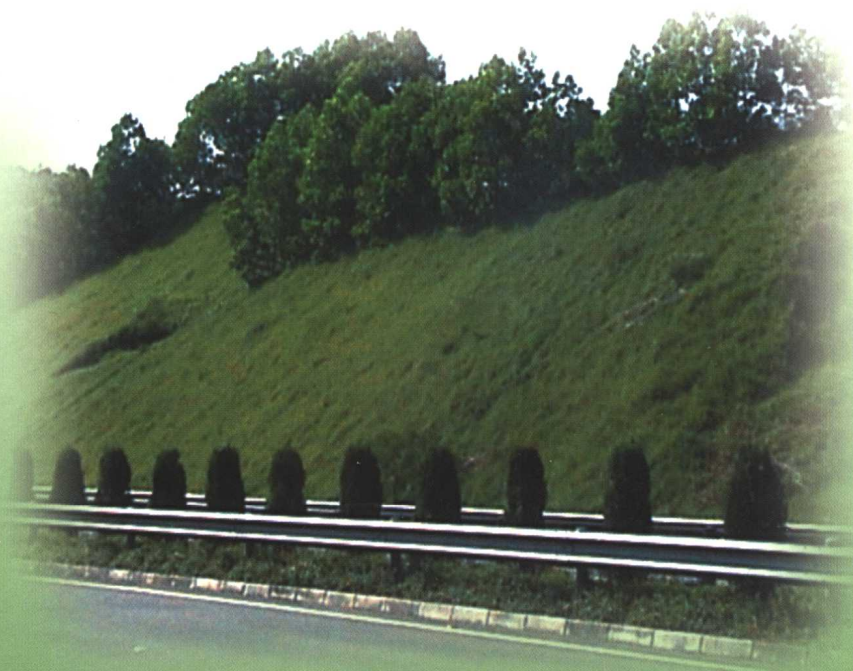




公路边坡稳定技术

Comprehensive Technique on the
Stability of Highway Slope

邓卫东 等 著



人民交通出版社

China Communications Press

交通科技丛书

Comprehensive technique on the stability of highway slope

公路边坡稳定技术

邓卫东 等 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书采用调研、理论分析、数值仿真分析、室内试验、现场试验等多种手段,对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。本书分为两篇共十一章,主要阐述边坡破坏机理、边坡稳定性分析方法、边坡岩土力学参数获取方法、边坡稳定安全系数取值和边坡支护的优化设计,以及七种新材料与新技术的设计、施工和质量检测与验收等内容。

本书可供公路工程设计与管理相关人员借鉴参考,亦可作为大专院校相关专业师生学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

公路边坡稳定技术/邓卫东等编著. —北京:人民交通出版社,2006.11

ISBN 7-114-06242-7

I. 公… II. 邓… III. 公路路基-边坡稳定

IV. U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 130429 号

交通科技丛书

书 名:公路边坡稳定技术

著 作 者:邓卫东 等

责任编辑:沈鸿雁 曲 乐

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

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

开 本:787×980 1/16

印 张:32.75

字 数:584千

版 次:2006年11月 第1版

印 次:2006年11月 第1次印刷

书 号:ISBN 7-114-06242-7

印 数:0001~4000册

定 价:60.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书,由本社负责调换)

前 言

山区公路建设中遇到大量的填方边坡和挖方边坡，其稳定问题一直没有得到很好的解决，长期困扰着我国山区公路的建设。无论在施工期，还是在公路运营期，边坡失稳事故时有发生，给国家和人民的生命财产带来严重损失，因此受到人们的普遍关注。

边坡稳定问题是岩土工程古老而又需要长期研究的课题，对此，国内外已开展过大量研究，取得了丰硕的成果。如何在已有成果的基础上，结合公路工程特点，建立起合适的边坡稳定性评价方法，开发新的边坡加固与防护技术，拓宽边坡治理途径，是公路边坡稳定面临的主要任务之一。

本书采用调研、理论分析、数值仿真分析、室内试验、现场试验等多种手段，对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，初步建立起相对系统的公路边坡稳定性评价方法，开发出了七种比较实用的公路边坡加固与防护的新材料与新技术，期望能为公路边坡的设计、施工及边坡的灾害治理提供参考和指导。

