

地面浸食に関する二、三の水理学的考察

准員 土屋 義人

SOME HYDRAULIC CONSIDERATIONS ON THE WATER EROSION OF LAND SURFACES

By Yoshito Tsuchiya, C.E. Assoc. Member

Synopsis: In this paper, the author makes some considerations for water erosion of land surface mainly, based on the data observed for applications of the contour trench method on the hillside in our country. He supposes the phenomenon of water erosion is developed by the tractive force of rain water flow including the effect of rain drops. Some experiments for the law of resistance to thin sheet flow on the land surfaces are attempted to present the rate of water erosion in dimensionless form. By the above treatment, an experimental formula for the rate of water erosion is proposed, and, moreover, some considerations on the soil detachment and the transportation by rain water flow are made on the basis of the results.

要旨 本論文はわが国の山腹に対する等高線壕工法の適用に関して調査した資料にもとづき、主として地面浸食に関するものについて考察したものである。この雨水流による地面浸食の現象を雨滴の効果を含めた雨水流の掃流力によつて進行するものと考え、実測資料について浸食土砂量を無次元表示するために、土砂面における流れの抵抗法則に関する若干の実験を行つた。以上の取り扱いによつて、浸食土砂量に関する無次元化した実験公式をうるとともに、さらに雨水流による土砂の剝離と輸送について考察した。

1. 緒言

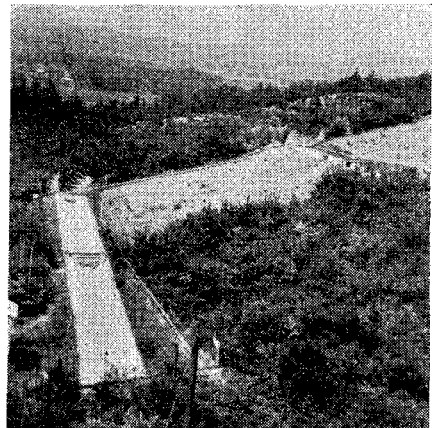
山腹砂防としての等高線壕工法が、建設省によつて岐阜県多治見市の山腹に施工されて以来、この工法のわが国の山腹への適用に関して、詳細な調査が行われてきた¹⁾。

この工法は降雨あるいは降雪を地面に吸収させることによつて、雨水流による地面浸食を防ぎ、表土の湿潤状態を良好にして、すみやかに草木を成育させるのが主要な目的である¹⁾。この場合壕の大きさを草木の成長に関連させて合理的に決定するためには、雨水流による地面浸食土砂量を推定して、壕の機能が終局に達したときに、草木が十分成長しているように決定するのが妥当な一つの方法であろう。このためには、雨水流による地面浸食の問題を水理学的に解明しなければならないが、とくに土砂の剝離現象をとまなう場合には、この浸食過程を量的に解析することは困難な問題であつて、これまで多くの人々によつて研究されて得られた成果がお互に十分な関連性をもたないのは、こうした理由によるわけである。

著者らはすでに水滴による地面浸食機構に関して、詳細な実験を行つて多くの興味深い諸結果を得たが²⁾、さらにまた雨水流による土砂の剝離と輸送の問題に関しても実験を行い、地面浸食の問題を水理学的に解明する上に重要な二、三の基礎的方針を明らかにすることができた³⁾。たとえば、一樣流れによる土砂の剝離量を無次元表示することに成功し、その結果流れの掃流力は土砂の剝離現象に対して、きわめて敏感に作用するということが見出されている。

つぎに述べる研究は、上記調査のうち主として地面浸食に関する資料にもとづいて、若干の水理学的考察を行つたものである。著者は前論文³⁾と同様に、雨水流による地面浸食の問題を取り扱うにあつて、まず土砂の剝離と輸送ということに注目することにした。そして、これらの現象は雨滴の効果を含めた雨水流の掃流力によつて進行するものと考え、前論文と同じ無次元表示を用いることによつて、実測資料を整理しようと試みたわけである。この場合、土砂面における流れの抵抗法則を知

写真—1 試験地 (第2斜面付近)



