

泥炭のクリープ破壊に関する実験的研究

対馬雅己

Experimental Studies on Creep Rupture of Peat

Masaki TSUSHIMA

(昭和58年10月31日受理)

In this paper, the influence of ignition-loss on the creep rupture characteristics are investigated experimentally.

Results of analysis are summarized as follows;

- 1) It was confirmed that the peat showed the greater steady-state creep and transient creep than clay.
- 2) Relations between strain rate $\dot{\epsilon}_s$ and failure time t_f of peat and clay in stress controlled shear tests were experimentally determined.
- 3) Both Rupture strains of peats obtained from strain-rate controlled and stress controlled shear tests were found to be almost equal values.
- 4) The accelerating rate in the range of accelerating creep of peat was found to be lower than that of clay.

1. ま え が き

泥炭性土は、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、特別の配慮を要する。一般に、軟弱地盤上に種々の構造物を載荷することによって、体積変化、クリープによる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考えられる。もし、その荷重が土の降伏強さを越えた場合は、大きなクリープ変形が生じ、最終的にはクリープ破壊が生じる。このような原因による粘土のクリープ破壊現象については、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、いまだに明らかにされていない面が多いようである。そこで、本研究は、従来の研究成果¹⁾と今回行った実験結果をもとに、泥炭の非排水条件下でのクリープ破壊特性を調べ、更にクリープ破壊特性に及ぼす有機物含有量の影響についても検討するものである。

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。供試体は、予圧密終了後、直径 35.0 mm、高さ 78.0 mm 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。クリープ試験は、60, 90, 120, 150 kPa の 4 種類の圧力で等方圧密した供試体について、非排水条件下で一定の軸差応力を載荷して行なった。またこの試験中、クリープ応力を一定に保つため、供試体の変形が均一であるとして、断面変化にともなう荷重補正をした。なお、すべての供試

表—1 試料の物性

試料	Gs	L.L (%)	Ip	Li (%)	Cc
peat	1.82	430	237	56	1.79
cp 50	2.17	201	96	34	1.32
clay	2.68	68	32	6	0.30

