

董兆祥 等著

岩体斜坡稳定性 数字化动态预测

地质出版社

学术著作出版基金资助

岩体斜坡稳定性数字化 动态预测

董兆祥 杨小荟 于开宁 雷 霆 董 昕 著
王凡俊 刘国辉 李治广 柳玉青 吴献峰

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

全书共 11 章, 包括绪论、岩体边坡地质结构类型的划分、岩体边坡稳定性动态数字化分析方法概述、单滑动面边坡岩体结构三维稳定性数字化动态分析、楔形双滑动面岩体边坡稳定性动态数字化分析、同倾向双滑动面岩体边坡稳定性动态数字化评价、岩体边坡的定量设计、岩体边坡稳定性三维数字化动态量化方法的基础与理论、非稳定边坡治理决策、基于斜坡稳定性数字化动态模型的反分析方法、岩体边坡稳定性数字化动态分析方法应用工程实例。

本书可作为地质工程专业及相关专业的大专院校师生、技术人员和科研人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

岩体斜坡稳定性数字化动态预测/董兆祥等著.

—北京: 地质出版社, 2010.12

ISBN 978-7-116-07016-5

I. ①岩... II. ①董... III. ①岩体-边坡稳定-稳定
分析 IV. ①TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 243301 号

YANTI XIEPO WENDINGXING SHUZHUA DONGTAI YUCE

责任编辑: 李惠娣

责任校对: 张 冬

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324514 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82324340

印 刷: 北京天成印务有限责任公司

开 本: 787 mm×1092 mm^{1/16}

印 张: 10

字 数: 240 千字

版 次: 2010 年 12 月北京第 1 版

印 次: 2010 年 12 月北京第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-07016-5

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前言

本专著的内容是作者近 20 年来科研工作的主要研究成果之一,即岩体斜坡的空间预测理论与方法研究。将这个主题定为作者的科研攻关目标,起因于 27 年前甘肃省东乡县境内的顷刻间掩埋了 3 个村庄的大型灾难性黄土滑坡的发生。这个事件使我下定了把滑坡地质灾害的探测、时空预测和治理作为科研攻关目标的决心。具体的科研课题定位,是选择了滑坡空间预测和治理设计中的长期以来被困扰的只能凭经验对边坡进行坡角设计及人们所期待的高边坡施工前的超前预测稳定性的实现。为了便于尽快地将研究成果应用到生产实践中,技术方法上选择了符合国内外边坡稳定性评价规范要求的极限平衡理论。研究课题既要符合现行规范要求,又要提出创造性的突破成果,这似乎是一对不可调和的矛盾,客观上这无疑增加了攻关目标的难度。本专著主要取材于河北省自然科学基金资助的题为《岩体斜坡稳定性三维动态预测的量化理论研究》的研究报告,该成果研究基础还要追溯到我作为第一主研人,协助我的原长春地质学院的两位老师——谭周地教授和曹柄兰教授所主持的“七五”国家科技攻关项目《长江三峡三斗坪坝址弱风化花岗岩利用标准的研究》和《中国西北巴谢河流域灾难性大型滑坡研究》两个课题攻关过程中得到的深造。他们在攻关中率先垂范,不畏艰难的奋斗精神和一丝不苟的科学态度使我受益匪浅。那两个课题尽管早已完成,但那种科研态度和优良的学风,一直鼓励着我能为预测、防治滑坡灾害尽到最大的努力,使我感到这是职业的要求,祖国和人民的重托。为此,从新中国成立后最老的一代工程地质专家——我的老师们手中接过“接力棒”,继续“跑下去”!

岩体斜坡稳定性动态预测的思路始于“八五”国家攻关项目专题《矿山开采引起的环境地质问题及其预测和防治对策研究》的实施过程,在研究报告和相关的论文中,提出了以斜坡地质结构的代表性结构体——单位结构体为研究个体,扩展到整个斜坡的稳定性研究的思维方法中。这个思路是受了工程地质学家谷德振在 1979 年所著的《岩体工程地质力学基础》中提出的“岩体是结构介质”这一对岩体介质属性划时代论断的启发,努力去获得在边坡工程中体现出的岩体结构控制着岩体的变形和破坏特征的规律。在 2008 年完成的河北省自然科学基金项目《岩体斜坡三维动态预测的量化理论研究》中,将随坡高动态地进行三维稳定性预测方法系统化,实现了高边坡稳定性超前预测、坡角的定量设计、斜坡治理决策等一系列高边坡的前沿难题突破,提供了一个具有确定性理论支持的新方法。

