

肖衡林 万 娟 马 强 肖本林 叶建军 ■ 著

生态护坡 理论与技术

SHENGTAI HUPO LILUN YU JISHU

边坡与生态护坡 研究现状及发展趋势 基材性质研究
新型基材开发——垃圾焚烧灰基材 边坡生态防护生态稳定性研究
植物根系形态分布与根系力学性能研究 根系—土复合体强度试验研究
生态护坡力学稳定性理论分析 生态护坡稳定性有限元分析



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

生态护坡理论与技术

肖衡林 万 娟 马 强 肖本林 叶建军 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

• 北京 •

内 容 提 要

本书是有关边坡生态防护的学术专著,较系统地研究了护坡基材的性质与新型基材、生态护坡的生态稳定性及生态护坡的力学稳定性,是作者多年来研究工作的成果。

本书分为四部分:绪论,基材性质及研发,边坡生态稳定性研究,边坡生态防护力学稳定性研究。具体内容包括:边坡与生态护坡,研究现状及发展趋势,基材性质研究,新型基材开发——垃圾焚烧飞灰基材,边坡生态防护生态稳定性研究,植物根系形态分布与根系力学性能研究,根系-土复合体强度试验研究,生态护坡力学稳定理论分析,生态护坡稳定性有限元分析。

本书主要适合从事道路、水电、铁路、矿山、市政工程等与边坡生态防护有关领域的科研工作者和工程技术人员阅读,亦可作为高等学校本科生和研究生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

生态护坡理论与技术 / 肖衡林等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 12
ISBN 978-7-5170-5359-0

I. ①生… II. ①肖… III. ①护坡 IV. ①U417.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第080583号

书 名	生态护坡理论与技术 SHENGTAI HUPO LILUN YU JISHU
作 者	肖衡林 万 娟 马 强 肖本林 叶建军 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京智博尚书文化传媒有限公司
印 刷	北京一鑫印务有限责任公司
规 格	170mm×240mm 16开本 13印张 207千字
版 次	2018年5月第1版 2018年5月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	70.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

边坡防护对于道路、水电、铁路、矿山、市政施工中产生的裸露边坡的稳定和水土保持起着重要的作用。传统的边坡防护有浆砌块石、浆砌片石、喷射混凝土等，这些防护措施早期防护效果好，但随着岩石、混凝土的风化则逐渐丧失其防护功能。生态护坡随着植被的生长防护功能逐渐增强，且能满足人们对景观和环境的要求。

本书系统地研究了护坡基材的性质及新型基材、边坡生态防护的生态稳定性及力学稳定性。系统研究了不同配比基材的抗剪强度、无侧限抗压强度等力学性质，分析了不同配比基材对植物生长的影响规律；开发了垃圾焚烧飞灰新型基材，分析了该新型基材的力学性质及植生性能。通过 48 组生态模型试验，研究了不同草灌比混合植被在不同坡率下植物的生长规律，并采用基于层次分析法的综合评价指数法进行评价，得出不同坡率下最优的草灌比。本书研究了狗牙根与多花木兰的根系形态分布规律，分析了两种根系的抗拉强度、弹性模量等力学参数与根径、埋深等的关系。研究了灌比及龄期对根土复合体抗剪强度的影响规律。采用极限平衡法，考虑植被的重力、间距，植被根系的形态分布与强度，得到生态护坡稳定系数计算公式。最后利用 ANSYS 有限元分析软件，分析了在不同含水率、坡度、植物间距条件下，植被对边坡稳定性的影响。

本书作者长期从事生态护坡领域方面的研究工作，该书是在作者所指导的硕士、博士学位论文的基础上修改、充实并结合作者十几年的研究成果写成。本书的研究工作获得了国家自然科学基金项目（51178166）、教育部新世纪优秀人才支持计划项目（NCET-11-0962）、教育部重点科研项目（210133）、湖北省教育厅优秀青年项目（Q20081403）、湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目（T201605）的资助。作者在生态护坡的研究过程中，得到湖北工业大学土木建筑与环境学院的庄心善、胡其志、李丽华、何俊、杨智勇、张晋等老师和彭泉、黄钢、丁齐、朱菁、胡强、刘力等研究生的支持与帮助，在此深深表示感谢，同时也衷心地感谢本著作中被引用文献资料的作者们。

由于作者水平所限，本书中难免存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。

肖衡林

2017 年 10 月

目 录

前言

第一部分 绪论

第 1 章 边坡与生态护坡	1
第 2 章 研究现状及发展趋势	3
2.1 生态护坡的研究现状	3
2.1.1 基材性质及应用研究现状	4
2.1.2 生态护坡系统的生态稳定性研究现状	5
2.1.3 生态护坡力学性能研究现状	6
2.2 存在的主要问题及发展趋势	10

第二部分 基材性质及研发

第 3 章 基材性质研究	12
3.1 基材对植物生长的影响研究	12
3.1.1 试验方案	12
3.1.2 狗牙根生长分析	14
3.1.3 狗牙根生长曲线分析	16
3.1.4 狗牙根覆盖率记录	19
3.1.5 正交实验分析	20
3.2 基材抗剪强度试验研究	24
3.2.1 概述	24
3.2.2 试验方案设计	24
3.2.3 制样过程	26
3.2.4 试验结果与分析	27
3.2.5 试样 pH 分析	37
3.3 基材无侧限抗压强度试验研究	38
3.3.1 基材的无侧限试验	38
3.3.2 试样的制作及试验方案	38
3.3.3 试验结果与分析	41
3.3.4 数据分析	44
3.3.5 方差分析	49

第4章 新型基材开发—垃圾焚烧飞灰基材	52
4.1 飞灰基材下植物的筛选试验	52
4.1.1 试验材料以及模型试验设计	52
4.1.2 植物出芽观察分析	53
4.1.3 植物盖度分析	59
4.2 飞灰基材下砂率对狗牙根植生情况的影响	60
4.2.1 试验材料以及模型试验设计	60
4.2.2 狗牙根出芽观测分析	62
4.3 飞灰基材下水泥对狗牙根植生情况的影响	68
4.3.1 水泥固化机理	68
4.3.2 模型试验方案	69
4.3.3 狗牙根出芽观测分析	72
4.3.4 浸出液中离子浓度含量分析	80
4.4 飞灰基材的力学性质研究	87
4.4.1 掺灰量对土体抗剪强度影响的试验研究	87
4.4.2 含水率对不同掺灰量下土体抗剪强度的影响	96
4.4.3 飞灰基材抗剪强度试验	109

第三部分 边坡生态稳定性研究

第5章 边坡生态防护生态稳定性研究	116
5.1 生态模型试验设计	117
5.2 植物生长规律分析	118
5.2.1 植物地上生物量分析	119
5.2.2 植物覆盖度分析	124
5.2.3 植物的长期观测	126
5.3 生态稳定性评价	128
5.3.1 指标的评分标准	129
5.3.2 指标权重计算	129
5.3.3 样地综合评价	130

第四部分 边坡生态防护力学稳定性研究

第6章 植物根系形态分布与根系力学性能研究	133
6.1 植物根系形态分布模式	133
6.1.1 狗牙根的根系形态分布	133
6.1.2 多花木兰的根系形态分布	136

6.2	根系力学性能研究	140
6.2.1	试验材料、设备及方法	140
6.2.2	试验结果	141
6.2.3	根系抗拉力、抗拉强度分析	142
6.2.4	根系应力-应变关系与弹性模量分析	145
第7章	根系-土复合体强度试验研究	148
7.1	根土复合体强度试验设计	148
7.2	试验设备及方法	150
7.3	试验过程	151
7.4	试验讨论	154
7.5	根土复合体力学性能分析	155
第8章	生态护坡力学稳定理论分析	167
8.1	根系的固土护坡的力学效应	167
8.2	植被的生物效应与水文效应	170
8.3	边坡稳定计算公式建立	170
第9章	生态护坡稳定性有限元分析	173
9.1	生态护坡模型建立	173
9.1.1	有限元分析的基本理论	173
9.1.2	有限元分析的计算模型	174
9.1.3	有限元分析的几何模型	175
9.2	含水率对边坡稳定性的影响	177
9.2.1	边坡应力场分析	178
9.2.2	边坡稳定系数分析	183
9.3	坡度对边坡稳定性的影响	184
9.3.1	边坡应力场分析	185
9.3.2	边坡稳定系数分析	188
9.4	植物间距对边坡稳定性的影响	189
9.4.1	边坡应力场分析	189
9.4.2	边坡稳定系数分析	193
	参考文献	194

第一部分 绪论

第 1 章 边坡与生态护坡

随着经济快速发展,公路、铁路、水电等基础设施建设正酣。基础设施的建设拉动了内需,提高了人民的生活水平,但工程施工破坏了原有的生态环境,产生了大量的路堤与路堑边坡,如不及时处理,施工产生的裸地易导致严重的水土流失、河流阻塞、水污染等次生灾害;由于原有的植被与土体结构破坏,重组的岩土结构体系可能成为边坡的不稳定因素,诱发边坡失稳,对沿线的人民生命财产及生物圈造成威胁。

本书对边坡下定义:各种工程(如公路、铁路、工业和民用建筑、矿山、市政水利水电工程等)及农业活动所形成的具有一定角度的斜坡、堤坝、坡岸、坡地和自然力量(如侵蚀、滑坡、泥石流等)形成的山坡、岸坡、斜坡。

为了保证边坡稳定与安全,常采用一些工程措施防护。传统的边坡防护工程措施有浆砌块石、浆砌片石、喷射混凝土等。这些防护措施在建设初期对增加坡体的稳定性和防止水土流失起到了积极作用。但其景观性差,不利于生态平衡与环境保护。随着时间的增长,混凝土老化与岩石风化导致其防护效果逐渐下降,特别是丰水地区易产生工程结构与坡面岩体脱空,从而失去防护功能。生态护坡满足人们对环境保护的要求,其早期的防护效果可能较弱,但随着植物茎叶与根系的发育与生长,其护坡效果逐渐增强,根系的固土与茎叶遮拦与截留的作用减轻坡面水土的流失与雨水入渗,增加边坡的稳定性。

20 世纪 80 年代以来,地球生态环境保护问题受到人们的重视。党的十八大报告明确提出了“建设生态文明建设”,重视人与自然的协调发展,重视经济的可持续性发展。随着人们环保意识的提高,生态破坏和环境污染越来越受到人们的重视。道路上进行生态护坡不仅满足了人们对景观与环境的要求,而且可以降低

噪音、降解并净化空气、减少光污染，给路上的司乘者以清新、愉悦、和谐的感受。工程防护是一种被动的防护措施，生态护坡则是一种积极地提高环境质量和人民生活水平的技术。

生态护坡作为一门新生的学科，在国际上还没有形成固定的术语。它的英文表述有“Ecological slope protection、Biotechnique、Soil bioengineering、Vegetation、Revegetatio”等，中文上称之为“植被护坡、植物固坡、坡面生态防护”。生态护坡一般定义为：“综合工程力学、土体学、生态学和植物学等学科的基本知识，对斜坡或边坡进行支护，形成由植物或工程和植物组成的综合护坡系统的护坡技术”。

第2章 研究现状及发展趋势

2.1 生态护坡的研究现状

国际上对于生态护坡技术的重视有二十来年时间,1994年9月,以“生态护坡”为主题的首次国际性会议在牛津举行,此次会议对于生态护坡的发展具有跨时代意义。但是国外在植物护坡方面的研究和应用已有较长的历史。早在1633年,日本德川五代将军德川纲吉开创性的采用铺草皮和栽植树苗技术来治理荒山。在欧洲,1877年~1895年,德国的土壤学家 Ewald Wollny 做了有关植被覆盖物对减少降雨侵蚀、冲刷和防止土体恶化的影响的观察。在20世纪初期,日本政府投入了大量人力和物力研究公路边坡播种早期树林化的可能性,提出了边坡早期播种树林化技术——客土喷播防护技术,该技术是一种融合土壤学、植物学、生态学理论的生态防护技术。日本的川端勇作将种植外来草种的植生盘用于道路坡面,随后日本相继研发出纤维土绿化工法、高次团粒 SF 绿化工法以及连续纤维绿化工法(TG 绿化工法)等相关成果。从20世纪30年代美国就开始进行公路边坡的植被护坡技术研究,20世纪50年代制定了相关法律,明确指出新建公路必须进行植被护坡技术,并通过很多的奖励机制来奖励那些对公路边坡绿化做出贡献的公司。经过了这些年的发展,生态护坡技术较为成熟。

我国在生态护坡的应用方面有较为悠久的历史。早在1591年,明代人们就利用栽植柳树来加固河岸,在17世纪就有植被防护用于加固黄河河岸的记载。但我国生态护坡技术的研究始于20世纪80年代末,对工程的指导作用不大,且来用的护坡技术限于播撒种、植草等防护方法。改革开放后,随着我国高速公路建设的快速发展和人们环保意识的逐步增强,生态护坡的技术才开始受到重视。我国学者对生态防护技术相关的研究工作主要表现在生态护坡系统的基材性质、生态稳定性、边坡的力学稳定性等方面。

2.1.1 基材性质及应用研究现状

我国从 20 世纪 80 年代初进行生态基材的开发和研究,随后发展较快,取得了一系列的研究成果。1994 年,湖北宜昌久丰植生工程有限公司首先引进了台湾喷射混凝土技术,分别在三峡大坝料石场后,花岗岩风化边坡和三峡专用公路灰岩边坡两处面积共约 300m^2 进行尝试,取得了一定的成果。1998 年~2000 年,铁道第二勘察设计院在襄石复线、内昆线、株柳复线对岩厂绿化防护问题做了喷混凝土植生护坡的选点工程试验,取得了一些工程实践经验。章梦涛(2000)、张俊云(2001)、舒翔(2001)、周颖(2001)等在借鉴日本同类技术的基础上,在内昆、株柳等铁路及惠河高速公路进行了以土壤为主要材料、硅酸盐水泥为粘结材料的“喷混凝土植生技术”边坡绿化试验,该方法采用阶梯式分层喷射,第一层侧重于防护,第二层侧重于植生,取得了较好的效果。三峡大学的许文年等开发了“植被混凝土边坡防护绿化技术”,并申请了专利技术。该技术的核心是绿化添加基材,不仅可以使基材的 pH 降到中性,而且可以作为肥料供植物吸收利用。此技术在三峡工程得到了成功的应用,可用于坡度缓于 1:0.3 开挖后的岩体坡面和混凝土坡面。近几年,通过在一些工程中的应用也取得了部分成果。南京水利水电科学研究所的陆采荣、梅国兴、李庆刚、刘正龙等对生态混凝土的保水、碱度、供水等能力进行了试验研究,得到了能够适合植被生长的生态混凝土的基本配方。四川省励志生态与环境工程技术有限公司李绍才和西南交通大学张俊云、周德培等对厚基材的各种植生性能进行了大量的试验研究,在内昆线横江车站,都江堰某矿山公路上开展了厚层基材植被护坡的工程试验研究,并在国内获得了广泛的应用。武汉理工大学的张季如、朱瑞赓等开发了 ZZLS 绿色生态材料,从微观角度、力学性质、植生能力等方面对该材料进行了全面的研究。陈静曦与胡双双等、祝安与刘海章、何建军与曹平等对岩质边坡绿化基材的物理、力学、酸碱度等植生指标开展了详细的研究,得到了一些有用的结论。

通过国内大量的工程实践可以认识到,生态护坡工程在植物选种及搭配上应尽量选择本地生长适应能力强的品种,以地带性的植被为基调,根据实际需要适当的选择异地物种。同时还要考虑草灌配比的适宜性,尽可能选择抗逆性强的植物和水、肥、光、热利用性强的物种,这样才能够保证植物在恶劣的环境下能够

存活,适合当地的气候环境,建设一个具备生物多样性的稳定的、生命力较强的立体生物群落系统。

虽然我国在运用基材进行边坡防护方面取得了一定的成效,初步形成了适合我国东南气候条件的喷射基材配比方案,但是依然存在一个普遍性问题:基材后期普通存在湿胀、剥落、易退化等一系列现象。这也暴露出我国在深入探讨基材成分方面与发达国家存在的差距,因此我们要加强关于基材内部成分及其相互作用机理等方面的研究工作,致力于找到一种整个生命周期内生态效益良好、内部稳定性好、耐久性较强的基材配比,以指导工程实践。

2.1.2 生态护坡系统的生态稳定性研究现状

植被要达到护坡效果,首先要保证长期的生态系统稳定性。如果植被逐渐退化成裸地,就无法达到护坡的目的。边坡遭受到自然或人为的破坏,最好的结果是恢复边坡原有的生态系统,这就涉及植被的生态恢复的问题。对于生态恢复,学者们给出了多种定义,Jordan认为生态恢复是在人的参与下恢复、改建和重建生态系统;国际恢复生态学会最终将生态恢复定义为:生态恢复是帮助研究生态整合性的恢复和管理过程的科学,生态整合性包括生物多样性、生态过程和结构、区域及历史情况、可持续的社会实践等广泛的范围。从一定意义上来说,生态恢复的情况是衡量生态护坡系统的生态稳定性的重要指标。生态护坡系统的生态稳定性可以理解为依靠自身的自支撑、自组织与自修复功能来完成生态群落的演变,保持生态持久稳定,达到永久性护坡的目的。

国内外学者在护坡植被的物种的选择、空间配置、植被的发展及稳定等方面做出了积极地探索。仓田益二郎认为为了迅速覆盖边坡来防止早期水土流失,应人为移植“先驱植物”;山寺喜成认为,坡面植被群落应用接近自然的方法建植,一般播种工程优于栽植工程;程洪、夏汉平、时培强、鲍玉洪、谢云等研究了各种护坡的草本植物的特性、护坡效果;张凤泉通过9种优质牧草的混播试验,得出适合于青黄高速护坡工程的混播组合草种;周崎治羲、半田真理子、菊地富父等指出,单纯草本植物护坡有其局限性,认为坡面树林化更有利于坡面稳定。2007年我国交通部科学研究院可持续中心经过近10年的物种筛选,完成课题“公路路域生态工程技术研究”,提出边坡植被以灌木为主、乔灌木相结合的复合植被综合

技术；凌剑兴，陈湛杏认为边坡草坪落后于以灌木为主的草灌结合群落，研究了草灌混播施工工艺；陶岩，江源等通过研究草灌植被的相互影响，得出适合灌木柠条生长的合适的草本植物的密度、覆盖度；张相锋，李绍才等提出了对植物群落有较优影响的草灌比。

前人对于生态护坡中的生态恢复与重建做出了有益的探索，但过多的关注生态恢复的早期效果，对于不同的坡面环境的探索甚少。

2.1.3 生态护坡力学性能研究现状

国外关于生态护坡技术中根系作用有少量研究，但是对于植物根系加筋作用的研究方面，深入且获得了一定成效。Endo and Tsuruta 早在 1969 年利用原位直剪试验，得到了剪切力与树根群体密度的线性方程。Waldron、Wu, Brenner & James 在 1977 年提出了根——土的数学计算模型。Green & Leiser 研究得出理想条件下垂直根伸展到华东浅层能起到稳定斜坡的作用。Ferraiolo 论述了包括水力学机制和机械学机制中植物有能够稳定斜坡的功效，木本植物根系通过侧根、须根、缠绕加固土壤形成紧密层，垂直根锚固斜坡土壤增加滑动阻力，根系通过网络作用增加土壤受胁变条件下的抗剪阻力。Wu et al 提出三个关于根的作用模型——简单剪切模型、锁链线形模型、弹塑作用模型。Rlestenbery 用带有较多分支的 Sugar maple (*Acer saccharum*) 进行根的拔拉试验，实验结果表明其最大荷载位于 10cm 深度，这远远比理论计算的要浅的多，用带少量分支的主根型种类 white ash (*frainus Americana*) 计算，在 3cm 突然断裂，这与结果十分接近。Wu (1999) 认为承受剪应力应该在根的 3~10cm 处。Nilaweera 通过带主根的几个种类植物的实验证明了 Wu 的观点。Abe 发现土壤在有根系的存在下，剪力强度增强到 200~600kg/m²，增长率为 11%~42%。Faisal Haji Ali 和 Normaniza Osman 研究了根系的加筋效果，他们通过种植香根草、紫罗兰、含羞草与胭脂树，对其根系的加筋土进行了直剪试验。西方国家中，美国在 20 世纪 30 年代就开始进行公路的边坡植被护坡研究，50 年代初期就编制了相关法律规定公路施工后必须回复边坡生态。1943 年，Moorish, R.H 和 Harrison, C.M 在公路两侧进行了草皮种植实验，通过种植不同种类的草本，组合不同的草种以及播种时间变化来探讨建立草皮的方法。20 世纪 50 年代，美国政府制定了法律，规定公路必须绿化，同时采取一系

列奖励机制奖励做出绿化的团体。Eillison 利用击溅板得出雨滴的击溅侵蚀公式： $G = k \cdot V^{4.22} \cdot d^{1.07} \cdot i^{0.05}$ （ G ：侵蚀量； V ：雨滴下降速度； d ：雨滴直径； i ：降雨强度； k ：系数），正是这个公式的提出，使得生态防护技术开始进入定量研究时代。Bihshop 和 Stevens 在 1964 年通过研究美国阿拉斯加东南部林区山地发生的滑坡的频率和范围得出，树木被砍伐过后，根系被破坏和腐烂是这里频繁发生滑坡的主要原因。Tumanina、Wu 等人在进行了很多实验后得出植被根的直径越大强度反而减小，所以进一步说明了植被的须根比粗根更有利于提高土壤的抗剪强度和加固强度。这一发现为植被根系对边坡的加固作用提供了理论支持；Tsuruta、Endo 在此理论的基础上研究了植被垂直根系对土体抗剪强度的增强作用。Kassif、Gray 将化学纤维分别置入压实土和沙中进行直剪试验用来模拟植物根系与土体的相互作用，实验的结果表明虽然土体的内摩擦角变化不明显，但土体的抗剪强度因为植物根系提高了土体的内聚力而增加。Rboert R 在 80 年代研究得出，坡地的加固可以通过植被根系的强大力量和植被对土壤饱和度的改变来实现，植被根系有很强的吸水能力，而且能把散乱的土体锚合成一整体。Greenway 在 1987 年利用力学理论总结了植物对边坡的稳定影响，主要是植物的根起到了对边坡加固的功效。

我国在 20 世纪 80 年代末开始采用拉拔试验原位剪切试验、根系抗拉试验以及数值模拟等主要手段研究植物根系力学性质。

我国在生态护坡理论研究上的主要成果有：1995 年周锡九和赵晓峰分析研究了植草护坡草根加筋原理，通过详细的实验数据进行了对于植草的浅层加固边坡土体作用机理的论证和说明，证明植被对土体浅层的加固非常有效。1996 年刘国彬等指出了草本植物根系固结土壤，根系缠绕、强化抗冲性有网络串连作用、根系生物化学作用及根土黏结作用这三个主要作用。根系化学作用效应在黄绵土中效应达到 51%，其作用主要是通过改善土体构型。网络串连作用虽然只有根土黏结作用效果的 50%，但两者都与效根面积成正比。与此同时，杨亚川提出了“根—土复合体”这一概念，把土壤和根系融为一体，得出了根土复合体的抗剪强度与法向压力的关系符合库仑定律，根土复合体抗剪强度与含根量成正比，而与含水量成反比；根的数量越多，土壤的粘聚力越大，但是根的多少与内摩擦角不存在太大关联。2003 年封金财等在总结国内外植物根对边坡稳定方面研究成

果,在此基础上通过在室内测试加筋($L=4.9\text{ cm}$, $D=1.75\text{ mm}$ 的茅草根)的无粘聚力的砂质土得出应力—应变关系曲线和根土复合体的破坏包线,证明了高峰之后的应力软化现象有所减弱;但加筋沙土的破坏包线呈现出两段不同的曲线,第一部分较为陡,之后便下行到平行于无根加筋的砂土的破坏包线,另外一部分外推相交于坐标轴,就得到一个“似粘聚力”,在无粘聚力的干砂土中加筋后得到的这个“似粘聚力”就是根加筋后土的抗剪强度的增量 Δs ,也称之为“根粘聚力”(简记为 CR)。室内直剪和三轴实验均显示 Δs 或 CR 与根的面积比 RAR 成正比。

代全厚等证明了农用草地的抗剪强度小于牛毛草地、天然草地。杨亚川等人实验得出直径达 0.6 mm 的节节草的草根抗拉强度可达 22.32 MPa ,相当于 I 级钢筋的抗拉强度 $1/10$ 。史敏华等研究了林木根系的抗拉强度,得出抗拉强度满足幂函数关系,其主要影响土壤固结力的因素有根系分布特征、根径、根等。封金财等通过实验测定了茅草根应力应变关系曲线,实验得出了根的存在使得浅土的($H<1\text{ m}$)的稳定性大幅度增加,而深度达到或超过 1 m 时,根的加筋作用慢慢减小,而且根的平均抗拉强度和根的面积是土壤抗剪强度提高的必要因素。程洪通过拉拔试验,测得香根草根的平均抗拉强度达到了相当于普通钢筋抗拉强度 $1/6$,约 85 MPa ,抗拉强度和香根草根直径有幂函数关系。刘国彬等的研究表明长芒草、狗芽根、胡枝子、茵陈蒿的应力—应变关系遵循胡克定律,而沙打旺、无芒雀麦的应力—应变为对数函数关系,应变递增快,不符合胡克定律。朱清科等对蛾眉冷杉、冬瓜杨根系受拉过程进行了研究,表明是典型的弹性断裂,而存在节理的杜鹃根系在节理处断裂,且为脆性断裂。王晓梅、陈建平等探讨了华中地区瑜伽山边坡中紫穗槐、紫花苜蓿、栎树、木子树这 4 种植物的抗拉性能,研究抗拉强度达到最大值所承受的抗拉力和自身的伸长率与直径变化的规律。

以上研究结果表明:根系的强度比较大,可以达到普通钢筋强度的 $1/10\sim 1/6$,不同植物根系材料力学特性是有差异的,因此需要从植物种类等方面,并结合根系立地条件探求植物根系力学性质。

在根土相互作用方面,国内外很多学者通过现场和室内试验,对根系固土的力学机理进行了研究。周跃对云南松的根系做了详细的研究,得出了坡体抗拉能力因为云南松坡水平根系的牵引效果增大了 2 倍,垂直根使根际土层对水平方向滑动的抵抗力提高了 37.83% 。利用常规直剪试验,张飞、石明强等研究种植与没

