

泥炭性有機質土のダイレイタンシー特性に及ぼす応力履歴の影響

(Influence of Stress History on Dilatancy Characteristics of Peat)

対馬 雅己* (Masaki Tsushima)

三田地 利之** (Toshiyuki Mitachi)

キーワード：応力-ひずみ曲線／異方性／過圧密／
三軸圧縮試験／せん断強さ／ダイレイタンシー／内
部摩擦角／有機質土 (IGC: D5/D6)

1. ま え が き

泥炭性有機質土から成る地盤は、一般に知られているように、土質工学上軟弱地盤の最も典型的な事例であって、構造物等の基礎地盤としては極めて不安定なものである。したがって、構造物等の荷重強度がある程度大きくなると、基礎地盤としての泥炭層は、支持力を失い、せん断による変形が生じ、更に破壊に至る場合もある。このため、泥炭性地盤が土質工学的な検討の対象となるのは、荷重強度の比較的小さい構造物等に限定されることが多い。

この地盤上における構造物の安定、沈下圧縮など変形の問題を工学的に処理するにあたって、その工学的な取り扱い方や考え方の基本的な部分に最も重要な問題を含んでいると考えられる。

泥炭性有機質土のせん断強さは、多くの場合設計計算に供する観点から、原位置試験結果を用いた検討が行われてきた。しかしながら、原位置試験における挙動は多くの場合、いくつかの複雑な要素が重なり合った状態で発揮され、また測定内容の不明確さをもつことが避けられないので、その基本的性質の把握は容易ではないと考えられる。これに対して室内試験では、その結果に及ぼす要因をある程度制御することが可能であるため、種々の応力・変形条件のもとで、泥炭性有機質土のせん断挙動を把握できるものと期待される。

著者は、過去の研究で正規圧密状態における泥炭性有機質土の軸対称三軸圧縮試験を実施し、非排水および排水条件におけるせん断抵抗角は、ともに圧密時の応力の異方性による影響を受けずほぼ一定となり、かつ排水条件にかかわらず一致することを明らかにした^{4),5)}。更に、

非排水および排水条件におけるダイレイタンシーが、表裏一体の関係にあり、かつ圧密時の応力の異方性の影響を受けないことを実験的に確かめる^{4),5)}とともに、等方圧密土のダイレイタンシー式を、平均有効主応力一定試験によって検証した⁵⁾。

本研究は、従来の研究を更に発展させる意味で、泥炭性有機質土のせん断特性、特にダイレイタンシー特性に及ぼす応力履歴の影響を調べたものであって、まず、前報⁵⁾で提案した異方圧密土についてのダイレイタンシー式を異方圧密後の平均有効主応力一定試験によって検証している。次に、過圧密状態における泥炭性有機質土のダイレイタンシー特性についてほとんど知られていないことに着目し、等方的に圧密・膨張した泥炭性有機質土、粘土およびその混合土についての側圧一定排水試験におけるダイレイタンシー特性を検討している。更に、乱した試料に関するこれまでの研究成果を基礎として、乱さない泥炭性有機質土の等方圧密非排水条件下でのせん断特性について考察を加えている。

2. 実 験

2.1 乱した試料および実験方法

実験に用いた試料は、秋田県雄物川流域から採取したもので、日本統一土質分類法による黒泥 (Mk) と粘土 (CH) である。更に、これらの試料のほかに黒泥、粘土の乾燥質量をそれぞれ M, C としたとき、乾燥質量比として $M/(C+M)$ が 50% になるように混合した試料をも用いた (以下、泥炭性有機質土：試料 P, 粘土：試料 C, 混合土：試料 CP と呼称する)。それらの物理的性質は、表-1 に示すとおりである。これらの試料を液性限界以上の高含水比で十分練り返したものを、気泡が混入しないように注意しながら圧密容器に入れ、各試験条件で規定した各側圧の 50% の圧力で約 24 時間予圧

表-1 乱した試料の物理的性質

試料	比重	液性限界 (%)	塑性指数	強熱減量値 (%)	圧縮指数	分解度 (%)
P	1.82	430	237	56	1.79	78.3
CP	2.17	201	96	34	1.32	—
C	2.68	68	32	6	0.30	—

* 秋田工業高等専門学校土木工学科 講師 (秋田市飯島文京町 1 の 1)

** 北海道大学工学部土木工学科 教授 (札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
(1984.12.12 原稿受付・討議期限 1986.4.1, 要請があれば 1 か月の期限延長可能)

密した。供試体は予圧密終了後、直径 35.0mm、高さ 87.5mm の円柱形に成形し圧密を促進するためにドレーンペーパーを供試体側面に巻いた。また、供試体上下端面における摩擦を軽減するために、シリコングリースを塗ったドーナツ型のメンブレンを用いた。すべての供試体について、100kPa のバックプレッシャーを圧密過程から適用した。なお、泥炭性有機質土については、練返しの際、その繊維質部分が破損しないように注意した。更に、供試体の成形時においてワイヤーソーでは泥炭の繊維などがうまく切れない場合もあり、このためカッターナイフなどを用意して慎重に行った。

試験は異方圧密後の平均有効主応力一定排水試験および等方圧密膨張排水試験であり、各試験の概要は以下のようである。

(1) 異方圧密後の平均有効主応力一定排水試験（応力制御方式）

60, 90, 120, 150kPa の 4 種類の側圧に対して、それぞれ圧密時の有効主応力比 $K=0.8, 0.6, 0.4$ で異方圧密した後、平均有効主応力一定排水試験を行う。異方圧密は、最小主応力 σ_3 を一定とし、最大主応力 $\sigma_1(=\sigma_3/K)$ を作用させ所定の主応力比の状態を保つ方法で行った。更に、異方圧密 (σ_{mc}) 終了後、 σ_{mc} の値を変えないように軸差応力 $(\sigma_1-\sigma_3)_d$ を加えると同時に最小主応力 σ_3 を減少させ、供試体の排水を許しながら段階的に $(\sigma_1-\sigma_3)_d$ を増加させた。異方圧密の終了は、残留間隙水圧が異方圧密圧力 (σ_{mc}) の 2% 以下という条件とした。各荷重段階における $(\sigma_1-\sigma_3)_d$ の増分は、各 σ_{mc} に対して応力比 $(\sigma_1-\sigma_3)_d/\sigma_{mc}=0.15$ と規定し、各荷重荷重による排水時間は約 24 時間とした。

軸方向変位は、ダイヤルゲージで測定し、軸圧はペロフラムシリンダーからプルービングリングを介して作用させ、体積変化量は供試体の半径方向の排水をドレーンペーパーを介して上部キャップに集め、ビューレット（最大容量 50ml、最小目盛 0.1ml）によって測定した。なお、この試験は軸ひずみが約 8% 程度で終了とした。

(2) 等方圧密膨張排水試験

60, 120, 180, 240kPa の 4 種類の圧力で等方圧密した後、各圧力についてそれぞれ 3, 9, 15, 21 の過圧密比で等方的に吸水膨張させ、側圧一定の排水三軸圧縮試験を行う。圧密の終了は有効応力で規定し、残留間隙水

圧が圧密圧力の 3% 以下という条件で圧密の終了とした。等方膨張過程では、圧力を一挙に所定圧まで下げて行い、吸水膨張による体積変化量は供試体の上部キャップを経由して吸水された量をビューレット（最大容量 10ml、最小目盛 0.05ml）によって測定した。また、この吸水膨張における時間は 24 時間とした。軸方向変位はダイヤルゲージ、軸圧はプルービングリングで測定した。せん断過程における軸変位速度は $8.5 \times 10^{-4} \text{mm/min}$ （ひずみ速度で約 0.001%/min）で行い、体積変化量はビューレット（最大容量 50ml、最小目盛 0.1ml）によって求めた。

