

文章编号: 1000-7598-(2009)01-0270-05

水库库岸滑坡体稳定性与三维 可视化模拟分析系统研究

李明超^{1,2}, 王忠耀², 刘 杰¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 长沙 410014)

摘 要: 基于滑坡体稳定性极限平衡分析方法、滑坡三维数字建模技术和可视化动态仿真技术等理论方法和技术, 采用 VC++ 研制开发了水库库岸滑坡体稳定性与三维可视化模拟分析系统 VisualSlope。该系统的实现过程分为系统分析、系统设计、系统开发与实施 3 个阶段。VisualSlope 系统通过图形对象库和数据库读取几何参数数据, 进而完成稳定性计算、结果可视化分析和失稳三维动态可视化模拟与演示分析, 软件功能丰富, 具有一定的通用性, 实用性强, 为水库库岸滑坡的稳定性分析与防治提供了技术支持平台。

关 键 词: 水库滑坡; 稳定性; 失稳动态模拟; 可视化分析; VisualSlope

中图分类号: TV 697.2⁺3; TP 312

文献标识码: A

Stability analysis and three-dimensional visual simulation system of landslide at reservoir banks

LI Ming-chao^{1,2}, WANG Zhong-yao², LIU Jie¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Mid-South Design & Research Institute, CHECC, Changsha 410014, China)

Abstract: Based on the limit equilibrium analysis method of slope stability, three-dimensional(3D) digital slope modeling technique and visual dynamic simulation technique, the VisualSlope system of slope stability analysis and 3D visual simulation at reservoir banks is developed by the VC++ tool. The implementation procedure includes three stages of the system analysis, the system design, and the system development. The VisualSlope system reads all geometric parameter data through the graphic object library and the database. Then, a series of subsequent tasks can be accomplished, such as stability computation, visual analysis of computational results, instability 3-D dynamic simulation and demonstration analysis. The developed system consists of abundant computational and analytical functions, with preferable generality and strong practicability. It can offer a technical support platform to slope stability analysis and control in reservoir banks.

Key words: slope in reservoir; stability; instability dynamic simulation; visual analysis; VisualSlope

1 引 言

我国已建、在建和拟建的大型水利水电工程中大多数都存在库岸稳定性问题, 如三峡、小浪底、李家峡、溪洛渡、向家坝、白鹤滩、二滩、锦屏一级、小湾和糯扎渡等, 因此水库库岸滑坡的稳定性分析研究对于确保水利水电工程建设的顺利进行和正常运行具有重大意义, 受到各方极大地关注^[1]。

滑坡研究包括滑坡表达、滑坡稳定性分析和滑坡工程治理三个方面的内容^[2], 这些方面的建模、计算、分析和研究都需要依靠计算机程序来完成,

尤其是滑坡稳定性数值计算与三维模拟分析。

目前实践中广泛应用并得以接受的方法仍然是基于极限平衡理论的条分法, 相应地计算程序开发的理论基础亦多为此类方法, 如冯树仁等^[3]采用简单实用的三维条分法编制了三维极限平衡法程序 SSA-3D, Xie 等^[4]基于 GIS 平台建立了滑坡三维稳定性分析与灾害评价系统, 姜清辉等^[5]有机的结合了三维边坡地层信息和极限平衡分析方法研制开发了 SLOPE^{3D} 系统, 陈祖煜等^[6]先后推出的土质边坡稳定分析程序 STAB-95 和岩质高边坡稳定分析程序 EMU^[7], 等。上述研究成果在滑坡分析与防治

收稿日期: 2007-08-08

基金项目: 中国博士后科学基金 (No. 20070420706); 国家重点基础研究发展(973)计划 (No. 2007CB714101) 资助项目。

作者简介: 李明超, 男, 1979 年生, 博士, 主要从事水利水电工程三维建模与分析方面的研究工作。E-mail: lmc@tju.edu.cn

应用方面起到了较大的作用,但工程人员仍期望建模、计算分析过程越简单、可靠^[8],这就需要在三维数据前后处理、图形分析、界面等方面作进一步的深入研究,提供便于应用于实际工程的软件系统。

本文基于极限平衡理论、三维数字建模技术、可视化仿真技术等理论技术,针对水库库岸滑坡体的特点和要求,采用 VC++ 研制开发了水库库岸滑坡体稳定性与三维可视化模拟分析系统 VisualSlope,为库岸滑坡的稳定性分析与防治提供一个便捷的平台。

