

摘 要

近年来,随着我国西部大开发战略的实施,在大量铁路、公路等工程项目的施工中,不可避免的开挖出大量岩质路堑边坡。对于这些工程边坡,除了采取必要的支挡措施保证边坡的稳定外,还应尽量对稳定的岩质路堑边坡绿色防护层的稳定性作进一步的研究,以有效的恢复破坏了的自然环境。

论文在参考国内外岩质路堑边坡绿色防护研究资料的基础上,结合渝怀(重庆至湖南怀化)铁路上鱼嘴车站和江北车站的岩质路堑边坡的绿色防护工程,进行了以下内容研究:

首先,通过直接剪切试验得出两个工点边坡绿色防护层土体的物理力学参数,并根据试验参数建立力学模型,对绿化后植被根系对边坡表层土体加固作用进行定量研究。结果表明,有根系边坡表层土体加固作用是明显的,在植被根系作用下,边坡表层土体的稳定系数明显高于无根系边坡表层土体的稳定系数。

其次,本文还对不同根系重量、不同含水率等与边坡表层土体的抗剪强度的关系进行了定性分析。

最后,根据试验得到的边坡表层土体的力学参数,采用 DP(Drucker-Prager)材料,对不同坡高和坡度的岩质路堑边坡绿色防护层土体进行了有限元分析。

有限元分析的结果表明,有根系岩质路堑边坡表层土体的变形明显小于无根系岩质路堑边坡表层土体的变形。

本文的研究为评价绿色防护对岩质路堑边坡表层土体的加固效果及岩质路堑边坡绿色护坡工程技术规范和标准的制定提供了试验和理论依据。

[关键词] 绿色防护; 岩质路堑边坡; 直接剪切试验; 有限元分析

Abstract

In recent years, with the implementation of the China's strategy to develop our western regions, in the construction, in such projects as a large number of railways, highways, etc., a large number of rock slope of road cuttings has happened in unavoidable excavation. To the slope by the project, except take essential propping up and blocking the measure to guarantee the slope steady, we should also try our best to resume the natural environment destroyed because of the excavating project, this requires that protects the rock slope of road cuttings by greening protection.

The thesis at the foundation to study materials by consulting domestic and international rock slope of road cuttings, combine the Yuhuai Railway (from Chongqing to Huaihua of Hunan), the station of Yuzui and Jiangbei's rock slop and road cutting by greening protection, has carried on the following content research:

First of all, we take samples on two some worker slope top layer of soil body, through shear test draw its mechanics parameter directly, set up mechanics model according to experimental parameter, to vegetation root system side slope top layer soil body strengthen function go on research after afforesting. The result shows that with root system slop top layer soil's steady coefficient are higher than without root system's evidently.

Secondly, thesis also analyses the different root weights and different water centents with the shear strength's relations.

Finally, according to the project parameter that the test is received, the soil body material adopts DP (Drucker-Prager) material, then we analyse different hight and degree of rock slop and road cuttings's body of top layer soil by the finite element method.

Result that finite element analyse indicate that rock slop and road cuttings with root system's deformation is smaller obviously than rock slop and road cuttings without root system's.

The thesis for appraise greening protection to rock slop and road cuttings's layer reinforcement result and also supports testing and theoretical foundation to rock slop and road cuttings's greening protection norm and standard formulation.

Keywords: Greening Protection; Rock slope of Road Cutting; Direct Shear Test; Finite Elements Analysis

第一章 绪论

1.1 前言

岩质路堑边坡的绿色防护是指在岩质路堑坡面上施加的防护措施,如果边坡失稳,应先施以支挡加固工程,再做防护技术。国外一般对“边坡绿色防护”解释为:“采用活的植物,单独用植物或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”^[116]。岩质路堑边坡坡面绿化涉及岩土工程、恢复生态学、植物学、土壤肥料学等多学科于一体的综合植被护坡工程技术。因此,岩质路堑边坡绿色(植物)防护,实质上是在工程建设中实施生态建设措施,把工程建设和生态环境建设结合起来。在我国土木工程、水土保持、园林等学科都针对自己的学科特点进行过一些研究。采用植被护坡技术,绿色植物完全覆盖岩质边坡,不仅能防护浅层边坡,而且能恢复已破坏的植被,美化环境,保持水土,有效地解决边坡工程防护与生态环境破坏的矛盾,实现人类活动与自然环境的和谐共处。由于不同研究机构学科之间的差异,除植被护坡这个名称外还有生态工程、坡面生态工程、生态护坡、植物固坡、植被护坡、边坡绿化等名称。

1.2 岩质路堑边坡绿色防护技术及研究意义

岩质路堑边坡的绿色防护是为了迅速恢复岩质路堑边坡的生态系统,保护生态环境,这就要求人类的开发活动必须与自然相协调。因此,开展岩质路堑边坡绿色防护技术的研究主要有以下两方面的意义:

首先,岩质路堑边坡绿色防护是采用植物防护、草坪和灌木相结合的方式,形成绿草如茵的草坪,不仅具有良好的防止土壤侵蚀,稳固边坡的作用,还能够净化空气,稀释、分解、吸收和固定汽车尾气的灰尘,吸收及减弱噪音,减缓太阳辐射,保护并恢复驾驶员视力,保证行车安全,给司乘人员一个舒适而恬静的旅途环境^[14]。

其次,“人类活动与自然和谐共处,经济发展与环境保护协调并进”是人类生存和发展的基本要求。因为岩质路堑边坡的开挖对地形、地貌和植被的破坏,绿色资源减少,施工过程中造成的水土流失,以及对环境和水系的污染和影响等都将对有损生态景观,而且恶化了动、植物的栖息生存条件,加剧了生态系统的退化。但岩质路堑边坡的绿色防护可以有效的解决岩质路堑边坡工程的建

设与生态环境之间破坏的矛盾, 实现人类活动与自然环境的和谐共处。

岩质路堑边坡的绿色防护与岩土体的性质、岩体结构、气候、水文、风化、地形地貌等因素密切相关, 因此, 结合我国工程建设开展岩质路堑边坡快速恢复植被技术研究, 有利于推广和完善适合我国特点的植被护坡技术, 也有助于国家环保政策的实施。

1.3 岩质路堑边坡绿色防护技术国内外研究现状

国际上专门以植被护坡为主题的首次国际会议 1994 年 9 月在牛津举行^[133]。边坡的防护类型经历了一个从土质边坡绿色防护向岩质路堑边坡绿色防护转变的发展过程, 但单纯的植被护坡一般只适用于坡度较低的土质边坡, 对较陡的边坡或岩质路堑边坡往往不适用, 因为岩质路堑边坡一般难以供给植被充足的养分和水分, 而陡峭的边坡上地表径流速度大, 植被易被冲走、表土易崩剥塌滑。因此对岩质路堑边坡的绿色防护显得尤为重要。

国外对岩质路堑边坡的绿色防护研究起步较早, 日本在 1980 年开始研究开发岩质路堑边坡绿色防护技术, 形成了以“喷射岩床绿化工法”为代表的各种岩质路堑边坡绿色防护技术, 已广泛应用于道路工程、各种地质灾害恢复工程和水库等岩石、岩堆边坡的绿化和防护工程中, 其植被防护技术的研究开发和应用走在世界各国的前列。其中 20 世纪 80~90 年代开发的泥浆喷播技术, 采用泥浆将沃土、稳定剂、草种等混合而成的浆体均匀地喷射到坡面上, 较好地解决了较平缓的贫瘠土质和破碎岩质边坡的绿化问题。厚层基材植被护坡技术, 日本从 1976 年开发至今, 20 余年间作了大量的试验研究工作, 仅粘结剂, 就有水泥, 无机高分子聚合物, 浮液与凝聚剂的混合物, 纤维有草本、木本有机短纤维及连续纤维, 基本材料有砂土、壤土及有机质土, 较好地解决了岩质等贫瘠高陡边坡的绿色防护问题。从实际工程的应用情况看, 岩质路堑边坡的绿色防护技术已可应用于坡度缓于 1:0.5 的软岩、中硬岩质、硬岩质边坡及酸性、强酸性土质边坡的植被防护^{[132][133][134]}。预应力锚索、土工织物、厚层基质喷播(客土喷播)等与生态防护相结合的技术已经成为设计、施工中的常规技术。岩石边坡的柔性防护、客土喷播等技术已成为业内的常识。

国外学者们对林木根系固坡作用的土力学机理研究及其数学模型的建立十分重视。美国、日本、新西兰和奥地利等国家的学者们, 分别采用室内外直接剪切根系与室外拉拔根系等方法, 提出了一些草灌木和乔木根系的固坡力学数学模型^[73]。但这些模型中均未解决根系重量与抗剪强度、含水率与抗剪强度以

及有无根系对抗剪强度的关系影响等,而这些又正是固坡工作者和林学家们最关心的问题,并往往在如何评价乔灌木、草本植物根系固坡效益上产生不同的见解和争议。

在实践的基础上,一些室内和现场剪切试验也曾研究土和树根的相互作用(奥洛克林 1974,沃尔德伦 1977,沃尔德伦和达克迅 1981b,齐默尔 1981)。其中多数表明剪切强度随着树根强度的增加而增加。正如格雷和奥哈西(1983)、朱厄尔(1980)、休伯利脊(1987)、沃尔德伦和达克迅(1981a)的成果所表明的那样,加筋所起的作用依赖于许多因素,最重要的是刚度和加强方位^[45]。

国内在生态护坡方面研究还比较少,在岩质路堑边坡绿色防护技术方面积累的经验也相当匮乏,国内岩质路堑边坡的绿色防护技术尚处于试验研究阶段。陈振盛(1995)及黄尊景(1995)对台湾泥岩边坡采用播种、植苗及植生带等方法来防护,刘桂元(1998)对软岩边坡栽植葛藤、松树等进行防护。李旭光(1995)、张俊云(2000)、杜娟(2000)和江玉林(2000)分别介绍了日本的客土喷播护坡技术。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,进行了以土壤为主要材料、硅酸盐水泥为粘结材料的喷混植生实验,并在内昆、株六等铁路及惠河告诉公路进行了现场实验,取得了一些研究成果。1994年,湖北宜昌久丰植生工程有限公司首先引进了台湾喷混凝土植生技术,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 300m²进行尝试,取得了一定的成果。铁道第二勘察设计院于 1998年~2000年在襄石复线、内昆线、株柳复线对岩石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。另外,许文年(2002)开发的植被混凝土边坡绿化技术,与喷混植生技术也较为相似。近几年通过在一些工程中的应用也取得了部分成果^{[132][133][134]}。

另外,解明曙采用全根系拉拔试验法,研究了白榆根系的固土能力,结果有根系土的抗剪强度远高于无根系土的抗剪强度^[68]。因此根系土壤含水适量后,往往能够保持土体不崩塌。日本阿比一时等采用大型直接剪切试验和根系的分布调查法,对根系增强土层抗剪强度的增量与剪切面上的根量间的关系进行了研究,并在根系调查的基础上确定坡体稳定和根系的关系,把含根较高的表土层堪称是土壤——根系防护层,认为根的重要作用在于该防护层中根的网络作用,从新的角度揭示了根系固土护坡的作用机理^[65]。

总之,岩质路堑边坡绿色防护技术发展相对缓慢,应用范围不广,技术水平较低,设计方法、施工规程、验收标准等技术规范相对滞后,还有待进一步

系统性开发研究和规范管理。

1.4 课题来源及研究技术路线

岩质路堑边坡绿色防护需具备两个基本条件：一是坡面上必须有植物能赖以持续生长的种植基质；二是基质能永久固定在岩面上。所以，目前关于岩质路堑边坡绿色防护研究的课题主要有：如何在岩质路堑边坡表面提供稳定的植被生长所需的条件。植物在边坡上难以生长，主要是缺乏植物生长的条件，创造条件让植物生长是在边坡上恢复植被的关键技术。

岩质路堑边坡绿色防护与边坡稳定性的作用机理研究，主要有植被根系与岩质边坡表层相互作用的关系研究、植被护坡的土壤学理论研究和植被护坡的生态学理论研究。

其中，对岩质路堑方边坡的防护层稳定性及有关指标的研究，是建立既稳固又有生态效应的绿色防护结构体系的重要内容。

本课题正是针对这一需要，结合在建渝怀铁路鱼嘴车站和江北车站边坡植被防护的试验工点，对岩质路堑边坡进行绿色防护后表层土体稳定性和植物根系对边坡表层土体的加固作用进行研究，并结合试验参数采用有限元法对岩质路堑边坡绿色防护的设计指标进行分析。

