

黄土边坡工程

——坡面稳定性的理论与实践

刘海松 著



科学出版社

黄土边坡工程

——坡面稳定性的理论与实践

刘海松 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了山西公路工程地质分区及各区黄土的主要物理力学性质、黄土边坡的地层组合形式及其坡面破坏模式、人工降雨冲刷试验过程及坡面破坏原因,建立降雨入渗与坡面径流的耦合方程,提出降雨入渗与坡面径流共同作用下的山西黄土公路边坡设计优化的建议。本书是对黄土边坡坡面稳定性理论与实践研究成果的分析与总结,可为解决山西黄土地区公路边坡稳定性问题提供科学依据,也可在其他公路建设领域推广。

本书可供黄土地区公路工程领域的勘察、设计、施工人员直接操作使用,也可作为大专院校公路工程、岩土工程、地质工程、环境工程等专业学生的辅修教材,还可供其他地区公路工程领域的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土边坡工程:坡面稳定性的理论与实践/刘海松著. —北京:科学出版社, 2015.6

ISBN 978-7-03-044559-9

I. ①黄… II. ①刘… III. ①黄土-边坡-道路工程-研究 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 124259 号

责任编辑:宋无汗 杨向萍 程雷星/责任校对:胡小洁

责任印制:徐晓晨/封面设计:红叶图文

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本:720 × 1000 B5

2015 年 6 月第一次印刷 印张:9 3/4

字数:187 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

黄土高原地区虽然自然条件较差，却是我国重要的能源基地，蕴藏着丰富的天然气、石油及煤炭等资源。随着经济战略逐渐向西部倾斜及国家西部大开发战略的实施，作为带动西部经济发展的交通运输工程（特别是高速公路）已得到优先发展。这些高速公路通过的黄土地区，大多沟壑纵横，黄土冲沟及河谷区谷坡陡峻，滑坡、崩塌、滑塌、泥石流等地质灾害非常发育，给公路建设及运营维护带来许多困难。当高速公路通过不同厚度的黄土区域时，因一系列技术要求和条件限制，不得不进行大量的开挖，形成高度不等的黄土边坡。这些黄土高陡边坡设计的合理性、运营后的坡面及整体稳定性以及防护效果将直接关系到公路运行的安全和国家对西部基础建设投资的效益。而目前公路黄土边坡稳定性研究的相关成果多集中在坡体稳定性分析方法、评价体系以及防护措施方面，很少见到关于黄土坡面的冲刷、剥落、坡脚冲蚀及落水洞等变形破坏的成因、机制、防护理念、具体措施等成套技术成果。

本书正是针对这些已被注意但尚未成为热点的黄土公路边坡坡面稳定性理论与实践问题，从介绍公路工程地质分区、统计各区黄土物理力学性质、划分边坡地层组合形式、探讨坡面破坏模式，到现场降雨试验验证、数值模拟分析、建立双因素耦合模型，直至推荐出具体的设计优化建议，给出了一套科学合理、系统完整、操作性强的应用性成果。

本书是作者在总结研究报告基础上撰写的。第1章为绪论；第2章山西黄土区域工程地质特征，主要材料来源于参考文献及作者多年从事黄土地区公路工程施工的经验及对相关问题研究的思考与理解，以及与项目负责人籍延青、龙建辉博士等的多次探讨；第3章山西公路工程地质分区研究，是作者参考硕士研究生

阶段参与的项目,对现场调查的分析和总结,试验及数据整理由闫治利硕士完成;第4章山西公路边坡的地层组合形式及破坏模式,属于作者对硕士阶段研究成果的延续及提升,主要图件由张忠硕士完成;第5章公路黄土边坡降雨冲刷现场试验研究,是作者对硕士阶段研究成果的提升及创新,现场试验由龙建辉、籍延青、刘海松、闫治利、师海涛等完成;第6章考虑坡面稳定的坡型优化,主要计算与数值模拟由杜光波博士和于慧丽硕士共同完成;第7章山西公路黄土边坡的防护技术,是对已有黄土公路边坡相关研究成果的概括与总结;第8章为主要结论及认识。

本书依托项目的顺利完成是各方支持和帮助的结果。项目实施过程中得到了山西省临吉高速公路建设管理处郭锁记和王中秋、山西省交通科学研究院武军、山西省交通科学研究院苏培仁等领导和专家的大力支持、指导和帮助,在此表示衷心的感谢!长安大学杨晓华教授和李同录教授,太原理工大学白晓红教授等对本书的撰写提出了宝贵的意见和建议,在此一并致谢!

