

秋田県谷地地すべりに関するレオロジー的考察

伊 藤 驍

Rheological Investigation on the Yachi Landslide, Akita Prefecture, Japan

Takeshi ITO

(昭和56年10月31日受理)

Yachi landslide is called rock slide and which includes laminated and weathered bentonitic green tuff. The soil behaviour in this landslide area depends generally on the hydrostatic condition of clay seams which are parted in base rock shales. To investigate the soil mass behaviour a four-element rheological model developed by Dr. Komamura is thus applied. First, rheological characteristic boundaries are discussed concerning the stability numbers derived from soil parameters. Then an example of displacement and time is analysed. The maximum cohesive strength and angle of internal friction of soil are decided to this landslide based on the variations of displacement. Finally, time dependent displacements upon varying of delayed time factors are presented. From the model, it is shown that Yachi landslide is governed highly by Bingham element prior to Voigt element, and it is also found that a fairly large value of delayed time factor for this landslide should be used.

1. はじめに

谷地地すべりは、頁岩の上にポーラスな崩積土が厚く堆積し、その頁岩と下位の頁岩との間に挟まれている軟弱な凝灰岩類の clay seams によって移動している時間依存性の高い地すべりである。この地すべりのシームを成す凝灰岩類は風化破碎が進んでおり、強度は頁岩の $1/100$ 程度しかなく非常に高い延性度をもっている。ボーリング結果によれば、地すべり面は概ねこの粘土シームにありこのシームの境界摩擦によるいわゆる岩盤内部不連続面ですべる岩盤地すべりであると定義されている¹⁾。しかし地すべりブロックによっては地下水に余り関与しないいわば固体摩擦とみられる鏡肌(slickenside)も存在し、崩壊の形態は一様でない。このことは同一地すべり内でも細かくみれば摩擦運動の形態が Fall型であったり、Slide型、Creep型、Flow型及びこれらの複合型であったりし、様々の形態の組合せがあるようであり、実際はこれらが集合体を成して一つの性質を生み出しているものとみてよいだろう。従って通常これらの組合せのうちどれが卓越するかで地すべりの形態が定まるが、それにはまず素因としての構成地質のテクトニックな問題と材料学的性質及び誘因

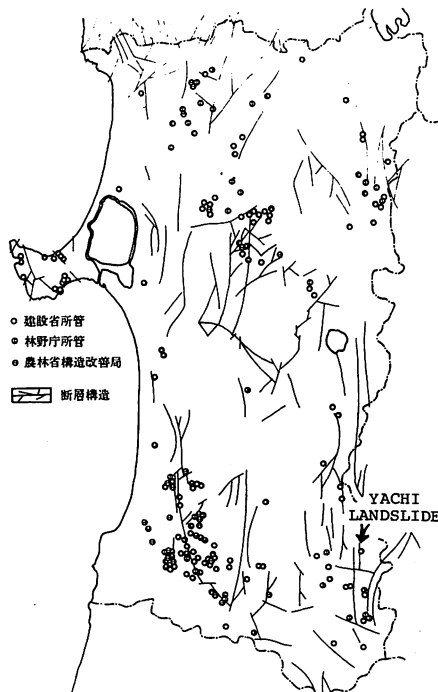


図1 谷地地すべりの位置及び秋田県の断層構造と地すべり分布図

としてのサイクリックな水文特性の組合せが大きく関与する。即ち地すべり土は局部的に粘弾性体であったり粘塑性体であったりするが、全体的には粘弾塑性体であったりする。これがまたある時期に至っては粘弾性体であるが季節が変れば別の性状を示したり複雑に性状遷移をする。この変化の理由は、土の含水比や土中水の間隙圧、応力分布が一樣でないこと及びこれが季節毎に方向性をもって移動しているからである。

このような複雑な土の運動を一連の時間依存性の挙動として量的に把えるためにはレオロジーモデルが適切であると考えられており、例えば駒村博士は、土が水を含むことによって変化する土の力学的性質を粘弾塑性体レオロジーモデルで取り扱い、作用要素が土の含水比によって機能する状態を定義し、また実際の地すべり挙動の性格を明らかにした²⁾。

