

## 二、三の砂質土および粘性土のクリープ特性について

### Creep Characteristics of Some Sandy- and Clayey-Soils

松倉 公憲\*・水野 恵司\*\*・今永 元\*\*\*

Yukinori MATSUKURA, Keiji MIZUNO and Gen IMANAGA

#### I はじめに

一般に、“一定応力のもとでのひずみ（または変位）の増大”はクリープ（creep）と呼ばれている。自然の斜面においても、斜面を構成する物質（岩石・土）には常に斜面下方に向うせん断応力が作用しており、それによって“continuous creep”が起っている。このような continuous creep は斜面における他のマスマーブメント、たとえば地すべり・山崩れの発生の前駆現象として重要であることが指摘されている（たとえば、Terzaghi, 1950 など）。

従来、このような土のクリープ特性に関しては土質力学の方面において、ミクロな物性論の立場から多くの議論がなされてきた（それらは Yong and Warkentin, 1975, pp. 253-259; Mitchell, 1976, pp. 321-339, などにまとめられている）。また、一方で、土のクリープ特性とマスマーブメント、特に地すべりとの関連を追求した研究がいくつかみられる（たとえば、Ter-Stepanian 1965; 駒村, 1967, 1969; 斎藤, 1968; 宿本ほか, 1979 など）。

ところが、これらの研究の大部分は、粘性土を対象にしており、砂質土を扱ったものはほとんどない。そのため、砂質土のクリープ特性に関してはほとんど明らかにされていないようである。そこで、本研究は砂質土のクリープ特性を明らかにすることを目的とし、そのために、二、三の砂質

土および粘性土のクリープ特性の比較検討を行なった。特に本研究では、地形学的意味についての考察が可能となるよう、実際に山崩れ・地すべりを生起させている土を研究の対象とした。

#### II クリープ実験の方法および試料

##### 1) 実験装置

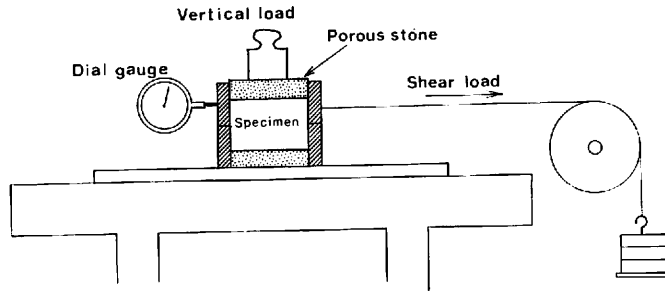
従来、クリープ特性に関する実験装置や実験条件について規格化されたものはない。そこで本研究では、試験機を自作した。その装置の概要を第1図に示した。試験機は基本的には一面せん断の形となっている。せん断箱はアクリル製の内径6 cm, 高さ4 cmの円筒形の上箱と下箱とから成っている。試料はこの上下の箱の中にセットされ、その上にポーラスストーンとおもりを載せることにより垂直荷重がかけられる。下箱は実験台に固定されているが、上箱は釣り糸を介しておもりによって引張られ、それによってせん断箱中の試料にせん断力が加えられるようになっている。せん断によって生ずる水平変位は、ダイヤルゲージによって計測される。

##### 2) 実験に用いた試料

実験には、マサとシラス、および2つの地すべり地の粘土の合計4種類の土を用いた。

マサは、茨城県十王町の角閃石黒雲母花崗岩からなる山地において採取した。この地域では、勾配が40°~59°ほどの斜面上で、鉛直深1 mほどの風化土層(マサ)がしばしば崩壊をおこしており、サ

\* 筑波大学地球科学系 \*\* 筑波大学・院・地球科学研究科 \*\*\* 筑波大学自然学類 (1984年5月21日受理)



