

边坡群稳定性耦联分析方法在三峡库区的应用

华小军¹, 樊启祥², 尚毅梓², 程建¹, 张玉柱¹, 刘志武¹

(1. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国长江三峡集团公司, 北京 100038)

摘要: 针对库区边坡群地质资料、水文信息等数据缺乏的问题, 提出了一种库区边坡群稳定性分析方法。该方法首先利用遥感信息技术提取相关库区边坡群岩土整体特征; 然后, 依据某一个边坡变形破坏的实际监测数据, 反算整个边坡群的详细地质信息数据; 最后, 使用库区边坡稳定性耦联分析模型, 跟踪和预测边坡群各个边坡体的变形情况。将提出的方法应用于三峡库区一个典型边坡群的稳定性分析, 结果表明预测的滑坡体位移大小和方向与野外观测结果基本吻合, 预测的主要滑坡趋势轨迹方向与实际趋势形态吻合良好。

关键词: 边坡群稳定性; 岩土域; 耦联分析; 三峡库区

中图分类号: TV147

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2019)01-0054-04

Application of coupling analysis method for slopes stability in Three Gorges Reservoir Region//HUA Xiaojun¹, FAN Qixiang², SHANG Yizi², CHENG Jian, ZHANG Yuzhu¹, LIU Zhiwu¹(1. *China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China*; 2. *China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China*)

Abstract: Aiming at the lack of geological and hydrological data, a stability analysis method for the reservoir slopes is proposed. First, the overall geotechnical properties of the slopes are extracted using the remote sensing technology, and then the detailed geological data for the slopes is derived through an inversion model based on the monitoring data of a certain slope with deformation and failure. Finally, the deformation of each individual slope can be traced and predicted by the coupling analysis model. This method has been applied to the stability analysis of typical slopes in the Three Gorges Reservoir Region, and the results show that the predicted displacement and direction of the landslide mass basically agrees with field observation. The predicted trajectory direction of the main landslide tendency also agrees well with observation.

Key words: stability of slopes; geotechnical region; coupling analysis; Three Gorges Reservoir Region

我国建成运行的高坝大库多位于岸坡陡峻、构造复杂、岩体破碎、软弱地层发育、崩滑灾害体广布等地质环境极脆弱的地带。由于防洪、发电等要求, 水库水位变动频繁, 改变了库区边坡的水文地质环境, 加剧了滑坡等地质灾害风险^[1-3], 反过来也制约了水库综合效益的发挥。以三峡为例, 根据 2009 年 7 月湖北省、重庆市库区 26 个区县政府上报统计资料及国土资源部门调查, 崩塌、滑坡共 5 386 处, 其中涉水的崩塌、滑坡 1 945 处, 不涉水的崩塌、滑坡 3 441 处^[4]。因此, 研究三峡库区边坡稳定性具有重要意义。

目前, 对水库边坡稳定性问题的研究已经较多。胡铁松等^[5]提出了滑坡预测的人工神经网络方法, 并将该方法应用于清江隔河岩库区两个主要滑坡的

预测, 预测结果表明了该方法的有效性以及在滑坡预测中的良好应用前景; 贾官伟等^[6]利用图像动态采集系统记录了水位骤降引致滑坡的发生、发展过程和滑坡模式, 为探讨边坡失稳原因和失稳模式提供了依据; 蒋秀玲等^[7]采用 Morgenstern-Price 法对滑坡稳定性进行计算, 对三峡水库水位变动下的库岸滑坡稳定性进行了评价; 向杰等^[8]研究了三峡水库蓄水诱发神女峰库岸破坏机制, 并简述了在库水位变化情况下, 岸坡稳定性分析的计算方法; 韩凌风等^[9]研究了库水位升降作用下库岸边坡渗流特征, 分析了该库岸边坡的孔隙水压力变化特征和渗流速度动态变化规律, 为渗流与变形耦合分析提供了依据; 邓华锋等^[10]提出了对库岸边坡分段的分析方法, 从力学机理上较好的解释了库岸边坡在水位上

基金项目: 国家自然科学基金(51579248)

作者简介: 华小军(1981—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: hua_xiaojun@ctg.com.cn

