

ROCK SLOPE

DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS

岩质边坡 动力反应分析

祁生文 伍法权
严福章 刘春玲 著



科学出版社

www.sciencep.com

TU457/3

2007

岩质边坡动力反应分析

祁生文 伍法权 严福章 刘春玲 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一本关于岩质边坡动力反应分析的专著。全书对边坡动力反应分析进行了较为系统的回顾,分析了边坡动力反应的工程地质因素、边坡动力反应的工程地质模型以及边坡特别是单面边坡在简谐波和地震波作用下的动力响应规律,给出了单面边坡两种不同的动力反应形式、边坡动力稳定性的简化算法以及边坡动力变形的分析方法。书中还介绍了边坡动力稳定性的空间预测方法,给出了边坡动力反应分析的流程。最后书中给出了一项重大工程边坡地震动力反应的分析实例。

本书可供从事地质工程、土木工程、地震工程的专家、学者以及相关专业的研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

岩质边坡动力反应分析 / 祁生文等著. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-020463-9

I. 岩… II. 祁… III. 岩石-边坡稳定性:动力稳定性-分析(力学)
IV. TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 160158 号

责任编辑:韩 鹏 李久进 / 责任校对:曾 茹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年10月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007年10月第一次印刷 印张:16

印数:1—1 500 字数:363 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序

我国是一个多山、多地震的国家,历史上由于地震导致的边坡失稳事例数以千计。近年来,随着我国西部大开发战略决策的实施,许多大型工程上马,遇到了大量的边坡,尤其是复杂岩质高陡边坡,这些边坡的地震动力响应、变形和稳定性问题均十分突出,成为亟待解决的重大问题。

边坡动力反应问题对于边坡地质灾害的防治工程、大量山区土木工程的布置具有重要的指导意义,也是国内外土木工程和地质工程的热点研究领域,具有较高的学术价值和重要的工程实践意义。近半个世纪以来,人们对边坡动力反应问题,倾注了极大的热情,取得了一些成绩。但是由于边坡动力反应问题是一个涉及工程地质学、地球物理学、土木工程等多学科的交叉难题,具有很大的难度,尤其是针对岩质边坡,国内外研究程度都较低。

该书作者对岩质边坡动力反应问题进行了艰难探索,在国家青年科学基金、中国博士后基金等的资助下,结合大量岩质边坡的工程实践写成了该专著。该书是作者对几年来取得的一系列成果的系统总结。

该书较为系统地研究了岩质边坡的动力反应问题,通过大量的文献阅读,对国内外零散分布于岩土力学、地震工程、地球物理领域的文献进行了详尽的综述,全面系统地总结了岩质边坡动力反应问题的研究现状。

在对边坡动力反应进行工程地质分析的基础上,作者利用拉格朗日元法,通过大量的数值模拟,研究了简谐波、地震波作用下均质弹性单面边坡的动力反应规律,总结了边坡动力反应的位移、速度、加速度在边坡剖面上分布的一般规律,发现了单面边坡的高边坡效应,并推导了高边坡效应的临界高度表达式,在此基础上,提出了边坡动力稳定性的简化算法。

作者研究了岩体结构面的循环剪切特性,推导了考虑循环剪切导致的结构面退化的弹塑性本构关系和考虑循环效应的屈服强度表达式,提出了考虑循环效应和速率效应的岩质边坡地震永久位移表达式,并用算例进行了验证;同时还介绍了边坡动力稳定区域预测的研究,最后列举了复杂岩质边坡的动力分析实例。

总之,该书得出了边坡动力响应剖面分布的一般规律,建立了较为完整的边坡动力问题研究方法,并在工程实践中得到了较为成功的应用。该书在学术上有重要创新,在应用上有新的突破,具有较高的学术价值和显著的工程实践意义,是工程地质和岩石力学领域一部优秀的学术专著。笔者愿意将该书推荐给读者,期望得到广泛的反响与研讨,以推动对岩质边坡动力反应这一古老而年轻命题的更深入研究。

是为序!

中国工程院院士

王思敬

2007年7月27日

前 言

边坡动力反应问题是一个古老而年轻的命题,是近年来工程地质、岩土工程、地震工程领域的研究热点。最早关于边坡动力反应问题的研究是土石坝坡的动力反应研究,起源于 20 世纪 20~30 年代,目前关于土质边坡动力反应问题的著述也较多。但是关于岩质边坡动力反应问题的研究则要迟得多,可追溯到 20 世纪 70 年代。本书是对以往岩质边坡动力反应研究的系统总结,也是作者们几年来在岩质边坡动力反应研究领域取得的一些成果的系统总结,其间得到了国家青年科学基金(No. 40302032)和中国博士后基金(No. 2002032100)的资助。

全书共分 8 章,包括以下 5 部分:第一部分是边坡动力反应的工程地质因素以及边坡动力反应的工程地质模型;第二部分是简谐波和地震波作用下边坡动力响应的规律研究;第三部分是边坡动力稳定性的简化算法;第四部分是边坡动力反应的变形研究;第五部分是一个重大边坡工程实例。

