

土木工程科技创新与发展研究前沿丛书

国家自然科学基金(51768040、51508256、50978129)联合资助

黄土地区

框架预应力锚杆支护边坡地震 作用分析及工程应用

叶帅华◇著

中国建筑工程出版社

非外借

土木工程科技创新与发展研究前沿丛书

国家自然科学基金 (51768040、51508256、50978129) 联合资助

黄土地区框架预应力锚杆 支护边坡地震作用 分析及工程应用

叶帅华 著



中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

黄土地区框架预应力锚杆支护边坡地震作用分析及工程应用/叶帅华著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 6
(土木工程科技创新与发展研究前沿丛书)
ISBN 978-7-112-22160-8

I. ①黄… II. ①叶… III. ①预应力结构-框架结构-锚杆支护-研究 IV. ①TU378

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 090406 号

本书以黄土地区广泛应用的框架预应力锚杆支护边坡为研究对象, 重点阐述了框架预应力锚杆支护边坡体系的地震作用及其在加固边坡工程中的应用。主要从理论方面介绍了框架-预应力锚杆-土体的动力相互作用、框架预应力锚杆支护边坡的地震响应、地震作用下框架预应力锚杆支护边坡的稳定性, 同时依托实际工程, 介绍了框架预应力锚杆支护结构在单级边坡、多级边坡和原位加固边坡工程中的应用及地震响应。

本书理论和实际相结合, 可供土木工程专业的教师、研究人员和工程技术人员使用, 也可作为高等院校和科研院所相关专业的研究生教学参考书。

责任编辑: 赵 莉 吉万旺

责任校对: 王雪竹

土木工程科技创新与发展研究前沿丛书
黄土地区框架预应力锚杆支护边坡地震作用分析及工程应用

叶帅华 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京京华铭诚工贸有限公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 11¼ 字数: 226 千字

2018 年 7 月第一版 2018 年 7 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-22160-8

(32049)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

■ 前 言 ■

我国是世界上黄土分布最广、厚度最大的国家,而这些黄土主要分布于广大西北地区的黄土高原。黄土高原纵横沟壑,存在着大量的边坡,西部大开发促使大量的公路、铁路和城市基础设施要在黄土地区建设,因而会遇到大量的边坡工程。据历史记载,西北黄土地区的强震,每次都会引起严重的地震滑坡。框架预应力锚杆支护结构作为一种新型支挡结构,具有诸多优点,因此在加固黄土边坡工程中得到了广泛应用。但其在地震作用下的分析还十分缺乏,因此,适时地开展黄土地区框架预应力锚杆支护边坡的地震作用分析是十分必要的,本书主要针对这一问题进行了理论分析、数值模拟和工程应用分析。

本书共 8 章,主要包括:第 1 章对本书的研究背景、目的和意义以及国内外研究现状进行了阐述;第 2 章建立了框架-预应力锚杆-土体系统在地震作用下的动力计算模型,并分别求解了在简谐地震作用下锚杆预应力的地震响应和锚杆锚固段轴力的动力响应;第 3 章建立了框架预应力锚杆支护边坡的地震动分析模型,并得到了支护边坡在水平地震作用下的动力响应;第 4 章在考虑锚杆预应力对黄土边坡稳定性影响的情况下,建立了框架预应力锚杆支护边坡的地震稳定性数值分析模型,提出了框架预应力锚杆支护边坡在地震作用下的稳定性安全系数计算方法;第 5 章以西北黄土地区实际工程为背景,采用有限元软件 ADINA 对框架预应力锚杆支护边坡进行了地震动响应和参数分析;第 6、7、8 章以实际工程为依托,分别介绍了框架预应力锚杆支护结构在单级加固边坡工程、多级加固边坡工程和原位加固边坡工程中的应用,并进行了地震响应分析。

