

報 文

UDC 624.137: 551.311.21

急斜面の土壤浸蝕量に関する一実験公式

正 員 田 中 茂*

AN EXPERIMENTAL FORMULA CONCERNING SOIL-LOSSES AT STEEP-SLOPE-EROSION

(JSCE Dec. 1952)

Shigeru Tanaka, C.E. Member

Synopsis The writer has been performing a number of various quantitative experiments concerning steep-slope-erosion. From these experimental results obtained, he has summarized a variety of relations between soil-losses, slopes and run-off quantities into an experimental formula.

要旨 著者はいままでに急斜面土壤浸蝕に関する定量的な実験を多く行ってきたのであるが、得られた実験結果の内より流砂量と斜面勾配及び表面流出量との間の関係をまとめて一実験公式を作ったのである。

1. 緒言

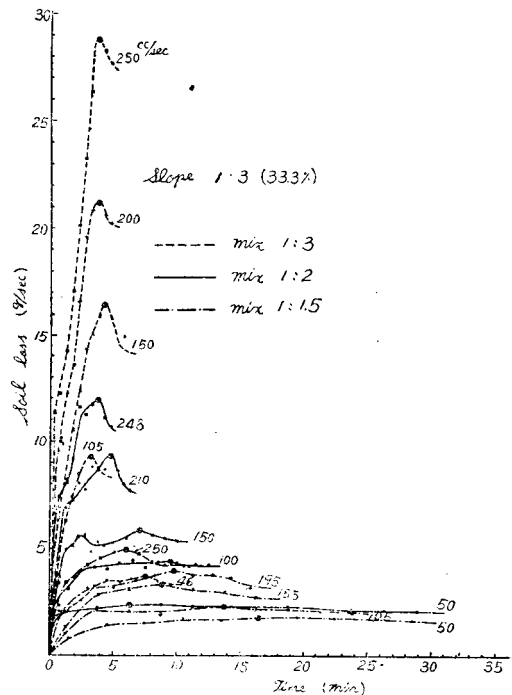
土壤浸蝕、ことに急斜面の土壤浸蝕に関する定量的な関係を理論的に誘導することは極めて困難である。そこでとりあえず実験的研究を行って得られた諸結果の一部をとりまとめて、実験公式を作った次第である。もとより実験公式はその実験の行われた時の諸条件を満足する場合に限って比較的正しく適用されるが、その条件以外の場合には適用し得ないのであつて、いわゆる一般性を有しない欠点をもっていることはまぬかれない。しかしながら全然一般性がないとは一概にはいえないこともあり、例えば Kutter の平均流速公式が Mississippi 河の実測資料にもとづいて作られたものであるにもかかわらず、偶然我国の河川にもよく適合しているというようなこともあるわけである。このように考えると理論式の誘導が困難な場合、研究発展の過渡期においては実験公式もまた相当有意義なものと思われる。

2. 実験公式に用いた基礎資料

拙著「急斜面の土壤浸蝕の実験的研究」第1報¹⁾において述べた通りの実験的研究を行い、得られた資料をもとにして、これより実験公式を誘導した。従つて

実験方法、実験範囲その他の諸条件は該報を参照せられたい。なお、資料としては該報には紙面の都合上、勾配 1:2 に対する浸蝕量時間曲線のみを示してあるが、ここでは勾配 1:3, 1:4, 1:5 等に対する諸曲線をも基礎資料として用いたので、図-1~3 として示しておく。

図-1 浸蝕量時間曲線 (勾配 1:3)
Erosion-time Curves (slope 1:3)



* 神戸大学助教授，工学部土木教室

1) 拙著；急斜面の土壤浸蝕の実験的研究，土木学会論文集第6号（昭. 26.8）

図-2 浸蝕量時間曲線 (勾配 1:4)
Erosion-time Curves (slope 1:4)

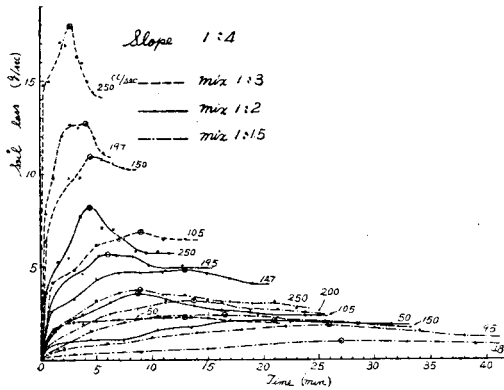
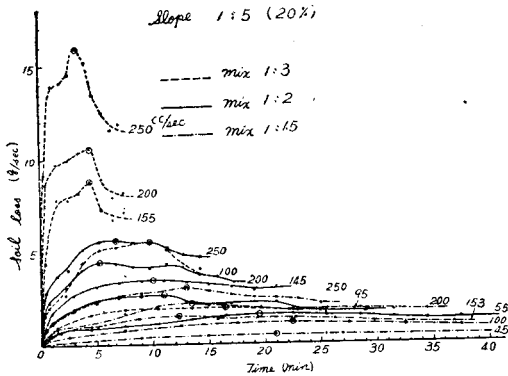


