第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0029-08

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ　2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:廖　军, 董　谦, 钱小龙, 等. 基于 UDEC 的高位滑坡运动参数影响因素[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 29—36
Liao Jun, Dong Qian, Qian Xiaolong, et al. Influencing factors of movement parameters of high landslide based on UDEC[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 29—36

基于 UDEC 的高位滑坡运动参数影响因素

廖　军[1]　董　谦[1]　钱小龙[1]　冯文凯[1,2]
(成都理工大学环境与土木工程学院[1],地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室[2],成都 610059)

摘　要　滑距和滑速这类运动参数历来是评价高位滑坡致灾范围和致灾强度的关键性指标。斜坡坡形特征、坡面物理力学性质等是这些指标的影响因素。通过对 17 个典型高位滑坡资料的收集与分析,资料显示高位滑坡多具有上陡下缓的坡形特征(折线形坡),将反映高位滑坡剪出口下方坡形特征的陡坡、缓坡的坡度与反映坡面性质特征的内聚力与内摩擦角作为运动参数的影响因素进行研究,根据资料并结合经验确定了各影响因素的变化范围,按照正交试验原理设计 UDEC 数值模拟试验,利用极差和方差分析研究各因素对高位滑坡滑距、滑速的影响性。结果表明:极差结果显示影响滑距的主次顺序为缓坡度 > 陡坡度≫内聚力 = 内摩擦角,影响滑速的主次顺序为陡坡度≫缓坡度 > 内聚力 > 内摩擦角;方差结果显示缓坡度、陡坡度为影响滑距的高度显著因素,陡坡度为影响滑速的显著因素,其余均为不显著因素;滑坡的运动参数受场区地形条件的影响显著,因此,在进行高位滑坡致灾范围与强度评价时,应主要考虑剪出口下方的坡形。

关键词　高位滑坡　　运动参数　　影响因素　　UDEC
中图法分类号　P642.22;　　**文献标志码**　A

中国西南山区由于沟谷纵横、地形高差大、斜坡坡度大、地质条件复杂,为高位滑坡的易发地区。高位滑坡往往具有高位能效应且体积巨大,一旦启动将于极短时间内产生的巨大运动动能,造成重大人员伤亡和财产损失[1]。

滑距和滑速这类运动参数是评价高位滑坡致灾范围和致灾强度的关键性指标,其变化规律受众多因素影响。因此,综合分析所有因素给高位滑坡运动参数带来的影响极其困难。近年来,国内外学者通过在诸多影响因素中合理选取多个目标因素,以此开展对高位滑坡运动参数的影响研究并取得了可喜的成果。立足于上诉学者所选取的影响因素类别,将研究成果大致分为地形条件及岩土体特性两个方面因素进行阐述。在地形条件因素影响方面,樊晓一等[2]在大量统计现有大型滑坡数据基础上,分析"坡""场"因素的影响主次顺序,得到了滑坡高度及坡度是运动距离的主要因素;Pirulli[3]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;潘欢迎等[4]通过物理模型试验模拟了在不同滑体参数、滑坡坡度和启动速度组合下滑坡的运动过程,并研究了不同工况条件下滑坡运动参数的基本规律;郭宁[5]以普格县姚家山滑坡为例,对其滑坡的影响因素等进行研究,揭示了滑坡的成因机制及危害性。在岩土体特性影响因素方面,郝明辉等[6]开展了一系列的室内模型试验,研究滑坡体碎屑粒径、滑床糙率和挑坎对运动参数的影响;葛云峰等[7]以法向刚度、切向刚度、内摩擦角、黏聚力四种滑动面节理参数为影响因素,基于正交试验设计原理,运用 3DEC 进行数值模拟试验,得到了这些因素对于鸡尾山滑坡稳定性影响的主次顺序;赵运会等[8]通过物理模型试验,对颗粒级配、体积、斜坡坡度、下垫面摩擦系数、含水率五种滑坡影响因素进行显著性分析,得到了斜坡坡度是影响滑距、滑速主要因素。

根据上述研究成果,较为普遍的认识是:滑坡区的地形条件、岩土体特性直接制约着滑距及滑速的变化规律。因此,对于高位滑坡这类地势高差较大的滑坡,其斜坡坡形特征及坡面物理力学性质应是主要考虑因素,然而,大部分研究往往针对上述某一方面进行深入分析,未能全面地考虑斜坡坡形特征及坡面物理力学性质对高位滑坡运动参数带来的综合影响。故本文以此为目标因素,根据 17 个典型高位滑坡的斜坡坡形特征及物理力学参数取值情况,

2018 年 7 月 5 日收到　　四川省青年科技创新研究团队专项计划(2017TD0018)、国家自然科学基金(41572291)和地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室团队项目(SKLGP2016Z001)资助
第一作者简介:廖　军(1971—),男,汉族,博士,副教授。研究方向:公路边(滑)坡工程与隧道工程评价防治及岩土体特性。E-mail: liaojun@ mail. cdut. edu. cn。