水利水电工程、露天采矿、石材开采工程、道路工程和工业民用建筑工程常以岩体高边坡为地质环境,以不断增高的趋势迅速发展。坡高的增加对边坡稳定系数的影响效应,对于传统的单一滑体的计算模式,无论采用哪种稳定性计算方法,都是难于获得的。正因为如此,现行的有关边坡地质工程的规范,都谨慎地将边坡坡高限于 30m 之内讨论其稳定性评价、治理技术。所以,研究坡高的增加对岩体斜坡抗滑稳定性的影响效应规律,最

理想的是得到稳定系数和稳定坡角对于坡高的函数关系，是当今地质工程迅速发展时代的迫切需要。

岩体是不同于任何人工材料在内、外力地质作用造就的天然地质体。任何以人工材料为试验和研究对象而产生和发展起来的力学理论作为它的量化方法的基础理论，对于岩体都是窥豹一斑，不能反映其实质和全貌。基于这种认识，实现此研究目标始终按谷德振教授提出的岩体为结构介质的认识论来研究岩体高边坡相关难题，把岩体工程地质力学理论作为研究和认识岩体斜坡的学术思想。

本书的第一个特点是量化方法上实现了将稳定系数、任意稳定系数下稳定坡角作为坡高函数的动态地、连续地计算过程；第二个特点是对不同的地质结构斜坡，系统地研究了动、静水压力，地震力等不同外力组合工况下稳定性和稳定坡角变化规律，在内容上具有动态量化方法的系统性。由于篇幅所限，仅是单位结构体的实体比例投影问题未进行专门阐述。此外，本书所创建的斜坡稳定性数字化动态分析方法，体现了将斜坡工程地质条件参数数字化，全方位地用数字动态地、连续地描述岩体斜坡。

此专著的另一个突出特点是，建立的 20 余个数字化动态模型，可非常方便应用于实际边坡工程。由于这些数字化动态模型仍属于极限平衡理论范畴，对于任何一个特定坡高下的稳定性计算与极限平衡方法无异，所以符合现行不同部门发布的边坡工程规范对稳定性评价方法的限定。本书的贡献在于确立了不同地质结构斜坡的稳定系数、稳定坡角与坡高间的函数关系，实现了它的连续动态计算，以便于人工边坡空间的超前预测，为生产中广泛应用奠定了前提条件。这种“动态量化方法”是“单一滑体的计算方法”的组合，可以完成已往“静态”量化方法无法完成的前沿难题。因为本书系统地提出的量化方法实现了将单一结构，扩大到整体斜坡重要地质参数的预测问题，有效地应用了岩体结构面地质力学特征和空间出现与空间组合规律。对本书创建的“数字化动态模型”的正确应用，必将节省大量的勘察工作量，实现施工前对边坡稳定性、滑坡体积、滑动面面积、稳定坡角等主要地质参数的超前预测，对斜坡治理方案进行正确决策。

此专著分为十一章，第一章至第三章是所提出的岩体斜坡稳定性数字化动态方法的概要阐述，提出了斜坡岩体地质结构的分类方法，为全书的结构和内容上的各论打下基础，从第四章至第六章，阐述了地壳上所有斜坡不同结构的四种边坡结构的稳定性随坡高变化的动态模型的建立和论证；第七章至第十章是岩体斜坡稳定性数字化模型的间接成果及其应用方法，如斜坡的稳定坡角的定量设计，反分析求抗剪强度地质参数和治理决策的论述。第十一章是本专著创立的稳定性动态模型的应用实例。

最近几年，愈是接近本书的主要的技术难题攻克阶段，愈是遇到更大的困难。对于这样一个斜坡稳定性预测动态方法的全新课题，需要现场与室内量化模型的建立及其相互对比分析等巨大的工作量，只能用横向项目将相关的工作坚持下去，遇到了一般课题碰不到的困难。在这部简洁的专著即将面世的时候，使我不能忘怀的是科研合作者的密切配合和我的研究生们书稿整理工作中所做的努力。更要感谢石家庄经济学院的校领导对我们研究工作的关心和支持。如果没有“石家庄经济学院学术著作出版基金”的资助，该专著就一定会延期与读者见面。

本专著的问世，首先要谢忱的是许多国内外著作者们，攻关过程中参考了他们的许多

论著，同时借鉴了他们的思维理念。非常感谢同行专家们先期研究成果的启发！此书在前人对岩体结构分类方法与治理方法的基础上，结合边坡地质边界条件的特点，提出了岩体斜坡地质结构分类方法，奠定了稳定性动态数字化分析方法和治理决策判据的基础，使攻关目标得以实现。

