

GONGLU BIANPO
GONGCHENG FANGZHI JISHU

公路边坡工程 防治技术

汪 晗◎编著



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

公路边坡工程防治技术

汪 晗 编著

合肥工业大学出版社

内 容 提 要

本书紧密结合国家相关标准和规范,采用调研、理论分析、数值仿真分析、试验等多种手段,对公路边坡的设计理论与方法、边坡加固处治与防护的新材料和新技术进行研究分析,阐述了公路边坡破坏机理、公路边坡稳定性分析方法、滑坡治理、边坡排水、土工格室边坡加筋技术、支挡结构防护技术、植被防护技术、柔性防护网技术、喷浆防护技术、土工合成材料防护技术等内容,并对各种防护技术列举了相关工程实例。

本书是作者对近二十年来的公路边坡工程防治实践与科研成果的系统总结,是在多位国内著名专家指导意见的基础上撰写而成的一部独具特色的公路边坡工程防治技术的著作。

图书在版编目(CIP)数据

公路边坡工程防治技术/汪晗编著. —合肥:合肥工业大学出版社,2014.4
ISBN 978-7-5650-1792-6

I. ①公… II. ①汪… III. ①公路路基—边坡防护 IV. ①U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 056878 号

公路边坡工程防治技术

汪 晗 编著

责任编辑 汤礼广 魏亮瑜

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2014 年 4 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2014 年 5 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	787 毫米×1092 毫米 1/16
电 话	理工编辑部:0551—62903087 市场营销部:0551—62903198	印 张	19
网 址	www. hfutpress. com. cn	字 数	438 千字
E-mail	hfutpress@163. com	印 刷	合肥现代印务有限公司
		发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-1792-6

定价: 43.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

序 言

随着经济的快速发展，我国公路工程建设也在大踏步地向前迈进，但我国是一个地质灾害频发的国家，因此在公路工程建设中，公路边（滑）坡治理工程急剧增多，公路边坡的防护治理问题成为我国公路工程建设中普遍性的技术难题。如何确保公路边（滑）坡工程的安全可靠，减少公路工程事故；如何提高我国公路边（滑）坡工程勘察设计、变形控制、施工技术、安全监测预报、加固和改造的科技水平，对此，我国广大的科研工程技术人员一直奋斗不懈。

经过几代岩土工作者的辛勤工作和不懈努力，我国公路边（滑）坡工程的治理水平与预警预报水平有了很大提高，但由于边坡工程的工程地质条件复杂多变，且地区差异很大，因此还有很多技术问题有待解决，特别是在如下边坡研究领域还需进行艰苦的科研工作与实际经验的积累：公路边坡工程的勘察、设计、施工理论与方法，公路边坡监测与安全预警预报，公路边坡工程变形计算与控制理论，公路边坡检测、鉴定技术和验收标准，公路边坡的评价、改造与加围技术等。

本书作者通过调研、理论分析、数值仿真分析、试验等多种手段，对公路边坡的设计理论与方法、公路边坡加固治理与防护的新材料和新技术进行了系统的研究分析，在吸收和消化前人理论研究与工程实践经验的基础上，通过大量的工程实例探讨了边坡工程的设计、监测、检测、鉴定和改造加固理论与技术，初步探讨了边坡工程安全方面的相关问题，以上内容，尤其是对工程实例的剖析均给读者留下深刻的印象。

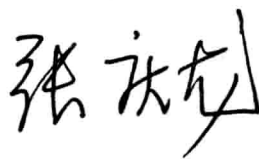
另外，本书还有以下特点：

(1) 采用公路工程、边坡工程新标准和新规范，如：《公路工程地质勘察规范》(JTG C20—2011)、《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)等，同时吸取了公路、建筑、边坡等相关行业近些年在公路边坡治理的最新研究成果。

(2) 紧密结合公路边坡工程防治的实际需要, 所提出的治理措施和方法均具有很强的实用性, 值得公路、岩土、建筑等工程领域的工程技术人员和广大读者借鉴。

(3) 对公路边坡治理措施和方法论述较为全面, 研究的成果具有前瞻性、科学性、创新性。

总而言之, 本书与科研、生产实践紧密结合, 反映了公路边坡工程防护治理科学最新的科研成果和发展动态。相信本书的出版对我国公路边坡工程防护和治理工作在科研、设计、施工、监理、检测等方面的进步将起到重要的推动作用。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '张庆' (Zhang Qing), with a stylized flourish at the end.

