

高民欢 李 辉 张新宇 史建方 编著

# 高等级公路 边坡冲刷理论与 与植被防护技术

Erosive Theory and Vegetation Protection of High-type Highway Embankment Slope



人民交通出版社  
China Communications Press

U418/5

2005

# 高等级公路 边坡冲刷理论与 植被防护技术

高民欢 李 辉 张新宇 史建方 编著



人民交通出版社

China Communications Press

(英商维多利亞書局經銷)

## 内 容 简 介

本书是在总结我国高等级公路边坡防护技术与实施的经验与教训的基础上,结合近几年关于冲刷防护技术研究方面的主要成果,并吸取了国内外有关的先进技术编写而成。全书共十五章,第一章简要阐述了冲刷防护的基本概念;第二章介绍了公路边坡稳定性计算与防护措施;第三章至第五章主要阐述了边坡冲刷理论与试验;第六章详细介绍了公路边坡防护临界高度的含义和确定方法;第七章至第八章介绍了路面与边坡表面汇水与排水系统对冲刷防护的影响和作用;第九章至第十五章则介绍了各类植被防护的设计与施工。

本书可作为高等级公路设计、施工和管理的工程技术人员的学习培训教材或操作指南,亦可作为大专院校相关专业学生的学习参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高等级公路边坡冲刷理论与植被防护技术/高民欢等  
编著. —北京:人民交通出版社, 2005.7

ISBN 7-114-05640-0

I. 高… II. 高… III. ①公路路基-边坡-冲刷  
②公路路基-边坡-植被-防护 IV. U418.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第074804号

书 名:高等级公路边坡冲刷理论与植被防护技术

著 者:高民欢 李 辉 张新宇 史建方

责任编辑:赵蓬

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:26.75

字 数:327千

版 次:2005年9月第1版

印 次:2005年9月第1次印刷

书 号:ISBN 7-114-05640-0

印 数:0001~4000册

定 价:45.00元

(如有印刷、装订质量问题,由本社负责调换)

# 前言

---

目前我国高等级公路尤其是高速公路建设方兴未艾,在建设质量和建设水平上,都取得了长足进步。特别是广大工程技术人员在边坡防护领域,经过多年的理论探索和工程实践,积累了丰富的边坡防护理论与实际经验。过去的防护理念主要是从土力学角度考虑路基边坡的稳定,而水对边坡冲刷造成的失稳却重视不够,或是尽管认识到水对边坡的危害,但没有进行相应的研究。

针对这种情况,我们在总结我国高等级公路边坡防护技术与实施的经验与教训的基础上,结合近几年关于冲刷防护技术研究方面的主要成果,并吸取了国内外有关的先进技术,编写了这本书。全书共十五章,第一章简要阐述了冲刷防护的基本概念;第二章对公路边坡稳定性计算与防护措施做了介绍,以便更好地与冲刷防护进行区分;第三章至第五章主要阐述了边坡冲刷理论与试验,是本书的理论基础;第六章详细介绍了公路边坡防护临界高度的含义和确定方法,是冲刷理论在工程实际中的应用和后续边坡防护设计

的依据;第七章至第八章介绍了路面与边坡表面汇水与排水系统对冲刷防护的影响和作用;第九章至第十五章则介绍了各类植被防护的设计与施工。

本书由高民欢、李辉、张新宇、史建方编著,高民欢统稿。分工为:高民欢编写第一章、第二章、第三章;张新宇编写第七章、第八章、第九章;李辉编写第四章、第五章、第六章;李志刚编写第十章、第十一章;张连强编写第十二章、第十四章;史建方编写第十三章、第十五章。