第1図 実験装置の概要

第1表 実験対象にした試料の諸物性

試料名	マサ (角閃石・黒雲母 花崗岩風化物)	シラス (入戸火砕流堆積 物)	粘土1 (ハンレイ岩風化 物)	粘土2 (泥岩風化物)	
試料採取地	茨城県十王町	鹿児島県国分市	茨城県八郷町	千葉県鴨川市	
斜面勾配	47°	45°-55°	11°-14°	11.6°	
マスマーブメントの様式	山崩れ	山崩れ	地すべり	地すべり	
比重 $G_s$ (-)	2.64	2.49	2.76	2.74	
乾燥単位体積重量 $\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1.84	0.91	1.24	1.51	
間隙率 $n$ (%)	31.0	63.4	55.0	44.8	
自然含水比 $w_n$ (%)	6.9	16.1	40.6	28.7	
比表面積 $S_v$ (m <sup>2</sup> /g)	—	6.08	—	39.5	
粒度	{ 砂 (>64 $\mu$ m) (%) シルト (2~64 $\mu$ m) (%) 粘土 (<2 $\mu$ m) (%) }	95	83	15	18
		5	15	40	34
		2	45	48	
液性限界 $w_L$ (%)	non-plastic	—	53.8	54.9	
塑性指数 $I_p$ (-)	—	—	29.2	36.7	
粘着力 $c'$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.067	0.11	0.169 (ピーク) 0.122 (残留)	0.081 (ピーク) 0.057 (残留)	
せん断抵抗角 $\phi'$ (度)	33.4	43.0	27.8 (ピーク) 10.6 (残留)	12.2 (ピーク) 9.2 (残留)	
含有鉱物	—	quartz plagioclase hyperthene metahalloysite vermiculite illite volcanic glass	plagioclase hornblende swelling chlorite kaolinite halloysite stilbite	quartz plagioclase K-feldspar illite Chlorite montmorillonite illite/ montmorillonite 混合層鉱物	
引用文献	松倉・田中(1983) Matsukura and Tanaka (1983)	松倉ほか (1982) Matsukura et al. (1984)	松倉ほか (1979) 松倉 (1980) 松倉・水野(1984)	水野 (1983) (一部のデータ は未発表)	

ンプリングはこの風化土層の最下部で行なった。

シラスは、鹿児島県国分市に広がるシラス台地において採取した。台地の縁辺には谷の開析に伴

なって形成された高さ70mほどの45°~55°の勾配をもつ斜面が形成されている。この斜面は非溶結の入戸火砕流堆積物（通称シラス）からなり、そ

ここでは豪雨時にしばしば鉛直深1 mほどの表層崩壊が発生する。

2つの粘土は、茨城県八郷町東山と千葉県鴨川市宇東の地すべり地において採取した。前者を粘土1、後者を粘土2と呼ぶことにする。東山は、ハンレイ岩風化物からなる $11^{\circ}\sim 14^{\circ}$ の勾配をもつ斜面で、深度6.4 mにすべり面が存在する。また、鴨川の採取地は漸新統の泥岩を基盤とする勾配 $11.6^{\circ}$ の緩斜面であり、2 mの厚さの崩積粘土が地すべりを発生させている場所にあたる。

これらの4つの試料の物理的性質、力学的性質、鉱物組成などを第1表にまとめた。マサと粘土2の単位体積重量( $\gamma_d$ )はやや大きく、間隙率( $n$ )がやや小さい。これに対し、シラスは小さな $\gamma_d$ と大きな $n$ をもっている。自然含水比は、粘土1、2で大きく、マサとシラスで小さい。粒度組成をみると、マサ、シラスは砂分が卓越しており、シルト・粘土の細粒分が極めて少ない。一方、粘土1、2は砂分の割合が15、18%と少なく、シルト・粘土分がいずれも80%以上を占めている。コンシステンシーにおける差異も同様であり、マサとシラスが non-plastic であるのに対し、粘土1、2は塑性に富む。せん断強度定数をみると、マサとシラスのせん断抵抗角がかなり大きく、逆に粘土1、2の残留強度のそれが極めて小さい値をもつ。シラスには膨潤性の粘土鉱物は含まれていないのに対し、粘土1には swelling chlorite、粘土2には montmorillonite および illite/montmorillonite 混合層鉱物がそれぞれ含まれており、これらがいわゆる“地すべり粘土”になっている。

### 3) 実験条件

上述の4種類の土を十分に浸水させた飽和含水状態でせん断箱につめ、その後、垂直応力を  $0.268 \text{ kgf/cm}^2$  で2日間圧密した。試験時の垂直応力はいずれの実験の場合も  $0.268 \text{ kgf/cm}^2$  に統一した。これは湿潤単位体積重量が  $1.8 \text{ gf/cm}^3$  の土からなる斜面の約1.5 mの深さにおける垂直上圧に相当する。

実験は20分ごとに载荷せん断力を徐々に増加させる多段階クリープ試験によって行なった。加え

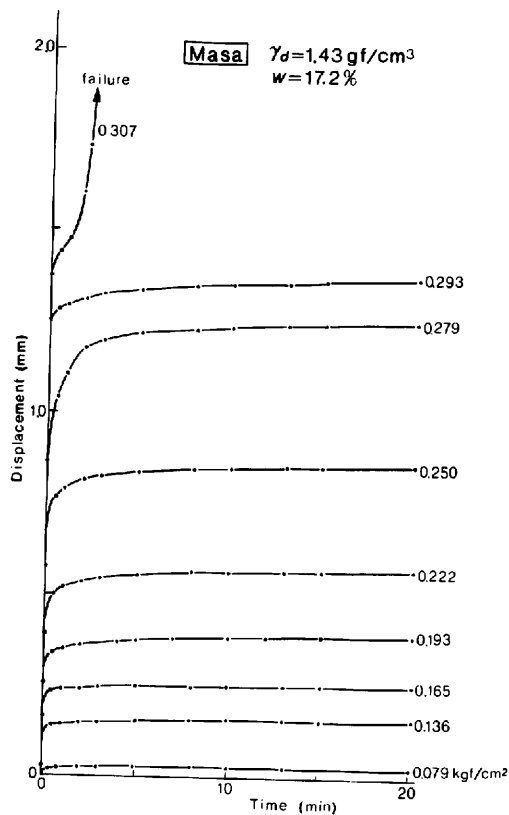
たせん断応力は7.1, 14.3, 22.1および  $28.5 \text{ gf/cm}^2$  の4種類のうちから、土の種類や実験時の土の挙動を勘案して適当なものを選定した。

## III クリープ実験の結果および考察

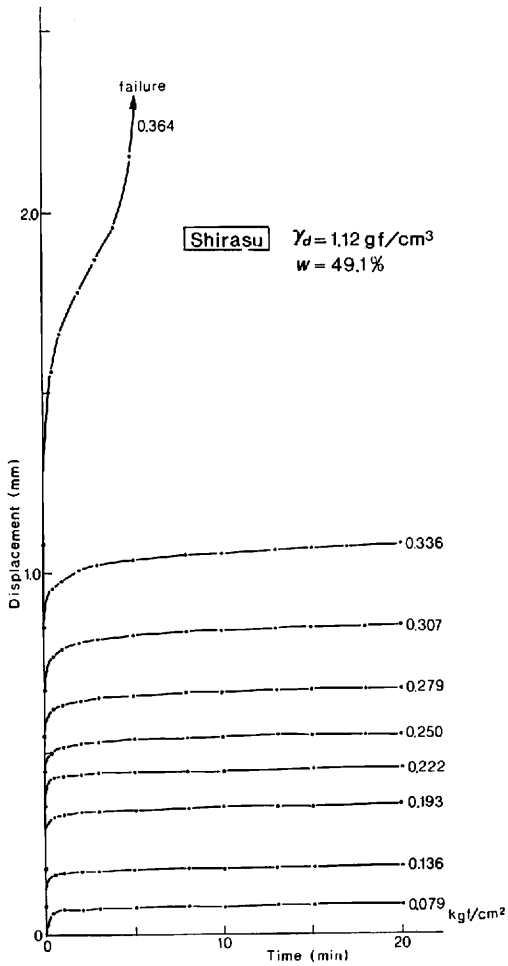
### 1) クリープ曲線の定性的特徴

実験結果の時間変位曲線をそれぞれの試料ごとに第2図～第5図に示した。

一般に、多段階クリープ試験におけるクリープ曲線には、加えたせん断応力に応じていくつかのタイプが存在することは既に知られている。それを模式的に示したのが第6図(A)である。せん断力の小さい場合は短時間で変位が止まる (Type I, II)。ところが、せん断応力の大きい場合には二次クリープ (secondary creep)、三次クリープ (tertiary creep) が出現し、最終的に破壊に至



第2図 マサにおける時間～変位曲線

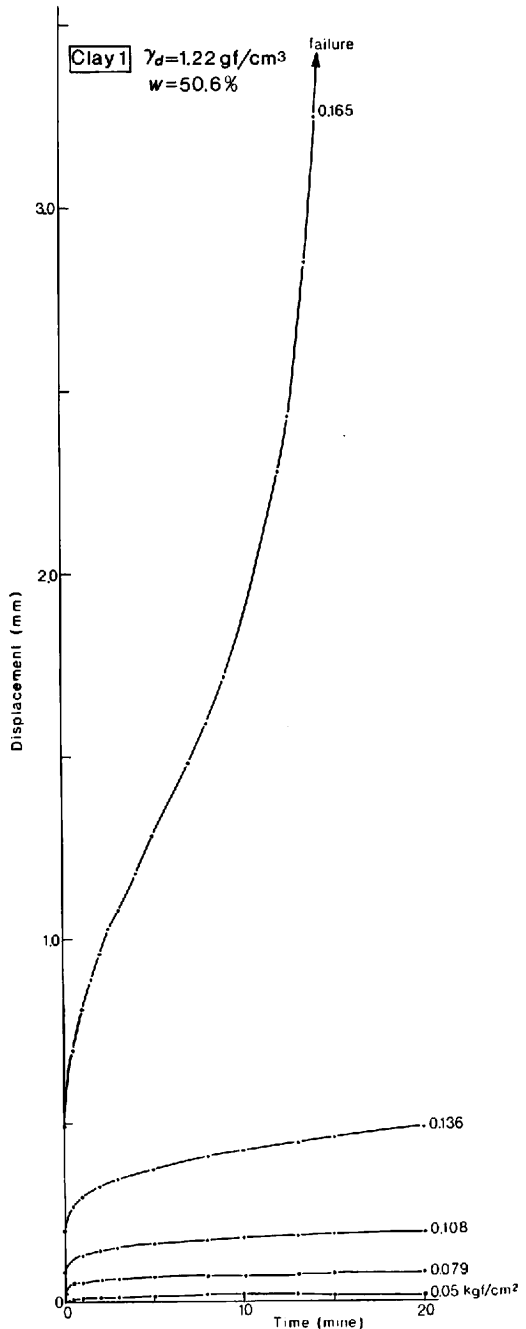


第3図 シラスにおける時間～変位曲線

る (Type III)。

第2図から第5図に示された本実験結果は、上述の模式図と全く類似のパターンを示しており、いずれの試料も典型的なクリープ挙動をするようである。そして個々のクリープ曲線の形態を詳しく比較すると、マサとシラスの類似性、および粘土1と粘土2の類似性が顕著に認められる。そこで、マサとシラスを“砂質土”，粘土1と粘土2を“粘性土”と一括して称呼することになると、それらのクリープ曲線に認められる定性的な特徴は次のようになる。

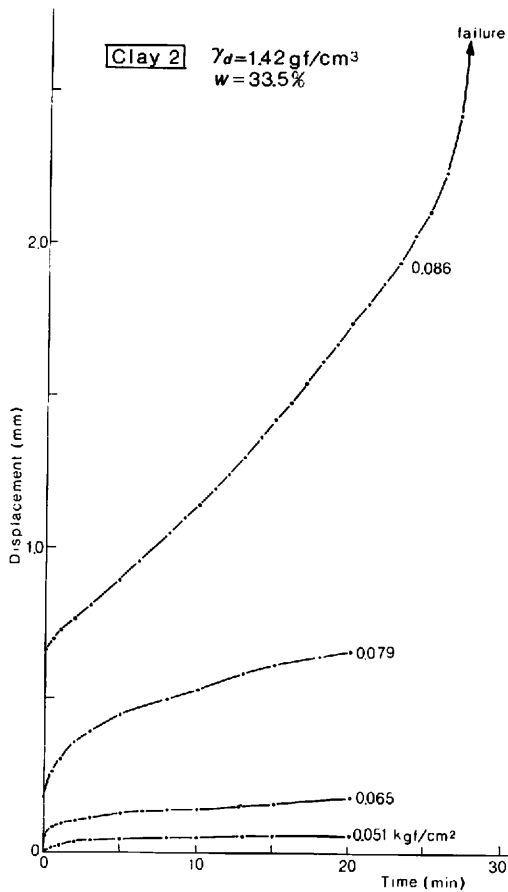
砂質土の場合：(1) せん断荷重載荷直後の変形



第4図 粘土1における時間～変位曲線

量 (弾性変形に相当する) が大きい、その後継続変位は極めて小さく、ある値に落ち着く。(2)

