

雨水流による土砂の剝離と輸送について

正員 岩 垣 雄 一*
准員 土 屋 義 人**

ON THE DETACHMENT AND THE TRANSPORTATION OF SOIL BY RAIN WATER FLOW

*Dr. Eng., Yūichi Iwagaki, C.E. Member and
Yoshito Tsuchiya, C.E. Assoc. Member*

Synopsis :

In studying the mechanism of water erosion of land-surfaces by rain water flow, it is necessary to evaluate experimentally the relations between the factors related to the phenomena of soil detachment from land-surfaces and transportation of detached soil. In this paper, erosion of land-surfaces consisting of sand or sandy soil by stream flow is treated. For this approach, hourly variations of the rate of detachment of soil, the discharge of surface flow and grain diameters of transported soil, and rates of sediment transportation by rain water flow are measured. The experimental results are discussed comparing with those obtained by some authorities. Moreover, a dimensionless expression on the rates of detachment of soil is proposed.

要 旨 雨水流による地面浸食機構を研究する場合には、地面からの土砂の剝離の問題と剝離された土砂が輸送される問題とについて、各諸要素との関係を実験的に明らかにする必要がある。この論文は、砂あるいは砂質土からなる地面の流れによる浸食を取扱つたもので、土砂の剝離量、表面流量および流出土砂の粒径の時間的变化、あるいは雨水流による土砂の輸送量が測定された。その実験結果を従来の諸研究者によつて得られた成果と比較して考察し、さらに土砂の剝離量に関する無次元表示を提案した。

1. 緒 言

地面に雨が降つてその強度が地面の浸透能より大きければ、雨水は地表面を流下して次第に河川へでてくる。こうした雨水流は必然的に地表面の浸食をともなうものであつて、この浸食現象は農地や山腹とか路面の保全に対して極めて重要な問題であることはいうまでもない。最近とくにやかましく叫ばれている治山治水計画において、山地からの土砂の流出をいかに防ぐかということが重要な問題の一つとなつており、その合理的な対策の確立は地面浸食機構の科学的な解明にまつところがはなはだ多い。

W.D. Ellison¹⁾は土壌浸食問題を研究する上に基礎となるものは、浸食作用力による土壌物質の剝離 (detachment) と輸送 (transportation) の過程であるといつている。最も剝離しやすいものは砂であつて、ロームおよび粘土の順となり、一方最も輸送されやすいものは粘土であつて、ロームおよび砂の順とみなされている¹⁾。従つて粘土からなる地表面上に水を流した場合、流水は大きい輸送能力をもつが、地表面からの粘土物質が剝離しにくいから、実際には浸食はほとんど起らない。しかしこの流れに流水の剝離作用力以外の剝離を起さしめる作用が働くと、浸食は急速に進行し、流水のもつ最大輸送能力に等しい量まで剝離物質を輸送すると考えられる。剝離を起させる作用としては、まず流水の剝離作用力と雨滴の有する衝撃力、および流水中に加えられた土砂が流下するときに生ずる地面との摩擦力などがある。このうち雨滴の有する衝撃力については、すでに著者らによつて人工水滴を用いた浸食機構に関する詳細な実験が行われ、多くの興味深い結果がえられている²⁾。本論文では、以上述べたように土砂の剝離と輸送という概念に基づいて、とくに雨水流の浸食作用力 (剝離作用力) と雨滴が土砂の剝離および輸送に及ぼす効果などについて、若干の実験とその考察を行つた結果について述べる。

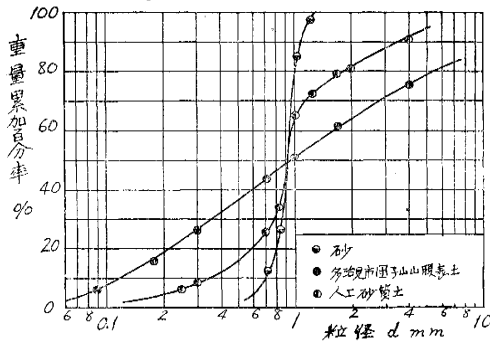
2. 土砂の剝離に関する実験とその考察

雨水流による土砂の剝離の過程について検討するにあたり、まず土砂の剝離に及ぼす流水の作用を知るために一様流れの場合について実験し、さらに人工降雨を用いて雨滴の土砂の剝離に及ぼす効果について若干の実験を行つた。

* 工学博士、京都大学助教授、防災研究所

** 名古屋工業大学助手、土木工学教室

図一 実験に使用した土砂のフルイ分け加積曲線
Fig. 1 Sieve analysis curves of used sand and sandy soils.

