

裸地斜面における流路の形成過程に関する研究 (3)

—流路の3次元形状—

芦田 和男・沢井 健二

A STUDY ON THE STREAM FORMATION PROCESS ON A BARE SLOPE (3)

—Three Dimensional Channel Form—

By *Kazuo* ASHIDA and *Kenji* SAWAI

Synopsis

In this study, the authors invented a three-dimensional position finder, based on the principle of measuring three angles, using sine-cosine potentiometers. With this device, they surveyed in detail the stream formation process on a cohesive material bed.

It has been found that even on steep slopes, the simple straight streams are seldom maintained, and the fall-like stepdowns as well as strong meanders are often formed.

On the other hand, the sediment run-off from bare slopes was investigated from a sediment-hydraulic view-point, based on the surveying of an actual residential development site.

1. 緒 言

著者らは、裸地斜面からの流出土砂量を、水理学的に予測することを目的として、斜面における流路の形成過程に着目し、一昨年、まず、流路配列の問題に取り組み、続いて昨年は、流路の横断面形状について研究を進めてきた。これは、流出土砂量を算定するにあたり、斜面全体のうちで、流路部分の占める割合を知ることが重要で、それを、個々の流路幅と、それらの間隔との比として把握しようとしたからであった。これら2つの問題は、前報ならびに前々報¹⁾²⁾において、ある程度解明されてはきたが、土の種類による受食性の問題や、流路形態と抵抗則の関係などを一般化するまでには至っておらず、また、研究を進めていく段階で、裸地斜面に形成される流路は、3次元的にきわめて複雑な形状を呈することが見い出されてきた。

そこで、このような流路の3次元形状について詳細な測定を行い、その形成機構を究明することが、斜面における水流の抵抗則、すなわち流出特性、ひいては土砂流出特性の解明につながるものと考えて、水路実験ならびに現地調査を行った。なお、従来の測定法では、所期のデータが得られないので、実験に先立って、3次元位置測定装置を考案・開発し、実際に試作して、一部利用した。

本報は、まず、この3次元位置測定装置を紹介し、ついで、水路実験と現地調査に基づいて、裸地斜面における流路の3次元的な形状特性と変動特性を論じ、それらと土砂流出との関連について考察するものである。

2. 3 次元位置測定装置

2.1 測定原理

空間内の位置の表示には、3次元直交座標が用いられることが多く、その最も基本的な測定法は、それら直交3軸に沿った距離を検出することである。それにはまず、測定位置（あるいは、それと1対1の対応関係にある位置）から、3つの座標平面への同時投影が考えられるが、距離を測定するための何らかの情報の発信装置や受信装置（場合によっては反射装置）を面内にくまなく配備することは、高価につくばかりでなく、測定装置そのものが大きな空間を占有する点で、得策でない。写真撮影のように、投影線を放射状にすれば、その難点は解消するが、直交座標への変換に際して、多大の労力と経費が必要となる。そこで、通常は、まず測定断面を設定し、さらにその中で測線を定めて、測線上の距離を測定する方法がとられている。しかし、この場合、断面設定、測線設定、距離測定のそれぞれに直線運動が伴えば、それらは直交3軸方向の運動であるので、自動制御機構にしなければ、円滑な操作が困難となる。したがって、操作性にすぐれ、しかも比較的安価な3次元位置測定器を得るには、直線運動をする個所をできるだけ減らすのが得策であると考えられる。

この要求を満たすひとつの方法として、まず測定の基準面を設け、その面内における、測定位置の対応点を2次元的に追跡しつつ、その基準面と測定点との距離を遠隔測定することが考えられる。たとえば、2次元座標測定器に超音波式距離計を付加すれば、この種の測定が可能となる。しかしながら、超音波の場合には、その反射点が肉眼では識別できないから、空間曲線を追跡するには、それが曲線から逸脱しないための何らかの工夫が必要である。また、測定対象位置に超音波の反射物がない場合には、それを補うなか、または、超音波の送（受）信部をそこに置かねばならず、遠隔測定法の価値が半減する。

そこで、いずれ測定対象位置に物体を置くのなら、単なる位置測定にとどまらず、温度計や圧力計などを付加して、諸量の空間分布の測定にも利用できるように測定器が考えられる。先に述べた方法で、距離の遠隔測定が要求されたのは、基準面を固定し、その法線方向の距離を直接に検出しようとしたからであり、基準面を可動にし、距離測定を角度の検出で置き換えれば、接触式でかつ操作性にすぐれた測定が可能となる。

Fig. 1 は、このような観点から考案した、3次元位置測定器の原理図である。すなわち、ある軸のまわりに回転する平面内で自由に角度の変えられる、2本のアームの先端を、測定位置に沿って滑らかに動かし、3つの回転角を同時に検出することによって、その3次元的な位置を測定しようというものである。外観は、いわゆるゼットランプと称する製図用照明器具の回転機構に似ており、アーム式の2次元座標読み取り器と同様の機構によって、回転角 α および β から、まず円筒座標の動径 r と高さ z を検出し、さらに、その動径に回転角 γ の正・余弦をかけることによって、 x 、 y 座標を検出する。すなわち、3つの回転角と直交座標との関係は、つぎのとおりである。

$$\left. \begin{aligned} x &= r \cos \gamma = (R_1 \cos \alpha + R_2 \cos \beta) \cos \gamma \\ y &= r \sin \gamma = (R_1 \cos \alpha + R_2 \cos \beta) \sin \gamma \\ z &= (R_1 \sin \alpha + R_2 \sin \beta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 R_1 、 R_2 は、それぞれ、アーム1およびアーム2の長さである。

回転角の検出には、種々の方法が考えられるが、ここでは、比較的入手し易く、しかも座標変換の容易な、関数ポテンショメータを用いることにした。**Fig. 2** は、その変換回路の概要で、3つの座標成分を磁気テープに同時に記録するなり、そのうちの任意の2つの組を取り出して、X-Y レコーダに図示するなどして、針先の3次元的位置を測定するのである。

先にも述べたように、この装置は、針先を物体に沿って動かすことにより、物体の形状を測定できるほか、針先に温度計や圧力計などを取り付けることによって、それらの量の空間分布の測定にも用いることができる。

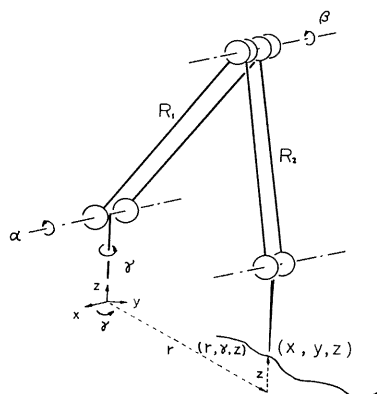


Fig. 1. The principle of the new three-dimensional position finder.

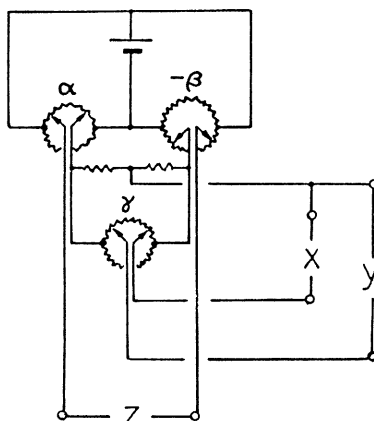


Fig. 2. The diagram of the electric circuit for coordinate transformation.

