

文章编号: 1108 - 2786 - (2016) 1 - 92 - 08

DOI: 10. 16089 /j. cnki. 1008 - 2786. 000105

基于正交设计的滑坡运动参数模型试验

赵运会, 樊晓一*

(西南科技大学土木工程与建筑学院 四川 绵阳 621010)

摘 要: 运动距离和速度是滑坡致灾区域和致灾强度的主要评价指标。颗粒级配、体积、斜坡坡度、下垫面摩擦系数、含水率等是影响这些参数的主要因素。按照正交试验原理设计模型试验研究这些因素对滑坡运动参数的影响特征。在试验基础上,采用极差和方差分析等手段,以滑坡的最大运动距离、最大运动速度为评价指标,对影响滑坡运动参数的 5 种因素进行了分析。结果表明:影响滑坡最大运动距离的诸因素中,斜坡坡度是最主要的因素,以下依次为下垫面摩擦系数、滑坡体积、颗粒级配、含水率,其中,斜坡坡度、下垫面摩擦系数和体积是影响最大运动距离的决定性因素;在滑坡最大运动速度的影响因素中,斜坡坡度也是最主要影响因素,以下依次为下垫面摩擦系数、含水率、颗粒级配和体积,其中,仅斜坡坡度是影响滑坡最大运动速度的决定性因素,其他因素的影响不显著。由此表明滑坡的运动距离是滑坡体规模与运动场地条件耦合作用的结果,而最大运动速度受控于斜坡坡度。

关键词: 滑坡模型试验; 正交设计; 运动距离; 运动速度

中图分类号: P642. 22

文献标志码: A

运动距离和运动速度是滑坡致灾机制的主要评价指标,其变化规律是滑坡体特征运动区地形条件耦合作用的结果。Pirulli^[1]通过研究运动路径的地形和下垫面特征对滑坡动力学的影响,推断滑坡远程、近程运动主要受控于滑坡的体积和滑坡区的地形条件。白永健^[2]等基于对滑坡及堰塞坝的工程地质测绘,研究了滑坡运动过程的地质力学模式,并推导出本构方程。杜鹃^[3]等考虑滑坡-碎屑流运动过程中滑体下表面的侵蚀作用和摩擦阻力变化,建立基于有限积分法的计算模型。黄锦林^[4]等在潘家铮山地滑坡垂直条分法滑速计算式的基础上,考虑库水阻力及受水作用后底面摩擦系数减小的影响,推导出适合库岸滑坡滑速分析的垂直条分法改

进计算式。顾成壮^[5]等系统分析了四川汉源二蛮山高速滑坡-碎屑流的基本特征和形成条件,运用 Scheidegger, A. E. 公式推导出其运动速度。樊晓一^[6]等对滑坡的等价摩擦系数、最大水平运动距离、最大垂直运动距离与滑坡体积的关系进行分析,认为滑坡的运程不仅受体积的控制还与其诱发机制相关。Sarah K. Bryant^[7]等研究滑坡体颗粒间的相互作用和撞击地面时的运动特征,以及用 DNA 推导出与试验相匹配的地面摩擦系数。张龙^[8]等通过 PFC3D 模拟鸡尾山滑坡在不同坡面摩擦系数和滑体粘结强度下的运动特征。曾耀勋^[9]等研究了坡脚及下垫面对滑体运动的减速机制。鲁晓兵等^[10]重点考察了床面摩擦系数、土体内摩擦角、初始运动

收稿日期(Received date): 2015 - 07 - 10; 改回日期(Accepted): 2015 - 08 - 27。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(No. 41272297); 四川省科技厅项目(No. 2014JY0121); 四川省教育厅重点项目(No. 14ZA0095)。[Supposed by the National Natural Science Foundation of China (No. 41272297), Science Foundation of the Committee of Science and Technology of Sichuan Province(No. 2014JY0121) and the Scientific Research Fund of Sichuan Provincial Education Department (No. 14ZA0095) .]

