

本书依托浙江省交通运输厅科研项目

《山区公路高挡墙稳定性评价与养护加固对策研究》(2003H14)

公路挡土墙病害形成 机理分析及防治

Theory Analysis & Dealing
for Highway Earth
Retaining Disease

王建林 著



人民交通出版社
China Communications Press

公路挡土墙病害形成 机理分析及防治

王建林 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以浙江省山区公路挡土墙为对象,通过典型案例,分析山岭地区公路挡土墙病害产生的原因和机理;在此基础上,进一步分析其合理的加固方法,以及山岭地区公路挡土墙在设计、施工及养护中所采取的技术措施。

本书以浙江省交通运输厅科研项目《山区公路高挡墙稳定性评价与养护加固对策研究》(2003H14)的研究成果为基础,通过近年来的技术应用与实践总结撰写成书。

本书可供公路工程施工及养护管理人员就山区公路挡墙设计、施工及病害治理提供参考,也可高职院校师生的教学与研究提供借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

公路挡土墙病害形成机理分析及防治 / 王建林著.

—北京:人民交通出版社,2013.6

ISBN 978-7-114-10710-8

I. ①公… II. ①王… III. ①公路—挡土墙—病害—防治 IV. ①U417.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 121427 号

书 名:公路挡土墙病害形成机理分析及防治

著 作 者:王建林

责任编辑:任雪莲 张一梅

出版发行:人民交通出版社

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:8

字 数:144 千

版 次:2013 年 6 月 第 1 版

印 次:2013 年 6 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-10710-8

定 价:25.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



前 言

山岭地区山峦重叠,山高坡陡,地形曲折复杂,作为山岭地区公路的主要支挡工程——挡土墙,在稳定路堤和路堑边坡,减少路基土石方量和占地面积,防止水流冲刷等方面起着重要的作用;同时,挡土墙也是整治路基塌方和治理山体滑坡的一个重要手段,它在公路工程建设中应用非常广泛。事实上,挡土墙工程的安全与否,将直接关系到整条道路的通畅与行车安全,一旦挡土墙出现失稳破坏,就会诱发路基滑塌,造成严重的交通阻塞和重大经济损失,甚至危及人们的生命财产安全。如宁波四明公路,经过多年自然环境侵蚀和各种因素影响,部分路段的挡土墙已出现了严重错台、鼓出、断裂、内部掏空以及基础滑移等病害,部分路段在雨天时出现严重塌方等事故;又如仙居、丽水等地的山岭地区公路挡土墙,也有相同的病害产生。针对山岭地区公路挡土墙目前出现的病害,如果继续使用而不采取措施,将进一步对公路行车造成威胁;如果进行拆除重建,不但需要大量的建设经费,而且对道路通行必将造成较大的影响。最经济的解决办法就是通过对现有公路挡土墙的病害形成机理进行全面、系统的分析,通过评价与预防,最终找出合理的养护加固措施,做到既经济又不影响交通。

长期以来,挡土墙在设计、施工或养护过程中,往往以经典理论为依据,通过各种方法进行计算和分析来评价挡土墙的稳定性的,以此判断挡土墙本身的结构安全与否。挡土墙的失稳破坏与各种外界条件的变化关系密切,而挡土墙的病害形成机理错综复杂。鉴于挡土墙工程在山岭地区公路的重要地位和结构的特殊性,针对目前挡土墙的设计、施工与养护现状,分析病害产生原因,探究病害产生机理,进一步完善优化现有的设计计算理论,找到符合当今公路挡土墙的合理的加固方案,避免和阻止挡土墙病害进一步发生和发展,是作者撰写本书的初衷。

本书以浙江省山岭地区公路挡土墙为对象,通过典型案例,分析其

病害产生的原因和机理;在此基础上,进一步分析其合理的加固方法,以及山岭地区公路挡土墙在设计、施工及养护中所采取的技术措施。

本书以浙江省交通运输厅科研项目《山区公路高挡墙稳定性评价与养护加固对策研究》(2003H14)的研究成果为基础,通过近年来的技术应用与实践总结撰写成书。在此过程中,浙江交通职业技术学院陈凯副教授参与了本书相关内容的撰写工作。