建立基于正交设计试验原理的高位滑坡 UDEC 模型并展开数值模拟试验,利用极差和方差分析研究各因素对高位滑坡滑距、滑速的影响性,判断出主要影响因素,以期为高位滑坡致灾范围和致灾强度评价提供参考。

1 典型高位滑坡坡形特征及坡面性质分析

大部分高位滑坡具有较大的滑动距离和较高的滑动速度,因此,纵观高位滑坡从启动到停止的整个滑体的运动路径中,较为明显的分为以下三个区域:滑源区、刮铲区、堆积区(区域名称根据各实际滑坡会有所变动或细化)。

为深入分析高位滑坡的坡形特征及坡面性质,根据高位滑坡具有大滑距、高滑速的特点,结合上述分区可知,其运动路径主要集中于刮铲区坡面和堆积区坡面,该坡面对滑体运动起着主要的阻滑作用,直接影响着高位滑坡运动参数,因此,将该区域坡面的坡形几何特征和坡面物理力学性质作为主要研究对象,为便于描述,将以上两个区域统称为滑坡剪出口下方坡面(后称剪出口下方坡面),见图 1。

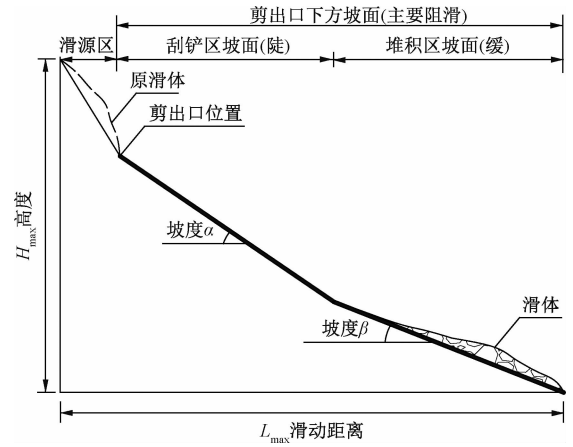

图 1 典型高位滑坡坡形特征示意图

Fig. 1 The slope characteristics of typical high landslide

鉴于此,将 17 个典型高位滑坡剪出口下方中反映坡形特征的坡度与反映坡面性质的内聚力与内摩擦角的数据[9—25]进行统计成表 1。可以得出:高位滑坡剪出口下方坡面的坡形特征基本呈现上陡(刮铲区)下缓(堆积区)的规律(图 1);以内聚力与内摩擦角为代表的剪出口下方坡面的力学参数受坡面性质不同取值各不相同,变化范围较大。

表 1 近年来高位滑坡运动参数及影响因素统计

Table 1 The statistics of high landslide movement parameters and influencing factors in recent years

编号	年份	高位滑坡名称	剪出口下方坡面的坡度/(°)		剪出口下方坡面的力学参数		滑距/m	滑速/(m·s^{-1})	文献来源
			陡坡(刮铲区)	缓坡(堆积区)	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)			
1	2008	都江堰牛圈沟滑坡	18	8	300	50	3 500	–	朱圻等[9]
2	2008	安县大光包滑坡	38	28	398	26	2 100	–	冯文凯等[10]
3	2008	青川东河口滑坡	26	10	235	38	2 500	–	孙萍等[11]
4	2008	绵竹文家沟滑坡	25	5	320	37	800	–	黄河清等[12]
5	2008	刘家湾滑坡	35	18	–	–	1 400	67.5	何源等[13]
6	2008	安县肖家桥滑坡	45	20	–	–	400	5	徐文杰等[14]
7	2008	北川王家山滑坡	36	29	–	–	450	–	赵旭等[15]
8	2008	安县老鹰岩滑坡	50	30	–	–	2 000	–	裴向军等[16]
9	2008	北川唐家山滑坡	–	–	480	31	800	–	曹琰波等[17]
10	2009	武隆鸡尾山滑坡	33	14	200	20	1 500	–	殷跃平等[18]
11	2010	汉源二蛮山滑坡	47	27	420	38	1 370	–	顾成壮等[19]
12	2011	南江县石板沟滑坡	28	15	–	–	200	–	张涛等[20]
13	2013	彝良县麻窝滑坡	75	20	200	30	345	32	吴钟腾等[21]
14	2013	都江堰五里坡滑坡	24	12	–	–	950	–	杜国梁等[22]
15	2013	赵家沟滑坡	25	15	22	11	900	30	康瀚等[23]
16	2017	纳雍县普洒滑坡	50	15	–	–	650	43.83	郑光等[24]
17	2017	茂县新磨滑坡	27	10	150	30	2 600	78.96	殷跃平等[25]
		最大值	75	30	480	50			
		最小值	18	5	22	11			