2.2 試作器の設計ならびに製作

Photo. 1 は、上のような原理に基づく、3次元位置測定器を試作したもので、角度 α はアーム 1 (3)、 γ はシャフトの回転を直接にポテンシオメータ α (2)、 γ (1) で検出し、 β はアーム 2 (4) の回転をワイヤ 1 (5) でシャフト部まで導いてから、ポテンシオメータ β (6) によって検出している。また、アーム 2 の先端に取り付けた針 (11) が常にシャフトと平行を保つよう、シャフトに固定したプーリー (7) の向きを、ワイヤ 2 (8)、3 (9) で順次伝達している。なお、針先がシャフトのまわりを回転しても、ハンドル (10) はそれと独立な向きをとれるよう、ボールベアリングで支持している。

測定範囲は、原理的には、 $[R_1 \sim R_2, R_1 + R_2]$ の半径の球殻内全域であるが、針先のハンドル部だけを支えて片手で操作する場合には、 $-\pi/2 < \beta < \alpha < \pi/2$ の条件からはずれると、モーメントのつり合いより、ハイドルを下方に抑える力が必要となり、位置によっては、接合部に大きな力が作用して危険となる。したがって、若干の余裕をみて、アーム 2 の先端を動かす範囲は、**Fig. 3** の斜線を施した部分の回転体内部に限定すべきであろう。そこで、試作器は、1 辺約 1m の立方体内部が測定できることを目標に、アームの長さを $R_1 = R_2 = 85\text{cm}$ に選んだ。^{*}

測定精度は、次章に述べる実験内容から、約 1mm（全体の 0.1%）の誤差を許容するが、それが局部的

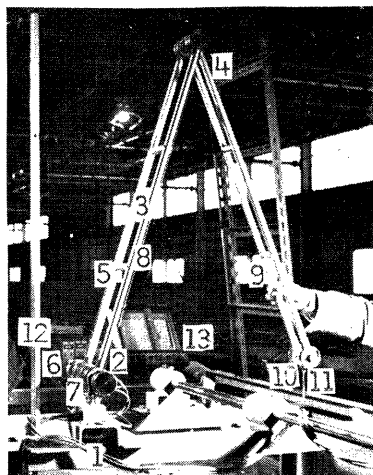


Photo. 1. A trial manufacture of the position finder.

^{*} 回転角の伝達方法としては、このような、ワイヤとプーリーを用いた方法をとらなくても、それぞれのアームを、市販のゼットランプに見られるような、ヒンジで結合した平行四辺形にしておけば、調整が容易で、力のバランスもとりに易いのであるが、測定範囲がやや狭くなるきらいがある。

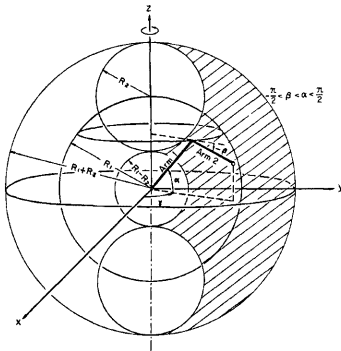


Fig. 3. The measuring range of the position finder.

おかねばならないであろう。

本器を用いて物体の形状を測定するときに現われる誤差は、大別すると、測定器の針先を、測定の対象位置に正確に追従させているかどうかという、操作上の誤差、ならびに、針先が正確に測定対象を追跡していても、それが正確に変換されるかどうかという、検出・記録・表示上の誤差とになる。前者、すなわち操作上の誤差は、熟練によってかなり解消できるが、測定対象位置の物質が軟く、反力が小さい場合には、その接触の確認を視覚に頼らざるを得ないため、0.5mm 程度の誤差は避けられない。また、本器が操作性にすぐれているというのは、滑らかに動かしながら測定ができるという意味であって、それを急速に動かすことは困難である。したがって、高速で振動する物体の表面の測定などには適さない。追従速度は、せいぜい 10 cm/s 程度までであろう。

後者、すなわち検出・記録・表示上の誤差は、さらに、角度の伝達ともなる機械的な誤差と、その変換・表示にもなる電気的な誤差とに分けられる。機械的な誤差のうち、部材の寸法の不均一や接合部のねじれによるものは、入念な製作によって解消できるが、回転部分の遊びや、部材のたわみによるものは、ある程度は避けられないように思われる。

電気的な誤差でまず問題になるのは、本器の心臓部ともいえるポテンシオメータの精度である。試作器に用いた導電プラスチック製ポテンシオメータは、極値付近を除くと、公称よりもはるかに精度が良く、使用範囲を限定すれば、充分実用に供し得る。ところが、極値付近、すなわち α , β , γ のいずれかが直角またはその整数倍に近いところでは、歪みが大きく、充分な精度が得られない。さらに、電気的な誤差として、増幅回路の非線形性や、各部で発生するノイズがあり、全体としての精度は、当初企んだ $\pm 0.1\%$ には及ばなかった。とくに、2つのアームが構成する面に垂直な方向への精度が悪く、3次元位置測定器とはいうものの、3つの座標成分が同じ精度で得られるわけではなく、事実上、空間位置の、ある面への投影がかなりの精度で得られているにすぎないのが現状である。

しかしながら、以上に述べた欠点の大部分は、部品の選択と入念な製作によって除去することができ、若干の改良を加えることによって実用化できるであろう。

3. 急勾配粘性流路床の変動過程

3.1 砂・ベントナイト混合物を用いた侵食実験

著者らは以前から、粘性性材料としてベントナイトを用いた侵食実験を、数多く行っているが、今回さら

に集中するものであってはならず、この意味で、ポテンシオメータは巻き線式のものよりも導電プラスチック式のもの、さらにできれば、無接触式のものが見られる。しかし三角関数ポテンシオメータで無接触式ものは市販されていないので、本器では、市販の導電プラスチック製三角関数ポテンシオメータ（公称精度 1%）を使用した。出力変換部の概要は先に Fig. 2 に示したが、実際には、ポテンシオメータ α および β の出力電圧の一部（余弦側）をポテンシオメータ γ の入力電圧として印加する際、干渉効果を減じて線形性を保つため、インピーダンス変換回路を挿入している。また、各出力成分は、零点調整回路と倍率調整回路を通した後、記録計に接続している（Photo. 1 (12, 13) 参照）。

2.3 試作器の精度と今後の改良策

次章においては、この試作器を用いて測定した資料をもとに解析を進めるが、それに先立って、本器の精度を吟味して

に実験資料を蓄積し、従来の資料とあわせて考察することにした。実験は12の Run から成り、Run 1～10は前報に述べた実験 Series B²⁾に相当し、幅・深さとも約 7 cm、長さ 2.3 m の水路に、また、Run 11～12は、幅 50 cm、深さ 1 m、長さ 75 cm (Run 11) または 2m (Run 12) の土槽 (Photo. 2) に、所定の勾配で土砂を敷きならし、中央に幅 1 cm の長方形断面の溝を切って、上流端から給水を行ったものである。使用材料は、Run 1～9では、1 mm の均一砂とベントナイトと水を重量比 9 : 1 : 3 で混合したもの、Run 10では、洛西・ユータウンの法面で採取した土砂、Run 11, 12では、珪砂 5号とベントナイトと水を重量比 9 : 1 : 3 で混合したものをを用いている。これらの材料はいずれも粘着力が大きく、自立するので、下流端は固定せず、自由になっている。また、上流の給水箇所は、落下水の衝撃による洗掘を防ぐため、湛水部を設けて減勢したのち、溢流させている。

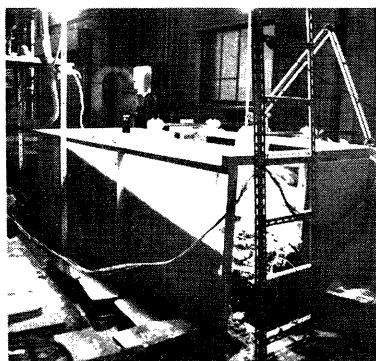


Photo. 2. A width-variable soil container.

