

文章编号: 1008-2786-(2016)6-724-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000179

滑坡碎屑流运动参数与影响因素敏感度研究

樊晓一 杨海龙 田述军 张友谊 孙新坡 王海瓜

(西南科技大学 土木工程与建筑学院 四川 绵阳 621010)

摘 要: 现场调查的数据分析表明: 同等规模体积的中、小型滑坡碎屑流的运动参数存在较大的差异, 这些参数的差异源于滑坡体积、岩土体特性和地形条件耦合作用的结果, 理论分析和数值计算常常不能完全解释其机理。因此, 在模型试验的基础上, 运用极差、方差分析等方法, 探讨了滑坡碎屑流的体积、颗粒级配和斜坡坡度对坡脚下的水平运动距离、等效摩擦系数的影响。研究表明: 滑坡碎屑流体积在同等规模等级和相同的落差条件下, 3 种因素对坡脚下水平运动距离的影响大小依次为颗粒级配、斜坡坡度和体积。颗粒级配对碎屑流坡脚下的水平运动距离的影响非常显著, 而同等规模内变化的体积的影响不显著。因素对等效摩擦系数的影响大小顺序为斜坡坡度、颗粒级配和体积。坡度对碎屑流等效摩擦系数的影响非常显著, 而同等规模内变化的体积的影响不显著。

关键词: 滑坡碎屑流; 颗粒级配; 斜坡坡度; 体积; 运动参数

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

已有的研究表明, 运动距离、等效摩擦系数与体积之间的较强相关性是基于体积分布在几个数量级的滑坡碎屑流统计分析的结果, 并且 90% 的滑坡体积都大于 100 万立方米^[1,2]。其结果仅能对大于 100 万立方米的滑坡碎屑流的运动性特征进行评价。但是对于中小型滑坡碎屑流, 如果运动过程未明显受阻(河谷、凸出的地形等), 同等规模体积的滑坡运动距离和等效摩擦系数会存在较大差异。已有的研究方法并不能完全解释这种差异, 其原因在于滑坡碎屑流的运动特征不仅受控于体积, 而且还受滑坡的地形条件和岩土体特征的影响。近年来, 国内外学者通过考虑滑坡形状、运动路径的约束条件、地形因素等来分析运动参数预测的离散性^[3-5]。杨裕云等^[6]、张龙等^[7]、王玉峰等^[8] 研究分别表明了崩滑体规模、地形条件、岩土体颗粒是高速远程运动的主要因素。郝明辉等^[9]、Yang 等^[10]、Kokelaara

等^[11]通过模型试验研究了碎屑的粒径、碎屑流体积、宏观和微观地形条件对滑坡碎屑流的运动参数的作用。上述的研究表明岩土体特征、地形条件和体积是滑坡碎屑流的运动参数的主要影响因素, 但研究的成果都是基于单一因素的影响, 并且采用的岩土体颗粒级配区间较小、地形条件单一以及固定的体积, 而缺乏岩土体特性、地形条件和体积的变化对运动参数的耦合作用关系以及各影响因素的敏感度的研究。

1 滑坡运动参数与体积

滑坡碎屑流运动距离的参数主要包括了最大水平运动距离(L_{\max})、坡脚下的水平运动距离(L) (图 1)。在山区, 坡脚下相对平坦的地形是人们社会经济活动的集中区域, 而这些区域常受到滑坡碎屑流

收稿日期(Received date): 2015-12-06; 修回日期(Accepted): 2016-03-12。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41272297, 41401195, 41472325); 四川省科技厅项目(2014JY0121); 四川省教育厅重点项目(14ZA0095) [National Natural Science Foundation of China(41272297; 41401195; 41472325); Science and Technology Department of Sichuan Province(2014JY0121); Education Department of Sichuan Province(14ZA0095)]

作者简介(Biography): 樊晓一(1974-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程及地质灾害方面的教学与研究工作 [Fan Xiaoyi (1974-), male, Ph.D., professor, research directions for geological hazard and geotechnical engineering] E-mail: xyfan1003@126.com

的威胁,一旦在降雨和地震的诱发下发生滑坡,常导致严重的人员伤亡和财产损失。因此坡脚下的水平运动距离(L)是滑坡、碎屑流灾害评估和防灾减灾最重要的因素。等效摩擦系数(最大垂直运动距离 H_{\max} 与最大水平运动距离 L_{\max} 的比值)作为描述滑坡碎屑流的运动性特征和反演滑坡运动速度的重要参数,一直以来,认为它主要受控于滑坡的体积而忽略了其他因素的影响。

