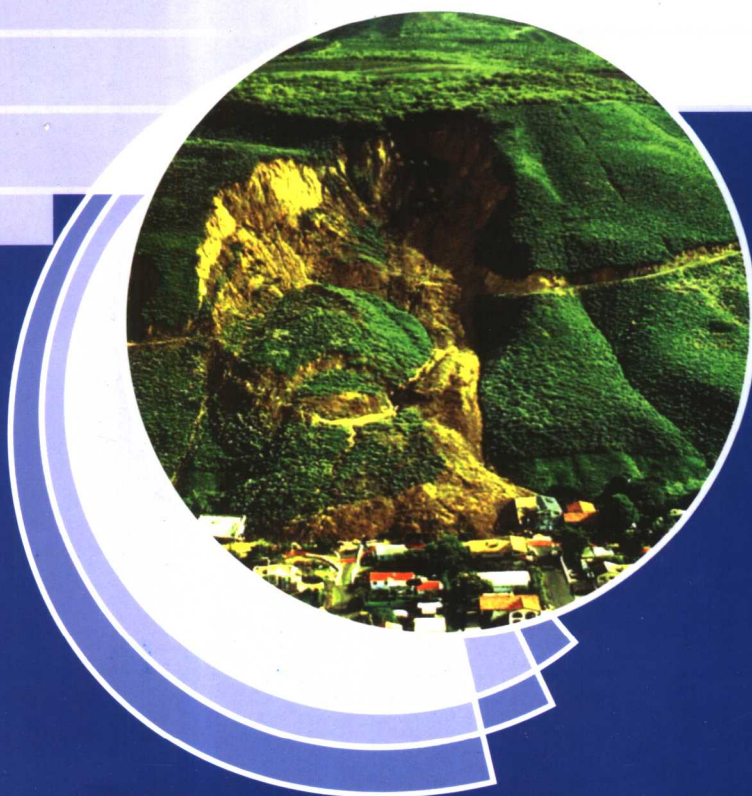


● 国家自然科学基金资助

● 中国地质大学学术著作出版基金资助

斜坡工程GIS 系统研究与应用

胡新丽 唐辉明 编著



中国地质大学出版社

国家自然科学基金资助
中国地质大学学术著作出版基金资助

斜坡工程 GIS 系统研究与应用

胡新丽 唐辉明 编著

中国地质大学出版社

内 容 摘 要

本书较系统地总结了斜坡工程的工作特点和研究思路,指出了斜坡工程研究中的关键问题。在此基础上,依据 GIS 的特点,提出了斜坡工程 GIS 系统的构建框架。针对斜坡工程的斜坡工程空间预测和斜坡治理两大主要内容,在进行信息分类、指标体系分析、模型分析、优化设计理论方法分析的基础上,分别进行了空间预测 GIS 系统和斜坡治理工程系统设计。采用面向对象、系统集成的编程策略,以 MapGIS 和 AutoCAD 为平台,开发了具有专业性和实用性的斜坡工程 GIS 系统。并将其成功地应用于工程实践。在斜坡工程的勘察→评价→治理设计→监测工作的系统化、一体化研究方面进行了有益的探索。

全书共分七章。体系合理,理论严谨,内容丰富全面,深入浅出,实用性强。可供工程地质、岩土工程、地质工程、水利工程、土木工程、环境工程的专业人员使用,也可作为上述专业的本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

斜坡工程 GIS 系统研究与应用/胡新丽,唐辉明编著. —武汉:中国地质大学出版社, 2005. 11

ISBN 7-5625-2071-2

I. 斜…

II. ①胡… ②唐…

III. 斜坡工程-GIS 应用研究

IV. P64

斜坡工程 GIS 系统研究与应用

胡新丽 唐辉明 编著

责任编辑:徐润英

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路388号)

邮编:430074

电话:(027) 87482760

传真:87481537

E-mail: cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

Http://www.cugp.cn

开本:787毫米×1092毫米 1/16

字数:270千字 印张:10 彩图:18

版次:2005年11月第1版

印次:2005年11月第1次印刷

印刷:中国地质大学出版社印刷厂

印数:1—1500册

ISBN 7-5625-2071-2/P·661

定价:35.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前言

斜坡工程研究是工程地质领域的重要研究方向。斜坡工程是一项复杂的系统工程,具有特定的工作特点。斜坡工程勘察—评价—治理设计—施工—监测整个过程涉及的数据信息量巨大,从区域信息到单体斜坡信息,从区域斜坡稳定性预测、区划到单体斜坡稳定性评价,从自然斜坡治理到人工边坡治理,从斜坡信息静态管理到基于 3S 技术的动态信息监测,数据类型繁多,预测模型、监测方法多样。

20 世纪 80 年代以来,随着计算机技术的发展,地理信息系统得到了迅猛的发展。目前,地理信息系统已在地质领域得到广泛的应用,其强大的空间信息管理和空间分析功能使地质研究工作进入了一个数字化、定量化时代;其强大的二次开发函数库为专业 GIS 的设计开发提供了强大的工具。

近年来,国内外工程地质领域的工作者已先后进行了斜坡工程的 GIS 应用研究,主要集中在地质灾害区划、滑坡信息静态管理等领域,对斜坡工程从勘察→评价→治理设计→施工→监测的整个过程的整体 GIS 应用及系统设计、开发研究较少。我们自 90 年代以来较系统地开展了斜坡工程中的 GIS 技术研究,并在三峡工程库区、黄河中下游岸坡区、京珠高速公路边坡工程中得到成功的应用。