2.2 乱さない試料および実験方法

実験に用いた試料は、秋田県雄物川流域および八郎潟周辺から採取した 4 種類の乱さない泥炭性有機質土であって、物理的性質を表-2 に示す。この表には各試料について、日本統一土質分類法による分類名をも併記している。また、表で示している液性限界値の測定に際しては、試料の中央の溝が繊維などでうまく切れない場合もあるため、カッターナイフを併用して慎重に行った。試料の採取は、内径 70mm、長さ 300mm のサンプリングチューブを表層付近の泥炭層に押し込んで採取したものである。供試体は、サンプリングチューブから押し出した試料をカッターナイフなどで慎重に上下端面のみを仕上げたもので、直径 70mm、高さ 150mm の円柱形である。また供試体上下端面における摩擦の軽減および圧密の促進方法は、前述の 2.1 と同様である。すべての供試体について、100kPa のバックプレッシャーを圧密過程から適用した。

試験は、所定の圧力で等方圧密した後の非排水三軸圧縮試験である。圧密の終了判定および軸方向変位、軸圧の測定は前述の 2.1 と同様である。発生間隙水圧 Δu の測定は供試体の底端部において水銀マノメーターによりゼロ位法で行い、軸変位速度は $14.0 \times 10^{-2} \text{mm/min}$ （ひずみ速度で約 0.1%/min）で実施した。

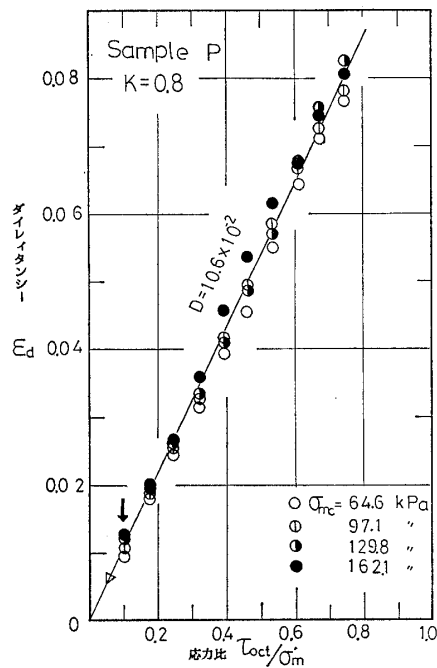
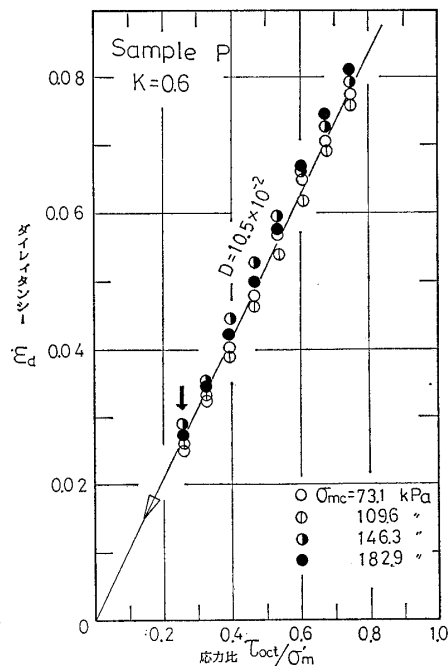
3. 実験結果および考察

3.1 異方圧密土の非排水および排水条件下におけるダイレイタンシー式の検証

図-1～3 は応力比 0.8～0.4 で異方圧密された試料 P についての平均有効主応力一定排水試験から得られたダ

表-2 乱さない試料の物理的性質

試料	分類名	自然含水比 (%)	比重	液性限界 (%)	塑性指数	強熱減量値 (%)	圧縮指数	分解度 (%)
No.1	黒泥 (Mk)	336	1.97	315	148	44	2.79	73.1
No.2	黒泥 (Mk)	400	1.75	416	215	54	3.59	83.8
No.3	黒泥 (Mk)	440	1.72	512	216	55	3.65	84.9
No.4	ビート (Pt)	720	1.50	693	363	93	5.38	41.0

図-1 ε_d と τ_{oct}/σ'_m の関係図-2 ε_d と τ_{oct}/σ'_m の関係

イレイトンシー ε_d (収縮) と正八面体面上の応力比 τ_{oct}/σ'_m との関係を示したものである。図中の矢印は圧密終了時の $\varepsilon_d \sim \tau_{oct}/\sigma'_m$ の関係を表すもので、この点の ε_d は次のようにして算出されたものである。すなわち、異方圧密中の全体積変化量から次式⁵⁾によって表される平均有効主応力の増分による体積変化量を差引いて求められる。

$$3C_m \cdot \Delta\sigma'_m = \frac{c_c}{(1+e_0)} \log_{10}(\sigma'_m + \Delta\sigma'_m) / \sigma'_m \quad (1)$$

