

三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究

胡修文^{1,2}, 唐辉明², 刘佑荣²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 采用3个小比例尺二维物理模型试验, 对三峡库区赵树岭滑坡在库区蓄水、水位波动、地面荷载和可能的地震荷载作用下的整体稳定性及其可能的变形、破坏机理进行了研究。采用百分表、网格线和数码相机, 对模型的变形和位移进行监测和记录。采用高容重和低容重模型材料, 分别模拟地下水位以上和地下水位以下滑坡岩体; 根据渗透理论和相似理论, 解算水位骤降时模型条件下的动水压力合力矢量, 采用施加集中力的方法模拟动水压力; 地表建筑荷载采用重晶石-石膏块体模拟; 地震荷载采用使模型倾斜的方法模拟。试验结果表明: 未来三峡水库运营期间, 不论库水位处于175 m或145 m, 还是从175 m骤降至145 m, 建有7层建筑物的该滑坡均整体稳定; 而当地震震级大于某级时, 该滑坡发生整体失稳, 并且库水位从175 m骤降至145 m时, 稳定性最差, 其次是145 m情况下, 175 m库水位时稳定性最好; 如果发生整体滑坡事件, 其滑坡机理为牵引式。

关键词: 岩石力学; 物理模型试验; 相似材料; 荷载模拟; 稳定性; 滑坡机理

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)12-2089-07

PHYSICAL MODEL STUDIES ON STABILITY OF ZHAOSHULING LANDSLIDE IN AREA OF THREE GORGES RESERVOIR

HU Xiu-wen^{1,2}, TANG Hui-ming², LIU You-rong²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Three small-scale 2D physical model experiments were conducted on a model table with the goals of investigating the potential deformation features and failure mechanics of a landslide in the Three Gorges Reservoir under conditions of reservoir impounding, water level fluctuation, building load on the surface of slope and potential seismicity, and evaluating its whole stabilities in the future. Dial gauges, gridding lines and digital camera were used to monitor quantitatively and write down qualitatively the deformations and displacements of the models. High/low unit weight model materials were used to simulate self-weight of sliding mass above groundwater level and sliding mass below groundwater level respectively. According to seepage force theory and similarity laws, the resultant hydrodynamic force was obtained by concentrated loading. The loading owing to the buildings was simulated by some Barite-gypsum blocks placed on the surface of the model. The seismic loading was simulated by raising the inclined plane on which the landslide model was placed. The research results show the slope on which a seven-floor building locates was stable when the water level is 145 m or 175 m, or under a rapid drawdown condition from 175 m to 145 m. While the intensity of earthquake is greater than a certain value, it must be of instability; and its stability must be the worst when the water level in the reservoir drawdown rapidly from 175 m to 145 m; and its stability must be better under condition of the water level 175 m than that of the water level 145 m. If the landslide would happen, the failure mechanism must be pull-type.

收稿日期: 2004-07-13; **修回日期:** 2004-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40202028)

作者简介: 胡修文(1968-), 男, 博士, 2004年于中国地质大学(武汉)地质工程专业获博士学位, 现任讲师, 主要从事岩土工程与工程地质方面的教学与研究工作。E-mail: goodhwx@yahoo.com.cn.

Key words : rock and soil mechanics ; physical model test ; similarity material ; simulation of loads ; stability ; landslide mechanism

1 滑坡地质概况

赵树岭滑坡位于三峡库区巴东县新城址云沱乡。滑坡区地形剖面呈缓坡平台与斜坡相间的折线形,后部及前缘较陡,中部见上、下李家坡和饿肚子坡等 3 个缓坡平台,平均坡度为 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$,缓坡平台之间为陡坡,其坡度大于 35° ,局部甚至更大。赵树岭及邻近地区岩体褶皱轴线近东西向,与斜坡走向一致,斜坡以顺向坡为主。基岩主要为 T_2b 泥质灰岩、泥灰岩及粉砂质泥质、粉砂岩。