由于作者水平有限,书中疏漏在所难免,恳请读者不吝赐教。

刘海松

2015年2月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 黄土地区的范围与分区	1
1.1.2 黄土边坡工程背景	3
1.2 黄土边坡坡面稳定性研究现状	7
1.3 边坡工程内容	8
1.3.1 边坡内容	8
1.3.2 技术路线	9
2 山西黄土区域工程地质特征	11
2.1 自然地理	11
2.1.1 地理位置	11
2.1.2 气候特征	11
2.1.3 水系特征	14
2.2 社会经济	14
2.2.1 交通概况	14
2.2.2 资源概况	15
2.3 区域地质环境	16
2.3.1 区域地形地貌	16
2.3.2 区域地质构造	20
2.3.3 地层岩性	24

2.3.4	新构造活动与地震	27
2.3.5	人类工程活动	28
3	山西公路工程地质分区研究	30
3.1	概述	30
3.2	分区原则及依据	31
3.2.1	分区原则	31
3.2.2	分区依据	32
3.3	山西公路工程地质分区	33
3.4	山西黄土公路工程地质分区特征	36
3.5	山西公路工程地质分区的应用	44
4	山西公路边坡的地层组合形式及破坏模式	47
4.1	山西公路黄土边坡现状	47
4.2	公路黄土边坡的地层组合及其特点	53
4.3	公路黄土边坡地层组合形式的划分依据	56
4.4	山西公路黄土边坡地层组合形式的主要特征	58
4.5	山西公路黄土边坡的破坏模式	63
4.5.1	坡体破坏	63
4.5.2	坡面破坏	64
4.6	考虑地层组合形式的边坡破坏模式	65
5	公路黄土边坡降雨冲刷现场试验研究	71
5.1	坡面稳定性模拟降雨冲刷试验	73
5.1.1	试验目的及设计	74
5.1.2	实体工程模拟降雨冲刷试验	75
5.2	基于坡面稳定性的数值分析	98
5.2.1	降雨入渗数值分析理论基础	99

5.2.2	基本原理	100
5.2.3	非饱和黄土地下水渗流	106
5.2.4	黄土边坡坡面径流	107
5.2.5	黄土边坡地下水运动方程的定解条件	111
5.2.6	黄土边坡地表径流与地下径流的耦合	115
6	考虑坡面稳定的坡型优化	119
6.1	山西黄土边坡的坡面稳定性现状	119
6.2	考虑降雨入渗及坡面径流的边坡设计	126
7	山西公路黄土边坡的防护技术	129
7.1	概述	129
7.2	山西黄土边坡坡面防护技术新探	137
7.2.1	根据气候条件确定坡面防护技术	137
7.2.2	根据边坡地层组合形式设置防护形式	138
7.2.3	黄土边坡植物防护技术几个问题探讨	138
7.3	山西公路高边坡防护技术推荐	139
7.3.1	防护效果分析	139
7.3.2	防护技术推荐	140
8	主要结论及认识	143
	参考文献	146

1 绪 论

1.1 概 述

1.1.1 黄土地区的范围与分区

黄土地区泛指有黄土分布的地区，包括山西、陕西、甘肃、宁夏、青海、河南、内蒙古西部的大部分区域以及山东、内蒙古东部和新疆的个别区域。作为典型黄土高原，一般公认是东起太行山西坡，西至乌鞘岭和日月山东坡，南抵秦岭北麓，北止于长城一线，面积约 38 万平方公里。目前一般是指黄土高原及与其毗邻的长城与阴山之间的河套地区，界限为北起阴山，南达秦岭，西至日月山—贺兰山，东抵太行山，面积约 62 万平方公里。

