

破碎帯地すべりの移動量予測

A PREDICTION METHOD ON DISPLACEMENT OF FRACTURED ZONE LANDSLIDE

八木 則男*・榎 明潔**・矢田部龍一***

By Norio YAGI, Meiketsu ENOKI and Ryuichi YATABE

Behaviour of fractured zone landslide is analysed based on the soil mechanics from a stand point of effective stress. Analysis of displacement of landslide is conducted considering the creep phenomenon of clay and the stress level at slip layer. Creep characteristic of landslide clay is investigated by the triaxial creep test. Stress level is obtained by the stability analysis considering strength parameters of clay obtained from slip surface. Relative rate of creep deformation at each stress level corresponding to each height of ground water table is calculated using the results of creep tests. The results of calculation explain qualitatively the behaviour of Nuta and Inuyose landslides.

Keywords: landslide, creep, clay, stability analysis

1. ま え が き

四国には東西に多くの構造線が走り、日本でも有数の複雑な地質を呈している。これらの構造線に沿っていわゆる破碎帯地すべりが多発し、甚大な物的、人的被害を受けている。また、近年、四国縦貫、横断道などの大規模な建設工事が行われつつあるが、地すべりに起因する難工事が多い。防災対策のみならず、建設工事を行ううえからも、破碎帯地すべりの機構の解明、予測法の確立が急務である。

破碎帯地すべりの移動形態をみると一度に完全に崩壊してしまうことはまれである。多くは年間に数 mm から数 cm 程度継続して動いているが、たまには豪雨時に数 m 移動するものもある。移動速度は年間を通じて一様というわけではなく、地下水位の変動などの影響を受けて変化していると思われる。地すべりの変形挙動を解明し、また、移動速度の変化を予測することは重要なことである。現在、地すべりの抑止工の設計は、安全率 1 を絶対基準として、安全率が 1 より小さければ地すべりが発生し、1 よりも大きければ地すべりは止まるという

考えに基づいて行われている。これは地すべりの変形挙動が未解明であるからである。地すべりの変形挙動が解明され、移動速度の変化が予測できれば、変形の観点からの設計法も可能となる。しかし、破碎帯地すべりの変形挙動に関してはほとんど研究がなされていない。佐々¹⁾は善徳地すべりの移動速度と地下水位が密接に関係していることなどを明らかにし、また、高橋ら²⁾は善徳地すべり地の小ブロックの変形挙動をクリープ理論で説明できることなどを明らかにしている。

変形挙動を土質力学的に解明しようとするれば、移動速度に与える間隙水圧（地下水位）の影響、地すべり粘土のクリープ特性、すべり面の応力レベルなどさまざまな問題を解明する必要がある。そこで、本研究では、四国の地すべりでは比較的移動量の大きい怒田地すべりおよび犬寄地すべりを対象として、変形挙動の実態を観測資料から把握し、地すべり粘土のクリープ特性および応力レベルの検討に基づいて変形挙動の解明を行い、また、移動速度の変化に対する予測法の開発を試みた。

2. 現地観測データに基づいた破碎帯地すべりの挙動

(1) 対象とした地すべり地

破碎帯地すべりの変形挙動の解明を試みる目的である

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科
(〒790 松山市文京町3)

** 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科(同上)

*** 正会員 工博 愛媛大学助手 工学部海洋工学科(同上)

ので地すべりの特徴として、①累積移動量が大きいこと、②移動量、地下水位、降雨量などの観測が時間的、空間的に比較的密にかつ長期間にわたって行われていること、の2点から対象地を選択した。対象としたのは、怒田（ぬた）地すべりおよび犬寄（いぬよせ）地すべりである。この両者とも四国の地すべりの中では移動量が比較的大きい方である。しかし、破碎帯地すべりの移動量は第三紀層地すべりのそれと比べれば一般的にはかなり小さい。各地すべり地の概略を以下に示す。

a) 怒田地すべり³⁾

高知県長岡郡大豊町怒田に位置している。本地すべりは規模的に日本有数のもので、建設省の直轄地すべり対策事業実施地となっている。斜面の傾斜は約20°程度である。地質的には三波川帯の南側の御荷鉾帯に位置している。すべり面付近の御荷鉾緑色岩はほとんど粘土化している。すべり面は最深部で25 m程度である。Fig. 1(a)に平面図を、Fig. 1(b)に縦断面図を示す。

b) 犬寄地すべり⁴⁾

愛媛県伊予市犬寄峠の国道56号線沿いにある。三波川帯の北縁部に位置しており、北方100 mに中央構造線が走っている。基盤是三波川結晶片岩類で、斜面の平均傾斜(25°程度)より緩い10°~20°の層理面をなしている。すべりは結晶片岩が粘土化した1 m足らずの粘土層で起こっている。Fig. 2(a)に平面図を、Fig. 2(b)に縦断面図を示す。

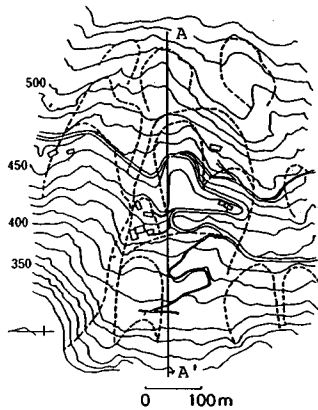


Fig. 1(a) Plan of Nuta landslide.

