

不攪乱泥炭の異方的せん断特性

ANISOTROPIC SHEAR CHARACTERISTICS OF UNDISTURBED PEAT

山口晴幸*・森 茂**・大平至徳***・木暮敬二***

By Hareyuki YAMAGUCHI, Shigeru MORI, Yoshinori OHIRA and Keiji KOGURE

Both vertical and horizontal samples of undisturbed fibrous peats, which were obtained by maintaining the axes of thin-walled tubes parallel to the vertical and horizontal directions in the peat ground, were used. These samples contained the amount of organic matters more than 70%. A series of the undrained triaxial compression and extension tests with pore water pressure measurement were performed on the specimens which were normally consolidated and overconsolidated under an isotropic stress condition, and the influence of fabric anisotropy on undrained shear behavior of peats was investigated. Test results indicated that as the anisotropic fabric of fibrous peat which had formed during accumulation still remained after the end of isotropic consolidation, anisotropic shear behavior was observed remarkably.

1. ま え が き

泥炭について間隙水圧の測定を伴った三軸試験を実施し有効応力の概念に基づいてせん断挙動を論じた代表的研究には、カナダの泥炭に関する Hanrahan¹⁾, Adams^{2),3)}, Ozden ら⁴⁾ のものがある。彼らは、泥炭では無機質粘土に比較してかなり大きな強度パラメーター、 ϕ' や c_u/p 値が測定されることを指摘した。また、泥炭では繊維性有機物の引張強さの効果によって、正規圧密泥炭においても有効粘着切片 c' が存在することを報告している^{2),4)}。同様の指摘は他の研究者によってもなされている^{5),6)}。及川ら⁵⁾は黒泥についての CU 試験を実施し、泥炭性有機質土はひずみ硬化型の応力～ひずみ曲線を呈するため、破壊状態を客観的に決定できないことを示し、有効応力経路の後半部で認められる変曲点から破壊状態を定める手法を提案している。Khattak ら⁷⁾は45°面上でのせん断応力 τ と有効垂直応力 σ' との比の最大値 $(\tau/\sigma')_{\max}$ とせん断応力の最大値 τ_{\max} とで発揮される ϕ' の値は両応力状態での発生間隙水圧量の相違によ

て大きく異なり、 $(\tau/\sigma')_{\max}$ での ϕ' はかなり大きな値を取ることを報告している。対馬ら^{8),9)}は黒泥と粘土から成る混合土についての CU と CD 試験を実施し、土のダイレイタンシー挙動と有機物含有量との関係について記述している。黒泥の混合比率の増大に伴う強度パラメーターの増加はダイレイタンシー係数の増加と密接に関連していることを指摘している。これらの研究は等方応力状態のもとで正規圧密された泥炭に関するものがほとんどである。これに対して、Edil ら¹⁰⁾は K_0 三軸試験装置を用いて、泥炭の K_0 圧密と吸水除荷での K_0 値について報告し、 K_0 値と過圧密比との関係に関する実験式を提案するとともに、 K_0 正規圧密泥炭の非排水せん断特性について記述している。上述の主要な研究は三軸圧縮下での基本的せん断挙動について実験的に論じたものである。著者ら⁹⁾は、ケンブリッジ理論を泥炭に修正拡張することにより、等方正規圧密泥炭の三軸圧縮および伸張下での応力～ひずみ関係を定量的に評価し得る手法を示し、正規圧密泥炭の非排水強度パラメーターを用いて、任意の過圧密比にある泥炭のそれを推定する手法を提案している。

ところで、泥炭は腐植過程にある根や葉等の植物質の繊維性有機物を母体とした海綿状繊維性構造を形造っているため、当然、堆積状況から判断しても、粘土や砂質

* 正会員 工博 防衛大学校助教授 土木工学教室
(〒239 横須賀市走水1-10-20)

** 学生会員 防衛大学校理工学研究科学生(同上)

*** 正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学教室(同上)

表-1 試料の物理的諸性質

Properties	Samples	Ohmiya peat	Urawa peat
Natural water content w_n (%)		965 - 1186	982 - 1263
Natural void ratio e_n		9.52 - 13.5	9.85 - 16.7
Specific gravity G_s		1.55 - 1.63	1.50 - 1.68
Ignition loss Lig (%)		68 - 82	71 - 83
Decomposition D (%)		45 - 53	35 - 42
Degree of saturation S_r (%)		100	100
Hydro potential pH		5 - 7	5 - 6
Carbon content C (%)		35 - 45	37 - 48
Preconsolidation stress p_c (kPa)		10 - 20	10 - 19
Liquid limit L.L. (%)		-	-
Plastic limit P.L. (%)		-	-
Sampling depth h (m)		0.7 - 1.5	0.6 - 1.5

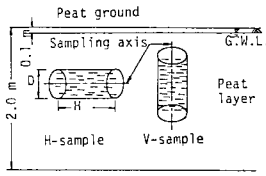


図-1 試料の採取方向

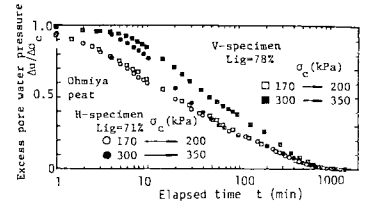


図-2 圧密中の過剰間隙水圧の消散状況

土等の無機質土に比較して異方的構造に卓越した材料であると考えられる。しかし、泥炭のせん断特性と構造異方性との関係について論じた既存の研究は少ない。本研究は、水平泥炭地盤で地表面に対して鉛直と水平方向から採取した両不攪乱泥炭試料を対象とした。三軸セル内で等方圧縮および過圧密された供試体についての軸対称三軸圧縮試験と伸張試験を実施し、採取方向の異なる両供試体間の挙動の比較と、圧縮と伸張下での挙動の相違から、泥炭の異方的せん断挙動について考察し、堆積過程で形成された異方構造が等方圧縮後も保持され、その効果を変形・強度特性に顕著な影響を及ぼすことを実験的に明らかにしている。

2. 試料と実験

(1) 泥炭試料

埼玉県大宮市と浦和市郊外の水田地帯一帯に分布している2か所の泥炭地で、図-1に示すように、水平地盤において地表面に鉛直方向と水平方向とにそれぞれシウォールチューブ(直径 $D=75$ mm, 長さ $H=500$ mm)を人力で貫入して採取した不攪乱泥炭試料(V試料とH試料)を用いた。採取に際して、試料間の不均一性をできるだけ回避するために約2m×2m四方での同深さから採取することに勤めた。両泥炭地の地下水面は地表面にほぼ一致しており、表層下約2m付近まで堆積している泥炭層は完全に飽和状態にあり、原位置での有効土かぶり圧のもとで正規圧密されていた。表-1に大宮と浦和両泥炭試料の物理的諸性質を示す。自然間隙比 $e_n > 9$ (含水比 $w_n > 900$ %) で、未分解の繊維性有機物を多量に含んでいるために、試料の液性限界(L.L.)や塑性限界(P.L.)等のアッターベルグ限界を定めることが不可能であった。試料に含まれている有機物量は全実質質量に対する有機物質量の比を百分率で表わした強熱減量値(Lig)で表示してある。両試料は70%~80%の有機物量を含有しており、高有機質土に分類される。有機物の腐植の割合を示す分解度(D)は105 μmふるいを用いた水洗い法により、炭素含有量(C)はCNコーダー装置を用いた元素分析により求めた。

