

# 龙王坪滑坡变形模式及稳定性评价\*

胡静<sup>①</sup> 黄凯湘<sup>②</sup> 洪念明<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>河南省地质矿产勘查开发局 第二地质勘查院 许昌 461000)

(<sup>②</sup>中国地质大学(武汉)工程学院 武汉 430074)

**摘要** 龙王坪滑坡分为上、下滑体两部分,在工程地质条件分析的基础上,分析了滑坡变形过程,确定了龙王坪滑坡上下两个滑体的变形破坏模式:上滑体为推移式滑坡,下滑体为牵引式滑坡。采用不平衡推力传递系数法评价了天然工况和暴雨工况下上下滑体的稳定性。采用 Abaqus 有限元软件模拟了暴雨对滑坡的渗流场应力场的变化规律,分析了其对稳定性的影响。研究成果表明滑坡天然条件下处于基本稳定状态,强降雨条件下欠稳定。

**关键词** 龙王坪滑坡 降雨 稳定性 非饱和土 数值模拟

**中图分类号**:P641 **文献标识码**:A

## DEFORMATION MODE AND STABILITY OF LONGWANGPING LANDSLIDE

HU Jing<sup>①</sup> HUANG Kaixiang<sup>②</sup> HONG Nianming<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>Second Geology & Mineral Resources Survey Institute; Bureau of Geological Exploration of Henan, Xuchang 461000)

(<sup>②</sup>Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

**Abstract** Longwangping landslide can be divided into the upper landslide and the lower landslide. Based on the engineering geological condition investigation, the deformation process is analyzed. The deformation and failure mode are determined. The upper landslide belongs to the pushing mode and the lower landslide is the pulling mode. With the unbalanced thrust transfer coefficient method, the landslide stability is evaluated both in normal natural state and the heavy rain conditions. Using the finite element method, the change regularity of the seepage field and stress field considering heavy rain is obtained. Then the influence by storm on the landslide stability is estimated. The result shows that under the normal natural condition, the landslide is stable. But under the heavy rainfall, Longwangping landslide is in the less stable state.

**Key words** Longwangping landslide, Rain, Stability, Unsaturated soil, Numerical modeling

## 1 引言

多年来对滑坡变形破坏模式已有深入的研究。力学机制的传统经典分类把滑坡变形破坏简单地分

为牵引式(后退式)和推移式(前进式)2种基本形式<sup>[1]</sup>。王兰生和张倬元主要针对层状或含层状岩体组成的斜坡变形机制提出了5种基本组合模式:蠕滑-拉裂、滑移-压密拉裂、弯曲-拉裂、塑流-拉裂、滑移-弯曲<sup>[2]</sup>。蒋征和张正禄利用变形模式的

\* 收稿日期:2012-01-05;收到修改稿日期:2012-05-17。

第一作者简介:胡静,工程地质专业。Email:huxli2000@163.com

拓扑约束识别方法来识别滑坡块体的变形模式<sup>[3]</sup>。王明华对蓄水后库岸滑坡的变形模式进行了模拟分析,发现水库蓄水不仅使滑坡稳定性产生变化,滑坡的变形模式也将由推移式转变为牵引式<sup>[4]</sup>。

针对降雨与滑坡的关系,学者们也做了很多研究。降雨及水位升降引起的地下水位的波动会降低库岸岩土体的抗剪强度<sup>[5~8]</sup>。非饱和土降雨入渗是诱发滑坡及滑坡变形破坏的主要因素之一<sup>[8]</sup>,在降雨入渗影响下非饱和边坡不仅强度参数会降低,而且变形参数也会随着应力水平和强度参数的变化而变化<sup>[9~11]</sup>。降雨入渗在边坡体内形成暂态饱和区及暂态水压力,其实是导致边坡非饱和区基质吸力降低,进而导致边坡稳定性的降低<sup>[12]</sup>。暂态饱和区与暂态孔隙水压力虽然是暂时的,但对边坡稳定性却至关重要<sup>[13]</sup>。在前人研究成果的基础上,本文主要分析了龙王坪滑坡的变形模式,并对天然、降雨工况下滑坡的稳定性进行了分析评价。