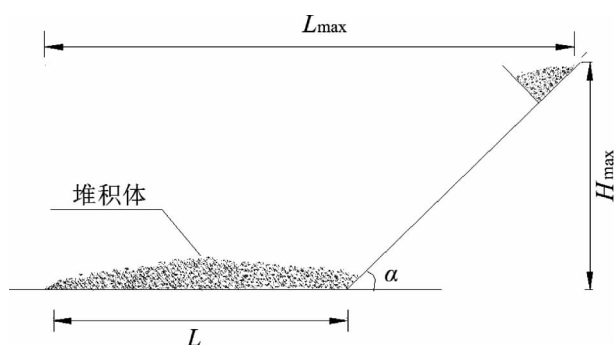


图1 滑坡运动距离示意图

Fig. 1 Movement distances of landslide

然而,对滑坡资料的分析表明^[12],虽然坡脚下的水平运动距离(L)在总体上随体积的增加而增大,等效摩擦系数(H_{\max}/L_{\max})随体积增加而减小,但是在同一规模等级下,不同滑坡的 L 和 H_{\max}/L_{\max} 却差异较大(图2、图3),导致在滑坡运动参数预测上呈现较大的误差。

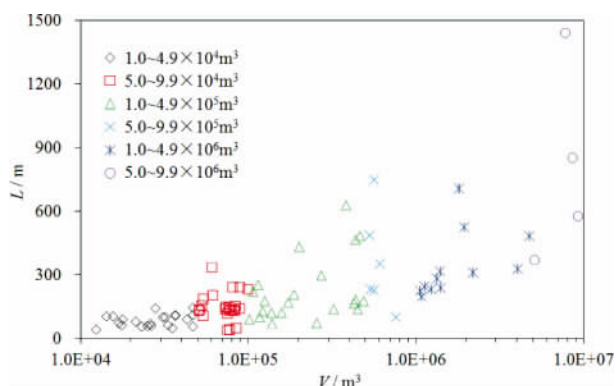


图2 滑坡体积与坡脚下的水平运动距离

Fig. 2 Horizontal movement distances on the bottom and volumes of landslides

因此,通过滑坡碎屑流的模型试验,采用4种斜坡坡度(25°、35°、45°、55°)、3类岩土体颗粒级配(分别代表土质、碎石土和岩质滑坡)和4种体积规

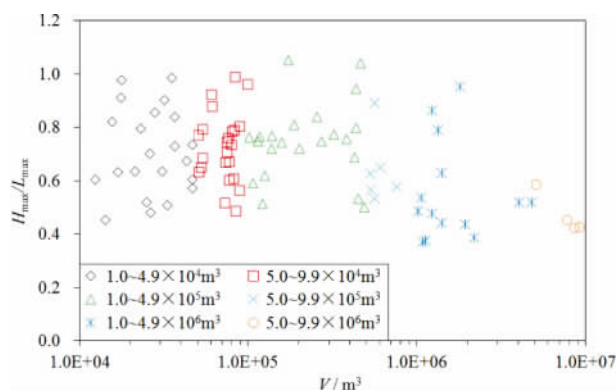


图3 滑坡等效摩擦系数与体积

Fig. 3 Apparent coefficients of friction and volumes of landslides

模来分析滑坡坡脚下的水平运动距离、等效摩擦系数的影响特征,揭示岩土体颗粒级配、斜坡坡度和同等规模等级内变化的体积对滑坡碎屑流运动参数的作用关系和敏感度。

2 试验和方法

2.1 试验设置

模型试验装置由2部分组成,上部斜坡为滑坡碎屑流的启动加速区,下部水平部分为运动堆积区。上、下部之间采用活动连接,可使上部斜坡具有不同的坡度。模型试验装置总长12 m,高3 m,宽1 m,深0.75 m。试验中上部斜坡的坡度分别设置为25°、35°、45°和55°(图4)。

2.2 试验材料

为了分析滑坡碎屑流的岩土体特征对运动速度、运动距离和等效摩擦系数的影响,此实验选取了3种天然岩土体材料(图5)。试验获得的岩土体M1、M2、M3的平均粒径为0.2 mm、1.2 mm、27 mm;密度为1.31 g/cm³、2.02 g/cm³、1.85 g/cm³;内摩擦角分别为32.42°、37.85°和48.19°。

