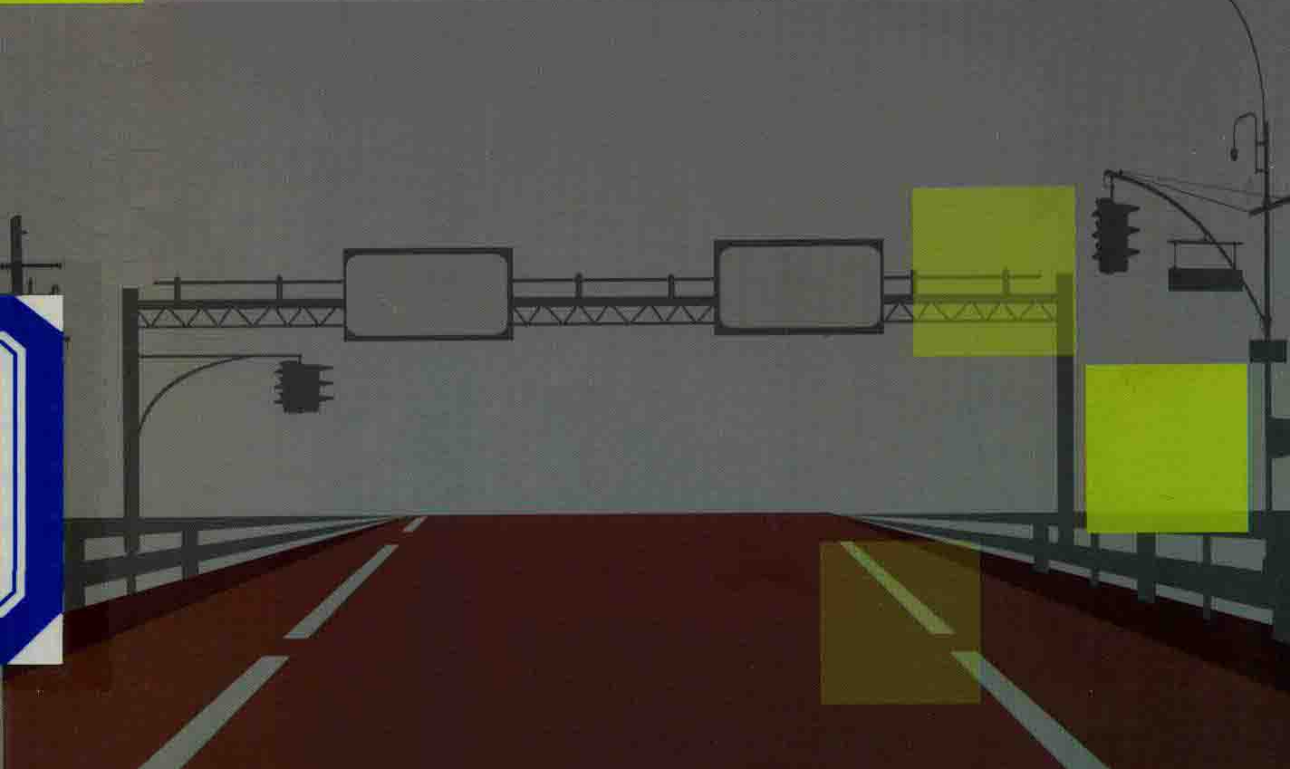




库岸公路碎裂岩质 高边坡稳定性研究

KUAN GONGLU SUILIE YANZHI
GAOBIANPO WENDINGXING YANJIU

王思长 ◎ 著

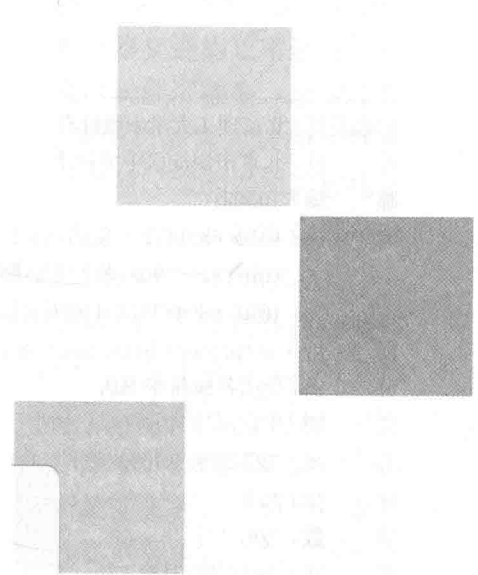


 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



库岸公路碎裂岩质 高边坡稳定性研究

王思长 ◎ 著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书是在理论与实践相结合的指导思想下编写的,依托安康至陕川界高速公路建设工程,以卧狮梁边坡为研究对象,对库岸公路碎裂岩质高边坡稳定性研究的岩石室内试验与参数选取、边坡稳定性评价与现场监测等方面进行了较为全面系统的分析。主要内容包括碎裂岩体质量模糊分级、碎裂岩体物理力学性质室内试验、岩石物理力学参数取值、水作用对库岸边坡稳定性的影响、库岸边坡稳定性理论计算及数值模拟分析、库岸边坡的现场监测技术与实践等。

本书可作为岩土工程、地质工程、交通土建工程、能源工程、矿山工程、水利水电工程、防灾减灾与防护工程、环境工程等专业领域科研人员、工程技术人员及高等院校师生的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