*名古屋工業大学助手，工学部土木工学教室

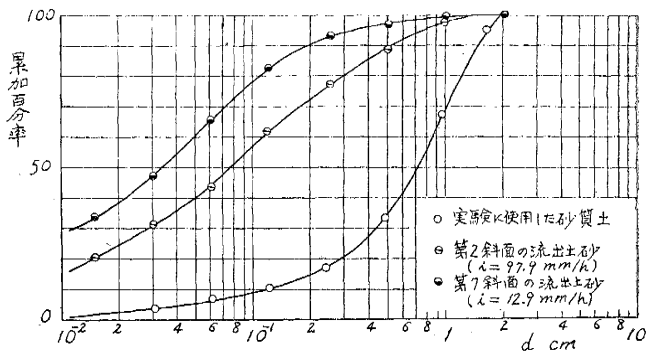
る必要があるわけで、これに関して二、三の実験を行つたので、まずその結果について述べる。

2. 土砂面における流れの抵抗法則に関する実験およびその考察

土砂面を流れる雨水流を平均的に見て考察する場合、どのような摩擦抵抗係数を用いるべきかについて、つきに述べるような実験および実測を行つた。

1) 実験方法 多治見市の山腹の表土を5cmの正方形断面、長さ2.6mの合成樹脂板製水樋につめて、十分長い間屋外に放置し、これに水を流して流量、水温、勾配および平均流速を測定することによつて、摩擦抵抗係数と Reynolds 数との関係を求めた。水深がきわめて小さく、また土砂面の凹凸がはげしいことから、直接水深を測定することが困難であつたので、平均流速を測定することによつたわけである。その方法としては食塩水法を採用し、その測定にあつて水樋の定められた断面において3回測定し、それらの平均値をもつて所要の平均流速とした。この実験において、とくに土砂面に近い部分の土砂について、その粒度組成を調べた結果が図一-1である。

図一-1 実験に使用した砂質土および流出土砂の粒径加積曲線



また、多治見市の山腹に設けられている等高線壕工法の調査に関する試験地において、同様の実験を試み、これらの結果を上記の実験によるものと比較した。

2) 実験結果とその考察 摩擦抵抗係数 A は摩擦速度を u^* 、平均流速を u_m 、勾配を $\sin \theta$ 、流量を q 、重力の加速度を g とすれば、2次元等流の場合

$$A = 2 \left(\frac{u^*}{u_m} \right)^2 = \frac{2g \sin \theta}{u_m^3} q \quad \dots \dots \dots (1)$$

であり、また Reynolds 数 R_e は

$$R_e = \frac{u_m h}{\nu} = \frac{q}{\nu} \quad \dots \dots \dots (2)$$

によつてあらわされる。ここに ν は動粘性係数である。水樋の幅に比較して水深が大きい場合には、当然側壁の影響が問題となるわけであるが、著者の行つた実験においては、水樋の幅に較べて水深がきわめて小さいので、2次元として取り扱つて十分であると考えられる。(1) および (2) 式を用いて実験結果を整理したものの一例が図一-2である。

一方、滑面水路における層流の抵抗法則は

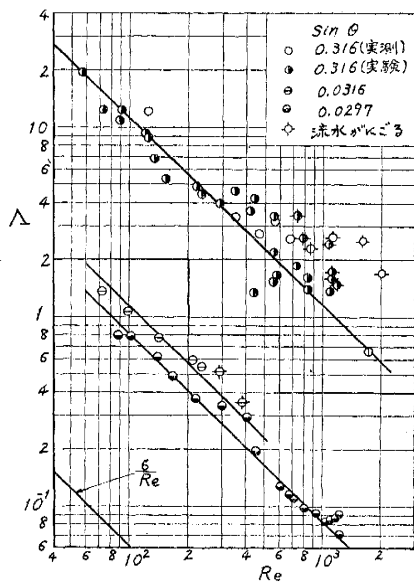
$$A = 6/R_e \quad \dots \dots \dots (3)$$