本书将我们的研究工作进行了较系统的总结。全书共分 7 章。第一章总结了国内外的研究现状;第二章总结了斜坡工程的研究思路,指出斜坡工程研究中的关键问题;第三章提出了从信息数据采集→空间数据库→评价指标体系和数据标准化→斜坡工程空间预测→斜坡治理设计→时间预测→预测成果可视化、图形化显示的斜坡工程 GIS 的技术路线和设计思路;第四章依据斜坡工程空间预测研究的特点,提出了斜坡工程空间预测 GIS 的设计思路;第五章提出了从斜坡稳定性评价成果分析→人工边坡开挖设计→推力与土压力计算→治理工程优化设计的斜坡治理工程系统的信息化优化设计思路和模型方法;第六章采用面向对象、系统集成的编程策略,利用 MapGIS 平台,使用先进的可视化编程语言,开发了具有模块可移植性、专业性和实用性的斜坡工程空间预测 GIS 系统。第七章介绍黄河下游工程地质信息管理、高阳镇库岸斜坡稳定性评价及治理工程设计、京珠高速公路湖北大悟段高边坡斜坡稳定性评价及治理工程优化设计等典型工程。

本书的撰写得到了吉林大学肖树芳教授的指导,得到中国地质大学工程学院老师们的帮助及黄河水利委员会勘测总队的领导和同行的支持。国家自然科学基金(No. 40202028)、中国地质大学出版基金给予了部分资助。在此,谨致以深切的谢意。

由于编者水平有限,书中错误之处恳请指正!

编著者

2005 年 10 月于武汉

Abstract

The outline of the research of the slope engineering is summarized and the key problems of it is presented in this book. Based on the characteristics of the GIS, the frame of the slope engineering GIS was founded. According to the main content of the slope engineering space prediction and the slope improvement, the information classifying, the evaluation index system, space prediction model, the theory and method of the slope optimal improvement design are analyzed. Based on these, the slope engineering space prediction system and the improvement system are separately designed. Adopting tactic of the object—oriented program and system compose, and taking MapGIS and AutoCAD as development platform, the GIS for the slope engineering was developed, which is modular portability, specialty and practicability. The software is applied to the practice. This work is valuably discuss for the systematism and integration of the slope engineering from the investigation→evaluation→improvement design→monitoring and prediction.

This contents of the book are divided into 7 chapters. For this book, the system is reasonable, the theories are preciseness, the contents are abundant and the system is logical. This book is useful to professional engineers of engineering geology, geological engineering, geotechnics, hydraulic engineering, civil engineering and environmental engineering. The book can be taken for the teaching reference in these majors.

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 研究意义	(1)
第二节 国内外研究现状与发展趋势	(2)
第二章 斜坡工程的研究特点	(11)
第一节 斜坡工程的研究思路	(11)
第二节 斜坡工程中的关键问题	(14)
第三章 斜坡工程 GIS 系统框架设计	(17)
第一节 GIS 概述	(17)
第二节 GIS 在地学中应用的现实性、高效性	(20)
第三节 斜坡工程 GIS 系统的设计框架	(20)
第四章 斜坡工程空间预测评价的 GIS 系统设计	(22)
第一节 斜坡工程空间预测评价 GIS 系统的设计思路与策略	(22)
第二节 系统构成及主要功能	(24)
第三节 空间数据信息的标准化	(27)
第四节 斜坡工程区域地质灾害空间预测 GIS 模型	(34)
第五节 单体斜坡稳定性评价模型	(45)
第五章 斜坡治理工程系统设计	(49)
第一节 斜坡工程信息化设计与施工思路	(49)
第二节 斜坡治理工程系统的设计思路与策略	(52)
第三节 斜坡治理工程系统的构成及主要功能	(53)
第四节 人工边坡开挖优化设计模型	(54)
第五节 斜坡治理工程推力及土压力计算方法	(55)
第六节 斜坡治理工程设计模型	(56)
第六章 斜坡工程 GIS 系统开发	(86)
第一节 系统设计与开发方法	(86)
第二节 系统主界面和主控模块的设计	(86)
第三节 斜坡工程空间预测评价 GIS 系统实现	(87)
第四节 斜坡治理工程系统实现	(95)
第五节 监测子系统实现	(96)
第七章 应用实例	(97)
第一节 黄河下游堤岸工程地质信息系统	(97)
第二节 长江三峡库区兴山县高阳镇库岸斜坡稳定性评价及治理工程设计	(100)
第三节 京珠高速公路湖北大悟段 K34 高边坡斜坡稳定性评价及治理工程优化设计	(128)
第四节 河北省石家庄灵寿县下苗家庄滑坡监测网布置及分析	(134)
参考文献	(140)

Contents

Chapter 1 introduction	(1)
Section 1 Research significance	(1)
Section 2 Related research and development in world	(2)
Chapter 2 research of the slope engineering	(11)
Section 1 Research methods of the slope engineering	(11)
Section 2 Key problems of the slope engineering	(14)
Chapter 3 GIS frame design of the slope engineering	(17)
Section 1 GIS introduction	(17)
Section 2 Reality and high efficiency of the GIS application in geoscience	(20)
Section 3 Design GIS of the slope engineering	(20)
Chapter 4 GIS design of the space prediction and evaluation of the slope engineering	(22)
Section 1 Design GIS methods and strategy of the space prediction and evaluation of the slope engineering	(22)
Section 2 System structure and main function	(24)
Section 3 Standardization of the space data and information	(27)
Section 4 GIS models of the regional geological hazard prediction of slope engineering	(34)
Section 5 Stability evaluation models of the single slope	(45)
Chapter 5 Design of the slope improvement system	(49)
Section 1 Research method of construction and information optimal design scheme of slope engineering	(49)
Section 2 Design method and strategy of the slope improvement system	(52)
Section 3 Structure and main functions of the slope improvement system	(53)
Section 4 Optimization design models on the excavation of the slope	(54)
Section 5 Calculation methods of pushing force and soil stress in the slope improvement engineering	(55)
Section 6 Design models of the slope improvement engineering	(56)
Chapter 6 GIS development of the slope engineering	(86)
Section 1 Design and development methods of system	(86)
Section 2 Design of the main interface and the main control module of system	(86)
Section 3 Development of space prediction and evaluation of slope engineering GIS	(87)
Section 4 Development of the slope improvement system	(95)
Section 5 Development of the monitoring subsystem	(96)