(2) 実験

試料は極細のピアノ線を張ったワイヤソーと薄刃型

カッターとを用いて、円柱供試体(直径50 mm, 高さ125 mm)に注意深く成形された。側面に排水用の沷紙を巻き、摩擦軽減のためシリコングリースを塗布したメンブレンを供試体上下端面に敷き、供試体の三軸セルへのセットは飽和度の低下に留意して水中で行った。供試体上端面より100 kPaの背圧を載荷して等方応力下で正規および過圧密されたVとH供試体について、ひずみ速度0.05%/minに固定した一連の非排水三軸圧縮試験と伸張試験をそれぞれ側圧(σ_r)一定のもとで軸圧(σ_a)を増加あるいは減少させることによって実施した。せん断に先立つ圧密過程と膨脹過程では、確実な過剰間隙水圧の消散と回復の確保および圧密~膨脹過程を記録するために、同一載荷手法に基づいて一段階での載荷時間を24時間とし、10~50 kPaの応力を段階的に増減して所定の拘束圧力までの載荷を行った。圧密~膨脹過程での供試体の排吸水を側面沷紙を介して供試体上端部から行い、間隙水圧は供試体底部で計測された。

過剰間隙水圧(Δu)の消散過程を示す図-2より、各圧密段階での圧密圧力の増分($\Delta \sigma_c$)に伴う発生間隙水圧の消散時間は約700~1000分であった。すべての供試体においてせん断開始時の間隙水圧による圧密度は95%以上、B値は0.98以上であったことから、すべての供試体は飽和状態にあるとみなし、一次圧密が完了したものと判断した。

3. 圧縮特性

泥炭の異方構造は等方圧密過程での体積ひずみと鉛直ひずみとの関係からも確認できる。有機物量 $Lig=70\sim 80$ % 含む大宮泥炭のVとH供試体および浦和泥炭のV供試体についての200 kPaにわたる等方圧縮試験結果を示した図-3は、泥炭要素構造が異方構造を形成していることを実証している。もしも泥炭が等方性材料であれば、等方圧縮中の体積ひずみ(v)と鉛直ひずみ(ϵ_v)の間には $v=3\epsilon_v$ の直線関係が存在する。しかし、V供試体の結果はこの関係直線の下方に、またH供試体のそれは上方にすべてプロットされている。これはV供試体では半径方向に比して鉛直方向に、逆に、H供試体では鉛直方向に比して半径方向に富んだ圧縮性を示すことを意味している。すなわち、泥炭は一般にいわれ

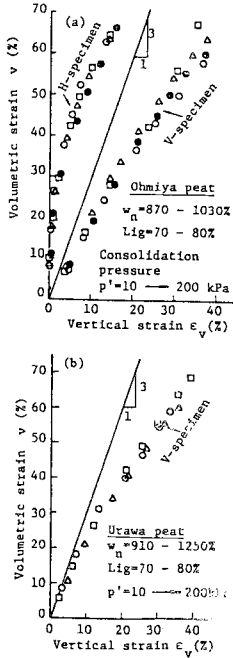


図-3 等方圧密中の体積ひずみと鉛直ひずみの関係

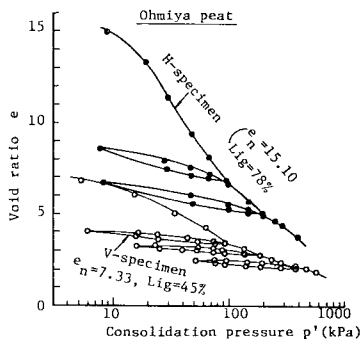


図-4 $e \sim \log p'$ 関係

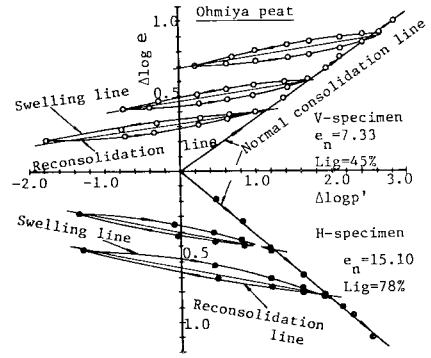


図-5 両対数紙上での $e \sim p'$ 関係

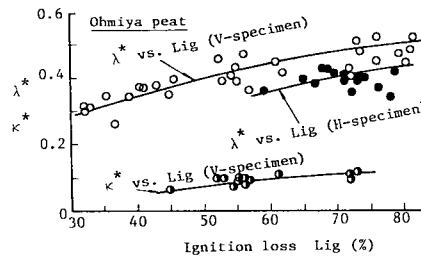


図-6 λ^* , x^* と有機物含有量との関係

ているように、堆積面方向に強く配向性をもった繊維性有機物を主体とした異方構造を形成しているといえる。しかも構造の異方性は原位置で受けていた有効土かぶり圧（約10～20 kPa）よりもきわめて大きい等方応力下で圧縮されても保持されることがわかる。

図-4はVとH供試体についての等方圧密～膨脹～再圧密曲線を片対数紙上にプロットしたものである。正規圧密領域において、対数圧力増分（ $\Delta \log p'$ ）による間隙比（ e ）の減少割合は圧縮に伴って低下する。そのため粘土等の無機質土を対象として経験的事実に基づいて定義される圧縮指数 $C_c = \Delta e / \Delta \log p'$ の概念を泥炭に直接適用すると、圧力増分に伴う圧縮量を算定するうえで不都合が生じる。この傾向は自然間隙比 $e_n > 5$ （ $Lig > 30\%$ ）の供試体で顕著であった。

そこで、図-4での正規圧密開始点からの結果を両対数紙上に再度プロットしたのが図-5である。両供試体において、正規圧密領域での $\log e \sim \log p'$ 関係は直線として近似することができる。過圧密領域での挙動に注目すると、膨脹と再圧密線は同一軌跡を示さず明瞭なループを描く。これは膨脹中の体積変化にかなりの塑性的成分が含まれていることを意味している。しかし、各先行圧密圧力から描かれるループは互いに類似した平行な位置関係を示し、そのループの平均的軌跡として引かれた直線もまた互いに平行となる。この直線によって膨脹と再圧縮時の $e \sim p'$ 関係を代表させるならば、過圧

