

文章编号 :1671-8860(2005)10-0917-04

文献标志码 :A

基于 RS /GIS 技术与数值计算的 库岸边坡稳定性研究

王 涛^{1,2} 蔡晓斌¹ 陈晓玲¹ 吴 玮¹

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室,武汉市东湖南路 8 号,430072)

摘 要:利用相关的地质、地貌、岩土性质、土地利用类型等数据,在对水库库区景观进行可视化分析的基础上,将宏观上的滑坡危险区域识别与微观上的危险区域内边坡稳定数值模拟相结合,研究了库岸边坡稳定性问题,并对库区复杂条件下的岩质边坡稳定性评价进行了尝试性探索。
关键词:GIS; RS; 边坡; 稳定性; FLAC3D
中图法分类号:P208; P237.9; P258

研究滑坡灾害时,一般是将滑坡灾害风险按统计方法进行分区,用于进行区域用地规划和减灾规划;而水电或地质等工程部门则需要对具体的边坡进行稳定性定量计算。本文将滑坡灾害风险分区与边坡稳定性计算结合起来,并对其内部的联系进行了探索。

1 RS 和 GIS 与边坡稳定数值模拟结合的技术路线

目前的库区滑坡灾害研究中,一方面是将 RS 和 GIS 较广泛地应用于区域地质稳定性调查;另一方面是针对库区滑坡进行大量的数值计算。但地质调查的结果是大范围的,对重点局域的稳定性的考虑不够,而数值计算的选点具有随机性,因此,将两者结合既可以考虑到大范围内的总体状况,又能通过数值计算得到重点局域的稳定状况。其实现的技术流程如图 1 所示。

基于目视判读滑坡信息的解译,其解译结果一般绘制在地形底图上,然后再数字化进入空间数据库。该过程不但繁琐、费时,且数据质量也将受到影响。利用专业的遥感影像处理软件,在对影像进行空间坐标配准和地形纠正后,通过计算机分类和目视解译相结合,将获取的发生滑坡的

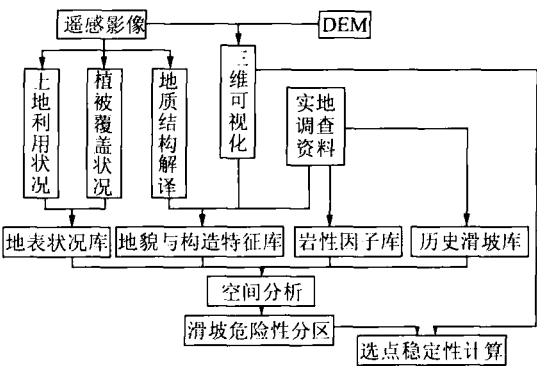


图 1 技术路线流程图
Fig. 1 Flow Chart of Technique Course

基础数据(土地利用、植被覆盖、区域地质构造、岩性数据和 DEM 等)一起放入 GIS 数据库中,通过对区域岩土性质、地形、地质构造、环境因素、土地利用、历史滑坡等数据的分析,对整个研究区域按照发生滑坡的可能性的不同进行滑坡危险性分区。在此基础上,选取各个危险区域内的典型区域进行稳定性计算,得到该区域滑坡的安全系数。

2 实例分析

本文将 GIS 和 RS 技术应用到我国某水库库岸边坡的稳定分析中,采用的遥感影像是 1999 年

收稿日期:2005-08-01。
项目来源:国家 973 计划资助项目(2003CB415205);江西师范大学鄱阳湖生态环境与资源研究重点实验室开放研究基金资助项目(200401006(1))。

的 TM 影像。该水库流域面积为 3 950 km², 库区的岩性主要是沉积岩, 无大型断裂带、褶皱带通过, 基本为单斜岩层, 产状基本一致, 均倾向南方, 倾角在 40°~60°之间。

2.1 库区可视化及因子库的建立

对库区景观的可视化有助于对水库库岸稳定性环境进行定性分析, 本文利用 ERDAS 进行三维虚拟环境的构建、编辑、漫游、动画、注释等。把 DEM 和数字正射影像图进行叠加, 产生三维地形的可视化。通过可视化, 可以更好地解译地质结构体, 辅助选择稳定性计算的代表性点位。

在获取遥感影像获取的信息以及各种勘测资料的基础上, 利用 GIS 技术建立对滑坡产生影响的因子资料库^[1], 包括地表状况库(土地利用状况子库、植被覆盖子库)、地貌与构造特征库(DEM 子库、坡度子库、坡向子库、岩层产状子库、断层分布子库、线性构造分布子库)、岩性因子库、历史滑坡库。

