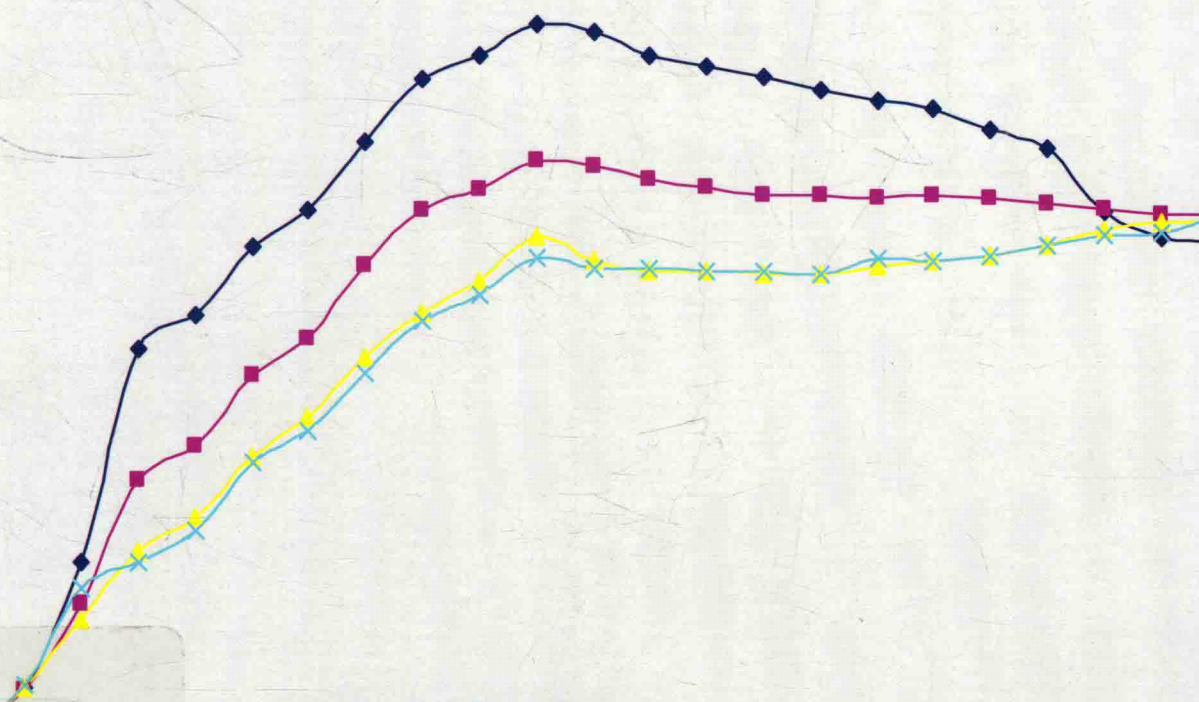


国家自然科学基金 (40702055) 和 中国博士后基金 (20080430884) 资助

强震动作用下顺倾和反倾岩质边坡 动力响应与破坏机理

刘红帅 齐文浩 郑 桐 著



地震出版社

国家自然科学基金 (40702055) 和 中国博士后基金 (20080430884) 资助

强震动作用下顺倾和反倾岩质边坡 动力响应与破坏机理

刘红帅 齐文浩 郑 桐 著

地 震 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

强震动作用下顺倾和反倾岩质边坡动力响应与破坏机理 /

刘红帅, 齐文浩, 郑桐著. -- 北京: 地震出版社, 2016.10

ISBN 978-7-5028-4775-3

I. ①强… II. ①刘… ②齐… ③郑… III. ①强震—地震作用—岩石—边坡稳定性—稳定分析 ②强震—地震作用—岩石破坏机理—研究 IV. ①P315 ②TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 229467 号

地震版 XM3863

强震动作用下顺倾和反倾岩质边坡动力响应与破坏机理

刘红帅 齐文浩 郑桐 著

责任编辑: 刘丽

责任校对: 孔景宽

出版发行: 地震出版社

北京市海淀区民族大学南路 9 号

发行部: 68423031 68467993

门市部: 68467991

总编室: 68462709 68423029

<http://www.dzpress.com.cn>

邮编: 100081

传真: 88421706

传真: 68467991

传真: 68455221

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印有限公司

版 (印) 次: 2016 年 10 月第一版 2016 年 10 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 201 千字