Chapter 7 Application Examples	(97)
Section 1 Engineering Geology Information System of the bank of the lower Yellow River	(97)
Section 2 Bank Slope stability evaluation and improvement design along Gaoyang in Xingshan county in Three Gorges Areas	(100)
Section 3 High slope stability evaluation and improvement optimization design of Dawu section of Jingzhu Highway in Hubei province	(128)
Section 4 Monitoring network design and analysis of landslide in Xiamiaojia village in Lingshou county in Hebei province	(134)
References	(140)

第一章 绪 论

第一节 研究意义

斜坡工程是工程地质十分重要的研究方向,同时也是环境工程地质、地质灾害、岩土工程的重要研究内容。它涉及到我国基本建设的各个领域,从城市建设到公路、铁路交通建设、水利水电工程建设,从一般的工程建设到我国国家重大工程建设。因此,斜坡工程研究工作的成败关系重大。

我国幅员辽阔、人口众多,自然地理条件与地质环境极其复杂,斜坡类型众多,需要研究的内容多,任务繁重。斜坡工程是一项复杂的系统工程,具有其特定的工作特点。斜坡工程从勘察→评价→治理设计→施工→监测的整个过程中,所涉及的数据信息量巨大,从区域信息到单体斜坡信息,从区域斜坡稳定性预测、区划到单体斜坡稳定性评价,从自然斜坡治理到人工边坡优化设计,从斜坡信息静态管理到基于 3S 技术的动态信息监测,从斜坡的稳定性评价预测到斜坡治理工程,数据种类繁多,预测模型、治理方法及监测方法多样。因此,急需总结并借助先进的技术手段,建立斜坡工程研究评价与治理设计系统,一方面用于管理大批的斜坡工程数据,达到信息共享的目的,更重要的是能够通过系统所具有的预测、评价模块,快速地完成斜坡稳定性评价工作,在此基础上,利用治理设计系统完成斜坡工程的治理工程设计工作。

斜坡分为人工边坡与自然斜坡,其破坏形式主要为滑坡或崩塌。据统计,滑坡灾害、崩塌灾害仅次于地震灾害,居第二位。特别是滑坡灾害,全国每年由于滑坡引起的直、间接经济损失达 200 亿元,用于滑坡治理的费用更高。因此滑坡预测治理已成为国家十分重视的研究领域。特别是近年来,随着城市化进程的加快、大型水利水电工程及交通建设的大力发展,例如长江三峡工程、长江及黄河上游在建和拟建的一系列大巨型水力发电工程、南水北调工程、山区铁路、公路尤其是高速公路工程等等,这些工程的数量和复杂程度是前所未有的,所遇到的工程地质问题也是十分复杂的。工程选址规划及城市扩建改造工程使斜坡工程问题日趋严重,迫使人们更加关注斜坡稳定性预测研究及治理优化设计研究。截止目前,在这一领域的研究取得了较大进步。但由于受传统设计方法和边坡本身系统的复杂性、模糊性等特点的约束和影响,使预测、设计的成果确定性、准确性较差,甚至引发工程事故,或造成人力、物力和资金的巨大浪费。当前斜坡稳定性预测评价及治理方面仍存在以下一些明显的不足之处:

- (1) 斜坡空间地质信息管理缺乏系统性,信息共享程度低。
- (2) 缺乏点与面结合的预测的系统性。
- (3) 预测成果的可视性差。

- (4) 预测评价成果与治理设计之间的联系性差。
- (5) 治理设计的优化和信息化程度低。
- (6) 信息化施工没有得到真正的实现。

这些问题不仅影响了斜坡预测的系统性、预测成果的实用性,而且影响了设计施工的合理性和安全性,更重要的是不同程度地影响了管理决策部门的决策,不利于土地资源的管理及有效降低经济损失。面对这种情况,建立适合我国管理特点的斜坡工程地质信息及斜坡工程预测评价与设计系统不仅是必要的,而且是紧迫的。

本书在斜坡工程地质信息综合研究,特别是在斜坡工程预测方法总结分析的基础上,结合 GIS 及 CAD 的特点,建立了预测评价与治理设计系统。该系统将斜坡工程地质信息数据库与图形库、方法库紧密结合,将斜坡地质灾害区域预测与单体斜坡稳定性预测评价有机联系,将预测评价与治理设计集于一体,提出斜坡工程“信息化”优化设计与施工的研究思想,并建立了各种常用斜坡治理优化设计模型。该系统具有两大功能:

1. 预测评价

系统预测评价结果既可以用作大范围宏观决策,又可以为单体斜坡防治提供必要资料,具有可视性强、传输功能和复制功能强及信息可加工的特点,可达到充分利用已有的资料信息,缩短模拟、评价周期和降低成本的目的。它不但可为滑坡的区域预测及单体斜坡,包括人工边坡的预测、监测、评价提供可靠支持,有效地获取可利用的土地资源及可持续利用方面的信息,而且,结果的可视化便于改善和提高管理决策部门的管理决策质量,还可快速完成斜坡的防治设计,为斜坡防治和城市各种工程建设提供快速服务。

