

# 水在干将坪滑坡中的作用机理

文宝萍<sup>1</sup>, 申 健<sup>1</sup>, 谭建民<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083;

2. 中国地质调查局宜昌地质矿产研究所, 宜昌 443003)

**摘要:** 干将坪滑坡是三峡水库蓄水后, 库区发生的第一例灾害性滑坡。本文以干将坪滑坡地质结构为基础, 结合滑坡发育特征, 采用敏感性分析方法, 研究了水库蓄水和降雨作用下滑坡稳定性系数随着一系列对水作用敏感的滑坡参数的变化规律, 探讨了水在干将坪滑坡中的定量作用机理。研究结果显示, 水在干将坪滑坡中的作用, 以其对切层段泥岩抗剪强度的弱化作用对滑坡稳定性的影响最为显著, 其余依次为对滑坡施加浮托力、弱化顺层段主滑带抗剪强度和增大滑体容重, 地下水位上升、滑带内孔隙水压力增大对滑坡稳定性的影响微弱。干将坪滑坡的发生是三峡水库蓄水和持续性降雨叠加作用的结果, 但是水库蓄水对滑坡稳定性的影响程度大于降雨, 后者对滑坡的发生可能起了触发因素的作用。

**关键词:** 干将坪滑坡; 水库蓄水; 降雨; 敏感性分析

**中图分类号:** P642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3665(2008)03-0012-07

## 1 引言

2003年7月13日凌晨1时, 位于长江支流青干河左岸的秭归县沙镇溪镇干将坪村突然发生体积近 $2\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 巨型岩质滑坡, 历时5min, 最大水平滑距近200m。滑坡造成14人死亡、10人失踪以及巨大的经济损失和社会影响。由于干将坪滑坡位于三峡库区, 并且滑坡灾害发生时间距三峡水库一期蓄水仅有43天, 并且滑坡发生前2003年6月21日~7月11日, 滑坡区持续降雨量达162.7mm, 所以该滑坡的形成机理受到了国内外许多学者的广泛关注。尽管不同学者对干将坪滑坡的形成机理认识不同, 但是所有学者的共识是水在该滑坡的形成中起了极为重要的作用<sup>[1~11]</sup>。刘才华等<sup>[6]</sup>认为, 滑坡失稳主要与库水对滑带强度的弱化作用有关, 库水位对滑坡稳定性的影响表现为当库水位上升幅度小于15m时, 即库水位小于110m时, 呈现减低趋势, 随后则呈现增大趋势。殷跃平、彭轩明<sup>[8]</sup>认为干将坪滑坡是降雨和水库蓄水联合作用的结果, 但是, 在不考虑滑带强度变化的条件下, 单独考虑降雨和水库蓄水影响时, 降雨的影响程度略大于水库蓄水。肖诗荣等<sup>[9]</sup>在同样未考虑滑带强度变

化的条件下, 认为水库蓄水对滑坡失稳的贡献大于降雨。实际上, 水在滑坡中作用的实质是通过非常复杂的物理、化学、力学过程, 改变滑坡岩土的一系列物理力学参数和滑坡的受力状态, 从而降低滑坡稳定性。众所周知, 滑坡岩土中对水作用敏感的参数和滑坡受力状态主要包括滑体容重、滑带抗剪强度、滑带内孔隙水压力、滑坡内动水压力、滑坡底面浮托力等。分析水对滑坡稳定性的影响时, 忽略其中任何一个参数或受力状态, 都不能全面反映水在滑坡中的作用程度。对于干将坪滑坡而言, 降雨和水库蓄水在滑坡中的作用部位不同, 必然对滑坡岩土参数和滑坡受力状态的影响程度不同。为了系统分析水在干将坪滑坡中的作用机理, 本文以干将坪滑坡的地质结构为基础, 结合滑坡发育特征、降雨与水库蓄水的作用特征、滑坡岩土中对水作用敏感的物理力学参数和水对滑坡受力状态的改变特征, 采用敏感性分析方法, 探讨了水在干将坪滑坡中的作用机理以及大气降水、三峡水库蓄水对滑坡稳定性的影响程度。

