



引用格式: 冯文凯, 顿佳伟, 张国强, 等. 库水作用下青杠坪滑坡堆积体变形演化趋势[J]. 科学与技术工程, 2020, 20(27): 11003-11011  
Feng Wenkai, Dun Jiawei, Zhang Guoqiang, et al. Deformation evolution trend of Qinggangping landslide accumulation under the action of reservoir water[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(27): 11003-11011

# 库水作用下青杠坪滑坡堆积体变形演化趋势

冯文凯<sup>1</sup>, 顿佳伟<sup>1</sup>, 张国强<sup>1</sup>, 易小宇<sup>1</sup>, 孟睿<sup>1</sup>, 周强<sup>2</sup>

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;  
2. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 成都 610021)

**摘要** 青杠坪滑坡为一巨型古滑坡, 位于溪洛渡库区金沙江右岸, 距坝址约 15.5 km, 受库水升降作用影响, 滑坡局部于 2014 年 4 月 24 日复活, 复活体方量约  $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 灾害使 137 间房屋及 0.6 km 乡村公路等毁于一旦, 造成约  $500 \times 10^4$  元的直接经济损失。鉴于青杠坪滑坡堆积体方量巨大, 后期库水升降作用下堆积体可能进一步复活, 将对当地居民的生命财产安全造成极大威胁, 因此对该滑坡的变形演化趋势进行研究迫在眉睫, 研究成果可为类似灾害的防治提供参考。为分析库水作用对滑坡堆积体的影响, 以滑坡堆积体上角砾土的现场双环渗透试验和室内干湿循环试验为基础, 运用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟库区水位升降作用下青杠坪滑坡堆积体变形演化趋势, 研究结果显示: 青杠坪滑坡表层堆积体平均渗透系数为  $6.94 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ , 为中-强透水介质; 土体抗剪强度指标与干湿循环次数  $n$  存在一定量化关系, 总体呈线性, 但黏聚力与干湿循环次数略具二次函数关系, 相比内摩擦角降幅大; 库水位稳定于 540、600 m 高程条件下, 坡体整体稳定, 随着干湿循环次数的增加, 坡体堆积体变形裂缝逐渐加大, 稳定性系数不断降低。总体来说, 库水升降循环次数达 35 次时, 滑坡体消落带以上 780~930 m 高程范围及巨型块石上部的堆积体将发生滑动, 青杠坪滑坡将再次复活。

**关键词** 青杠坪滑坡堆积体; 库水升降; 抗剪强度; 演化趋势  
中图分类号 P642.22; 文献标志码 A

## Deformation Evolution Trend of Qinggangping Landslide Accumulation under the Action of Reservoir Water

FENG Wen-kai<sup>1</sup>, DUN Jia-wei<sup>1</sup>, ZHANG Guo-qiang<sup>1</sup>, YI Xiao-yu<sup>1</sup>, MENG Rui<sup>1</sup>, ZHOU Qiang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China; 2. China Electric Power Engineering Consulting Group Southwest Electric Power Design Institute, Chengdu 610021, China)

**[Abstract]** The Qinggangping Landslide is a large ancient landslide. It is located on the right bank of Jinsha River in Xiluodu Reservoir, 15.5 km away from the dam. It was affected by the up-and-down of reservoir water, and the landslide was partially revived on April 24, 2014 due to the influence of the reservoir water. The volume of the reactivated body was approximately 3 million m<sup>3</sup>, which destroyed 137 houses and 0.6 km of rural roads, causing direct economic losses of about 5 million Chinese Yuan. The huge volume of the landslide posed a great geohazard to the lives and property of local residents under the influence of reservoir water lifting in the future. Therefore, to analyze the influence of reservoir water on landslide deposits, on-site double-ring penetration test and dry-wet cycle test of broiled soil on landslide accumulation were conducted, and the deformation of Qinggangping Landslide deposit under the water level lifting and lowering of reservoir area was simulated using FLAC<sup>3D</sup> software. The evolutionary trend was revealed. Results show that the average permeability coefficient of the surface layer of the landslide is  $6.94 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ , indicative of a medium-strong permeable medium. The soil shear strength index and the number of dry-wet cycles is found interrelated and the relation can be regressed, and the internal friction angle can be calculated. If the reservoir water level stays at 540 m and 600 m elevation, the slope body will be stable overall. With the increase of the number of dry-wet cycles, the deformation of the slope body can gradually increase, and the stability coefficient decrease continuously. Therefore, when the number of up-and-down cycles of the reservoir water reaches 35 times, the 780~930 m elevation range above the landslide body and the upper part of the large-sized rocks may slide, and the Qinggangping Landslide can be triggered again.

**[Key words]** Qinggangping landslide accumulation; reservoir water lift; shear strength; evolutionary trend

收稿日期: 2019-11-26; 修订日期: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(41977252); 四川省青年科技创新研究团队专项计划(2017TD0018); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主探索课题(SKLP2016Z001); 交通运输部交通运输行业重点科技项目(2018-ZD5-029)

第一作者: 冯文凯(1974—)男, 汉族, 河南新乡人, 教授, 博士研究生导师。研究方向: 区域稳定、岩体稳定及地质灾害评价与防治。E-mail: fengwenkai@cdu.cn

溪洛渡水库位于高山峡谷地貌区,库区内复杂的地质条件为大型堆积体、碎裂化岩质边坡的形成演化提供了内动力地质条件。溪洛渡库区自2013年下闸蓄水后,库水位在540~600 m反复升降,为古滑坡堆积体的复活提供了外动力地质条件。库水作用对动水压力型滑坡<sup>[1-2]</sup>、浮托减重型滑坡<sup>[3]</sup>、红土型库岸滑坡<sup>[4]</sup>等不同类型滑坡的稳定性造成了一定影响,并且库岸滑坡的危害极其巨大,1961年,湖南省资水拓溪水库蓄水初期,近坝库区右岸塘岩光村发生高速滑坡,造成重大损失,死亡40人<sup>[5]</sup>;1963年,意大利瓦依昂水库蓄水过程中,大坝上游峡谷左岸山体突然滑下巨型滑坡体,造成近坝下游城镇灾难后果,死亡近3 000人<sup>[6]</sup>;2003年,三峡水库初期蓄水后1年,库区秭归县沙镇溪镇千将坪村二组和四组 $1\ 500 \times 10^4\ \text{m}^3$ 山体突然下滑,造成14人死亡,10人失踪,经济损失惨重<sup>[7]</sup>。国内外典型库岸滑坡案例表明,库岸滑坡破坏力大,影响范围广泛,特别是在水库蓄水后,在库水位升降作用下更容易发生此类地质灾害。