滑体平面上呈长方形,中前部大致等宽,EW 宽约 550 m,SN 长 900~950 m,面积约 $50 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。滑体表面总体呈阶梯状,可见 2 级缓坡平台,高程 150 m 以下至长江边为陡坡,坡度 $35^{\circ} \sim 50^{\circ}$; 高程 170~200 m 之间为第 1 级缓坡平台,380~400 m 之间为第 2 级缓坡平台。高程 200~380 m 间坡度较陡,400 m 以上为滑坡后缘陡坡(见图 1)。图 1 中虚线为实际可能的地下水位线。

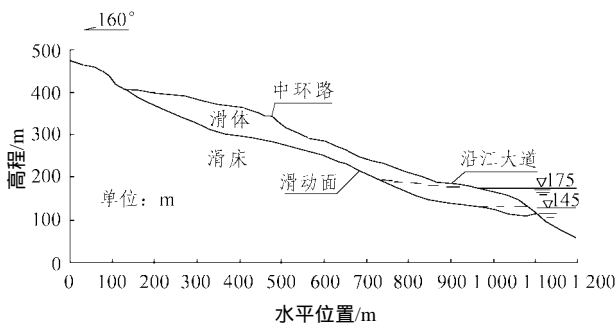


图 1 滑坡概化模型示意图

Fig.1 Sketch of conceptualization model for landslide

滑坡区物质为表层崩滑体层和基岩,崩滑体层主要由块裂、碎裂岩、含泥碎块石及碎块石组成,主要来源于 T_2b^3 ; 基岩以 T_2b^2 紫红色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩为主。崩滑体层最大厚度约 50~65 m。滑坡区 T_2b^3 中可见多层软弱破碎带,这些破碎带不顺层、不连续、厚度变化大,且各层软弱破碎带互不平行,构成了各不同期次滑坡的滑动面(或滑带)。其中,最低一个滑带位于 T_2b^3/T_2b^2 界面附近,其形状与地形起伏基本一致,对滑坡的整体稳定性起着控制作用^[1]。滑坡区地震烈度校核值为 7 度。

研究表明,库区蓄水及其水位的升降变化

是影响库岸滑坡稳定的重要因素^[2~4]。文[1,5]采用工程地质分析法、刚体极限平衡法、有限元法等对该滑坡的稳定性进行了研究。工程地质分析法只能对滑坡的稳定性进行定性评价;刚体极限平衡法过于简化,且不能给出滑坡的变形和位移状态;有限元法能够模拟滑坡的应力-应变状态,但其在模拟所有重要的物理现象时仍有难度,很难描述滑坡大变形特征。而模型试验可同时考虑多种因素及复杂的边界条件,能够直观地模拟岩体的变形、破坏机理^[6~8]。因此,本文采用模型试验研究该滑坡在不同库水位、地面荷载和可能的地震荷载组合作用下的整体稳定性,及其可能的破坏机理,为其稳定性评价和加固治理提供可靠的依据,以避免盲目治理,减少投资。

2 模型设计

2.1 模拟范围及模型概化

选取滑坡主滑方向典型地质剖面进行模拟,模拟范围北至长江中心,南至斜坡后缘上李家坡,SN 长 1 200 m,后缘高程为 475 m。

影响该滑坡稳定性的内在因素包括滑坡区的地质结构、地层岩性、节理裂隙、软弱破碎带和地形地貌等。 T_2b^3/T_2b^2 界面附近的顺层滑动带决定滑坡整体稳定性,必须单独进行模拟。 T_2b^3 中的软弱破碎带对滑坡整体稳定性影响不大,不单独模拟。滑体中近东西向的节理裂隙,在模型砌筑时加以考虑,而其他节理裂隙和破碎带,在岩体模拟材料中通过降低材料的强度和变形模量来加以考虑。考虑到试验条件,其层理构造不单独模拟。表层崩滑体层主要来源于 T_2b^3 ,将其看成 T_2b^3 基岩一起模拟。概化后的滑坡模型如图 1 所示。

