

降雨による流路網の発達過程に関する研究

澤 井 健 二

A STUDY ON THE STREAM NETWORK EVOLUTION UNDER PRECIPITATION

By *Kenji* SAWAI

Synopsis

On a bare slope, complicated stream network consisting of rills and gullies is often formed. In order to estimate the sediment run-off from a bare slope hydraulically, it is important to know the degree of concentration of surface water.

In this study some experiments were carried out using cohesive material and artificial rainfall. On the other hand, a stochastic simulation model is developed in which the confluence process of streams based on their lateral movement is noticed.

The most important difference of this process from that due to water supply at the upper end of the slope is that the inferior stream does not disappear at the joint but survives gathering the precipitation from the downstream catchment area.

1. 緒 言

裸地斜面など、面的な広がりをもった場における土砂流出や出水特性を水理学的に解明するには、流路の配列状況を把握することが必要である。

流路の形成過程には、谷頭侵食に見られるように、中間流もしくは地下水流が表面流となって地表に現れる点か、上流方向へ後退していく過程と、既に表面流となったものが流れに直角方向の底面凹凸の発達によって分裂する過程、ならびに破堤や溢水に伴う水流が微地形に応じて流下する過程がある。一方、流路の消滅過程には、浸透による表面流の消滅と、分合流に伴う派川の涸渇とがある。このような流路の形成・消滅ならびに変動過程に伴って、地表面には複雑な流路網が形成されるのである。

著者ら¹⁾は以前、人工降雨を用いた斜面侵食実験を行い、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たが、そこに見られた流路網の形成過程は、現実の崩壊地や切盛土面に見られるものとはかなり異なっていた。これにはいくつかの原因が考えられるが、その最も主要なものは、土質にあるものと考えられる。すなわち、実験においては、斜面材料に主として砂を用いたが、山腹斜面や人工法面など、流出土砂の生産源となるところの表土には、通常いくらかの粘土分が含まれており、たとえその含有量がわずかであっても、侵食現象に重大な影響を及ぼしているのである。

そこで、斜面材料にベントナイトを混入した侵食実験²⁾を行ったところ、降雨でなく斜面上流端からの給水であるにもかかわらず、実際の斜面におけるものにかかなり似た流路網の形成が見られた。その過程はきわめて不規則なものであり、決定論的に論じることはむずかしいが、個々の流路の変動機構に立脚した確率的シミュレーションによってかなり模擬できることがわかっている。

しかしながら、降雨条件下での流路網の形成過程は、斜面全域に給水がなされる点で、上端給水によるものとは異なっており、上記の実験から得られた結果やシミュレーションモデルがそのまま適用されるとは考えられない。本研究は、新たに、粘性性材料から成る斜面における降雨条件下での流路網の形成過程に関す

Table 1. Experimental conditions.

Exp. No.	Inclination i	Inflow $q_0(\text{cm}^2/\text{s})$	Precipitation $r(\text{mm}/\text{hr})$	Duration $T(\text{min})$
I	1/5	1.0	0	600
II	1/5	0	120	600
III	2/3	0	120	280

る実験を行い、その特性を把握するとともに、以前のシミュレーションモデルを拡張して、より一般的な予測法の確立を試みたものである。

2. 降雨による流路網の形成過程に関する実験

2.1 実験方法

実験に用いた斜面は、以前のもの²⁾と同じく、直径約1mmの砂とベントナイトと水を重量比9:1:3に練り混ぜたものを、幅1m、長さ3m、深さ10cmの上槽に8cmの厚さで敷き均らしたもので、宇治川水理実験所河川災害総合基礎実験施設の人工降雨装置によって、一定強度の霧状の雨を斜面全体にはほぼ一様に降らせ、sheet erosion から rill erosion への移行が生じる過程、さらには形成された流路が複雑な流路網を形成していく過程を詳細に観察するとともに、流路網の構造や流出土砂量の時間的変化を計測した。