水库蓄水运行中,库水位变幅区的岩土体将受到“饱水-风干”循环作用,使库岸坡体稳定性不断降低<sup>[8]</sup>,其影响备受专家学者关注,研究并取得了一些相关成果。董金玉等<sup>[9]</sup>对于某水电站库区一大型堆积体边坡,通过现场原位实验获取岩土体力学参数,利用FLAC<sup>3D</sup>模拟蓄水和水位下降过程位移变化,对边坡变形破坏特征进行了预测分析;鲁涛<sup>[10]</sup>以白水河滑坡为例,通过水-岩试验获取坡体在库水压力作用下的力学参数,利用FLAC<sup>3D</sup>模拟分析了滑坡在库水循环长期作用下的破坏过程以及后期演化趋势;朱少帅<sup>[11]</sup>以黄河上游某电站坝前右岸变形岸坡为研究对象,结合大量监测数据,对岸坡变形的预测预报进行挖掘,利用综合信息预报模型、时序分解法、R/S分析法对岸坡变形的阶段、位移量、发展趋势进行预测预报研究;李鹏岳等<sup>[12]</sup>以瀑布沟水电站库区双家坪滑坡为例,运用GeoStudio软件中的seep模块模拟库水作用下滑坡体地下水变化,计算不同库水位升降速率条件下堆积体滑坡内部渗流场变化并分析其稳定性;张夏冉等<sup>[13]</sup>以万州区下坪滑坡为研究对象,采用极限平衡法与概率分析法,分析库水位从159 m降至145 m阶段该滑坡的稳定性状态;傅鹏辉<sup>[14]</sup>以三峡库区堆积层滑坡为研究对象,利用理论分析、正交试验,通过数值模拟对滑坡渗流场、应力场、位移场及稳定性演化规律进行系统研究,指出坡体渗流场、应力场及稳定性的演化规律。

根据溪洛渡库水升降调度,结合渗透试验、干湿循环试验等,获取相关物理力学参数,并采用FLAC<sup>3D</sup>模拟分析方法,考虑库水高程为540、560 m的稳定水位以及库水在540~600 m高程频繁升降作用下,对青杠坪滑坡体空间变形及稳定性发展演化趋势进行分析,以便为类似滑坡研究及灾害治理提供参考。

## 1 青杠坪滑坡基本特征

青杠坪滑坡位于云南省永善县务基镇白胜村上坝一、二社,金沙江溪洛渡库区右岸,滑坡后缘为白胜村青杠坪平台,在库水位的升降作用下,于2014年4月24日复活。

### 1.1 地貌形态及边界特征

滑坡所在的岸坡向金沙江凸出,平面上呈“撮箕状”,主滑方向 $325^\circ$ ,坡脚为溪洛渡水库库区。滑坡左侧以刘家河沟为界、右侧以廖家河沟为界,边界两侧沟谷深切,排水通畅。水库蓄水前滑坡纵向长2 200 m,宽700 m,中前部坡度 $23^\circ \sim 25^\circ$ ,后缘坡度 $10^\circ \sim 20^\circ$ ,厚度37.73~220.00 m,体积约 $14\ 840 \times 10^4\ \text{m}^3$ ,为一巨型滑坡。蓄水后滑坡中前缘坡体复活,呈“圈椅状”,主滑方向为 $340^\circ$ ,斜长约450 m,横宽约300 m,滑体厚8.5~35 m,体积约 $300 \times 10^4\ \text{m}^3$ ;在复活体后缘右侧形成一弧形陡壁,坡度 $60^\circ \sim 80^\circ$ ,高程780 m,后缘左侧发育弧形拉张裂缝,并形成错坎。中部主要为滑坡堆积物,碎块石凌乱堆积,坡度约 $20^\circ$ 。前缘较陡,坡度 $25^\circ \sim 30^\circ$ ,局部稍缓,抵金沙江溪洛渡库区,高程约580 m,复活体左侧为古滑坡未解体的中倾下游的巨型泥页岩块石(图1),滑坡工程地质平面图如图2所示。

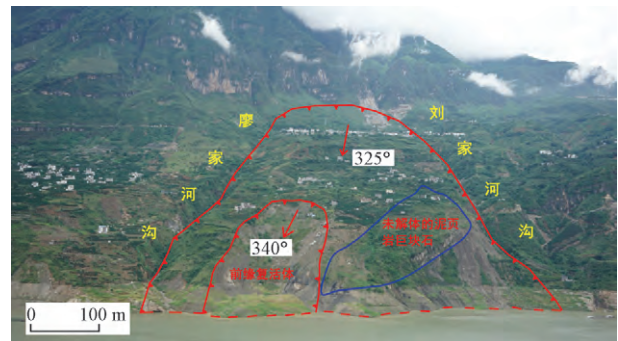


图1 青杠坪滑坡全貌图

Fig. 1 Overview of Qinggangping landslide

### 1.2 斜坡体结构特征

根据勘察成果,古滑坡堆积体由含碎石角砾土组成,碎石岩性为灰岩、泥页岩,其余为粉质黏土充填,厚度5~300 m,呈现前缘薄后缘厚的分布特征。滑坡堆积体后缘分布少量崩坡积碎石层,岩性以灰