マサで 0.307 kg/cm<sup>2</sup>、シラスで 0.364 kg/cm<sup>2</sup>と



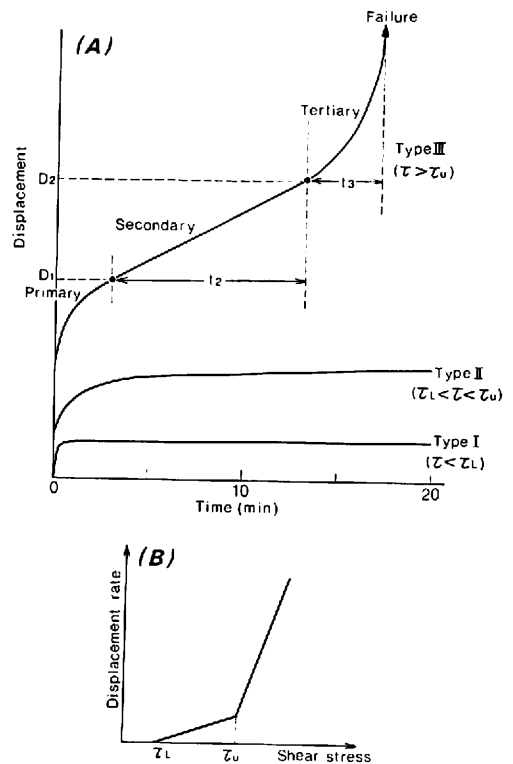
第5図 粘土2における時間～変位曲線

いう比較的大きなせん断応力のもとで変形が急速に進行し、短時間で破壊に至る。

粘性土の場合：(1)せん断荷重載荷後、瞬間的な変位の増加が小さく、緩やかに変形が進む。(2)比較的小さいせん断応力で大きな変形がみられる。(3)粘土1では  $0.165 \text{ kgf/cm}^2$ 、粘土2では  $0.086 \text{ kgf/cm}^2$  という小さなせん断応力で変位速度が徐々に増加し、明瞭な二次クリープおよび三次クリープを経過したあと破壊に至る。(4)破壊時の最終変位は砂質土より大きい。

## 2) クリープ特性値の比較と若干の考察

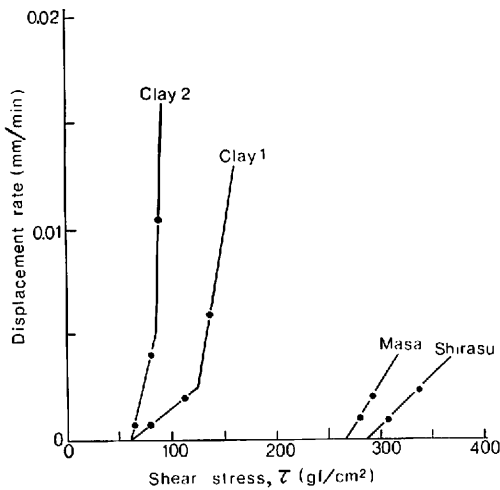
前述のようなクリープ曲線の特徴を定量的に比較するために、ここでは次のような値を計測した。上限降伏値、下限降伏値、二次クリープ変位速度