龙王坪滑坡处于持续缓慢的蠕滑中。2004年遭遇了200a一遇特大暴雨,24h降雨量达330.8mm,滑坡体蠕滑变形速度加快,坡体上房屋和公路挡土墙都出现了开裂(图1)。



图1 下滑体后部变形开裂的房屋

Fig. 1 Deformation cracking of the housing

## 2 龙王坪滑坡基本地质特征

### 2.1 地质构造及地震

研究区位于开县向斜,向斜轴向 $NE80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ,核部地层为侏罗系中统沙溪庙组。向斜北西翼岩层产状 $207^{\circ} \sim 161^{\circ} \angle 9^{\circ} \sim 17^{\circ}$ ,南西翼岩层产状 $350^{\circ} \sim 360^{\circ} \angle 12^{\circ} \sim 16^{\circ}$ (图2)。

据《中国地震烈度区划图》(1990年)、长江三峡工程可行性论证报告,该区地震基本烈度为VI度。

### 2.2 地形地貌

龙王坪滑坡位于重庆市开县东河右岸的斜坡

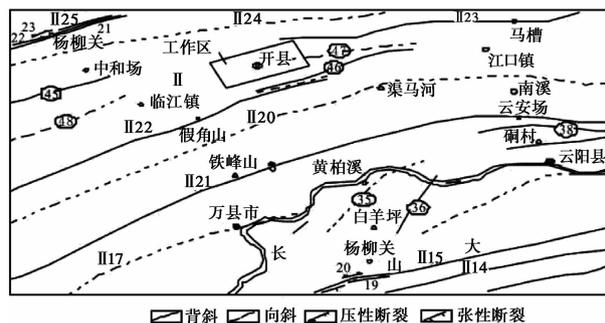


图2 区域地质构造纲要图

Fig. 2 Outline map of the regional geological structure

II弧形构造; II 14 赶场向斜; II 15 方斗山背斜; II 17 万县向斜; II 18 铁峰山背斜; II 20 渠马河向斜; II 22 假角山背斜; II 23 马槽坝背斜; II 24 长店房向斜; II 25 温泉井背斜; 19 自生桥逆断层; 20 外坝逆断层; 21 界牌逆断层; 22 杨柳关逆断层; 23 大紫院逆断层; ⑤ 黄柏溪向斜; ⑥ 新场背斜; ⑧ 杨柳湾向斜; ⑩ 石板沟背斜; ④ 6 回龙阁背斜; ④ 7 开县向斜

上,东南邻东河,属于构造剥蚀类型中的浅中切割低山地貌区。斜坡大致顺东西向展布,斜向东河。龙王坪滑坡由上滑体、下滑体组成,两滑坡体相对独立(图2)。上滑体微地形为单斜的缓坡,总体地形较平缓,平面上呈“舌状”,展布方向为NE-SW。滑坡主滑方向 $210^{\circ}$ ,平均坡角 $6.2^{\circ}$ 。滑坡剪出口高程267~275m,后缘300~306m,高差23~31m。滑体北东—南西长约300~350m,宽约200~250m,面积约 $7.80 \times 10^4 m^2$ ,平均厚度约12m,体积约 $93.6 \times 10^4 m^3$ 。

下滑体微地形为单斜的缓坡,略有起伏,总体地形较平缓,坡向约 $150^{\circ} \sim 200^{\circ}$ ,坡度角 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。下滑体总体坡度大于上滑体,且滑体前缘及边缘地带地形相对较陡。前缘高程176~180m,后缘高程266~280m,相对高差90~100m。主滑方向 $139^{\circ}$ 。

滑体平面面积约 $14.63 \times 10^4 m^2$ ,长约650m,宽200~250m;滑体平均厚约15m,体积约 $219 \times 10^4 m^3$ 。

### 2.3 地层岩性

滑坡区地层由老至新分述如下:

#### 2.3.1 侏罗系中统沙溪庙组泥岩、砂岩( $J_2S-Ms+Ss$ )

互层状紫红色泥岩和灰色砂岩,出露于滑坡后缘及东西两侧边界,区域内厚度100~350m。

#### 2.3.2 第四系全新统(Q4)

冲洪积物(Q4-al+pl):含碎石、卵砾石黏性土和砂土,主要分布于滑坡下滑体前缘东河河床及河流

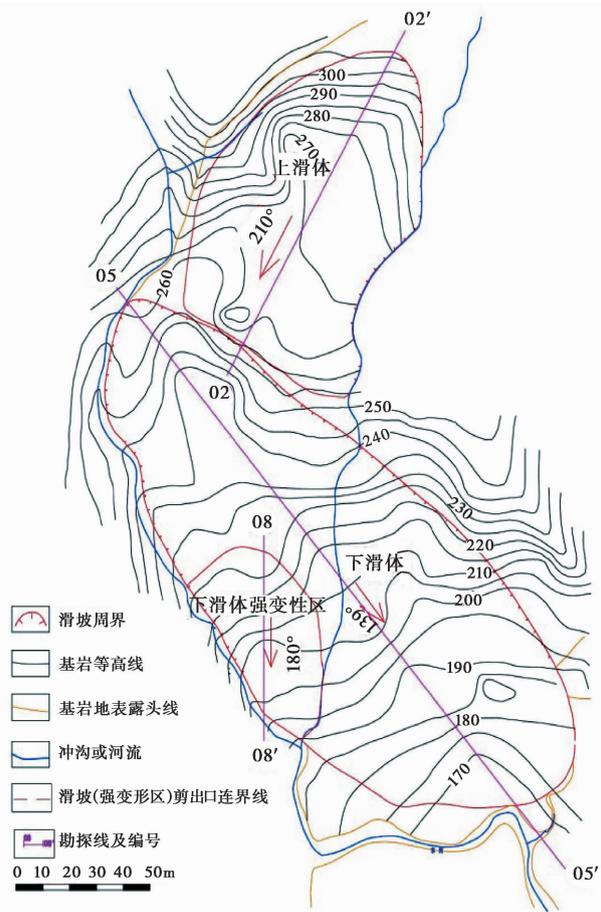


图3 龙王坪滑坡基岩表面等高线图

Fig. 3 Contour diagram of Longwangping landslide bedrock

两岸阶地。

残坡积物(Q4-el+dl):含碎石黏性土和碎石土等,分布于滑坡区外围相对陡坡地段。

滑坡堆积层(Q4-del):松散-中密结构,黄褐色、棕红色粉质黏土、黏土夹砂泥岩块石、碎块石土。出露于350~160m的斜坡下部。厚度2~25m。

### 3 滑坡变形破坏模式

#### 3.1 滑坡变形过程

2000年以前滑体处于相对稳定状态,无明显变形迹象。随着库区移民迁建工程开展,地质环境条件遭到一定程度破坏,在经历2004年9月4~5日的特大暴雨后,滑坡体的稳定性降低,滑体变形加剧,滑坡地表变形明显,尤其是滑坡前、后缘拉张现象明显(图1、4、5)。探井揭露的滑动面有明显的滑动痕迹,说明滑体已经处于滑动阶段。

#### 3.2 滑坡变形破坏模式

从基岩顶面等高线图(图2)可以看出:上滑体滑床为单斜斜坡,在滑体前缘具明显陡坎,即存在明显临空面且切脚。在暴雨作用下,滑体加速变形,产生蠕动-滑动变形,并在基岩陡坎处顺层剪出。该滑体变形属推移式变形模式,首先中后部产生滑移变形(图4),推动滑体前部变形剪出。