本书在撰写过程中参考了大量文献或论著,在此谨向有关作者表示衷心的感谢。

因作者水平有限,错误或不当之处在所难免,敬请读者指正。

作 者

2013 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 挡土墙的发展概况	2
1.2 公路挡土墙稳定性评价与养护加固策略的相关研究	5
1.3 山岭地区公路挡土墙稳定性评价与加固策略的目标	14
1.4 山岭地区公路挡土墙稳定性评价与加固的主要内容	15
第 2 章 浙江省山岭地区公路挡土墙主要类型及病害发育规律	16
2.1 上三高速公路典型挡土墙主要类型及病害发育规律	16
2.2 泰顺县公路典型挡土墙主要类型及水毁	28
2.3 杭昱高速公路 K34 + 480 ~ K34 + 530 典型挡土墙	32
2.4 丽水地区部分山岭公路典型挡土墙	32
2.5 莫干山一般公路典型挡土墙	33
2.6 四明山公路典型挡土墙	33
2.7 建德市山岭公路典型挡土墙	35
2.8 52 省道 K25 + 750 干砌片石挡土墙水毁	36
2.9 58 省道 K16 + 200 干砌片石挡土墙水毁	36
2.10 杭州地区 104 国道某处桥头引道两侧挡土墙病害	37
2.11 山岭地区公路挡土墙的主要类型及病害的发育规律	38
第 3 章 山岭地区公路挡土墙稳定性分析	41
3.1 挡土墙稳定性分析方法	41
3.2 重力式挡土墙稳定性分析	46
3.3 衡重式挡土墙稳定性分析	56
本章小结	59
第 4 章 山岭地区公路挡土墙坍塌破坏及病害形成机理	61
4.1 碎石土的物理力学特性和渗透特性	62
4.2 重力式砌石挡土墙失稳坍塌破坏的形成机理	67
4.3 衡重式砌石挡土墙失稳坍塌破坏的形成机理	82
本章小结	90

第 5 章 砌石挡土墙的因素敏感性计算分析	92
5.1 浆砌石重力式挡土墙墙高的敏感性分析	93
5.2 浆砌石重力式挡土墙墙后填土重度的敏感性分析	93
5.3 浆砌石重力式挡土墙墙面坡度的敏感性分析	94
5.4 浆砌石重力式挡土墙墙背坡度的敏感性分析	94
5.5 浆砌石重力式挡土墙潜在滑动面岩土体黏聚力的敏感性分析	94
5.6 浆砌石重力式挡土墙潜在滑动面岩土体内摩擦角的敏感性分析	94
5.7 浆砌石重力式挡土墙潜在滑动体饱水面积比敏感性分析	95
5.8 浆砌石重力式挡土墙路面荷载的敏感性分析	95
本章小结	95
第 6 章 山岭地区公路挡土墙的养护与加固策略	97
6.1 山岭地区公路挡土墙的养护技术	97
6.2 山岭地区公路挡土墙的加固策略	98
6.3 山岭地区典型公路挡土墙的加固策略工程实例分析	100
第 7 章 山岭地区挡土墙的稳定性评价与养护加固策略的几点思考	106
参考文献	108

第1章 绪 论

山岭地区的公路路线走向不是顺山沿水,就是横越山岭。随着我国国民经济的发展,近几年来公路交通建设飞速发展,特别是浙江省交通路网急速扩张,公路建设的地形、地质、气候和水文等自然环境日趋复杂,山岭地区的公路工程建设和运营中所遇到的挡土墙问题越来越多,这些挡土墙工程的稳定性、安全性及其对周边环境的影响已引起了人们的极大关注。

作为山岭地区公路的主要支挡工程——挡土墙工程,在稳定路堤和路堑边坡,防止水流冲刷路基,以及整治塌方、滑坡等路基病害方面,起着举足轻重的作用。长期以来,挡土墙作为边坡防护加固的重要构筑物,往往未能引起人们的重视。实际上,对于山岭地区公路而言,挡土墙工程的安全与否,将直接关系到整条道路的通畅与行车安全。一旦挡土墙出现破坏,则会引发路基塌方,造成严重的交通阻塞和重大经济损失,甚至威胁人们的生命。如宁波的四明山岭地区公路,其挡土墙高度一般在5~20m,经过多年自然环境侵蚀和多种因素影响,该地区的挡土墙在部分地段已出现严重错台、鼓出、断裂、内部掏空以及基础滑移等病害,部分路段在雨天可能出现严重塌方等事故。针对山岭地区公路挡土墙出现的病害,如果不采取措施进行加固处理而继续使用,将进一步对公路行车造成威胁;如果进行拆除重建,不但需要大量的建设经费,而且对道路通行也有一定的影响。因此,最经济的解决办法就是找到合理的加固措施,这样既经济又不影响交通。近年来,交通运输的快速发展带来了公路基本建设与养护的新浪潮。据统计,到2012年年底,我国公路通车总里程已突破410万公里,并且,我国公路建设的发展水平在较长时间内还将不断提高。在国家规划重点建设的公路骨干网和各地政府支持建设的公路中,许多公路建设穿过山区和丘陵地带,而这些地带众多的地质问题将给公路建设带来很大的困难,其中挡土墙工程的稳定问题就是一个很显著的方面,特别是山岭地区公路挡土墙问题。