密領域での $\log e \sim \log p'$ 関係は先行圧密圧力の大きさに依存しないとみさせる。

そこで、泥炭の場合、等方応力増分（ dp' ）に伴う間隙比増分（ de ） $_c$ とその弾性（ de ） $_e$ および塑性成分（ de ） $_p$ は

$$(de)_c = -\lambda^* e_0 \left(\frac{p'}{p_0}\right)^{-\lambda^*} \frac{dp'}{p'} \dots \dots \dots (1)$$

$$(de)_e = e_0 \left[(\lambda^* - x^*) \left(\frac{p'}{p_0}\right)^{-(\lambda^* - x^*)} - \lambda^* \left(\frac{p'}{p_0}\right)^{-\lambda^*} \right] \frac{dp'}{p'} \dots \dots \dots (2)$$

$$(de)_p = -(\lambda^* - x^*) e_0 \left(\frac{p'}{p_0}\right)^{-(\lambda^* - x^*)} \frac{dp'}{p'} \dots \dots \dots (3)$$

として近似できる。ここに、 e_0 , p_0 は膨脹開始時の間隙比と圧密圧力、 λ^* と x^* は正規圧密と過圧密領域での $\log e \sim \log p'$ 関係直線の勾配である。

図-6には圧縮指数と膨脹指数に相当するこの λ^* と x^* との値が有機物含有量（Lig）との関係でプロットされている。両係数値はLigの増大とともに増加する傾向にあり、 $Lig = 45 \sim 75\%$ 範囲でのV供試体の x^*/λ^* 値は約0.2であった。また、圧縮性に構造異方性の影響が認められ、 $Lig = 60 \sim 80\%$ の同範囲でのV供試体に対するH供試体の λ^* 値の比は約0.8であった。

4. 応力～ひずみ～間隙水圧挙動

(1) 正規圧密供試体

圧密圧力（ p_0 ）約100～350 kPaの等方応力下で正規

圧密した V と H 供試体についての非排水圧縮と伸張せん断時の軸差応力 $q = \sigma_a - \sigma_r$ と発生間隙水圧 Δu を p'_0 で正規化して軸ひずみ ϵ_a に対して図-7 と 8 にプロットしてある。供試体条件と試験条件を組み合わせた 4 種類の結果において、 p'_0 で正規化した $q/p'_0 \sim \epsilon_a$ 曲線と $\Delta u/p'_0 \sim \epsilon_a$ 曲線は圧密圧力に依存しない一義的傾向を示し、無機質粘土と同様に、泥炭の応力～ひずみ～間隙水圧挙動はせん断開始時の圧密圧力と比例的傾向を示すといえる。しかし、 $q/p'_0 \sim \epsilon_a$ 関係は V と H 供試体間のみならず、同一供試体での圧縮と伸張間でかなり異なっている。特に、両応力下での相違は H 供試体において著しい。 q/p'_0 軸あるいは ϵ_a 軸に関する応力～ひずみ曲線のこのような非対称性は、異方的構造が等方圧縮後も保持され、その効果が変形に伴って発揮されるせん断抵抗応力に反映されたものといえる。おな、図-8 に示すように、伸張試験では V と H 供試体において負の間隙水圧が発生している。これは、平均主応力 $p = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3$ が軸圧 (σ_a) の減少に伴って漸次低下することに主に起因している。そこで、発生間隙水圧 Δu に占めるせん断応力成分に起因する間隙水圧 Δu_d を p'_0 で正規化して ϵ_a との関係でプロットしたのが図-9 (記号は図-7, 8 と同じ) である。 Δu_d の挙動は Δu の挙動と同様に p'_0 で正規化表示でき、いずれの試験条件においても $\Delta u_d > 0$ を呈していることがわかる。特に、H 供試体の圧縮時と V 供試体の伸張時での Δu_d の挙動が互いに類似し、

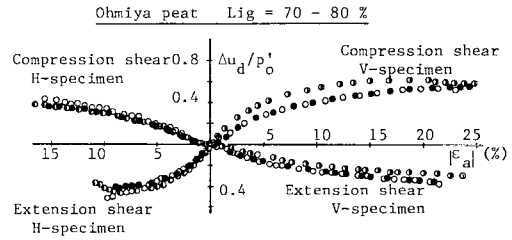


図-9 せん断応力成分に起因する間隙水圧挙動

しかも V 供試体では伸張時に比して圧縮時に、また H 供試体では圧縮時に比して伸張時において同一軸ひずみ ϵ_a での Δu_d の発生量が大きいことがわかる。次節で後述するが、これは圧縮下では V 供試体が伸張下では H 供試体が負のダイレイタンスに富んだ繊維性構造を形成していることを意味している。

(2) 過圧密供試体

先行圧密圧力 (p'_0) を 200 kPa に固定し、吸水膨張した一連の過圧密供試体についての圧縮と伸張下での $q \sim \epsilon_a$ と $\Delta u \sim \epsilon_a$ 関係を図-10 と 11 に示す。また図-12 は図-11 の結果に基づき Δu に占めるせん断応力成分に起因する間隙水圧 Δu_d を等価圧密圧力 $p'_0(p'_e$ は膨張線上におけるせん断開始時の間隙比に等しい正規圧密線上の圧力) で正規化して ϵ_a に対してプロットしたものである。

図-10 に示すように、過圧密比 (OCR) の大きい供試体はせん断開始時の圧密圧力が小さいので、当然同一軸ひずみで発揮される軸差応力 q が小さい応力～ひずみ曲線を呈するが、圧縮と伸張時の各 OCR に対応する両曲線はかなり類似している。ただ圧縮下では、かなりのせん断変形を受けても軸差応力の最大値が明瞭に現われにくいひずみ硬化型の曲線を呈する傾向にある。また、 E_{50} の変形係数を用いて両応力下での初期傾度を比較すると、OCR=4 付近までは伸張時の値が圧縮時の 1.1~1.2 倍、逆に OCR>4 では 0.5~0.7 倍であった (図略) ことから、V 供試体においては、吸水膨張に伴うせん断強度の減少割合は圧縮時に比較して伸張時において顕著であると考えられる。このことは図-10 での OCR の増大に伴う変形初期過程での圧縮と伸張時の軸差応力の発揮状況の相違からも認められる。

せん断変形に伴って発生する間隙水圧 Δu は当然 OCR の増大に伴って低下するが、図-11 に示すように、泥炭の V 供試体の圧縮下では、OCR=33 ときわめて強く過圧密された供試体において、 Δu がほぼ零で変形が進行していることがわかる。伸張下では平均主応力の減少に起因していずれの OCR の場合も Δu は負の値を取り、平均主応力が増加する圧縮下での Δu と直接比較することができない。そこで、平均主応力の変化に起因す