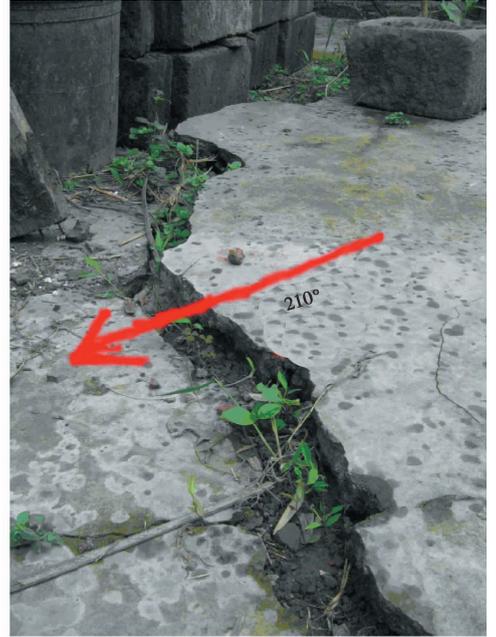


图4 上滑体后部开裂错落的坝坝

Fig. 4 Cracking scattered to dam on landslide rear

下滑体变形属于牵引式变形模式。总体变形方向为由北西—南东方向,受控于滑体右侧北西—南东方向展布的冲沟,在滑坡前缘该冲沟转为近东西向,目前下滑体整体处于变形阶段。下滑体受前缘临空面不断坍塌卸荷及公路工程切坡卸荷的影响,下滑体局部滑体变形加剧,沿软弱结构面滑动形成局部强变形区(图5)。

### 4 滑坡稳定性计算

#### 4.1 滑坡稳定性极限平衡法计算稳定性系数

##### 4.1.1 计算工况及参数选取

对上滑体、下滑体整体、下滑体强变性区进行了滑坡稳定性计算,计算剖面分别为02—02'、05—05'、08—08(图6、7、8)。龙王坪滑坡不涉水,处于地震Ⅵ度区,依据《技术要求》龙王坪滑坡上滑体防治工程等级确定Ⅲ级,安全系数取1.10~1.15;下



图5 下滑体前缘前缘挡墙鼓胀变形

Fig. 5 The leading edge of retaining wall bulging deformation

滑体防治工程等级为Ⅱ级,安全系数取 1.15 ~ 1.20 (表 1)。计算工况包括工况 1:自重+地面荷载;工况 2:自重+地面荷载+20a 一遇暴雨。

表 1 龙王坪滑坡岩土体力学参数表

Table 1 Mechanical parameters of rock and soil of Longwangping landslide

	弹性模量/ kPa	黏结力/ kPa	摩擦角/ (°)	渗透系数/ $m \cdot h^{-1}$	泊松比	孔隙比	密度/ $g \cdot cm^{-3}$
滑体	10000	15	10	$3e-4$	0.34	0.6	2
基岩	3840000	14175	39.3	$3e-6$	0.216	0.01	2.485

#### 4.1.2 稳定性分析

运用极限平衡法求得稳定性系数(表 2)。在天然状态下,上滑体和下滑体强变形区稳定性系数为 1.12 和 1.14,处于基本稳定状态;在降雨条件下稳定性系数明显降低,相对降雨前减小 0.1 左右,均

处于欠稳定状态。而下滑体整体在天然和降雨工况,稳定性系数都较大,为 1.68 和 1.52,2 种工况下都处于稳定状态。

表 2 滑坡稳定性系数

Table 2 the landslide stability coefficient by the limit equilibrium method

滑体	剖面号	计算工况	稳定性系数	稳定状态评估	安全系数
上滑体	2-2'	1	1.12	基本稳定	1.15
		2	1.03	欠稳定	1.10
下滑体 强变形 I 区	8-8'	1	1.14	基本稳定	1.20
		2	1.04	欠稳定	1.15
下滑体整体	5-5'	1	1.68	稳定	1.20
		2	1.52	稳定	1.15

## 4.2 暴雨对龙王坪滑坡强变形区影响

### 4.2.1 暴雨参数确定

气象部门提供的 3d 最大降雨量 446.7mm,第 2 天达到最大降雨强度  $9.3mm \cdot h^{-1}$ ,以此做出降雨曲线图(图 9)。初始水位为冲沟所在水平面,位于模型底部,坡脚设为水流溢出口。现以下滑体强变形区剖面 08-08'(图 8)为例分析滑坡在 3d 最大降雨量情况下的渗流和位移变形(图 10、图 11<sup>[14]</sup>, (表 1)。