Table 1 は、各実験ケースにおける、実験条件ならびに、実験終了時の流路形状特性の概略を示したもので、条件によっては、かなりの蛇行や、縦断方向の凹凸が発達している。

Fig. 4 は、このうちのいくつかのケースについて、縦断形状の時間的変化を表わしたもので、**Fig. 5** は、平面形状の時間的変化を表わしたものである。

3.2 斜面侵食流路の縦断形状に関する考察

Fig. 4 に見られるように、急勾配粘着性流路には、侵食の進行にともなって、階段状の縦断形状が発達することがある。このような現象は、実際の裸地斜面や、山間の小溪流においてもしばしば見られるもので

Table 1. Experimental conditions and results.

	Inclination	Discharge	Water Supplying Time	Water Surface Width	Maximum Depth	Longitudinal		Meander	
	$I(\sin \theta)$	$Q(\text{cm}^3/\text{s})$	$t(\text{hr})$	$b(\text{cm})$	$h(\text{cm})$	Wave Length $\lambda(\text{cm})$	Wave Height $J(\text{cm})$	Wave Length $\lambda_m(\text{cm})$	Width $A(\text{cm})$
Run 1	0.225	5	3	1.3	0.32	8.9	0.93	17.2	0.8
Run 2		9	3	1.2	0.32	6.3	0.97	17.4	1.0
Run 3		20	2	2.2	0.63	5.5	1.15	62.9	0.7
Run 4	0.438	2	3.5	0.9	0.27	3.6	0.34	13.5	1.2
Run 5		5	2	1.3	0.34	4.4	0.79	7.8	2.0
Run 6		10	1.5	1.7	0.36	4.7	0.96	11.9	1.0
Run 7	0.707	1	0.3	(deposition)					
Run 8		2	1.75	0.8	0.21	4.2	0.58	12.7	0.7
Run 9		5	1.25	1.2	0.35	2.6	0.58	11.9	1.1
Run 10	0.545	10	0.33	1.3	0.39	6.3	2.14	11.8	2.1
Run 11	0.555	40	8	3.0	1.2	15	6	15	2.5
Run 12	0.196	10	50	1.5	0.56	14	1	11	4.0

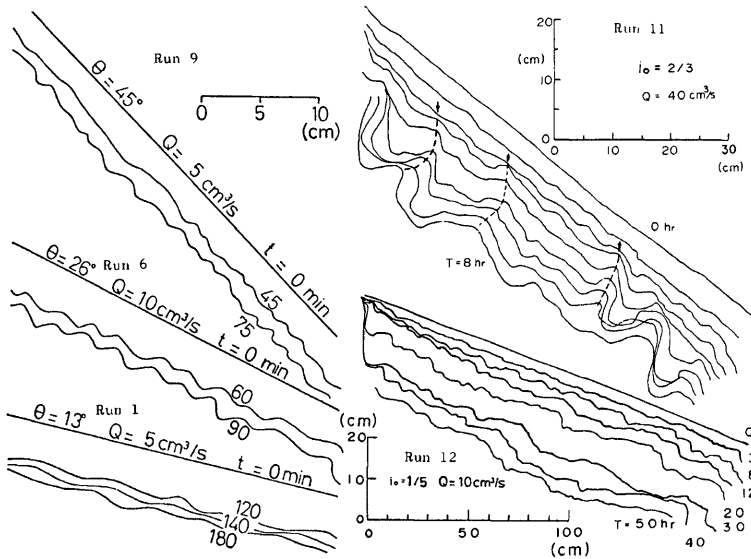


Fig. 4. Longitudinal profiles of the cohesive stream bed with steep slopes.

あり、その発生原因のひとつとして、巨れきの存在や、土質の不均一が考えられるが、この実験のように、比較的均一な場においても段差が生じるということは、その一因が、流れの機構そのものに内在する一種の不安定現象にあることを想起させる。そこで、砂れき床における河床波の発生機構の解析と同様に、開水路流れの一次元解析法に基づいて、粘性性流路床の安定解析を行ってみよう。

一般に河床の単位面積・単位時間あたりの侵食量を E 、堆積量を D とすれば、河床変動速度は、流砂の連続条件より、

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -E + D = -(\partial q_T / \partial s) / (1 - \lambda) \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表わされる。ここに、 (s, n) は、河床面における流砂の運動方向と、それに垂直上向き方向をとった曲線座標、 q_T は流砂量、 λ は河床の空隙率である。そして、砂れき床では、平衡状態からのずれが少ないことから、 q_T を水理量に対応させて解析するのが通例であるが、粘性性流路ではそれは不合理で、むしろ D を E にくらべて小さいものとして、河床変動 $\partial n / \partial t$ を直接に水理量と結びつけるのが妥当である³⁾。すでに述べたように、流路の変動過程は3次元的なものであり、縦断形状を横断形状から切り離して独立に論じることの可否は検討を要するが、かりに流れが2次元的で、かつ漸変流としての解析ができるものとするれば、その基礎方程式系はつぎのようになる。ただし、流量は一定とする。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial t} &= -E, \quad E = f_n(u_*) \\ \frac{\partial h}{\partial x} &= i - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2g} \right) - \frac{u_*^2}{gR}, \quad R = h \\ i &= \sin \theta - \frac{\partial z}{\partial x} \cos \theta \\ v h &= q(\text{const.}) \quad \text{i.e.} \quad v = q/h = f_n(h) \\ u_* &= (1 - \alpha \frac{\partial h}{\partial x}) v / \varphi = f_n(h, h_x), \quad h_x \equiv \frac{\partial h}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 (x, z) は、Fig. 6 に示すように、主流方向ならびにそれに垂直上向き方向にとった河床面の座標、

h は水深, v は流速, i は勾配, u_* は摩擦速度, R は径深, θ は平均勾配, q は単位幅流量である。また, f_* は関数を表わし, α は, 加速・減速による摩擦速度の変化⁽⁴⁾を表わす係数, φ は等流状態における流速係数である。

