



山区公路路基稳定 理论与实践

Theory and Practice for Subgrade
Stability of Highway in Mountainous Area

陈谦应 蒋树屏 柴贺军 杨建国 著



人民交通出版社
China Communications Press

交通科技丛书

Theory and Practice for Subgrade Stability
of Highway in Mountainous Area

山区公路路基稳定理论与实践

陈谦应 蒋树屏 柴贺军 杨建国 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书分三篇共十二章,分别讲述了山区公路挖方边坡稳定与加固、山区公路填方路基沉降综合处治、路基防排水技术。内容包括边坡稳定性评价方法,边坡加固及防护、路基处治方法、方式以及排水机理、排水系统布置与设计、防水新材料等。本书具有很强的参考价值。

本书可供公路、桥梁施工、设计、养护等技术人员,亦可供高校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

山区公路路基稳定理论与实践/陈谦应,蒋树屏,
柴贺军,杨建国著. —北京:人民交通出版社,2005.9
(交通科技丛书)

ISBN 7-114-05751-2

I. 山… II. ①陈…②蒋…③柴…④杨…

III. 公路路基-边坡-加固 IV. U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 102760 号

交通科技丛书

书 名:山区公路路基稳定理论与实践

著 作 者:陈谦应 蒋树屏 柴贺军 杨建国

责任编辑:沈鸿雁 师 云

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)85285838,85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店、交通书店、建筑书店

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

开 本:787×980 1/16

印 张:16.75

字 数:268 千

版 次:2005 年 12 月第 1 版

印 次:2005 年 12 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-114-05751-2

印 数:0001~4000 册

定 价:36.00 元

(如有印刷、装订质量问题,由本社负责调换)

序

随着我国高等级公路建设飞速发展,公路建设中日益活跃的人类工程活动以及特殊的地域地质条件,使得边坡、高填方和路基问题层出不穷,引起的崩塌、滑坡、路基不均匀沉降等灾害频繁发生,造成国家财产和人民生命的重大损失,仅每年用于挖方边坡事后治理、加固的费用高达十亿元人民币以上。因此,如何在公路建设的同时,合理地设计边坡、高填方和路基排水,防止由此而引发的灾害发生,是摆在公路技术人员面前的一项艰巨任务。

由于岩、土体的高度非线性和复杂性,对这些问题需要将多学科、多种手段及方法有机结合来开展综合研究。本书作者以一系列高速公路典型边坡、滑坡、高填方和路基防排水等工程实例为原型,通过理论和数值分析、大量的室内试验、模拟试验、示范工程试验,并围绕山区高等级公路路基修筑的具体特点,较为系统地提出了挖方边坡变形破坏机理、边坡稳定性评价方法、边坡岩土锚固设计与施工技术、边坡压力灌浆设计与施工技术、边坡绿化技术等,较好地解决了山区高等级公路挖方边坡稳定与加固中的关键技术;通过路堤不均匀沉降的多方法研究,提出了压实度、挖填交界、开挖台阶对填方不均匀沉降变形的影响,提出强夯法处治路基不均匀沉降的设计计算方法和设计参数,提出了压力灌浆法处治路基不均匀沉降的设计计算方法、灌浆施工工艺及质量检测评价方法;对路基内地下水运动特征、地下水对路基排水系统的作用机理、地下水对路基边坡稳定性的控制作用等进行综合分析,提出相应的路基防排水技术开发措施、设计方法,研制了 L-1 型固坡防水剂,并在公路边坡特别是已建喷射混凝土坡面上进行了应用。

作者将地质体和岩、土体的认识与岩体力学、土力学、数理力学、计算机科学、非线性科学及现代物理、数值模拟技术有机地结合起来,对复杂岩、土体的变形破坏过程、稳定性状况和沉降变形趋势作出科学的评价与预测,并由此制定出科学合理的处治措施。该研究取得了具有创新意义的成果,建立了一套具有理论基础、实际操作可行的工程处治技术,具有较重要的学术

价值和较显著的工程价值。

作为一部山区公路路基修筑方面的综合的和较为系统的学术著作,我相信,该书的出版,将为我国山区高等级公路的路基修筑提供一套既有理论又有实践的技术与方法。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '郑颖人' (Zheng Yanren).