此项研究成果是在河北省自然科学基金资助下完成的。原自然科学基金委办公室主任徐成和基金委办公室尚勇博士都非常关心和鼓励此项研究成果的进展，多次来学校检查指导工作，并主持了此项成果的评审。当此专著即将出版之际，非常感谢著名的工程地质学家、岩体力学学家、环境工程地质学家王思敬院士和著名的弹塑性力学学家郑颖人院士到石家庄作为评委会正、副主任为这项科研成果认真地评审，提出的肯定性的评语和诚挚的建议对这本专著的补充和完善起到了重要作用。

对于立题的初衷，一个主要因素就是便于研究成果尽快地在实践中得到应用，以便在短时间内得到检验和进一步的充实，所以诚挚地感谢生产部门的专家同行和校友们的支持！他们是河北建设勘察研究院有限公司总经理梁金国勘察大师、周文生处长、吴立春高级工程师、张全秀工程师；河北大地建设科技有限公司张树雄副总经理；河北省水利工程局刘治峰总工程师；河北省第三地质大队刘彦荣高级工程师、魏明辉工程师；张家口市工程技术有限公司王国江总经理，李永东副总经理和朱红总工程师、周军经理和李永喜经理；天津市市政勘察设计院李明生副总工程师、杨旭朝高级工程师；张家口市地质矿产局环境处宫凤山科长；天津华北工程勘察设计有限公司庄玉祥副总经理、刘杰副总经理、孙云总工程师；大连理工大学硕士生石晓宇。

此书所阐述和论证的内容是岩体斜坡空间预测研究的全新课题，加之成文仓促，作者水平所限，不足和错误之处在所难免，敬请读者批判指正。

董兆祥

2010年11月

目 录

前 言

第一章 绪论	(1)
一、岩体高边坡工程的现状与需求	(1)
二、岩体斜坡稳定性评价研究现状概述	(3)
三、岩体稳定性动态数字化分析方法	(12)
四、岩体稳定性数字化动态分析方法功能	(14)
第二章 岩体边坡地质结构类型的划分	(16)
第一节 岩体结构分类概述	(16)
一、岩体结构概念发展历史	(16)
二、岩体结构类型划分的研究历程	(18)
三、岩体结构面分级的研究历程	(19)
四、岩体结构划分指标依据	(20)
五、边坡岩体结构类型	(21)
第二节 边坡岩土体介质类型的属性	(22)
一、1920~1950 年：弹性介质阶段	(22)
二、1950~1970 年：裂隙介质阶段	(23)
三、1970~目前：结构介质阶段	(23)
第三节 岩体边坡地质结构类型的划分	(24)
一、岩质边坡分类概述	(24)
二、单滑动面结构边坡	(26)
三、楔形双滑动面斜坡	(27)
四、同倾向双滑动面斜坡	(27)
五、多滑动面斜坡	(27)
第四节 岩体边坡地质结构类型的划分意义	(27)
一、岩体结构决定稳定性	(27)
二、岩体结构决定变形与强度	(28)
三、岩体结构决定斜坡滑动位置	(28)

第三章 岩体斜坡稳定性数字化动态分析方法概述	(29)
第一节 问题的提出	(29)
第二节 岩体斜坡稳定性动态分析方法的步骤	(31)
一、工程地质调查	(31)
二、结构体研究	(34)
第三节 建立岩体斜坡稳定性数字化动态模型	(34)
第四节 实际应用	(34)
第四章 单滑动面边坡岩体结构三维稳定性数字化动态分析	(36)
第一节 概述	(36)
第二节 无地下水浸润曲面的单滑动面岩体结构边坡的稳定性三维动态分析	(39)
一、侧向切割面的倾角近于垂直,走向与滑动结构面的倾向夹角小于 20°	(40)
二、侧向切割面的倾角小于 70° 的情况	(40)
第三节 有地下水作用的单滑动面岩体的稳定性数字化动态模型	(42)
一、静水压力对单滑动面结构边坡的作用	(43)
二、动水压力对单滑动面边坡稳定性的影响	(44)
第四节 有外加荷载的斜坡稳定性	(46)
第五节 多因素单滑动面岩体边坡的数字化动态稳定性分析	(47)
第五章 楔形双滑动面岩体边坡稳定性动态数字化分析	(49)
第一节 研究意义	(49)
一、楔形双滑动面岩体边坡研究意义	(49)
二、楔形双滑动面地质结构边坡的滑移条件分析	(50)
第二节 地下水作用下的楔形双滑动面边坡稳定性数字化动态分析	(51)
一、地下水作用下的楔形双滑动面边坡稳定性数字化动态模型	(51)
二、其他条件下楔形双滑动面边坡稳定性数字化动态模型	(54)
第三节 坡顶倾斜的楔形双滑面地质结构	(55)
第六章 同倾向双滑动面岩体边坡稳定性数字化动态评价	(58)
第一节 同倾向双滑动面岩体边坡结构特点	(58)
第二节 不包括侧向摩阻力的同倾向双滑动面稳定性数字化动态分析	(58)
第三节 地震和静水压力影响下的稳定性数字化动态分析	(60)
一、动态表达式	(60)
二、同倾向双滑动面结构边坡的静水压力	(60)
第四节 动水压力和静水压力的同倾向双滑动面边坡的稳定性数字化动态分析	(62)

