

UDC 624.131 : 551.311.21

急斜面の土壤浸蝕の実験的研究

正 亂 用 中 茂*

EXPERIMENTAL RESEARCHES ON STEEP-SLOPE-EROSION

Shigeru Tanaka, C.E., Member

第 1 報 (Report 1)

Synopsis There are numerous and complicated factors which control steep-slope-erosion; namely meteorological factors, slope factors, and soil factors. It would be extremely difficult and take a very long time, if the writer tried to clarify the effects of these factors, one by one, on steep-slope-erosion. Therefore, he selected some of the important factors and has been studying them. The mechanism of erosion was already made public in the "Journal of the Japan Society of Civil Engineers", Vol. 34, No. 4. The quantitative aspects of erosion are reported in this paper.

要 旨 急斜面の土壤浸蝕を支配している要素は数多く複雑多岐に亘つてゐる。即ち、降雨の性状並びにその他の気象的要素、斜面の勾配、形状、広さ、長さ、地被状態などの環境的要素、及び土壤の物理的並びに化学的諸性質などの固有的要素等が考えられる。これらの諸要素が浸蝕量に及ぼす影響につき1つ1つ明らかにすることは極めて困難であり長年月を要する。そこで著者はこれらの諸要素中で最もよく問題にされ易いもの内から2,3を選んで研究を進めた。なお、急斜面土壤浸蝕の定性的な面即ち機構についてはさきに拙著「急斜面土壤浸蝕の機構について」¹⁾において論じた。そこで今回は定量的方面の研究について述べる。

1. 誠 訴

急斜面の土壤浸蝕を支配している諸要素の内、土壤の性質が最も重要であり、実験的に土壤浸蝕の定量的な諸問題を研究するに際しては実験に使用する土が大きな問題となる。そこで、地理的条件や特に土砂流出が大きな問題になつてゐる点などを考慮して、神戸の裏山より産する土を使用した。この数種の土を用いて多くの実験を行つた結果の内、斜面勾配及び流水量が如何に浸蝕量に影響を及ぼすかを定量的に研究した結果の一部を発表する。

2. 在来の浸蝕量公式

土壤浸蝕に関する在来の実験公式は殆どすべて緩斜面に対して適用せられるものであつて、急斜面に対しては適用し難いものが多い。しかし緩斜面と急斜面の浸蝕は全然性質を異にしているわけでなく、共通した点もかなり多くあるわけで、在来公式を吟味することは有意義なことである。次にこれら諸公式中の代表的なものをあげる。

a. 降雨強度或いは流出水量、斜面勾配と浸食量との関係を表わす公式

1. J.H. Neal の公式²⁾

茲に E : 浸蝕率 ($\text{lb}/\text{acre}/\text{hr}$), S : 勾配 (%), i : 降雨強度 (in/hr), k_1 : 勾配, 降雨強度以外の諸要素による係数, Neal の実測値では 0.4

2. R. E. Horton の公式³⁾

* 神戸大学助教授、工学部土木工学教室

さしかえ迄の時間の恰度真中の時刻をねらつて、篩を通つた細粒を水もろともすべて篩の下に置かれた特別に作つた大きいロートを通して、その下に受けた 200 cc の messcylinder に収めた。messcylinder に収めた細粒と水との全体の容積は、毎回多少ともその値を異にしているからその都度容積を計量した。messcylinder にとつた細粒を含んでいる濁つた水はよく振盪して、hydrometer を用いて比重を測り同時に温度をも読みとつた。その後 30 分～1 時間位の間隔で比重を測定した。このようにして 48 時間たつてから上澄液を全容積の約 $\frac{1}{2}$ 位のところ捨て去つた。

残りを蒸発皿にとつて恒温槽に入れ 110°C に 24 時間以上保つて完全に乾燥させた後、0.01 g まで計量した。なお法先並びに法肩から夫々 15 cm 離れた斜面上の 2 点に尖頭水面計を据えて溢流水深を測つたが、勾配 1:4 及び 1:5 の場合の測定結果は表一 2 の通りである。この値は実験槽の底板上で測つた値である。細粒はさらにまた機械分析を行つて粒子組成を明らかにした。

4. 浸蝕量の時間的変化

(1) 概説 浸蝕量の測定には極めて大きな実施上の困難が伴う。即ち、同じ配合の土を同じ勾配の斜面に仕上げ、同じ流量の水を流す時、2 回以上同じ実験をくり返してそれらの結果を比較すると、毎回の測定流砂量は必ずしも同じ値を示さず、場合によつては極めて大きい値の開きを生ずることがある。このような結果になる理由として考えられるることは次のようにある。即ち、同じ土を用い、定められた同じ配合にこれらを混合し同じ割合の水を加えて同じ回数切りかえした場合でも、ごく厳密にいうならばその都度粒子の配置が場所によつて異なるし、水分含有量が不均一になつてゐる小局部の配置状態が、毎回多少とも異なるはずである。かりにこれらが常に変りないものとしても、搗き固める場合の土の締り具合も毎回同じというわけにはいかない。斜面の表面の仕上げ方、面の中の細かい凹凸、面の不正、面の一方への傾きなどといふ諸点で、多少の相違が生ずることは止むを得ない。次に多くの条件の内、1 条件のみを変え、他の条件をすべて同じとした場合についての諸結果を比較する際にも、他の条件を完全に同じにすることが不可能であることから、上述のようなことが起ることは免れない。そこで 1 条件の種々なる変化が浸蝕量に及ぼす影響を調べる際には、なるべく浸蝕が正常の経過をたどつた時の浸蝕量をとらねばならぬ。従つて浸蝕が例えれば片側に偏する時、両側の木板と土との間が特に溝状にひどくやられる時、天端の部分の土が特に局部的に押しぬかれる場合などは正常の浸蝕状態とは申し難い。浸蝕の発達状態の正常でないものの浸蝕量を採用して正常なものとの平均値をとることは好ましくない。発達状態が正常であり、しかも同じ条件の下で得られた浸蝕量の毎回の差違がそれらの平均値に対し少くとも 20% 以下となるならば、その平均値を採用することが好ましい。