2005 年 10 月 25 日

前言

随着我国经济建设的发展,对公路交通的要求越来越高。我国是一个多山的国家,山丘区面积占全国总面积近 70%,山丘区修筑高等级公路,由于地质、地貌条件的限制和公路线形的制约,深挖、高填路基十分普遍。由此而产生的路基稳定性问题十分突出。挖方边坡路基是山丘区高等级公路路基的主要结构形式,在山区高等级公路中,近 50% 的路段由挖方路基组成。挖方边坡坍方、滑坡,不仅维修困难,而且将阻塞和中断交通。由此,将产生严重的经济损失和不良的社会影响。填方路基的稳定性集中表现在路基过大的沉降或不均匀沉降。在山区高等级公路中不均匀沉降经常发生,在一般路段不均匀沉降的产生,将导致水泥路面面板断裂、沥青混凝土路面开裂;在桥涵等人工构造物附近,不均匀沉降的产生,不仅导致路面结构破坏,而且产生诸如“桥头跳车”等不利于交通和行车安全的现象,从而影响高等级公路功能的正常发挥。在中西部地区由于受恶劣地形、地貌和复杂地质条件的限制,带来的直接问题就是防护工程和排水工程构造物等的工程造价远大于平原地区,每年由于暴雨和山洪暴发所造成的路基边坡冲刷及路基水毁不在少数,而路面的过早破坏与路基排水不良有着直接关系。如何正确认识上述工程问题产生的机理及采取怎样的处理措施,这些已成为该领域亟待解决的重大课题。

本书是国家经贸委“山区高等级公路修筑关键技术及示范工程”科研项目部分成果的总结。该项目通过理论分析和大量的室内试验、模拟试验、实体工程试验,同时,结合山区高等级公路的具体特点,对挖方边坡变形破坏机理、边坡稳定性评价方法、边坡岩土锚固设计与施工技术、边坡压力灌浆设计与施工技术、边坡绿化技术等进行了较全面深入的研究。书中建立了基于非线性理论的神经网络方法和遗传算法的公路边坡稳定性评价模型,改进和完善了遗传算法,丰富了边坡稳定性评价理论与方法;在国内首次建立了基于 GIS 技术的公路边坡稳定性评价系统,为快速、系统地分析、评价边坡的稳定性奠定了基础;研究了高等级公路边坡岩土灌浆加固的机理、设计方法和加固效果检测,并进行了现场试验检测;结合公路边坡的特点,提出了边坡锚固系统的设计方法、技术标准、施工工艺;开发完成了岩石边坡

生物绿化技术,可使岩石边坡绿化实现边坡加固和环境保护、环境美化有机地结合。在路基沉降控制方面,对山区高等级公路填方路基不均匀沉降产生机理、处治措施及施工工艺进行了研究。根据物理模拟提出了压实度、挖填交界、开挖台阶对填方不均匀沉降变形的影响;基于弹塑性动力有限元计算分析的强夯设计参数的研究,对强夯法处理路基不均匀沉降的机理、设计方法、施工工艺进行了研究,提出强夯法处治路基不均匀沉降的设计计算方法和设计参数;采用渗流有限元方法对灌浆机理和设计参数进行了详细研究,提出了压力灌浆法处治路基不均匀沉降的设计计算方法、灌浆施工工艺及质量检测评价方法。

在路基防排水方面,研究了路基地下排水的控制因素,提出路基稳定排水渗流计算、非稳定排水渗流计算方法;采用数值模拟方法分析了路堤类路基地下排水渗流特点和半挖半填类路基地下排水渗流规律,特别是大型滑坡的内部排水效果模拟;在公路边坡特别是已建喷射混凝土坡面上采用喷涂固坡防水剂进行边坡防排水处理;建立了基于水文地质条件分析、排水机理分析及其三维渗流模拟、固坡防水剂开发的路基防排水系统设计方法。

本科研项目得到交通部科技司、公路司、重庆市交委、重庆高速公路建设公司等的大力支持,人民交通出版社对本书的出版予以极大的关注,在此,表示衷心的感谢。由于作者水平有限,书中难免有不少缺点甚至错误,恳请读者给予批评指正。

著作者

2005年9月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 山区道路路基修筑存在的主要问题	1
第二节 本书阐述的主要问题及研究方法	2
第三节 主要成果摘要	2