第七章 岩体边坡的定量设计	(65)
第一节 概述	(65)
第二节 边坡工程安全等级的划分	(67)
第三节 单滑动面岩体结构边坡的设计	(68)
一、不包括侧向切割面摩擦力的单滑动面的边坡设计	(68)
二、包括地震力的单滑动面结构边坡的坡角设计	(68)
三、侧向切割面陡倾、边坡与滑动面倾向近一致的单滑动面边坡坡角设计	(68)
四、小倾角的侧向切割面的单滑动面结构边坡的坡角设计	(69)
五、计入地下水影响的单滑动面结构边坡的坡角设计	(70)
六、楔形双滑动面结构边坡的坡角设计	(70)
第四节 岩体边坡的整体设计概述	(71)
一、边坡整体设计的一般要求	(71)
二、岩体边坡中水的处理	(72)
三、边坡的绿化原则	(72)
四、边坡的绿化方法	(72)
第八章 岩体边坡稳定性三维数字化动态量化方法的基础与理论	(76)
第一节 概述	(76)
第二节 用于本动态分析方法的地质力学理论	(77)
第三节 本项研究成果应用的极限平衡理论	(78)
第四节 本项研究应用的实体比例投影方法	(79)
第五节 边坡变形与破坏的渐变理论与方法	(80)
一、问题的提出	(80)
二、渐变的地质环境	(81)
三、边坡变形与破坏的渐变理论分析	(82)
第九章 非稳定边坡治理决策	(86)
第一节 非稳定边坡治理现状及研究意义	(86)
一、非稳定边坡治理措施现状	(86)
二、边坡治理主要方法概述	(86)
第二节 岩体边坡治理决策的研究意义	(94)
第三节 单滑动面结构边坡的治理决策	(95)
一、概述	(95)
二、结构面抗剪强度参数对岩质边坡稳定的影响	(97)

第四节 楔形双滑动面边坡的治理决策	(101)
第五节 同倾向双滑动面结构边坡治理决策分析	(103)
第六节 边坡治理判据	(105)
第十章 基于斜坡稳定性数字化动态模型的反分析方法	(106)
第一节 地质工程中反分析方法的由来	(106)
第二节 基于稳定性数字化动态模型反分析方法	(108)
第三节 反分析方法的讨论	(109)
第十一章 岩体边坡稳定性数字化动态分析方法应用工程实例	(111)
第一节 工程实例一：确定岩体斜坡滑动面抗剪强度的动态反分析方法	(111)
一、应用意义	(111)
二、滑坡概况	(111)
三、场地工程地质条件	(112)
四、确定岩体斜坡滑动面抗剪强度的动态反分析方法	(113)
第二节 应用实例二：单滑动面岩体滑坡数字化稳定性动态评价方法	(114)
一、研究意义	(114)
二、滑坡稳定性动态评价	(114)
三、滑坡治理前后的稳定性预测	(115)
四、结果分析	(116)
五、结论	(116)
第三节 应用实例三：楔形双滑动面岩体边坡稳定性数字化动态分析	(116)
一、概述	(116)
二、I类边坡稳定性预测	(117)
三、II类边坡稳定性预测	(118)
第四节 应用实例四：边坡定量设计应用实例	(119)
一、工程地质条件	(120)
二、斜坡稳定性动态计算模型	(120)
三、关于抗剪强度参数取值问题	(120)
四、滑塌原因分析	(121)
五、边坡设计坡角的确定	(121)
六、治理措施的建议	(123)
第五节 应用实例五：具有外加荷载的单滑动面边坡稳定性数字化预测	(123)
一、工程概况	(123)