2.3 分析方法

采用正交分析方法^[13,14],根据3个因素的特征,分别取每个因素的不同水平分析影响因素对滑坡碎屑流运动参数的敏感度(表1)。运用正交分析中不同因素水平的平均值中的最大值与最小值的差(极差,记为R)来度量影响因素的敏感度大小。极差值大的因素对指标的影响大,是影响指标的主要因素;反之,极差值小的因素对指标的影响小,是影响指标的次要因素。

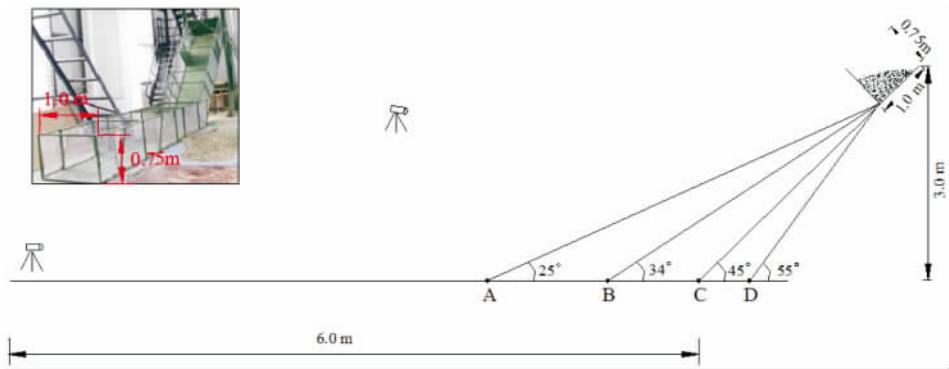


图 4 模型试验装置

Fig. 4 Experimental set-up

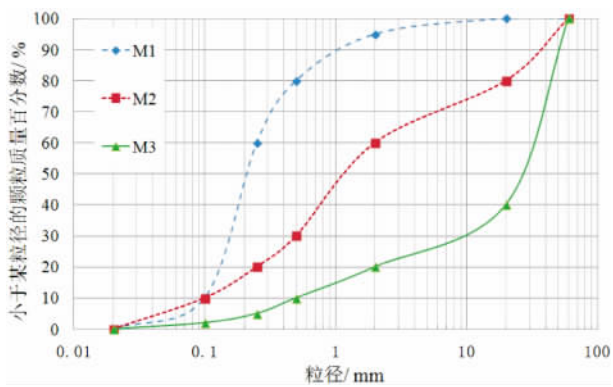


图 5 土体的颗粒级配

Fig. 5 Grading curve of materials

表 1 正交分析因素及水平

Tab. 1 Factors and levels of orthogonal analysis

水平因素	V/m^3	岩土样	$\alpha / ^\circ$
1	0.20	M1	25
2	0.15	M2	35
3	0.10	M3	45
4	0.05		55

3 坡脚下水平运动距离的影响因素敏感度分析

3.1 因素对 L 的影响特征

试验测得了在体积、岩土体和斜坡坡度作用下的坡脚下的水平运动距离(表 2)。当斜坡坡度为 25° 时, M1 和 M2 的岩土体都在斜坡上堆积, 未能滑动到坡脚位置, 坡脚下的水平运动距离都为 0。在相同的体积下和坡度条件下, L 随平均粒径(d_{50}) 的增加而增大。这是由于平均粒径越大, 碎屑流运动中与底板的接触面积较小, 受到地面的摩擦力减小,

运动性较大, 并且在坡脚后前后缘的土体颗粒之间存在能量传递, 致使其能保持较长距离的运动特征。

在相同的体积下和平均粒径(d_{50}) 条件下, L 随坡度的增加而增大。在同等的高度条件下, 斜坡的长度随坡度的减小而增大, 导致碎屑流在坡面上的运动距离增加, 摩擦作用导致碎屑流的整体运动特征不显著, 在坡脚后的能量传递有效性降低, 运动距离减小; 在相同的平均粒径(d_{50}) 和坡度条件下, L 随体积的增加而增大, 反映了碎屑流运动距离的规模效应。

表 2 坡脚下的水平运动距离表(单位: m)

Tab. 2 Horizontal movement distances on the bottom (unit: m)