## 2 滑坡地质结构及其发育特征

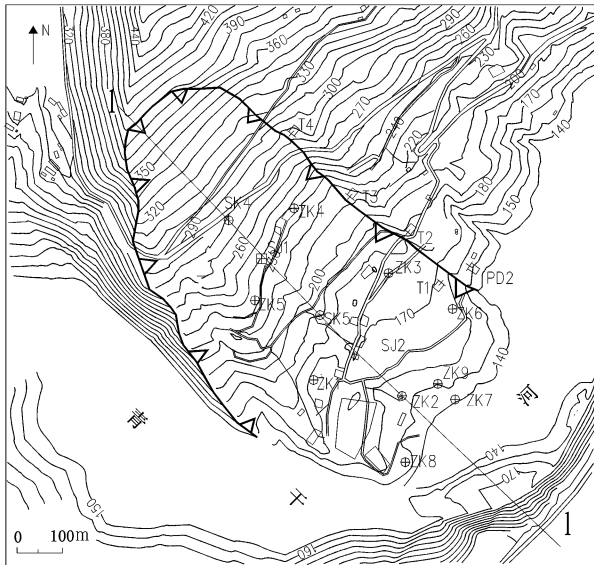
干将坪滑坡后缘顺层, 后壁形成三角形顺层滑壁, 后壁高程近400m。西南侧缘顺沿陡崖山脊发育, 东北侧缘切穿斜坡。滑坡前缘线冲向斜坡对岸, 最大爬高80m。滑坡纵长约1150m, 后部宽200~400m, 前部宽约600m。滑坡平面形态呈簸箕状(图1)。滑坡剪出口位于原青干河漫滩附近, 剪出口高程100~110m(图1、2)。

收稿日期: 2008-02-15; 修订日期: 2008-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(40472135)

作者简介: 文宝萍(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害和岩土体工程地质研究。

E-mail: wenbp@cugb.edu.cn



1—滑坡边界; 2—剖面线及编号; 3—钻孔及编号; 4—竖井及编号; 5—平洞及编号; 6—探槽及编号

图1 千将坪滑坡平面图

Fig.1 Plan of the Qianjiangping landslide

1—滑坡边界; 2—剖面线及编号; 3—钻孔及编号; 4—竖井及编号; 5—平洞及编号; 6—探槽及编号

### 2.1 滑体

滑体由第四系残坡积、崩坡积碎、块石土和侏罗系中—下统聂家山组(J<sub>1-2</sub>n)碎屑岩的碎裂岩体组成。残坡积、崩坡积碎、块石土厚5~15m,由棕黄色粉质粘土夹碎块石组成,碎块石成分以石英砂岩、泥质粉砂岩为主。碎裂岩体厚20~45m,岩性以青灰色石英砂岩、灰绿色泥质粉砂岩及紫红色粉砂质泥岩为主。钻孔及竖井揭露,滑体碎裂岩体岩层层序与周围基岩基本一致,倾向顺坡。现场大重度实验测得滑体天然容重16.05~22.57kN/m<sup>3</sup>,平均为17.58kN/m<sup>3</sup>[1]。

### 2.2 滑带

钻孔、竖井揭露,滑坡滑带由主滑带和2~3层次滑带组成。根据主滑带的物质组成及其发育特征,可将滑坡分为顺层滑动段(简称顺层段)与切层剪出段(简称切层段)两部分(图2)。

顺层滑坡段,主滑带主要顺沿灰黑色炭质页岩的泥化夹层发育,滑面产状135°32~15°,受基岩层面的变倾角产状控制,滑面倾角自滑坡后缘至滑坡中部逐渐变小。滑带厚5~10cm,滑带物质由灰黑色粘土夹灰岩、方解石角砾组成,呈软塑状,其中粘粒含量

