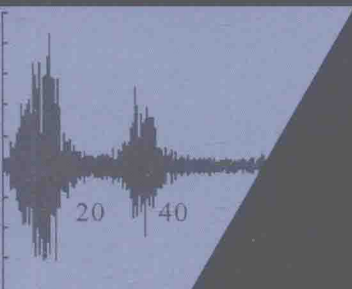


Seismic mechanism and design theory
of slope retaining structure

边坡挡土结构的 抗震机理与设计理论

曲宏略 张建经 杨长卫·著



科学出版社

边坡挡土结构的抗震 机理与设计理论

曲宏略 张建经 杨长卫 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书总结了作者近年来在边坡挡土结构抗震研究方面的成果,并结合国内外相关研究成果,详述了目前的研究进展。依托 5.12 汶川地震挡土结构的震害调查结果,统计得到了挡土结构的震害发生规律,初步分析了震害影响因素。在此基础上,结合振动台试验、数值分析、理论分析等手段,深入分析了重力式挡土墙、加筋土挡土墙、桩板式挡土墙等典型挡土结构的地震响应特性、震害机理和震害破坏模式,提出了基于规范的拟静力法改进修正建议。针对震害严重的重力式挡土墙,研发了新型的加筋重力式挡土墙,并分析了该结构的地震响应特性和提出了相应的简化设计方法。此外,针对柔性悬臂的桩板式挡土墙,考虑地震动和结构自身的振动特性,基于结构的性能表现,提出了适用的能力谱抗震设计方法和“三级设防”标准。研究成果为深入认识边坡工程的震害机理和抗震性能、改善我国边坡工程抗震设计方法、提升抗震设计水平提供了有力的理论依据和参考。

本书可供道路与铁路工程、地质工程、岩土工程、水利工程、地下工程等专业的科研人员、设计和施工人员,以及高等院校的教师、研究生、本科生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

边坡挡土结构的抗震机理与设计理论 / 曲宏略, 张建经, 杨长卫著. —北京: 科学出版社, 2015.12

ISBN 978-7-03-046870-3

I. ①边… II. ①曲… ②张… ③杨… III. ①边坡-挡土结构-防震设计 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 313510 号

责任编辑: 张 展 罗 莉 / 责任校对: 邓利娜 陈 杰

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016年3月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 267 千字

定价: 69.00 元

前 言

西部大开发战略实施以来,西部地区开展了大量的公路和铁路建设。截至2007年年底,西部地区累计新增公路通车里程65万千米,铁路运营里程6600多千米。大量新修建的交通线路为提高西部地区人们的生活水平和西部地区社会经济的发展作出了巨大的贡献。伴随着西部地区大量公路、铁路建设的展开,一个设计者和建设者都避免不了的问题出现了:地处青藏高原地震带与龙门山地震带的中国西部地区自古以来就地震频发,在西南地区修建的交通线路时常经受地震的危害。例如,2008年5月12日14时28分,四川汶川县发生8.0级特大地震,地震直接导致通往汶川、北川等重灾区的交通线路全部中断,通往北川的公路在地震发生3天后才打通。大量公路边坡震害对灾后第一时间的救援造成了极大的阻碍。汶川地震所引起的大量公路、铁路中断,反映出一个重要的问题:目前,我国现有的边坡支挡抗震设计水平远达不到实际需求,之前一直沿用的《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004-89)颁布于1990年,已有超过20年未进行修订。

国家十二五规划提出,2011~2020年,西南地区仅四川就还将新增12条高速出川大通道,其中高速公路就接近5300km。汶川地震已经暴露出来目前我国边坡支挡抗震设计水平的严重不足,那么以后的边坡支挡抗震设计应该如何进行?如何修正完善现有设计方法?这些都是留给我们的最为严峻的问题。

为此,本书依托5·12汶川地震支挡结构震害调查成果,选择目前应用最广泛、最典型的重力式挡土墙、加筋土挡土墙、桩板墙和锚索桩板墙为基本研究对象,将结合了重力式挡土墙和加筋土挡土墙优点的新型支挡结构——加筋重力式挡土墙作为拓展研究对象,重点进行地震响应特性、震害失效机理和结构设计理论方面的研究。全书内容可以分为四部分:

第一章为第一部分,主要介绍支挡结构的抗震分析理论、研究的意义以及目前国内外的研究现状。

第二章为第二部分,介绍边坡典型支挡结构震害调查分析与启示。本书所做研究主要是依托汶川地震展开的,因此本章就汶川地震所造成的支挡结构震害进行深入的研究,并分析支挡结构震害的影响因素。