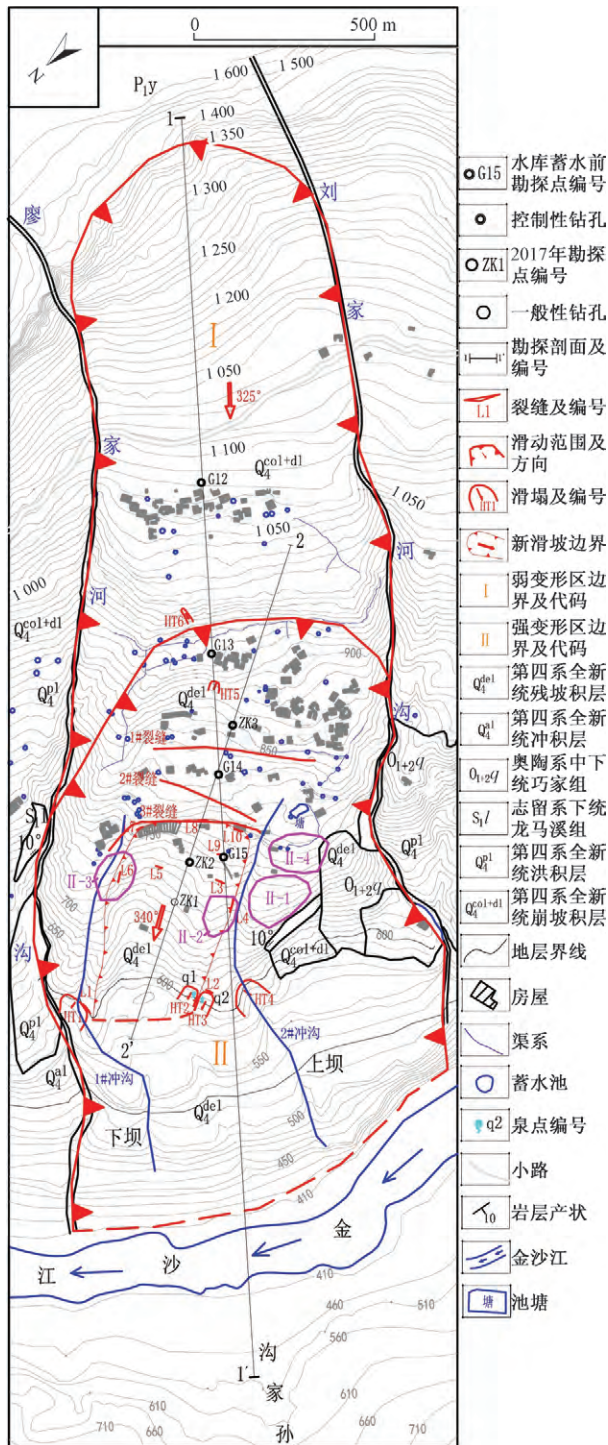


图2 青杠坪滑坡工程地质平面图

Fig. 2 Engineering geological plan of Qinggangping landslide

岩为主,滑坡前缘有部分段为灰岩地层。滑带厚1.10~5.33 m,由志留系(S)泥页岩组成。滑床主要为志留系下统龙马溪组(S<sub>1</sub>l)泥页岩,岩层缓倾坡内,倾向95°,倾角10°~15°(图3)。

库水作用下青杠坪滑坡前缘复活,复活体前缘左侧为层状结构泥页岩块体(假基岩),为滑坡整体滑动后未解体的巨型泥页岩块石,仍保持明显的层

理,岩性与基岩保持一致。复活体控滑结构面主要为土岩接触面,岩性为灰褐色角砾夹粉质黏土,角砾石成分以泥页岩为主,滑带埋深8.6~21.3 m,滑带土厚度0.2~0.3 m。强变形区工程地质剖面见图4。

### 1.3 变形破坏过程特征

青杠坪滑坡变形破坏分为水库蓄水前、水库蓄水后至滑坡复活期间和滑坡复活后3个阶段,不同阶段的变形破坏特征如下。

(1) 最初变形发生在水库蓄水前(2013年5月之前),830 m高程的平台前缘,发育有N40°E方向展布的串珠状陷坑及裂缝,陷坑坑口直径0.5~1.5 m,深0.5~1 m;裂缝宽30~40 cm,深大于1 m,外侧(NW侧)相对有下错现象,下错高度为30~40 cm。680 m高程附近,每逢雨季均会出现一系列相互平行的地面裂缝,展布方向N40°~45°E,一般长数米至十余米,缝宽3~5 cm。

(2) 2013年5月—2014年4月24日,岸坡以变形为主,变形范围主要在坡体上两条小冲沟,高程840 m以下,高程750 m以上裂缝主要分布3条,高程750 m以下裂缝较多,主要集中在4个区域:①2#冲沟左侧高程700~740 m,长约50 m;②2#冲沟右侧高程680~720 m,长约50 m;③1#冲沟两侧高程680~730 m,长约100 m;④2#冲沟至刘家河沟间高程780~750 m处。裂缝及各变形区分布示意图如图5所示。

(3) 2014年4月24日,原青杠坪滑坡堆积体中部产生滑移破坏,复活体后缘高程800~840 m平台前缘水平宽度约50 m处新增多条拉裂缝,间距约10 m,方向平行于河道。裂缝长度多在20~50 m[图6(a)],宽度一般为5~15 cm,局部未贯通。最前缘发育一条长度近200 m、中部贯通性良好的拉张裂缝,其中约20 m长的一段下错50~100 cm[图6(b)],宽度10~30 cm,上下游裂缝宽度5~10 cm,无明显错台。

## 2 岩土体物理力学性质

### 2.1 渗透特性

采用试坑双环注水试验获取了青杠坪滑坡表层堆积体渗透系数。在坡体选取3处试验点,试验结果如表1所示。试坑双环注水试验测得的平均渗透系数 $\bar{K} = 6.94 \times 10^{-2}$  cm/s。

### 2.2 强度特性

获取青杠坪滑坡堆积体角砾土在不同干湿循环次数条件下抗剪强度参数特性,进行密度为1.8 g/cm<sup>3</sup>,干湿循环次数为5、10、15、20次的重塑土快剪试验。试验结果如表2所示。