限于时间和作者水平,书中疏漏、不足之处在所难免,敬请广大读者批评、指正。最后,对所有为本书的完成和出版给予帮助与支持的同志表示最衷心的感谢。

**作者**

**2005年4月于石家庄**

# 目 录

第一章 绪论	1
第二章 边坡防护概论	9
第一节 岩土边坡分类与破坏类型	9
第二节 边坡稳定性分析	17
第三节 边坡稳定的工程措施	29
第三章 边坡冲刷机理分析	39
第一节 边坡冲刷成因简析	39
第二节 边坡冲刷影响因子分析	46
第三节 边坡冲刷中的细沟侵蚀机理研究	56
第四章 边坡冲刷计算	65
第一节 边坡临界冲刷坡角计算	65
第二节 边坡土冲刷量计算	72
第五章 冲刷防护试验	82
第一节 概述	82
第二节 公路边坡冲刷现象观测与分析	83
第三节 边坡冲刷规律试验	102
第四节 野外模拟试验	110

<b>第六章 边坡防护临界高度</b> .....	118
第一节 概述 .....	118
第二节 理论分析 .....	119
第三节 试验段野外观测结果中有关临界高度的分析 .....	120
第四节 调研结果中有关临界高度的分析 .....	127
第五节 试验段野外模拟冲刷试验结果中有关 临界高度的分析 .....	130
第六节 应用示例 .....	131
<b>第七章 路基路面排水优化设计计算</b> .....	133
第一节 公路排水设计现状及不足 .....	133
第二节 路肩排水设施优化设计 .....	135
第三节 路表排水泄水口设计合理性的验核方法 .....	144
第四节 暗式排水沟的设计计算方法 .....	155
第五节 边沟排水设计 .....	167
<b>第八章 路面排水方式对边坡防护的要求</b> .....	181
第一节 概述 .....	181
第二节 不同路面排水方式下的公路边坡水流流速的 计算方法 .....	181
第三节 路面排水方式对边坡防护形式的影响分析 .....	187
<b>第九章 路基边坡冲刷综合防护与生态环境保护</b> .....	193
第一节 综合防护的必要性和意义 .....	193
第二节 公路建设与生态 .....	205
第三节 植被护坡的生态学理论 .....	218
第四节 植被护坡理论 .....	230
<b>第十章 植被护坡设计与施工</b> .....	249
第一节 草皮护坡 .....	249
第二节 三维植被网护坡 .....	253
第三节 藤蔓植物护坡 .....	262

## 目 录

<b>第十一章</b>	<b>边坡综合防护方法设计与施工</b> .....	265
第一节	骨架植草护坡设计示例 .....	265
第二节	骨架植草护坡施工与经济性评价 .....	270
第三节	路堑边坡景观设计示例 .....	273
<b>第十二章</b>	<b>土工格室植被护坡设计与施工</b> .....	287
第一节	简介 .....	287
第二节	土工格室作用机理简析 .....	288
第三节	土工格室护坡作用机理的仿真分析 .....	291
第四节	岩石边坡土工格室稳定性分析 .....	298
第五节	土工格室护坡设计与施工 .....	305
<b>第十三章</b>	<b>液压喷播植草护坡设计与施工</b> .....	306
第一节	简介 .....	306
第二节	草坪喷播种植技术 .....	307
第三节	客土喷播种植技术 .....	312
第四节	挂网喷播种植技术 .....	318
第五节	经济造价分析 .....	321
<b>第十四章</b>	<b>高陡边坡的植被护坡技术</b> .....	325
第一节	钢筋混凝土框架填土植被护坡 .....	325
第二节	预应力锚索框架地梁植被护坡 .....	329
第三节	预应力锚索地梁植被护坡 .....	333
<b>第十五章</b>	<b>TBS 植被护坡绿化技术</b> .....	335
第一节	技术简介 .....	335
第二节	基材混合物基本性质研究 .....	339
第三节	结构设计 .....	381
第四节	施工技术 .....	397
第五节	工程应用 .....	407
<b>参考文献</b>	.....	415



# 第一章 绪 论

## 一、冲刷防护基本概念和必要性

路基是公路的主要组成部分,路基边坡质量的好坏直接影响到路基稳定和路基的使用质量。边坡的破坏主要有 2 种类型:

(1)由于边坡本身的稳定性不够,随着时间的推移,边坡发生徐变变形而最终失稳,形成整体或局部滑坡破坏;

(2)边坡本身稳定性满足要求,但因边坡坡面常年暴露于自然环境中,承受着各种自然条件的影响,其中水的冲刷作用尤为明显,由于水流对边坡侵蚀、浸润,使得边坡土体颗粒之间抗剪能力减小,而造成的边坡表面土体失稳现象屡见不鲜,如图 1-1 所示。前者可以在设计中充分考虑加以克服,而后者,即雨水对边坡的冲刷产生的失稳却是无法避免的。而且边坡冲刷造成滑坡失稳等将直接导致路面的损坏,修复难度大、费用高。所以边坡受雨水冲刷,必然要进行防护。

土体侵蚀冲刷过程,实际是一个具有整体性和综合性作用的系统过程。整体性表现为侵蚀作为一种过程,动力学作用贯穿始终,诸因素的作用仅仅是对动力学过程的影响、辅助或参与;综合性表现为在动力学过程中,诸因素间存在互动耦合效应,即诸因素间有相互作用和影响。土体侵蚀的内在机理是土体的分解和土粒的搬移。其产生是通过降落在土层表面的具有一定能量的降雨首先与地表土发生非弹性碰撞,使土原状结构受到破坏,并进而消除以及降低土之间的粘结作用,最终使土颗粒发生分散,处于“孤立”及“半孤立”状态。当

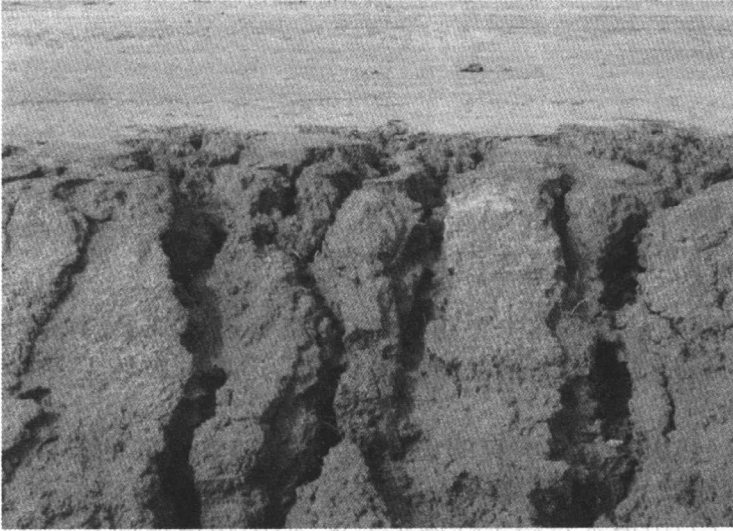


图 1-1 粉砂土路基边坡冲刷

土的人渗能力小于降雨的供水能力之后,坡面即产生径流,通过径流的冲刷侵蚀能力,不但可以将坡面上已经处于“孤立”及“半孤立”状态的土颗粒搬运输出坡面,同时也可将本身径流侵蚀作用所侵蚀掉的部分土粒搬运输出坡面。随着降雨的继续,坡面上径流的不断增大,侵蚀效果愈来愈显著;同时由于汇流以及径流集中作用,坡面径流最终都将输入沟道,并在沟道径流通过的两壁以及沟道内也产生侵蚀;而最终在坡面上形成大范围的冲刷现象。

很显然,研究边坡冲刷机理是研究边坡防护技术的前提条件,是必不可少的基础。但是过去的防护主要从土力学角度考虑路基边坡的稳定,而水对边坡冲刷造成的失稳却重视不够,或是尽管认识到水对边坡的危害,但没有进行相应的理论研究。并且国内在边坡防护工程设计方面虽然形式多样,但以前由于认识不足,重视程度不够,因此对边坡防护的系统

研究不多,多采用经验类比法,缺乏理论依据。国外高速公路边坡防护设计主要以植被为主,考虑生态环境保护及景观效果,与我国的设计思想不一样,显然,要提高我国边坡防护工程的设计水平,必须借鉴国外的经验,结合我国的实际情况,大胆创新。