在黄土高原地区，黄土基本连续覆盖了新近系及其他老地层，形成塬、梁、峁不同的黄土地貌。受古地形、沉积环境、大地构造运动以及后期地表侵蚀作用等因素影响，典型黄土高原地区被若干近似南北走向的山脉分隔成 3 个亚区，即乌鞘岭与六盘山之间的西部亚区、六盘山与吕梁山之间的中部亚区和吕梁山与太行山之间的东部亚区。西部亚区黄土分布于山地斜坡、山间盆地及高阶地上，堆积面积反映出基底地形的起伏；中部亚区黄土连续沉积，覆盖于新近系泥岩之上，填平了多数古河谷和盆地，少数深切河谷谷底有基岩出露，厚度较大、地层完整；东部亚区黄土覆盖于盆地边缘及河流阶地之上，个别盆地间分水岭也披覆有薄层黄土。

“七五”期间，考虑区域治理及经济开发的整体性，中国科学院黄土高原综合科学考察队通过考察和定位试验，于 1992 年编制了黄土高原地区综合治理开发分区图，将黄土高原地区分为豫西晋东南区、晋北大同区、汾渭谷地区、晋陕蒙接

壤区、晋西陕北区、陇东陕北区、陇中宁南区、鄂尔多斯高原风沙区、内蒙古沿黄区、宁夏沿黄区、兰州区和青东区 12 个综合治理区。在国家发展和改革委员会办公室农经字[2008]1808 号文件的附件二《黄土高原地区综合治理研究报告》中，将黄土高原地区划分为 3 大片 6 个综合治理区（图 1-1）（简称“国家 2008 分区方案”）^[1]。具体包括：

I 黄土高原沟壑和黄土丘陵沟壑区（I a 黄土高原沟壑区，I b 黄土丘陵沟壑区）；

II 河谷平原与土石山区（II a 河谷平原区，II b 土石山区）；

III 风沙区（III a 沙地和沙漠区，III b 农灌区）。

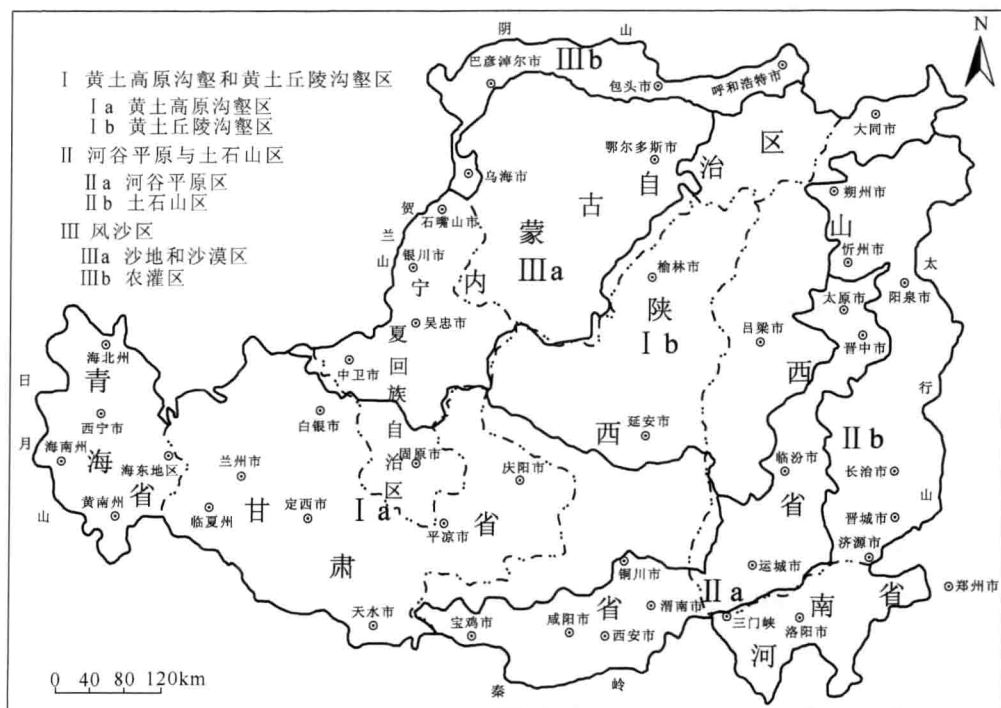


图 1-1 黄土高原地区综合治理开发分区图^[2]