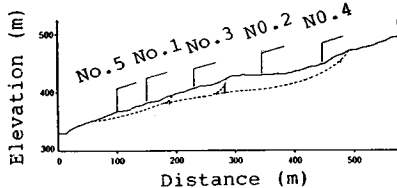


Fig. 1(b) Vertical section of Nuta landslide.

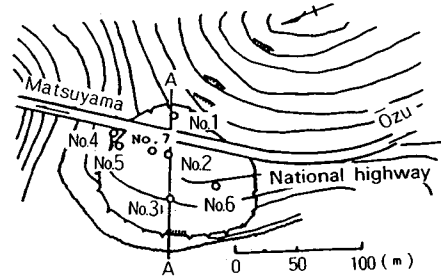


Fig. 2(a) Plan of Inuyose landslide.

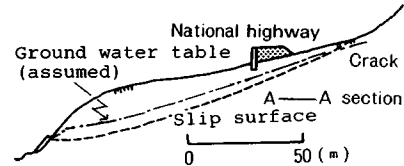


Fig. 2(b) Vertical section of Inuyose landslide.

(2) 現地観測結果および考察

a) 怒田地すべり

地下水位観測はNo. 2~No. 4孔で、移動量観測はNo. 3, 4孔で行っている。観測期間は昭和55年1月から昭和56年12月の2年間である。Fig. 3にNo. 3孔で観測された月間移動量、月平均地下水位、月間降水量の関係を示す。なお、移動量は孔内傾斜計で、地下水位は水位観測により行われている。観測期間中の移動量は8 cm程度である。これから、移動量と地下水位それと降水量の間には正の相関関係があることがわかる。すなわち、降雨時には地下水位が上昇することによる有効応力の低下を主要因として、移動量が大きくなっていると思われる。また、自重の増加によりせん断応力も変化するが、地下水面が上昇するまでは地すべりでは斜面勾配が小さく、したがってすべり面勾配も緩く、一般には安定側になる。多雨期と小雨期の移動量を比べると最高5倍程度の違いがみられる。

b) 犬寄地すべり^{5), 6)}

昭和57年4月から昭和58年12月までの月平均降水量と月平均移動量の関係をFig. 4に示す。なお、移動量は孔内傾斜計で測定されている。観測期間中の全移動量は5 cm程度である。若干のばらつきはあるが、多雨期と小雨期で移動量に2~3倍の違いがみられる。本地すべりでも地下水位観測は行われていたが、すべり面よりはるかに深くボーリングされた観測孔を用いていたせい、すべり面上に地下水位は観測されなかった。しかし、昭和59年8月から行ったすべり面深度までボーリングした観測孔を用いた測定ではすべり面より上に水位が観測されている。その年は、最高で日雨量50 mm程度の雨量しかなかったが、そのときに地下水位は50 cm程

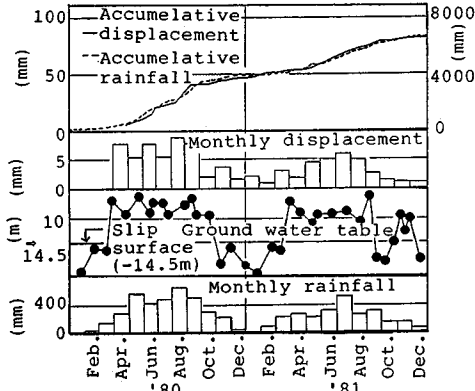


Fig. 3 Relationships between landslide movement, ground water table and rainfall.

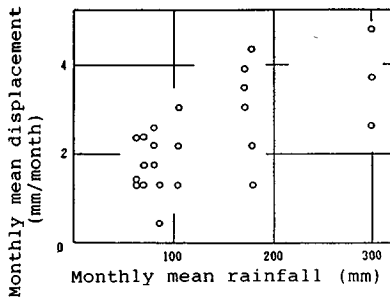


Fig. 4 Relationship of displacement and rainfall.