新しい実験ケースは2通りであるが、以前の上端給水のものも含めて、その実験条件を **Table 1** に示している。すなわち、Exp. I は勾配を 1/5 (約11°) に設定して上流から $1\text{cm}^2/\text{s}$ の薄層流を供給したもので、Exp. II は同じ勾配で $120\text{mm}/\text{hr}$ の一樣降雨を降らせたもの、Exp. III は同じ降雨条件で勾配を 2/3 (約34°) に増加させたものである。Exp. I ~ III における下流端流量はいずれも約 $100\text{cm}^3/\text{s}$ であるが、Exp. III は、斜面の水平投影面積が小さくなっている分だけ流量が少なくなっている。なお、Exp. II, III では、斜面上端に設けられた整流槽の水が溢流しないよう、底部に小孔を設けて排水している。

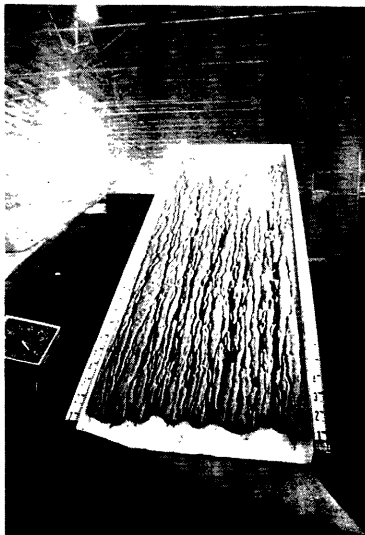


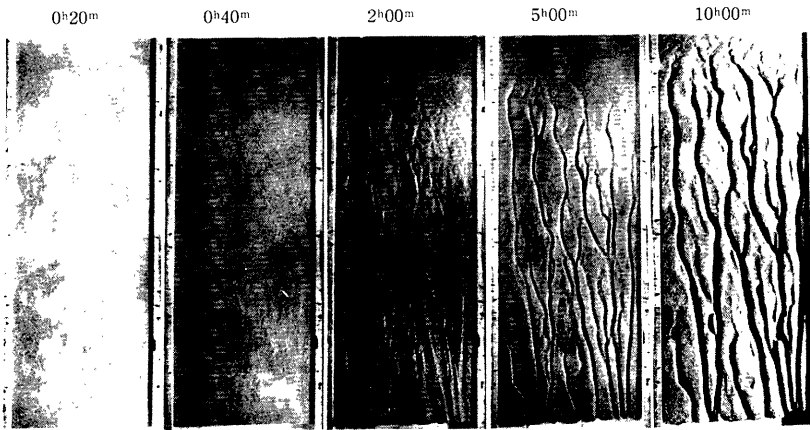
Photo. 1. General view of experiment (EXP. III, $T=4^{\text{h}}15^{\text{m}}$).

また、本実験に用いた材料は、その粘着力によって自立するので、下流端には特に土留めは設けず、下流端から10cmのところ斜面に垂直にカットして、自由端としている。

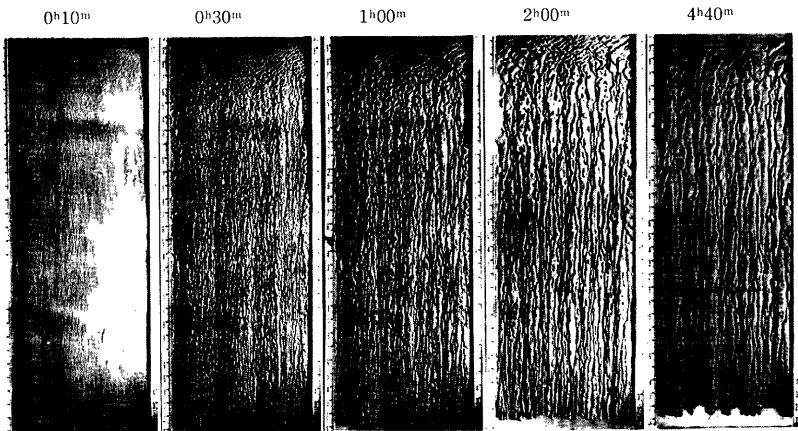
Photo. 1 は、実験の状況を示したものである。

流路網の平面的な特性量の計測は、主として写真計測によって行い、斜面の上方約5mの位置から撮影した35mmフィルムを拡大トレースして、流路本数や流路幅あるいは各点における集水面積を読み取った。斜面下流端からの流出土砂は、流出水とともに樋で集め、数秒間採取して全量を秤量した後、一口乾燥させて秤量し、その後粘土分を洗い流して再び乾燥秤量して、砂・粘土・水のそれぞれの単位時間当り流出量を求めた。斜面形状や侵食深は、ポイントゲージを用いて適宜測定しているが、系統的なデータを得るには至っていない。水深や流速については、雨中であることもあってきわめて計測が難しく、十分な精度のデータを得ることはできなかった。

また、Exp. I および III では8mmカメラによるメモモーション撮影(2秒1コマ)、Exp. II ではビデオカメラを用いた



(a) EXP. II



(b) EXP. III

Photo. 2. Channel network.

