

# 傾斜地の崩壊に関する基礎的研究\*\*

島 重 章\*

(昭和51年9月30日受理)

## A Basic Investigation of Landslide in Slope

Shigenori SHIMA

(Received Sept. 30, 1976)

### 1. はじめに

斜面の崩壊は、直観的な地形変化の形態と速度に重点をおいて分類すると、表面浸食、溪流浸食、崖くずれ、山くずれ、地すべりおよび土石流などに区別されるが、それぞれに生じている現象は様々である。

斜面崩壊の発生誘因の最も大きいものは、地表面および地中での水の動きであるが、地表水の集中流下する斜面は浸食によりガリを発生し、被害を及ぼす。これが大規模になると地すべりおよび土石流になる。一般の斜面は浸透水が基盤面上に貯留して間げき水圧が発生すると、崩壊すると考えられる。したがって、崩壊の発生する土層構造としては、基盤とその上の風化層、滞積層などの強度、および透水性の異なる不連続面を有することが多い。崖錐とか厚くゆるい滞積物よりなる斜面では、明白な層がなくても含水比増大により、流動的にすべりを起こすこともある。

斜面崩壊を引き起こす水は、定常的に流れる地下水よりも、もっと表層近くを流れる中間流が原因であるといわれている。中間流は降雨時のみに発生することが多く、またその水みちは変化しやすく、実態がつかみにくいという点がある。一般的に言えば、水の集まりやすい地形では斜面崩壊が多く、斜面の上部に平坦面があると豊富な浸透水があり、崩壊の可能性が高くなるわけである。

これら崩壊の主要素としては土質、降雨、地形および植生などがあげられているが、その変化は複雑であり、降雨条件一つを取り上げて考えても、その違いに

よって生ずる流域特性の変化については未だ不明な点が多い。

以上の観点から、この研究はこれらの点を解明してさらに斜面の安定を計ることを目的としているが、今回の報告は広島市沼田町の広島工大沼田校地グラウンド斜面において、崩壊箇所を検討がなされるのを機会に、その初期段階として斜面模型水路を製作して室内実験を行ない、斜面勾配および降雨条件を変化させた場合の浸透流出および崩壊の状況を確認するために、地中ひずみ測定、水位流量測定および土質試験などにより若干の検討を行なった。

### 2. 雨水と土砂の流出過程

#### (1) 斜面方向の雨水流出

斜面方向の流出成分は表面流出、中間流出および地下流出成分となり、水理学上では次のように表わしている。

##### a) 表面流 (地面流)

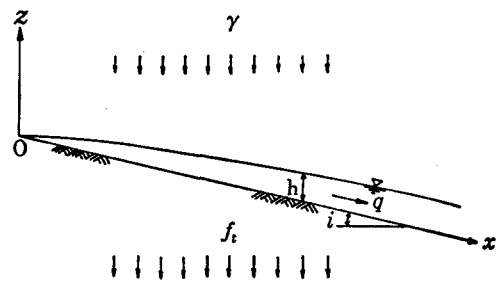


Fig-1 Surface runoff

\* 土木工学教室

\*\* 昭和51年9月18日広島工業大学研究発表会にて発表

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f_i \quad (1)$$

$$h = K_1 q^p \quad (2)$$

ここに、 $h$ : 水深、 $q$ : 単位幅当りの流量、 $r$ : 降雨強度、 $f_i$ : 浸透能、 $K_1$ 、 $p$ : 係数、Manningの式が適用される場合には

$$K_1 = n^{3/5} (\sin \theta)^{-3/10}, p = 3/5$$

表面流は Fig-1 のように表わされる。式(1)は連続式、式(2)は運動式である。これを解くには特性曲線法によればよいが、この場合、上流端  $x=0$  における条件が問題となるが、式(1)を使用するので、 $h=q=0$  としてよい。

#### b) 中間流

$$r \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = f_{i1} - f_{i2} \quad (3)$$

$$h = K_2 q, K_2 = 1/(kI) \quad (4)$$

ここに、 $h$ : 水深、 $q$ : 単位幅当りの流量、 $f_{i1}$ 、 $f_{i2}$ : 上層および下層における浸透能、 $r$ : 上層の有効空げき率、 $k$ : 上層の飽和透水係数、 $I$ : 動水勾配 (近似的には境界面の勾配)