度上昇していたことが観測されている。したがって、本地すべりでも降雨に伴う地下水位の変動が移動速度に影響を与えていることがわかる。

以上の2つの地すべりの観測データから、降雨に伴い地すべりの移動速度が変化することが明らかになった。なお、著者らは、これ以外にも四国の破碎帯地すべりでは移動速度と降雨量との相関が強いものが多いことをすでに明らかにしている⁷⁾。

前述したように、怒田地すべりと犬寄地すべりのすべりは粘土化した層で起こっている。したがって、この地すべりの変形挙動を解明するためには、地すべりの粘土のクリープ特性を解明する必要がある。また、降雨時の地下水位の変動すなわち有効応力の変化により移動速度は変化しているわけであるから、すべり面の応力レベルの変化も明らかにすることが必要である。

3. 地すべり粘土の非排水クリープ特性

(1) 試料, 実験方法

試料には怒田地すべりおよび犬寄地すべりのボーリングコアより採取したすべり面の粘土を使用した。試料は250 μ のふるいを通して、粗粒分を除いている。物性および粒度を Table 1 に示す。粒度分布は沈定法により求

Table 1 Physical properties and gradation.

Sample	G.	W _L (%)	P _L (%)	Gradation (%)		
				<5 μ	5-74 μ	74-250 μ
Nuta	3.02	33.5	16.2	42	53	5
Inuyose	2.73	35.9	24.2	37	58	5
Choja	2.79	34.2	20.3	19	69	12

めている。なお、後述のNCとRNCのクリープ特性を比較するために行った実験には、長者地すべり粘土を使用したのでその物理的性質も併記してある。

供試体は、250 μ のふるいを通した粘土試料を液性限界以上の高含水比で練り返し再圧密した正規圧密供試体を使用しており、直径35mm、高さ80mmである。試料の練り返しには水道水中のイオンの影響を考慮して、イオン交換水を使用した。

実験は圧密非排水三軸クリープ試験であり、圧密圧力は294kPaである。圧密終了後、非排水せん断強度を基準として一定のクリープ荷重を載荷し、軸ひずみ、間隙水圧、経過時間の関係を測定した。載荷期間は各1週間である。間隙水圧の測定は圧力変換器を介して静ひずみ計により行った。クリープ試験時にはバックプレッシャー196kPaを作用させ、B値が0.95以上の供試体についてのみ試験を行った。

すべり面の粘土は長い年月にわたって、せん断、発生間隙水圧の消散による圧密の繰り返して大変形を受けており、また、地下水位の上昇、下降に伴う応力の履歴も何度も受け、いわゆる正規圧密状態とは力学特性が異なっているであろう。クリープ特性も不攪乱試料で調べるべきであるが、破碎帯地すべりでは不攪乱状態での試料のサンプリングは非常に困難である。そこで、低含水比で完全に乱した試料(RNC)といわゆる正規圧密試料(NC)のクリープ特性の違いを調べてみた。試料には怒田粘土、犬寄粘土の量が十分でなかったため、高知県の長者地すべり粘土を使用した。物性などは Table 1 に併記してある。RNC試料は、予圧密して含水比が20%程度になっている試料を空気が入らないようにして手で完全に練り返して作成している⁸⁾。この試料はこの含水比では最も乱された状態のものである。圧密圧力はいずれも294kPaである。試験方法は前述したとおりであるが、RNCに対するクリープ荷重はRNCの非排水せん断強度を基準としている。

(2) 実験結果および考察

Fig. 5 に怒田粘土の、Fig. 6 に犬寄粘土のクリープひずみ速度と時間の関係を示す。ここに、 τ_c はクリープ荷重であり、 $\tau_{s,r}$ は別に行った三軸圧縮試験より求めた静的非排水せん断強度である。

図から怒田粘土では $\tau_c/\tau_{s,r}=0.9$ 、犬寄粘土では $\tau_c/\tau_{s,r}=0.95$ 程度で破壊に至り、それ以下の応力レベルで

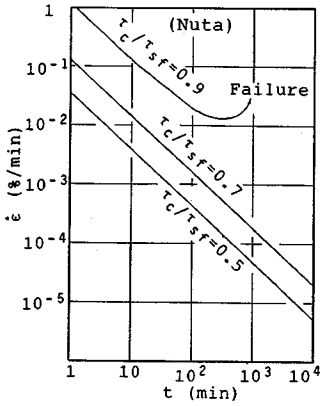


Fig. 5 Changes in strain rate with time.

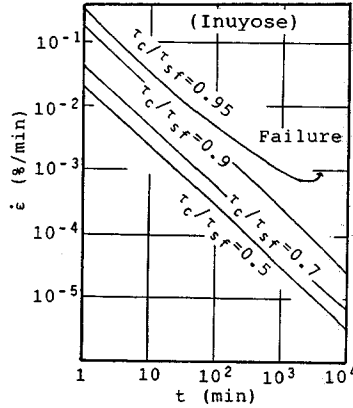


Fig. 6 Changes in strain rate with time.