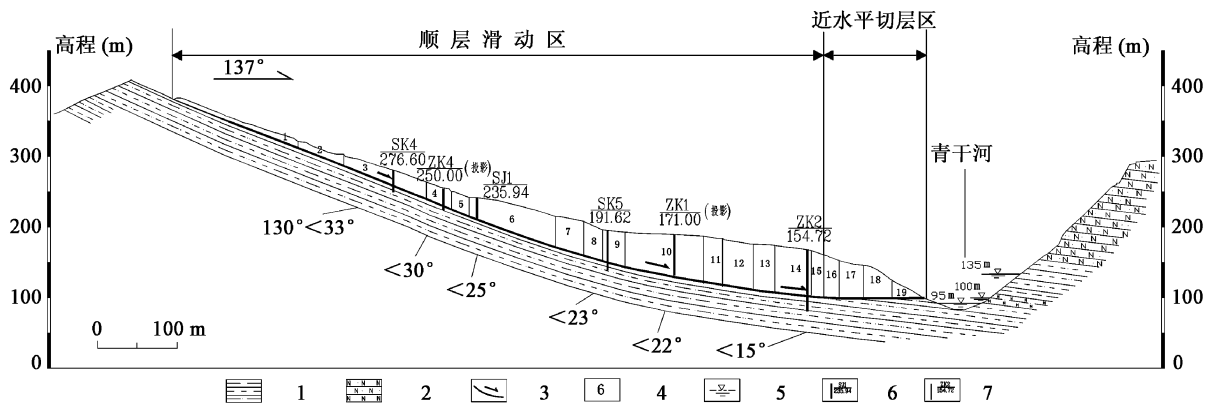


图2 千将坪滑坡纵剖面图

Fig.2 Cross section through the Qianjiangping landslide

1—粉砂质泥岩+泥质粉砂岩; 2—长石石英砂岩; 3—滑动方向; 4—条块编号; 5—水位; 6—竖井及编号; 7—钻孔及编号

22%~39%,角砾含量20%~35%。滑坡后缘出露的滑面上擦痕和滑动镜面非常清晰。

已有研究查明,该段主滑带的成因为滑坡发生前灰黑色页岩层内发育的、并且经历过多次活动的层间错动带[1]。滑坡发生时,滑带的抗剪强度应为层间错动带的残余抗剪强度。

切层剪出段,主滑带在紫红色粉砂质泥岩内切层发育,滑带产状近水平—缓倾坡内,长100~120m。滑带物质由紫红色粘土夹碎石角砾组成。对于该段滑带

的成因,是否为切穿泥岩发育、或是沿泥岩内已经存在的缓倾结构面发育,目前尚无确切证据[1,8],但是,根据滑坡的高速滑动特征判断,该段滑带可能切穿泥岩发育。

X射线衍射分析揭示,千将坪滑坡顺层和切层段主滑带内粘土矿物成分均以伊利石和伊/蒙混层矿物为主,含少量高岭石、绿泥石。但是,滑坡各段主滑带内粘土矿物含量和各类粘土矿物的相对含量则不相同[1]。室内直剪试验测得顺层段灰黑色粘性土滑带和

切层段新鲜泥岩的抗剪强度参数如表1所示。表1中顺层段滑带土抗剪强度指标为原状样室内直剪试验快剪条件下的试验指标,其非饱和状态对应饱和度约75%。泥岩试样微风化,非饱和状态为风干状态,风干状态抗剪强度指标为三轴压缩试验指标,饱和状态抗剪强度指标为饱和直剪试验指标<sup>[1]</sup>。

表1 干将坪滑坡主滑带抗剪强度参数

Table 1 Shear strength parameters of the Qianjiangping landslide's slip zones

滑带	饱和		非饱和	
	内聚力 C(kPa)	内摩擦角 (°)	内聚力 C(kPa)	内摩擦角 (°)
顺层滑动区灰黑色滑带	72.51	13.54	114	16.66
近水平切层段泥岩	112.8	20.8	1500	33.1

### 3 分析方法

为了探讨水在干将坪滑坡中的定量作用程度,本文从滑坡稳定性对单因素敏感性的分析角度,采用GEO-SLOPE软件中的简化Janbu法,计算在水库蓄水和大气降水作用下滑坡稳定性系数随着一系列对水作用敏感的滑带岩土物理力学参数、滑带受力状态的变化特征,通过对比滑坡稳定性系数对单个参数、受力状态的敏感性大小,以及各种条件变化对滑坡稳定性影响程度,初步分析水在滑坡中的作用机理,评价降雨和水库蓄水对滑坡稳定性的影响程度。

用敏感系数<sup>[12]</sup>和影响系数分别表示滑坡稳定性对各个参数和受力状态的敏感性,以及各参数和受力状态对滑坡稳定性的影响程度。敏感系数 $S$ 按下式计算:

$$S = (I_1 / I_2) \times 100\% \quad (1)$$

其中,  $I_1 = |FS| \times 100\% / FS_0$

$$I_2 = |X| \times 100\% / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中:  $I_1$  ——滑坡稳定性系数变化率;

$I_2$  ——滑坡稳定性系数计算参数变化率;