2014 年 4 月 22 日

前 言

公路的大规模修建,对国家交通及经济建设的发展、人们生活方式的改变及生活质量的提高起到了巨大的推动作用,但高速公路的修建也对各地局部环境造成了改变,其中最典型的表现是路基的填筑和切挖形成了高低不同、坡度各异的工程边坡,改变了所经之处的原生地质环境,扰动了应力场和原生地貌(根据生成方法,这些边坡可能是构成路基的各类填土、填石或土石混合填筑边坡,也可能是在山体中切挖路基而形成的路堑边坡,或者是半填半挖而形成的山体切削边坡)。边坡的稳定性和抗灾能力,不但对当地居民和生态环境具有重大影响,而且对公路运营和行车安全也是无法忽视的影响因素。

由于区域性地形地貌、地质条件的差异,这些边坡的力学性能、排水和渗水性能、存在状态及自稳能力可能差异很大。例如,山区公路的高填路堤边坡的稳定性主要决定于填筑材料和填筑工艺,半填半挖路基山体切削边坡的稳定性不但与施工工艺有关,而且其关键稳定性影响因素还涉及原生地形坡度、浅部地层地质结构及地质体的力学物理性能与水理性质。同时在许多情况下,边坡的防护技术和对策还需要考虑工作场地狭窄、运输条件艰苦等因素。因此,在高速公路边坡的防护方案选用、设计及施工中,对不同的边坡需要有针对性地探索使用不同的加固和支挡防护技术。

本书作者从事公路的科研、设计和施工管理工作多年,尤其是在公路边坡防护技术领域积累了丰富的经验,拥有一些独到的心得体会,经系统分析和初步总结,汇聚成册,供有关人员参考。全书内容共分为九章,其主要内容如下:

第一章主要介绍了影响边坡稳定的主要因素和边坡处治技术的发展方向。

第二章主要介绍边坡破坏机理研究,主要对路堤、路堑边坡破坏机理进行详细地研究,并列举了相关工程实例。

第三章主要介绍公路边坡稳定性评价方法,探讨了边坡稳定性影响因素分析,论述了边坡稳定性分析的极限平衡方法,介绍了有限元强度折减法,研究了土岩接触面强度特性及参数,对路堤、路堑边坡稳定性计算方法与稳定安全系数取值进行了分析。

第四章论述滑坡处治,主要介绍了滑坡形态和分类,论述了滑坡工程地

质勘测和滑坡稳定性判断,介绍了滑坡推力的计算,提出了滑坡防治措施。

第五章主要介绍土工格室加筋技术在公路边坡工程中的应用,论述了土工格室的基本性能,研究了土工格室与土相互作用机理,土工格室加筋路堤的数值分析,同时研究了土工格室加筋路堤设计。

第六章主要论述公路边坡植被防护技术,介绍了客土喷播、植生带绿化技术及液力喷播等相关技术。

第七章关于公路边坡支挡结构防护研究,主要研究了挡土墙和土钉支护、预应力锚固、抗滑桩等相关边坡防护治理技术,并列举了相关工程实例。

第八章主要论述公路边坡排水工程的设计与施工技术,介绍了排水工程在滑坡处治中的地位 and 作用等内容,提出了排水沟渠、跌水与急流槽相关设计技术。

第九章主要论述公路坡面工程防护技术,介绍了土工合成材料防护,研究了柔性防护网、喷浆防护、砌石防护等边坡防护治理技术。

本书在写作过程中,参考了目前国内外有关专家和学者关于边坡工程方面的规范、论文和著作;本书撰写完成后,合肥工业大学博士生导师王建国教授、安徽交通职业技术学院钱让清教授认真审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵的修改意见。在此一并向他们表示衷心的感谢!