库岸公路碎裂岩质高边坡稳定性研究/王思长著. —北京:北京理工大学出版社 2016.9
ISBN 978-7-5682-3131-2

I. ①库… II. ①王… III. ①公路路基—碎裂岩—岩质滑坡—边坡稳定性—研究
IV. ①U416.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第222833号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775(总编室)

(010) 82562903(教材售后服务热线)

(010) 68948351(其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京泽宇印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/8.5

字 数/200千字

版 次/2016年9月第1版 2016年9月第1次印刷

定 价/41.00

责任编辑/江 立

文案编辑/瞿义勇

责任校对/周瑞红

责任印制/边心超

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言 Preface

库岸公路边坡是指受水库蓄水及公路运营影响的斜坡岩土体。水库对入库流量的调蓄作用和公路交通运营作用,使库岸公路边坡的稳定性环境发生了显著变化:库水位升降作用,改变了岸坡地下渗流场、岩体的含水量及抗剪强度参数;水位的升高、加深及公路车辆交通运营,使库岸的浪蚀作用及动荷载加强,可能改变原有的库岸形态。碎裂岩体是经过复杂的地质作用改造,由岩块和地质结构面共同组成,具有特定的结构特征,赋存于一定物理地质环境中的复杂地质体,在水利水电、矿山、交通土建等工程中经常遇到,其强度、变形和渗透性等特征,将直接关系工程设计、施工和运营稳定性。当库岸公路边坡为碎裂岩体时,地质环境的改变会促使岸坡的水文地质、温度场、渗流场、应力场和化学场发生变化,不利于岸坡的稳定,因此,岩体产生新的变化,岸坡发生新的变形,容易导致岸坡发生崩塌、滑坡等地质灾害。

库岸公路边坡失稳所形成的地质灾害,对库区的基础设施和工程建设造成严重破坏,影响到公路交通的正常运营,同时,又会给库区人民的生产生活带来巨大经济损失,造成不良的社会影响。因此,开展库区公路碎裂岩质高边坡稳定性研究,特别是城镇人口密集地区、重要交通区域的库岸边坡稳定性研究,对库区岸坡的工程防治、交通顺畅、居民安全等是非常重要的,具有重要的工程意义、经济意义和社会意义。

库岸公路边坡的变形破坏与岸坡结构、岩土体性状、坡体几何形态、水作用、工程环境、人为作用等因素有关,对其稳定性评价方法众多。通常情况下是基于稳定性评价开展岸坡防治,一般是在搜集相关工程地质和水文地质资料基础上,明确边坡基本类型和岩体质量等级,分析地质灾害产生机理、发生范围和类型,确定计算边界和稳定性影响因素,实验得到计算物理力学参数,选择合理的计算原理和方法,确定破坏模式,建立计算模型,计算分析岸坡的稳定状态。根据计算结论,选

用安全、经济、合理、环保、可行的工程防治措施。由于岩土体的复杂性、影响因素的多变性及获取资料的局限性,在进行岸坡稳定性评价时存在诸多不确定的因素,如岩土体计算物理力学参数的选取、岸坡计算理论的选取、边界的确定、模型的建立等问题,都存在较大不确定性。如处理不当,则可能带来安全隐患或造成不必要的工程浪费。针对以上问题,笔者从不同方面开展了较多有益探索。

本书的主要成果:①考虑滑动体底部结构面饱水状态下,渗水压力对滑动体稳定性的影响,建立了渗压效应下岩质岸坡的滑动简化模型,推导了渗压效应下岩质岸坡的极限破坏角,得出岸坡坡高、坡脚与极限破坏角之间的关系;②基于对常用岸坡稳定性评价方法的比较,分析了有关的模糊因素,建立了模糊判断矩阵模型,结合层次分析法确定了各评价指标的目标权重,运用工程模糊集理论对岸坡的稳定性进行了综合评价;③在进行岸坡滑动体稳定性计算时,考虑了滑动体底部结构面水扬力及后缘裂隙水压力共同作用对滑动体稳定性的影响,采用非线性分析方法,建立了尖点突变模型,计算分析了卧狮梁岸坡的稳定性,并与刚性极限平衡法进行比较,验证了尖点突变理论计算各种影响因素复杂的岩质岸坡稳定性具有工程实际可行性。

本书完成过程中,得到了长安大学折学森教授、周志军教授,重庆科技学院刘东燕教授、黄林青教授,以及课题组同事、身边亲人和朋友的大力帮助和支持,对此深表感谢。

本书的研究工作得到了重庆市自然科学基金(cstc2016jcyj A0463)、重庆市博士后科研项目特别资助基金项目(Xm2014108)、重庆市安监局安全生产科技项目基金(CQAWS2013Y-006)等的资助。

本书内容主要是作者本人的研究成果,部分内容取材于国内外相关文献和专著。由于笔者水平有限,书中难免存在不足之处,热切希望读者和同行专家批评指正。

著 者

目 录 Contents

第1章 绪论	1
1.1 研究课题的提出及意义	1
1.2 库岸公路岩质高边坡稳定性研究现状及存在的问题	2
1.3 主要研究内容	12
第2章 安川公路岩质高边坡工程地质特征	13
2.1 区域地质环境	14
2.2 安川公路岩质高边坡基本类型研究	21
2.3 安川公路库岸岩质高边坡岩体质量模糊分级	31
2.4 本章小结	35
第3章 卧狮梁岸坡岩石物理力学性质试验研究	36
3.1 工程地质条件概述	36
3.2 岩石微细观结构特征	39
3.3 岩石物理性质研究	40
3.4 岩样单轴压缩试验研究	41
3.5 岩样三轴压缩试验研究	47
3.6 本章小结	56
第4章 岩石物理力学参数取值研究	57
4.1 岩石力学参数取值的最小二乘法	57

