

人工降雨による盛土ノリ面の表面侵食 に関する実験的研究

井上章二*

Experimental Studies on the Surface Erosion of Banking Slope Using Simulated Rainfall

Shoji INOUE

Summary: In order to study the mechanism of surface erosion on bare banking slope, some experiments of soil erosion were carried out using simulated rainfall. In these experiments, each condition of rainfall intensity was 30, 60 and 120 millimeters per hour, and of gradient of slope was 20, 30 and 40 degrees.

Multiple regression analysis was carried out to estimate the factors affecting sediment yield. The result of this analysis showed that sediment yield had a significant relation to maximum 10-minute rainfall intensity, and density of the soil. This turned out to be similar to the result of the previous field experiments in natural rainfall.

It was confirmed that the state of the change of sediment yield was roughly divided into two types by means of rainfall intensity, and that the grain-size distribution of sediment discharge changed with the lapse of time even in condition of constant rainfall intensity.

And the effect of the tractive force of sheet flow was analyzed hydraulically.

要旨 降雨水による裸地盛土ノリ面の表面侵食機構を解明するため、人工降雨による室内実験を行った。ノリ面からの土砂の流出に関係する因子の中で、10分間最大降雨強度、土の単位体積重量、斜面こう配、土の含水比の条件を変化させ、それらを説明変数とし、流出土砂量を目的変数として重回帰分析を行った結果、流出土砂量には10分間最大降雨強度と土の単位体積重量が大きく関与しているということがわかり、以前に実施した野外実験の結果を裏付けることができた。また、この実験では侵食現象を10分間という短時間ずつの連続的变化としてとらえ、流出土砂の量および粒径分布の経時変化を測定したが、その結果、流出土砂は降雨強度の大小により、あるいは一定強度の場合でも時間の経過により、変化していくことが明らかになった。さらに、地表流下水の掃流力が土砂の流出におよぼす影響について、水理学的に解析し、雨滴の衝撃力との関係について考察した。

* 森林工学研究室 Laboratory of Forest Engineering

I はじめに

本研究の目的は、降雨水による盛土ノリ面の表面侵食の機構を定量的に解明することである。以前に実施した自然降雨による野外実験において、ノリ面からの流出土砂量は10分間最大降雨強度の2乗および土壌硬度と強い相関のあることが見出された^{2, 3)}。しかし、この野外実験では、ノリ面の構造上、斜面こう配を変化させることは不可能であり、また、できるだけ自然の状態のまま実験を継続するということから、土の含水比等の計測も困難であったため、降雨強度因子と土壌硬度因子以外の因子が侵食に対してどの程度影響力をもつのかは不明であった。そこで本研究では、それらを考慮して、斜面侵食実験用に作製した人工降雨装置⁴⁾をもちい、小規模な裸地ノリ面を対象とした室内実験を行い、侵食に関与していると考えられる諸因子の影響力について考察した。

また、流出土砂の量および粒径分布の経時変化を測定することにより、土砂の流出におよぼす降雨強度の影響について詳細に検討した。

さらに、ノリ面の表面侵食の形態には、雨滴の衝撃力による土砂の移動、地表流下水の掃流力による土砂の移動、あるいはその両者の複合作用による土砂の移動等が考えられ、表面侵食の機構を解明するためには、雨滴の衝撃力と地表流下水の掃流力とが土砂の流出に対してそれぞれどのように関与しているのかを正確に把握する必要がある。そこで今回は、地表流下水の掃流力によって流出し得る土粒子の最大粒径を推定することにより、地表流下水の表面侵食におよぼす影響力についても検討を加えた。

