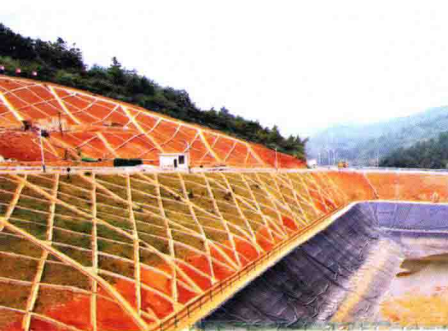


本学术著作获江西理工大学优秀著作出版基金资助

植被—边坡系统稳定性 分析方法

邓通发 桂 勇 罗嗣海◆著



中国建筑工业出版社

本学术著作获江西理工大学优秀著作出版基金资助
获江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室资助

植被—边坡系统稳定性 分析方法

邓通发 桂 勇 罗嗣海 著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

植被一边坡系统稳定性分析方法 / 邓通发, 桂勇, 罗嗣海
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 2
ISBN 978-7-112-18741-6

I. ①植… II. ①邓… ②桂… ③罗… III. ①植被—关
系—边坡稳定性—稳定分析 IV. ①TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 278282 号

本书是作者从事相关课题研究的成果总结。全书 11 章, 主要介绍针对植被一边坡系统稳定性方面的相关问题, 采用室内试验、模型试验、理论分析和数值模拟等方法, 对根系土抗剪强度、根系土渗透性能、植被边坡降雨入渗规律、边坡整体稳定性、边坡浅层稳定性、边坡长期稳定性以及边坡稳定二元指标评价体系等方面进行的研究及取得的成果。本书可供岩土工程设计和施工相关专业人员参考, 也可作为大中专院校和科研人员的参考用书。

责任编辑: 刘 江 范业庶 杨 杰

责任设计: 董建平

责任校对: 刘 钰 张 颖

植被一边坡系统稳定性分析方法

邓通发 桂 勇 罗嗣海 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 字数: 300 千字

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月第一次印刷

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-18741-6
(28032)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

传统的工程护坡技术大多采用砌石及混凝土等灰色防护，破坏了原有植被，对生态造成了永久性破坏，生态防护技术充分利用植物自身特点并结合必要的工程防护，能够起到工程建设与环境保护兼顾的目的。在越来越重视环境保护和生活质量的今天，生态防护已成了公路边坡防护的一种趋势，代表着边坡防护的发展方向。

然而，目前对于生态防护技术的研究主要集中在施工工艺及水土保持效果等“绿化”方面上，而对于植被护坡机理和植被一边坡系统稳定性缺乏相关的设计理论和分析方法的指导，在植被对边坡稳定性的影响上缺乏统一的认识，理论远远落后于防护技术应用的发展，大大制约了生态防护技术在边坡工程中的应用。

植被一边坡系统是一个复杂的动态系统，植被根系对边坡土质的影响效应是多方面的，并且在不同的气候条件以及植被生长的不同阶段，这种影响效应也是不同的。作者基于理论创新和工程实用的目地，采用室内试验、模型试验、简化理论和数值分析等方法，系统地研究了边坡生态防护的力学效应、水文效应、稳定性影响因素以及稳定性分析方法，取得了一些成果。

全书共分 11 章：

第 1 章介绍了生态边坡研究现状与存在的问题。简单介绍了生态边坡的类型与发展情况，重点从生态边坡护坡机理及边坡稳定性分析两方面进行了综述，指出目前生态边坡研究中存在的问题和不足。

第 2 章介绍了根系土抗剪强度室内试验研究成果。在总结植被根系护坡力学效应理论研究的基础上，开展根系土抗剪强度室内试验，分析了含水率、含根量及根系形态等因素对根系土抗剪强度的影响规律，并拟合了根系加筋效应公式。

第 3 章介绍了根系土渗透性能室内试验研究成果。在总结植被对边坡产生的水文效应的基础上，开展了根系土渗透性能室内试验，分析了含根量与根系形态等因素对根系土渗透性能的影响规律。

第 4、5 章介绍了植被一边坡系统降雨模型试验研究成果。在总结前人边坡模型试验的基础上，设计一套高效合理的生态边坡室内模型试验装置，开展了降雨条件下生态边坡渗流规律的对比试验，从湿润锋和含水率等指标分析了生态边坡降雨入渗的规律。

第 6 章介绍了植被一边坡系统的整体稳定性研究成果。基于极限平衡理论和非饱和土抗剪强度理论，采用数值分析的方法，分析了植被根系力学效应、水文效应及土水曲线等因素对植被一边坡系统的整体稳定性的影响规律。

第 7 章介绍了植被一边坡系统的浅层稳定性研究成果。在分析边坡浅层失稳模式的基础上，基于简化理论分析方法，分情况推导了植被一边坡系统浅层稳定计算公式，并进行了算例验证。

第 8 章介绍了植被一边坡系统的长期稳定性研究成果。基于非饱和渗流理论、根系固

土机理和非饱和土抗剪强度理论,考虑降雨、植物截留、坡面蒸发和植物蒸腾等气候—植物综合因素,采用数值分析方法,研究植被生长不同阶段下边坡的长期稳定性。

第9章介绍了生态边坡稳定可靠度初步研究成果。在分析土质参数统计特性的基础上,利用极限平衡理论和蒙特卡罗模拟法,系统地分析了土质强度参数的均值不定性、变异性、相关性、区间特性和空间变化性等统计特性对边坡稳定可靠性的影响。

第10章介绍了边坡稳定二元评价指标体系研究成果。综合极限平衡法和可靠度理论,考虑边坡材料指标的区间分布及实际边坡工程中稳定边坡的安全系数不能小于其临界值的特点,提出了一种更加符合工程实际的边坡稳定随机二元评价体系,同时选取蒙特卡罗模拟法,将该二元评价体系融入 GeoStudio 软件,借助 GeoStudio 软件强大的计算能力,形成一套完整而高效的边坡稳定性分析方法。

本书主要基于作者课题组承担的江西省交通厅科技重点项目“生态护坡浅层稳定性及整体稳定性效应的研究与实践”(2012C0003)取得的部分研究成果撰写而成。研究工作得到了江西省交通厅、赣州高速公路有限责任公司的科技基金资助。本书的出版得到江西理工大学优秀学术著作出版基金、江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室的资助。

感谢江西省交通厅、赣州高速公路有限责任公司、江西理工大学、江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室的经费支持。作者的研究生刘小燕、李辉、钟贞明,赣州高速公路有限责任公司周军平参与了部分研究工作。作者的研究还多处引用了前人的研究成果,对他们的劳动、支持和帮助,作者一并表示感谢。

限于作者的水平和认识,书中肯定存在不足乃至错误之处,敬请同行专家和读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 生态护坡的实践应用现状	1
1.2 生态边坡的护坡机理研究现状	3
1.2.1 根—土复合体的力学性能	4
1.2.2 植被—气候的水文效应	6
1.3 生态边坡稳定性分析研究现状	6
1.3.1 A 类植被—边坡系统及稳定分析	7
1.3.2 B、C 类植被—边坡系统及稳定分析	8
1.3.3 D 类植被—边坡系统及稳定分析	8
1.3.4 E 类植被—边坡系统及稳定分析	9
1.4 生态护坡研究中存在的问题	9
第 2 章 根系土抗剪强度室内试验	11
2.1 生态护坡力学作用机理	11
2.1.1 草本植物的浅根加筋作用	11
2.1.2 根—土作用力学模型	11
2.1.3 木本植物根系的锚固作用	14
2.2 含水率和含根量对根系土强度的影响	15
2.2.1 试验材料	16
2.2.2 试验仪器	16
2.2.3 试样制备	16
2.2.4 试验方法	17
2.2.5 试验结果及分析	18
2.2.6 根系加筋效应公式建立	21
2.3 根系分布形态对根系土强度的影响	22
2.3.1 试验方法	23
2.3.2 试验结果及分析	24
2.4 本章小结	25
第 3 章 根系土渗透性能室内试验	26
3.1 生态护坡水文效应机理	26
3.1.1 植被的降雨截留	26

3.1.2	植被的削弱溅蚀	27
3.1.3	抑制地表径流, 控制土粒流失	27
3.1.4	植被降低孔隙水压力	28
3.2	含根量对根系土渗透性的影响	28
3.2.1	渗透试验的原理及方法	28
3.2.2	试验材料	28
3.2.3	试验仪器	29
3.2.4	试样制备	29
3.2.5	计算方法	30
3.2.6	试验结果及分析	30
3.3	根系分布方式对根系土渗透性的影响	31
3.3.1	试验方法	31
3.3.2	试验结果及分析	31
3.4	草本植物截留量的统计研究	32
3.5	本章小结	34
第 4 章	生态边坡降雨模型试验	35
4.1	边坡模型试验研究的意义	35
4.2	边坡模型试验研究现状	36
4.3	边坡入渗模型试验研究现状	38
4.4	生态高边坡降雨模型设计	40
4.4.1	模型方案的研究目的	40
4.4.2	模型试验装置设计	41
4.4.3	试验操作步骤	44
4.4.4	模型试验工况	45
4.5	本章小结	45
第 5 章	生态边坡降雨入渗规律分析	46
5.1	入渗机理研究	46
5.1.1	土体内水的分类	46
5.1.2	入渗过程	47
5.1.3	影响入渗的因素	48
5.2	降雨入渗模型	49
5.2.1	入渗模型的发展	49
5.2.2	达西公式	49
5.2.3	Green-Ampt 模型	50
5.2.4	Philips 模型	51
5.3	入渗规律的模型试验研究	51
5.3.1	湿润锋沿边坡分布规律	52

5.3.2 各组湿润锋变化规律	56
5.3.3 同一位置处的湿润锋变化规律	57
5.3.4 土壤水分变化规律	61
5.3.5 入渗率规律	62
5.4 本章小结	66
第6章 边坡开挖整体稳定性分析	67
6.1 边坡稳定的基本理论	67
6.1.1 非饱和土强度理论	67
6.1.2 安全稳定性系数	67
6.2 边坡稳定分析方法	69
6.2.1 极限平衡法	69
6.2.2 滑移线法	69
6.2.3 极限分析法	70
6.2.4 有限元法	70
6.3 某高速边坡开挖稳定性分析	71
6.3.1 K17+800 边坡	71
6.3.2 K35+330 边坡	73
6.3.3 K35+490 边坡	74
6.3.4 K51+340 边坡	76
6.3.5 K53+510 边坡	77
第7章 生态边坡浅层稳定性分析	79
7.1 边坡浅层破坏模式	79
7.2 浅层稳定简化理论推导	80
7.2.1 根系在滑裂面之上	81
7.2.2 根系深入滑裂面以下	82
7.2.3 考虑降雨的浅层稳定性	84
7.3 工程实例分析	87
7.3.1 工程概况	87
7.3.2 结果分析	88
7.4 降雨条件下具有较宽坡顶平台边坡的浅层稳定性分析	88
7.4.1 有无植被护坡的稳定性对比分析	91
7.4.2 降雨强度对边坡稳定性影响分析	92
7.4.3 改进方法与原方法对比分析	93
7.5 本章小结	94
第8章 生态边坡长期稳定性分析	96
8.1 GeoStudio 介绍	96

8.1.1	SLOPE/W 与极限平衡法	96
8.1.2	SEEP/W 与饱和-非饱和土渗流理论	97
8.1.3	VADOSE/W 与气候环境因素	97
8.2	工程算例	99
8.2.1	计算模型及参数	99
8.2.2	边界条件及初始条件	101
8.2.3	气候条件与植被情况	101
8.3	结果分析	102
8.3.1	非饱和根系土抗剪强度各项指标比较分析	102
8.3.2	气候-植被综合作用下渗流场分析	103
8.3.3	气候-植被综合作用下稳定性分析	104
8.3.4	植被生长不同阶段边坡稳定性的影响	105
8.3.5	坡度对植被护坡效果的影响	106
8.3.6	坡高对植被护坡效果的影响	107
8.3.7	土壤水分特征曲线对稳定性影响分析	111
8.4	本章小结	116
第 9 章	生态边坡稳定可靠度初步分析	117
9.1	可靠度理论基础	118
9.1.1	变化性与不确定性	118
9.1.2	不确定性的类型	119
9.2	可靠性分析方法	120
9.2.1	蒙特卡罗模拟法	120
9.2.2	一次二阶矩法	121
9.2.3	其他可靠性分析方法	122
9.3	工程概况	122
9.4	全风化花岗岩强度参数统计特性	123
9.5	计算结果及分析	124
9.5.1	空间变化性的影响	124
9.5.2	区间性的影响	124
9.5.3	均值的影响	125
9.5.4	变异性的影响	126
9.5.5	相关性的影响	127
9.6	本章小结	129
第 10 章	边坡稳定二元评价指标体系	131
10.1	二元指标体系的推导	131
10.2	二元评价分析在 GeoStudio 中的实现	133
10.2.1	蒙特卡罗试验次数的确定	133

10.2.2 相关变量的处理	133
10.3 算例分析	134
10.3.1 工程概况	134
10.3.2 边界条件	134
10.3.3 材料参数	135
10.3.4 计算结果及分析	136
10.4 本章小结	139
第 11 章 结语与展望	140
参考文献	143

第 1 章 绪 论

生态建设和环境保护是 21 世纪人类共同关注的热门话题,随着国民经济的发展,大规模的资源开发和基础建设产生了大量的人工边坡,造成了严重的水土流失和土地沙化,形成了大量的裸露边坡。传统的工程护坡技术大多采用砌石及混凝土等灰色防护,破坏了原有植被,对生态造成了永久性破坏^[1]。生态防护技术是随着世界范围内高速公路建设而兴起的一门工程技术。与传统的工程防护技术不同,生态防护技术充分利用植物自身特点并结合必要的工程防护起到工程建设与环境保护兼顾的目的。在越来越重视环境保护和生活质量的今天,生态防护已成了公路边坡防护的一种趋势,代表着边坡防护的发展方向。

生态防护是一门涉及土壤学、肥料学、植物学、园艺学、环境生态学和岩土工程力学等多学科的综合环保技术。20 世纪 90 年代以前,多采用播草种、铺草皮、砌石骨架植草及蜂巢式网格植草等形式,随着土工材料植草护坡技术的引进和新型植被护坡技术的开发,客土喷播技术、土工网垫植草护坡、土工格室植草护坡、香根草技术(VGT)及加劲纤维毯等护坡技术在边坡工程中陆续获得应用,形成了适用于不同岩(土)质边坡的多种防护技术。

1.1 生态护坡的实践应用现状

边坡生态防护工程是一门非常年轻的学科,它真正形成一门学科,还是近十几年的事,而且直至今日甚至连一个很贴切的术语都还没有形成,国外称 Biotechnique, Soil Bioengineering, Vegetation 或 Revegetation 等,国内也有称植被护坡、植物固坡、坡面生态工程等。在国际上专门以植被护坡为主题的首次国际会议于 1994 年 9 月在牛津举行。国外一般把植被护坡定义为:“用活的植物、单独用植物或者植物与土木工程和非生命的植物材料相结合,以减轻坡面的不稳定性和侵蚀。”生态防护技术的应用历史久远,最初植被护坡主要用于河堤的护岸及荒山的治理,直到 20 世纪初才被人们重新发现和认识^[2-5]。

植物防护边坡的实践在欧美国家历史悠久。在中世纪,法国、瑞士的运河岸就采用栽植柳树的方法来防护。美国等发达国家从 20 世纪 30~40 年代就意识到了保护生态平衡的重要性,开始在公路边坡开展植被恢复工作。例如,Moosrih R. H. 和 Harsrinoc. M. 早在 1943 年和 1944 年就进行了公路两侧草皮种植的试验,通过不同播种时间、不同草种及草种组合的小区试验来探讨建立草皮的方法。50 年代后,随着公路的大量兴建,公路建设对环境的影响越来越受到社会的关注,为此,美国制定法律要求新建公路必须进行绿化,机械化施工的喷播技术应运而生。1953 年, Finn 公司首先开发出了喷播机。从 60 年代开始,美、德、法等发达国家开始大规模修建高速公路,喷播技术等绿化新技术在稳定边坡、防止土壤侵蚀和恢复植被等方面得到了广泛应用。日本提出了功能栽植的概念,对于

公路绿化起到了重要作用。70~80年代,由于公路植被的大量建植,如何管理和养护这些植被成为重要课题,许多人对化学除草剂和生长抑制剂进行了研究(Djkcnes R., 1986, McElroy M. T., 1984)。日本的边坡绿化起步较早,他们的生态防护几乎与公路建设同步发展,迄今已有半个多世纪的历史,期间经历无数的变化。1951年,川端勇作开发了采用外来草种的植生盘用于道路坡面,标志着以牧草为代表的外来草种开始用于坡面绿化。1958年,日本京都大学农学部开发了喷射种子法;1960年从美国进口喷射专用纤维,1965年即实现了喷射纤维的国产化。1973年开发出的纤维土绿化工法(Fiber-Soil Greening Method)标志着岩体绿化工程的开始,此法至今仍在应用。1983年,开发出高次团粒SF绿化工法(Soil Flockoreening Method)。1957年6月,日本从法国引进连续纤维加筋土工法,随后把它与已有的坡面绿化工法结合在一起,开发出连续纤维绿化工法(TC绿化工法)^[6]。

我国有记载的植被防护应用出现在1591年的明代,通过栽植柳树来加固与保护河岸。在17世纪,植被防护开始应用于保护黄河河岸。由于以往公路等级较低,国内在植被防护技术应用方面的研究起步较晚,直到20世纪90年代,随着高等级公路建设和对于环境问题认识的提高,才开始开展系统的防护研究。1996年,云南省昆明—曲靖高速公路全线路堑、路堤、中央分隔带和立交区等进行了全面防护和绿化,并首次采用瑞士湿法喷播技术进行大规模的植被种植,为我国公路绿化技术的提高做出了有益的尝试。1996年10月交通部在昆明举办的“全国交通环保培训班”,对公路绿化尤其是喷播技术的宣传和推广起到了积极的推动作用。近几年我国公路防护技术有了长足的进步,喷播技术等新技术已经在公路绿化中得到了广泛应用^[7]。

20世纪90年代以前,一般多采用撒草种、穴播或沟播、铺草皮、片石骨架植草、空心六棱砖植草等护坡方法。1989年,广东省从香港引进1台喷播机,开始在华南地区进行液压喷播试验。1990~1991年,中国黄土高原治山技术培训中心与日本合作在黄土高原首次进行了坡面喷涂绿化技术(即液压喷播)试验研究。此后,经过十年左右的发展完善,液压喷播技术已广泛应用于我国不同地区的公路、铁路及堤坝等工程的边坡防护中。1993年,我国引进土工材料植草护坡技术,随后土木工程界与塑料制品生产厂家合作,开发研制出了各式各样的土木材料产品,如三维植被网、土工格栅、土工网、土工格室等,结合植草技术在铁路、公路、水利等工程的边坡中陆续获得应用。

经过多年的发展,目前植被护坡方式一般有:厚层客土种子喷播技术、生态混凝土基材喷播技术、挂网植草护坡技术、植生带育种护坡技术、铺草皮护坡技术、液压喷播植草护坡技术、干砌片石或浆砌片石方格或拱形骨架内植草护坡技术、预制混凝土框格内植草护坡技术、三维植被网护坡技术、土工格室植草护坡技术、香根草篱笆护坡技术、马道植草护坡技术、藤蔓植物护坡技术等。其中,厚层客土种子喷播技术,是指借助于机器把泥炭、草纤维、木纤维、谷壳、秸秆、木屑、矿物、肥料、保水剂、黏合剂及部分自然土等组成的人工土壤喷播吹附到坡面上,作为基层供植物根系固着、提供植物营养。挂网植草护坡属于土工材料联合植被护坡技术,是利用土工合成材料网与坡土接触面的摩擦作用,将网垫、植被根系和坡土牢固地结合在一起,形成一层坚固的绿色防护层,防止雨水冲蚀、边坡溜塌和滑坡。坡面绿化基础工程联合植被护坡技术一般

有：坡底挡墙上方土坡植被防护技术、在坡面架设钢木结构或混凝土框架并在框后坡土中扦插植被做成绿色挡墙的护坡技术及复合土工材料网室植被防护土坡技术等。其中，坡底挡墙上方土坡植被防护技术适用于一般坡度到较陡边坡，坡高可大可小，能防治水土流失，挖方边坡可以采用。复合土工材料网室植被防护土坡技术适用于一般坡度到较陡边坡，坡高可大可小，可防护一定深度的土层，能防治水土流失，填方边坡可以采用，能控制中等深度土层滑移。

目前，我国公路边坡生态防护用植物多采用草本植物，这是因为草本植物种植方法简单，费用低廉，早期生长快，对防止初期土壤的侵蚀效果较好。但是，草本植物与灌木相比则具有根系较浅、抗拉强度较小、固坡效果较差、需要持续性的管理措施等缺点，在雨季高陡边坡时常会出现草皮层和基层的剥落。因此，单纯的草本植物用作公路边坡的护坡植被并不理想。草本植物和灌木植被在地面以下 0.5~1.5m 处有明显的固土作用，乔木植物根系的固土作用可达 3m 甚至更深，但是乔木的重力和所承受的风力会提高坡面荷载，造成坡面的不稳定和破坏。灌木作为护坡植物的主要缺点是成本高、早期生长慢、植被覆盖度低、对早期的坡土侵蚀防护效果不佳。但是可以通过灌木与草本植物混播，发挥二者的优点，让草本植物充当先锋植物，尽快达到绿化效果并能有效抵抗雨水冲蚀，后期则由灌木发挥固土护坡作用。

1.2 生态边坡的护坡机理研究现状

植被一边坡系统是一个复杂的动态系统，植被对边坡系统的影响是多方面的，一般认为可分为力学效应、水文效应和生物效应三种类型，详见表 1-1。一般认为植物浅根的加筋作用、侧根的牵引作用及根系与土的胶结作用等能显著提高含根土层的抗剪强度^[8-13]，主根的锚固作用类似于锚杆或者抗滑桩的效果，边坡植被通过林冠截留、根系吸水和叶片蒸腾等作用，能有效地降低土壤中的含水量和坡体土体的孔隙水压力，这些因素均有利于提高边坡的稳定性^[14-18]；植物根系由于生长的需要及入渗和蒸发反复交替进行会增加土体孔隙率和入渗能力，同时植物传递的风荷载将不利于边坡的稳定^[19]。对于植被重力的影响，要根据边坡的具体情况而定，其中，边坡的坡度、内摩擦角及潜在滑动面的形状和位置等因素都会改变植被重力的作用性质。因此，需要具体问题具体分析。张永兴^[20]等通过边坡支护设计验算法及 FLAC 数值模拟法，结合具体工程，研究了绿化荷载作用对边坡整体稳定性的影响，结果表明绿化荷载对边坡的稳定性影响甚微（安全系数下降最大值不到 6%），只要施工顺序得当可以保证边坡安全。

植物作用因素分类及对边坡稳定性的影响^[9,21] 表 1-1

作用因素大类	作用因素小类	对边坡稳定性影响
力学效应	1. 浅根的加筋作用和侧根的牵引作用	有利
	2. 主根的锚固作用	有利
	3. 植物重力荷载，产生沿滑坡面切向/法向分力	不利/有利
	4. 植被传递风荷载至土体	不利

续表

作用因素大类	作用因素小类	对边坡稳定性影响
水文效应	5. 植物截留, 减少降雨入渗量	有利
	6. 根系使含根土层渗透性能增加	不利
	7. 根系吸水和植物蒸腾降低土体孔隙水压力	有利
	8. 入渗和蒸发反复进行会增加土体孔隙和入渗能力	不利
	9. 植被可延缓土体被雨水冲蚀	有利
生物效应	10. 根系与土壤接触发生有机物质的胶结作用, 能提高根土界面的摩擦作用和土体的黏聚力	有利
	11. 根系分泌物对土壤黏粒矿物的生物化学作用, 可提高土体黏聚力及根—土界面摩擦力	有利

1.2.1 根—土复合体的力学性能

1. 根—土复合体的相互作用机理

杨亚川^[22]将植物的根系和土壤从宏观上视为一个整体, 从而提出“根—土复合体”的概念。对于根—土复合体的相互作用机理, 一般认为根系抗拉强度大于土体, 在边坡滑动等土体加载过程中, 土体中的剪应力通过根—土相互作用, 逐渐转变为根系的拉应力, 因此使得土体的抗剪强度增加了。如果继续加载, 根要么被拔出, 要么被拉断^[23], 这取决于根的几何和力学特征。可见根系抗拉力和根—土界面摩擦力是影响根—土复合体的相互作用的主要因素, 学者一般采用根系拉拔原位试验和室内试验来进行研究。

Hamza^[24]等在野外和室内试验中观察到根拔出时力—位移曲线为非线性关系, 如图 1-1 所示^[25]。Schwarz 等^[26]通过根系拉拔试验, 发现根长、根弯曲、根分支点(侧根的直径大于 0.5mm)是影响根系拔出力的关键参数, 其中, 分支点增大拔出力的作用非常明显, 因为沿根分支锚固长度上的根的抗拉强度也被调动起来。在根系拉拔过程中, 根—土界面的摩擦作用由根拉伸阶段的静摩擦作业逐渐向根滑动阶段的动摩擦作业转变。Schwarz 等^[25]把根—土界面的摩擦作用分为根—土界面间的摩擦和根系分支点的摩擦两大部分, 并得出根—土界面静摩擦力: $\tau_d = c' + \sigma' \tan \varphi$, 总拔出力为: $F_{all} = \pi d_0 b \tau_d + \sum f_i$,

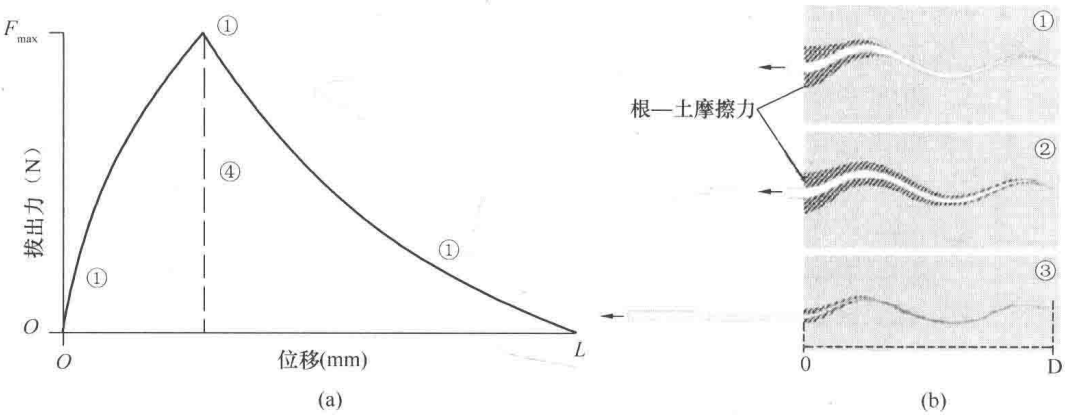


图 1-1 根系力—位移关系 (拔出)
(a) 力—位移关系曲线; (b) 根的拔出阶段

其中, d_0 为根尾 0 段的直径, f_i 为第 i 段根上的界面摩擦与分支点 i 的摩擦力之和。

国内学者研究表明, 植被根系的抗拉力与根径成指数函数或幂函数变化关系, 但这种回归关系因植被种类的不同而呈现较大差异, 这与根系的种类、生长方位、生长条件和组织结构有关。同时, 植被根系的表面积是影响根系抗拉阻力的重要因素, 一般而言, 表面积与抗拉力成正相关关系。因此, 在根径相同的情况下, 具有发达须根的根系由于增大了根系与土壤的接触面积和摩阻力, 可获得比主直根系更大的抗拉强度。

2. 根—土复合体的增强理论

根据根—土复合体的相互作用机理, 国内外学者对根—土复合体的增强理论模型进行了大量研究, 取得了丰硕的成果。20 世纪 70 年代, Wu^[30] 和 Waldron^[31] 基于摩尔—库伦强度理论提出了加筋土理论, 建立了根增强土的先驱模型。该模型假定当含根土体受到剪切时, 穿过剪切面的全部根系在同一时刻全部达到其抗拉强度, 即根系同时被拉断, 显然这一假设与实际情况不符^[32], 会使凝聚力计算值偏高。Pollen^[33] 等基于试验结果, 修正了 Wu-Waldron 增强模型, 建立了一种动态纤维束模型 (FBM) 来考虑土体在剪切过程中根系逐渐断裂的行为。该模型在根束中考虑了荷载相等均分的分配标准, 因而可以准确地模拟“根—土复合体”的受力破坏特征, 但由于没有考虑土变形及根的几何、力学性质对根渐进破坏特征的影响, 且使用应力控制加载, 不能得到完整的力—位移关系曲线, 不利于评价残余强度。Schwarz 等^[25,26] 修正了上述缺陷, 提出了以位移控制加载过程的根束模型 (RBM)。该模型综合考虑了根系的直径、抗拉强度、弯曲情况、根系长度、分支点、土体含水量及根—土间的摩擦作用等诸多因素的影响, 得到了包括达到荷载峰值后根残余拉力在内完整的力—位移关系曲线。

3. 根—土复合体的增强效果

根—土复合体的增强效果主要表现在对土的抗剪强度的提高上, 许多学者采用剪切试验或三轴试验进行研究, 取得了丰富的成果。俞晓丽^[34]、刘怀星^[35]、杨璞^[36] 等通过室内三轴试验考察了不同根系含量和不同加筋方式对根—土复合体抗剪强度指标的变化规律, 结果表明根系可提高土体抗剪强度, 具体表现为黏聚力 c 值明显增大, 而内摩擦角 φ 值变化幅度很小。余芹芹等^[37] 通过室内三轴试验发现灌草混种较单一种植灌木或草本植物对提高土体抗剪强度效果更好。周政^[38]、胡其志^[39] 研究了不同植被根系和不同含根量对根—土复合体抗剪强度的影响, 进一步验证了植被根系对根—土复合体的抗剪强度具有促进作用, 且抗剪强度随含根量的增大而增加。刘纪峰^[40]、胡文利等^[41] 探究了含水率对根—土复合体的抗剪强度的影响, 表明抗剪强度与含水率呈现负相关的关系。江峰等^[42] 采用直剪试验, 发现直根和斜根均能够提高根—土复合体的抗剪强度, 而且抗剪强度都随根条数的增加而增大, 只是斜根的加强效应稍大一些。邓卫东^[43]、石明强^[44] 等通过剪切试验研究了不同根系方向固土护坡的效果, 发现固土效果排序为: 复合根系 > 垂直根系 > 水平根系。夏振尧^[45]、黄晓乐等^[46] 将根系分形维数与根—土复合体的增强效果联系起来, 通过室内试验, 得出土层黏聚力增加值与土层内根系分形维数存在显著正相关关系的结论。刘川顺^[47] 等通过剪切试验, 建立了灌木加固黄土的非饱和根—土复合体抗剪强度模型, 得到非饱和根—土复合体黏聚力 c 为体积含水率 θ 和根系密度 β 的函数, 其回归关系式为: $c = 394.73\exp(-0.829\theta) + 2.13\beta^{1.07}$ 。

1.2.2 植被—气候的水文效应

学者们对于生态护坡的水文效应,主要从植物的降雨截留作用、减小地表径流、降低孔隙水压力及抗侵蚀等方面做了大量的研究。雨水滴落到坡面植被上,其中有一部分未下渗至土壤内,而是暂时被植被茎叶吸收并暂时储存,之后待蒸发返回到空气中,这部分被植被茎叶截留的水量可以减小雨水对坡面的冲蚀,延缓滑坡。仪垂祥、赵鸿雁等通过试验研究,分别建立了植被截留量公式及林冠截留量动态模型,可见植被截留量与植被覆盖度、叶面积指数和降雨量有关^[48,49];陈廉杰对林冠截留与覆盖度的研究,发现截留量与覆盖度正相关;卢洪健通过野外模拟降雨试验,得出截留率受降雨量影响显著,雨强对截留率影响不明显的结论^[50];薛建辉^[51]通过试验测得高山栎林、岷江冷杉林和灌竹林分别可平均截留 35.77%、45.47%和 46.55%的降雨量;地表枯落物最大可截持自身 1.7~3.5 倍重量的水分,能有效截留降雨^[52];卓丽^[53]等人采用吸水法测定草坪型结缕草的截留特性,结果表明:结缕草叶片的截留量在 0.61~1.05mm 之间,平均截留 0.83mm 水量。于露^[54]等人利用浸水试验,对高羊茅、早熟禾和结缕草叶片的最大吸水率进行研究,结果表明:其最大吸水量分别为其干质量的 0.41、0.62 和 0.52。以上对植被截留作用的研究可见,截留作用对保护边坡表层土壤有重要的意义。

草本植物茎叶生长茂密,覆盖度大,可有效削弱径流和冲刷能,进而减轻降雨对土体的冲蚀,减小地表径流,控制水土流失。侍倩^[55]建立了倾斜边坡抗侵蚀安全系数的估算公式,从而可以定量计算植被减小的侵蚀量;刘窑军^[56]通过对不同组合的边坡防护方式进行室外试验,研究降雨及植被防护对边坡侵蚀的影响,结果表明:梯坎与草灌结合的防护形式抗侵蚀能力最强,可达 72.3%和 80.2%的截留率和阻沙效率;田国行等研究得出,粉砂土边坡生态防护植被中,高羊茅、紫花苜蓿、狗牙根、紫穗槐和小叶扶芳藤削减降雨侵蚀率分别可达 96.1%、94.7%、94.6%、93.8%和 83.2%^[57];植物可以减弱雨滴对土颗粒的击打,殷晖等通过观测发现,雨强较小时,林冠截留作用使得雨水汇集,从而增加降雨落地时的动能,有时可以达到林外的 2 倍以上^[58]。雨水冲刷和地表径流是导致路基边坡失稳的一项关键的控制因素,通过前人研究可见:植被能明显减弱降雨对边坡的侵蚀,利于边坡的稳定。

在植物根系土增强土壤抗侵蚀力方面,朱显谟在 1960 年就提出,最有效和最根本的保持水土的方法就是生物措施^[59]。吴钦孝和李勇通过试验发现,草本植物的茎叶在一定程度上减少土壤流失,但决定削减土壤的冲刷量取决于根系^[60];曾信波^[61]在研究根系紫色土的抗冲性能时,认为植物根系提高土壤的抗侵蚀性能与根系密度相关,土壤流失量与根系含根量负相关;卓慕宁等^[62]对植草边坡进行观测试验,结果表明:草本植被能明显控制坡面沟蚀,在中到暴雨的情况下,植草边坡可平均减少 98.94%的径流量,大大降低了土壤流失量;李勇指出,根系提高土壤抗蚀性关键是由根径小于 1mm 的须根决定的^[63,64];吴彦^[65,66]及刘国彬^[27]提出,直径小于 1mm 的须根根系能够增加土壤水稳性团体的数目,有助于土壤结构稳定性的改进和渗透性增强,从而间接强化土壤的抗侵蚀力;李雄威以膨胀土为研究对象,通过原位渗透试验,证实了植物根系可增强土壤的渗透性^[67]。

1.3 生态边坡稳定性分析研究现状

根据开挖边坡及植被防护的类型,可将植被—边坡系统分成五大类,见表 1-2。各种

类型的植被—边坡系统稳定性分析如下。

植被—边坡系统类型^[4] 表 1-2

边坡类型	边坡特性	植被护坡作用	举 例
A	基岩完整，覆土层薄，根系不能进入岩体	植被固坡作用小，土层与基岩界面为薄弱面	新开挖的完整岩石边坡上进行喷射植被混凝土绿化
B	近似于类型 A，但基岩破碎，根系可以深入基岩裂隙	植被对边坡稳定起很大作用	在破碎岩石边坡上进行喷射植被混凝土绿化
C	覆土层较厚，在表层土壤和基岩间具有过渡层，其强度随深度增加而增加，根系伸入到过渡层	植被对边坡稳定起很大作用	自然边坡中常见
D	覆土层很厚，超过根系长度，植被可影响土层水文状态，但不能伸至深部可能滑移面	植被固坡力学效应有限，水文效应值得考虑	黄土边坡
E	植被结合必要的工程防护的形式	初期工程防护起主要作用，植被长大后变成植被与工程防护共同作用	土工格室植草护坡

1.3.1 A 类植被—边坡系统及稳定分析

类型 A 植被—边坡系统基岩完整，覆土层薄，根系不能进入岩体，土层与基岩的界面为薄弱面，植物固坡作用不大，因此，边坡的浅层稳定及客土稳定是需要关注的重点。

罗阳明^[68]针对边坡工程局部溜塌的失稳状态，分析了主动 SNS 与植被共同作用下浅层边坡的稳定性，如图 1-2 所示。坡体沿 *a*、*b*、*c* 三段边界发生塌滑，通过分别计算各段的自重重力，可计算出相应的下滑力和抗滑力，边坡的安全系数即由总抗滑力除以总下滑力得到。

如果边坡浅层失稳的范围较大，并且坡长远远大于其失稳厚度时，则可以采用“无限坡”模型来进行分析。Smith^[69]通过一个算例给出了均质无限斜坡的闭合形式解。胡利文等^[70]提出了关于生态护坡浅层稳定分析的无限坡模型，

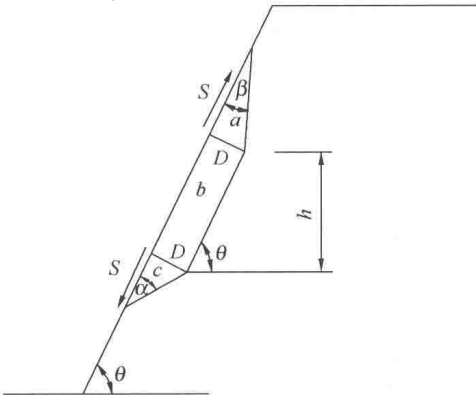


图 1-2 边坡浅层失稳计算图

并推导出了稳定安全系数的计算公式，通过了解坡面参数如坡度、厚度和土体参数等数据计算坡体可靠度。徐光明^[71]等应用离心模型试验研究了带有与边坡走向一致的倾斜基岩面且紧贴该基岩面存在软弱夹层的边坡的稳定性和破坏模式，发现该类边坡失稳时紧贴岩面的软弱夹层为滑动破坏面，且表现出典型的平移滑动破坏模式；并用极限平衡法求得了模型边坡的稳定安全系数，与实测结果相当吻合，证实了该方法能良好地预测边坡平移滑动破坏情形下的稳定安全系数。王亮^[72]、杨俊杰^[73]等设计了砂土客土及粉土客土对比模