本书的出版得到了国家自然科学基金“地震作用下框架预应力锚杆加固边坡破坏机理及稳定性分析”(项目编号:51768040)、国家自然科学基金“基于可靠度的框架预应力锚杆加固边坡地震稳定性分析”(项目编号:51508256)、国家自然科学基金“永久性柔性边坡支挡结构的地震作用和动力稳定性分析”(项目编号:50978129)、国家科技支撑计划“白龙江流域滑坡泥石流工程防治技术与示范”(项目编号:2011BAK12B07)、甘肃省高等学校科研项目“考虑锚杆预应力的格构梁结构支护边坡动力响应及参数分析”(项目编号:2013B-018)、甘肃省建设科技攻关计划项目“黄土高填方边坡稳定性分析及健康监测研究”(项目编号:JK2015-5)和兰州市科技发展计划项目“地震扰动区深挖路堑边坡稳定性分析及稳定性控制措施研究”(项目编号:2015-3-131)的支持,本书主要内容也是在这些基金项目的基础上进行撰写的。

感谢兰州理工大学结构工程研究所朱彦鹏教授、周勇教授、陈长流高工等一

直以来的支持和帮助。感谢博士后学习单位浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心合作导师龚晓南院士及其团队的支持和帮助。在本书撰写过程中，兰州理工大学结构工程研究所的李京榜、马孝瑞博士生，房光文、时轶磊、丁盛环、叶炜钠、陶钧、赵壮福、樊黎明、黄安平、张玉巧、李德鹏等硕士生为本书提供了许多帮助，在此表示衷心的感谢！

由于编著时间仓促，加之作者水平所限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

叶帅华
2018 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 黄土的概述	1
1.1.1 黄土的分布	1
1.1.2 地震诱发黄土边坡滑坡数量众多、危害巨大	1
1.2 研究背景、目的和意义	3
1.3 国内外研究现状	6
1.3.1 传统边坡动力研究现状	6
1.3.2 黄土地区柔性支护边坡动力研究现状	10
1.4 本书主要内容	12
第 2 章 框架-预应力锚杆-土体系统地震动相互作用分析模型及 地震响应分析	14
2.1 引论	14
2.2 预应力锚杆-土体系统的基本原理	16
2.2.1 预应力锚杆的组成	16
2.2.2 预应力锚杆的基本原理	16
2.2.3 锚杆与砂浆的相互作用	17
2.2.4 锚杆的抗拔机理	17
2.3 框架-预应力锚杆-土体系统动力模型的建立	17
2.4 简谐波作用下锚杆预应力动力响应分析	22
2.5 简谐波作用下锚杆-土体系统动力响应分析	23
2.6 工程实例及数值验证	24
2.6.1 工程概况	24
2.6.2 支护方案及设计结果	24
2.6.3 框架-预应力锚杆-土地震响应	24
2.6.4 有限元数值验证	26
2.7 本章小结	33
第 3 章 框架预应力锚杆支护边坡地震动模型的建立及响应分析	34
3.1 引论	34
3.2 框架预应力锚杆支护结构原理	35
3.2.1 框架预应力锚杆支护结构模型	35
3.2.2 框架预应力锚杆支护结构的作用机理	36

3.3	模型基本假定	37
3.4	动土压力模型的建立	37
3.5	框架预应力锚杆结构动力模型	39
3.6	预应力锚杆轴力响应	42
3.7	工程算例及数值验证	44
3.7.1	工程概况	44
3.7.2	支护方案及设计结果	44
3.7.3	支护边坡地震动响应及数值验证	44
3.7.4	计算结果对比分析	60
3.8	本章小结	60
第4章	框架预应力锚杆支护黄土边坡地震动稳定性及变形分析方法	62
4.1	引论	62
4.2	黄土边坡稳定性及变形分析方法	63
4.2.1	拟静力分析方法	63
4.2.2	Newmark 有限滑动位移计算方法	65
4.2.3	Makdisi-Seed 的简化分析法	68
4.3	基本假定	69
4.4	支护边坡地震动稳定性及变形分析模型	69
4.5	动力稳定性系数计算	71
4.6	数值算例	73
4.6.1	稳定性及变形计算	74
4.6.2	数值计算	74
4.7	本章小结	77
第5章	地震作用下框架预应力锚杆支护边坡动力响应及参数分析	78
5.1	引论	78
5.2	有限元软件 ADINA	78
5.3	Mohr-Coulomb 土体本构模型	79
5.4	动力分析有限元理论	81
5.4.1	动力分析方程	81
5.4.2	动力运动方程的解法	82
5.5	动力方程中阻尼的计算	83
5.6	有限元地震动输入	84
5.6.1	比例法	84
5.6.2	三角级数法	84
5.7	框架预应力锚杆支护边坡动力响应及参数分析	87