2 系统分析与设计

系统分析与设计是 VisualSlope 系统实现的基础,是对系统研制的可行性分析和总体设计。

2.1 用户需求分析

如前所述,对滑坡稳定性进行计算分析的工具很多,然而它们往往只是给出稳定系数的计算结果和简单的判断,很少针对这些结果对滑坡体的稳定详尽地进行综合性分析和判断以及倘若失稳会产生什么样的后果和危害等,而这些往往更是决策者和工程人员所关注的。

用户需求分析的任务是解决软件“做什么”的问题,需要与用户密切合作,对系统功能方面的需求进行详细地定义。根据用户调查和调研分析,用户对该系统的基本需求主要包括以下内容:

(1) 应用计算机图形学技术、数据库技术、数学滑坡技术等先进的技术手段,快速建立滑坡体区域高精度的三维数学地形模型和客观的三维滑坡体模型,更为直观清晰地理解滑坡体所处的地质环境,为滑坡体稳定性的计算分析奠定基础。

(2) 库岸滑坡体稳定性计算与分析主要包括①影响因素分析和模式识别;②滑坡体三维力学分析模型的建立;③多因素影响下的稳定性计算和敏感性分析;④各种工况条件下稳定性综合力学分析、反演分析和综合评价;⑤滑坡体防治措施分析。

(3) 滑坡体失稳三维数字动态模拟分析主要包括①滑坡体失稳机制分析;②滑坡体失稳运动数值模拟计算;③滑坡体失稳运动全过程三维动态可视化仿真分析(包括变形、失稳、滑移、入江、涌浪、堆积等);④各种工况条件下滑坡体失稳过程三维模拟分析。

2.2 系统总体设计

系统总体设计的目的是回答“系统应如何实现”的问题,其主要任务是划分出组成系统各物理元素的构成、联系及其定义描述。基于上述用户需求分

析,结合实际工程情况,以 VC++、OpenGL 和 VisualGeo 为工作平台,提出 VisualSlope 系统的基本研究思路和总体结构分别如图 1 和图 2 所示。

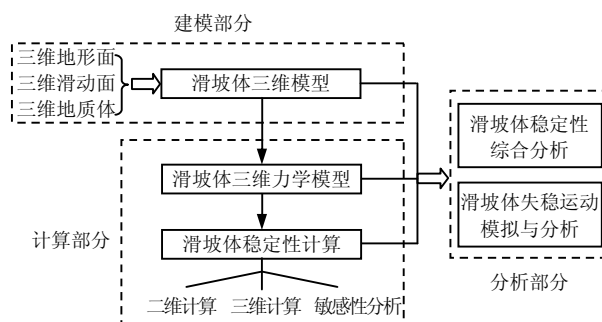


图1 VisualSlope 系统基本思路

Fig.1 Basic clew of VisualSlope system

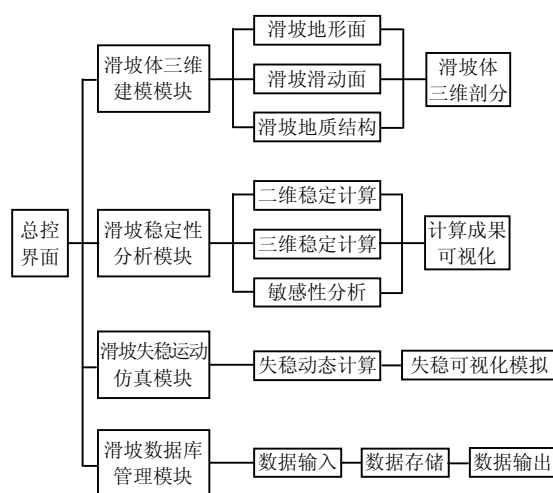


图2 VisualSlope 系统总体结构图

Fig.2 Overall structure scheme of VisualSlope system

从图 1 的 VisualSlope 系统总体的研究思路可见,该思路粗略的可分为三部分,即滑坡体三维建模、稳定性计算和稳定性分析,其中滑坡体三维建模部分就是根据工程地质勘测资料构造滑坡体所处区域的三维模型,并进行三维剖分,作为滑坡体稳定性计算和分析的基础,这将在笔者已研制开发的 VisualGeo 系统^[10]中实现,作为其前处理模块。而在滑坡体稳定性计算与分析中,首先通过数据接口将三维模型转化为用于计算的力学模型,进而输入或读取所需参数数据,在不同的模块中实现稳定系数的二、三维计算和敏感性分析,最后结合滑坡体三维模型和稳定性计算成果,从各方面综合分析滑坡体的稳定性,并考虑滑坡失稳的运动机制进行动态计算和三维模拟,为有效地指导滑坡防治决策提供有利的技术支持。图 2 则为 VisualSlope 系统总体