であらわされるが、これはまた粗面水路の場合においても、水深が砂粒の大きさに比較して十分大きいような場合には、よく一致するようである⁴⁾。しかし、著者が行つた実験のように水深がきわめて小さい場合には、図一-2 から明らかなように、摩擦抵抗係数は (3) 式であらわされる値よりかなり大きくなるようである。これは、土砂面に現われている砂粒の平均的な大きさと水深との比、土砂面の凹凸などによる水面の変動あるいは表面張力などが流れに影響するためであろうと考えられる。しかし、図一-2 から明らかなように勾配が一定の場合には、Reynolds 数の小さい範囲において比較的よくつぎの関係が成立するようである。

$$A = \beta/R_e \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに β は無次元量であつて、上述のような理由から一般には砂粒の平均的な大きさを d としたとき h/d 、Froude 数 F_r および Weber 数 W_e などの関数と考えることができるが、実用上ここでは一応これらの効果を勾配によつて代表するものと考えて、実験結果を整理したものが図一-3である。かなり実験結果がちらばつているが、こ

図一-2 摩擦抵抗係数 A と Reynolds 数 R_e との関係の一例



れは上述した諸要素の流れにおよぼす影響が勾配以外に直接的に作用するであろうことと、それぞれの実験について、若干土砂面の状態が相違するためであろう。

つぎに以上の結果と従来 Nikuradse および岩垣博士⁴⁾ などによつてそれぞれ粗面管路および開水路の抵抗法則に因して行われた結果との関連について考察してみよう。すでに述べた考察により、摩擦抵抗係数に対して、つぎの関係が考えられる。

$$A=f(R_e, h/d, F_r, W_e) \dots \dots \dots (5)$$

このうち最も A に対して支配的に影響するものとして、 R_e のほかに h/d をあげることができるので、(5) 式の関係を

$$A=f_1(R_e, h/d) \dots \dots \dots (5')$$

とあらわして、 h/d の A におよぼす効果について考察することにする。そのために R_e を一定として、 A と h/d との関係を実験結果から求めるために、 d として図-1から求められる中央粒径 d_{50} を用い、(3) 式による A と Nikuradse らの実験による A_1 との比 A/A_1 をとつた結果が図-4である。この図から明らかなように、 A/A_1 は h/d の増加とともに急速に減少して1に近づくようであり、また R_e が小さいほど実験結果がちらばつてゐるのは、 F_r および W_e などが影響するためであろう。

なお、実斜面における実測結果を以上と同様に整理して、図-2に示した。この結果から明らかなように、斜面勾配を同じくして実験した両者はかなりよく一致しているようであつて、このことは実験に使用した土砂面が十分現地の実斜面の状態を再現しえていたことを意味しているわけである。

3. 浸食土砂量の無次元表示

1) 基礎的資料 現地の試験地には裸地および被植地からなる調査用の斜面が合計 11 あり、斜面の長さは約 10~30 m で、その幅は約 10 m であり、その平均勾配は $\sin \theta = 0.30 \sim 0.37$ 程度である。これら斜面の下流端にそれぞれコンクリートまたは素掘りの梯形断面の壕が設けられて諸調査が行われているが、この研究において取り扱つた資料は、斜面の長さ 9.8 m、面積 104 m² および勾配 $\sin \theta = 0.316$ なる第 2、第 7 の二つの裸地斜面について、主として地面浸食の問題を中心に調査を進めて得られたものである。その調査および実測が行われたのは、昭和 31 年の夏期を中心とする約半年間である。

(i) 流出量と降雨強度との関係 地面浸食に関係する流れは表面流であるから、雨水の流出量を測定するにあつては、とくに表面流出量が測定でき、十分な精度をもつて各時間ごとの流量が記録されなければならない。このために、建設省多治見工事事務所において、かなり良好と考えられる写真-2のような装置によつて、電氣的に記録させる方法がとられた。このようにして得られた実測結果のうち、比較的一樣と考えられる降雨について、平均降雨強度 i mm/h と表面流出量 q , cm²/sec との関係を求めたものが図-5である。この図には主として第 7 斜面における実測結果が示さ

