

文章编号: 1000-7598-(2004)11-1837-04

水库库岸滑坡稳定性研究

王志旺^{1,2}, 杨健², 张保军², 马水山²

(1.中国地质大学 研究生院, 湖北 武汉 430074; 2.长江科学院 工程安全与病害防治研究所, 湖北 武汉 430010)

摘要:以清江水库库岸台子上滑坡为例,在滑坡影响因素的敏感性分析的基础上对滑坡成因进行了研究,并从滑坡可靠度计算和深部位移监测成果分析等方面对滑坡稳定性进行了研究,分析认为,滑带抗剪强度参数、地下水位对滑坡稳定安全系数的影响较为敏感;滑坡稳定性可靠度值为1.64;深部位移监测资料有利于对滑坡体稳定性作出比较客观准确的评价。因此,对台子上滑坡进行适当的工程治理是十分必要的。

关键词:水库库岸滑坡;敏感性分析;可靠度;滑坡成因;位移监测

中图分类号: TU 434

文献标识码: A

Study on stability of landside of reservoir area

WANG Zhi-wang^{1,2}, YANG Jian², ZHANG Bao-jun², MA Shui-shan²

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: On the basis of studying the sensitivity and the mechanism of Taizhishang landslide, this article analyzes the displacement monitoring result and the reliability of the landslide to discuss the stability of the landslide. The strength parameter and the underground water level are very sensitive to the safety factor of the landslide. The reliability of the landslide is 1.64. And the safety monitoring result of deep displacement could help us to evaluate the stability of the landslide according to the current situation of the landslide. Based on the above analysis, this article pointed out that it's very necessary to treat the landslide.

Key words: reservoir landslide; sensitivity analysis; reliability; landslide mechanism; displacement monitoring

1 引言

在我国许多大中型水电站施工或运行过程中,水库库岸滑坡稳定性一直是有关各方极为关注的问题^[1-3]。本文以清江水库库区台子上滑坡为例,从敏感性分析、滑坡成因、可靠度计算及现场实测资料等方面对滑坡稳定性进行研究。

2 基本概况

台子上滑坡体位于清江左岸,上距水布垭大坝轴线约为1.3 km,滑坡南北长约为800 m,东西最大宽度约为300 m。滑坡体总面积为0.2 km²。滑坡体一般厚约为35~40 m,滑坡体总方量为780万 m³。该滑坡体是一基岩顺层滑坡(图1),西侧受F₂断层控制,东侧受下伏基岩产状控制,滑床基岩基本上为志留系中统纱帽组下段地层,地层倾向SWW,

倾角为20°~22°,滑床倾向与地层倾向一致。从纵向看,滑床较为平缓,前部至中后部视倾角为15°~18°,后部视倾角为20°~25°;从横向上看,西部略陡,倾角为30°~35°,东部稍缓,倾角为20°~25°。滑床前缘敞开,后部闭合,呈典型圈椅特征^[4]。

2000年8月滑坡体前缘发生了大面积表层崩滑,并伴随局部泥石流。2001年2月下旬在滑坡体前缘开始了滑坡体的整治工作,9月滑坡体前缘的挡土墙浇筑、预应力锚索张拉以及钢筋笼块石护坡等加固工程已基本完成。

3 滑坡影响因素的敏感性分析

进行滑坡影响因素的敏感性分析,不仅有助于了解滑坡稳定性对各种滑坡影响因素的敏感程度,而且还可以分析滑坡的变形机理,为滑坡的工程治理措施提供设计依据。计算分析主要以临时生产