印张: 9.25

书号: ISBN 978-7-5028-4775-3/P(5473)

定价: 48.00 元

版权所有 翻印必究

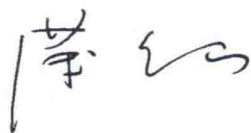
(图书出现印装问题, 本社负责调换)



汶川特大地震诱发了大量的崩塌、滑坡等地质灾害，造成了大量的人员伤亡和经济损失，举世震惊，从而激发了国内外学者的研究热情和兴趣。随着我国“一带一路”等国家战略的实施，诸多的建设工程正面临着地震滑坡灾害的威胁，搞清边坡的地震响应规律和破坏机理，以便于对症下药，可有效地减轻地震滑坡灾害，因此，开展边坡的动力响应与破坏机理研究具有重要的理论和工程应用价值。

全书分为基础篇、顺倾岩质边坡篇、反倾岩质边坡篇和结束篇四篇。基础篇从岩质边坡的地震破坏类型、地震崩滑体的统计特征及其影响因素、地震加速度响应和变形破坏机理四个方面评述了国内外的研究进展，简要介绍了本书采用的数值模拟原理及关键技术，阐述了振动台试验方案；顺倾和反倾岩质边坡篇详细介绍了地震响应和破坏机理的数值模拟和振动台试验成果；结束篇总结了顺倾和反倾岩质边坡的地震响应和破坏机理的创新性成果。全书思路清晰，结构安排合理，内容不乏有独到的学术见解和创新之处，可以为从事减轻岩质边坡地震灾害的科技人员提供有价值的参考。

本书著者刘红帅、齐文浩是我指导毕业的博士生，也是中国地震局工程力学研究所课题组多年来的核心成员。他们勤奋好学，刻苦钻研，学风严谨，他们一直从事边坡抗震领域的研究和工程咨询工作。该书是他们近十年科研成果的积累和总结，相信该书的出版将丰富和推动该领域的研究成果和工程应用。因此乐之作序。



2016年3月

随着我国西部大开发战略的实施以及国民经济建设的持续发展, 各类大型基础设施如南水北调西线、西电东送等大型水利枢纽工程、山区高速公路和铁路建设等正在实施或已列入国家发展规划, 这些工程建设会涉及到许多岩质边坡问题。然而, 我国地处世界上两条最活跃的地震带之间, 东有太平洋地震带, 西有喜马拉雅山—地中海地震带, 同时, 我国强震分布广, 破坏性地震几乎遍布各省, 其中西部地区地震活动性强, 频度高, 而上述大型工程项目大部分处于强地震多发区, 因此, 强震动作用下岩质边坡的稳定性问题是当前工程建设必须面对和急需解决的问题, 而岩质边坡地震响应与破坏机理的研究是解决边坡地震稳定性的关键。强震动作用下岩质边坡动力响应与破坏机理的研究不仅能够定量化解释边坡失稳机制, 而且是验证已有的稳定性分析方法的合理性与有效性、发展新的稳定性分析方法以及提出合理的防治对策的基础。因此, 强震动作用下岩质边坡地震响应与破坏机理的研究, 对于减少地震诱发的边坡灾害、确保工程安全、保障国家重大基础设施建设、促进国家西部大开发战略的实施, 具有极其重要的意义。

据《国语》记载: “周幽王三年(公元前 780 年), 泾洛渭

三川皆震，川竭，岐山崩。”这可能是世界上关于边坡地震破坏的最早记载。由此可见，地震滑坡是一个既古老又年轻的问题。自从人类在地球上诞生之日起，就不断与地震滑坡灾害做斗争，进行了大量相关研究工作，但至今仍有许多问题没有研究清楚，严重制约人类防治滑坡灾害的实践能力。岩质边坡种类繁多，地震响应与破坏机理千差万别。层状结构岩质边坡是最常见的岩质边坡类型之一。