図-3 浸蝕量時間曲線 (勾配 1:5)
Erosion-time Curves (slope 1:5)



3. 公式の誘導並びに考察

(1) 概説 J. H. Neal²⁾, R.E. Horton³⁾等の公式は一般に次の形で表わすことができる。

$$E = kq^\alpha \alpha_s^\beta \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 k は勾配、表面流出水量あるいは降雨強度以外の諸要素、なかでも、土質、表面の状態、斜長の長さ、等によつて支配される係数である。 α, β は指数であるがこれらも k と同様な諸要素によつて支配せられる。土質及び表面の状態が浸蝕量を支配する極めて重要な要素であることは著者のその後行つた多くの実験結果から極めて明らかである。ここでは土質によつて k, α, β 等の値がどのように変化するかを明らかに

- 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, 20 th Annual Meeting, p. 693~711, 1939.

したい。緩斜面の土壌浸蝕と急斜面のそれとは同じ土質で同じ表面流出水量のある場合でも、流水の性質が異なり、従つて浸蝕の機構や浸蝕量が異なり、 k, α, β 等の値も前記両氏の示したものと異なることは明らかである。しかしながら、いま問題にしている急斜面土壌浸蝕量を式(1)の形で表わすことは不都合ではないように思われ、少なくとも実用上は相当に便利であろう。

さて、次に考えなければならぬ大切なことは浸蝕量あるいは流亡土砂量の値として、どのような量を採用すべきかという問題である。浸蝕量時間曲線を眺めると、曲線の山の頂きに当る流砂量 E_{max} と、曲線とが大体水平に近く落ちついてきた時の流砂量 E_c とが目につく。著者の実験では、配合 1:3 のような砂の多い土質の場合では表面流出水量が大きいと、 E_c がうまく捕捉しにくい状態にあつたので、一応 E_{max} を選ぶことにした。

配合 1:1.5, 1:2, 1:3 の各土質につき E_c の捕捉し得られた値と、それに対する E_{max} の比 E_c/E_{max} を調べると表-1を得る。これよりみれば E_c/E_{max} の値は各流量、土質に対して大差のないものと考えても不都合はなきさうである。従つて雨裂状浸蝕が相当に発達した場合は累加浸蝕量を考へても大体一定してゐるのである。

表-1 E_c/E_{max} の値
Values of E_c/E_{max}

	q (cc/sec/m)	S=1:2	S=1:3	S=1:4	S=1:5	平均
Mix 1:1.5	833	0.87	0.92	0.93	0.77	0.87
	650~667	0.79	0.94	0.88	0.89	0.88
	500~533	0.83	0.92	0.81	0.80	0.84
	317~367	0.87	0.93	0.88	0.80	0.87
	150~167	0.88	0.95	0.80	0.80	0.86
	平均		0.85	0.93	0.86	0.81
Mix 1:2	827~833	0.89	0.90	0.68	0.88	0.84
	650~700	0.75	0.91	0.91	0.86	0.86
	483~517	0.88	0.95	0.86	0.79	0.87
	317~350	0.93	0.93	0.65	0.69	0.80
	167~183	0.92	0.93	0.80	0.82	0.87
	平均		0.87	0.92	0.78	0.81
Mix 1:3	833			0.77	0.75	0.76
	657~667			0.91	0.74	0.83
	500~517			0.94	0.82	0.88
	333~350	0.94	0.89	0.87	0.77	0.87
	150~167	0.90	0.89	0.92	0.86	0.89
	平均	0.92	0.89	0.88	0.79	0.85

(2) 公式の誘導 著者が行つて得た実験値は斜面巾 30 cm のものについてであるから、実用化する上に不便である。従つて斜面巾 1.0 m あたりのものに換算した方が好都合である。もつとも、換算して得た値は実験値に斜面の両側の板の影響が多少でも入つてゐると不正確になることはまぬかれぬ。著者の実験では水深が数 mm であり、かつ両側の影響ができる限り少ないように充分板を平滑にし、その上、流水が片側や両側に偏しないように注意を払つたから、この点はさして問題はないものと考えてよい。そこで浸蝕量時間曲線より E_{max} を拾ひだし、これらの値と表面流出水の流量とをいずれも巾 1.0 m あたりのものに換算し、各種配合の土につき一覧的に表示すると表-2~4 を得る。