(2) 浸蝕の正常発達 ある土で一定勾配の斜面を作つた時、種々の流量に対する浸蝕の発達状態を観察し、また同時に浸蝕量の測定や流出土砂の機械分析を行うことなどにより、浸蝕の正常発達の状態を求めることができる。これは眼で観察した法面の浸蝕状態の発達の経過によつても判断しうるが、これでは「かん」の問題とみられるから、流出土砂の機械的分析の結果や浸蝕量の時間的経過による変化などの定量的方面よりこれを明らかにする必要がある。

(3) 浸蝕量時間曲線 浸蝕の発達状態を観察すると、浸蝕のごく初期は層状一様浸蝕 (Sheet erosion) であるが、間もなく水筋状浸蝕 (Gully erosion) に移る。この両者の間には中間状浸蝕 (Transition erosion) があり、この浸蝕でききの 2 つの浸蝕が並行して同時に進行される。層状一様浸蝕の経続時間は水筋状浸蝕のそれに比べると比較的短い。中間状浸蝕もまた同様である。これらの浸蝕の転移点を正確につかまえることは難しいが、これらの浸蝕は性質を異にしているので同じようには論ぜられないから、やはり明確にする必要がある。さきに述べた浸蝕の正常発達においては、これら 3 つの型の浸蝕の転移点が自ら定まつた位置にあるが、異常発達

表一 1 黄色粘性土及び砂の機械分析結果(重量比)
Mechanical Analyses of Yellow Clayey Soil and Sand(% by wt.)

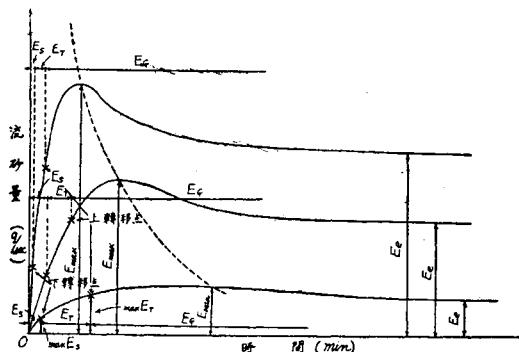
粒径(mm)	黄色粘性土	砂
2.5 以上	0%	0.8%
2.5~1.2	0.5	20.1
1.2~0.6	3.9	36.5
0.6~0.3	9.8	17.0
0.3~0.15	18.5	14.6
0.15 以下	67.8	11.0
計	100.0	100.0

表一 2 溢流水深
Overflow Depth on Flume

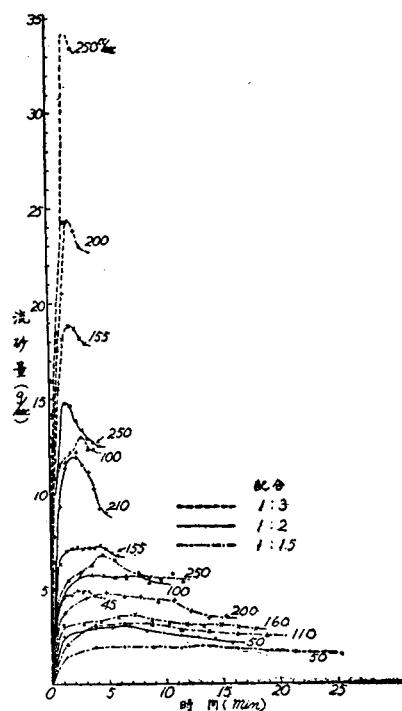
流量 m ³ /sec	上流水深 mm		下流水深 mm	
	勾配 1:4	勾配 1:5	勾配 1:4	勾配 1:5
50	1.7	1.9	1.7	1.8
100	1.9	2.1	1.8	2.1
150	2.1	2.3	2.0	2.3
200	2.3	2.5	2.2	2.5
250	2.6	2.7	2.5	2.7

の時には、正常の時とは異つて居り、さらに浸食量時間曲線全体を眺めても正常のものは自ら定まつた形状をとるのに反し、異状のものは趣を異にしている。図一2は勾配1:2の場合につき実験によつて得られた浸食量時間曲線の正常型を示したものである。図の浸食量時間曲線は次のような特徴を有している。各曲線は原点より急勾配で上昇し始め、上に凸な曲線を描いて上昇する間に漸次曲線の傾きが緩となつて、遂に最高点に達し、それより後は再び或る程度曲線は降下して、時間が充分に経つと略一定の水平線になる。尤も配合1:3の土は充分に時間をかける暇もない内に「みぞ状浸食」が強く発達し床板がある。