此分区方案并未将山西省详细划分，而任美镔院士以热量和水分的地域组合，兼顾地貌类型，同时以生物气候条件的地带性差异为依据，将黄土高原分为 5 个

自然小区，即陇西高原小区、陕北—陇东高原小区、渭河平原小区、山西高原小区和冀北山地小区，而山西高原小区又被划分为东部山地区、西部山地区和中部断陷盆地区。这对本书具有重要的参考价值。

但是，前人对黄土地区公路工程地质分区的研究很少，相关报道中仅发现《公路设计手册：路基》中有所提及，但其主要是以“湿陷性黄土工程性能新篇”中的“湿陷性”这一指标为依据，涉及山西省部分也不详细，需要进一步研究^[3, 4]。

1.1.2 黄土边坡工程背景

黄土高原地区虽然自然条件较差，却是我国重要的能源基地，蕴藏着丰富的天然气、石油及煤炭等资源。随着经济战略逐渐向西部倾斜及国家西部大开发战略的实施，作为带动西部经济发展的交通运输工程（特别是高速公路）已得到优先发展。

在黄土高原地区（尤其是黄土丘陵沟壑区），2005年1月13日交通部公布的“7918网”（《国家高速公路网规划》规划的7条放射线、9条纵线和18条横线）中即有3条放射线、5条横向路线和3条纵向路线穿过（图1-2），包括（北）京—乌（鲁木齐）高速、（北）京—（西）藏高速、（北）京—昆（明）高速、（天）津—乌（海）高速、青（岛）—银（川）高速、青（岛）—兰（州）高速、连（云港）—霍（尔果斯）高速、福（州）—银（川）高速、二（连浩特）—广（州）高速、包（头）—茂（名）高速和兰（州）—海（南）高速，总里程达 $2.4 \times 10^4 \text{ km}$ ，占国家高速公路网中总里程的29%。

这些高速公路通过的黄土地区，大多沟壑纵横，黄土冲沟及河谷区谷坡陡峻，滑坡、崩塌、滑塌、泥石流等地质灾害非常发育，给公路建设及运营维护带来许多困难。当高速公路通过不同厚度的黄土区域时（图1-3和图1-4），因一系列技术要求和条件限制，不得不进行大量的开挖，形成高度不等的黄土边坡。据文献^[5]



图 1-2 国家高速公路规划网在黄土高原地区的分布

(根据《2005 年国家高速公路网规划方案图》编制)

