

降雨時の斜面崩壊予知に関する室内実験

島 重 章*

(昭和61年10月8日受理)

Laboratory Experiments on Prediction Method for Occurrence of Slope Failure due to Rainfall

Shigenori SHIMA*

(Received Oct. 8, 1986)

Abstract:

Slope failures, which are frequent with heavy rain, bring sudden effluence of soils with a great deal of damage being caused in several places every year. Accordingly, this study uses laboratory experiments designed to show the influence of rainfall as a primary cause of slope failure.

A model ground was constructed using decomposed granite soil, and measurements of differences in ground displacement were made with the gradients of slope using synthetic rainfall.

From the results of these experiments, it was confirmed that if we convert the value of the earth strain to velocity of strain and calculate the elapsed time we can predict the time of slope failure. And it is further indicated that increasing water contents in the earth with continuing rainfall may trigger the slope failure.

1. はじめに

豪雨時に頻発する斜面崩壊は、突発的な土砂の流出が多く、毎年各地で人命や財産に多大の被害を与えている。¹⁾²⁾

瀬戸内の地域において、人口の増加に伴う住宅地の造成や、交通量の増加に伴う道路網の整備などは、平地部から山地部へと拡大されている。このような地域においては山地部が海岸部に近接した地形を呈し、更には山地部における開発や建設が多発しているため、斜面とのかかわりが非常に多くなっていると言えよう。

このような斜面はしばしば崩壊発生を引き起こす。斜面崩壊の原因については、土質の不均質、地震力、地下水位の変動および降雨などが挙げられるが、その崩壊機構については不明の点が多い。近年、特に梅雨

期や台風時期の集中豪雨によって多くの被害がもたらされており、土砂の流出や移動は人々にとって突発的であったとの印象を与えている。これまでの地すべり研究は斜面が安定か否かの問題を中心に進められてきたが、降雨時の突発性崩壊は斜面の安定性だけではなく、どれだけの距離をどの程度の速度で動くかという移動性の問題として取扱うことの必要性を、近年の研究課題は取り上げている。³⁾

以上の観点にたつて、本報告は斜面崩壊の主原因であると思われる降雨の影響に重点を置いて室内実験を行ったもので、風化花崗岩土（以下まさ土と称す）による模型地盤を形成し、斜面勾配の違いによる土砂の変位を計測して崩壊の予知を検討したものである。

2. 斜面崩壊予知

* 土木工学科

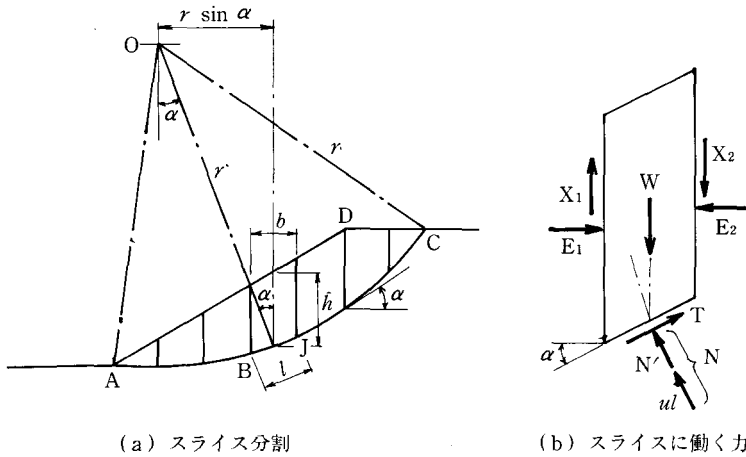


図-1 分割法によるスベリ面の力⁴⁾

(1) 設計上の崩壊予知

一般に斜面崩壊とは、地表面が水平でないところで、重力の作用により高所から低所へ向って土が移動しようとする運動であり、この場合に、土の内部にせん断力が発生する。土中に生じるせん断力とその土のせん断抵抗を越えないうちは、斜面は安定を保っているが、ある連続面で応力の超過が生じると、すべりが発生して斜面に崩壊が起こる。このような崩壊の予知は安全率によって確認できる。その代表的なものが分割法である。