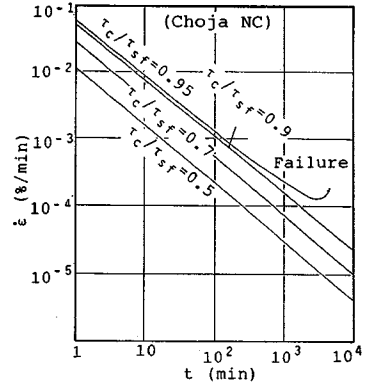


Fig. 7(a) Changes in strain rate with time.

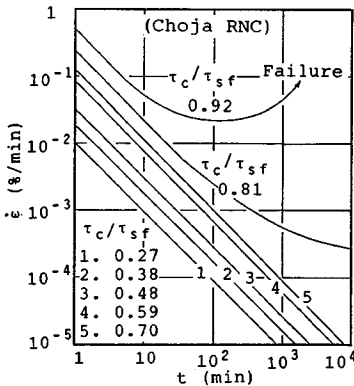


Fig. 7(b) Changes in strain rate with time.

は試験期間中にクリープ破壊を起こしていない。クリープ破壊に至らない場合には、従来指摘されているように、クリープひずみ速度と時間の関係は両対数紙上で直線関係にあり、各応力レベルでその傾きはほぼ等しいことがわかる⁹⁾。

クリープひずみ速度は、 $\tau_c/\tau_{sf}=0.5$ を基準にとると、怒田粘土では $\tau_c/\tau_{sf}=0.7$ で約3倍、 $\tau_c/\tau_{sf}=0.9$ で破壊に至るまでは約25倍である。また、犬寄粘土では $\tau_c/\tau_{sf}=0.7$ で約3倍、 $\tau_c/\tau_{sf}=0.9$ で約8倍、 $\tau_c/\tau_{sf}=0.95$ で破壊に至るまでは約15倍である。

Fig. 7(a), (b) に長者地すべり粘土の NC および RNC のクリープひずみ速度と時間の関係を示す。NC, RNC とも怒田粘土と犬寄粘土の場合と同様にクリープひずみ速度と時間の関係は両対数紙上で直線で、各応力レベルでその傾きはほぼ等しい。ただ、応力レベルと経過時間が同一であれば、RNC は NC と比べてクリープひずみ速度は大きい。また、RNC の上限降伏値は NC と比べて小さくなるようである。

前述したように、破碎帯地すべりの場合、地下水位が

上昇したときに移動速度は大きくなっている。そのときのすべり面の粘土は若干の過圧密状態にあると思われる。したがって、過圧密試料のクリープ特性を解明する必要がある。ただし、地下水面の上下による過圧密化は過圧密比でたかだか2程度であると思われる、傾向的には本実験結果と大差ないと考えられる。また、地下水面の上下に伴い有効応力が変化しているわけであるから、実際の現象を忠実に追跡しようとするれば、クリープ試験も有効応力を繰り返し変化させて行う必要があると考えられる。

4. 地すべりの安定解析およびすべり面の応力レベル

(1) 安定解析

安定解析は非円形のすべり面を仮定する Janbu 法により行った。基礎式を次に示す。

$$F_s = \frac{1}{\sum W_i \cdot \tan a_i} \times \sum \frac{(c'_i - u_i + W_i/b_i) \cdot \tan \phi'_i \cdot F_s \cdot (1 + \tan^2 a_i)}{F_s + \tan \phi'_i \cdot \tan a_i} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、添字 i は分割帯片 i 番目を示す。また、 F_s は安全率、 c' は有効粘着力、 ϕ' は有効内部摩擦角、 W は土の重量、 u は間隙水圧、 b は帯片の横幅、 a は底辺と水平方向のなす角度である。解析手法の詳細は参考文献に示す¹⁰⁾。

式(1)を用いて、怒田地すべり、犬寄地すべりの現状の安全率を求めてみた。解析にあたっての縦断面図は Fig. 1(a), (b) に示すものを用いた。解析に用いた強度定数などを Table 2 に示す。粘土の強度定数はボーリングコアより採取したすべり面の粘土試料を用いて NC 状態の繰り返し再圧密供試体を作成し、三軸圧縮試験に

Table 2 Conditions of calculation.

Data Slide zone	c' (kPa)	φ' (°)	e _o
Nuta	0	28.4	0.68
Inuyose	0	30.0	2.56

Table 3 Calculated safety factors.

