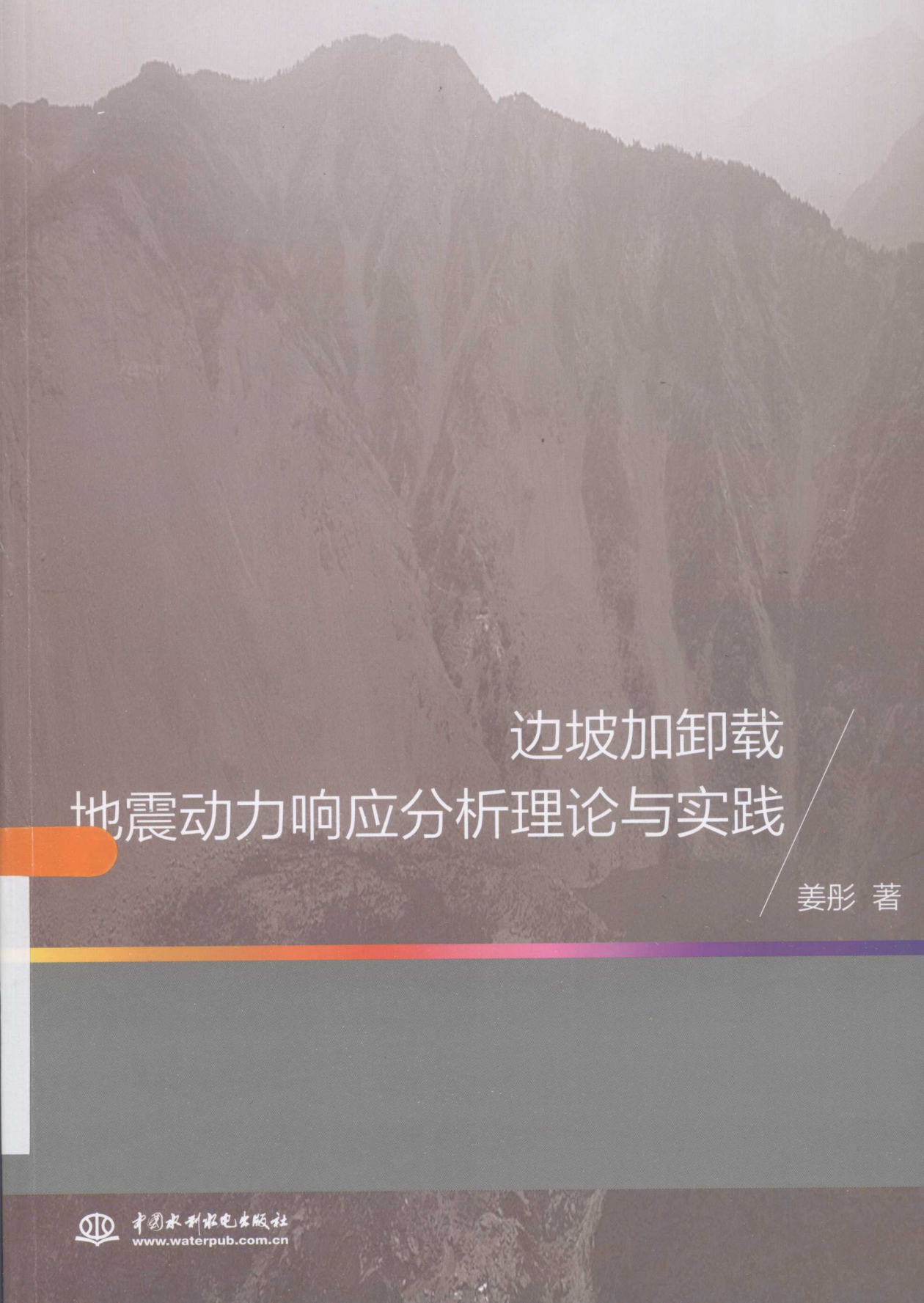




# 边坡加卸载 地震动力响应分析理论与实践

姜彤 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

014035796

P642. 27  
02

# 边坡加卸载 地震动力响应分析理论与实践

姜彤 著



P642. 27

02



北航

C1723096



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 简 介

本书共7章,建立了一种描述边坡在地震力作用下动力响应行为的加卸载稳定分析模型,从计算参数、边坡动力失稳的演化规律及其非线性特征等几个关键问题入手进行分析讨论,深入研究边坡在地震作用下的变形特征以及用加卸载响应度确定边坡动力稳定性的方法,从而将边坡的变形分析与稳定性评价有机结合,提出了基于非线性系统动力响应理论的边坡动力稳定性评价方法;并结合实际工程实例,论述了边坡岩体在地震力作用下的破坏、失稳机制及评价方法。