第三章至第七章为第三部分,主要是从震害机理出发,采用振动试验与理论分析手段解析各类型支挡结构的震害失效模式与地震响应特性。

第八章至第十二章为第四部分,主要是各类型支挡结构的抗震设计方法的修正与部分新方法的推导。

本书是由交通部西部交通建设科技项目“汶川地震公路地震灾害评估、机理分析及设防标准评价”、四川省教育厅项目“强震下能力谱法在抗滑桩设计中的应用研究”、西南石油大学科研培育计划“基于 PBSD 的锚索桩抗震评价体系研究”等基金资助下所取得的研究成果总结而成的。四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院的庄卫林、马洪生、陈强等提出了宝贵的建议，为本书增色不少，作者在此表示衷心感谢！

由于本书所涉及的支挡结构抗震设计内容较新，加之编者水平有限，不足之处在所难免，衷心希望广大读者提出宝贵的意见和建议。

曲宏略

2015 年 10 月 22 日

目 录

第一章 引言	1
1.1 概述	1
1.2 研究现状综述	2
1.2.1 理论分析	2
1.2.2 数值计算	7
1.2.3 原型的调查及测试	9
1.2.4 动力模型试验	10
1.3 本书主要内容	11
第二章 边坡典型支挡结构震害调查分析与启示	13
2.1 震害概况	13
2.2 支挡结构震害统计分析	15
2.2.1 调查线路段与烈度区的震害分布	15
2.2.2 震害支挡结构类型	18
2.2.3 挡土墙的砌筑方法	18
2.2.4 地质条件	20
2.2.5 与断裂带关系	20
2.2.6 震害类型	21
2.3 统计分析的启示	22
第三章 重力式挡土墙震害机理分析	23
3.1 浆砌挡土墙震害机理分析	23
3.2 片石混凝土挡土墙震害机理分析	27
3.2.1 振动试验介绍	28
3.2.2 震害机理分析	39
第四章 加筋土挡土墙震害机理分析	48
4.1 典型工点震害机理分析——两级加筋土挡土墙震害机理分析	48
4.1.1 工程概况	48
4.1.2 计算模型	49

4.1.3	参数选取	50
4.1.4	破坏机理分析	50
4.2	单级路肩加筋土挡土墙抗震机理分析	52
4.2.1	计算模型及参数	52
4.2.2	破坏机理分析	52
4.3	单级路堤加筋土挡土墙抗震机理分析	54
4.3.1	计算模型及参数	54
4.3.2	破坏机理分析	55
第五章	新型加筋重力式挡土墙震害机理分析	56
5.1	振动台试验简介	56
5.2	位移响应特性	57
5.3	土压力响应特性	59
5.3.1	土压力合值	59
5.3.2	土压力合力作用点	60
5.4	加速度响应特性	61
5.5	加筋和普通重力式挡土墙抗震机理的异同点	63
第六章	桩板墙震害机理分析	65
6.1	振动台试验介绍	66
6.1.1	试验模型设计	66
6.1.2	试验模型制作	67
6.1.3	测试元件介绍	69
6.1.4	测试元件布设及试验实施	72
6.2	结构位移分析	75
6.2.1	位移响应时程分析	75
6.2.2	桩身位移规律分析	77
6.3	结构受力分析	79
6.3.1	土压力响应时程分析	79
6.3.2	桩身受力的分布规律分析	80
6.4	加速度响应特性	82
6.4.1	加固边坡的行波效应	82
6.4.2	加固边坡放大效应研究	86
6.5	数值计算拓展分析	88
6.5.1	工程概况	88
6.5.2	算参数选取	89