図一3 理想的正常型の浸食量時間曲線
Erosion-time Curves of Ideal Normal Type



図一2 正常型の浸食量時間曲線(勾配1:2)
Erosion-time Curves of Normal Type



らわれた為に実験を止めたので、曲線が水平になるところ迄は捉えられなかつた。しかしさらに土の厚さを充分に厚くして実験をするならば、他の配合の土の場合と同様な曲線の形をとるであろう。なお、これらの曲線には原点から最高点に達する途中に上述の転移点があるが、これらの曲線からでは転移点特に層状一様浸食と中間状浸食との間の転移点を把握することは困難である。

次に理想的な正常発達をしている時の浸食量時間曲線を示すと図一3のようになる。即ち曲線の山の頂きの位置は流量が大きい程高く且つ左にきて、各種の流量に対応する曲線の最高点を連絡する線は1つの双曲線状をなすように思われる。最大浸食量 E_{max} と浸食が落付いた時の浸食量 E_e との比 E_e/E_{max} の値も各曲線についてほぼ同じ一定値となる。なお、図一2の曲線の縦距は1つの篠で受けた或る時間内の平均の1秒当たりの流砂量を g で表わしたものに、上記時間の恰度真中で篠を通過した細粒の1秒当たりの重量を g で表わしたもの加算したものである。

5. 結語

本報では、勾配1:2のものについてのみ説明し他の勾配のものについては説明を省いたが、どの場合でも上述のものと同様に、浸食量時間曲線があらわれる。ただ時間の長短の相違があるだけである。

参考文献

- 1) 摂著; 急斜面土壤浸食の機構について、土木学会誌33巻4号、4~11頁
- 2) J.H. Neal; The Effect of Degree of Slope and Rainfall Characteristics on Runoff and Soil Erosion, Agr. Eng. p. 213~217, Vol. 19, 1938.
- 3) R.E. Horton; Analysis of Runoff-Plat Experiments with varying Infiltration-Capacity, Trans. Amer. Geophys. Union, 20th Annual Meeting, p. 693~711, 1939.
- 4) A.W. Zingg; Degree and Length of Land Slope as it affects Soil Loss in Runoff, Agr. Eng. p. 59~64, Vol. 21, 1940.
- 5) R.E. Horton; Erosional Development of Stream and their Drainage Basins, Hydro-physical Approach to quantitative Morphology, Bul. Geol. Soc. Amer. 56: p.275~370, 1945.
- 6) 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., 62: p.233~242, 1946.
- 7) W.H. Gardner; Determination of the Critical Stream for various Slopes, Soil Sci., Vol. 66, No.3.
- 8) R.E. Horton; An Approach towards a physical Interpretation of Infiltration-Capacity, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 5:p. 399~417, 1940.

第 2 報 (Report 2)

Synopsis In succession to Report I, the writer has made clear how the results of the sieve analyses of eroded-out soils varied in course of time, and taken up the problems such as the normal states of the erosion developments and the transition points in this line of study, and given them his own views.

Moreover, he has examined the amounts of eroded-out soils, and also given his own opinion as to what values must be adopted as the amounts of eroded-out soils.

要旨 第1報にひき続いて、今回は急斜面の浸蝕土砂の機械分析の結果が、時間が経つにつれて如何様に変化するかを明らかにするとともに、この方面から見た浸蝕の正常発達状態や転移点の問題などをとりあげ、著者の見解を述べた。浸蝕量そのものに対しても、吟味検討を加えて浸蝕量として如何なるものを探るべきかを明らかにしたのである。

1. 浸蝕土砂の機械分析結果の時間的変化

著者が実験に使用した各種配合土の機械分析の結果は表一の通りである。なお、実験に当り毎回使用する土の分析を行つているが、個々の値に多少の変動を見る程度で、平均値としては表一の値を採つてよい。

表一 各種配合土の分析表(重量比 %)
Mechanical Analyses of the Soil Samples (% by wt.)

粒径 mm 配 合	2.5 以上	2.5~1.2	1.2~0.6	0.6~0.3	0.3~0.15	0.15 以下	計
1 : 1.5	0.5	12.3	23.5	14.1	16.2	39.4	100.0
1 : 2.0	0.5	13.6	25.6	14.6	15.9	29.8	100.0
1 : 3.0	0.6	15.2	28.3	15.2	15.6	25.1	100.0

浸蝕に伴い斜面より流出した土砂を、流出開始より一定時間毎に採集して篩分分析を行い、その結果が時間の経過につれ如何に変化するか、またこれらが浸蝕前の原土のそれと如何に相違するかなどを検討することは、極めて有意義なことである。表一～表四は勾配 1:2.0 における実験結果であつて、種々の配合、流量の場合につき、浸蝕土砂の篩分結果の時間的変化が示されている。これらは正常な浸蝕発達をたどつたと考えられた場合の実験結果であつて、第1報の図一2を作るのに使つた資料と同じものである。これらの諸表の中で見出される特に注目すべき特徴は次のようなものである。

a. 浸蝕の最初は粗粒に比べて細粒の流出が多いが、時間の経過とともに、漸次粗粒の流出割合も増し、時間が充分経つと一定の粒径組成に近づく。しかも、この粒径組成は実験に使用した浸蝕を受けない原土のそれと殆ど同じとみなしてもよい。

b. 粒径 2.5 mm 以上のものの%は原土の中においても 1% 以下の少量であり、元来は 0 であるはずのものが少量混入したのである。そこで流出土砂の分析結果中このものの占める%は流量、土質、時間に無関係に一定の小さい値を占める。

c. 粒径 1.2~2.5 mm のものの%は、時間とともに増し、時間が充分経つと一定値に落つく。流水開始時の%は、流量が大きい程、また砂分の多い土程比較的大きい値をとる。

d. 粒径 0.6~1.2 mm のものの%は、配合 1:1.5, 配合 1:2.0 の土では時間の経過とともに僅か乍らも増大し、遂にはおよそ一定の値に近づく。配合 1:3.0 の土では殆んど時間による変化は認められない。

表-2 流砂の篩分結果の時間的変化(配合1:1.5)

Variation of Sieve Analyses Results of Eroded-out Soil versus Time(Mix 1:1.5)

流水量 50%sec																													
粒度	0~2.5	2.5~5.0	5.0~7.5	7.5~10.0	10.0~12.5	12.5~15.0	15.0~17.5	17.5~20.0	20.0~22.5	22.5~25.0	25.0~27.5	27.5~30.0	30.0~32.5	32.5~3															

ことで、また転移点の位置如何が浸食の正常発達か否かを定めるにも役立つようである。一般に層状一様浸食の場合の浸食せられた流砂の粒子組成は浸食せられない前の原土のそれに比べると、微細粒子の%がはるかに多いが、水筋状浸食では流砂の粒子組成は原土のそれに近い組成を示している。この理由として考えられることは、浸食の初期は斜面の粗度が比較的少く、大粒の粒子の周囲は細粒がとり囲んでおり、微細粒子が結合剤の働きをしている。その上、流水の掃流力もまた、斜面のはんの表面附近のみしか働かない。そこで粗粒子は流水の浸漬作用を受けても、始めは下部が細粒で固く結合されていて掃流され難いが、細粒の方は斜面表面ですつきり結合力を失つてばらばらになり、流水により掃流されてしまう。水筋状浸食、特に「みぞ状浸食」では、急斜面上では流水の渦や衝撃や螺旋流などの作用が猛烈なために、細かいずれの粒子が送流され易いというような区別はなく、一様に掃流される傾向がある。

さて浸食型の転移点をつきり把握する方法として、著者は表-2, 3, 4等について粒径 1.2 mm 以上の粒子の%に着目し、この%の示す特徴を利用するのが合理的であると考えた。即ち原土の粒子組成%の内で、粒径 1.2 mm 以上のものの%と 0.15 mm 以下のものの%とが、時間の経過にともなつて特に敏感に変化することに注目したわけである。この内後者は前述の如く流量の増大又は砂分の増加に応じ小さい値をとり、それが時間につれて変化する状況は流量及び土質によつて甚だしく相違し、又原土の粒子組成の内 0.15 mm 以下のものの%との関係についても、浸食初期には特に簡単な関係が得られない。ところが前者は流量の大小によつても時間に対する変化曲線を別にする必要があるが、それらの間にはよく似た傾向があり、数値の大きさなども殆ど変らない。特に浸食初期ではいづれの場合でも皆同様に小さい値をとり、流量の大小にもあまり影響されない。その上に時間が充分に経つと流量に拘らず原土の粒径%に近いある一定値に近づく。こうした諸点を考慮して、粒径 1.2 mm 以上の粒子の%が時間とともに変化する状況をとりあげ、これが原土のその 0.5 倍の値を示す点を 1 つの転移点として、その前後の状態をそれぞれ層状一様浸食、中間状浸食に属するものとみなした。この様に定義した点を下転移点と名付けたが、中間状浸食と水筋状浸食との間の転移点、即ち上転移点については上の%が原土のその 0.75 倍となる点を採用した。実験的に浸食発達の様相を詳しく観察するとともに表-1~4を比較検討して、下転移点には 0.5 が最も適当と考え、上転移点は 0.5 と 1.0 の平均値をとつたのであつて、後者には大した理由はない。図-1~3 は実験結果を図示し、以上の関係を明らかにしたものである。これらの図の曲線群を用い、さきに述べた定義によつて定めた上転移点と下転移点に相当する時刻を第 1 報、図-2 に移せば、流砂量時間曲線上で 2 つの転移点が求められる。転移点のあらわれる時刻は流量が大きい程、砂の多い土程、は

図-1 勾配 1: 2, 配合 1: 1.5

Slope 1: 2, Mix 1: 1.5

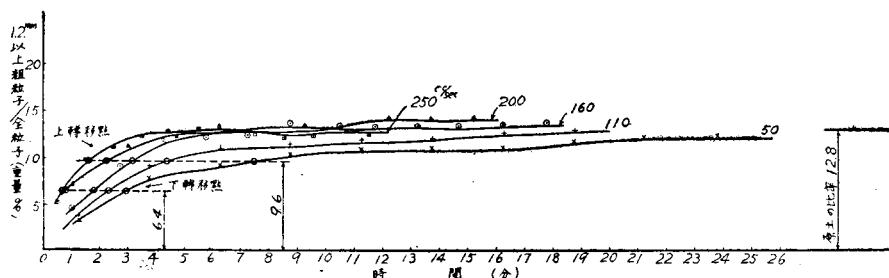
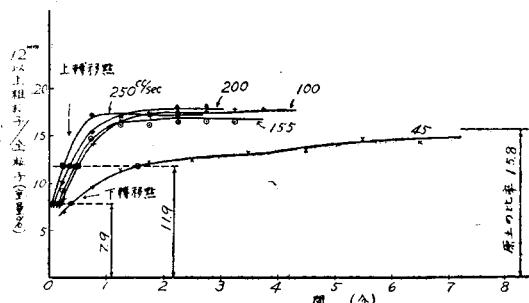
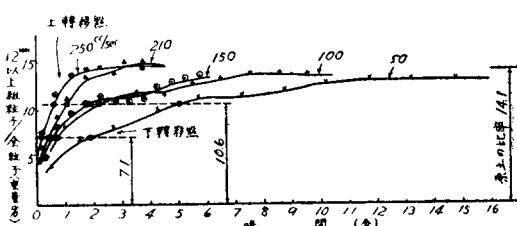


図-3 勾配 1: 2, 配合 1: 3

Slope 1: 2, Mix 1: 3

図-2 勾配 1: 2, 配合 1: 2

Slope 1: 2, Mix 1: 2



やいのであり、それらの間にはほぼ定まった関係があるように思われる。

3. 流砂量に関して考慮すべき諸点

流砂量と勾配、流水量、土質などその他の多くの諸要素との関係を究明するに当つて、まつさきに直面する問題は流砂量として如何なる値をとるかということである。流砂量時間曲線から分るように、曲線の縦距の値が時間によつて種々変化しているから、曲線上のどの点の流砂量を問題にするかが大切なことである。第1報、図-3の流砂量時間曲線をとり、それらの中で最もはつきりした値を探すと E_{max} と E_e を得る。前者は曲線の最高点に応ずる値であり、後者は浸食が落ちついた時の値である。これらの外に、下転移点に相当した浸食量 $\max E_s$ と上転移点に相当したそれ $\max E_T$ が考えられる。さきに定義した上転移点は實際には下転移点程はつきりしていないから $\max E_T$ は強いてとりあげることはないかも知れない。 $\max E_T$ は E_{max} より少しさきに現われる。さらに E_e の値は浸食が落ちつきしかも完全な水筋状浸食が充分に発達しつくした場合の値であるから、これを採り上げることは確かに最も有意義なことである。著者の実験の結果では、配合 1:1.5 並びに 1:2.0 の土についてよくこれを捕捉し得たが、配合 1:3.0 の土では浸食の進行速度が速く、これを捕えるのに困難であつた。 E_{max} の値は容易に求められ、しかも最大値であるということから重要であり、殆んどすべての場合水筋状浸食に属している。 $\max E_s$ も著者の定義に従うと容易に求められるが、砂の多い土では溢流開始後短時間(10秒以下)で、これがあらわれるから、実験操作上正確にこの値をおさえ難い場合も起る。なお E_e/E_{max} の値を配合 1:2.0, 1:1.5 などの土についての実験結果より求め、こうして得られた関係が配合 1:3.0 の土にも適用し得るものと仮定すれば、 E_e の値も間接的に求められることになる。

次に流砂量と一口にいつても、例え g/sec で表わされる短い単位時間当りのものもあれば、 kg/hr で示されるようなものもあり、さらには長い時間をとつてその時間内の累加流砂量或いは累加浸食量というものをとることも考えられる。これらの内最も実用上便利なものは累加量であろう。しかし、順序としては始めに g/sec で表わされるものにつき研究を進め、かかる後に累加量に及ぶのが至当であろう。

4. 結語

以上で浸食量の定量的問題をとり扱う上に考慮すべき事項のあらましが明らかとなつたわけである。次には浸食量と他の種々な要素との関係が如何様になつているかという問題に入ることになるが、これに関しては別の機会にゆずる。

第 3 報 (Report 3)

Synopsis Following the former two reports on the same subject, the writer has experimentally made clear the mechanism of the steep-slope-erosion of embankments with different types of berms, and obtained some results of berm-effects on steep-slope-erosion to a certain extent.

要旨 前2報にひき続き、今回は盛土した急斜面が種々の小段をもつた場合の土壤浸食機構を実験的に究明して、急斜面の土壤浸食に対する小段の影響をある程度明らかにすることことができた。

1. 緒言

緩斜面では斜面に段々をつけると土壤浸食が大いに軽減されるが、同様のことが急斜面にもいい得るものと考え、具体例についてある程度定量的な関係を求めるとして、この研究を行つたのである。小段といつても幅、高さ、数、勾配など種々の要素をもつており複雑であるが、ここでは築堤などによく用いられる小段のうち代表的な 2,3 のものを選んで実験した。

2. 実験の説明

実験に用いた土壤、機械器具、斜面の作り方及び実験の方法などの詳細は既報¹⁾ 及び本研究第1報に述べた通りである。ただ今回は特に図-1に示すような模型として土の厚さを 6 cm とした。図に示す①は標準斜面、②～④は小段をもつたものであるが、小段の寸法割合は表-1の通りである。