本书可供地质、水利、交通、采矿、国防等部门从事岩土工程生产、科研、教学的人员参考,也可作为大专院校工程地质水利工程、采矿工程、岩土工程等专业研究生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

边坡加卸载地震动力响应分析理论与实践 / 姜彤著

— 北京:中国水利水电出版社,2014.3

ISBN 978-7-5170-1813-1

I. ①边… II. ①姜… III. ①边坡—抗震性能—研究  
IV. ①U416.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第049148号

审图号:GS(2014)253号

|      |                                                                                                                            |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 边坡加卸载地震动力响应分析理论与实践                                                                                                         |
| 作 者  | 姜彤 著                                                                                                                       |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址:www.waterpub.com.cn<br>E-mail:sales@waterpub.com.cn<br>电话:(010) 68367658 (发行部) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话:(010) 88383994、63202643、68545874<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                |
| 排 版  | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                            |
| 印 刷  | 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司                                                                                                             |
| 规 格  | 170mm×240mm 16开本 10.5印张 209千字 4插页                                                                                          |
| 版 次  | 2014年3月第1版 2014年3月第1次印刷                                                                                                    |
| 印 数  | 0001—1000册                                                                                                                 |
| 定 价  | 58.00元                                                                                                                     |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



人类对于边坡稳定问题的研究已经进行了一百多年，经过多人的努力，已经在理论和实践中取得了很大成绩，在国内已经成功地修建了很多大型边坡工程就是证明。但是边坡问题是一个非常复杂的问题，特别是边坡动力问题，因它涉及多学科的交叉，到目前尚有许多关键问题未能很好解决。目前对于边坡的动力稳定问题，只注重应力—应变“状态”分析，而对边坡动力失稳的演化过程缺少深入研究，这是因为采用通常方法难以解决边坡在地震力作用下介质破裂失稳过程中所表现出的非线性动力特征及复杂机制问题。

《边坡加卸载地震动力响应分析理论与实践》这本书作者深入、系统地研讨了边坡在地震力作用下所表现的非线性特征及其失稳演化过程，并借助加卸载响应比理论建立了一种描述边坡在地震力作用下动力响应行为的加卸载稳定分析模型。该书从计算参数、边坡动力失稳的演化规律及其非线性特征等几个关键问题入手，进行深入分析边坡在地震作用下的变形特征，并提出以加卸载响应度确定边坡动力稳定性的新方法。该方法将非线性理论实用化，具有一定的学术深度，为边坡的动力失稳提供了新的研究途径。与国内外同类书籍相比，该书在边坡动力加卸载响应分析模型的建立、边坡动力失稳过程的时程分析等方面均具有独到之处，体现了作者的创新思维。该书的出版可以弥补国内该领域研究的不足，有助于促进边坡工程动力分析理论的发展。

该书是作者在自己创新架构基础上，参阅国内外大量文献撰写而成的。内容丰富，既有作者提出的理论模型，又有用数值方法对边坡在地震力作用下加卸载响应全时程的分析，并应用工程实例做

了检验，表明作者提出的方法具有一定的科学性和有效性。该书是值得岩石工程行业科研、设计及现场工程技术人员参考的好书之一。相信该书的出版，会引起同行们的兴趣。我期待着该书的早日问世，并乐意为之作序。

中国工程院院士  
总参工程兵科研三所研究员

顾金才

2014. 2. 17  
于洛阳

# 前言

我国独特的地理、地质条件以及伴随着国民经济高速发展而兴建的大量基础设施工程,使边坡稳定问题成为众多工程学科面临的共同问题。全球的板块构造和动力条件决定了我国是一个地震频发的国家,在我国境内有世界上最为活跃的太平洋地震带和喜马拉雅—地中海地震带,由地震诱发的滑坡在地震中一直扮演着“雪上加霜”的角色,给地震灾区人民的生命财产造成重大损失。所以,研究地震荷载作用下边坡的稳定性具有重要的理论和社会意义,也是岩石力学领域的热点之一。

通常,对边坡动力响应的研究多集中在寻找地震触发的位移在边坡内的分布规律,或试图找出坡高、坡角与边坡地震稳定性关系,在研究中重结果轻过程的现象非常普遍,对于边坡在地震力作用下的演化本质认识不足,变形分析与稳定分析不能有效结合。本书提出将数值模拟、实验模拟与加卸载响应比理论相融合,建立边坡的加卸载响应模型,开展边坡动力失稳过程的研究,从非线性系统论的角度探讨边坡的系统稳定程度,深入揭示了该问题对于边坡岩体失稳预测及稳定性设计所具有的重大理论价值和实际意义。

