研究ノート

泥炭性有機質土のクリープ破壊特性に関する実験的研究

(Experimental Study on Creep Rupture Characteristics of Peat)

対馬 雅己* (Masaki Tsushima)

キーワード：クリープ／粘土／破壊／変形／有機質土／有効応力 (IGC: D 5/D 6)

1. はじめに

泥炭性有機質土から成る地盤は、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物の多様な混合体であるため、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。

このような軟弱地盤上に構造物や盛土などを載荷することによって、体積変化とともに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に至る。

泥炭性有機質土の性質は、その密度、含水量さらに粘土の混入による有機物含有量などが互いに関連し合うことが予想される。そのため、粘性土と比べて、泥炭性有機質土のクリープ破壊現象は、複雑であり定量的に把握しにくい点が多い。

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について、非排水条件下におけるクリープ破壊特性を検討し、更に従来の研究成果¹⁾をもとに、通常のひずみ制御試験と応力制御試験におけるそれらの破壊特性との関係についても、実験的に調べるものである。

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をも用いた(以下、泥炭性有機質土：

試料 No. 1, 粘土：試料 No. 2, 混合土：試料 No. 3 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、100 kPa 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、ワイヤーソーなど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、等方圧密非排水クリープ試験である。60, 90, 120, 150 kPa の 4 種類の圧力で等方圧密した後、非排水条件下で一定の軸差応力を載荷してクリープ試験を行う。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セル型圧力変換器、また軸方向変位はダイヤル型変位変換器でそれぞれ計測した。軸荷重載荷は、ペロフラムシリンダーからブルーピングリングを介して、一定の軸圧を保つ方式とした。なお、この試験において、軸圧を一定に保つため供試体の変形が均一であるとして、断面変化に伴う荷重補正を行った。

3. 実験結果および考察

試料 No. 1 および試料 No. 2 のクリープ挙動について

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 (%)
No. 1	1.82	430	237	56
No. 2	2.68	68	32	6
No. 3	2.17	201	96	34

* 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)
(1984. 7. 10 原稿受付・討議期限 1985. 10. 1, 要請があれば 1 か月の期限延長可能)

て示せば、図-1, 2 となる。ここで、クリープ応力 q は、圧密圧力 p で正規化している。これらの図から分かるように、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。また図には示していないが、試料 No. 3 についても上述と同様な傾向が得られた。これらの図を詳しく検討してみると、有機物含有量の多い試料、すなわち泥炭性有機質土（試料 No. 1）の方が粘土（試料 No. 2）と比較して、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大きいことが認められる。このことは、植物性繊維やその分解物質から成る泥炭性有機質土であるため、付加応力を受けた場合その軸ひずみ ε の挙動は、粘土のそれとは異なるものである。

図-1 ε と t の関係 図-2 ε と t の関係 図-3 $\Delta u/p$ と t の関係 図-4 $\Delta u/p$ と t の関係

また、試料 No. 1 および試料 No. 2 について、クリープ応力による発生間隙水圧の挙動を示せば、図-3, 4 となる。ここで発生間隙水圧 Δu は、圧密圧力 p で正規化している。試料 No. 1 および試料 No. 2 の Δu の挙動は、クリープ応力の大きさにそれぞれ対応していることが分かる。 Δu の性状についてももう少し詳しく検討してみる。試料 No. 1 の Δu は、変形初期の状態からかなり大きい値を示し、それ以降は、ゆるやかに推移している。一方、試料 No. 2 のそれは、試料 No. 1 とはやや異なり、変形とともにゆるやかに増加していく傾向を示す。このような現象は、これらの試料の構成材料の相違などが主な要因であると考えられる。

図-5 は一例として試料 No. 1 について、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ とその時の時間 t の積 $\dot{\varepsilon} \cdot t$ との関係を示す。これによって、前述した三つのクリープ領域部分が明確に表示される。すなわち、遷移クリープは 45° より小さい勾配の直線、定常クリープは 45° の勾配の直線、加速クリープは 45° 以上の勾配の曲線となる。なお、図中の矢印は、定常クリープおよび加速クリープの開始点である。また、図には表示していないが、他の試料、すなわち試料 No. 2, No. 3 についても上述と同様な傾向が認められた。以下、定常クリープおよび加速クリープの開始点の時間 t_s , t_a 、更にそれらの開始点のひずみ ε_s , ε_a 、また破壊時間 t_r については、図-5 で示した手法によって整理したものである。