Slide zone	Water level	Safety factor
Nuta	Low W.L.	1.58
	High W.L.	1.19
Inuyose	Low W.L.	1.36
	High W.L.	1.27

より求めたものである¹¹⁾。繰り返し再圧密粘土を使用したのは、地すべりの移動と停止に伴いすべり面の粘土が大変形と圧密の繰り返しを受け、繰り返し状態にあると考えられるからである。また、せん断試験の結果、最大せん断ひずみで45%程度においても軟化はみられなかったため、得られた強度は残留強度に近いと思われる。ただし、この点についてはリングせん断試験機等によりさらに調べる必要がある。安定解析結果をTable 3に示す。怒田地すべりでは観測期間中の最高水位のときの安全率が1.19、犬寄地すべりでは安全率が1.27であり、1をきっていない。これより、怒田地すべり、犬寄地すべりともに安全率は1より大きく、したがって、地すべり変動はクリープにより生じていることがわかる。なお、著者らは地すべり粘土の強度特性を考慮して、同様な手法で四国の他の破碎帯地すべりに対しても安定解析を試みているが、安全率は多くのものが1~2程度であるという結果を得ている¹²⁾。

(2) すべり層の応力レベル

クリープ試験からわかるように、粘土のひずみ速度は応力レベルによって変化する。したがって、地すべり地におけるクリープひずみ速度を求める場合、すべり層での応力レベルを知る必要がある。しかし、応力レベルは一樣ではなく、すべり面に沿って変化しているし、すべり層が厚い場合には深さ方向にも変化している。これらのすべり層での平面的また深さ方向の正確な応力レベルの分布を知ることはかなり困難である。そこで、すべり層はかなり薄いと仮定し、すべり層の平均的な応力レベルをもとに移動速度の予測を試みることにする。平均的な応力レベルは次のようにして求められる。

Fig. 10に犬寄地すべりを対象にした安定解析より求めた安全率 F_s と内部摩擦角 ϕ_a の関係を示す。ここで、地下水位はすべり面にほぼ平行と仮定している。Fig. 2(b)に一例としてすべり面上5mの場合の地下水位の位置を併記してある。また、犬寄地すべり粘土の c' はゼロである。これから、それぞれの地下水位の位置に応じて、ある内部摩擦角 ϕ_a のときに安全率は1となつて

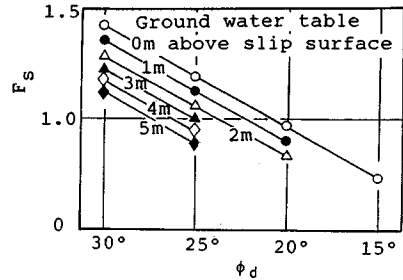


Fig. 10 Changes of safety factor with angle of shearing resistance.

いることがわかる。ここに、 ϕ_a は排水状態での内部摩擦角である。

地すべり粘土の排水状態での内部摩擦角 ϕ_a は、一般に $\phi' = \phi_a$ であるので犬寄地すべり粘土の場合約30°であろうが、安全率が1となるとき内部摩擦角が現に発揮されている内部摩擦角であり、この内部摩擦角を ϕ_m で示す。Fig. 10を参照して安全率が1となるとき、この内部摩擦角 ϕ_m から次のようにして、すべり面での応力レベルを求めることができる。すべり面に現に発揮されている土のせん断強度 τ_m は次式で示される。

$$\tau_m = c_m + \sigma'_c \tan \phi_m \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 c_m 、 ϕ_m はそれぞれ現に発揮されている粘着力と内部摩擦角であり、 σ'_c は有効土被圧である。

また、地すべり粘土の破壊強度 τ_{sr} は次式で示される。

$$\tau_{sr} = c' + \sigma'_c \tan \phi' \dots\dots\dots (3)$$

四国の地すべり粘土では、 $c' = 0$ であるので¹¹⁾、式(2)、(3)から次式のようになる。

$$\tau_m / \sigma'_c = \tan \phi_m \dots\dots\dots (4)$$

$$\tau_{sr} / \sigma'_c = \tan \phi' \dots\dots\dots (5)$$

これから、応力レベル (τ_m / τ_{sr}) は次式で示される。

$$\frac{\tau_m}{\tau_{sr}} = \frac{\tan \phi_m}{\tan \phi'} \dots\dots\dots (6)$$

ϕ' はせん断試験により求めることができる。また、 ϕ_m は上述した安定解析により求めることができるので、平均的な応力レベルを求めることが可能である。

5. クリープ特性に基づいた変形挙動の解析

現地観測データおよび安定解析結果などから、地すべりはクリープ的な挙動を示していることが明らかになった。そこで、地すべり粘土のクリープ特性と応力レベルを考慮して、主に怒田地すべりの変形挙動を土質力学的に考察し、また、犬寄地すべりの挙動についても簡単に考察する。

(1) 怒田地すべり

まず、現地観測から得た移動量とそのときの月平均地下水位によって計算したすべり面上の平均的な応力レベ

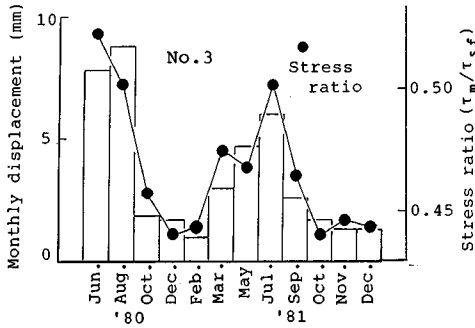


Fig. 11(a) Variations of displacement and stress ratio.

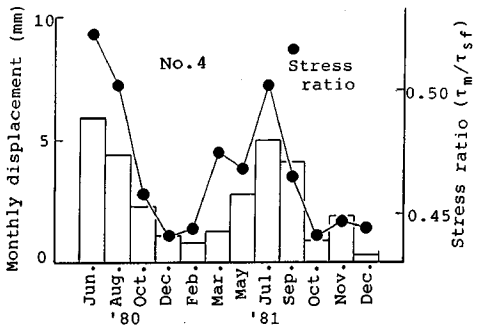


Fig. 11(b) Variations of displacement and stress ratio.

ル (τ_m/τ_{sf}) の変動を Fig. 11(a), (b) に示す。Fig. 11(a) は No. 3 孔の, Fig. 11(b) は No. 4 孔についてのものである。これらの図から、観測期間中の応力レベルは 0.45~0.53 の微小幅で変動しており、応力レベルの変動と移動量の増減とがよく対応していることがわかる。

ここで、室内クリープ試験をもとに怒田地すべりの変形挙動の解明を試みる。

まず、室内クリープ試験から求めた応力レベルとクリープひずみ速度の関係を Fig. 12 に示す。ひずみ速度の値はクリープ試験の経過時間 $t=1$ min のときの値である。今回実験を行った応力の範囲では、怒田粘土、犬寄粘土、長者粘土 (RNC も含めて) とともに応力レベルと対数で取ったクリープひずみ速度の間には直線関係が存在するようである。次に、現地観測結果をもとに求めた応力レベルと移動量との関係を Fig. 13 に示す。ここで、月間移動量は対数で取っている。これから、ばらつきはあるが、室内クリープ試験と同様に応力レベルと移動量の間には一意的な関係が存在するようである。これから、怒田地すべりの変形挙動は地すべり粘土のクリープにより説明できる可能性があることがわかる。

そこで、クリープ試験により求めたクリープひずみ速度と観測より求めた移動量の変化との関係を求めてみる。

いま、Fig. 12 のクリープ試験によるひずみ速度と応

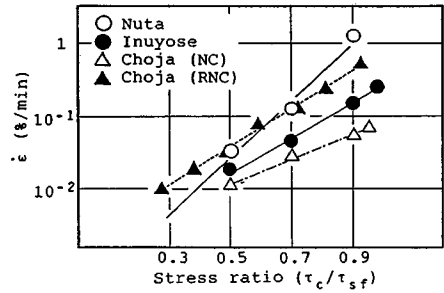


Fig. 12 Relationship between stress ratio and creep strain rate.

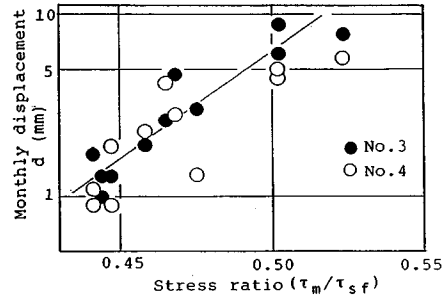


Fig. 13 Relationship between stress ratio and monthly displacement.

力レベルの関係式は、クリープひずみ速度を $\dot{\epsilon}$ として

$$\log \dot{\epsilon} = a \cdot X + b \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで、 a, b は定数であり、 $X (= \tau_c/\tau_{sf})$ は応力レベルである。いま、間隙水圧の変化などによって、応力レベルが X_1 から X_2 に変化したとすると、そのときのひずみ速度の変化率は次式で示される。

$$\log (\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1) = a(X_2 - X_1) \dots\dots\dots (8)$$

一方、地すべり移動量を d とすると、Fig. 13 の直線の式は次のように表わされる。

$$\log d = m \cdot X + n \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 m, n は定数である。このときも応力レベルが X_1 から X_2 に変化するると、移動量の変化率は次式で示される。

$$\log (d_2/d_1) = m(X_2 - X_1) \dots\dots\dots (10)$$

したがって、式 (8) と (10) とから、応力レベルの変化に対応した移動量変化率とひずみ速度変化率との間には、次式で表わされるような関係が存在する。

$$d_2/d_1 = (\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)^{m/a} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、怒田地すべり粘土のクリープ試験より求めたひずみ速度変化率と観測資料に基づいて求めた移動量変化率との関係を Fig. 14 に示す。図中の実線は、Fig. 12 と Fig. 13 に示した実線の傾きを用い、式 (11) によって与えられたものであり、応力レベル 0.47 におけるひずみと変位で正規化されている。これをみると多少ばらつきはあるものの、式 (11) の関係が成立するようであ

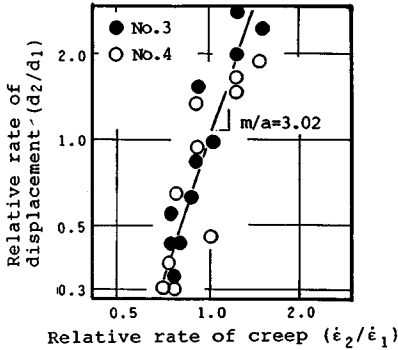


Fig. 14 Relationship between landslide movement and creep rate by triaxial test.

る。ただし、 m/a の値であるが、今回行った地すべり粘土試料のクリープ試験がすべり面の粘土のそれをよく再現しており、また、解析するにあたっての種々の仮定が実際の現象にはほぼ矛盾のないものならば、1程度とならねばならない。しかし、3.02と1よりかなり大きい値となった。 m/a の値が1でない理由として次のことが考えられる。

① すべり面の粘土は完全な非排水状態でクリープ変形しているわけではない。すなわち、地下水位が高くなって移動速度が大きいときはより非排水クリープに近い挙動をするが、水位が低下して動きが緩慢なときは地下水位が高いときと比べてより排水クリープに近い状態になっていると思われる。

② 現地観測は月単位程度の観測であるので、必ずしも最高水位を観測できていない。また、地下水位は間隙水圧の変化に比べて鈍く、間隙水圧を正確に表わしていないと思われる。

③ 繰り返し再圧密した試料のクリープ特性と、すべり面の粘土のそれとは異なる。すなわち、すべり面の粘土はせん断による大変形、また、間隙水圧の消散による圧密といった履歴を絶えず受けている。したがって、種々の履歴を与えた試料もしくは不攪乱試料を用いてクリープ試験を行う必要がある。

④ すべり層（あるいは、すべり面）が非常に薄いと仮定して解析しているが、地すべりの中には明確なすべり層をもたずに深さ方向に土塊全体が変形しているようなものもある。このような地すべりに対しては別の解析が必要である。

(2) 犬寄地すべり

犬寄地すべりは怒田地すべりほどの観測がなされていないので、上述したような移動解析を行うことはできない。そこで、以下に示すような検討を行ってみた。

地下水位の位置を種々変えた場合のすべり面上での応力レベルを Table 4 に示す。地下水位が存在しない場合

Table 4 Stress ratio correspond to ground water table.

Ground water table	Stress ratio (τ_m/τ_{sf})
0m (above slip surface)	0.658
1m	0.707
2m	0.763
3m	0.810
4m	0.852
5m	0.890

($\tau_m/\tau_{sf}=0.658$)を基準に取れば、地下水位が5m ($\tau_m/\tau_{sf}=0.890$)になると約5倍のクリープひずみ速度となる。Fig. 4で検討したように多雨期、小雨期で変位速度が2~3倍変化していたことと今回のクリープひずみ速度に対する考察から考えると斜面内でかなり地下水位が変化していることが予想される。

以上、怒田地すべりでは、地すべり粘土のクリープ特性から地すべりの変形挙動が一意的に決定される可能性があることを明らかにした。また、犬寄地すべりでは、多雨期、小雨期の移動速度の違いを地すべり粘土のクリープ特性とすべり面の応力レベルの検討から概略ではあるが説明が可能であることを示した。

ここで、地すべりの移動量予測について考える。まず、怒田地すべりであるが、Fig. 13から、対数表示した月間移動量は応力レベルとほぼ直線関係にあることがわかる。応力レベルは地下水位と対応しているので、地下水位を測定することにより移動量の変動を予測することができる。また、Fig. 3から地下水位と降雨量にも相関が認められるので、降雨量からも移動量の変化を予測することができる可能性がある。犬寄地すべりの場合も、Fig. 4に示したように若干のばらつきはあるが、移動量と降雨量の間に関係が認められるので、降雨量の変化から移動量の変化を予測できることがわかる。しかし、これらの関係は対策工が施工されて地すべり地の応力レベルが変化すれば当然変わる。