秋田県の谷地地すべりは物質破壊におけるこのようなレオジカルな性質に対応していると考えられたので、駒村博士のモデルによって種々の検討を試みた。その結果、移動量と時間の関係、移動量と土質定数の関係等、安定計算上興味ある知見が得られた。本文では谷地地すべりに対するモデルの妥当性を検証すると共に、このモデルによって分析された

特徴的事がらを述べこの地すべり問題における未知土質定数の安定限界などについて言及する。

なおレオロジーモデル使用に当たり、三重大学駒村教授より貴重な御助言を頂いた。また種々の資料をお世話下さった秋田県土木部砂防課の各位に対し、ここで厚く感謝の意を表します。

2. 谷地地すべりの概要

この地すべりは、毎年2～3mの積雪を越す東北有数の豪雪地帯で発生し、融雪地下水に特徴をもつ地すべりとして知られてきた。また過去の地すべり活動は付近の埋没した傾倒木、炭化木から推定してかなり以前に溯ると考えられている。

図1は1980年までに調査した秋田県の地すべり発生個所と断層構造及び谷地地すべりの位置を示している。図から谷地地すべりは地盤変動の活発な位置にあることがわかる。しかもこの地すべりは秋田県横手盆地の南東、岩手県境に接する東成瀬村標高400～600mの融雪水を集水しやすい位置にあり、地すべり末端部は雄物川上流成瀬川を越えて対岸にはフクレ上がりが生じており、その延長も1300mにわたる長大な川越え地すべりである。