5.7.1	建立数值有限元分析模型	87
5.7.2	模拟计算结果	87
5.7.3	支护边坡地震动响应及参数分析	92
5.8	本章小结	101
第6章	在单级加固边坡工程中的应用及动力分析	102
6.1	白龙江林管局迭部林业局中村花园住宅小区边坡治理	102
6.1.1	工程概况	102
6.1.2	工程地质条件	102
6.1.3	支护方案	103
6.1.4	支护边坡动力响应及稳定性分析	104
6.2	时代-海德堡庄园住宅小区边坡支护	110
6.2.1	工程概况	110
6.2.2	工程地质条件	111
6.2.3	支护方案	112
6.2.4	支护边坡动力响应及稳定性分析	112
第7章	在多级加固边坡工程中的应用及动力分析	121
7.1	兰永一级公路深挖路堑边坡加固设计	121
7.1.1	工程概况	121
7.1.2	场地岩土工程条件	122
7.1.3	深挖路堑高边坡设计优化方案	124
7.1.4	支护边坡地震响应数值分析	126
7.2	陇南武都东江新区外环路边坡	131
7.2.1	工程概况	131
7.2.2	场地工程地质及水文地质条件	131
7.2.3	边坡支护设计方案	133
7.2.4	边坡支护设计	134
7.2.5	边坡地震响应及稳定性分析	135
第8章	在原位加固工程中的应用及动力分析	146
8.1	中石油甘肃石油分公司富源加油站边坡加固	146
8.1.1	工程概况	146
8.1.2	工程地质条件	146
8.1.3	支护方案	147
8.1.4	支护边坡动力响应及稳定性分析	148
8.1.5	结语	152
8.2	中石油甘肃石油分公司皋兰加油站边坡加固	152

8.2.1	工程概况	152
8.2.2	工程地质条件	153
8.2.3	支护方案	153
8.2.4	支护边坡动力响应及稳定性分析	154
参考文献		162

1.1 黄土的概述

1.1.1 黄土的分布

黄土是一种多孔隙、弱胶结的第四纪沉积物，其颜色为灰黄、棕黄甚至棕红色，颗粒成分以粉粒为主，质地均匀，无层理，垂直节理发育^[1]。黄土在世界上分布相当广泛，面积约为 $13 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，约占地球陆地总面积的 9.8%，呈东西向带状断续地分布在南北半球中纬度的森林草原、草原和荒漠草原地带。在北美和欧洲，其北界大致与更新世大陆冰川的南界相连，分布在美国、加拿大、德国、法国、比利时、荷兰、中欧和东欧各国、白俄罗斯和乌克兰等地；在亚洲和南美则与沙漠和戈壁相邻，主要分布在中国、伊朗、中亚地区、阿根廷；在北非和南半球的新西兰、澳大利亚，黄土呈零星分布。

我国是世界上黄土分布最广、厚度最大的国家，其范围北起阴山山麓，东北至松辽平原和大、小兴安岭山前，西北至天山、昆仑山山麓，南达长江中、下游流域，面积约 $63 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。从地理位置来看，中国的黄土主要分布在北纬 40° 以南的地区，位于大陆的内部、西北戈壁荒漠以及半荒漠地区的外缘。从区域来看，中国的黄土主要分布于广大西北地区的黄土高原以及华北平原和东北的南部。其中以黄土高原地区最为集中（发育了世界上最典型的黄土地貌），占中国黄土面积的 72.4%，一般厚 50~200m，其中陕北和陇东的局部地区达 150m，在陇西地区可超过 200m，兰州九州台黄土堆积厚度达到 336m。具体地说，黄土主要分布于甘肃的中部和东部，陕西的中部和北部，内蒙古鄂尔多斯市的南部和西部，山西的大部分，河南的北部、西部及西北部，山东西部以及辽宁山地一带。华北平原的黄土则多被埋藏在较深的冲积层的下部。我国西北的黄土高原是世界上规模最大的黄土高原，华北的黄土平原是世界上规模最大的黄土平原。