浙江省地处我国东南沿海,每年夏秋两季,经常遭受强台风和暴雨袭击,造成山区县市公路水毁非常严重,经济损失十分惨重。2005年9月1日,第13号台风“泰利”来袭,温州市泰顺县遭遇了百年不遇的特大暴雨,全县平均降雨量达

337.6mm,其中降雨量最多的翁山乡外洋村达532.7mm,全县直接经济损失达11.23亿元。泰顺县大部分县乡道路和乡村“康庄工程”公路被毁,交通中断。其中,公路挡土墙毁坏数占总水毁数的15%以上。

1.1 挡土墙的发展概况

重力式挡土墙是最古老的挡土墙结构形式,因其料源丰富、取材方便、形式简单、施工简便,所以仍然是目前应用最广泛的结构形式。为了适应地基承载力的要求和地形条件,在重力式挡土墙的基础上,发展形成了半重力式和衡重式挡土墙。半重力式挡土墙可利用展宽墙趾和墙踵来减小基底应力,降低地基承载力的要求;衡重式挡土墙可利用衡重台以上的填土重力,节省部分墙身圬工,而且墙身建筑高度大,适用于地面横坡较大地段。实际上,半重力式和衡重式均属于重力式的范畴。

为了适应不同的使用要求(如建筑高度、稳定性等)和不同地区的建筑条件(如地基、料源和地形等),设计人员研究开发了各种形式的挡土墙,如悬臂式、扶壁式、加筋土式、锚杆式和锚定板式等,这些形式都是钢筋混凝土结构。

悬臂式和扶壁式挡土墙在国外应用十分广泛,但在我国应用尚未普及,不过随着高等级公路向中西部地区推进,其应用会越来越多。悬臂式和扶壁式挡土墙适用于缺乏石料的地区。它通过墙趾板和墙踵板宽度来调节、控制基底应力。墙高5m以内时,多采用悬臂式挡土墙;当墙高大于6m时,需在立壁(墙面板)与墙踵板之间增设扶肋,形成扶壁式挡土墙。

加筋土式挡土墙利用的是加筋土技术,加筋土是20世纪60年代由法国工程师亨利·维达尔(Henri Vidal)首先提出的一项土体加固新技术。1965年,法国在比利牛斯山的普拉聂尔斯修建了世界上第一座加筋土挡土墙,获得成功后,很快在欧洲范围内得到了普及,随后,加拿大、日本、美国等相继应用。我国对加筋土技术的研究和应用始于20世纪70年代中期,1978年在云南田坝储煤场修建了我国第一座试验性加筋土挡土墙,1980年在山西晋城—陵川公路上修建了第一座公路加筋土挡土墙。目前,加筋土挡土墙已在公路、铁路、建筑、水利和煤矿等工程项目上得到应用,尤其是在公路工程中应用最为广泛。

在20世纪50年代之前,锚杆技术只是作为施工过程的一种临时措施;20世纪50年代中期以后,西方国家在隧道工程中开始采用小型永久性的灌浆锚杆和喷射混凝土代替衬砌结构;20世纪60年代以后,锚杆技术迅速发展并广泛应用于土木工程的许多领域。作为轻型的支挡结构,锚杆挡土墙现已取代笨重的重力式圬工

挡土墙,并广泛应用于公路、铁路、煤矿和水利等支挡工程中。

锚杆挡土墙适用于路堑地段或者地面横坡较陡的路堤,而锚定板挡土墙适用于填方路段,因而锚杆式和锚定板式是两种互补的挡土墙结构形式。

锚定板挡土墙是我国铁路部门首创的,它发展于20世纪70年代初期,1974年首次在太(原)焦(作)铁路上使用,目前在铁路部门应用比较广泛。在公路、水利、煤矿等工程项目的立交桥桥台、边坡加固和坡脚防护等多种工程中应用了该种挡土墙。