作者简介(Biography): 赵运会(1990 -), 男(汉族), 河南方城人, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害。[Zhao Yunhui (1990 -), male(Han Chinese), born in Fangcheng of Henan, graduate student for Master Degree, major in geological disaster.] E-mail: zhaoyunhui0812@163.com

* 通信作者(Corresponding author): 樊晓一(1974 -), 男(汉族), 四川双流人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、地质灾害教学科研工作。[Fan Xiaoyi (1974 -), male(Han Chinese), born in Shuangliu of Sichuan, professor, PH. D, mainly engaged in teaching and research work of geological engineering and geological disaster.] E-mail: xyfan1003@126.com

速度和坡角等因素对碎屑流运动形态的影响。Zhou^[11]等运用离散元程序,研究不同的力学参数、滑坡体体积、地形条件对滑坡运动过程的影响。由于受地形影响与滑坡体物质的相互作用,导致现有的理论分析和数值模拟对滑坡运动速度的演变机制和运动距离的预测存在较大的误差。近年来,国内外学者已经意识到滑坡运动的地形条件对滑坡运程以及堆积体特征的影响^[12-13]。

由于滑坡发生时间和位置的不确定性,滑坡运动速度在实际的监测存在较大的困难,因此,物理试验在滑坡运动参数的研究中扮演了重要的角色,能够有效的研究滑坡运动机理以及滑体的堆积特征等。如Ugai^[14]以谢家店子滑坡为原型,开展了滑坡的静态和动态试验,研究了滑坡堆积形态和滑程;吴越等^[15]采用物理实验模拟滑体运动过程对建筑物的冲击力,并利用实验结果分析了建筑物在滑坡冲击下的易损程度;潘欢迎^[16]通过物理模型实验测试了在不同滑体结构、坡角和初始速度组合下滑坡的运动过程,并分析了其基本规律;郝明辉^[17]等通过开展室内模型试验,研究了碎屑粒径、滑床糙率和挑坎对运动特性的影响。综合的研究表明,滑坡启动后,运动机制受到地形条件和岩土体特征的耦合作用,因此,运用理论分析和数值模拟对滑坡运动参数的分析都不能忽略地形和岩土体对滑坡运动的影响。

本文根据正交试验原理^[18-19],考虑滑坡体颗粒级配组成、体积、斜坡坡度、下垫面摩擦系数、含水率等5个因素,设计了滑坡模型试验。通过试验现象,采用极差和方差分析方法,揭示了这些因素对滑坡的主次关系,不仅有助于确定滑坡的影响范围和灾害程度的时空体系预测预报,而且为滑坡动力学发展提供理论依据。

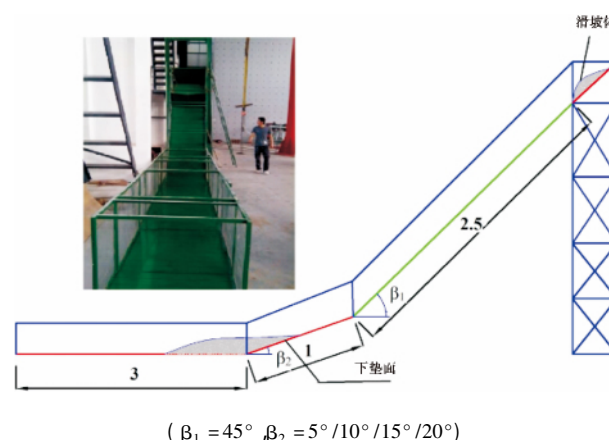
1 模型试验设计

1.1 试验装置

结合试验场地的具体情况和试验的要求,对滑坡试验装置尺寸进行详细设计,整个试验装置主要由砂箱、滑道和支架三部分构成。

砂箱尺寸规格长宽高为:1 m×1 m×0.75 m,砂箱前部设有挡板,两侧安装强度较高且透明的有机玻璃;滑道是试验岩土体运动的主要场所,用来模拟滑坡运动的不同场地条件,尺寸规格同砂箱。为实

现能自由模拟不同场地条件这一功能,进行分段设计,将整个滑道分为几段,拐角处利用铰链连接,使得上下两滑道能够沿铰链自由调整夹角。滑槽试验系统如图1所示,其中斜坡坡度 β_1 是固定坡度,斜坡坡度 β_2 是可调坡度。



($\beta_1 = 45^\circ$, $\beta_2 = 5^\circ/10^\circ/15^\circ/20^\circ$)

图1 试验滑槽结构尺寸示意图(单位:m)

Fig.1 Sketch of structural size of the experimental flume for landslide-debris avalanche (unit: m)

1.2 试验方案

1.2.1 正交试验设计

为了减少试验的数目,根据正交试验理论进行实验方案设计。考虑5种因素:滑坡体颗粒级配组成、体积、斜坡坡度、下垫面摩擦系数、含水率,其中斜坡坡度(β_2)代表了滑坡运动场地上坡度的变化(图1);滑坡体颗粒级配代表了滑坡岩土体的不同类型,粒径分布如图2所示,土体物理力学参数见表1;采用不同摩擦系数的防滑垫代表滑坡运动场地的不同类型(图3),其中采用二力平衡法测量滑动摩擦系数,将滑块置于防滑垫上,用一弹簧秤拉动滑块做匀速直线运动,根据二力平衡可知,必有一摩擦力阻碍滑块的运动,且大小与弹簧秤的拉力大小相同,方向相反,即 $F=f$,读出弹簧秤的示数 F ,再由 $F=f$ 与 $f=\mu mg$ 可以求出 μ 。根据5种因素的特征,每个因素分4种水平,如表2。所有因素都是确定4种水平,采用L16(45)表安排因素影响分析的试验方案(表3)。

