

斜面侵食に関する実験的研究

芦田 和男・奥村 武信・田中 健二

AN EXPERIMENTAL STUDY ON SLOPE EROSION

By Kazuo ASHIDA, Takenobu OKUMURA and Kenji TANAKA

Synopsis

The significance of slope erosion toward human activities increases with recent economic development, not only in the conventional soil conservation but also in the maintenance of reservoir and watershed, in the protection of newly developing lands for industry, resident or transfer.

In this paper, some wanting informations are discussed through the experiments for systematic understanding of erosion mechanism, i. e. with regard to the distribution of flow on the slope and to the evolution of the slope feature which is both the control and the image of flow. The experiments are carried out upon a sandy slope under the artificial rainfall, where erosion process is perhaps dominantly determined by the tractive force of flow and the critical one of materials.

1. 緒 言

斜面侵食の問題は、1940年代～50年代に多く研究された課題であるが、斜面侵食の機構があまりにも多くの複雑に交錯した諸側面を持っているために、それを系統的に記述するまでには至っていない。すなわち、一方では概括的であり、また一方では局部的な取り扱いに終っているようである。

ところで、斜面の侵食が持つ社会的意味、したがってこの問題を取り扱うことの工学的意味は、経済の発展とともに推移してきていると考えられる。すなわち、かつては主として土地の生産力の減退というプリミティブな面でのかわりあいであった。^{*} これは、人間の生命の根源を土地の生産物に依存する以上、絶えず注意を向けおかねばならないことであり、今もその意味をなくしてしまっているとは言えないものである。^{**} しかし、現今の飛躍的な、無秩序ともいえる経済的發展とともに、生命活動といったプリミティブな面のほかに、進行している生産活動の展開を妨げる現象、あるいは生産活動に付随して発生する不都合な現象とのかかわりあいでの意味が付け加えられてきている。すなわち、たとえば、生活基盤、生産基盤としての土地の確保のために大規模に行なわれる土地造成によって作り出される新しい被侵食斜面の維持の問題、大規模に変形される流域からの土砂流出の問題、したがってまた、土地利用変化による雨水流出様相の変化と関連する都市周辺中小河川の河積縮少の問題、さらに生活用水、産業用水確保のために多く築造されたダムのもつ利用価値の漸減等、斜面侵食のもつ社会的・工学的意味はより新しい面を加えつつ増大しているのである。^{***}

^{*} このことは、侵食を扱かう論文が参考としてあげる Neal¹⁾, Zingg²⁾, Ellison³⁾ などの論文が American Society of Agricultural Engineering の論文集に見出されることでもうかがえる。

^{**} Journal of Soil and Water Conservation には、farm planning の面での取り扱いをした論文が最近でも多い。

^{***} U.S.A. でも1960年頃から、たとえば Wischmeier⁴⁾, Guy & Ferguson⁵⁾, Dawdy⁶⁾ のように都市化と侵食問題との関連の論文が見られるようになっている。また、Fischer も、土地保全の将来を展望し、都市化地域におけるそれと、環境問題としてのそれを強調している。⁷⁾

それゆえに侵食過程の各側面を部分的に取り扱って得られている研究成果および、それ以後の、関連する諸知識、さらに問題とすべき未解決な問題を解明し、一つの体系とすることの重要性は大きい。しかし、さきに述べたように、現象を支配する因子の複雑さゆえに、すべてを包含した統一的な表示を試みることは、現段階として労を惜しまなくてもほとんど不可能である。そこで、われわれは、侵食現象のもつ水理学的な側面を取りあげて、現象・機構の把握を行なおうとするものである。

さて、水による斜面侵食は従来からよく知られているように、大きく二つの過程に分離することができよう。³⁾ すなわち一つは、土砂粒子の斜面土砂層からの剝離過程もしくは土砂粒子の mobility の増大の過程であって、これは雨滴の衝撃力や表流水のもつ掃流力が土砂層のもつ粘着抵抗をしのいだとき、あるいは、その重要性は小さいが、浸透水によりつくり出される間隙水圧が土砂層のもつ内部摩擦抵抗をしのいだときにあらわれる現象である。他の一つは、剝離された土砂もしくは mobility の増大した土砂の表流水の輸送過程であって、掃流力が粒子の限界掃流力あるいは浮遊限界を上まわったときにおこる。

侵食現象は、この二つの過程の大きさの組み合わせによって、種々の様相をもったものになるのであるが、⁸⁾ ここでは、主として後者の過程すなわち掃流力と掃流抵抗力の関係において決定されるような侵食現象を取り扱う。また、ここでは、水は降面の形式のみで与える。

ところで、降雨は斜面に到達すれば、まず浸透水となり、浸透能を超えるものが地表水流となる。この地表水流は斜面の条件によって、薄層流となったり、薄い channel flow となったり、その性格のちがう状態の流れを形成する。したがって、その掃流力にも当然差違があらわれる。たとえば、縦断形が時間的に変化しない(非透水性の)滑かな斜面を仮定すれば、降水から薄層流への変換は、連続式と運動方程式によって一次的に解析でき、水深・流速したがって掃流力も求まるが、一般には、薄層流から薄い channel flow への変換が生じ、これは斜面の傾斜に直角方向の微小な起伏を考慮して、二次的に取り扱わなければ解明できず、水深・流速したがって掃流力の大きさを的確に求めることは、より困難となる。さらに、流れが薄いために、雨滴の衝撃や浸透水・斜面のもつ粗度が流れの特性に対してさまざまな影響を持っており、その解明も必要となる。ここにいう薄層流と薄い channel flow は、ともに降水が斜面を流下するのに最も好都合な形態の流れを形成しようとする過程の一側面にすぎず、両者の間には明確な区別をつけたいが、水深などの水理量が横断方向に水深に比してかなりの距離にわたってほとんど変化しないものを薄層流と呼び、そうでないものを薄い channel flow と呼ぶことにする。

さらに、この斜面のもつ(微小な)起伏は、横断方向の掃流力の分布状況を反映したものにほかならず、斜面の侵食機構は、さきにあげた掃流力と掃流抵抗のほか、場所的条件としての斜面の形態を併せ考えたときに、はじめて解明されるものである。

すなわち、本研究の目的を要していえば、降雨による斜面侵食は、斜面上に発生する表面水流のもつ掃流力の分布と、それにより支配された掃流力の分布を支配する斜面の形態(リルないしはガリの形状と分布など)との関連の解明においてのみ把握されるものであるとの見地から、その様相を系統的に記述し、その結果として斜面から流出する土砂量を予測する手法の確立にむかって一つの試みをしようとするものである。

2. 斜面侵食に関係する従来の研究

斜面侵食に関する研究を分類すると、まず、土砂侵食量をできるだけ簡便な方法で推定しようとする目的で、実斜面での観測値や実験値を統計処理し表示していかうとするものがあげられる。すなわち、Neal, Horton⁹⁾, Zingg にはじまる多くの式が提案されている。そして、彼等は斜面長、斜面勾配、雨量強度あるいは表面流量といった簡単に定量化できる factor のみを採用し、他の斜面条件をすべて係数に包めた。その後、この係数に含まれる意味の解明や、関連する factor の抽出とその定量化、さらに彼等の採用した factor のより妥当な表現方法の検討など、より普遍性をもつ侵食量式を求める努力が払われてきた。

侵食の第一の過程である土砂の剝離過程に関する研究は、一滴の雨滴による土砂粒子の飛散を扱ったも

の¹⁰⁾、面的な拡がりをもつ降雨下での土砂粒子の飛散を扱ったもの¹¹⁾、流水による剥離を扱ったもの¹²⁾に大別できるが、ここでは詳しくふれない。

侵食の第二の過程である土砂の輸送を行なう斜面上の流れに関しては、まず薄層流の抵抗則に関する研究があげられる。粗面上の薄層流では Reynolds 数が小さくても、流れが乱流状態にあるために、層流抵抗則よりもむしろ Manning 則が成立することが指摘され、種々の条件に対する Manning の粗度係数が求められてきた。一方、この方法とは別に勾配や粗度を parameter にして、抵抗係数と Reynolds 数との関係の変化を表示する手法も多く用いられている。^{13), 14), 15)} さらに、抵抗係数が降雨強度により変化することも知られており^{15), 16), 17)}、抵抗係数に関する知識を要約すると、勾配、粗度、降雨強度が大きいほど、同一の Reynolds 数に対する抵抗が大きいといえる。またこれに伴ない、層流から乱流への遷移 Reynolds 数も減少する。また岩垣らは、急斜面上の薄層流に特異的にあらわれる転波列について詳細な研究を行ない、転波の波頂における impulse が斜面侵食に対して大きな効果をもっていることを指摘している。¹⁸⁾ しかし、薄層流の抵抗係数に関する従来のいくつかの実験からその実験条件を示すと、Table 1 のようであり、急勾配でかつ粗度の大きな流れに対する実験資料は少ない。

Table 1 Some experiments on flow resistance of shallow flow

Experimenter	Slope	Roughness	Rain fall intensity (mm/hr)	Diameter of rain drop (mm)	Reynolds' number	Resistance Coefficient f	Flow depth (mm)
Iwaki ¹³⁾	0.002~0.17	0~4.36 mm sand			100~15000	0.024~0.4	1~40
Tsuchiya ¹⁴⁾	0.006~0.4	soil $d_{50}=7$ mm			5~1500	0.03~4	1.4~6
Woo, Brater ¹⁵⁾	0.001~0.06	Masonite, 1 mm sand	0~135	4.5	25~200	0.16~2.8	≈ 5
Yoon, Wenzel ¹⁶⁾	0.001~0.03	glass plate	0~450	3.1	40~7000	0.02~1.0	3.4~9.5
Yen Wenzel, ¹⁷⁾ Yoon	0.005~0.01	"	0~375	3	220~2500	0.04~0.4	3~7