なお、この論文の一部は、第92回日本林学会大会(名古屋)、昭和56年度砂防学会研究発表会(東京)において発表した。

II 実験方法

実験に使用した人工降雨装置の詳細および検定結果については既に報告⁴⁾したとおりであり、降雨装置は実験ノリ面の上方約5.5mに設置されている。実験ノリ面は、アクリル製の箱に供試土を入れて締固め、それを傾斜可変台上に載せたものである。ノリ面の大きさは、斜面長150cm、幅30cmで、土層の深さは土表面に対して垂直方向に15cmである。アクリル箱の底は二重になっており、上の底板には多数の穴をあけ、浸透水が下に抜けるようにしてあ

表-1 実験条件

実験 No.	降雨強度 mm/hr	こう配 degree	含水比 %	土壌硬度指数 mm	土の単位体積重量 g/cm ³
1	120	20	13.1	19	1.60
2	"	"	13.3	19	1.60
3	60	"	11.3	18	1.58
4	"	"	11.9	20	1.63
5	30	"	11.5	19	1.58
6	"	"	11.4	22	1.63
7	120	30	12.5	18	1.52
8	"	"	13.3	12	1.40
9	60	"	9.8	18	1.50
10	"	"	12.8	15	1.45
11	30	"	10.5	17	1.53
12	"	"	11.7	20	1.58
13	120	40	10.6	18	1.54
14	"	"	11.5	19	1.53
15	60	"	11.7	18	1.58
16	"	"	11.9	19	1.60
17	30	"	11.3	20	1.56
18	"	"	10.4	17	1.57

る。重量4.57kg, 接地面積38.5cm²のランマーを40cmの高さより一定回数落下させ、その衝撃によって供試土を締固めたが、このとき土がアクリル箱よりもわずかに高くなるようにし、後に箱の高さまで削って整形した。

土を締固めた後、土中水分を安定させるために、そのまま数時間静置し、実験開始前に表面土砂の含水比を測定した。実験開始後は地表流出水量、浸透水量および流出土砂量の測定を10分ごとに行った。流出土砂は炉乾燥して重量を測定した後に、フルイ分けによって粒度分布を調べた。また、実験終了後に土の乾燥時の単位体積重量を測定した。

今回は降雨強度30mm/hr, 60mm/hr, 120mm/hrの三種類と、斜面こう配20°, 30°, 40°の三種類とを組み合わせることによって、表-1のように18回の実験を実施した。実験中の降雨はすべて降り始めの強度を維持する矩形分布として与えた。

なお、実験にもちいた供試土は福岡県三郡山系のマサ土で、その比重は2.68, 中央粒径は0.4mm, 標準偏差は6.32であり、粒径加積曲線は図-1のようである。

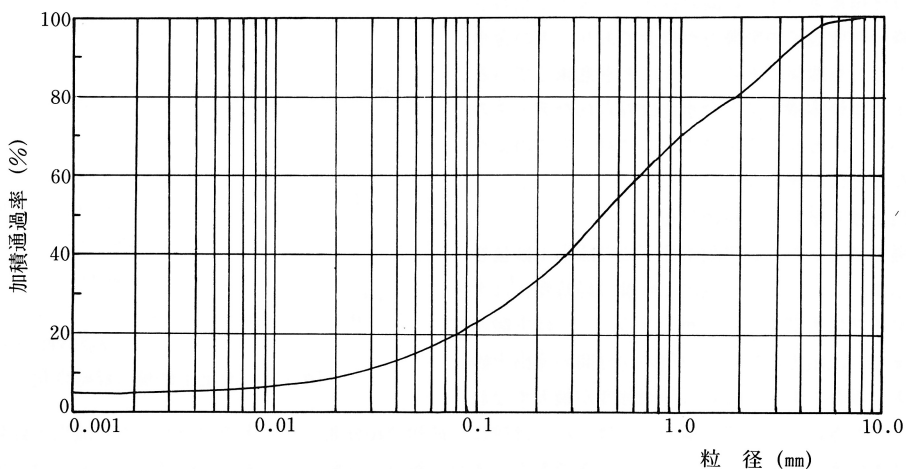


図-1 供試土の粒度分布

III 結果と考察

1) 重回帰分析

以前に実施した野外実験において、流出土砂量と最も相関の高い降雨因子は10分間最大降雨強度の2乗であり、土の締固め程度も流出土砂量と強い関係のあることが判明した。そこでこの室内実験では、野外実験で測定できなかった因子を測定し、10分間最大降雨強度の2乗, 土の単位体積重量, 実験開始直前の土の含水比, 斜面こう配の四因子の中で、どの因子が土砂の流出に対して支配的なものであるのかを知るために重回帰分析を行った。

