

マサ土ノリ面の表面侵食におよぼす粒度分布の
影響について(II)

地表流下水および侵食土砂の流出特性

井上章二*

On Effects of Variety of Grain-size Distribution
on Surface Erosion of Banking Slope
of Decomposed Granite (II)

Characteristic of surface runoff and sediment discharge

Shoji INOUE

Summary : In order to make clear the effect of grain-size distribution of soil on surface erosion on bare banking slope, some experiments of soil erosion on experimental slope were carried out using simulated rainfall, and surface runoff, sediment yield and grain-size distribution of sediment discharge were measured.

Soil materials in these experiments were four varieties of same decomposed granite but of different grain-size distribution. Each condition of rainfall intensity was 30, 60 and 120 millimeters per hour, and gradient of slope was 20 degrees.

The results may be summarized as follows:

1. The difference of surface runoff among materials was not shown in the case of same rainfall intensity.
2. Sediment yield increased as content rate of small particles increased in the case of same rainfall intensity.
3. The accuracy of application of following formula proposed by Iwagaki et al⁶⁾,

$$\frac{q}{u_* \cdot d_{50}} = A_0 \left\{ \frac{u_*^2}{(\sigma / \rho - 1) g \cdot d_{50}} \right\}^{A_1}$$

where, q : sediment yield (cm³/cm/sec.)

u_* : shear velocity (cm/sec.)

d_{50} : median diameter of particles (cm)

σ : density of sediment (gr/cm³)

ρ : density of water (gr/cm³)

g : acceleration of gravity (cm/sec.²)

* 森林工学研究室 Laboratory of Forest Engineering

A_0 and A_1 : constant

slightly decreased in condition of low content rate of small particles.

4. The following formula proposed in previous study¹⁾,

$$\frac{E}{\gamma \cdot d_{50}} = B_0 \left(\frac{i^2}{g \cdot d_{50}} \right)^{B_1} - B_2$$

where, E : sediment yield (gr/cm²)

γ : unit weight of sediment (gr/cm³)

i : maximum 10-minute rainfall intensity (cm/sec.)

B_0 , B_1 and B_2 : constant

applied very well even in all materials.

5. Content rate of small particles of sediment discharge increased as sediment yield increased in condition of high content rate of small particles.

要 旨 ノリ面の表面侵食におよぼす供試土の粒度分布の影響を解明するため、人工降雨装置をもちいたモデル斜面による侵食実験をおこなった。マサ土をフルイ分けにより、4種類の異なる粒度分布を示す試料を作製して供試土とし、地表流出水量、流出土砂量、流出土砂の粒度分布の比較をおこなった。また、以前に提案した流出土砂量実験式の適合性についても検討した。実験結果を要約すれば、以下のようである。

- 1) 供試土の粒度分布が異なる場合でも、降雨強度が等しいときには地表流出水量に大きな差はみとめられない。
- 2) 流出土砂量は供試土の粒度分布の相違によって大きく変化し、小粒径の土粒子の含まれる割合の多いほど流出土砂量は増加する。
- 3) 岩垣ら⁶⁾が提案した流出土砂量実験式：

$$\frac{q}{u_* \cdot d_{50}} = A_0 \left\{ \frac{u_*^2}{(\sigma / \rho - 1) g d_{50}} \right\}^{A_1}$$

ただし、 g は単位時間単位幅あたり流出土砂量、 u_* は流れの摩擦速度、 d_{50} は土粒子の中央粒径、 σ は土粒子の密度、 ρ は水の密度、 g は重力の加速度、 A_0 および A_1 は定数

は、小粒径の土粒子の割合が少ない場合には、適合が悪くなる。

- 4) 筆者ら¹⁾が前に提案した流出土砂量実験式：

$$\frac{E}{\gamma \cdot d_{50}} = B_0 \left(\frac{i^2}{g \cdot d_{50}} \right)^{B_1} - B_2$$