連続撮影も行っている。

なお、説明の便宜上、斜面上流端から斜面に沿って下流方向に x 軸、斜面水路右岸側壁から左岸方向に y 軸、初期表面位置から斜面に垂直下方に z 軸を定めている。

2.2 実験結果

Photo. 2 は、Exp. II および III における流路網の発達状況を示したものである。いずれの実験ケースにおいても、降雨開始後まもなく斜面全体が sheet flow で覆われ、ごく短い時間（数十秒以内）で流出水量はほぼ定常となる。しかしながら、この段階では斜面材料のうち粘土分だけが侵食され、砂粒の移動はまだ見られない。数分後には斜面上のあちこちで砂粒の移動が始まると同時に、横断方向にはほぼ等間隔（Exp. II では約 2cm, Exp. III では約 1.5cm）で高さ 1mm 程度の縦筋が見られるようになる。

この縦筋が発達すると、周辺に比べて相対的に流速や水深の大きい部分と小さい部分とがかなり明瞭に識別できるようになる(Photo. 2における、それぞれの実験ケースの最初の写真)。降雨条件下のため、この段階でも斜面全域に表面流があることには変わりがないが、流水の集中している部分を流路と呼び、他の部分と区別する。局所的には堆積も見られるが、さほど顕著なものではない。この段階での個々の流路の形状は、Exp. IIとIIIで非常に異なり、水深がさほど違わない(両者とも2~3mm程度)にもかかわらず、Exp. IIでは幅が約8cmあるのに対し、Exp. IIIでは約1cmと狭くなっている。

1時間~2時間後には、流路網の骨格はほぼでき上がり、その後の流路内での侵食はますます激しさを加えるが、流路網自体の変化は緩かになる。また、この段階になると、Exp. IIの前段階で見られた扁平な流路はなくなり、幅・水深比の小さな(約5程度)ものに変形している。

さらに時間が経過すると、各流路内の縦断方向の凹凸が顕著に見られるようになるとともに、流路の低下と蛇行とが合わさって、流路壁面のオーバーハングが随所に見られるようになる。また、流路が深く侵食されるにしたがって、流路以外のところでの砂の移動は減少する。しかしながら、谷頭部では、流路とそうでないところとの区別が明確でなく、流路以外とみなしたところでも侵食が継続している。

Fig. 1は、Exp. IIおよびIIIにおける流路本数の場所的・時間的变化を示したもので、Exp. IIでは流下方向にやや減少、Exp. IIIでは流下方向にやや増加の傾向にあるが、両ケースとも場所的な変化よりは時間的な変化の方が卓越しており、時間の経過に伴って流路本数が減少している。もっとも、流路本数の数え方には、特に侵食の初期段階においてあいまいさが避けられず、さほど厳密なものではない。図中の折線は、後に述べるシミュレーションの結果である。

Fig. 2は、斜面下端での流出土砂量の時間変化を砂分と粘土分とに分けて示したものである。Exp. IIでは、降雨開始直後には流出土砂が少なく、その後急激な増加と減少を示した後、ほぼ一定値のまわりを変動しているのに対し、Exp. IIIでは、全体的にExp. IIよりも大きな流出土砂量を示しているものの、長時間にわたって漸減の傾向にあるのが特徴的である。斜面材料の砂分と粘土分の比が9:1であるのに対し、流出土中に占める粘土分の割合はそれよりも大きく、特にExp. IIの初期において砂分を上回っているのが注目される。なお、図中の折線は後述のシミュレーション結果を示している。