1.2.2 数据获取

本次试验需要获取的数据主要有滑坡运动距离和运动速度。采用数码相机摄像作为滑坡运动速度以及运动特征的采集方法,对试验中滑坡的启动形态、运动特征以及堆积体形态进行跟踪拍摄。每次

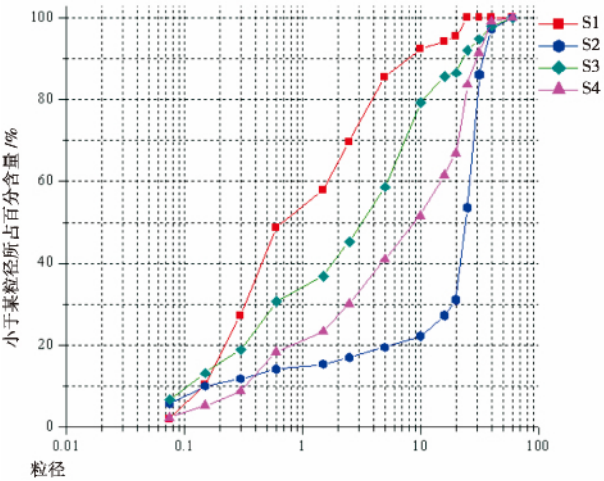


图 2 不同颗粒级配含量的粒径级配曲线
Fig.2 Grade curves of different coarse-grain contents

表 1 土体的物理力学参数
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of materials employed

试样 编号	不均匀 系数	曲率 系数	内摩擦角 / $^{\circ}$	粘聚力 / 咬合 力 / (kPa)	密度 / (g/cm^3)
S1	10.6	0.4	34.6	0.689	1.76
S2	152.9	81.7	41.0	0.868	2.09
S3	47.3	0.6	35.3	0.709	1.93
S4	33.1	1.8	39.4	0.821	2.10

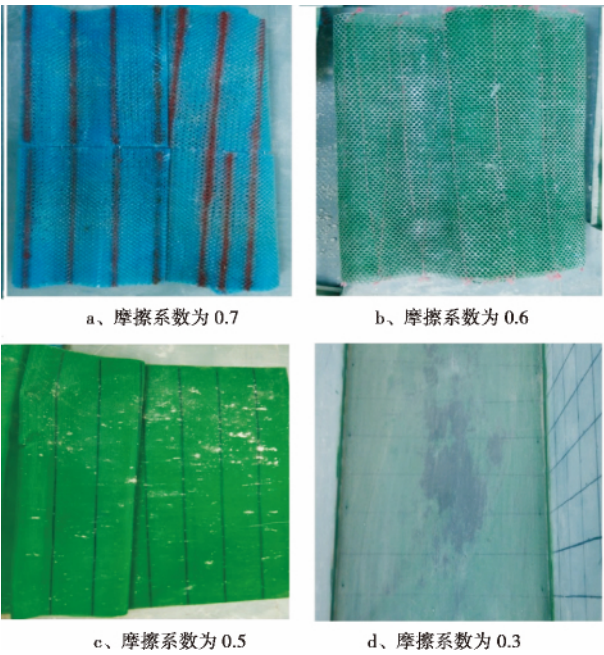


图 3 运动场地的下垫面类型
Fig.3 Underlying surface type

表 2 正交试验的因素及水平
Tab. 2 Factors and levels of orthogonal experiment

水平 因素	A(颗粒 级配)	B(体积 / m^3)	C(坡度 $\beta_2 / ^{\circ}$)	D(下垫 面摩擦系数)	E(含 水率 / %)
1	S1	0.05	5	0.3	5
2	S2	0.1	15	0.5	10
3	S3	0.15	25	0.6	15
4	S4	0.2	35	0.7	20

试验利用两台数码相机以每秒 30 帧进行跟踪拍摄 , 其中一台布置于试验装置的上方 , 用于拍摄滑坡启动形态以及在滑道中的运动轮廓 , 另外一台布置于装置的末端 , 记录滑坡的整个运动过程 , 运动距离利用卷尺在每组试验结束后直接测量得出。