2.2 相似条件及物理力学参数

根据试验条件,取几何相似常数为 400,模型长 300 cm,最大高度 118.75 cm,厚度为 20 cm。容重相似系数 $C_\gamma = 1.0$ 。根据相似理论得到模型试验的相似条件为

$$C_{\sigma_c} = C_c = C_E = C_\gamma C_l = 400 \quad (1)$$

$$C_\varepsilon = C_\phi = 1 \quad (2)$$

式中: C_{σ_c} , C_c , C_E , C_γ , C_ε , C_ϕ 和 C_l 分别为抗压强度相似常数、粘聚力相似常数、变形模量相似常数、容重相似常数、应变相似常数、摩擦角相

似常数和几何相似常数。

考虑到降雨的增重作用，水位以上滑体采用饱和容重，水位以下采用浮容重；水位以上滑面摩擦角取大值，水位以下取小值。根据岩体试验研究^[1]及其概化成果^[9]和以上相似条件，得到原型和模型物理力学参数(见表 1)。

2.3 模型材料

由配比试验研究^[9]可知，满足相似条件的岩石相似材料如表 2 所示。采用聚乙烯薄膜和聚四氟乙烯薄膜等材料进行摩擦试验^[9]，得到满足相似条件的滑面相似材料(见表 2)。

2.4 试验模拟方案

2009 年三峡工程建成后，库水位每年 5~6 月降至 145 m，6~9 月维持在 145 m，10 月开始蓄水升高至 175 m，并维持至次年 4 月份^[10]。据此，采用 145 m 库水位模型、175 m 库水位模型和库水位从 175 m 骤降至 145 m 模型 3 个平面应力模型来研究该滑坡体未来的整体稳定性及其可能的滑坡机理。3 个模型的相似条件完全相同，均考虑滑坡体自重荷载、地震荷载、地面建筑荷载和地下水浮托力的影响，不同处在于库水位从 175 m 骤降至 145 m 模型考虑库水位急剧下降时地下水渗透压力的影响。

试验模型地下水位线上下材料不同，如果将地

下水位线按照图 1 模拟成倾斜线，必然人为构造出影响试验模型稳定性的一条软弱面。因此，为了尽可能地降低该软弱面对模型稳定性的不良影响，将地下水位线简化为与库水位线处于同一水平面，即分别与 175 和 145 m 库水位线一致。

为缩短试验周期，将模型加载到开始发生蠕滑时，停止加载，待获得能够初步表征滑坡机理的数据后，再次加载，直至滑坡模型产生滑动破坏。

2.5 荷载模拟

2.5.1 滑坡岩体自重的模拟

考虑到降雨有增加滑坡体重量的作用，因而地下水位以上滑体采用饱和容重。地下水位以下滑体受到地下水浮托力的作用而采用浮容重。模型砌筑完成后滑体自动满足重力梯度的要求。

2.5.2 地震荷载的模拟

假设地震力的方向与滑坡主滑方向一致。采用提升模型架，使模型滑动面倾斜角度增加的方法来模拟地震力^[8]。模型的倾斜角度 α 与地震加速度系数 η 的关系^[8]为 $\alpha = \sin^{-1} \eta$ 。

2.5.3 地下水压力的模拟

浮托力和渗透压力是影响滑坡岩体稳定性的重要因素。地下水位以下滑体受到浮托力的作用而采用浮容重来模拟，模型采用低容重模型材料。地下水位下降对滑体产生的渗透压力属于体力，单位体

表 1 滑坡原型和模型物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of prototype landslide and its models

地层岩性	饱和容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)		饱和单轴抗压强度/MPa		变形模量/MPa		c/kPa		$\varphi/(^\circ)$	
T ₂ b ² 紫红色钙质粉砂质泥岩		25.7~27.1	11.69~23.31	0.029~0.058	5 362.7~7 487.2	13.4~18.7	-	-	-	-
T ₂ b ³ 青灰色泥质灰岩	水位以上	26.6~27.3	33.68~53.55	0.084~0.134	13 693~49 497	34.0~123.7	-	-	-	-
	水位以下	16.6~17.3								
滑带	水位以上	-	-	-	-	-	20~30	0.06~0.08	19	19
	水位以下	-	-	-	-	-			13	13