由于公路边坡防治技术问题的复杂性,有关理论、方法和技术还有待于更进一步研究,特别是由于作者的学识、水平和研究深度有限,虽然尽了最大努力,但仍然难免挂一漏万,存在错误和不当之处,恳请各位专家和读者批评指正。

作 者

2014 年 4 月

目 录

序 言	(1)
前 言	(1)
第一章 绪 论	(1)
第一节 边坡简介	(1)
第二节 边坡稳定的影响因素	(4)
第三节 边坡处治的理论与技术发展方向	(6)
第二章 边坡破坏机理研究	(9)
第一节 路堤边坡破坏机理研究	(9)
第二节 路堑边坡破坏机理研究	(21)
第三章 公路边坡稳定性评价方法	(38)
第一节 边坡稳定性影响因素分析	(38)
第二节 边坡稳定性分析的极限平衡方法	(39)
第三节 边坡稳定性分析的新方法——有限元强度折减法	(56)
第四节 土岩接触面强度特性及参数	(75)
第五节 路堤边坡稳定性计算方法与稳定安全系数的取值分析	(79)
第六节 路堑边坡稳定性计算方法与稳定安全系数的取值分析	(92)
第四章 滑坡处治	(99)
第一节 概述	(99)
第二节 滑坡工程地质勘测	(102)
第三节 滑坡稳定性判断	(107)
第四节 滑坡推力计算	(113)
第五节 滑坡防治措施	(118)

第五章 土工格室加筋技术在公路边坡工程中的应用	(130)
第一节 土工格室的基本性能	(130)
第二节 土工格室与土相互作用机理	(131)
第三节 土工格室加筋路堤的数值分析	(140)
第四节 土工格室加筋路堤设计	(145)
第五节 土工格室加筋路堤的施工质量控制	(147)
第六章 公路边坡植被防护技术	(153)
第一节 植被护坡概论	(153)
第二节 客土喷播技术	(165)
第三节 植生带绿化技术	(170)
第四节 液力喷播技术	(173)
第五节 其他技术	(176)
第七章 公路边坡支挡结构防护研究	(181)
第一节 挡土墙	(181)
第二节 土钉支护技术	(193)
第三节 预应力锚固技术	(202)
第四节 抗滑桩	(214)
第八章 公路边坡排水工程的设计与施工技术	(240)
第一节 概述	(240)
第二节 地表排水工程的分类	(242)
第三节 沟渠的加固	(243)
第四节 排水沟渠设计	(251)
第五节 跌水与急流槽	(258)
第六节 地下排水工程	(260)
第七节 排水设施的施工技术要点	(265)
第九章 公路坡面工程防护技术	(266)
第一节 土工合成材料的生态边坡防护	(266)
第二节 柔性防护网	(276)
第三节 喷浆防护技术	(282)
第四节 砌石防护	(291)
参考文献	(292)

第一章 绪 论

评价边坡稳定性时,首先要考察边坡的地质条件、水文地质条件、地形地貌和新构造运动等,因为这些因素往往是边坡稳定性的决定因素。一般来说,这些因素比人类的工程活动,如地下采掘、开挖坡脚、人工削坡,对边坡稳定性的影响更大。人类的工程活动往往是起到诱发边坡失稳的作用,是次要因素。

以前,由于公路等级低、线形差、路基不宽、开挖不深,边坡稳定性对公路的影响不显著,人们对边坡稳定性没有引起足够的重视。但是,随着国民经济建设的发展,公路交通事业日新月异,公路等级越来越高,高填深挖已经不可避免。复杂地形条件下修建高等级公路的情况日益增多,如六潜高速就经过了复杂的地质地形,高大边坡的数量增多,规模扩大,人工削坡、深切路基对边坡稳定性的影响增强。国内外已有许多公路边坡失稳的事例,公路边坡失稳不仅影响行车安全,甚至可以掩埋公路,中断交通,迫使放弃已建成公路的使用,造成不可估量的经济损失。因此,研究公路边坡稳定性和边坡防护方法显得非常必要。

边坡稳定性受地质条件、水文地质条件、地形地貌、新构造运动和人类的工程活动等多种因素影响,其稳定状态是这些因素综合作用的反映。边坡稳定性和各种因素构成一个相互联系、相互影响的整体,其中任何一个因素的改变往往会导致其他因素发生改变,进而引起边坡稳定状态发生改变。因此,在分析开挖路堑和人工削坡对边坡稳定性的影响时,也必须把这一因素和其他因素联系起来,作为一个统一的整体来考察和分析,而不应将它和其他因素割裂开,孤立地进行考察和分析。同时应当注意,对具体的边坡而言,各因素在边坡稳定中所起的作用是不同的,因此,在评价边坡稳定性时,还应区别各因素在边坡稳定中所起的作用,有重点地考察和分析起主导作用的因素。