滑坡运动速度的数据计算是在滑坡体前部定义易于通过图像追踪而且能够反映整体运动的特征点 , 其速度的获取方法则是利用所拍摄的图片以及录像通过处理得出 , 处理方法为: 在每次试验过程中拍摄的一系列图像上标记出特征点的位置 , 利用相邻的两张图像以及参照滑道上的网格 , 计算得出在图像拍摄间隔 $t = 1/30s$ 中此特征点的运动距离 d , 利用公式 $v = d/t$ 得出此刻的特征点速度 , 本试验以滑坡前缘为特征点。

2 试验结果

2.1 考察指标的确定

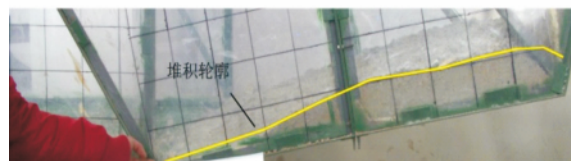
在滑坡运动的过程中 , 滑坡的最大运动距离和速度关系到滑坡影响范围内的拆迁避让方案、工程治理措施 , 以及防治工程等级、对建(构) 筑物的危害程度和搬迁范围等。因此 , 将滑坡的最大运动距离和最大运动速度作为滑坡在坡面运动参数的指标 , 分析颗粒级配组成、体积、斜坡坡度、下垫面摩擦系数、含水率等多个因素的影响规律。本文研究的滑坡最大运动距离是指滑坡体前缘在下垫面上的运动距离 , 最大运动速度是指滑坡在滑道水平面上的运动速度。

2.2 试验结果

将各组试验条件下滑坡的最大运动距离和最大运动速度值列入表 3 , 表中 I_j, II_j, III_j, IV_j 分别表示第 j 种因素第 1 2 3 4 水平。图 4(a) ~ 4(p) 分别表示试验 1 ~ 16 不同工况条件下滑坡体堆积形态。



a、试验1滑坡体堆积形态



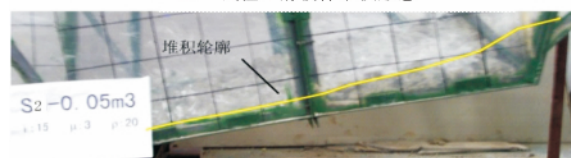
b、试验2滑坡体堆积形态



c、试验3滑坡体堆积形态



d、试验4滑坡体堆积形态



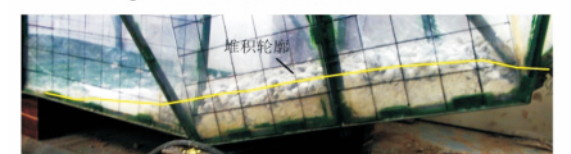
e、试验5滑坡体堆积形态



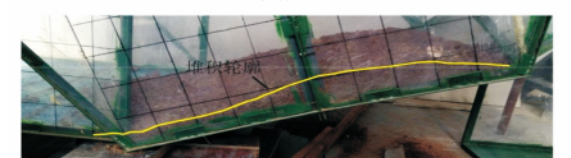
f、试验6滑坡体堆积形态



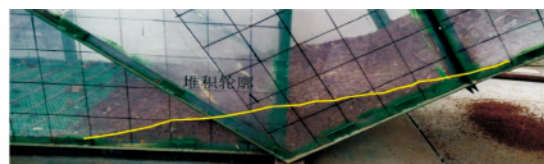
g、试验7滑坡体堆积形态



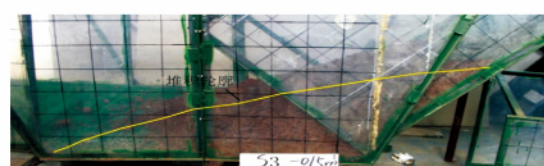
h、试验8滑坡体堆积形态



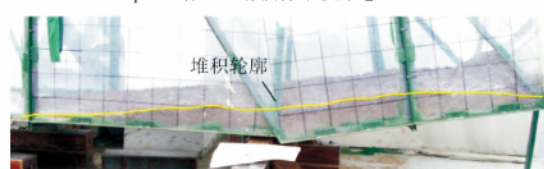
i、试验9滑坡体堆积形态



j、试验10滑坡体堆积形态



q、试验11滑坡体堆积形态



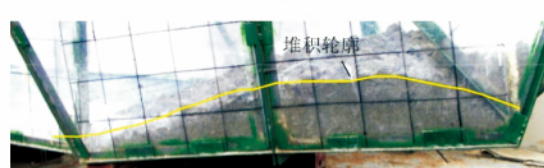
l、试验12滑坡体堆积形态



m、试验13滑坡体堆积形态



n、试验14滑坡体堆积形态



o、试验15滑坡体堆积形态



p、试验16滑坡体堆积形态

图4 不同工况条件下滑坡体堆积形态

Fig. 4 Shape of the landslide deposits under different conditions

3 滑坡最大运动距离

3.1 极差分析

将表3中各列 I_j, II_j, III_j, IV_j 及 $\bar{I}_j, \bar{II}_j, \bar{III}_j, \bar{IV}_j$ 分别算出并填入表内, 其中表3中最后一行是同