写真-2 測定装置の一例

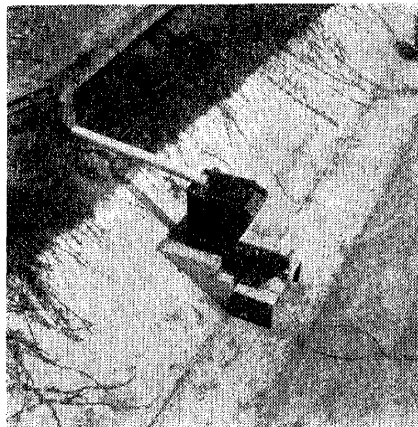


図-3 β と $\sin \theta$ との関係

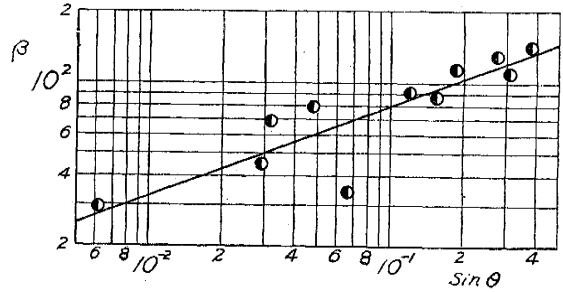


図-4 A と h/d_{50} との関係の一例

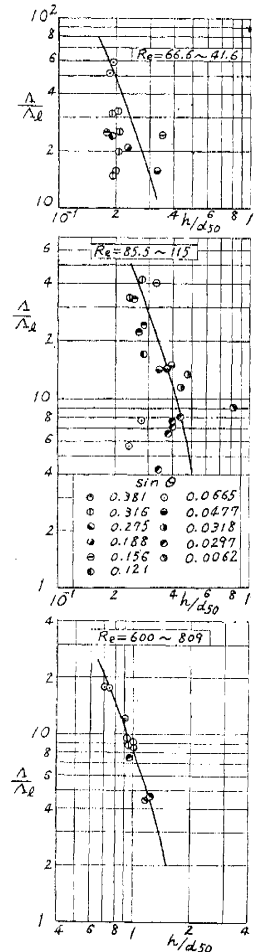


図-5 表面流出量と降雨強度との関係

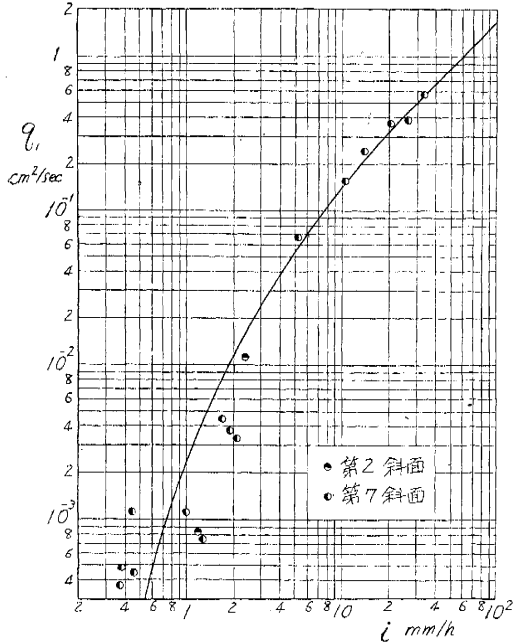
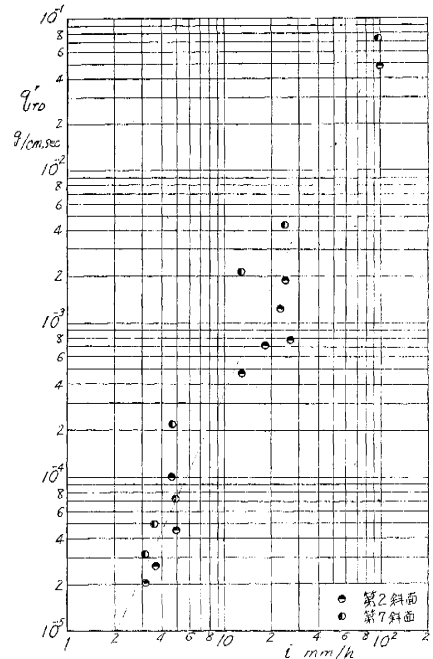


図-6 浸食土砂量と降雨強度との関係



れているが、これは実測の都合上第2斜面と同時に資料をうる事ができなかつたためである。第2斜面における実測値は2点にすぎないが、これらの結果に関する限り、両者はほとんど一致するようである。これらについてさらに詳しく議論するためには、多くの実測が行われなければならないが、表面流出量に関してはあまり相違しないものと考えられる。