この流れのもつ掃流力に対して、斜面のもつ抵抗力としては、土砂粒のもつ限界掃流力、土砂層のもつ粘着力および内部マサツ力があげられ、後に述べるように、著者らの実験においても、田中の指摘している小規模な迂り¹²⁾、あるいは土砂層の流動現象が見られたが、本論では後二者の効果を捨象して現象を考察することにして、土砂粒子の限界掃流力に関する従来の研究を検討すると、それらはいずれも緩勾配水路における水深の大きい流れに対するものであって、斜面上にあらわれる流れにそのまま適用することは困難である。そこで著者らは、単純に斜面勾配のみを考慮した修正を行なったこともある¹⁹⁾が、最近詳細な研究により、Shields のパラメーターを急勾配に対して修正した値と、粗度（土砂粒径と水深の比）との関係が求められた。²⁰⁾

さて、流れの掃流力とこの砂粒子の限界掃流力との関連で斜面上各点での輸送量が決まり、斜面の形態が変化する。掃流砂一般の問題としては、有効掃流力の評価と混合粒径の効果が主要な問題と考えられ、これらを考慮して従来から多くの流砂量式が提案されてきたが、そのいずれも、また比較的勾配がゆるやかな河床において得られたものであって、斜面侵食に関係するような急勾配の流れに対しても適用できるかどうかについては、今後の検討を要するところである。

斜面上の流れによって土砂輸送が行なわれる結果として表面の形態がどう変化するかを論じたものには、田中¹²⁾、霜鳥²¹⁾、Meyer²²⁾などの研究があるが、いずれも定性的あるいは観察的表現に止まっている。なかで、金子らは、定量的な表示として本論でも一つの指標としている水みち面積率をとりあげ、火山灰土壌では 0.1~0.3 に収斂することを示している。²³⁾ 奥田らも、裸地斜面上でのガリの幅、間隔について、その時間的空間的变化を水理学的定数、土壌因子、斜面の大観的幾何学的因子に関係づけて解明しようとしているが²⁴⁾、その傾向さえ未だ十分に把握できていないようである。また河村らは、地表流による単一のガリ頭部の後退とガリ底部の縦断形について解析を試み、後者が波動性をもつことを示しているが²⁵⁾、その検証は行われていない。

ちなみに、従来行なわれた斜面侵食に関する実験ならびに観測例の二三について、その条件を比較すると Table 2 のようである。これをみると、少なくとも屋内実験においては斜面の規模に限度があり、面的な拡がりまで考慮した例はなく、また野外における規模の大きいそれは、比較的剝離されにくい土壌を対象にしたものであり、本論で扱かうような激しい表面状態の変容を示すものではない。

Table 2 Some experiments on surface erosion

Experi- menter	Width of slope (cm)	Length of slope (cm)	Inclina- tion of slope	Soil characteristics	Water supply	Du- ration (min.)	Discharge rate at slope foot	Maximum flow depth
Tanaka ²⁶⁾	30	93	1/2~1/5	$d_m=0.2$ mm clayey, $d_m=1$ mm sand	from slope head	30	50~250 cc/sec	1.4~2.7 n.m
Iwagaki & Tsuchi- ya ¹³⁾	10	350	0.12~0.33	$d_{50}=0.96$ mm sandy	from slope head, rainfall $d=1.37$ mm 820~4600 mm/hr	27	4~16 cc/sec/cm	
Tsuchi- ya ¹⁴⁾	1060	980	0.316	$d_{50}=7$ mm (in field)	natural rainfall 3~100 mm/hr		0.0004~7 cc/sec/cm	
Kaneko et. al. ²³⁾	960	4000	6°30'	$d_m=0.2$ mm andeptsol (in field)	from slope head, showered 30~70 mm/hr	60~100	0.05~0.14 m ³ /min	
Tera- shima ²⁷⁾	30	300	10°~30°	$d_m=0.26$ mm $\sigma_\phi=3.35$ $k=0.02$ cm/sec	from slope head	60	10~50 cc/sec	0.2~1.2 cm
Shimo- dori ²¹⁾	44.5	97.5	10°~20°	$d_m=0.42$ mm $\sigma_\phi=5.38$ $k=0.02$ cm/sec	sprayed 110~160 mm/hr	120	1000 cc/min	

3. 実験の概要

斜面上にあらわれる流れの掃流力と斜面を構成する土砂粒子に対する限界掃流力との関連において、土砂粒子が輸送され斜面の形態が変化していく様相を把握することを目的として、まず粘着性をもたない砂粒子

で構成された斜面を対象として実験を行なった。ただ、以前に粘性材料により構成された斜面について、多少の実験を行なっているので、それについても二三触れることがある。

3.1 実験 斜面

実験は宇治川水理実験所河川災害総合基礎実験施設内に設置された Fig. 1 に示す斜面に人工降雨を与えて行なった。実験斜面の四囲はコンクリートブロックで囲われ、また斜面下流端は、従来の多くの実験で見

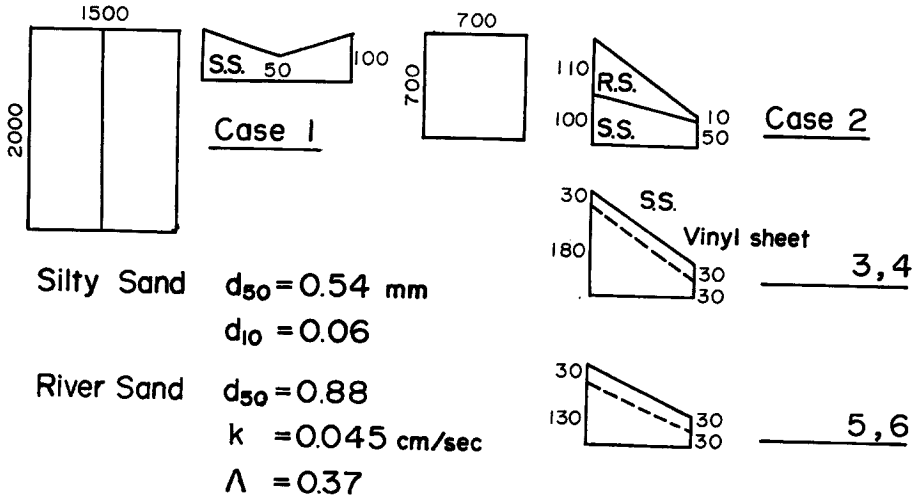


Fig. 1 Dimension of the experimental slope.

られるような²¹⁾²⁷⁾浸透流の影響を除去する手段はとられなかった。斜面を構成する材料の粒度分布は、Fig. 2 に示すとおりであった。CASE 2 では、CASE 1 の斜面上に川砂を盛り上げただけのものではあったが、流出量が定常になるまで実験を続行するには長時間を要したため、その時間を可能な限り短縮することと、さらには、砂層の厚さを一定にすることを考えて、CASE 3~6 では、30 cm の深さにビニールシートを挿み、これを不透水面とみなした。

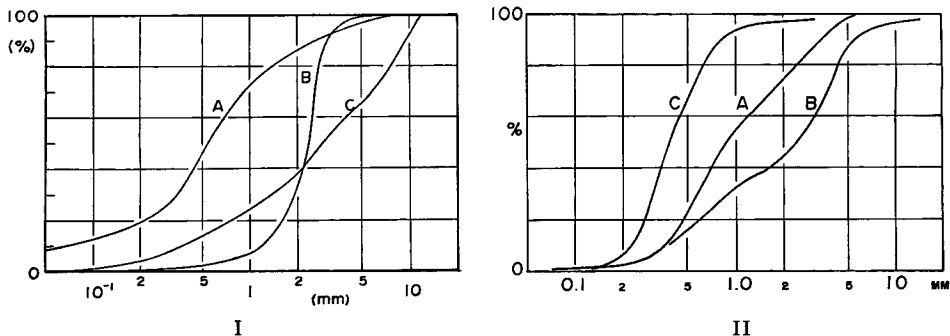


Fig. 2 Sieve analysis curves of sand particles.

- I: for CASE 1. A; initial composite
 B; residual over sheet-eroded surface
 C; residual within watercourse.
- II: for CASE 2~6. A; initial composite
 B; bed composite of water course (under full discharge)
 C; bed composite of watercourse covering B after rainfall stopped.

3.2 実験条件および測定

Table 3 Summary of experimental conditions and some hydro-data

RUN. No.	I	R	T	t	Q_t	f'	Q_s
1- 1	0.07	100	120				104
2			150				
3			165				
4			180				
5			180				
6			180				75
7			180				70
8			180				70
9			360				67
10			720				30
11			1440				26
12			1440				21
					$A=300\text{ m}^2 \uparrow$		11
							8
2- 1	0.22	120	135				131
2			105				107
3			120				103
4			135				168
5			105				250
					$A=49\text{ m}^2 \downarrow$		
3- 1	0.22	122	80				542
2		120	50				368
3		90	75				350
4		115	70				386
5		115	360	80	3830	0.53	
4- 1	0.22	78	143	122	3560	0.60	159
2		61	108	84	2560	0.44	159
3		54	114	92	2420	0.45	138
4		56	94				123
5		57	120	104	2690	0.49	141
6		56	72				
5- 1	0.16	65	121	95	3030	0.44	83
2		67	120	61	2330	0.35	145
3		65	120				140
4		64	120	100	2310	0.51	100
5		66	120	80	2200	0.53	112
6		65	123				61
6- 1	0.16	65	100	70	3080	0.42	287
2		69	100	52	2590	0.43	482
3		97	100	66	2590	0.54	439
4		90	100	55	2470	0.44	345
5		92	100	67	2460	0.52	273
6		98	100		2710	0.56	275

 I ; inclination of initial slope R ; rainfall intensity (mm/hr) T ; duration of rainfall (min.) t ; passing time before discharge being constant (min.) Q_t ; lost rainfall during t (l) f' ; ratio of run-off discharge to total rainfall during t . Q_s ; sediment discharge rate during T (kg/hr)

実験条件は **Fig. 1** および **Table 3** に示すとおりであり、CASE 2 (RUN 2-1~5) の特徴は、透水層が厚くしかもそれが場所的に変化していることである。これに対して、CASE 3~6 は、土質や透水層の厚さを一定にして、降雨強度と斜面勾配をそれぞれ二種類づつ組み合わせたものである。