收稿日期: 2003-04-20

修改稿收到日期: 2004-06-16

基金项目: 科技部社会公益研究专项资金面上项目(No.2002DIB10044)。

作者简介: 王志旺,男,1971年生,1995年毕业于中国地质大学(武汉),博士生,高级工程师,主要从事地质灾害监测技术研究工作。

E-mail: wzwhb@263.net

活基地场平台及滑坡治理工程实施前的天然状态为基础, 采用的模型见图 1 所示。安全系数的计算采用萨尔玛法 (SARMA 法)。

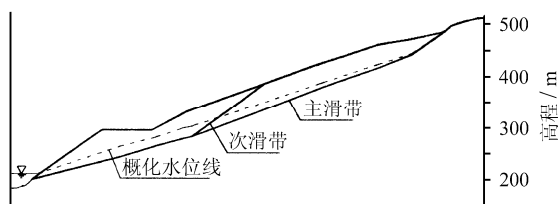


图 1 台子上滑坡概化剖面图

Fig.1 Generalized section of Taizhishang landslide

3.1 滑带抗剪参数的敏感性分析

滑带土的力学参数的敏感性分析结果见图 2。计算结果表明, 滑带土的力学参数对安全系数的影响较为敏感。内摩擦角每增加 1° , 安全系数增加约 0.05, 粘聚力每增加 10 kPa, 安全系数增加 0.03~0.04。

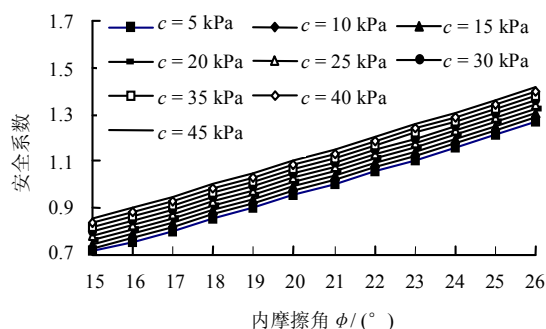


图 2 安全系数-内摩擦角-粘聚力关系图

Fig.2 The curves showing the relations between safety coefficient and inner friction angle with different cohesions

3.2 地下水位敏感性分析

地下水位对安全系数的敏感性分析成果见图 3。计算结果表明, 地下水位对安全系数的影响较为敏感, 当排水疏干程度增加 10% 时, 安全系数提高约 0.018。

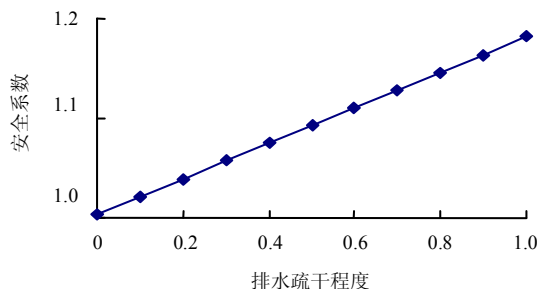


图 3 安全系数-排水疏干程度关系图

Fig.3 Relation between safety coefficient and drainage degree

3.3 江水位的敏感性分析

滑坡在不同江水位条件下的稳定分析计算成果如表 1 所示。

表 1 不同江水位时稳定安全系数表

Table 1 Stability safety coefficients with different river water levels

江水位/m	200	205	210	215	220	225
安全系数	1.020	1.013	1.006	0.999	0.999	0.986

计算结果表明, 江水位对滑坡前缘靠近江水部分的滑坡体影响较大, 在江水位变化范围之内, 当江水位升高 5 m 时, 安全系数提高约 0.007。

4 滑坡成因分析

根据滑坡地质特征以及前面对滑坡影响因素的敏感性分析, 可以对滑坡成因进行初步简要分析。

4.1 滑坡发育的基本条件

(1) 滑坡发育的地层条件——易滑地层

滑坡体基岩为志留系中统纱帽组地层, 纱帽组上段地层较坚硬, 下段地层含页岩、砂质页岩较多, 岩性相对较软, 形成上硬下软的地层组合。在重力荷载作用下, 易沿下部软弱岩层发生剪切破坏而形成滑带。台子上滑坡体的形成发展经历了漫长的演化过程, 在后期则是堆积层沿基岩面进行滑动。这种软硬相间的地层结构是滑坡产生的有利条件。此外, 地层走向 NNW, 倾向 SWW, 倾角为 $20^\circ \sim 22^\circ$, 从南北纵向上看, 岸坡结构为一斜顺向坡, 也有利于滑坡的顺层滑移。