4.2	岩石力学参数取值的随机-模糊理论	64
4.3	卧狮梁岸坡岩石力学参数取值研究	71
4.4	本章小结	74
第5章 水作用对卧狮梁岸坡稳定性的影响		75
5.1	降雨对岩质岸坡稳定性的影响	75
5.2	库水升降对岸坡稳定性的影响	79
5.3	地下水对岸坡稳定性的影响	80
5.4	水对卧狮梁岸坡稳定性的影响	81
5.5	本章小结	84
第6章 卧狮梁岸坡稳定性评价		86
6.1	库岸岩质边坡极限破坏角推导	86
6.2	基于工程模糊集理论的库岸岩质边坡稳定性评价	90
6.3	基于尖点突变理论的卧狮梁岸坡稳定性评价	96
6.4	卧狮梁岸坡稳定性的数值分析	101
6.5	本章小结	105
第7章 卧狮梁岸坡现场监测		106
7.1	监测技术要求	106
7.2	GPS坡表位移监测	107
7.3	深部位移监测	114

第8章 结论与展望	120
8.1 结论	120
8.2 有待进一步研究的问题	121
参考文献	122

第1章 绪 论

库岸公路边坡工程已引起世界各国水利工作者和公路工作者的高度重视。水库蓄水及运营过程中,将使水库岸坡周边环境产生变化,如库水位抬高、加深,水面加宽,浪蚀作用加剧等。库水位长期性、周期性升降及水的渗流作用,会引起库岸边坡水文地质条件、工程地质条件、应力条件等发生变化,势必对库岸公路边坡稳定性造成不利影响,对库岸公路的交通安全带来潜在危害。

天然岩体经构造、风化、应力、人类活动等作用后,发育有大量的方向随机、尺寸各异且互相切割的裂隙,导致岩体具有碎裂结构或碎斑结构状,本书称该类岩石为碎裂岩体。碎裂岩体是工程中常见的不良岩体,由于其裂隙空间展布的复杂性、渗流作用的特殊性、裂隙-岩块间水交换机理的复杂性等,目前的研究还存在较大欠缺。随着公路、铁路、城乡建设及水利工程的不断发展,修建在碎裂岩体上的边坡越来越多,由于对碎裂岩体边坡认识的局限性,导致已有设计、施工及防护不可避免地带有很大盲目性,边坡在施工中或完工后的失稳甚至滑坡灾害频繁发生,给国家财产和人民生命财产安全带来了巨大的威胁。

库岸公路碎裂岩质边坡既具有库岸边坡的特殊性,又存在碎裂岩体的复杂性,其稳定性问题是岩土工程的重要研究内容之一。

1.1 研究课题的提出及意义

山区高速公路建设过程中,必然会遇到较多岩质高边坡,若发生变形、失稳,无疑会带来一系列工程问题,如增加工程投资、延误工期,甚至对已有的工程设施造成破坏。国内外对此已开展了很多研究,同时也积累了许多工程设计和施工经验,但这些经验大多是针对普通公路岩质高边坡,如果高速公路沿水库修建,岩质高边坡有软弱夹层且碎裂比较严重,则库岸公路碎裂岩质高边坡的稳定性问题更加突出。公路修建时的人类活动,如边坡开挖、坡顶加载、爆破作用等,均会影响到边坡的自稳定性;水库蓄水及运行过程中,诸如库水位长期性、周期性升降与水流侵蚀条件的变化,会使水库岸坡的水文地质条件、应力条件和岩土体强度发生变化,必然会引起水库岸坡的变形、失稳;而自然条件,如降雨、地震等因素也会影响到碎裂岩质高边坡的稳定性,引发地质灾害,如果不加以重视,这些地质灾害问题轻则造成公路破坏、交通中断,使公路运营及维护成本增加,重则导致水库滑坡破坏,危及水库沿岸城镇、居民,造成严重的经济损失及社会损失。

本书的依托工程——安康至陕川界高速公路(以下简称安川公路)是国家确定的西部大通道之一——包头—茂名高速公路在陕西境内的一段,同时也是陕西省规划的“三纵四横五辐射”公路主骨架中的一段。路线全长 104.582 km,所经区域大部分在秦岭和巴山之间,

属亚热带大陆性季风气候区,山大沟深,地势险峻,溪涧交错,地形、地貌及水文地质条件极为复杂。项目地处陕西省南部汉江中上游,“南水北调”的水源——丹江口水库上游,水土保持和环境保护要求高。安康地区水系发达,水量丰富,建有多座水库,其中以安康城西汉江上游的火石岩水库(安康水电站水库)为最,该水库建于1990年,总库容量258 500万方,堰顶高程338 m,最大下泄流量 $31\,400\text{ m}^3/\text{s}$,百年一遇洪水最高水位330.0 m(正常蓄水位),千年一遇(设计洪水频率)洪水最高水位333.5 m,万年一遇(校核洪水频率)校核洪水位337.0 m,历史最高库水位(2003年9月7日)330.0 m,线路所经的紫阳段任河和汉江干流均为其水库范围。其他沿线水库有:位于石泉县境内汉江干流上正在修建的喜河水库;位于月河上游的观音河水库;位于月河下游(五里镇刘营村)的李家沟水库;位于毛坝境内的毛坝关水库;位于权河上拟建的权河口水库和高滩水库。