2.2 滑坡危险性分析与风险评价

研究表明, 在众多影响因子中, 历史滑坡的发生与岩性条件、植被覆盖状况、距水体的距离、坡度和坡向与滑坡的发生有着显著的相关性, 这几个因子成为分析库区滑坡的最佳预测因子集。下面进一步分析这几种最佳预测因子集与滑坡的相关性。

库区按岩性可以分为 4 类, 分别是石英砂岩、灰岩夹泥灰岩、石英砂岩夹粉砂岩、灰岩夹页岩。统计结果表明, 大量的历史滑坡主要发生在灰岩夹泥灰岩区域。

采用 ERDAS 对研究区域的影像进行监督分类和植被覆盖分区。地表覆盖状况是滑坡发生过程中的阻力因子, 地表植被覆盖状况好的情况下, 滑坡发生的概率能够大大减少。通过植被覆盖状况与历史滑坡发生次数的分析可知, 植被覆盖状况好的区域, 没有发生过历史滑坡, 随着植被覆盖状况的下降, 滑坡发生的频率迅速上升, 如图 2 所示。

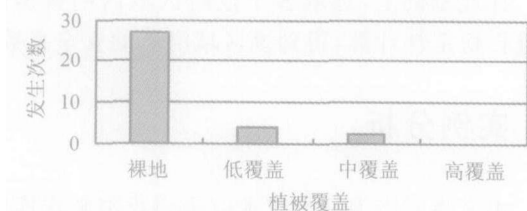


图 2 历史滑坡与植被覆盖的关系

Fig. 2 History Landslides Distribution in Different Vegetation Cover Zone

通过对历史滑坡的分析知, 滑坡发生的可能性随距水库的距离呈一定空间相关关系, 其关系主要

表现为: 在较近范围内, 水库的影响力比较大; 随着距离的增大, 危险性逐渐减小; 最后超过一定距离后, 发生次数逐渐与距库体的距离无明显关系, 说明库体对坡体的影响有一定的范围区间。通过对水库周边不同距离内发生历史滑坡的次数分析, 发现有 95% 以上的滑坡范围均在距水库 300 m 的范围内, 如图 3 所示, 因此, 将处于库区 300 m 缓冲区内作为危险区划分的一个判定因子。

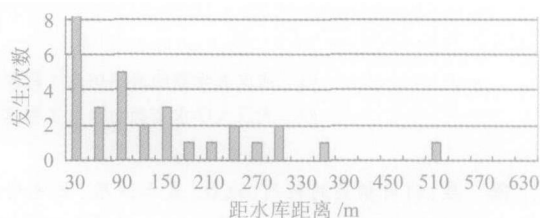


图 3 历史滑坡与距水库距离关系图

Fig. 3 Relation of History Landslides and Reservoir on Distance

由于滑坡发生的最直接动力来源是滑坡体的重力, 因此, 在不同的坡度状态, 发生滑坡的概率是不同的, 坡度在滑坡的危险性分析中具有相当大的作用。通过对历史滑坡的分析发现, 该区域滑坡发生的主要坡度区间位于 60°~70°之间, 如图 4 所示, 与理论分析的结果相吻合, 所以将坡度为 60°~70°的区域也作为危险区划分的一个判定因子。

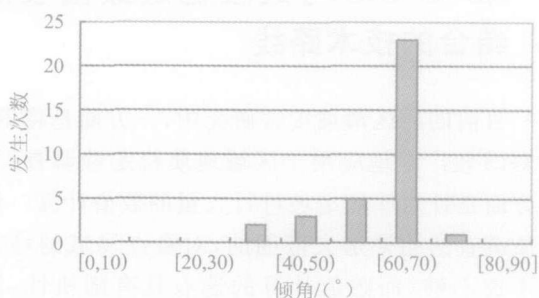


图 4 历史滑坡与坡度关系图

Fig. 4 Relation of History Landslides and Gradient

历史滑坡的发生与坡向有一定的相关规律, 并且坡向实际中与岩石产状的结合对于滑坡的发生也有很大的影响作用, 因此, 通过分析坡向的统计规律, 将坡向因素作为危险区判定的一个判定因子。图 5 显示, 坡向在 [270°, 360°] 之间, 滑坡发生的次数最多, 这个方向与岩层的倾向基本一致。结合图 4 发现, 岩层倾角小于坡角, 统计结果与地质结构上的解释也是基本一致的^[2]。