土钉技术是20世纪70年代出现的。原德意志联邦共和国、法国和美国几乎在同一时期各自独立地开始了土钉墙的研究和应用。土钉技术在许多方面与隧道新奥法施工类似,可视为新奥法概念的延伸。20世纪60年代初期出现的新奥法,采用喷射混凝土和黏结型锚杆相结合的方法,能迅速控制隧洞变形并使之稳定。特别是20世纪70年代及其稍后的时间内,先后在德国法兰克福及纽伦堡地铁的土体开挖工程中获得成功应用,这对土钉墙技术的出现产生了积极的影响。此外,在20世纪60年代发展起来的加筋土技术对土钉墙技术的萌生也有一定的推动作用。

1972年,法国首先在凡尔赛附近的一处铁路路堑的边坡开挖工程中应用了土钉墙。原德意志联邦共和国于1979年首先在Stuttgart建造了第一个永久性土钉工程(高14m),仅次于法国。原德意志联邦共和国还进行了长达10年的工程观测,获得了许多有价值的数据。至1992年,德国已建成500个土钉墙工程。美国最早应用土钉墙在1974年,其中一项有名的土钉墙工程是匹茨堡PPG工业总部的深基础开挖:由于与其紧邻的是既有建筑物,所以开挖时对土体用了注浆处理,并对土钉区内已有建筑物基础用微型桩作了托换。

法国、德国、美国、英国等国还十分重视土钉墙的工作性能的试验研究,包括分析方法和程序开发、大型足尺土钉墙试验与模型试验、离心机试验、实际工程长时间的土钉内力实测与土钉墙变形实测等,获得了许多宝贵资料,并编制了包括设计和施工监理手册等有关土钉墙的技术文件。

我国应用土钉的首例工程是1980年将土钉用于山西柳湾煤矿的边坡加固处理工程。近年来,一些高等学校、科研院所和设计院等部门在土钉墙的研究开发应用方面也做了不少工作。

随着对新型结构的研究发展,出现了一些复合式挡土墙,如竖向预应力锚杆挡土墙、重力式锚杆挡土墙、悬锚式挡土墙等。

竖向预应力锚杆挡土墙是重力式挡土墙与竖向设置的预应力锚杆组合形成的一种新型支挡构造物,锚杆竖向锚固于地基中,并砌筑于墙身内,最后张拉锚杆,利

用锚杆的弹性回缩对墙身施加预应力来提高挡土墙的稳定性。其适用于岩质地基,多用于滑坡的整治。1975年,我国铁路部门首先将其应用于成昆铁路狮子山滑坡病害的整治工程中,之后在其他滑坡治理工程中也陆续使用。

重力式锚杆挡土墙是在重力式挡土墙的基础上,利用锚杆技术而形成的另一种新型支挡构造物。此种挡土墙的墙身是用混凝土浇筑或浆砌片石砌筑的。利用锚杆一端砌筑于重力式墙身内,另一端锚固于墙后稳定的地层中,靠墙身自重和锚杆的锚固力共同来维持挡土墙的稳定。以锚杆的锚固力代替部分挡土墙圯工重力,同时可降低挡土墙对地基承载力的要求。1997年,洛(阳)三(门峡)高速公路应用了重力式锚杆挡土墙。

近年来,在悬臂式挡土墙的基础上,设计人员利用锚定板技术,研究开发了一种新型的悬锚式挡土墙。它是由钢筋混凝土墙身(即悬臂式挡土墙)、锚定板、拉杆以及填充于墙身与锚定板之间的填料构成的一种复合结构。悬锚式挡土墙充分利用了悬臂式挡土墙对地基承载力要求低、截面形式简单、施工方便的特点,同时引进了锚定板技术,克服了悬臂式挡土墙建筑高度低、悬臂立壁受力条件差的不足,并改善了扶壁式挡土墙墙后回填压实的施工条件,适用于缺乏石料的地区和承载力较低的软弱地基,并可在填方和半填半挖路段作路堤墙和路肩墙使用。

在传统挡土墙结构形式的基础上,设计人员还研究开发了新的结构形式,如U形挡土墙和倒Y形挡土墙。U形挡土墙在结构上类似悬臂式挡土墙,它把侧壁和底板连成整体,构成字母“U”形。在挖方地段需将路面铺筑在地下水位以下时,可以使用U形挡土墙。设计时,与传统挡土墙不同之处是需考虑水压力影响,同时必须进行上浮稳定性分析。在其侧壁顶部设置支撑时,作用于墙上的土压力为静止土压力。U形挡土墙底板比传统挡土墙宽,可看成弹性地基梁。当地下水位较高时,为确保上浮稳定性也可加厚底板或横向悬出。倒Y形挡土墙是日本神户大学田中博士发明的,他首先把混凝土预制成1~4m不同尺寸的砌块,再将预制砌块组合铺筑在碎石基础上,回填碎石构成挡土墙。倒Y形挡土墙在力学上具有抗倾覆、抗滑动性能强的特点,另外,它还具有排水性好,防止地下水侵蚀的优点。