该高速公路部分路段沿水库修建,水文地质条件复杂,岸坡岩体风化破碎严重,其稳定性受水库影响严重。针对秦巴山区的特点,研究分析库岸公路碎裂岩质高边坡稳定性,尤其是夏季持续降雨后,水库水位上升,岸坡地下水位随之上升,水因素对其稳定性的影响,对公路建设及建成通车后安全运营是非常必要的,对今后秦巴山区、库区及类似地质条件地区的公路设计、建设、防护等也具有一定的借鉴、参考意义。

1.2 库岸公路岩质高边坡稳定性研究现状及存在的问题

1.2.1 岩石力学参数研究现状

随着国内外一系列大中型水利水电工程、矿山工程、铁路工程、公路工程的建设,施工过程中所存在的大量工程地质问题使人们逐渐认识到岩体力学参数选取的重要性。合理而准确的岩体力学参数取值,不仅对工程区岩体结构模式及其强度特性的评价,而且对可利用岩体的判别、工程优化设计、确定合理建基面等具有重要的实用价值和经济价值。

对一些失事的或运行不良的工程的研究表明,其安全性与可靠性主要不是决定于建筑物本身,而是决定于地基承载力和与建筑物变形相容能力。为了满足地基承载力和变形相容能力的要求,一般对于大中型以上工程必须对其岩体力学特性进行现场和室内试验,以获取合理可靠的用于工程变形问题和稳定性评价的力学参数。众所周知,对实际工程而言,工程建设涉及的岩体是工程地区地质体的组成部分,它存在于一定地质环境中,其形成和发展经受过地质历史期内各种外动力地质作用的改造和影响,因此岩体条件和力学性质十分复杂,其复杂性表现在岩体的不连续性、非均质性、各向异性及赋存环境的差异性。而这些特性又随着时间、空间条件的变化而变化,并以不同方式组成各种模式,构成岩体工程的特殊性和复杂性。由于岩体是地质历史的产物,它的力学特性在空间上随机变异性往往很大,尽管试验资料不少,但如何选取有代表性的数值用于设计一直是参数选取中的一项难题。

如果所选参数(如用于边坡稳定性验算的 c 、 f 值)代表性不强,偏于安全,则工程投资增加,施工期加长;反之则工程投资下降,施工期缩短,但工程安全风险性增大,一旦发生事故,将是灾难性的。

国内外岩土工程师已从几十年的工程实践中逐渐摸索出数十种岩体力学参数取值方法,研究的总趋势由经验、半经验、精度较差的数值计算向计算复杂、精度较高的数值分析发展,尤其是计算机的使用加快了这一过程。

从国内外研究现状看,对岩体力学参数计算值的确定,在一定设计标准内的取值和整理方法并不相同。国外比较有代表性的方法有以下几种。

1. 日本国方法

该方法强调岩体分级对选取抗剪强度指标的重要性,把试验成果严格建立在岩体质量分级的基础上,并对各类岩体首先确定摩擦系数,求出相应的内聚力的上、下限值,然后根据经验确定抗剪强度参数计算值。

2. Patton 结构面抗剪强度预测法

对于岩质边坡,其稳定性不仅仅取决于岩石的抗剪强度,结构面的抗剪强度往往起决定作用。在工程实际中,绝大多数岩质边坡都是非均质岩体,有发育不同的节理裂隙或存在夹层,其抗剪强度主要由结构面及夹层物质所决定。因此,国内外学者在研究岩石抗剪强度的同时,更注重研究结构面的抗剪强度。

Patton 用带有规则凸起面的模型试验证明了带粗糙角的结构面抗剪强度,其公式为

$$\tau = \sigma \cdot \tan(\varphi_i + i) \quad (1-1)$$

式中 τ 、 σ ——分别为作用于结构面上的剪应力和正应力;

i ——粗糙角;

φ_i ——结构面上的内摩擦角。

3. Barton 预测裂隙面抗剪强度方法

Barton 依据大量试验资料,提出了按结构面的粗糙度系数和岩壁的抗压强度确定结构面抗剪强度的经验公式:

$$\tau = \sigma_n \tan\left(\varphi_b + JRC \cdot \lg \frac{JCS}{\sigma_n}\right) \quad (1-2)$$

式中 τ ——结构面的抗剪强度;

σ_n ——有效正应力;

JRC ——节理粗糙度系数;

JCS ——节理岩壁的有效抗压强度;

φ_b ——基本摩擦角。

4. 不连续面剪切扩容破坏机理研究

Goodman 深入研究了不连续面的剪切扩容破坏机理,并对有充填物的结构面进行了模拟试验,研究了壁面起伏差和充填物厚度之间的关系,他得出结论:有充填物的结构面强度介于无充填物的结构面强度和充填物本身强度之间,并随着充填物厚度 h 与起伏差 a 的比值 h/a 增大而缓慢下降。

另外, Lame 着重研究了 $h/a=0.1\sim 0.2$ 时结构面的强度变化,并利用回归分析求得了高岭土充填厚度与峰值强度之间的关系:

$$\tau = 7.25 + 0.46\sigma_n - 0.3\ln h \cdot \tau_n^{0.745} \quad (1-3)$$

式中 τ ——结构面的抗剪强度;