降雨は、斜面全体にほぼ一様に降るようであるが、強度の調節は流量のみによったために、強度の大きいほど雨滴の径は小さく霧状になることが多く、自然の降雨の場合と非常に異なるが、さきに述べたように、ここでは雨滴による土砂粒子の飛散、剥離を問題にしているのではなく、流水となったときの掃流力を問題にしているのであるから、流量が面的に一様に与えられれば十分であると考えている。

測定項目は、下流端の流量、流出土砂量、土砂濃度、斜面上の流速、水面幅、粒度分布ならびに地表高であるが、実験 CASE によって重点のおきどころは異なっており、必ずしも全部の CASE に対してすべての項目の測定を行なったわけではない。とくに、CASE 1 は、直接測定を行なった量が土砂濃度と流出土砂量およびその粒度分布であり、写真測定によって水系の展開を把握することに重点を置いたものである。（このことについては、機会があれば報告したいと考えている。）また、CASE 2 は、斜面侵食の機構を構成する現象の把握と問題点の抽出に重点をおき、上のすべての項目を測定したが、反面、系統的な資料は得られていない。CASE 3 では、CASE 2 で見出されたいくつかの問題点に焦点を絞り、とくに流れの抵抗則を明らかにするために、流速と水深の測定に重点をおいた。CASE 4~6 は、流水の集中現象に着目して、とくに水みちの分布の測定に重点をおいた。CASE 2~6 すべてに共通して得られている資料は、流量、流出土砂量および降雨停止後の斜面形状である。

つぎに測定方法について述べる。流量は **Photo. 1, 2** に見られるような量水槽の水位をポイントゲージあるいはマノメーターで 1/10 mm 単位で読み取って求めた。流出土砂量は、その全量を採砂函に受けて、降雨停止後、乾燥、秤量した。土砂濃度は、随時に約 1 l の採水を行なって求めた。斜面上の水理量は、**Photo. 2** に見られるように、パイプを渡して対象地点に行き、測点の位置は 5 cm 単位、水面幅は 1 cm 単位、水深は 1 mm 単位のスケールで直読した。流速は、水面に塩水を滴下して、その直下流に数 cm の間隔にある 2 対の受感部の電導度の変化により測定した。地表高の測定は、ポイントゲージによった。

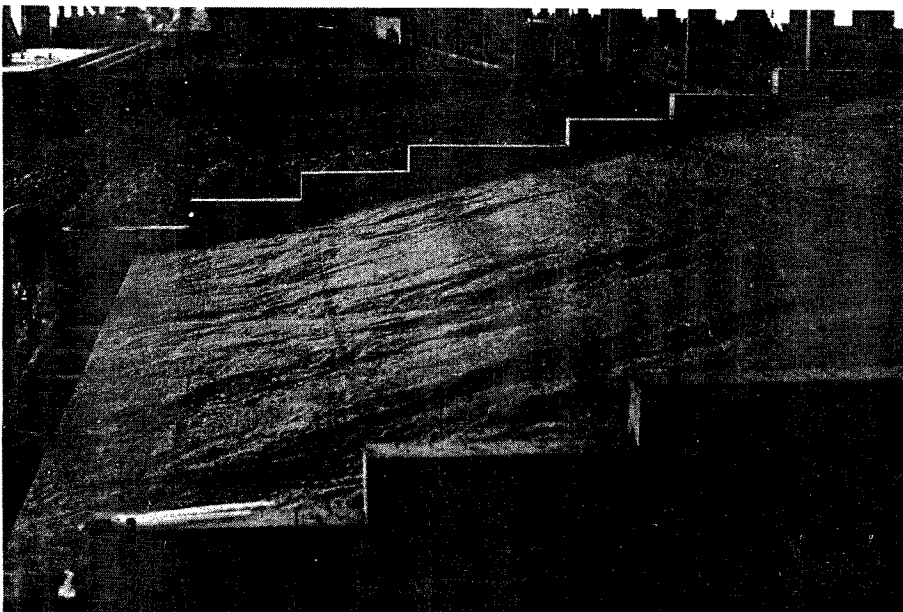


Photo. 1 A view over experimental slope after CASE 2.

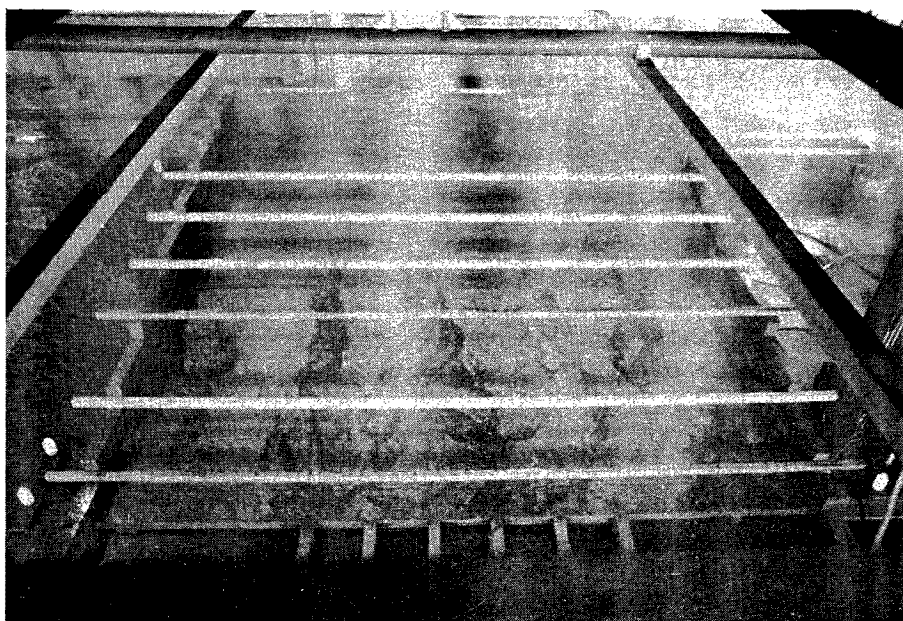


Photo. 2 A view over experimental slope during CASE 4.

なお、SECTION (測線) の位置は、斜面の最上端を 0 として、傾斜方向に水平距離 10 cm ごとに取っている。たとえば、最下流の測線 70 は、上流端から水平距離 700 cm である。また、本文中で RUN と呼ぶのは一連続降雨をさし、CASE とは、一つの初期斜面からはじめて数回の RUN を総称する。

4. 実験の結果と二三の考察

まず、現象の観察的事項を詳しく述べて見る。

CASE 1 の斜面は、浸透能が小さいために降雨開始とほとんど同時に斜面全体に表面流が発生し、その流量もほぼ定常である。これに対して、2～6においては、浸透能が大きく初期の降雨はすべて浸透してしまう。このとき、斜面上での砂粒子の飛散はほとんど見られないが、表面の粒度構成は徐々に変化して、比較的あらい粒子が表面をおおうようになる。やがて地下水位が上昇すると、下流端付近から表面流が発生し、その領域は急速に拡大する。

いづれの CASE においても、初期の斜面はほぼ平坦ではあるが、一様な侵食が見られるのは表面流発生後のごく短時間のみで、間もなく無数の小溝が生じ、土砂の動きには場所的な不均一性がみられる。このときの土砂の動きは、いわゆる「すべり」¹²⁾ではなく、個々の砂粒子が流水によって輸送される状態である。ここまでの現象は、多少の不均一性はあるが、斜面全幅にわたって流水の存在するいわゆる「層状侵食」もしくは「初期のリル状侵食」の段階であるといえる。

CASE 1 では、この段階の斜面形態がかなり安定であって、すなわち斜面上ほとんどの部分に流水が存在する状態のまま流出土砂は減少していくが、2～6では、ますます流水の集中が顕著となり、水みちをさらには谷状の形態を形成するようになる。このように、水みち（地形学でいう谷底または河道）とその周囲との比高が大きくなると、その頭部や側壁（地形学でいう谷頭、谷壁に相似できる）には、mass movementが発生する。その様式には、飽和した砂層が比較的なだらかな勾配で塑性流動をおこすものと、ほぼ鉛直に切り立った壁に平行な亀裂を生じて含水量の小さい土塊が崩落するもの、および両者の混在したものがある (Photo. 3)。この段階を「ガリ侵食」と呼んで差し支えないであろう。ガリの中の流路はきわめて不安定

なもので、土砂によって埋没したり、逆に堆積物を急激に押し流したりしながら分合流を繰り返す。また、個々の流路には高さの違いがあるために、ある一つのものの侵食が卓越すると、隣接するものでは流水が涸渇する現象も見られる。このように、CASE 2~6 の侵食は実に多くの要素を含んでおり、全体として非定



Photo. 3 Mass movement occurring at gully head.

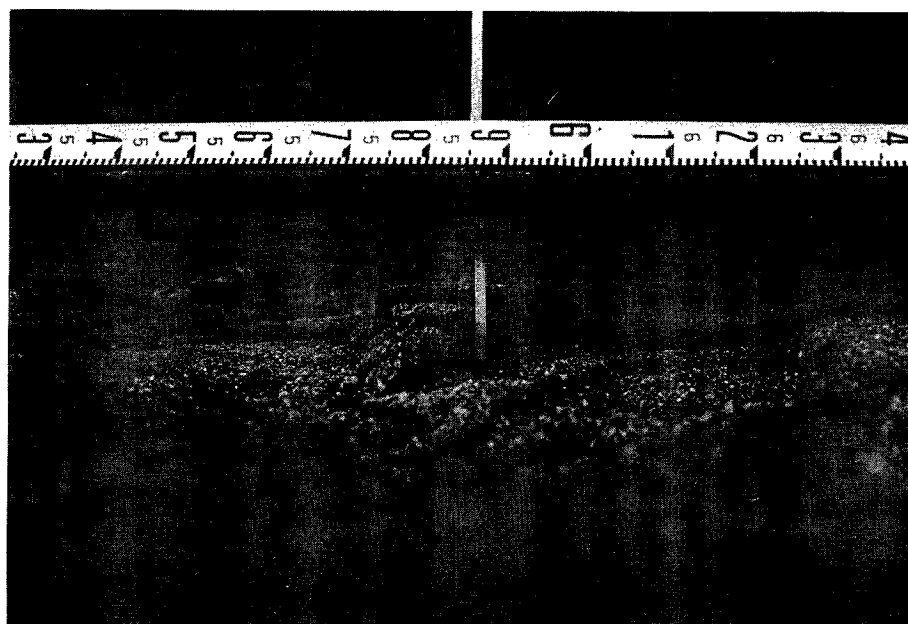


Photo. 4 Close-up of a watercourse.