2. 治理设计

依据信息化优化设计的思想,可利用系统提供的各种优化设计模型,快速合理地完成治理方案的设计及制图工作。

本书的重点是以 GIS 为基础的斜坡评价预测系统 GIS 的开发及以 CAD 为基础的设计系统的开发。

第二节 国内外研究现状与发展趋势

一、GIS 的发展历史及应用范围

地理信息系统 (Geographic Information System) 是随着信息时代的发展而产生的以采集、存储、描述、检索、分析和应用与空间位置有关的相应属性信息的计算机系统。它是集计算机学、地理学、测绘遥感学、环境科学、空间科学、信息科学、管理科学和现代通信技术为一体的一门新兴边缘学科。GIS 有两个显著特征:一是不仅可以像传统的数据库管理系统 (DBMS) 那样管理数字和文字 (属性) 信息,而且可以管理空间 (图形) 信息;二是可以利用各种空间分析的方法,对多种不同的信息进行综合分析,寻求空间实体间的相互关系,分析和处理在一定区域内分布的现象和过程。

地理信息系统产生于 20 世纪 50 年代,1956 奥地利测绘部门首先利用计算机建立了地籍数据库。随着计算机技术的发展和数字空间数据使用价值的提高,GIS 研究和建设得到了飞速的发展。目前,国外成熟的 GIS 软件主要有美国的 ARC/INFO、ILWIS、MAPINFO,

国内的软件有中国地质大学的 MapGIS、北大的 CitySTAR 及武汉测绘科技大学的 Geostar。GIS 以其强大的功能,已广泛地应用于各个学科领域,如城市规划中的管网、交通、火警预测的管理,环境保护方面的水土流失预测、大流域土壤侵蚀模糊评判,区域环境质量评价、国土资源管理、面向保险业的大面积自然灾害信息系统研究,军事领域等等。

地理信息系统在地质领域的应用也得到了迅猛的发展。1970—1976 年,美国地质调查局就建成了 50 多个信息系统,作为地理、地质和水资源等领域空间信息管理的工具。在基础地质方面,GIS 主要用于区域地质调查、构造形迹模拟和地质体三维模型分析。1986 年,德国研制的 DASCH 系统,实现了利用计算机编制各种地质图件的愿望。英国在威尔士中部的填图项目中,采用了专门设计的野外记录本,所有的地质测线、钻孔等数据存放在数据库中,将这些信息输入到 GIS 中与光栅扫描的地形数据综合,最后由计算机根据需要生成地质图和应用图。1985—1989 年,美国、加拿大、澳大利亚三国先后开始实施新一轮的地质填图计划,提出了建立国家地质图数据库的总目标。澳大利亚确定了支持 GIS 的数据库的格式要求,野外工作利用笔记本式计算机采集数据,建立编图所需要的各类数据库,全部数据用 ORACLE DBMS 进行管理,GIS 采用 ARC/INFO。目前 GIS 已广泛地用于矿产预测评价、矿山突水预测、水资源预测管理、地面沉降研究、矿山平硐沉降对农业的影响评价、沙漠化灾害评价、泥石流灾害危险度评估、大流域水资源预测评价、岩溶发育预测研究、地震灾害分区及评价、地裂缝灾害评价等。

二、GIS 在斜坡工程的应用现状

GIS 在斜坡灾害研究方面的应用开始于 20 世纪 70 年代后期,80 年代后、特别是进入 90 年代以来其应用日趋广泛,目前 GIS 在斜坡灾害研究中的应用主要在以下四个方面。

1. 斜坡信息管理

斜坡信息管理是指利用 GIS 强大的资料存贮、维护、更新、查询、检索以及以图形形式进行的可视化查询和显示功能——空间数据库功能,将以图形形式保存的地图和表格资料通过数字化处理进入数据库管理系统,并以一定的时间和空间序列组织这些资料。在此基础上进行历史滑坡的条件查询、滑坡发生的时间和空间规律分析。1992 年,美国的 Keane-James-M 建立研究了高速公路斜坡滑坡数据库,美国联邦地质调查局的 Bliss-Norman-B 等在 1998 年建立了基于 GIS 的斜坡地质信息数据库、Van DerHurst-Jrffey-J 研究了工程地质灾害数据库、我国的戴福初等于 1999 年建立了香港地区 1984—1996 年历史滑坡空间数据库。

2. 滑坡与动、静态环境因素相关分析

通过对滑坡空间分布及其环境背景数据的 GIS 图层操作,获得滑坡与影响因素综合数据库,在此基础上利用 GIS 的统计分析功能对数据库属性项进行统计分析,可获得滑坡发生频率与各影响因子的统计图,进而可据此对易滑地质环境条件进行综合分析。如 Larsen 和 Torres-Sanchez (1998) 对 Puerto Rico 的典型区域以航片为数据源,以 GIS 为工具,对滑坡发生频率与环境背景因素进行了统计;Gao-Jay (1992) 采用航片为滑坡数据源,将解译的滑坡数据库与地形数据进行叠加分析;戴福初等 (2000) 对香港大屿山的易滑地形条件进行了统计分析。