### 4.2.2 计算结果分析

如图 12、13 所示,降雨前后孔压变化明显,降雨前孔压随高度线性变化,坡面最上部的孔压为  $-533.5kPa$ ,降雨 72h 后,坡面中上部孔压为  $-259.3kPa$ ,坡面下部孔压为  $-166.7kPa$ ,这是由于降雨导致坡体表面饱和度增大孔压减小,坡脚处水流汇集,饱和度相对其他位置更大,孔压也更小。

而随着饱和度增大,土体强度降低重度增大,由图 14 可知,降雨造成的位移增量主要位于滑坡土体表面和坡脚部位,这与降雨后滑坡表面土体和坡脚部位饱和度较大相吻合,坡体中后部由于坡度较陡,

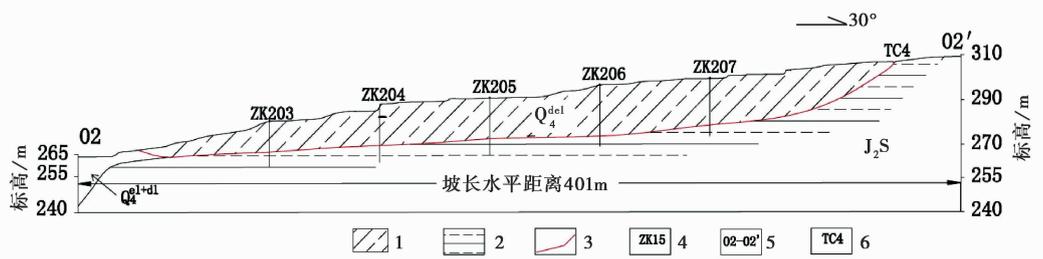


图 6 上滑体 02—02' 工程地质剖面图

Fig. 6 Engineering geological profile 02—02' of the top landslide

1. 第四系滑坡堆积物;2. 侏罗系中统沙溪庙组泥岩夹砂岩;3. 滑带;4. 钻孔;5. 勘探剖面线;6. 探槽

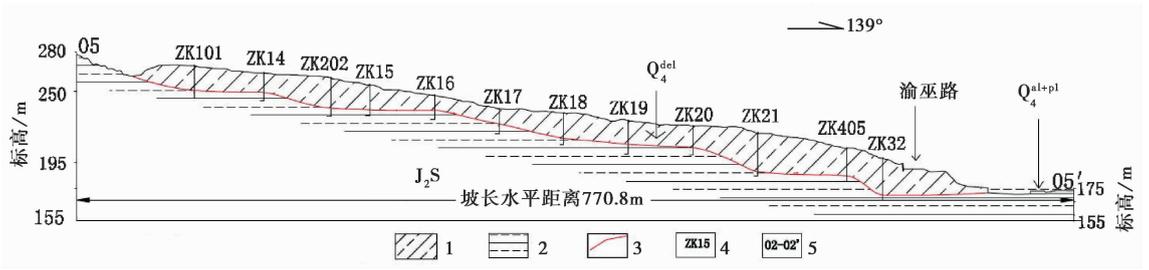


图7 下滑体整体05—05'工程地质剖面图

Fig. 7 Engineering geological profile 05—05' of the bottom landslide

1. 第四系滑坡堆积物; 2. 侏罗系中统沙溪庙组泥岩夹砂岩; 3. 滑带; 4. 钻孔编号; 5. 勘探剖面线

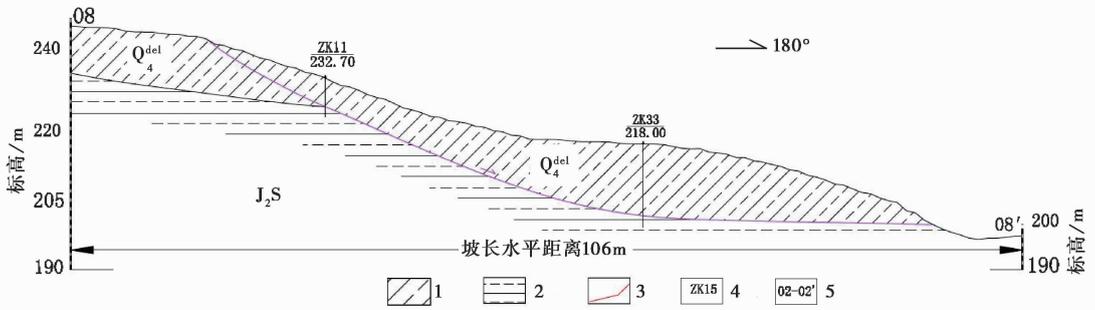