为此，本书选取实际工程中常见的含软弱夹层的顺倾和反倾层状结构岩质边坡为工程背景，运用数值分析和大型振动台试验相结合的手段，研究给出了强震动作用下顺倾和反倾岩质边坡的地震响应特征和破坏机理的规律，力求做到理论联系实际。本书共分为十章：第一章介绍研究背景、研究现状和研究内容；第二章介绍了 FLAC3D 力学原理及数值模拟关键技术；第三章详细介绍了岩质边坡大型振动台试验设计方案；第四至第五章采用 FLAC3D 开展了含软弱夹层顺倾岩质边坡表面加速度放大效应的影响因素和破坏机理的研究，提炼给出了相应的地震响应特征及规律和破坏的力学机制；第六章介绍了顺倾岩质边坡的大型振动台试验成果，包括地震响应特征、破坏机理及典型的尘雾现象；第七至第八章采用 FLAC3D 开展了含软弱夹层的反倾岩质边坡表面加速度放大效应的影响因素和破坏机理的研究，提炼给出了相应的地震响应特征及规律和破坏的力学机制；第九章介绍了反倾岩质边坡的大型振动台地震响应的试验成果；第十章总结了研究成果，指出研究的不足之处。

本书主要内容是以国家自然科学基金(40702055)和中国博士后基金(20080430884)的研究成果为基础撰写的。

刘红帅撰写了前言、第一至六章和第九、第十章的内容,齐文浩、郑桐撰写了第七、第八章的内容。本书得到了我的博士生导师防灾科技学院薄景山教授、博士后合作导师哈尔滨工程大学唐立强教授的大力支持、鼓励和指导。项目申请过程中,中国地震局工程力学研究所袁晓铭研究员、中国地震局地球物理研究所李小军研究员和吉林大学建设工程学院李广杰教授给予热情有力的思路点拨,并对申请书提出了中肯的修改意见;项目执行期间,防灾科技学院郭迅教授为大型振动台试验的实施提出了富有建设性的建议,中国地震局工程力学研究所景立平研究员、中国科学院地质与地球物理研究所伍法权研究员和成都理工大学许强教授给予了热情的支持;本书撰写过程中,地壳运动监测工程研究中心领导及同事给予了大力支持。本书出版之际,我的导师薄景山教授欣然应允作序。著者向对本书做出贡献的专家学者和单位表示诚挚的谢意。

希望通过正式出版该研究成果,与国内外同行进行有益的交流,并促进对相关问题的进一步深化。由于学术视角的不同,投入时间和学术见识的局限性,书中的观点和结果妥当与否,敬请广大同行予以批评指正,并共同探讨。

刘红帅

2016年2月

一 基础篇

第一章 绪 论	2
1.1 研究意义	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 地震边坡破坏的类型	3
1.2.2 地震崩滑体的统计特征及其影响因素	4
1.2.3 地震加速度响应	6
1.2.4 变形破坏机理	8
1.3 研究内容	10
第二章 FLAC3D 力学原理及数值模拟技术	12
2.1 力学原理	12
2.1.1 应变速率计算	12
2.1.2 应力计算	13
2.1.3 速度和位移计算	14
2.1.4 不平衡力及阻尼计算	14
2.1.5 循环计算	15
2.2 实施关键技术	15
2.2.1 FLAC3D 求解流程	15
2.2.2 网格划分	15
2.2.3 边界条件及阻尼的确定	16
2.2.4 计算模型及参数	16
2.2.5 地震波的调整	17