$X$  ——参数 $X$ 的变化量;

$X_{\max}$ 、 $X_{\min}$  ——参数 $X$ 在计算条件下的最大值、最小值;

$FS_0$  ——各参数基准值计算出的稳定性系数基准值;

$FS$  ——对应参数变化量 $X$ 的稳定性系数变化量。

某一计算参数 $X$ 的影响系数 $E$ 定义为:

$$E = FS_{\max,x} \times 100\% / FS_{\max,x} \quad (2)$$

式中:  $FS_{\max,x}$  ——计算参数 $X$ 变化量最大时的滑坡稳定性系数变化量;

$FS_{\min}$  ——所有参数变化量最大条件下,滑坡稳定性系数变化量之和。

#### 3.1 计算剖面

采用滑坡主滑方向的实测剖面1—1,恢复滑坡滑动前原地形,依此为基础确定计算剖面如图2所示。

#### 3.2 计算方案

钻孔勘探揭露,滑体物质结构疏松,渗透性良好。滑面附近,滑床基岩内陡倾—中角度裂隙发育,基岩呈弱风化—微风化状态,裂隙面上常被方解石薄膜覆盖。滑床深部基岩裂隙不发育,基岩多呈微风化—新鲜状态,沿灰黑色炭质页岩发育的粘性土滑带透水性极差<sup>[1]</sup>。因此,假定滑体和靠近滑面附近的滑床基岩透水、滑带隔水。降雨完全渗入滑体,升高滑坡内潜水地下水水位,滑带部位孔隙水压力近似等于地下水水位水头高度产生的静水压力,并且假定降雨前滑坡内地下水水位为零。由于滑坡前降雨持续8天,所以,假定降雨转化的地下水在滑坡内地下水流速度缓慢,因而忽略动水压力的作用。三峡水库蓄水后,库水通过河床渗入滑带附近裂隙发育的滑床基岩,给滑坡施加浮托力,其最大值近似等于水库蓄水前后青干河水位之差。据当地气象资料,2003年6月21日~7月11日期间,滑坡区持续降雨162.7mm。计算时,以此雨量为最大雨量。青干河水位变化区间取蓄水前河水位95m和三峡水库一期水位135m。由于顺层段主滑带沿灰黑色炭质页岩层间错动带发育、切层段主滑带切穿紫红色粉砂质泥岩发育,所以两段主滑带的抗剪强度参数基准值和最小值分别取灰黑色粘性土非饱和状态残余值/饱和状态残余值和紫红色泥岩非饱和状态峰值/饱和状态峰值。

干将坪滑坡发生时间与水库蓄水、降雨的先后关系说明,库水作用和降雨均在滑坡内持续作用了一定时间,并且库水在滑坡中的作用时间长于降雨作用时间。为了简化计算,本文假定库水位瞬间到达135m,并以此时的滑坡状态为滑坡稳定性计算的基准状态,计算参数的基准值确定为:降雨量、滑坡内潜水地下水水位、库水浮托力取0值,库水位以上滑体容重取天然容重、库水位以下滑体容重取饱和容重,滑带土抗剪强度参数取非饱和的天然状态值。

根据水库蓄水、降雨后,水与滑坡岩土的相互作用

特征,选取 135m 库水位以上滑体容重、滑坡内地下水位、顺层段主滑带抗剪强度参数、切层段主滑带抗剪强度参数和 135m 库水位以下滑坡段库水浮托力为变化参数,具体制定了 7 个计算方案如表 2 所示。由于水库蓄水后切层段滑带全部位于库水位以下,顺层段滑坡(包括滑体、滑带)大部分位于库水位以上;同时,蓄水后降雨主要影响库水位以上滑坡。所以,计算方案 1~4 相当于近似模拟降雨对滑坡稳定性的改变,方案 5~7 则近似模拟水库蓄水对滑坡稳定性的影响。

表 2 滑坡稳定性计算方案

Table 2 Scenarios designed for landslide stability analysis

计算方案	参数 X	参数 X 变化范围
1	库水位以上滑体容重 X1	17.58 ~ 23.58kN/m <sup>3</sup>
2	顺层段主滑带内聚力 X2	114 ~ 72.51kPa
3	顺层段主滑带内摩擦角 X3	16.66 ~ 13.54°
4	顺层段滑带区地下水位上升 X4	0 ~ 16.3cm
5	切层段主滑带内聚力 X5	1500 ~ 112kPa
6	切层段主滑带内摩擦角 X6	33.1 ~ 20.8°
7	库水浮托力 X7	0 ~ 40m