种植草本根系土壤的抗剪强度,并且用计算机模拟出有草和没草情况下坡面应力应变状态。扈萍等利用直剪试验,在土壤中加入一部分干根制备成试样,通过试验分析建立了含根量与粘聚力的关系式。陈丽华、余新晓、宋维峰、刘秀萍等假设根系分布,通过试验和有限元模拟了林土根系固土力学机制。赵丽兵、张宝贵等对4种具有代表性的草本植物进行野外剪切,将草本根系对土体抗剪强度的提高研究进行了量化。毛伶俐等通过试验添加一定数量草根进入土壤中进行剪切试验,测试了龄期为3~4个月的结缕草根系抗拉强度和草根对土壤抗剪强度的提高作用。通过试验加入不同质量根系的分层草根与复合草根加筋的扰动土三轴试验,刘怀星等建立了3种含根量的混合草根加筋土的BP神经网络本构模型。彭书生、盛谦主要通过数值模拟方法研究了在草本植被护坡的水文效应和力学效应共同作用下植被边坡的稳定性。言志信等在假设根系数量及形态的基础上,定量计算了由于根系作用增加的抗剪强度和边坡稳定性系数。黄晓乐、许文年等通过在平地上植被混凝土种植单一草本进行了不同深度的抗剪强度试验,通过比较几种草本的植被混凝土抗剪强度,发现草本根系使粘聚力有了较大的提升。李国荣等在寒冷干燥的地区自然坡度中,建立根的草本和灌木根—土相互作用的力学模型,发现植物坡度的力学效应与植物根系量,长度和强度和其他因素有关。张谢东、石明强等采用了有限元理论方法,将弹性模型、邓肯—张非线性弹性模型和双曲线模型分别应用于根系、土体和根土接触面,通过对比分析了有或者没草边坡的剪应力。江锋、张俊云等将7个月的狗牙根晒干后按照一定数量和角度加入试样中进行直剪试验,得出了土体的抗剪强度因为植物的根系有了显著的提升,并且抗剪强度与加筋根数量成正比例关系。单炜、孙玉英等研究了野外的胡枝子根系发现,在有植物根系的地方,根与土的复合体和植物根共同承担了边坡的抗剪强度,但只能延长根与土复合体的破坏过程而无法延长土体结构发生破坏的时间。汤劲松、刘松玉等通过三维数值模拟和利用浅根加筋和深根锚固及其联合加筋模型来分析,草本及毛竹根系怎样对隧道施工拱顶稳定性产生作用。宋维峰等结合三轴试验与数值模拟等方法分析了油松、刺槐根系与土壤的力学特性,林木根系对土壤的影响被较完整的展示出来。胡其志、肖本林、肖衡林等研究将不同重量的狗牙根根系加入到土体中,在对土体进行直剪试验,得到相关线性关系。开始能有效增强土体抗剪强度,提高幅度为3.9%~21.2%,有的甚至达到70%;但之后随

着根的数量增加,土体抗剪强度增加不再明显,最后达到一定值后不再增加。

2.2 存在的主要问题及发展趋势

虽然我国在边坡生态防护技术方面得到了一定发展,开发了适用于不同环境的护坡技术,但由于起步较晚,技术和理论都还不是很成熟,还存在许多问题需要进一步的研究。不足之处主要存在:

1) 边坡生态防护基材选取的定量研究问题。目前在基材成分配比及基础理论研究方面还没有一个系统的方法,一般只是凭经验选取基材成分及植物群落搭配,短期来看效果较好,但长期来看存在植被退化、基材胀落现象,并且在基材的施工前期准备工作、施工期间技术要点、质量验收标准、养护制度及后期跟踪调查等方面的评判标准目前还处于半经验状态。

2) 植物物种选配方面缺乏科学的依据及参考。我国地域辽阔、气候及地质特征多样,植物物种选配复杂,目前现有研究还远不能满足各地实际工程的需要。现阶段在植物物种选配方面,大多数是借鉴已有工程实例经验,植物选取区域针对性不够强,尤其是在高速公路全线上,植物物种选取单一,大大降低了公路沿线物种多样性,不仅不利于植被后期生长,而且可能导致生态恢复失败。

3) 路域生态环境与建植坡面生态效果研究不够,生态修复施工前对施工后生态环境影响缺乏研究,量化研究更是微乎其微。在生态修复施工完成后,季节对植物短期与长期生长影响、土层上部与下部生物量对植物生长的影响及根在土体中的分布形态的动态研究也非常有限。

4) 对根系力学性能的时间效应缺乏研究,没能揭示植物根系护坡的动态力学性能,根系对土增强作用的力学模型缺乏。

5) 生态恢复后生态长期效应研究少。在对恢复后植被群落的抗蚀性、多样性、稳定性的跟踪研究报道较少,极大地制约了我国在边坡生态修复技术植物恢复质量的准确评价及后续技术的提高。

针对以上问题,今后边坡生态防护技术发展趋势是:

1) 在生态护坡基材选取上应当规定一套系统的研究基材配比的方法论并开发新基材,同时结合我国国情制定一套健全的关于生态护坡基材整个生命周期的