ここに、 $3C_m$ は平均有効主応力の変化による土骨格の

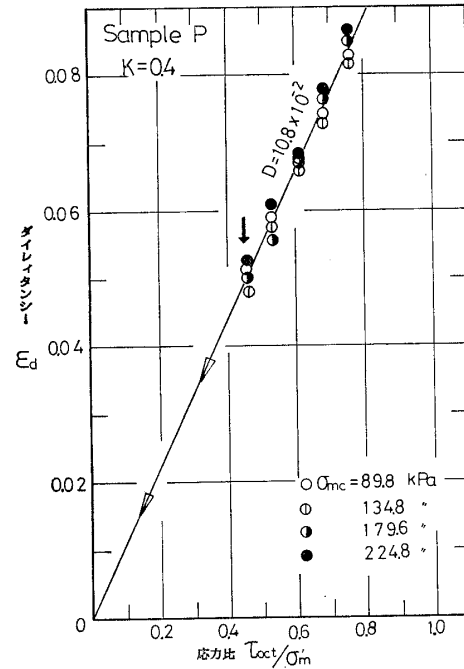
図-3 ε_d と τ_{oct}/σ'_m の関係

表-3 側圧一定非排水、排水および平均有効主応力一定試験によるダイレイタンス係数

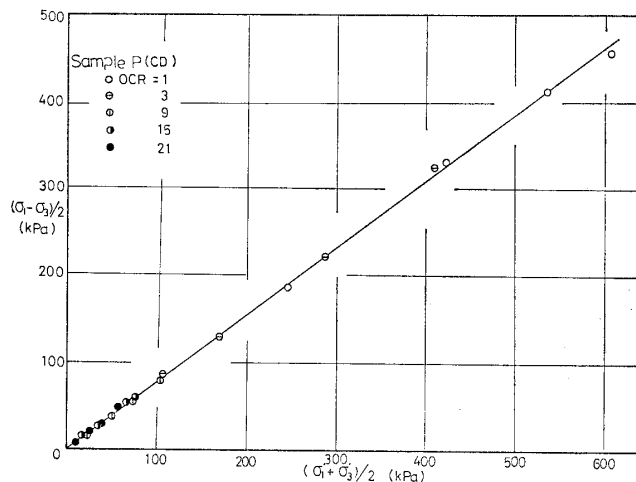
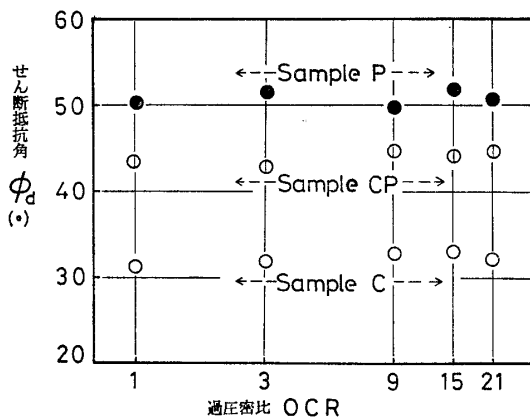
K 値		1.0	0.8	0.6	0.4
Sample P	$D_u (\times 10^{-2})$	10.6	11.0	10.6	10.8
	$D_d (\quad)$	10.4	10.5	10.3	10.2
	$D (\quad)$	10.8	10.6	10.5	10.8
Sample CP	$D_u (\times 10^{-2})$	8.0	8.3	8.1	8.7
	$D_d (\quad)$	8.2	8.4	8.6	7.9
	$D (\quad)$	8.1	7.9	8.2	8.4
Sample C	$D_u (\times 10^{-2})$	6.1	6.4	6.2	5.7
	$D_d (\quad)$	5.9	6.1	6.0	6.2
	$D (\quad)$	5.5	5.3	5.2	5.7

体積圧縮率、 e_0 は初期間隙比、 C_c は圧縮指数である。

矢印で示した点以降の ε_d の値は、上記のようにして算出された圧密終了時の ε_d にせん断時の体積変化量(ダイレイタンス)を加算したものである。この図から分かるように、異方圧密された試料Pの $\varepsilon_d \sim \tau_{oct}/\sigma'_m$ 関係は、圧密時の平均主応力の大きさに無関係にほぼ一本の直線で表され、しかもこの直線を逆に延長すると原点を通るものとみなしてさしつかえない。このことは、泥炭性有機質土の異方圧密中の体積変化を平均有効主応力の増分によるものと偏差応力の増分によるものと和として考えることの妥当性を示すものである。

なお、図には示していないが、試料CPおよび試料Cについても上記と同様な結果が得られた。

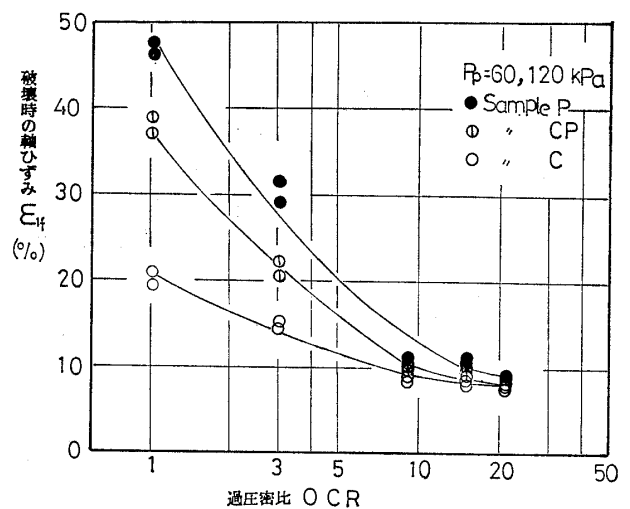
表-3 は、異方圧密後の各試料についての平均有効主応力一定試験による $\varepsilon_d \sim \tau_{oct}/\sigma'_m$ 曲線の勾配として得られるダイレイタンス係数 D を示したもので、比較の

図-4 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 \sim (\sigma_1' + \sigma_3')/2$ の関係図-5 ϕ_d と OCR の関係

ために既報^{4),5)}の等方圧密 ($K=1.0$) および異方圧密 ($K=0.8 \sim 0.4$) 側圧一定の非排水・排水試験結果から算定したダイレイタンス係数 D_u , D_d および等方圧密 ($K=1.0$) 平均有効主応力一定試験による D の値を併記している。各試料について D_u , D_d および D の値がほとんど一致することから、異方圧密試料についての側圧一定の非排水および排水試験結果をもとに提案したダイレイタンス式⁵⁾の妥当性が検証された。また、 D_u , D_d および D は異方圧密時の応力比にかかわらず一定とみなされることから、ダイレイタンス式は圧密時の応力の異方性に関係なく適用できることが分かる。

3.2 過圧密状態におけるせん断特性について

図-4 は、等方圧密膨張によって過圧密状態にある試料 P についての排水せん断破壊時 ($(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$) の $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ と $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ の関係を示したものである。図中には、既報⁴⁾の正規圧密状態 ($OCR=1$) における試験結果も併示している。正規圧密状態の泥炭性有機質土が、モール・クーロンの破壊規準に従うことは、他の研究者^{1)~3)}ならびに著者の研究報告^{4),5)}によって既に明らかであるが、図-4 から過圧密試料についてもモール・クーロンの破壊規準が成立し、多少ばらつきはあるもの

図-6 ε_{1f} と OCR の関係

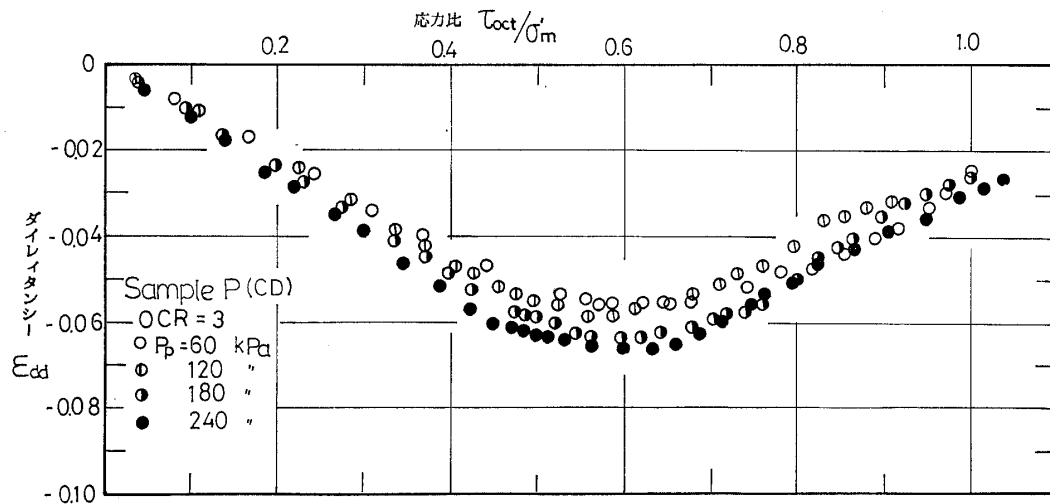
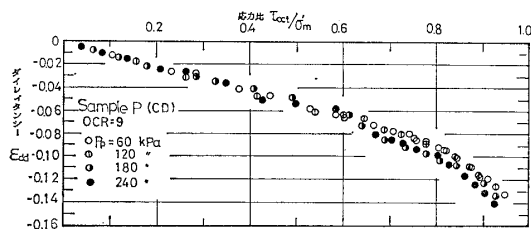
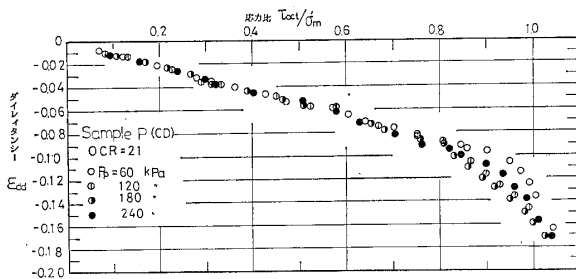
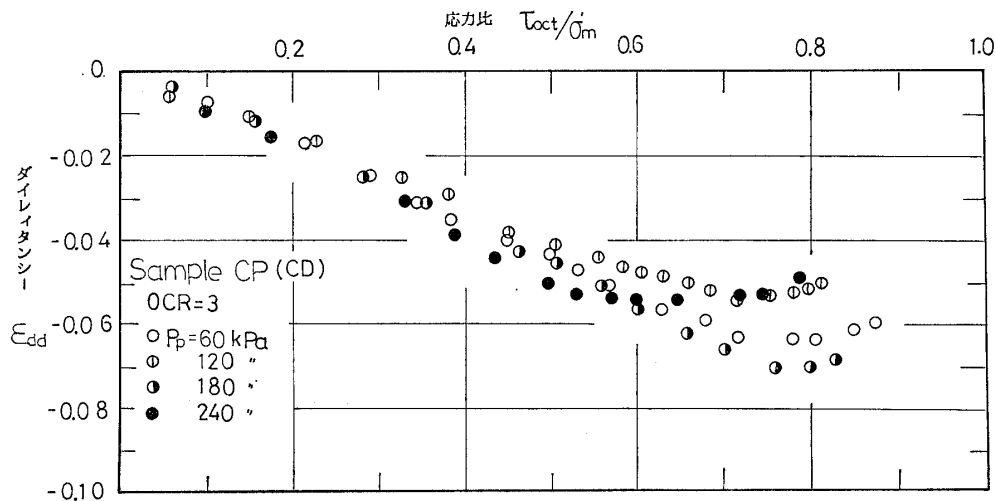
の、原点を通る一本の直線で表すことができる。また、図には示していないが、他の試料、すなわち試料 CP および試料 C についても図-4 のそれとほぼ同様な傾向を示すことが認められた。

以上のことをふまえ、各試料の ϕ_d について過圧密比をパラメータとして整理すれば、図-5 となる。同図には、各試料について正規圧密状態の排水せん断試験から得られたせん断抵抗角⁴⁾についても併示している。図から分かるように、各試料の排水条件下におけるせん断抵抗角 ϕ_d は、いずれも圧密膨張過程における過圧密比の影響を受けずほぼ一定となり、正規圧密土のそれと同じ値を示す。

さて、過圧密状態におけるせん断抵抗角に関する研究は、せん断時の排水条件が異なるが、泥炭性有機質土については、森ら⁶⁾、粘土については中瀬ら⁷⁾、ヘンケル (Henkel)⁸⁾などによって報告されており、今回用いた試料 P、試料 CP および試料 C の過圧密比とせん断抵抗角の関係とほぼ同様な傾向を示している。

破壊時の軸ひずみ ε_{1f} について、過圧密比をパラメータとして示したのが図-6 である。試料 P および試料 CP について、正規圧密状態での破壊時の ε_{1f} は、かなり大きい値を示すが、過圧密比の増大とともに急激に減少し $OCR \approx 9$ 付近で一定値 ($\varepsilon_{1f} \approx 10\%$) に収束することが認められる。また、試料 C の ε_{1f} については試料 P の ε_{1f} ほど急激に減少しないが、その傾向は他の試料と同様である。このように、各試料における ε_{1f} は正規圧密から過圧密状態に移行する過程でかなり異なるが、 $OCR \approx 9$ 付近を境にして収束し、これが土の種類に関係なく一定の破壊ひずみを生ずることは興味深いことである。

前述のように著者らの提案によるダイレイタンスの表現式は、等方圧密のみならず異方圧密後の泥炭性有機

図-7 ϵ_{dd} と τ_{oct}/σ'_m の関係図-8 ϵ_{dd} と τ_{oct}/σ'_m の関係図-9 ϵ_{dd} と τ_{oct}/σ'_m の関係図-10 ϵ_{dd} と τ_{oct}/σ'_m の関係

質土に適用可能であることを示したが、ここでは更に過圧密状態の泥炭性有機質土への適用性について検討を加える。

偏差応力による体積ひずみ ϵ_d は、非排水条件では全応力 ($\Delta\sigma_m$) と発生間隙水圧 (Δu) より、ダイレイタンシー相当量 ϵ_{du} として⁴⁾

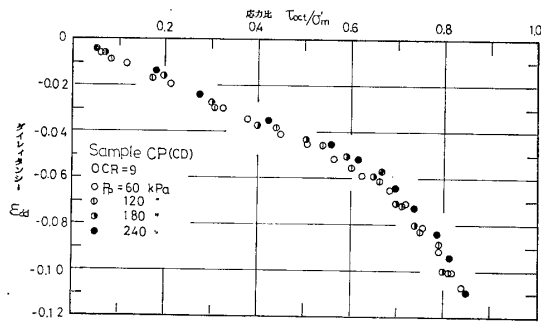
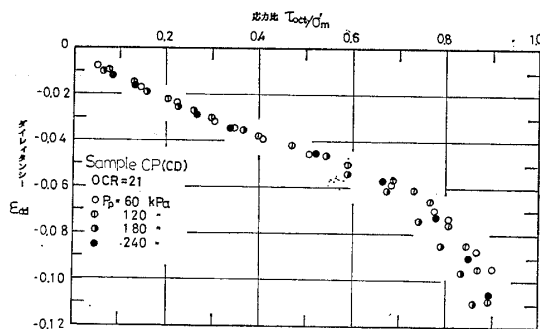
$$\epsilon_{du} = 3C_m(\Delta u - \Delta\sigma_m) \quad (2)$$

排水条件では、ダイレイタンシー量 ϵ_{dd} として⁴⁾

$$\epsilon_{dd} = \epsilon_v - 3C_m\Delta\sigma'_m \quad (3)$$

となる。ここで、 ϵ_v は応力変化に伴う全体積ひずみ、 $3C_m$ は平均有効主応力の変化による土要素の骨格構造の体積圧縮率であって、前述の(1)式で求められる。

試料 P、試料 CP および試料 C について、過圧密後の排水せん断過程におけるダイレイタンシー ϵ_{dd} と正八面体面上の応力比 τ_{oct}/σ'_m との関係を示せば、図-7~15 となる。なお、これらの図は過圧密比 3, 9, 21 について示したものである。さて、図には示していないが、既報⁴⁾により各試料の正規圧密状態における ϵ_{dd} の挙動

図-11 ϵ_{dd} と τ_{oct}/σ'_m の関係図-12 ϵ_{dd} と τ_{oct}/σ'_m の関係

は、応力比の増加に伴ってすべて収縮（正）することが確認された。そこで各試料について、過圧密比をパラメータとして ϵ_{dd} の挙動を検討してみる。過圧密比3における試料 P、試料 PC および試料 C の ϵ_{dd} の性状は、各試料とも先行圧密圧力に関係なく、応力比の増加に伴ってほぼ線形的に膨張（負）し、ある応力比の領域を越えると ϵ_{dd} は膨張から収縮（正）に変化する傾向を示す。そしてこの傾向は有機物含有量が増大するほど、すなわち試料 C、CP、P の順に顕著であることが認められる。

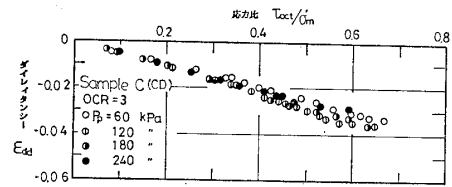
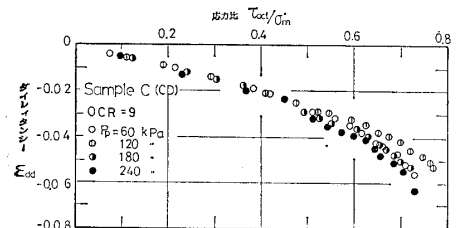
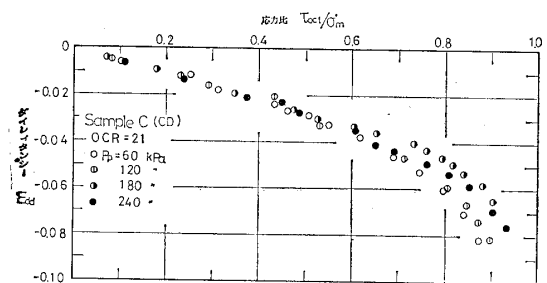
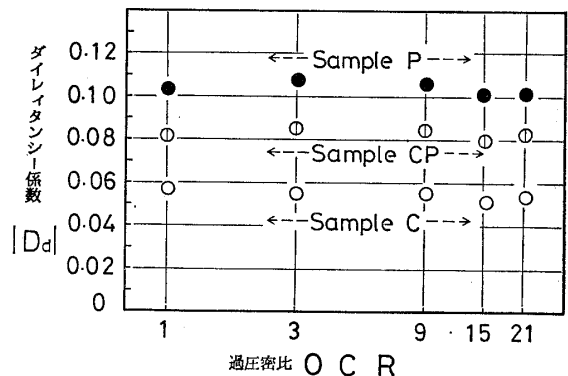
次に、各試料について過圧密比9以降のダイレイタンスー性状を検討してみる。これらの図で示されるように、各試料の ϵ_{dd} は、ともに先行圧密圧力に関係なく、応力比の増加に伴ってほぼ線形的に膨張（負）し、破壊に近づくにつれてその傾向が更に大きくなる。

著者は、既に等方圧密、異方圧密後の泥炭性有機質土の非排水および排水条件下におけるダイレイタンスー ϵ_d を近似的に次式で表示できることを示した^{4),5)}。

$$\epsilon_d = D \left(\frac{\tau_{oct} - \tau_0}{\sigma'_m} \right) \quad (4)$$

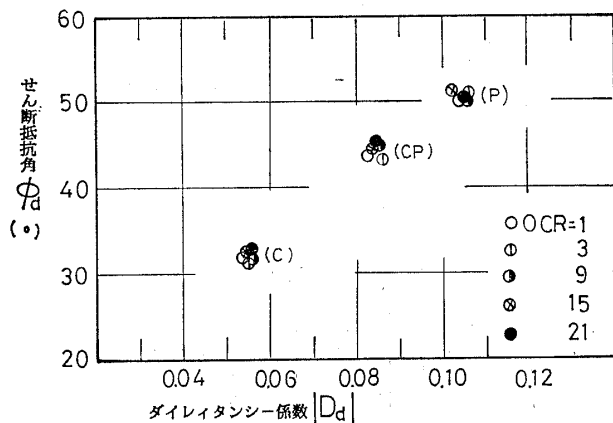
ここで、 τ_0 はこの応力以下ではダイレイタンスーがほとんど生じないという限界値、 D はダイレイタンスー係数である。

図-7～15 の直線部分に (4) 式を適用して得られたダイレイタンスー係数 D_d (絶対値表示) と過圧密比の関係を示したのが図-16 である。この図には、正規圧密試料から得られたダイレイタンスー係数⁴⁾も併示してい

図-13 ϵ_{dd} と τ_{oct}/σ'_m の関係図-14 ϵ_{dd} と τ_{oct}/σ'_m の関係図-15 ϵ_{dd} と τ_{oct}/σ'_m の関係図-16 D_d と OCR の関係

る。本研究では、 $1 < OCR < 3$ の範囲の実験を行っていないので詳細は不明であるが、 $1 < OCR < 3$ の間でダイレイタンスー係数の符号が正（収縮）から負（膨張）に変わることが予想される。したがって、図-16 の $1 < OCR < 3$ の間の $D_d \sim OCR$ 関係は不連続になるものと考えられるが、 $OCR \geq 3$ では過圧密比の値によらず、 D_d の絶対値はほとんど一定値を示し、その値は試料 C、CP、P の順に大きくなる。

図-17 は本実験によるせん断抵抗角 ϕ_d と上記のダイレイタンスー係数 D_d (絶対値表示) の関係を OCR をパラメータとして表示したものである。この図から分かるように、せん断抵抗角とダイレイタンスー係数とは

図-17 ϕ_d と D_d の関係

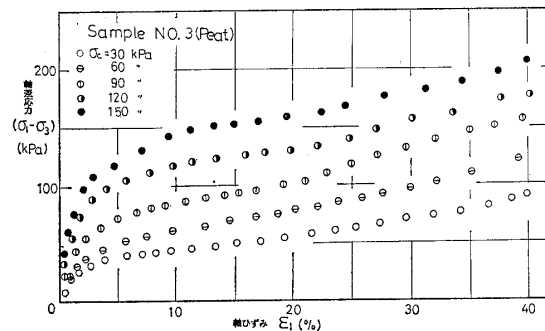
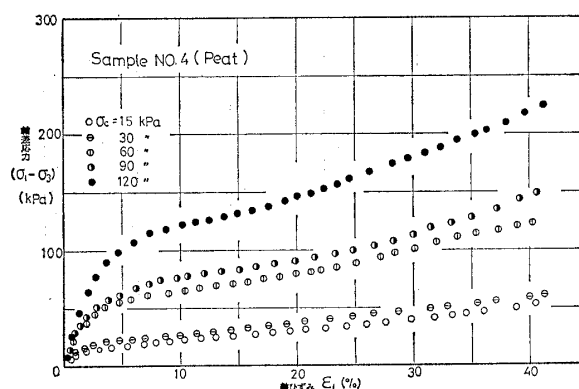
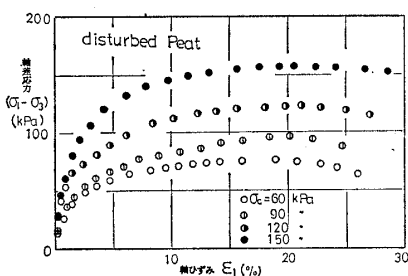
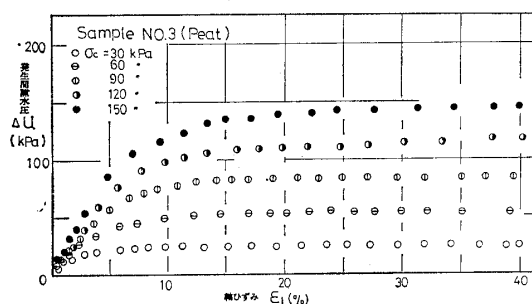
密接な関係がある。1<OCR<3 の過圧密土については、前述のような事情があって、研究の余地が残されているが、正規圧密土と過圧密比3以上の土の排水せん断抵抗角とダイレイタンス係数の間には過圧密比によらない、一義的な関係があると言える。