σ_n ——有效正应力;

h ——高岭土充填厚度；

τ_n ——结构面的抗剪峰值强度。

Kutter 通过对大型室内剪力仪试样应力状态进行有限元分析,认为剪切面上有软弱夹层时应力更趋均匀。

5. E. 霍克和 J. 卜布莱预测抗剪强度方法

E. 霍克和 J. 卜布莱通过大量岩体抛物线形包络线,得出岩体破坏的经验判据后,分不同情况根据应力大小选取抗剪强度参数值。

国内岩体力学参数选取有代表性的方法通常有以下几种。

1. 工程类比经验判断法

将已有的研究设计经验应用到条件相似的新研究和新设计中去,为此,需要对已有的经验进行广泛调查研究,全面分析工程地质因素的相似性和差异性,分析造成影响的主导因素的相似性和差异性。在缺乏试验条件和试验数据的情况下常采用该方法,该方法目前在工程实践中占有一定的地位。

2. 系数折减法

考虑试验地点地质条件的代表性、尺寸效应、时间效应和水的作用等影响,将试验综合值以不同系数加以折减。

3. 按加权平均值或变形一致性原则选取计算值

按加权平均值选取计算参数,即取不同岩性各自岩体力学参数综合值,以面积为权值进行加权平均,求得复合岩性岩体的整体综合值;按变形一致性选取计算参数,即根据不同试验结果应力-应变关系曲线,按同一变形标准求得各自的试验值再加权平均求得复合岩性岩体的整体综合值。

4. 理论方法

李华晔等曾分析过 600 多组抗剪试验成果,用最小二乘法建立了选取 c 、 f 值的计算公式,并建立了优选 c 、 f 值随机-模糊分析法,并用于工程实践;成都勘测设计研究院改进了日本的优定斜率法,并在二滩、溪洛渡等工程中用于 c 、 f 值的选取;李华晔、黄志全等把可靠度理论用于岩体 c 、 f 值的计算;胡小荣、谭文辉、张征等用泛克立格方程、中心点离散法、局部平均离散法和分形理论对单轴抗压、抗拉强度、变形模量等参数进行了分析计算;邓跃红、杨太华、孙钧、赵阳升、陈乃明等运用分形理论解释了岩石破碎、节理裂隙、岩石强度及变形模量、摩擦角等复杂问题。

周瑞光、孙广忠研究了结构面的力学效应,孙广忠提出了爬坡角理论;周瑞光把结构面分为四种形式,即平直结构面、锯齿结构面、波状结构面和台阶状结构面,并给出了每种结构面的判据。王思敬根据大量实测资料,分析了破裂结构面、破碎结构面、层状结构面及泥化结构面的剪切破坏形式,并统计得出各结构面的抗剪强度公式。

对于有充填物的结构面,影响 c 、 φ 值的因素相当复杂,从而对其抗剪强度的研究至关重要。一般来说,影响具有充填物的结构面抗剪强度的因素大体有三个方面:①充填物本身性质,包括矿物成分、颗粒组成与形状、塑性指数、密度及含水量等;②充填物与壁面之间的排列关系,主要包括壁面起伏差、充填物厚度及粗糙度系数等;③试验条件,比如排水条件、剪切速率、法向刚度等。以上三个方面,一些学者利用原位材料和模型材料做

了大量试验与分析，得出了 c 、 φ 的关系式。

1.2.2 岩质高边坡变形破坏模式及类型研究现状

边坡的变形破坏机制和地质力学模式是反映影响边坡稳定性状态的各种地质因素的综合体现，在工程中可以根据边坡变形破坏机制和模式评价预测边坡的变形发展趋势及可能的破坏形式，并选择可靠的加固措施。张倬元等认为边坡破坏是指边坡岩土体中已经形成贯通性破坏面时的变动。在此之前，边坡岩土体发生的变形和局部破裂，称为边坡变形。边坡变形、破坏和破坏后的继续运动，分别代表了边坡变形破坏的三个不同演化阶段。

20 世纪 70 年代 Hoek E 教授将岩石变形破坏类型分为圆弧破坏、平面破坏、楔形破坏和倾倒破坏，后来我国学者又详细讨论了边坡破坏机制、破坏方式、破坏类型以及如何抽象边坡稳定性分析力学模型等。20 世纪 80 年代，原国际工程地质协会(IAEG)滑坡委员会建议采用瓦恩斯(Wanes D, 1978)的滑坡分类方案作为国际标准，将边坡按运动方式划分为崩落(塌)(falls)、倾倒(topples)、滑动(落)(slides)、侧向扩离(lateral spreads)和流动(flows)五种基本类型。

谷德振、孙玉科等将边坡破坏模式概括为五类：倾倒变形破坏、水平剪切变形破坏、顺层高速滑动破坏、追踪平推滑移破坏、张裂顺层追踪破坏。孙广忠将边坡破坏类型概括为圆弧滑动、沿层面滑动、块体滑动、追踪节理面破坏、倾倒变形、溃曲破坏、崩塌和水平滑动八类，并讨论了各种破坏类型的特点。

张倬元等提出斜坡岩体结构类型与变形破坏模式对照表，见表 1.1。

表 1.1 斜坡岩体结构类型与变形破坏模式(张倬元等，1994)