图8 下滑体强变形区08—08'工程地质剖面图

Fig. 8 Engineering geological profile 08—08' of the strong deformation zone in the bottom landslide

1. 第四系滑坡堆积物; 2. 侏罗系中统沙溪庙组泥岩夹砂岩; 3. 滑带; 4. 钻孔; 5. 勘探剖面线

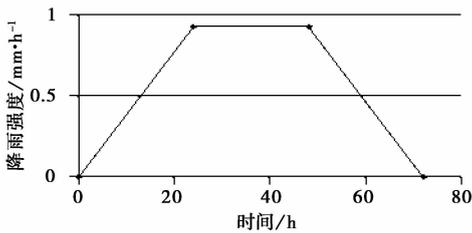


图9 降雨强度-时间曲线

Fig. 9 Rainfall intensity-time curve

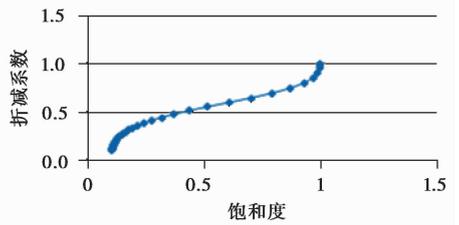


图11 饱和度-折减系数曲线

Fig. 11 Saturation-the reduction factor curve

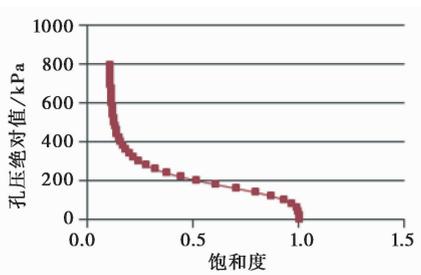


图10 饱和度-孔压曲线

Fig. 10 Saturation-the pore pressure curve

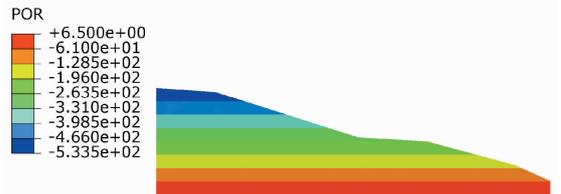


图12 降雨前孔压分布

Fig. 12 Pore pressure distribution before rainfall

位移也较大。最大位移在坡脚雨水溢出口, 达 34.43mm。而由等效塑性应变云图 (图 15) 可以看出, 滑坡已经基本贯通, 最大塑性变形区位于坡面较陡处中间位置, 大小为 6.683mm, 说明降雨后滑坡