ただし、 E は単位面積あたり流出土砂量、 γ は土の単位体積重量、 i は10分間最大降雨強度、 B_0 、 B_1 および B_2 は定数

は、供試土の粒度分布の相違に対しても適合性がよい。

- 5) 供試土に小粒径の土粒子が多く含まれる場合は、実験中に流出土砂量が増加したときに、小粒径の土粒子の流出割合が増加する。

I は じ め に

ノリ面侵食に関する研究のアプローチの方法には、雨滴のもつエネルギーや地表流水の掃流力、あるいはそれらを包含した形での短時間降雨強度などのいわゆる侵食の外力要因を主体に侵食現象を解明していく方向と、土壌物理性、化学性などを基礎として、侵食に対する抵抗力要因、すなわち、ノリ面を構成している土の受食性の面から研究していく方向の二つがあり、それぞれに研究がすすめられている。しかし、ノリ面侵食の機構を解明するためには、最終的にこの両者の相互関係を明らかにする必要があると考えられる。

そこでその第一段階として、本研究では、土の粒度分布の相違が、地表流出水量、流出土砂量に対してどのように影響をおよぼすのかを降雨強度の大きさとも関連させて検討した。また、流出土砂量の推定法についても若干の

検討を加えた。

一般に粘性土は粘土分の含有率が高いほど耐侵食性が大きいといわれている。しかし、マサ土のような砂質土ではこれとは逆の傾向を示す実験結果²⁾が得られており、これらを検証する意味で、人工降雨装置をもちたいモデル斜面による実験を実施している。現在、実験は続行中であるが、これまでに得られた結果を報告する。

本研究の実施にあたり、ご指導、ご助言、ご協力を賜っている九州大学農学部、末 勝海教授をはじめ砂防工学研究室の方々、愛媛大学農学部、伏見知道教授、小川 滋助教授に対してここに深く感謝の意を表す。また、実験にあたっては、愛媛大学農学部演習林、江崎次夫教官をはじめ藤久正文、尾上清利、河野修一各技官の方々、森林工学研究室専攻生横山宏三君（現ヤマキ）にご協力をいただいた。ここに記して深謝の意を表す。

なお、本報告の一部は、第93回日本林学会大会（藤沢）において発表した。また、本研究は、昭和56年度、文部省科学研究費の助成を受けた。

II 実験装置および実験方法

1) 人工降雨装置

実験に使用した人工降雨装置は1981年8月に愛媛大学米野々演習林に設置したものであり、雨滴発生部、金網および給水槽より構成されている。雨滴発生部は注射針によって水滴を発生させる構造で、縦20列、横47列、計940本の皮下注射針が4cm間隔で並んでおり、降雨面積は約1.4m²である。金網は雨滴発生部直下30cmにとりつけ、水平方向の往復運動を与え、その振動の速さによって雨滴径の分布を変化させることができる。給水槽では一定の水頭を保てるようになっており、水は一定の圧力で雨滴発生部に供給される。また、水滴の落下速度が一定となるいわゆる終末速度を得るために、雨滴発生部は実験斜面上方約11.5mのところに設置してある。降雨強度は約10～160mm/hrまで変化可能であり、雨滴分布も自然降雨に近い状態であることが確認されている。なお、構造、性能などその他詳細については既に報告⁴⁾したとおりである。