1) 拙著、急斜面土壤浸食の機構について、土木学会誌、第 33 卷第 4 号

図-1 模型縦断図

Longitudinal Sketch of the Models

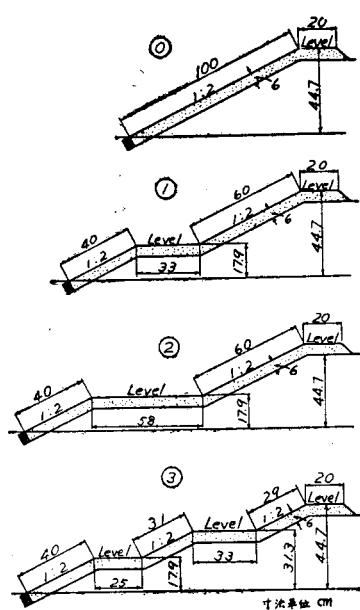


表-1 模型寸法

Dimensions of Models

模 型	小段の高さ 天端高	小段の幅 ①の斜面長
①	0.4	$1/3$
②	0.4	$1/3 + 1/4 = 7/12$
③(上)	0.7	$1/3$
④(下)	0.4	$1/4$

図-2 斜面縦断
Longitudinal Section

場合 AB 面が極端に短くない限り、その長さが AB 面の下部の流速に影響する程度は少いようであるが、小段上における流水の状態の変化が浸食流下して来た土砂を小段に堆積させる。この点が小段のある斜面の土壤浸食の大きい特徴である。

(2) 浸食、堆積の進行状態 斜面部の浸食の進行状態は前2報で説明した通りである故、ここでは主に小段部の浸食及び堆積のそれについて述べる。斜面及び小段上に流水を生ずると、B点附近は流速や水深の変化が著しいので土の安定が乱されやすく、特に AB 面に沿うて流下した水が B 点で小段に激突する際の衝撃や流水渦はこの部分の浸食を速かに発達せしめる。同時に AB 斜面の浸食土砂は小段上に運ばれ、B 点を離れて流速が落ちて来た部分に堆積する。こうした小段面上の浸食及び堆積は時間が経つにつれて発達する。小段の先端 C 点附近は、流水の方向や速度が急変するので浸食されるが、さほど急激ではない。CD 斜面の C 点附近は、常流より射流への移行部分に相当して力が強く作用し突角部が浸食され易いことは、AB 斜面の A 点附近と同様である。AB 斜面の浸食土砂は初めは殆んど BC 小段上に堆積するので、この土砂が CD 斜面上を転がり落ちるために CD 斜面を浸食するというようなことはない。小段 BC 上の堆積土砂は上述の如く斜面 AB の浸食土砂の大部分であるが、微粒子は流し去られて殆んど含まれていない。堆積土砂は初めは薄くて水面下に没しているが、時間とともに厚く且つ拡がる。これに応じ小段が水平より順次傾斜を帯びて来て流速が増し掃流力が増加する故、小段上に堆積できずに流し去られる粒子が増加し、ある勾配に達するとすべての粒子は流されてしまう。小段上の堆積は流れに直角な横断面上に一様な厚さにたまるのではなく、上の斜面の浸食状況に支配される。斜面 AB 上に「みぞ」ができると、その下の B 点の部分に深い浸食孔を生じ、これが C 点に向つて割合に幅の広い水筋となつて延びようとするが、一方浸食土砂が多量に堆積し或る程度で喰止められる。小段上の流水は低い部分を選んで流れるので、勾配が水平に近い間は堆積が発達するが、高い部分はその上を水が流れなくなるとそれ以上堆積しない。堆積土砂の流水方向の縦断勾配は、水深、流量、上方斜面の浸食状態等によつて相違するが、本実験では水深や流量が大きい程緩であった。実測の結果、B 点近くでは浸食孔の部分を別として最大 7° 、普通 $3^\circ \sim 5^\circ$ で、それから C 点に向つて $1^\circ \sim 2^\circ$ 程度の緩勾配となり、C 点の実際では又急で $3^\circ \sim 4^\circ$ であつた。B 点の部分に生じた孔は前方小段に向うと同時に後方斜面に向つても発達するが、ある大きさになると孔の周囲が高くなつて溜つた水が水槽作用をし、発達を停止する。この孔の内部では、左又は右まわりの渦ができている。

4. 流砂量の実測結果

図-3~6 は各測定時間毎にその真中の流砂量を以てその測定時間を代表する値として、流砂量時間曲線を示したものである。測定はできるだけ長く続けたが、底板があらわれぬ程度にした。次に流砂量(g/sec)を篩(100 mesh)にとまる部分 C と通過する部分 F とに分け、 $F/C(\%)$ の値の時間的変化を求め図-7 以下に示した。①の場合は紙面節約上省いた。