本书建立了一种描述边坡在地震力作用下动力响应行为的加卸载稳定分析模型,从计算参数、边坡动力失稳的演化规律及其非线性特征等几个关键问题入手进行分析讨论,深入研究边坡在地震作用下的变形特征以及用加卸载响应度确定边坡动力稳定性的方法,从而将边坡的变形分析与稳定性评价有机结合,提出了基于非线性系统动力响应理论的边坡动力稳定性评价方法。

本书共有7章。第1章绪论,回顾边坡稳定分析的国内外研究现状,对现有的研究和计算方法进行系统归纳和分类,分析以往方

法的优缺点,提出基于非线性系统论和加卸载响应比理论,对边坡动力失稳过程进行全时程分析,从其演化本质确定边坡系统稳定程度的解决方案,强调研究地震力作用下边坡稳定性的理论价值和实际意义。

第2章讨论岩土体物理力学参数的随机分布特征以及考虑地震、降雨随机分布特征的边坡稳定可靠度分析方法,论证地震对边坡稳定的影响程度。

第3章从工程地质学的角度出发,定性讨论影响地震作用下边坡稳定性的主要因素及边坡动力失稳过程中表现出的非线性特征。

第4章通过数值模拟方法,对边坡在地震力作用下的动力响应一般规律进行分析,并在此基础上基于加卸载响应比理论建立边坡的加卸载地震动力响应模型,讨论边坡地震加卸载响应特征。

第5章针对边坡地震加卸载响应的非线性特征,提出利用加卸载响应度对边坡系统在动力作用下的系统整体稳定程度的判别方法,将复杂非线性理论实用化。

第6章用工程实例和多种方法计算结果的对比,说明本书提出方法的科学性和合理性,显示新方法良好的工程应用前景。

第7章对边坡加卸载动力响应的研究进行总结,并对未来前景进行展望。

关于边坡稳定及其应用的书很多,基本概念、计算方法和原理在这些文献中有比较详细的论述。本书侧重探讨边坡在地震力作用下的加卸载动力响应特征及应用,所以书中只用很少的篇幅介绍边坡稳定、计算方法的基本原理,这些原理请参考相关论著。

本书的特点是抓住了边坡系统失稳是非线性系统演化的“鞍点”这一本质现象,深入、系统地研讨了边坡在地震力作用下所表现的非线性特征及其失稳演化过程,并借助加卸载响应比理论建立了一种描述边坡在地震力作用下动力响应行为的加卸载稳定分析模型。模型的建立是从计算参数、边坡动力失稳的演化规律及非线性特征等几个关键问题入手进行分析讨论,深入研究边坡在地震作用下的变形特征以及用加卸载响应度确定边坡动力稳定性的方法,从而将

边坡的变形分析与稳定性评价有机结合,提出了基于非线性系统动力响应理论的边坡动力稳定性评价方法。

本书由水利部公益性行业科研专项经费项目(201301034)、河南省基础与前沿研究计划项目(132300410021)资助。在本书的撰写过程中,参阅了国内外相关专业的大量文献,在此向所有论著的作者表示由衷的感谢!

为印刷方便,本书中部分彩色图片(图名带\*号者)在正文中用单色印刷,四色印刷见正文后彩插。

书中如有错误或不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2013年12月30日

于郑州

#### 联系方式

地址:郑州华北水利水电大学岩土工程与水工结构研究院,邮编 450045

网址: <http://insge.ncwu.edu.cn>

电话: 0371-65790993

传真: 0371-65790230

E-mail: [jiangtong@ncwu.edu.cn](mailto:jiangtong@ncwu.edu.cn)

# 目 录

## 序

## 前言

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                  | 1  |
| 1.1 问题的提出及研究意义            | 1  |
| 1.2 国内外的相关研究及进展           | 2  |
| 1.2.1 边坡静力稳定问题的研究及进展      | 3  |
| 1.2.2 边坡动力稳定问题的研究及进展      | 12 |
| 1.3 当前研究存在的主要问题           | 24 |
| 1.4 本书结构及主要内容             | 26 |
| 第 2 章 参数随机性及地震影响          | 27 |
| 2.1 岩土体力学参数分布概型的拟合优度检验    | 27 |
| 2.1.1 概率纸检验法              | 28 |
| 2.1.2 $\chi^2$ 检验法        | 28 |
| 2.1.3 K-S 检验法与 A-D 检验法    | 28 |
| 2.1.4 有限比较法               | 28 |
| 2.2 岩土体参数概率分布的多重拟合特性      | 29 |
| 2.2.1 微风化——新鲜岩类 (I)       | 30 |
| 2.2.2 弱风化上段岩类 (III)       | 32 |
| 2.3 参数分布概型对边坡可靠度指标的敏感性分析  | 34 |
| 2.3.1 边坡稳定计算常用参数的统计分布概型   | 34 |
| 2.3.2 参数不同分布概型对边坡稳定的敏感性分析 | 36 |
| 2.4 小结                    | 46 |
| 第 3 章 地质评价方法与非线性特征        | 47 |
| 3.1 我国滑坡分布的特点             | 47 |
| 3.2 影响地震作用下边坡稳定性的主要因素     | 51 |
| 3.2.1 影响边坡地震稳定性的内因        | 51 |
| 3.2.2 影响边坡地震稳定性的外因        | 55 |