1.1.2 地震诱发黄土边坡滑坡数量众多、危害巨大

黄土微结构具有的独特动力性质，使其表现出很高的地震易损性^[2-6]。在我国西部黄土地区，历次强震都曾引起过严重的地震滑坡，人口伤亡达百万人以

上^[1]。由于成因的不同,历史条件、地理条件的改变以及区域性自然气候条件的影响,黄土的外部特征、结构特征、物质成分以及物理、力学等特性均不相同。因此,黄土具有明显的区域分布特性。特别是陇西地区,黄土多属粒状架空孔隙结构,具有这种微结构的黄土,由于土质疏松、强度较低,是最容易失稳的。这种黄土对水的作用具有高度的敏感性,均为自重湿陷性和强烈湿陷性黄土,在地震时容易产生破裂、滑移和地震沉陷等灾害。历史上多次地震曾因发生在黄土场地上而造成特别严重的震害,震害严重是与黄土的特殊结构性和动力特性有密切关系的。从大量的历史地震记录来看,黄土地区最主要的场地地震灾害是滑坡与崩塌、黄土的震陷变形与液化及黄土地区的地裂缝等,尤其以滑坡最为常见且危害最大。地震对滑坡的诱发作用,在黄土地区比其他任何地区都更为明显,地震引起的崩塌与滑坡给人类带来了巨大的危害,不少学者从不同的角度研究了地震黄土滑坡^[7-13]。表 1-1 列出了我国黄土地区典型地震灾害,震害表明,黄土场地严重的地震滑坡、显著的地震动放大效应等是黄土地区主要的岩土地震灾害,造成了严重的人员伤亡和财产损失。

我国黄土地区典型地震灾害 表 1-1

时 间	震 中	震级 M_S	震中烈度	主要岩土地震灾害	死亡人数
1303 年	山西洪洞	8.0	XI	滑坡、崩塌、地震动放大	20 多万
1556 年	陕西华县	8.0	XI	震陷、地震动放大	83 万
1920 年	宁夏海原	8.5	XII	滑坡、液化、震陷、地震动放大	32 万
1927 年	甘肃古浪	8.0	XI	滑坡、崩塌、地震动放大	10 万
1970 年	宁夏西吉	5.5	VII	滑坡、地震动放大	107
1995 年	甘肃永登	5.8	VIII	滑坡、震陷、地震动放大	12

我国是一个多地震的国家,而我国的西部地区也是世界上板内构造活动最为活跃的地区之一:印度板块与欧亚板块的“强烈”碰撞与青藏高原的持续隆升,地壳内动力自西向东传递,波及范围远及中东部,并在西部地区表现得特别活跃,高地应力、强活动性构造及其伴随的强震过程构成这一地区内动力条件的突出特点。由于西部地区其地壳内、外动力条件的强烈交织与转化,促使高陡边坡发生强烈的动力过程,从而促进了大型灾难性滑坡的发生^[14]。

由于我国西部地区黄土分布广泛,因此黄土边坡是我国西部大开发基础建设工程中常见的岩土构筑物形式,它是指具有倾斜坡面的岩土体。由于边坡表面倾斜,在自身重量或其他外力作用下,整个岩土体具有从高处向低处滑动的趋势,如果土体内部某一个面上的滑动力超过土体抵抗滑动的能力,就会发生滑坡。滑坡是一种常见的地质灾害,给人类的生命财产带来重大威胁,可导致交通中断、河道堵塞、厂矿城镇被掩埋、工程建设受阻。诱发滑坡的因素是多种多样的,降

雨、地震、雪山融化以及开挖、填筑等人类工程活动等因素都可能诱发滑坡，而由地震诱发的滑坡无论是从规模、影响范围还是造成的损失都是降雨、开挖等其他因素诱发的滑坡不可比拟的^[15-17]。每年因地震而导致的滑坡灾害非常严重，特别是在山区和丘陵地带，地震诱发的边坡滑动和坍塌往往分布广、数量多、危害大。图 1-1~图 1-4 为我国最近几年发生的山体滑坡。