通信作者: 刘志武(1977—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: liu_zhiwu@ctg.com.cn

升或下降过程中安全系数先减小后增大的原因;段永祥等^[11]进行了库岸滑坡稳定性物理模拟研究,试验结果表明水库水位升降对滑坡前缘涉水部分影响较大,对中部和后缘影响较小,降雨对滑坡前缘、中部、后缘影响相对显著;张嘎^[12]提出了岩土域的概念,认为相邻边坡体的特性和变化规律具有相关性和相似性,在此基础上构建了边坡群稳定性耦联分析概念性模型。

以上研究大多针对整个边坡的定性评价或特定边坡的定量分析,缺乏对边坡整体安全性的定量分析,且对库区边坡群地质资料、水文信息等数据缺乏时的研究较少。本文基于张嘎建立的边坡群稳定性耦联分析概念性模型,提出一种库区边坡群稳定性分析方法。以三峡库区一个典型边坡群为实例,基于“实时反馈响应、同步修正模型”的思路,对该方法的有效性进行验证和分析。

1 三峡库区滑坡体概况

所研究的边坡为三峡库区某滑坡体(图1),该滑坡体三维几何计算模型由滑坡体、软弱带和基岩3部分组成,在平面上取包围滑坡体的大约1240 m×1000 m的区域。有研究表明^[13],从2004年1月15日起该滑坡体开始蠕动变形,进入滑坡发展阶段,在2007年7月期间,局部地区的滑坡形变达到最大30 cm。在2009年5月至8月期间由于降雨影响和库水位下降,该滑坡体发生了规模较大的形变,一些观测点的数据表明位移量在50~550 mm之间,滑坡体往北方向滑移,局部存在偏西或者偏东方向的调整,滑坡引起的裂缝在滑坡体上随处可见。

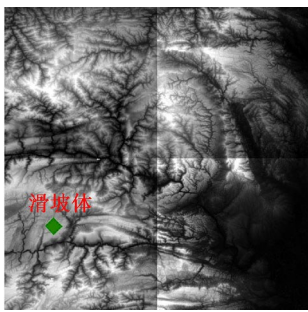


图1 三峡库区某滑坡体30 m分辨率DEM图

前期没有对该滑坡体进行勘察,信息缺乏,地质资料、水文信息等相关计算参数都没有提取到。这些资料需要联系当地国土资源局获取,有一定的难度,而三峡库区滑坡体资料本身也属于敏感信息,故根据卫星遥感信息图,找到一幅滑坡前的数字高程模型。运用ArcGis遥感信息技术软件对DEM原始数据进行处理,提取滑坡体的等高线和剖面信息,可以获得滑坡体的形态信息见图2。

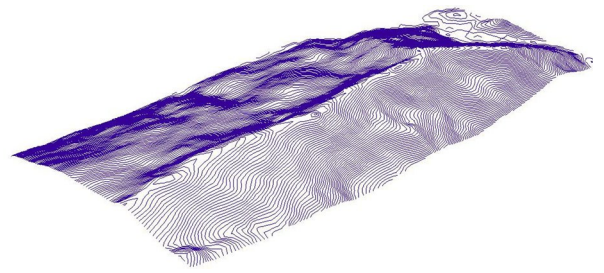


图2 三峡库区某滑坡体地形地貌

2 库区边坡群稳定性耦联分析方法

2.1 岩土域相似性原理

库区边坡群具有相似的地质条件和外部环境,虽然每个边坡体的几何特征、土层构成及特性等要素有所不同,但也存在着明显的共同属性。如各边坡体的地质构造与形成过程相似,因此其力学特性、渗透特性具有相关性,应力历史具有相似性;各边坡体的边界条件具有宏观一致性,其外水位、外荷载(如地震等)等具有相等或者相似的性质;各边坡体的变形破坏规律也有相似性。这些相关性使得库区内一个边坡体的数据信息对其他边坡体具有参考意义,因此将处于同一地域、具有内在联系的多个岩土体(如边坡等)构成的系统称为岩土域。

