

泥炭性有機質土の強度とダイレイタンシーについて

(Shear Strength and Dilatancy of Peat)

対馬雅己* (Masaki Tsushima)
及川洋** (Hiroshi Oikawa)キーワード：三軸圧縮試験／せん断強さ／ダイレイ
タンシー／内部摩擦角／粘土／物理化学的性質／有
機質土 (IGC : D 2/D 6)

1. ま え が き

従来、泥炭性有機質土は、粘性土と比べて繊維質の有機物を多く含む土であり、これを構成する地盤は土質工学上軟弱地盤の最も典型的な事例としてよく知られていることから、その支持力に対する安定、あるいは沈下などの問題への対処が極めて難しく特別な配慮を要する。泥炭性有機質土のせん断強さは、多くの場合原位置試験結果を通しての検討が行われてきた。しかし、原位置における挙動は多くの場合いくつかの複雑な要因が重なり合って発揮され、また測定内容の不明確さをも避けられないので、その基本的性質の把握は容易ではないと考えられる。そこで室内強度試験は、せん断強さに及ぼす要因をある程度制御することができるものと期待される。

泥炭性有機質土地盤上に種々の構造物を載荷したために生じる変形は、少なくとも2種類の機構が働いていると考えられる。すなわち地盤を構成する土の体積変化によるものと、そのせん断形状変形によるものとに分けることができる。実際の地盤においては、2種類の変形機構すなわち体積変化、形状変形が同時に生じ、載荷する荷重の大小によって、どちらかが支配的に起こるものと推測される。もし荷重が土の降伏強さを越えたとすると、それによる変形は主としてせん断変形機構によるものであるといえよう。しかし、その荷重が土の降伏強さ以下である場合には、せん断変形はかなり小さいか、無視することができ、体積変化が主に生じているものと考えられる。

さて、付加応力が変化した場合の土の体積変化は、等方応力成分によるものと、偏差応力成分によるものとに分けられ、後者はダイレイタンシーとよばれているものである。粘土のダイレイタンシー機構については、かな

り解明されているが^{1),2)}、特殊土といわれる泥炭性有機質土のそれについては、不明な点が多いようである。

本論文においては、泥炭性有機質土を中心に粘土およびその混合土の軸対称三軸圧縮試験を行い、せん断強さと物理諸定数を考えるうえで期待がもてる含水-強熱減量比なる指数に着目し、この指数とせん断強さの変化が結びつく可能性について調べ、更に非排水および排水条件下における強度特性が、ダイレイタンシーとどのようにかかわりあっているかについて検討するものである。なお、本文の内容の一部は、著者によって既に報告されたものである³⁾。

2. 試料および実験方法

泥炭性土では多くの場合、乱さない試料は含水比、密度、繊維構造などかなりの相違が認められる。そこでそのばらつきを避けるために、本実験では乱した供試体を用いた。実験に用いた試料は、秋田県平鹿郡大雄村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、黒泥、粘土の乾燥重量をそれぞれM、Cとしたとき乾燥重量比としてM/(C+M)が50%になるように混合した試料(以下CP50と呼称する)をも用いた。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十分注意しながら圧密容器に入れ、所定の圧力で約24時間予圧密した。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て行った。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用いた。また供試体上下端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。なお、供試体の成形に際し、ワイヤーソーなどでは泥炭の繊維

表-1 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	粘土含有 率 (%)
泥炭性有機質土	1.82	430	237	56	1.79	—
粘土	2.68	68	32	6	0.30	65
混合土 (CP50)	2.17	201	96	34	1.32	—

* 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 1-1)

** 秋田大学鉱山学部土木工学科 助手 (秋田市手形学園町 1-1)
(1981.6.8 原稿受付・討議期限 1983.4.1)

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。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。

試験は次の等方圧密非排水および圧密排水試験について実施した。1) C \bar{U} 試験：60, 90, 120, 150 kPa の4種類の圧力で等方圧密し、非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。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ンオメーターによりゼロ位法で行い、軸方向変位はダイヤルゲージ、軸圧はブルーピ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 8.5×10^{-2} mm/min (ひずみ速度で約 0.1%/min) で実施した。2) CD 試験：60, 90, 120, 150 kPa の4種類の圧力で等方圧密し、排水三軸圧縮試験を行う。圧密の終了判定および軸方向変位、軸圧の測定は1)と同様である。軸変位速度は 8.5×10^{-4} mm/min (ひずみ速度で約 0.001%/min) で行い、体積変化量は供試体の上端部から排水された量をビューレット (最大容量 50 cm³, 最小目盛 0.1 cm³) によって求めた。なお破壊規準として両試験とも有効主応力比 (σ_1'/σ_3')_{max} によった。

3. 実験結果および考察

3.1 泥炭性有機質土の非排水強度と物理定数について

本試験に用いた試料のなかで解析に必要な泥炭性有機質土、CP 50 (混合土) のほか既報データ³⁾などの非排水強度および物理諸定数を表-2 に示す。以下、本節では表-2 の結果に基づいて、非排水強度と物理諸定数との関係について検討を加えるものである。

表-2 試料の非排水強度および物理諸定数

試料	σ_c (kPa)	C_u (kPa)	w/L_i	C_c	C_c/GL_i	L_i (比)
CP 25 ³⁾	60	34.6	4.84	0.82	1.641	0.21
	90	45.5	4.76			
	120	60.6	4.51			
	150	71.0	4.34			
CP 50	60	36.0	4.85	1.32	1.789	0.34
	90	47.4	4.38			
	120	63.5	4.27			
	150	76.5	4.07			
CP 75 ³⁾	60	36.9	4.85	1.59	1.728	0.46
	90	52.4	4.33			
	120	66.0	4.10			
	150	77.4	3.92			
泥炭性有機質土	60	41.2	4.57	1.79	1.726	0.57
	90	55.3	4.34			
	120	71.4	3.90			
	150	79.9	3.71			