图 1-1 2008 年吕梁山体滑坡

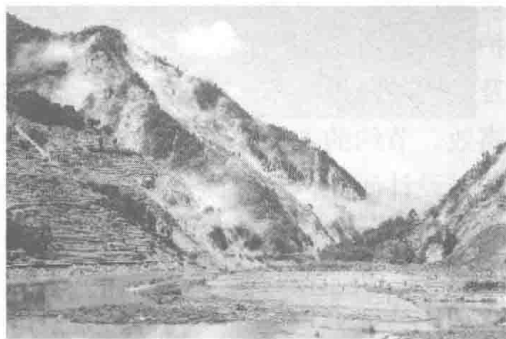


图 1-2 2008 年汶川地震山体滑坡



图 1-3 2009 年兰州山体滑坡



图 1-4 2011 年西安山体滑坡

1.2 研究背景、目的和意义

我国西北地区沟壑纵横，大多为湿陷性黄土地区，在这些地区修建城市、修筑公路和铁路时都会遇到边坡的开挖和回填问题，为防止滑坡和泥石流的发生需要用到各种类型的支护结构加以支挡，这样才能保证建筑、高速公路和铁路的使用安全，才能保证人民的生命和财产安全。一般支挡结构占山区城市建筑、高速公路、铁路投资的比重很大，但由于目前我国对永久性边坡支挡结构研究不够深入，所选用支挡结构形式单一陈旧，在工程上会造成较大的浪费而且使用不安全，经常造成边坡坍塌和滑移，给建筑、高速公路和铁路的安全和正常使用带来

了极大的安全隐患，如图 1-5 所示。而安全可靠、造价较低的柔性支挡结构在我国边坡支挡结构的设计和施工当中还使用较少，这主要与我国对永久性柔性支挡结构的分析、地震作用分析和设计方面研究较少有关。近几年随着国家西部大开发的加速发展，西北地区要建设大量的基础设施，与此同时甘肃要建设大量的房屋、高速公路和铁路工程，同时甘肃处在黄土山区，而柔性支挡结构特别适用于黄土，但由于对黄土柔性支挡结构的研究不够，使这种造价较低、安全性好的支护结构没有得到推广应用。随着甘肃境内国道主干线的高等级公路和铁路的修建及城市的建设的不断加快，需要研究在这些地区修筑公路、铁路和房屋的安全、高效、节约的方法，因此，深入开展黄土地区永久性边坡柔性支挡结构的分析和选型设计研究，对保证公路、铁路和建筑物的使用安全，减少滑坡对公路、铁路和建筑物的危害有重大的现实意义。

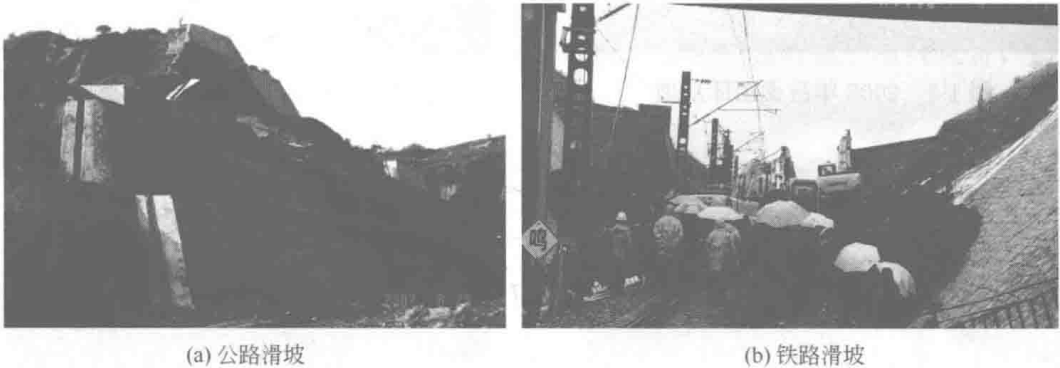


图 1-5 传统挡墙支护黄土边坡滑塌图片

支护结构中轻型柔性支挡结构形式在高边坡中由于施工简便、结构稳定且经济有效，因此在土木工程各个领域得到了广泛的应用，如边坡加固、斜坡稳定、滑坡防治、深基坑工程、桥头支护和隧道口支护等，而这些支挡结构的设计必须按照永久性边坡支护进行设计，必须考虑地震等偶然作用，还要考虑耐久性问题。