2) 実験方法

供試土には演習林産のマサ土をもちい、それをフルイによって粒度分布を①～④までの4種類に分けた。それぞ

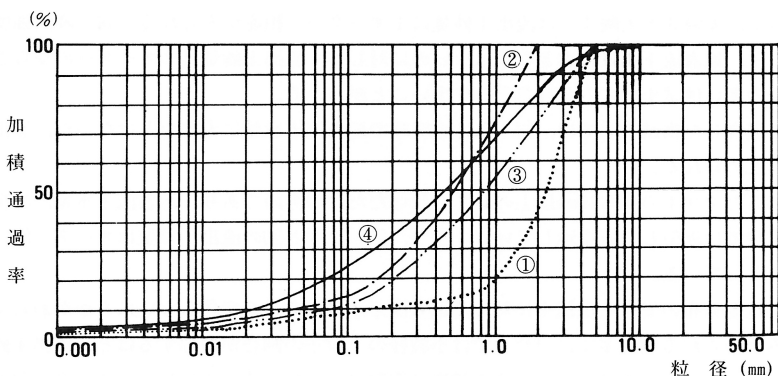


図-1 供試土の粒径加積曲線

れの粒度試験結果を図-1および表-1に示している。実験ノリ面は幅50cm、長さ150cm、深さ20cmの木製の箱に供試土を入れ、土粒子の破壊を防ぐためにローラーの転圧によって締固め、それを傾斜した台に載せたものである。斜面こう配は、今回の実験では20°と一定にした。斜面下端には土砂受用のブリキをとりつけているが、箱の側面の侵食に対する

表-1 供試土の諸元

		中央粒径 (cm)	標準偏差	比重
供試土	①	0.220	2.52	2.64
	②	0.055	2.94	
	③	0.089	4.03	
	④	0.045	6.32	

影響を除くため、中央30cm、両端10cmずつに分割して地表流下水および流出土砂を採取、測定できるようにし、中央30cm部分より流出した地表流下水、侵食土砂について今回分析の対象とした。

降雨強度は30、60、120mm/hrの3段階で実験したが、すべて開始時の強度を維持する矩形波形とした。実験開始後は、10分ごとに地表流下水量と流出土砂量を測定し、流出土砂はその粒度分布も調べた。以上の方法で表-2に示すように合計16回の実験をおこなった。

表-2 実験条件

実験 No.	供試土	降雨強度 (mm/hr)	降雨時間 (min)	土壌硬度指数 (mm)	実験 No.	供試土	降雨強度 (mm/hr)	降雨時間 (min)	土壌硬度指数 (mm)
1	①	120	120	15	9	③	120	120	19
2	"	"	60	14	10	"	"	60	14
3	②	60	120	19	11	④	30	70	19
4	"	"	"	20	12	"	"	80	22
5	"	120	"	18	13	"	60	60	18
6	"	"	60	16	14	"	"	70	20
7	③	60	120	17	15	"	120	70	19
8	"	"	60	18	16	"	"	40	19

III 実験結果および考察

1) 地表流下水量と流出土砂量

図-2は単位幅あたりの地表流下水量と流出土砂量の10分ごとの経時変化を供試土別に示したものである。比較的大粒径の土粒子の占める割合の多い供試土①では、実験1は地表流下水量と流出土砂量の増減がよく一致しているのに対して、実験2は両者の増減パターンは逆になっている。また、流出土砂量は実験1と実験2で大きな差はみられないが、実験1は増加傾向、実験2は減少傾向となっている。一方、地表流下水量は実験1と実験2でかなりの差がみとめられる。

供試土②は比較的小粒径の土粒子の割合が多い場合であり、同じ降雨条件において実験5と実験6は結果の再現性がみとめられるが、実験3と実験4では流出土砂量に1オーダーの相違がみられる。同一降雨強度で供試土①と②を比較してみると、地表流下水量は大きな差はないのに対して、流出土砂量は2オーダーのひらきがあり、小粒径の土粒子の割合の多い供試土②の方が侵食されやすいことがわかる。

供試土①と②を混合した供試土③では、同一条件の実験で地表流下水量に大きな差はないが、流出土砂量には1オーダーの差がみとめられる。

供試土④は採取したマサ土のうち19mm以上のレキを除いただけのものであり、地表流下水量、流出土砂量ともに、同一条件下での実験では近似した値を示している。また、供試土③と④の流出土砂量はオーダー的には供試土①と②の中間的な値をとっている。