6.5.3	固土坡变形规律	90
6.5.4	结构-土动力耦合作用	95
第七章	锚索桩板墙震害机理分析	97
7.1	振动台试验简介	98
7.2	结构变形分析	100
7.2.1	位移响应时程分析	100
7.2.2	桩身变形规律分析	103
7.3	结构受力分析	104
7.3.1	桩身受力分析	104
7.3.2	锚索轴力分析	107
7.4	加速度动力响应特性	108
7.4.1	加固边坡的行波效应	108
7.4.2	加固边坡放大效应研究	111
7.5	地震作用下锚固体体系的粘结机理	113
7.5.1	试验介绍	114
7.5.2	锚固体体系震害机理分析	116
第八章	重力式挡土墙抗震设计理论	122
8.1	墙背土压力合力	123
8.2	合力作用点高度	124
8.3	测土压力与规范比较	125
8.3.1	国内外抗震规范介绍	126
8.3.2	抗震规范地震对比	131
8.3.3	实测数据与规范对比	133
第九章	加筋土挡土墙抗震设计理论	136
9.1	两级加筋土挡土墙	136
9.2	单级路肩加筋土挡土墙	138
9.3	单级路堤加筋土挡土墙	140
第十章	新型加筋重力式挡土墙抗震设计理论	142
10.1	工作原理	142
10.2	抗震设计方法的公式推导	143
10.2.1	裂面假定	143
10.2.2	公式推导	145

10.3 振动台试验验证	148
第十一章 桩板墙抗震设计理论	150
11.1 拟静力法的改进	150
11.1.1 抗震设计方法修正及试验验证	150
11.1.2 数值分析验证	152
11.2 频谱设计方法	156
11.2.1 Pushover 能力谱法原理	157
11.2.2 在桩板墙性能设计中的应用	159
11.2.3 实例验证	160
11.2.4 桩板墙的“三级设防”标准	164
11.2.5 考虑近断层脉冲效应的 R 折减表达式	166
第十二章 锚索桩板墙抗震设计理论	171
12.1 抗震设计方法推导	172
12.1.1 基本假定	172
12.1.2 公式推导	174
12.1.3 试验验证	178
12.2 设计参数对抗震性能的影响	180
12.2.1 计算模型及参数简介	181
12.2.2 地震响应研究	182
12.2.3 设计参数影响研究	185
参考文献	196

第一章 引言

1.1 概述

我国位于世界两大著名地震带（环太平洋地震带和欧亚地震带）之间，太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块的挤压作用致使断裂带十分发育，频度高、强度大、震源浅、分布广是我国地震活动的特点。总体上看，有 79% 的国土位于地震烈度Ⅵ度或Ⅵ度以上的区域，近 70% 的大城市（人口超过 200 万的城市）处于地震烈度Ⅶ度或者Ⅶ度以上的地区，首都北京和一些省会城市，如西安、兰州、银川、太原、昆明、海口、拉萨、乌鲁木齐和呼和浩特等，都位于地震烈度Ⅷ度甚至Ⅷ度以上的区域内，此外，还有许多重要工业厂区位于受地震灾害严重威胁的区域内。虽然我国国土面积约占全球陆地面积的 1/15，但发生的地震占到了全球地震总数的 1/3，地震死亡人数占全球地震死亡人数的 60%。1900~2007 年，我国大陆地区已经发生 7.0~7.9 级地震 70 次，8.0 级及以上地震 6 次，这些地震造成的灾害涉及 28 个省份，死亡 59 万人，伤残 76 万人，数亿人次受灾。地震及其他自然灾害的严重性构成了中国的基本国情之一^[1]。

在我国，中度和强震地区分布着大量的边坡，如公路、铁路的高填路基和深挖路堑，土石坝、堤防等水利工程的边坡，矿区堆填边坡，山区自然边坡和开挖边坡，工业废渣堆填边坡等。根据填挖方的不同，边坡分为路堑边坡与路堤边坡（即上边坡与下边坡）。边坡失稳是典型的岩土工程事故之一，其诱发因素较多，而地震是重要因素之一。我国因地震而导致的滑坡灾害非常严重，如在 5·12 汶川地震中，规模大于 1000 万 m^3 的滑坡就达数十处，掩埋上百人的滑坡达 10 余处，仅北川县城王家岩滑坡就掩埋了 1600 余人^[2]；玉树地震触发了约 2036 处滑坡灾害，总面积约 1.194 km^2 ^[3]。

支挡结构是防治滑坡的重要结构，可用作支撑、加固填土或山坡土体，防止其坍塌以保持稳定，主要包括挡土墙、抗滑桩（桩板墙）、预应力锚索等支撑和锚固结构。支挡结构的设计水平，直接影响到其在地震中的抗震性能，进而关系到加固边坡的稳定性。在支挡结构的抗震设计领域，目前对结构和边坡的地震响

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W \tag{1-1}$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W \tag{1-2}$$