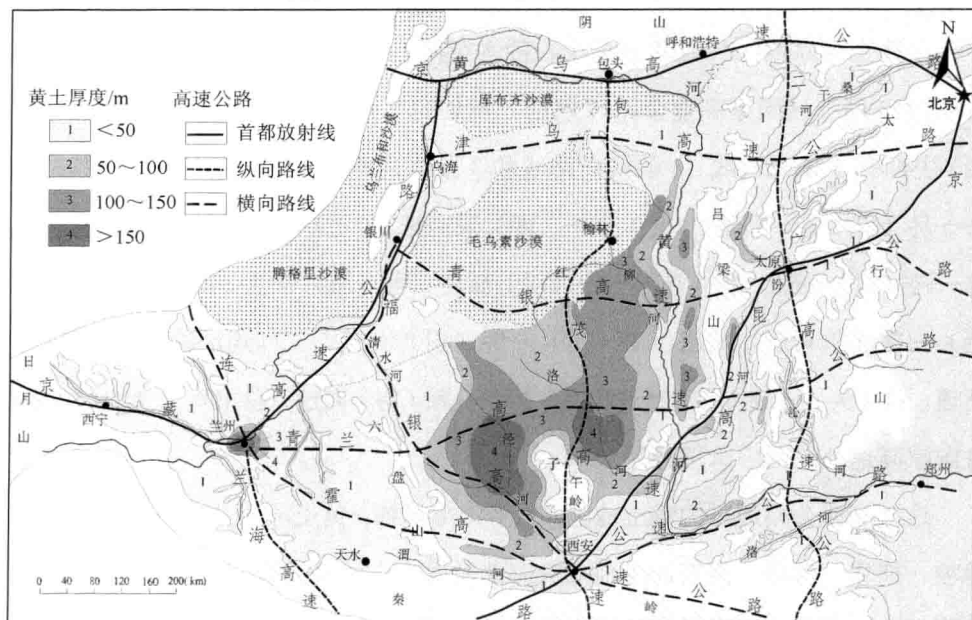


图 1-3 国家高速公路规划网与黄土厚度分布关系图

(根据文献[6]及 2005 年《国家高速公路网规划方案图》编制)

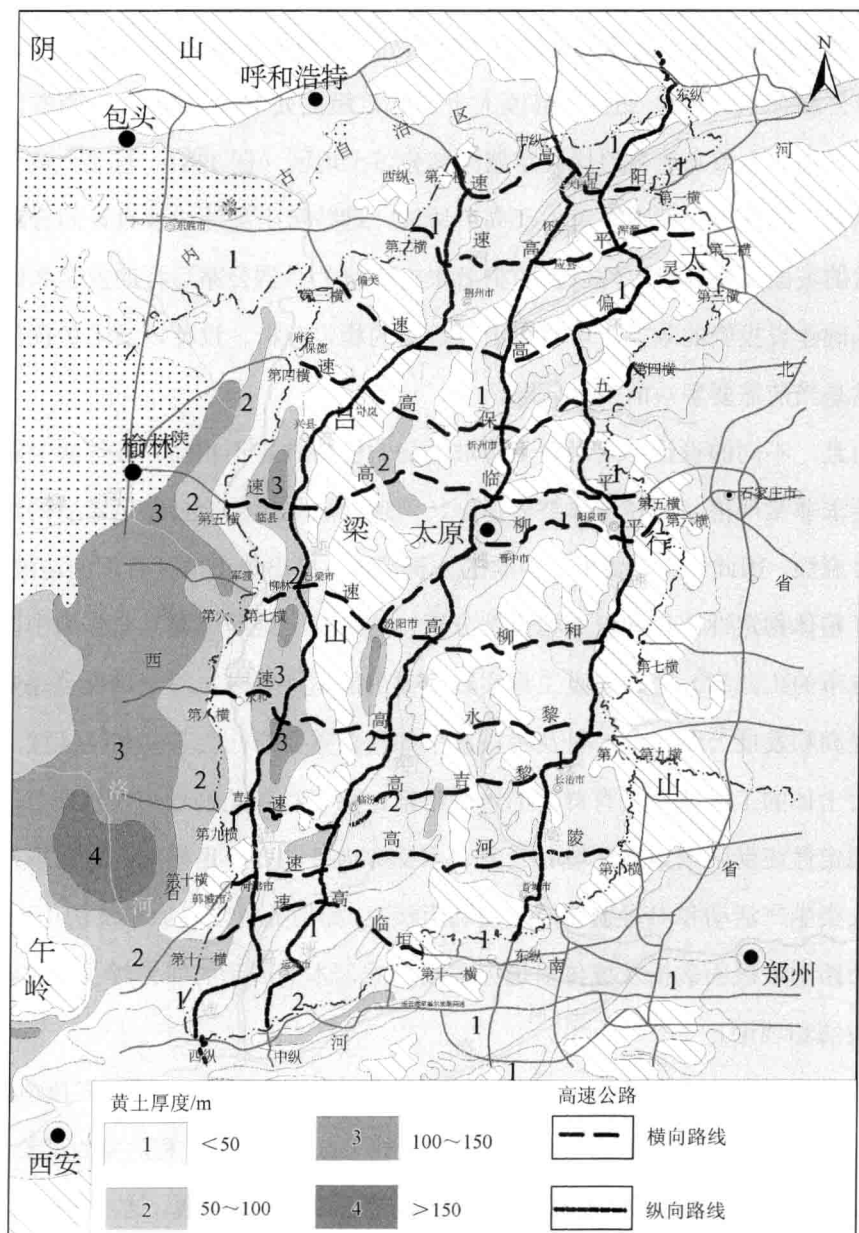


图 1-4 山西省高速公路规划网与黄土厚度分布关系图

(根据文献[6]及 2008 年《山西省高速公路网规划方案图》编绘)