第一篇 山区公路挖方边坡稳定与加固

第二章 概述	7
第一节 公路挖方边坡特点及主要问题	7
第二节 挖方边坡稳定与加固技术的发展	9
第三节 研究方法和技术路线	12
第三章 公路边坡类型及其变形破坏机制	15
第一节 边坡的变形与破坏	15
第二节 边坡变形模式单元和形成条件	16
第三节 边坡类型划分和变形地质模式	17
第四节 边坡变形破坏机制研究	22
第四章 边坡稳定性评价方法	32
第一节 边坡稳定性评价方法论	32
第二节 边坡稳定性宏观评价	35
第三节 极限平衡分析	42
第四节 边坡稳定性评价有限单元法	49
第五节 基于 GIS 技术的边坡稳定性评价系统	55
第五章 边坡加固与防护	58
第一节 引言	58
第二节 边坡锚固技术	62
第三节 边坡灌浆加固技术	94

第二篇 山区公路填方路基沉降综合处治

第六章 山区路基不均匀沉降研究	105
第一节 不均匀沉降的表现形式	105
第二节 路基不均匀沉降的时空变化特征	112
第三节 填方路基不均匀沉降模式及成因机制	115
第四节 地下水对路基不均匀沉降的影响分析	120
第五节 路基沉降现场观测	123
第六节 路基不均匀沉降的诱因	129
第七章 强夯法处治路基不均匀沉降	132
第一节 强夯的动力有限元数值分析	133
第二节 强夯作用下的应力应变分析计算	139
第三节 强夯加固主要参数的数值计算分析	142
第四节 强夯工程设计与施工	153
第八章 压力灌浆处治路基不均匀沉降	172
第一节 国内外研究现状	172
第二节 灌浆机理	175
第三节 灌浆浆液材料及配方研究	192
第四节 灌浆工程试验	197
第五节 灌浆质量检测方法试验	205
第六节 试验结果综合分析	214

第三篇 路基防排水技术

第九章 路基系统水文地质条件分析	223
第一节 各类地质单元地下水运动的基本规律	223
第二节 路基系统与地质体相互作用分析	223
第十章 路基排水系统排水机理分析	226
第一节 稳定排水渗流计算	226
第二节 非稳定排水渗流计算	232
第三节 排水机理三维渗流模拟分析	233

第十一章	路基排水系统的布置与设计	239
第一节	路基边坡排水布置方案设计	239
第二节	路基内部排水布置方案设计	240
第三节	工程应用实例	242
第十二章	路基防水新材料	248
第一节	普通防水材料评述	248
第二节	新型固坡防水剂(L-1 型)	248
第三节	工程应用实例	253
参考文献		255

第一章 绪 论

第一节 山区道路路基修筑存在的主要问题

20 世纪 90 年代以来,随着我国经济建设的发展,特别是西部大开发战略的实施,作为国家基础设施体系的重要组成部分,高等级公路在我国得到了飞速的发展,联通全国主要大中城市的“五纵七横”国家高等级公路网正在形成;西部地区新增 2.5 万 km 公路的工程也正在加紧建设之中。这些公路的修建和投入使用对增强我国的综合国力、促进西部地区的开发将发挥极其重要的作用。

我国是一个多山的国家,山丘区面积占全国总面积的 70%。因此,今后我国的高等级公路建设将主要在山丘区。山丘区修筑的高等级公路中,由于地质、地貌条件的限制和公路线形的制约,深挖、高填路基和弯、坡、斜高架桥十分普遍,由此而产生的路基稳定性问题十分突出。

山丘区高等级公路路基稳定性问题的集中表现为“上吐下泻”。“上吐”即挖方边坡的坍方、滑坡,“下泻”即填方路基的坍塌、沉陷。挖方边坡的坍方、滑坡在公路中普遍存在。已完成和正在修建的山区高等级公路中,挖方边坡坍方、滑坡现象屡见不鲜,几乎“无路不坍、无路不滑”。每年用于挖方边坡事后治理、加固的费用高达十亿元人民币以上。挖方边坡一旦发生坍方、滑坡,不仅维修困难,而且将阻塞或中断交通运输,影响公路投资效应的发挥,同时造成不良的社会影响。因此,开展公路挖方边坡稳定与加固技术的研究具有重要意义。

填方路基的坍塌、沉陷常常是导致路面结构过早破坏的主要原因。由于高等级公路路面投资巨大,显然,由于不均匀沉降的产生导致路面结构过早破坏,不仅会大幅度地增加公路养护和维修费用,而且影响交通运输的正常运行,从而给国家的经济建设造成巨大损失,同时产生不良的社会后果。因此,研究解决路基不均匀沉降问题,具有极大的经济、技术价值和较好的社会效益。