式中， F_h 、 F_v ——滑体在水平与竖直方向的地震惯性力；
 k_h 、 k_v ——无量纲的水平与竖直拟静力地震综合影响系数；
 a_h 、 a_v ——滑体在水平与竖直方向的地震加速度；
 W ——滑体重量。

此后，很多学者对拟静力法进行了发展和延伸。如 Ashok K. Chugh^[7]利用类似土坡稳定性分析中的条分法，得出了土体静态和地震时土压力的方向、大小和作用点，但未得出墙后土压力的分布形式。张建民^[8]基于土体抗剪强度折减理论，给出了墙后土体地震土压力的计算方法和相应参数的确定方式，该方法能简便计算主动与被动之间的任意中间状态的地震土压力，包括静土压力分量。陈学良等^[9]利用广义库仑理论的相关概念，拓展了物部-冈部计算式，提出了考虑黏性土的广义物部-冈部计算公式。

虽然拟静力法计算简单，但因简化较多而对于动力问题的处理过于粗略，当然就会存在许多缺陷，Seed^[10]曾经对该方法的不足进行过详尽的讨论，并指出惯性力的取值方向单一、大小不变，不考虑分布形式的影响是明显不合理的，应在数值大小和作用方向上考虑快速的波动情况；此外，稳定性系数计算值暂时小于 1 只会导致边坡产生一定的永久位移，未必会导致坡体整体失稳。沈珠江等^[11]认为拟静力法的缺陷是十分明显的，它完全没有考虑地震加速度时空分布的不均匀性，最主要的是没有一个实例能够证明地震惯性力对土工建筑物的破坏起了决定性的作用。

拟静力法最大的挑战在于地震综合影响系数如何合理取值，Terzaghi 建议一般地震 k 取 0.1，剧烈地震 k 取 0.25，灾难性地震 k 取 0.5；Seed 从土坝应用出发，建议对于 $M=6.5$ 级的地震 k 取 0.1，对于 $M=8.25$ 级的地震 k 取 0.25，并且建议在材料失去强度的情况下不适合用此公式。

目前，各个国家的抗震规范对于地震综合影响系数的取值也存在差异，以中国^[12,13]、欧洲^[14]、日本^[15]和新西兰^[16]支挡结构抗震规范为例，表 1-1 列举了在Ⅱ类场地条件下各国地震综合影响系数。但需要说明的是，所列国家在支挡结构抗震设计时其他参数也不尽相同，并不能以此判别其合理性，在此，主要体现的是地震综合影响系数对于结构抗震设计的重要性。

表 1-1 Ⅱ类场地各国规范地震作用综合修正系数

支挡结构抗震规范	中国	欧洲	日本	新西兰
地震作用综合修正系数	0.25	0.6	0.6	0.63

地震下挡土墙遭受破坏的原因很复杂，其抗震性能受结构形式、挡土墙所处位置、地形地貌条件、场地条件和地震动衰减特性等因素影响。尽管目前的研究和各国抗震规范中地震综合影响系数的计算考虑了上述部分因素，但对于其他影响因素仍缺乏研究，难以提出定量的指标。因此，如何确定地震作用综合修正系数的主控因素及如何将其定量化等问题仍有待进一步研究和探讨。

2. Newmark 滑块分析法

拟静力法只能提供一个稳定性评价指标，缺乏与破坏面有关的变形信息。为了确定震后支护边坡的服务能力，需要估计边坡产生的震后永久位移。目前计算地震永久位移常采用 Newmark 滑块分析法^[17]，该方法中计算位移的思想是 1965 年 Newmark 针对坝坡在第五届朗肯讲座中提出的，计算理论示意图见图 1-2。

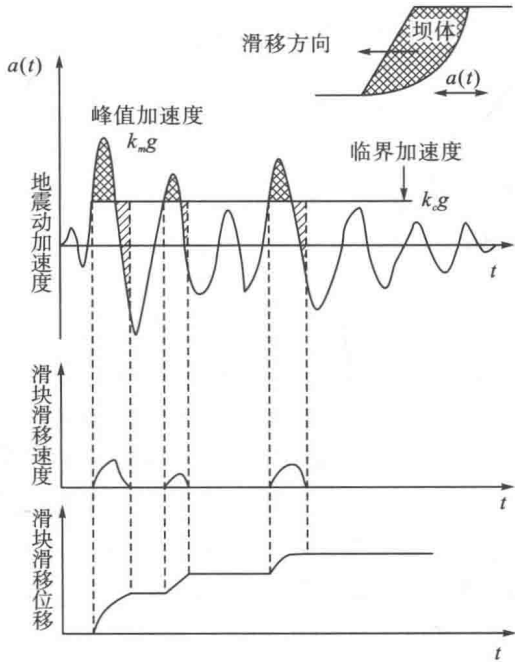


图 1-2 Newmark 滑块分析法示意图

为了计算边坡震后永久位移，需要确定边坡的临界屈服加速度，假定安全系数为 1，根据极限平衡分析理论，临界屈服加速度系数 k_c 很容易计算得到，将超过屈服加速度的地震加速度时程作两次积分即可估算出滑块的最最终位移。

