag{9}$$

(8)、(9) 式を(6)式に代入して初期条件 ($e = e_0$ のとき $p = p_0$, $\eta = 0$, $F(\eta) = 0$) のもとで解くと、

$$e - e_0 = -(1 + e_0) \cdot F(\eta) - e_0 \cdot [1 - (p/p_0)^{-C_c}] \tag{10}$$

非排水試験においては、 $e = e_0$ とおいて次式が得られる。

$$F(\eta) = -e_0 / (1 + e_0) \cdot [1 - (p/p_0)^{-C_c}] \tag{11}$$

図-14 は(11)式から計算された稚内泥炭の CIUC 試験における $F(\eta)$ と、CIPC 試験で測定されたダイレイタンスー量 ($\Delta V / V_0$) の値を η に対してプロットしたものである。これより非排水圧縮試験における有効応力状態の変化から間接的に得られるダイレイタンスー量 $F(\eta)$ は、平均有効主応力一定試験から直接得られるダイレイタンスー量と等価と見なすことが出来る。このことは有機物含有量の比較的小さい泥炭の乱した試料 ($Lig = 56\%$) については対馬⁵⁾ によって確かめられているが、大部分が有機物により構成されている乱さない繊維質泥炭 ($Lig = 92 \sim 93\%$, $H = 44 \sim 50\%$) についても、正規圧密試料においては(6)式で示される仮定が成立することが分かった。

3. 5 正規圧密領域における非排水強度増加率

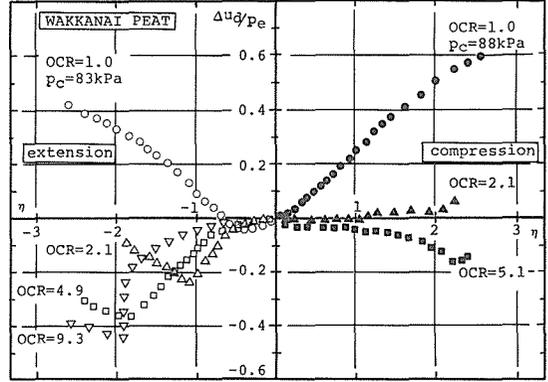


Fig. 13 Relationship between stress ratio η and Δu_d during undrained shear

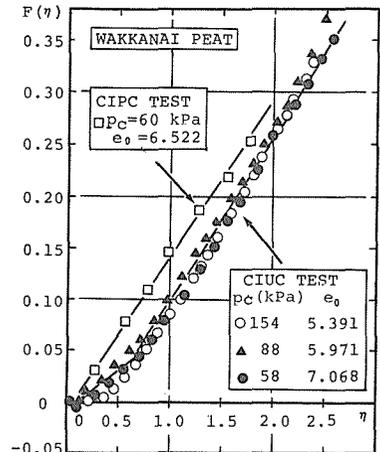


Fig. 14 Stress ratio η versus $F(\eta)$ in CIUC and CIPC test

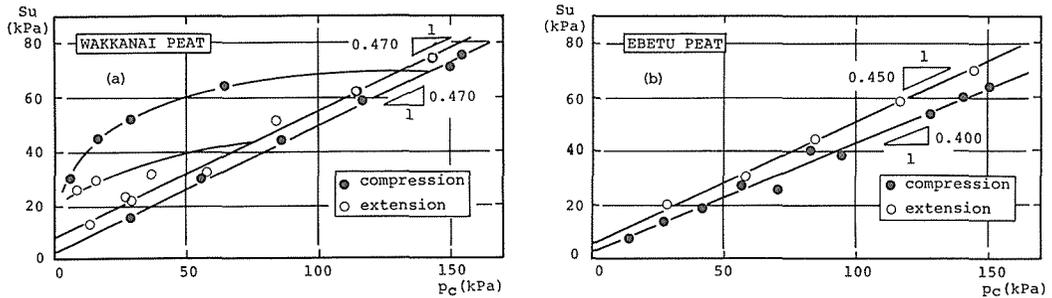


Fig. 15 (a), (b) Undrained shear strength S_u mobilized at $\varepsilon_a=15\%$ vs. preshear effective stress p_c

応力-ひずみ挙動、有効応力経路の考察からも明らかなように、今回用いた泥炭の非排水試験では一部の試験を除き破壊点を明確に決定出来なかった。実験結果から、 $\varepsilon_a > 15\%$ においては圧縮試験で非排水条件が満たされない場合が生じ、伸張試験ではろ紙およびメンブレンの影響が ε_a が増すにつれ大きくなると推察される。