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4$$

ここで、Y : 流出土砂量

X₁ : 10分間最大降雨強度の2乗

X₂ : 土の単位体積重量

X₃ : 土の含水比

X₄ : 斜面こう配

a₀, a₁, a₂, a₃, a₄ : 定数

とすれば、

$$Y = -3516 + 0.0807 X_1 + 2258 X_2 - 21.0 X_3 + 3.09 X_4$$

となり、これを標準化したデータによって表わすと

$$Y' = 1.1 X'_1 + 0.33 X'_2 - 0.052 X'_3 + 0.15 X'_4$$

となった。偏相関係数は

$$r_{Y1-234} = 0.97^{***} \quad ***: \text{危険率}0.1\% \text{で有意}$$

$$r_{Y2-134} = 0.75^{**} \quad **: \text{危険率}1\% \text{で有意}$$

$$r_{Y3-124} = -0.37$$

$$r_{Y4-123} = 0.52^* \quad *: \text{危険率}5\% \text{で有意}$$

であり、重相関係数は

$$r_{Y-1234} = 0.98^{***}$$

であった。また、回帰係数 a_1, a_2, a_3, a_4 の有意性の検定結果は、 a_1, a_2 は危険率0.1%で有意であり、 a_3 は有意性が認められず、 a_4 は危険率5%で有意となった。すなわち、以上の分析結果によれば流出土砂量が降雨強度と土の単位体積重量つまり締固め程度とに大きく左右され、特に降雨強度因子の影響力が最大であり、土の含水比とはほとんど無関係であるということの意味している。しかし、土の単位体積重量と含水比は得られたデータの変化量が小さく、とり得る値のすべてに対してこのような結果になるとはかぎらない。

2) 流出土砂の量および粒径分布

10分間隔で測定した、各実験条件下での流出土砂量を図-2に示す。これによると流出土砂量の経時変化は次の二つのタイプに大別することができる。一つは実験開始後10分までの流出土砂量がその後の10分間の流出土砂量よりも多い場合である。これは降雨強度が最大すなわち120mm/hrのときにみられる。他の一つはこれとは逆に、最初の10分間よりも次の10分間の方が流出土砂量が多い場合で、降雨強度が60mm/hr, 30mm/hrのときである。また、斜面こう配による流出土砂量の変化割合は、降雨強度が小さいほど大きくなっている。

次に流出土砂の粒径分布の経時変化を図-3に示しているが、一定強度の連続降雨に対しても、このように時間を区切って観察すると土砂の流出の状態は様でないことがわかる。降雨強度120mm/hrのときは、時間の経過にともない、最大粒径階の割合が増加している。これに対して30mm/hrの場合は流出土砂の絶対量が非常に少ないために、バラツキはあるが、最大粒径階の割合はあまり変化していないといえる。

ここで、粒径分布におよぼす斜面こう配の影響を降雨強度別に同一経過時間で比較してみると、降雨強度120mm/hrおよび60mm/hrのときは、こう配による粒径分布の差異は認められない。これに対して30mm/hrのときは、こう配が大きいほど、大粒径の占める割合が大きくなるのがわかる。

以上の結果より、マサ土では、ノリ面からの土砂の流出は、まず粒径の比較的小きな移動しやすい土粒子から始まり、しだいに大きな粒径の土粒子が流出していくようになるものと推察される。すなわち、土粒子が降雨によって淘汰される