表 2 模型材料配比及其物理力学参数

Table 2 Components of model materials and its physical-mechanical parameters

模型 部位	材料组成及质量配合比						容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度/ MPa	变形模量/ MPa	抗剪强度指标	
										c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
滑床	m(重晶石粉)	m(细砂)	m(碳酸锰)=60 1 2.5, 机油 9%				27.36	0.062	55	-	-
滑体	水位以上	m(重晶石粉)	m(细砂)	m(碳酸锰)=100 1 2.5, 机油 10%, 水 1%			27.60	0.145	74	-	-
	水位以下	m(碳酸锰)	m(细砂)	m(石膏)=1.5 1 0.5, 机油 10%			16.50	0.082	27	-	-
滑动面	水位以上	4 层聚乙烯薄膜					-	-	-	0	19.0
	水位以下	4 层聚乙烯薄膜中间夹两条聚四氟乙烯薄膜					-	-	-	0	12.3

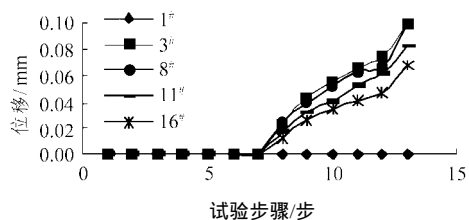


图 3 145 m 模型典型测点部分试验过程位移曲线

Fig.3 Displacement curves of typical monitoring points in 145 m model

175 m 库水位模型典型测点试验过程位移曲线如图 4 所示,在第 16 步以前,各测点在地表建筑荷载和地震作用下,没有发生位移,滑坡模型处于稳定状态;在第 17 步施加地震荷载期间,滑体上测点开始发生变形;在第 17 步以后,停止加载,滑体上各测点位移继续增大,滑体发生蠕变,并且中部 7# 测点首先发生变形。第 16, 17 步时模型倾斜角度分别为 2.89° 和 3.28°。

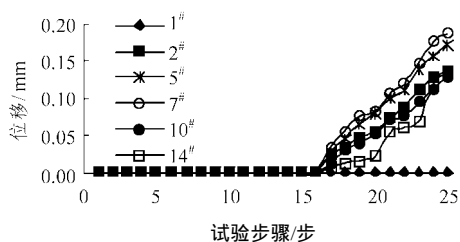


图 4 175 m 模型典型测点部分试验过程位移曲线

Fig.4 Displacement curves of typical monitoring points in 175 m model

库水位从 175 m 骤降至 145 m 模型典型测点试验过程位移曲线如图 5 所示,在第 15 步以前,各测点在地表建筑荷载、动水压力和地震荷载共同作用下,没有发生位移,滑坡模型处于稳定状态;在第 16 步施加地震荷载期间,滑体上测点开始发生变形;第 17~24 步停止加载,各测点位移继续增大,滑体发生蠕变,并且中前部 7# 和 8# 测点首先发生变形。第 15, 16 步时,模型倾斜角度分别为 2.08° 和 2.45°。

4.2.2 滑坡变形机理、破坏特征分析

145 m 库水位模型试验第 9~13 步典型测点时间-位移曲线如图 6 所示:滑体前部 3# 测点和中部 8# 测点位移最大,其次是 11# 测点,后部 14# 和 16# 测点位移最小。典型测点位移速率曲线如图 7 所示:滑体蠕滑启动阶段,中部 8# 测点的位移速率最大,前部 3# 测点次之,后部 14# 测点最小,随后前部测点 3# 最大,中部 8# 测点次之。与试验过程中观察到