5. 実験結果についての考察

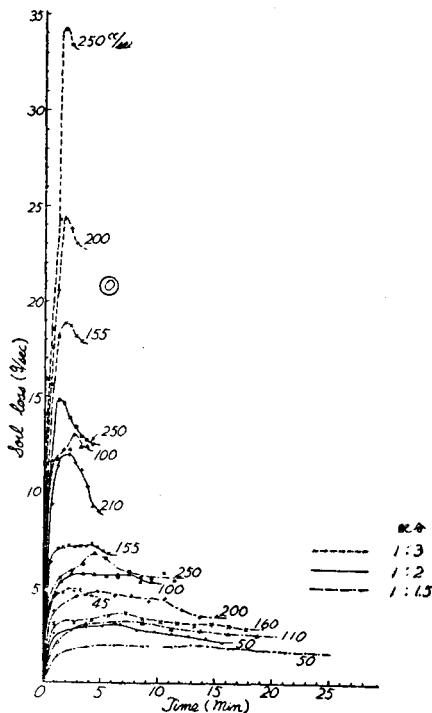
図-3~6 の流砂量時間曲線を比較検討すると、次に列挙する特徴がある。

3. 浸食状態の推移

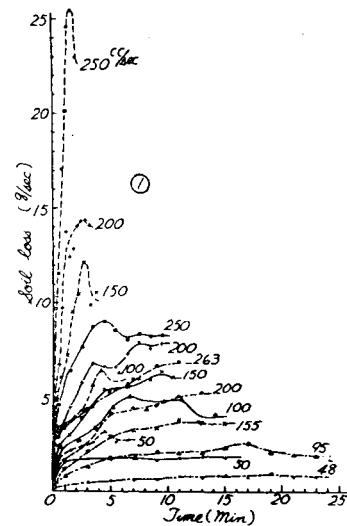
(1) 概説 一様な勾配の土壤法

面が浸食される時の様相と、水平小段をもつた土壤法面のそれとは、相当異なる点があるのは、当然である。小段は急斜面上を流れ下る水の水面勾配に急激な変化を与える。例えば図-2において AB 面上を射流状態で流れて来た水は、B 点で跳水現象を起し突然常流状態に変り、水深を増すとともに流速を減ずる。この水流は C 点で突然急勾配になるので、CD 面では射流状態になり水深を減すとともに流速を増す。この

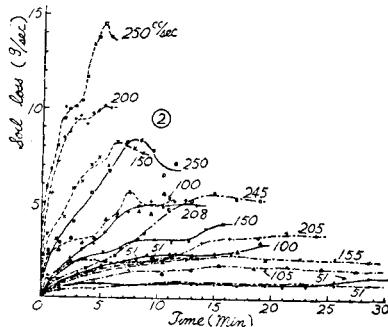
図一3 模型①の流砂量時間曲線
Erosion-time Curves obtained in Model ①



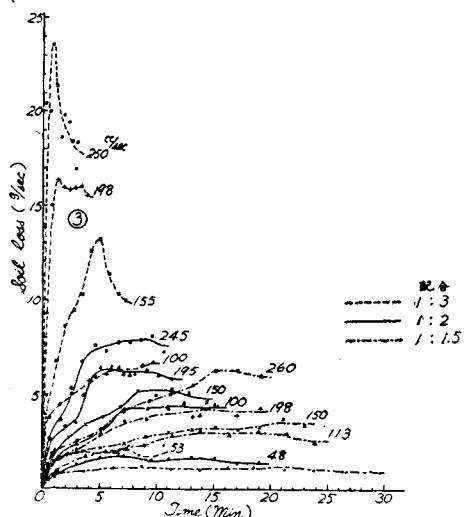
図一4 模型①の流砂量時間曲線
Erosion-time Curves obtained in Model ①



図一5 模型②の流砂量時間曲線
Erosion-time Curves obtained in Model ②



図一6 模型③の流砂量時間曲線
Erosion-time Curves obtained in Model ③



(1) 小段が存在する時は、これがない場合に比し流砂量の最大値が小さい。
 (2) 流砂量の最大値は小段のない斜面では通水開始後短時間に現われ、一般に曲線は原点より急な傾斜でしかも滑らかな上に凸な形状で上昇して最大値に達する。小段がある場合は、最大値の出現は前者に比し時間的におそくなり、原点より最大値に至る曲線の形は、始めは上に凸、ついで上に凹となり最大値近くで再び上に凸な波形曲線を呈する。

(3) 小段幅が大きくなる程、(1), (2)の傾向が強い。
 (4) 幅広い小段1つを用いる場合と、段を2つに分け2段の幅の合計がさきの1つの幅に等しくした時とでは、前者の方が最大値に至る迄の曲線は緩傾斜をなし、最大値の大きさも小さい。