泥炭性土の強度と物理諸定数を考えるうえで期待がもてる指標に宮川⁴⁾が提案した含水-強熱減量比 w/L_i といわれる尺度がある。この w/L_i は泥炭の有機質部分に対する含水量の重量比という、いわば泥炭の生成状態を示すうえで、二次的な性格を有する状態量としての指標であるが、この指標を用いて泥炭性土の物理的状态を説明するのに便利である。宮川⁴⁾は更にこの w/L_i を圧縮履歴に応じて整理し、地表面に生成しているような自然地盤の泥炭についてはこの値が約 10 前後となり、圧縮履歴に応じてこの w/L_i が変化することを示した。この w/L_i が変化することについて、宮川のデータ⁴⁾を用いて具体的に示せば図-1 のようになる。図から分かるように、 w/L_i は、多少ばらつきはあるものの、圧密圧力 p の増大に伴って小さくなる傾向を示すようである。このことから、泥炭はその w/L_i の値によって、その圧縮履歴を推定し得る可能性があると考えられる。したがって、この w/L_i 値が圧縮履歴に対応する、例えば泥炭性土の強度の変化と結びつく可能性を示唆しているものといえよう。

泥炭性有機質土の場合にも正規圧密状態における応力と飽和含水比との関係は

$$w_0/100 - w/100 = (C_c/G) \log_{10}(\sigma'/\sigma'_0) \quad (1)$$

で表せることが実験的に認められている。ここに w_0 , w は圧密応力 σ'_0 , σ' に対応する含水比、 G は泥炭の平均比重、 C_c はいわゆる圧縮指数で土質ごとに圧密応力に対応した値となる。圧密による非排水強度の増加率が土質について、圧密条件に対応した定値とみなされるとすれば、式(1)から

$$w_0/100 - w/100 = (C_c/G) \log_{10}(C_u/C_{u0}) \quad (2)$$

となる。 C_{u0} , C_u は、 σ'_0 , σ' に対応する非排水強度である。式(1), (2) は σ' の変化に伴う w , C_u の推移を示すもので、 w の変化を通じて σ' または C_u の値の推移が知れる。初期値の知れている土質の圧密に伴う σ' , C_u 値の推移は、 w の値を追跡測定することによって推定できることを示すものであり、ほぼ一様とみなされるような地盤では、大まかな意味では実用的な意味をもつかもしい。

泥炭性地盤では不均質性の著しいことがその特徴の一

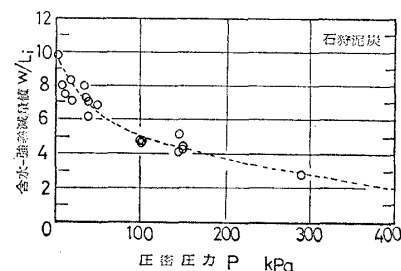


図-1 w/L_i と p の関係

つであり、このことがその土質工学的取扱いを非常に困難にしている一要素である。したがって、上述の関係は供試体ごとの圧密過程に適用を限定して考えたほうがよいと考えられる。

ところで泥炭性有機質土に対する粘土の混入による試料の圧縮指数 C_c と有機物含有量の代替指標としての強熱減量値 L_i との間には、既に定性的に示されているように⁵⁾、ほぼ

$$C_c = mL_i \quad (3)$$

なる関係がある。式(3)の勾配 $m (=C_c/L_i)$ は、試料中の有機質部分の圧縮指数に相当することになり、この値は当然植物の種類、生成の履歴などによって異なると思われる。さて、表-2のデータより C_c と L_i との間の勾配 m は図-2より、 $m \approx 3.7$ となる。

泥炭を単純にそれぞれ無機質部分、有機質部分からなる真比重をもつ二つの構成物の混合体であると考えられるならば、その泥炭の平均比重 G は、

$$G = G_S G_P / [G_P + L_i (G_S - G_P)] \quad (4)$$

と表すことができる⁴⁾。ここで G_S 、 G_P は泥炭を構成している無機質部分および有機質部分の平均比重である。更に式(4)を考慮して式(3)を書き改めれば、

$$C_c / GL_i = m / G \quad (5)$$

となり、 C_c / GL_i は G_S 、 G_P が定値とみなせる場合には L_i のみによって変化することになる。そこで一般の土

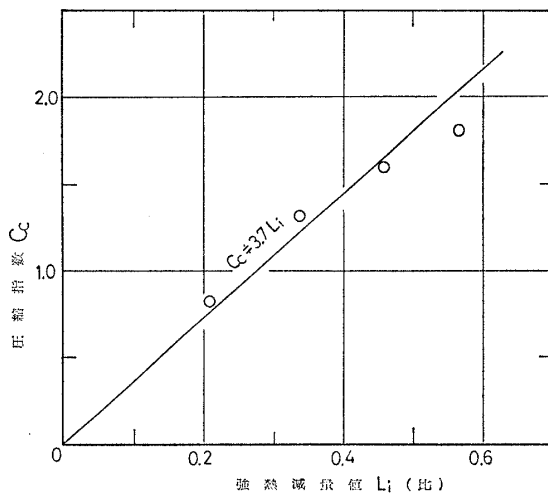


図-2 C_c と L_i の関係

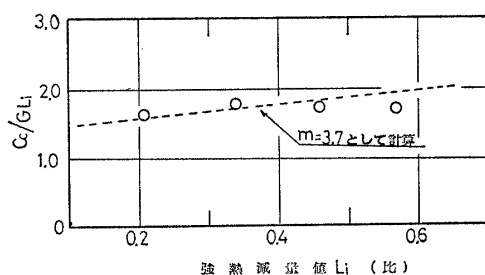


図-3 C_c/GL_i と L_i の関係

や泥炭層下の粘土層についての実測値から推測して、 G_S の値を $G_S = 2.8$ と仮定し、また G_P の値については表-2のデータを用いた $G \sim L_i$ 曲線に式(4)の G_P の2, 3値を併示すれば、 $G_P \approx 1.5$ となることが示される。