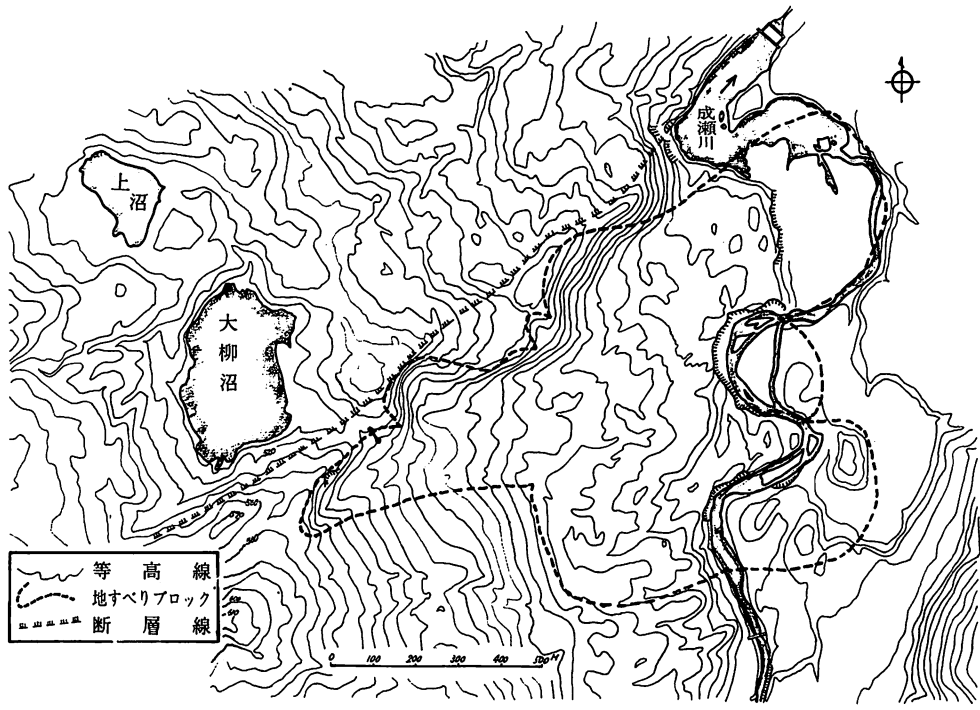


図2 谷地地すべりと周辺状況図

秋田県谷地地すべりに関するレオロジー的考察

図2は地すべり区域とその周辺の状況を示す。この地区の成瀬川上流には活断層群があり、特に北東に走る断層に伴う引きずり褶曲と考えられる複向斜構造帯が存在する。地すべり地層は新第三紀中新世女川層に対比される山内層に属し、地すべりブロックはこの断層を境いに東側に集中し四つのブロックに分断されている。その面積は $1.06 \times 10^6 \text{ m}^2$ 、移動土塊 $3.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ と我国の地すべりとしてはかなり大規模であり、地すべり土層の深さも上部で20m、末端部で40m以上もあり、傾斜は頁岩の dip slope $10^\circ \sim 15^\circ$ に平行している。さらに地すべり地内には通常みられる沢や小川が発達していない。一方、断層の西側の地すべり冠頭部には出口のない大柳沼とこれに注ぐ上沼がある。大柳沼は融雪期に満水し5月に水量のピークを迎え夏の渇水期との水位差は実に10mに達するほどである。この沼の水位にほぼ比例するようにして地下水水位が昇降し、地盤の変動量も融雪期に活発化しその最大ピークは4～5月に出現している。従ってこの沼は地すべり挙動と密接な関係をもっていることから、この地すべり地区の不気味な「水がめ」的存在であると考えられている。

3. レオロジーモデル

土のレオロジーモデルについては種々のタイプが考えられ、国内では村山・柴田のモデル³⁾や駒村のモデルが著名である。本文では駒村のモデルを使用する。その主な理由は谷地地すべりはすべり面に clay

seams をはさみ地塊運動はこれをベースに板状を呈し、しかもモデルの要素が土の挙動を良く表現しており、アナロジーが良好なこと等のためである。

駒村のモデルは、土塊の含水比が増加するに従い「粘弾性体」→「粘塑弾性体」→「粘塑性体」→「粘性体」と変ることに着目し、図3のように表現されている。これは Voigt モデルの変位(ϵ_V)と Bingham