(ii) 浸食土砂量と降雨強度との関係 地面浸食の問題を水理学的に考察するにあたって、一降雨ごとに測定された浸食土砂量について議論することは、多くの複雑な要素が介入してその進展を困難ならしめる。従つて、著者は降雨の状態としてなるべく一様に十分長い間降つたものを採用することにした。一降雨中30~60分ごとに浸食土砂を採取すると、この程度の時間においては、降雨はほぼ一様とみなされる場合が少なくなかつた。このようにして実測された結果のうち、降雨強度の変化の比較的大きい二、三の資料は省略することにした。

以上のようにして得られた実測結果を、降雨強度との関係としてあらわしたものが図-6である。これはすでに W.D. Ellison²⁾などによつて得られている結果と同様の傾向を示しているようであるが、その実測結果はかなりちらばつており、しかも第2斜面と第7斜面とは大きい差がみとめられる。

(iii) 流出土砂の大きさと降雨強度との関係

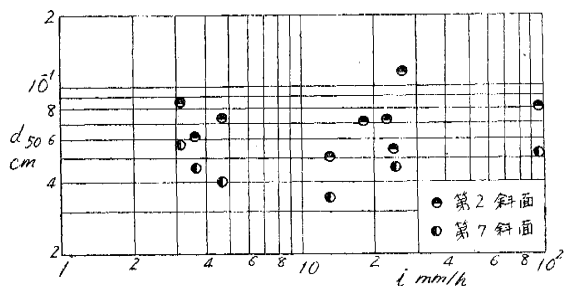
図-1に一例を示したように、流出土砂についてそれぞれ粒径加積曲線を作り、それより中央粒径を求めて降雨強度との関係としてあらわしたものが図-7である。実測結果は非常にちらばつており、これら両者の関係は明らかでないようである。

2) 浸食土砂量の無次元表示 すでに述べたように、浸食土砂量あるいは流出土砂の大きさと降雨強度との関係においては、実測結果がかなりちらばつて、あまりはつきりした傾向さえ見出しえない場合もあつたわけであるが、これはその整理の方法が水理学的に十分合理的でないためと考えられる。このために著者はすでに発表した一様流れによる地面浸食の場合³⁾と同様に、

$$\frac{q_{TD}}{u^*d} = F \left\{ \frac{u^{*2}}{(\sigma/\rho - 1)gd} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

なる関係を採用することにした。ここに q_{TD} は浸食土砂量、 σ/ρ は土砂の比重であり、 u^* は流れの摩擦速度で

図-7 流出土砂の大きさと降雨強度との関係



ある。

雨水流の場合は一様流の場合と相違して、地面浸食に対する流れの作用のほかに、雨滴の衝撃作用があるわけであつて、この作用の定性的な多くの興味深い結果については、すでに著者らが明らかにしたとおりであるが²⁾、これを定量的に解析することはかなりむずかしい。この研究の主な目的の一つは、雨水流による地面浸食土砂量を無次元表示することによつて、一つの合理的な実験式をつくることであり、このような方法を他の土砂について行うことによつて、かなり地面浸食の問題の解明に寄与しうるのであると考へたわけである。従つて、ここでは雨滴の効果は雨水流の掃流力に含まれるものとして考へて議論することにしよう。

以下流れはすべて2次的に取り扱い、かつ平均的にみた場合の水理量を対象として考へていくものとする。このように実斜面における流れの状態を単純化することは、かなり議論の対象となるであろうが、著者の取り扱つた実斜面においては、あまりリルまたはガリが発達していないので、計算の遂行を可能ならしめるためには妥当な方法であろうと考へられる。さらに一降雨またはその一部分において、流れがほぼ定常となつたときについて考へることにし、(6)式の関係をあらわすにあつては、斜面に沿う平均の摩擦速度を用いることにする。

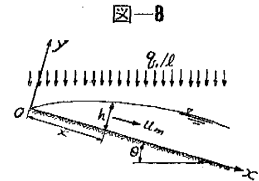


図-8

いま、座標を図-8のようにとり、図-3において $\sin \theta = 0.316$ に対応する β の値を求めて流れの抵抗法則を次式であらわす。

$$A = \frac{124 \nu l}{q_1 x} \dots \dots \dots (4')$$

つぎに、流速分布に対する補正係数を $\alpha = 6/5$ とし、さらに雨滴の流れにおよぼす効果を省略すれば³⁾、水面形をあらわす方程式はつぎのようにならされる。