本书分为两篇共十一章。第一篇为边坡的设计理论与方法，主要阐述边坡破坏机理、边坡稳定性分析方法、边坡岩土力学参数获取方法、边坡稳定安全系数取值和边坡支护的优化设计等内容；第二篇为边坡加固与防护的新材料与新技术，主要阐述了七种新材料与新技术的应用设计、施工和质量检测与验收等内容。全书由6位撰写者完成，重庆交通科研设计院邓卫东撰写第一至第三章，并参与了第十章的撰写；重庆交通科研设计院唐胜传撰写第四章；重庆交通科研设计院柴贺军撰写第五章，并参与了第二章第二节的撰写；贵州省交通勘察设计研究

院罗强和龙万学撰写第六至第八章；湖南省交通科学研究院李志勇撰写第九至第十一章。全书由邓卫东统稿。

本书是以2001年度交通部西部交通建设科技项目“公路边坡稳定成套技术”的部分研究成果为基础编写的。在项目的研究和本书的编写过程中，始终得到了交通部科教司、西部交通建设科技项目管理中心，以及重庆、贵州、湖南、云南等省（市）交通厅（委）的关怀与支持，项目的其他参加人员为此亦付出了辛勤的劳动，尤其是解放军后勤工程学院郑颖人院士在边坡稳定性分析的极限平衡法和有限元强度折减法方面，成都理工大学的李天斌教授在边坡岩体力学参数方面作出了很大贡献，在此，一并表示深切的谢意。

由于笔者理论水平和实践经验有限，书中难免有欠缺、不妥甚至错误之处，恳请各位专家、学者和广大读者批评指正。



2006年10月于重庆

目 录

第一篇 边坡设计理论与方法

第一章 绪论	3
第一节 公路边坡稳定面临的主要技术问题	3
第二节 阐述的主要内容及研究思想	5
第二章 边坡破坏机理	8
第一节 路堤边坡破坏机理	8
第二节 路堑边坡破坏机理	36
第三章 边坡稳定性评价方法	68
第一节 边坡稳定性分析的极限平衡方法	68
第二节 边坡稳定性分析的新方法——有限元强度折减法	88
第三节 路堤填料抗剪强度特性及抗剪强度参数试验方法	111
第四节 土岩接触面强度特性及参数	125
第五节 路堑边坡岩体力学参数	130
第六节 路堤边坡稳定性计算方法与稳定安全系数取值分析	164
第七节 路堑边坡稳定性计算方法与稳定安全系数的取值分析	180
第四章 基于 GIS 的边坡支护方案优化设计系统	189
第一节 公路边坡宏观稳定性评价	191
第二节 公路边坡稳定性分级	207
第三节 公路边坡支护方案优化	226
第四节 基于 GIS 的公路边坡支护设计系统	236
本篇参考文献	259

第二篇 边坡加固与防护的新材料与新技术

第五章 桩身预应力抗滑桩支挡技术	269
第一节 桩身预应力抗滑桩的受力机理—数值模拟分析	269
第二节 桩身预应力抗滑桩设计计算方法	286

第三节	桩身预应力抗滑桩的构造设计和施工工艺·····	300
第四节	桩身预应力抗滑桩的工程应用·····	307
第六章	高强锚固灌浆材料的开发与应用·····	321
第一节	高强锚固灌浆材料的基本特性·····	321
第二节	聚丙烯纤维水泥砂浆增强锚固作用的机理·····	332
第三节	聚丙烯纤维水泥砂浆预应力锚固的设计·····	336
第四节	聚丙烯纤维水泥砂浆锚固的施工与质量检查验收·····	347
第七章	边坡灌浆处治技术·····	357
第一节	灌浆材料的基本特性·····	357
第二节	灌浆加固边坡的机理与理论·····	372
第三节	灌浆加固边坡的设计·····	378
第四节	灌浆加固边坡的施工·····	388
第五节	灌浆加固边坡的质量检测与验收·····	394
第六节	灌浆加固处治边坡的工程应用·····	396
第八章	植被混凝土的开发及其护坡技术·····	409
第一节	植被混凝土材料及其特性·····	409
第二节	植被混凝土护坡的施工工艺与养护管理·····	423
第九章	土工合成材料生态护坡技术·····	434
第一节	应用于生态护坡的土工合成材料·····	434
第二节	土工合成材料生态护坡的设计·····	440
第三节	土工合成材料生态护坡技术的施工与质量控制·····	445
第十章	土工合成材料网喷射混凝土边坡防护技术·····	452
第一节	喷射混凝土土工合成材料及其性能·····	452
第二节	土工合成材料网喷射混凝土边坡防护设计·····	453
第三节	土工合成材料网喷射混凝土边坡防护的施工与质量控制·····	461
第四节	工程应用·····	465
第十一章	土工格室路堤加筋技术·····	469
第一节	土工格室的基本性能·····	469
第二节	土工格室与土相互作用机理·····	471
第三节	土工格室加筋效果分析·····	483
第四节	土工格室加筋路堤设计·····	501
第五节	土工格室加筋路堤的施工质量控制·····	504
本篇参考文献 ·····		512