2. 試料および実験方法

実験に用いた試料は、日本統一土質分類法による

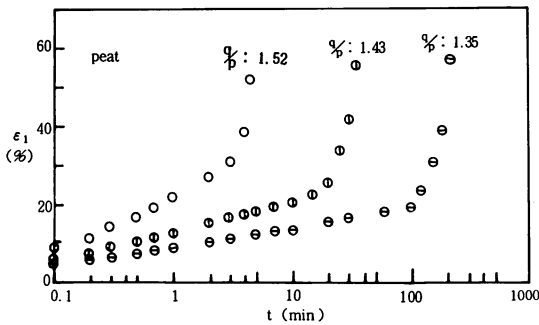


図-1 ϵ_1 と t の関係

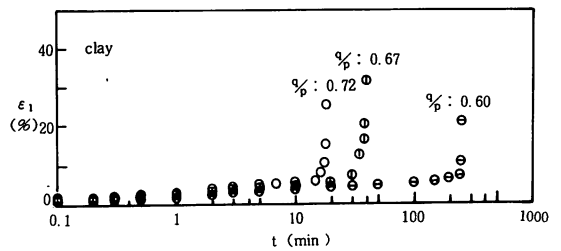


図-3 ϵ_1 と t の関係

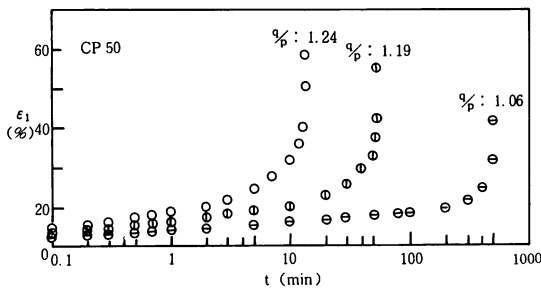


図-2 ϵ_1 と t の関係

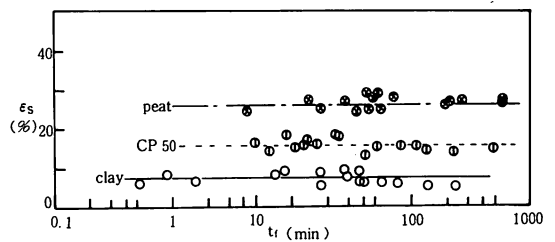


図-4 ϵ_s と t_r の関係

体について、100 kPa のバックプレッシャーを圧密過程から適用した。

3. 実験結果および考察

泥炭性有機質土、CP50 および粘土の各試料のクリープ挙動について示せば、図-1~3 となる。ここで、クリープの応力 q は、圧密圧力 P で正規化している。これらの図からわかるように、各試料とも典型的な三つの領域、すなわち遷移クリープ、定常クリープ、加速クリープが得られるようである。また各試料について、有機物含有量の代替指標としての強熱減量値 L_i をパラメータとして、それらのクリープ挙動を検討してみると、その含有量の多い試料ほど、遷移クリープおよび定常クリープ領域におけるひずみ量が多いことが認められる。このことは、有機物含有量の多い試料、すなわち植物性繊維やその分解物質から成る泥炭性有機質土自身が、圧縮性の大きい材料であることを裏付けるものであり、付加応力を受けた場合、その軸ひずみ ϵ_1 の挙動は、粘土のそれとは異なるものと考えられる。この

ような傾向を少し具体的に説明するために、定常クリープ開始点のひずみ ϵ_s と破壊時間 t_f との関係を示せば、図-4 となる。各試料の ϵ_s は、若干ばらつくが、それぞれクリープ応力に関係なく、ほぼ一定となり、各試料とも限界のひずみが存在するようである。また試料ごとに ϵ_s を比較すると、泥炭性有機質土の方が、他の試料よりかなり大きい値を示す。このことは、試料中に含まれる有機物含有量によって ϵ_s は、大きく変化することを示すものである。

図-5 は、泥炭性有機質土、CP50 および粘土について、定常クリープ開始点の時間 t_s と破壊時間 t_f との関係を示したものである。 t_s と t_f の間には、試料の種類に関係なく、ほぼ 45° の直線関係が認められ、次式で表示することができる。

$$\log t_s = \log t_f - 0.300, t_s/t_f \approx 0.5 \dots\dots(1)$$

この関係式は、試料の種類、クリープ応力、さらに圧密圧力に依存しないことを示唆するものである。

つぎに定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ と破壊時間 t_f について検討してみる。粘土のクリープ破壊試験において、定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ は、クリープ破壊過程で最

泥炭のクリープ破壊に関する実験的研究

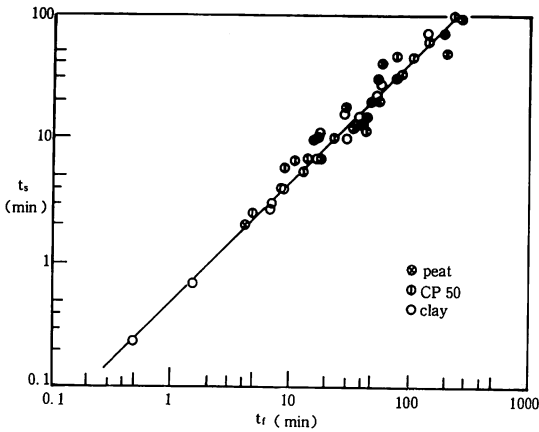


図-5 t_s と t_f の関係

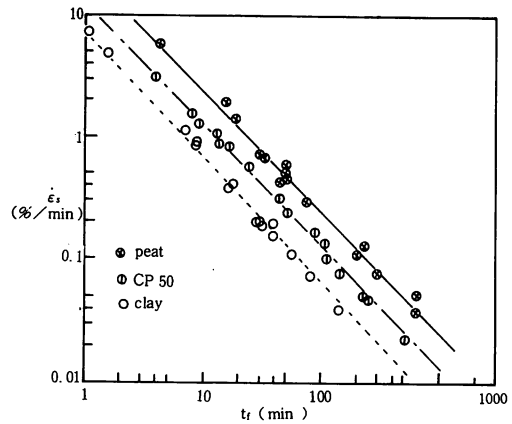


図-6 $\dot{\epsilon}_s$ と t_f の関係

小値をとり、この値がクリープの破壊特性を知るうえで有力な因子となりうるものが、齊藤・上沢ら¹⁾によって実験的に示されている。そこで、今回用いた試料、すなわち泥炭性有機質土、CP50 および粘土について、定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ と破壊時間 t_f との関係について示せば、図-6 となる。この図からわかるように、各試料ともほぼ 45° の直線勾配を示し、それらの関係式は、次のように示される。

泥炭： $\log \dot{\epsilon}_s = -\log t_f + 1.395,$
 $\dot{\epsilon}_s \cdot t_f = 24.8 \dots\dots\dots(2)$

CP50： $\log \dot{\epsilon}_s = -\log t_f + 1.140,$
 $\dot{\epsilon}_s \cdot t_f = 13.8 \dots\dots\dots(3)$

粘土： $\log \dot{\epsilon}_s = -\log t_f + 0.857,$
 $\dot{\epsilon}_s \cdot t_f = 7.2 \dots\dots\dots(4)$

上式の $\dot{\epsilon}_s \cdot t_f = C$ における定数 C は、試料の種類、すなわち有機物含有量に大きく依存するものであり、強熱減量値 L_1 の増加にともなって、その値は増大することが認められる。

一方、泥炭性有機質土について、通常のひずみ制御試験から得られたデータ³⁾から、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と破壊時間 t_f との関係をプロットすると、図-7 のようになる。ここで、破壊は、軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ で定義したものである。同図から、図-6 と同様、ほぼ 45° の直線関係が得られ

$\log \dot{\epsilon} = -\log t_f + 1.377, \dot{\epsilon} \cdot t_f = 23.8 \dots\dots(5)$

なる関係があることがわかる。この関係式は、図-6 で示した泥炭のそれと、ほぼ一致することが認められ、

$\dot{\epsilon}_s \cdot t_f \approx \dot{\epsilon} \cdot t_f = const. \dots\dots\dots(6)$

なる関係が近似的に表示される。

このことは、泥炭について通常のひずみ制御およ

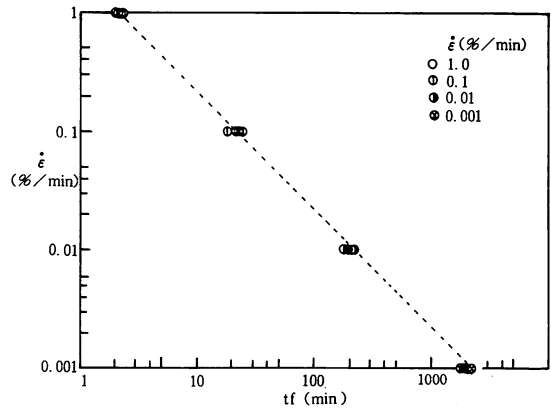
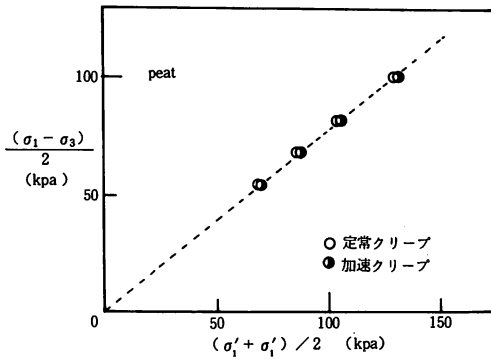


図-7 $\dot{\epsilon}$ と t_f の関係

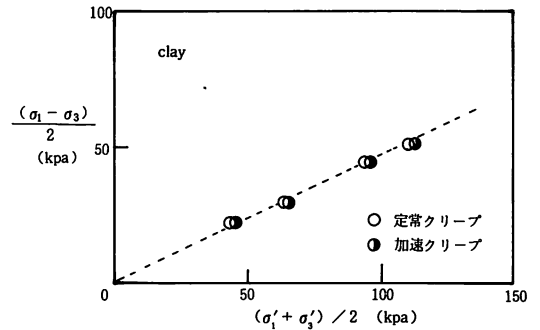
び荷重制御試験を実施した場合、それらの試験方法に関係なく、ひずみ速度と破壊時間の間にほぼ逆比例関係が成立し、それによる破壊ひずみが一定であることを示唆するものである。またこのような関係は、他の試料、すなわち CP50 および粘土についても同様な適用が可能であると考えられる。

栗原²⁾は、粘土の破壊特性について、せん断速度が大きいほど破壊時間が短く、強度が増大するという現象から、 $\dot{\epsilon}_s \cdot t_f$ の関係が通常のひずみ制御試験における $\dot{\epsilon} \cdot t_f$ の関係と等価であることを示している。したがって、この $\dot{\epsilon}_s \cdot t_f \approx \dot{\epsilon} \cdot t_f$ なる関係は、試料の種類、すなわち泥炭および粘土にかかわらず、成立するものである。

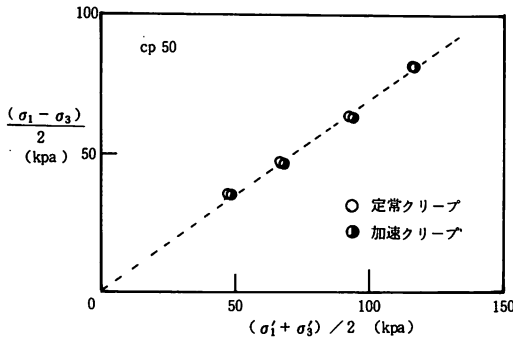
図-8~10 は、各試料の定常クリープおよび加速クリープの開始点におけるせん断抵抗角 ϕ' について、



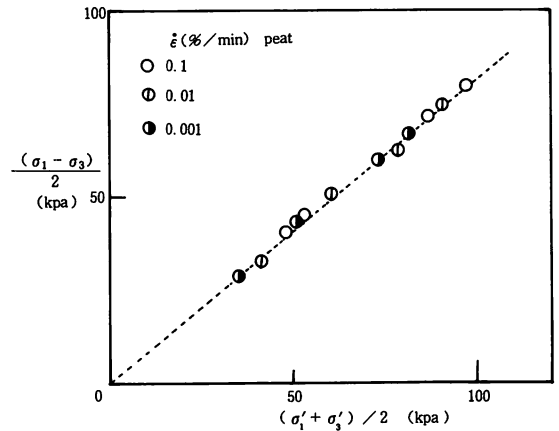
図—8 $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ と $(\sigma_1' + \sigma_3') / 2$ の関係



図—10 $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ と $(\sigma_1' + \sigma_3') / 2$ の関係



図—9 $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ と $(\sigma_1' + \sigma_3') / 2$ の関係



図—11 $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ と $(\sigma_1' + \sigma_3') / 2$ の関係

プロットしたものである。なお、図中のこれらの値は、ひずみ速度を定常クリープ速度で代表させ、間隙水圧の測定精度の点から、ひずみ速度が0.1%/min以下の遅い速度のデータについて表示したものである。非排水クリープ試験結果から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。各試料の定常クリープおよび加速クリープの開始点におけるせん断抵抗角は、これらの開始点に関係なくほぼ一致し、これによって得られる各試料のせん断抵抗角は、それぞれ泥炭：49.2°、CP50：42.9°、粘土：30.4°となる。このように、各試料の定常クリープおよび加速クリープの開始点におけるせん断抵抗角は、これらの開始点、すなわちせん断速度に関係なくほぼ一致し、その値は、有機物含有量の増大にともなって、大きくなることが認められる。さらに、泥炭のせん断抵抗角について、通常のひずみ制御試験からひずみ速度をパラメータ ($\dot{\epsilon}$: 0.1~0.001%/min) にしてプロットすれば、図-11となる³⁾。同図からわかるように、せん断抵抗角は通常のひずみ制御試験においても、ひずみ速度に

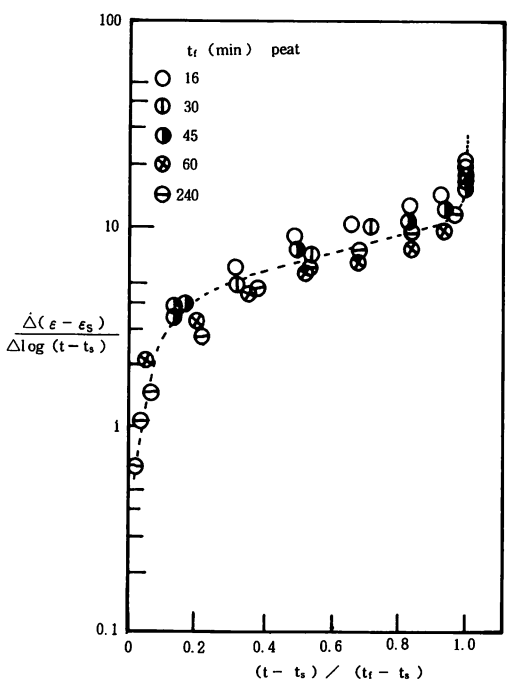
よる影響をほとんど受けず一定となり、その値は $\phi = 52.1^\circ$ となる。

以上のことから、泥炭のせん断抵抗角は、荷重制御試験において、せん断速度による影響をほとんど受けないということ、通常のひずみ制御試験のその挙動によって、さらに裏付けるものである。

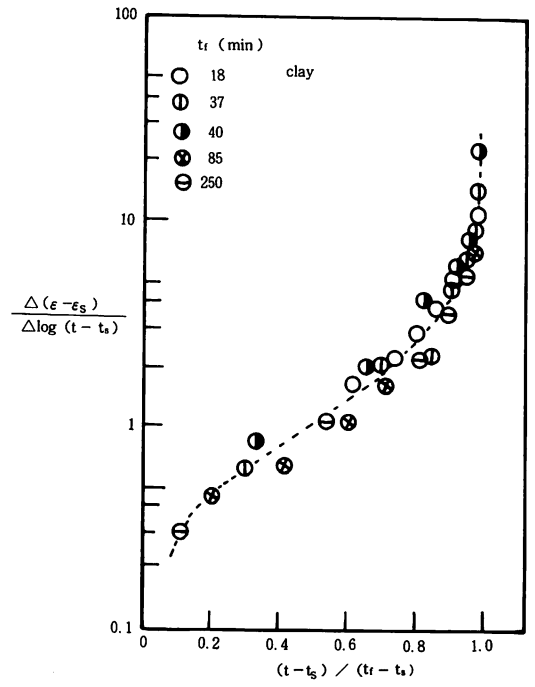
粘土のせん断抵抗角 ϕ' に及ぼすひずみ速度効果については、Richardsonら⁴⁾、Campanellaら⁵⁾、Vaidら⁶⁾によって報告されており、今回用いた試料、すなわち泥炭性有機質土、CP50および粘土について、 ϕ' の値がほとんど変化しない、という実験結果と同様な傾向を示すものである。

さて、北郷ら⁷⁾は、粘土について応力の異方性による粒子構造の変化が、加速クリープ領域の流動過程に与える影響について検討している。その結果、加速クリープ領域の流動過程では、圧密時の応力の異

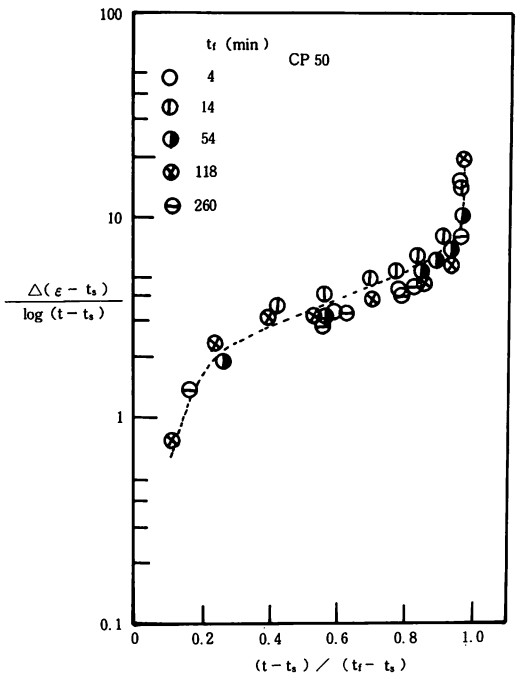
泥炭のクリープ破壊に関する実験的研究



図—12 $\Delta(\epsilon - \epsilon_s) / \Delta \log(t - t_s)$ と $(t - t_s) / (t_f - t_s)$ の関係



図—14 $\Delta(\epsilon - \epsilon_s) / \Delta \log(t - t_s)$ と $(t - t_s) / (t_r - t_s)$ の関係



図—13 $\Delta(\epsilon - \epsilon_s) / \log(t - t_s)$ と $(t - t_s) / (t_r - t_s)$ の関係

方性による影響がほとんど消散すると報告している。以上の現象をふまえ、土の種類、すなわち有機物含有量の変化が加速クリープ領域の流動特性に与える影響について調べてみる。各試料について、加速クリープ領域におけるクリープ破壊の進行状態の尺度として、対数ひずみ速度 $\Delta(\epsilon - \epsilon_s) / \Delta \log(t - t_s)$ と加速クリープ度 $(t - t_s) / (t_f - t_s)$ との関係を示したのが、図-12~14である。これらの図からわかるように、クリープ破壊が進行する度合は、有機物含有量が多いほど、ゆるやかになることが認められる。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に、付加応力を受けた場合のクリープ破壊の進行状態は、粘土のそれとは異なるものと考えられる。図-12~14の加速クリープ領域における流動特性について、更に詳しく検討してみる。泥炭性有機質土、CP50および粘土の各試料は、ともに初期部分ではそのクリープ破壊が急速に進行し、有機物含有量の多いほどその度合は大きい傾向を示すようである。しかしながら、それ以降のクリープ破壊の進行度合は、ややゆるやかになり、有機物含有量が増大する

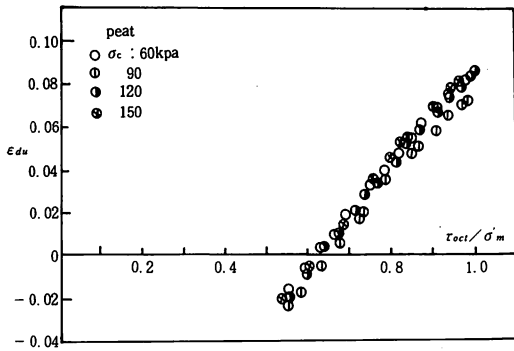


図-15 ϵ_{du} と τ_{oct}/σ'_m の関係

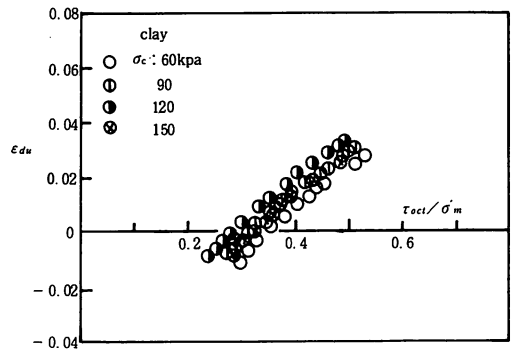


図-17 ϵ_{du} と τ_{oct}/σ'_m の関係

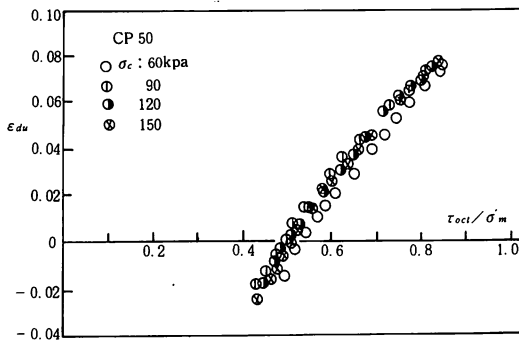


図-16 ϵ_{du} と τ_{oct}/σ'_m の関係

ほど、その割合は遅くなる傾向を示すようである。このように、加速クリープ領域における流動特性は、土の種類によって大きく変化することを裏付けるものである。

つぎに非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ス量を、クリープ試験からその挙動を検討してみる。非排水条件下におけるダイレイタンス相当量 ϵ_{du} ⁹⁾ は、次式で示すことができる。