第6図 (A)：多段階クリープ試験による模式的クリープ曲線。(B)：上限降伏値( $\tau_u$ )および下限降伏値( $\tau_L$ )の求め方の模式図。

二次クリープ持続時間、二次クリープ変位量、三次クリープ持続時間の6つの量である。

上限降伏値および下限降伏値の求め方はいくつか提案されているが、ここでは、村山・柴田(1956)や福本(1976)らが用いている変位速度法に従った。この方法は第6図(B)に示したように、各せん断応力下の任意の時間における変位速度を載荷応力ごとにプロットするもので、ある点を境に変位速度が急増し、直線が屈折する点を見出すことができる。この点が上限降伏値( $\tau_u$ )となる。また変位速度がゼロの点を下限降伏値( $\tau_L$ )とする。ここでは載荷後15分後の変位速度を求めて、せん断応力ごとにプロットした。その結果が第7図に示されているが、この図では  $\tau_L$  以下にプロットされる点は繁雑さを避けるため省略してある。この図から  $\tau_u, \tau_L$  を求めた。また、第6図(A)の模



第7図 せん断応力と載荷後15分後における変位速度との関係

式図で示されるような種々の値を用いて、二次クリープ持続時間： $t_2$ 、二次クリープ変位量： $D_2 - D_1$ 、二次クリープ変位速度： $(D_2 - D_1)/t_2$ 、三次クリープ持続時間： $t_3$ などの値が、各々のクリープ曲線から求められた。

得られた結果を第2表にまとめた。上限降伏値、下限降伏値ともに砂質土で大きく、粘性土で小さい。この傾向はせん断強度の大小とほぼ対応するようである。すなわち、第1表の強度定数を用いて、垂直応力  $268 \text{ gf/cm}^2$  に相当するせん断強度を求めると、マサとシラスでそれぞれ  $244 \text{ gf/cm}^2$ 、 $360 \text{ gf/cm}^2$  と大きく、粘土1、粘土2では  $172 \text{ gf/cm}^2$ 、 $100 \text{ gf/cm}^2$  と小さく、降伏値の傾向と合っている。

二次クリープ変位速度を比較すると  $0.04 \sim 0.1 \text{ mm/min}$  までの間にバラツキ、傾向は読みとれな

い。第2表にのせた値は最終載荷荷重におけるクリープ曲線から求めたものであるが、粘土1および粘土2ではその1つ前の載荷段階においても二次クリープが認められ、その変位速度はそれぞれ  $0.0062 \text{ mm/min}$ 、 $0.010 \text{ mm/min}$  と求められる。このように同一の土においても載荷荷重の大小によって二次クリープ変位速度は異なることから、4種の土のこの値を比較することは意味がないであろう。

これに対し、二次クリープ持続時間、同変位量（いずれも最終載荷時の値）をみると、砂質土と粘性土の間には明瞭な差異のあることが認められる。すなわち、マサとシラスの二次クリープ持続時間は、0.5分、1.0分と短いのにに対し、粘土1では5分、粘土2では8分とかなり長くなる。同様にその変位量は、マサで  $0.03 \text{ mm}$ 、シラスで  $0.09 \text{ mm}$  と極めて小さいのに対し、粘土1では  $0.52 \text{ mm}$ 、粘土2では  $0.36 \text{ mm}$  と大きい。このことは、砂質土では二次クリープのおこる時間および変位量の領域が極めて狭く、逆に粘性土ではそれが広いことを示している。三次クリープの持続時間についても同じことが言える。すなわち、マサとシラスはそれぞれ1分および2分と短いのにに対し、粘土1は6分、粘土2は19分と非常に長い。

以上の結果をまとめると次のようになる。砂質土においては、上限降伏値、下限降伏値ともに大きく、しかも二次クリープ持続時間、および三次クリープ持続時間が短く、二次クリープ変位量も極めて小さい。一方、粘性土の場合は、上限降伏値、下限降伏値ともに小さく、二次クリープおよび三次クリープの持続時間が極めて長く、二次クリープ変位量も大きい。換言すると、砂質土にお

第2表 各試料におけるクリープ特性値

	上限降伏値 ( $\text{gf/cm}^2$ )	下限降伏値 ( $\text{gf/cm}^2$ )	二次クリープ 変位速度 ( $\text{mm/min}$ )	二次クリープ 持続時間 ( $\text{min}$ )	二次クリープ 変位量 ( $\text{mm}$ )	三次クリープ 持続時間 ( $\text{min}$ )
マサ	300	264	0.060	0.5	0.03	1.0
シラス	350	292	0.090	1.0	0.09	2.0
粘土1	151	60	0.104	5.0	0.52	6.0
粘土2	83	60	0.045	8.0	0.36	9.0