V	岩土样	$\alpha = 25^\circ$	$\alpha = 34^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 55^\circ$
0.2 m ³	M1	0	0.70	1.50	1.60
	M2	0	1.45	2.40	1.80
	M3	1.1	2.10	3.40	2.70
0.15 m ³	M1	0	0.55	1.27	1.52
	M2	0	1.35	2.10	1.70
	M3	1.1	1.96	2.90	2.50
0.1 m ³	M1	0	0.30	1.15	1.45
	M2	0	1.20	2.05	1.60
	M3	1.05	1.85	2.70	2.40
0.05 m ³	M1	0	0.45	1.03	1.08
	M2	0	1.10	1.85	1.28
	M3	1.00	1.70	2.60	2.30

3.2 L 的影响因素敏感度分析

3.2.1 L 的影响因素的极差分析

表 3 分析了坡脚下的水平运动距离影响因素的正交分析结果。表中 V 、 M 和 α 表示体积、颗粒级配

和坡度因素, I、II、III、IV 各因素在 1、2、3、4 水平下运动距离的平均值, 极差 R_M 、 R_α 和 R_V 分别表示各影响因素在不同水平下运动距离平均值的最大值与最小值之差。

3.2.2 因素对 L 的影响大小分析

极差分析的结果显示: 在不同体积条件下, 颗粒级配的极差 R_M 都大于斜坡坡度的极差 R_α , 表明颗粒级配对碎屑流坡脚下的水平运动距离的影响大于斜坡坡度; 在不同岩土体颗粒级配条件下, 斜坡坡度的极差 R_α 都大于碎屑流体积的极差 R_V , 表明斜坡坡度对碎屑流坡脚下的水平运动距离的影响大于碎

屑流体积; 在不同斜坡坡度条件下, 岩土体颗粒级配的极差 R_M 都大于碎屑流体积的极差 R_V , 表明岩土体颗粒级配对碎屑流坡脚下的水平运动距离的影响大于碎屑流体积。

利用极差分布图可直观地比较各因素对 L 指标的影响大小(图 6), 图中点子散布大的因素是主要因素, 散布小的是次要因素。根据上述原则可以看出, 影响碎屑流坡脚下的水平运动距离的因素中, 因素 M 点子散布最大, 是主要的因素; 因素 α 的点子散布稍小, 其影响居第二位; 因素 V 的点子散布最小, 其影响最小。

表 3 坡脚下的水平运动距离影响因素的正交分析(单位: m)
Tab. 3 Orthogonal analysis of horizontal movement distances on the bottom (unit: m)

V	M				α					因素影响
	I	II	III	R_M	I	II	III	IV	R_α	
0.2m ³	1.27	1.88	2.73	1.46	—	1.42	2.43	2.03	1.01	$R_M > R_\alpha$
0.15m ³	1.11	1.72	2.45	1.34	—	1.29	2.09	1.91	0.8	
0.1m ³	1.00	1.62	2.32	1.32	—	1.15	1.97	1.82	0.82	
0.05m ³	0.85	1.41	2.20	1.35	—	1.08	1.83	1.55	0.75	
M	α				V					因素影响
	II	III	IV	R_α	I	II	III	IV	R_V	
M1	0.53	1.24	1.41	0.88	1.27	1.11	1.00	0.85	0.42	$R_\alpha > R_V$
M2	1.28	2.10	1.60	0.82	1.88	1.72	1.62	1.41	0.47	
M3	1.90	2.90	2.48	0.58	2.73	2.45	2.32	2.20	0.53	
α	M				V					因素影响
	I	II	III	R_M	I	II	III	IV	R_V	
$\alpha = 34^\circ$	0.53	1.28	1.90	1.37	1.42	1.29	1.15	1.08	0.34	$R_M > R_V$
$\alpha = 45^\circ$	1.24	2.10	2.90	1.66	2.43	2.09	1.97	1.83	0.6	
$\alpha = 55^\circ$	1.41	1.60	2.48	1.07	2.03	1.91	1.82	1.55	0.48	