常性が非常に強い。とくに流路の配列のパターンについては、予測しがたいものがある。

しかしながら、個々の流路の内部における土砂の輸送形態はやはり掃流による各個運搬である。また、流路は激しく変動し、個々のそれは消長を繰り返すというものの、測線上のその個数や、その総水面幅には急激な変化はあられせず、ある平衡状態を保ちながら現象が進行していることを思わせるところがある。

一方、降雨停止後の斜面の形態は、数個の大きなガリに区分され、さらに、それぞれの内部に数本の流路が存在する。また中央部から下部には、沖積扇状地状の堆積がある。これは、人工的に作られた斜面が、いわゆる水成勾配の斜面に変形する過程を示すものであろう。谷頭の位置は、浸透水の浸出点がその時点までに達した最高の位置から数 10 cm 下部にある。そしてこの後退は、はじめはさきに述べたように各個運搬形式の掃流によるが、そのうち塑性流動による移動、さらには、とくに表流水が減少あるいは消滅するような段階になると、間歇的な崩落によるものであって、その速度も、この形態のちがいによって大きく異なる。崩落の見られる谷頭には比高 10 cm にもなる鉛直に近い壁が存在することになる。

4.1 斜面上における流れと斜面形態

一様な降水が斜面上に与えられたばあい、それが地下流水と表流水にどのように分かれるか、さらに表流水は横断方向にどのように分布するか、これに対応して斜面の形態がどのように変化するかなどについて、実験結果にもとづいて二、三述べよう。

さきに述べたように CASE 4~6 においてこの問題を解明するための詳細な計測を行なった。Fig. 3 は水みちの分布についての測定結果の例であり、数字は各水みちの水面幅である。各 CASE の RUN 3, 5 については降雨停止直前のそれである。Fig. 4 は各測線上の流路の数、Fig. 5 は測線上の総水面幅の時間的縦断的变化を示すもので、Fig. 5 の b/B は総水面幅と斜面全幅の比で水みち面積率と呼ぶ。

Fig. 3 は、時間の経過にしたがって斜面上の流れの偏在度が増加することを示している。Fig. 4 において、水みちの本数が下流端近くで増加しているが、これは必ずしも水みちが途中から分流するのではなく、斜面下流端において地下水流を遮断している境界条件のために新たな表面流が発生することによるもので、局部的なものとみなされる。水面幅の測定においては、流路の断面形状を考慮していないので、二つの水みちが相近接しているばあいには、それらを一つのものであると判断することもあり、さらに定義のあいまいさもあって、必ずしも個々の水みちに分割して計測ができたとは言えない。総水面幅で表現すれば、このようなあいまいさは除去されるけれども、そのばあいにおいても sheet flow と channel flow との区別について画然とした規準を与えることは困難であって、水みちの本数および水面幅には測定上の誤差を伴う。なお、Fig. 5 において CASE 2 の水みち面積率が 1 から始まっているのは、sheet flow の水面幅を考慮に入れているためである。CASE 3~6 においても浸出点近傍では sheet flow が存在するが、それはごく限られた範囲であり、いったん地表に現われた水もすぐに浸透していく現象が多く見られた。

しかし、斜面中流部において、水みち面積率が 0.15~0.2 にあることが多く、条件の非常に異なる金子らの実験で得られたもの²⁸⁾と類似していることは興味深い点である。

さらに、水みちの間隔について検討した。Fig. 6 はその一例で、Fig. 3 で示された流路の中心間距離の標準偏差であるが、さきに述べた流路の測定規準あるいはその定義のあまみや標本数の少なさにもよると思われるけれども、あまり明確な傾向は認められない。ただ時間の経過とともに偏差は多少増大していき、ある範囲の中で増減を繰り返すようである。またこの検討では、現象的にはそれぞれ異なる傾向を示すものと考えられる、原面を残した部分も、大きく谷形の形態を示す部分も、さらにはすでに堆積形状を示している部分も一つにして取り扱っているために、なおさら明確な傾向を把握できなかったのではないかと考えられる。

つぎに問題になるのは、水みちの断面形状である。本実験は平衡状態にはないが、個々の水みちについてはかなり自由な形状をつくって流れていると思われるから、その形状については regime theory で得られたものと類似する関係が成り立つのではないかとと思われる。regime theory では種々の関係式が提案されているが、いま

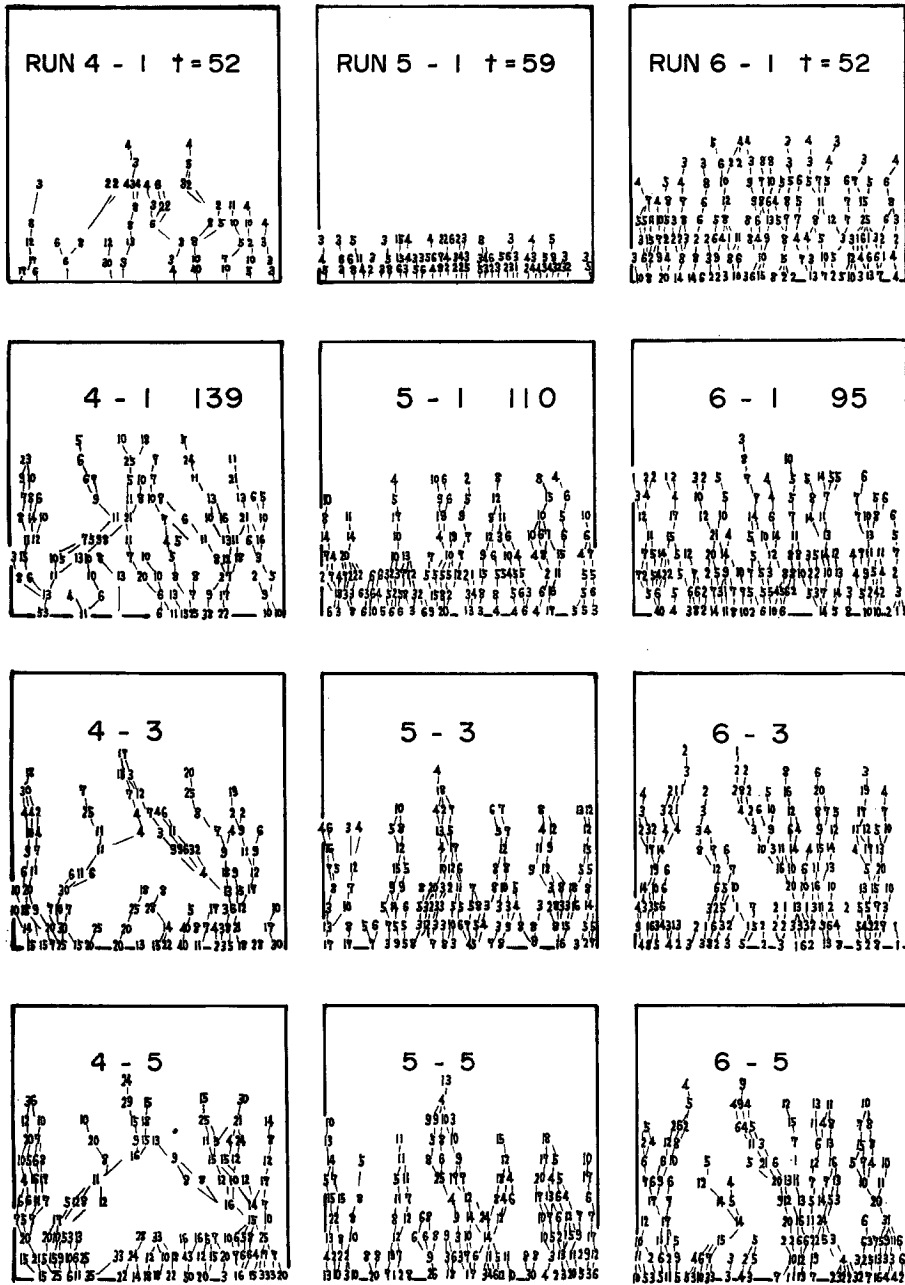


Fig. 3 Spatial distribution of watercourse. (figures show the width of the course)

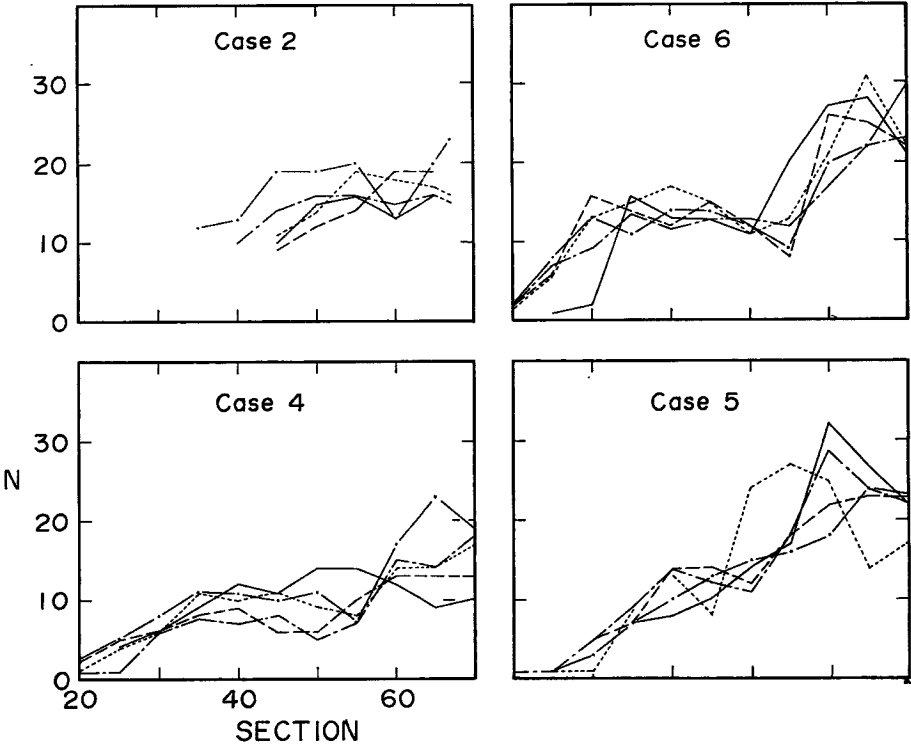


Fig. 4 Variation in number of the watercourses.