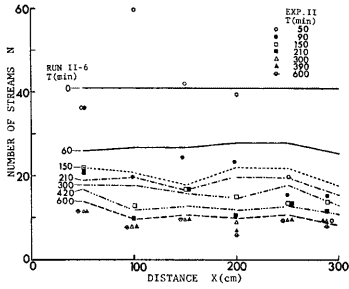
Fig. 3は、斜面全幅のうちで流路部分の占める割合(これを流路幅密度とよぶことにする)の場所的・時間的变化を示したものである。Exp. II、IIIとも、流路幅密度の流下方向変化はさほど顕著でなく、初期に一旦増加して最大値を示した後、時間とともに減少して、ある値の付近に落ち着く傾向が見られる。その値は、Exp. IIでは約15%、Exp. IIIでは約25%であるが、Exp. IIでは流路幅を水面幅として実験中に実測したのに対し、Exp. IIIでは写真から溝幅(側壁間の距離)を読み取っているため、Exp. IIIの水面幅はもう少し狭いものと思われる。

Fig. 4は、Exp. IIにおける、流路部分の侵食速度(低下速度)と流路以外の部分の侵食速度の場所的・時間的变化を示したもので、流路部分の侵食速度が時間的に一旦減少するものの、その後むしろ増加傾向にあるのに対し、流路以外の部分の侵食速度は、比較的初期の段階でも流路部分の侵食速度の数十分の一程度であるのが、時間の経過とともにますます減少して、百分の一以下となっている。一方、侵食速度は流下方向にいくにしたがって大きくなっているが、下流端では土塊の崩落の影響も加わっているため、流路床勾配の曲率を論じるには至らない。

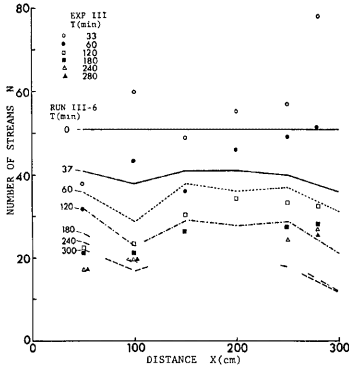
Fig. 5は、Exp. IIIの終了時における、下流端付近での各流路の流量の分布を、写真に基づく流域分割から推定したもので、大きなもので約10cm³/s程度、半数以上は1cm³/s以下となっている。

2.3 考 察

本実験に用いた人工降雨は霧状のもので、雨滴自体としてはほとんど侵食力を有しない。また、斜面材料にベントナイトが入っているため、粘着抵抗を示すとともに、透水性が小さく、パイピングその他のすべり破壊も生じにくくなっている。したがって、侵食が生じるためには表面流の掃流力が限界値を上回らねばならない。斜面材料のうち、砂分の限界摩擦速度が約2.4cm/sであるのに対して、粘土分のそれは約1cm/s³⁾

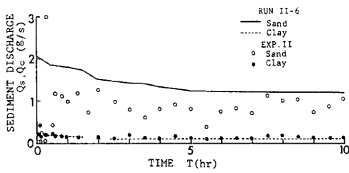


(a) EXP II

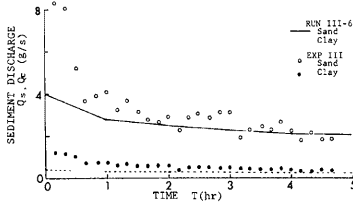


(b) EXP III

Fig. 1. Number of streams.

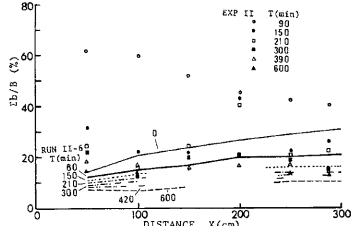


(a) EXP II

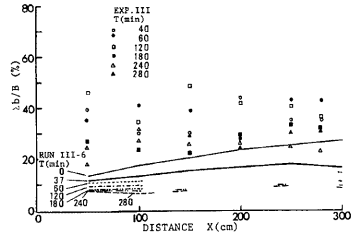


(b) EXP III

Fig. 2. Sediment discharge.

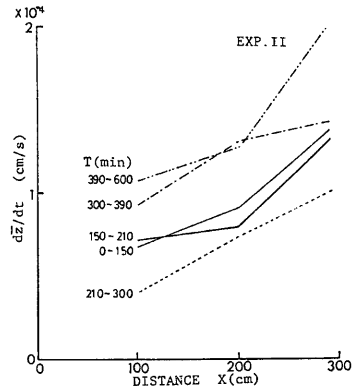


(a) EXP II

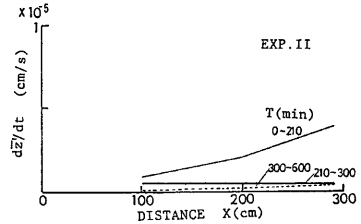


(b) EXP III

Fig. 3. Channel width density.