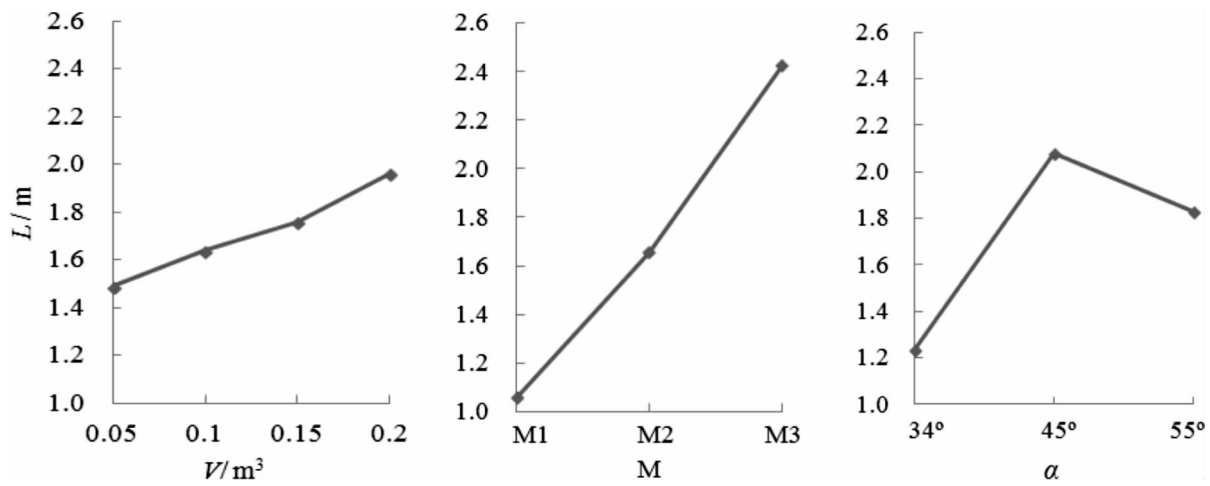


图 6 坡脚下的水平运动距离的影响因素极差分析
Fig. 6 Range analysis of the influence factors horizontal distances on the bottom

3.2.3 影响因素的显著性分析

为了准确估计误差大小,正确区分试验条件的改变与由试验误差二者所起的数据波动,考察、判断各个因素影响的显著性,采用方差分析法对坡脚下的水平运动距离进行分析(见表4)。由方差分析可以得出如下认识:颗粒级配和坡度对碎屑流坡脚下的水平运动距离的影响特别显著,是决定性因素;而体积对坡脚下的水平运动距离影响较弱。

表4 坡脚下的水平运动距离方差分析结果

Tab.4 Variance analysis of horizontal distances on the bottom

因素	自由度	$f_{0.05}$	$f_{0.01}$	偏差平方和	F 值	显著性
V	3	2.87	4.38	16.627	0.689	
M	2	3.26	5.25	6.422	28.98	* *
α	2	3.26	5.25	13.183	5.654	*

4 等效摩擦系数

4.1 等效摩擦系数的特征

模型试验中,当斜坡坡度为 25° 时,M1和M2的岩土体都在斜坡上堆积,未能滑动到坡脚位置,其等效摩擦系数与坡度的正切值一致。模型试验的数据分析也表明了等效摩擦系数随体积增加而减小,它们之间也表现为负幂率关系。然而,在同一体积条件下,同一颗粒级配的岩土体等效摩擦系数随坡度的增加而增大;在同一坡度条件下随岩土体平均粒径的增大而减小(表5)。因此等效摩擦系数的变化不但受体积的作用而且还与岩土体的颗粒级配和斜坡的坡度影响有关。

4.2 等效摩擦系数的影响因素的敏感度分析

4.2.1 影响因素的极差分析

等效摩擦系数影响因素的正交分析结果见表6。表中V、M和 α 表示体积、颗粒级配和坡度因素,I、II、III、IV各因素在1、2、3、4水平下等效摩擦系数的平均值,极差 R_M 、 R_{α} 和 R_V 分别表示各影响因素的等效摩擦系数平均值的最大值与最小值之差。

4.2.2 因素对等效摩擦系数的影响大小分析

极差分析的结果显示:在不同体积条件下, $R_M < R_{\alpha}$,颗粒级配对碎屑流等效摩擦系数的影响小于斜坡坡度;在不同岩土体颗粒级配条件下, $R_{\alpha} > R_V$,表明斜坡坡度对碎屑流等效摩擦系数的影响大于碎屑流体积;在不同斜坡坡度条件下, $R_M > R_V$,岩土体颗粒级配对碎屑流等效摩擦系数的影响大于碎屑