会继续整体变形滑动。

由位移增量云图和等效塑性区增量云图可以看出, 降雨后, 位移和塑性变形区主要位于边坡坡脚和中后部坡度较陡位置, 进行滑坡监测预报时, 应着重在此两位置监测。

图 16 显示, 坡脚初始饱和度为 0.5 且随着持续

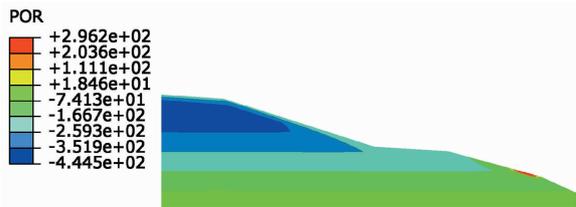


图 13 降雨 72h 后孔压分布

Fig. 13 Pore pressure distribution after 72h rainfall



图 14 降雨 72h 后位移增量图

Fig. 14 Displacement increment after 72h rainfall

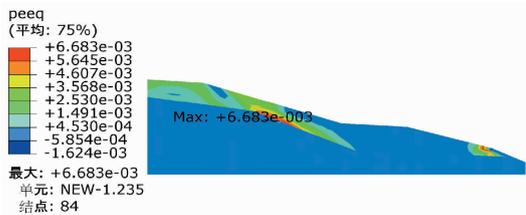


图 15 降雨前后塑性应变区增量

Fig. 15 Increment plastic strain after rainfall

降雨一直在增加,降雨 3d 后增大到 0.67; 坡体后缘初始饱和度为 0.12,在降雨 48h,也就是降雨量开始减小后达到非饱和的平衡状态,饱和度为 0.3,土体中水流会向坡脚汇集,故坡体中前部饱和度会持续增大,而坡后缘在降雨减小后能维持非饱和平衡状态。由坡脚附近单元时间-位移曲线(图 17)看到,位移增量在降雨 40h 后开始显著增大,在降雨前 2d 缓慢变形,而在第三天开始有较大变形,这是由于降雨所造成的滞后效应所致,说明降雨 2d 后边坡局部开始有较大变形,此时需要对其进行密切监测。

## 5 结论

(1) 龙王坪滑坡变形破坏的因素包括:暴雨使滑体及潜在滑移带强度降低;冲沟对坡脚的冲刷也会减小抗滑力。前缘修路挖方卸荷形成临空面、地表排水不畅等降低了滑坡稳定性。上滑体为推移式滑坡,下滑体为牵引式滑坡。

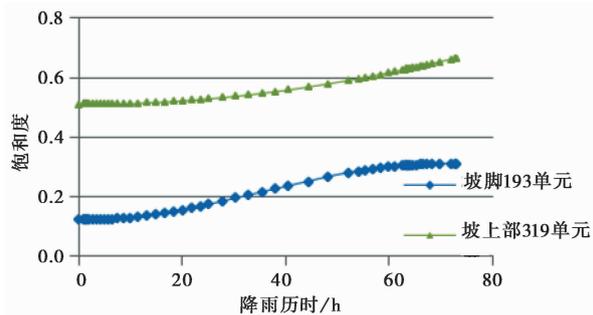


图 16 不同位置降雨-饱和度关系

Fig. 16 Rainfall-saturation curve at key position

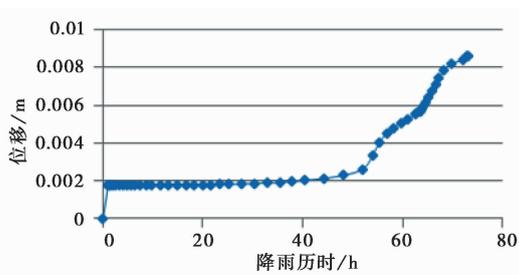


图 17 坡脚位移-降雨时间曲线

Fig. 17 Displacement-Rainfall time curve at landslide toe

(2) 天然状态下,上滑体和下滑体强变形区处于基本稳定状态,而在降雨下稳定性系数明显降低,相对降雨前减小 0.1 左右,均处于欠稳定状态。而下滑体整体在天然和降雨工况,都处于稳定状态。

(3) 暴雨会加速其变形滑动。降雨后最大塑性变形区位于滑坡坡度较陡的滑带处。由于降雨滞后效应,位移在降雨 2d 后会明显增加,最大位移位于坡脚水流溢出口。坡体中前部饱和度持续增加,坡体后缘饱和度在降雨 48h 后达到非饱和平衡状态,此时,滑坡强变形区会产生较大变形。因此,适宜进行排水处理,并结合前缘支挡进行综合治理。

## 参 考 文 献

- [1] 唐辉明. 工程地质学基础[M]. 北京:化学工业出版社, 2007. Tang Huiming. Basis of Engineering Geology. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [2] 王兰生, 张倬元. 斜坡变形破坏的地质力学模式. 水文地质与工程地质论丛(1)[M]. 北京:地质出版社, 1985. Wang Lansheng, Zhang Zhuoyuan. Geomechanical model of the slope deformation and failure. Hydrogeology and Engineering geology Forum(1) Beijing: Geological Publishing House, 1985.
- [3] 蒋征, 张正禄. 滑坡变形的模式识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(2): 127 ~ 132. Jiang Zheng, Zhang Zhenglu. Model recognition of landslide deformation. Geomatics and Information Science of Wuhan University.