注:坡度取自各文献关于刮铲区、堆积区特征描述;滑距、滑速取自各文献中最大滑距、最大滑速。

2　基于正交试验建立高位滑坡 UDEC 模型

2.1　正交试验方案

根据高位滑坡特征分析,为研究各因素对高位滑坡运动参数的影响,根据表 1 统计得出的典型高位滑坡剪出口下方坡形特征呈现上陡下缓规律,故将其分为两段:第一段坡面为陡坡;第二段坡面为缓坡,同时沿用内聚力与内摩擦角坡面物理力学性质因素。研究将高位滑坡运动参数的影响因素确定为第一段陡坡面(A)、第二段缓坡面(B)、剪出口下方坡面内聚力(C)、剪出口下方坡面内摩擦角(D)。采用数值模拟方法进行以上四种影响因素研究时,如果进行全面试验,则计算试验的规模将很大,故采用正交试验设计[26]进行研究。

据表 1 统计得出的剪出口下方坡面的坡度变化,可以得到在陡坡段坡度取值区间为 18° ~75°;在缓坡坡段取值区间为 5° ~30°。据表 1 统计得剪出口下方坡面的内聚力取值区间 22 ~480 kPa;剪出口下方坡面的内摩擦角取值区间 11° ~50°。因此,参考以往的经验[27],研究针对剪出口下方坡形高陡(大于 55°)的高位滑坡,拟定因素水平为表 2。

据表 2 可知这是四因素 3 水平的多指标(x、y、z)问题。如果做全面试验需 $3^4 = 81$ 次试验,由于时间越长误差越大,并且对于多指标问题,采用简单对比法,往往顾此失彼,对因素的影响性很难准确判定。因此,为对各指标通盘考虑且缩短计算周期,采用 L9(34)正交表安排因素影响研究的试验方案。

表 2　因素水平

Table 2　Factor level table

因素水平	剪出口下方坡面的坡度		剪出口下方坡面的力学性质	
	陡坡(A)/(°)	缓坡(B)/(°)	内聚力(C)/kPa	内摩擦角(D)/(°)
1	75	25	100	10
3	65	20	300	20
3	55	15	300	30

2.2　高位滑坡 UDEC 模型建立过程

根据典型高位滑坡坡形特征示意图,结合正交设计表 5,建立 9 种高位滑坡 UDEC 模型,研究拟定模型竖直高度为 450 m,水平长度为 760 m,各模型整体高度与长度保持不变。以正交设计表 5 内 1 试验号 UDEC 模型作为示列模型:第一段陡坡面坡度为 75°,水平距离 90 m,高差为 200 m;第二段缓坡面坡度为 25°,水平距离 200 m,高差 85 m(图 2)。

在建立模型时,为较为准确地得到能反映整个

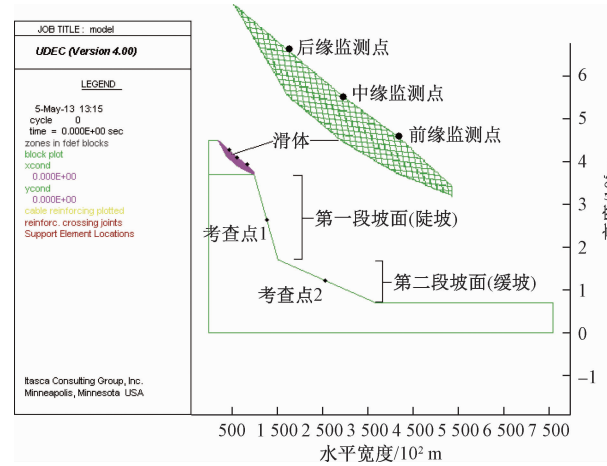

图 2　试验 1 号高位滑坡 UDEC 示列模型

Fig. 2　The No. 1 UDEC model of highlandslide

滑体的滑速计算结果,故在滑体的表面前、中、后缘设立三个监测点,由于需考虑剪出口下方坡面的坡度变化对高位滑坡运动的影响,因此在陡坡段设置考查点 1 与缓坡段设置考查 2,以记录滑体通过考查点的速度变化(图 2)。

2.3　参数选取

滑体及斜坡体的物理力学参数随岩性不同取值范围差异较大,基本没有规律可循。因此,研究中除需要考查的剪出口下方坡面的物理力学参数按正交设取值外,其余的参数取值沿用文献[21,28]中的取值,模型各部分物理力学参数综合取值见表 3、表 4。

研究的目标是剪出口坡面的物理力学性质对于滑坡运动参数的影响,因此,作以下两点假定:整个滑体在滑源区的变形破坏过程不作深究;单一滑坡解体后的块体变形及其内力不作计算。因此,将滑体与斜坡体的材料均设为弹性。

表 3　滑体物理力学参数

Table 3　The physical and mechanical parameters of landslide

参数	弹性模量 K/MPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
数值	900	0.25	2 100	81	30

表 4　滑体、剪出口下方坡节理裂隙物理力学参数

Table 4　The joint and fissure parameter table of landslide and slope physical and mechanical

节理裂隙面	切向刚度/MPa	法向刚度/MPa	内聚力/KPa	内摩擦角/(°)
滑体	100	100	40	20
剪出口下方坡面	1 000	1 000	见正交试验设计	
剪出口下方坡体	1 000	1 000	200	30