类型	特征		主要变形模式	可能破坏形式
	结构及产状	外形		
I 均质或类均质体斜坡	均质的土质或半岩质斜坡，包括碎裂状或碎块状体斜坡	决定于土、石性质或天然休止角	蠕滑-拉裂	转动型滑坡或滑塌
II 层状体斜坡	II ₁ 平缓层状体坡 $\alpha=0\sim\pm\varphi_r$	$\alpha<\beta$	蠕滑-压致拉裂	平推式滑坡、转动型滑坡
	II ₂ 缓倾外层状体坡 $\alpha=\varphi_r\sim\varphi_p$	$\alpha\approx\beta$	滑移-拉裂	顺层滑坡或块状滑坡
	II ₃ 中倾外层状体坡 $\alpha=\varphi_p\sim40^\circ$	$\alpha\geq\beta$	滑移-弯曲	顺层-切层滑坡
	II ₄ 陡倾外层状体坡 $\alpha=40^\circ\sim60^\circ$	$\alpha\geq\beta$	弯曲-拉裂	崩塌或切层转动型滑坡
	II ₅ 陡立-倾内层状斜坡坡 $\alpha>60^\circ\sim$ 倾内		弯曲-拉裂(浅部) 蠕滑-拉裂(深部)	崩塌、深部切层转动型滑坡
	II ₆ 变角倾外层状体坡 上陡，下缓 $\alpha<\varphi_r$	$\alpha\leq\beta$	滑移-弯曲	顺层转动型滑坡

续表

类型	特征		主要变形模式	可能破坏形式
	结构及产状	外形		
Ⅲ 块状体斜坡	可根据结构面组合线产状 按Ⅱ类方案细分		滑移-拉裂为多见	
Ⅳ 软弱基 座体斜坡	平缓软弱基座体斜坡	一般情况下 陡下(软弱 基座)缓	塑流-拉裂	扩里, 块状滑坡
	缓倾内软弱基座体斜坡			崩塌, 转动型滑坡(深部)
注: φ_r 、 φ_p 为软弱面的残余(或启动)摩擦角和基本摩擦角; α 为软弱面倾角; β 为斜坡坡角。				

王恭先于 2003 年提出按边坡变形破坏性质和机制分为坍塌、滑坡、崩塌、错落、倾倒五种类型; 按变形范围和规模分为三类:

(1) 坡面变形——边坡整体上是稳定的, 只表面 1~2 m 有风化剥落、冲沟, 或差异风化造成局部落石等。

(2) 边坡变形——变形局限于边坡范围以内, 变形深度一般为 2~6 m, 最大不超过 10 m, 多为边坡内一级或数级的坍塌、滑坡等, 有局部变形, 也有整体变形。

(3) 坡体变形——变形范围超出边坡开挖范围, 深度常大于 10 m, 多为滑坡、错落、倾倒和大型坍塌, 规模大、治理费用高, 设计上应尽量避免。

1.2.3 岩质高边坡稳定性研究历史及现状

边坡工程失稳破坏引发的事故屡见不鲜。1963 年, 意大利 Vajont 水库库岸突然滑坡, 洪水冲毁 Longaranc 市和 5 个村镇, 约 2 600 人死亡。1951—1952 年冬天, 洛杉矶滑坡造成 750 万美元的损失。欧洲的捷克、挪威、瑞典及英国等国家边坡失稳也较多, 仅捷克 1961—1963 年登记的滑坡就超过 9 000 处。在中国、印度、日本等国家边坡失事也很多, 日本为防治边坡失稳的费用 1952 年为 6.12 亿日元, 到 1972 年上升为 103.12 亿日元; 中国的边坡失稳不论在水利还是在矿山、铁路和公路等均是一个严重的问题。

人们对边坡稳定性的关注和研究最早是从滑坡现象开始的。1773 年法国工程师库仑及 1857 年英国学者朗肯分别提出了库仑土压力和朗肯土压力的计算方法。19 世纪末和 20 世纪初, 伴随着欧美国家的工业化而兴起的大规模土木工程建设, 出现了较多的人工边坡, 诱发了大量滑坡和崩塌, 造成了很大的损失。这时人们才开始重视边坡失稳造成的危害, 并开始借用一般材料分析中的工程力学理论对滑坡进行半经验、半理论的研究。早期对边坡稳定性的研究主要从两个方面进行: 一是借用土力学中极限平衡的概念, 由静力平衡条件计算边坡极限状态下的稳定性; 二是从边坡所处的水文地质条件、稳定性影响因素和失稳破坏现象进行对比分析。

20 世纪 20 年代起, 国际上开展了结构可靠性基本理论的研究, 并逐步扩展到结构分析和设计方面, 以概率统计为基础的可靠度理论在土木工程结构方面的研究和应用是开展较早的领域之一。

20 世纪 50 年代, 苏联地质工作者采用“地质历史分析法”对边坡稳定性进行研究, 即根据边坡发育的地质环境、边坡发育历史中的各个变形破坏迹象及其基本规律和对稳定性影

响因素的分析,反推边坡演变的全过程,对边坡稳定性的总体状况、趋势和区域特征做出评价和预测。随后,我国学者引进该工程地质体系,继承和发展了“地质历史分析法”,并将其应用于滑坡的分析和研究中,对边坡稳定性研究起到了推动作用。该方法是各类边坡稳定性评价方法的基础。同时,地质工作者都较为重视边坡地质条件的描述和边坡类型的划分,多用工程地质类比法评价边坡稳定性,即总结各类天然边坡或人工边坡的研究经验,包括边坡特征、计算参数、处治措施等,用于新研究边坡的稳定性分析中。工程地质类比法具有经验性和地域性的特点,应用时必须全面分析已有边坡与新研究边坡之间的地质环境条件的相似性和差异性,并要考虑工程的规模、类型。在实践中,自然边坡与人工边坡均可以相互进行类比,因而该方法也是目前应用很广泛的一种边坡稳定性分析方法。