由于岩质边坡动力反应是一个涉及工程地质学、地球物理、抗震工程等多学科的复杂难题,目前许多问题的研究尚在起步阶段和探索之中。本书所阐述的内容是作者近年来一些科研成果的总结和体会,希望它的出版能对这方面的工作有所推动,起到抛砖引玉的作用。由于作者水平所限,书中难免存在纰漏甚至错误,恳请读者批评指正。

本书的完成得益于中国科学院地质与地球物理研究所的王思敬院士、孙广忠研究员、王存玉副研究员、李晓副研究员,中国地质大学(北京)工程技术学院的孙进忠教授,国家地震局地质研究所蒋溥研究员、梁小华研究员,北京市地震局丁彦慧副研究员,中国水电顾问集团成都勘测设计研究院李文纲副总工程师、巩满福副总工程师、郑汉淮教授级高级工程师、杨静熙高级工程师、邓卫东高级工程师等,美国 itasca 咨询公司的 Peter Cundall 博士、Christine Detournay 博士、D. H. Roger 博士等,他们对作者的工作给予了大量的、无私的帮助,作者对他们表示衷心的感谢。

撰写本书时查阅了大量的文献,作者要感谢这些文献的创作者们,他们的智慧给作者以极大的启迪。

最后,作者对为本书作序,并给予高度评价的王思敬院士表示深深的谢意!

作 者

2007 年 7 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 边坡动力问题的研究现状	2
1.3 存在的问题	11
1.4 研究内容	12
主要参考文献	12
第 2 章 边坡动力稳定性的工程地质分析	19
2.1 地震作用下边坡稳定性的影响因素分析	19
2.1.1 地质背景的影响	19
2.1.2 岩体结构类型的影响	20
2.1.3 岩性组合的影响	21
2.1.4 地形地貌的影响	21
2.1.5 水文地质条件的影响	23
2.2 边坡的工程地质模型	23
2.3 边坡动力破坏形式的确定	24
2.4 边坡动力失稳机制探讨	26
2.5 小结	28
主要参考文献	28
第 3 章 边坡动力反应三量分布规律研究	30
3.1 拉格朗日元法的基本原理	31
3.1.1 应变速率的计算	31
3.1.2 应力的计算	32
3.1.3 速度和位移的计算	33
3.2 边坡动力反应数值模型边界条件的设置	33
3.3 边坡动力反应三量的提取和表达	34
3.4 动力反应计算持时的影响	35
3.5 黏滞边界条件设置的远近对于边坡动力反应规律的影响	38
3.6 动力作用下均质、各向同性弹性边坡三量的分布规律	40
3.6.1 简谐波作用下均质、各向同性弹性边坡三量的分布规律	40
3.6.2 地震波作用下均质、各向同性弹性边坡三量的分布规律	48
3.6.3 岩土体材料对于边坡动力反应的影响	53

3.6.4 动力输入的参数对边坡动力反应的影响	55
3.7 两种不同的动力反应	60
3.8 高边坡动力反应临界高度表达式的推导	61
3.9 边坡动力反应图像的刻画	63
3.10 小结	63
主要参考文献	65
第4章 边坡动力稳定性分析简化算法	66
4.1 拟静力分析方法	66
4.2 边坡动力稳定性的改进简化算法	70
主要参考文献	71
第5章 节理的动力剪切特性研究	72
5.1 循环荷载下节理的剪切特性	72
5.1.1 循环荷载下节理剪切特性的概念模式	72
5.1.2 循环荷载下节理的应力应变关系	74
5.2 循环荷载下软弱夹层的剪切特性	83
5.2.1 循环剪切下软弱夹层的剪切特性试验结果	84
5.2.2 循环剪切下软弱夹层的应力-应变关系	84
5.3 动荷载下节理的速率效应	85
主要参考文献	87
第6章 边坡动力稳定性分析的有限滑动位移方法	89
6.1 Newmark 有限滑动位移算法	90
6.1.1 圆弧滑动分析	90
6.1.2 块体滑动	92
6.1.3 平面滑动	93
6.1.4 一次地震中的有效滑动次数	94
6.2 Newmark 有限滑动位移算法的改进算法	95
6.2.1 Sarma 提出的算法	95
6.2.2 Makdisi-Seed 简化算法	99
6.2.3 Seed 提出的算法	100
6.2.4 Kramer 算法	103
6.2.5 王思敬算法	103
6.3 各方法优缺点评述	107
6.4 基于剩余推力法的地震滑坡永久位移估算	107
6.4.1 算法	107
6.4.2 算例分析及讨论	110
6.5 考虑结构面退化的岩质边坡地震永久位移	112
6.5.1 算法	112
6.5.2 边坡地震永久位移的求取步骤	114
6.5.3 算例	115