第一节 边坡简介

一、边坡分类

边坡分类见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 边坡分类表

分类依据	名 称	简 述
成因	自然边坡 (斜坡)	由自然地质作用形成地面具有一定斜度的地段,按地质作用可细分为剥蚀边坡、侵蚀边坡、堆积边坡
	人工边坡	由人工开挖、回填形成的地面具有一定斜度的地段

(续表)

分类依据	名 称	简 述
岩性	岩质边坡 (岩坡)	由岩石构成,按岩石成因、岩体结构又可细分,可见表 1-2
	土质边坡 (土坡)	由土构成,按土体结构又可细分为单元结构、多元结构、土石混合结构、土石叠置结构
坡高	超高边坡	岩质边坡坡高大于 30m,土质边坡坡高大于 15m
	高边坡	岩质边坡坡高 15~30m,土质边坡坡高 10~15m
	中高边坡	岩质边坡坡高 8~15m,土质边坡坡高 5~10m
	低边坡	岩质边坡坡高小于 8m,土质边坡坡高小于 5m
坡长	长边坡	坡长大于 300m
	中长边坡	坡长 100~300m
	短边坡	坡长小于 100m
坡度	缓坡	坡度小于 15°
	中等坡	坡度 15°~30°
	陡坡	坡度 30°~60°
	急坡	坡度 60°~90°
	倒坡	坡度大于 90°
稳定性	稳定坡	稳定条件好,不会发生破坏
	不稳定坡	稳定条件差或已发生局部破坏,必须处理才能稳定
	已失稳坡	已发生明显的破坏

表 1-2 岩质边坡分类表

分类依据	亚类名称	简 述
岩石类别	岩浆岩边坡	由岩浆岩构成,可细分为侵入岩边坡及喷出岩边坡
	沉积岩边坡	由沉积岩构成,可细分为碎屑沉积边坡、碳酸盐边坡、黏土岩边坡、特殊岩(夹有岩盐、石膏等)边坡
	变质岩边坡	由变质岩构成
结构	块状结构边坡	边坡岩体呈块状结构,岩体较完整,由岩浆岩体、厚层或中厚层沉积岩或变质岩构成
	层状结构边坡	边坡岩体呈层状结构,由层状或薄层状沉积岩或变质岩构成
	碎裂结构边坡	边坡岩体呈碎裂状结构,由强风化或强烈构造运动形成的破碎岩体构成
	散体结构边坡	边坡岩体呈散状结构,由全风化或大断层形成的极破碎岩体构成

(续表)

分类依据	亚类名称	简 述
岩层走向、 倾向与坡面走向、 倾向的关系	顺向坡	两者基本一致
	反向坡	两者的走向基本一致,但倾向相反
	斜向坡	两者的走向成较大角度($>45^\circ$)相交

二、边坡病害的分类

边坡病害可分为以下三类:

1. 滑坡

滑坡是路基山坡土体或岩体长期受地下水、地表水活动的影响,使其结构逐渐失去支撑力,在自重的作用下,整体沿着一定软弱面向下滑动的现象。滑坡按其引起滑动的力学特性,可分为牵引式滑坡和推移式滑坡。牵引式滑坡,是下部先滑动,使上部失去支撑而变形滑动,一般速度较慢,可延续相当长的时间,横向张性裂隙发育,表面多呈阶梯状或陡坎状。推移式滑坡是上部岩石挤压下部岩土体产生变形,滑动速度较快,滑体表面波状起伏,多见于有堆积分布的斜坡地段。在公路建设中,有时会因设计施工不当,改变了原来斜坡的平衡状态,从而引发工程新滑坡或工程复活古滑坡。

2. 崩塌

所谓崩塌,是指整体岩土块脱离母体突然从较陡的斜坡上崩落下来,并顺斜坡猛烈翻转、跳跃,最后堆落在山脚的现象。崩塌具有突发性,危害较大。它与滑坡的区别是崩塌发生急促,破坏体散开,并有倾倒、翻滚现象;而滑坡体一般总是沿着固定滑动面整体地、缓慢地向下滑动。