第三章 岩质边坡振动台试验设计.....19

3.1 引 言.....19

3.2 试验设备.....20

3.3 原型边坡.....20

3.4 模型边坡方案.....21

3.4.1 模型设计.....21

3.4.2 模型材料.....22

3.4.3 模型制作.....22

3.5 观测方案.....23

3.5.1 基本原则.....23

3.5.2 传感器位置布设.....24

3.6 小 结.....25

二 顺倾岩质边坡篇

第四章 顺倾岩质边坡表面放大效应.....28

4.1 引 言.....28

4.2 地震动输入方式的影响.....28

4.3 地震动参数对边坡表面放大效应的影响.....31

4.3.1 地震动峰值的影响.....31

4.3.2 地震动频率的影响.....31

4.3.3 地震动持时的影响.....32

4.3.4 地震动初动方向的影响.....33

4.4 软弱夹层力学参数的影响.....34

4.4.1 体积模量的影响.....34

4.4.2 剪切模量的影响.....34

4.4.3 黏聚力的影响.....34

4.4.4 内摩擦角的影响.....35

4.4.5 抗拉强度的影响.....35

4.5 坡体结构的影响.....36

4.5.1 坡高的影响.....36

4.5.2 坡角的影响.....38

4.5.3	软弱夹层厚度的影响	39
4.5.4	软弱夹层倾角的影响	40
4.5.5	软弱夹层位置的影响	40
4.6	小 结	41
第五章	顺倾岩质边坡地震破坏机理	43
5.1	引 言	43
5.2	坡高的影响	43
5.2.1	塑性区计算结果	43
5.2.2	坡高的影响规律	49
5.3	坡角的影响	49
5.3.1	塑性区计算结果	49
5.3.2	坡角的影响规律	54
5.4	软弱夹层厚度的影响	54
5.4.1	塑性区计算结果	54
5.4.2	软弱夹层厚度的影响规律	57
5.5	软弱夹层倾角的影响	57
5.5.1	塑性区计算结果	57
5.5.2	软弱夹层倾角的影响规律	59
5.6	软弱夹层位置的影响	59
5.6.1	塑性区计算结果	59
5.6.2	软弱夹层位置的影响规律	60
5.7	小 结	60
第六章	顺倾岩质边坡大型振动台试验	62
6.1	引 言	62
6.2	模型试验加载	62
6.3	模型边坡的动力特性	65
6.3.1	动力特性的变化规律	65
6.3.2	动力特性的影响因素	67
6.4	模型边坡的加速度响应	68
6.4.1	加速度响应放大规律	70
6.4.2	峰值加速度的影响	74

6.4.3 坡体对输入地震动的影响	75
6.5 模型边坡破坏机理	77
6.6 滑坡尘雾景象	79
6.7 小 结	80

三 反倾岩质边坡篇

第七章 反倾岩质边坡表面放大效应	84
------------------------	----

7.1 引 言	84
7.2 坡体结构的影响	84
7.2.1 坡高的影响	85
7.2.2 坡角的影响	85
7.2.3 软弱夹层厚度的影响	86
7.2.4 软弱夹层倾角的影响	87
7.2.5 软弱夹层位置的影响	87
7.3 小 结	88

第八章 反倾岩质边坡地震破坏机理	89
------------------------	----

8.1 引 言	89
8.2 坡高的影响	89
8.2.1 塑性区计算结果	89
8.2.2 坡高的影响规律	92
8.3 坡角的影响	93
8.3.1 塑性区计算结果	93
8.3.2 坡角的影响规律	96
8.4 软弱夹层厚度的影响	96
8.4.1 塑性区计算结果	96
8.4.2 软弱夹层厚度的影响规律	98
8.5 软弱夹层倾角的影响	98
8.5.1 塑性区计算结果	98
8.5.2 软弱夹层倾角的影响规律	100
8.6 软弱夹层位置的影响	100

8.6.1	塑性区计算结果	101
8.6.2	软弱夹层位置的影响规律	102
8.7	小 结	103
第九章	反倾岩质边坡大型振动台试验	104
9.1	引 言	104
9.2	试验加载方案	104
9.3	试验结果分析	106
9.3.1	模型边坡的加速度响应	106
9.3.2	坡体对输入地震动的影响	114
9.4	模型边坡破坏机理	117
9.5	小 结	118
 四 结束篇 		
第十章	结论与展望	120
10.1	顺倾岩质边坡成果	120
10.1.1	地震响应	120
10.1.2	破坏机理	121
10.1.3	大型振动台试验	122
10.2	反倾岩质边坡成果	122
10.2.1	地震响应	122
10.2.2	破坏机理	123
10.2.3	大型振动台试验	123
10.3	展 望	124
参考文献		125
参考资料		133