6.5.4 结论与讨论	117
主要参考文献	118
第7章 边坡动力稳定性区域预测	120
7.1 边坡地震稳定性的初判准则	120
7.1.1 触发边坡崩滑的最小地震烈度	120
7.1.2 触发边坡崩滑的最小地震震级	121
7.1.3 震级与地震滑坡区域面积的关系	121
7.1.4 边坡崩滑地震震级与震中距的关系	122
7.2 边坡动力稳定性预测流程	124
主要参考文献	125
第8章 岩质边坡动力反应分析实例——锦屏一级水电站左岸高陡边坡动力稳定性分析	126
8.1 引 言	126
8.2 区域地震活动性分析	126
8.3 近场区地质构造和地震活动性分析	127
8.4 地震危险性概率分析	128
8.5 场地相关加速度时程的合成	129
8.5.1 拟合目标谱法的基本原理和方法	129
8.5.2 目标谱的选用	130
8.5.3 持续时间以及时间包络线函数 $f(t)$ 的确定	130
8.6 左岸边坡工程地质条件分析	131
8.6.1 边坡地形地貌条件	131
8.6.2 地层岩性与岩体质量	133
8.6.3 地质构造与边坡结构	135
8.6.4 边坡应力场及其演化	136
8.6.5 水文地质条件	138
8.7 边坡工程地质模型及动力破坏形式的判断	138
8.8 边坡动力分析数值模型的建立	139
8.8.1 岩体物理力学参数的选取	139
8.8.2 数值模型	140
8.8.3 动力分析数值模拟结果分析	142
主要参考文献	149
附录A 第一种岩性材料边坡动力反应图谱(拉格朗日元法)	150
A.1 周期 $T=0.2s$	150
A.2 周期 $T=0.4s$	163
A.3 周期 $T=0.6s$	174
A.4 周期 $T=0.8s$	184
A.5 周期 $T=1.0s$	193
附录B 第二种岩性材料边坡动力反应图谱(拉格朗日元法)	200

附录 C 第三种岩性材料边坡动力反应图谱(拉格朗日元法)..... 205

C.1 周期 $T=0.2\text{s}$ 205

C.2 周期 $T=0.4\text{s}$ 214

C.3 周期 $T=0.6\text{s}$ 222

C.4 周期 $T=0.8\text{s}$ 230

C.5 周期 $T=1.0\text{s}$ 238

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

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(张倬元等,1993)。边坡的稳定和变形问题是工程地质学、岩石力学和土力学领域的经典命题之一。从荷载的角度来讲,有静荷载问题和动荷载问题之分。边坡所受到的动力荷载主要有地震荷载、爆炸荷载和机械振动荷载几种。造成破坏最多、最大的当属地震荷载。据《国语》记载:“周幽王二年(公元前 780 年),泾洛渭三川皆震,川竭,岐山崩。”这是世界上最早的关于边坡在动力荷载下破坏的记载(顾功序等,1983)。

1933 年 8 月 25 日四川叠溪 7.5 级地震造成许多滑坡,其中叠溪台地和教场坝等大滑坡阻塞岷江,形成 4 个堰塞湖,45 天后湖坝决口,高达 60m 的水头澎湃而下。这次地震造成 6800 人死亡,使沿江两岸居民受到一次浩劫(铁道部科学研究院西北研究所编,1988)。

我国是一个多地震的国家,历史上曾经发生许多次强烈地震,目前正处于地震活跃期。根据《中国地震目录》及其他文献记载,仅从公元前 780 年到 1992 年,在我国境内共发生震级大于 4.7 级的地震就超过 5142 次,地震触发的滑坡和崩塌数以千计^①。表 1-1 列出了我国地震滑坡、崩塌灾害的典型事例。

表 1-1 我国地震滑坡灾害典型事例^①

时间/(年-月-日)	地震位置	引发滑坡	现象及后果
1719-06-19	甘肃通渭南	笔架山崩塌、山地土山多崩、甘谷北山南移	山崩致死伤 40 000 余人,其中甘谷北山南移,掩埋永宁全镇及礼辛留一部分,死伤 30 000 余人
1920-12-16	宁夏海原	海原县一个长达 0.3km 的山体完全崩塌,西吉和固原一带的清水河与葫芦河的分水岭地区黄土滑坡十分普遍,甘肃静宁西部到会宁东面几十公里范围内,大型滑坡崩塌有几十处	村庄崩倒、河床完全被壅塞;在面积约 250km ² 余的黄土地区发生流动滑坡,据估计,死于诱发滑坡的人数高达 10 余万人,占这次死亡总人数的一半有余
1933-08-25	四川迭溪	在迭溪周围 15km 范围内,滑坡和崩塌到处可见,原有地貌完全改变	迭溪千年古城被毁,500 余人丧生;岷江西岸 10 余个村寨崩倒,部分完全崩入江中,岷江两岸山崩堵江成湖,45 天后溃决,造成 6800 人死亡
1950-08-15	西藏察隅	大量滑坡和崩塌	滑坡堵江,溃决后死于水灾者为地震本身的 3 倍以上
1974-05-11	云南昭通	木杆河、溪河、丁木河等陡峭河谷的两岸发生大面积的崩塌、滑坡	滑坡堵江、崩塌造成的损失约占此次地震总损失的 40%~50%

^① 丁彦慧,1997,中国西部地区地震滑坡预测方法研究,中国地质大学(北京)硕士学位论文,导师孙进忠、王余庆。

国外也有大量的地震滑坡实例。1970年5月31日秘鲁地震(面波震级 $M_s=7.7$),绝大多数人员伤亡是由于滑坡和崩塌造成的,瓦斯卡兰山(Nevados Huascaran)滑坡埋葬了1.8万人(张咸恭等,2000)。

1911年发生于塔吉克斯坦境内的地震形成了一个库容达11亿 m^3 的Sarez湖,滑坡体积22亿 m^3 ,天然坝长2km,高600m,这一坝高远远高出了人类建造的土石坝的世界纪录(陈祖煜,2003)。