3. 滑坡灾害空间预测系统

斜坡稳定性空间评价预测难度较大,从某种意义上讲,斜坡稳定性的空间预测问题比时间预测问题更为复杂和难以解决。国内外滑坡灾害研究者已提出和使用了许多斜坡稳定性空间评价的预测方法,如逻辑信息量法、综合信息量法、模糊综合评判法、聚类分析法等等,尽管取得了一些研究成果,但研究成果可操作性、实用性欠佳,基本上没有可视化、图文一体化效果,也缺乏系统性。目前,国内外滑坡研究者在致力于滑坡理论、方法和治理研究的同时,更注重基于高技术的 GIS 之上的滑坡灾害空间预测的系统化研究,将传统的预测方法与 GIS 技术相结合,来进行滑坡空间预测。

根据数据源的精度和研究区空间范围的大小, Leroi 把 GIS 支持下的滑坡灾害评价划分为三个层次:区域层次 (1:100 000), 主要为滑坡编录;流域层次 (1:25 000), 主要为灾害和危险区划;局域层次 (1:5 000), 为确定性和统计风险评价。戴福初等将其划分为三个层次:区域层次 (1:25 000~1:50 000)、局域层次 (1:5 000~1:10 000)、场地层次 (1:1 000)。

GIS 支持下的区域滑坡层次和局域层次的预测和危险性评价是目前研究的热点,区域斜坡稳定性预测的理论依据是工程地质类比法,其评价模型主要有经验模型、统计模型、信息模型、模糊数学模型、非线性模型等等。主要是对现有滑坡的地质条件和作用因素之间的统计规律进行研究,在此基础上采用各种数学方法将各影响因素叠加来进行预测。如 Carrara、Dhakal-Amod-Sagar, Hanswn、Van-Westen-C-J, Montgomery-David-R、Gupta 和 Joshi、Niemann 和 Howes、Wang 和 Unwin、Atkinson、Rowbotham 等 (1990—1999) 先后采用因素分级评分模型、多因素复合条件分析、逻辑回归模型建立了区域斜坡评价及滑坡灾害风险评估的 GIS 模型; Soeters (1994) 等探讨了 GPS 和 GIS 技术相结合在滑坡识别、分析、预测评价方面的应用; Gao-Jay (1992) 采用 GIS 和 GPS 相结合的方法,探索了 GIS 中 DTM 在滑坡失稳分析中的应用方法; Matmon-Ari 等 (1998) 利用 GIS 技术进行了斜坡形成年龄确定; Luzi-L (1998) 等采用概率与确定性综合方法,利用 GIS 分析滑坡对地震的敏感性; Miller-David-J (1998) 利用 GIS 进行了大型滑坡形成演化研究; 殷跃平 (1997)、Amanti-Marco 等 (1998) 探讨了 GIS 在区域地质灾害预报的应用。总的来看, GIS 在斜坡区域和局域预测方面主要是静态的灾害敏感性评估方法,是进行滑坡预测。预测结果主要用于对区域防灾规划和国土开发规划。

对于区域层次的滑坡灾害动态评价,目前也有人进行研究,如戴福初等采用多时航片解译得到滑坡发生的时序和空间分布规律,结合触发因子——暴雨的失控规律,在 GIS 支持下,建立滑坡触发因子综合数据库,通过触发因子的强频规律分析得到不同周期下的滑坡灾害风险等级。但总的来说,这方面的研究还远远落后于静态评价方面。

对于单体斜坡,包括自然斜坡和人工边坡的稳定性评价,一般采用两种模型方法:

(1) 确定性模型与 GIS 结合的方法,得到斜坡稳定性系数或破坏概率分布图。该类模型多采用无限斜坡稳定性分析模型,对滑坡多为浅层平面滑动的斜坡区较合理。它既可考虑地震、地下水的影响,更可考虑降雨等动态因子,因此,可实现斜坡稳定性动态评价,进而考虑岩土体参数的随机性进行破坏概率分析。如 Terlien 等 (1995) 用 GIS 技术,将降雨入渗模型与无限斜坡稳定分析模型相结合,考虑岩土体参数的随机性,对降雨条件下斜坡稳定性进行概率评价; Wu、W 等 (1995) 将斜坡补给—排泄模型与无限斜坡稳定模型结合,在 GIS 环境中建立可考虑坡形对地下水汇聚影响的分布式斜坡稳定模型; Van Asch 等 (1996)

考虑地震作用对斜坡的影响,将 GIS 与无限斜坡稳定分析模型结合评价不同地震作用条件下的斜坡破坏概率空间分布;戴福初等(2000)考虑暴雨雨强——持续时间条件下的土体斜坡中地下水位变化对斜坡稳定性的影响,采用无限斜坡稳定分析模型,进行滑坡灾害的确定性分析。

(2) 复杂分析模型与 GIS 结合。常用的、成熟的复杂分析模型主要有两种:① 极限平衡分析法。主要包括 Fellenius 法、Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern Prince 法、剩余推力法、Sarma 法、楔体极限平衡分析法等;② 数值计算方法。主要包括有限元(FEM)法、离散元(DEM)法等。这些方法与 GIS 的结合使用,要求在 GIS 环境中开发滑坡稳定性分析的专业模块。对于数值模拟方法而言,尽管其发展很快,已出现了许多大型通用软件,如 ADINA, ANSYS, ABAQUS, MARC/NASTRAN, FINAL, FLAC, EFG 等程序,但是国内研制的软件的前后处理等不尽如人意;笔者将致力于开发 GIS 与数值模拟接口程序,充分利用 GIS 先进的输入、输出和空间分析处理功能,改善数值模拟的前后处理。