(a) Channel part



(b) Non-channel part

Fig. 4. Bed degradation.

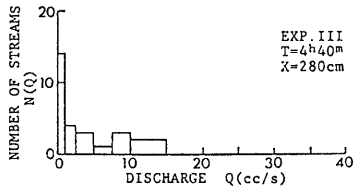


Fig. 5. Distribution of discharge (EXP. III).

Table 2. Conditions for initiation of erosion.

	u_* (cm/s)	x (cm)	
		Exp. II	Exp. III
Clay	1.0	6.1	2.2
Sand	2.4	74.6	30.7

であり、両者の中間の掃流力では表層の粘土分だけが侵食されて砂粒によるアーモークコートが形成されることになる。事実、実験の比較的初期の段階では、そのような現象が上流端付近に見られ、また、流路網が発達して集水域が細分されるに伴って、下流の方でも流路以外のところにそのような現象が多く見られた。

先に触れた、Exp. II の初期において砂分の流出割合が小さいのは、粘土分と砂分の流下速度の違いにもよるが、主として、砂れきが移動を始めるためにはまず周囲の粘土が剥離せねばならないことによるのである。

今、単位幅流量を q 、勾配を I 、抵抗係数を f とすれば、摩擦速度 u_* は、

$$u_* = (q \cdot g \cdot I / f \cdot 8)^{1/3} \tag{1}$$

と表される。流路が形成される以前は、単位幅流量は

$$q = r \cdot x \cos(\tan^{-1} I) \equiv q_0 \tag{2}$$

となるので、上式を連立させることによって流下距離と摩擦速度の関係を求めることができる。ここに、 r は有効降雨強度であるが、本実験では浸透がほとんどないため、降雨強度のものにはほぼ等しい。また、斜面侵食にかかわる流れは水深が小さく、対数則などの通常の開水路流の抵抗則が適用できないので、ここでは従来の実験結果¹⁾に基づいて、 $f=0.5$ とおくことにする。その結果、それぞれの実験条件に対して **Table 2** のような対応が得られ、粘土の侵食は斜面のほとんど全域で生じるが、砂粒の移動は斜面長がある程度以上にならないと生じないことが理解される。この限界距離は、実験で得られた谷頭までの距離に比べてやや大きい、流路の発生限界をかなりよく近似していると言えよう。

粘性流路では、幅・水深比の大きな流れは不安定で、容易に分裂することがわかっており⁴⁾、その分裂条件は、等流状態のもとでは

$$b/h \geq 10 \tag{3}$$

と表されている。ここに、 b は流路幅、 h は水深である。本実験では流下方向に流量が増加するため、明らかに等流状態ではないが、類似の関係が成り立つものとすれば、多数の流路の形成されることが理解できる。一方、分裂の生じる最小流路間隔 L は、

$$L/h \approx 5 \tag{4}$$

と表されているが、本実験で得られた流路間隔はそれよりもかなり広く、単純には予測できないようである。

個々の流路の形状は、既に述べたように、比較的初期の段階では扁平なものも見られるが、侵食の進行に伴って幅・水深比が約 5 程度のほぼ相似な断面形状を有するようになっていく。これは侵食速度が摩擦速度に比例する材料を対象とした、理論的平衡断面（幅・水深比が約 4）に近いものである。

Fig. 1 に示した流路本数の場所的变化は、以前に行った上端給水の場合の結果と非常に異なっている。すなわち、上端給水の場合には、流路本数が流下方向に明瞭に減少したのに対し、本実験では若干の変動はあるものの、流下方向にそれほど流路本数が変化しないのである。これは、上端給水の場合には、隣り合う流路が合流すると、どちらか一方に流れが吸収され、他方が涸渇したのに対し、降雨がある場合には、一旦流れが涸渇しても、それよりも下流域に降った雨が再びその流路に集まり、流れを維持するからである。降