在研究开发新的结构形式的同时,开发应用新材料、新工艺也是挡土墙发展的新趋势。加筋土挡土墙常用的筋材是条带式,而网状加筋和土工合成材料平面加筋可有效提高填土与加筋之间的摩擦作用,从而增强挡土墙的稳定性。此外,由于填土的固结沉降,改变了加筋的受力条件,还使得加筋拉力和墙面板基础压力增大,所以一些国家在墙面板与加筋连接部位安装了可上下滑动的机构来调整墙面板和填土之间的不均匀沉降。

锚杆挡土墙中采用锚索替代传统锚杆,形成锚索挡土墙。目前锚索在防护、加

固工程中的应用已十分普遍。

为了满足上部荷载的支承力,墙后可用轻质填料,因为墙后填料越轻就越能减小墙基支承力和墙背土压力。对软弱地基上的挡土墙,为防止滑移,可利用高炉炉渣等轻质填料,也可采用空心结构物(如箱、管等形式)。

随着聚合物的广泛应用,泡沫聚苯乙烯及泡沫砂浆等轻质填料也已开始应用。由于泡沫砂浆是由水泥砂浆掺入发泡剂而制成,可通过改变发泡率的大小非常灵活地设计成单位体积质量较小的复合材料,而且由于它是无机材料,所以不存在耐久性问题。泡沫聚苯乙烯可直接作为填料,也可以制成块状作为填料,其密度仅为土的百分之几,这对减小构造物的土压力特别有效。挪威于1972年就已开始使用,日本也用它来处治滑坡等工程。

另外,也可通过添加石灰和水泥等稳定剂来改善土的性质,以降低含水率,从而提高填料的强度和稳定性。一般来说,改善后的填料性质普遍得到提高,对减小墙后的土压力十分明显。

近年来,随着社会经济的发展和人民生活水平的提高以及对环境保护的日益重视,工程技术人员开始研究挡土墙与周围景观的协调,研究开发了生态挡土墙。生态挡土墙是在人们环保意识日益加强的环境下应运而生的,它不仅要满足挡土墙的使用功能,而且还要考虑到与周围环境的协调,要在场面景观和绿化砌块上采取措施。发达国家尤为重视这方面的发展和研究工作。近几年,在我国南方和东南沿海的一些地区,也开始兴建这种环保挡土墙。

挡土墙工程应尽可能做到与自然环境相协调,在设计和施工中也应采取各种措施,创造与环境和谐的氛围。例如,应用新式设计手段,丰富墙面的质感、色彩,改变造型单调的墙面构造或类型设计,做到统一中寓有变化,防止产生视觉疲劳;利用泄水管或预制墙体的合理搭配,变墙面的平面构成为立体构成,增强墙体的空间感;利用植物工程使墙体掩映在绿色植被中,融合于自然山林的景观之内等。总而言之,应采取有效的环保措施,提高挡土墙环境质量。

1.2 公路挡土墙稳定性评价与养护加固策略的相关研究

1.2.1 国外对挡土墙稳定性评价的相关研究

世界各国对挡土墙承载能力及失稳的研究已经有很长的历史。在国外,首先是1776年由库伦(C. A. Coulomb)提出的著名的库伦土压力理论。这一理论是从研究挡土墙墙后宏观土体的滑动出发,挡土墙后的破裂棱体出现滑动时,土体处于

一种极限平衡状态,根据破裂棱体的静力平衡条件,求得墙背主动土压力和被动土压力。

后来,朗金(W. J. M. Rankine)提出从研究弹性半无限体的应力出发,建立在土体的极限平衡理论基础上,求得土体压力。

这两种理论是挡土墙理论分析和设计的基础,但是由于其适用条件的限制,如,朗金土压力理论只适用于填土为一平面的垂直墙背和具有均布荷载的情况,填土表面为一倾斜平面的垂直挡土墙;库伦土压力理论只适应于砂性土。因此,后来有许多人根据工程实际情况及试验对上述理论进行了不断完善。