(2) 滑坡发育的地质构造条件

断层、裂隙及其不利组合是滑坡边界形成的重要条件。在滑坡西侧, F_2 断层基本上顺滑体边界延伸, 其延伸长, 破碎带宽, 断距大, 是滑体西部极好的切割面。其次区内较发育的 NW 向节理, 对滑体东侧边界的形成较为有利。而近 EW 向节理与其它两组节理的组合则有利于滑体后缘弧形拉裂面的形成。

(3) 滑坡发育的地形条件

地形条件对台子上滑坡发育的影响主要表现为坡向对滑坡发育的影响。通过对清江流域发育的滑坡体的地形条件进行统计后发现, 清江流域发育的滑坡体绝大多数位于清江的北岸, 即滑坡体的坡向为南坡, 例如, 杨家槽滑坡体、墓坪滑坡体、枣树坪滑坡体、覃家田滑坡体、茅坪滑坡体、古树包滑坡体、大岩淌滑坡体等, 台子上滑坡体也不例外。

分析认为, 坡向主要从以下 2 个方面影响滑坡的发育: ①坡向对滑坡发育的影响作用是内外营力的反映, 即区域构造应力场通过控制水系的发育进而控制了滑坡的发育方向; ②坡向影响到水热条件的差异, 使得自然地理诸要素具有规律性分异, 从而导致滑坡发育存在坡向性。

4.2 滑坡发育的诱发因素

(1) 降雨。降雨是滑坡发育的重要诱发因素。降雨的入渗, 一方面增加了滑体的重量, 从而增加了滑体的下滑力; 另一方面对滑带的软弱岩层有着较强的软化作用, 降低了滑动面(带)的抗滑力, 加剧了滑坡的形成和解体。2000年6~10月为雨季, 在这段时期滑坡体的前缘经常发生局部崩解。例如, 2000年10月1日, 滑坡所在区域降雨, 滑坡体前缘发生了大面积表层崩滑, 并伴随局部泥石流。

(2) 前缘江水的冲蚀。滑坡体前缘受清江河水的冲刷、淘蚀, 前缘岸坡后退, 临空面增大, 为剪切破坏提供了有利条件。例如, 据地质资料反映, 1997年7月滑体前缘受清江洪水的冲蚀, 曾出现较大范围的带状崩滑区, 岸坡后退 5~20 m, 同时还引起了滑坡前缘局部崩解体的进一步崩解。

(3) 人类活动。人类活动是台子上滑坡体发育的重要诱发因素之一。一方面人工开挖改变了滑坡体的边界及荷载状态, 加速了滑坡临空面的崩解破坏。例如, 2001年2月滑坡前缘 3#公路以下挡土墙施工前的坡脚开挖, 曾引起 3#公路以下较大范围的崩滑; 另一方面滑坡体上居民用水及田地灌溉用水也使地表径流条件发生改变, 可能抬高局部的地下水位, 从而对滑坡的稳定性不利。

5 深部位移监测成果分析

为了监测滑坡的位移变形特性及其稳定状态, 在滑坡前缘、中部和后缘共布置了 9 个深部位移监测孔。监测资料表明, 虽然滑坡体的岩性和变形特性因所在不同部位而各异, 但总体来说滑坡体相对破碎、松散, 且滑坡体前缘的监测孔 IN1-1, IN1-2, IN1-3 所在部位存在较为明显的滑动面(带)。图 4 为埋设在滑坡前缘的监测孔 IN1-2 的位移与深度关系曲线。从图中可以看出, IN1-2 测孔在孔深 34.5~42.5 m 处存在较为明显的滑动面(带)。而且, 在已经出现滑动面的部分测孔在其滑动面附近的相对水平位移, 一直呈不同程度的增长趋势, 个别部位增长速率相对较大, 但整体增长速率较小, 有待进一步观测。到 2002 年 3 月为止, 埋设在滑坡中后部的测孔尚无明显的滑动面(带)。因此, 滑坡体目前