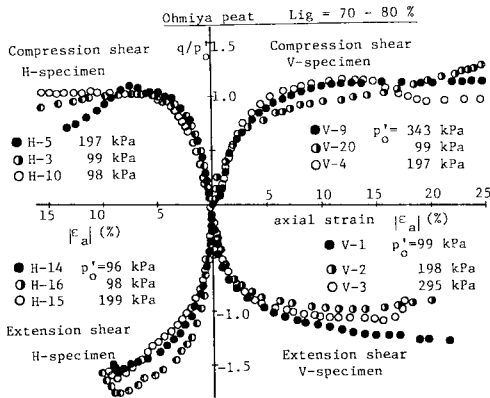


図-7 正規圧密供試体の軸差応力～軸ひずみ関係

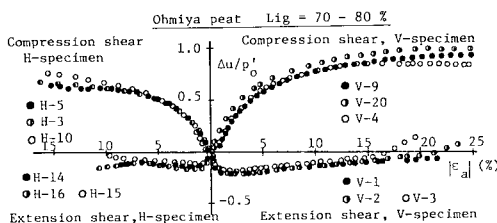


図-8 正規圧密供試体の間隙水圧～軸ひずみ関係

る間隙水圧 Δu_c を Δu から消去して、せん断応力成分に起因する間隙水圧 Δu_a の挙動を示した図-12によると、圧縮下では $OCR \approx 4$ 、伸張下では $OCR \approx 2$ 付近で Δu_a が正から負に転じる傾向を示す。しかも、同一OCRでの Δu_a は伸張下に比較して圧縮下で大きい。このことは、V 供試体では過圧密効果が伸張下に比較して圧縮下で軽減されることを意味し、圧縮下でのV 供

試体はせん断応力成分に起因する圧縮方向の間隙水圧の発生に富んだ構造を形成しているといえる。

図-13には、3種類の異なる先行圧密圧力 ($p'_0 = 100, 200, 350$ kPa) から吸水膨張したV 供試体 ($OCR = 2$ として) に関する圧縮試験から得られた間隙水圧 Δu を等価圧密圧力 p'_e で正規化し、 $OCR = 1$ の場合を併記して示してある。過圧密泥炭の発生間隙水圧は等価圧密圧力で正規化表示でき、ひずみ量と過圧密比によって規定される。すなわち、正規圧密供試体 ($OCR = 1$) の場合と同様に、せん断開始までの応力履歴が異なっても同一過圧密比であれば $\Delta u/p'_e \sim \epsilon_a$ 関係は一致するとみなせ、一般に無機質粘土について観測される結果と同様の傾向を示しているといえる。

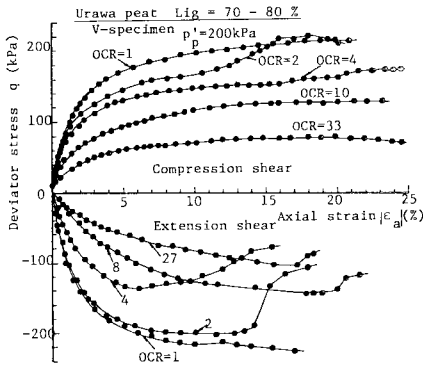


図-10 過圧密供試体の軸差応力～軸ひずみ関係

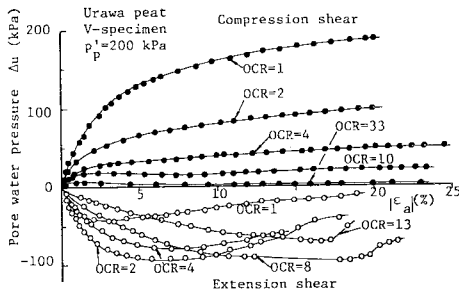


図-11 過圧密供試体の間隙水圧～軸ひずみ関係

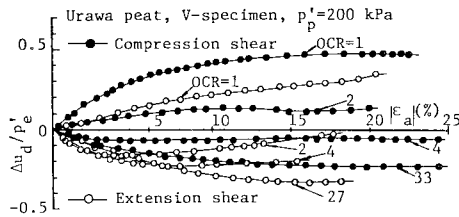


図-12 せん断応力成分に起因する間隙水圧挙動

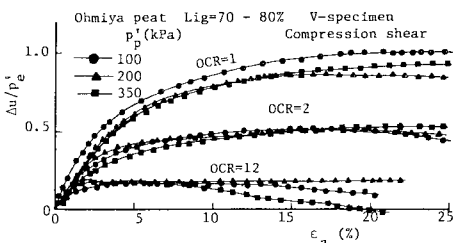


図-13 先行圧密圧力の異なる供試体間の間隙水圧挙動

5. 有効応力経路とダイレイタンス

(1) 有効応力経路

V と H 供試体 ($Lig = 70 \sim 80\%$) についての圧縮と伸張せん断時の有効応力経路を $q \sim p'$ 面上にプロットしたのが図-14～16である。ここに、 $q = \sigma_a - \sigma_r$ 、 $p' = (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3$ である。図-14は正規圧密されたV と H 供試体 (大宮泥炭)、図-15と16は過圧密されたV 供試体 (浦和と大宮泥炭) についての結果である。図-15と16中には同一軸ひずみ (ϵ_a) での有効応力状態を結んだ等ひずみ線群が描かれている。

図-14から明らかなように、正規圧密供試体についての各圧密圧力からの圧縮と伸張時の有効応力経路は、V と H 両供試体の場合において、いずれもそれぞれ相似的軌跡を描いている。しかし、V と H 供試体での有効応力の軌跡のみならず、同種の供試体での圧縮と伸張時での軌跡は互いに大きく異なっている。圧縮下ではH 供試体の有効応力経路はV 供試体のそれより原点から遠ざかる傾向にあり、伸張下ではV 供試体でその傾向が認められる。このような挙動の相違は堆積中に形成されていた泥炭の異方構造が等方圧縮されても保持され、異方性の効果が有効応力の変化に明瞭に反映されていることを裏付けている。これは全応力経路と有効応力経路との横距で表わされる発生間隙水圧 Δu 、特に、せん断応力成分に起因する間隙水圧 Δu_a の発生状況の相違によっている。すなわち、図-9で記述したように、圧縮下でのV 供試体の Δu_a の発生量はH 供試体のそれに比較して大きいのに対し、伸張下では逆の傾向が生じているからである。以上の応力経路の軌跡からも圧縮下ではV 供試体が、伸張下ではH 供試体が負のダイレイタンス (体積収縮) 方向に富んだ繊維性配列構造を成しているといえる。