该方法主要遵从如下假定：潜在的滑动体为刚性，整体滑动位移一致；滑块与滑面间符合完全的塑性应力应变关系；滑动面形状是平面或圆弧面。

Newmark 滑块分析法在边坡工程中得到了广泛应用。1995 年，Taylor^[18]根据接触面剪切试验得到的屈服加速度，对存在黏性土界面的固体垃圾场覆盖层进行

了动力稳定性分析,采用 Newmark 滑块分析法对屈服位移进行了估算,对比了不同性质覆盖层的屈服加速度和位移分析结果,并提出了安全经济的设计计算方法。1996年,Cai、Bathrust^[19]对 Newmark 滑块分析法的经验公式进行了总结,见表 1-2。

表 1-2 滑移位移经验公式

序号	计算方法	经验公式
1	Newmark (1965)	$d = 3 \frac{V_m^2}{k_m g} (k_c / k_m)^{-1}, \quad k_c / k_m < 0.16$
	上限法	$d = 0.5 \frac{V_m^2}{k_m g} (k_c / k_m)^{-2}, \quad k_c / k_m > 0.16$
2	Richard、Elms (1979) 上限法	$d = 0.087 \frac{V_m^2}{k_m g} \left(1 - \frac{k_c}{k_m}\right) (k_c / k_m)^{-4}$
3	Whitman、Liao (1984) 均值拟合法	$d = 37 \frac{V_m^2}{k_m g} \exp \left(-9.4 \frac{k_c}{k_m}\right)$
4	Cai、Bathrust (1996) 上限法	$d = 35 \frac{V_m^2}{k_g g} \exp \left(-6.91 \frac{k_c}{k_m}\right) (k_c / k_m)^{-0.38}$
5	Cai、Bathrust (1996) 均值拟合法	$\log \left(\frac{4d}{\alpha k_m g T^2}\right) = 0.85 - 3.91(k_c / k_m)$
6	Cai、Bathrust (1996) 线性拟合法	$\log \left(\frac{4d}{\alpha k_m g T^2}\right) = 1.0 - 3.86(k_c / k_m)$

备注: d 为实际位移; V_m 为峰值加速度; k_m 为峰值地震动加速度系数; k_c 为滑动临界屈服加速度系数; T 为地运动卓越周期; α 为滑块体几何形状常量, $\alpha = \cos \varphi / (\psi - \theta - \varphi)$, ψ 、 θ 、 φ 分别为破裂角、地震角、土体内摩擦角

国内方面关于 Newmark 滑块分析法的研究也较多,具代表性的有:王思敬^[20]基于该理论提出了边坡块体滑动的动力学计算方法;王思敬、张菊明^[21]提出了运动起始摩擦力和运动过程摩擦力的概念,并通过振动台试验,测得了花岗岩光滑节理面的动摩擦系数与运动速度的关系,在此基础上,王思敬等^[22]推导得出了楔形体和层状山体两种情形下的三维动力响应方程;张建经等^[23]通过振动台模型试验结果与滑移位移经验公式的比较,指出表 1-2 中 Whitman、Liao 均值拟合法最适合于重力式挡土墙滑移位移量的估算,并对重力式挡土墙的抗震性能设计流程进行了归纳。

3. 弹床系数法

弹床系数法由 Winkler 地基梁法发展而来。该方法假定土体的作用为均匀剪切、非均匀压缩和非均匀剪切等几种弹床系数,假定的土体弹床系数与土的类型、物理力学状态和位移的形式有关。土体对挡土墙的作用假设成弹簧的作用,根据