流体积。

表5 等效摩擦系数

Tab.5 Apparent coefficients of friction

V	d50	H_{max}/L_{max}			
		$\alpha = 25^{\circ}$	$\alpha = 34^{\circ}$	$\alpha = 45^{\circ}$	$\alpha = 55^{\circ}$
0.2m ³	M1	0.47	0.57	0.64	0.78
	M2	0.47	0.49	0.53	0.74
	M3	0.39	0.44	0.44	0.59
0.15m ³	M1	0.47	0.59	0.67	0.78
	M2	0.47	0.50	0.55	0.74
	M3	0.39	0.44	0.47	0.60
0.1m ³	M1	0.47	0.61	0.68	0.78
	M2	0.47	0.51	0.55	0.75
	M3	0.39	0.45	0.48	0.60
0.05m ³	M1	0.47	0.60	0.70	0.86
	M2	0.47	0.52	0.56	0.81
	M3	0.39	0.46	0.48	0.60

根据等效摩擦系数的影响因素极差分析图(图7)。表明影响碎屑流坡脚下的水平运动距离的因素中,因素 α 点子散布最大,是主要的因素;因素M的点子散布稍小,其影响居第二位;因素V的点子散布最小,其影响最小。

4.2.3 影响因素的显著性分析

采用方差分析法对等效摩擦系数进行分析(表7)表明:坡度和颗粒级配对碎屑流等效摩擦系数的影响特别显著,是决定性因素;而同等规模内变化的体积对等效摩擦系数的影响不显著。

5 坡度和颗粒级配对运动参数的作用机制分析

滑坡碎屑流的运动特征依次表现为加速运动、持速运动和减速运动阶段。当斜坡坡度较大时,碎屑流在加速阶段呈整体的运动趋势,前后缘的速度差异小,进入到持速运动阶段中,能够为前缘物质传递更多的能量,致使运动距离增加、等效摩擦系数减小。而在坡度较小时,因摩擦作用消耗的能量增加,碎屑流不能保持整体运动特征,前缘物质受坡脚作用停滞堆积,后部物质的运动能量不能有效地传递到前缘,导致运动距离减小、等效摩擦系数增加。

表 6 等效摩擦系数的影响因素的正交分析
Tab. 6 Orthogonal analysis of the apparent coefficients of friction

V	M					α					因素影响
	I	II	III	—	R_M	I	II	III	IV	R_α	
0.2m ³	0.62	0.56	0.47	—	0.15	0.44	0.50	0.54	0.70	0.26	$R_M < R_\alpha$
0.15m ³	0.62	0.56	0.48	—	0.14	0.44	0.51	0.56	0.70	0.26	
0.1m ³	0.63	0.57	0.48	—	0.15	0.44	0.52	0.57	0.71	0.27	
0.05m ³	0.66	0.59	0.48	—	0.18	0.44	0.52	0.58	0.76	0.32	
M	α					V					因素影响
	I	II	III ₃	IV ₄	R_α	I	II	III	IV	R_V	
M1	0.47	0.59	0.67	0.80	0.33	0.62	0.62	0.63	0.66	0.04	$R_\alpha > R_V$
M2	0.47	0.50	0.55	0.76	0.29	0.56	0.56	0.57	0.59	0.03	
M3	0.39	0.45	0.47	0.60	0.21	0.47	0.48	0.48	0.48	0.01	
α	M					V					因素影响
	I	II	III	—	R_M	I	II	III	IV	R_V	
$\alpha = 34^\circ$	0.47	0.47	0.39	—	0.08	0.44	0.44	0.44	0.44	0.00	$R_M > R_V$
$\alpha = 45^\circ$	0.59	0.50	0.45	—	0.14	0.50	0.51	0.52	0.52	0.02	
$\alpha = 55^\circ$	0.67	0.55	0.47	—	0.2	0.54	0.56	0.57	0.58	0.04	