表-2 E_{max} , q (配合 1:1.5)
 E_{max} versus q (mix 1:5)

勾配	50% (1:2)					25% (1:4)				
q (cc/sec)	833	667	533	367	167	833	667	500	317	160
E_{max} (g/sec)	22.7	16.0	12.1	10.4	6.7	12.5	10.7	7.9	6.3	3.3
勾配	33.3% (1:3)					20% (1:5)				
q (cc/sec)	833	650	517	350	167	833	667	510	333	150
E_{max} (g/sec)	16.5	13.3	11.1	7.7	6.0	10.1	7.2	5.1	3.8	1.5

表-3 E_{max} , q (配合 1:2)
 E_{max} versus q (mix 1:2)

勾配	50% (1:2)					25% (1:4)				
q (cc/sec)	833	700	517	333	167	833	650	490	350	167
E_{max} (g/sec)	49.2	40.5	24.2	19.2	10.2	27.3	18.6	16.1	11.8	6.9
勾配	33.3% (1:3)					20% (1:5)				
q (cc/sec)	827	700	500	333	167	833	667	483	317	183
E_{max} (g/sec)	39.7	31.0	19.7	14.6	8.0	18.8	15.0	11.4	8.8	5.3

表-4 E_{max} , q (配合 1:3)
 E_{max} versus q (mix 1:3)

勾配	50% (1:2)					25% (1:4)				
q (cc/sec)	833	667	517	333	150	833	657	500	350	167
E_{max} (g/sec)	114.0	81.1	62.6	43.4	16.4	59.7	42.2	36.2	22.8	7.6
勾配	33.3% (1:3)					20% (1:5)				
q (cc/sec)	833	667	500	350	153	833	667	517	333	150
E_{max} (g/sec)	96.0	70.6	54.7	30.8	12.3	53.0	35.2	29.5	18.5	6.5

さて、式(1)の両辺の log をとれば式(2)を得る。

$$\log E = \log k + \alpha \log q + \beta \log s \dots\dots\dots (2)$$

いま、 $\log E = z$, $\log q = x$, $\log s = y$, $\log k = l$ とおくと、式(2)は次のように表わしうる。

$$z = \alpha x + \beta y + l \dots\dots\dots (3)$$

従つて、 k , α , β 等の値が土質のみに関係する場合をとると、同一土質では流出水の流量を一定にした場合は、 y と z との間には直線的な関係があり、勾配を一定にした時は、 x と z との間にもまた直線的な関係が成立する。この関係を表-2~4 について検討したところ、ほとんどいずれも満足されることが確かめられたのである。

そこで、式(1)の k , α , β の値を最小自乗法を用いて決めることにし、式(3)に対する正等式として次式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} [xx]\alpha + [xy]\beta + [xl] &= [xz] \\ [xy]\alpha + [yy]\beta + [yl] &= [yz] \\ [x]\alpha + [y]\beta + Nl &= [z] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

従つて、 α , β , l は次式によつて算出した。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\begin{Bmatrix} [xx][y] - [xy][x] \\ [xy][y] - [yy][x] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} [y][y] - N[yy] \\ [x][y] - N[xy] \end{Bmatrix}}{\begin{Bmatrix} [xx][y] - [xy][x] \\ [xy][y] - [yy][x] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} [y][y] - N[yy] \\ [x][y] - N[xy] \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} [xx][y] - [xy][x] \\ [xy][y] - [yy][x] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} [x][y] - N[xy] \end{Bmatrix}} \\ \beta &= \frac{[z] - \alpha[x] - Nl}{[y]} \\ l &= \frac{\begin{Bmatrix} [xx][y] - [xy][x] \\ [xy][y] - [yy][x] \end{Bmatrix} - \alpha \begin{Bmatrix} [xx][y] - [xy][x] \\ [xy][y] - [yy][x] \end{Bmatrix}}{[x][y] - N[xy]} \end{aligned} \right\} (5)$$

その結果は次の表-5 のようである。

表-5 α , β , k の値
Values of α , β and k

土質(配合)	α	β	k
1:1.5	0.482	1.075	0.0124
1:2.0	0.894	0.898	0.0034
1:3.0	1.184	0.723	0.0022

但し式(1)の各記号の単位はそれぞれ、 E (g/sec/m²)、 q (cc/sec/m)、 s (%) とする。

(3) 公式の考察 前述のように著者の実験は長さ 1 m、巾 30 cm、の斜面を用い、流水量 $q = 45 \sim 250$ cc/sec、勾配 $s = 20 \sim 50\%$ の範囲で、配合 1:1.5、1:2、1:3 の 3 種類の土について実験を行つたものである。これらの実験結果を巾 1 m 当りに修正したもののについてとりまとめた結果得られたこの実験公式の指数並びに係数は、この実験に用いた土と同じ土で、その他の諸条件が同じであれば、斜面長 1 m に対しては一定であるものと考えられる。