図-15と16は、有効応力の軌跡がせん断開始までの泥炭要素が受けてきた応力履歴、すなわち、過圧密比

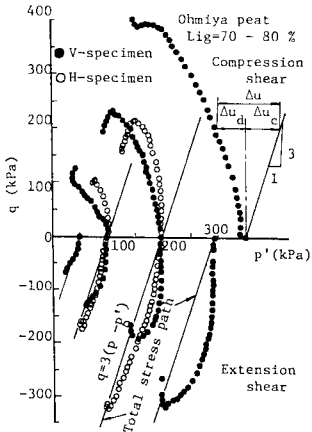


図-14 正規圧密供試体の有効応力経路

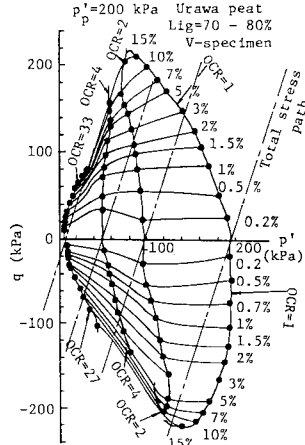


図-15 過圧密供試体の有効応力経路

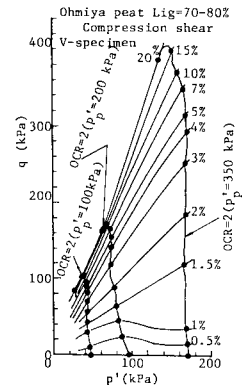


図-16 有効応力経路と等ひずみ線 (OCR=2)

(OCR) や先行圧密圧力 (p'_p) の相違によってどのように変化するかを調べたものである。図-15には $p'_p=200$ kPa に固定した各種の過圧密比の場合の圧縮と伸張せん断時の有効応力経路を、図-16には $p'_p=100, 200, 350$ kPa と異なるが同一過圧密比 (OCR=2) の場合の圧縮せん断時の応力経路をプロットしてある。図-16に示すように、同一OCRの過圧密供試体間の有効応力経路は正規圧密供試体の場合(図-14参照)と同様に相似的軌跡を呈するが、図-15から明らかなように、OCRによって大きく左右される。OCR=2の大宮と浦和両泥炭の有効応力経路は非排水試験にもかかわらず、平均有効主応力 p' がほぼ一定に保持されて軸差応力 q が増大し、 q 軸に平行的軌跡を示す。OCR>2の供試体では、 q とともに p' が増大し応力経路が正規圧密供試体 (OCR=1) の場合と逆に原点から遠ざかる傾向にある。これは、図-12で記述したように OCR=4 付近を境として、せん断応力成分に起因する間隙水圧 Δu_a が正から負に転じるためである。しかし OCR の増大に伴う Δu_a の発生状況が圧縮と伸張時で異なるために(図-12参照)、圧縮と伸張時の有効応力経路は必ずしも p' 軸に対称とはならない。なお、OCR=33の供試体における圧縮下での有効応力経路が全応力経路の左側に位置していることは、平均主応力増分 $\Delta p (= \Delta \sigma_a / 3)$ に起因する間隙水圧 $\Delta u_c (= \Delta p)$ と $|\Delta u_a|$ との大小関係が $\Delta u_c > |\Delta u_a|$ であることを示し、全間隙水圧 $\Delta u (= \Delta u_c + \Delta u_a)$ が負にならないことに対応している(図-11参照)。

図-15と16中に描かれた等ひずみ線群は各供試体間における同一軸ひずみ ϵ_a での (q, p') 点を結んだ線であることから、せん断抵抗角の動員状況と変形に伴うせん断抵抗角の推移状況を表わすという物理的意味をもつ

ている。図-15に示すように、OCRの異なる供試体間に描かれた等ひずみ線群は圧縮と伸張下で多少異なっている。しかし特に、 $\epsilon_a < 5\%$ 範囲では両応力下での等ひずみ線は p' 軸に平行になる傾向を示している。このことは、同一軸ひずみで動員されるせん断抵抗角が応力履歴 (OCR) に依存し、OCRの大きい供試体ほど同一ひずみで発揮されるせん断抵抗角が増大することを意味している。そこで、図-16より、同一過圧密比 (OCR=2) の供試体におけるせん断抵抗角の動員状況をみると、等ひずみ線群がほぼ原点を通る直線群としてみなすことができることから、せん断開始まで受けてきた応力履歴(先行圧密圧力)が異なっても過圧密比が等しければ、同一ひずみで動員されるせん断抵抗角は一致すると考えられる。このような結果は図-14で示した圧密圧力の異なるVおよびHの正規圧密供試体 (OCR=1) 間の圧縮と伸張下においてもそれぞれ確認された。以上のことから、泥炭の変形に伴って動員されるせん断抵抗角は構造異方性の影響を受けるが、同一試験条件下ではひずみ量と過圧密比に依存するパラメーターであるといえる。

(2) ダイレイタンスー

ダイレイタンスーとはせん断応力成分に起因する体積変化を意味し、土骨格を構成する土粒子の接触点での回転やすべりによって起こる相対的変位の結果として生じるものであるといわれている。かようなことからすれば、有機物と土粒子との構成比率によって、無機質粘土→低有機質粘土→高有機質土(泥炭)に至るに従い、土は当然構造異方性に富むことから、泥炭のダイレイタンスー挙動を究明することは広義の意味で土のせん断機構と構造異方性との関連について解明するのに重要な役割を果たすといえる。

本試験ではすべて非排水試験であるため、ダイレイタ

ンシー量を直接測定することはできない。ここでは、非排水試験結果に基づいて計算されるダイレイタンスー相当量を用いて、泥炭のダイレイタンスー挙動に及ぼす構造異方性と過圧密比との効果について考察する。

一般に、せん断過程での土要素の全体積ひずみ v は等方応力成分によるもの v_c とせん断応力成分によるもの (ダイレイタンスー) v_a との和として与えられる。非排水試験では $v=0$ であるから、 $v_a = -v_c$ となる。よって、 v_a は式 (1) の積分から次式で与えられる。

$$v_a = -\frac{e_0}{1+e_0} \left[1 - \left(\frac{p'}{p'_0} \right)^{-\lambda^*} \right] \dots\dots\dots (4)$$

上式で定義される v_a は非排水試験での平均有効主応力 p' の変化から推定されるダイレイタンスー量であるため、ダイレイタンスー相当量とよぶ。なお、過圧密比 $OCR > 2$ の供試体については λ^* の代わりに λ^* を用いて v_a の算定を行った。