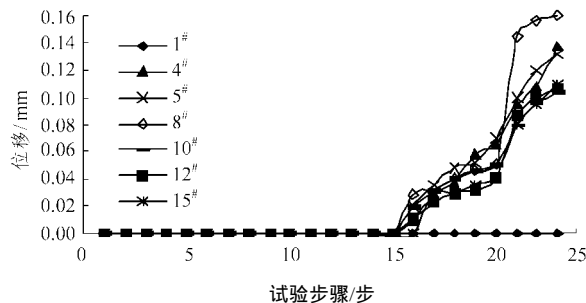


图 5 175-145 m 模型典型测点部分试验过程位移曲线

Fig.5 Displacement curves of typical monitoring points in 175-145m model

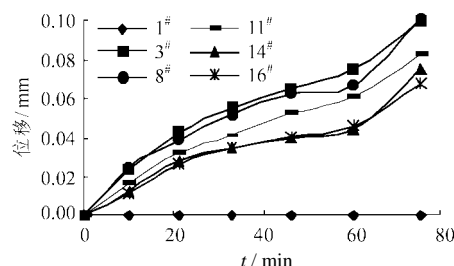


图 6 145 m 模型典型测点时间-位移曲线

Fig.6 Time-displacement curves of typical monitoring points in 145 m model

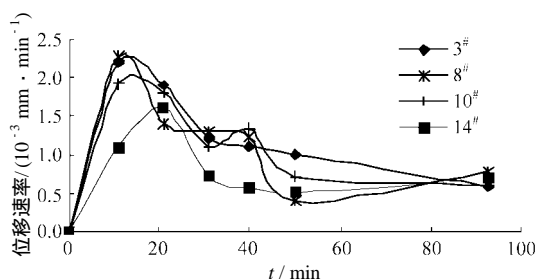


图 7 145 m 模型典型测点初始蠕滑位移速率曲线

Fig.7 Displacement rates curves of typical monitoring points in 145 m model

的滑体中部 8# 和 9# 测点最先发生移动,随后前部 3# 和 4# 等测点开始移动的情况相吻合。

175 m 库水位模型试验第 17~22 步典型测点时间-位移曲线如图 8 所示:中部 7# 测点位移最大,前部 3# 测点次之,后部 14# 测点最小。第 17~30 步典型测点位移速率曲线如图 9 所示:滑体蠕滑启动阶段,中部 7# 测点位移速率最大,前部 3# 次之,后部 14# 测点最小,随后前部 3# 测点基本上始终保持较高的速率水平。与试验过程中观察到的中部 6# 和 7# 测点最先发生移动,随后前部 3# 和 2# 等测点开始移动的情况相吻合。试验观察到滑体前部和中部网格线最先从滑面处错开,而与此同时,滑体后缘

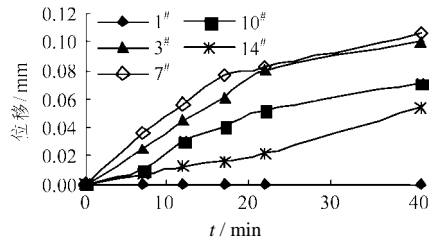


图 8 175 m 模型典型测点时间-位移曲线

Fig.8 Time-displacement curves of typical monitoring points in 175m model

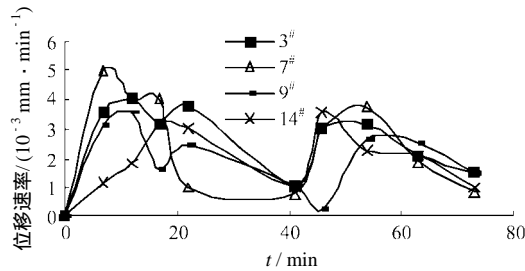


图 9 175 m 模型典型测点位移速率曲线

Fig.9 Displacement rate curves of typical monitoring points in 175 m model

还未出现裂纹,并且滑坡模型剪出口模型材料开始掉块时,仍未见到后缘裂纹出现。

库水位从 175 m 骤降至 145 m 模型试验第 15 ~ 23 步典型测点时间-位移曲线如图 10 所示:滑体蠕滑启动阶段,中前部 7#测点位移最大,前部 5#测点次之,后部 12#测点位移最小;模型滑移启动之后,前部 5#测点和中部 7#测点保持较高的位移水平,3#测点次之,12#测点位移水平最低。第 29 步提升模型后典型测点时间-位移曲线如图 11 和位移速率曲线图 12 所示:随着时间的推移,各部位位移逐渐增加,但位移大小不尽相同,其中前部 7#, 5#和 4#测点处于较高的位移水平,中部 10#测点次之,后部 13#和 16#测点位移最小;滑体各部位测点均处于缓慢加速蠕滑阶段,各部位测点的位移速率总体呈加快趋势,其中,前部 3#测点和中部 9#测点位移速率增加