本文研究，对评价岩质路堑边坡表层土体的绿色防护加固效果及岩质路堑边坡绿色护坡工程技术的规范和标准制定提供了试验和理论依据。

本课题主要完成工作内容和步骤如下：

- 1、现场取土样。
- 2、对鱼嘴车站和江北车站的土样进行有无根系的抗剪强度测定。
- 3、从力学角度研究有根系边坡和无根系边坡的稳定系数与边坡坡度的关系。
- 4、在边坡表层土体变形方面，对边坡的绿色防护与边坡坡度、坡高的关系进行研究。

研究流程图见图 1-1。

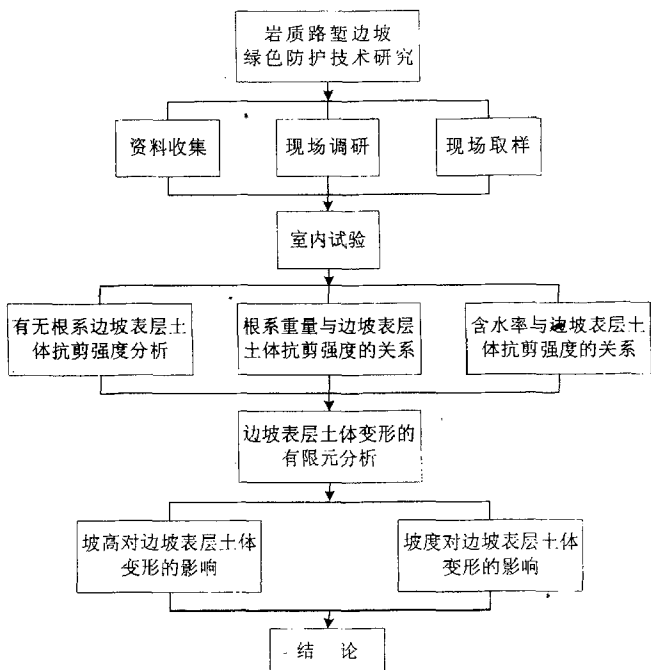


图 1-1 岩质路堑边坡绿色防护技术研究流程图

1.5 主要工作及时间安排

(1) 国内外研究现状及资料收集 (2003 年 3 月~2004 年 12 月)

包括国内外植被护坡资料及文件的阅读和摘录工作。先后共阅读国内外边坡支护及植被防护科技论文 150 篇左右及其它力学、数学理论文章。

(2) 渝怀铁路试验工点的现场调研 (2004 年 5 月和 2004 年 8 月)

2004 年 5 月对渝怀铁路进行现场调研, 调查试验工点的地质条件, 植被长势等。2004 年 8 月对渝怀铁路试验工点进行取样工作并再次对植被的长势进行调查。

(3) 室内资料整理和试验工作 (2004 年 8 月~2004 年 9 月)

对渝怀铁路现场调研资料进行整理, 并进行土工试验, 以此取得渝怀铁路

试验边坡表层土体的物理力学参数。

(4) 植被护坡的理论计算分析 (2004 年 9 月~2004 年 10 月)

- ①对有无根系边坡表层土体稳定性与坡度关系进行研究;
- ②对根系重量与抗剪强度的关系进行研究;
- ③对含水率与抗剪强度的关系进行研究;
- ④对植被护坡与边坡坡度、高度的关系进行研究。

(5) 论文的撰写 (2004 年 10 月~2005 年 1 月)

完成论文的初稿, 并进行修改。

第二章 渝怀铁路地质概况

2.1 渝怀铁路工程简介

渝怀铁路（重庆至湖南怀化）是我国西部大开发中基础设施建设的标志性工程之一，对加快西部地区开发，完善西南铁路路网布局，带动贫困山区人民脱贫致富都具有重要意义。渝怀铁路由重庆枢纽段和正线两部分组成。重庆枢纽段西连接襄渝线重庆市的团结村，东至鱼嘴站出站口，包括团结村联络线、重庆西环到线，总计 41.222km。渝怀正线自鱼嘴站出站口始，至湘黔线怀化站贵阳端终，包括怀化站西端下行引入线，总计 583.301km。全线正线建筑长度 624.523km，运营长度 603.589km（江北站至怀化站）^[137]。

渝怀线沿线地形起伏大，穿越了丘陵区、峡谷区、低山区、中山区。地层除石炭系外，从第四系至元古界，均有出露，以碎屑岩、可溶岩、变质岩为主。沿线地形地质条件复杂，地质灾害发育。对于大型的地质灾害，铁路上均采用绕避为主的原则，在初测和定测阶段线路都作了大量的绕避。现在仍有影响的地质灾害见表 2-1。

在渝怀铁路建设中，各施工单位把环境保护放在重要地位，积极采取有力措施，加大环保投入，力争将这条铁路建设成为一条“绿色通道”。对铁路修建过程中形成的工程边坡进行绿色防护，是修建此绿色通道的重中之重。

渝怀铁路全线的工程边坡的主要特点按其岩性组合，全线可分为下列几种类型：鱼嘴至涪陵以软质岩顺层为主；涪陵至彭水、冯家坝至细沙以软质岩和硬质岩互层为主；彭水至郁山，沿溪至龙潭以硬质岩顺层为主。硬质岩顺层又可分为 4 个亚类：①厚层至块状白云岩、灰岩，节理不发育；②中厚层状灰岩、白云质灰岩，节理发育但层面凹凸不平；③中厚层至薄层状灰岩，节理发育，层面光滑；④中厚层状灰岩夹薄层页岩。前三种类型层间力学指标逐渐降低，但受水的影响相对较小；后一种类型力学指标最低，有地下水活动时层间力学指标降低较快。

重庆地区属南过渡带，月平均气温 18.4℃，月平均最高气温 30℃，最低气温 8℃；年平均降雨量 1244.3mm，主要集中在每年的 4 月~9 月。

为了对植被护坡工程技术进行系统研究，本次在渝怀铁路选择 2 个试验工点进行土工试验和有限元分析，以此进行岩质路堑边坡表层土体的绿色防护技术研究。

表 2-1 渝怀铁路主要地质灾害简表^[137]

类 型	简 况
滑坡	沿线共有大小滑坡 63 处, 经初、定测后绕避了 32 处, 对线路有危害的仍有 31 处。
岩堆及坡、崩积层	沿线通过岩堆共有 16 处, 主要分于乌江峡谷、越岭地段、锦江峡谷等陡崖脚与软、硬质岩接触带附近。
危岩落石	全线地形陡峻, 危岩落石分布广泛, 共 13 段, 3.087km。主要分布于乌江峡谷、越岭地段、锦江峡谷的陡岩, 软、硬质岩接触带附近。
顺层及软质岩高边坡	全线顺层地段较长, 累计长度 43.638m。全线通过的软质岩主要为侏罗系、志留系、寒武系的泥页岩、板岩等。深路堑地段边坡较高, 路堑开挖后, 往往引起大范围的地面开裂和工程滑坡。顺层的危害主要表现在路堑开挖切断坡角后, 岩层沿层面发生顺层滑坡。
岩溶、岩溶塌陷及表水漏失	全线可溶岩地层分布广泛。可溶岩地段长 315.3km, 占全线的 54%, 其中隧道 114.508km (59 条), 路基 123.337km, 其余为桥梁。
水库坍岸	线路在鱼嘴至涪陵傍长江河谷、涪陵至土坎段傍乌江峡谷行进, 位于三峡库区内。长江河谷段地形横坡较缓, 对线路不够成威胁。乌江河谷段地形陡峻, 地表多坡、崩积、块石土和盐溶角砾岩风化层, 水库坍岸范围宽, 对线路影响大。
软土	沿线共通过软土地段 130 段, 累计线路长度 12.03km。
膨胀土	沿线通过膨胀土地段 13 处, 累计线路长度 49.46km。主要为可溶岩地层的红粘土, 部分为泥灰岩、泥质灰岩、坡积层。
煤层瓦斯	全线通过三个煤系地层, 三叠系须家河组、二叠系吴家坪组、梁山组含煤段。

2.2 试验工点概况

2.2.1 江北车站地质概况

线路自江北客站引出, 北向行进。该段为丘陵沟槽地貌, 自然坡度为 15~35°, 局部呈陡坎状, 海拔 215~270m, 民房散排, 植被不发育。

2.2.1.1 地层岩性

泥岩夹砂岩 (J_{2xs}), 紫红色, 泥岩夹黄色砂岩, 泥岩为厚~中厚层状, 表层风化剥落, 呈碎石角砾状; 砂岩薄层状, 矿物成份以长石为主, 石英等次之, 风化严重, 风化带厚约 1~3m。

砂岩 (J_{2xs}) 黄灰色, 紫红色, 中厚层状, 以长石矿物为主, 石英等次之。中细粒结构, 钙、泥质胶结, 质较坚, 风化颇重, 风化层厚 2~3m。

泥页岩夹砂岩 (J_{2s}), 紫红色, 青黑色, 泥页岩紫红色, 薄层状, 以粘土矿物为主, 岩层易风化剥落呈碎屑状; 砂岩呈薄~中厚层状, 以长石矿物为主, 中~细粒结构, 厚约 1~3m。

2.2.1.2 地质构造

地层成单斜构造，岩层产状 $N30^{\circ}\sim 70^{\circ}E$ ，测得节理 $N80^{\circ}E/75^{\circ}N$ ， $N20^{\circ}E/\perp$ ， $N10^{\circ}W/71^{\circ}N$ ， $N70^{\circ}W/\perp$ ，闭合到微张，贯穿性较差，间距 $0.5\sim 1.5m$ 。段内地震基本烈度为六度。

2.2.1.3 水文地质条件

该段地表水为沟槽中水，受大气降雨补给，水量不大，地下水不发育。本段挖方段左侧边坡普遍存在顺层，岩性以泥岩夹砂岩为主，工程挖方后存在顺层滑动的可能性。

2.2.1.4 不良地质现象

该段无不良地质现象。

2.2.1.5 采用的绿色防护类型

江北车站植被绿化分为两类，一是填方的路基边坡，采用骨架护坡，客土液压喷播植草。另一类是开挖的路堑边坡，采用挂网喷射厚层基材护坡。绿化效果见照片 2-1~2-3，其典型的边坡断面图见图 2-1：

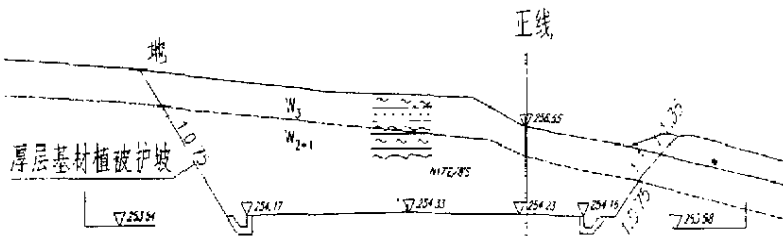
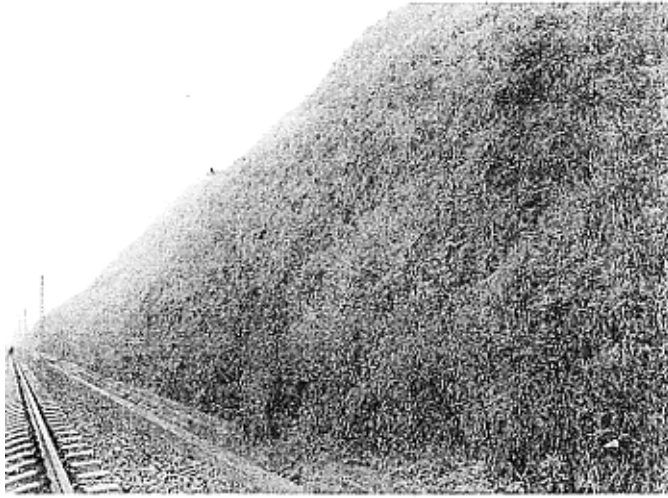


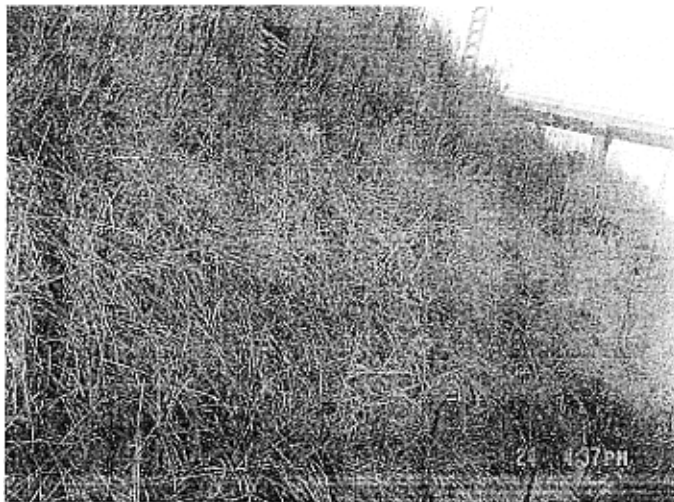
图 2-1 DK19+460 岩质路堑边坡断面



照片 2-1 江北车站喷射厚层基材植草护坡（摄于 2003.4）



照片 2-2 江北车站喷射厚层基材植草护坡（摄于 2004.5）



照片 2-3 江北车站喷射厚层基材植草护坡（摄于 2004.8）

2.2.2 鱼嘴车站地质概况

丘陵沟槽地貌，自然坡度 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ，海拔 $180\sim 260\text{m}$ 。丘陵平原，山顶浑圆，基岩裸露，平缓处多辟为旱地，沟槽中覆盖土较厚，开辟为水田及水塘，植被发育一般。