2.2 耦联分析概念性模型

岩土域耦联分析概念性模型结构见图3。该模型包括输入层、模型层、计算层和响应层4个层。其中,输入层用于收集多源数据和确定边界条件和参数等,并传递到模型层;模型层用于建立单个岩土体的分析模型和相互间的耦联关系;计算层用于多源数据的挖掘和分析,以及岩土域和所含岩土体分析模型的求解;响应层用于汇总各岩土体的响应及其耦联特性,并与输入层进行交互。

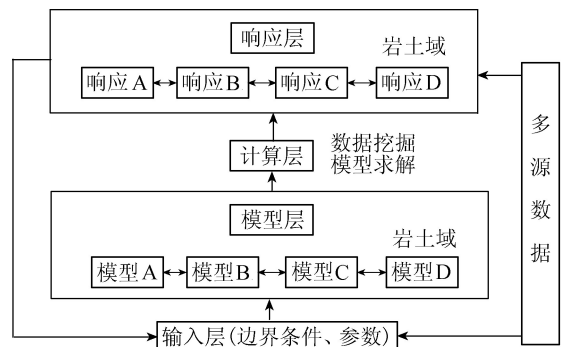


图3 岩土域耦联分析概念性模型

岩土域耦联分析概念性模型具有如下主要特点:①模型以数据驱动为主,一旦有新的数据进入响应层或者输入层,分析过程就将启动,而传统方法是过程驱动;②模型具有开放性,各岩土体的模型和响应相互独立;③模型结果是定量的,而不是概率和可

靠度分析;④数据和参数是多源的和灵活的。

2.3 库区边坡群稳定性耦联分析步骤

a. 输入层。输入滑坡体初始滑坡剖面的参数和水位。容重和强度参数采用取样试验与工程类比后的参数,水位根据水库蓄水情况变化。

b. 模型层。采用简化 Bishop 条分法建立边坡稳定性的分析模型,计算公式见式(1)(2),将滑坡体初始滑坡剖面实际滑坡形态导入耦联分析模型。

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{\alpha i}}(M_c(\gamma)c_i b_i + W_i M_\varphi(\gamma)\tan\varphi_i)}{\sum W_i \sin\alpha_i} \quad (1)$$

$$m_{\alpha i} = \cos\alpha_i + \frac{\sin\alpha_i M_\varphi(\gamma)\tan\varphi_i}{F_s} \quad (2)$$

式中: F_s 为边坡的安全系数;下标*i*为土条序号; b 为土条的宽度; W 和 α 分别为土条的重量和倾角; c 和 φ 分别为土的黏聚力和内摩擦角; $M_c(\gamma)$ 和 $M_\varphi(\gamma)$ 分别为黏聚力折减系数和摩擦力折减系数; γ 为土条的浮容重; $m_{\alpha i}$ 为抗滑力矩。

c. 计算层。运用数据挖掘、极限平衡法等分析方法进行迭代计算,反算得出滑坡体达到极限平衡时的参数。

d. 响应层运用上一步得出的参数对滑坡面进行预测推算,如果得出的滑坡形态与实际滑坡形态不符合则自动调整参数重新迭代计算,直至符合为止,此时的参数作为最终的计算参数,运用这些参数对滑坡体其他可能滑坡剖面进行安全分析,得出每个剖面的安全系数。

3 计算结果与分析

根据工程经验和现场蠕变变形痕迹,对滑坡体的各个可能滑坡方向进行标记,划分9个断面进行计算分析,如图4所示。由于滑坡体的初始滑裂面和变形体位置在剖面8处,故选取剖面8为计算基准剖面。

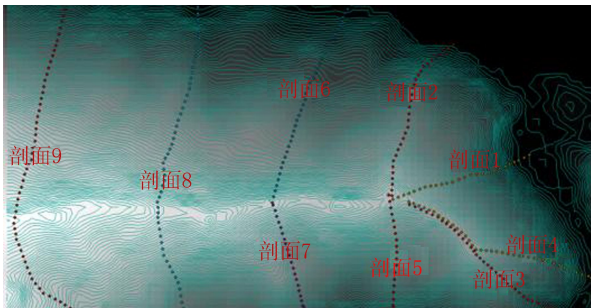


图4 三峡某滑坡体选取断面标记

将剖面8实际滑坡形态导入耦联分析模型,模型运用极限平衡分析方法进行迭代计算,反算得出滑坡体达到极限平衡时的参数。运用此参数对滑坡

面进行预测推算,如果得出的滑坡形态与实际滑坡形态不符合则自动调整参数重新迭代计算,直至符合为止,得出主要计算参数:土层容重为 10 kN/m^3 ,黏聚强度为 28 kPa ,内摩擦角为 25° 。剖面8的安全系数为 1.126 ,计算出的剖面8滑坡形态见图5。