二、右岸桥头边坡的稳定性	(124)
三、0号墩邻近挡墙段地基承载力	(127)
四、关于大冲沟左侧山体稳定性的讨论	(128)
五、结论与建议	(130)
第六节 应用实例六：岩体稳定性数字化动态分析方法在边坡加固设计中的应用	(130)
一、工程概述	(130)
二、工程地质条件	(131)
三、地质构造	(132)
四、物理地质作用	(132)
五、水文地质条件	(133)
六、地震烈度	(133)
七、设计依据	(133)
八、陡立岩体边坡加固设计	(133)
九、与边坡治理有关的工程地质参数	(136)
十、设计方案的论证分析	(136)
十一、施工与设备	(138)
十二、边坡工程质量检验、监测及验收	(138)
主要参考文献和资料	(140)
后记	(148)
第一作者简介	(150)

第一章 绪 论

一、岩体高边坡工程的现状与需求

1. 高边坡工程的发展趋势

人工岩体边坡是水利水电、采矿、道路和桥梁建设中常常涉及的工程。人工边坡的规模随着各类工程建筑物规模的扩大也在不断扩大（表 1-1）。我国的大多数大中型露天矿山已经或即将进入深部开采，随着边坡的加高加陡，露天边坡稳定性维护的难度和采场破坏的概率越来越大。当今世界，土质边坡最高为 120m，而岩质露天矿坑边坡则高于 1000m。高边坡的稳定性评价还没有单独的规范可循，可是它的变形破坏，尤其是在不同坡高条件下存在滑动的危险性的特点和矮边坡有很大区别。我国各个与工程建设有关的主管部门的规范仅涵盖了 30m 以下坡高的经验设计方法。

表 1-1 不同部门岩石工程高边坡类型及特点

部门	建议高边坡 定义高度/m	一般高边坡高度范围/m		边坡及边坡工程特点
		自然	人工	
铁道系统	>50	100~300	50~150	边坡高度一般较大，地质结构及环境条件复杂，对边坡质量要求高，但通常要求线路快速通过
水电系统	>100	100~1000	100~700	边坡高度大，地质结构及环境条件复杂，工程对边坡质量要求高，常需要保证永久稳定
矿山系统	>100	100~500		边坡高度大，地质结构较复杂，工程对边坡质量有一定要求，但通常考虑极限设计
公路系统	>30	30~150	30~80	边坡高度一般较小，地质结构及环境条件相对简单，对边坡质量要求较高
城建系统	>15	15~100	15~50	边坡高度小，地质结构及环境条件相对简单，对边坡质量要求高

（据黄润秋，2010）

例如，三峡工程双线五级船闸整个闸室段均在花岗岩山体中开挖修建，最大开挖深度 174.5m。开挖后形成南、北两侧高边坡，南坡最大坡高 170.28m，北坡最大坡高 137.8m；两线船闸之间保留宽 54~57m 的岩体隔墩。闸墙部位，即隔墩顶面以下为直立坡，呈双槽状四面直立坡。直立坡高度一般在 50m 左右，最大高度为 67.6m。在南、北两侧高边坡岩体内，各布置 7 层排水洞，在中隔墩和南北侧边坡岩体内各布置一条输水隧洞，每级闸首上游岩体内布置 36 个与输水隧洞相连的阀门井和检修门井。三峡工程双线

五级船闸全长 6.4km,它是在三峡大坝左侧的花岗岩山体中开挖出来的。由于船闸上下游水位落差达 113m,修建船闸就要在花岗岩山体中切出一道最大开挖深度为 176m 的直立高边坡。如何控制高边坡岩体内容易发生的断裂、潜流、渗水及风化等地质活动,使船闸避免出现失衡滑坡的危险,是水利施工中公认的一道世界级难题。

2. 滑坡的危害程度

我国受到滑坡威胁或可能受到其威胁的地区占陆地面积的 1/5 以上。据统计,我国 20 世纪 80 年代末至 90 年代初,崩塌、滑坡、泥石流等 15 种主要地质灾害所造成的经济损失每年达 100 多亿元,约 300~400 人死亡;90 年代中期以来,每年造成死亡的人数超过 1000 人,经济损失高达 200 多亿元,一些地区和县(市)的地质灾害已成为危害地方社会经济发展的重要因素。引发这些地质灾害除自然因素外,主要是人为因素的影响。迄今为止,遥感资料表明,我国崩塌、滑坡灾害点超过 100 万处,广泛分布在西部各省(市、自治区),特别是陕西、甘肃、四川、重庆、云南、贵州、新疆以及西藏等地区。这些地区地处江河上游,山高坡陡,沟壑纵横,断裂发育,新构造运动活动强烈,崩滑流灾害数量多、规模大、危害严重。