図-1, 2 の傾向を具体的に説明するために、定常クリープの開始点のひずみ ε_s とクリープ応力 q/p との関係

図-5 $\dot{\varepsilon} \cdot t$ と t の関係 図-6 ε_s と q/p の関係

を示せば、図-6 となる。各試料の $\dot{\epsilon}_s$ 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ことが認められる。また試料ごとに $\dot{\epsilon}_s$ を比較すると、試料 No. 1 のほうが、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、 $\dot{\epsilon}_s$ が大きく変化することを示すものである。粘土のクリープ応力による限界のひずみ、すなわち $\dot{\epsilon}_s$ については Campanella ら²⁾ の研究報告があり、今回用いた試料 No. 2 のそれとほぼ同様な傾向を示す。

次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。斉藤ら³⁾ は、粘土のクリープ破壊試験において、定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ がクリープ破壊過程で最小値をとり、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ことを実験的に示している。また栗原⁴⁾ は、通常のひずみ制御あるいは荷重制御試験において、せん断速度が大きいほど破壊時間が短く、強度が大きいという現象から、 $\dot{\epsilon}_s \cdot t_f$ 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述べている。

そこで、試料 No. 1、試料 No. 2 および試料 No. 3 について、定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ と破壊時間 t_f の関係を示せば、図-7 となる。この図から分かるように、各試料ともほぼ 45° の直線勾配を示し、それらの関係式は、次のようになる。

試料 No. 1:

$$\log_{10} \dot{\epsilon}_s = 1.344 - \log_{10} t_f \quad \dot{\epsilon}_s \cdot t_f \approx 22.1 \quad (1)$$

試料 No. 2:

$$\log_{10} \dot{\epsilon}_s = 0.863 - \log_{10} t_f \quad \dot{\epsilon}_s \cdot t_f \approx 7.3 \quad (2)$$

試料 No. 3:

$$\log_{10} \dot{\epsilon}_s = 1.146 - \log_{10} t_f \quad \dot{\epsilon}_s \cdot t_f \approx 14.0 \quad (3)$$

各試料の $\dot{\epsilon}_s \cdot t_f$ における比例定数は、有機物含有量に大

図-7 $\dot{\epsilon}_s$ と t_f の関係

きく依存するものであり、この含有量の増加に伴って、その値は増大することが認められる。このことは、泥炭性土の特性値に起因するものと考えられる。

一方、試料 No. 1 すなわち泥炭性有機質土について、通常のひずみ制御試験結果¹⁾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-8 のようになる。この図から、図-7 と同様なほぼ 45° の直線関係が得られ、

$$\log_{10} \dot{\epsilon} = 1.377 - \log_{10} t_f \quad \dot{\epsilon} \cdot t_f \approx 23.8 \quad (4)$$

となることが示される。この関係式は、図-7 で示した試料 No. 1 のそれと、ほぼ一致することが認められ、

$$\dot{\epsilon}_s \cdot t_f \approx \dot{\epsilon} \cdot t_f = \text{const.} \quad (5)$$

なる関係が近似的に表示される。

このことは、泥炭性有機質土（試料 No. 1）について、通常のひずみ制御および応力制御試験におけるひずみ速度と破壊時間との比例定数、すなわち破壊ひずみは、これらの試験方法に関係なくほぼ一致することを示唆するものであり、更に（5）式の適用性を他の試料 No. 2 および試料 No. 3 まで拡張することができるものと考えられる。

試料 No. 1 について、定常クリープおよび加速クリープの開始点における有効応力状態をプロットすれば、図-9 となる。なお、この図はひずみ速度を定常クリー

図-8 $\dot{\epsilon}$ と t_f の関係

図-9 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 \sim (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ の関係

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、しかもこれらの開始点における有効応力は、図-5 で示した手法を基礎として整理したものである。非排水クリープ試験結果から得られたすべての点は、若干ばらつきはあるものの、原点を通る直線上にあると考えられる。定常クリープおよび加速クリープの開始点における有効応力比 m 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有効応力比は、 $m = 0.782$ となる。また図には表示していないが、試料 No. 2 および試料 No. 3 の有効応力状態について整理すれば、上述と同様な傾向が得られ、これによる有効応力比は、それぞれ試料 No. 2 : 0.506 、試料 No. 3 : 0.699 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有効応力比は、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伴って、大きくなることが認められる。

一方、通常のひずみ制御試験について、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ をパラメータ ($\dot{\epsilon} = 0.1 \sim 0.001\%/min$) として試料 No. 1、すなわち泥炭性有機質土の破壊時の有効応力比 m をプロットすれば、図-10 となる。この図から分かるように、破壊時の有効応力比は通常のひずみ制御試験においても、せん断速度による影響をほとんど受けないことが明らかとなり、その値は $m = 0.788$ となる。