的变形基本上还只是局限在前缘, 滑坡体中部及后缘的变形相对较小。

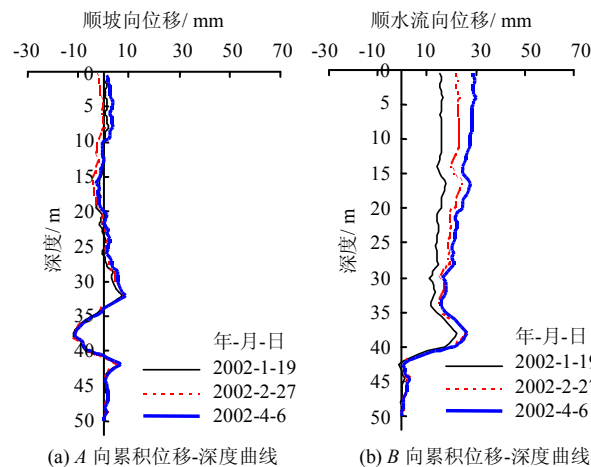


图 4 IN1-2 测孔位移与深度关系曲线

Fig.4 Curves indicating the relations between displacement and depth at measured hole IN1-2

图 5 给出了 IN1-2 测孔不同孔深处相对水平位移过程曲线, 从图中可以看出, IN1-2 表现出比较明显的规律性, 大致可分为 4 个不同的变化阶段: ①从 2000 年 10 月 1 日(第 1 次观测)~12 月 27 日, 测孔在孔深 34.5, 42.5 m 处的 A 向相对水平位移呈较快速增长趋势。这是由于滑坡体前缘在 2000 年 10 月份前后曾发生多次局部滑塌的影响所致。②2000 年 12 月 27 日~2001 年 3 月 16 日, 测孔在孔深 34.5, 42.5 m 处的 A 向相对水平位移略有增长, 但增长速率较小。这说明 2000 年 10 月份前后曾发生的多次局部滑塌对测孔 IN1-2 所在部位的影响已经减弱。③2001 年 3 月 16 日~6 月 4 日, 测孔在孔深 34.5, 42.5 m 处的 A 向相对水平位移又呈较快速增长趋势。这是由于 2001 年 2 月底因滑体坡脚开挖引起的 3#公路以下部位发生的较严重的滑塌影响所致。④2001 年 6 月 4 日~2002 年 3 月, 由于滑坡体前缘坡脚部位的施工已经基本完成, 测孔在孔深

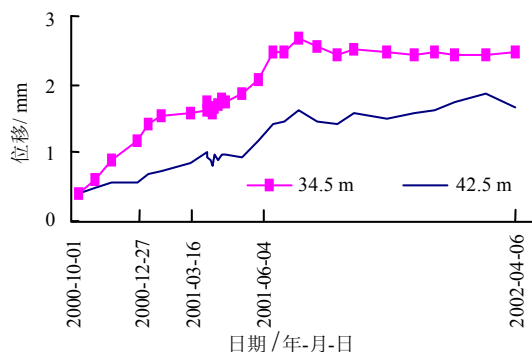


图 5 IN1-2 测孔不同孔深处相对水平位移过程曲线

Fig.5 Relative duration curves of horizontal displacement of measured points with different hole depths in hole IN1-2

34.5, 42.5 m 处的 A 向相对水平位移变化较小, 呈缓慢增长趋势。这说明滑坡前缘部位进行的工程治理措施对滑坡的稳定起到重要作用。

6 滑坡稳定性可靠度分析

边坡稳定性可靠度分析与传统的边坡稳定性评价方法的不同之处, 主要在于前者是将影响边坡稳定性的因素作为随机变量来考虑, 并建立边坡稳定性的概率模型, 采用失效概率或可靠概率表征边坡的可靠性程度^[5, 6]。本文采用蒙特卡洛法进行滑坡稳定性可靠度分析。

根据地质勘探报告和设计资料分析, 该滑坡体为微顺层滑坡, 潜在破坏模式为顺层滑动-剪切破坏, 主滑带和次滑带都已基本确定, 在此基础上进行随机模拟。根据已确定的破坏模式, 基于 Sarma 法建立极限状态方程。计算剖面如图 1 所示。