- ty, 2002, **27**(2): 127 ~ 132.
- [4] 王明华, 晏鄂川. 水库蓄水对库岸滑坡的影响研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(12): 2722 ~ 2725.  
Wang Minghua, Yan Echuan. Study on influence of reservoir water impounding on reservoir landslide. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(12): 2722 ~ 2725.
- [5] 胡新丽, David M Potts, Lidija Zdravkovic, 王亮清. 三峡水库运行条件下金乐滑坡稳定性评价[J]. 地球科学, 2007, **32**(3): 403 ~ 408.  
Hu Xinli, David M Potts, Lidija Zdravkovic, Wang Liangqing. Jinle landslide stability under water level fluctuation of Three Gorges reservoir. *Earth Science*, 2007, **32**(3): 403 ~ 408.
- [6] 张士林. 大降雨强度下雨水入渗规律研究[J]. 岩土工程技术, 2003, (5): 281 ~ 285.  
Zhang Shilin. The research of infiltrating regulation under rain-storm. *Geotechnical Engineering Technique*, 2003, (5): 281 ~ 285.
- [7] 唐辉明, 章广成. 库水位下降下的边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(增2): 11 ~ 15.  
Tang HM, Zhang GC. 2005. Study on slope stability during reservoir water level falling. *Rock and Soil Mechanics*, **26**(S2): 11 ~ 15.
- [8] 丰光亮, 胡新丽, 吴刚, 等. 鄂西恩施地区非饱和土降雨入渗规律[J]. 地质科技情报, 2010, **29**(5): 112 ~ 116.  
Feng Guangliang, Hu Xinli, Wu Gang, et al. Rainfall infiltration mechanism of unsaturated soil in Enshi of western Hubei province. *Geological Science and Technology Information*, 2010, **29**(5): 112 ~ 116.
- [9] 王协群, 张有祥, 邹维列, 等. 降雨入渗条件下非饱和路堤变形与边坡的稳定数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3640 ~ 3655.  
Wang Xiequn, Zhang Youxiang, Zou Weilie, et al. Numerical simulation for unsaturated road-embankment deformation and slope stability under rainfall infiltration. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(11): 3640 ~ 3655.
- [10] DG 弗雷德隆德, H 拉哈尔佐. 非饱和土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.  
Fredlund DG and Raharjo H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Beijing: Architecture & Buildings Press, 1997.
- [11] 吴宏伟, 陈首义, 庞宇威. 雨水入渗非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, **20**(1): 1 ~ 14.  
Wu Hongwei, Chen Shouyi, Pang Yuwei. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, **20**(1): 1 ~ 14.
- [12] 黄润秋, 戚国庆. 非饱和和渗流基质吸力对边坡稳定性的影响[J]. 工程地质学报, 2002, **10**(4): 343 ~ 348.  
Huang Runqiu, Qi Guoqing. The effect of unsaturated soil suction on stability. *Journal of Engineering Geology*, 2002, **10**(4): 343 ~ 348.
- [13] 田仕明, 董羽蕙. 边坡在降雨条件下的稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2010, **10**(24): 6079 ~ 6083.  
Tian Shiming, Dong Yuhui. Numeric simulation on rainfall infiltration on rock slope. *Science Technology and Engineering*, 2010, **10**(24): 6079 ~ 6083.
- [14] 费康, 张建伟. Abaqus 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.  
Fei Kang, Zhang Jianwei. *Application of Abaqus in Geotechnical Engineering*. Beijing: China Water Power Press, 2010.