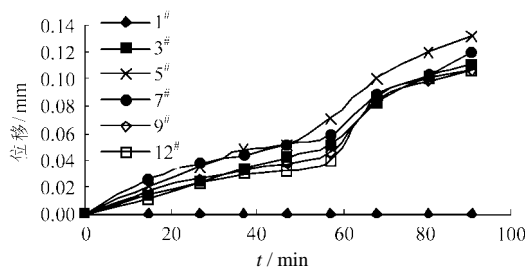


图 10 175-145 m 模型典型测点时间-位移曲线

Fig.10 Time-displacement curves of typical monitoring points in 175-145 m model

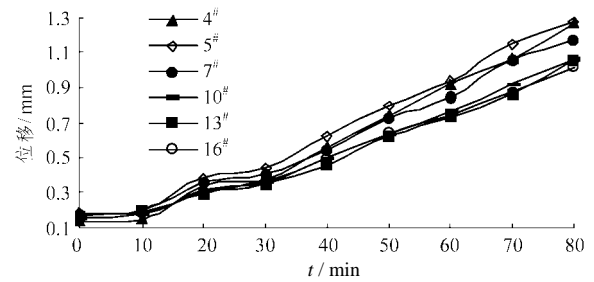


图 11 175-145 m 模型典型测点时间-位移曲线

Fig.11 Time-displacement curves of typical monitoring points in 175-145 m model

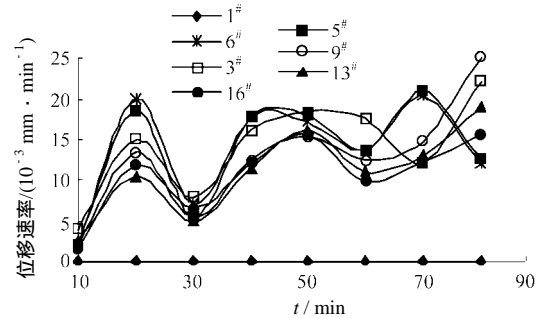


图 12 175-145 m 模型典型测点位移速率曲线

Fig.12 Displacement rate curves of typical monitoring points in 175-145 m model

较显著,中后部 13#和后部 16#测点次之,前部 5#和 6#测点位移速率增加不明显,但前部测点均处于较高的位移速率水平。

以上分析表明,3 个滑坡模型蠕滑变形均始于滑体中部,中部块体的蠕滑给滑体前部块体以推力,并促使其克服剪出口滑动面的反翘阻力而发生蠕滑变形,并进而牵引后部块体发生蠕滑。滑体以张拉破坏为主(图 13),张拉裂隙多数发育于砌块之间,后部张拉裂隙大。



图 13 145 m 滑坡模型破坏影像

Fig.13 Failure image of 145 m landslide model

5 结 论

(1) 模型试验研究表明,当三峡工程库区水位

为 175 或 145 m, 或者库水位从 175 m 骤降至 145 m 时, 建有 7 层楼的滑坡体整体稳定。

(2) 在三峡水库正常运营期间, 当发生地震, 且达到某一地震烈度时, 该滑坡体会发生变形和整体滑坡, 并且库水位从 175 m 骤降至 145 m 时稳定性最差, 其次为 145 m 库水位情况, 而 175 m 库水位时稳定性最好。

(3) 如果该滑坡发生整体失稳破坏, 其机理为蠕滑牵引式。沿江大道至中环路一带中前部区域首先产生蠕变变形和滑移; 斜坡体前部岩土体受到中部岩体蠕滑推力作用, 逐渐克服滑动阻力而发生变形和滑移; 随后中部和前部的蠕滑变形体给后部岩体以拉力, 牵引后部岩体产生蠕滑变形, 并最终产生整体滑坡事件。