2.2.2.1 地层岩性

覆盖层为第四系坡洪积 ($Q_4^{\text{dl+el}}$)、坡残积 ($Q_4^{\text{dl+el}}$)、下伏基岩侏罗系中统沙溪庙组 (J_2s)。

砂黏土 (Q_4^{dl+pl}): 棕黄色, 棕红色, 硬塑状, 水田表层 1m 内为软塑状, 厚 2~10 m。

软砂黏土 (Q_4^{dl+pl}): 棕黄色, 灰褐色, 软塑状, 分布于塘中, 水田表层, 或夹层产出, 厚 0~4 m。

砂黏土 (Q_4^{dl+sl}): 棕红色, 硬塑~半干硬状, 夹 5%~10% 砂岩、泥岩质碎石角砾, 厚 0~2 m。

泥岩夹灰岩 (J_2s): 紫红色灰紫色, 泥岩, 泥质结构, 矿物成分以粘土矿物为主, 易风化, 夹中厚层泥质砂岩, 表层风化呈颗粒及土状, 风化严重带 1~2 m。

2.2.2.2 地质构造

线路位于 DK51+602 与广福寺向斜 70 度斜交, 向斜 NW 翼岩层产状 $N12\sim30^\circ E/2\sim47^\circ$, 向斜 SE 翼岩层产状 $N18\sim36^\circ E/12\sim13^\circ$, 岩层以泥岩为主, 节理不发育。

2.2.2.3 水文地质条件

地表水为水塘中水, 由大气降雨补给, 地下水不发育。

2.2.2.4 不良地质现象

- 1、测段无不良地质现象。
- 2、特殊地质现象: 软土。

2.2.2.5 采用的绿色防护类型

鱼嘴车站 D1K51+450~+980 是长大深路堑, 中心最大挖深 48m, 除地表面 0~2m 为覆盖的砂粘土, 再下 1.5m 为泥岩夹砂岩的 W_3 风化严重带外, 其余为风化颇重带 W_2 。开挖后边坡中部以泥岩为主, $N15^\circ W/90^\circ$ 、 $N10^\circ W/90^\circ$ 、 $N70^\circ W/90^\circ$ 三组节理将岩层切割成块状, 岩性主要为厚层砂岩, 节理不发育, 岩质坚硬, 有少量裂隙水。

D1K51+460~+980 左侧长 520m 及 D1K51+530~+930 右侧长 400m 的路堑边坡 (砂岩) 设置锚杆挂网厚层基材 (见图 2-2 植被护坡, 边坡坡率为 1:0.75, 锚杆长度分别为 1.6m 和 1.3m, 部分位于泥岩夹砂岩层中的厚层基材锚杆分别加长至 3.2m 和 1.6m, 基材厚度 10 cm, 挂网采用 $\phi 3.0$ 高镀锌机编铁丝网。锚杆采用 $\phi 16$ 的 II 级螺纹钢筋。

D1K51+450~+980 左侧、D1K51+450~+740 右侧路堑二级、三级边坡及 D1K51+500 设置拱形骨架内客土喷播植草护坡, 主骨架间距 5m, 拱间净距 5m。绿化效果见照片 2-4、2-5、2-6, 其典型的边坡断面图见图 2-3:

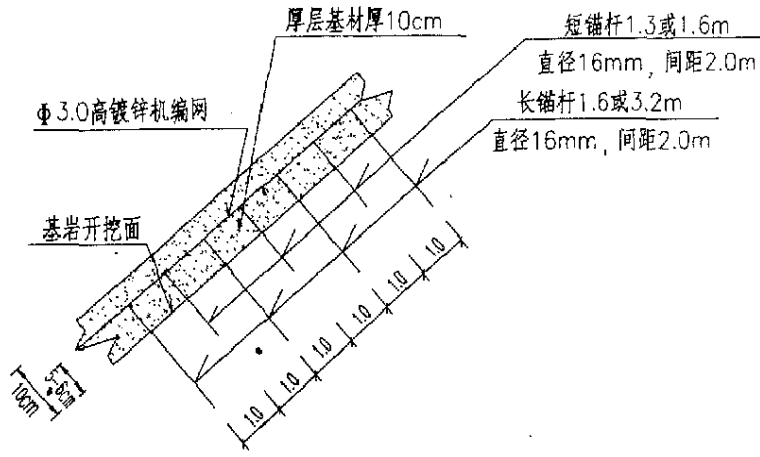


图 2-2 厚层基材护坡断面

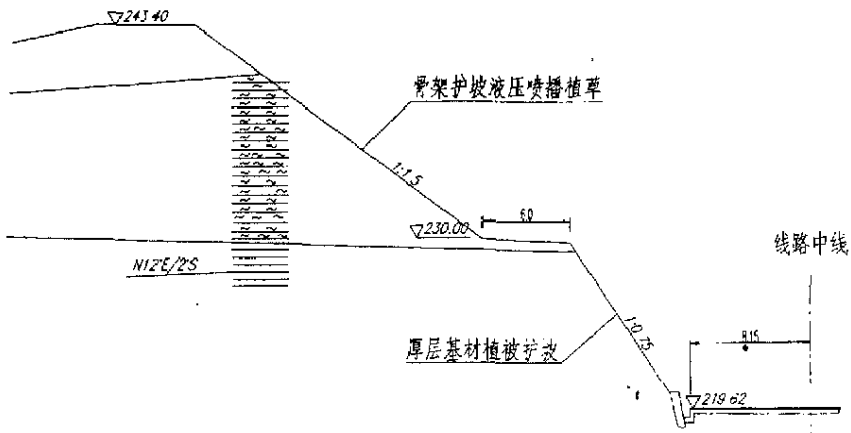
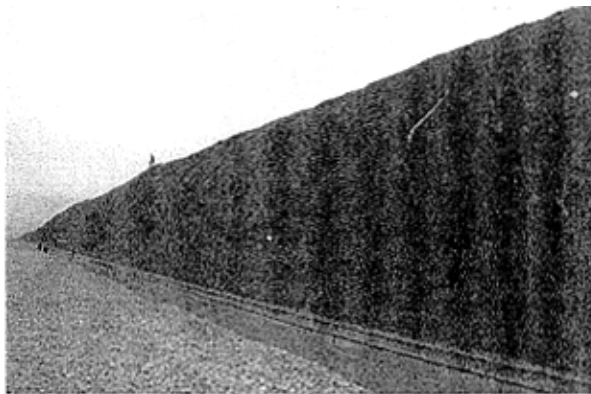


图 2-3 D1K51+640 岩质路堑边坡断面



照片 2-4 鱼嘴车站喷射厚层基材植草护坡 (摄于 2003.4)



照片 2-5 鱼嘴车站喷射厚层基材植草护坡（摄于 2004.5）



照片 2-6 鱼嘴车站喷射厚层基材植草护坡（摄于 2004.8）

2.3 江北车站和鱼嘴车站的植被类型

2.3.1 护坡植被类型选型

科学地选择适宜于工程边坡的植物品种是建立坡面快速恢复植被的重要工作之一。不同的植物具有各自不同的基因特性，因而对环境条件表现出不同的适应性，护坡植物品种的选择应遵循以下原则^{[132][134]}：

- (1) 适应当地的气候条件；
- (2) 适应当地的土壤条件（水分、pH 值、土壤性质等）；
- (3) 抗逆性（包括抗旱性、抗热性、抗寒性、抗贫瘠性、抗病害性等）强；
- (4) 地上部较矮，根系发达，生长迅速，能在短期内覆盖坡面；

- (5) 越年生或多年生;
- (6) 适应粗放管理, 能产生适量种子;
- (7) 种子易得且成本合理。

根据以上原则, 渝怀铁路江北车站和鱼嘴车站工程边坡采用以下草种: 高羊茅(*Festuca arundinacea*)、草地早熟禾(*Poa spp.*)、狗牙根(*Cynodon spp.*)和多年生黑麦草(*Lolium spp.*)。其种植用量见表 2-2:

表 2-2 江北车站和鱼嘴车站现场试验混合草种设计用量 (g/m^2)

高羊茅	草地早熟禾	狗牙根	多年生黑麦草
20	5	6	5

2.3.2 护坡植被简介

2.3.2.1 高羊茅

(1) 形态特征。多年生丛生型草本植物, 质地粗糙, 株高 60~80cm, 呈疏丛状, 须根发达, 入土很深。叶片线形扁平, 坚硬, 长 15~30cm, 宽 4~10mm, 背面光滑, 上面及边缘粗糙。圆锥花序开展, 长 20~30cm, 主枝长 6~8cm, 每节着生 2~4 个分枝, 小穗长 10~13mm, 具 4~5 花, 绿而带淡紫色, 颖果长圆状披针形, 长 3.4~4.2mm, 宽 1.2~1.5mm。显著大于羊茅属其它种^[14]。(见图 2-4)

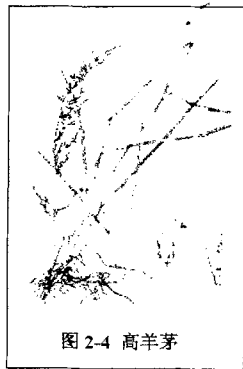


图 2-4 高羊茅

(2) 生态习性。适应于多种土壤和气候条件, 是应用非常广泛的草坪草。在暖温带和冷凉的亚热带气候条件下是一种重要的草坪草。高羊茅喜温耐热, 有强的抗热性, 在高温炎热的夏季, 许多冷季型禾草都进入休眠期; 但它不休眠。较抗寒, 耐荫耐湿又较抗旱, 耐刈割、耐践踏, 被践踏后再生力强。耐酸碱能力强, 能良好的适应 pH 值 4.7~8.5 的酸碱土壤。适应性广泛, 能适应年降水量 450mm 以上和海拔 1500m 以下温暖湿润的地区, 冷凉地区了也能适应。抗病性强, 根据多年观察高羊茅在北京地区未发现罹致病害。全年绿期较长, 在正常养护条件下, 在北京地区可达 240 天左右。不耐低剪, 剪草留茬应不低于 5cm, 剪得太低对分蘖有不利影响^[14]。

(3) 栽培技术。一般采用播种方法繁殖。种子繁殖, 建坪速度较快, 比草

地早熟禾快,比多年生黑麦草慢。春播或秋播均可,播种量 $25\sim 30\text{g}/\text{m}^2$ 。出苗后,注意除草,定期及时修剪^[14]。

2.3.2.2 狗牙根

(1) 形态特征。多年生草本植物。具根状茎和匍匐枝,具细韧的须根和根茎,节间长短不一。节间着地均可生根,分蘖 1~5 支。秆平卧部分长达 1m,并于节上产生不定根和分枝。故称“爬根草”。叶扁平线条形,长 3.8~8cm,宽 1~2mm,前端渐尖,边缘有细齿,叶色浓绿。叶舌短小,具小纤毛;穗状花序 3~6 枚,指状排列于茎顶,分支长 3~4cm。小穗排列于穗轴一侧,绿色,有时略带紫色,含 1 花,颖近等长,长 1.5~2mm,1 脉成脊,短于外稃,外稃具子脉。种子成熟易脱落,具有一定的自播能力^[14]。(见图 2-5)

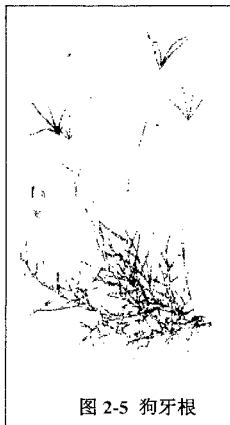


图 2-5 狗牙根

(2) 生态习性。该草喜光稍耐荫,在光照良好的开旷地上,草色浓绿,草层厚密,长势旺盛,而林下长势较弱。该草喜温暖,当气温降低至 0°C 时,生长受到严重影响。耐践踏,草层厚密,弹性好,再生力强,刈割后其地上部残茬能继续生长,切断的匍匐枝也能重新生根成活。喜排水良好的肥沃土壤中生长。因浅根系,且少须根,所以遇夏季干旱气候,容易出现匍匐枝嫩尖成片枯黄。此草侵占力较强,在肥厚的土壤情况下,容易与其它草种混生蔓延扩大,在微量盐滩地上亦能生长、良好。在华南全年绿期 270 天,华东、华中 245 天,成都 250 天。在乌鲁木齐秋季枯黄较早,绿色期 170 天左右^[14]。