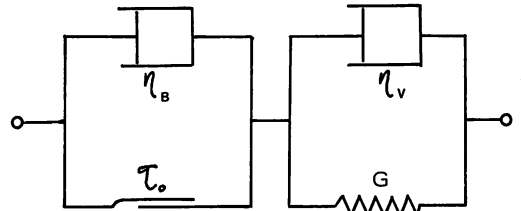


図3 粘塑弾性四要素モデル

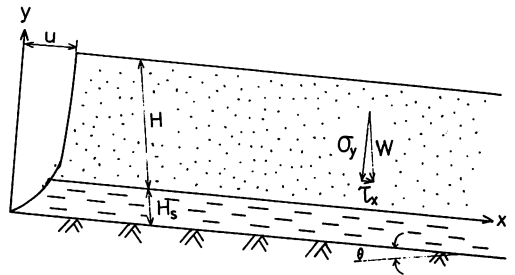


図5 地すべりの模式図

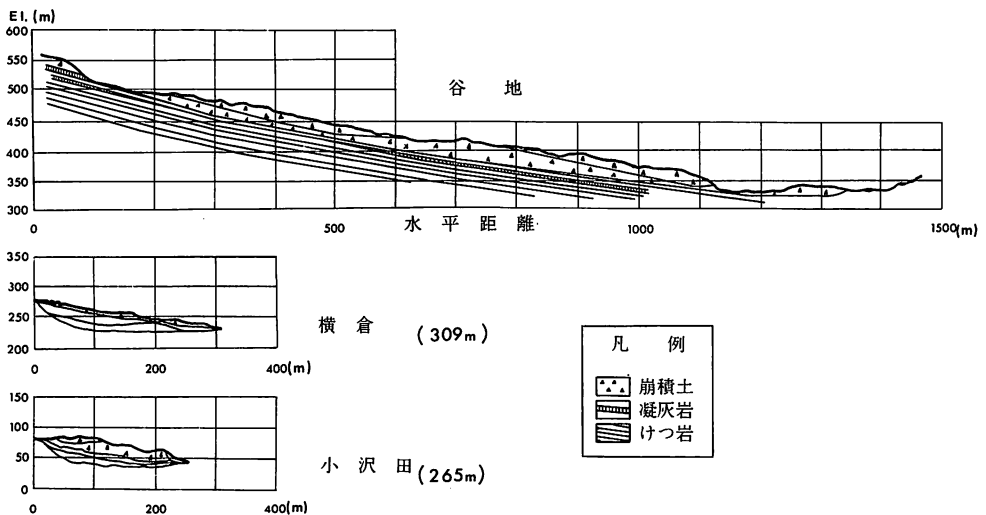


図4 谷地地すべりの断面と他の地すべりとの比較

モデルの変化 (ϵ_B) を合体させ四要素モデルとしたもので、変位は

$$\epsilon = \epsilon_V + \epsilon_B \quad (1)$$

と表わす。 ϵ_V , ϵ_B を個別に表示すると、

$$\epsilon_V = \frac{\tau_x}{G} (1 - e^{-(G/\eta_V)t}) \quad (2)$$

$$\epsilon_B = \frac{1}{\eta_B} (\tau_x - \tau_0) t \quad (3)$$

となり(2), (3)式から、土の応力~ヒズミ~時間関係式は、

$$\epsilon = \frac{\tau_x}{G} (1 - e^{-(G/\eta_V)t}) + \frac{(\tau_x - \tau_0)}{\eta_B} t \quad (4)$$

図4に谷地地すべりの断面を示すが、同図の他の地すべりと比較しても谷地地すべりは長大な板状であり、これが図5のような模式図で近似されるものとする。この模式図による地すべり移動量の積算値(U)は、 $W = \gamma H \cos \theta$, $\tau_x = \gamma H \cos \theta \cdot \sin \theta$, $\sigma_y = \gamma H \cos^2 \theta$ を考慮すると次のようになる。

$$U = \left\{ \frac{\gamma \cdot H \cdot t \cos^2 \theta}{\eta_B} (\tan \theta - \tan \phi - \frac{C}{\gamma H \cos^2 \theta}) + \frac{1}{G} \gamma H \sin \theta \cdot \cos \theta (1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}) \right\} H_s \quad (5)$$

ここで、 γ = 土の単位体積重量、 H = 地表面からすべり層までの深さ、 t = 時間、 θ = 斜面の傾斜角、 ϕ = 土の内部摩擦角、 C = 土の粘着力、 G = 土のせん断弾性係数、 λ = 遅延時間 (= η_V/G)、 η_B = Bingham 粘性係数、 η_V = Voigt 粘性係数、 H_s = 地すべり粘土層の厚さ、 e = 自然対数の底。

上式によれば、右辺第一項はBingham 挙動で第二項はVoigt 挙動を示し、各項の正負によって地すべりの動き方が粘弾性的になったり粘塑弾性的になったりする。即ち図3の四つの要素が働けばクリープと塑性流動とが合成された動きになる。この計算では、移動層の底部は基岩に密着し、表層で移動が大きいという特徴がある。

谷地地すべりの主すべりブロック断面からは $H = 23.25m$, $\theta = 9.08^\circ$ を得た。またサンプリング試料より得られる $C = 2.25tf/m^2$, $\gamma = 1.745tf/m^3$, $G = 4.034 \times 10^4 tf/m^2$ を採用すると谷地地すべりの安定数 (Stability number) は、 $C/\gamma H = 0.055$ となる。また計算に用いる ϕ は三軸試験によると過大及び過小であったため、(5)式を利用して定める。