(4) 滑坡体内部的破坏以张拉破坏为主, 张拉裂隙大多发育在软弱结构面, 滑体后部出现较大的张拉裂隙。张拉裂隙的走向与斜坡走向一致。

(5) 滑坡模型变形破坏机理表明, 如果要对该滑坡进行加固, 加固措施最佳的布置位置是沿江大道附近, 一方面可以利用加固或抗滑措施防止该斜坡沿江大道至中环路一带中前部岩体的蠕滑, 避免和减小其蠕滑作用对前部岩土体产生推力; 另一方面可以充分利用反翘段提供的抗滑阻力。

参考文献(References):

- [1] 中国地质大学. 三峡库区巴东新县城赵树岭滑坡稳定性预测及防治对策研究[R]. 武汉: 中国地质大学, 2001.(China University of Geosciences. Stability and control measures of Zhaoshuling landslide, Badong County, the Three Gorges Reservoir[R]. Wuhan: China University of Geosciences, 2001.(in Chinese))
- [2] 钟式范, 马水山, 张保军. 隔河岩水利枢纽水库蓄水对岸坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 193–200. (Zhong Shifan, Ma Shuishan, Zhang Baojun. Influence of Geheyan reservoir filling on the stability of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(3): 193–200.(in Chinese))
- [3] 张保军, 李亦明, 马水山. 从隔河岩水利枢纽库岸稳定性监测实施谈长江三峡库岸滑坡安全监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增): 1 658–1 662.(Zhang Baojun, Li Yiming, Ma Shuishan. On safety monitoring of landslides of the Three Gorges reservoir based on stability monitoring practices of landslides of Geheyan reservoir on Qingjiang valley[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.): 1 658–1 662.(in Chinese))
- [4] 邓建辉, 马水山, 张保军, 等. 清江隔河岩水库茅坪滑坡复活机理初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 730–1 737. (Deng Jianhui, Ma Shuishan, Zhang Baojun, et al. Preliminary investigation on the reactivation of Maoping landslide, Geheyan Reservoir, Qingjiang River[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1 730–1 737.(in Chinese))
- [5] 唐辉明, 马淑芝, 刘佑荣, 等. 三峡工程库区巴东县赵树岭滑坡稳定性与防治对策研究[J]. 地球科学, 2002, 27(5): 621–625. (Tang Huiming, Ma Shuzhi, Liu Yourong, et al. Stability and control measures of Zhaoshuling landslide, Badong County, the Three Gorges reservoir[J]. Earth Science, 2002, 27(5): 621–625.(in Chinese))
- [6] 任伟中, 白世伟, 葛修润. 厚覆盖层条件下地下采矿引起的地表变形陷落特征模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1 715–1 719.(Ren Weizhong, Bai Shiwei, Ge Xiurun. Modeling test study on deformation and subsidence of ground surface induced by underground mining with thick overburden[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1 715–1 719.(in Chinese))
- [7] 李天斌. 拱坝坝肩稳定性的地质力学模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 1 670–1 676.(Li Tianbin. Geomechanical modeling study on stability of arch dam shoulder[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 1 670–1 676.(in Chinese))
- [8] 龚召熊, 陈进. 岩石力学模型试验及其在三峡工程中的应用与发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.(Gong Zhaoxiong, Chen jin. Rock Mechanics Model Test, Application, and Development in the Three Gorges Project[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.(in Chinese))
- [9] 胡修文. 三峡工程库区赵树岭滑坡稳定性相似材料模型试验研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国地质大学, 2004.(Hu Xiuwen. Studies on similar material model experiment landslide stability of Zhaoshuling in the Three Gorges Reservoir[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2004.(in Chinese))
- [10] 田一德, 汪小莲. 三峡水库库岸崩滑体处理问题初探[J]. 人民长江, 1999, 30(11): 6–7.(Tian Yide, Wang Xiaolian. On treatment of landslide masses in TGP reservoir bank[J]. Yangtze River, 1999, 30(11): 6–7.(in Chinese))
- [11] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.(Xu Bangdong. Landslide Analysis and Control[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.(in Chinese))