3. 剥落

所谓剥落,是指边坡表层受风化,在冲刷和重力作用下,不断沿斜坡滚落。

三、公路工程滑坡类型及成因

所谓公路工程滑坡,是指在一定的地形地质和水文条件下,由于路堑开挖或路基填筑等人为因素为主引起的山体在重力作用下沿山坡内部某一软弱面(带)作整体地、缓慢地、间歇地滑动变形现象。根据坡体物质组成、滑动形式、形成成因、滑体厚度和滑体体积对公路工程滑坡进行分类,如表 1-3 所示。

表 1-3 公路工程滑坡分类

划分依据	名称类别	特征说明
物质组成	堆积层滑坡	由崩滑堆积等成因的块碎石堆积体,沿下伏基岩或体内软弱层动
	黄土滑坡	不同时期的黄土层中的滑坡,常见于高阶地上
	黏性土滑坡	黏性土本身变形滑动,或与其他土层的接触面或沿基岩接触面滑动
	岩层滑坡	软弱岩层组合物的滑坡,或沿同类基岩面,或沿不同岩层接触面以及较完整的基岩面滑动

(续表)

划分依据	名称类别	特征说明
引起滑动的力特征	推移式滑坡	上部滑体滑动挤压下部产生变形,滑动速度较快、滑体表面波状起伏,多见于有堆积物分布的斜坡地段
	牵引式滑坡	下部先滑使上部失去支撑面变形滑动,一般速度较慢,多具有上小下大的塔式外貌,横向张性裂隙发育,表面多呈阶梯状或陡坎状
形成原因	工程新滑坡	由开挖山体或填筑路基所形成的滑坡
	工程复活古滑坡	早已存在的滑坡,由开挖山体或填筑路基引起重新活动的滑坡
滑体厚度	浅层滑坡	滑坡体厚度在 10m 以内
	中层滑坡	滑坡体厚度在 10~25m 之间
	深层滑坡	滑坡体厚度超过 25m
滑体体积	小型滑坡	$<100000\text{m}^3$
	中型滑坡	$100000\sim1000000\text{m}^3$
	大型滑坡	$1000000\sim50000000\text{m}^3$
	巨型滑坡	$>50000000\text{m}^3$

公路滑坡整治基本原则如下:

(1)坚持以工程地质条件为设计依据。重视滑坡定性评价,辅以定量评价。定量评价一定要满足定性评价。

(2)安全性。根据防治对象重要程度、设计使用年限、地震条件、地下水条件,合理地拟定滑坡推力计算的安全系数。

(3)技术经济合理性。利用一切地形条件、地质条件,因地制宜采取工程措施,加强滑坡的整体稳定性。

(4)实施的可能性。充分考虑工程施工过程和顺序,应有利于滑体逐步趋于稳定,确保施工人员安全。

(5)重视社会人文因素。工程措施和施工顺序安排应注意协调施工与当地居民生活关系,尽量不影响当地居民正常生活。

(6)重视环保绿化。

第二节 边坡稳定的影响因素

边坡的稳定性受多种因素的影响,主要分为内在因素和外部因素。内在因素包括组成边坡的岩土力学性质、地质构造、岩土体结构、地应力、水的作用等。外部因素包括工程荷载条件、振动、边坡形态的改造、气象条件、植物作用等。研究分析影响边坡稳定的因素,特别是影响边坡变形破坏的主要因素,是稳定分析和边坡防治处理的一项重要任务。

1. 岩土的工程地质性质

岩土的工程地质性质包括组成土体的物理、化学、水文和力学性质,特别是岩土在饱水

条件下的力学强度,是影响边坡稳定的最主要因素。就边坡的变形破坏特征而论,不同地层有其常见的变形破坏形式。例如,有些地层中滑坡特别发达,这是与该地层中含有特殊的矿物成分、风化物,易于形成滑带有关。其次,土性对边坡的变形破坏也有直接影响。坚硬完整的块状或厚层状岩石,可以形成高达数百米的陡立边坡;而在淤泥或淤泥质软土地段,由于淤泥的塑流变形,几乎难以开挖边坡,边坡随挖随坍,难以成形;天然的松散地层边坡坡度较缓,而黄土边坡在干燥时却可以直立不溃。由某些岩土组成的边坡在干燥或天然状态下是稳定的,但一经浸水,岩土强度大减,边坡出现失稳。