$$\tan \phi = \tan \theta - \frac{C}{\gamma H \cos^2 \theta} = 0.103$$

$$\therefore \phi = 5.88^\circ$$

即ち $\phi < 5.88^\circ$ で粘塑弾性地すべり (定常クリープ型) が起こることになる。別途設計報告書⁴⁾によれば、地すべり発生地内の $H = 20 \sim 25m$, $\gamma = 1.7tf/m^3$, $C = 2.0tf/m^2$, $\phi = 2.95^\circ \sim 6.45^\circ$, 挟有風化凝灰岩の傾きが 10° 前後とされており、この計算で用いる C , ϕ , H , θ , γ はいずれも上記の設計値に近い。また崩積土の自然含水比 (w_n) は $25 \sim 40\%$ であるが、すべり層の主な粘土鉱物は保水能の高いモンモリロナイトを主成分とするベントナイトであり、すべり面を成す破砕面の clay seams の w_n はかなり高いものと推定される。例えば著者の行ったベントナイト含有率 25% の試料で $w_n = 50\%$ の状態の粘着力は $C > 2.5tf/m^2$ である。深層土の実測結果がないのが惜しまれるが、谷地地すべりは C が大きい割に ϕ が著しく小さいのが特徴である。

4. 地すべり挙動の解析

このレオロジーモデルにおける挙動を(5)式等より判別すると次の三つのタイプに分類される。

$$\left. \begin{aligned} f_1(\theta, \phi) &= \tan \theta - \tan \phi \\ f_2(\theta, \phi) &= \tan \theta - \tan \phi - \frac{C}{\gamma H \cos^2 \theta} \\ f_3(\theta, \phi) &= \tan \theta - \tan \phi - \frac{3C}{2\gamma H \cos^2 \theta} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

この $f_1(\theta, \phi) \sim f_3(\theta, \phi)$ によって規定される各種タイプは次表の発生条件となる。

表1 各地すべりタイプの発生条件

地すべりが発生しない	$f_1(\theta, \phi) < \phi$
地すべりが発生する	$f_1(\theta, \phi) > \phi$
粘弾性型の地すべり	$f_1(\theta, \phi) > \phi > f_2(\theta, \phi)$
粘塑弾性型	$f_2(\theta, \phi) > \phi > f_3(\theta, \phi)$
粘塑性型	$f_3(\theta, \phi) > \phi$

以上より各要素機能による谷地地すべりの発生領域を $f_2(\theta, \phi)$ について求めると図6のように描かれる。

$\phi \sim \theta$ 関係による土の挙動は式からも類推されるが、Stability number ($C/\gamma H$) が大きくなると各要素領域の中が増大し、その挙動領域の安定領域も拡大する。表1からわかるように、粘弾性型地すべりの発生条件は $9.08^\circ > \phi > 5.88^\circ$ である。従って $C/\gamma H$ が減少した場合、粘弾性及び粘塑弾性領域がせばまり、やがて粘塑性領域の挙動が卓越しすべり出す。岩石

秋田県谷地地すべりに関するレオロジー的考察

強度からは明らかに $\phi > \theta$ なので、この頁岩の強度条件からは安全である。しかし実際は滑動しているのであるからその原因を clay seams に求めなければならない。その条件は $f_3(\theta, \phi) = 0$ とおけば、 $\phi < 4.26^\circ$ となり、主に Bingham 要素が働く粘塑性型の地すべりとなる。内部摩擦角がこのように小さくなるためには粘土の含水比が極めて高いことが必要である。即ち粘土試料は液性限界を越えていると考えてよいだろう。

次に谷地地すべりの移動量の算定を試みる。この場合、すべり面を成す粘土層の厚さ (H_s) を仮定する。 H_s はボーリングによれば 1~200cm と変化が著しい。しかし実際すべっている所はこれが比較的薄く高々 10cm 内外である。ここでは $H_s = 10\text{cm}$ とし遅延時間 (λ) をパラメータにし、 $\phi = 4.26^\circ$ にとった移動量を試算すると図 7 の如くとなる。なお (5) 式の粘性係数は λ によって変わる値である。図をみると λ が大きいものほど移動速度は緩慢であり、長期間に亘り地すべりが継続する。一方 λ の小さいものほど地すべりが激しくしかも短い時間で収束性を示す。これはある程度すべれば、一定時間後には速度が止って弾性的平衡に到達することを意味している。即ち粘塑性型の地すべりからやがてゆっくりした粘弾性型の地すべりに変わるといことである。実際の挙動から判断すると λ はかなり大きいようである。