ここで, 各量を平均量と変動量とに分け, 変動量が微小であるとして高次の項を省略し, さらにそれらの変動量が,

$$\begin{aligned}
 a' &= a_0 e^{i\gamma_1 t} \cos\{\gamma_2 t + \beta(x - \delta_0)\} \\
 &= \text{Real}[a_0 e^{(i\gamma_1 + i\gamma_2)t + i\beta(x - \delta_0)}] \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

と表わされるものとすれば, 増幅率および伝播速度は,

$$\gamma_1 = \frac{dE}{du_*} \left\{ \frac{\partial u_*}{\partial h} (1 - F_r^2) + \frac{\partial u_*}{\partial h_x} \frac{F_r^2}{\varphi^2 h} \right\} \beta^2 / \Delta \dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned}
 c = -\frac{\gamma_2}{\beta} = \frac{dE}{du_*} \left\{ \frac{\partial u_*}{\partial h} \frac{u_*}{gh^2} \left(u_* - 2h \frac{\partial u_*}{\partial h} \right) \right. \\
 \left. - \frac{\partial u_*}{\partial h_x} \left(1 - F_r^2 + 2 \frac{u_*}{gh} \frac{\partial u_*}{\partial h_x} \right) \beta^2 \right\} / \Delta \dots\dots\dots (6)
 \end{aligned}$$

となる。ここに, $F_r = v/\sqrt{gh}$, $\Delta = \{u_*/gh^2(u_* - 2h \cdot \partial u_*/\partial h)\}^2 + \{(1 - F_r^2 + 2u_*/gh \cdot \partial u_*/\partial h_x) \beta\}^2$ である。

擾乱が発達する条件は $\gamma_1 > 0$ であるが, 粘着性流路では, 一般に E と u_* が正の相関をもつから, 式 (5) より, その条件は波長によらず,

$$F_r > 1/\sqrt{1 - \frac{1}{\varphi^2 h} \frac{\partial u_*}{\partial h_x} \frac{\partial u_*}{\partial h}} \dots\dots\dots (7)$$

となり, 根号の中の第2項が1にくらべて充分小さいので, 結局, 常流は安定, 射流は不安定ということになる。また, 式 (7) が成り立つとき, 式 (6) は負となるから, 擾乱は上流方向へ伝播する。

そこで, 上の理論結果を検証するために, つぎのような実験を行った。2次元流れの条件を満たすには, 側壁の影響を除外するために, ある程度幅の広い水路が望まれるが, 前報にも述べたように, 移動床流れには, 水理条件に応じたある安定な流路幅が存在し, それよりも広い断面を強制的に与えようとしても, 流れの集中化が生じてしまう²⁾。したがって, ここでは, アクリル製の側壁をもつ, 幅 1 cm, 全長 1 m の水路に, 土砂を平坦に敷き均らし, 水路全幅に通水を行って, 側壁から侵食状況を観察することにした。使用材料は, 豊浦標準砂とペントナイトと水を, 重量比 9:1:3 で練り混ぜたものである。水路勾配は 26° , 流量は $30 \text{ cm}^3/\text{s}$ で, 通水開始後 90 分まで, 15 分毎の写真をつなぎ合わせて, **Photo. 3** に示している。初期水深は 4.5 mm で, $F_r = 3.2$ の射流であるが, 30 分頃から凹凸が急速に発達し, 先の 3 次元的な侵食実験の場合に酷似した, 湛水部をとまなう階段状の縦断面を呈するようになる。このことから, 粘着性流路における階段状縦断面形状の発生原因は, 必ずしも流れの 3 次元性に求める必要はなく, 2 次元的な流れの機構そのものに内在しているものと考えられる。

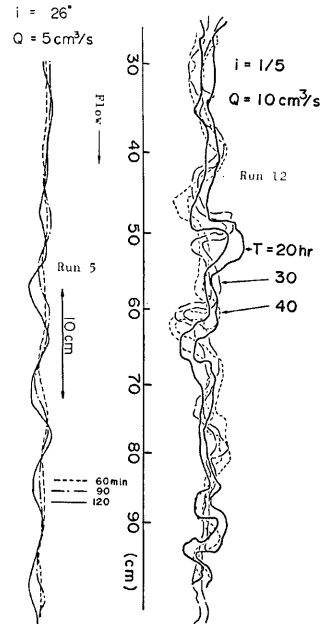


Fig. 5. Planes of meandering of the cohesive streams.

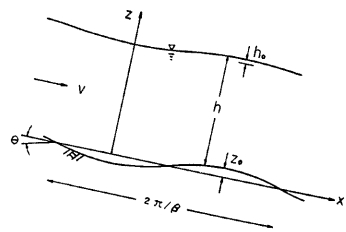


Fig. 6. Definition sketch for the stability analysis.

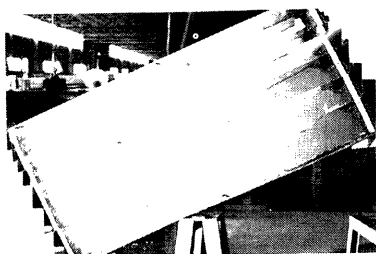


Photo. 3. An experiment of the two-dimensional erosion.

の解析によれば、射流状態ではいかなる波長の擾乱も発達することになるが、実際には、擾乱の波長は初期において小さく、侵食の進行にともなって統合され、波長と波高がともにある大きくなった後、その変形速度が落ちるようである。

つぎに擾乱の移動方向であるが、Photo. 3 ではそれが明確でないので、Fig. 4 によって検討してみよう。Run 1~10 においては、その移動方向の明確でないものもあるが、全体的にみて、上流方向に伝播する傾向が強く、このことは上記の理論結果と一致する。しかしながら、Run 11 においては、図中点線で示すように、河床の凸部が、侵食の初期においてむしろ下流側に前進し、かなり発達した後、上流側へ後退するようになっている。このように擾乱が下流側に伝播することがあるのは、擾乱の形状特性、とりわけその前後非対称性に起因するものと考えられ、先の解析のように、擾乱を前後対称な正弦波で近似することには問題があろう。

また、この実験のように縦断形が階段状になった場合、もとの主流方向に重大な物理的意味があるとは考えられず、むしろ、ステップの緩勾配部分と急勾配部分のそれぞれの方向が意味をもつであろう。そこで、鉛直方向を基準として凹凸の進行方向を論じれば、Fig. 4 からわかるように、Run 11 の比較的初期の段階においても、階段状の凹凸は上流側へ後退していることになる。

3.3 斜面侵食流路の平面形状に関する考察

流路の平面形状を論じるには、本来、兩岸を含めた帯状の部分を追跡しなければならないが、ここでは簡単のために、流路中心線の軌跡をもって代表させることにする。この場合、流路の平面形状特性として第一にあげられるのは、蛇行である。ことに、蛇行幅がどの程度の大きさを有するかということは、斜面における個々の流路の支配圏、ひいては流路間隔を決定する要因として、重要である。

そこで、3.1 の実験結果に基づいて、Run 12 の蛇行幅の時間的変化をプロットすれば、Fig. 7 のようになる。Fig. 5 に見られるような不規則な波形において、蛇行幅あるいは蛇行振幅を明確に定義することは困難であるが、ここでは、流路中心線の変曲点を結ぶ線からの距離をもって、振幅 (a)、その2倍を蛇行幅としている。図中、棒グラフで示してあるのは、各時刻における蛇行幅の頻度分布、白丸を結ぶ折れ線で示してあるのは、2 m の区間にわたる平均蛇行幅である。