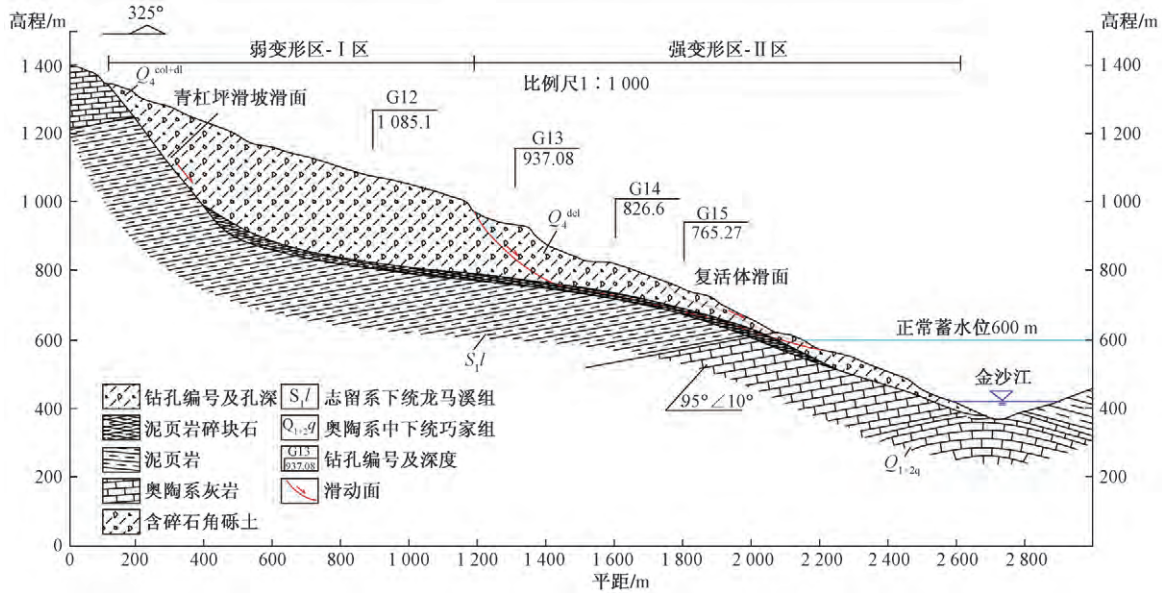


图3 青杠坪滑坡剖面图1-1'  
Fig. 3 The profile map 1-1' of Qinggangping landslide

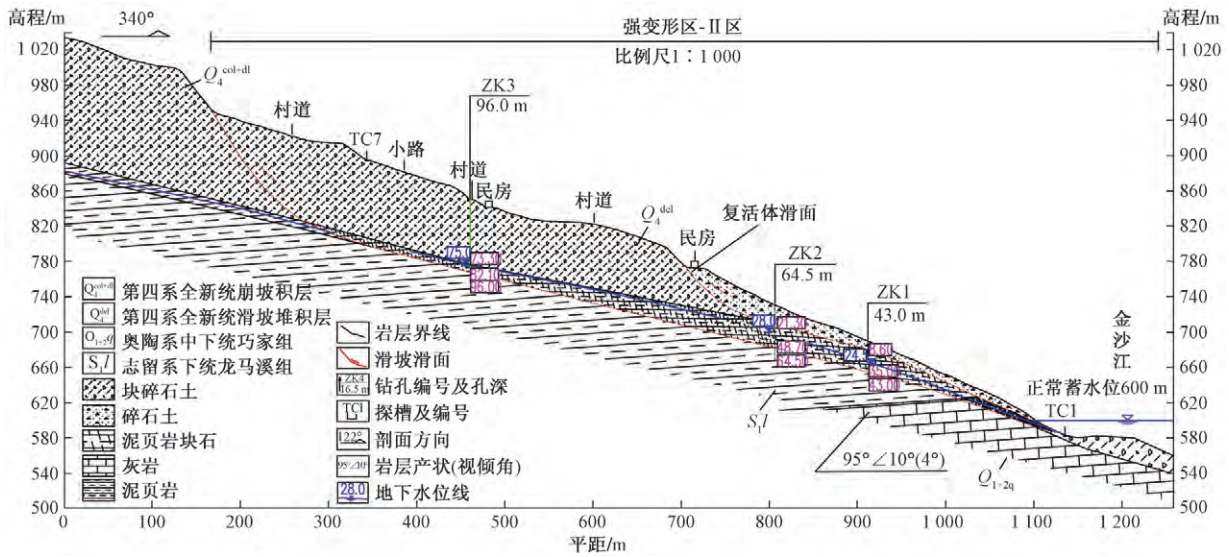


图4 强变形区剖面图2-2'  
Fig. 4 The profile map 2-2' of strong deformation zone

表1 试坑双环渗透试验结果

Table 1 Test pit double loop penetration test results

试验点号	最后一次 渗入流量/mL	渗入深 度/cm	渗透系数/ ( $10^{-2} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	平均渗透系数/ ( $10^{-2} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
ST-01	555	157.2	5.24	
ST-02	605	174.3	5.81	6.94
ST-03	700	292.8	9.76	

从表2中可知,近天然含水率状态下,角砾土抗剪强度指标随着干湿循环次数 $n$ 的增加而降低。在循环次数 $n$ 从0至20的过程中,角砾土黏聚力 $c$ 下降约19.0%,内摩擦角 $\varphi$ 降低约12%。

表2 干湿循环次数与抗剪强度指标关系( $\omega = 20\%$ )

Table 2 The relationship between the number of wet and dry cycles and the shear strength index ( $\omega = 20\%$ )

干湿循环次数	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^\circ$ )
0	26.8	26.9
5	25.9	25.8
10	23.6	25.1
15	22.3	24.3
20	21.7	23.5

对土体抗剪强度指标随干湿循环次数 $n$ 的变化进行线性拟合(图7、图8),得知土体黏聚力 $c$ 与干湿循环次数 $n$ 间具有 $c = 0.00457n^2 - 0.367n +$



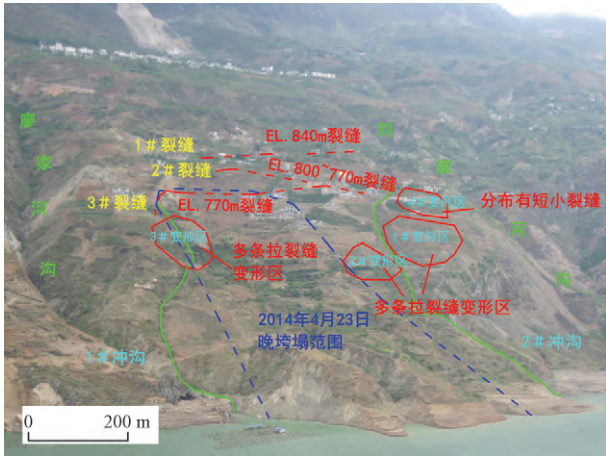


图5 裂缝及各变形区分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cracks and distribution of deformation zones

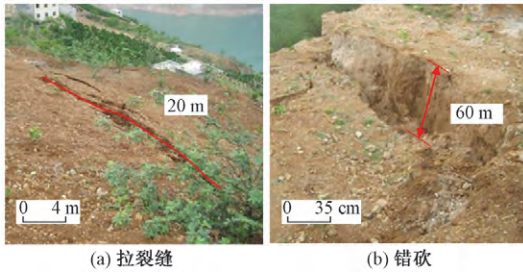


图6 平台最前缘拉裂缝及错砍

Fig. 6 Tension crack and cutting at the front edge of platform

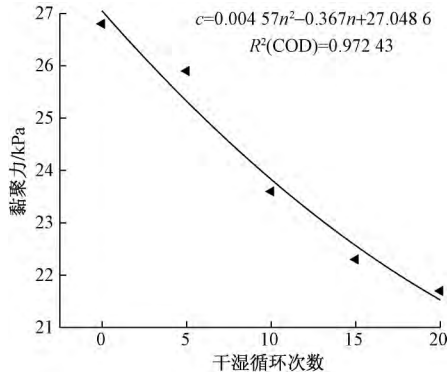


图7 黏聚力与干湿循环次数拟合曲线

Fig. 7 Fitting force and fitting curve of dry and wet cycle times

27.048 6 的关系; 土体内摩擦角  $\varphi$  与干湿循环次数  $n$  间具有  $\varphi = -0.166n + 26.78$  的关系。