此假设,可以得到墙体变形与受力之间的关系。通过墙背与墙底土体阻尼的假定可以得到阻尼力,进而由动力平衡方程可以求解挡土墙的动力反应,同时也可求得地震土压力。

弹床系数法的提出为深入了解支挡结构与土体间的相互作用机理奠定了基础。Ito、Matsui^[24]考虑桩土相互作用,从单桩出发,根据土体塑性变形理论,提出了抗滑桩由桩周土体产生桩侧作用力的计算方法。李仁平^[25]在 Ito 的研究基础上,研究了软土地基中被动桩与土体的相互作用问题。张有良等^[26]利用有限元法和极限平衡法相结合的方法模拟滑坡体和抗滑桩相互作用机理,利用弹床系数法考虑了抗滑桩-土体的耦合作用与变形,从而计算出了抗滑桩的内力和变形,以及因变形而施加给土体的作用力、滑坡体加固后的安全系数等参数。

4. 概率分析法

由于很多不确定因素贯穿于动力稳定分析中,如材料特性的随机性、地震动输入的随机性等,这些随机性和模糊性对计算结果往往产生很大影响,考虑这些不确定性对分析结果的影响具有必要性,因而出现了概率分析法。

Yegian^[27]于 1991 年首次将概率分析法引入到边坡工程的动力分析中,估算了地震作用下边坡的永久位移。1992 年,Halatchev^[28]也将概率分析法应用于边坡的稳定性分析中,考虑地震力的水平向和竖直向共同作用效果(即地震力具有任意倾角),假定土体剪切强度参数服从正态分布,并由 Monte-Carlo 模拟确定,地震系数被视为一个随机量来确定地震破坏的概率。2000 年,Al-Homoud^[29]利用边坡的临界位移和安全系数结合的方法,提出了土体边坡和堤坝的概率三维动力稳定性分析模型,发现震级和震中距对位移、破坏概率,以及二维和三维的安全系数影响很大。黄腾威^[30]利用概率分析法提出了地震作用下关于土坡稳定的可靠度分析方法。

5. 位移变形法

目前,对于天然未加固边坡的地震响应特征已有大量研究,大多集中于边坡稳定性和永久位移方面,如 Terzaghi^[31]、Newmark^[17]、Seed^[32]、Bray 和 Rathje^[33]、Bray 和 Travarasrou^[34]等。

对于位移法的研究,继滑块分析法后,较有代表性的有 Bray 和 Rathje 考虑边坡材料性质、几何尺寸、场地条件和地震动特性等条件提出的边坡在地震下产生永久位移的计算方法。在此方法中,最大地震荷载主要取决于设计地震动的峰值加速度和平均周期,以及边坡的动力响应特性(代表性参数为自振周期)。但对于支护边坡,特别是抗滑桩支护边坡的动力响应分析和抗震设计方法研究目前还很少,需要进一步加强。

在 Bray 和 Rathje 的研究基础上,Blake 等^[35]建立了窗口分析程序,在极限平

衡分析框架内,利用土拱形成条件计算支护边坡的动力稳定性。Li等^[36]在拟静力法框架内,运用极限运动分析理论估算了抗滑桩支护边坡的永久位移,但是此理论仅限于均质和各向同性土体单元,且破裂面被假定为对数螺旋方程。在Li等的研究基础上,罗渝等^[37]将上述理论进行了继承和发展,运用极限分析上限定理,推导出了地震作用下桩锚组合结构加固边坡中抗滑桩所需提供抗力的计算公式,以及该加固边坡的屈服加速度计算公式,并建立了震后永久位移估算理论。

1.2.2 数值计算

随着计算机技术的迅速发展,近年来数值计算方法在岩土工程领域得到了广泛的应用和发展。在边坡工程和挡土结构的地震响应特征和稳定性分析中,国内外较常用的数值计算方法为有限元法、快速拉格朗日元法、离散元法、非连续变形分析方法、刚体弹簧元法和边界元法等。在这些计算方法的基础上,很多计算分析软件得到了开发应用,并趋于成熟,其中以有限元法、离散元法和快速拉格朗日元法的应用最为广泛。