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| 3.2.3 影响边坡稳定性的内外因相互作用 .....       | 56        |
| 3.3 地震力作用下边坡失稳的非线性特征 .....        | 59        |
| 3.3.1 边坡失稳的启程 .....               | 59        |
| 3.3.2 边坡演化的变形累积 .....             | 60        |
| 3.4 边坡失稳的影响因素与非线性特征之间的关系 .....    | 61        |
| 3.5 小结 .....                      | 61        |
| <b>第4章 边坡加卸载响应模型 .....</b>        | <b>63</b> |
| 4.1 计算模型的建立 .....                 | 63        |
| 4.1.1 岩土材料介质的假定 .....             | 63        |
| 4.1.2 计算模型边界条件的设定 .....           | 64        |
| 4.1.3 地震加速度时程的输入 .....            | 65        |
| 4.2 地震作用下边坡内部质点位移的分布特征 .....      | 66        |
| 4.3 边坡动力响应的一般规律 .....             | 68        |
| 4.3.1 地震作用下边坡内部质点位移随时间的变化规律 ..... | 68        |
| 4.3.2 边坡内部质点运动速度随时间的变化规律 .....    | 70        |
| 4.3.3 边坡内部质点运动加速度随时间的变化规律 .....   | 71        |
| 4.4 边坡加卸载响应模型的建立 .....            | 73        |
| 4.4.1 研究地震作用下边坡加卸载响应模型的意义 .....   | 73        |
| 4.4.2 加卸载响应比理论的基本原理及研究进展 .....    | 74        |
| 4.4.3 加卸载响应比理论应用的可行性 .....        | 76        |
| 4.4.4 地震作用下边坡加卸载响应参数的选择 .....     | 80        |
| 4.4.5 加卸载区段的确定与影响 .....           | 81        |
| 4.4.6 边坡地震加卸载响应模型的建立 .....        | 82        |
| 4.5 边坡地震加卸载响应特征的研究 .....          | 84        |
| 4.5.1 以位移为响应参数的边坡加卸载响应特征 .....    | 84        |
| 4.5.2 以速度为响应参数的边坡加卸载响应特征 .....    | 85        |
| 4.5.3 以加速度为响应参数的边坡加卸载响应特征 .....   | 86        |
| 4.6 关于地震波动频率及相位差的讨论 .....         | 87        |
| 4.7 小结 .....                      | 89        |
| <b>第5章 非线性稳定分析方法 .....</b>        | <b>91</b> |
| 5.1 离散元 (DEM) 的基本原理 .....         | 92        |
| 5.2 计算模型的建立与计算参数的选择 .....         | 94        |
| 5.3 边坡结构体内位移的分布规律 .....           | 96        |
| 5.4 节理岩质边坡地震触发位移演化的非线性分岔特征 .....  | 99        |

|            |                    |            |
|------------|--------------------|------------|
| 5.4.1      | 边坡演化的混沌序列与奇异吸引子    | 101        |
| 5.4.2      | 边坡演化的相空间维数与吸引子的判定  | 101        |
| 5.4.3      | 边坡动力失稳过程与鞍点的确定     | 103        |
| 5.4.4      | 边坡系统演化鞍点是系统固有属性的证明 | 106        |
| 5.4.5      | 加卸载响应度的提出          | 114        |
| 5.5        | 小结                 | 114        |
| <b>第6章</b> | <b>工程实例分析</b>      | <b>116</b> |
| 6.1        | 坝址区的工程地质背景         | 117        |
| 6.1.1      | 地形地貌               | 117        |
| 6.1.2      | 地层岩性               | 118        |
| 6.1.3      | 地质构造与地震            | 120        |
| 6.1.4      | 水文地质条件             | 124        |
| 6.1.5      | 不良物理地质现象           | 125        |
| 6.1.6      | 坝址区岩石的物理力学性质       | 127        |
| 6.1.7      | 水库区主要工程地质问题        | 127        |
| 6.2        | 坝肩边坡的岩体结构面统计       | 127        |
| 6.2.1      | 坝址区节理分布            | 128        |
| 6.2.2      | 坝址区节理分析            | 128        |
| 6.3        | 右岸坝肩的边坡动力稳定分析      | 132        |
| 6.3.1      | 计算模型的建立            | 133        |
| 6.3.2      | 岩体物理力学参数的选取        | 136        |
| 6.3.3      | 地震加速度时程的输入与边界条件的设置 | 136        |
| 6.3.4      | 临界加卸载响应比的计算        | 137        |
| 6.3.5      | 边坡地震稳定性的分析         | 140        |
| 6.4        | 与有限单元法计算结果的对比      | 142        |
| 6.5        | 小结                 | 143        |
| <b>第7章</b> | <b>结论与展望</b>       | <b>145</b> |
| 7.1        | 基本结论               | 145        |
| 7.2        | 展望                 | 147        |
|            | 参考文献               | 148        |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 问题的提出及研究意义