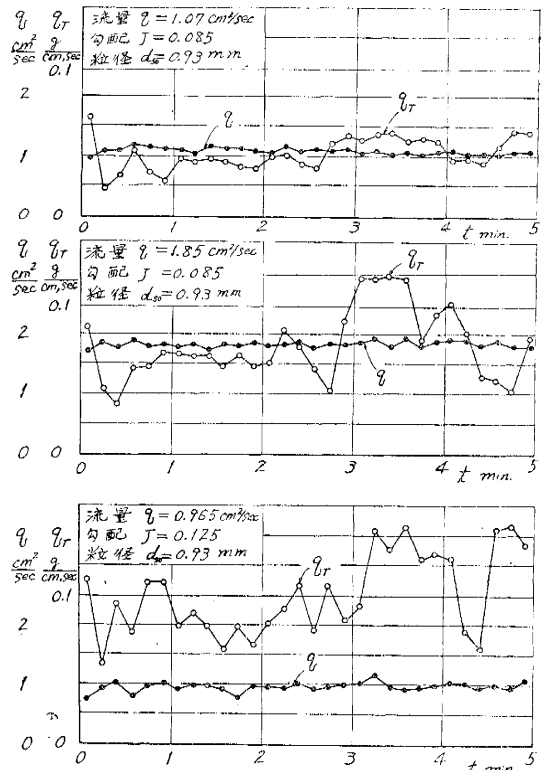


(1) 一様流れによる土砂の剝離

(i) 砂の場合 長さ約 3.0 m, 幅 20 cm, 深さ 10 cm の木製水樋に図一に示されるような比較的均一と考えられる中央粒径 0.93 mm の砂をしき, これに水を流して下流端で流砂量 (剝離量) を測定した。その結果の一例が図二に示されている。この場合, 流れの集中は顕著に起つてガリが発生し, このガリは蛇行して安定しないため流砂量は時間の経過に従つて変動する。図において, いずれの場合も水を流し始めたときに大きい流砂量を示しているのは, 流れが段波のような形をして進むために水面勾配が大きくなって, 流砂量が一時的に増大するためである。水を流し始めて約 2 分経過するまでは, ガリの発生は顕著ではなく, 流砂量もあまり大きい変動を示さないが, それ以後はガリの発生のために流砂量は大きく増減し著しい変動を示している。このことは, 勾配が大きいほどまた流量が大きくなるほど顕著にみられるが, 流砂量の時間的変動はほぼ同じ傾向を示している。下流端で測定した流砂量を支配するものは, 下流端付近の水量が支配的であると考えられるから, 上記の現象は上流側におけるガリの発達が下流に及び, 下流端の水量を変化させるものと解される。もしこのような変動が現われず, 一樣に水が流れたとすれば, 水を流し始めてから 2 分すぎ付近までの, 大きさ一定の流砂量を示すものと考えられ, 上述のようにガリの発生が顕著で, それに応じて流砂量の著しい変動があるということは, 砂がいかに剝離しやすいものであるかを示しているものといえよう。そして流砂量と水の流れ方とは相互に関連するものであるが, 砂の場合とはくに水の輸送能力に対応した流砂量をあらわすということが理解されるであろう。砂質地面や海岸の砂丘などが降雨または地下水の流出によつて浸食される過程は, ほぼ以上述べたような変化をたどつて, 一筋の流れとなつて発達していくものと考えられる。

(ii) 土の場合 長さ 3.5 m, 幅 20 cm, 深さ 10 cm の木製水樋を 2 つに区切つて幅約 10 cm とし, 図一に示されるような粒度組成をもつ多治見市田子山山腹表土を厚さ約 5 cm につめ, 約半年自然の状態を再現するため屋外に設置したのち, これに水を流して土砂の剝離に関する実験を行つた。まず, 剝離量の時間的変化は砂の場合と全く相違した傾向を示す。それは土の場合には, 土砂の剝離という現象が最も支配的なものとなるためであつて, 砂の場合のように流水の輸送能力のみに依存しないからである。その実験結果の一例を図三に示したが剝離量は水の流し始めにおいて, 最大となり時間の経過に従つて漸減し, やがて一定値に近づくような傾向をとることがわかる。このような時間的変化は R.E. Horton²⁾ の実験結果に近く, W.H. Gardner および C.W. Lauritzen³⁾ の実験結果とは, その傾向が相違している。また人工の土を用いた田中博士⁴⁾ の実験結果とも相違するようであつて, この点については後述するつもりである。剝離量が水の流し始めにおいて最大となるのは, 土砂面の初期状態によるものと考えられ, 一般に表面にある土砂は含水量その他の関係から剝離しやすくなるわけである。表面流量は水の流し始めにおいて若干小さくなるようであるが, ほとんど変化しないといつてよい。初期において表面流量が小さくなるのは, 土の浸透能が大きいためであつて, この浸透能は急速に減少していく

図二 流砂量および流量の時間的変化
Fig. 2 Hourly variations of the rate sediment transportation and the discharge of flow.



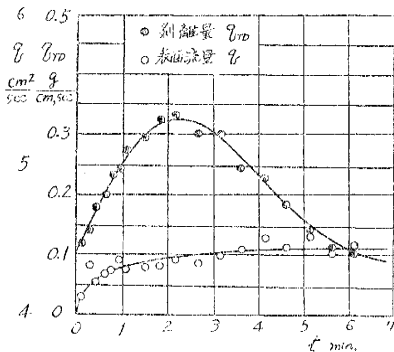
ものであることを示している。また図に示されている λ は 24 mesh 以上の剝離土砂量と全剝離量との割合であつて、時間の経過とともに次第に原土の $\lambda=52.8\%$ に近づく傾向を示し、この結果は田中博士によるものと同じである⁴⁾。このことは、剝離しやすい細粒の土砂がまず最初に剝離し、やがて大粒の砂粒が移動を開始するわけで、土砂が剝離するに従つて大粒の砂粒が浸食面に露出し、次第に移動しやすい状態になつていくことを考えれば、容易に説明されることである。

つぎに田中博士の試験による流出土砂量(剝離量)の時間的変化と著者らの試験結果との関連について考察してみよう⁴⁾。そのために、国子山山腹表土に (i) において使用した中央粒径 0.93 mm の砂を混入して、図-1 に示したような粒度組成をもつ砂質土を作り、これを同じ水樋の下流約 1.5 m の長さにつめて水を流し、剝離量の

時間的変化を測定した。その結果の一例が 図-4 である。これは田中博士の試験結果と同じ傾向を示しており、このことは自然土に砂を混入することによつて、その性質が変化し剝離しやすいものになつたためであらう。人工を加えた剝離しやすい土砂を水樋につめて表面をならすと、表面には比較的剝離しにくい粘土層が形成され、これが浸食される間は剝離量も少なく、この粘土層が剝離し層状浸食からリル状浸食へと移行して剝離量は増加していく。その過程において、側方浸食が顕著とみなされるときに剝離量は最大となり、やがてリル状浸食またはガリ状浸食に発達すると漸減してほぼ一定値に近づくものと考えられる。たとえば、築堤直後ののり面の浸食はほぼこのような過程をたどつてガリ状浸食へと発達していくのであらう。

図-4 剝離量および流量の時間的変化 (斜面の長さ 1.5 m)

Fig. 4 Hourly variations of the rate of soil detachment and the discharge of flow. (length of slope=1.5 m)



A. W. Zingg⁵⁾ と同様に、土砂の剝離量と斜面の長さとの関係を知るために行つた試験の結果が図-5 である。この場合の剝離量は、その時間的変化の状態において最終的に漸近した値をとつた。この土砂の剝離量は流水の本質的な剝離作用を知るためには極めて重要なものであつて、以下これについて考察していくつもりである。この図から、剝離量は斜面の長さの増大とともに、この試験の範囲内ではほぼ直線的に増加するように思われる。このことは著者

図-3 剝離量、粒径および流量の時間的変化 (斜面の長さ 3.5 m 勾配 0.316)

Fig. 3 Hourly variations of the rate of soil detachment, grain diameters and the discharge of flow. (length of slope=3.5 m inclination of slope=0.316)

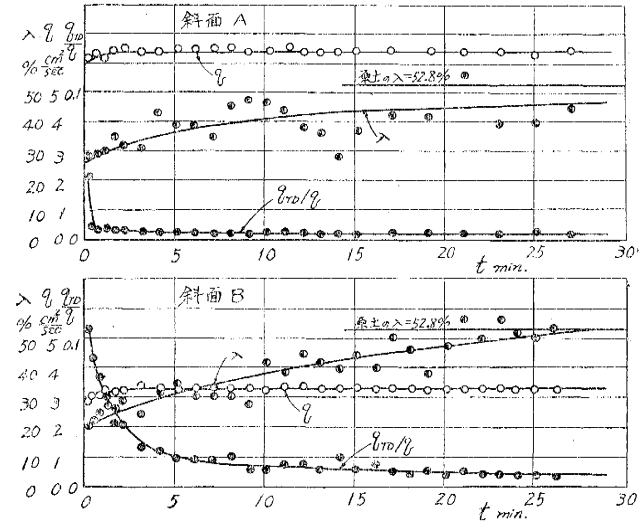


図-5 剝離量と斜面の長さとの関係

Fig. 5 Relation between the rate of soil detachment and the length of slope.

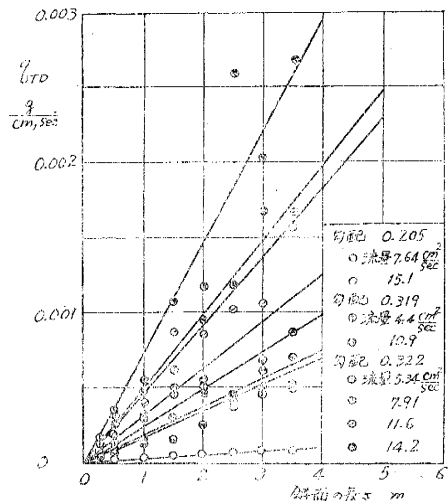


図-6 剝離量と勾配および流量との関係

Fig. 6 Relations between the rate of soil detachment and the discharge or slope.

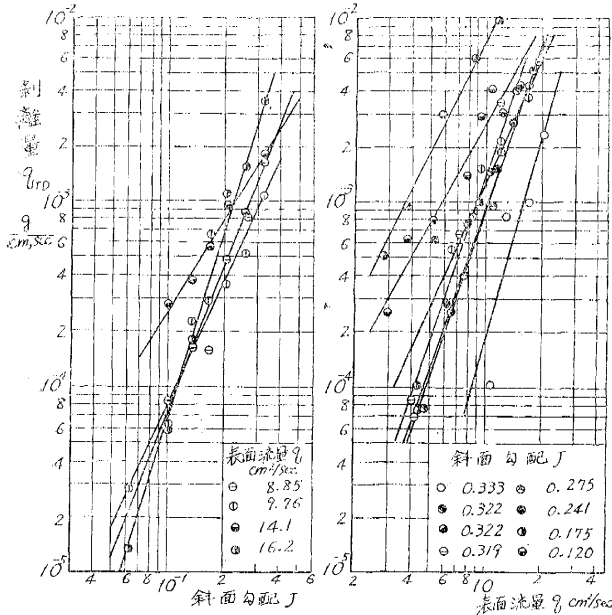
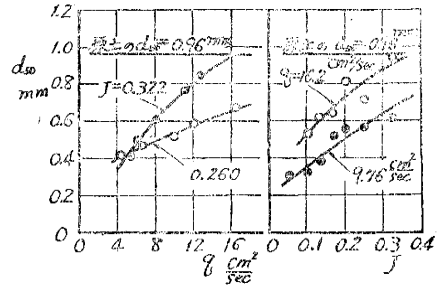


図-7 流出土砂の平均粒径と勾配および流量との関係

Fig. 7 Relation between the medium diameter of detached soil and the slope or discharge.

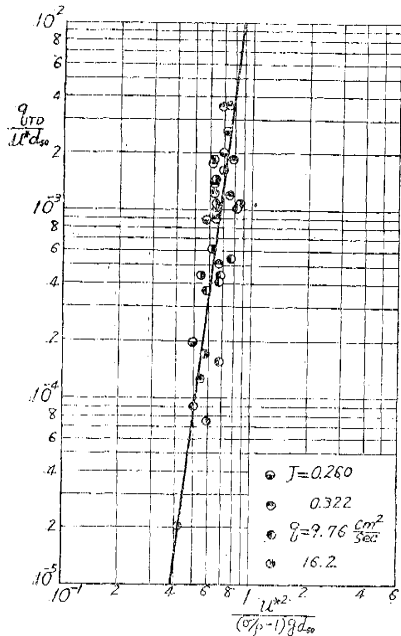


らが実験に使用した土が非常に剝離しにくい性質のものであることを意味している。土砂の剝離量と流水の輸送能力とが平衡するような斜面の長さを見出すためには、実験に用いた斜面の長さがまだ短いわけであり、このような状態を見出し系統的に議論することは極めて興味あることであるが、かなり困難な問題であろう。