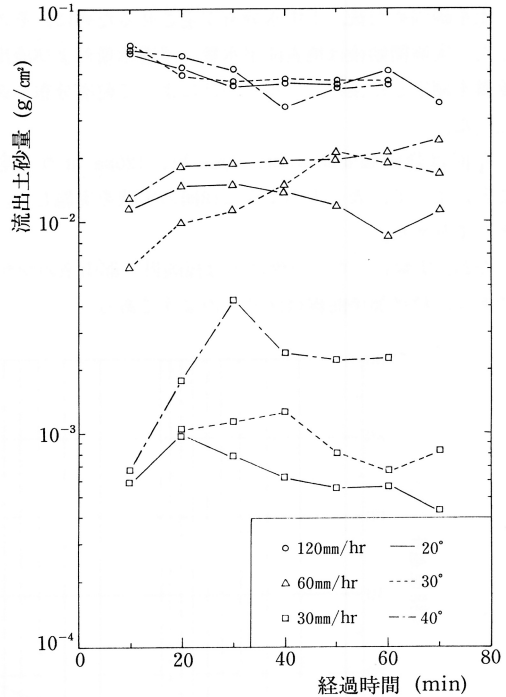


図-2 流出土砂量の経時変化

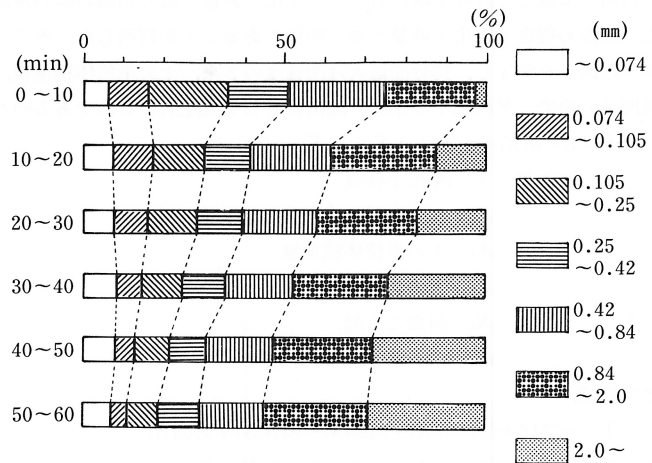


図-3-1 粒径分布の経時変化 (120mm/hr, 30°)

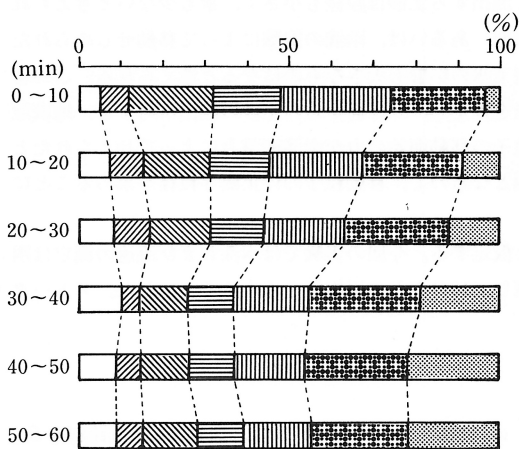


図-3-2 粒径分布の経時変化 (120mm/hr, 40°)

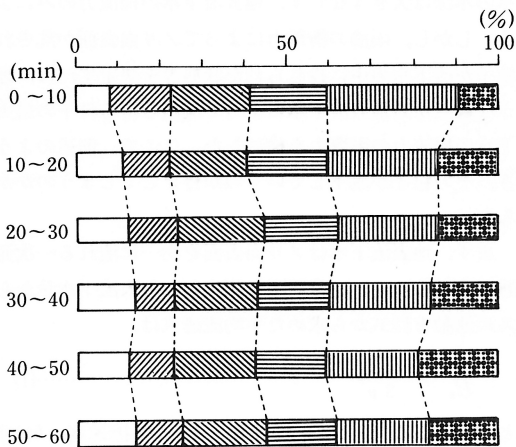


図-3-3 粒径分布の経時変化 (60mm/hr, 20°)