应引起注意的是,全球滑坡的 70%是由人类活动引起的。我国湖北省盐池河磷矿山体滑塌,是地下开采引起地质灾害的典型环境工程地质问题。这次灾难使矿区全部毁灭,死亡 284 人,造成巨大财产损失;1957 年 9 月 26 日刘家峡水库左岸发生滑坡,1967 年 3 月 6 日湖南柘溪水库的塘岩光大滑坡等,都是由兴建水利工程引发的;由修建铁路和公路引发的滑坡也很多,危害极大。据统计,我国铁路沿线较严重的大、中型滑坡就有 1000 多处,新中国成立以来,全国铁路由于崩塌、滑坡造成的损失累计达数十亿元。

3. 边坡的失稳破坏形式

根据有关研究统计的 117 个边坡工程高度统计结果见表 1-2,说明工程高边坡占有较大的比例。

表 1-2 117 个边坡工程高度统计结果

坡高 h/m	<50	50~100	100~200	>200
工程边坡	2	11	23	6
水库边坡	1	1	8	36
河岸边坡	—	2	5	22
合计	3	14	36	64

(据 GB 50487—2008)

按《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008)统计,岩石边坡稳定分析暂按崩塌、滑动、蠕变和流动四大类型的失稳情况,分别作出规定,见表 1-3。其中除弧面形与倾倒滑动以外,都属于按结构体滑动。

表 1-4 是有关研究者统计了 70 个工程边坡来说明边坡失去稳定的运动方式,其中滑动运动方式占了 1/2 以上,以块状和层状滑动的破坏方式占 1/2 以上,即以结构体滑动的滑坡占有较高的比例。

表 1-3 边坡工程高度的破坏类型

失稳破坏类型		破坏特征
崩塌		边坡岩体坠落或滚动
滑 动	平面型	边坡岩体沿某一结构面滑动
	弧面形	散体或碎裂的岩石边坡沿弧型面滑动
	楔形体	结构面组合的楔形体，沿交线方向滑动
蠕 变	倾倒	反倾向层状结构的边坡，岩层倾角与坡角
	溃屈	顺层向层状结构的边坡，岩层倾角与坡脚大致相似， 边坡下部岩层逐渐向上鼓起，产生层面拉裂和脱开
	侧向张裂	双层结构的边坡，下部软岩产生塑性变形，使上部岩层发生扩张、移动张裂和下沉
流动		崩塌碎屑类堆积向坡脚流动，形成碎屑流

表 1-4 不同边坡失稳破坏方式统计表

岩体结构 失稳类型		块状	层状	碎裂	散体	合计	
						个	%
崩塌		1	4	0	1	6	8.6
滑动		8	18	2	23	51	72.9
溃屈		0	3	0	0	3	4.3
倾倒		0	4	0	0	4	5.7
拉裂		1	1	0	0	2	2.8
流动		0	0	0	0	0	0
复合		0	4	0	0	4	5.7
合计	个	10	34	26		70	
	%	14.3	48.6	37.1			100

(据水利水电规划设计总院等，2008)

溃屈与拉裂的破坏类型基本也属于按岩体结构滑动破坏的方式。可见，岩体边坡的破坏方式以结构体滑移的破坏方式最常见。研究以结构体滑移破坏边坡，对研究发生滑坡的几率，具有重要意义。

可见，如何全面地、整体地、三维地评价按岩体结构体方式破坏的高边坡，定量地对高边坡进行设计，建立指导施工决策的理论模型，是当今高边坡研究中的追求目标。按结构体滑移破坏的高边坡工程的设计、施工与稳定性评价成为边坡研究的前沿课题。

二、岩体斜坡稳定性评价研究现状概述

(一) 评价方法概述

边坡稳定性评价是由于工程的迫切需要而不断发展的，在水电工程中发展迅速。评价

的基本方法分为定性评价、定量评价和图解分析法三种。边坡稳定性的评价方法总的发展方向是从定性分析到定量分析，从二维评价向三维评价迈进。将经常应用或引起有关研究者广泛研究和关注的岩体边坡稳定性评价方法列于表 1-5。各种方法简介如下。