雨がある場合とない場合との最大の相違点はここにある。

ところで、Fig. 3 に示した流路幅密度 (文献¹⁾では水みち面積率と呼んでいたもの) がいくらになるかという事は、流出土砂量を予測する上できわめて重要である。この値を σ とするとき、流路部分の単位幅流量は平均的には

$$q = q_0 / \sigma \quad \dots\dots\dots(5)$$

と表され、 f を一定とすれば、平均摩擦速度は式 (1) より

$$u_* = u_{*0} / \sigma^{1/3} \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる。ここに、 q_0 および u_{*0} は、それぞれ流路が形成されない状態での単位幅流量および摩擦速度である。したがって、材料の受食性は

$$E \propto u_*^n \quad \dots\dots\dots(7)$$

と表されるとき、流路部分の平均低下速度は

$$E = E_0 / \sigma^{(n/3)} \quad \dots\dots\dots(8)$$

となり、これに流路幅の合計をかけた総面積侵食速度は

$$E_a = E_{a0} \cdot \sigma^{(1-n/3)} \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる。ここに、 E_{a0} は流路が形成されない状態での E_a の値である。

したがって、 $n > 3$ の場合には σ が減少するにしたがって、すなわち流れが集中するにしたがって侵食量が増大するが、 $n < 3$ の場合にはその逆となる。

粘性土の受食性は現在十分に解明されるに至っていないが、本実験に用いた材料については、限界掃流力をかなり上回る領域では $n \approx 1$ となることがわかっており、流れの集中に伴って流出土砂量の減少することが説明される。

3. 流路網の発達過程に関するシミュレーション

3.1 シミュレーションの方法

流路網の発達過程には、流路の分裂と統合の過程があるが、本シミュレーションで対象とするのは統合過程であり、分裂過程は対象としない。これは、分裂の過程は比較的短時間のうちに完了し、初期状態として分裂の完了した状態をとれば、あとはほとんど統合のみの過程となるからである。流路の統合は、個々の流路の横変動に伴う接触によって生じるが、これはかなり不規則な現象であり、決定論的な手法によって追跡することは困難である。

そこで、ある流下距離 Δx ごとに計算点を設け、与えられた流路配列および流路形状から、流路各点における水量を決定論的な手法によって求めた後、材料の受食性や流路の蛇行特性を加味して、ある時間差分 ΔT 内の流路の横変位 ΔY を確率的に選択し、合流判定を行って流路網を再編するという手順で、流路網のシミュレーションを行うことにした。この手法は既に以前の研究²⁾で、上端給水の場合を対象として考案したものであり、その基本式を要約すると次のようである。

$$Q = b \cdot h \cdot v \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$v / u_* = \sqrt{8} / f \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$u_* = \sqrt{g h I} \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$u_{*e} / u_* = \sqrt{8} / f / \{6.0 + 5.75 \log_{10}(h/d)\} \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$E = f_n(u_{*e}) \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$\Delta Y_{max} = \alpha \cdot \{E / (h/b)\} \cdot \Delta T \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\Delta Y_{dmax} = \beta \cdot b \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$\Delta Z = E \cdot b \cdot \Delta T / (b + | \Delta Y |) \quad \dots\dots\dots(17)$$

ここに、各記号は慣用に従っているが、 ΔY_{max} は ΔT の間に可能な最大横変位、 ΔY_{dmax} は流下区間 ΔX における流路偏倚量の概略の上限値を表しており、 ΔY は、 ΔY_{max} と ΔY_{dmax} の両者によって規定される範囲から、一様乱数に従って選択する。

流量 Q は、上端給水の場合には、流路網をたどって直上流の流路の流量を受け継げばよいが、降雨がある場合には、さらに周辺の集水域からの雨水の流入を加える必要がある。これが、今回のシミュレーションの主要な変更点であり、 ΔX 間の流量の増分は、流路の配列状況に応じて、Fig. 6 の斜線で囲まれた領域の面積に有効降雨強度をかけて求める。ただし、この場合には流量の非常に小さな流路も現れるので、流路本数の算定においては、流路と判定するための限界流量 Q_c を設ける。

なお、式 (13) は底面に作用するせん断力のうち、侵食に寄与するものの割合を、摩擦速度の形で表現したものであるが、水深がきわめて小さい場合には式 (13) は適用せず、 $u_{*e} = 0$ と置き直す。