以上のように、粒度分布の異なる供試土に対して地表流下水量はあまり変化しないにもかかわらず、流出土砂量には大きな差がみとめられる例が多く、マサ土では小粒径の土粒子の割合が増加するほど、流出土砂量が増加する傾向を示している。また、同じ供試土、同じ降雨強度の実験において、流出土砂量に1オーダー程度の差が生じる場合もある。その原因の一つとして、実験9と実験10のときにみられるように、土壌硬度に大きな差があるということが考えられる。しかし、その他の実験例では、この結果を生じさせるような実験条件の相違はみられない。ところが、以前に実施した自然降雨による野外実験において、10分間最大降雨強度と降雨波形が近似しているいくつかの降雨について流出土砂量を比較してみると、10分間最大降雨強度が10mm/10min以上の場合は流出土砂量が1オーダー相違している例もある。同一の実験条件といってもノリ面を均一あるいは同一に締固めることは不可能であり、そのわずかな相違によって流出土砂量に1オーダー程度のバラツキまたは誤差が生じるとも考えられる。また、供試土①の場合にみられた地表流下水量の差も上記のようなことに起因しているのかもしれない。これらの原因については、さらに詳細に検討する必要がある。

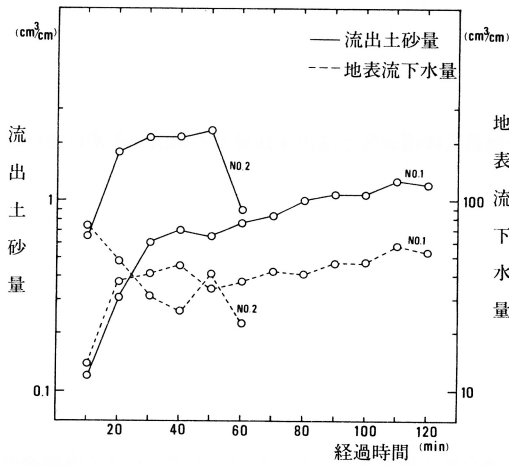


図-2-1 地表流下水量と流出土砂量の経時変化 (供試土①)

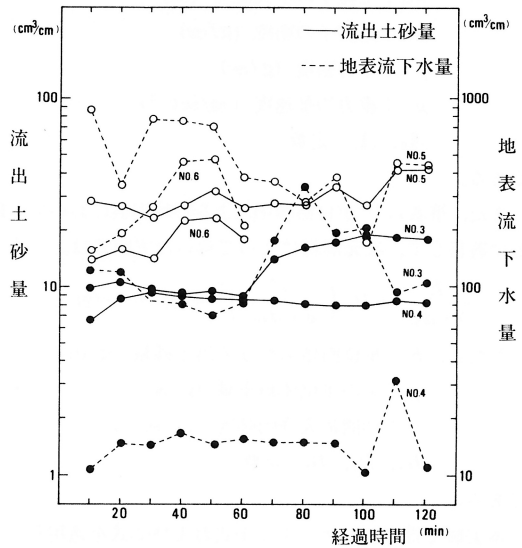


図-2-2 地表流下水量と流出土砂量の経時変化 (供試土②)

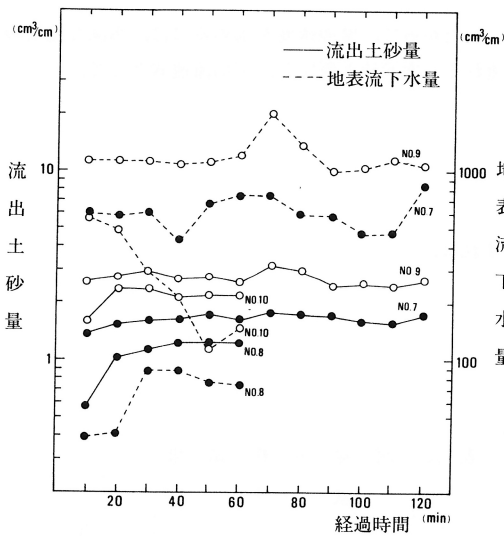


図-2-3 地表流下水量と流出土砂量の経時変化 (供試土③)