第一篇

边坡设计理论与方法

第一章 绪 论

第一节 公路边坡稳定面临的主要技术问题

在山区修建高等级公路，不可避免地会遇到大量的深挖高填路基。已建高速公路，最高的填方已超过 50m，最高的路堑挖方边坡高度已超过了 100m。尽管山区高等级公路的建设越来越倡导环境保护，尽力避免深挖高填，但路基作为公路的主要结构，所遇地形复杂，其边坡稳定问题仍不可回避。

1988 年，我国第一条高速公路——沪嘉高速公路建成，高等级公路在我国的建设历史已有近 20 年，山区高等级公路的建设也有 10 年，但路基边坡失稳问题一直没有得到很好的研究解决。近年来的工程实践表明，路基边坡失稳仍然是最为普遍和突出的问题之一，特别是在雨季，公路边坡的塌方、滑坡等地质灾害现象更为普遍。边坡破坏造成的危害有如下几方面：

(1) 边坡破坏带来系列的工程问题和环境问题，严重的中断交通，甚至造成人员伤亡，给国家和人民经济造成巨大损失。

(2) 边坡的表层破坏使水土流失，还进一步诱发边坡的深层、浅层破坏（图 1-1）。按流失土壤的价值，西南地区一条 100km 长的 4 车道高速公路，如不做好边坡防护，其水土流失所带来的损失将达 8000 万元左右。

(3) 边坡的浅层破坏造成边坡溜塌、落石，还危及行车安全，导致人员伤亡事故时有发生。贵州某高速公路边坡落石造成人员伤亡，重庆某公路边坡落石致 3 人死亡（图 1-2）等事故仍让人记忆犹新。



图 1-1 边坡表层水土流失



图 1-2 国道 319 线重庆段边坡破坏致 3 人死亡

(4) 边坡深层破坏带来的后果更加严重。除在公路建设及养护期间需要花费大量的人力和财力进行处治外,还往往中断交通。处治后发生病害的边坡再进行治理时,技术和施工难度增加。

(5) 路堤边坡破坏往往导致路面断板、开裂,这种现象较为普遍,被称为难以解决的顽症,严重的情况是出现路堤整体滑动(图 1-3 和图 1-4),中断交通,除给公路运营管理部门带来直接的经济损失外,还给用路者带来难以估量的间接损失。



图 1-3 福建某高速公路路堤破坏



图 1-4 四川某高速公路的路堤边坡破坏

公路路基边坡面广、量多、涉及面广、影响面大,其稳定问题解决不好,将成为严重制约和阻碍山区高等级公路进一步发展的主要因素之一。

在我国山区高速公路建设的十年历程中,通过不断的实践和学习,对路基边坡稳定及其加固处治技术问题有了一定的认识,并取得了很多研究成果。从技术层面看,其发展大致可分为以下两个阶段。

1. 20 世纪 90 年代初至 90 年代中期的山区高速公路建设起步阶段

此阶段重视高填路基的稳定性,开展了一些山区软弱地基路堤的稳定性研究,初步建立了高填路基稳定性分析概念,将土力学的边坡稳定性分析方法引入路基稳定性分析中,提出了一些地基处理技术。这一阶段,由于高速公路还多处于丘陵地区,对路堑边坡的稳定性还未引起重视,路堑边坡的加固多采用挡土墙,边坡的防护多采用浆砌片石。