基于以上统计规律, 利用 ERDAS 的专家分类器可以找出最易发生滑坡的区域。该模块允许

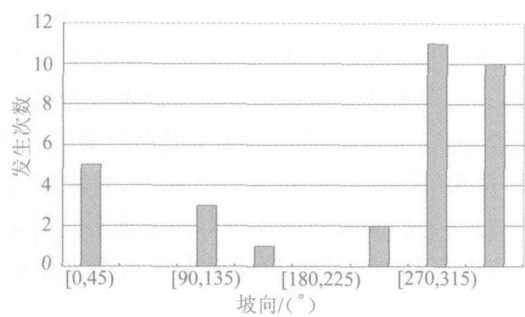


图 5 历史滑坡与坡向关系图

Fig. 5 Relation Between History Landslides and Directions of Slopes

用户利用最广泛的数据源,在多重判据的专家水平上进行分类。专家分类器中的知识工程师为具有第一手经验的专家提供一个将经验应用到指定变量、规则及相关的输出类别,创建分层判断树的界面^[3]。

利用专家分类器和知识工程师,对 5 个判定因子建立知识库,按照定量分析规则,经过测试后得出分区图,如图 6 所示。

2.3 边坡稳定的定量计算

通过对滑坡风险的评估,结合三维显示,选择具有代表性的点位进行数值计算,能够对重点区域内的边坡稳定性进行更高精度的评估。目前,

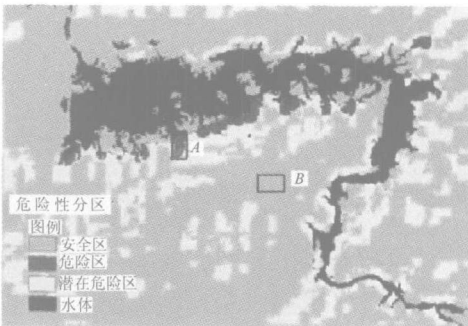


图 6 库区滑坡风险图

Fig. 6 Landslides Hazards Graph of Reservoir Zone

基于 GIS 对斜坡已有的研究均采用无限斜坡稳定性分析模型,这对浅层坡残积土滑坡无疑是合适的^[4]。Utah 大学的 Tarboton 教授还针对该种情况在 GIS 平台上开发出了 SINMAP 程序,但对于复杂的地质条件,则必须采用与实际情况相适应的复杂分析模型。

本文选取了两个区域进行数值计算,如图 6 所示,区域 A 位于石灰岩夹泥灰岩地区,区域 B 位于石英砂岩地区,其相应的力学参数如表 1 所示。计算工具采用美国 ITASCA 公司的 FLAC3D 软件,它是一个用于分析和解决岩土工程问题的三维显式差分法程序。程序将计算区域

表 1 岩体力学参数表

Tab. 1 Rock Mass Mechanics Parameters

区域	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	摩擦角/ (°)	凝聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
石灰岩夹泥灰岩	2 600	9	7	30	1	0.1
石英砂岩	2 700	12	8	45	2	0.2

内的介质划分为若干个三维单元,单元之间用节点相互连接。

程序内包含了强度折减法(strength reduction solution)求解边坡的安全系数(F)模块。结合有限差分法的强度折减系数法,较传统的方法具有如下优点:能够对具有复杂地貌、地质的边坡进行计算;考虑了岩土体的本构关系以及变形对应力的影响;能够模拟滑移面形状(通常由剪应变增量或者位移增量确定滑移面的形状和位置);求解安全系数时,可以不需要假定滑移面的形状。

抗剪强度折减方法将岩土体的抗剪强度指标 C 和 Φ 用一个折减系数 F_s 按式(1)和式(2)进行折减,然后用折减后的虚拟抗剪强度指标 C_F 和 Φ 取代原来的抗剪强度指标 C 和 Φ 如式(3)所示:

$$C_F = C / F_s \tag{1}$$

$$\Phi_F = \tan^{-1} ((\tan \Phi) / F_s) \tag{2}$$

$$\tau_{fF} = C_F + \sigma \tan \Phi_F \tag{3}$$

式中, C_F 是折减后岩土体虚拟的粘聚力; Φ 是折减后岩土体虚拟的内摩擦角; τ_{fF} 是折减后的抗剪强度。

折减系数 F_s 的初始值取得足够小,以保证开始时是一个近乎弹性的问题;然后不断增加 F_s 的值,折减后的抗剪强度指标逐步减小,直到某一个折减抗剪强度下整个边坡发生失稳,那么在发生整体失稳之前的那个折减系数值,即岩土体的实际抗剪强度指标与发生虚拟破坏时的折减强度指标的比值,就是这个边坡的稳定安全系数^[5]。