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\sin \theta - 62 \frac{\nu q_1 x}{gh^3 l} - \frac{12 q_1^2 x}{5 gh^2 l^2}}{\cos \theta - \frac{6 q_1^2 x^2}{5 gh^3 l^2}} = \frac{F_1(h, x)}{F_2(h, x)} \dots \dots \dots (7)$$

ここに l は斜面の長さである。(7)式を適当な境界条件のもとに数値積分するか、あるいは等傾斜線法などによつて図式積分することによつて、水面形を求めることができるが、抵抗法則として(3)式を用い路面流水の解析を行つた結果によれば³⁾、水面形は(7)式の分子を用い

$$F_1(h, x) = 0 \dots \dots \dots (8)$$

で十分近似できるよである。従つて、ここでは水深がきわめて小さいことから、計算を行うにあつて、(8)式で水面形を近似させることにすれば、簡単に水深 h と x との関係を求めることができる。また摩擦速度は(1)および(4')式から

$$u^* = \frac{\sqrt{62 \nu q_1 x / l}}{h} \dots \dots \dots (9)$$

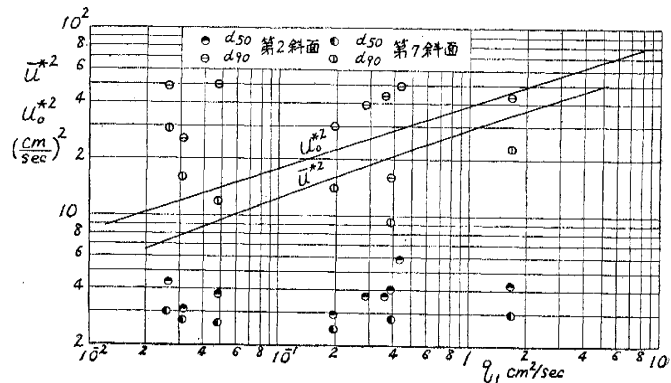
であらわされるから、斜面に沿う平均の摩擦速度 \bar{u}^* は次式で求めることができる。

$$\bar{u}^* = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{\sqrt{62 \nu q_1 x / l}}{h} dx \dots \dots \dots (10)$$

(8)および(10)式において、実斜面に対応した数値として $l = 9.80$ m, $\sin \theta = 0.316$ および $\nu = 0.01$ cm²/sec

を用い、 \bar{u}^{*2} と q_1 との関係を求めたのが図-9である。またこの図には、表面流出量に対応した流出土砂について、岩垣公式⁷⁾を用いて求めた限界掃流力の関係が示されている。この場合、以上のように流れを平均的に考へて求められた掃流力に較べて、流出土砂の大きさとして d_{50} を採用すると限界掃流力が十分小さくあわれているが、流出土砂の大きいものを代表する d_{90} を採用すると限界掃流力がかなり大きくなつていくことがわかる。

図-9 \bar{u}^{*2} および $u_{0.9}^{*2}$ と q_1 との関係



表面流出量と降雨強度との関係として、第2および第7斜面ともに図-5にて実線で示されている関係を用い、以上の結果から実測資料について、 q_{TD}/\bar{u}^*d_{50} と $\bar{u}^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd_{50}$ との関係を求めたものが図-10である。実測資料としてはかなりよくまとまっております整理されているようで、さらに図-6および図-7と比較することによつて、浸食土砂量を(6)式の関係によつて無次元表示することは、十分水理学的に有意義であるといふことができるであろう。なお図-6と図-10とは実測値の数が若干相違しているが、これは土砂の大きさに関する資料が欠けていたものを図-6の結果から除いたためである。

一樣流れによる地面浸食の場合と同様に、雨水流による浸食土砂量は、流れの掃流力にかなり敏感であるといふことができる。いま図-10に示すように、両対数で表示した q_{TD}/\bar{u}^*d_{50} と $\bar{u}^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd_{50}$ との関係を直線であらわすことにすれば、

$$\frac{q_{TD}}{\bar{u}^*d_{50}} = 0.678 \left\{ \frac{\bar{u}^{*2}}{(\sigma/\rho-1)gd_{50}} \right\}^4 \dots\dots\dots (11)$$