选取对滑坡体安全影响较大的参数, 如滑体、主滑带、次滑带的粘结力、内摩擦角及重度作为随机变量, 参数取值见表 2, 假定它们均服从标准正态分布。根据监测结果, 滑坡体的地下水位整体变化不大, 将地下水位作为确定值参加可靠度计算, 其值根据渗压计实测地下水位确定。

表 2 抗剪强度参数的统计参数

材料名称	粘聚力/kPa		内摩擦角/(°)		重度/kN·m ⁻³	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
滑体	27	1.5	23.4	7.1	22.6	0.081
主滑带	23	1.1	19.5	1.7		
次滑带	25	1.1	20.1	2.0		

计算结果表明, 在临时生产生活基地场平台及滑坡治理工程实施前的天然状态下, 滑坡的可靠度 $\beta=1.64$, 破坏概率 $P_f=5.0\%$ 。目前我国还没有岩石边坡稳定性目标可靠度指标的相应规范规程, 在水利水电工程结构可靠度设计统一标准^[7]中, 按结构安全级别和破坏类型不同, 水工结构目标可靠度指标规定为 2.7~4.2。鉴于台子上滑坡规模较大, 地理位置十分重要, 对滑坡进行适当的工程治理是十分必要的。

8 结 语

通过对台子上滑坡影响因素的敏感性分析、滑坡成因分析、可靠度计算以及对深部位移监测成果的分析, 初步得出如下认识:

(1) 滑坡影响因素的敏感性分析表明, 滑带抗剪强度参数、地下水位对滑坡稳定安全系数的影响

较为敏感。

(2) 对滑坡成因的分析认为, 台子上滑坡发育的基本条件有软硬相间的有利地层结构、有利的地质构造条件及有利的地形条件等; 滑坡发育的诱发因素有降雨、前缘江水的冲蚀及人类活动等。

(3) 滑坡前缘深部位移监测孔已经出现了滑动面(带), 滑动面的位移一直呈缓慢增长趋势, 但滑坡中后部的变形相对较小, 尚未发现明显的滑动面。

(4) 为了克服力学参数取值不确定性给传统的安全系数计算结果带来的影响, 对滑坡的可靠度及破坏概率进行了计算分析。

(5) 根据滑坡的可靠度和破坏概率计算结果以及深部位移监测成果, 考虑到台子上滑坡规模较大, 地理位置重要, 分析认为对滑坡进行适当的工程治理是十分必要的。

参 考 文 献

- [1] 徐瑞春, 徐同海. 清江隔河岩水库杨家槽滑坡稳定性工程地质研究[J]. 地质力学学报, 1999, 5(2): 1-9.
XU Rui-chun, XU Tong-hai. Study on stability of Yangjiacao slide mass in the Geheyan reservoir on Qingjiang river[J]. *Journal of Geomachics*, 1999, 5(2): 1-9.
- [2] 马水山, 王志旺, 张漫. 滑坡监测资料的因子分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1 003-1 006.
MA Shui-shan, WANG Zhi-wang, ZHANG Man. Factor analysis on monitoring data of landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(7): 1 003-1 006.
- [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 Bao-jun, LI Yi-ming, MA Shui-shan. On safety monitoring of landslides of TGP's reservoir area based on stabilization 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.
- [4] 王志旺, 张保军, 马水山. 台子上滑坡深部位移监测及成因研究[J]. 长江科学院院报, 2003, (1): 26-28.
WANG Zhi-wang, ZHANG Bao-Jun, MA Shui-shan. Study on displacement monitoring and mechanism of Taizhishang landslide[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2003, (1): 26-28.
- [5] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [6] 徐卫亚, 张志腾. 滑坡失稳破坏概率及可靠度研究[J]. 灾害学, 1995, 10(4): 33-37.
XU Wei-ya, ZHANG Zhi-teng. Study on landslide failure probability and reliability[J]. *Journal of Catastrophology*, 1995, 10(4): 33-37.