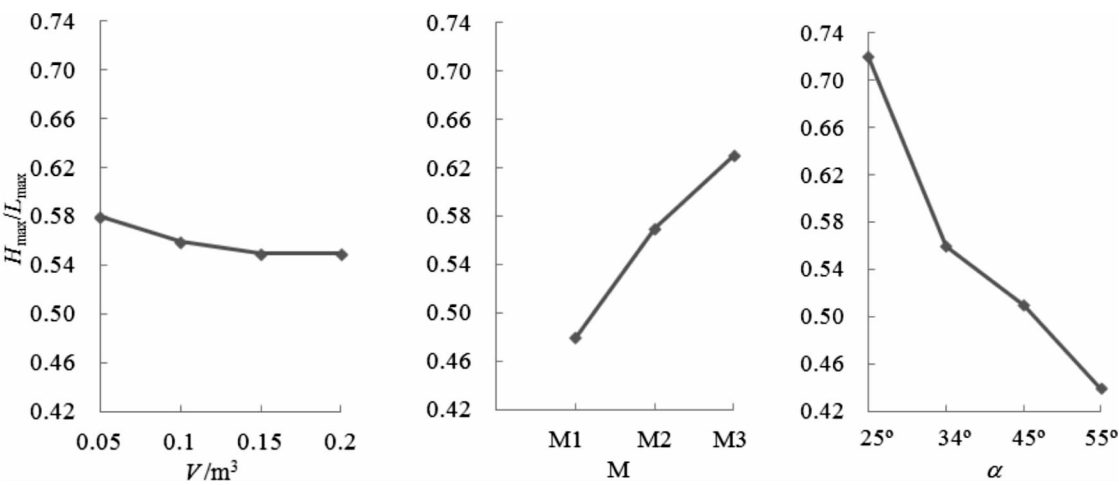


图 7 等效摩擦系数与各影响因素的极差分析

Fig. 7 Range analysis of apparent coefficients of friction and influence factors

表 7 等效摩擦系数的方差分析结果

Tab. 7 Variance analysis results of apparent coefficients of friction

因素	自由度	$f_{0.05}$	$f_{0.01}$	偏差平方和	F 值	显著性
V	3	2.80	4.22	0.736	0.119	
M	2	3.19	5.08	0.539	8.456	*
α	3	2.80	4.22	0.250	25.792	**

滑坡碎屑流的颗粒粒径越大,在运动过程中受到的正应力和剪应力越大,以平衡上部颗粒重量,使

底部颗粒受到地面的摩擦力大大减小,运动性增加,前缘物质具有相对较大的运动速度。后部物质的能量可以高效地传递到碎屑流的前缘,致使其能保持较长距离的持速运动特征。碎屑流的细颗粒所占的比例较大时,与底板的接触面积较大,受摩擦作用的能量损失也最大,致使最先到达坡脚位置的碎屑流受坡脚作用后的运动速度迅速降低,运动较短的距离后堆积停止,在坡脚后的一定距离内形成暂时的堆积体。后部的碎屑流物质运动到坡脚后受摩擦作

用和前部堆积体的阻止,覆盖在前部碎屑流堆积体的上部,不能将能量有效地传递给前缘物质,致使碎屑流的运动距离减小。

6 结论

滑坡碎屑流的坡脚下的水平运动距离、等效摩擦系数是体积、颗粒级配和斜坡坡度耦合影响作用的结果。通过模型试验数据的极差分析和方差分析,各因素对滑坡碎屑流运动参数的影响为:

在同等体积下,颗粒级配对坡脚下的水平运动距离的影响大于斜坡坡度;同一岩土体颗粒级配条件下,斜坡坡度对坡脚下的水平运动距离的影响大于碎屑流体积;斜坡坡度条件下,岩土体颗粒级配对坡脚下的水平运动距离的影响大于碎屑流体积。综合各因素对坡脚下的水平运动距离的影响表明,颗粒级配是主要的因素,其次是斜坡坡度、体积。方差分析的结果表明颗粒级配和坡度是碎屑流坡脚下的水平运动距离的决定性因素,而同等规模内变化的体积的影响不显著。

在同等体积下,斜坡坡度对等效摩擦系数的影响大于颗粒级配;同一岩土体颗粒级配条件下,斜坡坡度对等效摩擦系数的影响大于碎屑流体积;斜坡坡度条件下,岩土体颗粒级配对等效摩擦系数的影响大于碎屑流体积。综合各因素对等效摩擦系数的影响表明,斜坡坡度是主要的因素,其次是颗粒级配、体积。方差分析的结果表明坡度和颗粒级配是碎屑流等效摩擦系数的决定性因素,而同等规模内变化的体积的影响不显著。

参考文献 (References)

[1] Legros F. The mobility of long-runout landslides [J]. *Engineering Geology*, 2002, 63: 301 - 331

[2] 黄润秋, 许强. 中国典型灾难性滑坡 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 131 - 132 [Huang Runqiu, Xu Qiang. Catastrophic landslides in China [M]. Beijing: Science Press, 2008: 131 - 132]

[3] Devoli G, Blasio F V D, Elverhøi A, et al. Statistical Analysis of Landslide Events in Central America and their Run-out Distance. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27: 23 - 42