また、有効応力経路の考察より、非排水せん断中に泥炭が発揮する強度は ε_a に依存する傾向にあり、かつ $\varepsilon_a > 15\%$ では図-6, 7からも理解されるように、 Δq に対する $\Delta \varepsilon_a$ がかなり大きい。そこで、本研究では、便宜上 $\varepsilon_a=15\%$ をもって破壊したとみなすことにする。図-15(a), (b)はそれぞれ稚内泥炭、江別泥炭の p_c と上述のようにして決定された非排水強度 $S_u=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ の関係を示したものである。圧縮・伸張側ともNC領域において S_u と p_c は直線関係にあり、これらの直線の傾きをそれぞれ非排水強度増加率(S_u/p_c)として計算した結果を他の強度パラメータとともに表-2に示した。従来の研究によれば、泥炭の(S_u/p_c)は粘性土の(S_u/p_c)¹⁰と比較するとかなり大きな値をとるとされている。しかし、今回用いた泥炭では表-2に示すように、その(S_u/p_c)は粘性土のそれとほぼ同程度かやや大きい程度であった。なお、泥炭の三軸試験から得られる強度パラメータは試験に用いる供試体の寸法にかなり影響されるとの報告¹⁶⁾もあるため、実際に原位置で泥炭が動員し得る強度と室内試験において「要素としての供試体」が動員し得る強度の対応関係を、供試体の寸法効果とともに今後は十分吟味してゆく必要がある。ところで、泥炭が粘性土と同程度の(S_u/p_c)を有するとすると、このことは、泥炭の持つ間隙比 e が粘性土のそれよりはるかに大きいにも拘らず、同一圧密圧力下で発揮し得る非排水強度はほぼ同程度であることを意味しており、泥炭の構造と強度発現のメカニズムを考える上で極めて興味深いことである。

3.6 過圧密領域における非排水強度増加率の推定

著者らはこれまでに、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も $\phi_u=0$ 法を適用するのが実際的であるとの考えから、過圧密状態にある粘土の非排水強度の推定法を提案して来た^{8), 10)}一方、泥炭地盤の安定解析においても現在までのところ $\phi_u=0$ 法が主として用いられている¹⁷⁾ことから、泥炭についても粘土の場合と同様な考えに立ち、以下に過圧密状態にある泥炭の非排水強度の推定法を検討することにしてしよう。

Table 2. Undrained shear strength parameters mobilized at $\varepsilon_a=15\%$

Sample	Test	(S_u/p_c)	c' (kPa)	ϕ' (°)	A_f
EBETU PEAT	Comp.	0.40	8	40.2	0.93~1.08
	Ext.	0.45	11	51.3	0.89~0.94
WAKKANAI PEAT	Comp.	0.47	7	40.5	0.79~0.87
	Ext.	0.47	28	50.7	0.87~0.94

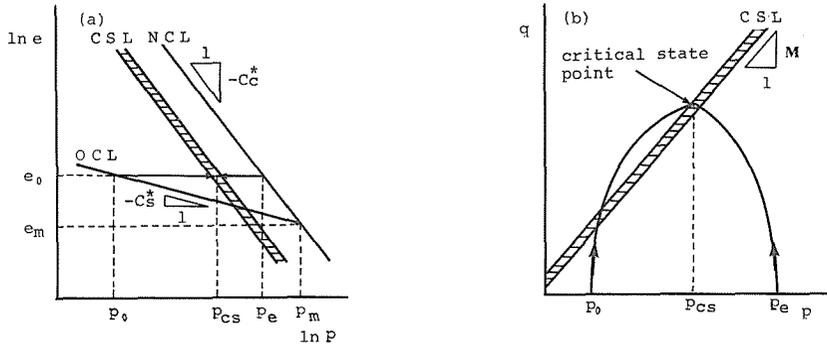


Fig. 16 (a) Assumption on void ratio e vs. effective stress p
 (b) Critical state concept

図-16 に示すように、 $\ln e - \ln p$ 平面上で等方圧密・等方膨張線がそれぞれ傾き C_c^* 、 C_s^* の直線と見なせるとすると (仮定 1),

$$\ln e_0 - \ln e_m = C_c^* \cdot (\ln p_m - \ln p_e) = C_s^* \cdot (\ln p_m - \ln p_0) \quad (12)$$

$$OCR = p_m / p_0 \quad (13)$$

(12), (13)式から次式を得る。

$$(p_e / p_0) = OCR^{1 - C_c^* / C_s^*} \quad (14)$$

Roscoe ら¹⁸⁾ が提唱した限界状態の概念が泥炭にも適用出来ると仮定すると (仮定 2), 間隙比 e の等しい試料は NC, OC の別なく $p = p_{cs}$ で限界状態線 (CSL) に達し, その S_u は等しいとおけるから, (14)式から,

$$\begin{aligned} (S_u / p_0) / (S_u / p_e) &= (S_u / p)_{oc} / (S_u / p)_{nc} \\ &= OCR^{1 - C_c^* / C_s^*} \end{aligned} \quad (15)$$