浸透能の異なる地層があり、しかも上層のそれが下層より大なる場合 ( $f_{i1} > f_{i2}$ ) には、境界面上に一時的に地下水状の流れを生ずる。一般に、このような流れを中間流というが、Darcy 則が成立する場合には、式(1)、(2)によって流れの模様を解析することができる。

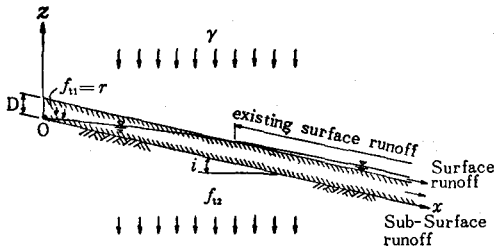


Fig-2 Sub-surface runoff

わが国の大部分の山腹斜面は、多孔質の表層でおおわれているので、この表層内で中間流が発生する。強雨の場合には Fig-2 に示すように、表層の厚さ  $D$  が薄い (5~20 cm 程度) ので、中間流の水面が地表に現われて表面流が発生する。このような場合には、雨水は表面流および中間流として流出することになる。

#### c) 地下水流

式(3)、(4)によって計算することができるが、地下水流の場合には動水勾配の中に水面勾配をも考慮し、 $I = \sin \theta - (\partial h / \partial x)$  とする。また、一般に下層は不透

水性であるので、 $f_{i2} = 0$  である。地下水流となって流出する成分を地下水流出というが、この成分は時間的変化が緩慢であって、無降雨の河川流量の主要な供給源である。

#### (2) 地面浸食

土砂の生産、流出を考慮すると、裸地の地面浸食の過程は、一般に雨滴による地盤からの土粒子のはく離と、薄層流あるいは転波列を伴った薄層流によるはく離および輸送とからなり、後者には層状一様浸食と小水路に集中した流水による雨裂状浸食が含まれる。

##### a) 雨滴によるはく離

降雨による浸食土量の約 80% が雨滴によるはく離に起因し、10~20% が地表流水による浸食であるといわれている。また、浸食に関与する降水量として、単なる積算量よりも、限界強度より強い雨の量と雨滴の衝撃力が支配的である。雨滴による土砂のはく離量について、Ellison は次式を与えた。

$$E = K \cdot v^{4.33} \cdot D^{1.07} \cdot P^{0.65} \quad (5)$$

ここに、 $E$ : 30分間の雨滴による飛散土量 (g)、 $K$ : 土により定まる定数、 $v$ : 雨滴の落下速度 (cm/sec)

##### b) 表流水による浸食

一様流れによる土砂の浸食量は、砂の場合には流水の輸送能力に応じた流砂量により、土の場合には土砂のはく離量により支配される。また、土のはく離量は斜面の長さとともにほぼ直線的に増大する傾向がある。層状一様浸食について、岩垣、土屋は一様流れによる土砂のはく離量を次式で与えた。

$$\frac{qTD}{u_* d_{50}} = 0.023 \left[ \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho) - 1} g \cdot d_{50} \right]^8 \quad (6)$$

ここに、 $qTD$ : 単位幅当り土砂のはく離量 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )、 $u_*$ : 流れの摩擦速度、等流の場合  $u_*^2 = ghI$ 、 $d_{50}$ : 土砂の中央粒径 (cm)、 $\sigma/\rho$ : 土砂の比重、 $g$ : 重力の加速度 ( $\text{cm}/\text{sec}^2$ )、実験条件: 斜面長 3.5 m、斜面勾配  $I = 0.062 \sim 0.322$ 、単位幅流量 4.4~16.2  $\text{cm}^3/\text{sec}$  である。

雨水流れによる場合、雨滴の衝撃力が土砂のはく離に及ぼす影響がかなり大きく、均一砂の輸送量は一様流れの場合より若干小さい流砂量を示す。これについて、岩垣、土屋は雨水流による地面浸食が雨滴の効果を含めた雨水流の掃流力により進行するものとして、次式を与えた。

$$\frac{qTD}{u_* d_{50}} = 0.678 \left[ \frac{u_*}{(\sigma/\rho) - 1} g d_{50} \right]^4 \quad (7)$$

ここに、 $q_{TD}$ :単位幅当り浸食土砂量 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ ),  $\bar{u}_*$ :斜面に沿う平均摩擦速度, 実験条件: 多治見市山腹裸地斜面, 斜面長 9.8 m, 斜面勾配: 0.316.