随着我国国民经济的高速发展,使我国社会主义建设迈入了空前发展的新阶段,各领域的科学技术随之突飞猛进,特别是在土木工程领域,越来越多的工程项目开工建设。水利水电工程、桥梁、隧道、铁路、公路、采矿等行业为适应社会发展的需要,兴建了许多大规模的工程,而几乎每个大型工程的兴建都是建设在人类赖以生存的地球上,这就在不同程度上涉及岩土工程理论与技术的方方面面。由于岩土材料的复杂性以及新材料、新技术和新施工工艺的应用,尤其是超大结构的采用,许多岩土工程新问题摆在我们面前,而边坡的稳定问题就是其中之一。

边坡包括天然斜坡和人工边坡,是地球表面具有露天侧向临空面的地质体<sup>[1]</sup>,是自然界中最为常见的地表特征之一,它常常被利用成为岩土工程建筑物的一部分,成为大自然送给人类的礼物;但如果人类不能很好地认识边坡的内在特性,了解边坡演化的自然规律,那么在不同的内外营力作用下(构造地应力、降雨、地震等),边坡会逐渐演化发生不同形式和规模的变形和破坏,严重的边坡失稳会酿成巨大的地质灾害,导致江河堵塞、交通中断,甚至对人类的生命和财产构成严重威胁,成为人类最不愿面对的大型灾害。1963 年发生在意大利的瓦依昂(Vaiont)水库的特大滑坡,造成约 3000 人丧生,水库下游的朗加朗市完全消失,震惊世界,成为人类历史上最严重的自然灾害之一;1718 年发生在我国甘肃的笔架山山崩由地震诱发( $M=7.5$ ),酿成 4 万人死亡的惨重灾害。由此可见,如果人类不能充分了解边坡的特性和演化规律将给人类自身带来无可估量的生命和财产损失。

我国独特的地理、地质条件决定了边坡稳定问题在我国特别突出。我国是一个多山的国家,山地面积约占国土面积的  $2/3$ ,具有大量的自然边坡,同时我国大量基础设施的建设,又使我们面临大量复杂人工边坡问题,如长江三峡永久船闸高边坡,黄河小浪底水利枢纽进口高边坡和库区大型滑坡、雅砻江锦屏一级水电站普斯罗沟左岸高边坡、黄河拉西瓦水电站的高边坡问题,以及大型深凹露天矿的开采、公路、铁路、隧道等工程中,都面临着大量的边坡稳定问题<sup>[2]</sup>。此外,全球的板块构造和动力条件决定了我国是一个地震频发的国



家,在我国境内有世界上最为活跃的太平洋地震带和喜马拉雅—地中海地震带,地震灾害固然非常重要,但由地震触发的次生灾害——滑坡同样非常重要,在汶川地震、玉树地震和彝良地震中,均产生了大量由地震诱发的滑坡灾害,给灾区人民的生命财产造成大量损失,所以研究地震荷载作用下边坡的稳定性具有重要的意义。

边坡稳定性研究是岩土工程研究领域的重要组成部分,大量学者围绕边坡(斜坡)的稳定问题展开深入研究,并取得了大量有效、实用的研究成果,笔者在查阅文献过程中发现关于边坡稳定分析研究的文献数以万计。其实人类很早就认识到边坡稳定问题的重要性,最早关于边坡稳定的研究可以追溯到19世纪<sup>[3]</sup>。在边坡研究的百年发展历史中,人类的研究取得了突飞猛进的发展,大量科学家投身于这一领域,取得了大量有实用价值的研究成果,人类也逐渐认识了边坡演化过程中的一些规律,评价边坡稳定的方法也从最初的定性分析向定量分析发展。计算机的出现使科学家从繁重的手工计算中解脱出来专注于理论方面的研究,发展了很多适合于边坡稳定分析的计算方法(关于这些方法,在本书中有专门的章节讨论,在此不再赘述)。从理论研究的角度看来,目前关于边坡在静荷载作用下的稳定问题的研究已日趋成熟,各国都制定了相应的技术规范用于工程实践;但边坡在动荷载(地震、爆破、风荷载、波浪荷载)作用下的稳定性及边坡的动力响应过程研究由于其高度复杂性,目前的研究还不成熟,尤其是大型岩质高边坡的动力响应过程和稳定性评价方面的研究进展缓慢。