表 1-5 目前常用边坡稳定分析方法一览表

边坡稳定分析方法		
定量（半定量）分析方法	极限平衡分析法	
	应力应变 分析方法	有限单元法
		散体元法
	概率分析法	
	边坡稳定性三维分析方法	
	快速拉格朗日分析法	
	不连续变形分析法	
	遗传进化算法	
	神经网络评价法	
定性分析方法	范例推理评价法	
	专家系统	
系统理论分析方法	模糊综合评价法	
	可靠度评价方法	
	灰色系统评价法	
图解分析法	向量图解法	
	赤平投影及实体比例投影法	
	图表分析法	

1. 定性评价方法

定性评价主要是通过综合考虑各种影响边坡稳定性的因素，并根据变形的时间效应规律，判断边坡的稳定状况和发展趋势。这一方法已被国内外工程地质人员所熟悉和广泛采用。定性评价按照所依据的资料不同又可分为历史分析法与工程地质类比法两种。历史分析法就是对边坡发育历史进行分析，从它的形成历史来判断现在的稳定状况和预测未来的变化；工程地质类比法是在分析了影响边坡稳定的诸因素基础上，对比条件相类似的其他边坡，来评价本边坡的稳定状况并预测其发展趋势。

经过多年的水利水电工程实践，华东勘测设计研究院、福建省地质工程勘测院等水利水电部门，已对岩浆岩地区积累了丰富的定性评价边坡稳定性的经验。长江水利委员会在三峡水库库岸稳定性调查工作中，总结出三叠系巴东组地层形成滑坡的规律，对定性评价库岸稳定性具有指导意义。中南勘测设计研究院根据五强溪工程左岸边坡历史上发生过蠕动这一事实，预测施工开挖时可能出现的变形趋势也得到了实际的证实。长江水利委员会在研究三峡船闸高边坡全风化花岗岩的开挖坡角时，曾进行了 241 处自然边坡的调查，在

此基础上进行了类比。20 世纪 80 年代以后,定性评价方法又有了新的进展,即所谓“模式化”评价方法的出现。1981 年 12 月 3~8 日,在乌江渡水电站工地召开的“边坡稳定现场交流会”上,成都地质学院第一次提出了斜坡岩体变形的四种基本模式,他们在研究了国外以及国内的龚嘴水电站、四川鲁班水库、乌江渡大黄崖、二滩水电站金龙山变形体实例的基础上,认为斜坡岩体的变形类型与斜坡岩体的物质组成和地质结构密切相关,且有不同的变形机制。因此,利用地质模式有助于认识斜坡变形破坏的机制和近期斜坡演变的全过程,据此可以判定斜坡所处的演变阶段和发展趋势,而且是物理、数值模拟研究和定量评价的重要依据。他们对拉裂、蠕滑、弯曲和塑流这四种模式的岩性、岩体结构、变形类型、发展趋势都进行了详细的分析。稍后,孙玉科在分析了一些包括塘岩光滑坡和葛洲坝二江厂房边坡的工程实例后,提出了反倾边坡的倾倒破坏、沿水平软弱夹层的整体性滑动、顺层边坡的快速滑动破坏、坐落式平推滑移和具有滑移倒塌特点的山崩五种地质模式。最近,中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院也从地质模式出发,评价了天生桥二级电站厂房的岩质边坡稳定性。上述几种地质模式反映了我国定性评价的发展趋势,虽然尚不完善,但都是一个可喜的尝试。

2. 定量评价方法

定量评价是在定性评价的基础上,通过数值计算或图解方法赋予边坡稳定性以量的概念。目前定量评价方法中使用最广泛的仍是极限平衡分析法与有限元计算两种。图解法使用的也较多,近代发展的随机评价方法和系统工程分析法、优势面法也受到普遍的关注。

本书提出的岩体稳定性动态数字化量化分析方法,是综合应用了地质力学和岩体工程地质力学规律和实体比例投影方法,采用传统的对边坡稳定性评价的极限平衡理论框架、按所提出的优势结构体的优化抉择理念,实现了空间上动态地评价边坡稳定性的量化理论与方法。