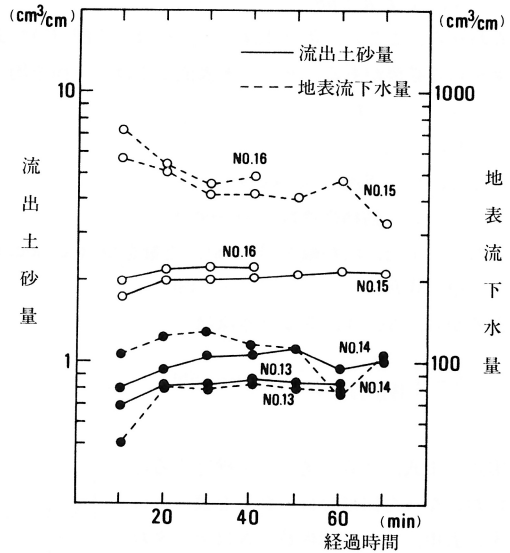


図-2-4 地表流下水量と流出土砂量の経時変化 (供試土④)

2) 流出土砂量の推定

ノリ面からの侵食土砂量をある程度物理的に推定する方法は、おおむね次の二つに分類できる。すなわち、地表流下水の掃流力に主眼をおき、侵食土砂を掃流砂としてとらえるものと、降雨強度、特に一連続降雨中の短時間最大降雨強度から流出土砂量を推定しようとするものである。

岩垣ら⁶⁾が提案した掃流砂量実験式は、

$$\frac{q}{u_* \cdot d_{50}} = A_0 \left\{ \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1) g d_{50}} \right\}^{A_1} \dots\dots(1)$$

ただし、 q : 単位時間単位幅あたり侵食土砂量 (cm³/cm/sec.)

u_* : 流れの摩擦速度 (cm/sec.)

d_{50} : 土粒子の中央粒径 (cm)
 σ : 土粒子の密度 (g/cm³)
 ρ : 水の密度 (g/cm³)
 g : 重力の加速度 (cm/sec.²)
 A_0, A_1 : 定数

である。

また、筆者ら¹⁾が自然降雨による野外実験において、10分間最大降雨強度と流出土砂量との相関が非常に強いことに着目して、次元解析によって導いた実験式は、

$$\frac{E}{\gamma \cdot d_{50}} = B_0 \left(\frac{i^2}{g \cdot d_{50}} \right)^{B_1} - B_2 \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 E : 単位面積あたり流出土砂量 (g/cm²)
 γ : 土の単位体積重量 (g/cm³)
 i : 10分間最大降雨強度 (cm/sec.)
 B_0, B_1, B_2 : 定数

である。

本実験で得られたデータに(1)式および(2)式を適用し、その適合度の検定をおこなったが、(1)式における摩擦速度 u_* は次のようにして求めた。

まず、摩擦速度は

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

と表わせる。ここに、 h は水深 (cm)、 θ はこう配 (°) である。したがって、摩擦速度を求めるには、水深と流量の関係を知る必要がある。そこで地表流下水はノリ面を均一に流れる一次元流と仮定し、平均流速式として、

$$\frac{v}{u_*} = \frac{u_* h}{3 \nu} \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 v : 流速 (cm/sec.)
 ν : 動粘性係数 (cm²/sec.)

をもちい、また、流路幅を W (cm)、流量を Q (cm³/sec.) とすれば、

$$Q = W h v \dots \dots \dots (5)$$

であるから、(3)、(4)、(5)より水深は

$$h = \left(\frac{3 \nu Q}{W g \sin \theta} \right)^{\frac{1}{3}} \dots \dots \dots (6)$$

となる。

実際に(1)式、(2)式の適合度を検定するためにおこなった回帰分析の結果を表-3に示す。表中、 r は相関係数、 N はデータ数である。また、(2)式においては、これまでの研究結果⁵⁾から $B_1 \approx 1$ であることが確認されているので、ここでは $B_1 = 1$ とおいた。(1)式の場合は、比較的大粒径の土粒子の割合が多いときに相関係数が低くなっている。前に報告³⁾したように、掃流力によって移動しうる土粒子の大きさには限界があるため、大粒径の土粒子が多く含まれる場合は実験式の適合性が悪くなるものと考えられ、(1)式の適用にはその点の十分な考慮が必要であろう。