2. 20 世纪 90 年代中期至 90 年代末的山区高速公路建设初期发展阶段

此阶段大量的高速公路开始进入山区,面临的地质条件越来越复杂,已建成的高速公路开始暴露出一些问题。这一阶段,人们开始关注路基的不均匀沉降、路堑边坡的稳定性、边坡防护与环境保护结合的问题。针对这些问题,研究人员开展了相关的研究,取得了较好的成绩。比较有代表性的有:

(1) 针对填方路基稳定和不均匀沉降,开展了强夯、灌浆、土工合成材料处治技术的研究,并将这些技术应用到一些工程中。

(2) 学习相关的先进知识和经验, 引入工程地质学的原理与方法认识边坡稳定性问题, 开展了抗滑桩、预应力锚索、锚杆等边坡加固处治技术的研究。

(3) 开展了边坡植被防护技术的研究, 开发出了三维网、有机材料等边坡植被防护技术。

虽然取得了较好的成绩, 但在许多问题上仍需要进行深入研究。如在边坡稳定性评价方法上, 尚未结合公路边坡量多面广、地质条件复杂多变、形成时间短等突出特点, 建立起相对系统完善的方法; 在边坡加固处治、边坡防护技术上, 一方面已开发的方法在技术上还不够完善, 难以推广应用, 另一方面, 现有技术尚不能适应更多复杂的边坡条件, 需要进一步发展新的技术。

在 2005 年初, 为适应新的发展形式需要, 我国对未来 30 年的国家高速公路网进行了规划。即再用 30 年时间, 形成全国 7 条首都放射状、9 条南北纵向和 18 条东西向共 8.5 万公里高速公路网, 实现东部地区 30min 上高速, 中部 1h 上高速, 西部 2h 上高速的目标。

到 2005 年末, 我国共建成 4.1 万公里高速公路, 占规划总里程的 48% 以上。也就是说, 在未来 30 年内, 我国还将有 4.4 万公里的高速公路需要建设, 同时, 还有众多的其他等级公路, 也面临数量庞大的公路改造和养护。面临的边坡问题将更加复杂, 工程人员任重道远, 边坡稳定问题在相对长的时间内, 仍将是山区公路建设面临的主要技术问题之一。

第二节 阐述的主要内容及研究思想

本书针对高等级公路建设中边坡工程的薄弱环节和所面临的主要技术问题, 开展边坡的设计理论与方法、边坡加固处治与防护技术两大方面的研究, 重点阐述边坡破坏机理、边坡稳定性评价方法、边坡优化设计、边坡加固和防护的一些新材料和新技术。

一、边坡破坏机理与稳定性评价方法

对边坡破坏机理和稳定性评价方法, 国内外进行了不少研究, 如何结合公路边坡的环境条件、使用要求和技术水平, 建立相对完善的边坡稳定性评价方法, 是公路边坡所面临的关键技术问题。

针对这一问题, 首先在广泛调查的基础上, 分析归纳路堤所处的典型地质地貌环境和路堑边坡的主要地质环境特征, 总结出边坡破坏的主要形式, 并从工程地质学的角度分析路堑边坡的破坏机理。在此基础上, 采用

室内模拟试验和数值分析方法,分析典型条件下边坡破坏与变形特征,以及有关因素的影响,揭示边坡破坏机理。

边坡稳定性评价,包含稳定性分析方法、岩土力学参数获取方法和稳定安全系数取值三个方面。对稳定性分析方法,主要通过对现有方法的分析,结合公路行业现状,提出合适的边坡稳定性分析方法,并探索有限元强度折减法及其应用;对岩土力学参数,通过调研和室内外试验,结合现有方法,对填土强度参数、软弱结构面、硬性结构面、节理化岩体强度特性进行研究,建立起一套简易适用的公路边坡岩土体力学参数获取方法;对边坡稳定安全系数,在分析现有安全系数取值合理性的基础上,结合实际案例的计算分析,推荐出边坡稳定安全系数。