4. 斜坡灾害预警系统

主要根据斜坡预测评价结果,包括空间及时间预测成果,借助计算机网络系统发布灾害预警。该方面的研究国内目前刚刚启动,还有待于进一步发展。

总之, GIS 在斜坡方面的应用日趋广泛,主要应用点仍在地质灾害的区域预测方面,也有向单体稳定性预测发展的趋势。应用方法主要是静态预测方法,动态预测方面有待于发展。目前,国外对于 GIS 支持下的斜坡地质灾害预测系统研究也已经展开,例如 Mejia. M 等(1995)于 1995 年建立了地质灾害风险评估的综合预测决策支持系统,印度的 Thigale 等探讨了建立滑坡灾害分区制图数据库的途径, Dikau-Richard 等(1996)总结了数据库与 GIS 技术相结合在滑坡区域预测的应用状况;国内也有一些单位正在进行这方面的研究。但到目前为止,这方面的研究刚刚起步,研究成果还很少、很不成熟。

目前, GIS 在斜坡工程的应用强调综合应用 GIS 数据库与空间分析功能,从研究的总体状况看,仍存在以下几个问题:

- (1) 研究分散,系统性差,多为针对某一地区的专用模型。
- (2) 方法使用单一,方法库建设缺乏系统性。
- (3) 滑坡预测评价指标体系研究薄弱。
- (4) 数据库建设多样化,缺乏国家标准。
- (5) 传统的斜坡稳定评价方法与 GIS 的结合较少。
- (6) GIS 与治理设计系统缺乏集成。

三、斜坡治理设计的研究现状

(一) 斜坡工程设计特点

斜坡工程的设计作为工程设计,是一种决策过程(通常反复进行)。设计过程的基本要点包括目标及准则的确立、综合、分析、实施、试验及评价。决策及分析是这一过程的核心。Nadle(1986)曾提出了系统方法论及设计过程(SMD),将注意力集中于定义系统的目的,确定其复杂程度,将有效地增强工程师对于问题的准确认识。SMD 要点如下:

- (1) 设计是分层次的,这是理解设计系统的复杂程度、子系统及其联系的关键。
- (2) 设计是功能性的,这意味着设计成果必须满足优化的功能。

(3) 设计意味着决策, 也即它需经过详细的评价后从多个方案中选择一个最优的方案。

(4) 设计是反复进行的, 需对已有设计结论 (甚至目的、功能等) 进行协调、变化、改进。

(5) 设计追求最优化价值, 设计的目的是寻求系统的全局最优, 而不是追求系统中各单元因子的局部行为。

崔政权等指出: 对于边坡工程的设计与加固, 应贯彻“顺应性”和“协调性”准则。顺应是求得人类活动同自然界之间相互协调的第一前提条件, 即充分利用自然界造就出来的稳定状态条件, 改造那些处于非稳定态的自然条件使之处于新的稳态。“顺应性”和“协调性”准则的实质是要充分利用自然界自身的稳定条件, 改造不稳定部分, 使边坡长期处于稳定状态, 依山就势和因地制宜是该准则实施的具体体现。

对于岩石工程设计, 经历了一个不断发展完善的过程, 如 Hoek 及 Brown 于 1978 年和 1988 年提出了岩石工程设计过程指南; Brown (1985) 强调地下开挖设计中的理论及分析途径; Bieniawski (1982) 提出了岸坡岩石工程设计的六项原则 (如独立性、最小不确定性、简化、艺术化、最优化、可施工准则), 作为评价和优化可选择设计的准则; Starfield 和 Cundell (1989) 强调了岩石力学模型方法的重要性; Bieniawski (1992) 提出了岩石工程设计方法。

综合考虑工程设计一般特征及斜坡工程系统的特点, 总结出以下斜坡工程设计的特点:

(1) 斜坡工程受复杂的地质环境、水文气象、人类活动和要求的制约, 是个复杂的构筑物。岩体本身的物理力学特性、岩体力学作用使斜坡工程设计具有复杂性。

(2) 斜坡工程设计具有阶段性。原因是在勘测设计阶段取得的技术资料不可能十分完全地揭露深部地质条件, 不容易准确地测定岩土力学参数, 也更难以具体地预测施工对岩体特性及结构的影响, 即边坡工程设计信息是逐渐获取的, 对高边坡岩体工程的认识只能是具有阶段性的。因此边坡工程设计是一个动态的、序贯的决策过程, 设计的确定及优化也是动态的, 具有阶段性。

(3) 斜坡工程设计首先必须明确影响其稳定的因素, 并确定主、次因素。例如对岩质斜坡的地形要素、岩性要素及地质构造要素要分别调查分析清楚, 确定主要控制因素; 边坡岩体的加 (卸) 载应力途径、本构关系、长期变形 (时效变形)、整体稳定性及局部块体稳定性分析问题是岩体边坡工程设计必须面对的十分重要的课题。

(4) 地下地表水的影响, 是斜坡治理设计时必须考虑的因素, 一般方法为首先建立渗流场模型, 在明确地下水补、径、排途径, 动、静水压力形成条件及地下水化学成分的基础上, 进行设计推力计算及排水系统设计。

(5) 斜坡工程设计应考虑安全性、经济性的高度统一, 追求以最小的经济代价取得符合要求的安全性。而安全性问题中则包括着边坡岩土体的稳定及变形问题。安全性准则要求在建设期及运行期有足够的整体稳定及不产生可破坏边坡运行功能的过大变形。在具体设计中表现为方案选择确定既要考虑边坡岩土体的稳定, 又要考虑经济因素, 在设计方案的选择和技术方法设计中进行优化。