1927年,Fellenius提出了条分法,后经 Morgenstem 和 Price 等许多学者进行了一系列改进。1935年,Ohde提出了对数螺旋线组合面法^[2]。但上述理论都是将挡土墙作为一个平面问题来研究,也就是将挡土墙看作一个无限长的单位长度来考虑,实际上挡土墙的长度是有限的。于是,许多学者从20世纪50年代开始进行挡土墙空间问题的研究。1952年,波布里可夫首次提出了墙面绝对光滑的有限长度挡土墙上无黏性土的土压力计算。1955年,Bishop首次采用滑移弧线的方法对边坡的稳定性进行了分析,而后许多人将这一方法应用到挡土墙的稳定性分析中^[3]。1960年,Karah根据 Terzaghi 发现的土压力非线性性质,发表了《论挡土墙上非线性分布土压力》一文,并提出了水平层分析法。

1965年,由 Newmark 提出了著名的块体滑移理论(Slidig Blok Theory)^[4],并将这一理论成功地应用于动荷载条件下(地震)对桥墩和大坝永久性位移的预测上。而后,Whitman 和 Taylor 也应用了类似的理论解决了大量的实际问题,Rechards 又成功地将这一理论应用到挡土墙的设计及稳定性分析上^[5,6]。Koseki Leshchinsky 和 Ling 等根据地震的震动规律,采用伪静态(Pseudo-static)分析的方法,对地震作用下挡土墙的破坏机理进行了分析^[7,8]。

20世纪70年代,索克洛夫发表了《有限长度挡土墙主动土压力计算》一文,文中提出,在有限长度挡土墙产生微小变形时,墙后填土所形成的滑裂体形状与库伦所假设的三角楔体完全不同,而是一个梯形角锥体,并根据这一发现提出了一种土压力计算方法。1977年,可列恩根据波布里可夫的假设,提出了墙后滑移块体是一个半圆形截面柱体。1978年,卡斯台的(J. Karstedt)根据前人的研究成果,假定滑裂体呈一个抛物线截柱体,并对滑移块体的形状进行了比较系统的研究,获取了许多有益的成果。

进入20世纪80年代,许多学者采取更为有效的研究方法对挡土墙墙后填土的滑裂体形状进行了更进一步的研究。1986年,捷拉茨(J. Gerlach)通过多次试验对墙后填土在不同条件下的滑移体形状以及滑移体不同位置上的形状进行了分

析,通过分析发现,不同尺寸的挡土墙填土的滑移形状也各不相同,并绘制出了各种不同类型的滑移体形状图。与此同时,我国的顾慰慈教授也对这一问题进行了研究,得出了不同墙体时滑移体的形状及其变化规律,从而为空间土压力的计算打下了基础。

20 世纪 90 年代以后,由于计算机技术的迅猛发展,这一领域的研究也异常活跃。1994 年, S. Subhash Babu 等人采用有限元法对承受外部荷载下挡土墙与土体的相互作用问题进行了比较系统的分析,并对挡土墙的变形以及在各个方向上的位移变化进行了预测^[9]。1995 年, P. K. Woodward 根据 Lade-Duncan 破裂准则,利用数值模拟的方法,对两个传统的库伦土压力系数(主动土压力系数和被动土压力系数)进行了研究,并根据荷载条件和土体性质的不同提出了修正的计算方法^[10]。

1997 年, Danuta Lesniewska 等人利用塑性硬化模型,采用离心加速的方法对加筋土挡土墙的承载能力进行了等比试验和数值模拟^[11],从而进一步说明了数值模拟在挡土墙机理分析中的可行性。2000 年, Paolo Carrubba 等人分别采用离散元和有限元法对挡土墙后填土的破裂角以及滑移体的形状进行了分析,同时对加固结构(锚杆)的承载性能进行了评估^[12]。2001 年, Jame G. Collin 根据美国各类挡土墙尤其是加筋土挡土墙失稳的类型,进行了一系列的分析,并进行了大量的数值计算^[13]。2001 年, Sun Hong 和 Zhao Xi-hong 以及 Kwang Wei Lo 提出了等效应力(Equivalent Stress)的概念,他们对平面应变问题极限荷载下的结构损伤情况进行了分析,并对挡土墙后填土的被动土压力和主动土压力进行了研究,最后根据研究结果整理出了被动土压力和主动土压力系数及等效应力的关系式^[14]。

1.2.2 国内对挡土墙稳定性评价的相关研究

我国许多学者在挡土墙承载能力及失稳的研究方面也做了大量的工作^[15-113]。沈珠江、卢肇钧、蒋莼秋、顾慰慈等著名学者都对挡土墙的稳定性分析及失稳机理的研究做出了重要贡献^[15-17]。其中,沈珠江在 20 世纪 60 年代提出的散体极限平衡理论、蒋莼秋提出的挡土墙土压力非线性分布解以及顾慰慈在 20 世纪 80 年代对挡土墙背面填土中滑裂土体形状的研究等,为我国在这一领域的应用研究提供了理论基础。