综上所述,开展挖方边坡稳定与加固关键技术研究、填方路基不均匀沉降综合处治技术研究、路基防排水技术研究是十分必要的。通过研究,形成

以边坡加固新材料、新工艺为主的挖方边坡稳定与加固技术、以路基沉降处治措施为主的不均匀沉降综合处治技术、以路基排水新结构为主的路基排水技术。通过这些技术,使我国山区高等级公路的修筑技术迈上一个新的台阶,并产生较好的技术经济效益和明显的社会环境效益。

第二节 本书阐述的主要问题及研究方法

在挖方边坡稳定与加固方面,本书在总结归纳和充分吸收现有研究成果的基础上,结合公路边坡工程的具体特点和实体示范工程试验,提出公路边坡稳定性分析、评价方法和完善公路边坡工程锚杆、锚索及压力灌浆加固设计、施工技术。

在填方路基不均匀沉降综合处治方面,本书在总结归纳和充分吸收现有研究成果的基础上,结合公路路基不均匀沉降的具体特点和实体示范工程试验,提出路基不均匀沉降处治方法、措施及施工工艺。

在路基防排水方面,结合我国公路路基防排水工程和路堑、路基边坡防水的具体情况,研究的主要目标是:在总结归纳和充分吸收已有研究成果的基础上,结合公路路基和边坡防排水工程的具体特点和实体示范工程试验,对我国高等级公路建设中存在的路基防排水问题进行研究。

第三节 主要成果摘要

一、挖方边坡稳定与加固

(1)通过对前人研究成果和大量工程实例的分析和总结,提出了边坡失稳破坏在本质上是变形破坏的观点。根据公路边坡工程的具体特点,提出了解决公路边坡稳定性问题应遵循:边坡变形破坏机制分析→边坡稳定性计算与评价→边坡加固处治技术措施的技术路线和技术方法。经多个实体示范工程应用验证,这套工作方法和技术体系适用于公路边坡工程。

(2)在总结、分析不同类型边坡、不同岩体结构边坡变形破坏机制的基础上,提出了公路边坡类型的划分及相应的变形破坏模式,为选择边坡稳定性计算方法、快速进行边坡稳定性评价奠定了基础。

(3)对多种边坡稳定性评价方法进行了研究,提出边坡稳定性评价模糊—随机模型和基于非线性理论的神经网络方法、遗传算法的边坡稳定性

评价模型,丰富了边坡稳定性评价方法;提出了公路边坡变形破坏机制的物理模拟研究方法和边坡变形破坏全过程数值模拟技术。所建立的评价模型和所采用的技术方法,在理论上和工程应用上都有所创新。同时,针对这些方法和模型开发了基于 GIS 的边坡稳定性评价分析模块,初步实现了系统集成,为达到事前预测、及时决策、及时支护(控制)提供了技术手段。

(4)对锚杆、锚索加固边坡的锚固机理进行了较全面的研究,并通过工程试验提出了锚杆、锚索加固边坡的设计方法和施工关键工艺。

(5)开发出岩土廉价灌浆材料,通过工程试验提出了边坡岩土灌浆加固施工工艺。

(6)开发完成了岩石边坡生物绿化技术,应用这项技术可使岩石边坡全绿化,实现边坡加固和环境保护、环境美化有机的结合,具有重大的现实意义。

二、填方路基不均匀沉降综合处治方面

(1)通过对前人研究成果和大量工程实例的分析与总结,提出了路基不均匀沉降产生的原因和发展变化模式,指出了路基不均匀沉降的特点、方式和可能产生的后果。这对指导路基、路面设计施工具有极大的现实意义。

(2)通过理论分析、结合现场试验,对强夯法处理路基不均匀沉降的机理、设计方法、施工工艺进行了系统研究,提出强夯法处治路基不均匀沉降的设计计算方法和设计参数,提出了关键施工工艺,为这种方法的推广应用奠定了基础。

(3)对多种灌浆方法和灌浆理论进行了分析研究,并采用渗流有限元方法对灌浆机理和设计参数进行了详细研究,提出了压力灌浆法处治路基沉降的设计计算方法和灌浆施工工艺及质量检测评价方法。

(4)对土工格栅处治路基不均匀沉降进行了分析和试验,提出了土工格栅的布置形式、设计计算方法。

三、路基防排水方面

(1)由于路基内部地下水疏排不畅引起的一系列公路水毁问题和路基边坡因地表水入渗而引起坡体的变形破坏对路基稳定带来灾害性影响的问题,已经在现代高等级公路建设中引起了高度重视。路基、路面排水与防护设计已经成为高速公路建设工程中的重要组成部分。