次に、斜面長を変えた場合その斜面中のどこの 1 m という長さをとつてもこれらの値は変わらないかどうかという問題がある。同一の土質、勾配、表面状態の斜

面に同一流量の表面流出がある場合には、浸蝕の機構や土の浸蝕に対する抵抗力などは斜面長のいかんにかかわらず同じである。この場合ただ斜面の長短によつて多少変化すると考えられるものは流水の状態であろう。すなわち、まず、層状様浸蝕では斜面長のいかんにより浸蝕に大きな影響のある雨水波列の発生並びに発達の有様が異なり、浸蝕量が変化することは確かであろう。次に雨裂状浸蝕の場合でも、斜面長が増すほど、みぞがよく発達し、斜面下方では斜面上方よりも浸蝕作用が多少強い傾向がある。また他方、特に弱雨の場合は斜面の長さが増すと滲透量が増し、斜面下方ほど表面流量が減少し浸蝕量も多少減少することが考えられ、この傾向は緩斜面ほど著しい。このことについては G.W. Musgrave⁴⁾, H.L. Borset, and Russell Woodburn⁵⁾, O. E. Hays, and V. J. Palmer⁶⁾, E. B. Deeter, and P.L. Hopkins⁷⁾, 及び H. G. Lewis, and H.S. Riesbol⁸⁾ などが勾配 1.0% 前後、斜面長 157.5 ft, 315 ft, 630 ft, 並びに 36.3 ft, 72.6 ft, 145.2 ft の各斜面について行つた実験結果に徴しても明らかである。このように斜面の長短により場所により浸蝕量(単位長当りの)が多少異なることは明らかである。ところで、同じ土質の同じ状態の斜面であれば流量が極めて小さい時は別として相当量以上の流出水量があれば、各異なつた流量においても、斜面長の変化に

応じておよそ似かよつた割合で浸蝕量が変化するものと考えられ、斜面長が k , α , β 等に及ぼす影響は土質の違いがそれらに及ぼす影響に比して極めて小さいものとみなしてもよいであろう。

表-5 より次のような傾向を知る。粗粒の比較的多い土は急斜面浸蝕では大きな α の値を示し、この場合 β の値は比較的小さい。細粒に富む土では逆の傾向を示す。また土の配合の相違による α の値の変化の方が β の値の変化よりはるかに大きい。このように土質の違いによる指数の変化の大きいことは、土質によつて浸蝕の機構が違い、また浸蝕に対する抵抗力が異なることを意味している。すなわち粗粒の多い配合の土ほど、流水のために土の粒子が結合を失つて離れやすく、勾配がある大きさ以上になると矩形断面に近い深いみぞが発達し、流水はここに集中するようになる。この時流量が増すと水深も増し、流水の衝撃波などにもとづく回流、横流及び螺旋流なども急激に大きくなり、みぞの底や側壁の受ける浸蝕作用は流量が増すと大きくなり、勾配そのものの増加の影響はむしろ少ない。他方、細粒に富む土では、みぞの発達がおそく、みぞの断面も浅い拋物線形であり、みぞでは流量が増してもその割に水深が増加せず、その上粒子が分離しにくく比較的大きな塊りのまま剥離する。すなわち、渦流、横流、螺旋流などの発達も粗粒に富む土の場合に比べて小さく、またこれらによつて浸蝕を受ける傾向もこの土では少ない。それ故に、流量の増加によるよりはむしろ勾配の増加による浸蝕力の増加、特に層状浸蝕の掃流力の増加が著しくなるからであろう。

4. 結語

ここに誘導した浸蝕量公式はある特定条件の下において行つた実験結果より誘導したものであり、これを実用化するには、さらに相似律の問題や、その他の問題について研究し、これらを明らかにしなければならぬのである。これらに関しては別に改めて論ずるつもりである。本研究は急斜面の土壌浸蝕の定量的関係を数式化する第一歩として行つたものであるが、完全に目的を達するところまではゆかなかつた。本研究に対して御指導を添うした京大石原藤次郎博士に深甚な謝意を表する。(昭. 27. 6. 16)

編集幹事の交代について

土木学会誌編集幹事として2年有余にわたり誌面の改善に努力された三宅正夫氏(東京都建設局)が、去る11月末愛知県土木部計画課へ榮転されたので、後任として東京大学助教授、徳平 淳氏が就任された。