レジーム論に見られるように、蛇行幅にもある平衡状態が存在し、統計的に水理量と対応がつけられるか⁵⁾、それとも、蛇行幅には上限がなく、どこまでも無秩序に屈曲が進むもの

一方、著者らが以前、常流状態において行った侵食実験によれば、少なくとも半時間以内には目立った凹凸は生じておらず³⁾、式 (7) による安定・不安定の判定が妥当であるように思われる。

ところで、上に示した線形解析は、あくまでも単一の波長をもつ正弦微小擾乱に対して適用されるものであり、正弦波と著しく異なる擾乱や、すでに発達してしまった擾乱に対しては、何らの情報も与えるものでない。Photo. 3 あるいは前節に示した実験のように、擾乱が発達して、跳水部分や滝状の部分を作なうようになった場合、漸変流としてのこのような解析が適用できないことは明白であろう。たとえば、上

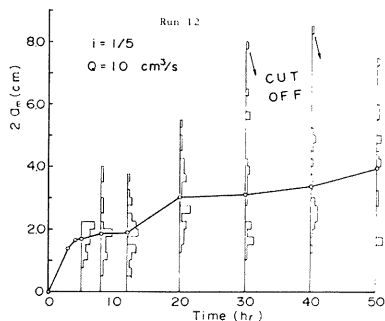


Fig. 7. Meander width distributions and their mean values.

かについては、議論のわかれるところであるが、本実験によれば、個々の蛇曲の振幅には上限があって、それに達したものは短絡して一旦振幅が減少し、再び発達を始めるという現象をくり返し、平均蛇行幅の変化率は、時間とともに急激に減少するようである。

一方、蛇行波長 (λ_m) は、通水初期においてほぼ定まり、その後、変動はあるものの、明確な増加傾向や減少傾向は見られない。その結果、蛇行幅と蛇行波長の比は、初期に急速に増加したのち、ある値 (Run 12 では 0.3 程度) に落ち着いている。しかし、この値が、蛇行の規模その他に依存するものかどうかについては、さらに検討を要するであろう。

Fig. 8 は、蛇行の発達程度を表わすパラメータとしてよく用いられる、屈曲率 (屈曲示数)⁵⁾ の時間的変化を示したものであり、Fig. 7 の場合と同様に、棒グラフがその頻度分布、白丸を結んだ折れ線が平均値を表わしている。平均屈曲率は 30 時間を経過するまで直線的に増加し、その後ほぼ一定値を保つようになるが、これは、個々の屈曲の屈曲率がある程度大きくなると、短絡を生じるためであると考えられる。この実験で測定された最大の屈曲率は約 3 であるが、この値について、つぎに若干考察してみよう。

蛇行形状の数式による表現としてしばしば用いられる、sine generated curve⁶⁾

$$\theta = \theta_0 \sin(2\pi s/L) \quad \dots\dots\dots(8)$$

を例にとれば、その屈曲率 S は、

$$S \equiv \frac{L}{\lambda_m} = L/4 \int_0^{L/4} \cos \theta ds = \pi/2 \int_0^{\pi/2} \cos(\theta_0 \sin x) dx = \frac{1}{J_0(\theta_0)} \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる。ここに、 s は弧長、 L は蛇行長 (同位相点間の弧長)、 λ_m は蛇行波長 (同位相点間の弦長)、 θ は流向偏角、 θ_0 は最大流向偏角で、 J_0 は、0 次 Bessel 関数を表わしている。 θ_0 が 2.2 を超えると、流線が交錯して短絡が生じるが、この時の屈曲率は、式 (9) より、 $S \approx 9$ である。ところが、実際の流路は有限の幅をもっているから、流線が交錯するまでに短絡が生じるはずであり、実験値より波長・流路幅比を 7 とおけば、短絡の生じる sine generated curve の屈曲率は、 $S \approx 4$ となる。

また、sine generated curve の振幅は、

$$a = \int_0^{L/4} \sin \theta ds = \frac{L}{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin(\theta_0 \sin x) dx \quad \dots\dots\dots(10)$$

であるから、蛇行幅と蛇行波長の比は、

$$\frac{2a}{\lambda_m} = \int_0^{\pi/2} \sin(\theta_0 \sin x) dx / \pi J_0(\theta_0) \quad \dots\dots\dots(11)$$

となり、上に示した短絡の生じる屈曲率、 $S=4$ のとき、式 (11) の値は約 2 となる。(先に示した、Run 12 における蛇行幅/蛇行波長比 0.3 は、平均蛇行幅に関するものである。)

これらのことから、sine generated curve のあてはめについてはさらに検討を要するにしても、屈曲率や蛇行幅にある上限値が存在することは、うなづけるであろう。

ところで、蛇行波長については、従来、流量または流路幅との関係式を経験的に求めたものが多く、自由蛇行では、

$$\lambda_m = \left\{ \begin{array}{ll} K_1 Q^{n_1} & K_1: 50 \sim 100 \quad n_1 \approx 0.50 \end{array} \right. \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} K_2 B^{n_2} & K_2: 3 \sim 17 \quad n_2 \approx 1.0 \end{array} \right. \quad \dots\dots\dots(13)$$

とされている⁵⁾。ここに、 Q は流量、 B は流路幅で、単位はいずれも (m-sec) である。上式は、実河川のデータに基づいて得られたものであるが、本実験のデータをこれと比較するため、Run 12 の $Q=10 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $B=1.5 \text{ cm}$ を代入すると、式 (12) では $\lambda=15.8 \sim 31.6 \text{ cm}$ 、式 (13) では $\lambda=4.5 \sim 25.5 \text{ cm}$ となる。こ

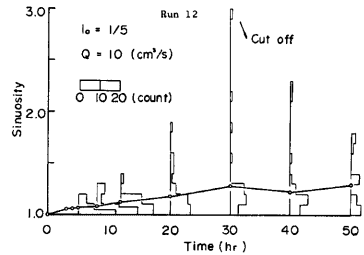


Fig. 8. Sinuosity distributions and their mean values.

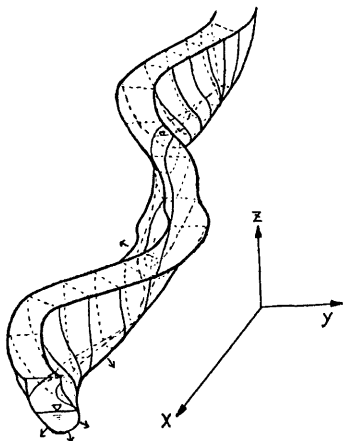


Fig. 9. A conceptual sketch of the three-dimensional transfiguration of the stream.

れに対して、実験で得られた波長は 10~12 cm であり、式 (13) の示す範囲に含まれることになる。

また、先にも示したように、蛇行波長は、発達初期段階ではほぼ定まるから、直線流路における微小擾乱の線形安定解析によって得られる卓越波長と比較し得るであろう。池田らの理論⁷⁾によれば、sine generated curve で表わされる蛇行流路内の流速分布が、 $\theta_0 = \text{const.}$ のもとで最も外岸側に偏るような波長が卓越するものと考ええると、

$$L = \sqrt{6} \pi \frac{h_0}{\sqrt{i}} \frac{u_0}{u_*} \quad \dots\dots\dots (14)$$

である。ここに、 h_0 は水深、 i は勾配、 u_0 は平均流速、 u_* は摩擦速度である。しかしながら、 $\theta_0 = \text{const.}$ とおくと、蛇行長に比例して蛇行振幅が変化するので、直線流路からどのような波長の蛇曲が卓越してくるかを論じる場合には、この条件は適さない。そこで、これを若干変形して、蛇行幅が一定のもとで流速偏倚が最大になる条件より、卓越波長を求め直すと、

$$L = 2 \pi \frac{h_0}{\sqrt{i}} \frac{u_0}{u_*} \quad \dots\dots\dots (15)$$

となる。この式に、Run 12 の代表値として、 $h_0 = 0.3 \text{ cm}$ 、 $i = 0.2$ 、 $u_0/u_* = 2.9$ を代入すると、 $L = 12.2 \text{ cm}$ となり、実測の蛇行波長にきわめて近い値が得られる。

なお、蛇行の移動特性については、冲積河川では下流方向へ前進するといわれているが、粘着性材料を用いた本実験では、必ずしもそのような傾向は見られない。これは、冲積河川の蛇行現象には土砂の移動と堆積が密接に関与しているのに対し、本実験のような斜面侵食流路の蛇行現象には、それがあまり関与していないことによるのではないと思われる。

3.4 流路の 3 次元の変動過程

これまででは、流路形状特性を縦断特性と平面特性とに分けて論じてきたが、元来それらは一体のものであり、互に影響を及ぼし合っている。また、主に、空間曲線としての流路中心線に限定してその特性を見てきたが、流路にはある幅と深さがあり、それらが時間的にも空間的にも変動する。Fig. 9 は、そのような 3 次元の流路変動過程を概念的に表わしたもので、流路は蛇行しつつ低下するので、ねじれを生じ、オーバーハングをとまうようになる。

流路形状が平面的にも縦断的にも直線に近い段階では、全区間が射流状態にあり、わずかの湾曲や底面凹凸の存在によって流れの状況が非常に変わり、横断面内の水面形状もきわめて複雑である。そしてこの段階においては、種々の微小な擾乱が混在するが、やがてその中に淘汰がおり、あるものだけが選択されていくのである。

このようにして湾曲や凹凸が発達すると、流水抵抗の増大する区間で湛水現象が生じ、跳水をおこして、常流区間が現われるようになる。また、場合によっては、底面から剥離した流れが自由水脈を形成し、その落下点での衝撃力を一層強めることとなる。さらに、湾曲部や跳水部では強い 2 次流が発生し、底面の洗掘だけではなく、側岸をも激しく侵食し、流路幅が流下方向に脈動する。

しかしながら、湾曲や凹凸がある程度発達し、流路幅もある程度拡大すると、2 次流の流速は緩和され、ある種の平衡状態が形成されるようになる。

このように、3 次元的な変動現象の組み合わせた状態では、必ずしも 2 次元モデルにおいて考えられる

ような規則的な現象は存続せず、たとえば、勾配の大きな斜面において階段状の縦断形が発達すると、水流の蛇行は段落の部分で断ち切れ、その前後の相関が弱くなる。それは縦断形についても同様で、一旦、段差が形成されても、横変動のために、それがとに残されて、流水部分が平坦に戻ることもある。それらの流路形態の存続領域は、勾配や流量その他の条件によって区分されるのではないかと考えられるが、現在の段階では、比較的緩い斜面では蛇行現象が卓越し、比較的急な斜面では階段状の縦断形が卓越するという、定性的な区分にとどまっている。

Fig. 10 は Run 11 の縦断図から、底面侵食速度の時間の変化を求めたもので、上に述べたような様々の作用がある時には助長し合い、またある時には相殺し合った結果を反映している。この図において通水初期に侵食速度が大きいのは、初期断面が狭く、単位幅流量が大きかったためである。

また、5時間付近にも侵食速度のピークが見られるが、これは先に述べた強い衝撃力の現われであろう。それにしても、このように複雑な流況の変化があるにもかかわらず、侵食速度が全体としてさほど変化しないということは、前々報において見いだされた、“通水後数十分からは、流路配列が変化するにもかかわらず、斜面からの流出土砂量はほとんど変化しない”こととあいまって、注目に値する。

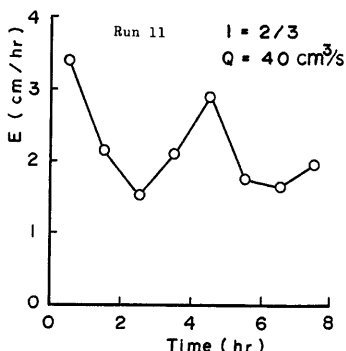


Fig. 10. A time variance of the rate of erosion.

4. 宅造地法面における侵食流路形態と土砂流出

4.1 法面侵食の実態調査

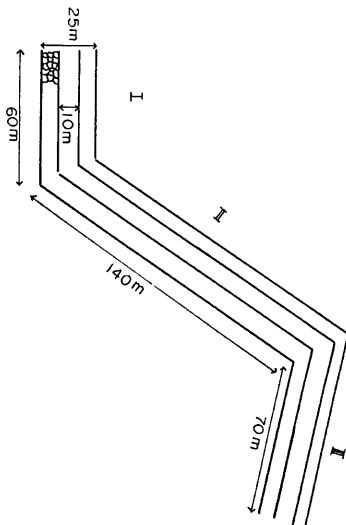


Fig. 11. Dimensions of the slopes at the measuring site.

著者らは、斜面侵食に関する実験や理論解析と並行して、昭和49年から50年にかけて、京都市西部の洛西ニュータウンの造成現場に現われた裸地斜面において、侵食状況の現地調査を行った。

対象とした斜面は、D 住区東緑地の南寄り約 300 m の区間で、**Fig. 11** に示すように、屈曲した3つの部分から成っており、北から順次、斜面Ⅰ、斜面Ⅱ、斜面Ⅲと呼ぶことにする。この地域は、竹林地帯の一角で、斜面Ⅰは昭和49年4月20日、斜面Ⅱ、Ⅲは昭和50年6月10日に切土整形され、いずれも整形直後、上段のみ、種子吹付けによる緑化工が施され、下段は、石積み工が施工されるまで、裸地の状態であった。法勾配は1割5分、すなわち約34°で、落差5mごとに幅1mの小段が設けられている。

調査は、昭和49年7月29日および昭和50年7月18日に、流路の平面ならびに縦断測量を中心に行い、その外、強雨時に随時、侵食状況の観察を行った。

Photo. 4 に示すように、法面に形成される流路パターンは平行状に近いが、個々の流路を詳しく見ると、かなりの横変動があり、浸透水の出没ともあいまって、分合流や流路の発生・消滅を随所でひきおこしている。その結果、流路本数

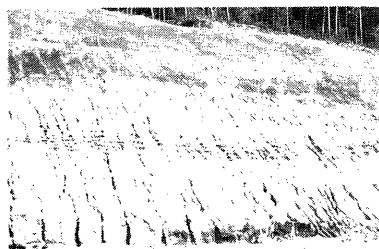


Photo. 4. Numerous rills caved on a bare slope.

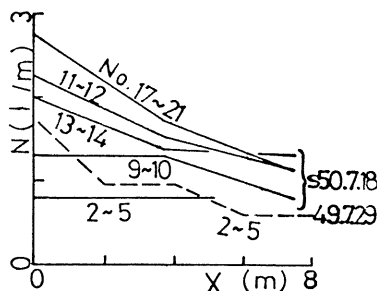


Fig. 12. Numbers of streams in a unit width of slope.

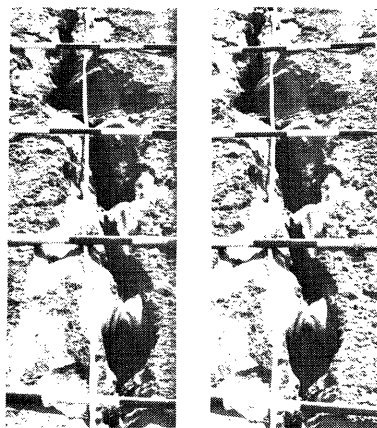


Photo. 5. Developed stereo views of the stream with a series of steps.

4.2 流出土砂量の予測法

砂防計画,あるいは土砂処理計画をたてるにあたって,最も基本的な課題は,流域からの流出土砂量を的

は,時間ならびに流下距離にともなって変化している。**Fig. 12** は,これを単位幅あたりに換算して示したもので,流路間隔の小さい間は,時間的にも距離的にも流路本数がしだいに減少し,ある程度流路間隔が大きくなると,もはやそれ以後は,流路本数が変化しなくなるようである。図中の数字は,縦断測量を行った流路番号を示すもので, No. 1~6 が斜面Ⅰ, No. 7~16が斜面Ⅱ, No. 17~21 が斜面Ⅲに属するが,同じ斜面内でも,区間によって流路の密度が異なるため,比較的一様と判断される5つの区間に分けて,密度を求めている。なお, No. 2~5 の区間の下流部が昭和50年に消滅しているのは,先に述べた石積みによる法面保護の施工にともなう,人為的なものである。

つぎに,個々の流路をさらに詳しく見ると, **Photo. 5** (立体写真) に示すように,3次元的にきわめて複雑な形態を呈しており,直線流路とは流出特性を異にするものと思われる。まず,流路配列に影響を及ぼす,流路の平面形状から見ていくと,流路幅には,深い溝の兩岸の距離としての溝幅と,溝の底部における流水幅としてのくぼみの幅とがあり,溝幅は流水幅 (b) の約2倍になっている。蛇行幅 (A) は侵食の発達程度によって当然異なるが,今回の測定の範囲では, **Fig. 13** に示すように,蛇行波長 λ_m と比較的良好対応が付き,平均的には, $A/\lambda_m \approx 0.1$ また,蛇行波長と流水幅の関係は, $\lambda_m/b \approx 10$ となっている。したがって,蛇行幅と流水幅の関係は, $A/b \approx 1$ と近似される。

一方,このような波動の他に,蛇行軸そのものがさらに大きなスケールで横偏倚し, **Fig. 14** に示すように,流路全体としての偏倚量は,流下距離にともなって増加する。今回の測定範囲では,流路の最大横偏倚は蛇行幅の5倍程度であり,これは流路間隔の約8割に相当する。しかし,斜面の中には,流路の存在しない部分もかなりあり,平均的には,溝幅は流路間隔の約15%を占めているようである。

Fig. 15 は,流路の縦断形状の一例であるが,実験で見られたものと同様に,顕著な階段状を呈している。**Fig. 16** および **Fig. 17** は,縦断波長と流路幅の関係,ならびに縦断波高と波長の関係を示したもので,これらは $\lambda/b \approx 8$, $A/\lambda \approx 0.2$ と近似されるが,一般的に成り立つものかどうかは疑問である。

流水断面の形状は,前章の実験において見られたものと酷似しており,かなりの強雨時でも,湛水部を除くと,水深は数 mm 以下である。

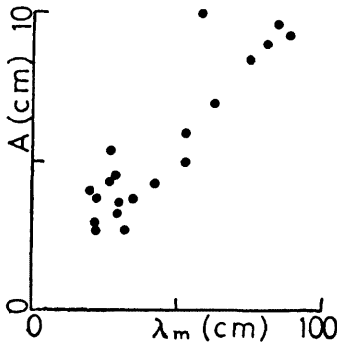


Fig. 13. Relation between meander length and meander width.

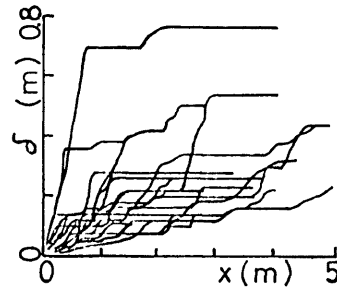


Fig. 14. The increase of the lateral excursion with downstream distance.

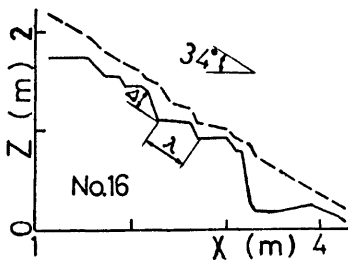


Fig. 15. Longitudinal profile of a deep ditch on the bare slope.

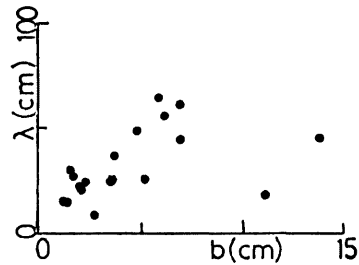


Fig. 16. Relation between stream width and wave length of the longitudinal irregularities.

確に予測することである。実用的な見地からすれば、これを経験的手法に頼らざるを得ない場合も多いのであるが、より一般化をはかっていくためには、やはり土砂水理学的な手法の導入が望まれるであろう。

対象流域の大きな河川では、通常、比流砂量という概念が用いられ、流出土砂量は $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ の単位で扱われる。これに対し、開発地の砂防のように、比較の対象面積が小さく、期間も短い場合には、平均侵食深（単位 cm）の概念がしばしば用いられている⁹⁾。たとえば、調節池の容量を定めるための基準として、切土部で $5\text{cm}/\text{year}$ 、盛土部で $10\text{cm}/\text{year}$ をとるといった類である。

そこで、前述の洛西ニュータウンの斜面について、土砂水理学的な観点から侵食量を推算し、上記の基準と比較してみよう。

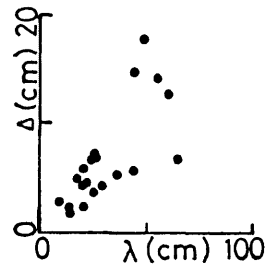


Fig. 17. Relation between longitudinal wave length and wave height.