[4] Pirulli M. Morphology and Substrate Control on the Dynamics of Flowlike Landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(2): 376 - 388

[5] Ouyang C, He S, Xu Q, LUO Y, Zhang W. A MacCormack - TVD finite difference method to simulate the mass flow in mountainous terrain with variable computational domain. *Computers & Geosciences*, 2013, 52, 1 - 10

[6] 杨裕云, 胡新丽, 王亮清等. 高速远程崩滑及其形成条件初探 [J]. *工程地质学报*, 2011, 19(6): 809 - 815 [Yang Yuyun, Hu Xinli, Wang Liangqing, et al. Long runout rockfall-landslides and their forming conditions [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(6): 809 - 815]

[7] 张龙, 唐辉明, 熊承仁等. 鸡尾山高速远程滑坡运动过程 PFC3D 模拟 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(S1): 2601 - 2611 [Zhang Long, Tang Huiming, Xiong Chengren, et al. Movement process simulation of high-speed long-distance jiweishan landslide with PFC3D [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(S1): 2601 - 2611]

[8] 王玉峰, 程谦恭, 朱 圻. 汶川地震触发高速远程滑坡 - 碎屑流堆积反粒序特征及机制分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(6): 1089 - 1105 [Wang Yufeng, Cheng Qiangong, Zhu Qi. Inverse grading analysis of deposit from rock avalanches triggered by wenchuan earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(6): 1089 - 1105]

[9] 郝明辉, 许强, 杨磊. 滑坡 - 碎屑流物理模型试验及运动机制探讨 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(S1): 127 - 132 [Hao Minghui, Xu Qiang, Yang Lei, et al. Physical modeling and movement mechanism of landslide-debris avalanches [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(S1): 127 - 132]

[10] Yang Q Q, Cai F, Ugai K, et al. Some factors affecting mass-front velocity of rapid dry granular flows in a large flume. *Engineering Geology*, 2011, 122: 249 - 260.

[11] Kokelaar B P, Grahama R L, Gray J M N T, Vallance J W. Fine-grained linings of leveed channels facilitate runout of granular flows. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 385: 172 - 180.

[12] 樊晓一, 田述军, 段晓冬, 张友谊. 地形因子对坡脚型地震滑坡运动参数的影响研究. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(S2): 4056 - 4066 [Fan Xiaoyi, Tian Shujun, Duan Xiaodong, Zhang Youyi. Study of topography factors influence on motion Parameters for seismic slope-toe landslides [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 4056 - 4066]

[13] 黄润秋, 刘卫华. 基于正交设计的滚石运动特征现场试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(5): 882 - 891 [Huang Runqiu, Liu Weihua. In-situ test study of characteristics of rolling rock blocks based on orthogonal design [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(5): 882 - 891]

[14] 樊晓一, 乔建平. 坡、场因数对大型滑坡的运动特征影响研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(11): 2337 - 2347 [Fan Xiaoyi, Qiao Jianping. Influence of landslide and ground factors on large-scale landslide movement [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(11): 2337 - 2347]

Susceptibility Degree of Factors Influence on the Movement Parameters of Landslide – Debris Avalanches

FAN Xiaoyi , YANG Hailong , TIAN Shujun , ZHANG Youyi , SUN Xinpo , WANG Haigua

(School of Civil Engineering and Architecture , Southwest University of Science and Technology , Mianyang , Sichuan 621010 , China)

Abstract: The movement parameters of middle and small landslide-debris avalanches were significant differences in the same scale volumes based on the field investigation data. The differences result in the couple effect among the volumes , soil-mass and topography which were not completely discovered by the theory analysis and numerical calculation. Therefore , Laboratory experiments , extreme difference analysis and variance analysis are used to investigate some factors influencing the movement of landslide-debris avalanches , including volumes , particle sizes and gradients of slope. In the conditions of the volume change in the same scale and identical fall height , the results showed as follows. The particle size was the most important factor which influenced on the horizontal movement distances after slope toe , followed by gradient of slope , volume in turn. The particle size was the critical factor for the distances and volume change in the same scale was not. The gradient of slope was the most important influential factor on the apparent coefficients of friction , followed by particle size and volume. The gradient of slope played an important role of controlling the apparent coefficients of friction. The volume was the insignificant one of the parameters.

Key words: landslide-debris avalanches; particle size; gradient of slope; volume; movement parameter