同様にこの地すべり挙動を粘着力に着目して解析すると図 8 のようになる。 $C \sim U$ 関係は直線で示され、 C が小さいものほど U が大きく、 λ の値に拘らず C は一定値に収束していることが見出された。

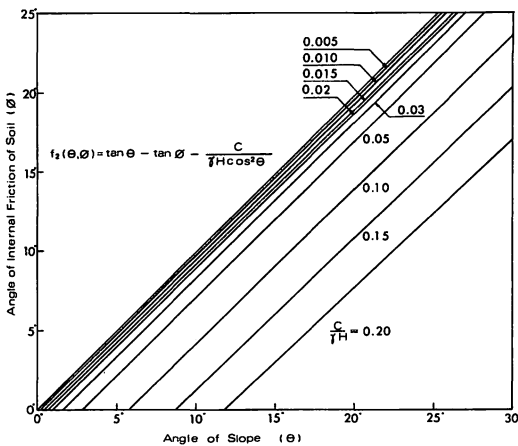


図 6 $C/\gamma H$ による谷地地すべりの発生領域

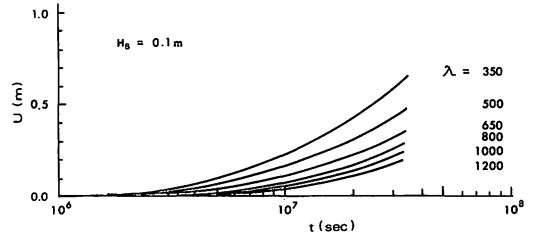


図 7 λ による移動量の変化

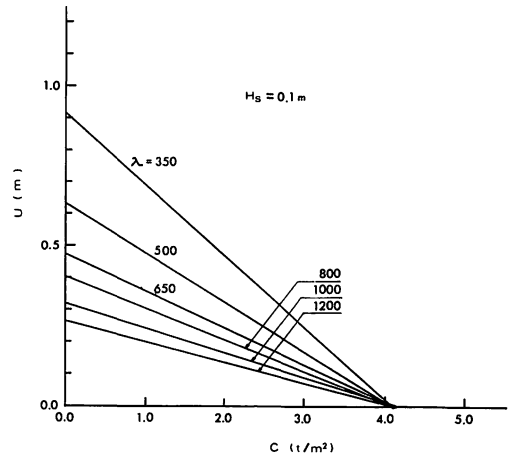


図 8 C と移動量の関係

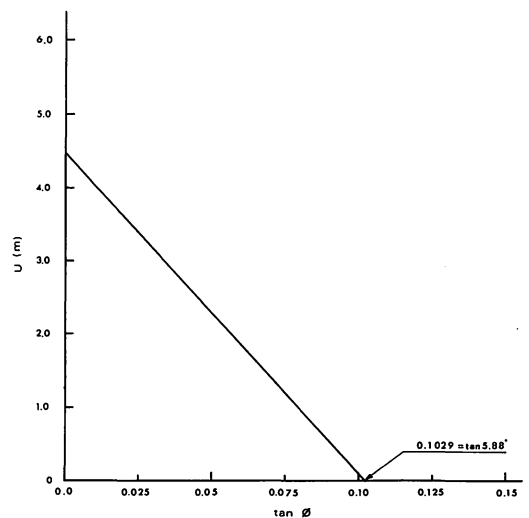


図 9 ϕ と移動量の関係

これは H_s の値を変えても一定値に収束した⁵⁾。即ち谷地地すべりの場合、滑らないための C の限界値は $C=4.1\text{tf/m}^2$ である。この値は谷地地すべりの設計 $C-\phi$ 相関図に示されている値に極めて近似した値であった。