现仅就比较常用的岩体边坡稳定性定量概述如下。

(1) 极限平衡法

传统的极限平衡分析法已在国内外广泛使用,潘家铮总工程师曾对这一方法进行了系统深入的研究和归纳总结,并发展了空间滑坡的极限平衡分析方法,出版了专著,对运用极限平衡分析法评价边坡稳定性具有指导性作用。这一方法的基本假定是把岩体视为刚性体,本身不产生变形,但可传递应力。因此,只研究滑动面的受力大小而不必研究滑体内部的应力状态,此外除将边界条件大大简化外,一般将三向问题简化为平面问题,遵循库仑定律判别准则,分别按下列步骤进行:

- 1) 通过分析确定或归纳出可能出现的破裂面形态(直线、折线、圆弧、单滑面、双滑面或多滑面);

- 2) 确定计算荷载和计算参数(摩擦系数、内聚力、密度、地下水位等);

- 3) 仅在最简单的直线滑动时可直接计算出 K_c 值外,通常采用试算法进行试算。最常用的方法是分块推力传递法(或等 K 值法)。由于这一方法是在一个假定状态下求出的 K_c 值及相应的剪切面反力和某些内力,不能求出失稳前真实的反力和内力,所以仍是一种近似解。

在极限平衡分析中,分块隔离面不仅是一个虚拟面,而且面上剪力方向也是人为给定

的,在复杂滑动情况下,由于块体各自的合力 R_i 的大小与方向随隔离面上的推力 N 及剪力 T 而变,滑向也可能相应改变。因此有人提出了隔离面上剪力方向的公式随着迭代计算,让两个块体的滑移类型、滑向、剪力方向等可以一起随之改变,最终所得的 K 值,将是在极限平衡和“等 K 值”假定下的较严格的理论解,但这一改进尚未经过大量实践的检验。

此外,长江水利委员会也利用了改进的极限平衡分析法——萨尔玛法对三峡水库滑坡进行了稳定性评价。

极限平衡分析法是通过计算出的 K_c 值来评价边坡的稳定性。 K_c 值只是一个具有物理意义的系数。稳定性的判断是以边坡的破坏强度为依据,并不反映不同工程对边坡稳定性的不同要求。例如水库滑坡,其危害性主要是高速滑落形成的涌浪,故有人提出对于此类边坡,安全性应以滑速为判断准则,边坡的稳定系数 $K_c = v_0/v$, 式中 v_0 为允许滑速; v 是实际滑速。

对于深切谷坡常发生的弯曲倾倒和弯曲溃屈变形,如何用 K_c 值来评价其稳定性也是困难的所在。目前虽有人开始着手研究并提出一些稳定性的判别准则,但尚未经实践检验。

尽管极限平衡分析法存在上述问题,但只要透彻了解它的基本原理,谨慎选用参数和计算公式,仍能提供较合理的解答。因此,对于大多数的稳定性分析,它仍是目前广泛应用和有效的手段。

计算时应选择有代表性的剖面进行,对重要的大型可能失稳边坡,除主要计算剖面外,还应根据失稳边坡的大小和地质结构选取一些辅助剖面,并分别采用不同公式进行校核,综合评定边坡的稳定性。一般当不同剖面用同一公式计算而得出不同 K_c 值时,宜取其最低值,当同一剖面采用不同公式而得出不同 K_c 值时,宜取其平均值。

(2) 应力应变分析法

极限平衡分析法假定边坡是刚体和所有的滑动面都是连贯面的条件在多数情况下与实际并不相符,且边坡的破坏更非单一的滑动,在一些情况下以渐进破坏的形式出现,对于蠕动、渐进破坏—倾倒和弯曲—溃曲的变形破坏形式,以计算机快速计算为手段的应力应变方法,从结构分析被引进到边坡稳定性分析,已取得了较好的效果。

应力应变分析使用最广的是有限元法(FEM),有限元法与极限平衡分析法相比具有如下特点:①能考虑边坡岩体的变形;②可通过物理方程引入各种各样的岩体介质力学特性,如线弹性、弹塑性、黏弹性乃至流变性等,使问题的分析更符合岩体的实际情况;③可模拟岩体的非均质性和各向异性,可考虑诸如岩体的渗流体积力及其他荷载;④可简便处理复杂的边界条件。

有限元法的基本原理是将一个连续体变换成为有限数量的、大小不同的单元体集合,单元体之间通过节点来连接和制约,且共同承受外部荷载与内力,然后就每个节点建立平衡方程,并变换为以节点位移为未知数与节点力的关系方程,求出节点位移并根据位移计算单元应力。最后,根据各单元的已知力学强度参数进行强度判别,从而评价边坡岩体的稳定性。

从20世纪70年代起,不少工程,如资水敷溪口、黄河龙羊峡、红水河龙滩、长江三