$$\epsilon_{du} = 3c_s(\Delta u - \Delta \sigma_m) \dots\dots\dots(6)$$

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⁸⁾。

$$3c_s = \frac{c}{(1+e_o)} \frac{\log_{10}(\sigma'_m + \Delta \sigma'_m)/\sigma'_m}{\Delta \sigma'_m} \dots\dots\dots(7)$$

ここで e_o は、等方圧密終了後の間隙比であり、また係数 c としては、従来の研究成果⁹⁾¹⁰⁾から圧縮指数 c_c を用いて整理され、式(6)からそのダイレイタンスを定性的に把握することができる。以上のことから、泥炭性有機質土、CP50 および粘土の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 との関係について示したのが、図-15~17 である。各試料における ϵ_{du} は、ともに応力比の増加にともなって、ほぼ線形的に増大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、泥炭性有機質土の方が、他の試料より大きい値を示していることがわかる。このことは、泥炭性土のもつ特性値に起因するものと考えられる。 ϵ_{du} の挙動について、更に詳しく検討してみればわかるように、各試料の ϵ_{du} は、ともに応力比が比較的小さい領域では、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初めて ϵ_{du} は、その増分に対応して増大する傾向を示すようである。またクリープ応力によって、これらの試料の ϵ_{du} が増加しない、すなわち収縮が生じない τ_{oct}/σ'_m の限界値を求めると、泥炭性有機質土で約 0.60、CP50 で 0.50 さらに粘土では 0.30 となり、試料の種類によってその限界値が変化することを示唆するものである。

4. ま と め

泥炭性有機質土、CP50 および粘土の各試料について、三軸非排水クリープ試験から得られた主な結論は次のとおりである。

- 1) 泥炭性有機質土、CP50 および粘土の定常クリープ開始点のひずみ ϵ_s は、それぞれクリープ応力に関係なく、ほぼ一定である。
- 2) 各試料の定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ と破壊時間 t_f の間には、逆比例関係が成立し、その比例定数は、有機物含有量が増大するほど大きくなる。
- 3) 泥炭性有機質土について、通常のひずみ制御試験によるひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と破壊時間 t_f との間には、荷重制御試験と同様、逆比例関係が成立し、その比例定数は、それとほぼ同じ値となる。

4) 各試料の加速クリープ領域における流動過程について、クリープ破壊が進行する度合は、有機物含有量が増加するほど、ゆるやかになることが認められる。

参 考 文 献

- 1) 齊藤・上沢 (1960) : 土のクリープ破壊に関する実験的研究, 鉄道技術研究報告, 128号, pp. 1~9.
- 2) 栗原則夫(1971) : 粘土のクリープ破壊に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 202号, pp. 59~71.
- 3) 対馬・岩崎・宮川 (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.
- 4) Richardson and Whitman (1963) : "Effect of strain rate upon undrained shear strength of a saturated remould fat clay," *Geotechnique*, vol. 13, no. 4, pp. 310~324.
- 5) Campanella and Vaid (1974) : "Triaxial and plane strain creep rupture of an undisturbed clay," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 1~10.
- 6) Vaid and Campanella (1977) : "Time-dependent behavior of undisturbed clay," *Proc., ASCE*, vol. 103, no. GT7, pp. 693~709.
- 7) 北郷・三田地・山口 (1977) : Ko圧密した飽和粘性土の非排水クリープ破壊について, 第12回土質工学会研究発表会, pp. 311~314.
- 8) 対馬・及川 (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. 22, pp. 133~141.
- 9) Roscoe and Burland (1968) : "On the generalized stress-strain behavior of wet clay," *Engineering Plasticity*, Cambridge Univ. Press., pp. 535~609.
- 10) Mitachi and Kitago (1979) : "The influence of stress history and stress system on stress-strain strength properties of Saturated clay," *Soils and Foundations*, vol. 19, pp. 45~61.