有限元法最早应用在岩土工程动力分析中,Clough、Chopra^[38]首次将该方法用于土坝的地震反应分析,此后该方法在岩土工程领域的动力响应分析中得到了广泛的应用和发展。由于自身的局限性,有限元法对地震过程中的液化、崩塌、滚落、大滑移和大应变等破坏现象难以作出准确合理的分析。但由于有限元法能够考虑复杂地形、土体非线性、非均质性和弹塑性等因素的影响,可以用总应力分析法和有效应力分析法深入分析岩土体的动力特性及各部分的动力响应,并且应用经验丰富,因此,有限元法仍然是岩土工程动力分析中较为常用的分析方法之一。例如,薄景山等^[39]利用时域集中质量显式的有限元方法,结合地震波多次透射公式,研究了斜坡在无限域中地震作用下的应力和位移场,并通过计算得到了多个不同滑动面上斜坡稳定系数的时程变化,提出了土坡最小稳定系数的确定方法。吴兆营等^[40]采用有限元法计算得出了某岩体边坡的动力稳定系数时程,并给出了按时间加权的平均稳定系数。张彦等^[41]分别利用拟静力法和有限元法对25m以上的高填方路堤进行了地震稳定性分析,针对公路路堤不断加高的趋势,给出了高填方路堤抗震设计时应考虑的地震动力放大系数公式。汪鹏程等^[42]通过建立一个切方直立土坡概化模型,进行桩-锚支护边坡系统的动力分析,得出了坡体速度、位移、土压力、坡顶拉应力、结构的剪力、弯矩和锚杆轴力的动力响应情况,揭示了此支护体系的动力特性。

离散元法由Cundall^[43]基于牛顿第二运动定律提出。该方法把介质看作不连

续块体,尤其适用于计算分析节理岩体的动力响应问题,在边坡、隧道和水利等工程领域均有重要应用。它的优点在于能够较准确地反映块体之间接触面上的变形、倾翻与分离等大应变情况,同时能够计算块体内部的应力与变形分布。

1983年,Lemos将边界元法与离散元法耦合,并将开发的耦合半平面程序用于计算断裂介质和节理中的应力分析问题。Iwashita与Hakuno利用离散元模型研究了岩质陡坡的动力变形与稳定过程,Meguro与Hakuno将其应用于混凝土结构地震破坏的研究中,也取得了一定的进展。Rajinder Bhasin^[44]在对喜马拉雅山下某个大型洞室的变形机制研究中,利用 UDEC(离散元软件)探讨了不同计算参数(如节理本构模型、节理间距等)对洞室变形的影响。

离散元法在我国的研究应用开始于20世纪80年代中期,王泳嘉^[45]首次利用该方法对节理岩体的自然崩落机制进行了研究。李世海等^[46]利用离散元法对三峡永久船闸的高边坡工程进行了数值模拟分析。陶连金等^[47]运用离散元法对某节理岩体边坡进行了动力稳定性评价,并估算了该边坡的永久位移。

离散元法在一定程度上弥补了有限元法的某些不足,它能够模拟边坡工程随时间的大变形过程,甚至是完全破坏的过程,但由于它假定了介质为不连续块体,因此不能用于连续介质的计算分析。此外,由于测定离散元法所需参数的法向及切向弹簧刚度是非常困难的,因而所得的分析结果通常是定性的。

快速拉格朗日差分法是一种新型数值分析方法,近年来得到了逐步完善。该方法假定介质为连续介质,利用差分技术引入了时间因素,从而实现了连续介质的小变形到大变形过程的模拟,它有效地避免了有限元法与离散元法不能有机统一的矛盾。与有限元法类似,该方法采用了连续介质这一基本假定计算岩土体的应力和变形场,同时又能够与离散元法类似地计算岩土体沿某一软弱面滑动,以及随时间延续岩土体变形逐渐增大的大变形问题,还可以模拟材料非线性的物理不稳定等情形,因此,快速拉格朗日差分法同时具备了有限元法和离散元法两者的主要功能。但是,和有限元法一样,它不能模拟含多个不连续界面的岩土体问题。不过,由于快速拉格朗日差分法所具有的优势,目前该方法已得到了广泛的应用。例如,Chen等^[48]和Martin等^[49]采用FLAC研究了被动桩和土体间的相互作用,分析了土体位移对被动桩的受力影响。陶云辉^[50]通过FLAC3D对地震力作用下的桩板墙结构进行研究,确定了桩前后土压力大小与桩身变形情况,以及地震动参数对结构动力响应的影响。卢昌松^[51]采用有限差分计算方法建立了路肩式预应力锚索桩板墙数值计算模型,对降雨及地震情形下预应力锚索及抗滑桩的受力情况进行了分析,并对抗滑桩和锚索在各种工况下分担下滑力的合理性进行了探讨。

此外还存在一些其他的数值分析方法,如边界元法、非连续变性方法(DDA)、