3 高位滑坡运动参数的影响因素分析

3.1 正交试验计算结果

按照正交试验设计,对 9 组 UDEC 数值模型进行依次计算,得到与之对应的滑体距剪出口最大位移值和滑体前、中、后缘监测点经过第一段陡坡(考查点 1)和第二段缓坡(考查点 2)的速度平均值(由于篇幅所限未列出前、中、后缘的速度值),试验结果详见表 5。

滑速变化为各试验号滑体在陡坡考查点 1 与缓坡考查点 2 的平均速度计算结果的差值;表 5 中 I_j、II_j、III_j 分别表示第 j 种因素第 1、2、3 水平,$\overline{I_j}$、$\overline{II_j}$、$\overline{III_j}$ 为均值;R_j 是同一列的 $\overline{I_j}$、$\overline{II_j}$、$\overline{III_j}$ 之中最大值与最小值的差,称为极差。

3.2 滑距影响因素分析

3.2.1 极差分析

为更加直观了解各因素与位移之间的关系,把表 5 中 $\overline{I_j}$、$\overline{II_j}$、$\overline{III_j}$ 的位移数据和相应因素水平进行整合为图 3。图 3 中反映 A 陡坡与 B 缓坡的位移数据点散布较大,即坡度因素变动时,对滑距的变动幅度影响较大;C 内聚力和 D 内摩擦角的位移数据点较为集中,即物理性质因素变化时,对滑距的变化幅度影响较小。因此,A 陡坡、B 缓坡为主要因素,C 内聚力、D 内摩擦角为次要因素。根据表 5 极差计算结果对可将各因素的主次顺序进行排序为 B 缓坡 > A 陡坡≫C 内聚力 = D 内摩擦角。

3.2.2 方差分析

为准确估计误差大小,将试验中由于试验因素改变引起的数据波动同试验误差引起的数据波动加以区分,对各因素进行精确的影响程度数量估计,采用方差分析法对位移计算结果进行分析。由于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因素偏差平方和;总偏差平方和的自由度等于各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,原则上难以对试验数据进行方差分析。因此,采用下述方法估计误差平方和及其自由度:若没有一个偏差平方和明显偏小时,可将正交表各因素中几个最小的偏差平方和相加作为误差平方和,将它们对应的自由度相加作为误差平方和的自由度。所以将因素 C 和因素 D 的偏差平方和作为误差平方和,因素 C 和因素 D 对应的自由度作为误差平方和的自由度。详见表 6。

由方差分析可以得到如下认识:剪出口下方坡面的坡度对滑坡的距剪出口位移的影响高度显著,是决定性因素;剪出口坡面的力学性质则影响不显著。

3.3 滑速影响因素分析

3.3.1 极差分析

为直观了解各因素对滑体通过陡坡、缓坡后速

表 5 正交试验方案及分析计算

Table 5 Orthogonal experiment schemes and analysis of calculation

试验号	因素水平				距剪出口位移/m	前、中、后缘监测点平均速度/(m·s^{-1})		
	剪出口下方坡面的坡度		剪出口下方坡面的力学性质					
	陡坡(A)/(°)	缓坡(B)/(°)	内聚力(C)/kPa	内摩擦角(D)/(°)		考查点 1(陡坡)	考查点 2(缓坡)	滑速变化
1	75	25	100	10	469.5	8.3	0.6	7.7
2	75	20	200	20	501.2	8.5	2.1	6.4
3	75	15	300	30	591.6	8.5	1	7.5
4	65	25	200	30	497.6	6.5	3.2	3.3
5	65	20	300	10	542.3	4.4	2.8	1.6
6	65	15	100	20	618.3	5.2	1	4.2
7	55	25	300	20	544.7	5.5	4.5	1.0
8	55	20	100	30	586.2	5	1.8	3.2
9	55	15	200	10	666.8	5	0.8	4.2

水平状态	陡坡(A)/(°)		缓坡(B)/(°)		内聚力(C)/kPa		内摩擦角(D)/(°)	
	距剪出口位移	滑速变化	距剪出口位移	滑速变化	距剪出口位移	滑速变化	距剪出口位移	滑速变化
I_j	1 562.3	21.6	1 511.9	12	1 674.0	15.1	1 678.6	13.5
II_j	1 658.2	9.1	1 629.7	11.2	1 665.6	13.9	1 664.2	11.6
III_j	1 797.7	8.4	1 876.6	15.9	1 678.7	10.1	1 675.4	14
$\overline{I_j}$	520.8	7.2	504.0	4.0	558.0	5.0	559.5	4.5
$\overline{II_j}$	552.8	3.0	543.2	3.7	555.2	4.6	554.7	3.9
$\overline{III_j}$	599.2	2.8	625.5	5.4	560.0	3.4	558.5	4.7
R_j	78.4	4.4	121.5	1.7	4.8	1.6	4.8	0.8