が得られる。以上のように地面浸食土砂量を無次元表示することは、この問題を定量的に解明するための重要な基礎的方針を提供するものと考えられ、このような取り扱いによる今後の詳細な実験ならびに実測が望まれるところである。

なお、以上の諸結果は昭和31年の夏期を中心として行われた実測資料にもつて考察されたわけであるから、もちろんこの山腹斜面について普遍的に成立する結果ということとはできない。とくに、実斜面は土砂の流出とともに次第にその状態を変えていくわけであるから、当然図-5および図-10などの関係はそれに応じて若干相違してくるであろう。このような問題は雨水流による浸食土砂量を推定する場合、とくに等高線掘工法の壕の埋没を推定するにあたり、きわめて重要な問題の一つであつて、今後の詳細な調査実測にまつところが多い。

4. 土砂の剝離と輸送についての考察

雨水流による地面浸食の問題のうち、土砂の剝離と輸送のいずれの過程が支配的であるかということとは、この問題の水理学的な考察、とくに浸食土砂量を推定する場合、きわめて重要なこととなるわけである。このために、山腹斜面の下流端における平均的な掃流力を求め、これを用いてすでに述べた浸食土砂量を(6)式の関係によつ

図-10 q_{TD}/\bar{u}^*d_{50} と $\bar{u}^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd_{50}$ との関係

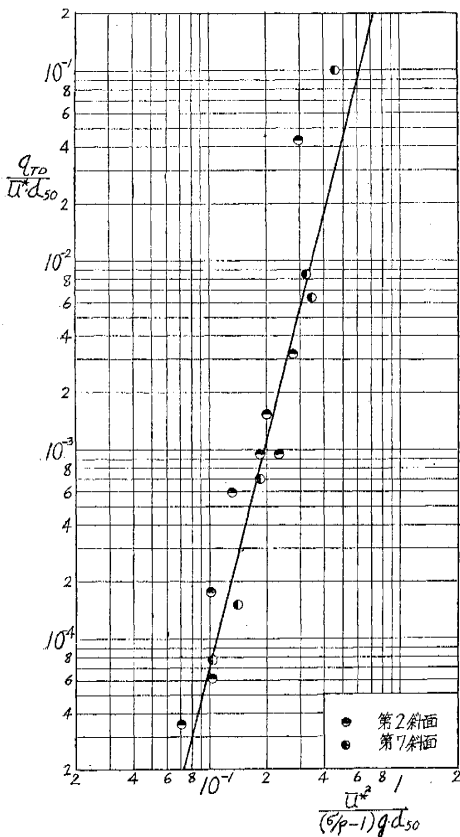
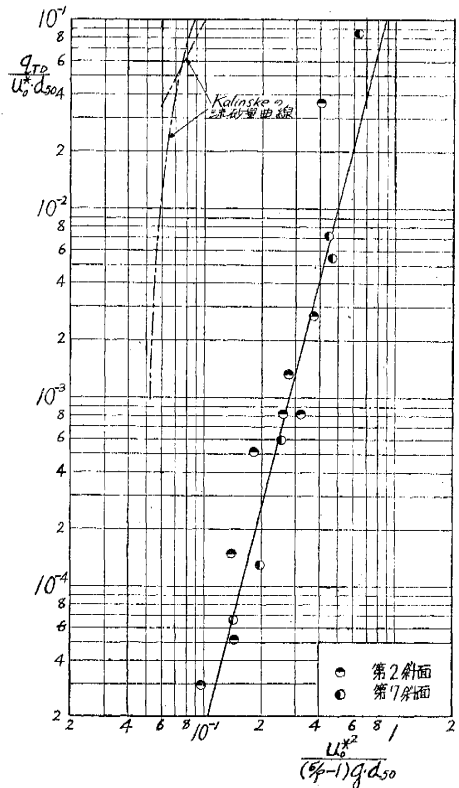


図-11 $q_T/u_0^*d_{50}$ と $u_0^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd_{50}$ との関係



て表示し、雨水流の輸送能力と比較することによろ。この場合、雨水流による土砂の輸送能力は、著者らによつて比較的勾配の急な場合に対して行われた実験結果によれば³⁾、一樣流の場合より若干小さいようであり、流砂量に関する A.A. Kalinske⁵⁾ の研究成果には近いようである。