\* 由于库水浮托力与库水位相关,故表 2 及下文的计算结果中,库水浮托力变化范围直接用库水位增长幅度表示。

### 4 结果分析与讨论

基准状态下滑坡稳定性系数  $F_s = 2.43$ 。在水的作用下,随着滑体容重的增加、滑带各段抗剪强度参数的

降低以及滑坡内地下水位的上升和库水浮托力的增大,滑坡稳定性系数明显降低。但是,滑坡稳定性系数随着这些对水作用敏感参数和受力状态的降低程度却明显不同。正是这些不同反映了滑坡稳定性对各个参数、受力状态的敏感性具有显著区别,同时这些参数变化和受力状态改变对滑坡稳定性的影响程度也各不相同。

#### 4.1 水在滑坡中的定量作用

比较滑坡稳定性系数随各个计算参数的变化特征可以看出(图 3、图 4、表 3),滑坡顺层段内摩擦角与滑坡稳定性系数关系曲线斜率以及增加单位容重后滑坡稳定性系数降低值最大、其次为顺层段内摩擦角、切层段内摩擦角、顺层段内聚力、库水浮托力,切层段内聚力和地下水位在单位与滑坡稳定性系数关系曲线的斜率和单位降低值最小。当库水位在滑坡剪出口高程 100m 以下时,库水浮托力对滑坡稳定性没有明显影响。若仅从计算参数单位变化对滑坡稳定性的改变角度分析,似乎表现为滑坡稳定性对滑体容重的敏感性最高,对切层段内聚力和库水浮托力的敏感性最低。然而,由于滑坡岩土物理力学参数和受力状态对水作用的敏感性不同,即水的作用对各参数和受力状态的改变幅度不同,加之各个参数的量纲不同,所以仅以计算参数与滑坡稳定性系数关系曲线的斜率不能准确反映计算水作用下滑坡稳定性对滑坡参数的敏感性。

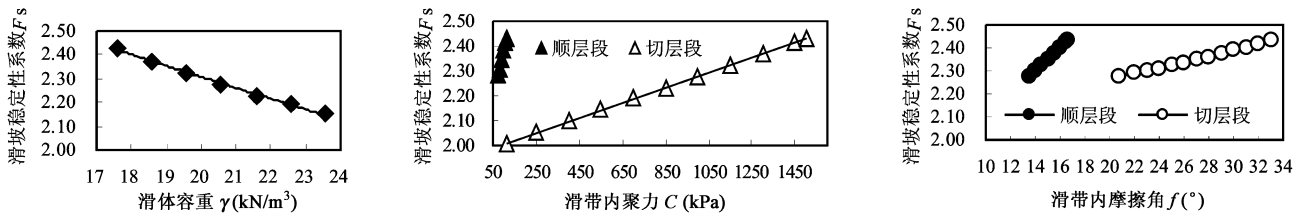


图 3 滑坡稳定性系数随滑体容重、主滑带内聚力和内摩擦角变化曲线

Fig. 3 Correlation among the landslide's factor of safety, unit of weight of the landslide materials, and cohesion and internal friction angle of the landslide's main slip zone

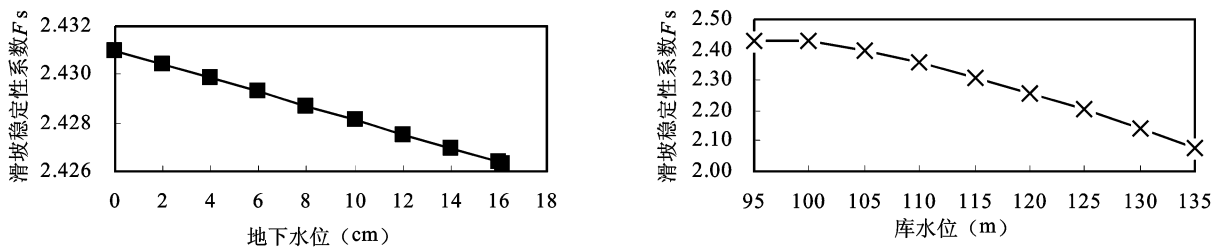


图 4 滑坡稳定性系数与地下水位、库水浮托力(以库水位表示)关系曲线

Fig. 4 Correlation among the landslide's factor of safety, groundwater level above the landslide's main slip zone and uplift water pressure from the reservoir's water level

表3 滑坡稳定性系数随计算参数单位变化量的降低值  
 Table 3 Reduction of the landslide's factor of safety with unit decrease of the landslide's parameters

计算参数	滑坡稳定性系数降低值
滑体容重 (kN/m <sup>3</sup> )	0.046
顺层段内聚力 (kPa)	0.004
顺层段内摩擦角 (°)	0.05
切层段内聚力 (kPa)	3 × 10 <sup>-4</sup>
切层段内摩擦角 (°)	0.01
地下水位 (cm)	2.9 × 10 <sup>-4</sup>
库水浮托力 (m)	0.009

实际上,滑坡稳定性对与水相关的滑坡参数和受力状态的敏感程度取决于滑坡稳定性系数随着这些参数变化率的改变特征。图5显示了滑坡稳定系数变化率与各个计算参数变化率的关系曲线。显然,各曲线斜率即为滑坡稳定性对计算参数的敏感系数。比较滑坡稳定性对各参数的敏感系数,滑坡稳定性对切层段内聚力的敏感系数最高,其次为库水浮托力、滑体容重,对切层段内摩擦和顺层段内聚力、内摩擦角的敏感系数基本相等,但小于前两个参数,对地下水位的敏感性系数最小。当各个计算参数变化量分别达到最大值时,即水的作用程度最大时,滑坡稳定性系数对各自参数的最大变化率也呈现上述规律(图5)。尽管滑坡稳定性系数对顺层段内聚力和内摩擦角各自的敏感系数

小于滑体容重,但是若叠加滑坡稳定性对顺层段抗剪强度强度参数的敏感系数,则滑坡稳定性该段抗剪强度的敏感性高于滑体容重。另一方面,若以本文定义的影响系数衡量水的作用下滑坡岩土物理力学参数和应力状态对滑坡稳定性的影响程度,切层段内聚力对滑坡稳定性的影响系数最大(27.8%),切层段抗剪强度参数(内聚力+内摩擦角)对滑坡稳定性的影响系数38.1%。其次为库水浮托力(23.3%)、顺层段抗剪强度参数(内聚力+内摩擦角)(20.1%)、滑体容重(18.3%),地下水位上升、滑带部位孔隙水压力增高对滑坡稳定性影响程度则非常微弱(0.3%)。据上述结果推断,水在滑坡形成中的作用以其对切层段紫红色泥岩抗剪强度的弱化作用最为明显,尤其切层段泥岩内聚力的急剧减小。其次为库水浮托力作用、顺层段主滑带抗剪强度弱化和增大滑体容重。顺层主滑带和切层段泥岩抗剪强度的降低及库水浮托力的作用,直接导致滑坡抗滑力降低,尤其抗滑段抗滑能力的显著降低,滑体容重则增大滑坡下滑力。综合作用的结果,滑坡稳定性急剧降低,直至滑坡发生。根据干将坪滑坡的发育特征,水对切层段泥岩抗剪强度的降低作用,应主要归咎于泥岩饱水后,水对泥岩的软化作用;水对顺层段主滑带抗剪强度的降低主要与非饱和滑带土饱水后基质吸力的降低密切相关。

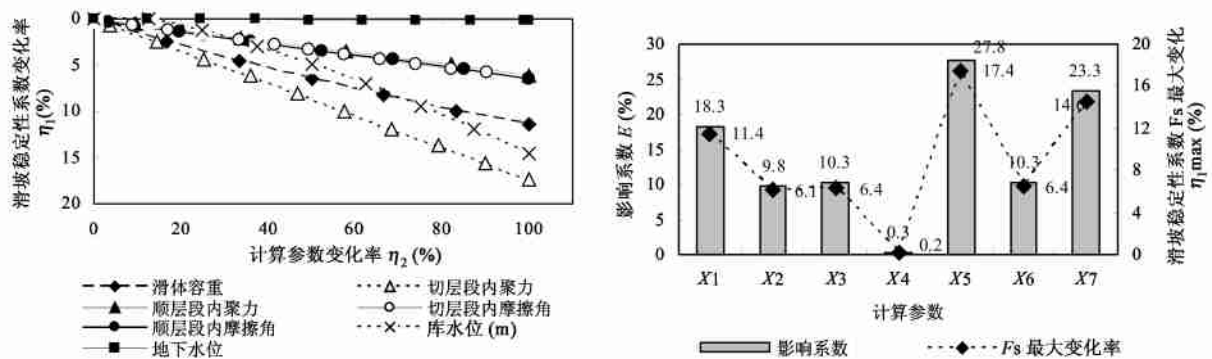


图5 滑坡稳定性系数变化率及其最大变化率、影响系数与计算参数变化率关系曲线

Fig.5 Correlation among the ratio variation of landslide's factors of safety and its maximum value, influence factors of the landslide's parameters

#### 4.2 降雨与水库蓄水对滑坡稳定性的影响程度

如前所述,计算方案1~4、5~7分别近似模拟降雨、水库蓄水对滑坡稳定性的影响。计算结果显示,虽然滑坡稳定性系数随着滑坡容重、地下水位和库水浮托力增大、滑带抗剪强度参数减小,均呈现逐渐降低的变化趋势,但是在每一个参数和应力状态的分别改变

的条件下,滑坡稳定性系数  $F_s$  均大于1,甚至均大于2。当所有参数和应力状态同时改变时,滑坡稳定性系数从基准状态的2.43降至0.95。滑坡形成的真实情况也是各个参数和受力状态在滑坡中同时改变,并非单独变化。显然,干将坪滑坡的形成是降雨、水库蓄水叠加作用的结果。但是,对降雨敏感的滑体容重、顺层

段滑带抗剪强度参数和滑坡内地下水位对滑坡稳定性的影响系数之和 38.7%,对库水作用敏感的库水浮托力、切层段滑带抗剪强度参数对滑坡稳定性的影响系数之和 61.3%,说明水库蓄水对滑坡稳定性的影响程度明显大于降雨。降雨对该滑坡的发生应该起着触发因素的作用。

水在滑坡中的作用涉及非常复杂的物理、化学和力学过程,结果导致滑坡岩土中对水作用敏感的物理力学参数和受力状态同时改变。因此,滑坡稳定性是多个参数的函数,而各个参数和受状力状态的变化又是时间的动态函数。水库蓄水后青干河水位从 95m 抬高到 135m 并非瞬间完成,而是经历一段时间的动态过程。为了简化计算,本文忽略了滑带抗剪强度参数和库水浮托力在水位抬高过程中的动态变化,与实际有一定出入。本文从单因素敏感性角度所作的分析只是对水在滑坡中的作用程度和水库蓄水、降雨对滑坡稳定性的影响程度的初步探讨。对于水在滑坡中作用机理的全面评价,尚需要从多因素敏感性和因素变化的动态过程等方面进行深入的系统分析。

## 5 结论

(1) 水在干将坪滑坡中的作用机理与水对滑坡岩土物理力学参数和受力状态的改变密切相关。但是,由于滑坡稳定性对各个参数和受力状态的敏感性则有明显区别。

(2) 滑坡稳定性对切层段泥岩抗剪强度参数的敏感性最高,其次为库水浮托力、顺层段主滑带抗剪强度参数和滑体容重,对地下水位的敏感性微弱。因此,水在干将坪滑坡的中的作用,以其对切层段泥岩抗剪强度的弱化作用对滑坡稳定性的影响最为显著,其余依次为对滑坡施加浮托力、弱化顺层段主滑带抗剪强度和增大滑体容重。