表-3 回 帰 分 析 結 果

	供 試 土 別			
	①	②	③	④
A_0	3.39×10	8.37×10^{-1}	7.94×10^{-1}	7.82×10^{-1}
A_1	8.52×10^{-1}	3.20×10^{-1}	3.03×10^{-1}	1.05×10^{-1}
r	0.65**	0.91***	0.84***	0.64***
N	18	42	36	39

	①	②	③	④
	B_0	3.11×10^{-3}	1.34×10^{-5}	4.69×10^{-5}
B_2	-1.98×10^{-8}	6.99×10^{-8}	4.24×10^{-8}	3.45×10^{-8}
r	0.94***	0.84***	0.72***	0.96***
N	18	42	36	39

** : 有意水準 99% レベル
 *** : 有意水準 99.9% レベル

(2)式の場合は、いずれの供試土においても相関係数は高く、供試土の粒径分布に左右されることなく適用できると考えられる。また、(2)式は複雑な降雨波形の中の10分間最大降雨強度と流出土砂量との強い相関関係により導きだされたもので、野外実験で非常に適合度が高かったのであるが、降雨を矩形分布として与えたこのモデル実験においてもよく適合することが確認された。しかし、(2)式における10分間最大降雨強度と流出土砂の関係は、物理的には雨滴の落下エネルギーによる土粒子の初期移動もしくは飛散、および地表流下水の掃流力による流送とを包含しているため、雨滴侵食と掃流侵食との関係は不明であり、現時点では物理的に不明確な点も指摘される。

3) 流出土砂の粒度分布

降雨時間の経過にともなう流出土砂量の増減と流出土砂の粒度分布とに何らかの関係があるのではないかという

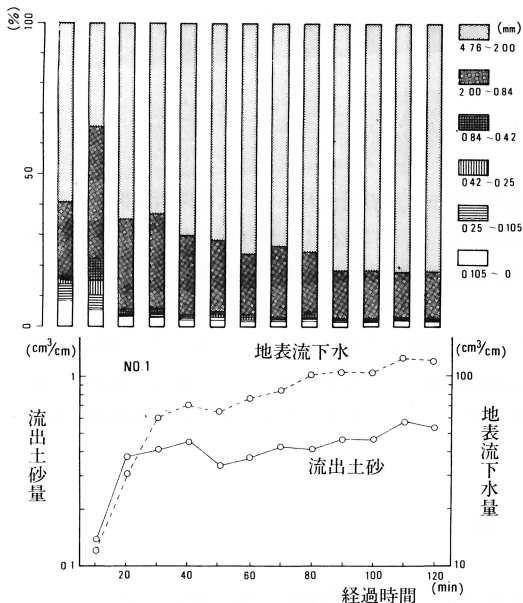


図-3-1 流出土砂の粒度分布 (供試土①)

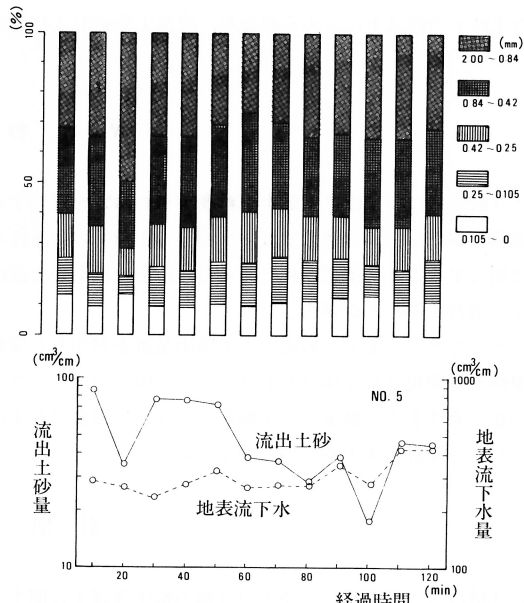


図-3-2 流出土砂の粒土分布 (供試土②)