### 二、冲刷防护意义

路基工程是公路工程的主要组成部分,路基质量的好坏直接影响到路面的使用质量。路面的损坏往往与路基排水不畅、边坡失稳等有直接关系,而且修复难度大、费用高。其中边坡常年暴露于自然环境中,承受着各种自然条件的影响,如气象变化、水流冲刷等,使边坡发生各种变形、病害甚至破坏,而起主导作用的是水对路基边坡的破坏,因此边坡防护与排水工程紧密结合,就是要防水、治水、排水,从而防治边坡病害,保证边坡稳定,改善环境景观和生态平衡。

随着我国公路等级和人们生活水平的提高,路基边坡防护日渐引起公路部门的重视,在国内多年的道路工程实践中,积累了不少防护技术的经验。由于高速公路线形标准较高,比选方案少等因素,造成路基高填深挖现象普遍存在,同时大交通量给沿线造成的交通污染不但威胁沿线居民的身体健康,而且影响区域内的生态平衡。由于诸多原因,我国公路的环保技术研究还不能完全适应当今高速公路发展的建设要求,同时关于边坡冲刷防护、排水、交通环境美化的综合设计也鲜为报道。因此国内高速公路边坡防护存在的主要问题有:

- (1)缺乏系统的防护方案、措施研究和综合设计;
- (2)在防护方案、防护形式选择方面缺乏技术、工程经济比较分析;
- (3)植物物种选择方面,随意性大,缺乏和园林部门的探讨研究;

(4)由于各地区的差异,缺乏各分区最佳防护典型形式,使设计人员难以操作;

(5)没有将防护、排水、景观综合考虑。

这样,由于理论研究上的不足和设计上的随意性,同时由于不同地区的地理、气候及工程建设规模的差异,决定了不同地区综合防护方案的差异性,所以在边坡冲刷机理研究的基础上,对不同地区的高速公路边坡进行综合系统研究,提出最佳防护设计方案已迫在眉睫。具体用途与意义表现如下:

(1)使公路工程技术人员更新边坡防护设计观念,改变以往主要从土力学角度考虑路基边坡的稳定,而对边坡冲刷造成的失稳重视不够的现状;同时对边坡防护理论做出有益地补充,为边坡防护设计技术的完善打下坚实的理论基础,使今后边坡防护设计做到以冲刷防护为主、有据可依、更加合理。

(2)建立一套实用、合理的侵蚀冲刷理论计算模型,结合模拟试验,推导出半理论半经验的冲刷公式,所取得的研究成果,可填补国内在公路边坡冲刷特性研究方面的空白,具有重大的理论价值。

(3)改进现行防护结构设计、技术措施的不足之处,更好地指导工程上如何正确防治边坡冲刷病害,保证公路边坡稳定,减少水土流失对环境的破坏。

(4)改变长期以来公路工程界对边坡设计没有考虑环境保护的现状,从施工期间就重视水土流失对环境的破坏,研究对策,并且将环保作为一个边坡防护设计需考虑的重要因素,这是满足当前对公路工程建设的环保要求的一项重要举措,具有深远意义。

### 三、国内外研究现状

随着我国公路等级提高和飞速发展,路基边坡防护日渐引起公路部门的重视,在我国多年的道路工程实践中,积累了不少防护技术经验;与此同时,防护技术在理论方面的研究涉

及不多,防护设计的依据不是十分清楚。设计人员往往凭经验进行工程设计,缺乏必要的理论支持;而且在设计时仅从边坡的稳定性等因素出发,很少考虑水对边坡坡面的冲刷作用,在这方面往往工程上重视不够,这样难以根据不同地区的土质情况、降雨量等合理进行护坡设计。

由于以前的防护设计主要是防止边坡失稳,因此在设计上以圪工防护(挡墙、护面墙等)为主,在圪工防护理论计算方面,库仑理论、朗金理论被广泛应用,边坡的稳定性理论与设计均较为成熟,因此目前设计的路基有可靠的稳定性。但是在大量的防护实践中,发现边坡基本上不发生因设计不合理造成大面积滑坡等失稳现象,却出现了不少因水流冲刷边坡,最终导致边坡失稳的现象。由此可见水是公路边坡土侵蚀冲刷的主体,但是目前公路部门对水流的力学研究都是以明渠均匀流为研究对象,如曼宁流速公式等,利用这些公式进行排水构造物的设计取得了较满意的效果,但如果以此来描述边坡冲刷则有不妥。如排水规范推荐的沟管近似流速公式  $v = 20 \times i^{0.5}$ ,流速与坡角的平方根成正比,而在公路边坡中,随边坡坡角的增大,径流冲刷量确有增大的趋势,但坡角增大导致汇水面积减小,可能出现冲量减小的现象,因此现有的公路水文水力理论与公式不能直接套用在边坡水流冲刷的分析上。

而且路堤顶面由于经过压实,渗透率很小,加上路堤顶面设有路拱,顶面汇集的水以股流形式首先在路肩低洼或薄弱部位冲刷边坡,顶面的汇流作用可使坡面发生强烈沟蚀,况且路堤边坡土质经过一定的压实,整个路堤的填料颗粒又普遍大于坡耕地土壤颗粒,一般不会发生坡面面蚀,所以沟蚀成为路堤坡面主要的冲刷形式。

根据调研我们也发现,路堤坡面的主要侵蚀形式是浅沟侵蚀,并且边坡侵蚀量基本上全部由沟蚀量组成,沟间面蚀量很小,坡面沟蚀的发展分为三种情况:

(1)当雨量少,汇流量小,冲刷力弱,在路堤坡面上引起很小的浅沟侵蚀。

(2)当冲沟形成后,沟壁由于较为疏松,如不及时修补,在重力作用下易发生坍塌,使沟变宽,从而加剧沟蚀的发生。

在调研中发现不少冲沟中可见许多大的石块,这是由于水流带走小颗粒后留下的,有的大石块由于重力作用,还能往坡下滚动一段距离。每条冲沟在坡脚都堆积有大小不等的冲积扇。冲沟断面呈不规则的梯形,在坡肩部位断面宽度和深度一般大于边坡下部断面的相应尺寸。

(3)如果连续下雨,冲沟进一步发展变密且横向发展连成一片,看起来就像整个边坡被剥蚀掉一层。

国外研究的重点是土壤本身侵蚀机理分析,这方面的研究已开展了近 100 年,其中较著名的有 Wischmeier 和 Smith 在 1978 年提出的通用土壤流失公式(USLE),此公式的最大优点是在于它的完整性,在预报侵蚀和设计抗侵蚀措施方面有广泛的可能性。但是应用 USLE 公式预测土壤流失的误差,可高达 400%。

研究侵蚀的理论模型更有前景,它建立在研究自然界及斜坡水流和土壤分离、搬运和沉积过程形成规律基础之上。1985~1990 年,美国进行了 WEPP(Water Erosion Prediction Project)的设计工作,其目的是创新一代模型以预测及防止土壤水蚀。

尽管国外对土壤侵蚀的研究较早、较成熟,但是国外的研究工作很少在大于 20% 的坡地上进行(公路边坡坡度一般都大于 30%),所以将国外现有的研究成果和侵蚀冲刷理论应用于公路边坡会产生何种结果尚不清楚。

综上所述,研究边坡冲刷机理是研究边坡防护技术的前提条件,是必不可少的基础,这方面的研究主要存在以下几点问题:

(1)目前的边坡防护主要是考虑边坡稳定性,对边坡及防

护设施的量化抗冲刷能力和环保因素考虑较少;

(2)即使边坡防护考虑了冲刷的危害,由于对边坡冲刷特性研究较少,现有的公路水文水力理论与公式不能直接套用在边坡水流冲刷的分析上,其防护技术缺乏理论支持,没有建立在冲刷量化的基础上;

(3)国内外对土壤侵蚀的研究主要集中在坡耕地水土保持研究方面,但是公路边坡坡度对水流阻力、流速影响的结果不尽相同,同时几乎所有国内外的相关研究都是在 20% 坡度以下进行的,不适合公路边坡(一般均大于 30%);

(4)公路边坡坡面土为压实土、容重大、土粒排列紧密、土体抗冲刷性强,由于上述特性,路堤边坡土与坡耕地的土壤可蚀性相差很大,侵蚀冲刷有其自身的规律,不能直接套用坡耕地水土保持研究成果。

因此,很有必要专门对公路边坡土的冲刷特性进行分析,从而在此基础上进一步研究边坡抗冲刷综合防护技术。此外,高速公路边坡防护设计技术本身还存在以下问题:

(1)防护工程的设计未根据实际需要,设计的随意性大

设计中往往千篇一律(比如许多边坡基本采用浆砌片石全防护的设计),不论路堤高与低,一个统一模式,未能因地制宜,从实际需要出发,结果造成了工程资金的巨大浪费。

(2)各种形式的防护未经经济技术比较

现在高速公路中常用的防护形式有浆砌片石、衬砌拱、六角形块、正方形预制网格、浆砌片石网格等,在现行设计中,没有对具有同样防护能力的不同防护形式进行经济性比选,从中选出既能满足边坡防护要求,同时又能省钱的防护形式。

(3)防护工程设计未从环境生态方面考虑

现有的许多防护工程未从环境生态方面考虑,未能和公路沿线环境很好地结合起来考虑,大量采用浆砌片石全防护的形式,看不到绿色,不仅浪费建设资金,而且也不美观;更有甚者,在防护工程的线形设计上,也未能和周边环境相融合,

破坏了道路的整体美感。

(4)未能对各种防护形式抗冲刷性能及对不同土质的适宜性作系统的研究

目前常用的几种防护形式各自的防护能力到底怎样?应该说还没有一个确切的答案,或者说还没有定量的数据。设计人员恐怕还是凭经验、凭感觉进行设计,没有充分的理论依据。同时,某一种具体的防护形式,到底是对任何一种土质的边坡都适合呢,还是应有所限制?等等,这些问题都还缺乏系统的研究。

由于以上问题导致了当前高速公路防护设计很不合理,需要防护的地方未能很好地防护,使路基边坡产生冲刷;而部分不需防护的地方却大量设计了防护工程,不仅浪费了大量的工程建设资金,而且严重影响了高速公路的景观,破坏了高速公路自然环境,同时还造成了施工难度增加,工程质量难以控制。

因此,为了降低工程造价,减少或防止道路病害,保持生态环境的相对平衡,确保道路的安全与稳定,十分必要对边坡防护工程设计的合理性、经济性、有效性及美观性作系统的研究。



## 第二章 边坡防护概论

### 第一节 岩土边坡分类与破坏类型

#### 一、边坡分类

边坡就是具有倾斜坡面的土体或岩体,它的简单外形和各部位名称如图 2-1 所示。在铁路和公路两旁、野外可看见各种不同类型的岩土边坡。边坡有多种分类方式,例如可根据成因、岩土性质、边坡高度等因素进行分类。边坡的一般分类见表 2-1、表 2-2。分类的目的是为了更好地从不同的角度认识边坡的性质,采取恰当的工程措施,确保边坡稳定,为植物的生长提供安定的环境。

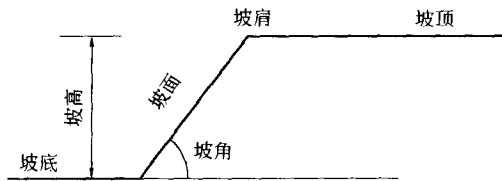


图 2-1 边坡各部位名称

边坡分类表

表 2-1

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具有一定斜度地面的地段,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、回填而形成与地面具有一定斜度的地段