### 3 库水作用下滑坡变形演化趋势分析

#### 3.1 模拟方案

根据库区蓄水调节, 从以下 2 个方面对青杠坪滑坡堆积体在 540 ~ 600 m 水位高程下进行模拟。

(1) 对滑坡堆积体在 540、600 m 库水位高程条件下坡体的孔隙水压力、位移场、初始剪应变增量、

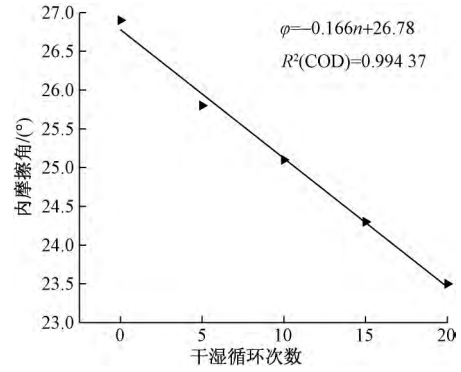


图8 内摩擦角与干湿循环次数拟合曲线

Fig. 8 Fit curve of internal friction angle and dry and wet cycle times

各监测点位移曲线进行分析, 对比不同水位下斜坡体的变形区及位移的大小, 对稳定性进行分析。

(2) 结合室内重塑土体干湿循环强度实验获得的黏聚力  $c$  与内摩擦角  $\varphi$  随干湿循环次数  $n$  的关系, 将其关系曲线引入数值模拟模型中对库水消落带(高程 540 ~ 600 m 水位段)进行折减, 而后模拟不同干湿循环次数条件下斜坡体变形位移及稳定性的变化情况。

#### 3.2 模型建立与参数选取

采用 FLAC<sup>3D</sup> 对该滑坡进行建模, 由于青杠坪滑坡弱变形区变形较小, 因此本次仅对弱变形区前缘(高程为 1 120 m)以下坡体进行建模。本构模型采用取 Mohr-Coulomb (M-C) 理想弹塑性模型, 模型长 1 808.5 m, 宽 1 066.5 m, 高 850 m, 网格划分按照 20 m 长度进行, 共 127 820 个节点, 707 521 个单元, 在模型表面共设置 8 个监测点(图 9)。根据溪洛渡水库库区水位升降特点, 滑坡堆积体在 540、600 m 稳定蓄水位下以及后期库水于 540 ~ 600 m 高程持续作用, 根据上述试验结果及相关工程经验类比, 得出不同水位升降作用次数  $n$  对应的岩体力学参数, 滑坡体物理力学参数如表 3 所示。

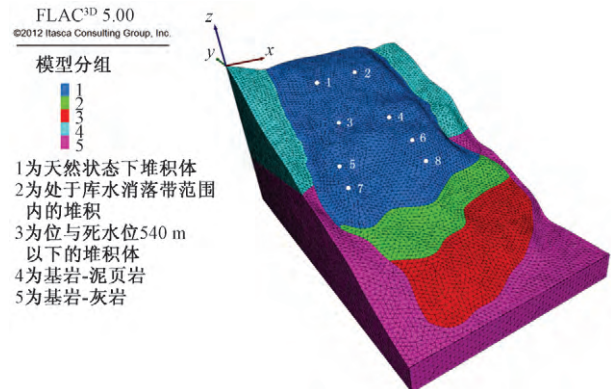


图9 模型及各监测点点位分布图

Fig. 9 Model and point distribution map of each monitoring point

表3 模型参数取值  
Table 3 Model parameter value

土体类型	容重/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )		黏聚力 $c/\text{kPa}$		内摩擦角 $\varphi/(\circ)$		体积模量/	剪切模量/	抗拉强度/
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和	Pa	Pa	Pa
堆积体	1 890	1 960	26.8	16.67	26.9	21.99	$4.6 \times 10^9$	$2.3 \times 10^9$	$5 \times 10^4$
消落带堆积体	1 850	1 890	按照试验拟合公式取值				$1.9 \times 10^9$	$8.9 \times 10^8$	$3 \times 10^4$
泥页岩	2 600	2 620	1 820	1 650	42.4	38	$2.9 \times 10^{10}$	$2.1 \times 10^{10}$	$7 \times 10^6$
灰岩	2 650	2 700	2 000	1 800	45	40	$4.1 \times 10^{10}$	$3.1 \times 10^{10}$	$2 \times 10^7$

### 3.3 模拟结果分析

#### 3.3.1 稳定蓄水位下滑坡稳定性分析

从模拟结果图 10、图 12 中可以看出,无论滑坡的稳定蓄水水位是 540 m 还是 600 m,其位移、剪应变增量主要是在集中在巨型块石所在部位(消落带上部)。

从剪应变增量可以看出(图 12),540 m 水位和 600 m 水位的剪应变增量值较小且差别不大,未见明显突变。堆积体发生失稳的可能性较小。

从位移可以看出(图 11),巨型块石所在部位最大位移分别为 9.09、12.24 cm,在实地调查中发现该区域有多条拉裂缝,宽度一般为 5~15 cm,模拟结果与实际情况较符合。

因此在库水稳定在 540、600 m 库水位的条件下,坡体整体基本处于稳定状态,仅在斜坡体一定部位产生裂缝,裂缝宽度(位移)为 0.1~12.24 cm。

#### 3.3.2 滑坡长期演化规律分析

库区水位升降过程中,消落带在干湿循环作用下的土体力学参数弱化是边坡失稳的重要外在因素,将消落带岩土体强度随水土循环作用次数  $n$  的衰减规律通过 FISH 函数在模拟中体现出来,对堆积体的长期演化规律进行分析。

通过室内土体干湿循环直剪试验所得到的土体黏聚力  $c$  与干湿循环次数  $n$  间具有  $c = 0.00457n^2 - 0.367n + 27.0486$  的关系,土体内摩擦角  $\varphi$  与干湿循环次数  $n$  间具有  $\varphi = -0.166n + 26.78$  的关系,模拟具体思路如图 13 所示,图 13 中变量  $i$  起到循环 FISH 函数的作用。

当干湿循环次数  $n = 5$  时,斜坡体最大位移量达到约 15.1 cm,已复活的滑坡体范围内位移较小,为 0.5~1.5 cm,前缘浸水部位及消落带位移量为 1~3 cm,780~930 m 高程范围位移 1~5 cm(图 14)。

当  $n = 20$  时,斜坡体变形范围稍有扩大,仍包括已复活滑坡体前缘、左侧及后缘 3 个区域,且变形量有明显增加,最大位移量达到约 36.8 cm,前缘浸水部位及消落带位移量达到 4~6 cm,780~930 m 高

程范围位移量为 5~8 cm,已复活滑坡体部位位移量仍较小,为 1~2 cm(图 15)。

$n = 35$  时,斜坡体最大位移量达到了约 90.2 cm,坡体明显达到破坏状态,前缘浸水部位及消落带位移量达到 10.3~20.2 cm,780~930 m 高程范围位移量为 5.3~26.1 cm(图 16)。

采用强度折减法计算得出  $n = 5$ 、 $n = 20$ 、 $n = 35$  时,斜坡体安全系数分别为 1.26、1.13、0.98。

模拟结果可以看出,随着干湿循环次数的增加,斜坡变形量不但增大,稳定性不断降低,当  $n = 35$  时,滑坡体消落带以上 780~930 m 高程范围及巨型块石上部的堆积体将发生滑动,青杠坪滑坡将再次复活。

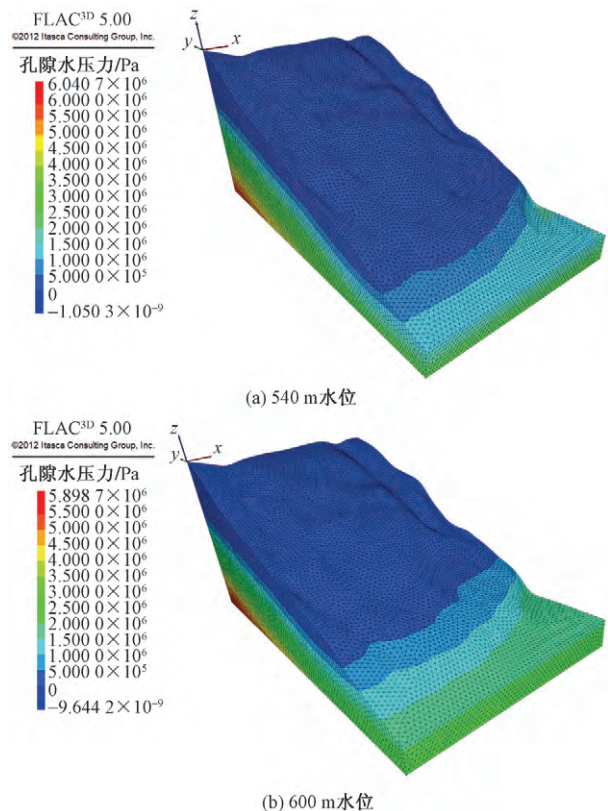


图 10 540、600 m 水位岸坡孔隙水压力分布  
Fig. 10 Pore water pressure distribution of 540 m, 600 m water level bank slope



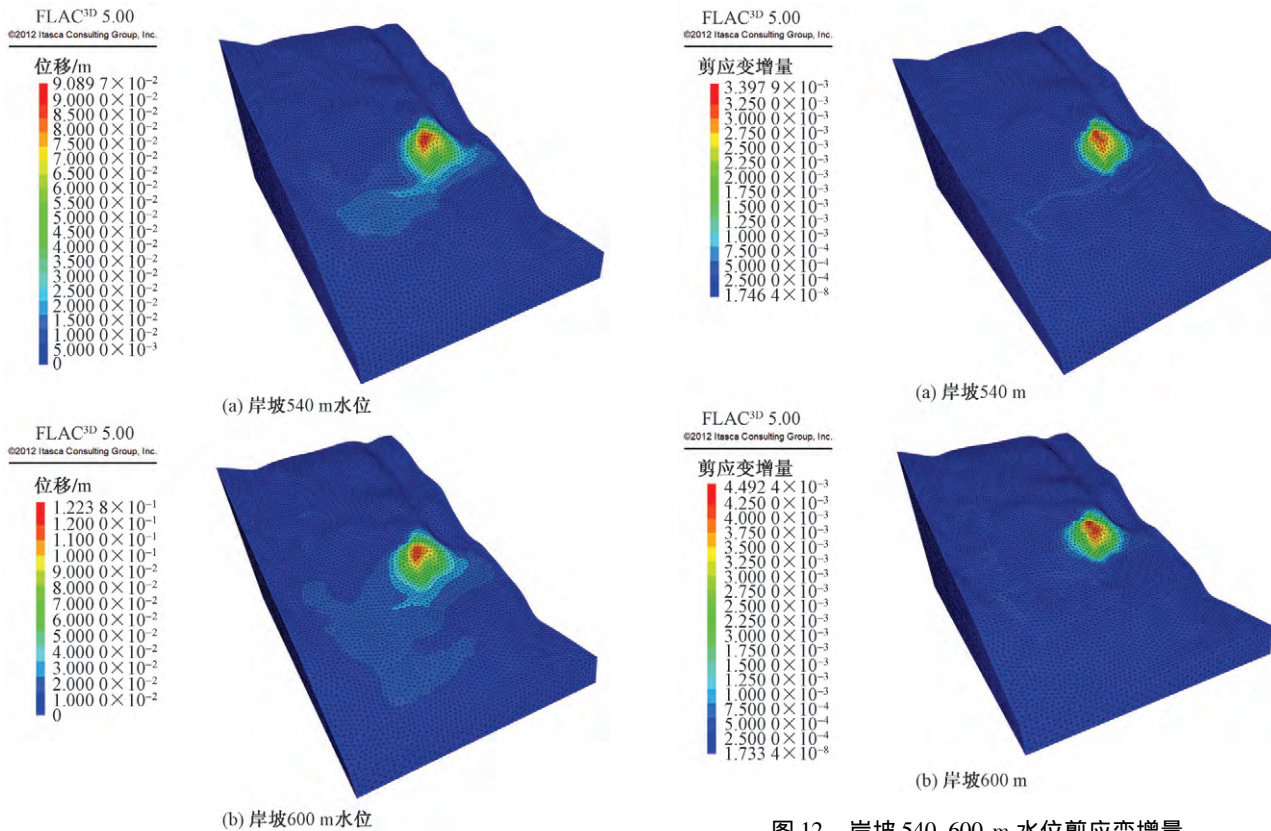


图 11 岸坡 540、600 m 水位位移

Fig. 11 540 m 600 m water level displacement of bank slope

图 12 岸坡 540、600 m 水位剪应变增量

Fig. 12 Shear strain increment of 540 m , 600 m water level on bank slope

### 4 结论

在室内试验的基础上,运用 FLAC<sup>3D</sup> 技术分析了青杠坪滑坡堆积体演化趋势,得到如下结论。

(1) 青杠坪滑坡在水库蓄水前,整体处于基本稳定状态,水库蓄水后至 2014 年 4 月之前,斜坡堆积体局部发生变形,岸坡以形变为主,2014 年 4 月 24 日,滑坡堆积体局部发生滑动,中部产生滑移破坏,复活体后缘高程约 780 m,前缘高程在 540 m 库水位以下,剪出口高程约 460 m,复活体后缘右侧出现较多的裂缝。强变形区范围为青杠坪滑坡中部陡坎坡脚(高程 940 m)以下区域,陡坎以上至青杠坪滑坡后缘即为弱变形区,随着时间的推移,强变形区有逐渐向陡坎上部转移的趋势。

(2) 室内外岩土体物理力学性质试验显示:  
 ①青杠坪滑坡表层堆积体平均渗透系数为  $6.94 \times 10^{-2}$  cm/s,为中-强透水介质;  
 ②库水升降作用对矿物成分的影响有限;  
 ③土体抗剪强度指标与干湿循环次数  $n$  的关系:黏聚力  $c = 0.00457n^2 - 0.367n + 27.0486$ ,内摩擦角  $\varphi = -0.166n + 26.78$ 。

(3) 库水位稳定于 540、600 m 条件下,坡体整体稳定,仅消落带上方巨型块石上部产生拉张裂缝,裂缝宽度(位移量)为 0.1 ~ 12.24 cm。随着干

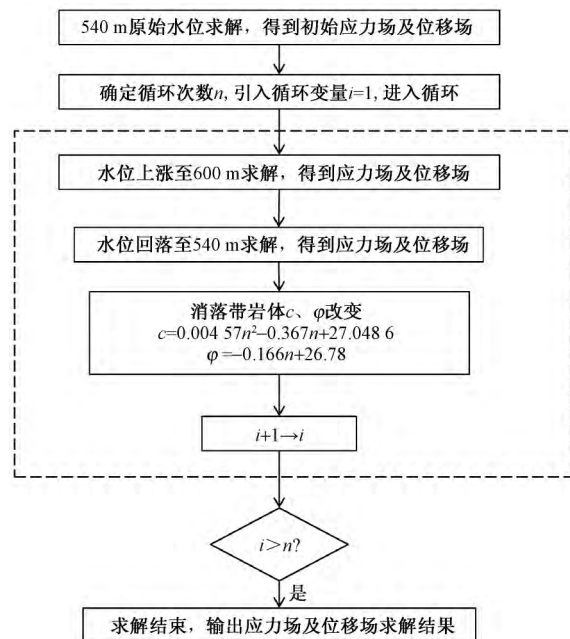


图 13 FLAC<sup>3D</sup> 分析流程图

Fig. 13 FLAC<sup>3D</sup> analysis flow chart

湿循环次数的增加,坡体堆积体变形裂缝逐渐加大,稳定性系数不断降低,当  $n = 35$  时,消落带以上 780 ~ 930 m 高程范围及巨型块石上部位移集中部位的堆积体将发生滑动,青杠坪滑坡将再次复活。

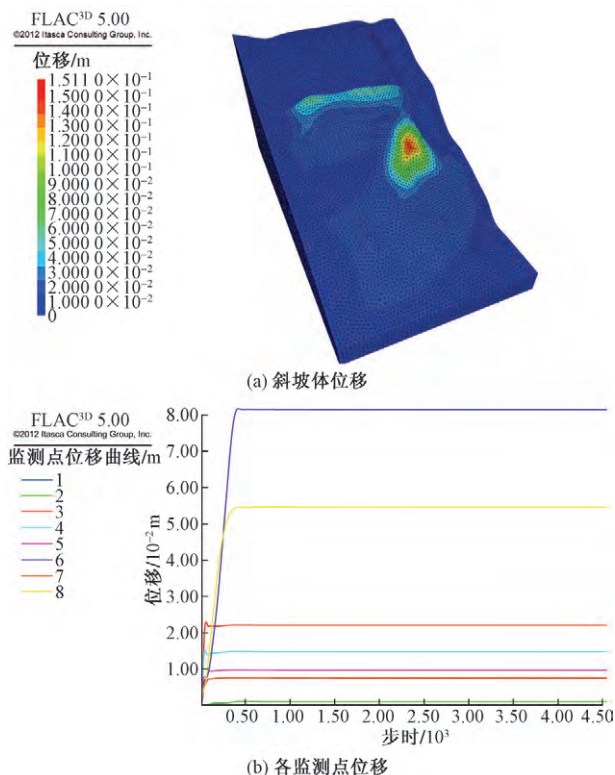


图 14 干湿循环次数  $n = 5$  时斜坡体位及各监测点位移曲线  
Fig. 14 Displacement diagram of slope and curve of each monitoring point when the number of dry and wet cycles  $n = 5$

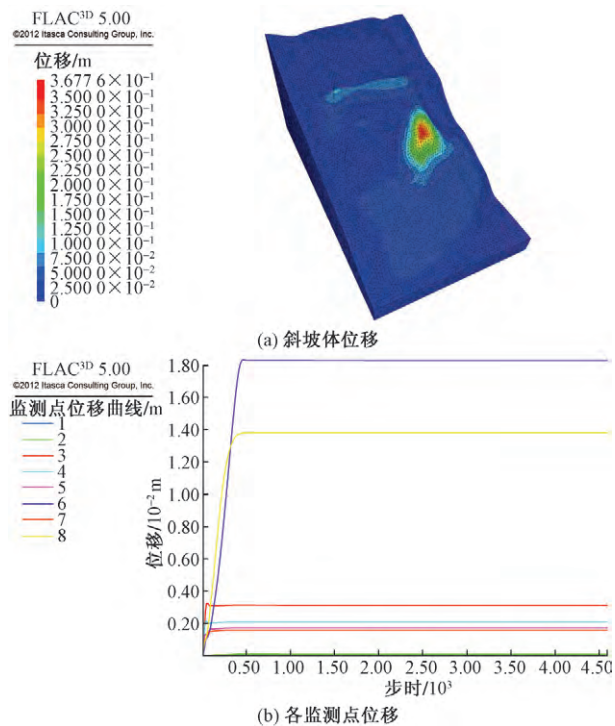


图 15 干湿循环次数  $n = 20$  时斜坡体位及各监测点位移曲线  
Fig. 15 Displacement diagram of slope and curve of each monitoring point when number of dry and wet cycles  $n = 20$