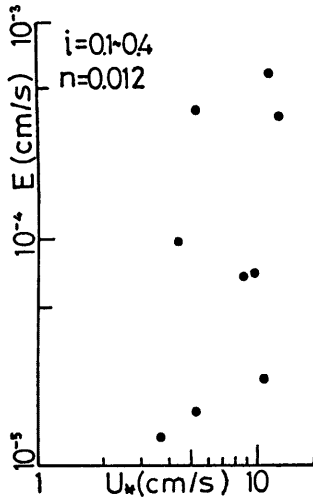


Fig. 18. Relation between the rate of erosion and shear velocity for the soil of the slope at Rakusai-New-Town.

の平均低下速度に換算すると、約 3.8 cm/year となるが、これは斜面下端に対する値であるから、斜面全体としての平均値は、もう少し小さくなるであろう。

もっとも、中間流の存在や流路形態によって、流れの抵抗特性や流出特性が異なるから、厳密にはその影響を考慮せねばならず、また、全掃流力のうちで侵食に寄与する有効掃流力の的確な算定法を確立することも、今後の課題である。

5. 結 論

以上、流路の3次元形状を中心に、裸地斜面における流路の形成過程について考察してきたが、その結果を要約すると、つぎのようである。

- 1) 流路の3次元形状を敏速、かつ滑らかに測定する方法として、ある軸のまわりに回転する平面内で自由に角度の変えられる2本のアームによって位置を追跡しながら、その平面ならびにアームの回転角を検出・変換する方法を考案し、実際に試作・利用した。この方法は、直接に直交座標を検出する従来の方法にくらべて、操作性の点で、はるかにすぐれている。
- 2) 粘性材料としてベントナイトを用いた、長時間にわたる実験において、斜面侵食流路の形状特性を詳細に測定し、蛇曲から迂曲への発達や短絡、階段状縦断形の形成など、従来あまり解明されていない現象について、多くの知見を得た。

*1) ここに用いた粗度係数は、上に述べた受食性試験における、平坦流路床での値であり、実際斜面での粗度係数は、これよりもかなり大きいものと思われるが、形状抵抗による掃流力の増加分は、侵食には寄与しないものと考えて、ここでは、あえて、侵食に寄与する有効粗度係数として、この値を選んだ。

表面侵食の形態には、雨滴の衝撃作用によるものや、凍結・融解その他の作用によるものもあるが、この斜面では、表流水の掃流作用によるものが支配的であると思われる。したがって、侵食量を予測するには、まず、対象とする斜面土壌の、流水に対する抵抗力あるいは受食性を調べることが必要であり、斜面で採取した土試料を用いた水路実験によって、摩擦速度と侵食速度の関係を求めたところ、Fig. 18のような結果が得られた。

これによると、この土の侵食限界摩擦速度は、約 3.7 cm/s である。ここで、斜面長を 30 m、流出率を 75%、Manning の粗度係数を 0.012 において、斜面下流端での層状侵食の発生限界降雨強度を求めれば、0.17 mm/min となる。*)

斜面上に流路が形成されて、流水がそこに集中すれば、もっと小さな降雨強度でも侵食が生じるが、一応、侵食量を支配する降雨の目安として、法面整形から測定までの期間の、この強度を上回る降雨の、平均強度と延べ時間を求めると、斜面Ⅰが 0.32 mm/min で 2146 分、斜面Ⅱ、Ⅲが 0.34 mm/min で 424 分となる。

先に述べたように、溝幅は流路間隔の 15%、流水幅はさらにその約半分であるから、この降雨が、流路の集水幅の 7.5% の部分に集中して流下するものとして摩擦速度を計算し、Fig. 18 の関係より、流路部分の侵食深を求めれば、斜面Ⅰでは 64 cm、斜面Ⅱ、Ⅲでは 16 cm となる。これを斜面幅

3) 粘性流路における縦断方向の底面擾乱の安定性について、2次元漸変流モデルによる線型解析を行い、常流においては安定、射流においては不安定という結果を得た。また、不安定の場合、擾乱の伝播方向は上流向きである。

一方、実験によれば、安定・不安定の区分は上の結果と矛盾しないが、伝播方向は必ずしも明確でない。

4) 実験によれば、蛇行波長は通水初期においてほぼ定まり、その後、蛇行幅や蛇行長が増加するが、ある程度蛇行が発達して、屈曲率が3程度になると、短絡を生じるため、それらにも上限値が存在する。蛇行流路の流心線の数式による表現としてよく用いられる、sine generated curve を用いれば、これらの現象を定性的に説明することができるが、定量的な評価も行うには、さらに、流路幅を考慮した、帯状のものとしての流路形状モデルが必要である。

5) 流路の縦断形状特性と平面形状特性は、独立したものではなく、互に影響を及ぼし合っている。たとえば、勾配の大きな斜面において、階段状の縦断形が発達すると、水流の蛇行は段落の部分で断ち切れ、規則的な発達を妨げられる。しかしながら、水理条件による、それらの流路形態の領域区分を行うには至らなかった。

6) 流路の発達過程において、激しい流況の変化があるにもかかわらず、侵食速度は、初期を除くとさほど変化していない。このことは、斜面上に一旦流路が形成されたあとは、流路配列が変化しても流出土砂量がほとんど変化しないこととあいまって、注目に値する。

7) 造成地の裸地斜面では、たとえ短期間といえども、その間に強雨があれば、容易に侵食が進行し、下流への土砂流出ならびに、斜面自体の維持上の問題を惹起する。この問題に対処するため、従来は主に、経験的な手法によって、侵食量の推定がなされてきたが、これに科学的な根拠を与え、一般化をはかるべく、現地資料と実験に基づいた、土砂水理学的な侵食量算定法を提示した。

本研究を遂行する上で、3次元位置測定器の製作においては、京都大学防災研究所宇治川水理実験所、今井繁一技官、ならびに山口恒二技官に大変お世話になり、また、現地調査や実験にあたっては、大学院学生藤田学君、ならびに工学部学生福地雄一郎君の協力を得た。ここに記して、深甚の謝意を表する。

なお、本研究の一部は、昭和51年度文部省科学研究費（一般研究 C）の補助を受けたものである。

巻 考 文 献

- 1) 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 ——, 京大防災研究所年報, 第18号 B, 1975, pp. 513-528.
- 2) 芦田和男, 沢井健二: 裸地斜面における流路の形成過程に関する研究 (2) —— 流路の横断面形状 ——, 京大防災研究所年報, 第19号 B-2, 1976, pp. 329-343.
- 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, 京大防災研究所年報, 第17号 B, 1974, pp. 571-584.
- 4) 椿東一郎, 斎藤隆: 流れによる Sand Wave の発生限界, 九大工学集報, 1967.
- 5) 高山茂美: 河川地形, 共立出版, 1974, pp. 217-222.
- 6) Langbein, W.B. and L.B. Leopold: River Meanders—Theory of Minimum Variance, U.S.G.S. Professional paper 422-H, 1966.
- 7) 池田駿介, 日野幹雄, 吉川秀夫: 河川の自由蛇行に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, No. 255, 1976, pp. 63-73.
- 8) 都市水文委員会: 都市域における水環境および都市水文に関する技術的問題, 土木学会関西支部講習会テキスト, 1975, pp. 111-131.