的调查统计, 2005 年以前, 在西部各省区黄土地区高度大于 30m 的公路高边坡共有 250 余处, 其中属于高速公路的有 130 余处, 一级公路的有 60 余处, 国道主干线二级公路有 60 余处, 近 1/3 高度大于 50m, 最高处可达 108m。山西省已建、在建及规划的多条高速公路均会穿越大部分黄土地区 (图 1-4), 与整个黄土地区基本相同, 同样会出现很多黄土 (高) 边坡, 这些黄土高陡边坡设计的合理性、运营后的坡面及整体稳定性以及防护效果将直接关系到公路运行的安全和国家对西部基础建设投资的效益。可见黄土高边坡的稳定分析、设计以及防护优化设计等仍然是当前需要解决的实际问题。

而且, 不同的设计形式对黄土边坡的稳定性影响各不相同。高等级公路变形控制要求非常严格, 即使坡体整体稳定, 但坡面破坏也会给公路运营后的维护带来很多麻烦。因此, 有必要采用科学的分析手段, 提出黄土地区合理的边坡形式, 并进行整体稳定性评价和坡面稳定性分析, 这是黄土地区 (尤其是作为中国重要能源省市的山西省) 公路建设工程实践中提出的迫切要求, 对于确保公路安全运输, 提高和发展公路建设水平及科技水平都具有重要的社会意义和经济意义。

岩土体的工程特性具有鲜明的地缘特征, 除了自身的物理力学性质外, 岩土体的稳定性还受区域地质环境、气象、水文等内外动力作用影响; 也常取决于当地的人类生产活动和对岩土体的整治利用状况, 如地处黄土高原东部的山西地区, 目前公路边坡破面破损及坡体崩塌灾害很严重, 本书展示的即为解决相关问题的主要方法和理论。

基于此, 本书以山西黄土地区已建公路高边坡的调查分析为基础, 以山西省临 (汾) —吉 (县) 高速公路为依托, 选择代表性工点进行实体工程的室内试验、现场试验和分析计算, 并将研究成果直接用于该高速公路的工程实践。这不仅对确保依托工程的顺利实施与安全营运具有重要意义, 而且对西部、中部地区高速公路建设中黄土高边坡的设计、防护与施工具有重要的指导作用, 其推广应用前景广泛, 经济效益可观。

1.2 黄土边坡坡面稳定性研究现状

公路高边坡防护的好坏直接影响行车安全与行车环境。公路高边坡防护形式包括工程防护和植物防护两类。美、欧、日等发达国家或地区建设高速公路的时间比较早,经过几十年高等级公路建设的实践积累,尤其对公路边坡与加固长期的研究和实践,已形成了一套工程防护与植物防护相结合的公路边坡防护体系,各种柔性支护和绿化措施,如土工格栅、土工织物、基质喷播等与生态防护相结合的技术已成为设计中的常识,并实现了边坡的信息化设计。

我国的高等级公路建设近年得到了飞速发展,基本上是省省有高速公路,并正在逐步实现全国高速公路的网络化。与高速公路快速发展相伴的是高边坡数量的剧增,工期短、设计时对高边坡的地质情况了解不足以及施工期间对边坡防护加固重视不够等因素,诱发山体变形,引起开挖边坡坡面发生局部的坍塌、连续的裂缝和错台,迫使公路改线并造成一定范围的生态破坏。上述状况已引起我国公路设计和建设部门的高度重视,并投入了大量的人力和物力开展对公路边坡设计与防护的研究,国内外各种先进的工程防护技术和植物防护技术都开始在我国公路边坡防护上得到应用,取得了较好的成效。通常采用坡体防护和坡面防护两类方法,坡体主要以加固为主,而坡面有工程防护及植物防护两类,又以工程防护居多。