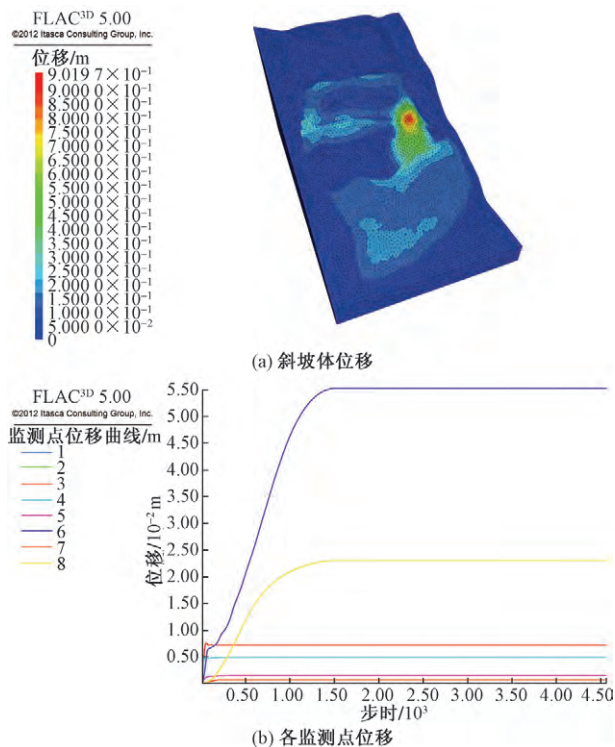


图 16 干湿循环次数  $n = 35$  时斜坡体位及各监测点位移曲线

Fig. 16 Displacement diagram of slope and curve of each monitoring point when number of dry and wet cycles  $n = 35$

### 参考文献

- 李永康, 许强, 董远峰, 等. 库水位升降作用对动水压力型滑坡的影响——以三峡库区白家包滑坡为例[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(18): 18-24.  
Li Yongkang, Xu Qiang, Dong Yuanfeng, et al. Effects of reservoir water level rise and fall on hydrodynamic pressure landslides: taking Baijiabao landslide in Three Gorges Reservoir as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(18): 18-24.
- 王力, 王世梅. 库水位骤降条件下动水压力型滑坡稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(12): 117-120.  
Wang Li, Wang Shimei. Stability analysis of hydro-hydraulic landslides under conditions of reservoir water level drooping[J]. Water Power Energy Science, 2018, 36(12): 117-120.
- 史丁康, 许万忠, 熊茹雪, 等. 基于库水作用分区的浮托减重型滑坡稳定性分析[J]. 水力发电, 2019, 45(11): 28-33.  
Shi Dingkang, Xu Wanzhong, Xiong Ruxue, et al. Stability analysis of floating support decreasing landslides based on water reservoir zones[J]. Hydroelectric Power, 2019, 45(11): 28-33.
- 邱贵. 库水位升降引起的渗流场变化对红土型库岸边坡稳定影响的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.  
Qiu Guangui. Study on the influence of seepage field changes caused by reservoir water level rise and fall on the stability of the laterite reservoir bank slope[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- 杜伯辉. 柘溪水库塘岩光滑坡: 中国典型滑坡[M]. 北京: 科学



- 出版社, 1988: 918-922.
- Du Bohui. Tangyan smooth slope of Zhexi Reservoir: a typical landslide in China[M]. Beijing: Science Press, 1988: 918-922.
- 6 钟立勋. 意大利瓦依昂水库滑坡事件的启示[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994(2): 77-84.
- Zhong Lixun. Enlightenment from the landslide event at Wayan Reservoir, Italy[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994(2): 77-84.
- 7 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(7): 1459-1464.
- Xiao Shirong, Liu Defu, Hu Zhiyu. Study on geomechanical model of Qianjiangping landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(7): 1459-1464.
- 8 代贞伟, 殷跃平, 魏云杰, 等. 三峡库区藕塘滑坡特征、成因及形成机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 145-153.
- Dai Zhenwei, Yin Yueping, Wei Yunjie, et al. Study on the characteristics, genesis and formation mechanism of the Qiantang landslide in the Three Gorges Reservoir area[J]. Hydrogeological Engineering Geology, 2015, 42(6): 145-153.
- 9 董金玉, 杨继红, 孙文怀. 库水位升降作用下大型堆积体边坡变形破坏预测[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1774-1780.
- Dong Jinyu, Yang Jihong, Sun Wenhui. Prediction of deformation and failure of large accumulation slope under the action of reservoir water level rise and fall[J]. Geotechnical Mechanics, 2011, 32(6): 1774-1780.
- 10 鲁涛. 范家坪、白水河滑坡形成机理及后期演化趋势预测[D]. 宜昌: 三峡大学, 2012.
- Lu Tao. Fanjiaping, Baishuihe landslide formation mechanism and later evolution trend prediction[D]. Yichang: Three Gorges University, 2012.
- 11 朱少帅. 基于监测资料的黄河上游某水电站坝前右岸变形岸坡演化趋势研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- Zhu Shaoshuai. Study on evolution trend of deformation bank slope on the right bank of a hydropower station in the upper Yellow River based on monitoring data[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- 12 李鹏岳, 巴仁基, 倪化勇, 等. 库水位升降速率对雅安双家坪堆积体滑坡稳定性影响模拟分析[J]. 地质力学学报, 2017, 23(2): 288-295.
- Li Pengyue, Ba Renji, Ni Huayong, et al. Simulation analysis of the influence of the rise and fall rate of reservoir water level on the stability of Shuangjiaping accumulation landslide[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(2): 288-295.
- 13 张夏冉, 殷坤龙, 李焱, 等. 库水位下降和降雨对重庆万州下坪滑坡稳定性的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(2): 22-29.
- Zhang Xiaran, Yin Kunlong, Li Ye, et al. The influence of reservoir water level drop and rainfall on the stability of Xiaping landslide in Wanzhou, Chongqing[J]. Chinese Journal of Geological Disasters and Prevention, 2017, 28(2): 22-29.
- 14 傅鹏辉. 库水位下降条件下滑坡稳定性及动力增载位移响应规律研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- Fu Penghui. Study on the response law of landslide stability and dynamic load increase displacement under the condition of reservoir water level falling[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.