2. 地质构造

地质构造因素,包括区域构造特点、边坡地段的褶皱形态、岩层产状、断层和节理裂隙发育特征以及区域新构造运动特点等。它对边坡稳定,特别是岩质边坡稳定的影响是十分明显的。在区域构造比较复杂、褶皱比较严重、新构造运动比较活跃的地区,边坡的稳定性较差。同时,边坡地段的岩层褶皱形态和岩层产状,直接影响边坡变形破坏的形式和规模。至于断层和节理裂隙,对边坡变形破坏的影响则更为明显。某些断层或节理本身,就构成滑面或滑坡的周界面。

3. 岩质边坡的岩体结构

对坚硬和半坚硬岩石而言,岩石的性质对边坡的稳定性并不是最主要的影响因素。边坡岩体的破坏主要受岩体中不连续面(结构面)的控制。影响边坡稳定的岩体结构因素主要包括以下几个方面,如结构面的倾向和倾角、结构面的走向、结构面的组数和数量、结构面的连续性、结构面的起伏差和表面性质等。

4. 水文地质作用

“十个边坡九个水”,这句话形象地反映了边坡失稳往往与地下水的活动有着密切关系这一客观事实。水文地质条件包括地下水的储存、补给、径流、排泄条件。地下水的富集程度既与气候条件有关,又与水文地质条件有关,边坡水文地质条件的改变必然导致其地下水富集程度的改变。由于岩土体的力学性质受水的影响很大,地下水富集程度的提高一方面增大坡体下滑力,另一方面降低软弱夹层和结构面的抗剪强度,引起孔隙水压力上升,降低滑动面上的有效正应力,导致滑动面的抗滑力减小。因此,地下水富集程度的改变相应地引起边坡稳定性发生改变。有不少边坡失稳与边坡水文地质条件恶化有关,而治理边坡也往往是由于改善了水文地质条件而获得成功。

5. 地震

地震对边坡稳定性的影响极大,地震往往伴有大量的边坡失稳。地震作用导致边坡稳定性降低主要是由于地震作用产生的水平地震附加力,当水平地震附加力的作用方向与主滑方向一致时,边坡的下滑力增大,滑动面的抗滑力减小。另外,在地震力作用下,岩土中的孔隙水压力增加、岩土体强度降低,这也对边坡的稳定不利。

6. 边坡形态

边坡形态对边坡的稳定性有直接影响。边坡形态系指边坡的高度、长度、剖面形态、平面形态以及边坡的临空条件等。对均质岩土边坡而言,坡度越陡,坡高越大,对其稳定越不利。当边坡的稳定受同向缓倾滑动结构面控制时,边坡的稳定性与边坡坡度关系不大,而主要取决于边坡高度。此外,边坡的临空条件也影响边坡的稳定。平面上呈凹形的边坡较呈凸形的边坡稳定。同是凹形边坡,边坡等高线曲率半径越小,越有利于边坡的稳定。

7. 地应力

地应力是控制边坡岩体节理裂隙发育及边坡变形特征的重要因素,开挖边坡使坡体内岩土体的初始应力状态改变,坡脚附近出现剪应力集中带,坡顶和坡面的一些部位可能出现张应力区;在新构造运动强烈的地区,开挖边坡能使岩体的残余构造应力释放,可直接引起边坡的变形破坏。

8. 风化作用

风化作用使岩土体的抗剪强度减弱,裂隙增加、扩大,影响斜坡的形状和坡度,透水性增加,使地面水易于浸入,改变地下水的动态等。沿裂隙风化时,可使岩土脱落或沿斜坡崩塌、堆积、滑移等。

9. 人为的工程活动因素

(1)荷载作用。坡顶荷载一方面增加了坡体下滑力,另一方面加大了坡顶张应力和坡脚剪应力的集中程度,使边坡岩土体破坏,强度降低。坡顶荷载的类型如静载、活载;荷载的大小和作用次数等均影响边坡的稳定性。

(2)公路路基结构。路基形式、路基填土或填石的类型号与性质、排水结构物与支挡结构物的设置等,均影响边坡的稳定性。

(3)施工方法及养护措施。对路基来说,影响边坡稳定性的因素主要有路基填筑方法是否正确、压实度是否充分以及是否采用大爆破等;如果在设计、施工中未及时采用一般措施,而在养护中未加以补充、改善时,也会影响边坡稳定性。