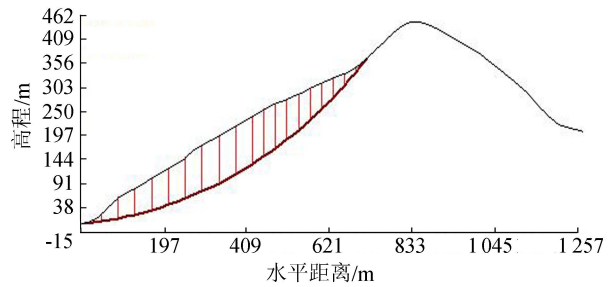


图5 耦联分析模型模拟的剖面8滑坡形态

将图5与Wang等^[14]的实测结果进行对比可知运用耦联分析模型得出的滑坡形态与该滑坡体的实际滑坡形态基本一致,可得出最终的计算参数。运用最终的计算参数对其他可能滑坡剖面进行安全分析计算,剖面1~7和剖面9的安全系数计算结果分别为 0.828 、 1.276 、 0.906 、 2.204 、 1.144 、 1.252 、 1.194 、 1.064 ,耦联分析模型计算出的剖面1滑坡形态见图6,其他类似。

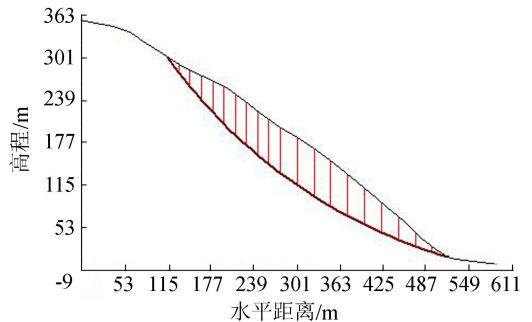


图6 耦联分析模型模拟的剖面1滑坡形态

计算结果显示,最危险的剖面为剖面1、剖面3、剖面5、剖面9,其中剖面1、剖面3为欠稳定状态(本次计算将安全系数小于 1.15 视为潜在危险滑裂面),预测的主要滑坡趋势集中在北北方向,如图7所示。实际滑坡位移矢量图见图8。整体上看,滑坡体作近北方向滑移,局部地区移动方向有偏西或者偏东的调整,平均位移在 30 cm 左右。滑坡体的头部区域是位移量相对较大的区域,箭头方向显示这个区域从东南向西北方向顺山坡从高处向低处滑移,最大位移接近 70 cm 。坡体的运动方向在靠近长江的舌部顺着地势发生改变,西边沿北北西滑动,东边沿北北东滑动。这个形变场特征和该滑坡体的地形特征吻合甚好,位移大小和方向与李小凡等^[13]对滑坡体的野外观测结果基本吻合,预测的主要滑坡趋势轨迹方向与实际趋势形态吻合良好。