要将柔性支护结构应用到永久性边坡当中，还需进行大量的研究工作。近几年柔性支挡结构在国内得到了快速的发展，如图 1-6 所示，而针对黄土的特定支挡结构的合理结构形式及其相应的土压力分布、黄土局部湿陷损伤时的计算模型和计算方法的研究、地震区永久性柔性支挡结构的地震作用分析与抗震设计方法，目前国内外还无人系统地做过这方面的研究工作，这就给边坡支挡结构分析和设计带来了很大的不确定性。

合理分析湿陷性黄土地区柔性支护结构，只有针对黄土地区支挡结构，如框架锚杆、土钉墙、土钉墙加锚杆、抗滑桩加锚杆等，建立土体、土钉和锚杆及支挡结构协同工作的分析计算模型，采用非线性本构关系，分析土体、土钉和锚杆



(a) 某大学支护边坡1



(b) 某大学支护边坡2



(c) 某住宅小区支护边坡



(d) 某加油站支护边坡

图 1-6 框架预应力锚杆支护边坡

及支挡结构的内力，并考虑黄土湿陷损伤机理，建立黄土局部湿陷损伤时支挡结构计算模型，对支挡结构在损伤机理下进行非线性内力分析以及地震区永久性柔性支挡结构的地震作用分析，这样才能使黄土地区支挡结构分析、设计更加合理。

随着新型边坡加固措施和计算机技术的飞跃发展，尤其以岩土锚固技术为核心的柔性支挡结构在边坡工程中的推广应用，边坡动力分析这一课题获得了新的进展，许多柔性支护结构、新的计算理论和方法不断产生，从而使得边坡支护这一传统技术出现了新问题，这一古老问题又有了新的研究方向。传统的边坡动力分析主要针对岩土工程问题展开，采用的分析方法属岩土力学范畴，而对于柔性支护结构加固下的边坡动力分析，由于岩土锚固技术的应用大大加强了支护结构与岩土的协同工作能力，使得边坡受力体系变得更为复杂，此时的边坡动力分析就不再是单一的岩土问题，而是岩土与结构相互交叉产生的新问题，传统的边坡动力分析方法已经不能再适用于柔性支护结构加固下的边坡动力分析。

对于纯土质边坡的动力计算方法，目前的研究已经比较成熟；而对于柔性支护结构加固下边坡动力分析及支护结构抗震设计，目前的研究还相对非常缺乏。在实际边坡工程的动力计算中，人们还是主要沿用传统土质边坡的动力计算方法，对于由柔性支护结构加固下边坡的动力计算，一般不考虑支护结构对坡体

加固的影响,或者简化了支护结构对边坡的作用。传统刚性支护结构(主要指重力式)作用下的边坡动力分析及支护抗震设计方法已经无法胜任这种柔性边坡支护结构,然而,对于以岩土锚固技术为核心的柔性支护结构加固下的边坡动力分析及支护结构抗震设计,如土钉墙、框架锚杆柔性支挡结构等,支护结构对边坡受力状态影响较大,当忽略支挡结构对坡体的影响时,计算结果往往会出现很大偏差,而且支护结构的抗震设计无法计算。

在这些柔性支挡结构中,框架预应力锚杆支挡结构作为一种新型支挡结构,在国家西部大开发过程中发挥了巨大的作用,因此本书的研究目的主要在于对框架预应力锚杆支护边坡地震动力计算理论及方法进行研究,并提出新的抗震设计思路及计算方法,使得地震作用下框架锚杆支护边坡设计更加简化。在国内外研究领域,针对地震作用下框架预应力锚杆支护边坡动力分析方法的研究相对缺乏。本书的研究成果,将为框架预应力锚杆支护结构在土体边坡支护中的应用提供更加合理、完善的设计依据和计算方法,可减少由设计不当造成的重大损失;对于促进这种新型支护结构在更多地区和领域的推广应用,保证公路、铁路和建筑物的使用安全,具有重要的现实和经济意义。