基础篇



第一章 绪 论

1.1 研究意义

大量的震害调查结果表明,地震诱发的边坡失稳破坏是主要的地震地质灾害类型之一,特别是在山区和丘陵地带,边坡失稳形成的滑坡、崩塌等灾害往往具有空间分布范围广、数量多、灾害严重的特点。例如,1786年发生在四川泸定的 $7\frac{1}{2}$ 级地震,诱发了严重的崩塌,形成了大范围的滑坡,死亡人数超10万(李树德等,2001);1920年发生在宁夏海原的 $8\frac{1}{2}$ 级地震诱发了大型滑坡657处,滑坡体四处堵塞河道,形成了多处堰塞湖,死亡的243人多半死于滑坡灾害(国家地震局兰州地震研究所、宁夏回族自治区地震队,1980);1933年发生在四川叠溪的 $7\frac{1}{2}$ 级地震,诱发了大量的滑坡,形成的堰塞湖决口后,导致2500人死亡(王兰生等,2008);1994年发生在美国Northridge的6.7级地震,诱发了超过1.1万处滑坡,面积超过 10000 km^2 (Parise and Jibson, 2000);2008年发生在四川汶川的8.0级地震触发了滑坡、崩塌数量总数达4万~5万处,其中对人员安全构成直接威胁的灾害隐患点就达12000余处,规模大于1000万立方米的巨型滑坡达30余处(黄润秋等,2009)。

我国地势西高东低,山地面积约占国土面积的 $\frac{2}{3}$,这就从客观上决定了我国发育有大量的自然边坡。伴随着我国不同时期国家战略的实施以及国民经济建设的持续发展,各类大型基础设施如南水北调西线、西电东送等大型水利枢纽工程以及山区高速公路和铁路建设等正在实施或已列入国家发展规划(李海波等,2003),我国工程建设施工期间和运营阶段将会遇到大量的岩质边坡稳定性问题。地处欧亚大陆板块东南隅,东部为西太平洋板块和菲律宾海板块,西南为印度洋板块,正是由于欧亚板块受到印度洋板块的挤压碰撞、与菲律宾海板块的交叉俯冲及西太平洋的俯冲作用,使得我国西南地区的地震活动处于活跃期,比如汶川地震、玉树地震和芦山地震等。这无疑明显增加了我国西南地区地震滑坡的发生几率。

由此可见,强震动作用下岩质边坡的稳定性问题是当前工程建设必须面对和急需解决

的问题,而岩质边坡地震响应与破坏机理是解决其地震稳定性的核心,其地震响应和破坏机理的研究不仅能合理地解释边坡破坏机制和预估边坡震害,为验证已有稳定性分析方法的合理性与有效性、发展新的稳定性分析方法提供科学依据,而且能实现主动防灾、科学防灾,减少我国水利水电工程、高速铁路和公路等工程可能出现的边坡地震灾害、确保工程安全、保障国家重大基础设施顺利建设和国家级大开发战略的顺利实施。因此,开展强震动作用下岩质边坡的地震响应和破坏机理的研究无疑具有重要的理论价值和重大的工程意义。

1.2 国内外研究现状

自从人类在地球上诞生之日起,就不断与地震边坡灾害做斗争,由此可见,地震边坡灾害是一个古老的问题。据《国语》记载:“周幽王三年(公元前780年),泾洛渭三川皆震,川竭,岐山崩。”这可能是世界上关于地震边坡破坏的最早记载。直到现代科学框架的雏形建立之前,受科学知识和生产水平的限制,历史上记载的边坡地震破坏通常用“山崩”等简单词汇描述边坡的破坏现象,无法给出较为详细的科学描述及解释。从检索到的文献分析,最早关于边坡动力响应及稳定性的研究是从土石坝坝坡开始的,起源于20世纪20~30年代。关于土质边坡动力响应及稳定性的论文和著作相当多,但是关于岩质动力响应及稳定性的问题则要迟将近半个世纪,可追溯到20世纪70年代,其研究成果相对要少,这可能跟岩质边坡的震害少有关。因此,关于地震边坡灾害的研究是一个较年轻的课题。

自进入现代科学体系以来,国内外学者围绕地震边坡破坏的类型、地震崩滑体的统计特征及其影响因素、地震加速度响应和变形破坏机理、地震边坡稳定性评价等方面积累了大量的科研成果。关于地震边坡稳定性评价成果,刘红帅(2006)、胡卸文和罗刚(2014)均对此方向进行了较为系统的报道,此处不再赘述,本书只对前四方面进行简要的总结。