図-17 (a) と (b) は大宮と浦和泥炭について、約 100~350 kPa の範囲の圧密圧力 (p'_0) のもとで正規圧密された V と H 供試体についての圧縮と伸張せん断時のダイレイタンスー相当量 v_a を応力比 q/p' との関係でプロットしたものである。図-17 (a) に示す供試体と載荷条件を組み合わせた 4 種類の結果に注目すると、 p'_0 の大きさ、すなわち、供試体の含水比状態によらずダイレイタンスー相当量はそれぞれ応力比と一義の関係にあるとみなせる。V 供試体では伸張下に比較して圧縮下で負のダイレイタンスー (体積収縮) に富み、ダイレイタンスー相当量は応力比とほぼ比例的関係にある。上述のことは、浦和泥炭の V 供試体についての圧縮と伸張時での結果についても認められることが図-17 (b) からわかる。これに対して、H 供試体ではまったく逆の傾向がみられる (図-17(a) 下半部参照)。しかも、興味あることは、V 供試体の圧縮下と H 供試体の伸張下、V 供試体の伸張下と H 供試体の圧縮下での $v_a \sim q/p'$ 関係が原点についてほぼ互いに点対称な関係にあることである。この結果は図-9 で記述した Δu_a の挙動に対応しており、泥炭のようにきわめて異方性に卓越した地盤材料では V 供試体の圧縮下と H 供試体の伸張下で示すダイレイタンスー挙動はきわめて類似し、一方のせん断挙動から他方のせん断挙動を推測できる可能性を与えている。著者ら^{6), 11)} は図-17 に示す $v_a \sim q/p'$ 関係に基づき、 v_a を q/p' の一次あるいは指数関数として近似し、ケンブリッジ理論に組み込むことによって、正規圧密泥炭の三軸圧縮と伸張下での応力~ひずみ関係を系統立てて論じ得る手法を提案した。なお、図-17 で V 供試体の圧縮下と H 供試体の伸張下での v_a は q/p' と比例の関係にあることを指摘したが、著者ら¹¹⁾ は q/p' に伴う v_a の増加割合は有機物含有量とともに増大し、有機物

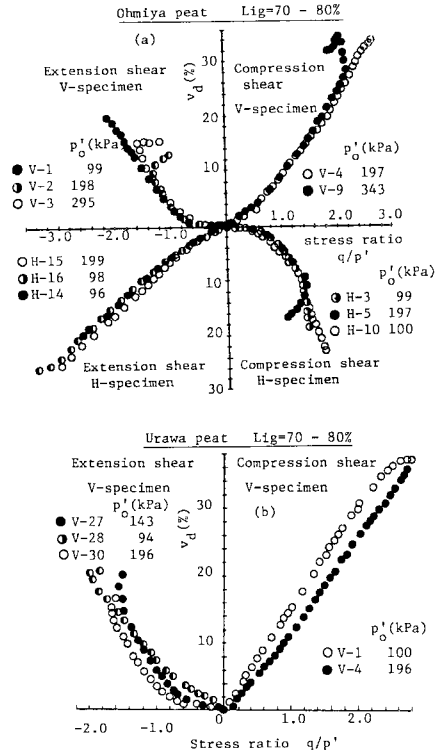


図-17 正規圧密泥炭のダイレイタンスー~応力比関係

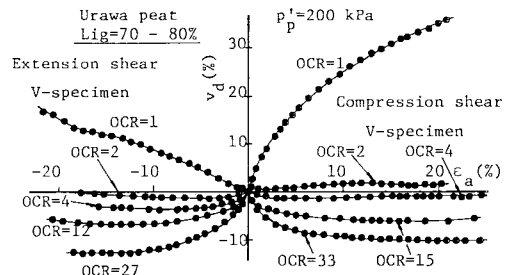


図-18 過圧密泥炭のダイレイタンスー挙動

含有量の度合はダイレイタンスー係数の変化としてとらえることができ、巨視的には、泥炭の $v_a \sim q/p'$ 関係は無機質粘土の延長線上に位置づけられ得ることを報告している。さらに、著者ら¹²⁾ は泥炭と粘土の排水三軸圧縮試験から、両試料でのせん断中の体積変化量は大きく異なるが、全体積変化量 (v) に占めるダイレイタンスー量の割合は約 30% となり、泥炭と粘土であまり変わらないことを指摘している。

図-18 は V 供試体を用いて、泥炭のダイレイタンスー挙動に及ぼす過圧密効果を調べるために、 v_a を軸ひずみ ϵ_a との関係でプロットしたものである。図-12 での記述から予想されることであるが、圧縮下では $OCR=3$ 付近、伸張下では $OCR=2$ 付近の供試体を境

として体積変化が収縮 ($v_a > 0$) から膨張 ($v_a < 0$) に転じ、OCRの増大に伴って膨張量が増加する。また、伸張下に比較して圧縮下において、OCRの増大に伴って生じ得る体積変化範囲が大きく、しかもOCR=33と強く過圧密された供試体の膨張量が正規圧密供試体(OCR=1)の圧縮量に比較してかなり小さい。このことから、圧縮下におけるV供試体では過圧密効果が軽減される傾向にあり、伸張下に比較して正のダイレイタンスーを起こしずらく、圧縮性に富んだ構造を成しているといえる。

6. 非排水強度特性

破壊を軸差応力が最大に発揮される応力状態(サフィックス f を付す)と定義し、泥炭が示す異方的強度パラメーターについて記述する。図-19は正規圧密泥炭についての破壊時の有効応力状態を $q_f \sim p'_f$ 面上に、図-20と21はそれぞれ非排水せん断強さ $c_u = |q_f/2|$ と間隙圧係数 A_f とを圧密圧力 (p'_0) との関係でプロットしたものである。図-19(a)での記号 M と m は直線によって近似された破壊包絡線の勾配と鉛直切片である。有効せん断抵抗角 ϕ' と粘着切片 c' はこの両係数を用いて、また A_f はそれぞれ次式より求められる。

$$\text{三軸圧縮: } \phi' = \sin^{-1}\left(\frac{3M}{6+M}\right), \quad c' = \frac{3 - \sin\phi'}{6\cos\phi'} m$$

$$A_f = \frac{\Delta u_f}{\Delta \sigma_{ar}} \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{三軸伸張: } \phi' = \sin^{-1}\left(\frac{3|M|}{6-|M|}\right), \quad c' = \frac{3 + \sin\phi'}{6\cos\phi'} |m|$$

$$A_f = 1 - \frac{\Delta u_f}{\Delta \sigma_{ar}} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 M と m は圧縮で正、伸張で負である。泥炭では繊維の引張強さが発揮され、正規圧密供試体でも c' が存在する。そのため、図-20での $(\sigma_{ar} - \sigma_{rf})/2 \sim p'_0$ の関係は当然鉛直切片をもつが直線で近似できる。この直線の勾配 (c_u/p'_0) は圧密による非排水せん断強さの増加割合を示すパラメーターに対応している。表-2は大宮と浦和泥炭との正規圧密供試体についての各種の非排水強度パラメーター値をまとめたものである。