いては、荷重の大きい所で降伏がおり、二次クリープおよび三次クリープが極めて短時間に進行し、すぐ破壊に至る。一方、粘性土は低荷重で降伏がおり、その後、長時間にわたり二次クリープ、三次クリープの変形をしたのちに破壊する。このようなクリープ変形特性の差異が、砂質土から成る斜面では脆性破壊的に斜面が崩れ落ちる、いわゆる“山崩れ”が発生し、粘性土から成る斜面では、変形が緩慢で継続的な塑性変形運動である“地すべり”が生起することに密接に関連すると思われる。

#### IV おわりに

山崩れに関連したマサとシラスの多段階クリープ試験を行なった結果、このような砂質土においても、比較的大きなせん断力が作用すると、二次クリープおよび三次クリープを経たのちに破壊することが判った。しかし、その持続時間や変位量は、地すべり地から採取した粘土に比較して、はるかに短く、小さいことが判った。すなわち、粘性土に比較して、二次クリープおよび三次クリープの時間と変位の領域が極めて狭いことになり、このことが、砂質土斜面での“山崩れ”という運動様式に強く反映していることが予想される。

#### 謝 辞

本研究を行なうにあたり、水理実験センター・小島豊盛技官には、実験装置の作成に多大の御協力を頂いた。記して感謝の意を表する。

#### 文 献

- 駒村富士弥 (1967) : 地すべり土のレオロジー的特性とその特性にもとづく地すべりの動き方について。地すべり, 4-2, 10-20.
- 駒村富士弥 (1969) : 地すべり土の挙動に関するレオロジー的研究(I)。新砂防, 73号, 7-12.
- 斎藤迪孝 (1968) : 斜面崩壊発生時期の予知に関する研究。鉄道技術研究報告, 626号, 1-53.
- 福木安正 (1976) : 地すべり粘土のクリープ特性(1)。地すべり, 13-3, 6-13.

- 福木安正・寺川俊浩・小宮利彦 (1979) : 地すべり斜面の安定解析と原位置大型供試体の長期クリープ試験。地すべり, 15-4, 1-11.
- 松倉公憲・木股三善・谷津榮壽 (1979) : 柿岡盆地北部, 東山におけるハンレイ岩の風化と地すべり粘土の生成。地理評, 52, 30-39.
- 松倉公憲 (1980) : 筑波山周縁に分布する二, 三の土の力学的性質と地形学的意味について。地理評, 53, 54-61.
- 松倉公憲・林田伸一・前門晃 (1982) : シラス台地をつくる火砕流堆積物とその諸性質。第17回土質工学会研究発表講演集, 25-28.
- 松倉公憲・田中保行 (1983) : 阿武隈山地南部のまさ土斜面における表層崩壊。第18回土質工学会研究発表講演集, 29-30.
- 松倉公憲・水野恵司 (1984) : 柿岡盆地北部, 東山地すべりにおける斜面勾配とその力学的安定について。地理評, 57, 485-494.
- 水野恵司 (1983) : 千葉県南部の地すべりと斜面傾斜。筑波大学地球科学研究科修士論文, 52 p(未公表).
- 村山朔郎・柴田徹 (1956) : 粘土のレオロジー的特性について。土木学会論文集, 40号, 1-31.
- Matsukura, Y. and Tanaka, Y. (1983) : Stability analysis for soil slips of two grass-slopes in Southern Abukuma Mountains, Japan. *Trans., Japanese Geomorphological Union*, 4, 229-239.
- Matsukura, Y., Hayashida, S. and Maekado, A. (1984) : Angles of valley-side slope made of “Shirasu” ignimbrite in South Kyushu, Japan. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 28, 179-191.
- Mitchell, J. K. (1976) : *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley and Sons, New York, 422 p.
- Ter-Stepanian, G. (1965) : In-situ determination of the rheological characteristics of soils on slopes. *Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, 2, 575-577.
- Terzaghi, K. (1950) : Mechanism of landslides. *Bull. Geol. Soc. Am.*, Berkeley Volume, 202-245.
- Yong, N. R. and Warkentin, B. P. (1975) : *Soil properties and behaviour*. Elsevier Scientific Pub., Amsterdam, 449 p.