また流れによる土砂の剝離量と斜面勾配および表面流量との関係をとりとまとめたものが 図-6 であり、流出した土砂の中央粒径と斜面勾配および表面流量との関係は 図-7 のようにあらわされる。なお 図-6 において斜面勾配の同じものが示されているにもかかわらず、実験結果が若干相違しているのは、それぞれ実験の日時が異なるために各実験において土の性質が変つていたためであろう。

図-8 q_{TD}/u^*d_{50} と $u^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd_{50}$ との関係

Fig. 8 Relation between q_{TD}/u^*d_{50} and $u^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd_{50}$



つぎに、流水による土砂の剝離の過程について二、三考察してみよう。斜面の長さが一定で、土砂の性質が時間的および場所的に変化しないような場合を取扱うことにすれば、流水による剝離量 q_{TD} は水深 h 、勾配 J 、土砂の粒径 d 、その比重 σ/ρ および重力の加速度 g の函数と考えられる。すなわち

$$q_{TD} = f(h, J, d, \sigma/\rho, g) \dots\dots\dots (1)$$

流水の剝離作用は主としてその掃流力が支配的であると考えられるから、(1) 式は A.A. Kalinske⁶⁾ の流砂量の表示と同様に

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

とあらわすことができる。ここに u^* は流れの摩擦速度であつて、等流の場合 $u^* = ghJ$ であらわされる。

すでに説明した実験結果のうち、剝離して流出した土砂の粒径が測定されている資料について、(2) 式の関係を調べてみよう。著者らの実験においては、水深の測定が困難であつたので、流量から逆算することにした。そのために Manning の平均流速公式を用いることにし、その粗度係数 n としては、著者の一人岩垣⁷⁾ によつて行われた流れの抵抗法則に関する実験結果から、土砂の粒径として $d_{50} = 0.96 \text{ mm}$ を用い $n = 0.013 \text{ sec} \cdot \text{m}^{-1/3}$ と推定した。この n の値は、実験の範囲内ではあまり変化しないと考えられるのでこれを一定とし、(2) 式の関係をプロットしたものが 図-8 である。ただし、 d として中央粒径 d_{50} をとつた。土砂の剝離の過程の複雑さのため、かなり実験結果はちらばつてい

q_{TD}/u^*d_{50} は掃流力の無次元表示 $u^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd_{50}$ の増加に従つて急激に増大し、これら両者の間にはある一つの関係が見出されるようである。このことは、土砂の剝離に及ぼす流水の効果が主として掃流力によるものであり、また土砂の剝離量は流れの掃流力に非常に敏感であるといふことができる。いま図に示すように、両対数で表示した q_{TD}/u^*d_{50} と $u^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd_{50}$ との関係を直線であらわすことにすれば、

$$\frac{q_{TD}}{u^*d_{50}} = 0.023 \left\{ \frac{u^{*2}}{(\sigma/\rho-1)gd_{50}} \right\}^8 \dots\dots\dots (3)$$

がえられる。この結果は斜面の長さが 3.5 m で、勾配および単位幅流量がそれぞれ 0.062~0.322 および 4.4~16.2 cm²/sec の範囲で実験されたものである。またこの結果が非常にばらついている他の支配的な原因としては、 d として採用した流出土砂の中央粒径の測定にあるものと考えられる。

以上のような取扱い方により、多くの土砂についてその剝離の過程に関する詳細な実験を行い、それら相互の土質力学的な特性と関連させることによつて、かなりこの問題の発展が期待されるものと考えられる。このような意味において、今後の詳細な実験とその系統的な取扱いとが望まれるわけである。

(2) 雨水流による土砂の剝離

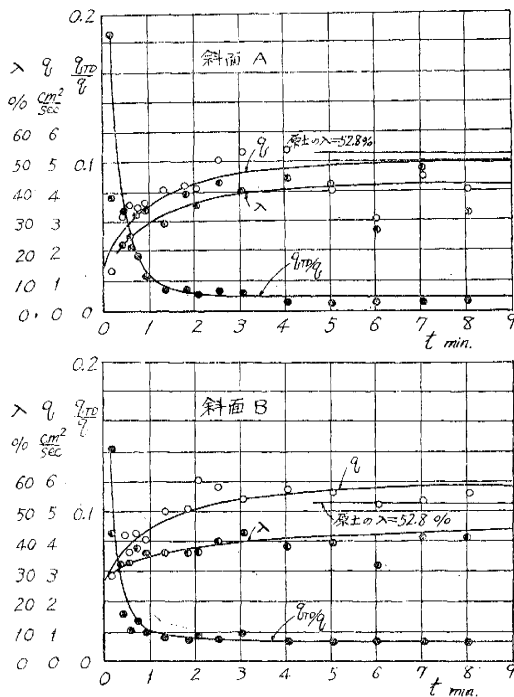
土砂の剝離に及ぼす雨滴の効果を調べるために、人工降雨を用いつぎに述べるような実験を行つた。直径 3/4" の合成樹脂の管に 0.6 mm の穴を 5 cm 間隔で一列にあげ、これを水道に連結して人工降雨をつくる簡単な方法をとつた。この実験装置は、落下高さを 3.0 m までの範囲で自由に変えることができるが、ここでは自然の降雨になるべく近くするために、最大の落下高さにおいて実験した。また雨滴の大きさは、あらかじめ痕跡法によつて調べたところ、降雨強度によつてほとんど変化せず、その平均の大きさは 1.37 mm であつた。