上の ϕ' の値は $0 \sim 90^\circ$ 範囲にある。この範囲に対応する M の範囲は式(5)と(6)から

$$-1.5 < M < 3 \dots \dots \dots (7)$$

となる。すなわち、 M がこの範囲にあれば ϕ' と c' が求められる。しかし表-2からわかるように、大宮泥炭のH供試体の伸張試験から得られた M 値は -2.97 であるため、 ϕ' と c' を求めることができないという奇妙な現象が生じている。そこで、図-19の結果を $(\sigma_{ar} - \sigma_{rf})/2 \sim (\sigma_{ar} + \sigma_{rf})/2$ 面上に再度プロットし、有

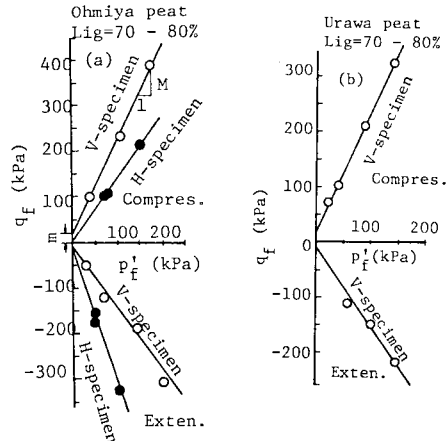


図-19 正規圧密泥炭の破壊時の応力状態

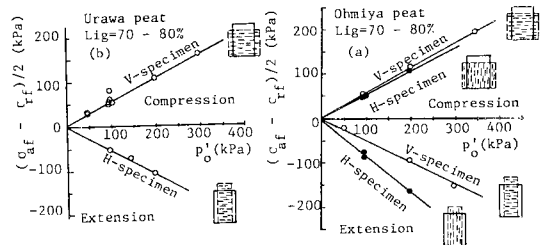


図-20 正規圧密泥炭の非排水強度～圧密圧力関係

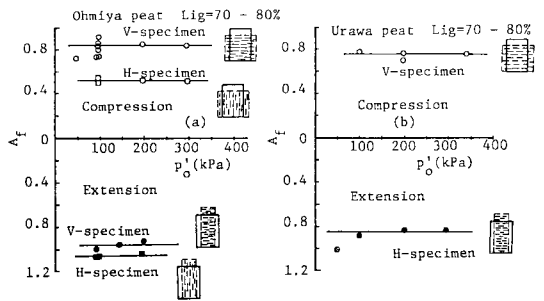


図-21 正規圧密泥炭の破壊時の間隙圧係数

効応力表示によるモールの応力円を描いたのが図-22である。図-22(a)でのH供試体の伸張下での応力円に着目すると、破壊時の最小有効主応力 (σ'_{a1}) が負となっており、この傾向が破壊時の最大有効主応力 (σ'_{r1})、すなわち、せん断開始時の圧密圧力が大きい供試体ほど顕著となっている。そのため、圧密圧力の大きい供試体のモール円が圧密圧力の小さい供試体のそれを包むような位置関係を取り、圧密圧力の異なる各応力円に外接する接線を引くことができない。そこで、 $q_f \sim p'_f$ 面上では破壊包絡線を引き M と m の値を定めることはできるが、 ϕ' と c' の値を求めることができない。これは負の有効応力に起因するものと考えられる。 ϕ' と c' は決

表-2 正規圧密泥炭の非排水強度パラメーター

Strength parameters	Ohmiya peat				Urawa peat	
	V-specimen		H-specimen		V-specimen	
	Compression	Extension	Compression	Extension	Compression	Extension
M	2.14	-1.36	1.43	-2.97	2.19	-1.42
m (kPa)	7	-4	1	-5	16.4	-10.7
ϕ^i (°)	51.0	61.6	35.3	-	53.2	68.3
c_u^i (kPa)	4.0	5.4	0.5	-	10.0	18.9
c_u/p_0^i	0.55	0.62	0.53	0.80	0.52	0.57
A_E	0.84	0.96	0.52	1.06	0.88	0.92

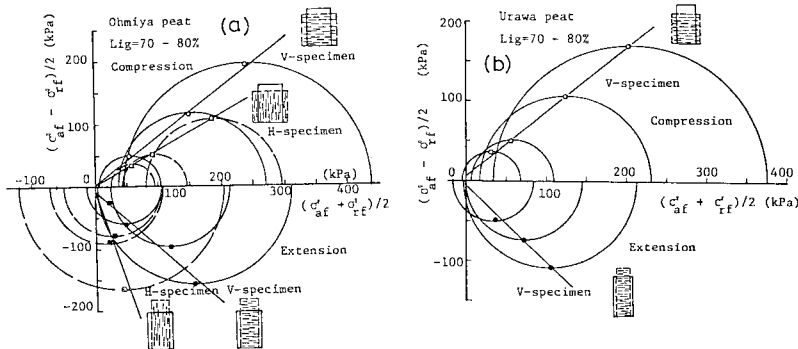


図-22 正規圧密泥炭のモール円

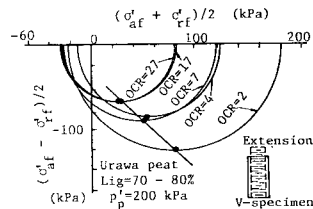


図-23 過圧密泥炭のモール円

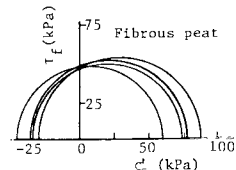


図-24 非圧密非排水試験での有効応力表示によるモール円¹⁾

定できるが、図-22 (b) と図-23 に示すように、浦和泥炭の正規圧密 V 供試体（圧密圧力 100 kPa）の圧縮と伸張時に、また過圧密 V 供試体の伸張時に負の最小有効主応力が観測された。Hanrahan¹⁾ は、飽和繊維性泥炭についての非圧密非排水圧縮試験（UU 試験）を実施し、非排水せん断中の間隙水圧が拘束圧力より大きくなることを指摘し、本結果と同様に、最小有効主応力が負となる応力円が得られることを報告している（図-24 参照）。当然このような結果は泥炭中に含まれている繊維性有機物の効果によるものと考えられる。このことから判断すると、図-22 (a) で指摘した H 供試体の伸張試験で、 ϕ' と c' を定めることができない主要な原因は、せん断開始の繊維の配列方向とせん断中の変形方向との関連において、繊維の引張強さが予想以上に強度パラメーターに寄与していることにあると考えられる。