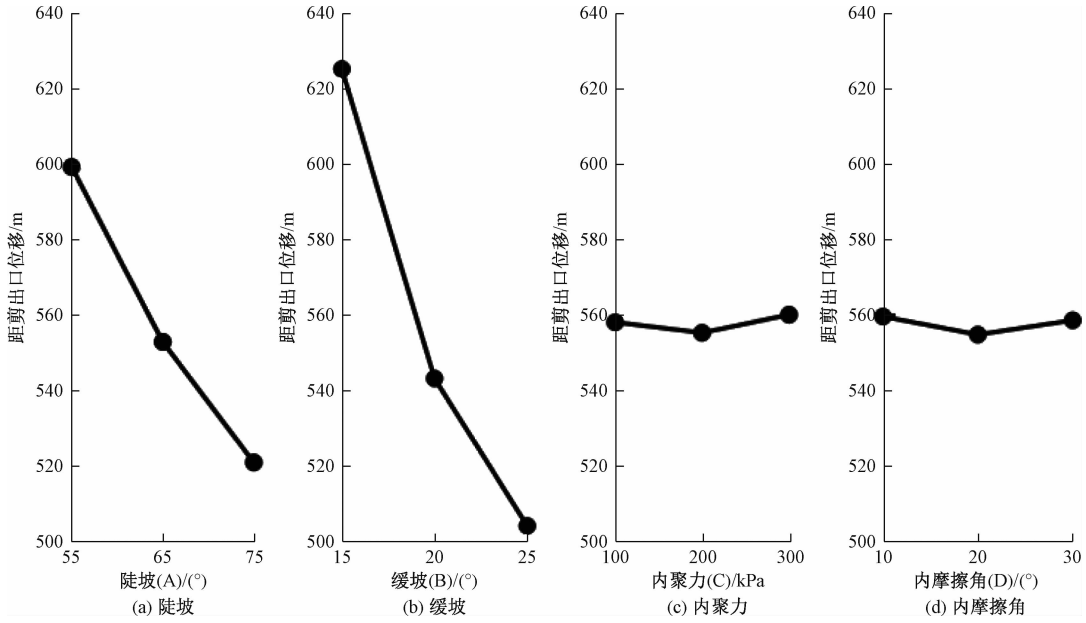

图 3　位移与各影响因素的关系

Fig. 3　Relationship between movement distances and all Influencing factors

表 6　运动距离方差分析结果

Table 6　Variance analysis results of movement distances

方差来源	平方和	自由度	均方	F	显著性
A	9 341.13	2	4 670.56	139	＊＊
B	23 117.93	2	11 558.96	344	＊＊
C	28.96	2	14.48	0.43	[＊]
D	38.16	2	19.06	0.57	[＊]
误差 Δ	67.12	4	33.56		
总和	32 526.18	8			

注:$F_{0.05}(2,2)=19$;$F_{0.01}(2,2)=99$;＊＊表示因子高度显著;[＊]表示因子不显著。

度变化的影响关系,把表 5 中$\overline{I_j}$、$\overline{II_j}$、$\overline{III_j}$的速度变化数据和相应因素水平进行整合为图 4。反应陡坡(A)的速度变化数据点散布较大,即陡度因素变动时,对速度变化的影响较大;内聚力(C)和内摩擦角(D)的位移数据点较为集中,即物理性质因素变化时,对滑距变化的影响较小。因此,陡坡(A)为主要因素,缓坡(B)、内聚力(C)、内摩擦角(D)为次要因素。根据表 5 极差计算结果对可将各因素的主次顺序进行排序:陡坡(B)≫缓坡(A)>内聚力(C)>内摩擦角(D)。