上式を整理すると,

$$\begin{aligned} (S_u / p)_{oc} &= (S_u / p)_{nc} \cdot OCR^\Lambda \\ \text{ただし } \Lambda &= 1 - C_c^* / C_s^* \end{aligned} \quad (16)$$

となり粘土の場合と同形の推定式¹⁰⁾を得る。

ところで図-15 から明らかなように, 正規圧密領域における泥炭の S_u と p_c は直線関係にあるが, S_u 軸に切片を持ち, それは特に伸張側でかなり大きな値となっている。従って(15)式で定義した $(S_u / p)_{nc}$ は p_c に依存し, 一定値と見なせないことになる。これは泥炭がその構成材料から考えて引張り強さを持つためと推測される。しかし, 三軸試験では正確な引張り強さを直接評価し得ないこと, 伸張試験におけるろ紙およびメンブレンの試験結果に及ぼす影響が不明確なことから, 便宜上今回得られた切片成分を全ての試験の S_u 成分から差し引いて, $(S_u / p)_{nc}$ は定数とみなし, (16)式を適用することにした。図-17(a), (b)は稚内泥炭の CIRIUC, CIRIUE 試験から得られた $(S_u / p)_{oc}$ と OCR の関係を(16)式による推定値の

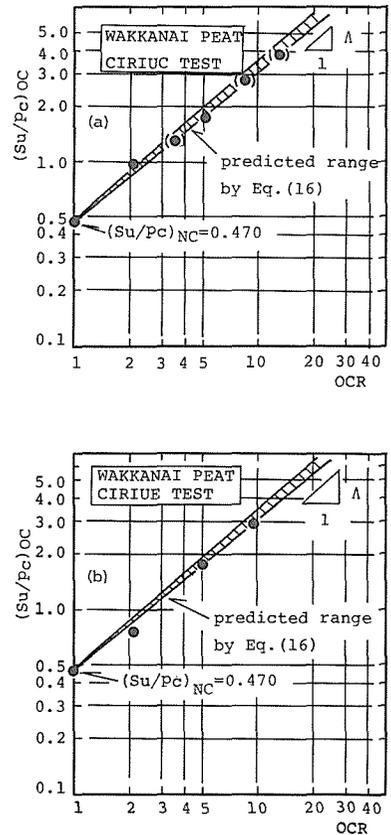


Fig. 17 (a), (b) Comparison of predicted and observed relationship between S_u / p_c and OCR

範囲とともに示したものである。ここで、(16)式による推定値を範囲で示しているのは、 C_s^* が必ずしも圧密履歴によらない定数とは見なせなかったからである。図-17 から OCR と $(S_u/p_c)_{oc}$ の実測値は両対数紙上で直線関係にあること、(16)式は実測値の増加傾向を比較的良く表していることがわかる。ところで、今回の非排水試験では破壊時点を $\varepsilon_a=15\%$ としているが、有効応力経路の考察からも明らかのように、 $\varepsilon_a=15\%$ では仮定 2 の条件は満足されているとは言えない。それにもかかわらず(16)式は比較的良く実測値を推定している。これは p_c で正規化した有効応力経路の形状から理解されるように、同一の間隙比 e をもつ泥炭の S_u は、その OCR によらずせん断時の変形量に依存する傾向にあるためであって、仮定 2 についてはさらに検討する必要がある。また、図-17 からわかるように推定値は C_s^* の値にかなり影響される。 C_s^* を実験定数として客観的に決定するのが難しいことなどの問題があることから、今後は先に著者らが粘土の場合に対して用いた手法¹⁰⁾などを検討し、推定精度の向上と試験方法の簡便化をはかる必要がある。