(3) 栽培技术。狗牙根的繁殖方法有播种、草皮切块和根茎切段等。狗牙根种子在低温下发芽差,日平均温度在 18° 时发芽最佳。狗牙根因种子小,故整地时一定要精细认真,深翻土地,坪床应平整,细碎,疏松,底肥充足,一般施 $0.15\text{kg}/\text{m}^2$ 厩肥,再加配施 0.03kg 的过磷酸钙作基肥。播种期因狗牙根不耐寒,北方多为春末夏初,秋播则不利越冬,南方春播和秋播均可。播种量为 $5\sim 7\text{g}/\text{m}^2$ 。播完后要稍微喷些水,苗期注意人工拔除杂草^[14]。

2.3.2.3 草地早熟禾

(1) 形态特征。多年生根茎,疏丛型禾草,由根茎将许多疏丛型禾草连接在一起形成稠密的网状结构。禾草、秆丛生、光滑,呈圆筒形,高 50~75cm。

须根数量极多，分枝纵横，密集，可斜伸出地表成株丛。叶鞘疏松裹茎，具纵条纹；叶片条形，柔软。圆锥花序展开，长 13~20cm，小穗 4~6m，含 3~5 小花。颖果种子纺锤形，具三棱。长 1.1~1.5m，宽约 0.6mm。种子细小，千粒重约 0.39g^[14]。（见图 2-6）

(2) 生态习性。草地早熟禾适应性较强，喜光耐荫，喜温暖湿润，适宜在气候冷凉、湿度较大的地区生长，又具有很强的耐寒能力，在我国北方-30 度的寒冷地区均能安全越冬。抗旱型较差和耐炎热性差，在缺水或炎热夏季时生长缓慢或停滞，绿化效果差，春秋生长繁茂。在排水良好、土壤肥沃的湿地生长良好。根茎繁殖力强，再生性好，较耐践踏。播种当年只有个别植株抽穗开花，大部分植株第二年才开始开花结实。草地早熟禾绿期较长，在北京绿色期 270 天左右，3 月中旬返青，12 月上旬枯黄^[14]。

(3) 栽培技术。草地早熟禾既可用种子繁殖，又可用营养体繁殖。通常多采用播种，一般春播，也可秋播。由于种子细小，播种前应认真细致整地，清除坪床上的一切杂物。施底肥、腐熟有机肥 2.25~3.75kg/m²。播种深度 1~1.5cm，播种量 10~15g/m²。播种后要保持土壤湿润，以利于种子发芽，勤除杂草，当苗长到 5~6cm 时，可追施氮肥 5g/m²^[14]。

2.3.2.4 多年生黑麦草

(1) 形态特征。为非匍匐的丛生性草坪草种，具有细弱的根状茎，须根稠密，质地柔软，密度良好。茎直立，秆丛生，高 30~60cm，基部倾斜；叶片扁平，窄长，有微柔毛，长 10~20cm，宽 3~6mm，深绿色，发亮，具有光泽，富有弹性；叶脉明显。穗状花序，稍弯曲，最长可达 30cm，小穗扁平无柄，互生于主轴两侧。每穗含 3~10 朵花。种子扁平，呈土黄色，长 4~6mm。成熟后易脱落^[14]。（见图 2-7）

(2) 生态习性。该草喜温暖湿润夏季较凉爽的环境。抗寒、抗霜而不耐热，耐湿而不耐干旱，也不耐瘠薄。适宜于年降水量

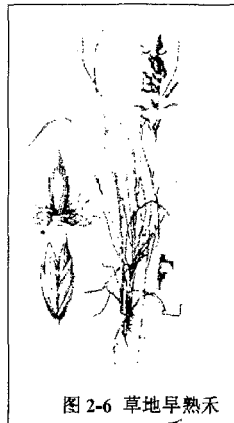


图 2-6 草地早熟禾

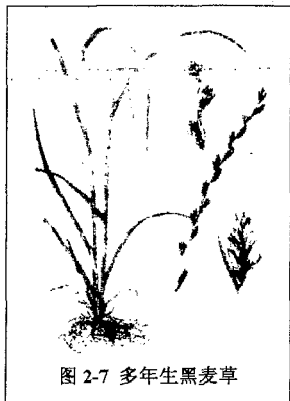


图 2-7 多年生黑麦草

1000~1500mm, 冬季无严寒, 夏季无酷暑的地区生长。生长最适宜温度为 20℃, 它不耐炎热, 35℃ 以上气温时则生长势变弱, 当气温低于-15℃ 时则可安全越冬。春秋季生长快, 炎热的夏季呈休眠状态。一般在北方绿期为 250 天左右。它适宜在肥沃、湿润、排水良好的土壤或粘性土上生长, 也可以在微酸性土壤上生长, 适宜 pH 值 6~7。最好是中性偏酸, 含肥较多的土壤。不耐干旱, 在水分缺少、瘠薄的沙土中生长不良。喜阳光下生长, 不耐荫, 在荫处易出现病害。耐践踏性和刈剪, 再生性好, 生长速度快。多年生黑麦草结实性好, 种粒较大, 发芽容易, 生长较快。该草寿命较短, 一般 4~6 年, 在精细管理下, 则可延长寿命^[14]。

(3) 栽培技术。通常用种子播种繁殖。多年生黑麦草产种量高, 采种容易, 种子发芽率高, 出苗快而整齐, 成坪快。在土壤水分充足的情况下 5~7d 即可出苗。春播、秋播均可, 以秋播为好, 播种量为 25~35 g/m²。苗期应注意浇水和防除杂草。该草分蘖力强, 再生快, 应注意修剪, 剪后及时浇水和追肥^[14]。

第三章 渝怀铁路的土工试验

3.1 试验准备

关于岩质路堑边坡的绿色防护涉及到很多方面,例如表层土体的稳定性,水分的供给等都对边坡的稳定以及植被的生长起着重要的作用。

试验必须采用可靠的试验样品,而取样是岩土室内试验研究必不可少的工序。尽管取样在岩土工程勘察中是一项经常性的工作,但有关取样的一些技术问题迄今尚未得到圆满解决,或者说未得到足够的重视。有很多岩土工程师和研究工作者致力于各种试验的理论、方法、仪器的研究,利用试验结果进行各种复杂、精密的分析计算。这些工作虽然是有意义的,但其真实价值如何,在很大程度上取决于所使用的试验样品是否能真正代表所要研究的岩土体^[9]。

我们于 2004. 8. 24 日驱车到重庆渝怀线的鱼嘴车站和江北车站进行取样工作,土样用塑料袋包裹紧,胶带缠实,以保持土样的天然结构和含水量。土样包装袋外粘贴表示土样上层面向的“↑”标贴。为了避免在运输过程中土样受到撞击,震动,土样放进土样箱之后所有空隙均填塞了杂草和薄塑料。取样现场图片见照片 3-1。

影响根系固坡能力大小的因素主要有物种的生物学特性(包括根系特性,穿过剪切面的根量,植被的年龄和人为活动等)和环境因素(包括坡度、坡高、土壤性状等)。



照片 3-1 取样现场

土样运到成都之后储放在土木馆土工试验室 1116, 因为要做一部分原状土样和需要保持天然含水率的扰动土样, 所以将土样放在了阴凉处, 严禁暴晒和冻结, 原状土上下方向不得倒置。

为了缩短土样的存放时间, 在准备好仪器之后就开始做各项试验了。试验项目共包括以下几项: 含水率的测定、密度的测定、不同含水率下的土体的剪应力的测定、不同根系重量情况下土体的剪应力的测定、土样 C, φ 值的试验等。

3.2 土样制备

根据《铁路工程土工试验规程》TB10102-2004 J338-2004, 针对这次试验的内容, 各试验项目所需土样数量见下表 3-1 所示, 各试验项目的计算单位和精度等, 如表 3-2 所示。

表 3-1 各试验项目所需土样数量^[1]

试验项目	黏性土、粉土		砂类土、圆(角)砾土	
	原状土(筒)	扰动土	原状土(筒)	扰动土
	$\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$	g	$\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$	g
含水率		100~300		800~1000
密度	1		1	
颗粒密度		50		砂 50: 砾 2000~10000
直剪剪切	2	5000		

表 3-2 计算单位和精度^[13]

试验项目	仪器校正精度			试验精度			成果整理		
	长度	重量	容量	长度	重量	容量	单位	精度	允许误差
含水量		0.01 克			0.01 克		%	0.1	2.0
容重	0.01 厘米	0.1 克	0.1 厘米 ³	0.01 厘米	0.01 克	0.1 厘米 ³	克/厘米 ³	0.01	0.03
直剪	0.01 毫米	0.1 克	0.1 厘米 ³	0.01 毫米	0.1 克	0.1 厘米 ³	φ 度 C 公斤/厘米 ²	0.5 0.01	

将土样进行统一编号, 并按工程性质编写报告号。土样编号规定如下: 鱼嘴车站的无根系边坡表层土体简称 YZW-1; 鱼嘴车站的有根系边坡表层土体简称 YZY-1; 江北车站的无根系边坡表层土体简称 JBW-1; 江北车站的有根系边

坡表层土体简称 JBY-1。其中前两个字母为取样工点名称的第一个大写字母，阿拉伯数字为试验过程中的土样编号。按编号顺序及试验项目单上要求试验项目依次进行开土及试验。开土后立即进行含水量及天然容重试验。切取试样后，在保证质量的前提下应尽量节省试样，将取完试件后所余之原状土扰动湿土包好存于样品箱内，以备复查试验结果时使用。

3.3 含水率的测定

土的天然含水率是土在 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 温度下烘至恒量时所失去水分质量与恒量后干土质量的比值，用百分数表示。

本试验以烘干法为测定含水率的标准方法，适合于各类土。

3.3.1 试验所采用的仪器设备

- 1、电热干燥箱：控制温度在 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 。
- 2、天平：TG71 型工业天平，最大载荷 1kg，分度值 10mg。
- 3、砝码：Fg4 型砝码，最小和最大质量 20mg~500g。
- 4、称量盒：直径 50mm，高 30mm。

3.3.2 试验操作步骤

1、根据不同土类按表 3-3 确定称取代表性试样质量，放入称量盒内，立即盖好盒盖，将盒外附着的土擦净后称量。

表 3-3 烘干法测定含水率所需试样质量¹¹⁾

按《铁路路基设计规范》 填料分类	按《铁路工程岩土 分类标准》分类	取试样质量(g)
细粒土	粉土、黏性土	15~30
粗粒土	砂类土、有机土	30~50
	圆砾或角砾	250~500
碎石类土	碎石类土	500~1000

由于所取土样为有根边坡表层土体，所以做此试验时根据所取土样的土类以及含有有机土，所以取试样质量应该在 30~50g 之间。

2、打开盒盖，将装有试样的称量盒放入烘箱，在 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 温度下烘干。烘干时间在 8 小时以上。

3、烘干结束后，将称量盒从烘箱中取出，盖上盒盖，放入干燥容器内冷却至室温，称其质量，精确至 0.01g。

3.3.3 成果整理

1、试验结果应按下式计算：

$$\omega = \left(\frac{m_s}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (3-1)$$

式中：

ω ——含水率（%），计算至 0.1%；

m_d ——干试样质量（g）；

m_s ——湿试样质量（g）。

2、本试验应进行平行测定，平行测定的差值应符合表 3-4 的规定，取其算术平均值。

表 3-4 含水率测定允许差^[1]

土的种类	含水率平行差值（%）		
	$\omega \leq 10$	$10 < \omega \leq 40$	$\omega > 40$
砂类土、有机土、 粉土、黏性土	0.5	1.0	2.0
碎石土	1.0	2.0	—

3、记录表如下表 3-5~3-8。

表 3-5 江北车站有根系表层土体烘干法测定含水率

试样 编号	称量 盒号	湿土+铝 盒质量	干土+铝 盒质量	铝盒 重量	含水率	平均 含水 率	总平 均含 水率
		g	g	g	%		
		(1)	(2)	(3)	$\frac{(1)-(3)}{(2)-(3)} - 1 \times 100$		
JBY-1	H385	42.010	36.870	11.700	20.4	19.9	19.7
	H310	50.430	44.140	11.705	19.3		
JBY-2	H218	41.750	36.700	11.721	20.2	19.5	
	H520	58.950	51.450	11.710	18.9		
JBY-3	H490	56.415	49.505	11.715	18.3	19.3	
	H300	53.900	46.800	11.694	20.2		
JBY-4	H514	41.720	36.670	11.695	20.2	20.1	
	H575	52.130	45.410	11.700	19.9		