(6) 斜坡治理设计应充分体现“顺应”与“协调”原则。即要充分考虑人工工程与岩土体之间的协调和相互作用。

(7) 施工技术是边坡工程设计的重要内容, 设计中应根据斜坡和设计方法特点, 明确施

工顺序、开挖工序、开挖爆破、施工处理质量控制等等内容。

(8) 斜坡工程设计具有风险性, 风险来自于设计参数、模型、方法, 具有不确定性, 因此, 在设计施工过程中, 应及时搜集数据资料, 实现信息化设计与施工, 最大限度地降低设计风险, 提高安全性。

(二) 斜坡治理工作理论思想

斜坡治理工作是斜坡工程的核心内容之一, 是人们一直以来十分关注的重要问题。自 20 世纪 70 年代以来, 斜坡的治理问题越来越受到人们的重视, 人们一直在力图寻找出边坡治理设计的一项可靠模式。然而, 由于边坡问题本身的复杂性和科学技术发展水平的限制以及传统工程设计体制的制约, 人们对边坡的影响因素和形成机理还没有完全认识清楚, 边坡治理设计与实际脱节, 使得治后边坡存在诸多安全隐患甚至破坏失稳。

目前, 在斜坡治理设计中, 引入了系统论、信息论、控制论等思想方法, 使斜坡治理设计工作更加系统, 但仍然未能将斜坡作为动态系统考虑, 未能充分考虑斜坡自身的变形过程与治理工程施工进程、治后变形发展对设计的反馈影响, 缺乏优化意识或优化单一。

近年来, 由于非线性科学的深入研究, 特别是诸多先进设计研究理念的深入, 人们认识到: 斜坡治理工程是一项复杂的系统工程, 其治理设计应属于一种系统设计, 具有地质工程的非线性、随机性, 不同于一般结构工程设计的确定性。以系统论、信息化为基础的边坡优化治理系统, 是贯穿于勘察、设计、施工全过程的动态反馈设计, 是适合斜坡工程复杂性设计问题的有效模式。

近 30 多年来, 国内外许多学者提出了斜坡工程研究各种各样的新理论、新方法, 取得了巨大进展。例如, 在岩质边坡方面, 孙玉科等 (1965) 提出的“岩体结构”理论的学术观点, 谷德振教授著的《岩体工程地质力学基础》, 孙广忠的专著《岩体结构力学》, 都提出了“岩体结构”这一对岩质工程研究具有巨大影响的理论观点, 明确提出了“岩体结构控制论”的观点, 为此类工程地质研究奠定了理论基础和指明了方向。1974 年英国 M. Hoek 的《岩石边坡工程》, 1977 年加拿大出版的《露天矿边坡手册》, 揭示了国外岩石边坡的研究情况, 并对此后我国边坡研究产生了很大影响。80 年代以来, 各种先进技术手段的应用, 使人们对岩石边坡的认识更加系统化。如孙玉科等提出的边坡工程地质模型思想、数值模拟技术, 钻孔岩芯定向钻探技术、CAD 技术、边坡可靠性分析等。同边坡研究的飞速发展相比, 边坡设计却发展缓慢, 除了技术原因外, 主要是受设计观念、体制、认识的影响。传统的边坡设计将地质与设计分离, 使得设计与实际往往脱节。90 年代以来, 由于认识的深入和实践经验的丰富, 边坡工程地质研究逐步向设计方面延伸, 边坡设计工作也越来越依靠工程地质方面的研究, 开始出现了工程地质与设计相结合的新局面。特别是近几年来, 将系统论、信息论的优化设计方法应用于边坡设计中, 提倡勘察——设计——施工——反馈设计的动态设计模式, 不仅将设计与地质紧密地联系了起来, 更为重要的是将地质作为设计的一个不可或缺的组成部分。

斜坡治理设计是一项较为繁琐的系统设计, 包括对场地工程地质、环境地质条件的分析, 边坡体稳定性评价, 治理方案选取, 治理措施细化优化, 施工过程监控、反馈等。目前, 各部分的发展情况并不平衡。

(三) 斜坡治理方法

斜坡工程治理方法很多, 目前常见的方法有: 削坡、挡土墙、抗滑桩、锚拉桩、锚 (杆

或索)喷(喷射混凝土)(以下简称锚喷)、预应力锚索、格构锚固、浆(干)砌石护坡、混凝土板护坡、排水工程等。由于缺乏对某些方法加固机理的深入认识,所以在其推广与应用中,造成了设计与实际条件严重不符,设计与施工脱节,边坡施工后发生边坡垮塌事故或加固过于偏重安全,浪费严重。因此,本文将对各种常用方法削坡、挡土墙、抗滑桩、锚喷加固、格构锚固及预应力锚索、岸坡护坡等的优化设计进行分析研究。

(四) 边坡系统优化设计

从系统论、耗散结构理论的观点出发,斜坡系统是一个开放的动态体系。在降雨入渗、地震作用、重力作用以及人类工程活动等内、外动力作用下,系统的各个部分之间以及系统与外部环境之间不断地进行着物质、能量和信息交换,交换的结果是系统的熵值减小,实现无序→有序、平衡态→近平衡态→远离平衡态的演化和发展。其具体过程是:随着外界环境的变化,处于临空面附近的岩土体单元释放荷载使原有的平衡被打破;坡体内的应力状态也随之发生变化,局部应力集中超过了该部位岩土体的容许强度,引起局部的剪切错动、拉裂并出现小位移。各子系统之间的作用是暂时性的,还没有造成整体性的破坏,处于一种局域不平衡状态,为边坡演化的非线性平衡区;随着边坡变形的进一步发展,以及与外界物质和能量的不断交换,系统的开放程度越来越大,原有的破裂面不断扩大,破裂面附近的岩土体开始超过岩土体的临界强度发生累进性破坏,一旦破裂面互相贯通,便形成滑坡。