C_c/GL_i の計算値は、前述した G_S 、 G_P の値を用いて式(4)、(5)から L_i をパラメーターとして表示することになり、表-2の実測値とともに図-3に示す。この図から分かるように、 L_i の変化による C_c/GL_i 値の変動幅は比較的小さいようである。そこで式(2)を書き改めて

$$w_0/L_i - w/L_i = (C_c/GL_i) \log_{10}(C_u/C_{u0}) \quad (6)$$

とすれば、 C_c/GL_i を近似的に定値とみなすことが許される範囲では、 C_u は w/L_i によって統一的に整理される可能性があることになる。これは原位置データの示す定性的傾向^{4),6)}を説明するものであり、 σ' についても同様である²⁾。

泥炭性地盤におけるある地点の C_u 値の推移は、 w/L_i 値の経過によって知る可能性のあることを示すものである。そこで泥炭性有機質土に対する粘土の混入による表-2の試料群について、 $\log_{10} C_u$ と w/L_i との間に線形関係を期待して、等方圧密供試体16個 ($L_i = 0.21 \sim 0.57$, $\sigma_c = 60 \sim 150 \text{ kPa}$) のデータについて、回帰分析を行ったところ図-4に示すような関係が得られ、両者の間には0.914という高い相関係数が存在する。以上の経過によって、状態量すなわち含水-強熱減量比は、泥炭性有機質土の正規圧密状態における非排水強度を推定する一つの手法を与えることが示された。また排水強度についても同様な適用ができるものと考えられる。

3.2 せん断抵抗角 ϕ' 、 ϕ_a について

一般に特殊土といわれる泥炭性有機質土のせん断強さについては、モール・クーロンの破壊規準に従うことは従来の研究^{7)~9)}によって既に知られているところである。そこで圧密非排水および圧密排水条件下における泥炭性有機質土のせん断抵抗角 ϕ' 、 ϕ_a を求めてみると、図-5、6のようになる。非排水および排水試験結果から

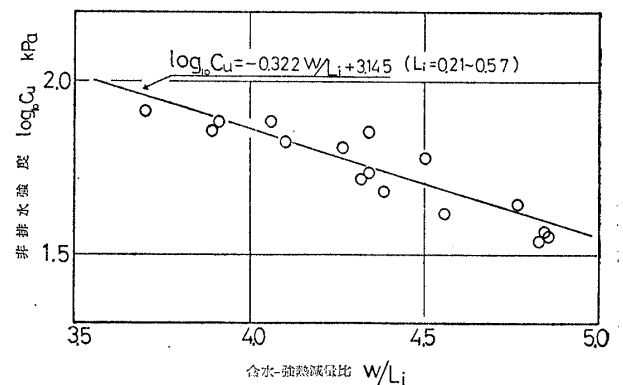
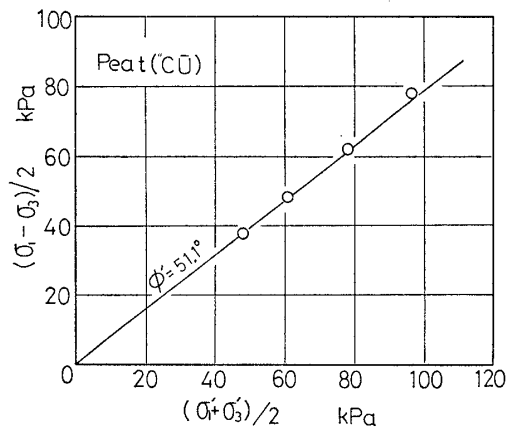
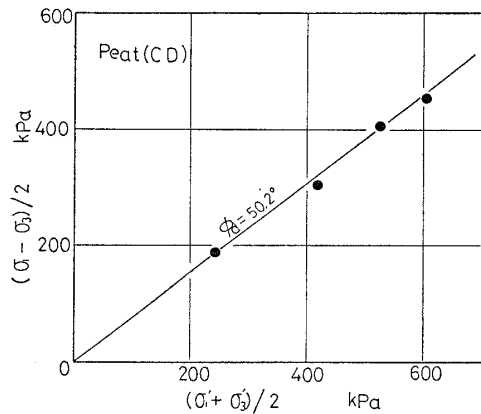


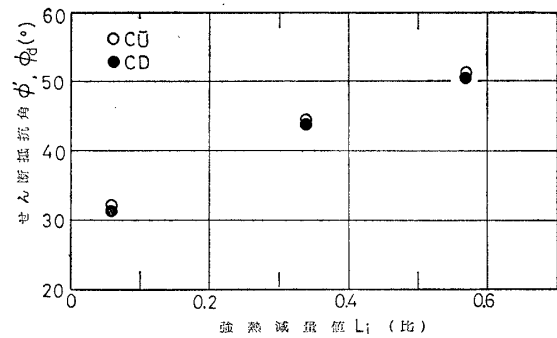
図-4 $\log_{10} C_u$ と w/L_i の関係

図-5 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 \sim (\sigma_1' + \sigma_3')/2$ の関係図-6 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 \sim (\sigma_1' + \sigma_3')/2$ の関係

得られたすべての点は、多少ばらつきはあるものの、ともに粘着力をゼロとして原点を通るものとしてさしつかえないと考えられる。このことを考慮すれば、非排水および排水試験によるせん断抵抗角はそれぞれ $\phi' = 51.1^\circ$, $\phi_a = 50.2^\circ$ の値が得られる。このように、乱した泥炭性有機質土については、せん断時の排水条件に関係なくほとんど一致することから、有効応力解析も可能であると考えられる。

さて土のせん断強さは、粘着力と摩擦力とによって受け持たれることが一般に知られているところである。しかしながら、図-5, 6 で示されるように乱した泥炭性有機質土のせん断強さは、摩擦成分のみで発揮されるものとみなされる。泥炭性土のせん断強さに関する従来の研究としては、摩擦力成分で受け持たれるという報告⁷⁾と摩擦力成分、粘着力成分の両方によって起因するという報告⁸⁾がある。したがって、泥炭性有機質土のせん断強さは、分解度さらに泥炭層生成の履歴による構成植物の種類、その密度などが互に関連し合うことが予想されるため、その摩擦力成分あるいは粘着力成分に限定して考える必要性はないであろうと著者らは理解している。

泥炭性有機質土のせん断抵抗角 ϕ' , ϕ_a の一貫性につ

図-7 ϕ' , ϕ_a と L_i の関係

いて注目してみる。泥炭性土はその生成条件から考えられるように、さまざまな分解過程にある有機質物の多様な混合物であるため、その圧縮性の大きいことはもちろん、粘土と同様に付加応力によるダイレイタンスーが生ずるものと予想される。したがって、非排水および排水条件下においてそれぞれ発生するダイレイタンスーから(非排水条件の場合は発生間隙水圧の挙動からダイレイタンスーを推定)せん断抵抗角 ϕ' , ϕ_a を検討することによって、何らかの特異点が見いだせるものと確信している。

図-7 は、非排水および排水せん断試験について、等方圧密を受けた供試体のせん断抵抗角と強熱減量値 L_i との関係を示したものである。図には表示していないが、粘土、CP 50 の供試体についてのせん断抵抗角 ϕ' , ϕ_a は、図-5, 6 と同様な方法で求められ、その結果前述した泥炭性有機質土と同じように、両者の供試体とも排水条件にかかわらず粘着力成分はゼロとなり、摩擦成分だけで発揮されることが明らかとなった。図-7 から分かるように、 ϕ' , ϕ_a は、ともに有機物含有量による影響を受けて、 L_i の増加に伴って増大する傾向を示す。またそれらのせん断抵抗角は、泥炭性有機質土と同様、CP 50、粘土ともに排水条件にかかわらずほぼ一致することは興味深いことである。このような現象は、前図で述べたダイレイタンスーに関する検討を更に具体的に説明しうる根拠を与えるものとして注目される。すなわち、非排水せん断過程において発生する間隙水圧の挙動からそのダイレイタンスーに相当する量と排水せん断によるダイレイタンスーとが、表裏一体の関係であるという考え方に基づくものであれば、せん断時の排水条件によって得られたせん断抵抗角とダイレイタンスー効果とは、密接にかかわり合っているものと推測される。この非排水および排水条件下によるダイレイタンスーが表裏一体であるという考え方を実証する検討は、後節で詳しく述べることにする。

さて、せん断抵抗角 ϕ' (非排水せん断) と ϕ_a (排水せん断) とに関する研究は、粘土についてはビエラム

(Bjerrum)ら¹⁰⁾やシモンズ (Simons)¹¹⁾, また泥炭性有機質土ではアダムス (Adams)⁷⁾によって報告されており, 今回用いた試料, すなわち泥炭性有機質土, 粘土および CP 50 についての ϕ' , ϕ_d の一致性とほぼ同様な傾向を示すようである。

泥炭性土の有効応力解析についてもう少し詳しく述べれば次のようになる。泥炭性有機質土の三軸せん断試験に関する研究例は少ないが, 今回行った圧密非排水, 圧密排水せん断の二つの試験条件すなわち, 前者の間隙水圧を測定して, その結果を有効応力で整理して得られた強度定数と後者の間隙水圧が発生しないようなせん断速度 (実質的には有効応力となる) の整理による強度定数とを比較してもほとんど変わらないことが認められることから, この試料についても有効応力解析が適用できるものと考えられる。

3.3 ダイレイタンシーの基本式について

付加応力が変化した場合の土要素の体積ひずみが次式で表されるとする。

$$\varepsilon_v = \varepsilon_c + \varepsilon_d \quad (7)$$

ここに, ε_v : 応力変化に伴う全体積ひずみ

ε_c : 等方応力成分の変化による体積ひずみ

ε_d : 偏差応力成分の変化による体積ひずみ, いわゆるダイレイタンシーひずみ

また ε_c は次式で表されると考える。

$$\varepsilon_c = 3C_s \Delta\sigma_m' \quad (8)$$

ここで $3C_s$ は, 等方応力の変化による土要素の骨格構造の体積圧縮率である。

式 (8) の応力を全応力 ($\Delta\sigma_m$) と発生間隙水圧 (Δu) によって示せば, 式 (7) は次式のようになる。

$$\varepsilon_v = 3C_s (\Delta\sigma_m - \Delta u) + \varepsilon_d \quad (9)$$

したがって偏差応力による体積ひずみ ε_d は, 非排水条件では $\varepsilon_v = 0$ より, 式 (9) からダイレイタンシー相当量 ε_{du} として

$$\varepsilon_{du} = 3C_s (\Delta u - \Delta\sigma_m) \quad (10)$$

排水条件では, 式 (7), (8) からダイレイタンシー ε_{dd} として

$$\varepsilon_{dd} = \varepsilon_v - 3C_s \Delta\sigma_m' \quad (11)$$

となる。

ところで $3C_s$ は, 等方応力下の圧密試験の結果から次式のようにして求められる。

$$3C_s = \frac{C}{(1+e_0)} \frac{\log_{10}(\sigma_m' + \Delta\sigma_m')/\sigma_m'}{\Delta\sigma_m'} \quad (12)$$

ここで e_0 は等方圧密終了後の間隙比, C は等方圧密および等方膨張における $e \sim \log_{10} \sigma_m'$ 関係の直線部の勾配であって, 圧縮指数 (C_c) または膨張指数 (C_e) とよばれているものである。

非排水および排水条件下で土要素に応力変化を与えた

場合のダイレイタンシー量を軸対称三軸圧縮試験に基づいて, 式 (10) および式 (11) によって求めることができ, これを τ/σ' に対応して表示することができる。ここで τ は, 考慮の対象としている体積ひずみの原因となっている偏差応力であって, ダイレイタンシーの原因となる成分と考えているものである。これは主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$), 正八面体面上のせん断応力 τ_{oct} , またはモービライズ面のせん断応力 τ_{mob} などで示すことができる。 σ' は有効平均主応力 σ_m' , モービライズ面の有効鉛直応力 σ_{mob}' などで考えることができる。本報告では, 正八面体面上のせん断応力と有効平均主応力との応力比 τ_{oct}/σ_m' をとりあげ, ダイレイタンシーとの関係について検討するものである。

3.4 非排水および排水条件下におけるダイレイタンシー性状について

前節で述べたように, 非排水条件下におけるダイレイタンシー相当量 ε_{du} は式 (10) で示される。ここで土粒子骨格要素の等方応力成分による体積圧縮率 $3C_s$ は, 式 (12) で示される実験データから求められる。ここに式 (12) の係数 C としては, 従来の研究成果^{14), 15)} から圧縮指数 C_c を用いて整理され, これによって式 (10) からそのダイレイタンシーを定性的に把握することが可能となる。

以上のことから, 泥炭性有機質土, CP 50 および粘土のダイレイタンシー相当量 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-8~10 である。各試料における ε_{du} は, ともに応力比の増加に伴って, ほぼ線形的に収縮 (-) する傾向を示すようである。また試料ごとに ε_{du} を比較すると, 泥炭性有機質土のほうが他の試料よりかなり大きい値を示していることが分かる。これは, 泥炭性有機質土粒子自身が比較的圧縮性の大きい植物性繊維やその分解物質であるため, 付加応力を受けた場合の ε_{du} の挙動は, 粘土のそれとは著しく異なるものと考えられる。このことから泥炭性有機質土のダイレイタンシー挙動は, せん断機構を調べるうえでも重要な要素であり, これを明らかにすることによって, そのダイレイタンシーとせん断強度とが密接に結びつくものと推測している。

図-8~10 の ε_{du} の挙動について, 更に詳しく検討してみる。泥炭性有機質土, CP 50 および粘土の各試料はともに応力比が比較的小さい領域では, その ε_{du} によって示される挙動はやや不明確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, その増分に対応してほぼ線形比例的に収縮する傾向を示すようである。またこれらの試料について, ε_{du} が起こらない, すなわち収縮が生じない τ_{oct}/σ_m' の限界値を求めてみ

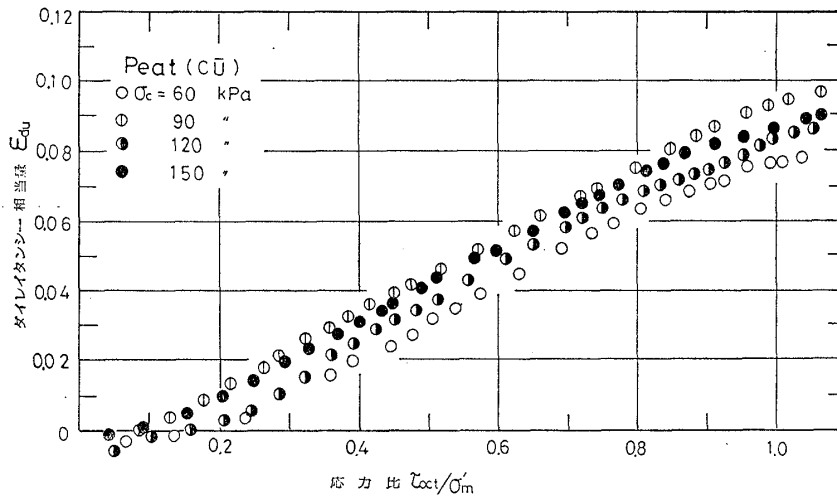


図-8 ϵ_{du} と τ_{oct}/σ'_m の関係

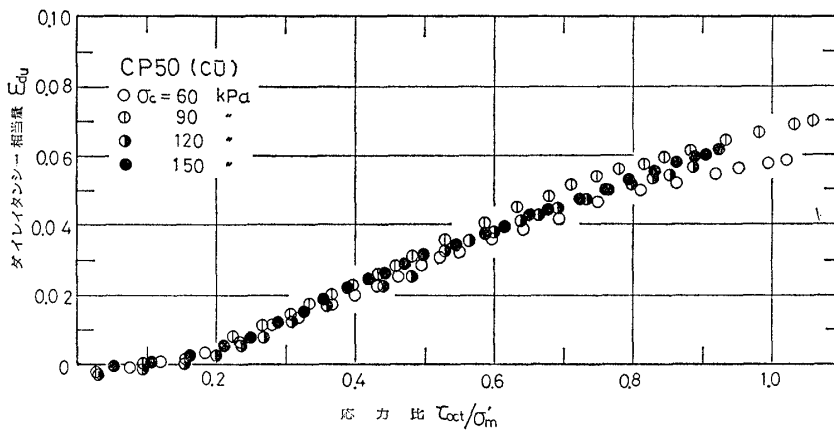


図-9 ϵ_{du} と τ_{oct}/σ'_m の関係

ると、泥炭性有機質土で若干ばらつくが約 0.11, CP 50 で約 0.10 更に粘土では 0.12 となり、試料の種類にかかわらずほぼ同様な値となるようである。柴田¹⁾は、他の研究者^{12),13)}が行った福岡粘土および London Clay などのデータを再整理した結果、ダイレイタンシーがほとんど生じない応力比 $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma'_m$ として、それぞれ 0.30, 0.33 という値を示している。そこで、本実験で用いた粘土について図-10 の横座標 τ_{oct}/σ'_m を $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma'_m$

で整理しなおしてその限界値の応力比を求めてみると、約 0.26 となるようである。この値は、実験方法およびその整理方法などが異なるが前述した福岡粘土, London Clay などの値と比べても、さほど違いがないことは興味深いことである。

せん断過程において、排水状態で作用応力を受けたとき、偏差応力成分によるダイレイタンシー ϵ_{da} は、式 (11) によって求められる。ここで土粒子骨格要素の等方応力成分による体積圧縮率 $3C_s$ は、式 (12) で示される。ここに式 (12) の係数 C としては、排水せん断過程における応力経路の状態から考えて、圧縮指数 C_c を用いた。そこで泥炭性有機質土, CP 50 および粘土の排水せん断過程におけるダイレイタンシー ϵ_{da} と正八面体面上の応力比 τ_{oct}/σ'_m との関係について示せば図-11~13 となる。各試料の ϵ_{da} と τ_{oct}/σ'_m との関係から分かるように、圧密圧力の大きさは無関係にほぼ一本の直線で表され、その発生量は非排水状態のそれと同様に、有機物含有量が多いほど大きい値を示すようである。粘土の ϵ_{da} と泥炭性有機質土のそれと直接比較すれば、泥炭

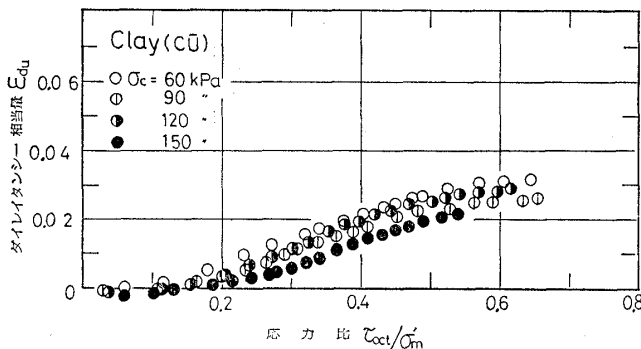
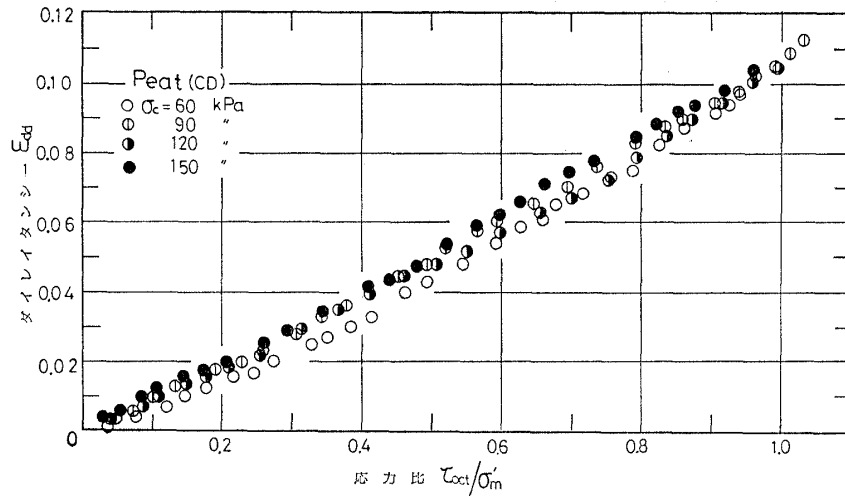
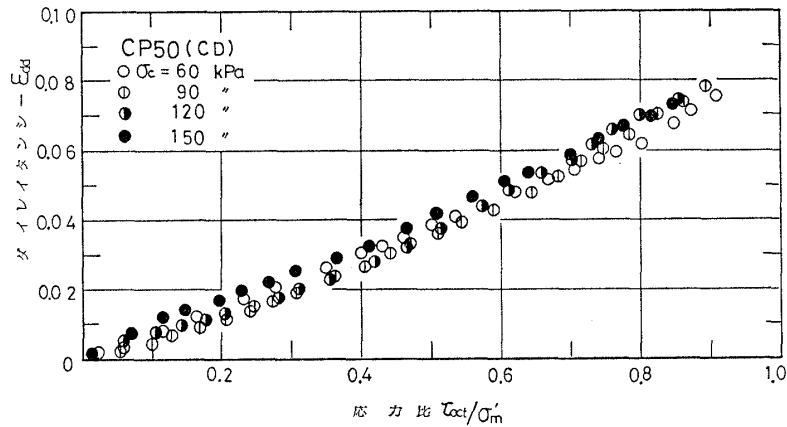


図-10 ϵ_{du} と τ_{oct}/σ'_m の関係

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

性有機質土のほうがおよそ3倍程度のダイレイタンス量が認められる。この傾向は、非排水状態における ϵ_{du} と τ_{oct}/σ_m' の関係で述べたように、泥炭性土のもつ特性値に起因するものと考えられる。

泥炭性有機質土、CP 50 および粘土の非排水および排水状態におけるダイレイタンス量 ϵ_{du} , ϵ_{dd} について検討してみると、各試料における ϵ_{du} と ϵ_{dd} は若干ばらつくが、ほぼ等しいことが認められる。このことは、非排水条件下において、せん断応力による間隙水圧の挙動が、

排水条件下におけるその体積変化の性状と表裏一体であるという考え方を実証したものといえよう。したがって、ダイレイタンス挙動は非排水条件下においても把握することが可能であると考えられる。

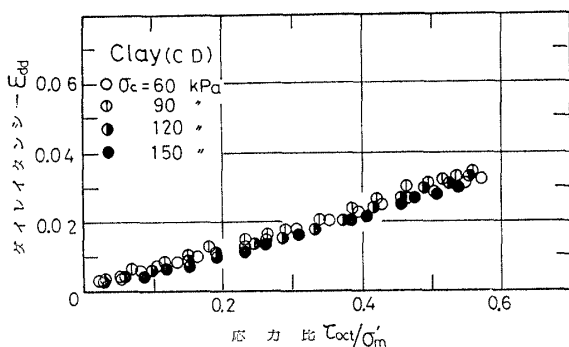
3.5 ダイレイタンス係数 D について

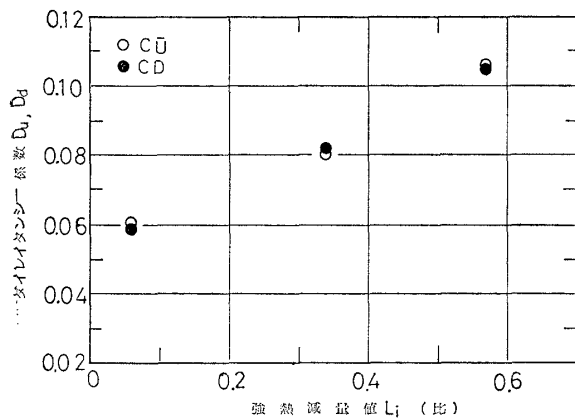
非排水、排水条件下における ϵ_{du} および ϵ_{dd} と τ_{oct}/σ_m' との間に線形関係が成り立つとすれば、そのダイレイタンス式として、次の形式が近似的に表示することができる。

$$\epsilon_d = D \left(\frac{\tau_{oct} - \tau_0}{\sigma_m'} \right) \quad (13)$$

ここで ϵ_d は非排水および排水条件下におけるダイレイタンス、 τ_0 はせん断応力 τ_{oct} がこの応力以下ではダイレイタンスが生じないという限界値、 D は非排水および排水条件下におけるダイレイタンス係数である。

図-14は、図-8~13の ϵ_{du} および ϵ_{dd} と τ_{oct}/σ_m' との関係について、式(13)から得られたダイレイタンス係数 D (非排水および排水条件下ではそれぞれ D_u , D_d と呼称する) と強熱減量値 L_i との関係を示したもの

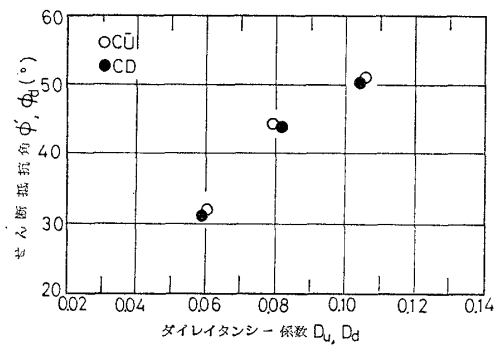
図-13 ϵ_{dd} と τ_{oct}/σ_m' の関係

図-14 D_u, D_d と L_i の関係

である D_u および D_d は、排水条件にかかわらず、有機物含有量の増大に伴って増加する傾向を示すようである。また試料ごとに D_u, D_d を検討すれば分かるように、非排水および排水条件下におけるダイレイタンスー係数は、ほぼ一致することが認められる。このような関係は、土のせん断機構を解明するために注目すべき点であると思われる。この D_u と D_d の一致性は、非排水せん断中の間隙水圧の変化と排水条件下におけるその体積変化とが表裏一体であるという基本的な考え方を実証するものであるといえよう。

さて、ダイレイタンスー係数 D の値として、柴田¹⁾は排水条件下で平均有効主応力一定試験を実施し、尼崎粘土で 7.3×10^{-2} 、また他の実験データ^{12), 13)}を再整理して福岡粘土 : 9.2×10^{-2} 、London Clay : 7.7×10^{-2} 、Weald Clay : 4.2×10^{-2} をそれぞれ示している。一方、著者らが行った排水条件下における三軸圧縮試験結果から、柴田¹⁾と同様な方法、すなわち横軸を応力比 $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_m'$ で整理しなおすと、その粘土のダイレイタンスー係数 D_d として、 2.9×10^{-2} という値となる。この値は、前述した平均有効主応力一定試験結果の D の値とさほど大きな相違がないと解釈している。したがって、式 (11) のダイレイタンスー式は、粘土についてはその適用性を示すものであり、更にこの式を泥炭性有機質土まで拡張することができるものと考えられる。

土のせん断機構を解明する一つの手がかりとして、図-14 の非排水、排水条件下におけるダイレイタンスー係数と図-7 のせん断抵抗角の挙動を直接対比して示せば、図-15 のようになる。非排水および排水条件下の ϕ', ϕ_d は、ともに D_u および D_d と密接に関係し、 D_u, D_d の増大に伴って大きくなる傾向を示すようである。また各試料についての ϕ' と ϕ_d の一致性は、 D_u, D_d によって規定されるようである。このように、等方圧密土の非排水および排水せん断試験によるその強度定数は、せん断過程におけるダイレイタンスー特性と深くかかわり合っていることが認められる。

図-15 ϕ', ϕ_d と D_u, D_d の関係

4. 結 論

特殊土といわれる泥炭性有機質土を中心に、粘土およびその混合土について、それらの物理性とせん断強度との相関性に言及し、更にせん断過程において発生するダイレイタンスーについて、解析した研究結果の一端を示したものである。これらを要約すると次のようになる。