分割法はすべり土塊を鉛直方向に細長く分割し、スベリ面の各面要素上の応力からそのせん断抵抗を求める方法である。安全率の算定にあたっては、図-1の図式を用いて説明する。安全率はつり合い条件を満足するのに必要なせん断応力 τ に対する有効せん断強さ s の比として定義されるので、安全率は

$$F = s/\tau = (c' + \sigma' \tan \phi') / \tau \quad (1-1)$$

である。

ここに、 c' 、 ϕ' はそれぞれ有効応力表示のせん断強度定数であり、 σ' は破壊時の有効応力である。

図-1に示すように、斜面は不静定であるから、解を得るためには斜面上の全直力 E およびせん断力 X をフレニウス法によって仮定すると $X_1 = X_2$ 、 E_1 と E_2 はスライス底を平行でかつ同じ大きさの逆向きであると仮定する。したがって、力の多角形は図-2に示すような三角形となる。

$$\tau = \frac{1}{F} \left\{ c' + \left(\frac{N}{l} - u \right) \tan \phi' \right\} \quad (1-2)$$

スライスの底に働くせん断力は

$$T = \tau l = \frac{s}{F} \cdot l \quad (1-3)$$

である。つり合いのためのすべりモーメントは $\Sigma W_r \cdot \sin \alpha$ であり、抵抗モーメントは

$$\begin{aligned} \Sigma T_r &= \Sigma \tau l_r = \Sigma \frac{s}{F} l_r \\ &= \frac{\gamma}{F} \Sigma \{ c' l + (N - ul) \tan \phi' \} \end{aligned} \quad (1-4)$$

$$\therefore F = \frac{1}{\Sigma W \sin \alpha} \Sigma \{ c' l + (N - ul) \tan \phi' \} \quad (1-5)$$

スライス上に働く鉛直成分 N は

$$N = W \cos \alpha \quad (1-6)$$

となる。式(1-6)を式(1-5)に代入すると

$$F = \frac{1}{\Sigma W \sin \alpha} \Sigma \{ c' l + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi' \} \quad (1-7)$$

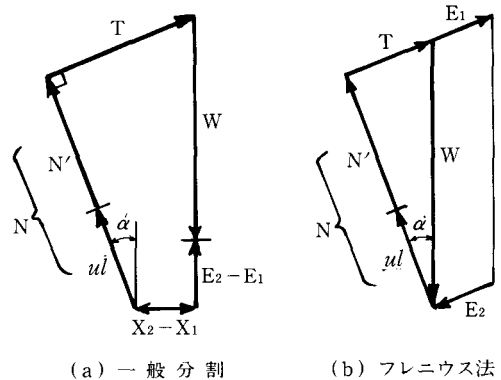


図-2 力の多角形⁴⁾

となる。⁴⁾

式(1-7)において、 $F < 1.0$ の場合は不安定、 $F = 1.0 \sim 1.2$ の場合は小規模、軽易な構造物は安定、 $F > 1.2$ の場合は盛土斜面およびアースダムに対する標準値としての設計最小安全率が一般値として設定されている。⁵⁾

(2) 計測上の崩壊予知

斜面が降雨により崩壊する際の地表面の移動は、図-3に示すように①、②、③、④の4つのパターンを示す。この④段階における表面の移動速度の常用対数を横軸に、加速度の常用対数を縦軸にとると、両者はある範囲においてほぼ直線で表わされる。この関係は次式で示される。

$$d^2x/dt^2 = a(dx/dt)^\alpha \quad (2-1)$$

ここに x : 表面変動量, t : 時間, d^2x/dt^2 : 表面移動加速度, dx/dt : 表面移動速度, α, a : 定数, ④段階では $a > 0$ である。

式(2-1)を1回積分すると

$\alpha < 1$ の時

$$dx/dt = \{a(1-\alpha)\}^{1/(1-\alpha)} (t_1+t)^{1/(1-\alpha)} \quad (2-2)$$

$\alpha = 1$ の時

$$dx/dt = \exp\{a(t_2+t)\} \quad (2-3)$$

$\alpha > 1$ の時

$$dx/dt = \{a(\alpha-1)\}^{-1/(\alpha-1)} (t_r-t)^{-1/(\alpha-1)} \quad (2-4)$$

(ただし $t < t_r$)

ここに t_1, t_2, t_r は積分定数である。

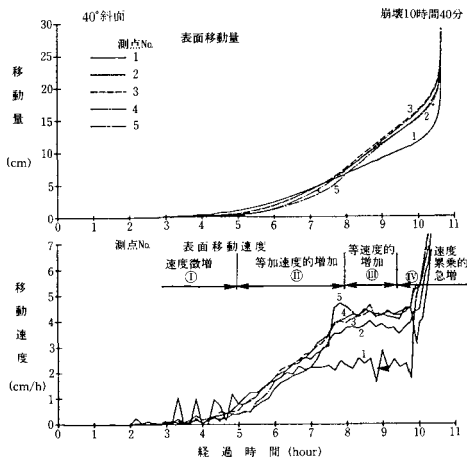


図-3 斜面表面の移動量と移動速度例図⁶⁾

崩壊時の最終段落における斜面表面の変動速度を表す式(2-4)は $t \rightarrow t_r$ で dx/dt が無限大になる。現実には速度が無限大になることはないが、ここでは t_r を斜面崩壊発生時刻と考えることにする。