20世纪60年代,意大利瓦依昂水库——世界上最高的双拱坝发生滑坡事故,造成近3000人死亡及巨大经济损失,使人们认识到结构面对边坡稳定性的控制作用,初步形成了岩体结构的观点,并在应用赤平极射投影的基础上,提出了实体比例投影方法,用以进行边坡块体破坏的计算,定性判断边坡稳定性。同时,人们逐渐认识到边坡为一个时效变形体,边坡稳定性研究也因此而进入了模式机制研究新阶段。我国学者结合露天矿边坡稳定性研究,在陈宗基老师的指导下,进行了较系统的岩体力学性质试验研究,包括常规力学试验及流变力学试验,大型现场试验及室内岩块试验,动力学试验及静力学试验,岩块力学试验及结构面力学试验等。

20世纪70年代,地质工作者提出累进性破坏的观点和边坡变形破坏的机制模式,边坡稳定性研究进入了地质分析和岩石力学分析相结合的时代。王兰生、张倬元等通过国内外大量的现场调研,深入研究了斜坡变形破坏演化机制的一般规律,提出了斜坡变形的六种主要模式,即蠕滑-拉裂、滑移-压致拉裂、滑移-拉裂、弯曲-拉裂、塑流-拉裂和滑移-弯曲,以及斜坡失稳的三种基本破坏方式,即崩落(塌)、滑落(坡)、(侧向)扩离。原中国科学院地质研究所金川露天矿为典型工程实例,对边坡稳定性进行了长期、全面、系统的研究,将工程地质学与岩体力学密切结合,强调地质是基础及地质构造的控制作用,初步形成了岩体结构控制论的观点。国外的R. E. Goodman也非常重视岩体结构特性的研究,出版了《不连续岩体中地质工程方法》一书。70年代末,我国的岩土工程边坡稳定性分析引入了可靠性研究方法,最初侧重于土工数据的统计处理、经验方程的建立和回归分析等方面,然后对土层的概率分布模型、土性参数的不确定性等进行研究。

20世纪80年代,边坡稳定性研究进入了新阶段。1986年,原国际工程地质协会(IAEG)成立,同时成立了“滑坡及其他块体运动委员会”,这是国际上第一个专门研究滑坡及其防治的国际组织。国际岩石力学学会(ISRM)、国际土力学与基础工程学会(ISSMFE)、国际大坝委员会(ICOLD)等均将边坡工程作为重要专题进行学术交流和探讨,对边坡工程研究起到了重要的推动作用。1981—1986年,中国地质矿产部将“中国西南、西北崩滑灾害与斜坡稳定性研究”列为专题进行重点攻关;1986—1990年,三峡工程将库岸稳定性列为专题进行研究。其间,在系统科学方法论的指导下,对边坡岩体的赋存环境、坡体结构、内部应力状态、变形破坏机制、稳定性影响因素等进行了系统研究,形成了较为系统的边坡稳定性研究思路,边坡变形破坏的地质模式得到了进一步补充和完善,针对不同的地质模式提出了一些相应的稳定性计算方法;数值模拟和物理模拟手段被引入边坡研究中,人们借助有限元法、离散元法、杂交元法、边界元法、无穷元法、块体法以及地质力学模型试验等再现边坡变形破坏的全过程,从整体、内部作用机理等方面对边坡进行了全面的认识

和评价;利用数量化理论、模糊数学方法、概率论与数理统计等,探索了边坡稳定性的预测预报方法。1986年,国际化标准组织(ISO/TC98)颁布了一个标准文件《结构可靠性总原则》(ISO 2394),有力地推进了可靠性在工程领域的发展,也为后期可靠性理论在岩质高边坡工程中的发展做了铺垫。

20世纪90年代以来,我国黄河小浪底水电工程、长江三峡水电工程、黄河拉西瓦水电站、澜沧江小湾水电站、广西龙滩水电工程、金沙江溪洛渡水电站、雅砻江锦屏水电站等重大工程的论证和建设遇到了前所未有的高边坡稳定性问题,人们对工程边坡的勘察、设计、评价、监测和加固越来越重视。同时,非线性科学理论、非连续介质理论、可靠性分析理论、层次分析法以及计算机技术的发展,为边坡稳定性问题的研究提供了新的途径和方法,多学科、多专业的交叉渗透研究已成为边坡研究的发展方向。声发射技术、模糊数学、块体理论、灰色系统理论、神经网络理论、优化设计理论、分形理论、动态设计理论、突变理论、数值模拟技术、边坡监测及预警预报等理论方法广泛地应用于边坡研究中。黄润秋等以长江三峡水电工程、金沙江溪洛渡水电站、黄河拉西瓦水电站、澜沧江小湾水电站等重大工程为依托,总结了几十年来对岩体结构的研究成果,提出了复杂岩体结构精细描述的观念,全面系统地总结了复杂岩体结构精细描述与定量评价方法,取得了创新性成果,见表1.2。这一阶段,边坡稳定性研究步入了定性与定量相结合、概念模型与仿真模拟相结合、监测与反馈分析相结合的新阶段,从理论到工程实践都得到极大的发展。