1.3 国内外研究现状

对边坡的动力分析与研究包括岩质边坡动力分析、土质边坡动力分析以及坝坡的动力分析等。一百多年来,边坡的动力问题分析与研究在土木工程领域一直都很受重视,对边坡动力问题的分析与研究从来都没有间断过,大量的研究人员都在从事这方面的相关研究课题。经过研究者的不断分析与发展,这一研究领域的内容也是非常的丰富。

现阶段,在边坡的动力问题分析与研究中,采用最多的还是拟静力法和有限元数值法(Finite Element Method, FEM),然而这两种方法在实际工程应用中各有优缺点。在边坡动力问题的分析与研究中,有限元数值法(FEM)在解决动力方面的理论计算中,能够考虑各种因素条件,实现较准确地分析,但也正因为这样,这种方法极其复杂和难于求解,所以很难在设计人员进行推广。而拟静力法则相反,其计算简单,容易求解,容易被接受,但是在计算和理论分析上过于粗糙,与岩土体的实际状态相差较大。目前,拟静力法应用于一些国家规范中^{[18][19]},以及在大量的实际工程中被采纳为主要计算方法。而对于经过结构支护的柔性边坡的动力研究和分析目前还比较欠缺。

1.3.1 传统边坡动力研究现状

Mononobe 等^[20] 最早认为边坡是一个变形体,从变形体这一角度研究了土

质边坡的动力反应,并首次将一维剪切楔法引入到边坡模型,成为了应用该方法对边坡进行地震动反应分析的第一人。但是直到20多年后,由于Hatana-ka^{[21][22]}和Ambraseys^{[23][24]}的工作,该模型才被人们重新认识,并进而得到工程界的认可。后来,对一维剪切楔法的研究,国内外大量的学者对其进行了改进,剪切楔法也因此被逐渐地推广到二维、三维边坡的地震动研究中。

20世纪60~70年代,剪切楔模型被用到振动台足尺(full scale)试验,来指导设计“地震系数”^[25],并且首次十分成功地用Bouquet坝的足尺振动试验来验证了剪切楔模型^[26]。

在地震动反应分析方法有了实质性发展之后,20世纪60~70年代,越来越多学者和研究人员开始关注以什么样的标准来分析和评价强震期间边坡的稳定性和安全性。拟静力法由于本身的缺陷而在这个问题上无法实现^[25]。为了能够使这一问题得以解决,Newmark^[27]提出了有限滑动位移法,这一方法是以坡体的潜在变形为标准来评价边坡的动力稳定性的。Newmark注意到:①不管何时,一旦作用于有滑动趋势的滑体上的惯性力大于滑体的屈服阻力,滑动就会发生;②当惯性力的方向发生改变时,滑动就会停止甚至向回滑动。之后,这一著名方法被广泛应用,并且被多次改进^[28-33]。

由于Newmark法仍存在不少缺陷^[25],为了能够估算此类边坡的地震稳定性,Seed^{[31][34]}与其研究团队提出了一种新的方法,其步骤包括:①根据FEM分析边坡的初始静态应力分布;②确定土参数;③确定土体的动力性质,计算土体的动应力;④依据试验来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;⑤利用边坡分析和半经验方法把潜在的应变变成一系列的相容变形;⑥根据边坡中相容变形的大小及分布来确定边坡的稳定性。由于实现了对美国若干重大工程的合理解释,该方法得到了美国土坝安全机构以及国际大坝委员会的承认。后来的研究者们对其潜在缺陷和应用进行了一些讨论^[35-38]。

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,进而产生了几种改进分析模式。Seed方法被重新应用,并且试图结合新的试验手段来发展一种新的方法来解决这一课题。20世纪80年代末期,Gazetas^{[25][26]}对有关边坡地震反应分析的英文文献进行了综述,并提出了Nonlinear-elastic分析方法。