流れの抵抗法則として(4')式を用いれば、斜面の下流端における表面流出量に対応した等流と考えた場合の摩擦速度 u_{0*} はつぎのようにならわされる。

$$u_{0*} = (g \sin \theta)^{1/3} (62 \nu q_1)^{1/6} \dots \dots \dots (12)$$

実斜面における数値として、 $\sin \theta = 0.316$ 、 $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$ および $g = 980 \text{ cm}/\text{sec}^2$ を(12)式に用い、 q_1 との関係を求めた結果を図-9に示した。前節で述べたように流出土砂の大きさとして d_{90} をとつた場合、その限界掃流力は以上のようにして求められた下流端における掃流力よりかなり大きくあらわれているが、これは実斜面に若干リルまたはガリが発生しているため局部的に掃流力が增大することのほか、雨滴の衝撃作用ならびに転波列などの影響が付加されたものと考えられる。この結果を用いて図-10と同じように表示して、Kalinskeの流砂量曲線と比較したものが図-11である。

雨水流による地面浸食の場合には、斜面の上流から土砂が剝離して、次第にその量が増していくわけであるが、それと同時に流量が増加するため、下流端においては図-11から明らかのように、実測値は Kalinske の流砂量曲線より非常に小さくあらわされている。このことは、斜面の下流端における浸食土砂量は流れの輸送能力よりきわめて小さいことを示しているわけである。従つて、雨水流による地面浸食土砂量を支配するものは、著者の取り扱つた多治見市の山腹斜面に関する限り、土砂の剝離の過程が支配的であるといふことができるであろう。

5. 結 語

以上雨水流による地面浸食の問題に関連して、土砂面における流れの抵抗法則に関する実験ならびにこれを用いて実測資料による地面浸食土砂量を、雨水流の掃流力に関係づけて無次元表示した結果について述べるとともに、これらの結果はこの問題を水理学的に解明していく上に重要な基礎的資料とその方針を提供するものであることを論じた。

この研究によつて明らかにされた主な事項を要約すれば、つぎのようである。

(1) 水深がきわめて小さい場合、土砂面における流れの摩擦抵抗係数は Reynolds 数があまり大きくなければ、滑面水路における層流の抵抗法則と同様の傾向を示すが、その値はかなり大きく、その支配的な要素として h/d をあげることができる。

(2) 雨水流による地面浸食土砂量は、雨水流の掃流力に関係づけることによつて無次元表示することができ、その結果著者の取り扱つた山腹斜面について一つの実験式がえられた。

(3) 雨水流による土砂の剝離と輸送の過程については、流出土砂量を雨水流の輸送能力と比較することによつて、著者の取り扱つた山腹斜面に関する限り、剝離の過程が支配的であるということが明らかにされた。

最後にこの研究に対して終始御指導を賜つた京都大学石原教授および岩垣助教授ならびに御教示を仰いだ名古屋工業大学橋本教授に深く感謝するとともに、実測資料を得るにあつて多大の御援助をいただいた建設省多治見工事事務所長毛利三郎氏および実験ならびに実測に熱心な助力を与えられた九州電力 織田幸市郎氏に謝意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) 松川恒雄：山腹砂防工法としての等高線壕工法について、新砂防，16，昭.30.1，pp.21~24.
- 2) 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，昭.31.6，pp.55~63.
- 3) 岩垣雄一，土屋義人：雨水流による土砂の剝離と輸送について，土木学会論文集，第51号，昭.32.12，pp.34~40.
- 4) 岩垣雄一：雨水流による地面浸食機構に関する基礎的研究，昭.30.9.
- 5) W.D. Ellison：Studies of Raindrop Erosion, Agri. Eng., Vol.25, April and May, 1944, pp.131~136, pp.181-182.
- 6) 岩垣雄一：薄層流に関する研究(第2報)，土木学会誌，第35巻，12号，昭.25.12，pp.1~5.
- 7) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究，(I) 限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，昭.31.12，pp.1~21.
- 8) H. Rouse：Engineering Hydraulics, 1949, pp.798-799.

(昭.33.3.24)