3.3 乱さない泥炭性有機質土のせん断特性について

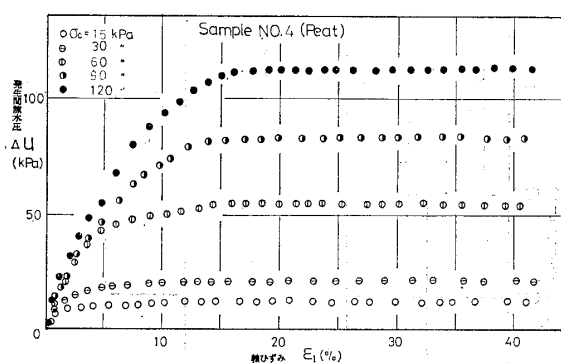
この節では、前述の研究成果を基礎にして、非排水条件下における乱さない泥炭性有機質土のせん断特性について、検討を加える。

4種類の乱さない泥炭性有機質土の中で、一例として試料 No.3 と試料 No.4 について、せん断時の軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と軸ひずみ ε_1 との関係を示したのが、図-18, 19 である。これらの図から分かるように、軸差応力はせん断初期において急激に上昇し、それ以降はゆるやかに増大する傾向を示す。また、各試料における軸差応力の値は、圧密圧力の大きさに対応していることが分かる。このような応力～ひずみ挙動は、乱した泥炭性有機質土や粘土のそれと定性的に同じである。しかしながら、軸差応力の明確なピークは軸ひずみが 40% 以上になっても現れず、むしろ 20% 付近からやや直線的に増加するようである。これに対して、著者が一連の研究に用いた乱した試料¹⁴⁾、すなわち泥炭性有機質土の軸差応力と軸ひずみとの関係を示すと、図-20 のようである。この挙動は基本的に図-18, 19 の傾向とほぼ同様であるが、軸差応力の最大値が圧密圧力によらず、約 20% 前後の軸ひずみで生じる点において異なっている。図-18, 19 と図-20 の応力～ひずみ曲線の相違は、泥炭性有機質土の構成材料の違いならびに分解度、更に試料を攪乱することによる骨格構造の変化などが要因として考えられるが、図-18, 19 のような応力～ひずみ曲線の特異性に与えるこれらの要因の大小については、今後なお検討の余地が残されている。

次に非排水せん断中に発生する間隙水圧について調べてみる。一例として試料 No.3, No.4 について、せん

図-18 Δu と ε_1 の関係図-19 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と ε_1 の関係図-20 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と ε_1 の関係図-21 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と ε_1 の関係

断中に発生した間隙水圧 Δu を軸ひずみ ε_1 に対して示したのが、図-21, 22 である。これらの試料における Δu の挙動は、各圧密圧力の大きさに対応して増大していることが分かり、この傾向は乱した試料¹⁴⁾と定性的に様である。 Δu の性状について、もう少し詳しく検討してみる。試料 No.3, No.4 の発生間隙水圧 Δu は、せん断初期において急激に増加するが、軸ひずみ ε_1 が

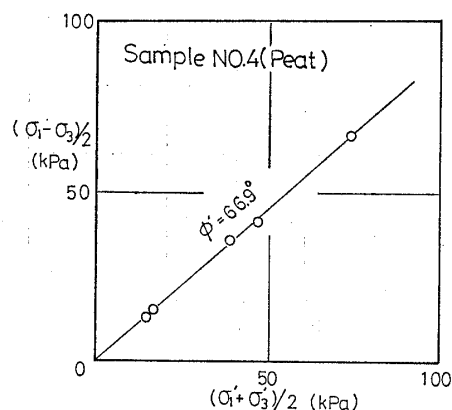
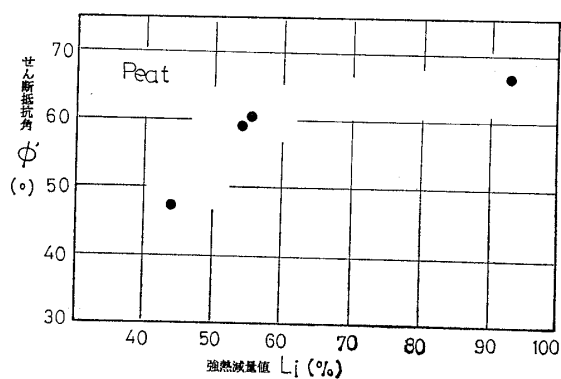
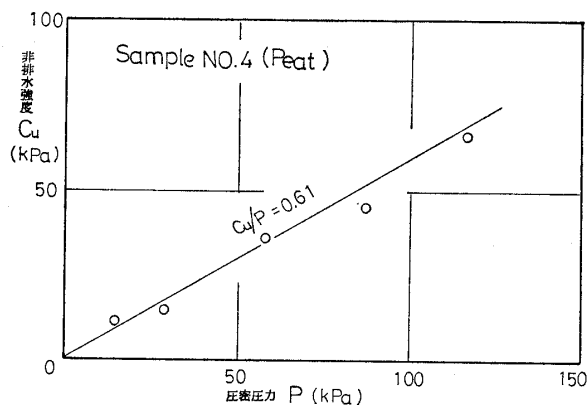
図-22 ΔU と ε_1 の関係

約 20% 以上になるとほぼ一定となり、乱した泥炭性有機質土や粘土の挙動と類似している。

さて、図-18, 19 で示される乱さない泥炭性有機質土の応力～ひずみ曲線からどのようにして、せん断強さを決定するかを考えてみよう。このような場合、従来粘性土などに適用されているように軸ひずみ 15% におけるせん断抵抗をせん断強さとする方法¹⁰⁾、更に最大主応力面と 45° をなす平面上の有効応力軌跡が、初めて破壊包絡線に達したときの点のせん断抵抗をもって、せん断強さとする方法¹¹⁾などがある。今回用いた乱さない試料について、せん断時の軸ひずみが約 20% 以上になると、供試体の底面周辺に間隙水がにじみ出てくるという現象が観察され、更にひずみが 30% 前後になると間隙水の浸出が供試体全体に及ぶことが認められた。また、これによる供試体の変形もかなり不均一なものとなるため、従来行われている軸ひずみ ε_1 に対する供試体の断面補正¹⁰⁾にも疑問が生じてくる。したがって、以上の観点から通常粘性土に適用されているように¹⁰⁾、軸ひずみが 15% に達したときのせん断抵抗をもって、せん断強さとするほうが妥当であると判断される。この処理方法は今回用いた試料に適用したものであり、このことは当然泥炭性土の植物の種類、生成の履歴、分解度、更にせん断過程における供試体の状況などを考慮してその都度検討したほうがよいと考えられる。

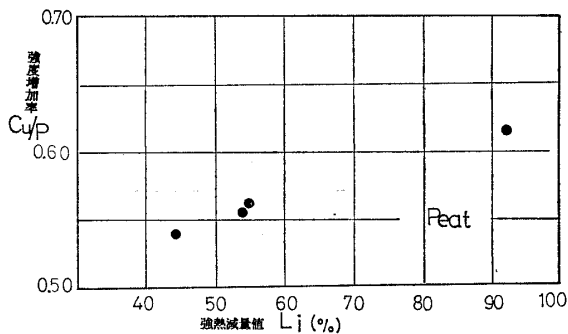
さて、前述したような観点に基づいて非排水せん断強さを軸ひずみ 15% におけるせん断抵抗で定義し、一例として試料 No. 4 の $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ と $(\sigma'_1 + \sigma_3)/2$ の関係を示したのが、図-23 である。破壊包絡線は原点を通るものとしてさしかえないと考えられ、 $\phi' = 66.9^\circ$ となる。また、図には示していないが、他の試料、すなわち試料 No. 1～No. 3 についても、図-23 のそれとほぼ同様な傾向を示した。

図-24 は試料 No. 1～No. 4 について、せん断抵抗角 ϕ' と強熱減量値 L_i (有機物含有量の代替指標) との関係を示したものである。図から分かるように、 ϕ' は L_i の増加に伴って増大する傾向を示す。これは、著者の乱