表 1.2 岩石边坡工程实践与研究历程(黄润秋等, 2004)

时期	工程实践	学术思想	理论基础及基本观点	分析技术	典型边坡工程及灾害事件
1960年	西南、西北地区水电工程, 三线铁路工程, 露天矿边坡工程	地质过程机制分析方法, 工程地质学	工程地质学+弹塑性力学+流变学概念(可变形性、结构非连续、流变介质)	解析分析方法	金川露天矿边坡 龚嘴电站边坡 雅砻江霸王山、金龙山滑坡 乌江黄崖边坡变形
1980年	三峡库边稳定性评价、黄河上游一系列水电工程(拉西瓦、龙羊峡、李家峡等)边坡稳定性	地质过程机制分析——定量评价	工程地质学+岩石力学+现代数理统计和数值模拟理论(确定性的分析方法为主)	数值+物理模拟	盐池河岩崩 鸡扒子滑坡 洒勒山滑坡 新滩滑坡 漫湾坝肩滑坡 龙羊峡近坝库边滑坡 拉西瓦坝区滑坡 李家峡库坝区滑坡
1990年	金沙江向家坝、溪洛渡, 雅碧江锦屏、官渡, 澜沧江小湾, 白龙江苗家坝等大型水电工程边坡	系统工程地质学, 工程地质系统集成法	现代工程地质学+系统科学(强调系统性、强调过程的模拟再现)	过程模拟	天生桥二级水电站边坡 链子崖危岩体治理 黄腊石滑坡治理 黄土坡滑坡 甘肃黄茨滑坡
1995—2000年	三峡工程船闸高边坡, 链子崖危岩体治理, 小湾、锦屏高边坡	系统工程地质学或工程地质系统集成法, 基于变形理论的设计	系统工程地质学(含非线性科学)+变形过程控制理论(强调系统的非线性过程演化及过程控制)	过程模拟及过程控制	三峡船闸高边坡 链子崖危岩体治理 李家峡水电站高边坡 小湾高边坡

1.2.4 库岸边坡的基本类型及变形破坏基本形式

1.2.4.1 水库岸坡的基本类型

库岸边坡结构是库岸岸坡变形破坏的关键因素之一。不同的岸坡结构特征决定了不同的岸坡变形破坏类型、数量和规模,即使在相同的地质环境下,具有不同结构的岸坡,其岸坡再造方式一般也不同。因此,查明水库岸坡特征对分析岸坡发育特征、变形破坏机制及进行稳定性评价和岸坡防护有十分重要的意义。

1. 按照水库岸坡岩土结构分类

根据水库岸坡岩性特征,可将岸坡划分为土质岸坡、岩质岸坡、岩土混合岸坡。

根据水库岸坡物质组成,土质岸坡又可分为黄土状土质岸坡、冲洪积土质岸坡、崩滑堆积岸坡和残坡积岸坡;对于岩质岸坡,根据岩层产状、岩石坚硬程度和河流的走向或岸坡走向,又可分为平缓层状岸坡、横向岸坡、逆向层状岸坡和斜向层状岸坡;岩土混合岸坡又可分为土-软岩岸坡和土-硬岩岸坡。

2. 按照岸坡地形条件分类

根据库岸岸坡的坡度,可将岸坡划分为陡坡型、缓坡型、上陡下缓型、下陡上缓型、凹形弧线型和凸形弧线型六种。

1.2.4.2 水库岸坡变形破坏的基本形式

水库岸坡变形破坏的形式与岸坡岩性特征、岸坡坡角、库区地质环境、岸坡地质结构类型、水动力条件及水库运行动态等环境因素密切相关。缓坡型土质岸坡底端一般表现为侵蚀型破坏;松散堆积层较厚的岸坡一般形成坍塌活滑移;片状、板状、薄层状岩体本身层间结构强度较低,易发生较大的变形,在该类岩体构成的库段内,晚近地质时期形成的各类残坡积、崩坡积及滑坡体等第四系堆积体极为发育,水库蓄水后,水库破坏的事件发生的概率相对较高,破坏模式一般为顺层滑移。通过对典型水库岸坡变形破坏实例分析岸坡在库水作用下的变形破坏机理,其变形破坏的基本形式如下。

1. 顺层“滑移弯曲”滑塌

这类塌岸变形发育于走向与坡面近于一致、倾向坡外、倾角大于坡角的柔性片状、板状及薄层状岩体且三面临空的岸坡。在这种特定的地质结构条件下,层(片)理面倾角明显大于该面的残余摩擦角。在重力作用下,沿着岩层片理面滑移的薄层状柔性岩体,因下部滑移面未临空而受阻,在顺滑移的压应力作用下发生弯曲变形。

水库蓄水后,坡体变形演变过程包括三个发展阶段:

- (1)初期轻微弯曲阶段,通常发生在顺层压应力与层面法向应力较大的坡体下部;
- (2)强烈弯曲—隆起阶段,岩体强烈松动扩容,地面隆起,出现剖面X形剪切错动,其中一组逐渐发展为潜在滑移切出面;
- (3)滑移切出面贯通并发展为滑坡,表现为崩滑或滑崩式破坏。

2. 牵引式“滑移-拉裂”

这类滑坡变形主要发育在坡形相对较陡的古滑坡堆积体、残坡积松软岸坡。岸坡多为局部地下水相对富集区,坡体为黏性土与块石混合堆积,结构松软。在库水浸润和水位急