一系列的 $\overline{I}_j, \overline{II}_j, \overline{III}_j, \overline{IV}_j$ 之中最大值与最小值的差,称之为极差,记为 R 。极差是度量数据波动大小的重要指标,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就小,是影响指标的次要因素。由此分析,从表 3 的最后一行的极差可以看出,因素 C 是主要因素,以下依次为因素 D、B、A、E。

3.2 最大运动距离正交试验成果分析

为了能直观形象地比较各因素对指标影响的大小,选出各因素对指标最有利的水平,作因素和指标的关系图,并进行分析。把每个因素的 $\overline{I}_j, \overline{II}_j, \overline{III}_j,$

\overline{IV}_j 点在坐标纸上(图 5),从而有如下结论:当颗粒级配为 S4,体积为 0.2 m^3 ,斜坡坡度(β_2)为 35° ,下垫面摩擦系数为 0.3,含水率为 15%时,滑坡体达到最大运动距离。

试验中,各个因素的影响是有主次的,对滑坡运动参数试验来说,从图中可以看出,某种因素对滑坡的最大运动距离影响大,其相应的最大运动距离的差异也就比较大,这种因素是主要的;某种因素对滑坡最大运动距离影响不大,是指因素不同水平相应的最大运动距离的差异较小,这种因素是次要的。从图上反映出点散布大的因素是主要因素,数据点

表 3 试验方案及分析计算表
Tab. 3 Experiment schemes and analysis of calculation

试验号		因素及水平					运动距离	运动速度		
		A	B	C	D	E	/m	/(m/s)		
	1	S1	0.05	5	0.3	5	1.03	0.44		
	2	S1	0.1	15	0.5	10	1.05	0.30		
	3	S1	0.15	25	0.6	15	1.23	2.73		
	4	S1	0.2	35	0.7	20	1.63	3.54		
	5	S2	0.05	15	0.6	20	0.80	0.00		
	6	S2	0.1	5	0.7	15	0.66	0.00		
	7	S2	0.15	35	0.3	10	2.43	3.53		
	8	S2	0.2	25	0.5	5	1.50	1.47		
	9	S3	0.05	25	0.7	10	1.25	1.21		
	10	S3	0.1	35	0.6	5	1.60	2.12		
	11	S3	0.15	5	0.5	20	0.80	0.00		
	12	S3	0.2	15	0.3	15	2.25	2.06		
	13	S4	0.05	35	0.5	15	1.55	3.03		
	14	S4	0.1	25	0.3	20	2.42	3.64		
	15	S4	0.15	15	0.7	5	1.15	0.59		
	16	S4	0.2	5	0.6	10	0.95	0.00		
水平状态	运动距离(1)	运动速度(1)	运动距离(2)	运动速度(2)	运动距离(3)	运动速度(3)	运动距离(4)	运动速度(4)	运动距离(5)	运动速度(5)
I _j	4.94	7.01	4.63	4.68	3.44	0.44	8.13	9.67	5.28	4.62
II _j	5.39	5.00	5.73	6.06	5.25	2.95	4.90	4.80	5.68	5.04
III _j	5.90	5.39	5.61	6.84	6.40	9.05	4.58	4.85	5.69	7.82
IV _j	6.07	7.25	6.33	7.07	7.21	12.22	4.69	5.34	5.65	7.18
\overline{I}_j	1.24	1.75	1.16	1.17	0.86	0.11	2.03	2.42	1.32	1.16
\overline{II}_j	1.35	1.25	1.43	1.52	1.31	0.74	1.23	1.20	1.42	1.26
\overline{III}_j	1.48	1.35	1.40	1.71	1.60	2.26	1.15	1.21	1.42	1.95
\overline{IV}_j	1.52	1.81	1.58	1.77	1.80	3.05	1.17	1.33	1.41	1.79
	0.28	0.56	0.43	0.60	0.94	2.94	0.89	1.22	0.10	0.80

注:表中最后一行数据为 $\overline{I}_j, \overline{II}_j, \overline{III}_j, \overline{IV}_j$ 状态下最大值与最小值的差,称为极差;运动距离单位为 m,运动速度单位为 m/s。