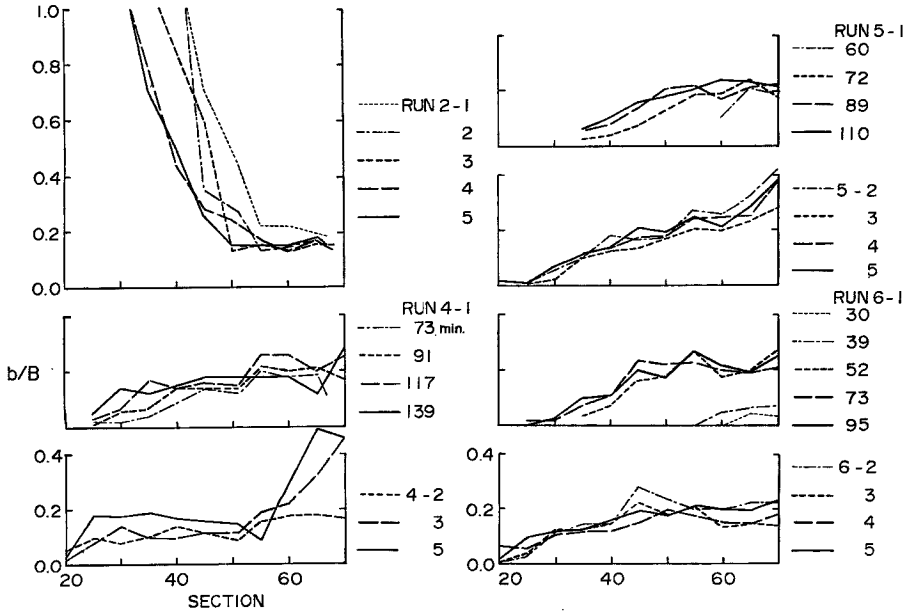


Fig. 5 Variation in total width of the watercourses.

$h \propto Q^{1/3}$, $b \propto Q^{1/3}$, $I \propto Q^{1/6}$ の関係を用いると
 $b/h \propto Q^{1/6} \propto I$ となる。

(ここに, h ; 水深 b ; 流路幅 I ; 勾配 Q ; 流量) それゆえ Fig. 7 のように, I と b/h の関係を図示したが, 勾配の変域も狭く明確な傾向は見出せず, むしろ全体として, b/h がある範囲に集中することが認められた。そこで, b/h の度数分布を検討すると, Fig. 8 のように $b/h=5\sim 20$ のものが約 65% を占める。

以上それぞれの問題について実験結果を示したにすぎず, これらの問題の解明は地下水と地表水を含めた二次元的な解析によらねばならず, 今後に残された大きな課題の一つであると言える。

つぎに, 上述の流れと相互作用をもって形成される斜面形態の変化について述べる。計測した斜面上の起伏の

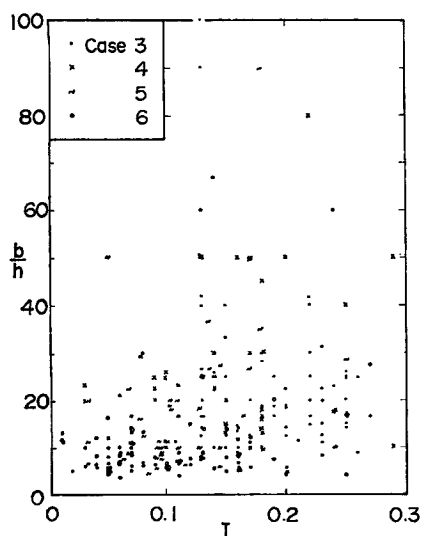


Fig. 7 Relation between Inclination I and shape b/h of watercourse.

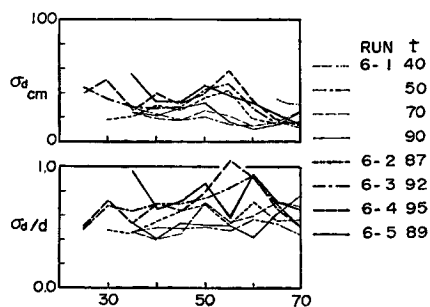


Fig. 6 Deviation of the distance d between watercourses. $\bar{d}$; average of the distance d .

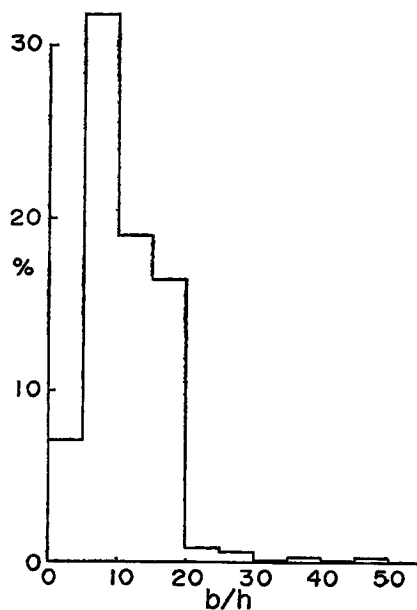


Fig. 8 Histogram of b/h .

変化の一例は Fig. 9 のとおりで, 斜面の侵食がさまざまな機構の組み合わせによって進行していることを示している。たとえば, SECTION 25 左のガリでは, RUN 4-2 以降下刻はほとんど停止し振幅だけが盛んに行なわれている。SEC. 35 右1/3では, 一時的に下刻は停止し, 二つのガリを隔絶していた部分が消滅し, その部分に最低部をもつ一つのガリを形成している。SEC. 45 右1/3では, 一つのガリの中に集まった流れが, ある時は複数の極部をもった底をつくり, あるときは単純な底をつくっている。また SEC. 55 では, 初期の単一の横断面形をひとまず複雑な起伏のある形状にしたのち, それらを平滑にしなが一つの大きな波長をもつ横断面形にむかって変化していく。

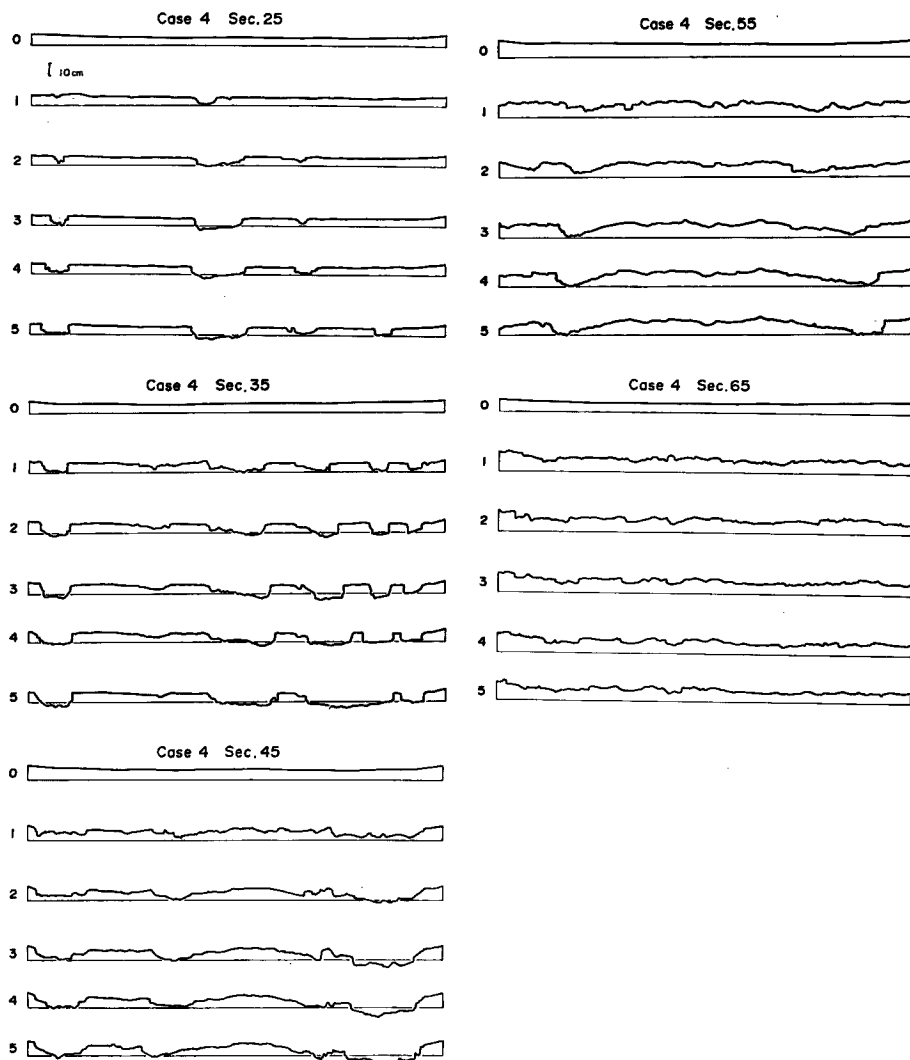


Fig. 9 Configuration of slope.