通过遥感影像获取计算区域内的 DEM 建立计算模型。考虑到遥感影像的精度,不模拟岩体中的构造情况。在 FLAC3D 计算中,采用 Mohr-Columb 屈服准则,并且考虑了地下水,通过计算得到区域 A 的安全系数为 0.852,图 7 为水平位移分布图,区域 B 的安全系数为 1.673,因此,数值计算与基于 RS、GIS 得出的结论是一致的。可以预测,随着遥感影像精度的增高,可以建立更加

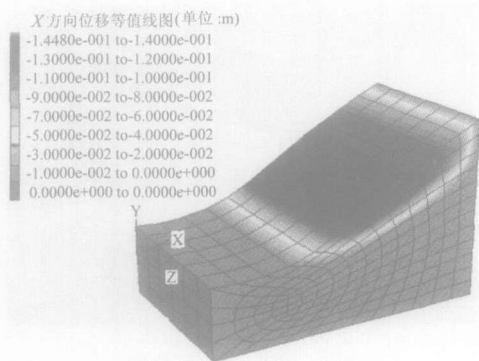


图 7 FLAC3D 计算出的水平位移分布图

Fig. 7 Horizontal Displacement Graph
Computed by FLAC3D

符合实际的计算模型,如可以通过遥感影像获得岩体中的详细的构造信息,利用 ITASCA 的离散元程序 3DEC 进行稳定计算。

通过数值计算,进一步证实了利用 GIS 和 RS 进行库岸边坡稳定性分区的可靠性。同时证明了边坡外在的表现形式与其内部的岩土体性质有着密切的联系。

3 结 语

本文通过遥感影像的三维可视化技术和解译

出的地质构造,选择具有代表性的重点局域范围,结合各种力学数值计算方法,针对性地对重点区域复杂地质条件下的边坡进行了稳定性评价。研究表明,将 GIS/RS 技术和数值计算相结合,可以在充分了解区域环境的基础上,对库区边坡进行宏观上的区域分析评价与局域范围内的定量计算,从而更好地监测和预报库区可能发生的滑坡。

参 考 文 献

- 1 单新建,叶洪,李焯芬,等. 基于 GIS 的区域滑坡危险性预测方法与初步应用. 岩石力学与工程学报, 2002, 12(10): 1 507 ~ 1 514
- 2 崔冠英. 水利工程地质. 北京:中国水利水电出版社, 2000
- 3 党安荣,王小栋,陈晓峰. ERDAS IMAGE 遥感图像处理方法. 北京:清华大学出版社, 2003
- 4 戴福初,李军. 地理信息系统在滑坡灾害研究中的应用. 地质科技情报, 2000, 19(1): 91 ~ 96
- 5 郑颖人,赵尚毅,张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析. 中国工程科学, 2002, 4(10): 57 ~ 61

第一作者简介:王涛,博士生,讲师。现从事 3D GIS 和岩土工程数值计算研究。

E-mail: wangtao6 @public. wh. hb. cn

Stability of Reservoir Slope Based on RS /GIS and Numerical Simulation

WANG Tao^{1,2} CAI Xiaobin¹ CHEN Xiaoling¹ WU Wei¹

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,
Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Science, Wuhan University,
8 South Donghu Road, Wuhan 430072, China)

Abstract: Data related to geology, landform, property of rock and soil, and land use / cover types are selected to study the stability of reservoir slope based on RS/ GIS and numerical simulation in this paper. The reservoir area is visualized for qualitative analysis. The dangerous zones are identified with a combined analysis of statistical evaluation, rule-based classification and numerical simulation of slope stability. The result shows that a combination of RS/ GIS and numerical simulation is effective on the evaluation of the stability of rock slopes under complex conditions in the reservoir area.

Key words: GIS; RS; slope; stability; FLAC3D

About the first author: WANG Tao, Ph.D candidate, lecturer, majors in 3D GIS and geotechnical engineering numerical simulation research.
E-mail: wangtao6 @public. wh. hb. cn