调查发现,黄土地区公路边坡的坡体变形、失稳最常见,从数量上分析,坡体失稳较坡面破坏的段落、总里程都要少,但是对公路营运安全、广大司乘人员人身安全和财产安全的威胁要比后者大得多,尤其是此类破坏的突发性和成灾性,更值得关注。坡面变形、破坏也是黄土地区公路边坡常见的现象,以剥落和冲刷为主。目前,针对黄土边坡坡面的冲刷、剥蚀破坏等的防护,还没有统一的行业标准。全国各省区对黄土边坡的防护各具特色。例如,山西省运(城)—风(陵

渡)一级公路,黄土高边坡全部采用浆砌片石护面墙一坡到顶全部防护。太(原)—旧(关)高速公路,黄土高边坡原来设2~3m高的浆砌片石护面墙,后又在护面墙上增设锚钉板护面,将黄土边坡全部护满。陕西省以前建设的三级公路、四级公路黄土高公路边坡只有局部增设护面墙,大多数路段不设护面墙。近年建设的高等级公路,重视边坡的防护设计,大部分路段均在坡脚设2m高的护面墙,个别路段护面墙较高,绛(帐)—法(门寺)二级公路、三(原)—铜(川)一级公路和西(安)—临(潼)高速公路就是典型的例子。甘肃省新建高速公路一般设10m高护面墙,局部路段护面墙高达20~30m,对厚层古土壤或三趾马红土进行管网喷浆处理。

纵观黄土地区已建和在建公路边坡,黄土边坡坡体防护技术主要包括放缓坡比、支挡以及加固等。坡面防护技术可分为工程防护技术、植物防护技术和复合型生态防护技术三大类。文献[7]中在植物防护方面做了大量调查和研究,认为在整个黄土地区,不论防护与加固的力度,还是在防护与加固措施的针对性方面,都存在一些值得进一步商榷的问题,如“防护对策较单一、植物防护措施偏少、植物防护‘贵族化’严重”等。

本书在前人黄土边坡的坡面防护研究基础上,采用现场降雨试验,重点在黄土边坡坡面稳定性及降雨对坡体整体稳定性的影响方面进行了理论分析和有限元模拟,将降雨条件引入到黄土边坡(其他土坡也可借鉴)稳定性分析和设计中,为公路黄土边坡设计提供更全面的理论依据。

1.3 边坡工程内容

1.3.1 边坡内容

本书重点工作是对路堑黄土边坡开展研究,研究具体内容包括两个方面。

1) 黄土路堑边坡的地质力学模式研究

通过对黄土路堑边坡大量的已有工程进行调查研究,根据工程地质条件及边坡破坏特征,建立合理的边坡地层组合模型,并以此为依据进行稳定性评价,最终为黄土地区公路路堑边坡的稳定性分析及防治工程设计提供依据。

具体内容包括以下三点:

(1) 选取黄土地区具有代表性的高速公路或一级公路,进行现场调查,实测黄土路堑边坡剖面,编制黄土地区路堑边坡的分布现状及坡型图。

(2) 依据黄土的成因时代、物质组成、结构构造及水文地质条件等,对黄土地区路堑边坡进行地质结构分类,编制黄土地区路堑边坡地层组合类型图。

(3) 总结各地层组合模型的分布规律和特征,提出考虑边坡地层组合模型的稳定性分析方法。

2) 外动力作用——降雨冲刷对边坡稳定性的现场试验研究

选取具有代表性的边坡进行现场降雨试验,获取坡面冲刷破坏特征以及剥落现象发生与降雨量、降雨强度和降雨时间的关系,并分析不同地层组合模型边坡坡面抗冲刷的能力,最终获取降雨对不同地质结构模型边坡稳定性(坡面和坡体)的影响。

具体内容包括以下两点。

(1) 依据野外调查选取具有代表性的路堑边坡,进行现场降雨试验,观测坡面冲刷破坏特征,获取坡面剥落与雨量、雨强及降雨时间的关系。

(2) 依据现场降雨试验结果,采用稳定性分析软件对黄土路堑边坡坡面稳定性进行分析,并建立其与坡体稳定性的联系。

1.3.2 技术路线

根据解决黄土边坡坡面稳定性的总体目标和主要工程内容,制订如图 1-5 所示