(3) 干将坪滑坡的形成是水库蓄水与降雨叠加作用的结果。但是,水库蓄水对滑坡稳定性的影响程度

大于降雨,其中降雨对滑坡的发生起着触发因素的作用。

## 参考文献:

- [1] 文宝萍. 干将坪滑坡滑带与滑坡牵引区软弱带发育特征及其变化规律综合研究[R]. 北京:中国地质大学,2007.
- [2] 廖秋林,李 晓,李守定,等. 三峡库区干将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(17):3146-3153.
- [3] 王治华,杨日红. 三峡水库区干将坪滑坡活动性质及运动特征[J]. 中国地质灾害预防防治学报,2005,16(3):5-11.
- [4] 杨为民,吴树仁,石菊松,等. 湖北秭归干将坪研制滑坡形成机理分析[J]. 煤炭工程,2006(4):57-59.
- [5] 张业明,刘广润,常宏,等. 三峡库区干将坪滑坡构造解析及启示[J]. 人民长江,2004,52(9):24-26.
- [6] 刘才华,陈从新,冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. 岩土力学,2005,26(5):668-703.
- [7] 李会中,潘玉珍,王团乐. 三峡库区干将坪滑坡成因与机制分析[J]. 人民长江,2006,37(7):12-20.
- [8] 殷跃平,彭轩明. 三峡库区干将坪滑坡失稳探讨[J]. 水文地质工程地质,2007,34(3):51-54.
- [9] 肖诗荣,刘德富,胡志宇. 三峡库区干将坪滑坡地质力学模型研究[J]. 岩土力学,2007,28(7):1459-1464.
- [10] Wang Fa-Wu, Zhang Ye-Ming, Huo Zhi-Tao, et al. The July 14, 2003 Qianjiangping landslide, Three Gorges Reservoir, China [J]. Landslides, 2004, 1(2):157-162.
- [11] Dai F C, Deng J H, Tham L G, et al. A large landslide in Zigui County, Three Gorges area [J]. Canadian Geotech. J. 2004, 41(6):1233-1240.
- [12] 徐卫亚. 边坡与滑坡环境岩石力学与工程研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,2001:193-199.

## The influence of water on the occurrence of Qianjiangping landslide

WEN Bao-ping<sup>1</sup>, SHEN Jian<sup>1</sup>, TAN Jian-min<sup>2</sup>

(1. *Chian University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;*

2. *Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Yichang 443003, China)*

**Abstract:** Qianjiangping landslide was the first catastrophic landslide occurred in the reservoir area of the Three Gorges dam after its impoundment. Following analyzing characteristics of the landslide, variation of its factor of safety ( $F_s$ ) under the influence of both rise of reservoir water level and durative rainfall was investigated in this paper using sensitive analysis with a consideration of a series effects of water on the landslide, such as: weakening of shear strength of the landslide's slip zone, increasing unit weight of the landslide materials, imposing a uplift water pressure on the landslide, and rising groundwater table. It was found among these effects, weakening of shear strength of the lower section of the landslide's slip zone, which developed crossing bedding planes of mudstone, had the strongest influence on the landslide's stability, followed by those of uplift water pressure, weakening of shear strength of the slip zone's upper section along the bedding plane of shale, increasing of unit weight of landslide's materials, whereas rising of groundwater table had little influence on the landslide. Results of this study showed that occurrence of Qianjiangping landslide was a consequence of combined influence of impoundment of Three Gorges' dam and durative rainfall. However, it seems that influence of the former was much greater than the latter.

**Key words:** Qianjiangping landslide; rise of reservoir water level; rainfall; sensitive analysis

责任编辑:张明霞

(上接第 11 页)

## Analysis on engineering rupturing possibility of the fault $F_{201}$ and its effects on the Daliushu dams site area of the Yellow River

MA Run-yong, PENG Jian-bing

(*Key Laboratory of Educational Ministry of Western Geology Resource and Geology Engineering, Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China*)

**Abstract:** The Daliushu dam site in the Heishanxia Gorge of the Yellow River is located in the middle of Zhongwei-Tongxin overthrust nappe fracture zone, which is 1.5km apart from the seismogenic fault  $F_{201}$ . In the dams site area, the fracture zone is composed of many faults, and the faults can be divided into main faults and branch faults, which have a close relation with the fault  $F_{201}$ . The results of statistic indicates that the rupturing effects as branch fracture, secondary fracture will be appeared around the 3-5km area apart from seismogenic fault when the Earthquakes with  $M_s \geq 7.0$  happen in the Qinghai-Tibet Plateau and its margins. Since late Pleistocene, the earthquake rupture events have happened along the fault  $F_{201}$  time after time, and the Daliushu dam site is located in the branch fracture zone when the earthquakes with  $M_s \geq 7.0$  happen, so it is possible for the engineering rupturing. Analysis result of 3D finite element indicates that the dislocation ratio of the fault  $F_{93}$ ,  $F_{39}$  and  $F_{40}$  to the fault  $F_{201}$  arrives at 14.38%, 12.0% and 9.8% separately, when the rupturing effects of fault  $F_{201}$  happens.

**Key words:** Daliushu dams site area; overthrust nappe structure zone; section structure

责任编辑:张明霞