

BAOZHA ZAIHAXIA

YANZHI BIANPO DONGLI XIANGYING JI KONGZHI

爆炸载荷下 岩质边坡动力响应及控制

钟冬望 吴 亮 韩 芳 姜翠香 著



科学出版社

爆炸载荷下岩质边坡 动力响应及控制

钟冬望 吴 亮 韩 芳 姜翠香 著

科 学 出 版 社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书是一本关于爆炸载荷下岩质边坡的动力响应及控制的专著。全书对岩质边坡动力响应及控制研究的历史及现状进行了较为系统的总结,介绍了工程爆破相似律及其应用,分析了影响岩质边坡稳定性的主要工程地质因素;结合实验室和现场试验,分别研究了岩质边坡的损伤断裂机理,爆破地震波的主要特征、影响因素、分析方法、数值模拟和振动效应预测预报及控制技术。

本书可供采矿工程、爆破工程、交通工程、水利水电工程等领域的工程技术人员及相关专业的研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

爆炸载荷下岩质边坡动力响应及控制/钟冬望等著. —北京:科学出版社,2011.11
ISBN 978-7-03-032523-5

I. ①爆… II. ①钟… III. ①岩石—边坡稳定性;动力稳定性—研究
IV. ①TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 206109 号

责任编辑:曾 莉/责任校对:董艳辉 蔡 莹

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

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>

武汉市科利德印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 10 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 10 月第一次印刷 印张:12 3/4

印数:1—1 350

字数:248 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

爆炸载荷下岩质高边坡的动力响应及控制是矿山开发和工程建设中面临的一个亟待解决的课题,历来深受国内外学者重视,在我国,从“七五”期间起就将其列为国家科技攻关的重要研究内容。近年来有关岩石力学、爆破技术的研究在理论基础、实验手段和数值模拟方法等方面均有了很大的突破,广大科技工作者在实践中也取得了许多宝贵的经验,新理论、新技术、新方法、新工艺随之应运而生。本书是在国家自然科学基金“爆炸载荷下岩质高边坡的动力响应与破坏机理研究(50774056)”、“精确延时控制爆破对边坡稳定性影响规律研究(51174147)”资助下完成的,归纳了作者近年来从事相关研究的成果,包括工程爆破相似律及其应用、岩质边坡动力稳定性分析及失稳机理、岩质边坡的爆破动力响应机理、岩质边坡的损伤断裂机理、边坡爆破动力响应及破坏机理的实验研究、边坡爆破动力响应的数值模拟及应用、临近边坡的控制爆破技术等内容。

我国爆破技术研究历史悠久,虽已取得了许多重要成果,但仍有大量问题需要深入研究,爆破理论的发展严重滞后于爆破技术的进步是工程爆破领域长期存在的问题,只有不断引进新理论和采用新的研究方法,借鉴基础理论及相关应用学科的最新成果,才有望取得长足的进步。本书的目的在于使我们对爆炸载荷下岩质高边坡的动力响应及控制有更为深入、系统、科学的认识,为重大岩土开挖工程和深凹露天矿的安全生产提供科学保证,同时也为改善爆破效果、优化爆破参数、控制爆破地震波对边坡及周边环境的危害提供科学依据。

本书第1章、第3章、第8章由钟冬望撰写,第2章由韩芳撰写,第5章由姜翠香撰写,第4章、第7章由吴亮撰写,第6章由钟冬望、陈浩合著,全书由钟冬望统一审定。在本书出版之际,谨向书中所有参考文献的作者以及支持和参与本课题的李寿贵、磨季云、熊祖钊、余刚、陈桂娟、胡卫华、王难烂、曾国伟、陈江伟、何理等表示衷心的感谢!同时对工程力学系全体教师和相关矿山工程技术人员、工人及研究生们表示衷心的感谢!

本书可供采矿工程、爆破工程、交通工程、水利水电工程等领域的工程技术人员及相关专业的研究生参考使用。由于水平所限,书中不妥之处在所难免,甚至有错误的地方,尚希读者见谅并提出宝贵意见。

作 者

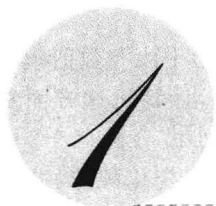
2011年5月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 岩质边坡动力问题研究现状及进展	3
1.3 岩质边坡开挖动力响应研究存在的主要问题	16
参考文献	16
2 工程爆破相似律及其应用	23
2.1 相似理论	23
2.2 量纲分析	26
2.3 光面爆破的相似准则及其分析	31
2.4 台阶微差爆破中的相似问题	35
2.5 土岩爆破条状药包爆破相似律	38
2.6 土岩爆破集中药包爆破相似律	41
2.7 水压爆破相似律	43
2.8 井下深孔爆破相似律	44
参考文献	47
3 岩质边坡动力稳定性分析及失稳机理探讨	49
3.1 工程岩体稳定性分析的基本原理	49
3.2 工程岩体稳定性分析方法	50
3.3 爆破作用下边坡稳定性的影响因素分析	53
3.4 边坡动力变形破坏类型	60
3.5 爆破诱发边坡失稳机理探讨	62
参考文献	65
4 岩质边坡的爆破动力响应机理研究	67
4.1 岩体的动态性质	67
4.2 爆破荷载作用下边坡岩体内的动应力分析	69
4.3 高边坡爆破振动动力分析	70
4.4 高边坡爆破振动动力稳定性评价方法	75
4.5 边坡爆破开挖动力稳定安全判据及控制标准	80
参考文献	82



5 岩质边坡的损伤断裂机理	86
5.1 岩质边坡中的应力场.....	86
5.2 边坡的变形破坏和机理.....	90
5.3 边坡岩体卸荷强度理论研究.....	93
5.4 岩石爆破损伤模型.....	97
参考文献.....	102
6 边坡爆破动力响应及破坏机理的实验研究	104
6.1 电阻应变测试原理	104
6.2 岩石爆破振动测量原理	111
6.3 爆破条件下混凝土高边坡应力状态的实验研究	113
6.4 爆破条件下混凝土高边坡振动响应的实验研究	120
6.5 动光弹试验	133
6.6 小结	138
参考文献.....	139
7 边坡爆破动力响应的数值模拟及应用	141
7.1 ANSYS/LS-DYNA 程序算法基础	141
7.2 爆破荷载施加问题研究	144
7.3 室内模型试验模拟	145
7.4 工程应用	152
7.5 小结	164
参考文献.....	164
8 临近边坡的控制爆破技术	165
8.1 引言	165
8.2 预裂爆破机理研究的发展综述	166
8.3 预裂爆破的爆炸载荷与准静态应力场	169
8.4 预裂爆破的损伤断裂成缝机理	177
8.5 预裂爆破减振效果分析	182
8.6 临近高陡边坡控制爆破技术工程应用	186
参考文献.....	195



绪 论

1.1 引言



爆炸载荷下岩质高边坡的动力响应及控制是矿山开发和工程建设中面临的一个亟待解决的课题。国家的重大基础设施建设和一些重大战略的部署,提出了许多相关的、新的科学难题,如深部开采的高应力问题、强地震烈度区下高陡边坡的安全问题、水利水电工程中高陡边坡的长期安全性问题等。目前我国 18 座大型冶金矿山中,已有 16 座即将或已经进入深凹露天开采,随着露天矿坑的逐渐加深,边坡也在变高变陡,爆破地震效应对边坡稳定的影响问题日益突出^[1,2],维护边坡稳定的难度和费用也越来越大。边坡稳定是露天矿安全生产的前提,露天边坡稳定问题是露天矿山最为重要的安全问题,一旦边坡失稳发生滑坡,将直接危及矿山生产设备安全,使矿山蒙受重大经济损失,甚至造成矿山生产的瘫痪、停产^[3],更有甚者还有可能造成施工作业人员的人身伤亡,造成不可估量的经济损失。例如,漫湾水电站施工过程中产生滑坡,后期处理费用增加 1.2 亿,施工期延长一年,损失超过 10 亿元^[4]。随着国家生产安全形势的日益严峻和爆破开挖过程对环境影响程度的不断加剧,爆炸载荷下岩质高边坡的动力响应及控制已经成为亟待解决的研究课题。

爆炸载荷下岩质高边坡的动力响应的研究在岩石爆破学术界历来深受国内外学者重视,在我国,从“七五”期间起就将其列为国家科技攻关的重要研究内容。研究爆破地震效应的主要目的是通过深入了解地震波的产生和传播规律,以更好地控制其对周围环境的破坏影响。相关研究目前在如下两方面都取得了较大的进展:在改善炸药爆炸后的能量分布问题上,人们通过改变爆破方式、装药结构及孔网参数,采取微差起爆等爆破技术手段,可以提高炸药爆炸后的破碎岩石能量利用率,进而减少其产生的地震波能量,在一定程度上达到了降低爆破地震危害、维护边坡稳定的目的^[5,6];在爆破地震波的传播规律上,通过测试发现影响其传播规律的因素,提出了相应的安全判据,采取预裂爆破、缓冲爆破以及在特定工程环境下通过开挖减震沟等办法,以耗散地震波在传播过程中的能量达到降低地震效应目的。露天采场爆破地震波的产生、传播与地质地形条件、爆破方式等多种因素有关,而目



前所做的大量研究^[7,8],其思路和方法大多限于针对影响爆破地震效应的具体因素,缺乏对爆破振动规律的系统研究。

近年来有关岩石力学、爆破技术的研究在理论基础、实验手段和数值模拟方法等方面均有了很大的突破。尤其是,随着计算机的广泛普及,计算机这方面发挥着越来越重要的作用。例如,通过对采集信号进行 FFT 变换、小波分析^[8,9]等多种信号处理手段从空间和时间两个方面来探讨地震波的能量分布变化规律,及在同一时刻的能量和频率的关系,改变了以往仅考虑单因素如爆破振动速度所带来的不足,为充分考虑对边坡稳定性影响的多种因素打下了基础^[10]。在非平稳信号分析领域广为应用的小波变换则可很好地应用于爆破振动信号的分析处理。在爆破振动的传播规律上,现在已把神经网络等模糊和智能科学引入其中^[1],为解决这类不确定因素对传播规律的影响建立了一条新的途径。同时数值计算方法在该领域也发挥着越来越重要的作用,现在也已建立了充分考虑岩石非连续性的数值计算模型如 DDA 计算模型等,这比以往单纯使用有限元的连续计算模型和节理单元模型前进了一大步,这种方法可以充分考虑在岩石中广泛存在的节理、裂隙对地震波的耗能作用,使计算结果与实际更为接近。在实验研究上,通过采用实验室和现场实验等多种方法,可以充分考虑某一因素的影响规律并为理论分析、信号处理和数值模拟研究提供相关数据和检验其正确性^[11]。

由于爆破地震与天然地震在能量、频率和持续时间上有着根本的差别,通过反应谱理论来研究结构受爆破地震作用的响应,在工程应用上虽然已做了大量工作,但还不是很成熟。根据结构动力学原理,考虑影响反应谱的因素和爆破地震作用的特点,钱胜国等建立了适用于爆破工程实际的动力计算方法与安全评价标准^[11]。在三峡碾压混凝土围堰爆破地震响应计算中,采用爆破地震反应谱法计算厂房坝段爆破地震响应,利用类似爆破地震实测波形,建立爆破地震速度反应谱^[12],再用 ANSYS 程序进行厂房坝段动力反应计算,通过计算获得了出现最大动应力和动位移的部位,获得了爆破在坝体中产生的动应力不对大坝产生破坏影响时的震源规模,由此确定了爆破规模。此外,确定爆破对边坡施加荷载的正反演理论分析方法和常规统计方法亦已建立。舒大强等^[12]根据爆破地震波在边坡中的作用,采用波形叠加反应谱的动力分析方法编制了爆破振动二维有限元动力计算程序,通过计算,对岩质高边坡的动力特性和爆破振动加速度的分布规律作了详细分析。张永哲等^[13]在对爆破地震波频谱分析的基础上,考虑爆源特性和波的传播、工程地形地质条件和动力响应特性,根据爆破地震波尺度效应概念以及现场实测地震波的传播衰减规律,给出不同时间和空间位置的地震波传递函数,微差爆破造成波的叠加作用、沿地下深度方向地震波频率特性的变化,提出了一套边坡爆破开挖极限平衡动力稳定分析方法。由于没有将爆破能量分布与振动效应结合起来研究,关于爆破地震的安全判据目前还没有统一标准^[14,15]。



由于现有研究缺乏以全面系统的能量转化与利用的观点来研究爆破地震效应问题,加之影响炸药利用率的因素众多,虽然解决了具体生产问题,但对整个爆破振动规律的揭示还远不能满足目前矿山生产和大型岩土工程的需要^[16-18]。爆破理论的发展严重滞后于爆破技术的进步是工程爆破领域长期存在的问题^[19,20],只有不断引进新理论和采用新的研究方法,借鉴基础理论及相关应用学科的最新成果,才有望取得长足的进步。为重大岩土开挖工程和深凹露天矿的安全生产提供科学保证,同时也为改善爆破效果,优化爆破参数、控制爆破地震波对边坡及周边环境的危害提供科学依据。

1.2 岩质边坡动力问题研究现状及进展



1.2.1 岩质边坡稳定分析方法

边坡是地球表面具有露天侧向临空面的地质体。边坡按照成因划分,可以分为天然斜坡和人工边坡;按组成性质划分,可以分为土质边坡和岩质边坡;按高度划分,边坡又可以分为高边坡和低边坡。

土质边坡破坏的形式常为弧面或沿既有面破坏,影响其稳定性的因素比较简单,主要是由于开挖或天然形成的坡度比较陡,在重力或降雨、地下水、地震等因素作用下而失稳。

对于岩质边坡,由于岩质边坡体内存在许多不规则的结构面,因此岩体是非连续、非均质、各向异性的介质,而且岩质边坡在开挖前就受到地应力(构造应力、温度应力、自重应力)和地下水等的作用,此外,岩质边坡还受到本身岩石类型、自然界风化侵蚀等影响,因此岩质边坡稳定与否不仅取决于岩体内部地质结构,也取决于外部环境的影响,是多种因素的综合作用。但总体而言,岩质边坡的稳定性很大程度上取决于岩体内破坏面和不连续面的存在和性质,所以它的稳定性主要是通过分析岩体中的结构面来进行评价的。

在大多数岩体力学问题的研究中,都假定岩体在外力作用下是静止的,所以,考虑问题的角度也一般是从静力学角度出发,其结果与实际情况不尽相符,往往是不得不对结果作一些折减。通常,在许多实际情况中,荷载常具有动力特性,如上所述的地震滑坡灾害等,沿用静力学的原理和方法来求解这类问题,结构的动载特性无法反应出来,这显然是不合适的。例如,在地震作用和影响下,岩质边坡和岩基的稳定;隧洞围岩和衬砌结构的安全;筑造在岩层中的导弹发射竖井能否继续使用;修建大型水库以后是否存在诱发地震的可能性,以及在诱发地震一旦发生时,大坝及库区岩质边坡的稳定等。地震等动荷载对于岩质边坡和隧洞围岩稳定性的影响是很大的,其影响主要有^[21]:①地震荷载通过岩体本身的不同层面与结构不连续

面的界面起反射和折射作用,导致超压增大;或者对欠稳定的岩坡发生掉块、局部崩塌和呈台阶滑落等;②地震和其他外界因素共同作用造成边坡失稳,特别是降雨、洪水和地下水位的变化等,加剧和促进了破坏形成。

常见的岩质边坡的破坏形式可以分为简单破坏模式和复杂破坏模式。简单破坏模式又可分为崩塌破坏、平移滑动破坏、楔形破坏、倾倒破坏和弧形破坏等模式;复杂破坏模式则可以是多种简单破坏模式的组合^[22]。

岩质边坡稳定性研究的发展历程大致可分为三个阶段^[22-24]。

(1) 将岩体视为松散体,并运用连续介质力学进行理论分析的土力学方法。上世纪初至 50 年代,岩质边坡稳定性评价几乎完全属于土力学范畴,稳定性分析计算建立在刚体极限平衡基础上,这一阶段可称为定性研究阶段。刚体极限平衡分析法的基本思路是:假定考虑岩土破坏是由于滑体内滑动面上发生滑动造成的,滑动面上土体服从破坏条件,假设滑动面已知,通过考虑由滑动面形成的隔离体的静力平衡,确定沿这一滑面发生滑动时的破坏荷载。最小的破坏荷载就是要求的极限荷载,与之对应的滑动面就是最危险的滑动面,目前已经提出了一系列的多块体极限平衡法,其中以 Sarma 法最为先进。这个方法允许对滑动体进行斜块分割,并提出滑动体达到极限平衡时在各斜块的交界面上也达到极限平衡。

(2) 上世纪 60 ~ 70 年代,岩质边坡稳定性研究理论和方法有了较大的发展,边坡稳定性研究进入力学机制和内部作用研究阶段,在边坡稳定性计算分析方面基本上沿两种途径进行:一是以刚体极限平衡理论为基础,考虑岩体中结构面的控制作用,利用数学分析法或图解法,最后求得安全系数或类似于安全系数的概念来进行定量评价,如结构分析法和块体理论等;二是以有限元法、边界元法或离散元法分析岩质边坡内部的变形特征和应力状态,给出直观形象的评价结果。

(3) 上世纪 80 年代以来,边坡稳定性研究的理论和方法更加成熟,可以利用计算机定量或半定量地模拟边坡开挖至破坏的全过程,在 70 年代后期,蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟技术应用于岩体结构面几何参数概率分布模型模拟,得出边坡岩体结构面网络图像,直观地仿真了岩体结构特征,并将其结果应用于岩质边坡稳定性评价,出现了边坡稳定性破坏概率分析方法。此外,一些新理论、新方法诸如系统论方法、信息论方法、模糊数学、灰色理论和数量化理论等被引入边坡稳定性研究,为定量评价和预测岩质边坡稳定性开辟了更为广阔的前景,边坡稳定性研究已步入系统工程分析研究阶段。

边坡稳定性分析过程一般步骤为:实际边坡 → 力学模型 → 数学模型 → 计算方法 → 结论。其核心内容是力学模型、数学模型、计算方法的研究,即边坡稳定性分析方法的研究。边坡稳定分析方法研究一直是边坡稳定性问题的重要研究内容,也是边坡稳定研究的基础。近几年来在该领域内取得了很多新的进展,其主要表现在以下几个方面:



(1) 极限平衡理论的完善。极限平衡理论是最经典的确定性分析方法,具体方法是将有滑动趋势范围内的边坡岩体按某种规则划分为一个个小块体,通过块体的平衡条件建立整个边坡平衡方程,以此为基础进行边坡分析。由于该方法具有模型简单、计算公式简捷、可以解决各种复杂剖面形状、能考虑各种加载形式的优点,因此得到广泛的应用。但也存在着危险滑动面确定困难、计算模型过于简化的缺点。近几年来该方法得到进一步的完善。传统的极限平衡法认为滑动面沿长度方向是不变的,这与实际边坡有些不符。郭汉荣^[25]在极限平衡公式中引入一个几何参数 R ,将单位走向边坡长度块段分析改为扇形块段分析,用于锥形边坡分析中。该方法能较好地适用于天然山包、人工废石山、煤矸山等锥形边坡,且计算结果比传统的方法更合乎实际。D. Timothy等^[26]认为极限平衡二维分析中隐含破坏面垂直剖面方向无穷大的假设与实际不合,建立了极限平衡三维分析方法。该文将极限平衡二维分析推广到三维分析,更能反映实际边坡,但大大增加了分析的难度。极限平衡分析的关键问题是确定最危险滑动面及其对应的最小安全系数,常规作法是假定滑动面为圆弧形,对滑动面圆心的确定采用经验方法、消元法中的二分法及坐标轮换法等。肖专文等^[27]仍假设滑动面为圆弧形,用遗传进化算法确定边坡最危险滑动面及其对应的最小安全系数。遗传进化算法由美国 John H. Huang 教授首先提出,这种算法模拟生物进化步骤,将复制、杂交、变异、竞争和选择等概念引入到算法中。将该算法应用到边坡稳定分析中克服了传统分析方法容易进入局部极小化的缺点,是一种全局优化算法。但该方法要有较高的理论基础。朱大勇^[28]基于最优控制理论思想,认为临界面是非孤立的,而是共生于一簇危险滑动面,引入边坡临界滑动场概念,通过数值方法求解临界滑动场,进而计算临界滑动面及临界滑动面对应的最小安全系数。该方法提出的临界滑动场概念比单一临界滑动面更能反映边坡整体或局部稳定性,能将所有可能危险滑动范围同时显现,且由临界滑动场能快速定出边坡临界滑动面。但该方法计算工作量大,只能采用计算机方法。G. Jorge等^[29,30]通过实验分析了人工加固边坡的破坏机理并评价了基于极限平衡理论的加固边坡设计方法的适用性及其设计中假设的合理性。该文将边坡稳定性问题推广到人工加固边坡领域。因此极限平衡法在计算模型、滑动面确定、边坡类型等方面都得到了完善。

(2) 数值分析方法的广泛应用。有限元法是一种十分成熟的数值方法,它几乎可适用于所有的计算领域。其最大优点是可分析任何形状的几何体,不但能进行线性分析还可进行非线性分析。有限元是边坡稳定分析中用得较多的一种数值方法。邱祥波等^[31]采用原流变模型,给出了初应变法的有限元解析式,用自编的平面有限元程序对小浪底出口边坡进行了稳定性分析。沈凤生等^[32]采用三维有限元法对小浪底水利枢纽工程进水口南端山体高边坡稳定性进行了研究分析。杨家岭等采用三维弹塑性有限元分析方法对藕塘古滑体在三峡水库形成后的稳定性进行了分



析。另外,其他的数值分析方法如边界元法、离散元法、拉格朗日法也开始大量应用于边坡稳定性分析中。常春等则提出了边坡应力分析的一种新方法,即离散元计算和神经网络预测相结合的模型。该方法首先用离散元方法分析不同开采深度下的边坡岩体应力,将计算结果形成样本集,应用于神经网络学习并进行推理,预测其他开采深度的边坡岩体应力。可见数值分析方法有两种发展趋势:一是有限元法的发展,从平面有限元到三维有限元,从弹性有限元到弹塑性有限元,使有限元法分析结果更能反映实际边坡;二是大量数值计算方法的应用,如边界元法、离散元法、拉格朗日法(Lagrange)等,这些数值方法的应用,必将促进边坡稳定性研究的发展。

(3) 复合法的应用。对于同一边坡采用两种或者两种以上方法进行研究的论文越来越多。沈凤生等^[32]采用三维有限元和刚体极限平衡理论相结合的方法分析了小浪底水利枢纽工程进水口南端山体高边坡的稳定性。杨家岭等^[33]用极限平衡理论和三维弹塑性有限元分析方法研究了藕塘古滑体在三峡水库形成后的稳定性问题。常春等^[34]采用离散元数值方法和极限平衡理论计算不同的开采深度下的边坡岩体应力,研究了露天矿开采深度对边坡稳定性的影响。T. C. John等^[35]采用有限元数值方法和极限平衡理论分析了均质和非均质的简单边坡,并且讨论了极限平衡法的精确性问题。复合法不失为一种好的方法,用两种或两种以上方法分析同一问题,可以相互对照,相互验证,但该法增加了工作量。

(4) 随机分析方法的蓬勃发展。随机分析方法不同于以上所述确定性分析方法,它认为影响边坡稳定性的各种因素是随机变量,运用概率论和数理统计知识来研究边坡稳定性。随机分析中常将边坡岩体材料性能,如弹性模量、泊松比(Possion)等,边坡几何尺寸,如内部结构面、边坡边界尺寸,边坡外部荷载,如地震力、重力场、渗流场等视为随机变量。自上世纪80年代初期以来,祝玉学等^[36]开展了岩体边坡随机分析研究,其研究思路基本与工程结构的可靠性分析相吻合。工程结构已经使用了可靠度设计方法,但边坡稳定性的可靠性分析还在研究中,基于岩体介质的复杂性,目前很难进入实用阶段。但有很多研究者在这方面做了大量工作。祝玉学等对边坡随机分析进行了系统研究,为边坡可靠性分析做了大量基础工作。刘沐宇等^[37]考虑岩体性质的空间变异性和随机性,讨论了基于可靠度理论的岩体结构的可靠性设计,为此方法引入到岩体结构设计中作了有益的探索。武清玺等^[38]以随机块体理论为基础,首先确定最大可能失稳岩体,考虑滑动型式、结构面参数及荷载的随机性,分析拱坝坝肩的抗滑稳定可靠度,但该文中没有考虑滑坡边界和结构面产状的随机性。徐建平^[39]将摄动随机有限元法用于分析顺层岩质边坡可靠性分析,克服了模拟有限元法(将蒙特卡罗法与有限元方法相结合)计算量大的不足,但减小了计算精度。岩体力学(强度)参数的可靠性分析是随机分析方法的重要组成部分,黄志全等^[40]、严春风等^[41]对岩体力学参数和强度参数的可靠



性问题进行了研究。从理论上说,随机分析方法是一种很好的方法,因为实际中没有绝对确定性,都具有随机性。但因随机因素太多,难以确定各因素的概率。目前还只能处于理论研究阶段,要想应用到边坡设计中还有很多工作要做。

(5) 模糊分析方法的引入。该方法认为边坡性质及稳定性的界限是不清楚的,具有相当的模糊性,采用模糊理论对边坡稳定性进行研究。模糊理论是应用模糊变换原理和最大隶属度原则,综合考虑被评事物或其属性的相关因素,进而进行等级或级别评价。该方法难点在于相关因素及各因素的边界值的确定。李彰明^[42]应用模糊理论,构造了边坡稳定性分析的模糊综合评价模型及关联因素边界值矩阵,通过对某一大型露天矿边坡工程地质条件调查与物理力学性质测试研究,得到各关联因素的实测值,进而评价了该边坡的稳定性。

(6) 计算机模拟技术在边坡中的应用。在边坡稳定性分析中已开始应用计算机模拟技术,该技术主要用在边坡结构面网络模拟中。袁绍国等^[43]、魏安^[44]、陈乃明等^[45]、汪小刚等^[46]、A. Shapiro 等^[17]、D. Deliot^[48]用计算机模拟了边坡节理网络。陈昌彦等^[49]用各种线性符号及组合概化岩体结构和物性两类信息,建立相应拟合函数,实现了工程地质结构和边坡的三维模拟及再现,并将其应用于三峡船闸边坡工程中。李彰明^[50]开发了露天矿边坡实用的专家系统,用于边坡问题的智能化分析,计算机模拟技术丰富了边坡分析方法。

对于岩质边坡的稳定分析,除了上面所提到的方法外,试验研究也是很重要的途径之一。试验研究对于基本理论和规律的研究、本构关系和数学力学模型的建立、力学参数的选择和确定有着重要的意义。此外,试验研究的成果可以验证数值方法的有效性和合理性。当然,试验研究也有许多不足的地方,如由于岩体的不连续性和非均质性引起的岩石试样明显的“尺寸效应”,从而使得室内试验的参数往往大于真实情况;室内试验模拟岩体结构面以及相似比的统一,困难很大。而且,室内试验的成本、工期以及工况等因素都是必需考虑的问题。但是,对规模巨大、极其重要的工程,进行室内试验是十分有必要的。这样,可以获得结论的定性分析。

1.2.2 岩质边坡的动力稳定性研究

岩质边坡动力稳定问题主要研究内容有:动力如何作用于边坡,即动力的输入;边坡发生失稳的位置,即边坡破坏面的位置及形状;动力作用下边坡是否会失稳,即失稳判据;边坡失稳的结果,即永久变形或永久位移的计算。在这几个问题中,动力荷载的考虑和破坏面的位置和形状确定是研究其他问题的前提,边坡失稳判据和永久位移的计算是重点研究的内容^[51]。因此,在过去的几十年中,国内外研究人员针对动力荷载作用下边坡稳定性计算方法和安全评价进行了大量的研究工作^[52-59]。



1. 边坡动力稳定性计算方法的研究

一般认为,动力荷载对岩质边坡稳定性影响主要是由于动荷载引起的惯性力和因循环退化引起的剪应力降低,导致边坡整体下滑力加大,降低了边坡的安全系数。因此将动荷载下边坡失稳分为惯性失稳(Inertial Instability)和衰减失稳(Weakening Instability)。

目前边坡动力稳定性分析方法主要还是基于极限平衡理论和应力——变形分析。惯性失稳常采用的分析方法有拟静力法(Pseudo Static Analysis)、Newmark 滑块分析法(Newmark Sliding Block Analysis)、Makdisi Seed 法及有限元方法。而衰减失稳常采用流动破坏分析法(Flow Failure Analysis)和变形破坏分析法(Deformation Failure Analysis)^[60]。为了能够较全面而清晰地反映岩质边坡动力稳定性评价方法的研究现状,下面简要论述拟静力法、滑块分析法和数值模拟法的进展情况。

1) 拟静力法

自 Terzaghi 于 1950 年首次将拟静力法应用于边坡地震稳定性分析以来,拟静力法因应用简便而得到大量应用,至今仍备受工程技术人员的青睐。拟静力法实质上是将地震动的作用简化为水平、竖直向的恒定加速度作用,并将其施加在潜在不稳定滑体的重心上,加速度的作用方向取为最不利于边坡稳定的方向,将地震动作用转化为水平和竖直方向的拟静荷载因子,其大小通常用地震系数 k_h 和 k_v 来表示,数值上等于水平或竖直加速度与重力加速度之比。将地震所产生的惯性力作为静力施加在边坡潜在不稳定滑体上,根据极限平衡理论,便可求出边坡的抗震安全系数。这个分析实质上与静力稳定性分析思路完全相同,所采用的方法是由静力稳定分析方法拓展而来的,所需要的信息只是添加了一个反映地震作用的地震系数,因而十分简便。边坡安全系数与边坡抗剪强度指标、不稳定(包含潜在的不稳定)滑体密度、最危险滑动面的形状及位置、地下水位和地震系数等密切相关。在拟静力分析时,边坡抗剪强度指标可通过现场或试验室相应试验^[61]测定,亦可结合试验反算^[62]而定;而破坏面形状和位置首先根据边坡地质条件用经验、工程类比等方法^[63]来确定,若无明确滑动面的,亦可用优化算法^[64]来确定。

工程师在使用拟静力法时,最关心的莫过于地震系数的选取。关于地震系数的选取,研究成果较多。Seed 总结了常用的三种确定地震系数的方法^[65,66]:① 经验值的使用;② 刚体反应分析法;③ 采用黏弹性反应分析法。此外,何蕴龙等^[67]采用有限元动力分析方法研究了岩石边坡地震系数的分布规律和坡高、岩体动弹模、边坡坡度对岩石边坡地震系数的影响规律,提出了一个岩石边坡地震作用近似计算的方法。其中以经验值的使用最为广泛,下面仅对经验值的使用予以简要介绍。

刘立平等^[60]对 Terzaghi、Seed、Marcuso 所给出的经验值进行了总结,张克绪



等^[66]也给出国内外常用的一些经验值。值得指出的是,Seed^[68]认为不断地采用这些经验数值就会造成它是权威设计标准的假象,其实,似乎谁也不知道为什么第一次要选择这样的数值。Seed意在指出这些地震系数的选取缺乏可靠的科学基础。王赞军等^[69]首次采用地震危险性概率分析方法来计算滑坡体未来若干年内可能遭受的不同超越概率水平下的地震动峰值加速度,从而改变了经验性的确定滑坡地震系数的历史。2001年8月1日颁布实施的《中国地震动参数区划图》(GB18306—2001)中的两个图件之一“中国地震动峰值加速度区划图”,同样也采用了地震危险性概率分析方法,给出了50年超越概率为10%的地震动峰值加速度,为我国不同地区滑坡的水平地震系数确定提供了依据。陈蜀俊等^[70]采用此方法对奉节长江大桥北岸边坡进行了地震动作用下的稳定性分析。值得指出的是,工程场地地震安全性评价及区划图所给出的峰值加速度是针对一般水平场地而言的,应用于边坡稳定性计算时尚应结合边坡地形及地质构造进行适当的修正。

目前已给出的地震系数的经验值仍然在实际工程中得到普遍应用,原因在于没有既直接又快速的方法来确定设计地震系数。

拟静力法简单实用,在边坡地震稳定性分析中应用得最为广泛,积累了大量的工程经验,并纳入了有关规范(SL203—97,《核电站抗震设计规范》)。Seed于1966年用力的多边形法计算了各土条滑弧面的静应力,考虑地震惯性力(拟静力法)和动三轴试验得到的总应力动剪切强度用力的多边形法计算了滑弧稳定安全系数。Leshchinsky等^[71]采用拟静力法来评价简单边坡的稳定,用数值方法计算了潜在滑动面上的正应力分布,用此正应力确定了满足所有极限平衡方程的最小安全系数,并提出了简单边坡地震稳定性评估的设计表,此表在非地震条件下与Taylor表相同。Bray等^[72]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了分析,提出了垃圾场地震稳定性评价过程。曾富宝^[73]基于Taylor的摩擦圆法,提出了可以考虑地震动强度。

对土摩擦角影响的土坡稳定性计算方法,给出了与Taylor表相类似的图表。Ling等^[74]将拟静力法应用于沿节理面滑动的岩体边坡地震稳定性分析中,进行了地震稳定分析和永久位移计算。Siyahi等^[75]在正常固结土边坡地震稳定性分析中采用了拟静力法,采用参数分析确定了不同剪切强度的安全系数并考虑了剪切强度降低的影响。Ausilio等^[76]将拟静力法应用于加固边坡的地震稳定性分析中,利用极限理论并考虑了不同的破坏模式,提出了加固力大小计算公式及与地震力相关的屈服强度的表达式。Biondi等^[77]基于拟静力法,研究了震时和震后孔隙水压力对无限长饱和和无黏性土边坡的稳定性影响,并提出了计算公式,给出了详细的计算步骤。Siad^[78]结合极限设计理论的运动学方法和拟静力法,推导了以平移失稳为主的破裂岩体边坡的稳定性上限系数的公式,该公式可以考虑坡角、材料强度和地震系数的影响,并以稳定性系数图表的形式给出了不同破裂面摩擦角的稳定性



系数上限曲线。姚爱军等^[79]采用改进的 Sarma 边坡稳定性分析模型,探讨了复杂岩质边坡地震敏感性的分析方法。该方法不仅考虑了不规则滑面问题、坡面加固力问题,而且考虑了地下水和地震的作用。周圆 π 等^[80]基于遗传算法和拟静力法——简化毕晓普法(Bishop)提出了搜索地震作用下最危险滑动面及相应的最小安全系数的方法,计算了固定一个出逸点的情况下有、无地震作用下的安全系数,并绘制了分布图。结果表明,地震对安全系数分布情况影响很小,但扩大了安全系数低值区。拟静力法尽管应用广泛,也有很多不足之处,如传统拟静力法通常只考虑水平地震动和不管什么样的边坡均采用单一的地震系数等。Ling 等^[81]研究了水平和垂直加速度共同作用下边坡的稳定性和位移,发现若水平加速度很大时垂直加速度对稳定性和位移有重大影响。

已有学者先后对拟静力法的不足之处进行过总结和归纳。例如,Seed 于 1973 年曾经对拟静力法的不足进行过详尽的讨论^[82]。他指出:① 惯性力不是永久不变的,也不是单向的,而是在量级上和方向上有快速的波动;② 即使边坡的稳定性系数暂时小于 1,不一定会导致边坡的整体失稳,只会导致边坡产生一定的永久位移。沈珠江等^[83]指出:拟静力法的缺点是十分明显的,它完全无视地震加速度时空分布的不均匀性,而最主要的是尚没有一个土工建筑物破坏实例证明地震惯性力起了决定性的作用。实践证明,用拟静力法设计往往低估含易液化土坡破坏的可能性,而对无液化可能的边坡,则往往高估其破坏的可能性。

2) 滑块分析法

拟静力法只提供了一个稳定指标(安全系数),但没有与破坏面相关的变形信息。有限滑动位移的思想是 Newmark 于 1965 年在第 5 届 Rankin 讲座上针对坝坡提出的^[84]。他指出堤坝稳定与否取决于地震时引起的变形,并非最小安全系数;地震动为短暂的往返荷载,惯性力只是在很短的时间内产生,即使惯性力可能足够大,而使安全系数在短暂时刻内小于 1,引起坝坡产生永久变形,但当加速度减小甚至反向时,位移又停止了。这样一系列数值大、时间短的惯性力作用会使坝坡产生累积位移。地震运动停止后,如果土的强度没有显著降低,土坡将不会产生进一步的严重位移。有限滑动位移的计算方法是以 Newmark 提出的屈服加速度 a_y 概念为基础的。Newmark 假设土体为刚塑性体,对坝坡的圆弧、平面和块体三种形式进行了分析。将超过滑动体屈服加速度的那部分加速度反应进行两次时间积分即可估算出边坡的有限滑动位移。

自从 Newmark 提出有限滑动位移法以来,该方法得到了国内外学者的高度关注和深入研究,并在工程方面得到了大量应用。Kramer^[85]、刘立平^[60]、Ling^[86]和祁生文^[82]对该方法在国外的发展进行了简要总结。

王思敬^[87]将有限滑动位移法的思路引入到岩体边坡动力稳定性分析中,提出了边坡块体滑动的动力学方法。王思敬等^[88]通过试验,提出运动起始摩擦力和运



动摩擦力的概念,在振动台上测得花岗岩光滑节理面的动摩擦系数和运动速度的关系;在此基础上提出了边坡块体滑动的动力学方程,根据输入时程,可求得各个 Δt 时间间隔上的块体相对基座的加速度、速度和位移。在上述基础上王思敬、薛守义、张菊明又分别推导了楔形体和层状山体的三维动力反应方程式^[89-91]。

值得指出的是,以往的 Newmark 分析均是基于简单边坡滑动模型(如圆弧体等)进行的,在使用的过程中往往忽略了 Newmark 方法的使用前提,即边坡(坝坡)材料在地震时强度不会有明显降低^[92],不区分边坡材料强度特性而随意使用,并且未考虑地震过程中滑面强度(内摩擦角和黏聚力)和孔隙水压的变化,也未讨论地震竖直力的影响。黄建梁等^[93]基于刚体力学原理,以 Sarma 法为基础推导了同时考虑水平和竖直地震加速度的计算公式,采用条块技术针对任意形态的坡体建立了根据水平和竖直加速度时程估计坡体的加速度、速度和位移时程的方法,讨论了地震动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水的动态响应问题等。祁生林等^[94]基于剩余推力法,结合 Newmark 有限滑动位移法,考虑了由于动力作用造成的孔隙水压力变化,对最为常见的边坡灾害“滑坡”提出了两种简便的计算地震动力永久位移的方法。关于孔隙水压的计算尚须深入的研究。

3) 数值模拟法

自 20 世纪 60 年代有限元法用于土坝地震反应分析^[95]以来,特别是 20 世纪 90 年代中后期,伴随着计算机技术和计算力学的高速发展,有限元法及其他数值模拟法在边坡地震稳定性中获得了深入的研究和广泛的应用。目前,对边坡地震稳定性分析常采用的数值方法有有限元法、离散元法和快速拉格朗日元法^[96];对于边坡的稳定性评价所采用的判定指标有安全系数和永久位移两种,从查阅的国内外文献来看,国内以安全系数为主,国外以永久位移为主。下面以边坡地震稳定性评价指标来分别论述。

就安全系数而言,结合极限平衡原理,国内已取得了一些有价值的研究成果。钱胜国等^[97]选择三峡三号船闸作为研究对象,用反应谱法对开挖完工期间尚未浇筑混凝土时的闸首及闸室断面进行了二维有限元动力分析,提出了三号船闸高边坡在三度地震作用下的应力分布、变位、动力放大系数沿高程分布以及局部区域二维动力稳定安全系数。张建海等^[98]提出采用刚体弹簧元计算边坡、坝基、坝肩等结构物在地震动作用下的动力安全系数,该方法给出的安全系数是随地震动作用而发生波动,从而更深刻地反映了动力现象本质,并将该方法应用于工程实际。薄景山等^[99]将土边坡动应力作用下的应力状态概化为自重应力和附加动应力的叠加,采用时域集中质量的显式波动有限元法,结合多次透射公式,来分析地震过程中的动位移场、动应力场及稳定性系数的波动时程。刘汉龙等^[100]考虑到在地震过程中,边坡的稳定安全系数最小值出现在某一瞬间,指出了用这个值评价边坡在地震