国内对挡土墙稳定性分析的研究主要集中在以下五个方面:①挡土墙的受力分析^[17-28];②挡土墙稳定性计算分析方法的研究^[29-58];③挡土墙可靠性的分析^[59-63];④地下水渗流对挡土墙稳定性的影响^[64-68];⑤各种挡土墙的适用性及优化设计等^[69-113]。

经过 20 多年的发展,有关挡土墙的基础理论研究已经取得了大量的具有应用

价值的研究成果,理论体系日臻完善。但是,由于其力学体系的复杂性,许多理论还有一定的局限性。

1.2.2.1 挡土墙的受力分析

西南交通大学等单位(1979)对锚定板群锚挡土墙的受力进行分析。兰永珍等(1983)研究了锚定板挡土墙在动力作用下的受力状态。

吴雄志(1992)提出了一种以变压力系数为基础,并考虑墙后填土破裂面影响的拉筋最大拉力计算方法。

隋铁龄(1992)经过5年野外试验,测定了挡土墙水平冻胀力值及沿墙高方向的分布形式。应用外包络图统计分析方法,将在空间和时间上非稳定状态的挡土墙水平冻胀力压强图转换成稳定状态下挡土墙水平冻胀力压强图,经过压强、变形、边坡等修正,给出了挡土墙水平冻胀力设计取值方法和计算式。

赵树德(1995)按空间问题计算边坡滑动及挡土墙上的土压力。

刘祖典(1995)根据国外文献资料介绍了考虑地震力作用下,土坡稳定分析及挡土墙土压力分析两种土工问题的闭合解法。

施大震(1996,1997)介绍了路肩短卸荷板式挡土墙在候月铁路线某工点的试验研究情况,并运用库伦理论(力多边形法)及有限元法分析了墙体的受力状况。

杨广庆(2004)在FHWA经验公式的基础上,提出了一种改进的计算台阶式加筋土挡土墙下级墙墙体附加垂直应力和墙背附加水平土压力的计算方法,该方法将面板后填土分成三个不同性质的应力区域,即主动区、过渡区和稳定区。

1.2.2.2 挡土墙稳定性的计算分析方法

陈忠达(1994)在重力式挡土墙稳定性分析中,运用模糊集合论的理论,提出了模糊稳定性系数的概念和描述方法,建立了重力式挡土墙稳定性分析的数学模型。

陈忠达(1995)以模糊集合论为基本原理,分析了允许稳定性系数的模糊性和影响允许稳定性系数取值因素,建立了模糊综合评判法确定允许稳定性系数的数学模型,最后提出了相应的计算方法。

黄广军等(1998)通过计算,分析了挡土墙的稳定性系数 $[K_e]$ 、 $[K_0]$ 的主要影响因素,对挡土墙的稳定性系数的取值进行了讨论。

李钧民(1998)改进了黏性土主动土压力的计算方法,提出了以抗滑移稳定为条件决定挡土墙截面的新方法和抗倾覆稳定性验算的公式。

郑建荣等(1999)通过挡土墙失稳破坏的实例分析,研究重力式挡土墙失稳原因及“规范”公式的适用性,提出抗倾覆稳定性系数计算的通用公式。

杨雪强(2000)基于土的塑性极限分析理论,考虑墙后为无黏性填土的情况,对折线形挡土墙墙背上的主动土压力和挡土墙抗倾覆稳定状态等进行了较为系统的

研究。

马石城等(2000)对国内、国外两种不同土压力计算模式下悬扶壁式挡土墙的抗倾覆稳定性进行了分析。

陈忠达等(2000)、张晓波等(2005)将模糊集合理论与方法引入挡土墙稳定性分析中,给出了模糊稳定性系数的概念,提出了挡土墙稳定性模糊分析方法,最后结合实例说明了模糊分析的具体过程。

李广信等(2001)采用图解法计算加筋挡土墙在二维超静孔压下的墙后土压力,用圆弧滑动法进行了稳定性校核。

赵坚等(2001)根据我国近年来挡土墙抗冻技术研究成果,介绍了季节冻土区挡土墙抗冻结构设计的要求、荷载组合、冻胀力的设计取值及墙体强度和稳定性的验算方法。

王成华等(2002)通过对比水泥搅拌桩挡土墙与传统的重力式挡土墙在工作性状、失稳机理等方面的差异,以及分析水泥搅拌桩挡土墙倾覆抗力的组成与发展,揭示了水泥搅拌桩挡土墙倾覆失稳机理的复杂性。