以上の諸項の起る理由を著者は次のように考える。

(1) に対しては、小段を設けると途中で流速を減じ得ると同時に、浸食のみぞがこの部で中断せられ、下方斜

図-7 模型①のF/C-時間曲線
F/C-time Curves obtained in Model ①

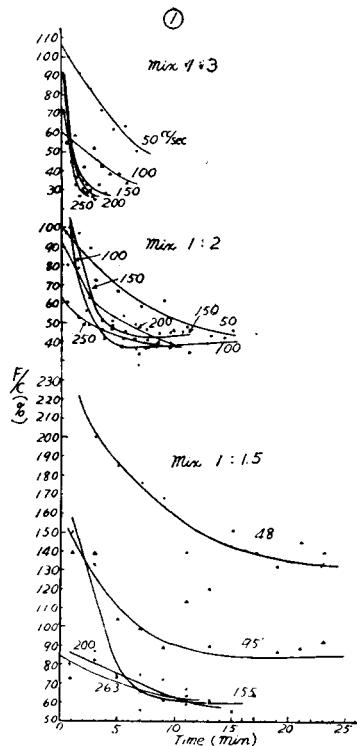


図-8 模型②のF/C-時間曲線
F/C-time Curves obtained in Model ②

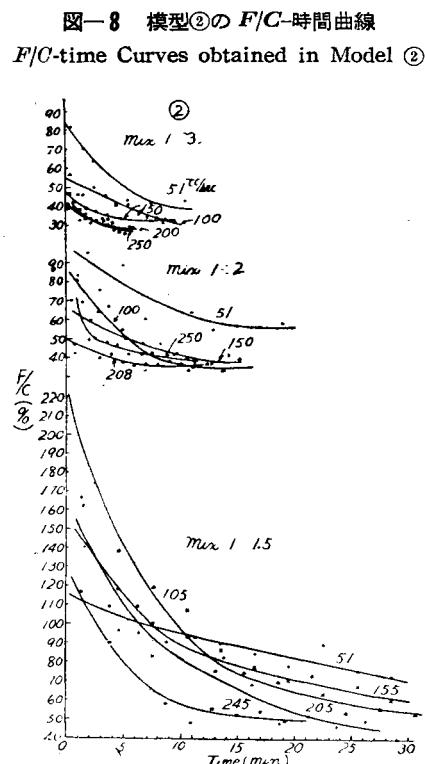
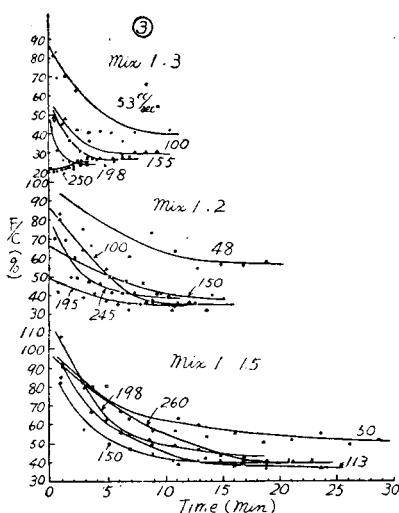


図-9 模型③のF/C-時間曲線
F/C-time Curves obtained in Model ③



面まで連続して発達することが困難になる。又小段上の主流の道筋はたえず変動して容易に定まらぬ故、小段の下の斜面上に定まつた深いみぞの発達することが阻止され易いことなどが考えられる。

(2) に対しては、小段のない斜面では1度浸食された土砂はすべて急速に下方に運ばれるのに対し、小段のある斜面では、浸食が始まると間もなくその速度も増すが、同時に、上方斜面よりの浸食土砂が段上に堆積し始める。この堆積がある時間続くために、法先に流送されてくる土砂は急激には増さなくなる。しかし堆積が進行して極限に達するにつれて、再び全斜面上から浸食される土砂が殆んど全部法先に運ばれるようになり、浸食量が増大して最大値に達する。

(3) に対しては、小段の幅が大きい程ここで流勢を殺す作用が大きく、小段上に堆積しうる土砂量もまた大きいし、浸食のみぞが中断せられる傾向も強い。

(4) に対しては、段の数を多くすれば水勢をそぎ、浸食のみぞが中断せられる傾向が強くなる。しかし他方、小段上に堆積することができる土砂の量は少くなるし、

堆積の進行の止む迄の時間も短かくなる。その上、小段の角の数も多くなつて角の部分の浸食量も増してくる。この後に述べた作用の方が先に述べた作用よりも強く働くためと思われる。

次に F/C の値の時間的変化を図-7~9 により調べると、次の特徴をあげることをうる。

(1) 全般的にいつて、曲線は双曲線に似ており、時間が経つにつれて水平になり一定の水平線に漸近する。これは小段の有無に関しない。

(2) 小段幅が小さい程、短時間で水平線に近づく。

(3) 小段の有無その他に関せず、同じ斜面で同じ土については、流量が極く少くない限り、どの曲線も同じ水平線に漸近する。

(4) 幅の広い小段を1つ用いる場合と、段を2段に分け、段の幅の和が1段の幅に等しい場合とでは、前の場合の曲線は後のそれに比し水平になるのに長時間を要する。

以上の諸項の生ずる理由は次のように考えられる。

(1) に対しては、どの場合も初期には粗粒よりも微細粒の方が量多く流出し、時のたつにつれて粗粒子の流亡も増して、遂には F/C の値が一定する。

(2) に対しては、小段の幅が小さいと、その上に堆積しうる土砂量も少くなり、短時間で流砂量が最大値に達し浸食が落付くからである。

(3) に対しては、流量がごく少い時は容易には粗粒子を流送できず、微細粒子を多く流し易いので F/C の値も容易に小さくはならない。流量がある程度以上あれば、時間さえ充分長くとると、同じ土の時には F/C は一定値になる。

(4) に対しては、広い幅の1段の方が堆積を多く生じ、又堆積が極限に達する迄に長時間を要し、その間は F の量が C の量に対して高い比率を維持するからである。

6. 結語

以上で築堤などに用いられる小段の土壤浸食に及ぼす影響の一部を明らかにし得たが、今後なお多くの実験を行う必要がある。小段上に堆積した土や流出土の粒子組成の時間的变化についても論じたいが紙面の都合で省略する。本研究に対し御指導を添うした京大石原教授に深甚な謝意を表する。なお本研究は文部省科学研究費補助によるものである。