的模块框架结构,由滑坡体三维建模、滑坡稳定性分析、滑坡失稳运动仿真和数据库管理4个模块组成。4个模块不仅分工明确,易于程序实现,而且相互之间关系密切。滑坡体三维建模模块是基础,能够提供直观准确的三维滑坡体模型和反映空间变化的复杂滑动面,并提供三维剖分功能;滑坡稳定性分析模块和滑坡失稳运动仿真模块是核心,在后者基础上根据实际的需要对滑坡稳定性进行二、三维和敏感性等多方面的综合分析,研究滑坡失稳诱发机制并进行计算模拟和可视化仿真;数据库管理模块为滑坡体三维地质建模、稳定性分析与表达、失稳可视化模拟提供对象属性管理和各种输入输出手段。整个系统结构规范且具有良好的维护性。

2.3 系统功能设计

系统功能设计是系统软件设计的具体化。依据系统目标及系统总体设计要求,VisualSlope系统的总体特点和所能完成的功能目标可归为如下几点:

(1) 采用数据库技术 通过有效的数据接口,能够快速、方便地将滑坡体三维模型和剖分模型的相关属性数据传输到系统的计算分析模块中,有效地提供了便于实际应用的三维稳定性计算的数据处理功能。

(2) 系统采用扩展模块化思想进行设计 根据不同的数据结构和实际需要构建了二、三维计算和结果分析3个计算模块,同时每个大模块又由几个较小的模块组成,实现了数据管理、计算、人机交互及专业分析等各部分组件的高效集成,同时也便于扩展。

(3) 系统通过图形对象库和数据库读取几何参数数据、分析计算结果、动态可视化演示,进一步提高了该系统的重用性和开放性,具有良好的可操作性和软件维护性。

3 系统开发与实现

根据上述分析和设计,基于前述各章节详细论述的大型水库库岸滑坡稳定性分析关键技术,利用数字滑坡技术、计算机图形学技术、岩土力学理论和数据库技术等多种理论方法和技术手段,研制开发了库岸滑坡体稳定性与三维可视化模拟分析平台——VisualSlope软件系统,系统采用了快速原型化方法进行开发,即在对用户需求初步调查的基础上,以快速的方法先构造一个可以工作的系统原型,随着用户或开发人员对系统理解的加深而不断地对原型进行细化、修正和补充,产生一个新的原

型版本,如此反复,从而形成一个相对稳定的、质量较高的系统。

该软件系统基于 Windows 2000/XP 操作系统,应用 VC 6.0++和 OpenGL 开发平台进行系统开发。下面将对主要的计算分析模块进行简要的介绍。

3.1 系统界面

用户界面是人机交互过程中最直观的计算机画面,界面的好坏不仅影响系统形象和直观水平,而且决定用户使用系统的效率,因此,对操作界面应依照人机工程学的观点来进行设计,以操作方便为原则。本系统采用 Visual C++ 6.0 进行界面开发集成,界面采用当前流行的图形用户界面(GUI),通过一级和多级下拉式菜单,并利用对话框形式与用户进行直观、友好的交互。图3为 VisualSlope 系统的启动界面,可选择新建二维或三维稳定性分析文件,或者打开已有工程文件。