第三节 边坡处治的理论与技术发展方向

一、边坡稳定性研究的发展方向

边坡稳定性研究由来已久,早期的边坡研究是仅以土体为研究对象的,该方法的显著特点是采用材料力学和简单的均质弹性、弹塑性理论为基础的半经验半理论性质的研究方法,并将其用于岩质边坡的稳定性研究。但由于其力学机理的粗浅或假设的不合理,其计算结果与实际情况差别较大。1959年法国 Malpasset 坝左岸坝肩岩体的崩溃及 1963 年意大利 Vajont 坝上游左岸的库岸边坡滑坡等,使人们清醒地认识到边坡破坏力学机理研究的不足,从而使边坡稳定性研究向前迈进了一大步。以弹塑性理论为基础并改进的极限平衡法应用为主的多种方法应运而生,特别是 1967 年人们第一次尝试用有限元研究边坡的稳定性问题,给定量评价边坡的稳定性创造了条件,并使其逐步过渡到数值方法,从而使边坡稳定性研究进入模式机制和作用过程研究成为可能。同时,随着大量规模巨大工程的开展,决策要求的提高,以概率论为基础的可靠度方法也被引入到边坡稳定性研究中。在这一时期,由于我国边坡工程的不断实践与发展,边坡稳定性分析的原理与方法也获得了不断丰富与发展,如由中国科学院地质所提出的岩体结构理论及相应的边坡岩体稳定性分析的岩体工程地质力学方法,该方法的本质在于以岩体结构理论为基础,强调岩体中结构面特别是软弱结构面对边坡岩体变形及边坡失稳破坏的控制作用,运用赤平投影及实体比例投影作图方法,确定边坡潜在不稳定块体可能的几何形态或滑移边界,并用与现场滑坡条件相应的滑面岩体强度指标,定量地分析、评价边坡的稳定性。同时,滑坡研究进行了模拟试验与空间预测等。进入 20 世纪 80 年代后,由于计算机技术水平的大幅度提高及岩体力学性质研究的进

展,各种复杂的数值计算方法广泛地应用于边坡研究中。同时,由于学科之间的相互渗透,这一时期的研究方法各式各样,成果迭出。现今使用的数学模型大致可分为两类:一类是基于极限平衡理论的条分法;另一类是数值分析方法。虽然条分法人为假定的条间作用力并不代表边坡真实的应力状态,但条分法计算简单,发展历史较长,就稳定性而言,其结果已可满足实际需要,对土坡更是如此。

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。其中,条分法是边坡稳定分析理论中重要的内容之一。力学模型简单,可以对边坡进行定量的稳定性评价,已被工程人员广泛采用。1916年瑞典人彼德森最早提出了条分法:假定土坡稳定问题是平面应变问题,并对圆柱形滑裂面以上的土体划分垂直条块,计算中不考虑土条间的作用力,定义安全系数为滑裂面上全部抗滑力矩与滑动力矩之比。之后,Fellenius(1936年)、Bishop(1955年)、Morgenstern、Rice(1965年)、Janbu(1973年)等许多学者对条分法进行了改进。其中,Bishop重新定义安全系数为沿整个滑裂面的抗剪强度与实际产生剪应力的比值,使得物理意义更明确。为了将坡体稳定分析中的超静定问题转化为静定问题,一些学者尝试将条块间的作用力作了人为假定。例如:Bishop假定土条左右面上的剪力相互抵消;Morgenstern和Rice假定了条分面上剪力和水平推力比值的函数关系,并认为在垂直面上的应力分布不应破坏屈服条件,并且保证土条接触面上不产生拉应力;Janbu假定了推力线的位置。

随着计算机技术的发展,很多数值计算方法都用到边坡稳定分析中。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。有限单元法用于边坡中应力和位移的分析已经比较完善,并被许多学者成功应用。其他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。目前,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;二是大量新型数值计算方法的应用,如边界元法、离散元法、拉格朗日元法等,这些数值方法的应用,必将促进边坡稳定性研究的发展。

进入20世纪90年代,边坡问题的研究将传统的边坡工程地质学、现代岩土力学和现代数学相结合,形成了所谓的现代边坡工程学;各种现代科学的新技术,如系统工程论、信息理论、模糊数学、灰色理论、现代概率统计理论、耗散论、协同学、突变理论、混沌理论、分形理论等不断用于边坡问题研究中,从而给边坡的稳定性研究提供了新理论、新方法。