日本1995年发生的阪神地震导致5500余人丧生,直接导致经济损失1000亿美元。由地震触发的滑坡则是这次造成重大人员伤亡和经济损失的主要原因。仁川滑坡是规模最大的一个,该滑坡摧毁了11座房屋,掩埋了34人,其体积为20万 m^3 (陈祖煜等,2005)。

我国是一个多山的国家,山地约占国土面积的 $2/3$,有大量的自然边坡;同时由于西部大开发战略的实施,西南和西北许多重大水利水电工程正在建设中或处在论证阶段。这些重大水利水电工程均建于高山峡谷区,边坡极为高陡,以锦屏一级水电站高边坡为例,自然边坡高达1300m余。我国西部由于受印度板块和欧亚板块的碰撞影响,青藏高原快速隆起,区域地质背景复杂、地震活动频繁、复杂高边坡的动力问题极为突出。

由于静荷载和动荷载的不同特点,边坡在动力荷载和静荷载作用下其变形和破坏形式是不同的。相对于边坡的静力问题而言,边坡动力问题更为复杂,而且远未得到应有的研究。边坡动力问题的复杂性表现在以下几个方面:

(1) 相对于静力问题来讲,动力问题本身要复杂得多;

(2) 边坡动力问题的研究散布在各个不同的领域,它涉及岩土力学、工程地质学、地震学、振动学、地球物理学、结构动力学、地震工程学等,涉及的学科范围极为广泛;

(3) 岩土体动力学的研究很晚,特别是岩体动力学的研究;

(4) 动力试验条件要求苛刻,试验设备复杂、昂贵;

(5) 边坡动力问题可验证的实例太少。

以上几个因素是制约边坡动力问题研究的主要原因。国内外关于边坡动力反应规律的研究尚不成熟,开展边坡动力反应及稳定分析不仅具有重要理论意义,而且具有重大实践价值。

目前岩土体的动力问题已经成为岩土力学界、工程地质学界、地震工程学界的研究热点之一。国内外的地震学者、地质学者、岩土力学工作者做了大量的工作,取得了一些可喜的成果。祁生文在博士论文《边坡动力响应及应用研究》中,对边坡动力响应这一命题的研究现状进行了较为全面的综述^①。

1.2 边坡动力问题的研究现状

最早研究边坡动力问题的领域是土力学领域,当时是为了解决土石坝和堤坝在地震作用下的稳定性问题。在早期的关于土坝地震设计方法中人们往往错误地假定坝坡是绝对刚性体,因而分析方法也采用拟静力法(pseudo-static approach)。虽然现在我们知道

^① 祁生文,2002,边坡动力响应及应用研究,中国科学院地质与地球物理研究所博士学位论文,导师伍法权。

土坝是变形体而非刚体,它们对地震的反应决定于构成它们的材料、几何形态以及地基运动特点,但是早期对于这点的认识则来自于试验(Keightley,1963、1966)和地震期间坝坡的反应(Okamoto et al.,1969)。

Mononobe H A 等最早认识到坝坡是变形体,从变形体的角度研究了土质边坡的动力反应,并第一次提出了一维剪切楔法的模型,开创了剪切楔法分析边坡地震反应分析的先河(Mononobe et al.,1936)。然而,直到 20 年后,由于 Hatanaka 和 Ambraseys 的工作(Hatanaka,1952、1955;Ambraseys,1960a、1960b),这个模型的意义才被人们重新认识并得到工程界的认可。后来的很多学者对一维剪切楔法进行了改进,把剪切楔法推广到二维、三维的情形下。表 1-2 列出了关于剪切楔法的重要发展和研究一览表。

表 1-2 关于剪切楔法的重要发展和研究一览表

参考文献	主要贡献
Mononobe et al.,1936	第一次把一维剪切楔模型引入土坝的研究
Hatanaka,1952、1955	说明了剪切变形是主要的;对矩形河谷建立了二维剪切楔模型;发展了基于反应谱的合理设计步骤
Ambraseys,1960	把剪切楔模型发展到平面形态为梯形的坝坡、下伏弹性层的矩形河谷
Keightley,1963、1966	集中质量的剪切楔模型用以解释足尺试验
Martin,1965①	用一维剪切楔模型进行参数研究,得出模量和深度的立方根成正比
Seed and Martin,1966 Ambraseys and Sarma,1967	对于潜在滑体利用一维剪切楔模型得到了“地震系数”
Okamoto et al.,1969	发表了几例地震期间,Sannokai 大坝的完整反应
Frazier,1969①	Bouquet 峡谷大坝的二维集中质量剪切楔模型
Petrovski et al.,1974	Mavrovo 大坝的二维集中质量剪切楔模型
Okamoto,1973	包括下伏土层散射阻尼的一维剪切楔模型
Sarma,1979	下伏只发生剪切变形的弹性土层简化一维剪切楔模型
Makdisi and Seed,1979	基于一维剪切楔和等效线性化方法简化了手算流程
Abdel-Ghaffa and Scott,1979	利用一维和二维剪切楔模型的结果跟原型试验以及地震反应作对比
Gazetas,1980	利用二维剪切楔模型计算土坝的侧向和纵向的稳定性
Gazetas,1981、1982	发展了类一维剪切楔模型,并通过几例历史地震资料,拓展了它的使用范围
Gazetas,1981	推广了剪切楔的概念并用以研究均质或非均质土坝的纵向和铅直向反应
Gazetas and Abdel-Ghaffar,1981	利用 12 个大坝的原型试验结果来验证非均质剪切楔模型
Abdel-Ghaffar and Koh,1981	利用模量随深度增加的规律发展了剪切楔概念并用来分析土坝的纵向振动
Ohmachi,1981、1982	简化三维模型,把坝体沿纵向切成内部相连的超单元进行一维动力反应分析
Gazetas et al.,1981、1982	基于非均质剪切楔模型推导了线性、应变相容线性非静态自由振动公式
Abdel-Ghaffar and Koh,1982	基于 Galerkin 公式的三维剪切楔模型
Oner,1984	对于峡谷地形和非均质介质,用半经验的方法研究土坝自振周期的简单表达式
Elgamal et al.,1984②	利用线性条件推导了简化的非弹性的 Galerkin 类型的公式