基于上述讨论,可以看出本研究课题的重要性和先进性。我国的多山地、多地震环境不可避免地带来了大量和地震荷载有关的边坡问题,因此研究边坡特别是岩质边坡在动荷载下的稳定性评价方法及边坡在动荷载下的响应过程具有重要的理论和实践意义。

## 1.2 国内外的相关研究及进展

斜坡或边坡作为一种人类不可回避的地学环境与工程形式,总与人类的工程活动伴生,为此人类为了安全起见始终关注着边坡的稳定性。边坡在受到人类的工程活动及外界环境影响时,坡体有可能发生破坏,给人类的带来灾害。100多年来,人们对边坡变形过程、失稳形式、失稳机制、稳定评价及滑坡预测预报等进行了广泛而深入的研究,借助数学、力学及计算科学的理论和方法,试图对边坡的稳定、演化及滑坡的预测预报进行研究,并应用到工程实践中去。经过国内外无数工程地质和岩石力学、岩土工程工作者的努力,已形成了针对边坡工程的理论体系和工作方法,为人类工程建设活动奠定了一定的理



论及实践基础。然而,由于岩土体赋存于一定的地质环境中,在其形成、变形和破坏的过程中,经历了一定的演化历史和各种地质作用,从而形成了自身的几何及物理力学特性,具有一定的物质组成,一定的结构和构造,并继续在特定的地质环境中遭受质的变形、破坏<sup>[4]</sup>,从而使岩土体具有极高的复杂性,加上人类认知能力有限,因而此领域的研究难度较大,还有大量的难题未解决,下面分静力问题和动力问题两个方面对边坡稳定性方面的研究进展做一综述。

### 1.2.1 边坡静力稳定问题的研究及进展

在边坡的静力稳定问题研究中,岩土体的物理力学参数的准确性会对边坡稳定的评价结果产生重大的影响,因此本节首先对边坡物理力学参数选取的研究进行总结,然后讨论边坡静力稳定问题的研究及进展。

#### 1.2.1.1 边坡静力学参数选取的研究

人类所建设的工程无不希望建筑物稳定可靠且工程造价低,要做到这一点其关键性的一步是建筑物设计力学参数选取合理,参数值的高低会影响建筑物的建造尺寸,当然也就涉及工程投资。如果所选参数可靠度较低,往往会导致建筑物结构破坏,甚至有灾难性事故发生。根据世界各国的调查和统计,45%的重力坝事故是由于地质问题没有查清,岩体力学参数选取不合理造成的<sup>[5]</sup>,如法国马尔帕赛拱坝高66m,1959年溃坝,造成近500人死亡,究其原因地质条件没有查清,岩体力学参数选取过高所致。由此可见,岩体力学参数选取是边坡稳定分析的重要内容,只有准确的力学参数才能得到符合工程实际的计算结果,岩体力学参数在工程建设中所起的作用极为重要,会直接影响到工程的造价和安全。

当前国内外岩体力学参数选取研究的总趋势是从有经验、半经验、精度较低的数值计算方法向考虑多种因素影响、计算过程复杂、精度较高代表性较强的数值计算分析法发展,尤其是计算机的使用,使这一领域的研究加快。

岩体力学参数选取常用的方法有点群中心法、优选斜率法、最小二乘法、随机-模糊法等。点群中心法由于人为因素影响过多,目前已不常采用,国内对于岩体力学参数的研究主要是从岩体力学参数本身所包含的随机性和模糊性出发,应用随机理论和模糊数学的方法,对试验所得的数据进行分析以获得更为逼近岩体力学实际参数的“真值”。李华晔等人建立了最小二乘选取 $c$ 、 $\varphi$ 值的算法并分析了300多组岩体抗剪强度试验成果<sup>[6]</sup>,成都勘测设计院改进了日本人的优选斜率法,并用于二滩、溪洛渡等工程岩体抗剪参数选取值<sup>[7]</sup>,熊文林、李华晔、黄志全等人建立了优选 $c$ 、 $\varphi$ 值的随机-模糊分析方法<sup>[8-10]</sup>,李华晔、黄志全等人把随机-模糊分析用于小浪底、溪洛渡、宝泉抽水蓄能电站等工程岩体 $c$ 、 $\varphi$ 值计算<sup>[10,11]</sup>,胡小荣、谭文辉、张征等人用泛克拉格法、中心点离散法、局部平均离散法和分形理论对岩体单轴抗压、抗拉、变形模量等



参数进行了分析和计算<sup>[12-15]</sup>, 谭文辉将修正的地质强度指标 (GSI) 和非线性广义 Hoek-Brown 破坏准则相结合, 在岩石三轴试验和现场地质调查的基础上, 对岩体的宏观力学参数进行了研究<sup>[16]</sup>。

国外对于岩体力学参数选取的研究与国内大体相似, 但他们在研究时间上更早些, 如 Brown E. T. 等人对现场应力渗透系数和干密度的研究<sup>[17]</sup>, Derkiareghian 和 Zhu W. Q. 等人用中心点离散法对单轴抗压、单轴抗拉所做的随机有限元分析等<sup>[5]</sup>。

### 1.2.1.2 边坡静力稳定分析方法研究

边坡稳定分析是进行边坡研究的核心内容, 人们根据边坡的几何形态、破坏方式等发展了各种适用于不同滑坡类型的评价方法。

#### 1. 工程地质分析法

工程地质分析法的核心内容是对边坡进行工程地质定性评价, 最早应用工程地质类比法, 随着工作的深入, 人们逐渐进入理性分析阶段, 工程地质分析法的理论基础是地质成因演化论及 20 世纪 60 年代末、70 年代初被明确提出的岩体结构的概念<sup>[18]</sup>, 在这之后, 大量基于该理论的研究不断进行, 20 世纪 80 年代是岩体结构理论发展的高潮期, 相关专著不断出版<sup>[17, 19-23]</sup>。基于岩体结构理论的工程地质分析方法在边坡稳定评价中占有重要的地位, 特别是对于地质条件复杂的岩质高边坡, 工程地质分析法更有其独特的价值<sup>[2]</sup>。

岩体结构力学<sup>[23]</sup>的发展促进了工程地质分析法的发展, 多数边坡的破坏是由岩体结构面控制的, 在岩体结构理论的指导下, 人们开始研究边坡的破坏模式, 为定量研究边坡稳定性奠定基础。1980 年李铁汉等人以滑动面的形态、数目、组合特征以及边坡岩体破坏的力学性质, 将边坡变形破坏划分为 5 类, 每类中又分为若干亚类<sup>[24]</sup>。孙玉科等人 (1983, 1988) 总结了我国岩质边坡变形破坏的主要地质模式, 提出了边坡变形的常见 5 大模式, 即金川模式 (反倾边坡)、盐池河模式 (水平层状上硬下软)、葛洲坝模式 (水平薄层状软硬相间)、白灰厂模式 (水平厚层状软硬相间) 以及塘岩光模式 (顺倾薄层状结构)<sup>[20, 24]</sup>, 这些基于岩体结构理论的成果的提出, 为准确确定边坡工程地质模式, 从而进行准确定量计算作出了巨大的贡献。

#### 2. 刚体极限平衡分析法

刚体极限平衡法是边坡稳定分析的重要方法之一, 也是目前工程设计部门在进行简单的边坡稳定分析中最常用的方法, 该方法是以莫尔-库仑抗剪强度理论为基础, 建立滑坡体力或力矩平衡方程, 通过一定的假定条件, 减少未知量的个数, 从而将边坡稳定的超静定问题转化为静定问题, 然后求解方程组, 得到边坡的安全系数<sup>[25]</sup>。这种方法没有像许多数值分析法一样, 引入弹性力学或结构力学求解超静定问题的解法; 所以理论简单, 操作简洁, 可用于求解



介质材料均一, 边界条件简单的边坡稳定问题。

条分法是刚体极限平衡法的重要方法之一, 1916年由瑞典人彼德森提出, 后来经过 Fellenious、Taylor 等人不断改进, 现已成为简单边坡稳定分析的经典方法, 他们假定边坡稳定问题是一个平面应力问题, 滑裂面是个圆柱面, 计算中不考虑条块之间的作用力, 边坡稳定的安全系数是用滑裂面上全部抗滑力矩与滑动力矩之比来定义<sup>[26]</sup>。20世纪40年代以后, 随着岩土力学的发展, 很多学者致力于对条分法的改进, 他们的努力大致有两个方面: 一方面是着重探索最危险滑弧位置的规律, 制作数表、曲线, 以减少计算工作量; 另一方面是对基本假定做修改和补充, 提出新的计算方法, 使计算结果更加符合工程实际。1955年 Bishop 对传统的瑞典圆弧法进行了重要的改进, 提出了关于安全系数定义的改变, 对条分法的发展起了重要的作用<sup>[27]</sup>。在这之后的几十年里, 世界各国的学者纷纷致力于通过力的平衡条件来确定安全系数, 如 Janbu (1954) 假定土条间力为水平<sup>[28]</sup>, 美国陆军工程师团假定条间力的倾角等于平均坝坡的坡角<sup>[29]</sup>, 这些方法实际上都是通过假定条件减少未知量的个数, 在满足合理性要求的前提下求解安全系数, 所以严格地讲, 他们都是一些简化的方法。

1965年, 随着计算机的出现和普及, 早期的手工计算已经被计算机所代替, 人们在计算机的帮助下, 开始努力寻找新的、更为严格、精确和实用的求导边坡安全系数的方法, Morgenstern 和 Price 提出了适用于任意形状滑裂面的严格分析方法, Spencer (1967) 提出了土条侧向力相互平行的假定, 建立了同时满足力和力矩平衡方程的分析方法。

以上的计算方法从严格的角度上来说, 对于均质土坡分析较为理想, 而对于一些介质和边界条件复杂的岩质边坡是不适用的, Sarma (1979) 提出了一种重要的刚体极限平衡方法, 解决了很多长期困扰科学家的问题, 他认为边坡岩体只有沿着一个理想的平面或圆弧滑动, 才能成为一个理想的刚体运动, 否则岩体必先破坏成为多块可相互滑动的块体之后才可能发生滑动。由于这种方法对于岩质边坡分析能力的增强, 后来被广泛地应用于边坡的分析中, 并被称为 Sarma 法<sup>[30, 31]</sup>。

1983年, 陈祖煜对 Morgenstern-Price 法作了重要改进<sup>[32]</sup>, 完整地导出了静力平衡微分方程的解, 提出求解安全系数的解析方法, 从根本上解决了数值分析的收敛问题, 进一步推动了刚体极限平衡法的发展。

目前, 刚体极限平衡方法已经从二维发展到了三维, 关于边坡稳定分析的三维极限平衡方法, 已有很多文献介绍, Duncan 曾经总结了 24 篇文献资料, 列举了这些方法的特点和局限性<sup>[33]</sup>。



### 3. 数值计算方法

由于刚体极限平衡法自身固有的局限性,在对边坡进行稳定分析时,需对滑坡边界条件大大地进行简化,计算中所选用的各种计算参数往往是确定的且呈线性变化,对于由复杂介质和边界组成的滑坡体,如果进行这样的简化处理,将不能客观地反映工程实际的真实性,且使计算结果有很大的误差。实际上,不仅滑坡的各种计算参数是不确定且随机的,而且边坡系统本身就是一个不平衡、不稳定、充满复杂性的动态系统,其与外界环境不断地有物质、能量和信息交换。鉴于此,科学家们为了寻求能够反应工程实际情况的方法,进行了各种尝试,在数值计算方法上,随着计算机的普及和发展,出现了一批以弹性力学、结构力学为基础的数值计算方法: FDM (有限差分法)、FEM (有限单元法)、DEM (离散单元法)、DDA (不连续变形分析)、FLAC (快速拉格朗日插值)、NNM (流形元方法) 等方法都是数值计算方法飞速发展的产物。

在处理复杂边界和介质的计算上,数值分析方法由于其强大的灵活性和通用性,在工程技术的各个领域发挥了极大的作用,现已成为广大工程技术人员的得力计算工具。

### 4. 边坡稳定分析的系统方法

边坡稳定分析的系统方法是近年来兴起的一类评价方法,其主要理论依据是边坡变形破坏行为所表现出的非线性,这些非线性主要表现在:

(1) 岩石材料的无序分布,地应力的随时空分布。

(2) 边坡系统是高度复杂、规模宏大的系统,影响边坡稳定的因素很多,而通常条件下,难以确定边坡的地质条件和环境信息。岩体的变形、损伤、破坏及演化过程包含了相互耦合的多种非线性过程,传统的确定性分析理论和力学方法无法描述如此复杂的力学行为。

(3) 岩体变形经过塑性、断裂和破坏过程中,会在系统中出现分叉、突变等非线性复杂力学行为。

(4) 岩石的变形、损伤和破坏过程是一个动态的非线性不可逆过程。

复杂非线性系统科学使我们对事物的研究实现了由静态到动态、由局部到整体、由线性到非线性、由简单到复杂的认知走向<sup>[34]</sup>。岩体工程问题的极端复杂性是其他建筑工程问题所不能比拟的,因而在经典的理论计算方面遇到了严重困难,而20世纪70年代出现的复杂非线性系统科学为解决这个问题开辟新的研究领域,谢和平等人(1996)认为:“岩土工程失稳的研究要取得突破性发展,迫切需要引进非线性科学研究的原理和方法<sup>[35]</sup>”。郑颖等人(1996)认为,把岩体的破坏与远离平衡条件下的非线性动力系统理论联系起来,可能成为21世纪岩石或岩体理论的突破口<sup>[36]</sup>。基于上述思想,为了更准确地描述边坡非线性复杂动力学过程,科学家们将混沌理论中的耗散结构、协同分岔、