このような複雑な変化を、どのように定量表現すれば、斜面上に働いた力との関係で的確に把握できるかが問題であるが、ここではつぎのような二三の簡単な処理を試みた。その結果を Fig. 10, 11 に示す。図中の記号はそれぞれつぎのとおりである。 $\bar{AZ}$; 測線上の平均侵食深, $\bar{AZ}_g$; ガリ (初期の高さより 2 cm 以上侵食された部分) の中での平均侵食深, $\Delta Z_{\max}$; 測線上での最大侵食深, ΣB_g ; 上の定義によるガリの測線上の総幅, σ_1, σ_{50} ; それぞれ断面平均高および 50 cm の移動平均高からの標準偏差。ここで 50 cm の移動平均をとったのは、流路幅は 50 cm を越えるものがないので、そのような小さなスケールの変動を調べるためである。

これらの数値のみで、外力との関係づけが十分行なえるとは考えられないが、これらの数値によって斜面侵食の特性を若干検討してみよう。

1° 平均侵食深の縦断的变化は、上部の方が流れの存在する時間が短かく、その量も少ないこと、さらに

下端の境界条件で流路床高がおさえられていることにより、その中間点で最大侵食深を持った曲線となる。また、下端から流れに対して平衡な勾配を形づくっていくはずであるから、その最大侵食深の位置は時間とともに上昇していくことが考えられるけれども、CASE 3 の最終状態のように、先行する降雨よりもかなり長時間の降雨が連続したばあい、その最大侵食深の位置の移動の傾向は明確にあらわれているが、その他の場合については明確でない。なお、勾配のゆるい CASE 3, 4 においては下流端部に一時的な堆積を示しているが、これは下流端をおさえたブロック天端に水平面を有していることによる影響であって、二度目の降雨からはこの部分でも侵食の方が卓越している。

2° 1°に述べたことは、流路についてみるとより明確にあらわれるであろうと考えられる。しかし、このばあいも CASE 3 については明確にあらわれるが、その他については明らかでない。

3° ガリの断面の拡大の様相は、いわゆる縦侵食と横侵食の大きさによって異なる。その変化の様子は、斜面の起伏の標準偏差の時間的変化によってある程度知ることができよう。斜面上のガリ侵食について、その底部ではますます侵食が進行し、頂部となったところはいつまでも侵食されずに残るとすれば、斜面高さにみられる偏差は一方的に増大することになる。しかし、Fig. 11 に見られるように、一般に、標準偏差はある値にまで増大すればむしろ減少をはじめることを示している。もっとも、RUN 3-5 において、上部の方では未だ一方的に増大していく傾向も見られるが、中下部においてはもはやあまり増大しなくなっている。これは縦侵食がある程度進めば、侵食は主として横方向のそれに比重が移されることを示しているように思われる。このことは、たとえば CASE 5 SEC. 35 のように最大侵食深の増大が停止したときにも、ガリの幅が着実に増大していることによって示されている。しかし、このことはすべてに妥当なことではなく、

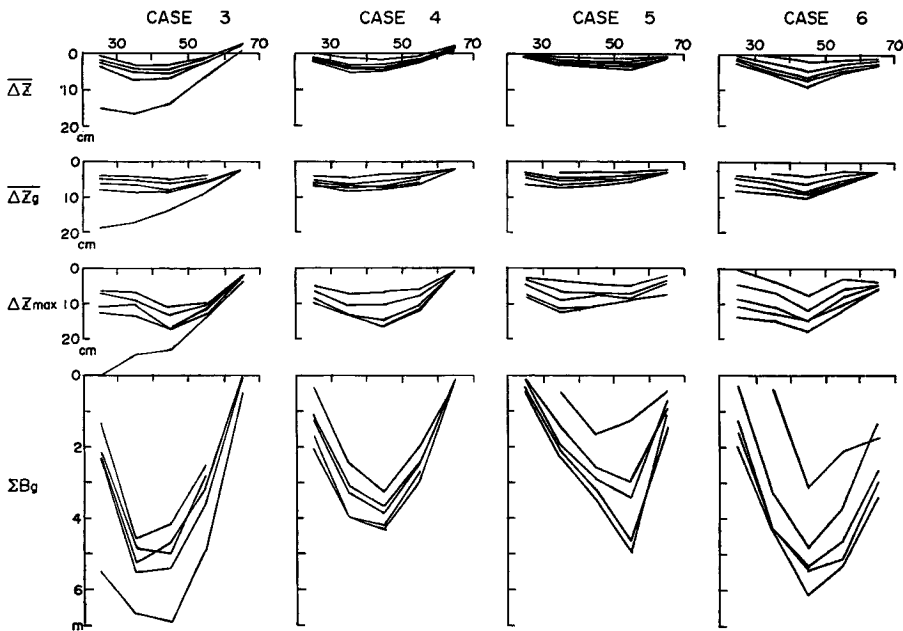


Fig. 10 Variation of some values about slope configuration.

ΔZ ; over-all mean of eroded depth

ΔZ_g ; mean of eroded depth along the gullies

ΔZ_{max} ; maximum eroded depth

ΣB_g ; sum of gully width

(where, gully is defined as eroded more than 2 cm from the initial)

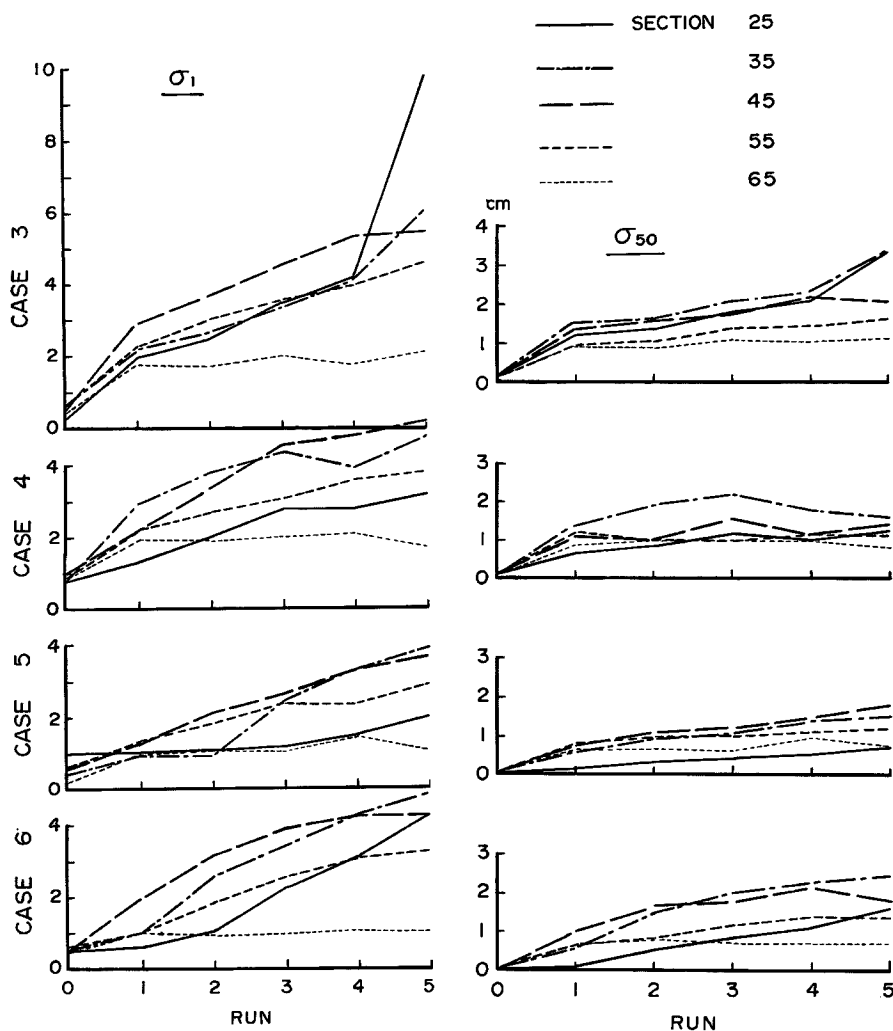


Fig. 11 Variation in deviation of relief.

 σ_1 ; standard deviation around the average height. σ_{50} ; standard deviation around the shifting mean with 50 cm span.

CASE 6 SEC. 35 のように、平均侵食深、ガリの内部での侵食深および最大侵食深のいずれも着実に増大しているにもかかわらず、ガリの幅の増大はすでに停止していることもある。

4° σ の値は、 Δz や ΣB_g と同様ほとんどのばあい、SEC. 35 ないしは SEC 45 において卓越している。

以上、斜面上の起伏の場所的・時間的变化について二三記述したが、いまだ資料も少なく、かつリルの発生からガリへの発達初期の段階については資料が得られていないので、今後はさらに系統的な研究を進めていく必要がある。また、斜面形態の変化をさらに的確に表現しうる指標を明らかにしていくことも必要である。

4.2 斜面上の流れの抵抗則について

前述のとおり、斜面形状の変化は主として流れのもつ掃流力に帰するわけで、それを算出するためには、

急斜面上での流れの抵抗則が必要であるが、従来それに関する資料は少なく、その解明が要望されている。そこで、この問題に関して、実験結果をもとに若干考察しよう。

斜面上の水理量の測定結果から算出した抵抗係数と Reynolds 数の関係は Fig. 12-I である。このような Reynolds 数の範囲にある流れに対する抵抗係数としては、きわめて大きな値と考えられる。そこで、本実験と Table 1 に示した従来の実験条件を比較すると、いくつかの相違点が指摘される。すなわち、本実験の特徴は、第 1 に降雨が存在すること、第 2 に浸透流が存在すること、第 3 に流路表面をおおう砂粒子の粒径がかなり大きいこと、第 4 に土砂粒子が活発に動いていること、そして第 5 に流路勾配が大きいことである。Fig. 12-I に示した測定値は非常にバラツキが多いが、これが測定精度に起因したものか、それとも上にあげた種々の要因にもとづく系統的なものであるかは、今のところ明らかでない。しかし少なくとも、降雨中の測定値と降雨停止後のそれとの間には、かなり明確な差違がみとめられる。その原因として、降雨停止後には流れに対する雨滴のもつ直接的な影響がなくなること、停止後流量の急減、浸透流の減少とともに、流砂は堆積をはじめ流路面の砂粒径も小さくなることがあげられる。