4. ま と め

原位置からシンウォールサンプラーによって採取した乱さない泥炭の軸対称三軸試験を行い、泥炭のせん断挙動を調べた。得られた主な結果を要約するとつぎのようになる。

- (1) 等方圧密、 K_0 圧密ともに正規圧密領域における含水比 w と平均有効主応力 p_c の関係は両対数紙上で直線関係にあり、その傾き C_c^* はほぼ等しい。また、同一の p_c での w を比較すると常に K_0 圧密の方が等方圧密より小さい。
- (2) 稚内泥炭の正規圧密領域における静止土圧係数 K_0 は 0.29~0.30 程度であって、粘土のそれと比較するとかなり小さい。また、過圧密領域における静止土圧係数 K_{or} と過圧密比 OCR は $\ln(1+2K_{or}) \sim \ln(OCR)$ 図上で直線関係を示す。
- (3) 非排水圧縮ならびに伸張試験における軸差応力-ひずみ関係は正規圧密、過圧密供試体ともに明確なピークを示すものはほとんどない。また、このときの発生間隙水圧 Δu は非常に大きく、一部の試験においては $\Delta u/p_c$ が 1.0 を越え、「非排水条件」を満足し得ない場合が見られた。
- (4) 正規圧密供試体の圧縮試験と伸張試験では有効応力経路の形状は p 軸について対称形にならない。また、等ひずみ線群の形状から正規圧密供試体の任意のひずみにおいて動員される強度成分は p_c の大きさによらない。
- (5) 泥炭のダイレイタンス挙動は OCR とともに変化し、定性的には粘土の場合と似た挙動を示す。
- (6) 破壊点を軸ひずみ $\varepsilon_a=15\%$ とした場合、正規圧密領域における非排水強度増加率 $(S_u/p_c)_{nc}$ は粘性土とはほぼ同程度である。また、過圧密領域における非排水強度増加率 $(S_u/p_c)_{oc}$ と OCR は両対数紙上で直線関係にあり、この関係は近似的に(16)式によって推定することが出来る。

5. あとがき

本研究では、従来から粘性土について用いられてきた試験方法をそのまま泥炭に適用し、泥炭のせん断特性について考察したが、圧密時、せん断時の大変形を考慮すると試験方法については改良の余地があり、さらに、泥炭の引張り強さを評価し得る試験法を確立することなども今後の課題である。なお、実験に際しては昭和 59 年度北大工学部卒業生水上純一、藪 正樹両君ならびに本学工藤 豊技官の協力を得た。また、試料は全て北海道開発局土木試験所土質研究室(能登繁幸室長)より提供していただいたものである。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば栗原則夫・高橋朋和：土と基礎，32（昭59），3，p.53-58.
- 2) 及川 洋・宮川 勇：土質工学会論文報告集，Vol.20（昭55），No.3，p.91-100.
- 3) 対馬雅己・及川 洋：土質工学会論文報告集，Vol.22（昭57），No.2，p.133-141.
- 4) 山口晴幸・大平至徳・木暮敬二・森 茂：土と基礎，32（昭59），11，p.37-44.
- 5) 対馬雅己：土質工学会論文報告集，Vol.24（昭59），No.3，p.159-167.
- 6) Yamaguchi, H., Ohira, Y. and Kogure, K.: Soils and Foundations, Vol.25 (1985), No.2, p.119-134.
- 7) 三田地利之・藤原幸彦：土質工学会北海道支部技術報告集，第25号（昭60），p.117-126.
- 8) Mitachi, T. and Kitago, S.: Soils and Foundations, Vol.16 (1976), No.1, p.45-58.
- 9) Edil, T. B., and Dhowian, A. W.: Proc. ASCE, Vol.107 (1981), No.GT2, p.201-217.
- 10) 例えば三田地利之・小野 丘：土と基礎，33（昭60），3，p.21-28.
- 11) 三田地利之・工藤 豊・木幡行宏：土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第3部（昭60），p.503-504.
- 12) 森 茂・山口晴幸・大平至徳・木暮敬二：防衛大学理工学研究報告，23（昭60），1，p.30-69.
- 13) Marachi, N. D., Dayton, D. J. and Dare, C. T.: Testing of Peats and Organic Soils (1983), ASTM, STP820, p.207-217.
- 14) Mitachi, T. and Kitago, S.: Soils and Foundations, Vol.19 (1979), No.2, p.45-58.
- 15) 例えば Atkinson, J. H. and Bransby, P. L.: The Mechanics of Soils, McGRAW-HILL (1978), London, p.210-234.
- 16) 関子睦夫・木暮敬二・山口晴幸：土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第3部（昭60），p.531-532.
- 17) 土質工学会編：日本の特殊土，土質工学会（昭49），p.141-161.
- 18) Roscoe, K. H. and Burland, J. B.: Engineering Plasticity (1968), Cambridge Univ. Press., p.535-609.