边坡稳定性分析方法取得了很大的成就,但在以下几个方面还有待进一步完善,这将是以后研究的重点。

1. 进一步进行边坡稳定性分析试验研究

目前对边坡稳定性分析试验研究并不多。

众所周知,试验是边坡稳定性研究的基础,也是计算方法的依据。如果不进行试验研究就难以分析边坡破坏机理,从而难以把握计算方法的正确性。只有加强边坡稳定分析试验研究,才能促进边坡分析的发展。

2. 完善确定性分析方法,特别是复合法

目前确定性分析方法占有绝对的地位,只有不断完善才能适合不同的边坡条件。复合法是确定性分析方法的发展方向,可将不同方法的优点结合起来,故应大力发展复合方法。

3. 大力发展边坡稳定分析的随机方法和模糊方法

这方面是边坡稳定性分析的新兴方法,在理论和应用上都有很多研究工作要做,应大量开展随机方法和模糊方法的理论和应用研究,使其更适于边坡稳定性分析。

二、边坡治理技术的发展方向

边坡治理是一项技术复杂、施工困难的灾害防治工程。近年来,随着公路建设事业的迅速发展,以及大型重点工程项目的日益增多,边坡治理面临的问题也越来越突出。

由于我国一些地区石料来源丰富,就地取材方便,再加上施工方法简单,因此,在过去很长一段时间内,石砌的重力式挡土墙是我国岩土工程中广泛采用的主要支挡结构。

这种挡土墙形式简单,设计一般采用库仑土压力理论。但由于其截面大、圬工数量多、施工进度慢,在地形困难、石料缺乏地区应用不便。20世纪50年代,为适应西南山区地形陡峻的特点,出现了我国独创的衡重式挡土墙,较以往的重力式挡土墙可节省圬工20%~30%。随后,又出现了一种改进型的结构形式——卸荷板式挡土墙,可进一步节省墙体圬工,从而节省工程投资,有关设计计算方法已纳入《铁路路基支挡结构设计规范》(TB10025—2001)。随着经济发展,建设项目增多,对道路和环境景观美化要求的提高,以及施工技术和标准化程度的提高,结构受力更合理、外形更美观、边坡坡度易调可变的挡土墙,如人字形挡土墙、单元式及格栅式拼装挡土墙、带U型流水边沟单元化低挡土墙、地锚式山体固定挡土墙,特别是表面装饰美化挡土墙,将会得到迅速发展。

锚固技术由于良好的边坡处治效果和耐久性而广泛地应用于高陡边坡的防护与处治,其主要的锚固形式有:锚杆墙板及锚杆肋柱墙板、锚杆灌注桩、锚杆(钉)喷网、小锚杆铁丝网喷浆、锚索加固护坡和预应力锚索抗滑桩等。

在工程实践中,早期沿用结构工程概念,针对锚固作用机理提出诸如悬吊理论、组合梁理论、成拱理论等简单的模型。岩体工程的发展促使岩土锚固理论上了一个新台阶。通过大量的物理模型试验、数值仿真模拟、现场观测等手段,深入探讨了锚杆(索)加固机理。虽然锚固理论研究工作取得了一定进展,但也存在不少问题,如理论研究明显滞后于工程应用研究;对锚固体力的传递只有定性描述;在设计中大都采用黏结应力均匀分布的形式;锚杆(索)加固机理也没有统一的认识,缺乏行之有效并且合理的计算方法;理论分析和数值分析与实际情况出入较大;采用等效模型评论锚杆(索)的加固作用时,岩体力学参数的选取往往很难准确把握。

因此边坡锚固的发展方向为:围绕锚固荷载传递机理的研究考虑黏结应力非均匀分布的事实,研究并提出切合实际的单锚承载力的计算公式,狠抓半理论半经验的设计原则,发展考虑群锚效应的系统锚杆支护的实用计算方法;进一步加强锚固机理研究,包括锚杆(索)预应力对岩土体应力重分布及岩土体力学性能的影响、锚固体对岩土体物理力学性质的影响以及锚杆(索)与边坡岩土体之间的相互作用;研究和提出模拟锚杆作用的合理计算模型:拉力型、压力型、剪力型锚固体内应力传递规律;研究地震、冲击、交变荷载、冰冻、高温等特殊条件下锚杆的性能及设计方法。