1.2.1 地震边坡破坏的类型

近年来,中国台湾集集地震、四川汶川地震和日本东海岸地震诱发了大量的边坡灾害,由于地震震级高、持续时间长、震区地形地质环境复杂,地面地震动响应强烈,因而其触发地质灾害呈现出一系列与通常重力环境下地质灾害迥异的特征,如独特的震动破裂和溃滑失稳机制、超强的动力特性、大规模的高速抛射与远程运动、大量山体震裂松动与坡麓物质堆积、众多的崩滑堵江等。这些现象和问题有的已远远超出了人类原有的认识和知识范畴,推动了人类对其系统思考和总结,扩展和提升了对于边坡地震灾害的科学内涵。黄润秋(2009)调查了汶川8.0级地震触发的大量崩滑实例,依据灾害机制及其地质力学模式,

提出了对汶川地震触发崩塌、滑坡成因机制的分类体系,这一体系包括5大类、14种类型,具体为溃滑型(拉裂-溃滑型、顺层-溃滑型、剪断-溃滑型和复合型)、溃崩型(倾倒型、溃屈型、溃散型和溃喷型)、抛射型(整体抛射型和单体抛射型)、剥皮型(浅表溃散和块体失稳)和震裂型(裂开型和松弛型)。大类的划分主要依据斜坡失稳的动力过程,这是强震条件下斜坡破坏最显著的表征;小类的划分主要依据坡体的地质结构,其异同决定了在同一动力过程中斜坡失稳具体形式上的差异。Cui等(2010)从灾害链的角度出发,指出汶川地震直接诱发的山地灾害主要是崩塌和滑坡,受局部地形地貌条件、水文条件和松散体规模的影响,衍生出泥石流和堰塞湖灾害,从而形成一个完整的地震诱发山地灾害链。他们根据地震诱发机理和运动学特征,给出了分类:地震滑坡分为振动助推式、振动碎裂式、振动加载式、振动错断式和振动错落转移式5类;地震崩塌分为振动倾倒式、振动错落式、振动流动式崩塌、振动弹射式和振动抛射式5类;堰塞湖分为滑坡型、泥石流型和滑坡-泥石流型3种;泥石流分为坡面型、冲沟型和沟谷型3种。

此外,陈国顺(1991)根据山西地震带中古地震和近代地震触发的多处滑坡滑面倾角大小,提出振荡式及触发式滑坡两种类型:振荡式滑坡的滑动面倾角小,因而滑力来源于强震振动;而触发式滑坡的滑动面倾角大,因而滑力主要来自滑坡体本身静荷载。

对地震边坡灾害类型的科学划分有助于建立起该灾害的研究体系,形成有利的概念设计原则,提升人类探索灾害机理的认识,加速建立地震边坡灾害的勘察、设计和施工的合理化防灾体系。尽管通过汶川地震的震例提升了人类对地震边坡灾害的认识,但不同的学者给出的类型不尽相同,不同的地震可能有不同的特点,有必要系统总结国内外地震震例,发现大地震和特大地震的边坡灾害的共性和差异,形成相对统一且完整的分类体系。

1.2.2 地震崩滑体的统计特征及其影响因素

国内外许多学者利用地震学、地质学和统计学原理详细论述了地震与崩滑体的统计关系,具体如下。

国外学者 Keefer (1984a, b) 根据世界范围内地震事件研究了区域地震崩滑的特点,指出高度超过 150 m 且坡度大于 25° 和冰川抛蚀的碎裂岩石边坡更易发生崩塌,认为诱发滑坡的最小地震震级为 M_w 4.0, 利用美国的数据建立了滑坡分布与地震参数的关系式。Jibson 等 (1994) 研究了美国 1991 年 Racha Earthquake 的边坡破坏情况,指出地震边坡破坏类型基本上受岩性和地质构造的控制。Wasowski 等 (2002) 分析了 1980 年 Irpinia 地震中远离地震断层的 Sele 河谷两侧的滑坡密度差异的成因,指出河谷东西两侧的滑坡密度差异是由于地下水条件的不同引起的。Carro 等 (2003) 基于 1997 年 Umbria-Marche 地震的资料,提出一种用于判断岩石崩塌发生概率的方法。Bozzano 等 (2004) 根据现场调查