吴从师等(2003)基于转动块体方法,对爆破地震作用下重力式挡土墙作了动力稳定分析,讨论了爆破振动频率、地面振动加速度与挡土墙位移的关系,研究了加速度阈值系数对于挡土墙某些参数的敏感性,考虑爆破地震重复作用的累积变形,结合前人的实测爆破振动数据,基本确定了挡土墙开始产生位移的地面振动速度阈值。

曾长贤等(2003)结合现场试验分析了不同的级间平台宽度对挡土墙稳定性的影响。

金爱兵等(2003)采用 FLAC 对动载下加筋土挡土墙失稳机理数值模拟分析,提出 104 国道界河立交桥加筋土挡土墙的加固方案。

王云仓等(2005)提出利用布辛尼斯克(Boussinesq)方程,采用高斯—塞得尔迭代法求解,求出设置排水管的墙后地下水面线的空间分布的计算方法。

李清华等(2005)结合工程实际,提出圆心角为 90° 的圆弧形变墙高、变底宽的重力式挡土墙部分荷载的整体设计计算方法。

吴顺川等(2005)采用快速拉格朗日数值模拟方法,对产生坡间挡土墙失稳的主要因素——边坡角及车辆动荷载进行全面探讨,提出坡间挡土墙“双锚”建设方案,并根据分析结果确定具体的工程措施及主要技术参数。

张广彬(2006)运用有限元法模拟分级加载工况下路堤的固结变形情况,采用边坡稳定性极限分析的数值方法获得不同加载步下计算模型的稳定性安全系数及其随时间的变化规律,分析填料黏聚力、摩擦角、重度以及地基渗透性对挡土墙稳

定性的影响。

1.2.2.3 挡土墙的可靠性分析

顾正浩(1991)应用计算机模拟技术,研究了挡土墙后主动土压力的分布规律,按照相关双重稳定破坏模式,由实际安全储备的分布特性,推导出挡土墙可能的破坏概率。

梁波(1999)从可靠性原理出发,主要探讨了换算内摩擦角 φ_0 的不同换算方法和土性参数的变异性对挡土墙抗滑稳定性分析中分项系数的影响以及分项系数与安全系数、可靠指标的相互关系。

张友葩等(2002)用 LUSAS 有限元软件对加筋土挡土墙的工程结构在动荷载条件下承受荷载状况进行了分析。

朱明等(2003)根据现场勘测结果和设计资料,进行了挡土墙失稳前的稳定计算,探讨了挡土墙失稳的原因,并将土工参数以随机变量描述,进行了挡土墙的可靠性分析。

毛金萍等(2004)根据软土基坑水泥土搅拌桩围护结构的定值验算方法,建立了围护结构整体稳定、抗倾覆、抗水平滑移的极限状态方程,用基于 Latinhypercube 抽样技术的 MonteCarlo 模拟方法分别对水泥土搅拌桩挡土墙的可靠度进行了分析研究。

1.2.2.4 地下水渗流对挡土墙稳定性的影响

刘忠玉等(2001)通过计算水泥土挡土墙周围的渗流场,研究了墙侧水压力的变化规律。

刘忠玉等(2003)通过计算有地下水时的多种工况下考虑及不考虑渗流时水泥土挡土墙的抗倾覆和抗水平滑动稳定性抗力分项系数,得出地下水的渗流对水泥土挡土墙稳定性有很大影响。

尚军(2004)采用非饱和土的强度理论推导了考虑挡土墙周围非饱和土基质吸力对水泥搅拌桩挡土墙支护结构稳定性状的影响的分析方法,初步探讨了饱和—非饱和土环境下水泥搅拌桩挡土墙支护结构的稳定性安全系数变化规律。

张敏江等(2005)运用库伦土压力理论和朗金土压力理论对沈大高速公路某段重力式挡土墙因墙后浸水而产生滑移破坏进行了受力分析,推导出挡土墙浸水情况下的滑动稳定系数的变化公式,分析了凸榫对挡土墙抗滑移的作用。

赵乃志等(2005)通过对沈大高速公路某段带凸榫重力式挡土墙因墙后浸水产生滑移破坏的分析,探讨在路基浸水情况下的挡土墙的受力状况,推导出带凸榫挡土墙浸水情况下的滑动稳定系数的变化公式,进而分析了因雨水产生的水位差对挡土墙的滑动稳定性系数的影响。