续表

参考文献	主要贡献
Prevost et al., 1985 ^③	作为基本函数的一维和二维特征振型
Dakoulas and Gazetas, 1985	推广了一维非均质剪切楔模型用以解释模量 G 随深度的指数增长: $G \sim z^n$
Dakoulas and Gazetas, 1985	推广了剪切楔概念模型,得到了半圆形河谷土坝侧向振动的封闭解
Dakoulas and Gazetas, 1985	简化了一维剪切楔模型并和等效线性有限单元法分析作了对比
Gazetas, 1987	比较了剪切楔模型和有限单元法分析结果
孔宪京、韩国城, 1994	提出了计算坝-基相互作用的波动-剪切楔法
徐志英、周健, 1996	推导了三角形河谷内土坝三维动力反应的剪切楔法
孔宪京等, 2001	推广剪切楔法用以分析混凝土面板堆石坝的地震反应

资料来源: Gazetas, 1987.

①Frazier G A, 1969, Vibration characteristics of three dimensional solids with application to earth dams, PhD Thesis, Montana State University.

②Elgamel A W M, Abel-Ghaffar A M, Prevost J H, 1984, Nonlinear earthquake response analysis of earth dams, Princeton Univ, Research Report.

③Dakoulas P, 1985, Contribution to seismic analysis of earth dams, PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute.

20 世纪 60~70 年代, 剪切楔模型被用来解释足尺(full scale)震动试验, 指导参数研究用以设计“地震系数”(Gazetas, 1987), 并且第一次相当成功地用 Bouquet 坝的足尺振动试验来验证剪切楔模型(Gazetas and Dakoulas, 1992)。

随着地震反应分析方法取得实质性进展, 20 世纪 60~70 年代更多的注意力集中到发展可靠的步骤和标准来评价强震期间土坝的稳定性和安全性。拟静力法由于本身的缺陷显然无法胜任(Gazetas, 1987)。为了解决这一问题, N M Newmark 提出了著名的有限滑动位移法, 该法根据潜在变形来评价土坝坝坡的动力稳定性(Newmark, 1965)。N M Newmark 注意到无论什么时候只要作用在潜在滑体上的惯性力超过了它的屈服阻力, 滑动便发生; 当惯性力改变方向时, 滑动停止甚至向回滑动。这个著名的方法随后被广泛应用并且被多次改进(Franklin and Chang, 1977; Makdisi and Seed, 1979; Sarma, 1975; Seed, 1979; Constantinous et al., 1985; Kramer and Smith, 1997)^①。

目前对于土坝稳定性评价, 只需要比较平均的加速度时程和潜在滑体的屈服加速度。前者可以通过平面应变或者剪切楔法模型分析得到, 而后者则采用不排水循环强度用拟静力法计算得到。假定只要诱发加速度超过屈服加速度, 永久变形就会产生, 并且这种变形可以简单地通过双重积分来进行估计。

尽管这个方法有很多的缺陷(Gazetas, 1987), 但是只要能够可靠的确定土的屈服加速度, 并且土的屈服加速度在一个地震过程中没有任何明显的随时间变小的现象, 这种方法就非常可行。紧密的黏土、干砂和非常密的饱和砂土都属于这一类。因为在循环加载过程中, 它们不经历明显的孔隙水压力增加, 它们的不排水静抗剪强度保持不变。令人遗憾的是用这类土构成的土坝在经历强震后无明显的稳定性问题(Seed, 1979), 因此基本上不需要进行

① Hynes-Griffth M E, Franklin A G. 1984. Rationalizing the seismic coefficient method, Miscellaneous paper GL84-13, U. S Army, Engineer Waterways Experiment Station Report, Vicksburg.

稳定性分析。相反,那些由松砂或者中密饱和砂土填筑的大坝由于孔隙水压力的累积和随之而来的液化则产生了严重的破坏,这就向坝坡稳定性评价方法提出了挑战。

为了估计这种类型坝坡的地震稳定性,H B Seed 和他的合作者们发展了一种新的分析方法(Seed,1979、1973)。这个方法包括以下几步:①利用有限单元法分析初始坝坡的静态应力分布;②确定作为应变函数的土的参数,诸如,土的剪切模量、泊松比和阻尼;③利用平面应变有限元和步骤;④确定土的动力性质,计算由地面运动激发的应力;⑤利用室内试验估算孔隙水压力的生成及其导致的力学强度降低和潜在应变发展;⑥利用边坡分析和半经验方法把潜在应变变成一系列的相容变形。根据这些相容变形在大坝中的大小和分布来判断边坡稳定性。应用此方法对几例由于液化导致破坏的大坝边坡包括著名的 Sheffield 和 Lower San Fernando 大坝(其中几例发生了大变形)所做的解释,得到了美国几个负责土坝安全的机构如加利福尼亚州水资源局、工程师师团以及国际大坝委员会的承认。后来的研究者们对这个方法进行了应用并对其潜在缺陷进行了讨论(Castro et al.,1975;Castro and Poulos,1977;Dobry et al.,1984;Poulos et al.,1985)^①。归纳起来有以下两点:①关于液化定义的异议,液化是指室内循环试验时峰值孔隙水压力比超过100%或瞬间永久应变超过5%;②用来估计液化势的固结试样,应力控制的不排水循环三轴各向异性固结试样。

进入20世纪80年代,大量的文献集中在改进、拓展和验证60年代发展起来的土坝地震反应预测上面。通过参数研究来阐明诸如峡谷几何形态、材料的不均匀性等因素的重要性,进而产生了几种改进分析模式。前面提到的 Seed 方法重新被应用,并且结合新的试验手段试图发展另一种方法来解决这一岩土工程界和地震工程界的著名命题。80年代末期,G Gazetas 对1987年、1992年以前发表的有关土石坝坝坡地震反应分析的英文文献进行了综述,并提出了一种非线性-非弹性(Nonlinear-inelastic)分析方法(Gazetas,1987;Gazetas and Dakoulas,1992)。

在对坝坡的地震反应研究过程中,人们渐渐注意到许多不确定性因素,如与地震和地质场地因素相关的不确定因素、地基和坝体材料的刚度以及力学强度甚至包括分析方法。为考虑这些不确定性因素,概率方法被引入。M K Yegian 较早将概率的方法引入坝坡的动力分析,他提出了用概率的方法分析坝坡的地震危险性(Yegian,1991)和估算边坡(包括坝坡)在地震作用下的永久位移(Yegian et al.,1995、1998)。R. V. Halatchev 提出了一种用于堤坝和边坡稳定性分析的概率方法,该方法建立在 Sarma 解的基础上,考虑了地震力的水平和垂直分量,即地震力具有任意倾角;土体剪切强度参数假定为正态分布采用 Monte-Carlo 模拟;破坏概率由地震系数确定;将地震系数视作一个随机量,并将其应用于露天煤矿边坡分析(Halatchev,1992)。A S Al-Homoud 等利用安全系数和边坡破坏的临界位移提出了地震力作用下土体边坡和堤坝的概率三维稳定性分析模型(Al-Homoud and Tahtamoni,2000),考虑了如下的不确定性因素:实验室和现场所测的剪切强度参数值存在差异的不确定性,空间上变化以及土参数间的关系,提出了5个基于极限值下的非超越概率地震位移概率模型以及基于安全系数的三维动力边坡稳定分析的概率模

① Mohamad R. 1985. Evaluation of seismically induced liquefaction flow failure of earth dams, PhD Dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute.

型,并编写了 PTDDSSA 计算机程序。将这些模型应用于受不同程度地震灾害的著名滑坡 Selset landslide 中,发现震源距离和震级对地震引起的位移、破坏概率(即位移允许超越概率)、二维和三维安全系数影响很大。

在我国,研究土石坝坝坡的工作开始于 20 世纪 60 年代,并取得一系列成果^①(孔宪京、韩国城,1994;徐志英、周健,1991、1996;黄文熙,1983;沈珠江,2000;顾淦臣,1989;钱家欢、殷宗泽,1996;徐志英、沈珠江,1981a、1981b、1983;徐志英、周健,1985;周健等,1991、2000;周健、徐志英,1984;龚晓南,2000;吴世明、徐攸在,1998;吴世明等,2001;黄茂松等,2001;Huang et al.,2001;Zhang et al.,1998;黄建梁等,1997;王家鼎、张倬元,1999;薄景山等,2001)。徐志英、沈珠江、周健、吴世明等发展了基于黏弹性本构关系的动力有限单元法。徐志英提出了三角形河谷内土坝三维动力分析的剪切楔法,并对美国的奥罗维尔土坝进行了简化分析(徐志英、周健,1996)。黄茂松发展了自适应的有限单元法并将之用于对美国 Lower San Fernando 土坝的分析(黄茂松等,2001;Huang et al.,2001)。黄建梁等借用 Sarma 法,进行了地震稳定性的动态理论分析,在文中推导了同时考虑水平和铅直地震动的坡体临界加速度计算公式,采用条分技术针对任意形态的坡体建立了根据水平和铅直地震加速度时程估计坡体失稳的加速度、速度和位移时程的方法,讨论了地震加速度时程的确定问题,地震过程中坡体抗滑强度的衰减问题和孔隙的动态响应问题以及坡体地震稳定性的评价问题(黄建梁等,1997),但是他忽略了地震过程中孔压和各条块应力之间的关系是耦合关系,因此并没有解决孔压的动态响应问题。王家鼎探讨了地震作用下黄土斜坡的动力稳定性和变形问题,提出了地震诱发高速黄土滑坡的机理——黄土体解体、斜抛和粉尘化效应,推导了黄土滑体斜抛运动的全过程及滑速、滑距公式(王家鼎等,2001;王家鼎、张倬元,1999)。薄景山建立了计算土质边坡地震反应及评价其动力稳定性的一个数值分析模型(薄景山等,2001)。孔宪京用剪切楔法研究了土石坝和地基以及混凝土面板堆石坝的地震反应(孔宪京、韩国城,1994;徐志英、周健,1996)。