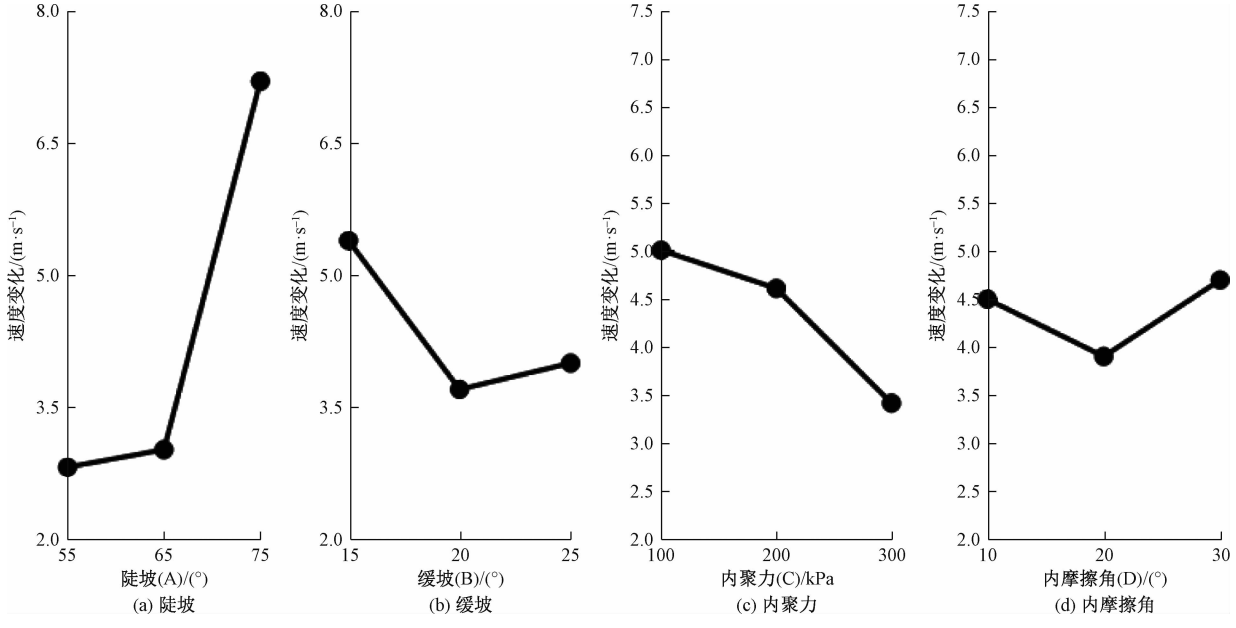

图 4　速度与各影响因素的关系

Fig. 4　Relationship between movement velocity and all influencing factors

3.3.2 *方差分析*

由于此次为没有空列的正交试验,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。因此,由于因素 D 偏差平方明显偏小,故将因素 D 偏差平方和作为误差平方和,因素 D 对应的自由度作为误差平方和的自由度。

采用方差分析法对滑体通过陡坡、缓坡后速度改变进行分析,剪出口下方坡面的陡坡坡度对滑速改变的影响显著;剪出口下方坡面的缓坡坡度、内聚力、内摩擦角则影响不显著(表 7)。

表 7 运动速度方差分析结果

Table 7 Variance analysis results of movement velocity

方差来源	平方和	自由度	均方	*F*	显著性
A	36.78	2	18.39	34.1	*
B	4.216	2	2.11	3.94	[*]
C	4.54	2	2.27	4.25	[*]
误差 D	1.09	2	0.53		
总和	46.61	8			

注:* 表示因子显著。

4 结论

(1)根据极差计算结果显示:剪出口下方坡面的缓坡坡度、陡坡坡度为影响滑体距剪出口位移的主要因素,剪出口下方坡面的内聚力与内摩擦角为次要因素,主次顺序为 B 缓坡 > A 陡坡≫C 内聚力 = D 内摩擦角;剪出口下方坡面的陡坡因素为影响滑体通过陡坡、缓坡后速度改变的主要因素,剪出口下方坡面的缓坡坡度、内聚力与内摩擦角为次要因素,主次顺序为 B 陡坡≫A 缓坡 > C 内聚力 > D 内摩擦角。

(2)根据方差计算结果显示:剪出口下方坡面的陡坡坡度、缓坡坡度为影响滑体距剪出口位移的高度显著因素,剪出口下方坡面的内聚力与内摩擦角为不显著因素;剪出口下方坡面的陡坡因素为影响滑体通过陡坡、缓坡后速度改变的显著因素,剪出口下方坡面的缓坡坡度、内聚力与内摩擦角为不显著因素。

(3)研究结果表明滑坡的运动参数受场区地形条件的影响显著。因此,在进行高位滑坡致灾范围与强度评价时,应主要考虑剪出口下方的坡形,这对滑坡防治具有现实意义。

参 考 文 献

1 王兰生, 詹 铮, 苏道刚, 等. 中国典型滑坡. 北京: 科学出版社, 1988
Wang Lansheng, Zhan Zheng, Su Daogang, *et al*. Typical landslides in China. Beijing: Science Press, 1988

2 樊晓一, 乔建平. "坡"、"场"因素对大型滑坡运动特征的影响. 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. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010; 29(11): 2337—2347

3 Pirulli M. Morphology and substrate control on dynamics of flow like landslides. Journal of Geotechnical and Geoenviornmental Engineering, 2010; 136(2): 376

4 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试验研究. 工程地质学报, 2013; 21(5): 788—796
Pan Huanying, Chai Bo, Li Xiang. Experimental study on risk of movement process of bedding rock landslides with different structures. Journal of Engineering GeoLogy, 2013; 21(5): 788—796

5 郭 宁. 普格县姚家山滑坡成因及稳定性分析. 科学技术与工程, 2014; 14(11): 114—118
Guo Ning. Analysis on the causes and stability of Yaojiashan landslide in Puer County. Science Technology and Engineering, 2014; 14(11): 114—118

6 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. 岩土力学, 2014; 35(增刊1): 480—488
Hao Minghui, Xu Qiang, Yang Lei, *et al*. Physical model test and motion mechanism of landslidedebris flow. Rock and Soil Mechanics, 2014; 35(S1): 480—488

