



中交科技丛书 · 科研著作

# 强震带边坡

## 位移控制设计与柔性防护技术

# Q

QIANGZHENDAI BIANPO

WEIYI KONGZHI SHEJI YU ROUXING FANGHU JISHU

何思明 赵永国 编著  
王佐 主审



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.



中交科技丛书·科研著作

# 强震带边坡

## 位移控制设计与柔性防护技术



QIANGZHENDAI BIANPO

WEIYI KONGZHI SHEJI YU ROUXING FANGHU JISHU

何思明 赵永国 编著  
王 佐 主审



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书在分析地震边坡破坏模式与震害机理的基础上,结合广义极限分析与广义极限平衡理论,建立了强震荷载下重力式挡墙加固边坡、抗滑桩加固边坡、预应力加固边坡、土钉墙加固边坡、加筋土边坡以及组合结构加固边坡的屈服加速度与永久位移计算模式,揭示了地震加速度时程、边坡几何形态与地质条件、边坡支挡结构类型对屈服加速度与永久位移的定量影响,为强震带边坡位移控制设计理论构建提供了重要理论支撑。本书基于耗能原理,研发了强震带边坡柔性防护新技术,并在此基础之上,系统构建了强震带边坡位移控制设计原理与柔性防护理论技术体系,实现了强震带边坡从安全系数控制设计向位移控制设计转变、从刚性支挡向柔性支护转变,对我国地震带边坡抗震设计水平提升一个全新的阶段具有显著的促进作用。

本书可供地震和边坡防护工程业界广大设计、科研人员以及高校有关专业师生参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

强震带边坡位移控制设计与柔性防护技术 / 何思明, 赵永国编著. —北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.5  
ISBN 978-7-114-12169-2

I. ①强… II. ①何… ②赵… III. ①地震带-边坡-位移-控制-防护 IV. ①P315.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 068911 号

中交科技丛书·科研著作

书 名: 强震带边坡位移控制设计与柔性防护技术

著 者: 何思明 赵永国

责任编辑: 尤 伟

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 720×960 1/16

印 张: 9.75

字 数: 170千

版 次: 2015年6月 第1版

印 次: 2015年6月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12169-2

定 价: 45.00元

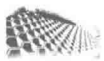
(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 前 言

我国西部山区地质环境脆弱,滑坡、泥石流等地质灾害频发,给人民生命财产和工程安全造成重大威胁。同时,我国又地处世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带之间,受板块间的挤压,地震活动十分频繁,加剧了地质灾害的发生,如2008年汶川特大地震诱发了大量边坡破坏,不仅直接造成重大的人员伤亡和财产损失,而且阻断了通往灾区的交通路线,延缓了救援队伍和工程机械进入灾区,加大了救灾难度。

强震带边坡工程抗震设计通常采用传统的拟静力法,这种设计方法没有考虑边坡工程的地震动响应,忽略了地震加速度时程和边坡破坏模式的影响,与地震作用的真实情况不符。地震荷载是往复荷载,边坡安全系数可能在几个时间段内小于1.0,但并不发生整体的破坏,而是产生部分永久位移。边坡的稳定性取决于地震过程中边坡永久位移的累积,只要边坡累计位移不超过临界值,边坡则不会产生整体垮塌,只会产生部分变形,5·12汶川地震灾区大量加固边坡调查也证明了这一点。永久位移控制设计的理念就是把边坡工程的地震永久位移作为控制设计标准,建立强震带边坡位移控制设计理论与方法。

本书在分析地震边坡破坏模式与震害机理的基础上,结合广义极限分析与广义极限平衡理论,建立了强震荷载下重力式挡墙加固边坡、抗滑桩加固边坡、预应力加固边坡、土钉墙加固边坡、加筋土边坡以及组合结构加固边坡的屈服加速度与永久位移计算模式,揭示了地震加速度时程、边坡几何形态与地质条件、边坡支挡结构类型对屈服加速度与永久位移的定量影响,为强震带边坡位移控制设计理论构建提供了重要理论支撑。基于耗能原理,研发了强震带边坡柔性防护新技术,包括让压预应力锚索结构、耗能垫层刚性支挡增柔技术、耗能锚杆等。在此基础上,系统构建了强震带边坡位移控制设计原理与柔性防护理论技术体系,实现了强震带边坡从安全系数控制设计向位移控制设计转变、从刚性支



挡向柔性支护转变,将我国地震带边坡抗震设计水平提升到一个全新的阶段。

目前,欧美等国家已经将地震带边坡工程永久位移控制与柔性防护技术纳入边坡抗震设计规范。为了便于我国广大工程技术人员和科研工作者更好地理解 and 掌握地震边坡位移控制设计方法和柔性防护技术,更加科学合理地进行强震带边坡抗震设计,特编写本书供专业技术人员、研究人员以及广大研究生参考。

本书共分为 14 章,各章节主要内容如下:

第 1 章:地震荷载下边坡动土压力与边坡永久位移研究现状。

第 2 章:分析了汶川地震灾区典型边坡防治工程(如重力式挡土墙、抗滑桩、预应力锚索等)破坏模式。

第 3、第 4 章:重力式挡墙动土压力计算方法。

第 5~11 章:典型工程加固边坡屈服加速度与永久位移计算方法。

第 12 章:典型支挡结构临界位移控制标准与边坡刚性支挡柔性增韧技术。

第 13 章:新型让压预应力锚索的设计理论。

第 14 章:新型耗能锚杆原理与设计方法。

其中,第 1 章由中科院水利部成都山地灾害与环境研究所何思明编写;第 2 章由中交第一公路勘察设计研究院有限公司赵永国、中科院水利部成都山地灾害与环境研究所罗渝共同编写;第 3、4 章由中交第一公路勘察设计研究院有限公司赵永国和西安中交土木科技有限公司彭泽友、吴清共同编写;第 5~11 章由中科院水利部成都山地灾害与环境研究所何思明、李新坡、罗渝,和中交第一公路勘察设计研究院有限公司赵永国、潘长平、翟敏刚共同编写;第 12 章由中科院水利部成都山地灾害与环境研究所吴永、欧阳朝军和王娟共同编写;第 13、14 章由中交第一公路勘察设计研究院有限公司赵永国和西安中交土木科技有限公司高山、邹顺共同编写。全书由何思明统稿、赵永国校稿,中交第一公路勘察设计研究院有限公司王佐主审。

在本专著编撰过程中开展了大量研究工作,先后得到了中国科学院 STS 项目“川藏铁路山地灾害分布规律、风险分析与防治试验示范”(KFJ-EW-ST-094)、国家十二五科技支撑项目(2011BAK12B03)、国家重点基础研究计划(973)(2013CB733201)、陕西省重点科技创新团队(2013KCT-20)、中国交建重大科技研发项目(2011-ZJKJ-04)等项目的资助,并得到了中交第一公路勘察设计



计研究院有限公司、中科院水利部成都山地灾害与环境研究所、西安中交土木科技有限公司、陕西省公路交通防减灾重点实验室的大力支持和帮助。

此外,本书在编写过程中还得到了国内外许多专家、学者的指导和帮助。人民交通出版社对于本书的出版给予了大力支持,在此一并表示感谢。

由于编著者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请批评指正。来函请寄中交第一公路勘察设计研究院有限公司(陕西省西安市高新区科技二路63号,邮编:710075,联系电话:029-88322888),中科院水利部成都山地灾害与环境研究所(四川省成都市人民南路四段九号,邮编:610041,电话:028-85228816)。

编著者

2015年5月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 加固边坡地震动土压力研究现状	4
1.3 地震荷载下加固边坡永久位移的研究现状	6
第 2 章 地震荷载下边坡支挡结构破坏模式分析	10
2.1 引言	10
2.2 地震作用下挡土墙的破坏模式分析	10
2.3 地震作用下抗滑桩的破坏模式分析	12
2.4 地震作用下的锚索(杆)支护结构破坏模式分析	13
2.5 本章小结	14
第 3 章 基于静力法的地震荷载下挡土墙动土压力计算	16
3.1 土体的应力状态	16
3.2 挡土墙被动土压力计算	18
3.3 算例分析	20
第 4 章 基于拟动力法的地震荷载下重力式挡墙动土压力计算	24
4.1 引言	24
4.2 基于拟动力法的挡土墙地震动土压力理论分析	26
4.3 算例分析	30
4.4 本章小结	38
第 5 章 强震荷载下挡土墙的屈服加速度与永久位移计算	39
5.1 重力式挡墙的屈服加速度与永久位移计算	39



5.2 悬臂式挡墙的屈服加速度与永久位移计算 .....	43
<b>第 6 章 强震荷载下抗滑桩加固边坡屈服加速度与永久位移计算</b> .....	<b>49</b>
6.1 抗滑桩加固体系的动力稳定性分析 .....	49
6.2 地震中抗滑桩的屈服加速度与永久位移计算 .....	51
6.3 算例及讨论 .....	53
<b>第 7 章 地震荷载下预应力锚索加固边坡屈服加速度与永久位移计算</b> .....	<b>54</b>
7.1 Hoek-Brown 准则 .....	54
7.2 预应力锚索高切坡的动力稳定性分析 .....	55
7.3 地震荷载下预应力锚索加固高切坡的屈服加速度与永久位移预测 .....	58
7.4 算例及讨论 .....	60
<b>第 8 章 地震荷载下土钉加固边坡屈服加速度与永久位移计算</b> .....	<b>64</b>
8.1 土钉加固边坡的动力稳定性分析 .....	64
8.2 土钉加固边坡的屈服加速度与永久位移计算 .....	67
8.3 算例分析 .....	68
8.4 本章小结 .....	73
<b>第 9 章 基于拟静力法的加筋土边坡屈服加速度与永久位移计算</b> .....	<b>74</b>
9.1 引言 .....	74
9.2 加筋土边坡地震稳定性计算 .....	75
9.3 算例分析 .....	78
<b>第 10 章 基于拟动力法的加筋土挡墙的永久位移计算</b> .....	<b>84</b>
10.1 引言 .....	84
10.2 基本假设 .....	85
10.3 理论分析 .....	85
10.4 工程算例分析 .....	90
10.5 本章小结 .....	95
<b>第 11 章 地震荷载下组合结构加固边坡屈服加速度与永久位移计算</b> .....	<b>97</b>
11.1 基于极限分析原理的桩锚组合抗滑结构动力稳定性分析 .....	97
11.2 地震荷载作用下组合抗滑结构的屈服地震加速度与永久位移计算 .....	102





11.3 算例与分析 .....	103
<b>第 12 章 强震带边坡刚性支挡与柔性增韧技术 .....</b>	<b>107</b>
12.1 强震带刚性支挡结构抗震设计位移控制标准 .....	107
12.2 强震带刚性支挡结构的柔性增韧技术概况 .....	109
12.3 EPS 材料的力学特性 .....	109
12.4 EPS 挡土墙的柔性增韧抗震机理与设计 .....	111
12.5 EPS 超前支护抗滑桩柔性增韧机理 .....	114
12.6 本章小结 .....	120
<b>第 13 章 让压预应力锚固技术 .....</b>	<b>121</b>
13.1 新型让压锚索耗能器的工作原理 .....	121
13.2 新型让压锚索设计理论 .....	127
13.3 新型让压锚索的应用 .....	131
13.4 算例及讨论 .....	132
<b>第 14 章 新型耗能锚杆技术 .....</b>	<b>136</b>
14.1 新型耗能锚杆概况 .....	136
14.2 新型耗能锚杆基本原理 .....	138
14.3 新型耗能锚杆静力抗拔试验 .....	139
14.4 新型耗动力跌落试验 .....	140
<b>参考文献 .....</b>	<b>142</b>

# 第1章 绪 论

## 1.1 概 述

我国西部地区地形复杂多变,地质环境十分脆弱,新构造运动相对活跃。西部地区特殊的地形、地质地貌及气候条件,使得该地区时常发生滑坡、崩塌、泥石流等自然灾害,给人民的生命和财产安全构成了严重的威胁。根据国土资源部的相关地质灾害数据统计,目前发生的地质灾害中滑坡占总数的51%,崩塌所占比例为17%,泥石流占8%,地面塌陷约占5%,地裂缝占3%,不稳定斜坡占16%。因此如何有效合理地预防和治理地质灾害是目前以及将来很长一段时间内必须坚持解决和完善的问题。本书在此背景之上,主要针对与滑坡灾害相关的问题展开研究。

滑坡是岩土体在重力作用下,沿一定的软弱面整体或局部向下滑动的现象。发生破坏的岩土体以水平位移为主,除滑动体边缘存在为数极小的崩离碎块和翻转现象之外,其他部位相对位置变化不大。滑坡对国家基础设施建设以及人民的生命财产安全等造成了重大破坏,它的发生受自然地质运动和人类活动的双重影响。引起滑坡灾害的因素主要分为两大类:第一是内部因素,如岩土体的类型、结构、软弱夹层、地下水等;另一方面是外部因素,包括地震、降雨、河流冲刷及人工开挖坡脚等。其中,地震诱发的滑坡时间短,破坏性强,并且伴随有余震的作用,使得后果更加严重。2008年5月12日,四川汶川发生里氏8.0级强震,地震诱发大规模山体滑坡,导致8万人遇难,直接经济损失达8451亿元。强震导致大量的边坡支护结构发生变形破坏(图1-1、图1-2)。

我国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带之间,受板块间的挤压,地震活动十分频繁。根据相关调查研究,我国分布有大大小小23条地震带,因此在强震带地区的边坡支护结构设计中应该考虑地震荷载的作用,而挡墙结构因其结构简单、经济合理被大量运用于基础设施建设中。基于此,本书系统地研究了地震作用下边坡支护结构的永久位移和土压力的具体分布情况。



a)



b)

图 1-1 汶川地震灾害引发的边坡结构的破坏

a) 5·12 汶川地震诱发了大规模的山体破坏; b) 强烈地震导致已建边坡防护工程变形破坏



a)

b)



c)

d)

图 1-2 强震导致防护工程变形破坏



对于解决地震相关的边坡稳定计算方法,大多数采用拟静力法。传统的拟静力法是一种用静力学方法近似解决动力学问题的简易方法,它发展较早,迄今仍然被广泛使用。其基本思想是在静力计算的基础上,将地震作用简化为一个惯性力系附加在研究对象上,其核心是选择相对准确的地震加速度,通过边坡稳定性分析得到边坡的抗震安全系数。这种设计方法虽然简单,但没有考虑结构的地震响应,没有包含边坡和结构的永久位移信息,与地震作用的真实情况不符。工程实践表明,单纯的拟静力法不能满足边坡工程结构抗震设计的需要,基于此,本书在国内外关于地震边坡研究的基础之上,把地震荷载看作是空间与时间的函数,进一步研究加固结构的永久位移与动土压力。

对于永久位移的分析,最早的是1965年的Newmark理论,该理论中地震加速度时程曲线,如图1-3所示。该理论认为在地震作用的过程中,仅有几个时间段地震加速度超过了临界地震加速度(使边坡达到初始破坏的地震加速度)。因此,在地震过程中,安全系数可能在几个时间段内低于1.0,在安全系数小于1.0的时段,地震使得边坡产生一定量的永久位移,当地震加速度小于屈服加速度的时候,边坡再次处于平衡而停止产生永久位移,如果结构整体强度没有发生较大的变化,则认为加固边坡处于安全状态。加固边坡在地震过程中的稳定性取决于边坡永久位移的累积量。位移控制设计的理念就是把加固边坡的结构的永久位移作为控制设计的标准,允许边坡工程结构在短时间内安全系数低于1.0,产生一定的变形和位移,只要最终的位移量低于位移临界值,边坡就不会发生破坏。显然,相对于拟静力法中把地震峰值加速度作用下的惯性力视为永久荷载进行边坡设计,位移控制设计方法在经济上更加合理,不失为边坡工程抗震设计的合理途径。

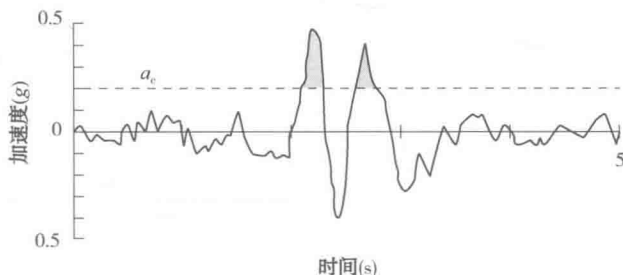


图1-3 地震加速度时程曲线(临界地震加速度为 $a_c$ )

综上所述,开展地震引起的加固结构永久位移的研究,将为建立更加科学的地震边坡设计理论体系及评价方法体系提供依据,是一项具有重要理论意义和工程实际价值的研究项目。



## 1.2 加固边坡地震动土压力研究现状

支护结构在地震作用下主要有以下 3 种破坏形式:①地震作用使得地基松散,导致地基承载力下降,一旦承载力不足以支撑整个系统,则结构就会产生沉降变形;②地震荷载随时间和空间不断发生变化,当地震加速度的方向背离土体时,作用在支挡结构的土压力会随之增加,当结构所受的水平合力超过了地基的抗滑力,系统就可能出现平移变形破坏;③地震荷载作用导致结构绕旋转中心产生旋转移移,当旋转移移超过某个值的时候,结构就会产生旋转破坏,从而导致机构失效。

1923 年日本关东大地震以后,物部(Mononobe)和冈部(Okabe)基于库仑土压力理论及拟静力学法,研究得到了挡土墙的地震动土压力的表达式,后来被称为物部—冈部公式,也就是最有名的 Mononobe-Okabe 公式。其基本假定为:

- (1) 假设地震作用下滑体滑动面是平面,并且通过挡土墙的墙踵;
- (2) 滑动面上土的应力满足 Mohr-Coulomb 屈服准则;
- (3) 变形超过主动状态以后,不考虑滑动面的应力变化;
- (4) 墙背和填土接触面达到极限强度;
- (5) 土楔体中各点加速度值相同;
- (6) 挡土墙是足够长的,两端的影响可忽略不计;
- (7) 填土是均匀、各向同性的材料。

目前,Mononobe-Okabe 公式成为挡土墙结构抗震设计中最常用的方法,但是该方法存在两个明显的缺陷:

(1) 把地震作用看作一个简单的静力作用,没有考虑地震作用的时程性。

(2) 大量现场调查以及室内试验研究表明,合力作用点位置并非在  $H/3$  ( $H$  为墙高)处。

2000 年,Soubra 采用拟静力法以及极限分析理论的运动学方法,结合条分法的思想,将滑体分成  $n$  个三角形块体,运用优化的方法分别得到了边坡加固结构在静力条件下和地震作用下的被动土压力系数。

Kumar 运用拟静力法,将地震荷载作用看作一个水平惯性力,忽略竖向地震荷载作用,利用极限平衡法,得到了倾斜挡土墙墙后土体破裂面为复合破坏面(直线破裂面和对数螺旋线破裂面)情况下的被动土压力系数。Lancelotta 利用极限分析的下限分析法,通过理论分析,得到了地震被动土压力系数的计算表达式。



杨小礼根据 H-B 非线性破坏准则,通过切线法原理引进中间变量,利用极限分析上限定理求得主动土压力合力的上限解,通过序列二次规划算法对该问题进行优化计算,从而得出最大的主动土压力合力值。

以上研究的主要内容都是围绕挡土墙的地震土压力合力展开,并未对地震土压力的具体分布做深入研究。基于此,卡岗首先采用水平层分析法,得出了土压力沿墙高的非线性分布解。

刘忠玉、杨会朋等基于 Mononobe-Okabe 理论,结合水平层分析法,求得了刚性挡土墙在地震荷载作用下的主动土压力的具体非线性分布解的表达式。王丽艳等基于 Mononobe-Okabe 准则,得到了地下水在地震中产生的超静水压力对挡墙的影响,并且得出墙体的残余角随着液化度的升高而增大的结论。

随后,更多的学者研究了不同破裂面形状的情况下,支护结构土压力的具体非线性分布解。范保华假定破裂面为摆线弧,针对土压力在静力条件下的非线性分布解作了深入的研究。张丽娟和米海珍假定破裂面为通过墙趾的旋轮线组成的曲面,将地震荷载看作一个静力作用,取水平微元进行极限平衡分析,得到了地震主动土压力非线性分布。计算结果能与试验结果较好地吻合。

以上对于地震土压力的计算都是将地震作用看作是一个加速度大小、方向都不变的惯性力作用。由于该方法概念简单、计算工作量小,拟静力学方法广泛应用于实际工程中。但是该方法与地震的实际作用存在较大差异,基于此,越来越多的学者提出运用动力学来求解边坡的相关问题。动力学虽然更加符合实际情况,但是地震动力作用过程较复杂,使得计算结果难以实现。针对两者的不足,Steedman 等提出拟动力学的方法,假定地震加速度随着深度和时间呈正弦变化,考虑周期和相差,从而计算出挡土墙地震荷载作用下的主动土压力。

Zeng 等针对加筋的岸壁,提出由于地震共振作用,导致回填土刚度的恶化,并提出了新的设计原则,利用离心模型试验进一步证明了该理论是合理有效的。Nimbalkar S 和 Choudhury D 采用拟动力学的方法研究了加筋土挡墙破裂面为曲线破裂面情况下边坡的稳定性。Ghosh 采用拟动力学的方法研究了倾斜挡土墙的土压力分布。夏唐代运用拟动力学的分析方法,以重力式挡墙为研究对象,得到了考虑时间、相位以及地震加速度的放大效应条件下,黏性土的地震主动土压力系数和主动土压力分布强度的计算公式。王奎华等提出采用拟动力学,对填土表面有均布荷载作用的挡土墙地震被动土压力展开了深入研究,并且得到被动土压力沿墙高的分布曲线。王志凯等研究出水平地震加速度系数及加速度放大系数均对土压力分布有很大影响,不考虑加速度的放大效应是偏于危险的。



以上关于挡土墙地震土压力具体分布的研究,都是将计算得到的主动土压力合力表达式进行高度的微分,这样得到的具体高度分布解并不能很好地说明问题,因此本书采用水平微元分析法,对土压力的具体分布解做了更加深入的分析。此外,大型模型振动台试验研究也是越来越多学者研究的焦点,它可以弥补实地观测场地附近不发生地震带来的困难,并能很好地模拟挡土墙的地震反应,为理论研究提供数据,并验证理论公式。

由于合力作用点处结构破坏较为严重,因此为了使得结构更加安全合理,有必要对合力作用点高度进行研究。现场调查以及室内试验表明,合力作用点高度大于  $H/3$ 。为了较为准确地计算挡土墙的合力作用点高度,国内外学者做了大量相关方面的室内试验以及理论分析。

Wood 经过研究发现,挡土墙在地震荷载作用下,墙体受到的主动土压力合力作用点近似在墙的中部地区, Parkash 经过理论计算,得出刚性挡土墙在地震荷载作用下合力作用点位置大约在  $0.45H$  处,而对于柔性挡土墙,认为合力作用点约在  $0.55H$  处。

综上对国内外研究现状的分析发现,对于挡土墙土压力的研究主要是对土压力系数的研究,运用拟动力法得到挡土墙合力的表达式,将表达式对高度进行求导得出土压力的具体分布。在此基础之上,本书运用改进后的方法,对滑体进行水平微元的力矩分析,得到了极限平衡状态下土压力沿挡土墙高度的具体分布形态。

### 1.3 地震荷载下加固边坡永久位移的研究现状

挡土墙结构因其构造简单、经济合理,成为目前最常用的边坡支护结构。边坡支护结构的抗震设计主要有两种理念,受力控制设计和位移控制设计。对于受力控制的支挡结构,设计理念是根据地震作用力与支护结构作用力下边坡的安全系数进行结构设计的,但是地震作用是短暂性的,这样就说明结构只在某几个时刻处于危险状态。在这种条件下设计的边坡会大大增加成本,经济上不合理;而后者从位移方面着手进行设计,则只要最终位移在允许的临界位移范围内,就说明这种支护结构是安全有效的。后一种设计方法不仅保证了结构的稳定性,而且节约了成本,所以位移控制方法正受到越来越多地关注。

地震引起的结构产生的不能恢复的变形称为地震永久变形。变形的类型可分为裂缝、倾斜、沉降等。针对地震作用产生的永久变形,本书研究的主要方向是水平方向的永久位移以及绕旋转中心旋转产生的角度变形。



1965年,美国学者 Newmark 在第五届郎肯讲座上提出了著名的 Newmark 理论。该理论认为在强震荷载作用下,支护结构在短时间内安全系数小于 1.0,此时边坡会产生位移变形,当地震作用减小甚至反向时,滑体停止滑动。地震结束以后,当地震产生的累积永久位移值在一定范围内(国外研究文献中,对于脆性介质滑坡假定临界位移为 5cm,而对于韧性介质滑坡,假定临界位移为 10cm),并且加固结构完整,土体强度没有明显下降,则认为加固边坡是安全稳定的。Newmark 认为反向的加速度可以忽略不计,因为反向的屈服加速度通常非常大,超过临界值的可能性非常小。Newmark 理论的基本思想表明,在地震荷载作用下,边坡稳定性分析不以边坡的最小稳定性安全系数为主,而是以地震产生的永久位移为主要控制因素。

Newmark 模型提出以后,很多学者也在此基础之上,相继提出了各种边坡支护结构的永久位移计算方法。主要有拟静力法、拟动力法、数值分析法以及试验方法等。

Kramer S 和 Smith M 在 Newmark 理论上,对理论进行了优化,并且考虑了滑面以上土体性能的影响,从而对永久位移进行了深入研究。Zeng 和 Steedman 提出了一种重力式挡墙的旋转位移的计算方法,考虑了地面运动对于旋转位移的影响,并且得到了离心机试验数据的验证。Michalowski 和 You 提出了一种基于拟静力法、广义极限平衡法以及滑块理论的加筋边坡地震位移计算方法。研究表明,当地震加速度值较大时,为了确保结构的稳定性,需要将加筋的设计长度和强度大幅度地提高。如果允许加固结构在地震荷载作用下可以发生较小位移,并且加固结构整体强度没有明显降低,则加筋材料的强度和长度就能够得到可观地减小,在经济上更加合理。同时给出了旋转和平移两种破坏机制的屈服加速度和位移的计算公式。

Radoslaw 采用运动极限分析定理,研究了不同加筋模型下地震边坡的稳定性。并且计算得出最合理的加筋长度。Ausilio 等采用拟静力法和运动极限分析定理,分别针对加筋土边坡破裂面为对数螺旋线形破裂面和直线形破裂面两种情况进行研究,分析了两种情况下加筋土边坡的稳定性,并且得到了地震屈服加速度的表达式,通过滑块模型理论得出了水平向永久位移和旋转位移的表达式。Trandafir 等运用滑块模型,分别对重力式挡墙加固边坡和锚索加固边坡两种方式进行了地震永久位移的计算。结果表明,在相同条件下,重力式挡墙加固边坡在地震荷载作用下产生的永久位移值大于锚索结构加固边坡的永久位移值。Mojallal 和 Mohammad 运用极限分析法上限定理计算挡土墙的地震位移,用





于计算在地震条件下的挡土墙屈服加速度,并且得到滑动和旋转模式下结构的永久位移。徐光兴、姚令侃等基于塑性极限方面的上限定理,推导了潜在滑坡体的正反向地震屈服加速度值,研究了竖向地震加速度对滑坡体临界加速度的影响;建立了滑坡体系在地震荷载作用下的能量守恒方程,并且利用汶川地震中记录的强震动,建立了基于 Arias 强度的位移模型,分别对不同参数组合下地震永久位移方程式进行了回归拟合。

王思敬等通过试验研究了岩质边坡中楔形块的动力问题,给出了动力平衡表达式,并且得出了楔形块的地震永久位移的计算方法。祁生林、祁生文等将 Newmark 有限滑动位移法和剩余推力法思想相结合,研究了动力作用造成的孔隙水压力变化,以此提出一种计算永久位移的新方法,将计算结果与 FLAC3D 进行对比,结果表明两种方法的结果相近,证明了剩余推力法在分析地震动力时程方面的可行性。祁生文针对岩质边坡结构面退化情况,提出了一种岩质边坡的地震永久位移算法(平面滑动和楔形体滑动),将计算结果与传统 Newmark 法结果进行对比,由于后者不考虑结构面退化,计算的永久位移值偏小,所以 Newmark 法更适合地震强度不高,边坡比较稳定的地区。

Yang 基于非线性 Hoek-Brown 破坏准则,结合极限分析理论和滑块模型来解决岩质边坡地震位移问题。王福彤等基于 Raffnsson(1991)、Wu 和 Prakash(2000)研究方法的基本思路,考虑填土黏聚力的地震永久位移解析解,计算结果与离心机试验结果比较接近,证明该方法的可行性。

年延凯等运用拟静力法,结合塑性极限分析定理与抗剪强度折减技术,得出了地震作用下土坡的屈服加速度系数与潜在破裂面的形状。董建华、朱彦鹏基于拟静力法,采用功能原理和遗传法建立了地震作用下土钉支护边坡永久位移计算方法,并通过数值分析与算例比较,得出震后位移量也是边坡永久位移的组成部分,且不能忽略的结论。肖世国等基于拟静力法研究了地震荷载作用下悬臂式抗滑桩圆弧破裂面下,地震永久位移的计算方法,并且与其他多元回归方程进行结果对比。

卢坤林等采用数值方法和 Newmark 理论,研究了三维边坡的地震永久位移。结果表明二维方法比三维方法计算得出的永久位移值偏大。

Choudhury 和 Nimbalkar 采用拟动力学的方法,研究了墙后填土无超载情况下重力式挡墙的旋转位移。

邓雪晶等针对经典 Newmark 双滑块系统进行了深入分析,并且考虑了摩擦型接触面的作用,建立了单周期简谐振动下结构的相对滑移量的最大值的近似