(2)公路建设过程中,应根据路段的水文、地质和地形特征,确定是否需要路基排水或选择适当的排水形式。在选择方案时,应根据地形、土质的情况,综合考虑、合理布局,遇到特殊或复杂地形时更要慎重。

(3)路基排水系统设计中,要特别注意边坡(尤其是路堑边坡)地下水对路基的浸润、冲刷和入渗等作用将危害到路基长久稳定和使用安全的问题,对地下水位过高、地表水流丰富且裂隙发育或土层含水量过大的路基边坡,应当同时设置边坡排水系统。

(4)通过对路基地下排水系统排水机理及其模拟分析,可看出地下排水是一个较为复杂的物理过程,排水系统的排水效果受到多种因素影响。对于路堤类路基、半挖半填路基均显示出:以控制渗透系数、盲沟设置方案、入渗系数等项对排水的效果更为显著。

(5)在具体设计时,除了遵从规程、规范的基本准则外,还需要从以下方面考虑进一步优化的问题:

①地下排水系统包括排水孔、渗沟和盲沟,均能有效地降低地下水位、达到排水效果、保持路基处于干燥状态。

②边坡排水孔的作用是非常显著的,不仅对降低坡体地下水位有显著贡献,而且由于能有效拦截坡体的地下径流,因而对路基的水位降低也起着重要作用。

③盲沟的排水效果主要受路基渗透性能控制。一般说来,渗透性越强,盲沟的间距可越稀疏一些;而路基介质在施工过程中有夯实、压密等作用,其渗透性一般较小,从数值模拟分析结果来看,设置2~3列盲沟可取得较好的排水效果。

(6)研制开发了L-1型固坡防水剂。它可以喷涂、刷涂或辊涂在公路边坡坡面裸露的岩石、挂网喷浆坡面、用锚索和锚杆稳定的坡面,显著提高了边坡防水性能,抵抗了地表水(包括酸雨等)对坡表面的渗透、侵蚀和冲刷,大大延缓边坡的不良地质灾害的发育速度,使边坡得到长久稳固。L-1型固坡防水剂耐候性能强,使用方法简便,使用安全、无污染,应用范围广,实际使用效果显著,价格低廉,是一种良好的固坡防水新材料。

第一篇 山区公路挖方边坡稳定与加固

第二章 概 述

第一节 公路挖方边坡特点及主要问题

在我国,由于地理和地质条件的复杂性及巨大的区域差异性,地质灾害问题历来较为严重。地质灾害可以在各类地貌、地质环境下发生,在中国的西部地区,即环青藏高原周边地区更普遍。由于青藏高原的隆起,造成青藏高原周边特殊的地形地貌条件、构造条件,以及强烈的新构造运动和特殊的气候环境,为崩塌、滑坡和泥石流的发生提供了条件。

公路挖方边坡的坍塌、滑动是一种地质灾害。这种灾害在山区高等级公路中普遍存在。目前已修建完成的和正在修建的高等级公路,几乎是“无路不坍、无路不滑”,特别是在雨季,公路边坡的坍方、滑坡等地质灾害更为普遍。这些灾害的产生轻者影响公路交通的正常运行或导致公路修建的成本大幅度增加,重者导致公路交通中断甚至严重威胁着人民的生命和财产安全。据不完全统计,我国每年用于治理边坡坍塌、滑坡等地质灾害的费用多在十亿元以上。因此,边坡工程地质灾害的防治已成为我国山区公路建设中,特别是西部山区公路建设中的重大工程问题,亟待研究解决。

导致边坡失稳的原因是多方面的,如果说边坡的环境地质条件是其内因,那么人们对其稳定性问题认识不足,导致边坡开挖设计不合理、边坡加固措施和施工工艺不当、施工质量得不到可靠保证则是其主要外因。

自然边坡在其演变过程中,常表现为渐变(剥蚀和小规模垮塌或滑坡)和剧变(大规模崩塌或滑坡)两种形式,究竟出现何种演变形式,受地形、地层岩性、岩体结构、岩体物理力学特性和地下水特征等地质条件控制。公路边坡是人工边坡,人工边坡是否稳定,除受上述地质条件控制外,还受人类工程活动形式及规模(开挖和支护)的控制。在处于剧变过程中的自然斜坡上开挖边坡,若不采取适当的支护措施,必然会使边坡变形破坏进一步加剧。在处于渐变过程中(稳定)的自然斜坡上开挖人工边坡,当开挖方式和规模不至于从根本上改变边坡的自然平衡条件时,开挖形成的边坡就不会失稳破坏,否则将诱发边坡失稳。