边坡工程是一项复杂的系统工程,涉及工程地质和水文地质、工程力学与工程结构、土力学与基础工程,还涉及工程施工与工程管理,是融多种学科于一体的综合性学科。边坡工程是由若干具有独立功能的体系和部分组成的整体。无论是设计还是施工,均应从这一整体的系统出发,只有系统各部分的协调,才能构成良好的整体。就某一具体的斜坡工程而言,既要注意坡体的工程地质性质,又要考虑坡体区域的水文地质条件;既要合理估算边坡的稳定性,又要分析各种因素的影响,同时,也应考虑整治措施及其产生的影响。边坡开挖的方式与边坡安全稳定直接相关,边坡开挖方式及开挖参数对边坡开挖阶段的稳定性起着重要作用,而边坡区域环境对边坡支护方案的确定具有制约作用。因此,确定边坡设计方案时,要求各部分的状态在系统协调下整体效益最优。

通过大量的工程实践,人们已认识到边坡工程设计不同于一般的结构工程设计。由于边坡系统的不确定性,使得边坡工程设计应是动态的、适应工程地质条件变化的信息化设计,贯穿于工程设计、施工的全过程。近年来,在工程实践中,已越来越重视优化设计,如引用可靠性理论进行边坡优化设计、信息化设计与施工,但多从经济、技术角度进行分析、优化,优化目标、优化指标单一,不能体现整个边坡系统的最优化。

工程地质学近年来在信息化设计方面取得了重要进展,已初步形成理论与方法体系。特别是伴随大量复杂交通工程的出现,边坡工程地质的理论进一步深化,方法不断更新,地质灾害勘察、设计、施工一体化思想逐渐成形,大大促进了工程地质信息化设计的发展。

工程地质信息化设计的两项重要技术是数值模拟与岩体结构面网络模拟,它们的不断成熟与发展,为信息化设计提供了重要保证,GIS的运用使工程地质综合技术应用成为可能。

一般而言,大多数边坡工程都是受制于一定的在建或已建工程、设施(如公路、铁路、航道、厂房、住宅及名胜古迹等)而产生的人工边坡,边坡前缘或坡角线位置是一定的,在此基础上的边坡设计是以限定的坡角线为边坡前界,综合分析边坡稳定性与边坡形态和开挖、支护方式的关系,确定最优边坡角,合理的开挖、支护方案,使边坡系统各部分的状态

在系统综合协调下整体效益最优的优化设计,且应是结合施工的信息化反馈设计。

针对斜坡工程的不确定性、复杂性、非线性等特点,在边坡工程设计中采用信息化设计方法。这个过程可概括如下:

(1) 依据地质调查、评价结果确定最优边坡角,合理的开挖、支护方案,使边坡系统各部分的状态在系统综合协调下整体效益最优的优化设计。

(2) 输入施工过程中采集到的资料和反分析结果对原有设计方案进行正分析;根据正分析结果,设计者判断原有设计方案是否需要修改。

(3) 如果需要修改设计方案,在联机帮助下,再次利用优化方法,对每种类型的修改方案进行优化,得到既满足设计要求又满足施工要求,而且经济性好的优化方案。

(4) 设计者对经济优化的几种不同修改方案进行的筛选,必要时再进行一些修改,并转至第(3)步进行进一步的优化,直至得到一个满意的修改方案为止。

(5) 进行选定修改方案的细部设计及施工组织设计,打印输出各种图形、文件,交给施工单位使用,结束反馈设计。

总之,斜坡工程设计已从阶段性常规设计发展到对应于系统论的观点的斜坡工程动态的工程地质信息化优化设计。

(五) 施工与监测

施工是设计的实现阶段,施工技术的合理性是工程质量的重要保障。更重要的是,施工阶段的监测数据采集及其信息分析是进行进一步优化设计的基础。因此,在设计阶段和施工阶段必须按照一定的原则,依据具体斜坡的特征选取适当的监测方法,建立合理的监测网。

在施工阶段,除了严格按照设计及相关国家规范进行施工、验收外,另一重要的工作内容是进行施工地质信息的采集以及监测数据的采集、分析。一旦发现问题,及时反馈有关设计单位,进行设计优化。

从环境岩石力学和工程建设的角度出发,斜坡工程监测应包括三个方面的内容,一是对边坡体的监测,二是对边坡环境的监测,三是对结构工程的监测。当然,监测也应体现监控。监测网的布置应能覆盖整个斜坡工程区,而且应突出重点。监测工作分为三步:第一是准确地建立监测网;第二步是进行监测数据的采集,包括群策群防和各种监测仪器数据采集;最后依据监测数据,校验设计理论、数学力学模型、公式、参数、荷载、材料特性等的正确性和可靠性,为改进或完善设计提供依据。目前采用的主要监测方法为:斜坡表面绝对位移监测、深部位移监测(钻孔倾斜仪)、裂缝相对位移监测、地下水动态监测、基室监测及工程的应变监测等等。

根据工程实践及杨志法等(1995)的总结,斜坡工程监测系统的设计一般依据以下原则:①可靠性原则;②位移为主的监测原则;③分层次监测原则;④关键部位重点优先的监测原则;⑤不干扰或少干扰原则;⑥信息反馈高效原则;⑦方便实用原则;⑧巡检信息与仪器监测信息并重原则;⑨经济合理原则。

总之,施工工作目前已从单一的按图施工、机械采集数据发展到注重施工技术方法选取、信息反馈的信息化施工阶段。

(六) 斜坡治理工作中存在的问题

斜坡治理工作尽管目前已得到了较大的发展,取得了一定的成果,但目前仍存在一些问题: