

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

中央大学理工学部 正会員 國生 剛治 原 忠

学生会員 ○机 慶人 吉川 陽

1. 研究背景

わ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おり、これらの土砂災害の予知・予測は難しく、地形条件や気象条件からも高い頻度で大きな人的被害を及ぼしてきた。従来、土石流は一見流体に近い挙動を示すため、流体力学的に扱われることが多かった。しかし、一方で粒状体としての性質も適切な土砂管理や流出土砂の実態を把握するために重要であると考えられる。本研究では土石流の粒状体的側面に主に着目し、土石流発生溪流におけるエネルギーバランスの解明によって流出土砂の挙動を把握することを目的としている。

2. 固定床模型水路を用いた土砂流下実験の方法および実験条件

2. 1. 実験方法

実験には勾配を $\theta=20^\circ$ に固定し、表面を防水ペイントした幅120mm、高さ200mmの木製の矩形固定床水路(図-1)を用い、実験材料としては利根川砂を使用した。水路下流端から流出した土砂の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30コマの速さで測定することにより、水路下流端通過時の土砂の流速の時刻歴を同時に測定した。

実験手順としては、水路上流側2800mmを板で仕切り、仕切り板上流側に土砂10kgと水を充填し、手動で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。また、仕切り板より上流側に土砂を充填させる前に、あらかじめ一定量の水を加えて土砂の充填による分級がなるべく起きないように混ぜ合わせた。実験装置の概略図を図-1に示す。

2. 2. 実験条件

土砂量10kg、流下距離2800mmとし、本実験の再現性の確認、W/Sの違いによる損失エネルギーの比較検討、さらには細粒分含有率を0、5、10%と変化させた試料を用いての損失エネルギーの比較検討を行った。実験材料として用いた利根川砂礫の粒径加積曲線をそれぞれ図-2に示し、また実験条件の詳細を表-1に示す。

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_L は式(1)のように初期位置エネルギー MgH [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 $\sum m_{ij}gh_j$ [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 $\sum m_2(t_i)v_0^2(t_i)/2$ [J] の差として求められる。ここで式(1)中の記号の詳細を表-2に示す。

土砂の流速 $v_0(t_i)$ を水路側面から撮影した画像から算出する計算方法は式(2)の通りである。すなわち水路下流端から放出される土砂が、そこから z (=100mm 一定) だけ下方の位置を通過する時の水平距離 $x(t_i)$ を計測することにより、任意の時間 t_i における土砂の流出速度 $v_0(t_i)$ を連続的に計算する。このように t_i ごとに電子天秤で測

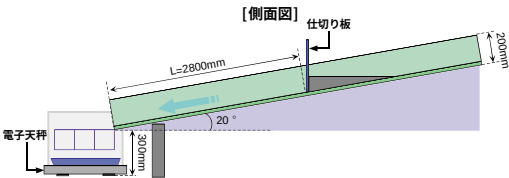


図 - 1 模型水路概略図

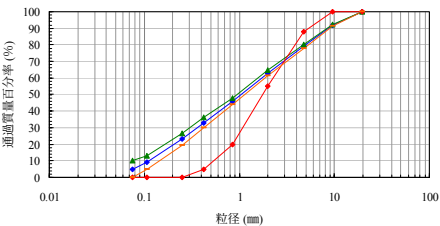


図 - 2 粒径加積曲線

表 - 1 実験条件

	M[kg]	L[mm]	W/S	Uc	Uc'	D50[mm]	Fc[%]	θ[deg]
case1-1-1	10	2800	0.5	4.26	1.01	1.84	0.0	20
case1-2-1	10	2800	0.35	4.26	1.01	1.84	0.0	20
case1-3-1	10	2800	1.0	4.26	1.01	1.84	0.0	20
case2-1-1	10	2800	0.5	12.22	0.61	1.24	0.0	20
case2-2-1	10	2800	0.35	12.22	0.61	1.24	0.0	20
case2-1-2	10	2800	0.5	15.45	0.66	1.12	5.0	20
case2-2-2	10	2800	0.35	15.45	0.66	1.12	5.0	20
case2-1-3	10	2800	0.5	22.48	0.78	0.99	10.0	20
case2-2-3	10	2800	0.35	22.48	0.78	0.99	10.0	20

表 - 2 式中記号の詳細

E_L	[J]	損失エネルギー
M	[kg]	全質量(土砂+水)
H	[m]	土砂流下前の平均高さ
m_{ij}	[kg]	水路上堆砂土砂質量
h_i	[m]	水路上堆砂土砂の平均高さ
$m_2(t_i)$	[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

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

定した流出土砂質量 $m_2(t_i)$ ，さらに式(2)で計算した $v_0(t_i)$ の $\Delta t=1/30$ 秒ごとの値，また水路小区間（20cm）ごとに測定した残存質量 m_{1j} を用いて，式(1)から損失エネルギー E_L を算定する．ただし土砂の流出速度 $v_0(t_i)$ と流出土砂質量 $m_2(t_i)$ の間に生ずるわずかな時間差は無視している．

$$E_L = MgH - \left\{ \sum_j m_{1j} g h_j + \frac{1}{2} \sum_i m_2(t_i) v_0^2(t_i) \right\} \quad \cdots(1) \quad v_0(t_i) = \sqrt{\frac{g}{z(1 + \cos 2\theta) - x \sin 2\theta}} x(t_i) \quad \cdots(2)$$

4. 結果と考察

本実験における再現性を確認するために case1-1-1, 1-2-1 の条件下で各ケース 2 回ずつ (A,B) 実験を行った．損失エネルギー E_L および運動エネルギー，残存位置エネルギーそれぞれの割合を図-3 に示す．

これより水土比 W/S が 0.5, 0.35 両ケースともに，各エネルギーの割合はほぼ同じとなり，本実験の再現性は良いと考えられる．

流速の時間変化の測定例をそれぞれ図-4 に示すが実験ケースごとにかなり類似した時間変化を示しており，今回用いた測定法に信頼性があると考えられる．さらに詳細に見ると，流速については， $W/S=0.5$ の方が $W/S=0.35$ より初期段階での流速が明らかに大きいことがわかる．また，細粒分含有率 F_c が多いほど土砂の流出時間が多少長い傾向が見られる．

一方，流出土砂質量の時間変化を図-5 に示すが， $W/S=0.5$ の方が $W/S=0.35$ より初期の流出質量が明らかに大きい．また細粒分含有率 F_c の影響については，流出開始からほぼ同じ割合で土砂が流出し，最終的に流出した量についてもほとんど差が無いことがわかる．また，細粒分含有率 F_c が 10% で水土比 W/S が 0.35 の case2-2-3 については土砂がほとんど流下しなかった．

図-6 は $W/S=0.5$ と 0.35 の条件で $F_c=0, 5, 10\%$ に変化したケースを比較しているが，水土比 W/S が小さいほうが損失エネルギーの割合が大きくなることがわかる．また，水土比 W/S が同じケースで比較すると，細粒分含有率 F_c が多くなるほど多少損失エネルギーの割合が増える傾向が見られる．

図-7 は，細粒分を含まない均等係数が $U_c'=4$ 程度の粗砂について， W/S を 1.0～0.35 に変化した場合のエネルギーを示す．図-4 からわかるように水土比 W/S の大きい方が流出土砂の流速が大きく，運動エネルギーの割合が大きくなり，損失エネルギーが小さい値を示す傾向が見られた．

5. まとめ

最も損失エネルギーの割合に寄与するのは水土比 W/S であり， W/S の値が大きいほど損失エネルギーの割合は小さくなる傾向が見られた．また，細粒分含有率が大きいほど損失エネルギーの割合が多少大きくなる傾向が見られた．

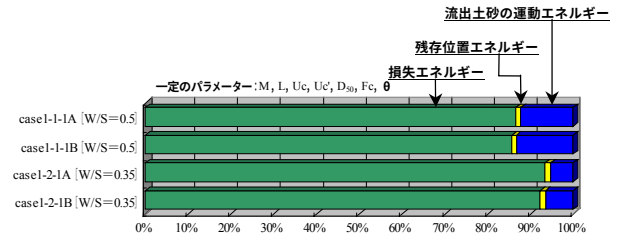


図-3 各エネルギーの割合

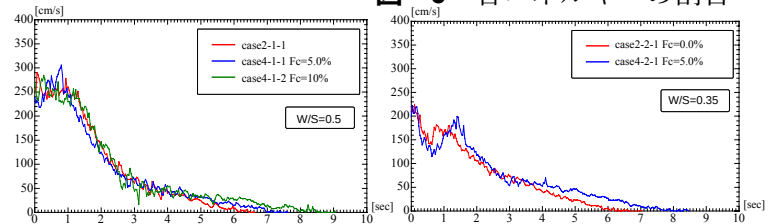


図-4 流速の時刻歴 ($W/S=0.5, 0.35$)

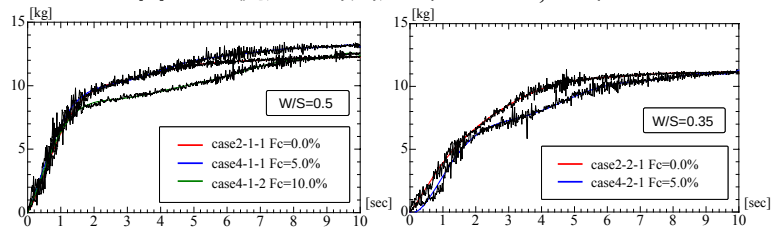


図-5 累積土砂流出質量の時刻歴 ($W/S=0.5, 0.35$)

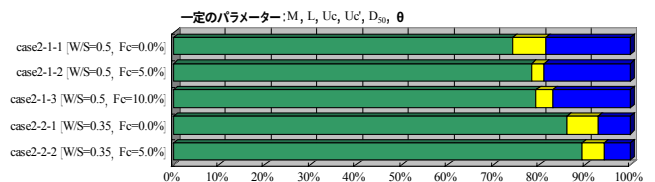


図-6 各エネルギーの割合

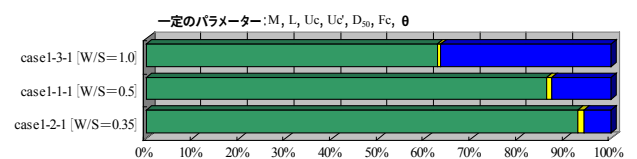


図-7 各エネルギーの割合