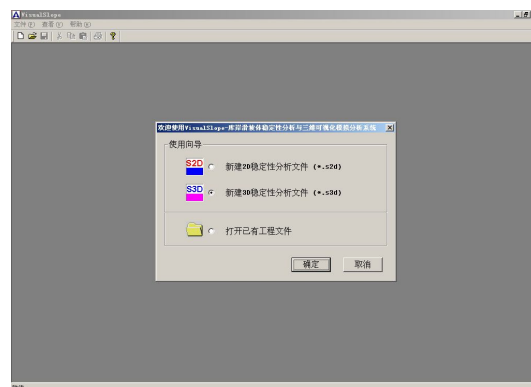


图3 系统启动界面

Fig.3 Start-up interface of the system

3.2 滑坡体二维稳定性分析模块

滑坡体二维稳定性分析模块界面如图4所示。模块主要包括参数输入(分为基本参数和几何参数两类)、稳定性计算和稳定系数敏感性分析(考虑强

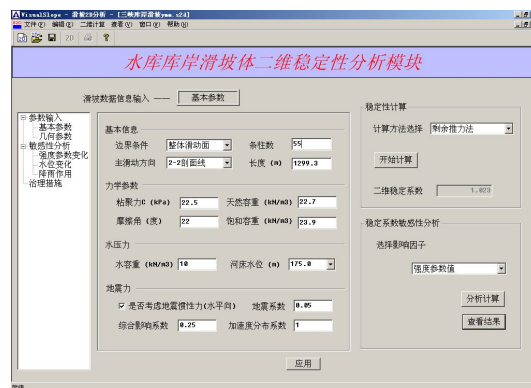


图4 滑坡体二维稳定性分析模块

Fig.4 2-D analysis module of slope stability

度参数变化、水位变化和降雨作用等因素)三个部分,其中基本参数包括滑坡体的基本信息、力学参数、水压力和地震力(是否考虑可选)等数据,可参考图 4。几何参数界面如图 5(a)所示,直接通过数据库读取二维条块几何数据,每个条块包含地表面、底滑面和地下水控制点 3 组数据;强度参数变化界面见图 5(b),包括凝聚力和摩擦角的改变;水位变化界面见图 5(c),包括水位上升和下降的改变参数;降雨作用参数界面见图 5(d)。

(a) 几何参数

(b) 水位变化

(c) 强度参数变化

(d) 降雨作用

图 5 滑坡体二维参数输入
Fig.5 2-D parameter input of slope

3.3 滑坡体三维稳定性分析模块

滑坡体三维稳定性分析模块界面如图 6 所示,在滑坡三维模型的基础上^[10],模块主要包括几何数据预处理、滑坡三维数据输入、稳定性计算和稳定系数敏感性分析四部分,其中滑坡模型几何数据预处理包括滑块编号、滑块体积、面积、底滑面、表面和地下水水位面等几何数据的处理;三维数据输入界面如图 7 所示,由基本参数、力学参数、受力参数和几何参数构成,各项具体内容可参见图示;敏感性分析因子主要包括强度参数、水位、降雨及其组合变化等,其参数输入内容与二维分析中类似,这里不再进行介绍。

3.4 滑坡体稳定性计算结果可视化分析模块

滑坡体稳定性计算结果可视化分析模块界面如图 8 所示。该模块主要是将上述二、三维稳定性计算、敏感性分析、治理措施分析,以及涌浪计算结果^[11]等数据通过各种图表的方式进行可视化显示,查看方式可选择全部(即列表+数据+图形)、列表+

数据、数据、数据+图形、图形等多种形式,且在图形显示中可交互调整标题、坐标轴、字体、线型、颜色等,便于结果的查看与分析。



图 6 滑坡体三维稳定性分析模块
Fig.6 3-D analysis module of slope stability

(a) 基本参数

(b) 力学参数

(c) 受力参数

(d) 几何参数

图 7 滑坡体三维参数输入
Fig.7 3-D parameter input of slope

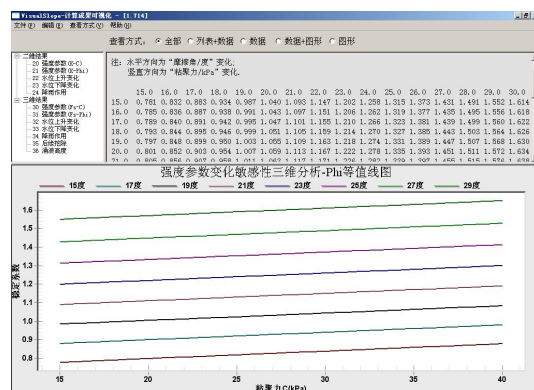


图 8 滑坡体稳定性计算成果可视化分析模块
Fig.8 Visual analysis module of stability computing results