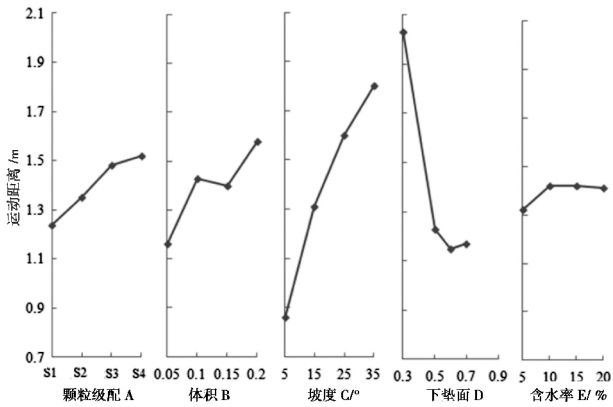


图 5 运动距离与各影响因素的关系

Fig. 5 Relationship between movement distances and all influence factors

散布小的因素是次要因素。

根据上述原则,从图 5 可以看出,影响滑坡最大运动距离的因素中,因素 C(斜坡坡度)的数据点散布最大,是主要因素;因素 E(含水率)的数据点散布小,其影响相对较小,因此它们对最大运动距离影响的排列顺序为因素 C、D、B、A、E。

3.3 方差分析

为了准确估计误差大小,正确区分试验条件的改变与有试验误差二者所引起的数据波动,考察、判断各个因素影响的显著性,采用方差分析法对滑坡的最大运动距离进行分析。由于本次试验的因素列处于饱和状态,没有空白列,则总偏差平方和等于各个因素偏差平方和;总偏差平方和的自由度等于各个因素偏差平方和的自由度。由于没有误差的平方和及其自由度,难以对试验数据进行方差分析。因此,可以采用下述方法估计误差平方和及其自由度:当正交表中有一个偏差平方和明显偏小时,可以用该偏差平方和作为误差平方和,该偏差平方和所对应的自由度作为误差平方和的自由度。所以将因素 E 作为误差分析及检验,如表 4 所示。

由方差分析可以得到如下认识:斜坡坡度、下垫面摩擦系数、体积对滑坡最大运动距离的影响特别显著,是决定性因素;其他因素对滑坡最大运动距离影响较小。

4 滑坡最大运动速度

4.1 极差分析

将表 3 中各列 I_j, II_j, III_j, IV_j 及 $\bar{I}_j, \bar{II}_j, \bar{III}_j, \bar{IV}_j$ 分别算出并填入表内。据此分析,从表 3 的最后

一行的极差可以看出,因素 C(斜坡坡度)、D(下垫面摩擦系数)是主要因素,其余 3 个因素的极差都很小,是次要因素。

表 4 运动距离方差分析结果

Tab. 4 Variance analysis results of movement distances					
方差来源	平方和	自由度	均方	F 比	显著性
A	0.20	3	0.07	6.74	[*]
B	0.37	3	0.12	12.73	*
C	2.00	3	0.67	68.59	**
D	2.19	3	0.73	74.91	**
误差(E)	0.03	3	0.01		
总和 S	4.79	15			

备注: $F_{\alpha}(3, 3) = 9.28, F_{0.01}(3, 3) = 29.46$; ** 表示因子高度显著(显著性水平为 0.01); * 表示因子显著; [*] 表示因子不显著。

4.2 运动速度正交试验成果分析

为了更直观形象地比较各因素对指标影响的大小,选出各因素对指标最有利的水平,作因素和指标的关系图来分析。把每个因素的 $\bar{I}_j, \bar{II}_j, \bar{III}_j, \bar{IV}_j$ 点在坐标纸上(图 6),从而有如下结论:颗粒级配为 S4,体积为 0.2 m^3 ,斜坡坡度(β_2)为 35° ,下垫面摩擦系数为 0.3,含水率为 15%时,滑坡体在水平面上达到最大运动速度。

从图 6 可以看出,影响速度的诸因素中,因素 C(斜坡坡度)、D(下垫面摩擦系数)点分布较大,是主要因素;其余 3 个因素点分布相差很小,对运动速度的影响较小,是次要因素,因此它们对最大运动速度影响的排列顺序为因素 C、D、E、A、B。

4.3 方差分析

采用方差分析法对滑坡运动速度进行分析,分

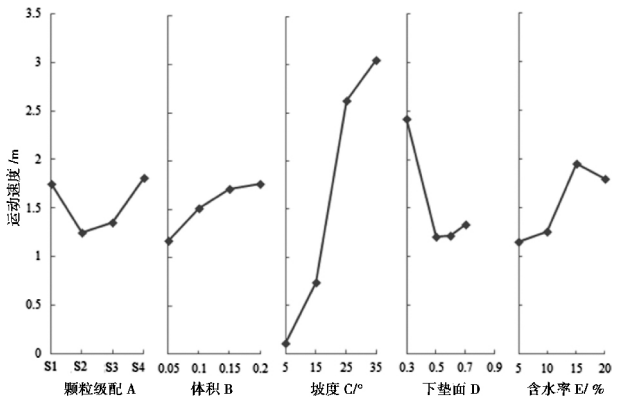


图 6 运动速度与各影响因素的关系

Fig. 6 Relationship between and movement velocity all influence factors

析结果如表 5 所示。由方差分析可以得出如下认识: 斜坡坡度对滑坡运动速度有特别显著的影响, 是滑坡运动速度的决定性因素; 其余因素对滑坡运动速度影响不明显。

表 5 运动速度方差分析结果

Tab. 5 Variance analysis results of movement velocity

方差来源	平方和	自由度	均方	F 比	显著性
A	0.96	3	0.32	1.11	[*]
C	22.01	3	7.34	25.26	*
D	4.13	3	1.38	4.74	[*]
E	1.85	3	0.62	2.12	[*]
误差(B)	0.87	3	0.29		
总和 S	29.83	15			

备注: $F_{0.05}(3, 3) = 9.28$, $F_{0.01}(3, 3) = 29.46$; * 表示因子高度显著(显著性水平为 0.01); 缺 * 表示因子显著; [*] 表示因子不显著。

5 结论

运动距离和速度是滑坡防灾减灾需要解决的关键问题。由于滑坡运动的复杂性, 仅通过理论分析和数值模拟并不能完全解释滑坡的高速、远程运动机制。通过室内模型试验, 分析 5 个主要因素对滑坡运动距离和速度的影响, 可以得到如下结论:

1) 在影响滑坡最大运动距离的诸因素中, 影响的大小依次为斜坡坡度、下垫面摩擦系数、体积、颗粒级配和含水率。方差分析结果表明, 斜坡坡度、下垫面摩擦系数、体积对滑坡最大运动距离的影响特别显著, 是决定性因素; 其他因素对滑坡最大运动距离影响较小。

2) 在影响滑坡最大运动速度的诸因素中, 斜坡坡度是最主要影响因素, 以下依次为下垫面摩擦系数、含水率、颗粒级配、体积, 其中斜坡坡度对滑坡最大运动速度的影响特别显著, 是决定性因素, 其余因素对滑坡最大运动速度的影响不显著。

3) 研究表明, 滑坡的运动距离不仅受滑坡体规模的控制, 还受运动场地的地形条件的显著影响; 滑坡的最大运动速度受控于运动场地条件的斜坡坡度, 决定了滑坡的致灾强度特征。研究结果可为滑坡的致灾区域和致灾强度的预测和评价提供参考依据, 对滑坡灾害的防治具有实际意义。

参考文献(References)

- [1] M Pirulli. Morphology and substrate control on the dynamics of flow like landslides [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(2): 376–388
- [2] 白永健, 倪化勇, 王运生, 等. 喜德采书组“8.31”滑坡工程地质特征及运动过程 [J]. 山地学报, 2014, 30(3): 327–335 [Bai Yongjian, Ni Huayong, Wang Yunsheng, et al. Engineering geological characteristics and motor process of caishu landslide in Xide of Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2014, 30(3): 327–335]
- [3] 杜鹃, 殷坤龙, 王佳佳. 基于有限体积法的滑坡-碎屑流三维运动过程模拟分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 480–488 [Du Juan, Yin Kunlong, Wang Jiajia. Simulation of three-dimensional movement of landslide-debris flow based on finite volume method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 480–488]
- [4] 黄锦林, 钟志辉, 张明飞. 基于垂直条分法改进计算式的库岸滑坡滑速分析 [J]. 山地学报, 2012, 30(5): 555–560 [Huang Jinlin, Zhong Zhihui, Zhang Mingfei. Sliding velocity analysis of reservoir bank landslides based on the improved vertical slice method [J]. Mountain Research, 2012, 30(5): 555–560]
- [5] 顾成壮, 胡卸文, 方力, 等. 四川汉源二壩山高速滑坡-碎屑流基本特征及地质演化 [J]. 山地学报, 2014, 32(5): 568–578 [Gu Chengzhuang, Hu Xiewen, Fang Li, et al. Basic characteristics and evolution history of ermanshan High-speed slide-debris flow in Hanyuan, Sichuan [J]. Mountain Research, 2014, 32(5): 568–578]
- [6] 樊晓一, 乔建平, 韩萌, 等. 灾难性地震和降雨滑坡体积与运动距离研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3051–3058 [Fan Xiaoyi, Qiao Jianping, Han Meng, et al. Volumes and movement distances of earthquake and rainfall-induced catastrophic landslides [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 3051–3058]
- [7] Sarah K Bryant, W Andy Take, Elisabeth T Bowman. Observations of grain-scale interactions and simulation of dry granular flows in a large-scale flume [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 52(5): 638–655
- [8] 张龙, 唐辉明, 熊承仁. 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): 1000–1965 [Zhang Long, Tang Huiming, Xiong Chengren. Movement process simulation of high-speed long-distance Jiweishan landslide with PFC3D [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 1000–1965]
- [9] 曾耀勋, 樊晓一, 段晓冬. 坡脚型场地对滑坡体运动的减速机制研究 [J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 193–196 [Zeng Yaoyuan, Fan Xiaoyi, Duan Xiaodong. Deceleration Mechanism of Slope Foot Site to Landslide Movement [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(4): 193–196]
- [10] 鲁晓兵, 张旭辉, 崔鹏. 碎屑流沿坡面运动的数值模拟 [J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 524–527 [Lu Xiaobing, Zhang Xuhui, Cui Peng. Numerical simulation of clastic grain flow along a slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 524–527]
- [11] Zhou Jiawen, Huang Kangxin, Hao Minghui, et al. Discrete element modeling of the mass movement and loose material supplying

- the gully process of a debris avalanche in the Bayi Gully, Southwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 99(1): 95 – 111
- [12] 樊晓一,田述军,段晓东,等. 地形因子对坡脚型地震滑坡运动参数的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(S2): 4056 – 4066 [Fan Xiaoyi, Tian Shujun, Duan Xiaodong, et al. 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] Devoli G, Blasio F V. D, Elverhqi A, et al. Statistical Analysis of Landslide Events in Central America and their Run – out Distance [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27: 23 – 42
- [14] K Ugai, Q Yang, F Cai, et al. Laboratory flume static and dynamic experiment for rock avalanches [J]. *American Society of Civil Engineers*, 2010, 201: 278 – 287
- [15] 吴越,刘东升,李明军. 岩体滑坡冲击能计算及受灾体易损性定量评估[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(5): 901 – 909 [Wu Yue, Liu Dongsheng, Li Mingjun. Impact energy calculation for rock slope and quantitative assessment of vulnerability for element at risk [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(5): 901 – 909]
- [16] 潘欢迎,柴波,李想. 不同结构顺层岩质滑坡运动过程风险性的实验研究[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(5): 788 – 796 [Pan Huanying, Chai Bo, Li Xiang. Experimental re-search of risk parameters in process of bedding rock landslide motion [J]. *Journal of Engineering geology*, 2013, 21(5): 788 – 796]
- [17] 郝明辉,许强,杨磊等. 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(增1): 480 – 488 [Hao Minghuo, Xu Qiang, Yang Lei. Physical modeling and movement mechanism of landslide-debris avalanches [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Suppl. 1): 480 – 488]
- [18] 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]
- [19] 李雁,易永胜,高全等. 高性能海砂混凝土配合比设计的正交试验研究[J]. *建筑设计*, 2010, 41(2): 162 – 164 [Li Yan, Yi Yongsheng, Gao Quan, et al. Orthogonal test study of proportioning design of high performance sea sand concrete [J]. *Architecture Technology*, 2010, 41(2): 162 – 164]

Model Test of Movement Parameters of Landslide Based on Orthogonal Design

ZHAO Yunhui, FAN Xiaoyi

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

Abstract: Model test of landslide movement was designed in terms of the design theory of orthogonal test, of which 5 influential were considered including grain composition, volume, gradient of slope, friction of underlying surface, moisture content. And these 5 influential factors were analyzed with the experiment by means of range and variance. During the analysis, the evaluation criteria were the maximum movement distance of landslide and the maximum speed. It is shown that among so many influential factors of the maximum movement distance, the gradient of slope is the most important one, followed by the friction of underlying surface, volume, grain composition, moisture content, in turn. The gradient of slope, friction of underlying surface and volume are critical factors for the maximum movement distance. It is also shown that among so many influential factors of the speed the gradient of slope is the most important one, followed by the friction of underlying surface, moisture content, grain composition and volume. Among 5 influential factors, only the gradient of slope play an important role of the maximum speed and other factors are not significant. The results indicated that movement distances of landslides are coupling of the volumes and movement ground and the slope gradients control the maximum speed.

Key words: model test of landslide; orthogonal design; movement distance; movement speed