

模型水路を用いた土砂流下実験における損失エネルギーの算出（その1）

～平均粒径の違いによる影響～

中央大学理工学部 正会員 國生 剛治

学生会員 ○田辺 稔史 平賀 有輝 西村 治久

1. 研究背景

我が国では毎年集中豪雨や台風に伴う強雨によって土石流が発生している。これらの土石流災害の予知・予測は難しく、高い頻度で大きな被害を及ぼしてきた。土石流は一見流体に近い挙動を示すために流体力学的に扱われることが多い。しかし、一方で流出土砂の実態を把握し適切な防災対策に繋げるためには、粒状体としての性質も重要であると考えられる。本研究では土石流を粒状体として扱い、エネルギーバランスの面から流出土砂の挙動を把握することを目的とし、模型水路を用いて、土石流材料の粒度分布などが流下中の損失エネルギーに与える影響に着目した実験を行っている¹⁾。本報ではその結果のうち、平均粒径 D50 の違いによる影響について述べる。

2. 実験方法

実験装置の概略を図-1に示す。実験には幅120mm、高さ200mmの亚克力製の矩形固定床水路を用いた。水路下流端から上流側2800mmをシャッターで仕切り、そこに貯めた土砂を流す。水路下流端から流出した土砂質量を自動計測するために設置した電子天秤の最大容量は40kg、サンプリング速度は50Hzである。また、水路出口部から自由落下する土砂の落下軌跡を側方から1秒間に60コマの速さでビデオ撮影することで、水路下流端通過時の土砂の流速の時刻歴を測定した。

実験手順は、まずシャッターより上流側に土砂と水を充填する。その際、あらかじめ土砂に少量の水を加えて混ぜ合わせ、さらなる加水での土砂と水の一体化を図った。その後空気圧により仕切り板を一気に引き上げることで土石流を発生させた。

実験材料として用いた河床砂礫の粒径加積曲線を図-2に、実験条件を表-1に示す。土砂質量は10kg、流下距離を2800mm、水路の傾斜角度θは30°、水と土砂の重量比W/Sを0.5、0.35とし、平均粒径はD₅₀=14.43、5.77、1.84と変化させ、水路流下中の損失エネルギーの比較検討を行った。

3. 損失エネルギーの算出方法

土砂の水路内損失エネルギーE_{DP}は、式(1)のように初期位置エネルギーMgLtanθ [J] から土砂流下後の水路内に堆積した砂の残存位置エネルギーΣm_{1j}g(L-l_j)tanθ [J] および水路下流端から流出した土砂の運動エネルギーΣm₂(t_i)v₀²(t_i)/2 [J] の差として求められる。式中の記号の詳細は表-2に示す。ここで、シャッター内に貯めた土砂の初期位置エネルギーの算出では、飽和土砂と上部の水の部分の質量と重心位置を計算し、それを用いて初期位置エネルギーを計算している。

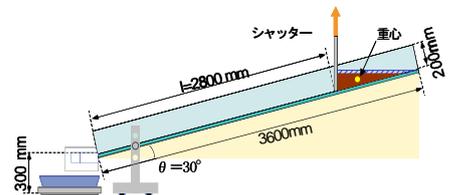


図-1 模型水路概略図

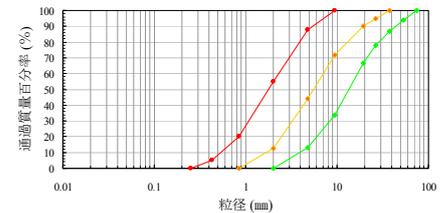


図-2 粒径加積曲線

表-1 実験条件

	ms[kg]	L[mm]	W/S	Uc	Uc'	D50	θ[deg]
case1-1	10	2800	0.5	4.25	1.03	14.43	30
case1-2	10	2800	0.5	4.22	0.94	5.77	30
case1-3	10	2800	0.5	4.26	1.01	1.84	30
case2-1	10	2800	0.35	4.25	1.03	14.43	30
case2-2	10	2800	0.35	4.22	0.94	5.77	30
case2-3	10	2800	0.35	4.26	1.01	1.84	30

表-2 式中記号の詳細

記号	単位	説明
E _{DP}	[J]	損失エネルギー
e _{DP}	[J/mkg]	1m1kgあたりの損失エネルギー
M	[kg]	全質量(土砂+水)
θ	[°]	模型水路の傾斜角度
L	[m]	水路下流端から土砂の重心までの水平距離
m _{1j}	[kg]	水路内堆積土砂質量
l _j	[m]	水路内堆積土砂の水平距離
m ₂ (t _i)	[kg]	水路より流出した土砂質量
v ₀ (t _i)	[m/sec]	流出土砂の流速
g	[m/s ²]	重力加速度

$$E_{DP} = MgL \tan \theta - \left\{ \sum_j m_{1j} g(L-l_j) \tan \theta + \frac{1}{2} \sum_i m_2(t_i) v_0^2(t_i) \right\} \dots (1) \quad v_0(t_i) = \sqrt{\frac{g}{z(1 + \cos 2\theta) - x \sin 2\theta}} x(t_i) \dots (2)$$

キーワード 土石流, エネルギー, 模型水路実験

連絡先 〒112-8551 文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部土木工学科 Tel 03-3817-1799

土砂の流速 $v_0(t_i)$ は水路側面から $\Delta t=1/60$ 秒で撮影した画像より、水路下流端から放出される土砂が、そこから z ($=100\text{mm}$ 一定) だけ下方の位置を通過する時の水平距離 $x(t_i)$ を計測することで任意の時間 t_i における土砂の流出速度 $v_0(t_i)$ を式(2)により連続的に計算する。この $v_0(t_i)$ と電子天秤で測定した土砂質量 $m_2(t_i)$ 、水路小区間 (20cm) ごとに測定した残存質量 m_{1j} (j は小区間のナンバー) を用いて、式(1)から損失エネルギー E_{DP} を算出する。