(i) 砂の場合 すでに述べたように、砂の場合には剝離の過程はあまり重要でないものと考えられ、もつぱら流れによる輸送の過程が支配的となるわけである。ここにいう輸送の過程には Ellison⁹⁾によつて見出された雨滴の衝撃力による飛散作用をも含まれているわけであつて、これら土砂の輸送に関しては次節において説明したい。ただ、雨水流の場合にはガリが発生しにくいという興味深い事実がわかつた。

(ii) 土の場合 実験に用いた土や水樋、ならびに

図-9 剝離量、粒径および下流端流量の時間的変化 (斜面の長さ 2.5 m, 勾配 0.316)

Fig. 9 Hourly variations of the rate of soil detachment, grain diameters and the discharge of flowat the and of flume.



実験方法は一樣流れの場合と全く同様であつて、実験結果の一例が図-9 に示されている。土砂の剝離量の時間的変化は一樣流れの場合と全く同じ傾向を示しているが、図-3 と比較することにより、雨滴の衝撃力が土砂の剝離に及ぼす効果のかなり大きいことが見出されるであろう。また、 λ の時間的変化も大体一樣流れの場合と同じ傾向を示しているが、降雨開始直後において、 λ がとくに大きいのは土砂表面に存在していた砂粒が雨滴の衝撃力によつて移動したためと考えられ、このことは Ellison の実験結果によつてさらによく理解されるどころである⁹⁾。

なお、著者は土砂の剝離量と降雨強度およびその他の水理量との関係を求めるような実験を行わなかつたが、たとえば剝離量(流出土砂量)と降雨強度とはかなりはつきりした相関が見出されているようであり、とくに実測資料を基としたこれら雨水流による土砂の剝離に関する考察については、つぎの機会に発表することにする。

3. 土砂の輸送に関する実験とその考察

剝離した土砂の最も単純化した代表的なものとしてほぼ均一と思われる砂をとりあげ、その流れによる輸送に関して、比較的勾配の急な場合について実験を行つた。前節(i)で使用した水樋に約 5 cm の厚さに前節と同じ砂をしき、流れが集中してガリが発生しないように幅は 5 cm にせばめた。流れとしては、一樣流れの場合と人工降雨による場合とについて、勾配をそれぞ

れ 0.008~0.240 および 0.020~0.283 の範囲で実験を行つた。水深の測定には 1/10 mm 読みのポイントゲージを用い、下流端に砂面と同じ高さにブリキ製の小さい水樋を砂面とほぼ平行にとりつけ、このブリキ製水樋の最上流端で測定することにした。また人工降雨による場合には、ポイントゲージの位置より少し下流まで雨を降らせて、その平均の水深を測定した。

(1) 一樣流れによる土砂の輸送

A.A. Kalinske⁶⁾と同様に (2) 式の関係によつて実験結果を整理したものが 図-10 である。図中の実線は比較的緩勾配の場合において行われた実験資料を基として Kalinske および Brown によつて見出されたもので⁶⁾、このうち直線は次式であらわされる。

$$\frac{q_T}{u^*d_{50}} = 10 \left\{ \frac{u^{*2}}{(\sigma/\rho - 1)gd_{50}} \right\}^2 \dots\dots\dots (4)$$

これは $u^{*2}/(\sigma/\rho - 1)gd_{50}$ が大きい場合に、砂粒の運動形式として、転動のほかには跳躍ないしは浮遊の形式によるものが含まれているものと考えられている。実験結果はかなりちらばつているが、Kalinske および Brown の結果とよく似た傾向を示しており、定量的には若干大きくあらわれているようである。水樋の幅を 5 cm にせばめてもおがりが発生することがあつて、この場合には流砂量が大きくなる傾向を示し、限界掃流力に近いほどその傾向は著しい。このことは流水による砂質地面の浸食において、層状浸食からリル状あるいはガリ状浸食への発達過程における流砂量の変化などと関連してかなり興味深いことであろう。

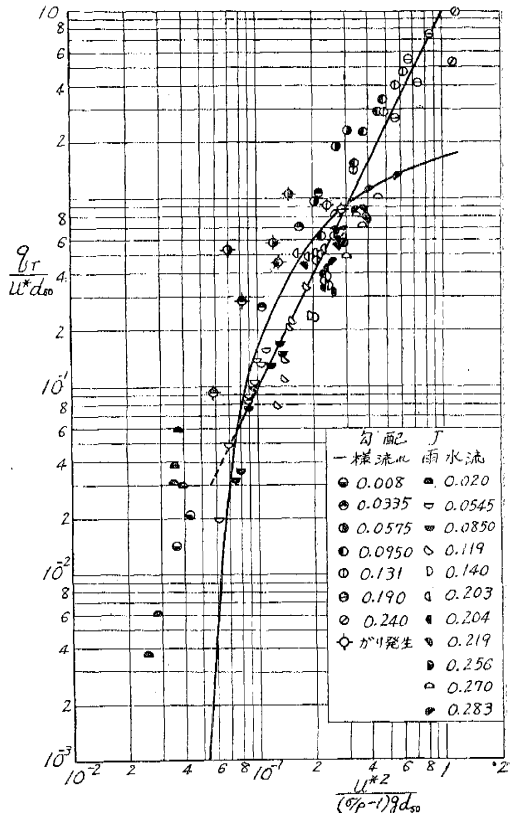
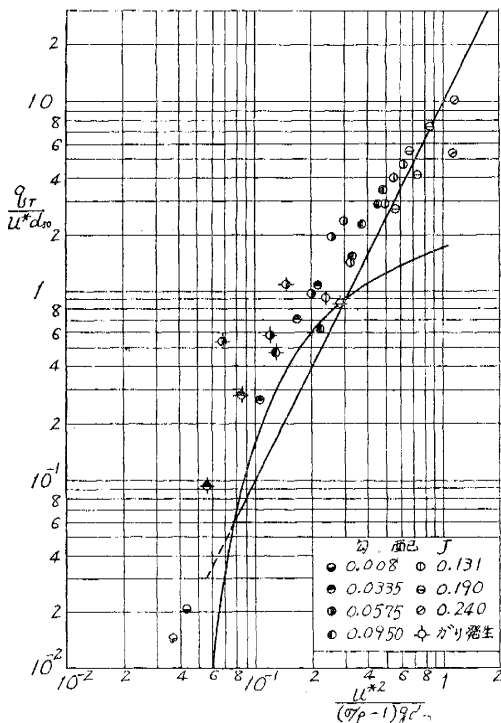
(2) 雨水流による土砂の輸送

雨水流による土砂の輸送は、降雨開始後しばらくして流れが定常になつた場合を議論することにしても、流れは不等流であるから、ここでは一応下流端の水深と砂面の勾配から求められる一樣流れとしての掃流力を用い、実験結果を一樣流れの場合と同じように q_T/u^*d_{50} と $u^{*2}/(\sigma/\rho - 1)gd_{50}$ との関係によつて整理することにした。

このようにして得られた結果が 図-11 であつて、比較のために一樣流れによる実験結果も一緒に図示してある。この実験における降雨強度は 82~460 cm/hr の範囲内である。つぎに、これら両者の相違について考察してみよう。まず $u^{*2}/(\sigma/\rho - 1)gd_{50}$ の小さい場合、と

図-11 q_T/u^*d_{50} と $u^{*2}/(\sigma/\rho - 1)gd_{50}$ との関係 (2)
Fig. 11 Relation between q_T/u^*d_{50} and $u^{*2}/(\sigma/\rho - 1)gd_{50}$ (2)

図-10 q_T/u^*d_{50} と $u^{*2}/(\sigma/\rho - 1)gd_{50}$ との関係
Fig. 10 Relation between q_T/u^*d_{50} and $u^{*2}/(\sigma/\rho - 1)gd_{50}$ (1)



くに限界掃流力付近においては、一様流れの場合より雨水流による方が大きい流砂量を示しているが、これは明らかに雨滴の衝撃力による飛散作用に基づいたためであり、その付近において実験値がちらばつているのは、雨滴の飛散作用が降雨強度によつて相違するためであろう⁹⁾。つぎに $u^{*2}/(g/\rho-1)gd_0$ の小さい場合を除いて、大部分一様流れの場合より雨水流による方が若干小さい流砂量を示しているが、その理由として掃流力 ρu^{*2} の求め方、浮遊流砂の存在および砂面付近における流れの状態の相違などが考えられる。このうち最初の理由については、実験結果に基づいて不等流の基礎方程式から掃流力を近似的に計算した結果によれば、水深が小さく勾配が比較的急であるため、ほとんどその変化を認めることができなかつたし、また第2の理由は雨滴が砂面に落下したときを考えることにしても、砂粒が浮遊の状態ではほとんどないように思われた。従つて、以上のことを考慮すれば、雨水流の場合流砂量が小さくあらわれる支配的な理由として、つぎのように考えることができる。すなわち、流砂量に関係するのは主として砂面付近の流速であり、雨水流の場合雨滴の衝撃作用に基づく流れや砂面の攪乱によつて、この砂面付近の流速が変化するためと考えられる。

4. 結 語

雨水流による土砂の剝離と輸送の問題はきわめて複雑である。一般に土砂の性質は、時間的にも、また場所的にも変化し、雨水流による土砂の剝離や輸送に関する機構を力学的に解析することははなはだ困難であつて、どうしても多くの実験を系統的に行つて、それらに及ぼす諸要素について検討して行かねばならない。その場合実験結果をできる限り無次元表示し、おのおのの土砂についてその土質力学的性質と関連してそれら相互の関係を適確に見出しうる方法をとらねばならない。土砂の剝離量および輸送量を定量的に解明することは、極めて重要な問題であつて、将来詳細な実験を行つて、この問題を明らかにしたいと考えている。

以上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) 砂の場合には、土砂の剝離現象は考える必要がなく、砂面に水を流すとガリの発生に従つて流砂量が変動し、その傾向は流量および勾配が大きいほど著しい。
 - (2) 一様流れによる土の剝離量の時間的変化は、まず水の流しはじめにおいて最大となり、漸次減少して一定値に近づく傾向を示し、これは雨水流の場合にもほとんど同じである。
 - (3) 著者らの取扱つた土については、土砂の剝離量は斜面の長さとともにほぼ直線的に増大することがわかつた。
 - (4) 雨滴が土砂の剝離に及ぼす効果はかなり大きい。
 - (5) 一様流れによる土砂の剝離量についての無次元表示法を提案し、実験に使用した土に関する次元的に合理的な実験式が作られた。
 - (6) 一様流れによる土砂の輸送量(流砂量)は比較的勾配の急な場合、Kalinske および Brown の結果より若干大きい値をあたえるようであり、ガリが発生すると流砂量は増大し、その傾向は限界掃流力に近づくほど著しい。
 - (7) 雨水流による土砂の輸送量は掃流力が大きい場合には、一様流れによる場合より若干小さい値を示し、限界掃流力に近づくると雨滴の衝撃力による飛散作用のため一様流れの場合より、若干大きい値を示すようである。
- 最後にこの研究を行うに当つて、終始御指導を賜つた京都大学石原教授に深甚なる謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) W.D. Ellison: Soil Erosion Studies-Part I, Agri. Eng., Vol. 28, April, 1947, pp. 145-146.
- 2) R.E. Horton: An Approach towards a Physical Interpretation of Infiltration Capacity, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 5, 1940, pp. 399-417.
- 3) W.H. Gardner and C.W. Lauritzen: Erosion as a Function of the Size of the Irrigating Stream and the Slope of the Eroding Surface, Soil Sci., Vol. 62, 1946, pp. 233-242.
- 4) 田中茂: 急斜面の土壌浸食の実験的研究, 土木学会論文集, 第6号, 昭.26, pp. 85~96.
- 5) A.W. Zingg: Degree and Length of Land Slope as It Affects Soil Loss in Runoff, Agri. Eng., Vol. 21, 1940, pp. 59-64.
- 6) H. Rouse: Engineering Hydraulics, 1949, pp. 796-799.
- 7) 岩垣雄一: 開水路水流の理論, 土木学会水工学論文集, 昭.24, pp. 5~24.
- 8) W.D. Ellison: Studies of Raindrop Erosion, Agri. Eng., Vol. 25, April and May, 1944, pp. 131-136, pp. 181-182.
- 9) 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, pp. 55~63.

(昭.32.6.4)