近年来,由于环境问题日益受到重视,城市废弃物边坡的动力问题成为边坡动力问题研究的一个新的内容。城市固体废弃物由于其本身的特点而区别于前面我们讨论的边坡。从地震稳定性的角度来看最显著的特点是它们一般具有较大的尺度、相对软弱的物质组成以及其中存在织物体系。例如,位于美国南加利福尼亚州 Eagle 山脉的垃圾场,体积可达 $5.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,形成的边坡高度达到 350m。很显然,这样尺度的边坡再加上相对软弱的物质构成使得它们的自振周期要远大于一般的自然边坡和人工边坡(Kramer and Smith,1997)。

由于垃圾含有各种各样的物质,因此要确定它们的材料属性极其困难。对地震稳定性评价来说,最重要的参数包括垃圾以及织物的力学强度、垃圾的刚度和阻尼特性。S Singh 和 B Murphy 利用摩尔-库仑理论来研究垃圾的属性,他们发现当摩擦角 φ 取为 0° 时,内聚力介于 35~100kPa,反之如果内聚力取为 0 时,摩擦角介于 $26^\circ \sim 39^\circ$ (Singh and Murphy,1990)。E Kavazanjian 等曾经建议当正应力低于 30kPa 时,内摩擦角可以取为 0° ,内聚力可以取为 24kPa;而在高正应力情况下,可以取内聚力为 0,而取内摩擦角为 33°

① 汪闻韶,1983,土石坝的抗震问题,水利水电科学研究院。

(Kavazanjian et al., 1995)。当然,由于垃圾组成极其复杂、场地条件千变万化,再加上织物体系的几何形态和力学强度变化的影响,要想精确了解垃圾的属性是不可能的(Kramer and Smith, 1997)。

1988年位于加利福尼亚州 Kettleman 山脉的垃圾填埋场失事后,织物与垃圾之间界面的力学强度引起了学者们的注意。他们用大型抗拔试验(Seed et al., 1990)、大型直剪试验(Bove, 1990; O'Rourke et al., 1990; Byrne et al., 1992; Yegian and Lahlaf, 1992; Orman, 1994)以及大型扭剪试验(Negussey et al., 1989; Stark and Poeppel, 1994)来研究织物的强度。试验结果表明,由于组成材料的差异,力学强度有一定离散,最小的内摩擦角为 $5^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 。在高正应力下,织物与垃圾之间界面的强度甚至更低(Stark and Poeppel, 1994)。室内的试验则没有发现界面的动、静强度有很大差别(Yegian and Lahlaf, 1992)。

对南加利福尼亚州某垃圾填埋场(该垃圾填埋场从 1948 年运作至 1984 年)的地震反射试验表明:垃圾的平均剪切波速为 244m/s。对 20 世纪 50 年代投入使用的某垃圾场,用跨孔法和单孔法测试得到的剪切波速为 200m/s(Sharma et al., 1990)、274m/s(美国地球技术委员会, 1988)、91m/s(Singh and Murphy, 1990)。Kavazanjian 利用 SASW(表面波测试)法测量了原位固体废弃物的剪切波速,结果表明剪切波速在表面大约为 90m/s,在深度为 20m 处的新近填埋、不太紧密的垃圾,其剪切波速大约为 160m/s,而那些较早填埋的密实的垃圾,其剪切波速是那些新近填埋垃圾的两倍(Kavazanjian, 1993)。直接测量垃圾阻尼特性的手段还没有,阻尼的性质通常认为和腐殖质或者黏土和腐殖质的混合物类似(Singh and Murphy, 1990)。关于 OII 垃圾场动力响应研究表明垃圾的阻尼要比典型黏土的大,而比腐殖质的小(Kramer and Smith, 1997)。

Bray 等最早对固体废弃物地震稳定性进行研究,1994 年他们对具有软弱层(位于垃圾与下卧层间)的垃圾场采用波传播理论和拟静力法进行分析(Bray and Repetto, 1994),随后提出了垃圾场地地震稳定性评价过程(Bray et al., 1995、1996; Bray and Rathje, 1998)。S L Kramer 等则对有限滑动位移法(Newmark, 1965)进行了改进并用以分析废弃物边坡的动力反应(Kramer and Smith, 1997)。D G Anderson 和 E Kavazanjian 对垃圾边坡动力反应的研究进行了一番总结(Anderson et al., 1992; Kavazanjian, 1995)。P C Repetto 等和 D E Del Nero 等调查了废弃物对填埋场地地震动反应的影响(Repetto et al., 1993; Del Nero et al., 1995)。I M Idriss 等用有限单元法对填埋场地的地震变形进行了研究(Idriss, 1995)。M K Yegian 等和 H I Ling 等则对土工织物界面的动力反应进行了研究(Yegian et al., 1998、1991; Ling and Leshchinsky, 1997)。