式(2-4)より $dx/dt = v$ として

$$t = -a(\alpha-1) \left(\frac{1}{v}\right)^{\alpha-1} + t_r \quad (2-5)$$

又は

$$1/v = \{a(\alpha-1)^{1/(\alpha-1)}(t_r-t)^{1/(\alpha-1)}\} \quad (2-6)$$

(ただし $t < t_r$)

縦軸を表面移動速度の逆数 ($1/v$), 横軸を時間 (t) として式(2-5), 式(2-6)の関係を図示すると、一様な右下がりの曲線となり、 t_r で t 軸と交わるように接近する。図-4にその模式図を示す。 α の値によって曲線の形状が異なり、 $\alpha > 2$ で上に凸、 $1 < \alpha < 2$ で上に凹の曲線、 $\alpha = 2$ で直線になる。 $\alpha = 2$ の場合には、任意の時刻においてそれまでに得られている速度の逆数直線を延長して、 t 軸との交点を求めることにより崩壊発生時刻を予知することができる。⁶⁾

3. 実験装置および方法

(1) 実験装置

室内模型実験装置は写真-1に示すような、外形 $180 \text{ cm} \times 35 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ の鋼製箱で、片面ガラス張りの観測窓を有し、電動油圧ジャッキによって最大 35° まで傾斜可変可能な水路である。

この装置には、底面に 20 cm 間隔で6ヶ所の水圧計取り付け口を有し、側面に水圧の取り付け口を12ヶ有して、ガラス管マンメータに接続し、上流、中流および下流の3ヶ所に分割した土中間隙水圧データの収集、判読が可能である。

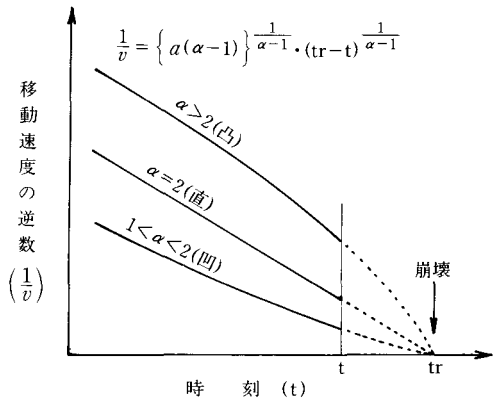


図-4 表面移動速度の逆数の経時変化模式図⁶⁾

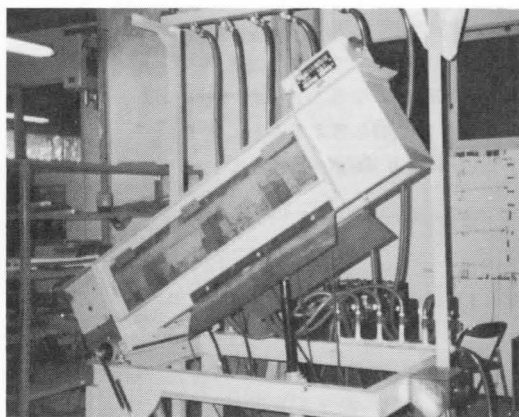


写真-1 斜面崩壊実験用模型実験装置

斜面崩壊実験用計測装置は多点ひずみ測定を主とするもので、図-5に示すようなcpu自動計測装置で、降雨実験中に土中に埋設したひずみ計および底面水圧計のデータを10秒毎に測定するものである。ひずみ測定器(DPU-100-B)はマイクロコンピュータ内蔵の多目的自動式多点静ひずみ測定器で、自動切換スキャナー(PS-7513-50)の接続により最大1,000点まで測定が可能である。パーソナルコンピュータ(S-5900)はプロッターおよびFDD装置を併用して、データの集積および印字の高速処理をすることを主体とし、演算処理によってデータの図形処理も可能にした。

(2) 実験方法

実験に使用した土質材料は、広島工業大学新1号館建設現場より採取したまさ土である。その土質特性は表-1に示す。この土試料を斜面模型装置内に投入し、木製ランマーの自由落下により上流側5層、下流側3層の締め固めを行い、図-6に示すような斜面形状を形成する。この装置全体を傾斜させることによって斜面勾配は1:0.5, 1:1.0および1:1.5の3種類を得る。この斜面に降雨を与え、図-6に示すように設置した各