二、边坡优化设计

实地调查发现,在西南山区公路中,约有 20%左右的边坡采取了不恰当的加固与防护措施。有些边坡加固防护“过度”,有些边坡则加固防护不足。前者造成了人力物力的巨大浪费,后者则不能有效地保证边坡安全,导致人民群众生命财产的损失。因此,如何在现有的理论基础上,综合现有的边坡加固与防护方法,并进行优化,以达到“合理”地对边坡进行加固与防护设计,具有重要的理论和实际意义。

对边坡优化设计,在借鉴前人研究成果的基础上,充分吸收相关行业的研究成果和成功经验,结合公路工程实际情况,从线路规划阶段开始,建立一套包含边坡稳定性评价、边坡工程加固与防护设计直至优化设计的方法,并利用 GIS 技术的强大空间数据管理能力和良好的用户界面,开发基于 GIS 的公路边坡优化设计软件,解决优化设计手段。

三、边坡加固与防护的新材料和新技术

根据边坡失稳破坏的空间形态,可将边坡失稳形态分为深层、浅层和表层三种。无论对哪一种破坏,都需要发展相应的技术,对其进行处治。

对深层和浅层破坏的处治,普遍称之为加固;对表层破坏的处治,称之为防护。边坡加固与防护技术的发展通常与新理论、新材料、新工艺的出现密切相关。

目前,工程人员已采用了多种方法进行公路边坡的加固与防护。针对现有技术存在的问题和薄弱点,一方面完善相关技术;另一方面开发出一些新材料与新技术。笔者重点进行了以下新材料与新技术的研究:

- (1) 预应力抗滑桩支挡技术;
- (2) 高强锚固灌浆材料;

- (3) 边坡灌浆处治技术；
- (4) 植被混凝土护坡技术；
- (5) 土工合成材料生态护坡技术；
- (6) 土工合成材料网喷射混凝土边坡防护技术；
- (7) 土工格室路堤加筋技术。

对这些新材料与新技术，笔者采用理论解析、数值分析、室内试验、现场试验以及依托工程实施等手段进行了研究。本书主要阐述了材料特性、设计理论与方法、施工工艺、质量检查手段与方法等方面的内容。

第二章 边坡破坏机理

第一节 路堤边坡破坏机理

一、路堤破坏的主要现象及原因

山区公路路堤所处条件主要有：地基土性较为均匀的平坦区域的路堤，地基土性不均匀但地势较为平坦的路堤，半填半挖及斜坡地基上的路堤，设有支挡或无支挡结构物的路堤。不同的路堤，其破坏表现不同。一般情况下，施工期间出现路堤整体滑动、坍塌的事件时有发生，通过处理，在通车后出现整体滑动、坍塌的情况并不多见，破坏形式更多地表现为路堤变形引起的路面开裂，不均匀沉降或变形导致的路面不平整。究竟发生整体滑动或坍塌、不均匀沉降的情况如何，哪一种路堤形式通过现行方法设计施工后出现破坏的可能性较大，均需通过调查予以了解。

路堤边坡发生破坏的原因很复杂，除与路堤形式有关外，地基情况没勘探清楚、设计存在缺陷、未按规定进行施工等，都可能导致路堤出现破坏。为掌握路堤破坏的主要现象及原因，选择了南宁—桂林高速公路、贵阳—新寨高速公路、成都—雅安高速公路、成都—南充高速公路、太原—旧关高速公路等山区高等级公路，进行广泛深入地调查。

1. 广西南宁—桂林高速公路

全线为水泥混凝土路面，通车已近五年，存在较多的高填方路堤。调查了12段路堤，其所处位置、高度及形式，破坏现象以及引起破坏的主要原因总结于表2-1。通过调查得出：

南宁—桂林高速公路高填方路堤破坏现象及原因

表 2-1

序号	桩号	中心填高 (m)	路堤形式	破坏现象	破坏的主要原因
1	K727+800~ K727+950	26.5	斜坡上路堤	不均匀沉降， 路面开裂	排水不良、填料不佳
2	K667+300~ K667+575	31.5	一般路堤	—	—