図-23 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 \sim (\sigma'_1 + \sigma_3)/2$ の関係図-24 ϕ' と D_u の関係図-25 c_u と p の関係

した試料についての一連の研究結果⁴⁾と定性的に同様であって、後述するように有機物含有量の多い土ほどダイレイタンス係数が大きく発生間隙水圧が大きい結果、 ϕ' が増大するものと考えられる。

図-25 は、非排水せん断強さ c_u を軸ひずみ ε_1 が 15% に達したときのせん断抵抗で定義し、それを有効圧密圧力 p に対してプロットしたものである。軟弱地盤の圧密による地盤改良効果の指標として、非排水強度増加率 c_u/p が用いられている。泥炭性土の非排水強度増加率は通常の粘性土よりも大きく、したがって圧密による地盤改良の効果は、粘性土よりも期待しうるといわれている。渡辺¹²⁾ は、乱さない泥炭の一面せん断試験結果が

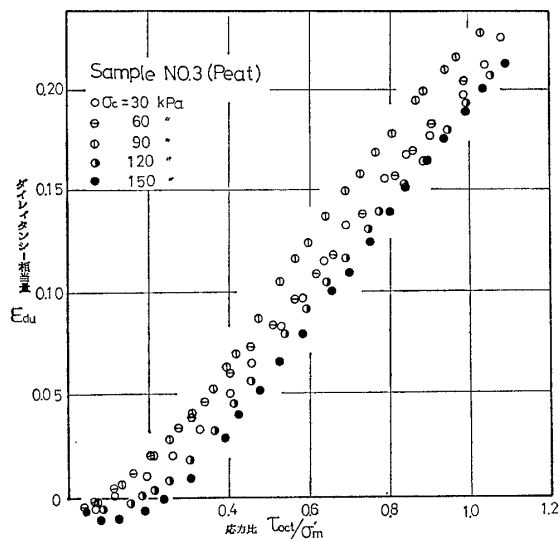
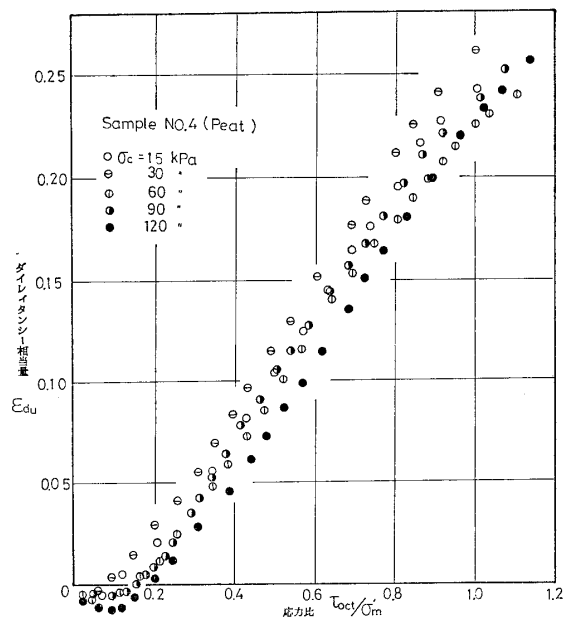
図-26 c_u/p と L_i の関係

ら、この値が 0.43 程度という結果を得ている。また宮川¹³⁾は北海道の泥炭層に対する現場ベーン試験結果から、 c_u/p に対して 0.5~1.0, あるいはそれ以上の値を得ており、泥炭性土の c_u/p は、粘性土との対比において興味を持たれる点である。図から、多少ばらつきはあるものの c_u と p はほぼ直線的関係にあると考えられ、 $c_u/p=0.61$ が得られた。また図に示していないが、試料 No.1~No.3 の c_u と p の関係についても上述と同様な挙動を示した。

図-26 は c_u/p の値と強熱減量値 L_i との関係を示したものであって、 ϕ' と同様に c_u/p 値についても L_i の増加に伴って増大する傾向がみられる。

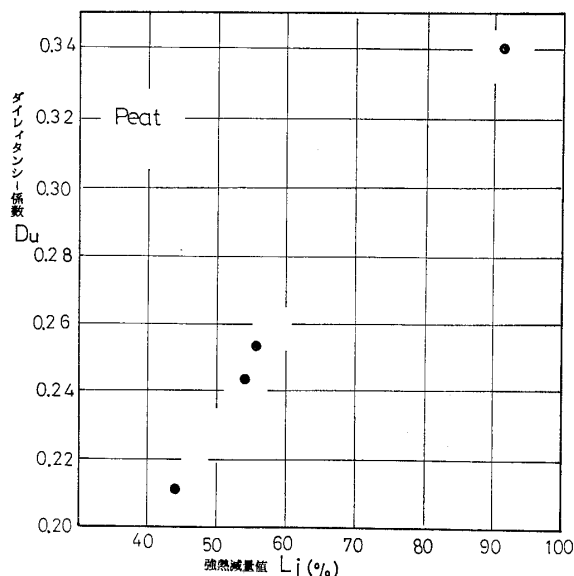
次に非排水せん断過程において発生する間隙水圧の挙動を通じて、ダイレイタンス特性について検討してみる。偏差応力による体積ひずみ ε_d は、非排水条件下では、全応力 ($\Delta\sigma_m$) と発生間隙水圧 (Δu) より、ダイレイタンス相当量 ε_{du} ⁴⁾ として前節の式 (2) で示される。一例として試料 No.3 と No.4 について、ダイレイタンス相当量 ε_{du} と正八面体面上における応力比 τ_{oct}/σ_m' との関係を、各圧密圧力ごとに示したのが、図-27, 28 である。これらの ε_{du} は、いずれも応力比の増加に伴ってほぼ線形的に収縮(正)する傾向を示す。また、図に示していないが、試料 No.1, No.2 についても前図と同様な性状を示した。図-27, 28 の ε_{du} について、乱した泥炭性有機質土⁴⁾ のそれと比較すると、乱さない試料のほうが約 2 倍以上の大きい値を示している。本研究に用いた乱さない試料は、文献 No.4 の乱した試料と採取地が異なるので直接の比較はできないが、コンシステンシー限界や強熱減量値からすると試料 No.2 および No.3 が既報の乱した試料の物性値に近い。いずれにしても、 ε_{du} の発生量に大きな差があるのは攪乱による骨格構造の違いが大きな要因と考えられ、更に泥炭性有機質土の分解度や泥炭層生成の際の履歴による構成植物の種類、その密度などが互いに関連し合っているものと推測される。

図-27, 28 の ε_{du} 挙動について、更に詳しく検討してみる。これらの ε_{du} は応力比が比較的小さい領域で

図-27 ε_{du} と τ_{oct}/σ_m' の関係図-28 ε_{du} と τ_{oct}/σ_m' の関係

は、膨張(負)あるいは流動的であり、応力比がある程度の値を越えると、初めて ε_{du} は応力比の増分に対応してほぼ線形比例的に収縮することが分かる。また、収縮(正)が生じない τ_{oct}/σ_m' の限界値を求めてみると、若干ばらつきが試料 No.3 で約 0.15, 試料 No.4 では約 0.13 となる。このような傾向は他の試料、すなわち試料 No.1, No.2, 更に乱した試料⁴⁾ ともほぼ同様であって、応力比の限界値が分解度、植物の種類さらに試料の状態(攪乱、不攪乱)などに依存しないことを示唆するものである。