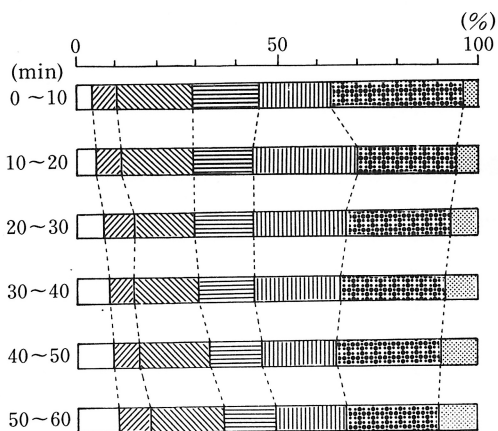


図-3-4 粒径分布の経時変化 (60mm/hr, 40°)

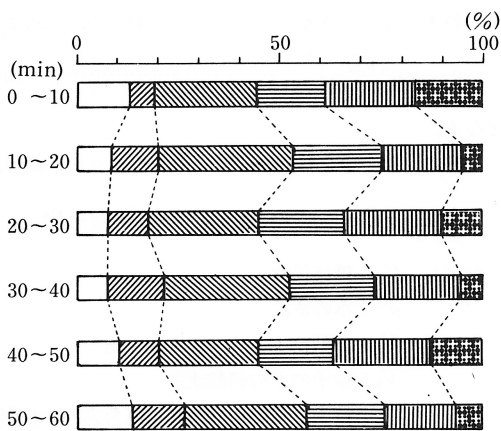


図-3-5 粒径分布の経時変化 (30mm/hr, 20°)

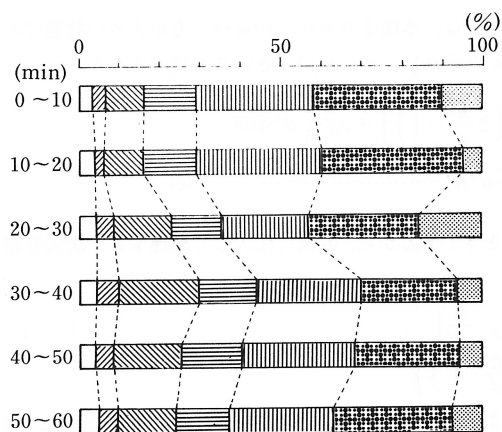


図-3-6 粒径分布の経時変化 (30mm/hr, 40°)

から侵食が進行していくと考えられる。この傾向は降雨強度が大きいほど、顕著にあらわれるようである。また、流出土砂量の経時変化を前述のように二つのタイプに分けることができたのも、この淘汰現象によるものと考えられる。降雨強度が大きいときは移動しやすい土粒子が急激に流出してしまい、移動しにくいものが残り、降雨強度が小さいときは侵食が徐々にしか進行しないためにこの淘汰現象が明確にはあらわれないのであろう。これに対して、降雨強度が小さいほど、斜面こう配因子の流出土砂におよぼす影響は大きくなる。これは重回帰分析でも示されたように、降雨強度が大きいときは降雨強度の影響力がこう配の影響力をはるかに上回るためと推察される。

3) 地表流下水の掃流力

この実験のように斜面長が短い場合には、地表流下

水の水深は大きくならず、地表流下水の掃流力のみによって流出する土砂は粒径も小さく、量も少ないと考えられる。しかし、雨滴の衝撃力によってノリ面表面が乱された状態、あるいは、雨滴の衝撃によって移動せしめられた粒子が流下水の中に投げられた状態等を想定すれば、地表流下水の影響も大きなものになると考えられる。このような観点から地表流下水によって流出し得る粒子の最大粒径を推定し、ノリ面からの土砂の流出に対する、地表流下水の掃流力の影響力を検討した。ここで、前述のように粒子の移動開始の力が雨滴衝撃力によって与えられたとき、その粒子が流下していくのか停止してしまうのが問題となるので、移動粒子の停止限界粒径を求めることにした。

まず、地表流下水はノリ面表面を均一に流れる一次元流と仮定する。今回の実験では水深および流速の測定は困難であったので、10分間隔で測定した地表流下水量から逆算し、10分ごとの平均値を求めることにした。ストークスの運動方程式から求めた平均流速式は、

$$\frac{v}{U_*} = \frac{U_* h}{3 \nu} \dots\dots\dots(1)$$

となる。ここに、 v は平均流速、 U_* は摩擦速度、 h は水深、 ν は動粘性係数である。また、流量を Q 、流路幅を B 、重力の加速度を g 、こう配を θ とすれば、

$$Q = B h v \dots\dots\dots(2)$$

$$U_* = \sqrt{g h \sin\theta} \dots\dots\dots(3)$$

と表わすことができる。したがって、(1)、(2)、(3)式より水深は

$$h = \left(\frac{3 \nu Q}{B g \sin\theta} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots(4)$$

となる。

一方、流体の中を移動する粒子の力のつりあい式は、粒子を球形とし等速運動をしているとすれば、

$$\frac{1}{2} C_D \rho (U - V_s)^2 A + W \sin\theta = (W \cos\theta - F) \mu_f \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 C_D ：抵抗係数

ρ ：水の密度

U ：移動粒子に対する代表流速

V_s ：粒子の平均移動速度

A ：粒子の浸潤部の流れに直角方向の投影面積

W ：粒子の重量

F ：浮力

μ_f ：動摩擦係数

となり、本実験のように地表流下水の水深がきわめて小さい場合は、水深よりも粒子の直径の方が大きい状態での移動が存在する。すなわち、粒子の直径を d 、粒子の密度を σ とすれば、 $h < d$ のとき(5)式を整理すると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} C_D \rho (U - V_s)^2 \left\{ \frac{\pi}{8} d^2 + \left(h - \frac{d}{2} \right) \sqrt{dh - \frac{d^2}{4}} + \frac{d^2}{4} \sin^{-1} \left(2 \frac{h}{d} - 1 \right) \right\} + \sigma g \frac{\pi}{6} d^3 \sin\theta \\ = \left\{ \sigma - \rho \left(\frac{h}{d} \right)^2 \left(3 - 2 \frac{h}{d} \right) \right\} g \cos\theta \frac{\pi}{6} d^3 \mu_f \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

のように表わせる。粒子の停止限界というのは $V_s = 0$ となるときであるから、(6)式に代入して整理すると次式を得る。

$$U^2 = \frac{4 \pi g d \left[\left\{ \frac{\sigma}{\rho} - \left(\frac{h}{d} \right)^2 \left(3 - 2 \frac{h}{d} \right) \right\} (\tan\theta)^{-1} \mu_f - \frac{\sigma}{\rho} \right]}{3 C_D \left\{ \frac{\pi}{2} + 4 \left(\frac{h}{d} - \frac{1}{2} \right) \sqrt{\frac{h}{d} - \left(\frac{h}{d} \right)^2} + \sin^{-1} \left(2 \frac{h}{d} - 1 \right) \right\}} \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 $U = v$ とし、(2)および(4)式によって求められた v および h の値を(7)式に代入すれば、そのときの流速、水深に対する移動粒子の停止限界粒径が求められる。

実際に停止限界粒径を計算するにあたって必要になってくる定数の値は次のように決定した。動粘性係数 ν は実

験時の水温10℃のとき $\nu = 0.013$ (cm²/s), 流路幅 $B = 30$ (cm), 重力の加速度 $g = 980$ (cm/s²), 抵抗係数 C_D はレイノルズ数によって変化するが, この実験では $C_D = 3.0$, 水の密度 $\rho = 1.0$ (g/cm³)とした。動摩擦係数 μ_f は芦田らの報告¹⁾を基に検討した結果, μ_f の変化に対して d の変化は無視できるほど小さいので, $\mu_f = 0.5$ として実用上問題は無いと思われる。

以上のような方法で計算した結果を表-2に示す。表中, T は実験開始からの経過時間, d_c は停止限界粒径, ま

表-2 停止限界粒径

	T (min)	120mm/hr		60mm/hr		30mm/hr	
		d_c (cm)	$d_c <$ (%)	d_c (cm)	$d_c <$ (%)	d_c (cm)	$d_c <$ (%)
20°	10	0.065	21.5	0.044	31.0	0.020	62.0
	20	0.069	24.5	0.050	26.0	0.035	30.5
	30	0.069	27.5	0.050	27.0	0.036	39.5
	40	0.070	33.5	0.051	27.0	0.037	30.0
	50	0.070	31.5	0.050	23.0	0.038	38.0
	60	0.070	33.0	0.050	21.0	0.038	26.5
30°	10	0.055	34.5	0.009	91.0	0.034	63.5
	20	0.057	45.0	0.038	54.5	0.039	58.5
	30	0.055	50.5	0.036	31.0	0.040	57.5
	40	0.053	55.5	0.035	50.0	0.040	57.0
	50	0.057	57.0	0.041	37.5	0.040	58.0
	60	0.056	61.0	0.043	42.0	0.040	53.5
40°	10	0.045	46.0	—	—	0.007	96.0
	20	0.051	42.0	0.014	83.5	0.016	82.5
	30	0.052	51.0	0.023	48.5	0.027	65.0
	40	0.052	55.5	0.026	65.0	0.029	51.5
	50	0.051	62.5	0.025	47.5	0.029	56.0
	60	0.053	70.0	0.026	62.0	0.029	57.5

た, $d_c <$ は流出土砂のうち d_c よりも大きな粒子の占める割合である。これによると, 地表流下水の掃流力によって流出可能な最大粒子より大きな粒子が相当な割合流出している。したがって, ノリ面侵食における土砂の流出機構の解析にあたっては, 土砂の流出が掃流力のみによるとする従来の方法は再検討される必要があるのではないかと考えられる。

IV おわりに

人工降雨装置をもちいた今回の実験で, 裸地盛土ノリ面の侵食には降雨因子として10分間最大降雨強度の2乗, 土壌の因子としては単位体積重量が大きく関与していることが確認され, 自然降雨による野外実験の結果を裏付けることができた。また, 流出土砂量の経時変化は降雨強度によって二つのタイプに大別でき, 流出土砂の粒径分布は一定強度の連続降雨でも時間の経過とともに変化していき, しかもその変化の状態は降雨強度によって異なるということが確認された。

今後は, 侵食機構をより理論的, 物理的に解明していくとともに, 侵食に対する土質因子の影響についてもさらに研究をすすめていくつもりである。

最後に, 本研究の実施にあたり, ご指導, ご協力を賜った九州大学農学部, 末 勝海教授をはじめ, 砂防工学研究室の方々に対して, ここに記して深謝の意を表する。

引用文献

- 1) 芦田和男ほか：山地河川の掃流砂量に関する研究. 新砂防107：9～17, 1978
- 2) 江崎次夫・井上章二：盛土のり面の植生保護工に関する研究(Ⅲ). 愛媛大演報15：109～126, 1978
- 3) 井上章二・長澤 喬：盛土ノリ面の保全に関する研究(2). 日林九支研論33：321～322, 1980
- 4) 井上章二：人工降雨装置による斜面侵食に関する研究(Ⅰ). 日林九支研論33：319～320, 1980

(1981年8月31日受理)