ところで表-2 より明らかなように、泥炭はきわめて異方的強度パラメーター値を示す。V 供試体の圧縮下での ϕ' は伸張下でのそれより 10~15° 小さいが 50° 以上の値を示し、H 供試体の圧縮下での 35° に比較して非常に大きい。また、いずれの場合も $c_u/p_0^i > 0.5$ となり、特に、H 供試体の伸張下では 0.8 というきわめて大きい値が測定された。同様の傾向が c' についてもみられる。泥炭の大きな強度パラメーター値は他の研究者によっても報告されている^{1)~10)}。著者ら¹³⁾ は、泥炭のきわめて大きな c_u/p_0^i と ϕ' は大略的には無機質粘土の延長線上に位置づけられ、特に大きな ϕ' を示す泥炭のような土質では圧縮下に比較して伸張下でかなり大きな ϕ' が観測されることを、各種無機質粘土に関する結果との

対比から指摘した。なお、 A 値についても、当然異方性の影響はみられるが、図-21 に示すように、それはほぼ 1.0 付近あるいはそれ以下となる。この結果が圧密圧力 (p_0^i) の大きさに依存しないとみなせることは無機質粘土と類似した傾向を与えているといえる。

以上の結果から、等方正規圧密泥炭の非排水強度パラメーター値の大小関係を供試体条件と載荷条件とから区分して示すと次のように表示できる。

- V 供試体：圧縮試験 > 伸張試験
- H 供試体：圧縮試験 < 伸張試験
- 圧縮試験：V 供試体 > H 供試体
- 伸張試験：V 供試体 < H 供試体

なお、吸水除荷に伴う過圧密泥炭の圧縮下と伸張下での A_r と c_u/p_0^i の値は、粘土に関する整理法^{14),15)} と同様に、正規圧密泥炭のそれらを用いて次式として表示できる⁶⁾。

$$(c_u/p_0^i)_{OP} = \overline{(c_u/p_0^i)_{NP}} (\text{OCR})^{1-\alpha} \dots \dots \dots (8)$$

$$(A_r)_{OP} = (A_r)_{NP} - \frac{1}{2(c_u/p_0^i)_{NP}} [1 - (\text{OCR})^{\alpha-1}] \dots \dots \dots (9)$$

ここに、サフィックス NP と OP は正規圧密と過圧密泥炭を意味し、OCR は過圧密比、 $\alpha = \kappa^*/\lambda^*$ である。

7. 結 論

(1) 原位置に堆積している泥炭はきわめて異方的繊維性配列構造を形成している。しかも、この構造異方性は原位置で受けていた有効土かぶり圧よりもかなり大きな等方応力下で圧密しても保持され、異方性の効果が以後のせん断特性に明瞭に反映されることが確認された。

(2) 同一採取方向の正規圧密供試体間のせん断挙動は圧縮と伸張せん断で大きく異なるが、同一せん断方向間の挙動は圧密圧力の大きさに対して比例的傾向を示し、せん断開始時の圧密圧力を用いて、また過圧密供試体の挙動は等価圧密圧力を用いて正規化表示できる。

(3) 水平地盤において、せん断時の最大主応力の方向が原位置での鉛直応力の方向と一致するようにせん断変形を受ける場合、泥炭は負のダイレイタンスに富んだせん断変形を呈し、過圧密効果が軽減される傾向を示す。

(4) 正規圧密された繊維性泥炭は粘着切片をもち、きわめて異方的強度特性を示す。しかも、無機質に比較してかなり大きな強度パラメーター値が観測される。なお、繊維の配列方向と変形方向との関連において、発揮される繊維の引張り強さの効果の相違によって、 ϕ' と c' が求められない場合も生じる。

謝 辞：本研究の遂行に当たり、本科28期生 柴田健司、藤田秀光両君には、実験およびデータ整理で多大な協力を受けた。記して謝意を表します。また、防衛大学校共同利用器材粉粒体物性測定室のCNコーダー装置を使用させていただき、便宜を計って下さった関係各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Hanrahan, E. T. : An Investigation of physical properties of peat, *Geotech.*, Vol. 4, No. 3, pp. 108~123, 1967.
- 2) Adams, J. I. : Laboratory Compression test on peat, *Ontario Hydro Research News*, Third quarter, pp. 35~40, 1962.
- 3) Adams, J. I. : The engineering behavior of a Canadian Muskeg, *Proc. of 6th ICSMFE*, Vol. 1, pp. 3~7, 1965.
- 4) Ozden, Z. S. and Wilson, N. E. : Shear strength characteristics and structure of organic soils, *Proc. of 13th Muskeg Research Conf. NRC, Canada*, pp. 8~26, 1970.
- 5) 及川 洋・宮川 勇：乱さない泥炭の非排水せん断特性，土質工学会論文報告集，Vol. 20, No. 3, pp. 91~100, 1980.
- 6) 山口晴幸・森 茂・大平至徳・木暮敬二：過圧密泥炭の非排水せん断特性，土木学会論文集，第358号/Ⅲ-3, pp. 119~128, 1985.
- 7) Khattak, A. S. and Das, B. M. : Effect of high excess pore pressure on strength parameters of organic soil, *Technical note, Soils and Foundations*, Vol. 25, No. 1, pp. 99~104, 1985.
- 8) 対馬雅己・及川 洋：泥炭性有機質土の強度とダイレイタンスについて，土質工学会論文報告集，Vol. 22, No. 2, pp. 133~141, 1982.
- 9) 対馬雅己：泥炭性有機質土のせん断特性に関する実験的研究，土質工学会論文報告集，Vol. 24, No. 3, pp. 159~167, 1984.
- 10) Edil, T. B. and Dhowian, A. W. : At-rest lateral pressure of peat soils, *Proc. ASCE*, Vol. 107, No. GT2, pp. 201~217, 1981.
- 11) Yamaguchi, H., Ohira, Y., Kogure, K. and Mori, S. : Undrained shear characteristics of normally consolidated peat under triaxial compression and extension conditions, *Soils and Foundations*, Vol. 25, No. 3, pp. 1~14, 1985.
- 12) Yamaguchi, H., Ohira, Y. and Kogure, K. : Volume change characteristics of undisturbed fibrous peat, *Soils and Foundations*, Vol. 25, No. 2, pp. 119~134, 1985.
- 13) 森 茂・大平至徳・山口晴幸：過圧密泥炭の非排水三軸圧縮・伸張挙動，第39回土木学会年次講演概要集，Ⅲ，pp. 749~750, 1984.
- 14) Mitachi, T. and Kitago, S. : Change in undrained shear strength characteristics of saturated remolded clays due to swelling, *Soils and Foundations*, Vol. 16, No. 1, pp. 45~58, 1976.
- 15) 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，Vol. 8, No. 4, pp. 103~143, 1969.

(1985. 3. 22・受付)