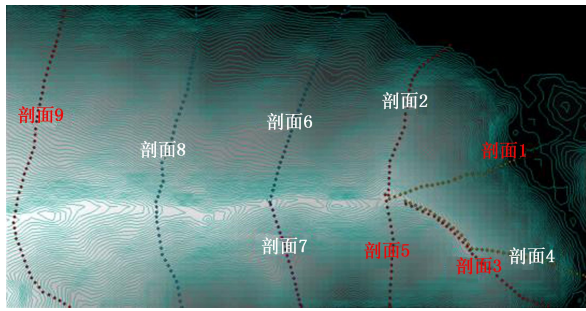


图7 预测滑坡趋势标记

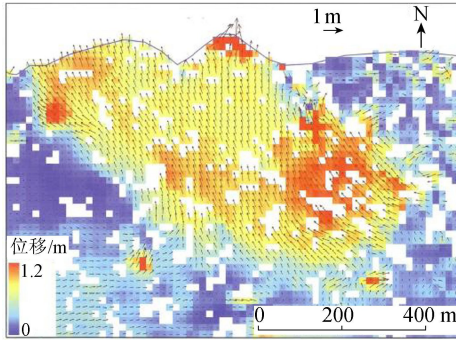


图8 实际滑坡位移矢量图

4 结 语

基于提出的岩土域概念,将岩土体分析扩展到岩土域分析,通过利用其他岩土体数据,采用耦联分析、大数据挖掘等手段提高了边坡稳定的分析精度。

提出了一种库区边坡群稳定性分析方法,以三峡库区一个典型边坡群为实例,在边坡群资料不全、信息缺乏的情况下,利用遥感信息技术提取相关特性,计算了该边坡的稳定性。结果表明预测的滑坡体位移大小和方向与野外观测结果基本吻合,预测的主要滑坡趋势轨迹方向与实际趋势形态吻合良好,验证了本文方法的有效性。

本文只对水位固定状态下边坡的稳定性进行了定量分析,后期可以将此耦联模型应用于水位变化条件下的边坡稳定性耦联过程分析。

参考文献:

[1] 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 Zhaoshuping Landslide, Badong Country, Three Gorges Reservoir[J]. Earth Science, 2002, 27(5): 621-625. (in Chinese))

[2] COJEAN R, CAI Y J. Analysis and modeling of slope stability in the Three-Gorges Dam Reservoir (China): the case of Huangtupo Landslide [J]. Journal of Mountain Science, 2011(8): 166-175.

[3] 李智慧,贾苍琴,王贵和,等. 水位骤降对边坡稳定性影响研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(增刊1): 86-90. (LI Zhihui, JIA Cangqin, WANG Guihe, et al. Review of influence of rapid drawdown of water level on slope stability[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31 (Sup1): 86-90. (In Chinese))

[4] 侯俊东,侯甦予,吕军,等. 三峡库区地质灾害监测预警工程经济效益评估分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2012, 23(2):64-69. (HOU Jundong, HOU Suyu, LÜ Jun, et al. Analysis on economic benefit evaluation of geological disaster monitoring & warning engineering for Three Gorges Reservoir area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(2): 64-69. (in Chinese))

[5] 胡铁松,蔡德所,何薪基. 清江隔河岩库区滑坡预测的神经网络方法[J]. 水利水电科技进展, 1998, 18(1): 38-40. (HU Tiesong, CAI Desuo, HE Xinji. Neural network method for landside prediction in Geheyan Reservoir on Qingjiang River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1998, 18(1): 38-40. (in Chinese))

[6] 贾官伟,詹良通,陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009, 28(9): 1798-1803. (JIA Guanwei, ZHAN Liangtong, CHEN Yunmin. Model test study of slope instability induced by rapid drawdown of water level [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1798-1803. (in Chinese))

[7] 蒋秀玲,张常亮. 三峡水库水位变动下的库岸滑坡稳定性评价[J]. 水文地质工程地质,2010, 37(6):38-42. (JIANG Xiuling, ZHANG Changliang. Stability assessment for the landslide undergoing the effects of water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(6): 38-42. (in Chinese))

[8] 向杰,唐红梅. 三峡水库蓄水诱发神女溪岸坡破坏机制研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(增刊1):700-704. (XIANG Jie, TANG Hongmei. Failure mechanism study for fairy-river shore slope in the Three Gorges Reservoir caused by water-impoundment [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Nature Science), 2011, 30(Sup1): 700-704. (in Chinese))

[9] 韩凌风,秦荣,吴实渊. 库水位升降作用下库岸边坡渗流特征研究 [J]. 工程勘察,2014(7):26-30. (HAN Lingfeng, QIN Rong, WU Shiyuan. Study on seepage characteristics of reservoir bank slopes under water level fluctuation [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014(7): 26-30. (in Chinese))

(下转第69页)