こうした地すべり挙動全体をみるとこのモデルによる挙動はVoigt要素の影響が小さく、その移動量は主にBingham要素に支配されていると考えられる。このことから ϕ と U の関係について整理し、定常クリープによる年間移動量を算出すると、図9のようになる。図から粘弾性型の地すべり発生条件が $\phi>5.88^\circ$ であることがわかる。いま $\phi=5.88^\circ$ として、既述の $\theta=9.08^\circ$ を用い、 λ の変化による時間別移動量 U を調べてみると図10のようである。同一 λ では期間の長いものの移動量は大きい、 λ が大きくなると期間による変動巾が小さくなり、 $\lambda=\infty$ になると移動が完全に停止する。 $\eta_v=1.0\times 10^8$ (poise)として実験試料に基づく G を採用すると、 $\lambda=2480\text{sec}$ となる。この λ は国内の中小規模の地すべりからみるとや、大き目である。しかし谷地地すべりの場合は C の限界値が大きいことから λ も実際は大きく見積られ、極めて緩慢な挙動を示している地すべりであると言ってよい。数値計算から導かれるBingham粘性係数はこの場合、年間50cm移動に対し $\eta_B=3.0\times 10^6$ (poise)となり初期の挙動を説明できる。移動量の実測結果が連続的に得られておらず、これら粘性係数の季節変化を知ることができなかった。しかし、以上のモデルによって未知定数が知られ、この地すべり挙動についての概要を知ることができた。さらにこの種の研究では、実際の挙動をいかに適切に表現している粘性係数を採るかが今後の大きな課題として残されよう。

5. 結 び

谷地地すべりはベントナイトをはさむ長大な岩盤地すべりであるためレオロジーモデルとしてはBingham要素の作用力が大きく、又、遅延時間(λ)の大きい地すべりであることがわかった。土の内部摩擦角は小さいが粘着力が大きくその限界値も $C=4.1\text{tf/m}^2$ と計算された。これは設計計算に用いる値とほとんど一致した。

なお地すべりは季節変化との水文特性によってその挙動にも変化のみられる地塊運動現象である。当地の間ゲキ水圧、連続的な移動量を計測することによってこの地すべりの挙動がさらに詳しく解析され

るものと思われる。

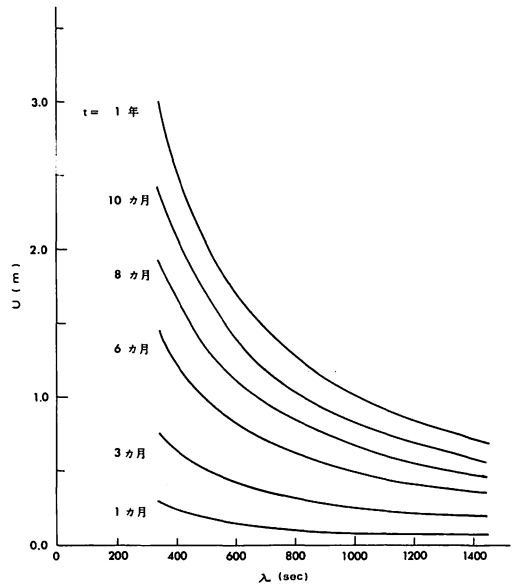


図10 時間別にみた移動量の変化

参 考 文 献

- 1) 寺川・西田・近藤：谷地地すべり，地すべり，第16巻第1号，1979
- 2) 駒村：第三紀層地すべりの発生と予測に関するレオロジー的研究，第三紀層の地すべり発生と予測の研究，1975
- 3) S.Murayama & T.Shibata：Flow and Stress Relaxation of Clay, IUTAM Symposium on Rheology and Soil Mechanics, 1964
- 4) 秋田県砂防課；谷地地すべり，1978
- 5) 伊藤他：レオロジーモデルによる谷地地すべりについて，第17回自然災害科学総合シンポジウム，1980