田中は層状一様浸食と雨裂状浸食の関係について、次式を与えている。

$$\left. \begin{aligned} q &= q_s + q_G = \text{const}, \\ E &= E_s + E_G \\ q_s &= m E_s \\ q_G &= n E_s \end{aligned} \right\} (8)$$

ここに、 $q$ :のり面一定幅当り流量,  $q_s$ :雨裂以外の流量,  $q_G$ :雨裂内の流量,  $E, E_s, E_G$ : $q, q_s, q_G$ に対応する浸食量,  $m, n$ :のり面条件による常数。

このほかにも多くの実験式が提案されているが、いずれも実験を行なった土質, 斜面条件について適用されるもので、普遍的妥当性に乏しい。

### 3. 実験装置および方法

#### (1) 実験装置

土試料を詰めた斜面に降雨を発生させ、土砂崩壊の様相を調べるために Fig-3 および Fig-4 に示すような実験装置を作製した。装置は長さ 179 cm, 幅 20 cm, 高さ 40 cm の木製箱で、ほぼ均一に締固めた土

試料を詰めた勾配可変水路である。土中水深測定は装置底面中央線に沿って行ない、下流端より 15 cm の点から 30 cm 間隔で計 6ヶ所の穴を設け、マンノメーターに接続して計測した。マンノメーターは内径 7 mm,

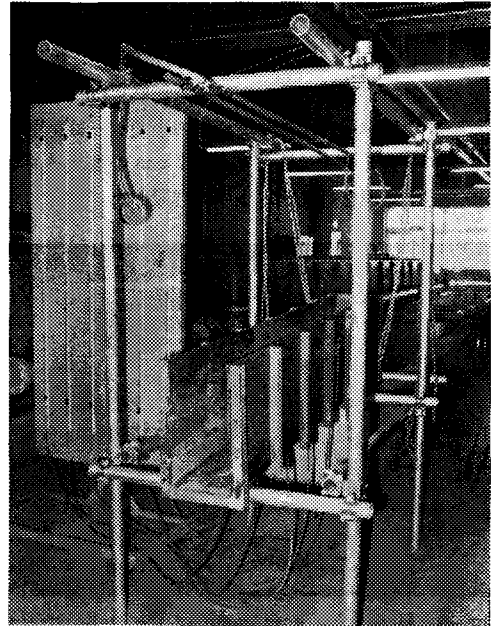


Fig-3 Apparatus for experiment.

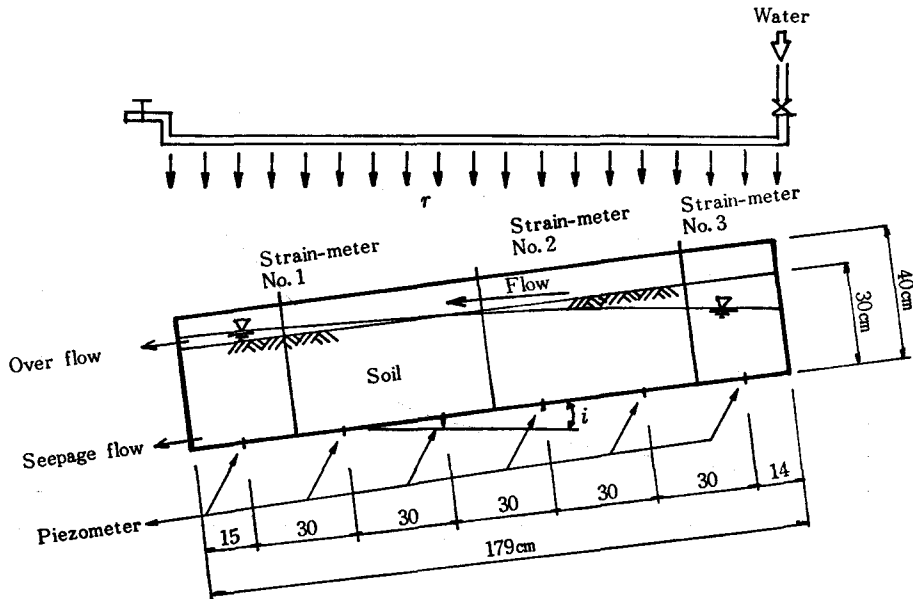


Fig-4 Drawing of flume-hydraulic systems

長さ 1,600 mm のガラス管を垂直に取り付け、目盛テープを接着固定した装置である。降雨装置は内径 13 mm、長さ 1,800 mm の塩ビパイプを 2 本、U 字型並列にし、水路の上方約 90 cm の位置に水平に配置した。降雨用の噴出孔は 0.2 mm の小孔を 8 cm 間隔で下向きに設け、パイプの一端は給水側に、他端は水圧計に接続した。土中ひずみ測定装置は Fig-5 に示すデジタル静ひずみ測定器および 20 点切換平衡箱を使用した。ひずみゲージは 120  $\Omega$  抵抗の小型ゲージを用いてアクティブ 2 ゲージ法とし、 $\phi$  18 mm の塩ビパイプに接着防水処理を行ない、土中に埋設した。