そこで、これらの点をさらに詳細に検討するために、つぎのような水路実験を行なった。水路は幅 7 cm, 長さ 2 m で、底面には斜面の流路床から採取した砂粒子（その粒度構成は Fig. 2-II-B に示してある）をニスづけした。水深および勾配は、斜面における流れの条件を含むように設定し、降雨強度を変化させるごとに水深と流量とを測定した。その結果は Fig. 12-II のとおり、斜面実験の場合とほぼ同じような抵抗係数を示すが、降雨の有無による影響はほとんどない。従来の研究においても、Reynolds 数が 2000 以上では降雨による影響はほとんどないことが指摘されているが^{16,17)}、この実験によって、急勾配で粗度のさらに大きいばあいには、Reynolds 数をもっと小さい範囲においても降雨による影響のないことが知られた。

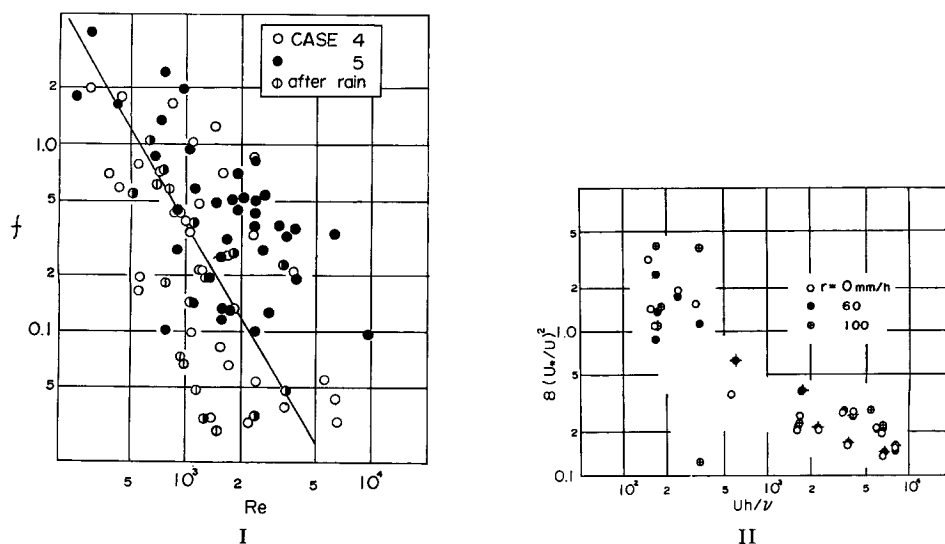


Fig. 12 Relation between Reynolds' number of flow and resistance coefficient.

I; over slope (a line is used for the following calculation)

II; in channel

これらのことから、つぎのように表現できよう。すなわち、層流抵抗則に支配されている流れにおいては降雨は抵抗係数を増大させるが、すでに層流抵抗則から離れた乱れた流れにおいては降雨が抵抗係数に及ぼす影響は少ない。

ところで、このような急勾配粗面上においては、降雨がなくても層流抵抗則が成り立たないことはすでに

知られているところであり、相対粗度をパラメーターに選んで、実際の抵抗係数を層流のそれと比較することが行われてきた。^{18,14,15)} しかし、急勾配粗面上の流れが、Reynolds 数の比較的小さい範囲においてもすでに乱流状態にあると考えられるから、相対粗度を主要な変数として、これと抵抗係数との関係を直接表示した方が適当であろう。そこで、Fig. 12-II をそのように表示しなおしたのが Fig. 13-I である。これによると、相対水深が小さくなると抵抗係数が急激に増大することがわかる。この実験は、勾配の変域が狭く、この関係が一般性をもつかどうかについては、今後の検討を必要とする。(このことは、文献 20 にも考察されている。)

斜面上において、降雨停止の前後に流れの抵抗係数に大きな差違があらわれることについて以下考察しよう。

降雨停止直後は、流量の減少に伴って水深が急減するにもかかわらず、流速の実測値は降雨停止前後で大した変化を示さない。もしも粗度が一定とすれば、上に述べた相対水深と抵抗係数の関係から、流速はもっと減少してよいはずである。したがってここで考えられるのは、降雨停止前後における粗度の変化である。すなわち、降雨中では土砂の移動が盛んで、ほとんどの粒子が動いているために、流路表面の粗度はそのうちのかなり大きな粒子によって支配されようが、降雨停止後には、流れの掃流力の減少にともない粗い粒子から順次多動を止め、流路表面ほど細かい粒子が堆積するために、その粗度はかなり減少しよう。たとえば、Fig. 2-II-B は流路床の平均的な粒度分布であり、C は降雨停止後にも永く流れが存在した流路床の表面堆積物のそれであるが、両者の中央粒径の比は 6 を越えており、降雨停止によって流路床面の粒径が非常に小さくなっていることがわかる。降雨中には B よりもさらに粗度が大きくなっていることも考えられるが、明確な河床波も識別できなかったで、いちおう B の平均粒径をもってその粗度を代表させ、降雨停止後のそれを C の平均粒径に代表させて、相対水深と抵抗係数の関係を図示すると、おそらく粗度の選び方に起因すると思われる多少右への偏りはあるが、Fig. 12-I にみられた降雨の有無による大きな差違はなくなり、一つの傾向を示す範囲にすべて包括されてしまうことがわかる。

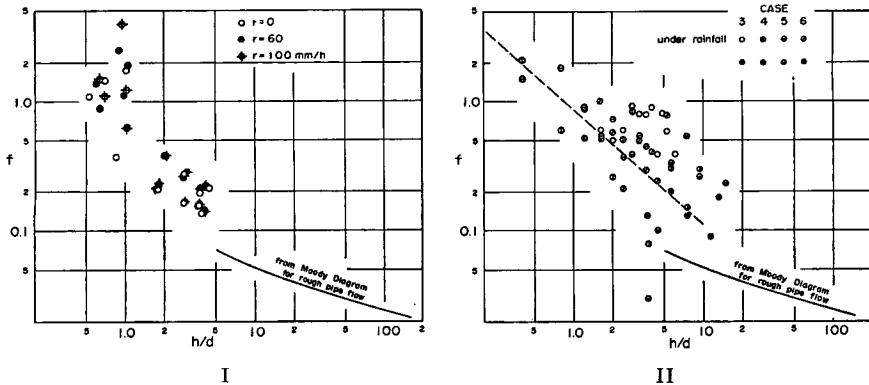


Fig. 13 Relation between relative flow depth h/d and resistance coefficient
I; in channel
II; over slope (a line is used for the following calculation)

4.3 流砂量の算定

斜面侵食量を水理学的に算定するためには、斜面上の掃流力を求めて、これを掃流砂量式に適用しなければならない。斜面上の掃流力の算定に必要な事項についてはすでに述べてきたので、ここでは掃流砂量式について検討しよう。

従来、掃流砂量式は数多く提案されているが、本論で問題にしているような急勾配の薄い流れについて求

められているものはないので、まず従来の掃流砂量の適用性について検討しなければならない。

地形の測定結果より算定した断面通過土砂量を Fig. 14 に示しているが、SECTION 55 におけるそれは、斜面末端部において採取したものとはほぼ等しい。そこで、ここでは SEC. 55 における流砂量をつぎのような方法で算定し、下流端における流出土砂量の実測値と比較することにする。

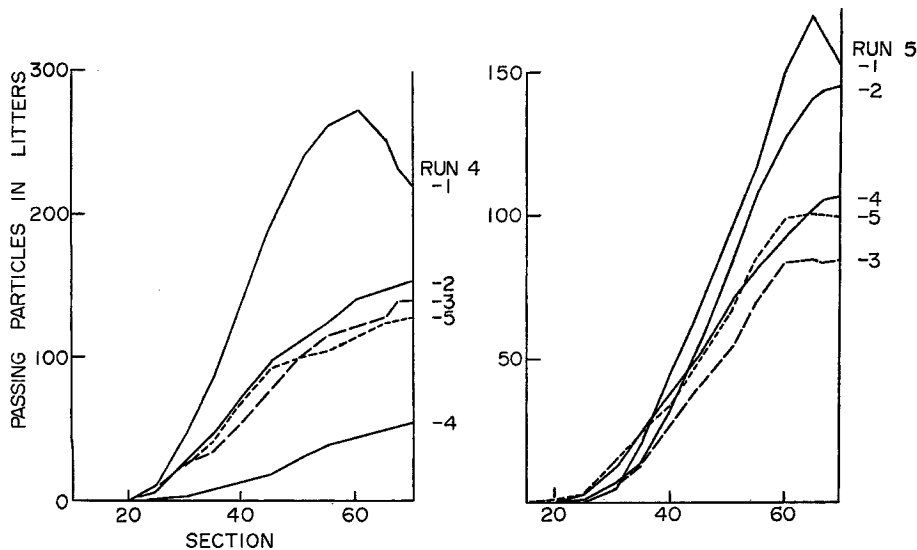


Fig. 14 Downwards change in sediment discharge. (calculated from sectional profile)

1° SECTION 55 における表面流量は、下流端流量から地下水流量およびこの区間における降雨量を差し引いて求めるが、地下水流量は、

$kBDI$ で与える。ここに k は砂層の透水係数、 B および D はそれぞれ断面の幅および平均砂層厚、 I は斜面平均勾配（平均侵食深を考慮に入れた）である。

2° 流路は、検査断面内における実測流路幅 (4.1 において b で表示したもの) の合計幅を有する広長方形断面であると考ええる。

3° 抵抗係数は相対水深の関数であるとし、Fig. 13-II の中に直線で示される関係を用いて、水深および掃流力を計算する。

4° 砂粒子の限界掃流力ないし限界マサツ速度は、相対粗度の関数とし Fig. 15²⁰⁾ から決定する。図中 S_{sc} は急斜面に対して修正した Shields のパラメーターであって、つぎの式であらわされる。

$$S_{sc} = \frac{u_{*c}^2}{(s-1)gd} \times \frac{1}{\tan \phi \cdot \cos \theta - \frac{s}{s-1} \cdot \sin \theta}$$

ここに ϕ ; 砂粒子の最大静止マサツ角 ($\tan \phi = 1$ とした。)

θ ; 流路勾配

$S = \sigma/\rho$; 砂粒子の比重

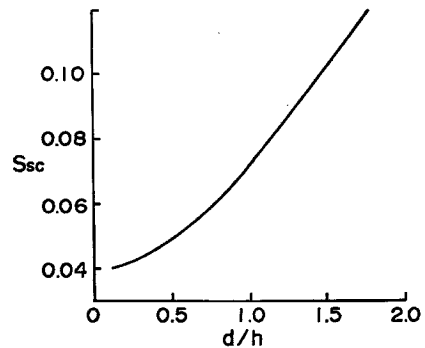


Fig. 15 A diagram for calculation of critical tractive force on particles within shallow flow over inclined slope.