续上表

序号	桩号	中心填高 (m)	路堤形式	破坏现象	破坏的主要原因
3	K412+090~ K412+250	14.0	半填半挖路堤	不均匀沉降, 路面开裂	排水不畅、填料不佳、填挖交界处理不当、古滑坡, 压实不足
4	K419+500	18.1	一般高路堤	—	填挖交界及台阶处理不当
5	K424+500~ K424+700	16.0	一般高路堤	不均匀沉降, 路面开裂	填挖交界及台阶处理不当、填筑速度过快
6	K430+900	36.0	有护脚挡墙的 半填半挖路堤	不均匀沉降, 路面开裂	排水不良, 填挖交界及台阶处理不当、压实不足
7	K432+600	35.0	半填半挖路堤	不均匀沉降, 路面开裂	排水不良、填料不佳、填挖交界及台阶处理不当
8	K447+200	36.1	斜坡上路堤	不均匀沉降, 路面开裂	排水不良、填挖交界及台阶处理不当
9	K447+800	26.4	一般路堤	—	—
10	K448+950	20.4	一般路堤	—	填挖交界及台阶处理不当
11	K465+720	28.8	斜坡上路堤	不均匀沉降, 路面开裂	排水不良, 填料不佳、存在软基
12	K467+550	26.0	一般路堤	不均匀沉降, 路面开裂	排水不良, 填挖交界及台阶处理不当、软基压缩变形过大

(1) 一般路堤有 6 段, 出现破坏的有 2 段, 占 33%; 斜坡路堤有 6 段, 均出现了不同程度的破坏。因而斜坡路堤应是山区路堤设计关注的主要对象。

(2) 12 个高路堤中, 填挖交界处有裂缝的有 7 个, 有错台的有 1 个, 填挖交界处理不当是引起路堤破坏的重要原因之一。

(3) 除一般路堤相对较少遭受水害外, 其他(半填半挖路堤、斜坡上路堤、有护脚挡墙的半填半挖路堤) 三种或多或少都由于水的浸入, 造成路堤不同程度的破坏。斜坡上的路堤更应考虑水的影响。

(4) 良好的地基是高路堤稳定的前提。基底软基清理不彻底, 会造成较明显的不均匀沉降。

(5) 不良填料(如高液限黏土、潮湿、杂乱, 不易压实的硅质灰岩、遇水性质易急剧恶化的炭质泥岩夹黏土等) 引起路堤出现病害的有 5 段, 占整个调查路堤段的 40%。填料的正确选择是保证路堤填筑质量的关键。

(6) 由于压实不足引起路堤破坏的有 2 段, 占 16%。桥头填方, 支挡结构后填挖交界处的填方仍是压实的薄弱环节。

2. 贵州贵阳—新寨高速公路

全长 200 多公里, 路面为柔性路面, 于 1999 年年底建成通车。调查了出现路面裂缝或塌陷的 4 处路段, 基本情况如图 2-1 和表 2-2 所示。

贵阳—新寨高速公路路堤稳定和均匀沉降情况

表 2-2

段落桩号	中心填高 (m)	断面形式	破坏现象	主要原因分析
K22+960~K23+010 (龙里水厂段)	7	一般路堤	纵向路面裂缝, 距路基顶边缘 2~3m 处, 长度约 20m	地基未处理好
K70+500~K70+600	10	一般路堤	纵向路面裂缝, 距路基顶右侧边缘 2.5m 处	右侧设一路肩重力式砌石挡墙, 挡墙侧位移动引起裂缝
K70+620~K70+670	-1.5	条带型斜坡路堤	纵向路面裂缝, 距路基顶右侧边缘 4.0m 处	路堤稳定性不足
K70+830~K70+950 (江西坡滑坡段)	—	路基挖填均有	路基塌陷	未探明原始地基情况, 路基处在一直处于蠕变状态滑坡的中上部, 少量的开挖回填便诱发滑动体滑动

表 2-2 中所列 4 段路堤均处于斜坡地基上, 特殊的地形地质情况是造成路堤失稳的客观原因, 而对地基地质条件、地基土性情况认识不重视是造成路堤失稳的主观原因, 因此, 斜坡上路堤的稳定性设计值得设计人员重视。



图 2-1 贵新路出现的路面塌陷情况