非排水条件下における ε_{du} と τ_{oct}/σ_m' との間に線形関係が成り立つとすれば、ダイレイタンス ε_d として前節の式 (4) が適用される。そこで、試料 No.1~No.4 について、式 (4) を適用して得られたダイレイ

図-29 D_u と L_i の関係

タンシー係数 D_u と強熱減量値 L_i との関係を示せば、図-29 となる。 D_u は有機物含有量の増大に伴って増加する傾向を示す。この傾向は既報の乱した試料⁴⁾においても定性的に同様であるが、ほぼ同じ L_i 値の試料について比較すると、乱さない試料の D_u は乱した試料のその2倍以上の値をとる。

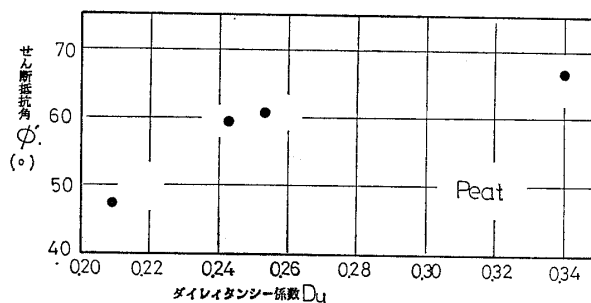
乱した泥炭性有機質土については、そのダイレイタンシーとせん断抵抗角とが密接に結びつくものであることを既報⁴⁾で述べた。このことを、乱さない泥炭性有機質土について確かめるために、図-24 のせん断抵抗角と図-29 のダイレイタンシー係数の値を直接対比して示したのが、図-30 である。せん断抵抗角 ϕ' はダイレイタンシー係数 D_u と密接に関係し、 D_u の増大に伴って大きくなる傾向を示す。

したがって、非排水せん断試験による泥炭性有機質土のせん断抵抗角 ϕ' は試料の状態、すなわち乱した試料および乱さない試料に関係なく、せん断過程におけるダイレイタンシー特性と深くかかわり合っていることが分かる。

4. 結 論

既報⁵⁾で提案した異方圧密土のダイレイタンシー式を異方圧密後の平均有効主応力一定試験によって検証し、更に過圧密土のダイレイタンシー特性について検討を加えた。また、以上の研究成果を基礎として乱さない試料のせん断特性についても調べた。得られた結論を要約すると次のようである。

1) 異方圧密された泥炭性有機質土、粘土およびその混合土についての平均有効主応力一定試験から得られたダイレイタンシー係数は、側圧一定の異方圧密非排水および排水条件下におけるそれとほぼ一致し、前報で提案

図-30 ϕ' と L_i の関係

した異方圧密土についてのダイレイタンシー式の妥当性が検証された。

2) 泥炭性有機質土、粘土およびその混合土のせん断抵抗角 ϕ_a は過圧密比による影響を受けず、それぞれ一定値を示す。

3) 過圧密状態においても、排水せん断中に生じる全体積ひずみは、等方応力成分と偏差応力成分の重合わせとして表示される。

4) 過圧密状態における各試料のダイレイタンシー挙動は、いずれも先行圧密圧力に依存しない。

5) 各試料のダイレイタンシー係数 D_d は、過圧密比3以上ではいずれも過圧密比によらず一定値を示す。

6) 正規圧密および過圧密 ($OCR \geq 3$) 排水条件下におけるせん断抵抗角 ϕ_a は、ダイレイタンシー係数 D_d と密接に関係し、ダイレイタンシー係数の増大に伴って大きくなる。

7) 乱さない泥炭性有機質土のせん断抵抗角 ϕ' およびダイレイタンシー係数 D_u は、ともに有機物含有量の増加に伴って大きくなる。

8) 非排水せん断試験による泥炭性有機質土のせん断抵抗角 ϕ' は、試料の攪乱、不攪乱に関係なくせん断過程におけるダイレイタンシー特性と深くかかわり合っていることが確認された。

記 号 説 明

- C_c = 圧縮指数
- $3C_m$ = 体積圧縮率
- c_u = 非排水せん断強度 (kPa)
- c_u/p = 非排水強度増加率
- D_u, D_d = 非排水、排水条件下のダイレイタンシー係数
- D = 異方圧密土における平均有効主応力一定条件下のダイレイタンシー係数
- e_0 = 初期間隙比
- L_i = 強熱減量値 (%)
- OCR = 過圧密比
- p = 有効圧密圧力 (kPa)
- p_p = 先行圧密圧力 (kPa)
- Δu = 発生間隙水圧 (kPa)
- ε_1 = 軸ひずみ (%)
- ε_{1f} = 破壊時の軸ひずみ (%)
- $\varepsilon_{du}, \varepsilon_{dd}$ = 非排水、排水条件下のダイレイタンシー

$\tau_{oct}/\sigma_m' =$ 正八面体面上の応力比

$\phi', \phi_d =$ 非排水, 排水条件下のせん断抵抗角 ($^\circ$)

$\sigma_e =$ 圧密圧力 (kPa)

$(\sigma_1 - \sigma_3) =$ 軸差応力 (kPa)

参考文献

- 1) Adams, J. I. (1961) : "Laboratory compression test on peat," Proc. Seventh Muskeg Res. Conf. Tech. Memo 71, pp. 36—54.
- 2) Hanrahan, E. T. (1954) : "An investigation of some physical properties of peat," Géotechnique, Vol. 4, No. 3, pp. 108—123.
- 3) Hanrahan, E. T. (1967) : "Shear strength of peat," Proc. the Geotechnical Conf. Oslo, Vol. 1, pp. 193—198.
- 4) 対馬雅己・及川 洋 (1982) : 泥炭性有機質土の強度とダイレイタンスーについて, 「土質工学会論文報告集」, Vol. 23, No. 2, pp. 132—141.
- 5) 対馬雅己 (1984) : 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.
- 6) 森 茂・大平至徳・山口晴幸 (1982) : 過圧密ピートの非排水強度特性について, 「土木学会 38 回年次学術講演会概要」, pp. 571—572.
- 7) 中瀬明男・小林正樹・勝野 克 (1969) : 圧密および膨張による飽和粘土のせん断強度の変化, 「港湾技術研究報告」, Vol. 8, No. 4, pp. 103—143.
- 8) Henkel, D. J. (1956) : "The effect of overconsolidation on the behaviour of clays during shear," Géotechnique, Vol. 6, pp. 139—150.
- 9) Scott, R. F. (1963) : "Principles of soil mechanics," pp. 270—275.
- 10) 土質工学会編 : 「土質試験法」, 第 2 回改訂版, pp. 495—522.
- 11) 松尾 稔・軽部大蔵 (1966) : 室内せん断試験結果の設計への適用に際する 2, 3 の問題点, 「第 11 回土質工学シンポジウム論文集」, pp. 91—100.
- 12) 渡辺 進 (1971) : 泥炭 (施工例), 国鉄三沢—小川原間の盛土工事, 「施工技術」, Vol. 4, No. 6, pp. 165—176.
- 13) 宮川 勇 (1958) : 泥炭地の土質工学的調査研究, 第 3 報, 「北海道開発局土木試験所報告」, Vol. 20, pp. 63—88.
- 14) 対馬雅己・岩崎恒夫・宮川 勇 (1977) : 有機質土の強度試験結果に関する二, 三の考察, 「土と基礎」, No. 235, pp. 13—18.
- 15) Roscoe, K. H. and Burland, J. B. (1968) : "On the generalized stress-strain behaviour of wet clay," Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press, pp. 535—609.
- 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.