(by Ashida et. al.)

S_{sc} ; modified Shields' parameter

d/h ; relative particle size

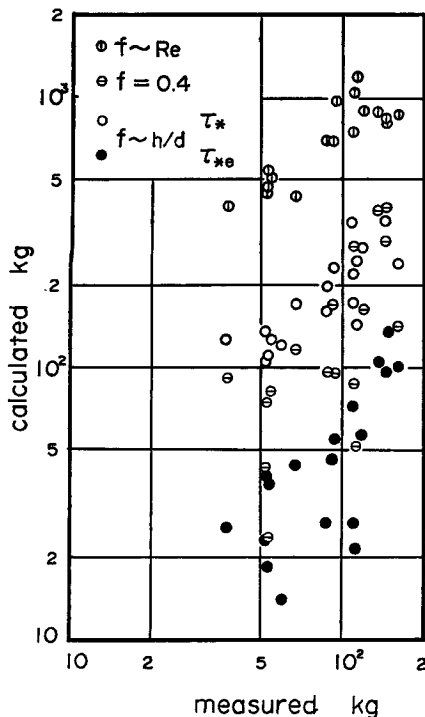


Fig. 16 Comparison of sediment discharge measured and calculated.

g ; 重力の加速度

d ; 砂粒子の粒径 (Fig. 2-II-A の平均粒径とした。)

5° 流砂量式としては、従来の実験値とよく一致し、かなりの普遍性を有すると考えられる芦田・道上のつぎの式²⁸⁾を用いる。混合効果は考えに入れない。

$$q_B/\sqrt{s g d^3} = 17\tau_{*c}^{3/2}(1-\tau_{*c}/\tau_*)(1-u_{*c}/u_*)$$

ここに、 q_B ; 単位幅単位時間あたりの流砂量

τ_{*c} , τ_{*c} , τ_* ; それぞれ有効掃流力, 限界掃流力, 掃流力の無次元量 ($=u_*^2/sgd$)

Fig. 16 は、CASE 4 ならびに 5 について、斜面を左右両端からそれぞれ 2m の区間および中央の 3m の区間に分割し、 $\tau_{*c}=\tau_*$ として計算した値と実測値を比較したものである (○印)。これによると、計算値が実測値を若干うわまわっているが、これは相対水深の小さい流れにおいて抵抗係数が増大していることによると考えられる。そこで、この抵抗係数を用いて算定された平均流速を使って、次式²⁸⁾により計算される有効掃流力 u_{*c} を

$$\frac{u}{u_{*c}} = 6.0 + 5.75 \log \frac{h}{d(1+2\tau_*)}$$

ここに、 u は平均流速、 h は水深

用いて掃流砂量を計算した結果 (●印) は、実測値よりも若干下まわった。

以上の計算には不確定な推定量を多く含んでおり、また非常に不規則な状態にある流れにおけるそれであることを考えれば、計算値は実測値と比較的よく適合しているとみることができる。しかし、急勾配の薄層流に対する抵抗係数の問題、ならびにそれと関連を持っている有効掃流力の算定法については、さらに検討する必要がある。

なお、図中○印は、抵抗係数が Reynolds 数に対して Fig. 12-I の直線に示される関係をもっていると考へての算定であり、◐印は $f=0.4$ で固定したときのそれである。

5. む す び

以上、著者らは人工降雨を用いて表流水による砂斜面の侵食に関する実験的研究を行ない、表流水とガリの空間的分布ならびにそれらの時間的変遷を詳細に検討して、その特性を明らかにした。さらに、このような表流水にもとづく掃流力を用いて斜面からの流出土砂量を算定することを試み、その際必要となる、水深の小さい急勾配流れにおける抵抗係数を明らかにする一方、こうしたばあいの掃流砂量について検討を加え、従来の掃流砂量式が適用できることを示した。

斜面形態は、土砂侵食強度の空間的分布の写像であり、また逆に、侵食を進める外力である掃流力の空間的分布は斜面形態の写像でもある。この両者の間に存する関係を適確に記述することこそ本研究の最終目的である。この目的からすると、本論の成果はその一端を示したものにすぎず、条件の異なる斜面とくに現地斜面をも説明しうる普遍的な関係を求めるまでには、さらに遠い道程を進まなければならない。著者らは、これからも本論に示した考えの道筋に沿って一步一步進めていくとともに、こうした現象を取り扱っていくうえでさらに有効な手法を模索していきたいと考えている。

最後に、この労の多い実験の手伝いと資料整理にあたってくれた堀口正美、南波芳樹、吉田義則の諸氏に

謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Neal, J. H.: The effect of degree of slope and rainfall characteristics on runoff and soil erosion, Agr. Eng., Vol. 19, 1938. pp. 213-217.
- 2) Zingg, A. W.: Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff, Agr. Eng., Vol. 21, 1940, pp. 59-64.
- 3) Ellison, W. D.: Soil erosion studies-part 1, Agr. Eng., Vol. 28, 1947.
- 4) Wischmeier, W. H.: Soil erosion in the Detroit metropolitan area, Soi. Sci. Soc. Amer., 1959, pp. 246- .
- 5) Guy, H. P. and G. E. Ferguson: Sediment in small reservoirs due to urbanization, Proc. A.S.C.E., HY-2, 1962.
- 6) Dawdy, D. R.: Knowledge of sedimentation in urban environment, Proc. A.S.C.E., HY-6, 1967.
- 7) Fischer, J. L.: An expanding future for soil conservation, Jour. Soi. Wat. Cons., 1970.
- 8) Rowlison, D. L. and G. L. Martin: Rational model describing slope erosion, Proc. A.S.C.E., IR-1, 1971, pp. 39-50.
- 9) Horton, R. E.: Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration capacity, Trans. A.G.U., 20th Annu. Meet. 1939, pp. 693-711.
- 10) たとえば, 岩垣雄一・土屋義人: 水滴による地面浸食に関する二, 三の実験; 土木学会論文集, 第35号, 1956.
Palmer, R. S.: Water drop impact forces, Trans. A.S.A.E., 1965.
- 11) たとえば, Ekern, P. C.: Rainfall impact as the force initiating soil erosion, Proc. S.S.S.A., 1951.
Mazrak, A.P. and P.N. Mosher: Detachment of soil particles in simulated rainfall, Proc. S.S.S.A., Vol. 32, 1968, pp. 716- .
- 12) たとえば, 田中 茂: 急斜面土壌侵食の機構について; 土木学会誌, 33-4, 1948, pp. 4-10.
岩垣雄一・土屋義人: 雨水流による土砂の剥離と輸送について; 土木学会論文集, 第51号, 1957.
Partheniades, E.: Erosion and deposition of cohesive soils, Proc. A.S.C.E., HY-7, 1965.
- 13) 岩垣雄一: 雨水流による地面浸食侵食機構に関する基礎的研究, 学位論文, 1955.
- 14) 土屋義人: 地面浸食に関する二, 三の水理学的考察, 土論, 第59号, 1958.
- 15) Woo, D.C. and E. F. Brater: Spatially varied flow from controlled rainfall, Proc. A.S.C.E., HY-6, 1962.
- 16) Yoon, Y. N. and H. G. Wenzel: Mechanics of sheet flow under simulated rainfall, Proc. A.S.C.E., HY-9, 1971.
- 17) Yen, B. C., H. G. Wenzel and Y. N. Yoon: Resistance coefficients for steady spatially varied flow, Proc. A.S.C.E., HY-8, 1972.
- 18) 石原藤次郎・岩垣雄一・岩佐義朗: 急斜面上の層流における転波列の理論; 土論, 第19号, 1954.
- 19) 芦田和男・奥村武信・田中健二: 人工降雨による砂斜面の侵食について; 土木学会第27回年次講演会講演概要集, 1972.
- 20) 芦田和男・大同淳之・高橋 保・水山高久: 急勾配流れの限界掃流力に関する研究, 第17回水理講演会講演集, 1973.
- 21) 霜島重雄: 法面侵食に関する実験的研究, 新砂防63号, 1966.
- 22) Meyer, L. D. and E. J. Monke: Mechanics of soil erosion by rainfall and overland flow, Trans. A.S. A.E., 1965.
- 23) 金子 良・五十嵐正次・上林春美: 火山山麓における侵食の研究, 農業土木試験場報告第1号, 1963.
- 24) 奥田節夫・柏谷健二・横山康二: ガリーの発達に関する計測と考察, 日本地理学会(1972年秋) 予稿

集, 1972.

- 25) 河村三郎・横山 武: 雨水流による土砂流出の研究——ガリ浸食について——, 土木学会中部支部研究発表会概要集, 1973.
- 26) 田中 茂: 急斜面の土壌侵食の実験的研究, 第 1 報～第 3 報, 土論, 第 6 号, 1951.
- 27) 寺島治男: ガリ侵食機構に関する実験的研究, 新砂防第 61 号, 1966.
- 28) 芦田和男・道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土論, No. 206, 1972.