このことは、泥炭性有機質土（試料 No. 1）について、応力制御試験による定常クリープおよび加速クリープの開始点における有効応力比が、これらの開始点、すなわち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によるひずみ速度をパラメータとした同試料の破壊時の有効応力比の挙動によって、更に裏付けられるものである。

粘土の有効内部摩擦角 ϕ' （有効応力比 m に相当）に及ぼすひずみ速度効果については、Richardson ら⁵⁾、Campanella ら²⁾、Vaid ら⁶⁾ によって報告されており、今回用いた試料 No. 1～No. 3 について、 m の値がほと

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

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及ぼす影響について調べてみる。

各試料について、対数ひずみ速度 $\Delta(\epsilon - \epsilon_a) / \Delta \log_{10}(t - t_a)$ と加速クリープ度 $(t - t_a) / (t_r - t_a)$ との関係を示せば、図-11～13 となる。これらの図から、全般的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、試料 No. 1 のほうが試料 No. 2 と比べて、それを構成している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、そのクリープ破壊の進行状態が異なるものと考えられる。

図-11～13 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。各試料は、ともにその初期部分でクリープ破壊が急速に進行するが、それ以降では、有機物含有量が増大するほどその進行度合は遅くなり、最終的に破壊に達していることが分かる。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示唆するものであろう。

図-11 $\Delta(\epsilon - \epsilon_a) / \Delta \log_{10}(t - t_a)$ と $(t - t_a) / (t_r - t_a)$ の関係

図-12 $\Delta(\varepsilon-\varepsilon_0)/\Delta \log_{10}(t-t_0)$ と $(t-t_0)/(t_r-t_0)$ の関係

図-13 $\Delta(\varepsilon-\varepsilon_0)/\Delta \log_{10}(t-t_0)$ と $(t-t_0)/(t_r-t_0)$ の関係

4. 結 論

泥炭性有機質土、粘土およびその混合土の各試料について、非排水条件下におけるクリープ破壊特性を実験的に解析した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) 泥炭性有機質土、粘土およびその混合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となり、各試料とも限界のひずみが存在した。

2) 各試料の定常クリープ速度 $\dot{\varepsilon}_s$ と破壊時間 t_r 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加するほど大きい値を示した。

3) 泥炭性有機質土について、通常のひずみ制御および応力制御試験から得られた $\dot{\varepsilon} \cdot t_f$ 、 $\dot{\varepsilon}_s \cdot t_r$ の値は、試験方法に関係なく等価であることが認められた。

4) 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有効応力比 m は、それらの開始点に関係なく、ほぼ一定となった。

5) 各試料の加速クリープ領域における流動特性は、有機物含有量によって異なることが示された。

最後に、本研究をとりまとめるにあたって、御助言を頂いた北海道大学工学部三田地利之教授に謝意を表します。

記 号 説 明

m = 有効応力比

p = 有効圧密圧力 (kPa)

q = クリープ応力 (kPa)

t = 経過時間 (min)

t_r, t_f = 応力制御およびひずみ制御試験による破壊時間 (min)

t_s, t_a = 定常クリープおよび加速クリープの開始点における時間 (min)

Δu = 発生間隙水圧 (kPa)

ε = 軸ひずみ (%)

$\dot{\varepsilon}$ = ひずみ制御試験によるせん断速度 (%/min)

$\dot{\varepsilon}_s$ = 定常クリープ速度 (%/min)

$\varepsilon_s, \varepsilon_a$ = 定常クリープおよび加速クリープの開始点におけるひずみ (%)

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) Campanella, R. G. and Vaid, Y. P. (1974) : "Triaxial and plane strain creep rupture of an undisturbed clay," Canadian Geotechnical Journal, Vol.11, pp.1-10.
- 3) 斎藤迪孝・上沢 弘 (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.
- 4) 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.
- 5) Richardson, A. V. and Whitman, R. V. (1963) : "Effect of strain-rate upon undrained shear resistance of a saturated remould fat clay," Géotechnique, Vol.13, No.4, pp.310-324.
- 6) Vaid, Y. P. and Campanella, R. G. (1977) : "Time-dependent behavior of undisturbed clay," Proc. ASCE, Vol.103, No. GT 7, pp.693-709.
- 7) 北郷 繁・三田地利之・山口晴幸 (1977) : K_0 圧密した飽和粘土の非排水クリープ破壊について, 「第 12 回土質工学研究発表会」, pp.311~314.