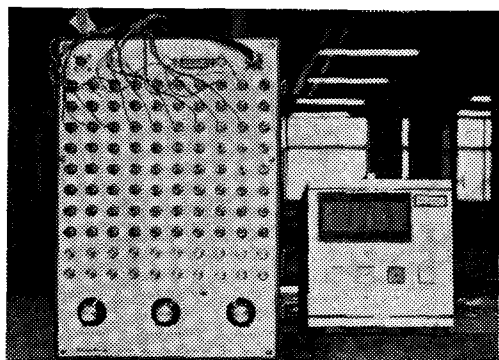


Fig-5 Measuring equipment of the static strain.

## (2) 実験方法

### a) 実験用土試料

使用した土試料は、沼田校地グラウンドの崩壊斜面内より採取したマサ土である。このグラウンドは山地を切り取り、その土を盛土斜面として建設造成した箇所であり、最近かなりの斜面崩壊が見られている。崩壊斜面の一部を Fig-6 に示す。湿潤土と乾燥土がまだらになっているのが観察されたが、層の形成は確認されず、ほぼ均一な土質地盤であると思われる。この土試料を実験室に持ち帰り、土質試験を行なった結果を Table-1 に、粒径加積曲線を Fig-7 に、締固め曲



Fig-6 Landslide of the field slope

Table-1 Experimental results of soil sample

Specific gravity	Mechanical analysis								Coefficient of permeability	Compaction test	
	Max. size	Gravel	Sand	Silt	Clay	$U_c$	$U_c'$	$\gamma_d$ max.		$\omega$ opt	
2.633	9.52 mm	4.5 %	67.0 %	12.0 %	16.5 %	470	18	$2.5 \times 10^{-4}$ cm/sec	1.745 g/cm <sup>3</sup>	15.0 %	

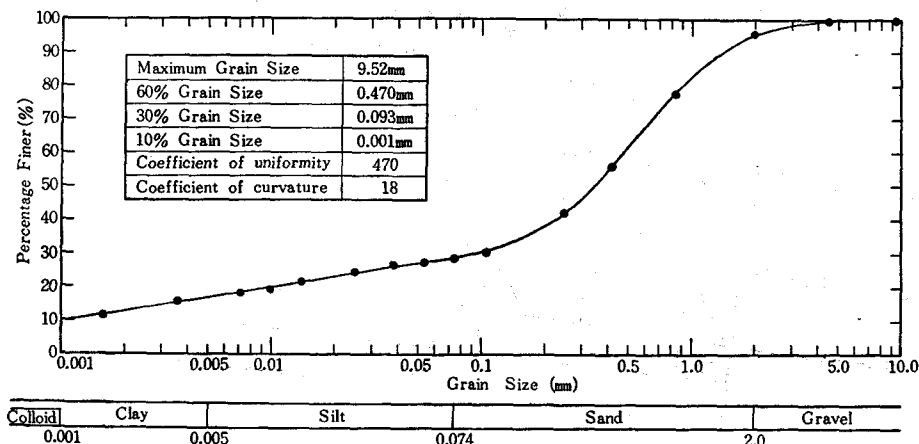
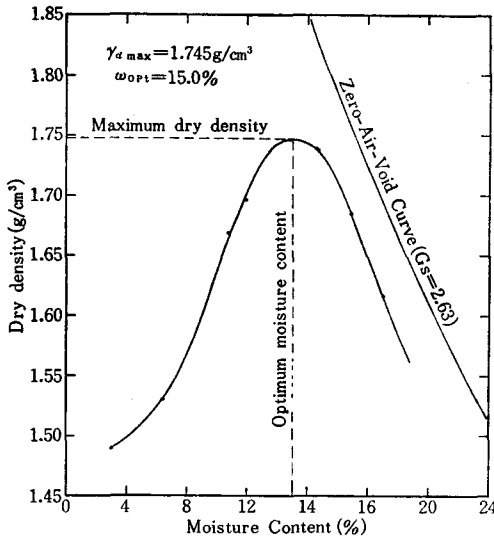


Fig-7 Grain size accumulation curve



Fig—8 Moisture content-dry density graph

線を Fig—8 に示した。

b) 実験方法

不飽和状態の試料土を木製水路内に高さ 30 cm まで 3 層に分けて投入し、突き固めながら表面を平坦にしたのち、締固め状態を確認するために単位体積重量を求めた。つぎに水路の上流、中流および下流の 3 ヶ

所で、地表面から 0 cm, 15 cm および 25 cm の各深さの試料を採取し、含水比を求めた。ひずみゲージを接着したひずみ計は水路の上流、中流および下流に、各々下端を固定し、降雨開始前までに初期値の調整を行なった。マンメーターは管の途中に空気混入の無きよう注意を要するが、水を満たして管内の空気を除去した状態を初期値とした。

以上の準備を完了した後に降雨を開始し、経過時間とともに水深マンメーターおよびひずみ測定を読みを記録し、同時に浸透および越流流量を測定した。降雨量測定は供給水圧が一定でなかったため、土試料から求めた試験前後の含水比の差により残留含水量を算出し、その含水比と全浸透流量および全流出量の総和を降水量とした。浸透流量および越流流量が定常流となり、マンメーターの水深変化も一定となったとき、流れは定常化したとみなして降水の供給を停止し、その後の浸透および越流の流出がほぼ終了するまで実験を継続した。終了後、水路内の上流、中流および下流の各位置において含水比の測定を行なった。

4. 実験結果および考察

浸透流出実験の結果を一覧表にまとめたものが、Table—2 である。土試料の締固め密度を増せば単位

Table—2 Summary of experimental results

Run No.	Moisture content (%)		Wet density (g/cm <sup>3</sup> )		Rainfall depth (mm)	Intensity of rainfall (mm/hr)	Infiltration discharge (ml)	Overflow discharge (ml)	Slope angle (°)	Rainfall time (min)	Experiment time (min)
	Before	After	Before	After							
1	26.08	26.55	1.881	1.888	65,730	408.0	21,720	43,250	14	27	115
2	20.81	26.25	1.802	1.883	92,550	517.0	6,040	77,780	14	30	72
3	24.65	25.38	1.859	1.870	130,000	726.3	2,095	126,670	18	30	50
4	25.38	27.13	1.866	1.870	40,100	224.0	1,100	36,160	7	30	30
5	27.13	26.14	1.876	1.881	19,340	124.7	12,700	5,060	7	26	90
6	26.14	25.89	1.881	1.878	90,360	360.6	12,500	77,460	7	42	92
7	25.89	24.26	1.878	1.853	76,800	429.0	6,900	67,200	7	30	64
8	24.26	25.42	1.853	1.871	45,570	424.3	17,750	25,950	7	18	90
9	25.42	26.82	1.871	1.892	46,350	258.9	24,360	19,750	12	30	90
10	26.82	26.53	1.892	1.887	78,070	408.9	5,280	72,320	12	32	75
11	25.90	26.00	1.880	1.881	49,700	333.2	11,700	36,500	12	25	80

Run 1  $G_s=2.633$  }  $\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1 + \omega/100} = 1.492$        $\gamma_t = 1.888$  }  $\gamma_d = 1.492$   
 $\gamma_t = 1.881$  }  $e = \frac{G_s \cdot \gamma \omega}{\gamma_d} - 1 = 0.765$        $\omega = 26.55$  }  $e = 0.765$   
 $\omega = 26.08$  }  $S_r = \frac{\omega G_s}{e} = 89.763\%$   
 $S_r = 91.381\%$

体積重量は大きくなり、土粒子の間げきは小さくなるので、土の透水係数も小さくなる。すなわち、土中への浸透が大きいということは、土粒子の間げきが大きく締固め密度が小さいということである。実験に使用した土は Table-1 および Fig-6 に示したように、シルト分以下の微細粒子を 28.5% 含んでおり、分類上、シルト質砂と呼ばれる試料である。この土は透水体としての取り扱いよりは、一般的には不透水性に近い土として使用されるようであるが、この土試料により造成された斜面の崩壊が促進している現状から、斜面の崩壊要因が表面流のみによるものか、または浸透による中間流によるものかを解明する為に、Table-2 に示すような 11 回の実験を行なった。降雨強度は 124.7 mm/hr~726.3 mm/hr と大きい、その理由としては、短期流出実験であること、および斜面傾斜角が 7°~18° とゆるやかな形であることがあげられる。

浸透量は降雨量および降雨時間を多くすれば増加するが、降雨量に対する比率で表わせれば浸透率となり、土試料の透水係数および斜面傾斜角に影響すると考えられる。そこで、実験水路における浸水係数と浸

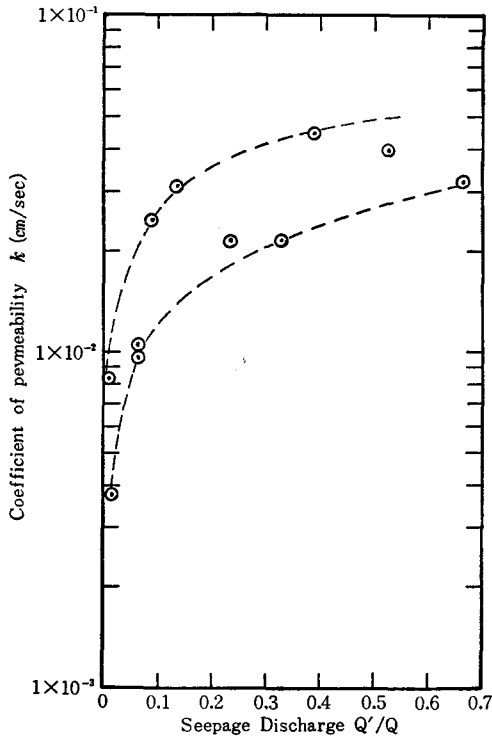


Fig-9 Relations between coefficient of permeability  $k$  and seepage discharge  $Q'/Q$ .

透率の関係を示したのが Fig-9 であり、斜面傾斜角との関係を示したのが Fig-10 である。Fig-9 に示すように、透水係数は  $10^{-2}$ ~ $10^{-3}$  cm/sec の範囲で変化した。土試料の試験から得られた  $k=2.5 \times 10^{-4}$  cm/sec 程度にすれば、浸透量が顕著に得られないという現象が生じた為、 $\gamma_d=1.49$  g/cm<sup>3</sup> 程度の締固め状態で実験を行なった結果、透水係数を大きくすれば浸透量は双曲線的に増加する傾向を示した。装置の傾斜角を 7° から 18° まで変化させると、Fig-10 に示すように浸透率は減少傾向を示した。これは雨滴の浸透流下速度に関係するため、地盤の傾斜勾配の大きい程浸透量は低下するが、Fig-9 に示したように、地盤の透水係数に影響を受けるため、その減少率には幅が表われた。

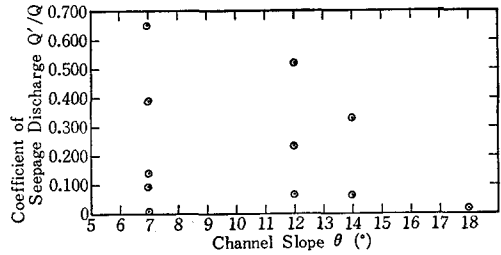


Fig-10 Relations between coefficient of seepage discharge  $Q'/Q$  and channel slope  $\theta$

降雨の浸透が生じれば、結果として地中含水比も変化するが、その代表例として 9 回目の実験結果を Fig-11 に示した。この実験は飽和度  $S_r=87.49\%$  で開始したが、傾向として Fig-11 に示すように、地表面付近の含水比変化が大きく、15 cm 以下の変化が小さくなっている。短期流出中に降雨が地中に浸透し、飽和状態となるのは地表より 10 cm 程度である

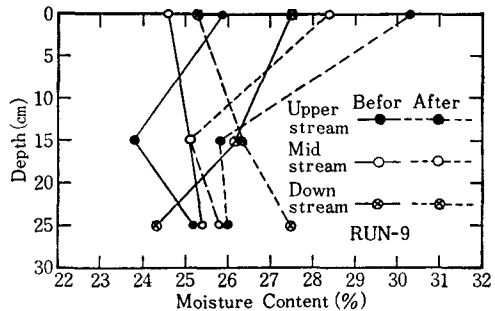


Fig-11 Moisture contents in experiment before and after.

と考えられ、この部分が中間流となって流出するものと思われる。試験後の含水比測定用試料採取の際にも、土中空げが部分的に飽和されているのが確認され、さらに含水比の結果から  $S_r=92.31\%$  が得られる。

土中の水深分布は装置底部から接続したマンノメータにより測定した。その結果を Fig-12 に示すように、

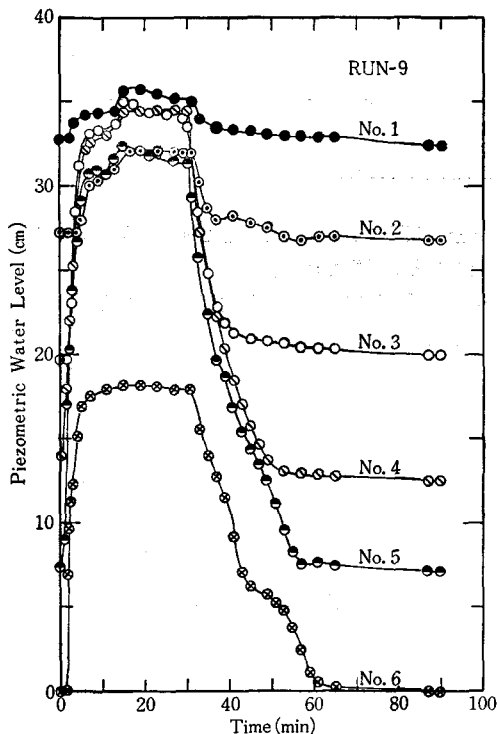


Fig-12 Piezometer water level curve

上流側から 30 cm 間隔で No. 1 から No. 6 まで測定した。勾配によってその始点は違っているが、降雨開始後 5~10 分で急激に上昇変化した後、定常状態を示し、30分間の降雨状態に対応した値を示し、降雨終了後、30分以上で初期の水位に漸次回復した。水位は、上流で 3~5 cm、中流で 15~20 cm、下流で 18~25 cm の圧力水頭を示した。ピエゾ水頭に換算すると上流端および下流端の水頭差の大きいのに比し、中流域では  $\Delta h=1$  cm の値となる。すなわち、Darcy 則の適用を仮定すれば、中流域における  $\Delta S=30$  cm 区間の流量は  $0.788 \text{ m}^3/\text{sec}$  程度となる。

地中のひずみは土中の水圧および土粒子の移動に関係するが、装置の上流、中流および下流に埋設したひずみ計で測定した結果を Fig-13 に示した。傾向と

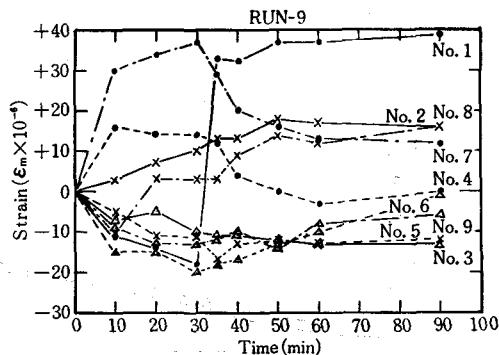


Fig-13 Change of strain versus time

しては表層部の変化が大きくなっている。特に上流および中流での表層部分の変化は正のひずみを受け、実験中に表層土粒子の流下移動が確認された。いづれも、降雨終了と共に、漸次減少しているが、No. 1 の変化が特に大きいのは、装置下流に流出残留した土砂および水圧により負のひずみが働き、降雨の終了と共に、流下方向の正ひずみが大きく作用したと思われる。

装置全体の浸透および流出量の時間的変化は図-14 に示した。表面流は降雨強度が大きいため、実験開始後すぐに越流水として発生し、30分後の降雨終了と共に急激に減少した。浸透流は飽和水流が中間流となって下流側に現われるが、実験開始後 1.5 分で流出を開始し、約 5 分経過後から定常状態で流出し、降雨終了後は漸次減少の傾向を示した。

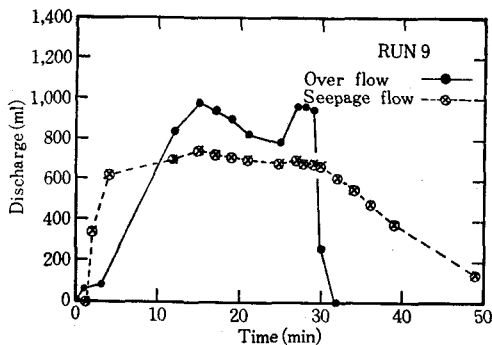


Fig. 14 Relations between discharge and time

表面浸食は雨滴による土粒子の飛散から発生し、雨水の集合と共に表層の土砂を膜状にけずっていく現象である。山崩れや地すべりの様な現象よりは小規模となるが、ガリの発達から斜面の崩壊へと発展していく過程や、それらを支配する要素などについては未解決

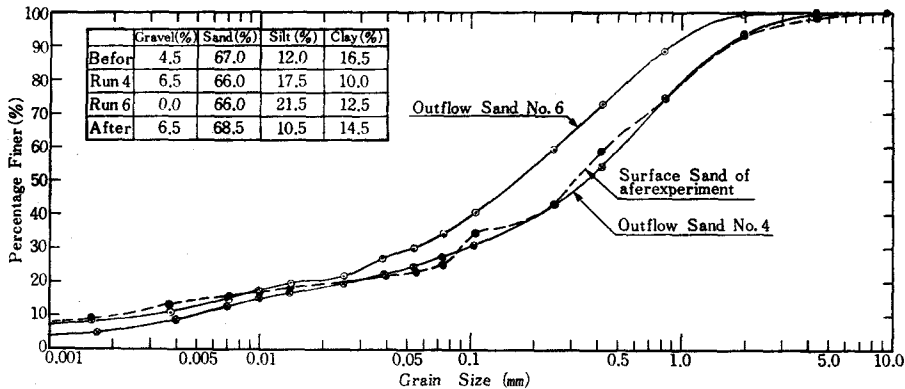


Fig-15 Grain size accumulation curves

の問題が多い。ここでは表層土質変化に着目し、流出土砂の粒度分布について検討し、その結果を Fig-15 に示した。造成直後の斜面は降雨により初期に土粒子の粒度組成そのままの流出分布がみられたが、6 回目の流出実験結果を見ると、レキ分が減少し、シルト分以下の微粒子が増加する傾向が見られた。雨水が薄層をつくって地面を流れ、表層をけずって発生する小溝は砂レキ混入土砂の流下によるもので、その後シルト分の流下によりガリが発生するものと思われる。

## 5. おわりに

斜面における崩壊の原因としては降雨による影響が大であり、50 mm 以上の降雨後に発生頻度の高くなることは過去の地すべり資料から得られている。しかし、斜面崩壊の各要素はいずれも複雑に関係するため、その予知は非常に困難である。地すべり地の移動状況を正しく理解することが、その発生原因と移動機構の解明に重要であるが、全体の土塊が一様に動くことは少なく、土質力学的要素、水理学的要素および地質地下構造などが複雑に関係していると考えられる。

今回は中間報告的なものであり、若干の実験結果から降雨と土質の変化特性について検討したが、降雨量と浸透量の変化を浸透率とすると、地盤傾斜角、締固め密度および透水係数の影響を受けることが確認された。また、降雨は地中のごく浅い範囲で中間流となって、含水比、ひずみおよび水位に変動を与えることが判明し、表面流は土粒子の移動を促進し、レキからシ

ルト分の流下によりガリが発生させ、斜面崩壊の原因となることが確認された。

今後、現地調査および実験的研究を継続し、多くの資料を集積検討して、今回報告した基礎的な性質の把握を前提に、斜面崩壊の解明に努力してゆく所存である。

最後に、本研究を進めるに当り、実験に御協力いただいた本学卒業生の大家俊英君（現、KK熊谷組）および田岡康博君（現、山陽調査開発KK）をはじめとする研究室の諸君に心より感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 矢野勝正：水災害の科学，技報堂，昭和46年。
- 2) 土木学会編：水理公式集，昭和46年度改訂版，土木学会，昭和46年。
- 3) 石原，本間：応用水理学，中I，丸善，昭和33年。
- 4) 石原，本間：応用水理学，中II，丸善，昭和33年。
- 5) 端野，池紙：山地斜面流の抵抗則に関する実験的研究，土木学会中国四国支部第25回年次学術講演会概要集，II-15，昭和50年。
- 6) 金丸，三島，村田：モデル斜面からの流出に関する一考察，土木学会中国四国支部第25回年次学術講演会概要集，II-16，昭和50年。
- 7) D. Swartzenruber & D. Hillil: Infiltration and Runoff for Small Field Plots Under Constant Intensity Rainfall, Water Resour. Res., Vol. 11, No. 3, 1975.