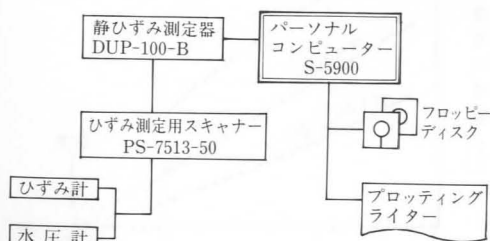


図-5 斜面崩壊実験用計測装置

センサーの経時変化を測定する。降雨の開始と共に、斜面は徐々に浸食されて崩壊に至る。その間に降雨量、表面流出量、浸透水量、側面マンメータおよび土中含水比を計測する。更に、斜面崩壊実験用計測装置は、降雨開始と同時にひずみ計測の経時変化を10秒毎に自動測定するもので、プロットングライターへの数値データの打ち出しおよびフロッピーディスクへのデータの収納を行い、崩壊の終了と共に測定を終了する。降雨は崩壊の進行状況を見て停止し、停止後は斜面崩壊形状の測定および土試料のサンプリングを行い、試験前後の安全率の確認を行う。

4. 実験結果および考察

斜面崩壊は大分類すると、深く広い範囲にわたる崩壊(地すべり)と、比較的浅い位置で起こる崩壊(崖くずれ)とに分けられる。そのうちで本実験は比較的浅い位置で崩壊するものと言えよう。

一般的に、降雨が継続すると雨水は地盤内部に浸透していくが、更に降り続けると地盤の浸透能力を越えて飽和状態になるため、地表面を流下する水は一種の土石流となって地表の土砂を削る。また浸透水はまさ土のような風化の進行した地盤においては浸透水量も多くなる。どのような風化地盤も地中深くには不透水性

表-1 試料土の土質特性

試験項目		試験結果
物理的性質	土粒子の比重試験	G_s 2.62
	土のコンシステンシー試験	$w_L(\%)$ 32.3
		$w_p(\%)$ N P
物理的性質	土の粒度試験	$D_{max}(mm)$ 19.1
		$D_{10}(mm)$ 0.056
		U_c 62.4
		U_c' 15.8
化学的性質	土のpH試験	pH 8.43
	土の強熱減量試験	$L_i(\%)$ 3.37
	土のイオン濃度試験	$K^+(\text{ppm})$ 7.89
力学的性質	土の室内透水試験	$k(\text{cm/sec})$ 1.31×10^{-4}
	土の一面せん断試験	$c(\text{kg/cm}^2)$ 0.12
		$\phi(^{\circ})$ 39.8
	土の締め固め試験	$w_{opt}(\%)$ 14.1
$\rho_{dmax}(\text{t/m}^3)$ 1.725		

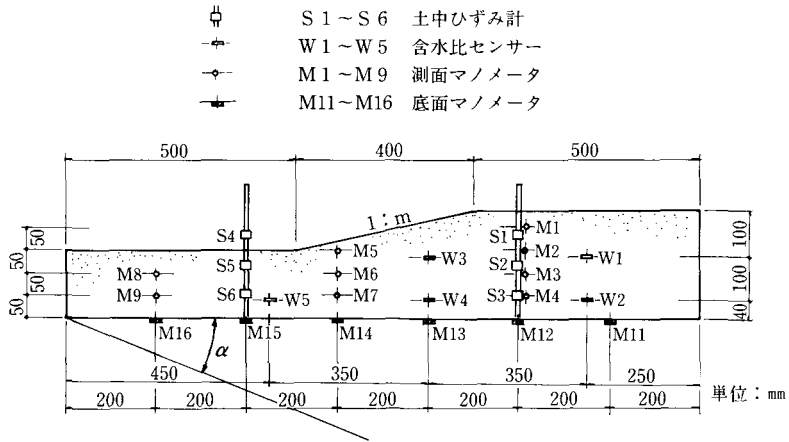


図-6 斜面形状および計測器位置

岩盤を有し、浸透水はそれに沿って流下しようとするため、風化地盤に多量に浸透した水は地盤を押し流す力となる。

(1) 浸透水と越流水

斜面装置は設置した土槽全体を可変傾斜させ、その斜面に降雨強度 100~200 mm/hr の降雨を与え、所

定斜面域の崩壊発生を見ようとするものである。土中の含水比は小さい場合 ($w=4.90\sim7.84\%$) および、大きい場合 ($w=12.23\sim15.76\%$) の2種類である。降雨は地表面に達すると、それに沿って流下するが、同時に浸透を開始する。その場合、初期土中含水比の小さい地盤ほど多く浸透する。ここでは斜面崩壊を目的

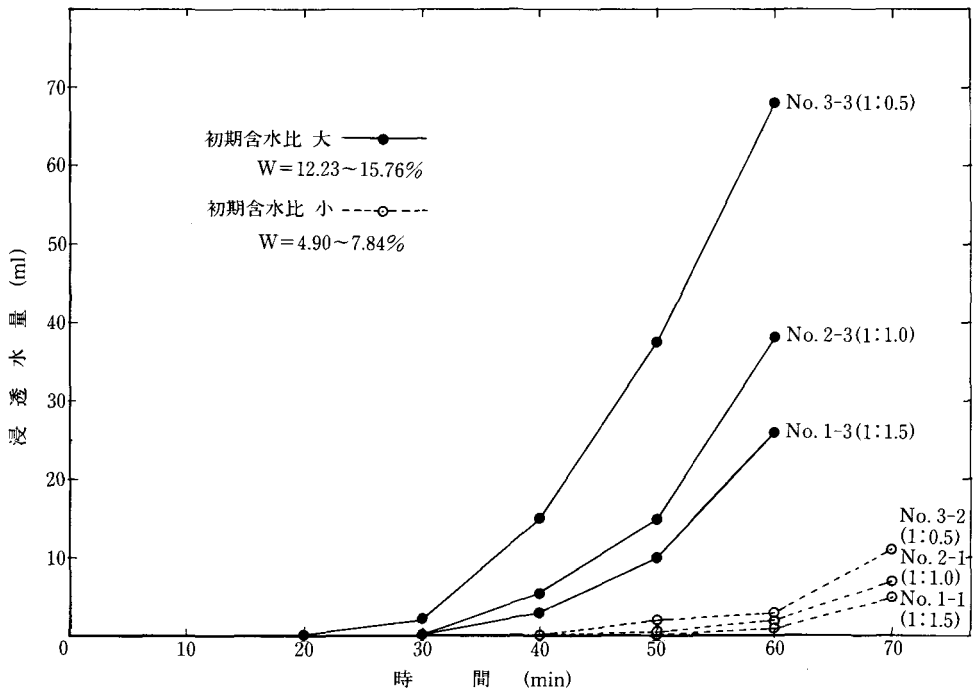


図-7 浸透水量の経時変化

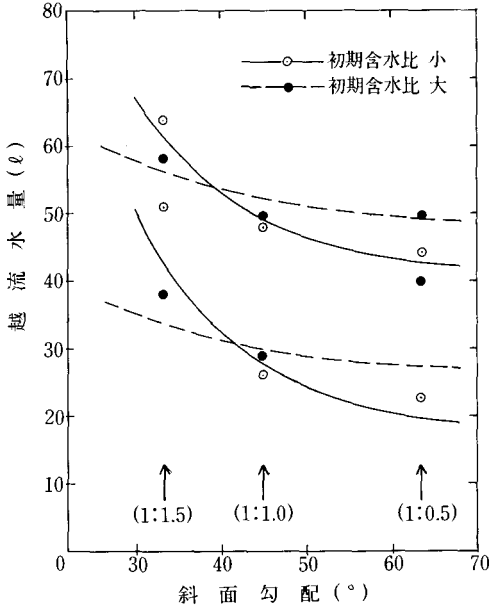


図-8 越流量と斜面勾配の関係

とした降雨強度を与える為、短時間に雨裂からガリの発生を招き、地表面の崩壊進行に伴って浸透量も増加したと考えられる。図-7は浸透量の経時変化を示した。初期含水比の大きい場合が、小さい場合に比して浸透水量が大である。これは初期含水比の小さな場合は土中への浸透貯留量が多くなるものの、浸透水量として排水される量は少なく、含水比の大なる場合は排水量が多くなる傾向を示して崩壊に至る可能性も高いことが考えられる。越流量は土砂を含んだ流出量であるため、土砂量を除いた水量を斜面勾配の違いにより比較したのが図-8である。勾配が急になるにしたがい越流量は低下している。これは急勾配ほど崩壊発生に至る状況が早いため、斜面形態が急変して流下以上に浸透力が増加したと考えられる。初期含水比の違いが越流量の発生に影響すると考えられる。即ち、初期含水比の小さい場合が浸透力も大きいので、越流量は小さくなり、初期含水比の大きい場合はその逆になる傾向を示した。

(2) 土中含水比

含水比の経時変化を計測するには、一般に困難であると考えられるが、ここでは簡易型センサーを作製して埋設し、コールラウシュブリッジによる電気抵抗を測定した。電気抵抗値は含水比と比例的な関係にあることから、含水比に換算可能である。⁷⁾ 含水比～抵抗値曲線によって換算式は

$$w(\%) = 28.60 - 15.2 \log_{10} R_x(\Omega)$$

を得た。計測結果の一例は図-9に示すように、いずれも経時変化に伴い土中含水比の増加を示し、各センサーは降雨開始と共に順次増加反応した。初期含水比の大小による違いは、その増加傾向の違いを示した。即ち、初期含水比の大きい場合は緩やかではあるが、短時間で飽和状態(20%以上)に近づいている。初期含水比の小さい場合は浸透の開始を示す浸潤前線の変化が表われ、反応の開始と共にその線型は急上昇して飽和状態に近づいている。この図から直接的に崩壊時間を判読することは困難であると思われるが、線型の変化が急上昇後に平衡状態を示して、その状態が継続した過程で崩壊の発生に至っていることから、斜面が高含水比の状態を継続すれば崩壊に至ることを示唆しているといえよう。

(3) 土中ひずみ

パイプ式ひずみ計は一般に地すべり調査に用いられている計測器の一種である。ここでは斜面模型装置の大きさに合わせて、径φ22mmの塩ビパイプにひずみゲージを接着した2ゲージ法によるひずみ計を作製した。この計測は土中に埋設したひずみ計に累積ひずみ量が発生し、土塊が確実にすべっているか否か、あるいは将来すべりの因子が作用してすべりが発生するか否かを判定するものである。⁸⁾ ここでは自動計測により記録はフロッピーディスクに収納した。その一部を図形処理結果で示すと図-10のようになる。縦軸にひずみ量、横軸に経過時間を取って累積ひずみ量の変形状況を図示したものである。上流側に埋設したひず

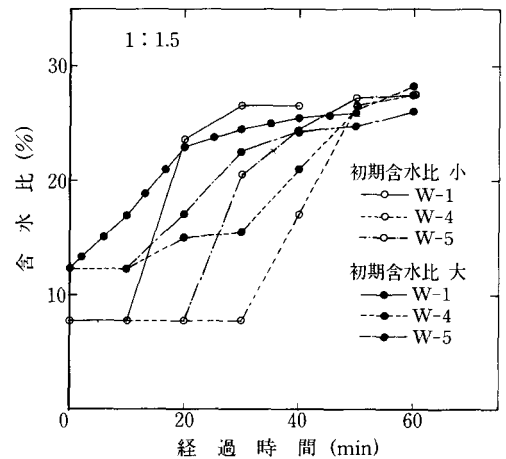


図-9 土中含水比の経時変化

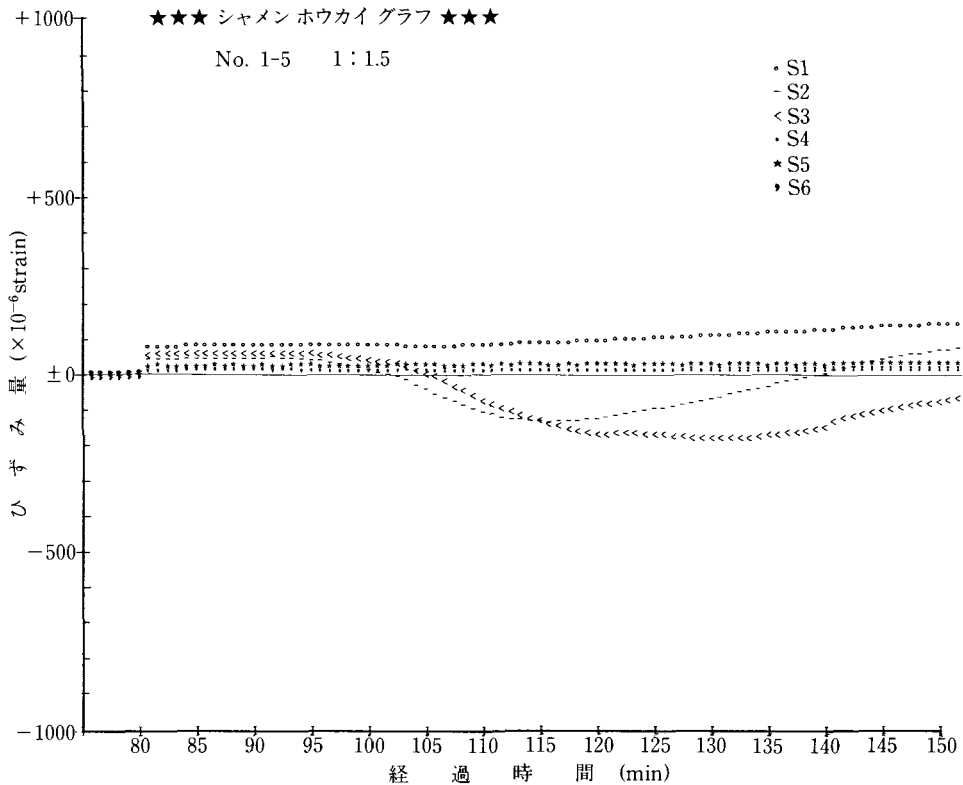


図-10 土中ひずみの経時変化曲線

み計は、降雨の浸透流下に伴う土砂の移動量を累積ひずみ量として示した。土砂の移動は模型の中でも特に、所定の斜面を構成している部分の土砂移動が大きいため、上流側のひずみ計が下流側のひずみ計以上に大きい変動を示したと考えられる。これは降雨により崩壊する際の地表面の移動量によると考えられるので、地表面近くに埋設した S-1 および S-5 のひずみ計についてひずみ速度 (ひずみ/時間) を求め、図示したのが図-11である。ひずみ速度は地表面の崩壊による移動速度とは必ずしも一致しないが、最も地表面に近い S-1 および S-5 の累積ひずみ量は経時変化を伴って指数函数的に変化し、大きな変動を生じる前のひずみ速度が平衡状態になれば、その後必ず崩壊が発生する。従って、収集データの同時モニタリングを行えば、CRT 画面上で崩壊時間の予測をすることが可能になると考えられる。降雨開始と共に 2 次曲線を描くので、その軌跡が X 軸と並行になれば、降雨の継続によって必ず崩壊が発生し、更に、軌跡は変動を生じる。従って図-11より判読すれば S-1 は開始後105分、S-5 は

115分が崩壊開始時刻となる。

(4) 安全率の確認

斜面の安全性を表示する指標として、スベリ土塊のすべろうとする力とそれに抵抗しようとする力の比を斜面の安全率と称する。この安全率を求めるには、現地におけるスベリ面がどこにあるかを正確に知らねば、安全率そのものの意味がない。ここでは崩壊面の形状を測定し、その測定結果をもとに分割表示をするもので、その一例を図-12に示す。土質定数として必要な c 、 ϕ 値は斜面崩壊実験前後にセン断試験より求めた。分割表示図は BASIC 演算 (8 Bit) によってプリントアウトした図形処理である。演算結果の安全率 F_s と斜面勾配の関係を図-13に示した。勾配が急になる程、安全率は低下する。この実験はいつでも崩壊を発生させた結果を基にしたものであり、1 割勾配よりも急な勾配であれば、危険度の大きいことが判かる。

5. おわりに

斜面崩壊の主要原因である降雨の影響に重点を置いた

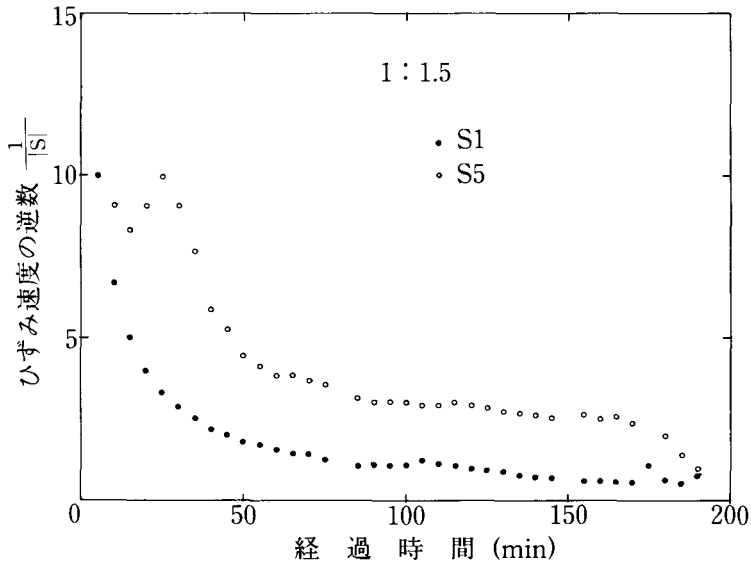


図-11 ひずみ速度の逆数の経時変化

室内実験結果から、まさ土によって形成された斜面は降雨のもとで斜面崩壊を生じ、それに伴う各種データの収集を行った。得られた結果を要約すると次のようである。

(1) 浸透水および越流水の動きは土中の含水比に左右される。含水比が小さい地盤ほどよく浸透して土中の貯留量は多くなるものの、浸透水量として排水される量は含水比の大きい地盤が多い。従って、含水比の

大きい地盤ほど、土中水の動きが大きいと言える。

(2) 土中含水比の計測結果から、降雨の継続に伴い土中含水比は増加を示し、その増加傾向は土中の初期含水比に左右されるが、飽和状態に近づく過程が判読できるので、崩壊の発生に至る危険性の判断に役立つと考えられる。

(3) 降雨の継続に伴う土中の累積ひずみ量は、土中

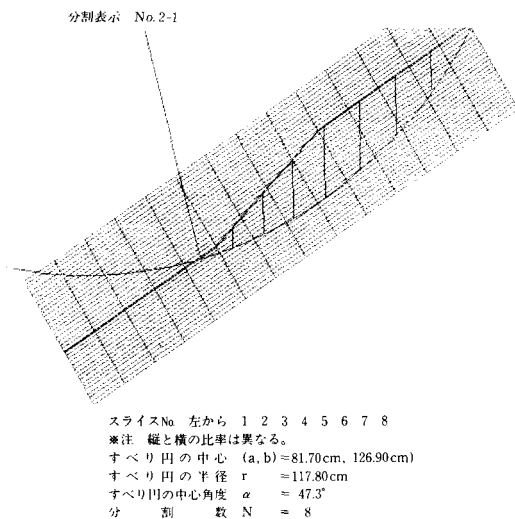


図-12 安定計算のための分割表示

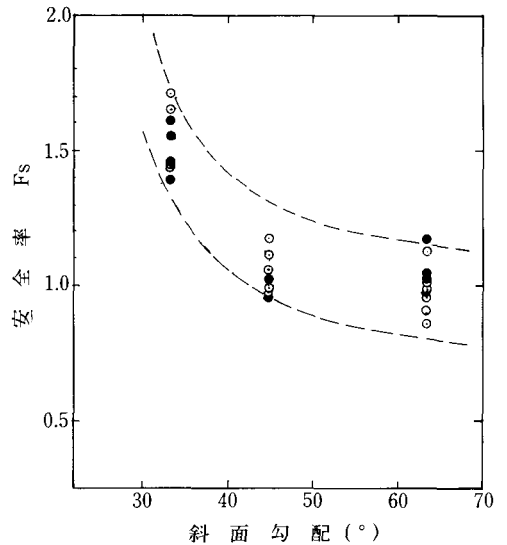


図-13 安全率と斜面勾配の関係

ひずみ計により計測され、経時変化量を図示することができた。更に、このひずみ量をひずみ速度の逆数として表示すれば指数函数的変化を示し、更にひずみ速度の逆数値が平衡状態になれば、その後には必ず大きな変化を伴って崩壊が発生するので、その崩壊発生時間を予測できる。

(4) スペリ計算の安全率は斜面設計上の安全性の指標である。斜面の勾配が急になる程安全率は低下する。この実験では、いずれも崩壊を発生させた結果を安全率で表示すると、1割勾配よりも急な勾配であれば、まさ土のような盛土斜面の危険度の大きいことが判明した。

以上の結果は、降雨を与えた斜面の崩壊に関する室内模型実験によるものであり、複雑な現場条件下での崩壊時間の予測には、今後とも表面変位量の計測および表示など多くの問題点があると思われる。

謝 辞

本研究の一部は昭和56年度私立大学研究設備整備費「斜面崩壊実験用計測装置」の研究テーマのひとつとして行ったものである。また、実験計測は本学卒業生中田 強君（現、奈良建設K. K）および宮本隆一君（現、坂町役場）の御協力をいただいた。ここに記して謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 川上 浩(1986)：長野市地附山の地すべりとその災害,「地すべり学会関西支部シンポジウム論文集」pp. 1~4.
- 2) 島 坦(1986)：長野市地附山地すべりとその前兆としての極微小地震,「地すべり」Vol. 23, No. 1, pp. 1~7.
- 3) 佐々恭二(1986)：速い地すべりの運動機構について,「地すべり学会関西支部シンポジウム論文集」pp. 15~41.
- 4) 村田清二(1984)：斜面の安定,「新編土質工学」pp. 251~280, 国民科学社.
- 5) 講習会等委員会編(1981)：斜面の安定,「土と基礎の設計計算演習」pp. 103~138, 土質工学会.
- 6) 福園輝旗(1985)：表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法,「地すべり」Vol. 22, No. 2, pp. 8~13.
- 7) 島 重章(1982)：雨水流出による斜面崩壊実験について,「土木学会中国四国支部年次学術講演会集」pp. 214~215.
- 8) 竹内篤雄(1986)：地中内部ひずみ計(パイプひずみ計)の情報は正しいか?「地すべり学会関西支部会誌, らんどすらいど」No. 3, pp. 20~29.