7 葛云峰, 唐辉明, 熊承仁, 等. 滑动面力学参数对滑坡稳定性影响研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例. 岩石力学与工程学报, 2014; 33(增刊2):3873—3884
Ge Yunfeng, Tang Huiming, Xiong Chengren, *et al*. Effect of sliding plane mechanical parameters on landslide stability—A case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014; 33(S2): 3873—3884

8 赵运会, 樊晓一. 基于正交设计的滑坡运动参数模型试验. 山地学报, 2016; 34(1): 92—99
Zhao Yunhui, Fan Xiaoyi. Model test of movement parameters of landslide based on orthogonal design. Journal of Mountain Science, 2016; 34(1): 92—99

9 朱 圻, 程谦恭, 王玉峰, 等. 牛圈沟高速远程滑坡超前冲击气浪机制分析. 岩石力学与工程学报, 2014; 33(6): 1212—1226
Zhu Qi, Cheng Qiangong, Wang Yufeng, *et al*. Mechanism of air-blasts of rapid and long-runout landslide Niujuangou. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014; 33(6): 1212—1226

10 冯文凯, 易小宇, 葛 华, 等. 大光包滑坡滑带碎裂岩体原位钻孔剪切试验研究. 岩土工程学报, 2017; 39(9): 1718—1723
Feng Wenkai, Yi Xiaoyu, Ge Hua, *et al*. In-situ borehole shear tests on cataclastic rock mass of Daguangbao landslide. Journal of Geotechnical Enginering, 2017; 39(9): 1718—1723

11 孙 萍, 殷跃平, 陈立伟. 汶川地震区东河口滑坡破坏机制 FLAC 模拟分析. 水文地质工程地质, 2011; 38(5): 87—91
Sun Ping, Yin Yueping, Chen Liwei. Numerical analysis of the failure mechanism of the Donghekou rockslide in the Wenchuan earthquake region with FLAC. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011; 38(5): 87—91

12 黄河清, 赵其华. 汶川地震诱发文家沟巨型滑坡-碎屑流基本特

征及成因机制初步分析. 工程地质学报, 2010; 18(2): 168—177
Huang Heqing, Zhao Qihua. Basic characteristics and prelimminary mechanis analysis of large scale rock side-stubzstrom at Wenjiagou Triggered by Wenchuan earthquake. Journal of Engineering GeoLogy, 2010; 18(2):168—177

13 何　源, 罗永红, 王运生, 等. 刘家湾滑坡特征及成因机制探讨. 工程地质学报, 2015; 23(5): 835—843
He yuan, Luo Yonghong, Wang Yunsheng, *et al.* Discussion on geneticmechanism characteristic of Liujiawanlandslide and geologic. Journal of Engineering Geology, 2015; 23(5): 835—843

14 徐文杰, 陈祖煜, 何秉顺, 等. 肖家桥滑坡堵江机制及灾害链效应研究. 岩石力学与工程学报, 2010; 29(5): 933—942
Xu Wenjie, Chen Zuyi, He Bingshun, *et al.* Research on river-blocking mechanism of Xiaojiaqiao landslide and disasters of Chain effects. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010; 29(5): 933—942

15 赵　旭, 彭培好, 闫　亮. 崩滑型地质遗迹景观的保护与开发——以青川县东河口王家山滑坡为例. 自然杂志, 2014; 36(3): 202—207
Zhao Xu, Peng Peihao, Yan Liang. Protection and development countermeasures of collapse slide geohe ritage landscape—A case study of Wangjia Mountain slide at Donghekou of Qingchuan County. Journal of Nature, 2014; 36(3): 202—207

16 裴向军, 郝永峰, 张军新, 等. 老鹰岩滑坡成因机制与运动特征研究. 地质灾害与环境保护, 2010; 21(4): 28—32
Pei Xiangjun, Hao Yongfeng, Zhang Junxin, *et al.* Movement charateristics and mechanism of Laoyingyan landslide triggered by Wenchuan earthquake. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010; 21(4): 28—32

17 曹琰波, 戴福初, 许　冲, 等. 唐家山滑坡变形运动机制的离散元模拟. 岩石力学与工程学报, 2011; 30(增刊 1): 2878—2887
Cao Yanbo, Dai Chufu, Xu Chong, *et al.* Discrete element simulation of deformation and movement mechanism for Tangjiashan landslide. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011; 30(S1): 2878—2887

18 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例. 岩石力学与工程报, 2010; 29(2): 217—226
Yin Yueping. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide—A case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010; 29(2): 217—226

19 顾成壮, 胡卸文, 方　力, 等. 四川汉源二蛮山高速滑坡-碎屑流基本特征及地质演化. 山地学报, 2014; 32(5): 568—578
Gu Chengzhuang, Hu Xiewen, Fang Li, *et al.* Basic aracteristics and evolution history of ermanshan high-speed Slidedebris flow in Hanyuan Sichuan. Mountain Research, 2014; 32(5): 568—578