1) 非排水強度 C_u は、含水-強熱減量比 w/L_i によって統一的に整理され、少なくとも泥炭性地盤では w/L_i 値の経過によって C_u 値の推移を知る可能性を示唆した。

2) 非排水および排水せん断試験によるせん断抵抗角 ϕ', ϕ_d は、ともに有機物含有量の増大に伴って大きくなる傾向を示した。また各試料の ϕ', ϕ_d の値は、排水条件にかかわらず、ほぼ一致することが確認された。このような現象は、ダイレイタンスー挙動をき知する一つの要因となることが推測される。

3) 応力が作用した場合の全体積ひずみは、等方応力成分と偏差応力成分の重合わせの和として表示され、その結果として非排水および排水条件下におけるダイレイタンスー挙動が定性かつ定量的に把握されることが可能となった。

4) 泥炭性有機質土、CP 50 および粘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量 $\epsilon_{du}, \epsilon_{dd}$ は、ほぼ等しいことが認められた。このことは、非排水状態において、せん断応力による間隙水圧の挙動が、排水状態におけるその体積変化の性状と表裏一体であるという考え方を実証したものとといえよう。

5) 非排水および排水条件下におけるダイレイタンスー係数 D_u, D_d は、ともに有機物含有量の増大に伴って増加する傾向を示した。また各試料の D_u, D_d は、排水条件にかかわらず、ほぼ一致することが認められた。

6) 土のせん断機構を解明する一つの手がかりとなるせん断抵抗角とダイレイタンスー係数について検討した結果、非排水および排水条件下の ϕ', ϕ_d は、ともに D_u および D_d と密接に関係し、 D_u, D_d の増大に伴って大きくなる傾向を示すようであった。このように、等方圧

密土の非排水、排水せん断試験によるその強度定数は、ダイレイタンス特性と深くかかわり合っていることが確認された。

7) 非排水および排水条件下における ϕ' , ϕ_d の一致性は、それらのダイレイタンス特性すなわちダイレイタンス係数によって規定されることを見いだした。

最後に、本研究は元秋田大学鉱山学部故宮川勇教授の御指導のもとで実施したことを、ここに付記する。

記号説明

w/L_i = 含水-強熱減量比
 σ'_0 = 圧密応力 (有効応力) (kPa)
 $\sigma' = \sigma'_0$ の増分による圧密応力 (kPa)
 $w_0, w = \sigma'_0$ および σ' に対応する含水比
 C_c = 圧縮指数
 G = 泥炭の平均比重
 $C_{w0}, C_u = \sigma'_0$ および σ' に対応する非排水強度 (kPa)
 L_i = 強熱減量値 (比)
 G_S, G_P = 泥炭を構成している無機質部分、有機質部分の平均比重
 σ_c = 等方圧密圧力 (kPa)
 ϕ', ϕ_d = 非排水および排水条件下におけるせん断抵抗角 (°)
 ϵ_v = 応力変化に伴う全体積ひずみ
 ϵ_s, ϵ_d = 等方応力成分および偏差応力成分の変化による体積ひずみ
 $\Delta\sigma'_m$ = 平均有効主応力の増分 (kPa)
 Δu = 発生間隙水圧 (kPa)
 $3C_s$ = 体積圧縮率または膨張率
 e_0 = 等方圧密終了後の間隙比
 C_e = 膨張指数
 $\epsilon_{dw}, \epsilon_{dd}$ = 非排水および排水条件下におけるダイレイタンス
 τ_{oct}/σ'_m = 正八面体面上の応力比
 D_w, D_d = 非排水および排水条件下におけるダイレイタンス係数
 τ_0/σ'_m = ダイレイタンス (収縮) が生じないという限界の応力比

参考文献

- 柴田 徹 (1963) : 粘土のダイレイタンスについて, 「京都大学防災研究所年報」, 第6号, pp. 128~134.
- 軽部大蔵・栗原則夫 (1966) : 繰り返し粘土のダイレイタンスとせん断強度について, 「土木学会論文報告集」, No.135, pp. 16~24.
- 対馬雅己・岩崎恒明・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.
- 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」, 第20号, pp. 63~88.
- 宮川 勇 (1971) : 泥炭性土の2, 3の物理性と有機質, 「第6回土質工学研究発表会講演集」, pp. 97~100.
- 宮川 勇 (1972) : 有機質土の試案“状態図”について, 「土木学会 東北支部 技術研究発表会講演概要」, pp. 141~142.
- Adams, J. I. (1961) : “Laboratory compression test on peat,” Proc. Seventh Muskeg Res. Conf. Tech. Memo 71, pp. 36-54.
- Hanrahan, E. T. (1954) : “An investigation of some physical properties of peat,” Géotechnique, Vol.4, No.3, pp. 108-123.
- Hanrahan, E. T. (1967) : “Shear strength of peat,” Proc. the Geotechnical Conf. Oslo, Vol.1, pp. 193-198.
- Bjerrum, L. and Simons, N. E. (1960) : “Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays,” Res. Conf. Shear Strength of Cohesive Soils, Colorado, pp. 711-726.
- Simons, N. E. (1960) : “Comprehensive investigation of the shear strength of an undisturbed drammen clay,” Res. Conf. Shear Strength of Cohesive Soils, Colorado, pp. 727-745.
- 水野高明・徳光善治・川上 浩 (1962) : 三軸試験中の間隙水圧の挙動について, 「土木学会 17 回年次学術講演会概要」, pp. 25~26.
- Henkel, D. J. (1960) : “The shear strength of saturated remoulded clays,” Res. Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, pp. 533-554.
- 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.
- 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.