ところで、今まで対策工を行うにあたっては、安全率の観点からの検討がほとんどである。しかし、対策工事を行っても施工量によっては移動量が減少するだけで、完全に地すべりが止まらない場合がある。したがって、対策工の効果費用に関して変動挙動の観点からの検討も必要となるであろう。今回示した解析手法によれば、対策工の効果を変形速度の面からも検討することができる。しかし、そのような解析手法を確立するためには、今後、移動量、地下水位（できればすべり面の間隙水圧）、降雨量などに関する現場観測をより精度よく、また、時間的により密に行い、それとともに詳細な安定解析および変形解析を行い、観測結果と解析結果を比較検討することにより解析法をより信頼性の高いものにしていく

ことが必要である。

6. あとがき

怒田地すべりおよび犬寄地すべりの変形挙動の解明のため、現地観測資料による変形挙動の把握、地すべり粘土のクリープ特性の解明、すべり面の応力レベルの検討を行い、土質力学的観点から変形挙動に対する考察を加え、変形挙動の予測法の検討を行った。得られた結論は次のようである。

(1) 現地観測データの解析によって、怒田地すべり、犬寄地すべりの変形挙動と降雨量（および地下水位の変動）との間に相関性がみられた。これから、地下水位の変化に伴う有効応力の変動を主要因として移動速度が変化していることが明らかになった。

(2) クリープ試験から破碎帯地すべり粘土も明瞭なクリープ現象を示すことが明らかになった。また、クリープひずみ速度と応力レベルとの関係は片対数紙上で直線で近似でき、応力レベルが増大するとクリープひずみ速度は指数的に増加することが明らかになった。

(3) 怒田地すべりに関しては、応力レベルと移動量の間の一意的な関係があることが確かめられた。また、クリープひずみ速度の変化率と地すべり移動量の変化率との間にも一意的な関係がある。したがって、地すべりの移動量の変化を定量的に予測できる可能性がある。

(4) 犬寄地すべりに関しては、地すべり粘土のクリープ特性とすべり面の応力レベルの検討から、概略ではあるが多雨期、小雨期の実際の移動速度の変化を説明することができた。

(5) 以上の手法を用いれば、移動速度の変化を定量的に評価できる可能性がある。したがって、対策工の設計に際しては、変形挙動の観点からの検討も行われることが望ましい。

本研究を行うにあたって、怒田地すべり、犬寄地すべりの観測資料ならびにボーリング試料は建設省四国地建吉野川砂防工事事務所および同松山工事事務所の、また、長者地すべりの粘土試料は高知県土木部砂防課および越

智土木事務所のご好意によるものである。また、実験、計算に際しては、当時愛媛大学大学院生 国富和真氏（現・鴻池組）、同工学部学生 篠原浩一氏（現・関東電気工業）、同 吉本 明氏（現・日本総合システム）にお世話になった。関係諸氏、諸機関に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Sassa, K. : Monitoring of a crystalline schist landslide—compressive creep affected by “under ground erosion”—, Proc. IVth ISL, Vol.2, pp.179~184.
- 2) Takahashi, N. and Tsunaki, R. : Movement of a small block in Zentoku landslide observed in June, 1984, Proc. IVth ICFL, pp.169~174, 1985.
- 3) 建設省四国地方建設局吉野川砂防工事事務所：怒田地すべり観測業務報告書，1982，1983.
- 4) 建設省四国地方建設局松山工事事務所：犬寄地すべり調査報告書，1983，1984.
- 5) 八木則男・榎 明潔・矢田部龍一・永江正憲：犬寄地すべりの挙動に対する土質力学的検討，地すべり，Vol.23, No.1, pp.8~15, 1985.
- 6) Yagi, N., Enoki, M. and Yatabe, R. : Analysis of Inuyose landslide based on creep phenomenon, Proc. Vth ICFL, pp.79~83, 1987.
- 7) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔：破碎帯地すべりの移動特性に及ぼす降雨の影響，地すべり，投稿中
- 8) 八木則男・矢田部龍一・松村真一郎：繰り返し時含水比の異なる再圧密土の力学特性，土木学会論文報告集，第330号，pp.99~106, 1983.
- 9) Singh, A. and Mitchell, J.K. : General stress-strain-time function for soils, Proc. ASCE, Vol.94, No. SM1, pp.21~46, 1968.
- 10) 矢田部龍一・榎 明潔・八木則男：降雨浸透を考慮した斜面安定解析法の検討，地すべり，Vol.22, No.3, pp.1~7, 1985.
- 11) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔：破碎帯地すべり粘土の力学特性，土木学会論文集，第406号／Ⅲ-11, 1989年6月.
- 12) 矢田部龍一：粘性土の強度特性を考慮した破碎帯地すべり地の安定解析，愛媛大学工学部紀要，第11巻，第3号，pp.449~457, 1988.

(1988.5.16・受付)