20 张　涛, 谢忠胜, 石胜伟, 等. 南江县石板沟滑坡特征、成因及演化过程研究. 长江科学院院报, 2013; 30(7): 33—37
Zhang Tao, Xie Zhongsheng, Shi Shengwei, *et al.* Characteristics geological causes and evolution of Shibangou landslide in Nanjiang county. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013; 30(7): 33—37

21 吴钟腾, 冯文凯, 朱继良. 云南省彝良县麻窝后山滑坡变形破坏机理离心机模拟试验. 水文地质工程地质, 2014; 41(4): 87—91,103
Wu Zhongteng, Feng Wenkai, Zhu Jiliang. Centrifuge simulation test on deformation mechanism of landslide in the Mawo mountain in Yiliang County, Yunnan Province. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014; 41(4): 87—91,103

22 杜国梁, 张永双, 姚　鑫, 等. 都江堰市五里坡高位滑坡-碎屑流成因机制分析. 岩土力学, 2016; 37(增刊 2): 493—501
Du Guoliang, Zhang Yongshuang, Yao Xing, *et al.* Formation mechanism analysis of Wulipo landslide-debris flow in Dujiangyan City. Rock and Soil Mechanics, 2016; 37(S2): 493—501

23 康　瀚. 云南镇雄县赵家沟滑坡成因机理研究. 成都: 成都理工大学, 2014
Kang Han. Study on the genesis mechanism of Zhao Jia Gou landslide in Zhenxiong County Yunnan. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014

24 郑　光, 许　强, 巨袁臻, 等. 2017 年 8 月 28 日贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌特征与成因机理研究. 工程地质学报, 2018; 26(1): 223—240
Zheng Guang, Xu Qiang, Ju Yuanzhen, *et al.* The pusacun rockavalanche on August 28, 2017 in Zhangjiawan Nayong, Guizhou: Characteristics and failure mechanism. Journal of Engineering Geology, 2018; 26(1): 223—240

25 殷跃平, 王文沛, 张　楠, 等. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究——以四川茂县新磨滑坡为例. 中国地质, 2017; 44(5): 827—841
Yin Yueping, Wang Wenpei, Zhang Nan, *et al.* Long runout geological disaster initiated by the ridgetop rockslide in a strong earthquake area—A case study of the Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan Province. Geology in China, 2017; 44(5): 827—841

26 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究. 实验技术与管理, 2010; 27(9): 52—55
Liu Ruijiang, Zhang Yewang, Wen Chongwei, *et al.* Orthogonal experimental design and analysis methods. Experimental Technology and Management, 2010; 27(9): 52—55

27 倪　恒, 刘佑荣, 龙治国. 正交设计在滑坡敏感性分析中的应用. 岩石力学与工程学报, 2002; 21(7): 986—992
Ni Heng, Liu Yourong, Long Zhiguo. Application of orthogonal design in landslide sensitivity analysis. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002; 21(7): 986—992

28 吴钟腾. 云南省彝良县麻窝滑坡危害范围三维数值模拟分析. 2015 年全国工程地质学术年会论文集. 成都: 成都理工大学, 2015: 6
Wu Zhongteng. 3D numerical simulation analysis of the damage zone of Mawo landslide in Yiliang County, Yunnan Province. National Symposiu on Engineering Geology, 2015. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015: 6

Influencing Factors of Movement Parameters of High Landslide Based on UDEC

LIAO Jun[1], DONG Qian[1], QIAN Xiao-long[1], FENG Wen-kai[1,2]
(College of Environment and Civil Engineering[1], Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection[2], Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

[**Abstract**] The movement parameters such as movement distance and movement speed have been used by many scholars as key indicators for evaluating the extent and severity of high landslide hazards. The features of the slope shape, the physico-mechanical properties of the slope, both of these factors are the influencing factors of these indexes. The author through the collection and analysis of data of 17 typical high landslides, the data shows that high landslides generally have a gentle slope shape (polygonal slope). This article will reflect the steep slopes of the slope features of the high landslide shear outlets, the gradient of the gentle slopes, and the cohesion and internal friction angle that reflect the nature of the slope surface as movement parameters' influencing factors. Based on the data and combined with experience, the range of variation of each influencing factor was determined. The UDEC numerical simulation experiment was designed according to the orthogonal design, The influence of various factors on the distance and speed of the high landslide was studied using range and variance analysis. The results show that: the extreme results show that the order of the primary and secondary impact movement distance is gentle mild slope > steep slope≫cohesion = internal friction angle, the order of primary and secondary affecting the movement speed is steep slope≫mild slope > cohesion > internal friction angle; the results of variance show that mild slope and steep slope are highly significant factors affecting the movement distance, steep slope is a significant factor affecting the speed, and the rest are insignificant factors. Landslide movement parameters are significantly affected by the terrain conditions of the site. Therefore, when assessing the scope and intensity of high landslide hazards, the slope shape below the shear outlet should be mainly considered.

[**Key words**] high landslide movement parameters influencing factors UDEC