在研究过程中,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以及分析方法等。为了能够把这些不确定性因素考虑进去,概率方法就随即被引入。Yegian^[39-41]较早地将概率方法引入到边坡的动力分析,并用这种方法评价了边坡的地震危险性,估算了地震作用下边坡的永久位移。Halatchev^[42]基于Sarma解,并考虑了水平地震和竖向地震的影响,用概率方法分析了堤坝和边坡的稳定性。该模型中,土体采用Monte-Carlo模拟,由地震

系数来确定破坏概率,将地震系数看成随机量。Al-Homoud 等^[43] 提出了土体边坡和堤坝在地震动作用下的三维稳定性概率分析模型,模型中考虑了剪切强度由于所测环境的不同而引起的不确定性以及土体参数之间的关系,进而建立了地震动位移概率模型与三维边坡地震动稳定性分析的概率模型(基于安全系数),最后还编写了 PTDDSSA 程序。通过把这些模型应用到受不同程度破坏的边坡中,发现震源距离和震级对位移、破坏概率以及安全系数影响很大。

我国边坡的研究工作大致开始于 20 世纪 60 年代,并取得一系列成果^[44-65]。徐志英^[46] 提出了三角形河谷内土坝边坡三维动力分析的剪切楔法。黄茂松^[61] 发展了自适应的 FEM,并用该法对美国 Lower San Fernando 土坝边坡进行了分析。黄建梁等^[62] 基于 Sarma 法,进行了地震稳定性的动态理论分析,同时考虑水平和竖向地震动的作用,推导了边坡坡体的临界加速度,采用条分法,建立了估算坡体失稳的三量(加速度、速度和位移)时程,但是他没有考虑地震过程中孔压和各条块应力之间的耦合关系,因而并没有解决孔压动态响应的问题。王家鼎^{[63][65]} 探讨了黄土边坡在地震动作用下的稳定性和变形问题,提出了地震诱发高速黄土斜坡的机理,推导了黄土斜体斜抛运动的全过程及滑速、滑距公式。薄景山^[64] 建立了土质边坡地震动反应和稳定性的数值模型。孔宪京^[44] 利用剪切楔法研究和分析了土石坝、地基和混凝土面板堆石坝的地震反应。

近年来,城市废弃物形成的边坡对环境的影响越来越受到重视,由此而产生的边坡动力问题成为一个新的研究内容。城市固体废弃物形成的边坡,由于其独有的特点而不同于前面提及的边坡。就地震稳定性而言,该类边坡最显著的特点在于一方面尺度大,另一方面坡体内部有大量的软弱物质和织物体系。例如,位于美国南加利福尼亚州 Eagle 山脉的垃圾场,堆积而成的边坡高度约 350m,体积约 $5.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。显而易见,由大量相对软弱物质构成的如此大的边坡,其自振周期要远远大于一般的自然边坡和人工边坡^[33]。

从地震稳定性评价方面来讲,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。Singh 等^[66] 利用 Mohr-Coulomb 理论来研究垃圾的属性,当 $\varphi=0^\circ$ 时, τ 介于 35kPa~100kPa,反之 $\tau=0$ 时, φ 介于 $26^\circ \sim 39^\circ$ 。Kavazanjian 等^[67] 认为当正应力 $\sigma < 30 \text{ kPa}$ 时, $\varphi=0^\circ$, $\tau=24 \text{ kPa}$;而在 σ 很高的情况下,取 $\tau=0$, $\varphi=33^\circ$ 。由于不同场地条件下垃圾组成的复杂性,以及垃圾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^[33]。

1988 年 California Kettleman 山脉垃圾填埋场事故之后,一些学者和研究人员用大型直剪试验^[68-72]、大型扭剪试验^{[73][74]} 以及大型抗拔试验来研究织物的强度。对 Southern California 某垃圾填埋场的地震反射试验表明:垃圾的平均剪切波速为 244m/s。20 世纪 50 年代用跨孔法和单孔法测试得到的剪切波速为