4.結果と考察

図-3 は流出土砂質量の時刻歴を、図-4 は流速の時刻歴を示したものである。質量の時刻歴には短周期の変動がのっているため、フィルターをかけて滑らかにしている。図-3 より、 W/S の違いによらず D_{50} が小さくなるにつれて若干ではあるが、土砂が流出するのに時間を要するようになっていることが見て取れる。また $W/S=0.5$ の方が 0.35 より早い段階で土砂流出が終了していることが分かる。次に図-4 より、 W/S の違いによらず D_{50} が小さくなるにしたがって若干ではあるが、初期の流速が遅くなる傾向が見て取れる。また $W/S=0.5$ の方が 0.35 より初期の流速が早いことが見て取れる。

図-5 は初期の位置エネルギーを 100%として、各エネルギーの割合を示したものである。これより、 D_{50} が小さくなるにつれて全体に占める損失エネルギーの割合が大きくなっていき、運動エネルギーが小さくなっていくことが見て取れる。また D_{50} が同じもの同士で W/S が 0.5 と 0.35 の比較をしたところ、 0.35 の方が損失エネルギーの割合が大きくなる結果となった。

ところで、単位質量 1kg の土砂が単位水平距離 1m を流れる間の損失エネルギー e_{DP} は、式(3)のように表わすことができる。図-6 は、式(3)より水平距離 1m 当り、質量 1kg 当りで算出した損失エネルギー e_{DP} とその区間での重力エネルギー $g \tan\theta$ [J/m/kg] の比をあらわしたグラフである。同図中には同一条件で 2 回ずつ行った実験で求めた平均とそれぞれ値も載せているが、データのばらつきを考慮しても、明瞭な傾向を示している。この比の大小により土砂の流動性が決定されるといえるが、 W/S が大きくなり D_{50} が大きくなるほど比の値が小さくなり、土砂の流動性が増してくることが分かる。

$$e_{DP} \text{ [J/m/kg]} = \frac{MgL \tan\theta - \sum_j m_{1j}g(L-l_j) \tan\theta - \frac{1}{2} \sum_i m_2(t_i)v_0^2}{\sum_j m_{1j}l_j + L \sum_i m_2(t_i)} \dots(3)$$

5.まとめ

限られた条件の範囲ではあるが、今回の模型水路流下実験により以下のことが分かった。

- 平均粒径が大きくなり W/S が大きくなるほど、流出時間が短く、流出速度は速くなる傾向がある。
- 平均粒径が大きくなり W/S が大きくなるほど、損失エネルギーと重力エネルギーの比が小さくなることから、同じ高度差で生じる土石流の破壊エネルギーが増大する傾向が明らかとなった。

謝辞；今回の調査は文部科学省科学技術振興調整費による委託研究開発（活褶曲地帯における地震被害データアーカイブスの構築と社会基盤施設の防災対策への活用法の提案，研究代表者：小長井一男）の一環として実施したものである。末筆ながら関係各位に感謝の意を表します。

[参考文献] 1) 國生剛治,平賀有輝:模型水路を用いた土砂流下実験における損失エネルギー算出方法の検討, Geo-kanto2007 講演概要集

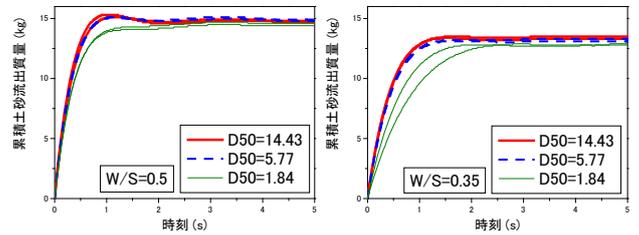


図-3 累積土砂流出質量の時刻歴

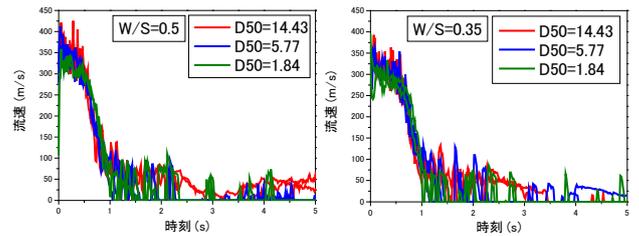


図-4 流速の時刻歴

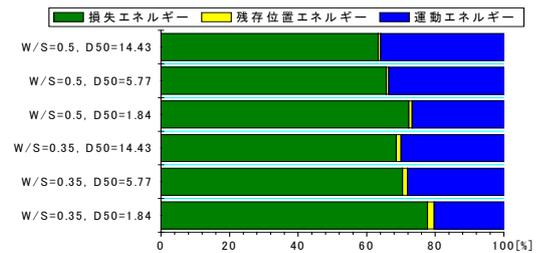


図-5 各エネルギーの割合

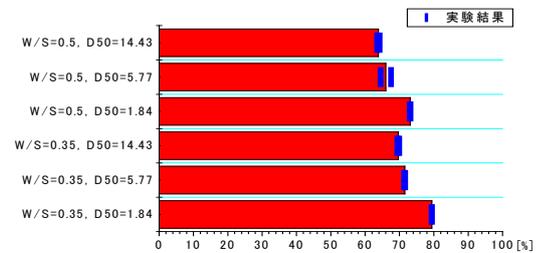


図-6 流出土砂中の損失エネルギーと重力エネルギーの比