我国学者王思敬较早的研究了岩体边坡的动力问题。他和他的合作者们进行了一系列研究(王思敬, 1977; 王思敬、张菊明, 1982; 王思敬、薛守义, 1992; 张菊明、王思敬, 1994; Wang et al., 1993; 王存玉、王思敬, 1987; 王存玉, 1987),并取得了以下主要成果:①通过振动模拟试验探索了块体运动时滑动面的摩擦特性,研究了块体运动时滑动面上摩擦特性的变化,指出由静止到运动时启动摩擦力和加载波形曲线有关,即受加载速率或振动频率的影响;块体开始运动后,动摩擦系数则与相对运动速度及累积位移有关。②应用振动台和加速度测量系统,测得滑动面在块体运动时的动摩擦系数及其与运动速度的关系曲线。③建立了边坡块体运动的动力微分方程,通过数值积分求得块体滑动的动力学特征,即块体运动加速度和块体相对基岩的运动加速度、运动速度和位移曲线。④讨论了动力

稳定评价准则,指出常规准动态稳定分析的应用条件及动态稳定(包括允许位移和动力失稳)的评价方法,并说明了基岩振动加速度可以超过极限加速度值而不一定导致动力失稳,但可能产生一定的最终位移。⑤对岩质边坡中楔形块体作了动力分析,推导了一组相应的动力平衡公式,编制了计算程序。⑥进行了层状边坡岩体滑动稳定的三维动力学分析,建立了块体运动的三维动力学方程,并探讨了层状边坡层间振动加速度在传递过程中的加速度变化情况,从而可以计算出在不同振源方向作用下边坡各层间的稳定性。R N Chowdhury(1978)在“Slope Analysis”一书中提到了边坡动力稳定性和变形问题。A W Crawford 等研究了剪切位移、速率对节理面摩擦阻力的影响(Crawford and Curran, 1981、1982)。

1987年,王存玉在二滩拱坝动力模型试验中发现,岩石边坡对地震加速度不仅存在铅直向的放大作用,而且还存在水平向的放大作用(王存玉、王思敬,1987;王存玉,1987)。何蕴龙等通过动力有限元法发现了“岩石边坡的地震动力系数并不随坡高增高而单调增大”,并且得出了“约坡高100m时坡顶最大动力系数达到最大值,坡高超过100m动力系数反而有所降低。但总的来说,岩石边坡动力系数对坡高的变化是不敏感的,在工程常见的坡高范围内边坡动力系数的变化是不大的”的结论,并基于此提出了岩质边坡地震作用的近似算法(何蕴龙、陆述远,1998)。清华大学研究过龙羊峡和二滩工程岩石坝肩动力特性及地震反应加速度,对库岸边坡进行了有限元动力计算和模型试验(何蕴龙、陆述远,1998)。1991年,长江科学院采用有限元法研究了三峡船闸高边坡的地震稳定性(钱胜国、陆秋蓉,1991)^①。祁生文等利用FLAC^{3D},通过大量数值模拟,绘制了边坡动力反应的位移、速度、加速度三量在边坡剖面上分布的一般规律,发现了两种不同的边坡动力反应规律(祁生文等,2003;祁生文,2006)。

薛守义博士较为系统地分析和总结了前人对岩体边坡动力稳定性所做的零星工作,结合岩体结构思想,将岩体变形破坏机制分为滑动、崩塌、塑性变形和层体弯折等4种主要类型和若干亚类,并指出了各种情况下所需选用的动力分析方法,将岩体边坡稳定性分析模型归纳为岩体地质模型、力学模型和几何模型3类。在振动模型研究的基础上,分析了岩体振动的力学效应,发展推导了楔形体滑动机制下的地震滑动位移分析公式,编制了相应计算程序。在振动单剪仪上,进行了小浪底原状泥化夹层的动力特性试验研究,取得了泥化夹层动力特性比较可靠的直接资料^②。张平博士通过块体滑动模型试验研究了动荷载下边坡动力反应,并得出滑动块体产生的累积位移不仅与台面的输入加速度大小、荷载频率和持续时间有关,而且还与法向应力和坡面倾角有关,其中坡面倾角和荷载频率影响最大^③。

对岩质边坡的动力反应有涉猎的还有李秉生,他曾经研究过块状边坡的动态效应(中国地质学会工程地质专业委员会编,1988)。徐卫亚博士在其博士学位论文中采用振型叠加法对链子崖的动力时程反应也进行过研究^④。另外,孙钧、胡聿贤等的著述中也涉及岩

① 钱胜国,陆秋蓉,1991,长江三峡船闸高边坡地震稳定性分析,武汉,长江科学院科研报告。

② 薛守义,1989,岩体边坡动力稳定性研究,中国科学院地质研究所博士学位论文,导师王思敬、张镜剑。

③ 张平,1994,岩石节理的动力剪切特性研究,重庆建筑大学博士学位论文,导师朱可善、吴德伦。

④ 徐卫亚,1991,地质灾害学及链子崖危岩体防治研究,中国科学院地质研究所博士学位论文,导师孙广忠。