個々の流路変動の追跡という観点からは、流下方向の計算間隔 ΔX は蛇行の四半波長程度、時間間隔 ΔT は蛇行周期の数分の一以下が適当と考えられるが、隣接する流路の合流判定を行うという観点からは、流路間隔を横侵食速度で除した値が ΔT のひとつの基準となる。 ΔT 内に2本の流路が交差すれば、直下流のレベルが高い方の流路の位置を修正して低い方の流路の位置に一致させ、下流へのつながりを遮断する。

また、流出土砂量は、単位体積の斜面材料に含まれるそれぞれの成分量に斜面全域からの侵食体積をかけて算出する。

3.2 シミュレーションの具体例

(a) 計算条件

次に、Exp. II および III に対応する確率シミュレーションの例を示すが、計算条件としては、斜面幅、斜面長、斜面勾配、降雨強度のほか、材料の侵食特性として、

$$E / u_{*e} = 0.75 \times 10^{-4} \quad \dots\dots\dots(18)$$

を、また個々の流路の横断面形状特性として

$$b/h = 5 \quad \dots\dots\dots(19)$$

を与える。さらに、流れの抵抗については

$$f = 0.5 \quad \dots\dots\dots(20)$$

とおき、流路本数を数える際の限界流量 Q_c は $0.1 \text{ cm}^3/\text{s}$ とする。

初期条件としては、等間隔の平行直線流路を考え、その流路間隔は RUN II (Exp. II に対応) では 2.5 cm 、RUN III (Exp. III に対応) では 2 cm とした。流下方向の計算間隔 ΔX は 5 cm とし、流路の横変動特性を表すパラメータ α, β はいずれも1とおいている。

(b) 計算結果

計算結果のいくつかは、実験結果と対比する形で、Fig. 1~3 に示されている。まず、Fig. 1 に示された

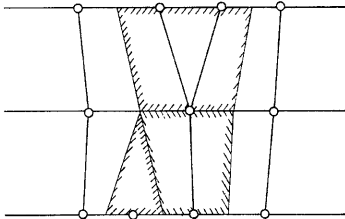


Fig. 6. Division of catchment area.

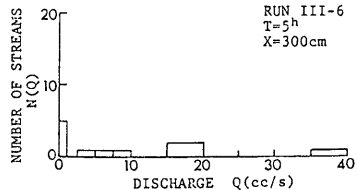


Fig. 7. Distribution of discharge (RUN III).

流路本数に関しては、流下方向への細かい変化に多少のずれがあるものの、場所的な変化よりも時間的な変化の方が卓越するとともに、その変化速度が時間の経過に従って小さくなっていく傾向などはよく模擬できており、数値的にも計算値は実験値にかなり近くなっている。ただし、RUNⅢにおいては、 $Q_c=0.1\text{cm}^3/\text{s}$ とすると流路本数が過少に評価されたので、Fig. 1 (b) では、それよりも流量の少ない流路も合わせて数えられている。

流出土砂量に関しては、Fig. 2 に示されているように、砂分と粘土分の比率や、初期の流出特性にずれが見られるものの、全体的には計算値は実験値によく適合していると言えよう。

これに対して、Fig. 3 に示される流路幅密度に関しては、時間の経過とともにその値が減少するという傾向は実験結果と一致するものの、その絶対値や流下方向への変化特性が実験結果と異なり、十分な模擬ができていたとは言い難い。その原因を探るために、RUNⅢの $T=5\text{hr}$ における斜面下流端での流路規模（流量で代表）を調べると、Fig. 7 のようになっており、先に示した Fig. 5 の結果とかなり異なっている。すなわち、このシミュレーションでは、 $Q=40\text{cm}^3/\text{s}$ にも及ぶ流路が出現しており、流水の集中化が過度に生じていることになる。

4. 今後の問題点

以上、降雨による流路網の形成過程について、実験の検討を行うとともに、確率シミュレーションを行い、その適用性について検討したところ、以前に検討した上端給水の場合に比べて、より実際現象に接近することが可能となったが、依然として未解決の問題点が多く残されているとともに、一方では降雨条件下を対象とするがゆえの新たな問題点が見出される。すなわち、まず第一に、降雨がある場合には、侵食の形態として雨滴侵食が挙げられるが、本実験に用いた人工降雨は雨滴の直径が小さいため、それが生じない。次に、本実験に用いた斜面材料は透水性が小さく、降雨はほとんど表面流として流出するが、実際の斜面では降水のかなりの部分が地中に浸透するであろう。したがって、降雨条件から侵食現象を推定するには、流出解析が不可欠となる。

本研究では、流路網の形成過程に着目し、斜面からの流出土砂量も、個々の流路の侵食量の総和として算定している。しかしながら、斜面全域に表面流がある場合には、流路とそうでないところとの判別が難しく、議論があいまいになる恐れがある。また、現象的には確かに小さな規模の個々の流路の侵食の積み重ねとして、全体の侵食量が決定されているのであるが、大規模な造成地や流域を対象とするとき、はたしてそのような微視的な観点から現象を把握するのが有効かどうかも再検討する必要がある。

また、シミュレーションの実行に当たっては、実験から得られた経験あるいは結果的な情報をいくつか用いているが、予測あるいは一般化という観点からすれば、それらを決定する機構についても考察を進める必要がある。

5. 結 論

以上、裸地斜面における流出土砂量の予測を目標として、降雨による流路網の形成過程について述べてきたが、結果を要約するとつぎのようである。

1) 斜面の上端から給水がある場合と同様に、斜面全域に降雨が作用する場合にも、顕著な流路網が形成されるが、前者の流路網では流下距離ならびに時間の経過に伴って流路本数が減少するのに対し、後者の流路網では時間の経過とともに流路本数が減少するのは共通しているが、流下方向への流路本数の減少傾向は見られない。

2) 流路本数の減少は、隣り合う流路の横変動による合流とそれに伴う片方の流路の涸渇に原因があるが、上に述べたような差異が現れるのは、上端給水の場合には一旦涸渇した流路はもはや復活することがないのに対し、降雨がある場合には、局所的には流れが途絶えても、その下流域に降った雨が再びその流路に集まり、流れを維持するからである。

3) 流路網が発達して流れが集中するに伴い、流路内での侵食は激しさを増すが、斜面全体としての侵食速度（流出土砂量）がどのように変化するかは、材料の受食性と水流のもつ掃流力の範囲によって異なり、一概に論じることができない。すなわち、限界掃流力の近傍では、流れが集中するに従って流出土砂量が増大するが、掃流力の充分に大きい範囲では、流路幅密度の減少とともに流出土砂量も減少する。

4) 以前にも考案した上端給水の場合を対象とする流路網の発達過程に関する確率シミュレーションモデルを、降雨条件下に適用できるように拡張して実験結果と比較したところ、流路本数や流出土砂量の変化特性をかなりよく模擬できることがわかった。しかしながら、流路幅密度や流路網の構造自体になると十分な模擬ができていないとは言い難く、改良の余地が残されている。

5) 上記のシミュレーションは、流路の横変動に基づく統合の過程を対象としたものであるが、その初期条件となる比較的初期の流路配列をも含めて予測を行うためには、流路の分裂の過程をもモデルに組み入れる必要がある。また、シミュレーションの実行に当たっては、実験の結果から得られた情報をいくつか用いているが、予測という観点からは不十分なものであり、さらに検討が必要である。

本研究は、文部省科学研究費補助金（昭和54年度～56年度、自然災害特別研究、研究代表者：河村三郎）の補助を得て行われたものである。また、実験ならびに数値シミュレーションの実施においては、京都大学工学部4回生、長井治明君の労に負うところが多い。記して謝意を表す。なお、数値シミュレーションを行うには、京都大学大型計算機センターを利用した。

参 考 文 献

- 1) 芦田和男・奥村武信・田中健二：斜面侵食に関する研究，京都大学防災研究所年報，第16号B，1973 pp. 449-470.
- 2) 芦田和男・田中健二：裸地斜面における流路の形成過程に関する研究(1)——流路網の確率的シミュレーションを中心として——，京都大学防災研究所年報，第18号B，1975，pp. 513-528.
- 3) 芦田和男・田中健二：粘土分を含有する砂れき床の侵食と流砂機構に関する研究，京都大学防災研究所年報，第17号B，1974，pp. 571-584.
- 4) 澤井健二・芦田和男：粘着性流路の侵食と横断形状に関する研究，土木学会論文報告集，第266号，1977，pp. 73-86.