表 3-6 江北车站无根系表层土体烘干法测定含水率

试样 编号	称量 盒号	湿土+铝 盒质量	干土+铝 盒质量	铝盒 重量	含水率	平均 含水 率	总平 均含 水率
		g	g	g	%		
		(1)	(2)	(3)	$\frac{(1)-(3)}{(2)-(3)}-1 \times 100$		
JBW-1	H362	47.315	42.280	11.700	16.5	16.6	16.7
	H209	51.130	45.470	11.690	16.8		
JBW-2	H570	45.115	40.250	11.716	17.0	16.8	
	H377	51.415	45.800	11.700	16.5		

表 3-7 鱼嘴车站有根系表层土体烘干法测定含水率

试样 编号	称量 盒号	湿土+铝 盒质量	干土+铝 盒质量	铝盒 重量	含水率	平均 含水 率	总平 均含 水率
		g	g	g	%		
		(1)	(2)	(3)	$\frac{(1)-(3)}{(2)-(3)}-1 \times 100$		
YZY-1	H300	52.160	45.560	11.694	19.5	19.7	18.9
	H302	48.655	42.535	11.700	19.8		
YZY-2	H580	47.525	41.850	11.685	18.8	18.8	
	H301	50.600	44.450	11.712	18.8		
YZY-3	H270	44.610	39.310	11.710	19.2	19.0	
	H385	54.520	47.760	11.700	18.7		
YZY-4	H520	42.460	37.720	11.710	18.2	18.2	
	H490	49.350	43.550	11.715	18.2		

表 3-8 鱼嘴车站无根系表层土体烘干法测定含水率

试样 编号	称量 盒号	湿土+铝 盒质量	干土+铝 盒质量	铝盒 重量	含水率	平均 含水 率	总平 均含 水率
		g	g	g	%		
		(1)	(2)	(3)	$\frac{(1)-(3)}{(2)-(3)}-1 \times 100$		
YZW-1	H234	53.900	47.965	11.710	19.7	16.9	16.8
	H215	46.820	42.475	11.710	14.1		
YZW-2	H260	49.980	44.625	11.700	16.3	16.8	
	H388	53.610	47.440	11.710	17.3		

土中主要水分之一固化水(粘结晶)在105~110°C高温下可蒸发完毕,温度偏低或偏高均会影响试验结果。含水率是标志土的湿度的一个重要物理指标。

天然土层的含水率变化范围很大，它与土的种类、埋藏条件及其所处的自然环境等有关。

由表 3-5~3-8 可以看出，有根系表层土体含水率大于无根系表层土体的含水率，主要原因是由于无根系表层土样是在有根系土样的基础上，将根系从土样中拣出来，剩余的即为无根系土样，在分离根系过程中，就导致了水分的蒸发，从而使得有根系土样的含水率略高于无根系土样的含水率；另外，由于根系的含水量较高，在根系被取出后，也会造成无根土样含水率稍低。

因此我们在本文中规定有根系边坡表层土体的含水率为 19.3%，无根系边坡表层土体的含水率为 16.7%。

3.4 密度的测定

土的密度是土的单位体积质量，单位为 g/cm^3 。本试验的目的是测定土的密度，用于计算土的干密度等指标。

本试验采用环刀法测定土的密度。

3.4.1 试验所采用的仪器设备

- 1、环刀：内径 61.8mm 或 79.8mm，高 20mm。
- 2、天平：TG71 型工业天平，最大载荷 1kg，分度值 10mg。
- 3、砝码：Fg4 型砝码，最小和最大质量 20mg~500g。
- 4、其他：切土刀、直尺、凡士林等。

3.4.2 试验操作步骤

1、本试验应按工程需要取原状土制备试样，由于是进行有根系土体的密度测定，因此在将原状土取出来之后，先将植被的茎叶去掉，然后将环刀的内壁涂一薄层凡士林，刀口向下放在土样上，用切土刀将土样削成略大于环刀直径的土柱。边垂直下压环刀边削土柱至伸出环刀为止。

2、用切土刀将环刀与土柱分离，削去两端余土并修平。擦净环刀外壁，称环刀与土总质量。

3.4.3 成果整理

- 1、试验结果应按下式计算：

$$\rho = \frac{m_s}{V} \quad (3-2)$$

式中：

ρ ——试样的湿密度 (g/cm^3), 计算至 $0.01 \text{g}/\text{cm}^3$;

m_s ——湿试样质量 (g);

V ——环刀容积 (cm^3)。

2、本试验应进行平行测定, 平行测定的差值不得大于 $0.03 \text{g}/\text{cm}^3$, 取其算术平均值。

3、环刀法密度试验的记录, 包括工程编号、试样编号、环刀编号、试样质量和试样体积。记录见下表 3-9~3-12。

表 3-9 江北车站有根系边坡表层土体的密度测定

试样编号	样品编号	环刀编号	土样+环刀重 g	环刀重 g	土样重 g	环刀体积 cm^3	单位密度 g/cm^3	平均单位密度 g/cm^3	总平均单位密度 g/cm^3
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)=(3) -(4)	(6)	(7)=(5) /(6)	(8)	(9)
JBY-5	1	39	143.300	34.712	108.588	64.106	1.69	1.68	1.68
	2	35	142.600	35.770	106.830	64.307	1.66		
JBY-6	3	20	141.570	35.027	106.543	64.106	1.66	1.67	
	4	33	143.070	35.037	108.033	64.207	1.68		
JBY-7	5	33	142.790	35.037	107.753	64.207	1.68	1.68	
	6	11	143.130	35.002	108.128	64.106	1.69		
JBY-8	7	39	143.070	34.712	108.358	64.106	1.69	1.68	
	8	48	142.760	35.320	107.440	64.106	1.68		

表 3-10 江北车站无根系边坡表层土体的密度测定

试样编号	样品编号	环刀编号	土样+环刀重 g	环刀重 g	土样重 g	环刀体积 cm^3	单位密度 g/cm^3	平均单位密度 g/cm^3	总平均单位密度 g/cm^3
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)=(3) -(4)	(6)	(7)=(5) /(6)	(8)	(9)
JBW-3	1	45	136.810	35.280	101.530	64.106	1.58	1.59	1.60
	2	33	137.360	35.037	102.323	64.207	1.59		
JBW-4	3	45	137.420	35.280	102.140	64.106	1.59	1.60	
	4	35	139.700	35.770	103.930	64.307	1.62		
JBW-5	5	11	138.450	35.002	103.448	64.106	1.61	1.60	
	6	47	137.120	35.020	102.100	64.307	1.59		
JBW-6	7	33	139.070	35.037	104.033	64.207	1.62	1.61	
	8	39	137.260	34.712	102.548	64.106	1.60		

表 3-11 鱼嘴车站有根系边坡表层土体的密度测定

试样编号	样品编号	环刀编号	土样+环刀重 g	环刀重 g	土样重 g	环刀体积 cm ³	单位密度 g/cm ³	平均单位密度 g/cm ³	总平均单位密度 g/cm ³
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)=(3)-(4)	(6)	(7)=(5)/(6)	(8)	
YZY-5	1	47	142.100	35.020	107.080	64.307	1.67	1.66	1.65
	2	11	141.220	35.002	106.218	64.106	1.66		
YZY-6	3	35	141.970	35.770	106.200	64.307	1.65	1.64	
	4	45	139.815	35.280	104.535	64.106	1.63		
YZY-7	5	39	140.920	34.712	106.208	64.106	1.66	1.65	
	6	20	140.320	35.027	105.293	64.106	1.64		
YZY-8	7	45	141.330	35.280	106.050	64.106	1.65	1.65	
	8	20	139.970	35.027	104.943	64.106	1.64		
YZY-9	9	39	131.525	34.712	96.813	64.106	1.51	1.52	
	10	45	133.930	35.280	98.650	64.106	1.54		

表 3-12 鱼嘴车站无根系边坡表层土体的密度测定

试样编号	样品编号	环刀编号	土样+环刀重 g	环刀重 g	土样重 g	环刀体积 cm ³	单位密度 g/cm ³	平均单位密度 g/cm ³	总平均单位密度 g/cm ³
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)=(3)-(4)	(6)	(7)=(5)/(6)	(8)	
YZW-3	1	39	132.200	34.712	97.488	64.106	1.52	1.53	1.52
	2	20	133.530	35.027	98.503	64.106	1.54		
YZW-4	3	39	132.800	34.712	98.088	64.106	1.53	1.53	
	4	33	133.415	35.037	98.378	64.207	1.53		
YZW-5	5	20	131.685	35.027	96.658	64.106	1.51	1.52	
	6	11	132.630	35.002	97.628	64.106	1.52		
YZW-6	7	48	132.770	35.320	97.450	64.106	1.52	1.52	
	8	11	132.710	35.002	97.708	64.106	1.52		
YZW-7	9	39	131.525	34.712	96.813	64.106	1.51	1.52	
	10	45	133.930	35.280	98.650	64.106	1.54		
YZW-8	11	35	132.980	35.770	97.210	64.307	1.51	1.52	
	12	48	133.900	35.320	98.580	64.106	1.54		
YZW-9	13	47	132.180	35.020	97.160	64.307	1.51	1.53	
	14	33	134.205	35.037	99.168	64.207	1.54		
YZW-10	15	33	132.130	35.037	97.093	64.207	1.51	1.52	
	16	20	133.030	35.027	98.003	64.106	1.53		

由表 3-9~3-12 可知, 有根系边坡表层土体的密度取二者的平均值 1.67 g/cm^3 , 无根系边坡表层土体的密度取二者的平均值 1.56 g/cm^3 , 则有根系边坡表层土体的容重为 16.7 KN/m^3 , 无根系边坡表层土体的容重为 15.6 KN/m^3 。

3.5 直接剪切试验

3.5.1 直接剪切试验原理

目前研究根系土抗剪强度的测定方法主要有以下几种: 直接剪切试验法; 原位水平挤出法; 全株根系拉拔试验法和室内模拟剪切试验法等。

直剪试验是将试样置于一定的垂直应力下, 在水平方向陆续向试样施加剪应力进行剪切。起始由于所加剪应力较小, 试样发生较小的变形而处于弹性平衡状态, 当剪应力达到某一限度时, 土样由于变形过大而不能抵抗更大的剪切, 此时土样即开始破坏而达到塑性平衡状态, 此破坏时的强度即为土的抗剪强度。它是由土颗粒之间的内摩擦角 φ 及由胶结物和束缚水膜的分子引力所产生的内聚力 C 两个参数所组成。土的抗剪强度可用库仑公式来表达, 库仑定律是指在法向应力变化范围不大时, 抗剪强度与法向应力的关系近似为一条直线。它表明在一般的荷载范围内土的抗剪强度与法向应力之间呈直线关系。其中 C , φ 被称为土的强度指标。

即

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (3-3)$$

式中:

τ ——土的抗剪强度, kPa;

σ ——土的剪切面上的垂直应力, kPa;

C ——土的内聚力, kPa;

φ ——土的内摩擦角, $^\circ$ 。

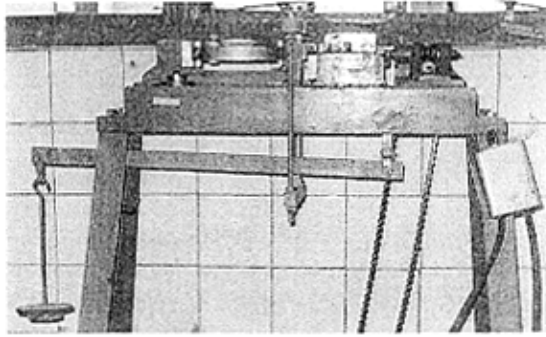
以剪应力 τ 为纵坐标, 垂直应力 σ 为横坐标, 绘制 $\tau - \sigma$ 关系曲线。在纵轴上的截距即为土的内聚力 C , 此直线的倾角即为土的内摩擦角。直剪试验仪见照片 3-2。

土的抗剪强度问题的基本出发点是把土视作为破坏前不变形的刚塑体^[12]。

直接剪切试验的目的是测定土的抗剪强度并决定土的内摩擦角和內聚力。

直接剪切试验的一般规定: 应取 4 个试样, 在直剪仪中分别施加不同竖向压力, 再分别对它们施加水平剪切力进行剪切, 求得破坏时的剪应力 τ 。然后根据库仑定律确定土的抗剪强度参数: 内摩擦角 φ 和內聚力 C 。

本试验采用不固结不排水剪（UU）进行剪切试验。



照片 3-2 直剪试验仪

3.5.2 试验所采用的仪器设备

- 1、直剪仪：包括剪切盒、垂直加压设备、剪切传动装置、测力计、位移量系统。直剪仪和测力计进行校正和率定。
- 2、位移计：量程为 10mm，分度值为 0.01mm 的百分表。
- 3、环刀：内径 50mm，高 30mm。
- 4、天平：Fg4 型砝码，最小和最大质量 20mg~500g。
- 5、透水板：直径比环刀略小约 0.2~0.5mm。
- 6、其他：切土刀、塑料纸等。

3.5.3 试验操作步骤

3.5.3.1 试验基本过程

1、将土样上下方向颠倒放置，将环刀的内壁涂一薄层凡士林，刀口向下放在土样上，用切土刀将土样削成略大于环刀直径的土柱，边垂直下压环刀边削土柱至伸出环刀为止。

2、用切土刀将环刀与土柱分离，削去两端余土并修平，擦净环刀外壁，称环刀与土总质量，准确至 0.1g。试样制备应迅速。

3、对准剪切容器的上下盒，插入固定销，在下盒内放入透水板，然后在透水板上放置一张塑料纸以防透水。再将带有试样的环刀刀口向上，对准剪切盒口，在试样上面放塑料纸，然后在塑料纸上放置透水板，再将试样缓慢推入剪切盒内，再移去环刀。

4、开动前进传动装置，使上盒的前端钢珠与测力计接触，调整测力计读数

为零。顺次加上传压板、钢珠、加压框架。

5、施加荷载分别为 $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $1.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 。

6、立即拔去固定销，将测力计调零后，开动秒表，当测力计的读数不变或出现后退，表示试样已被剪坏，一般应剪切至剪切变形达 4mm 为止，如测力计读数随剪切变形继续加大，则剪切变形应达到 6mm 为止。

7、剪切结束后应立即吸去剪切盒内积水，退去剪切力和垂直压力，移去加压框架，取出试样，按上述步骤连续剪完不同垂直压力下的其余三个试样。

3.5.3.2 试验土样抗剪强度选取

试验中每隔 5 秒读测力环读数一次，实验完成后算出每隔 5 秒的应力值(表 3-14)，绘出土样中应力随时间的曲线图(如图 3-1)。参照 3.5.3.1 第 6 条确定土样的剪应力值。

下面仅列出鱼嘴车站有根系边坡表层土体在垂直压力 $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 几组试验数据，其它与之相同。这里不再一一赘述。

表 3-14 鱼嘴车站有根系边坡表层土体每 5s 剪应力的值

时间 s	YZY-10 环刀编号 39 剪应力	YZY-11 环刀编号 48 剪应力	YZY-12 环刀编号 45 剪应力	YZY-13 环刀编号 20 剪应力
0	0	0	0	0
5	19.040	16.660	26.180	21.420
10	32.130	35.700	40.460	34.510
15	40.460	45.220	49.980	44.030
20	45.696	52.360	57.120	49.980
25	51.170	58.310	64.260	53.550
30	55.930	63.070	69.020	60.690
35	60.690	68.306	73.780	65.450
40	65.450	72.590	78.540	71.400
45	69.020	76.398	80.920	74.256
50	72.828	80.444	84.490	77.350
55	76.160	83.300	88.060	80.920
60	78.778	86.156	90.440	83.538
65	81.158	88.536	92.820	86.870
70	83.776	90.916	96.390	89.250
75	85.918	93.296	98.770	92.344
80	88.060	95.200	101.150	94.248
85	90.440	97.580	103.530	95.676
90	91.868	99.484	104.720	97.818
95	93.058	100.436	107.100	100.198
100	94.724	102.340	108.290	101.864
105	95.200	104.006	109.718	103.530
110	97.104	105.910	110.908	104.720

续表 3-14

时间 s	YZY-10 环刀编号 39 剪应力	YZY-11 环刀编号 48 剪应力	YZY-12 环刀编号 45 剪应力	YZY-13 环刀编号 20 剪应力
115	97.818	108.052	112.098	106.148
120	99.008	109.956	113.288	107.338
125	99.960	111.384	114.240	108.290
130	100.912	113.764	115.430	109.480
135	101.864	115.430	116.620	109.956
140	102.578	116.620	116.858	111.384
145	103.054	118.524	117.096	111.860
150	104.006	120.190	118.524	112.336
155	104.720	121.618	119.000	113.050
160	105.196	123.760	-	113.764
165	106.386	124.950	-	114.478
170	107.100	126.140	-	116.296
175	107.100	127.330	-	116.144
180	-	128.520	-	116.620
185	-	130.186	-	-
190	-	131.138	-	-

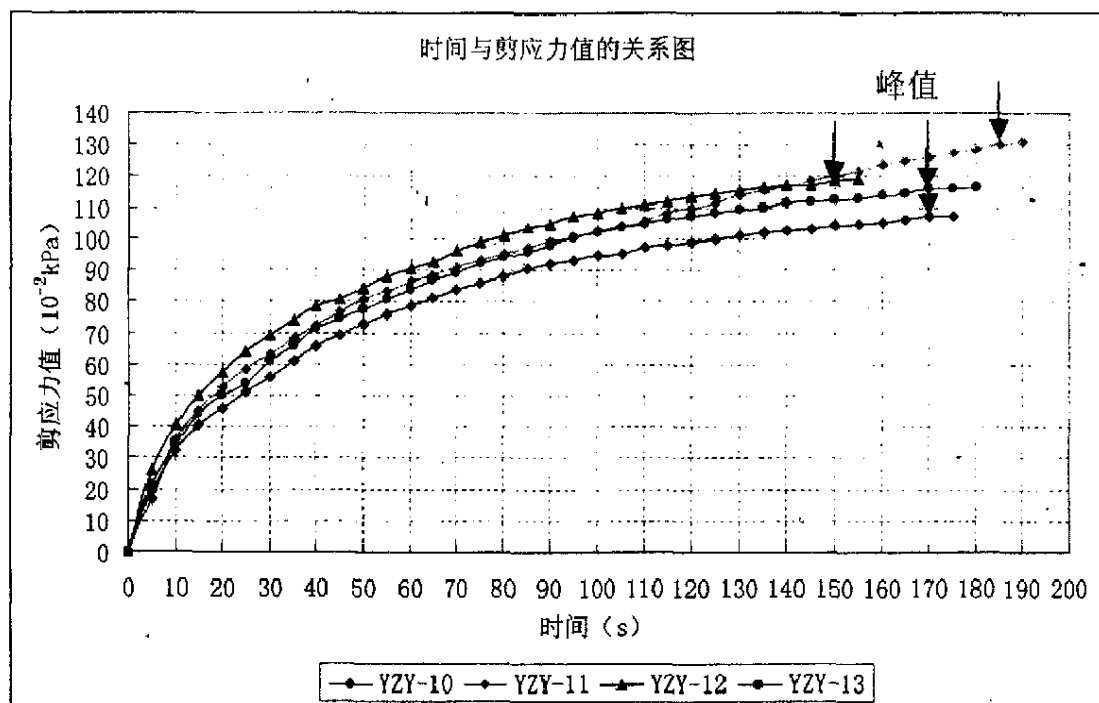


图 3-1 鱼嘴车站有根系边坡表层土体剪应力值选取

3.5.4 成果整理

1、抗剪强度计算公式:

$$\tau = C \times R \times 100 \quad (3-4)$$

式中:

C——测力计率定系数 ($\text{kg}/\text{cm}^2/0.01\text{mm}$);

R——测力计读数(10^{-2}mm);

100——单位换算因数。

2、以抗剪强度 τ 为横坐标,垂直应力 σ 为纵坐标,绘出压力与抗剪强度关系曲线图,求出内摩擦角和粘着力。

3、试验记录见下表3-15~3-16。抗剪强度与垂直应力关系曲线见图3-2~3-10。土样剪切之后见照片3-3。

表 3-15 有根系边坡表层土体的抗剪强度测定记录表

试样 编号	百分 表读 数	量力环 系数	垂直 荷载	垂直 应力	抗剪 强度	C 值	ϕ 值	C 值 平均 值	ϕ 值 平均 值
	10^{-2} mm	kg/cm^2 /0.01mm	kg/cm^2	kPa	kPa	kPa	°	kPa	°
JBY-9	20	0.0238	0.50	50	47.60	19.04	28.28	19.81	27.9
	30	0.0238	1.00	100	71.40				
	41	0.0238	1.50	150	97.58				
	54	0.0238	2.00	200	128.52				
JBY-10	18.7	0.0238	0.50	50	44.506	19.75	27.7		
	31	0.0238	1.00	100	73.78				
	42	0.0238	1.50	150	99.96				
	51.8	0.0238	2.00	200	123.284				
YZY-14	20	0.0238	0.50	50	47.60	20.23	28.28		
	31	0.0238	1.00	100	73.78				
	42	0.0238	1.50	150	99.96				
	54	0.0238	2.00	200	128.52				
YZY-15	19	0.0238	0.50	50	45.22	20.23	27.29		
	31	0.0238	1.00	100	73.78				
	40.4	0.0238	1.50	150	96.152				
	52	0.0238	2.00	200	123.76				

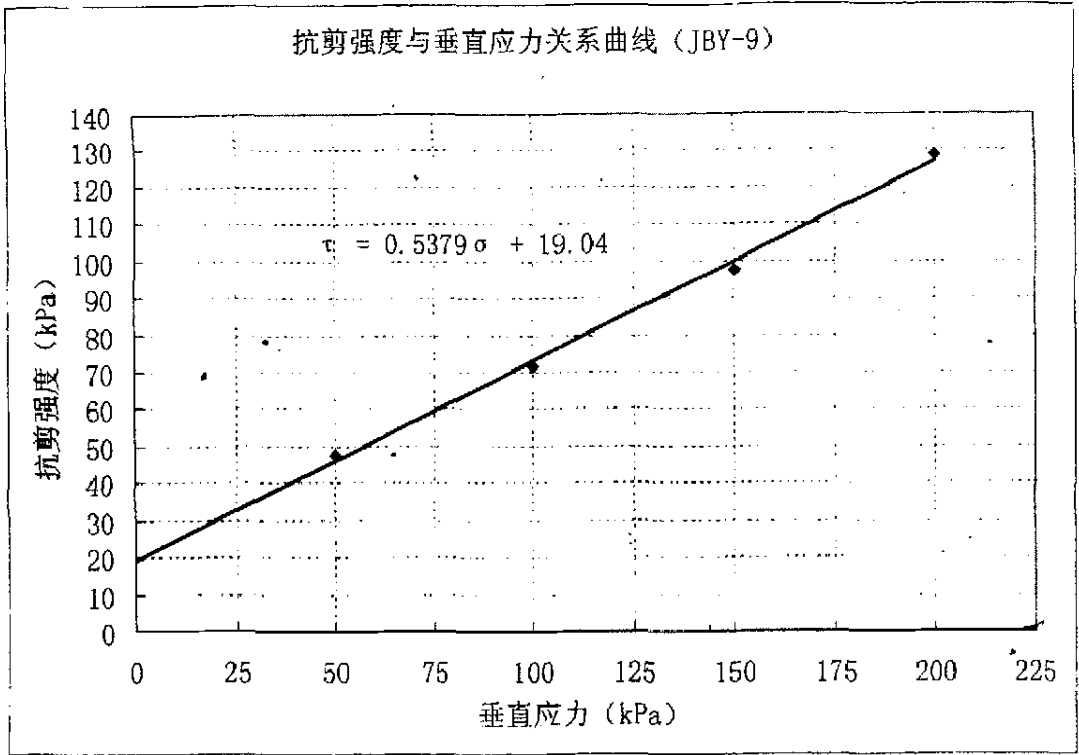


图 3-2 抗剪强度与垂直应力关系曲线图 (JBY-9)

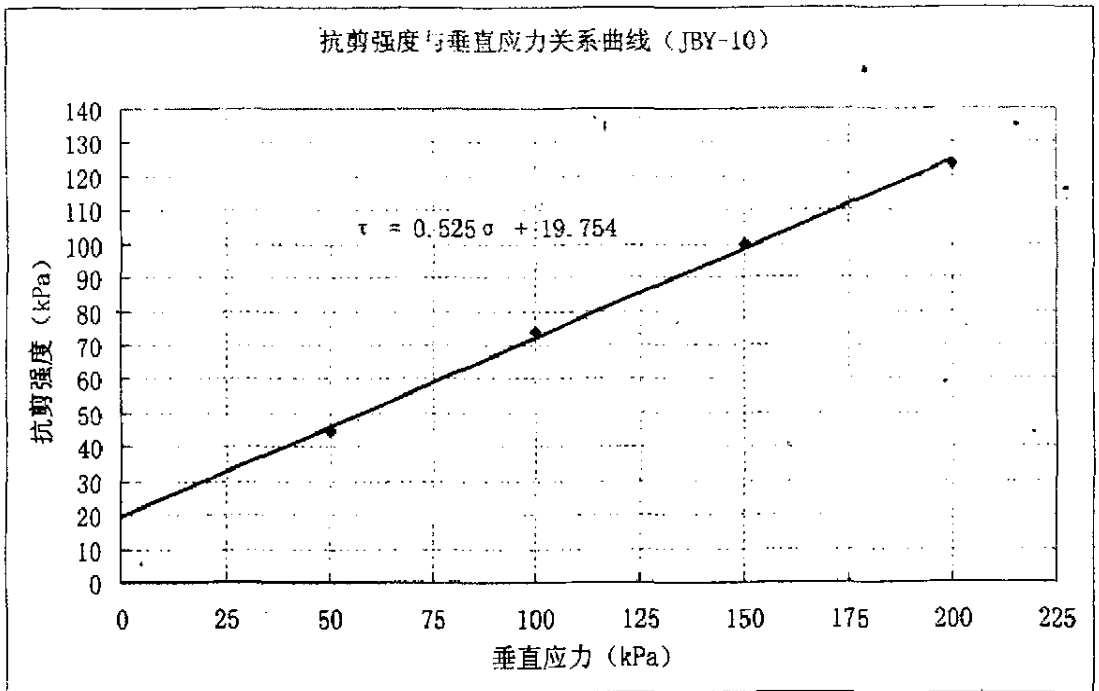


图 3-3 抗剪强度与垂直应力关系曲线图 (JBY-10)