3.5 滑坡体失稳三维动态模拟分析模块

滑坡体失稳三维动态模拟分析模块界面如图 9 所示。该模块主要根据滑坡体失稳数值模拟计算结果对其运动过程进行动态模拟演示^[11],并能获得相应时刻的库区水位、动态稳定系数、加速度、速度、位移和入江体积等信息,同时也可通过输入时间静态查询相应的演示面貌和信息数据。

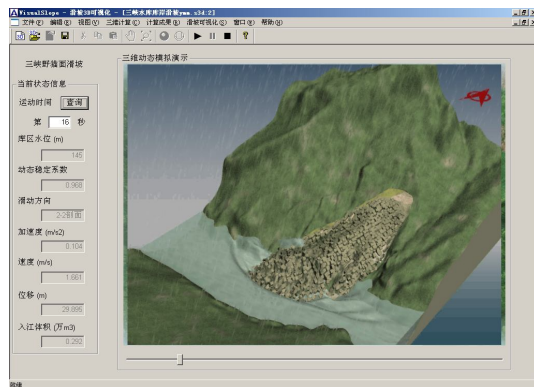


图 9 滑坡体失稳三维动态模拟分析模块

Fig.9 3-D dynamic simulation analysis module of slope instability

4 结 语

基于水库库岸滑坡体稳定性计算分析理论、滑坡三维数字建模技术和可视化动态仿真技术等理论方法和技术,采用 VC++研制开发了水库库岸滑坡体稳定性与三维可视化模拟分析系统 VisualSlope。该系统的实现过程分为系统分析(建立新系统的逻辑设计方案)、系统设计(建立新系统的物理设计方案)、系统开发与实施三个阶段。系统编制实现采用了面向对象的程序设计思想,较大地提高了程序开发效率和可靠性。

VisualSlope 系统特色之处在于与三维地质建模 VisualGeo 系统结合,通过直接读取三维滑坡模型图形对象库和数据库中的几何参数数据,进而完成稳定性计算、结果可视化分析和失稳动态三维可视化模拟与演示分析,提高了该系统的双重性和开放性,具有良好的可操作性和软件维护性。软件功能丰富,具有一定的通用性,实用性强,为库岸滑坡的稳定性分析与防治提供了先进的应用平台。

参 考 文 献

[1] 王志旺, 杨健, 张保军, 等. 水库库岸滑坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1837—1840
WANG Zhi-wang, YANG Jian, ZHANG Bao-jun, et al. Study of stability of landslide of reservoir area[J]. *Rock*

and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1837—1840.

- [2] 吕杰堂. 数字滑坡技术中的三维滑坡模型研究[博士后论文 D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2002.
- [3] 冯树仁, 丰定祥, 葛修润, 等. 边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 657—661.
FENG Shu-ren, FENG Ding-xiang, GE Xiu-run, et al. 3D limit equilibrium method for slope stability and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 657—661.
- [4] XIE M, ESAKI T, ZHOU G Y, et al. Geographic information systems-based three-dimensional critical slope stability analysis and landslide hazard assessment[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(12): 1109—1118.
- [5] 姜清辉, 王笑海, 丰定祥, 等. 三维边坡稳定性极限平衡分析系统软件 SLOPE^{3D} 的设计及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1121—1125.
JIANG Qing-hui, WANG Xiao-hai, FENG Ding-xiang, et al. Slope^{3D}—A three-dimensional limit equilibrium analysis software for slope stability and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(7): 1121—1125.
- [6] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [7] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 等. 岩质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [8] 张鲁渝, 欧阳小秀, 郑颖人. 国内岩土边坡稳定分析软件面临的问题及几点思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 166—169.
ZHANG Lu-yu, OUYANG Xiao-xiou, ZHENG Ying-ren. Problems and thoughts of development of slope stability analysis software in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(1): 166—169.
- [9] 钟登华, 李明超. 水利水电工程地质三维建模与分析理论及实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 7—13.
- [10] 李明超, 胡兴娥, 安娜, 等. 滑坡体三维地质建模与可视化分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1355—1360.
LI Ming-chao, HU Xing-e, AN Na, et al. 3-D geological modeling and visual analysis of landslide mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1355—1360.
- [11] 钟登华, 安娜, 李明超. 库岸滑坡体失稳三维动态模拟与分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 360—367.
ZHONG Deng-hua, AN Na, LI Ming-chao. 3-D dynamic simulation and analysis of slope instability of reservoir banks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 360—367.