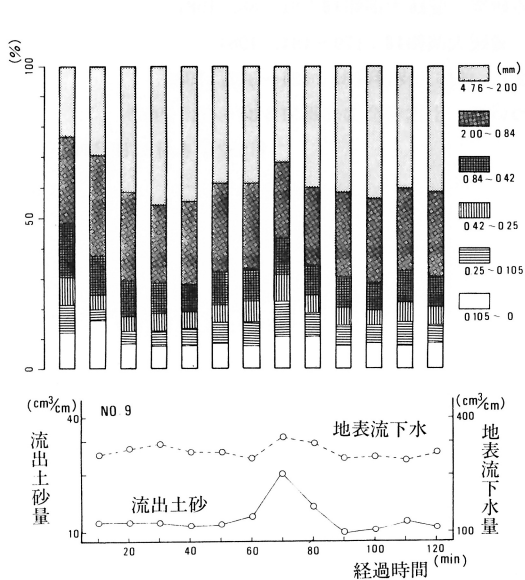


図-3-3 流出土砂の粒度分布 (供試土③)

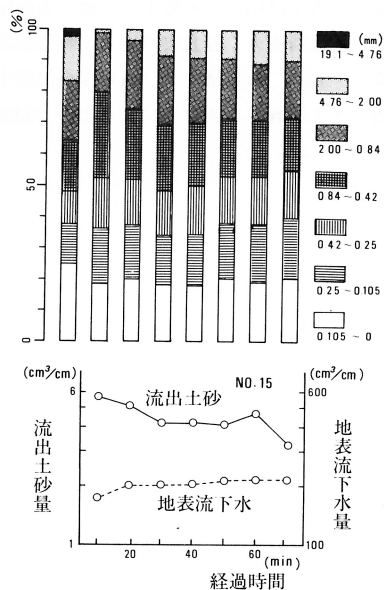


図-3-4 流出土砂の粒度分布 (供試土④)

推測から、10分ごとに採取した流出土砂を炉乾燥後フルイによって粒度分布を調べた。その結果のうち、各供試土1例ずつを図-3に示す。図中、左端に供試土の粒度分布、下段には流出土砂量と地表流下水量を対照のために示している。

供試土①、実験1では、流出土砂量が増加するとともに、比較的大きな粒径の土粒子の割合が増加しており、供試土②、③、④の場合は、供試土①のときとは逆に、流出土砂量が増加したときに、小さな粒径の土粒子の流出割合が増加している。

供試土①は前述のように比較的大きな粒径の土粒子の割合が多く、流出土砂量の絶対量が、他の3つの供試土の場合と比較して非常に少ない。それゆえ、粒径の大きな重い土粒子の量のわずかな変動によって粒度分布は大きく変化し、また実験誤差も大きなものになると考えられる。したがって、マサ土のような砂質土においては、小粒径の土粒子の供試土に占める割合が、流出土砂量および流出土砂の粒度分布に大きな影響を与えるものと考えられる。

IV お わ り に

ノリ面侵食におよぼす供試土の粒度分布の影響を解明するために、モデル斜面において、人工降雨装置をもちいた実験をおこない、マサ土では、小粒径の土粒子の含まれる割合が多いときに流出土砂量が増加し、粘性土の場合とは相反することが確認された。また、以前に提案した流出土砂量実験式が、粒度分布の異なる供試土についても十分に適合することが判明した。

しかしながら、モデル斜面、人工降雨装置を利用した実験で、同一条件の実験のくり返しにおいて、実験結果の再現性が疑問視される場合もあり、その原因について、さらに詳細に検討する必要がある。今後は、供試土の粒度分布の条件をより整備して実験をおこない、侵食におよぼす粒径そのもの影響、および粒径の分布状態の影響等について解析をすすめていく予定である。

引 用 文 献

- 1) 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
- 2) 江崎次夫・津田 修・藤久正文：盛土のり面の植生保護工に関する研究（Ⅹ）。91回日林論：427～428，1980
- 3) 井上章二：人工降雨による盛土ノリ面の表面侵食に関する研究。愛媛大演報18：81～88，1981
- 4) 井上章二・江崎次夫：侵食実験用人工降雨装置について。愛媛大演報18：179～184，1981
- 5) 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
- 6) 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51：34～40，1957

(1982年8月31日受理)