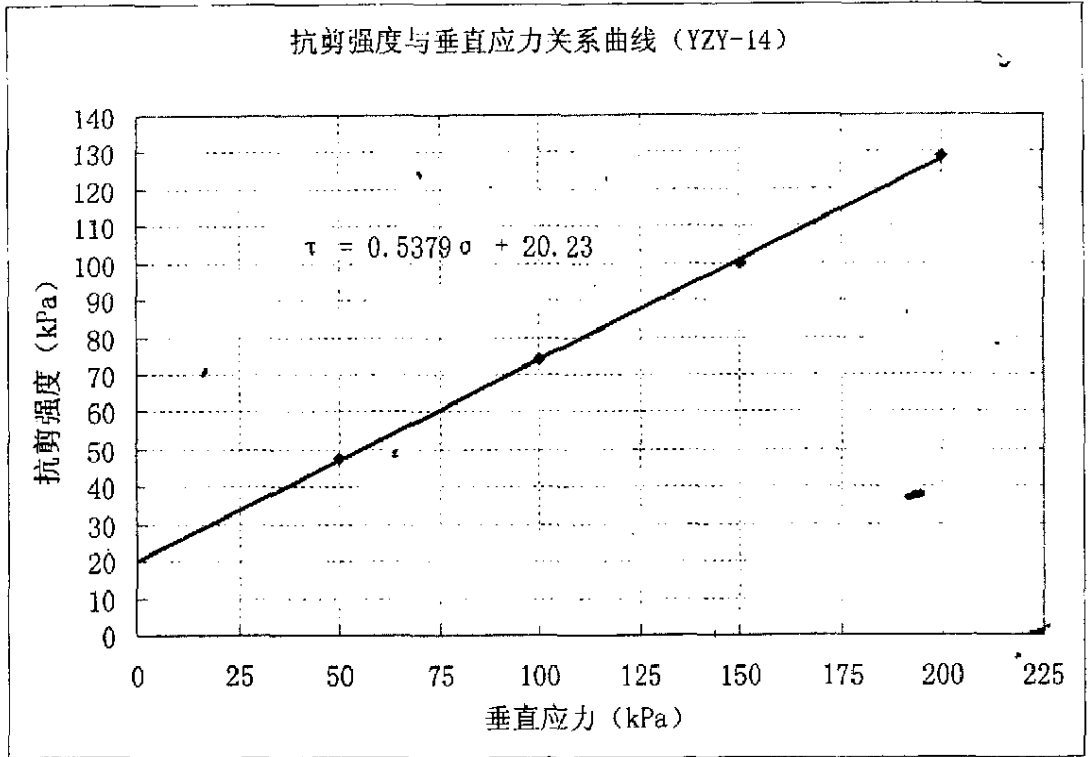


图 3-4 抗剪强度与垂直应力关系曲线图 (YZY-14)

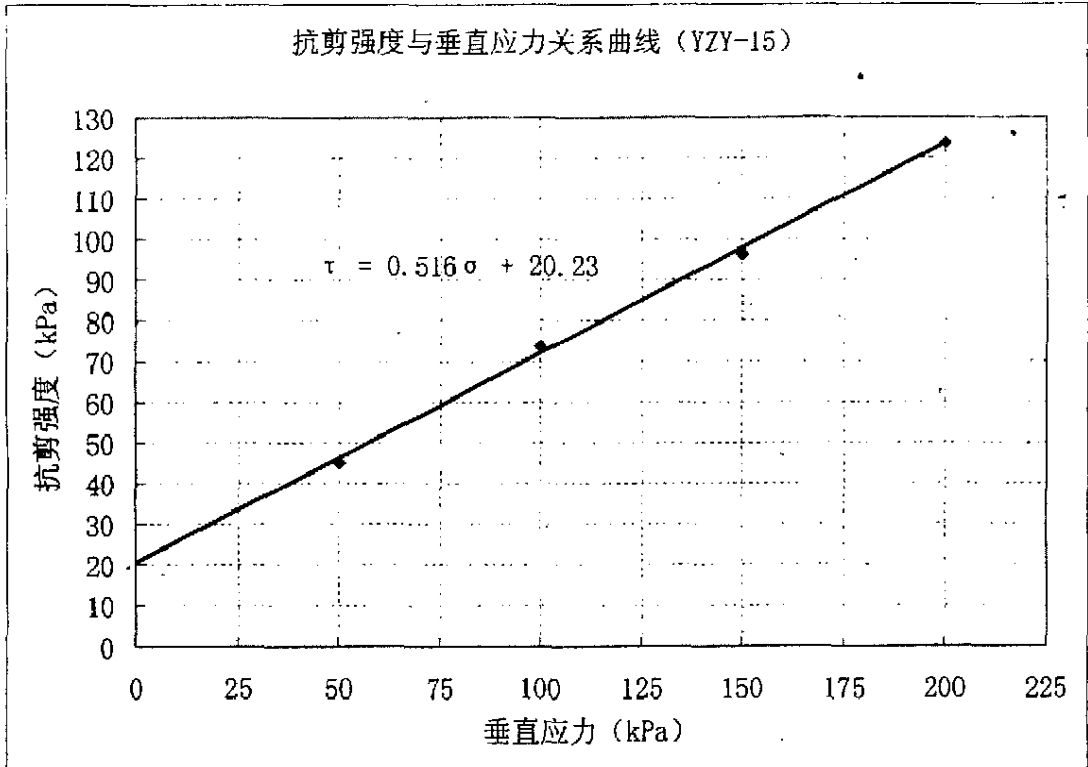


图 3-5 抗剪强度与垂直应力关系曲线图 (YZY-15)

表 3-16 无根系边坡表层土体的抗剪强度测定记录表

试样编号	百分表读数	量力环系数	垂直荷载	垂直应力	抗剪强度	C 值	ϕ 值	C 值平均值	ϕ 值平均值
	10^{-2} mm	kg/cm ² / 0.01mm	kg/cm ²	kPa	kPa	kPa	°	kPa	°
JBW-8	16	0.0238	0.50	50	38.08	11.90	26.56	11.57	26.3
	25	0.0238	1.00	100	59.5				
	37	0.0238	1.50	150	88.06				
	47	0.0238	2.00	200	111.86				
JBW-9	15	0.0238	0.50	50	35.7	11.42	26.82		
	26	0.0238	1.00	100	61.88				
	38	0.0238	1.50	150	90.44				
	46.4	0.0238	2.00	200	110.432				
YZW-12	15	0.0238	0.50	50	35.7	11.78	25.74		
	25	0.0238	1.00	100	59.5				
	36	0.0238	1.50	150	85.68				
	45.1	0.0238	2.00	200	107.338				
YZW-13	15	0.0238	0.50	50	35.7	11.19	26.07		
	25	0.0238	1.00	100	59.5				
	36	0.0238	1.50	150	85.68				
	45.6	0.0238	2.00	200	108.528				

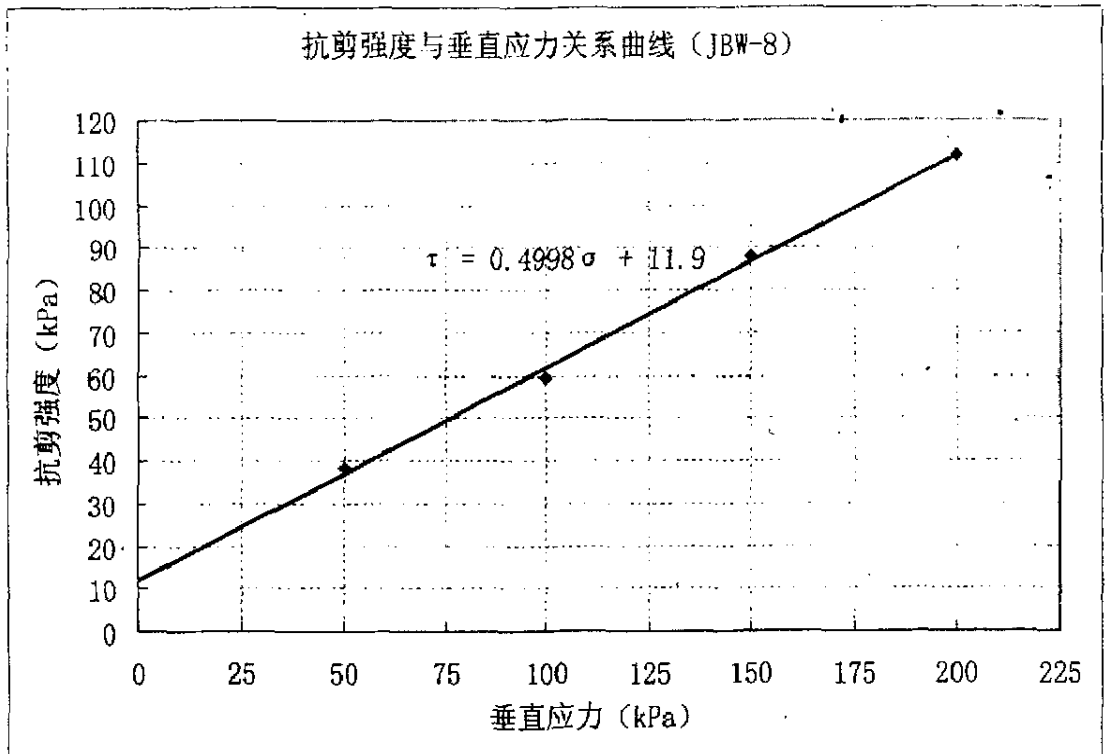


图 3-6 抗剪强度与垂直应力关系曲线图 (JBW-8)

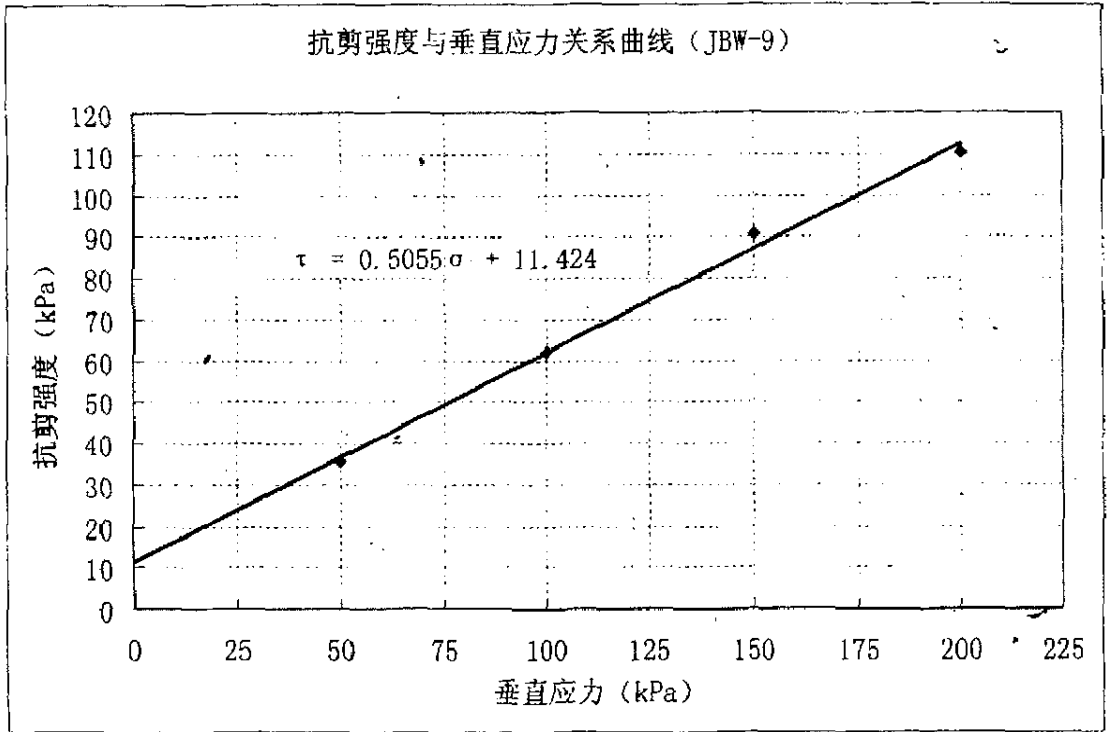


图 3-7 抗剪强度与垂直应力关系曲线图 (JBW-9)

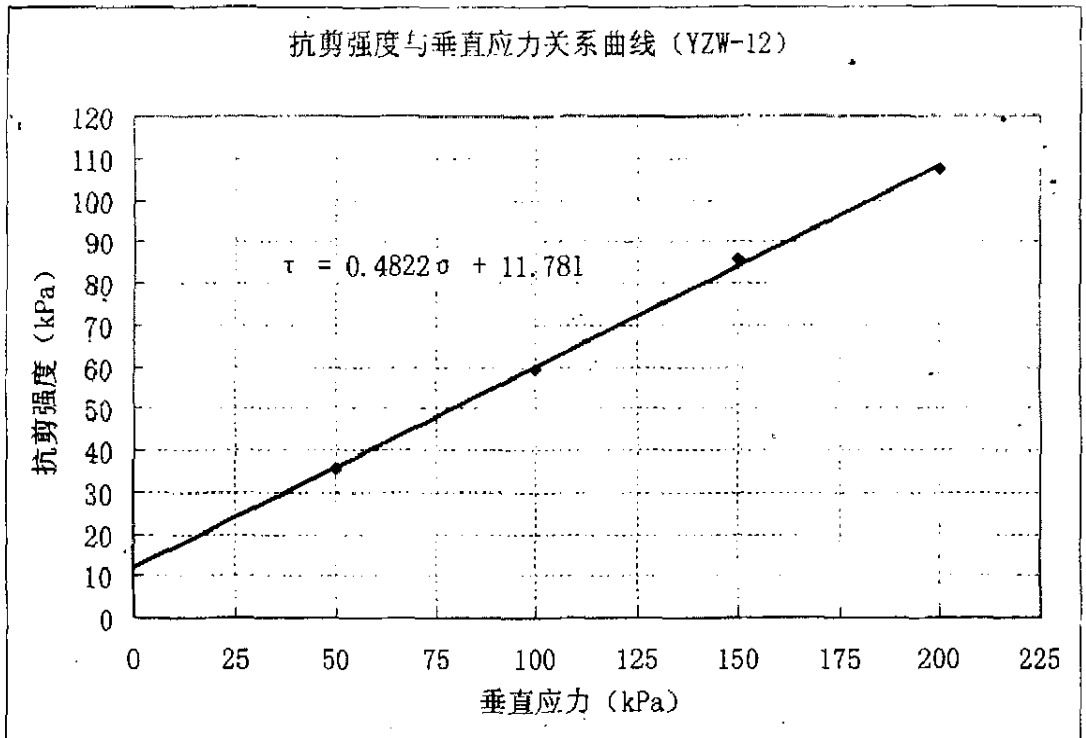


图 3-8 抗剪强度与垂直应力关系曲线图 (YZW-12)

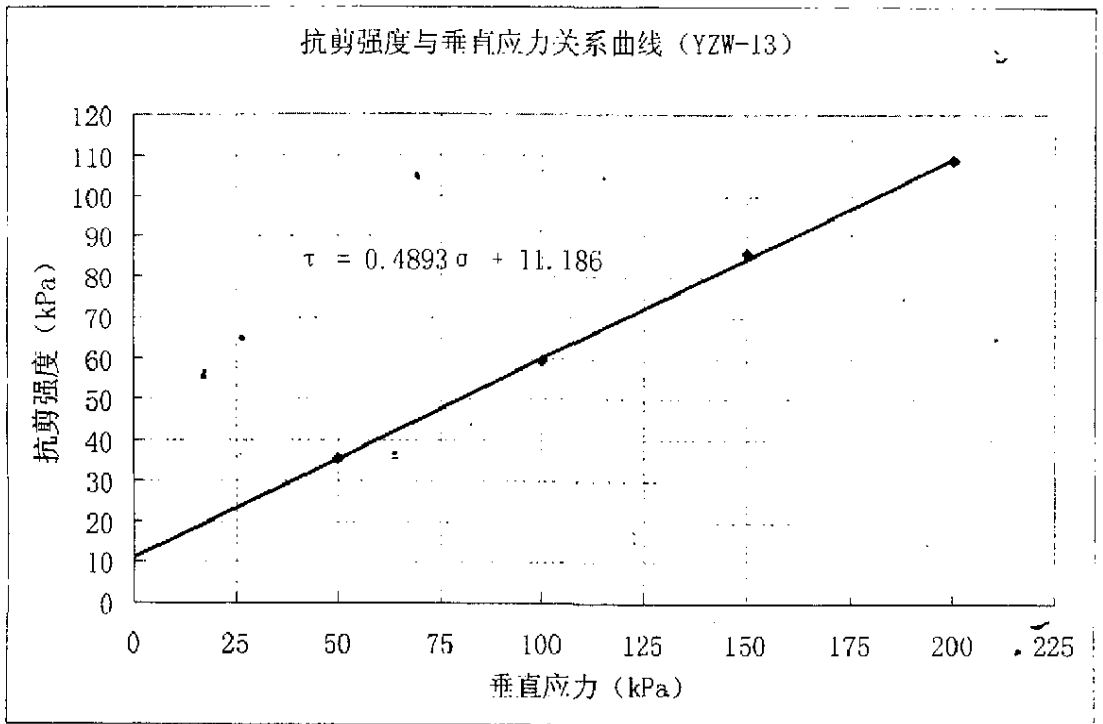
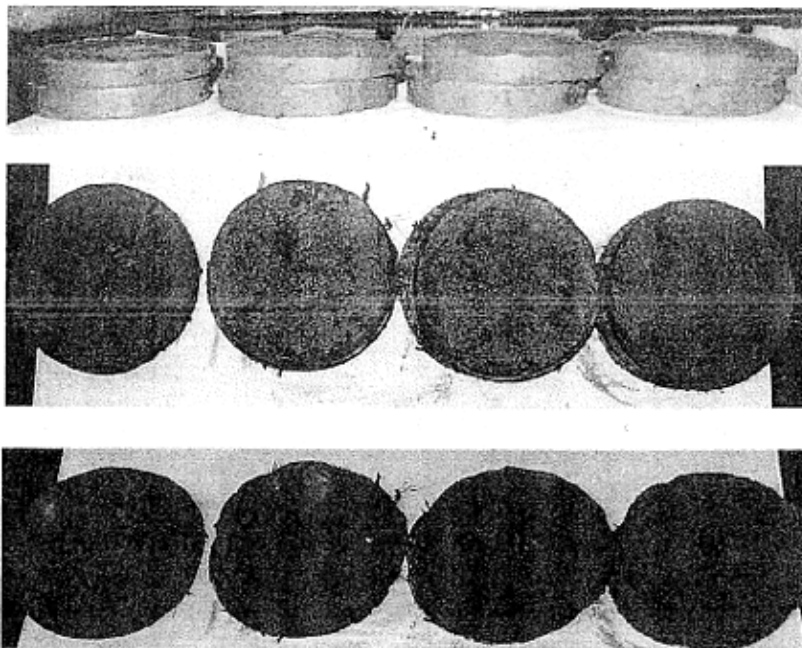


图 3-9 抗剪强度与垂直应力关系曲线图 (YZW-13)



照片 3-3 土样剪切后侧面和正面照片

3.5.5 有无根系边坡表层土体抗剪强度的比较

有无根系边坡表层土体抗剪强度的比较见图 3-10。

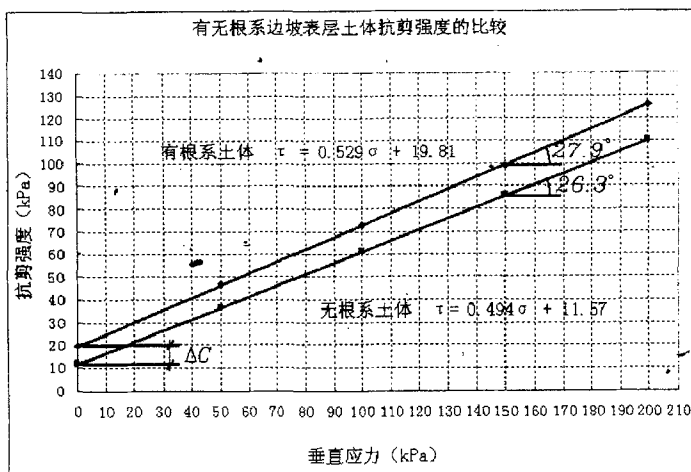


图 3-10 有无根系边坡表层土体抗剪强度的比较

从图 3-10 中可以看出，有根系边坡表层土体的抗剪强度明显大于无根系边坡表层土体的抗剪强度。试验结果有力证明了植物根系对坡面表层有明显的加固作用。

加筋作用基本原理：植被的根系使土体在根系的延伸范围内得以形成整体。根系在土中分布的密度，自地表向下逐渐减少、逐渐细弱。据挖验各种草根深入地表下最长达 0.6~0.8m，实际在根系盘结范围内，边坡土体已是由土和草根组成的复合材料。因此，在考虑边坡浅层土体强度时，应以土—根复合材料的强度作为依据，可以按加筋土原理分析有草根土的应力状态，即把土中草根的分布视为加筋材料分布，且为多维加筋，这种加筋为土层提供了附加“粘聚力” ΔC ，其大小与草根密度、强度和土的颗粒性质有关。它使原土体的抗剪强度线向上推移了一个距离 ΔC ；这使得有根系土体的抗剪强度大大提高了^[138]。

抗剪强度是内摩擦力和粘结力之和，植被的根系，特别是根系在土层中向四周和纵深生长、穿插，盘根错节，根系使土颗粒牢固地联结在一起，形成一个牢固的空间整体。在深 10~50 厘米的范围内边坡已是由土和植物根系组成的复合材料，类似加筋土的性质。根据加筋土原理，土中加筋使土体强度提高。

土和植物根系组成的“加筋土”，其强度同样也提高了^[43]。故土体的抗剪强度能较好地反映其稳定性。

应当说明的是，实际上有根系加筋土的 C_r 值要比表中所列试验测量值要大得多，现场取土样时，由于草根盘结，十分困难，而且在做试验制作试样时，会对一些根系进行切除，所以实际的 C_r 要大得多。这对边坡表层的加固是非常有利的。

通过以上分析可以看出，植被对边坡的防护作用是很大的，对防止坡面土质的溜坍是很有效的，是一种边坡防护的理想措施和方法。

3.5.6 有无根系边坡表层土体 ΔK 与 α 关系

有根系土体浅层加筋作用的稳定效应见下列分析：

现在假设有一浅层边坡表层土体的厚度为 h ，长度为 L ，倾角为 α ，边坡表层土体重量 $Q = \gamma hL$ （见下图 3-11）。

稳定系数可以用 K 表示，即

$$K = \frac{Q \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi}{Q \sin \alpha} + \frac{CL}{Q \sin \alpha} = \frac{Q \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi}{Q \sin \alpha} + \frac{CL}{\gamma h L \sin \alpha} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{C}{\gamma h \sin \alpha} \quad (3-5)$$

式中：

- C ——土中粘聚力；
- γ ——土的容重。

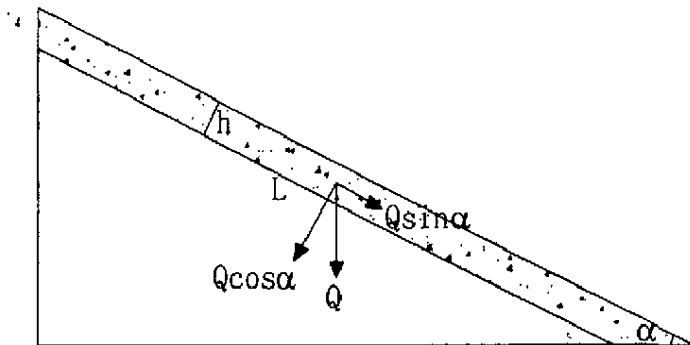


图 3-11 边坡表层土体受力分析图

此式对有根系边坡和无根系边坡都是适用的，由于有根系根系对边坡的加筋作用，粘聚力 C 提高， φ 也有所增大，则边坡稳定系数提高了 ΔK 值，假设 C_r 为有根系边坡表层土体的粘聚力， C_0 为无根系边坡表层土体的粘聚力， φ_r 为有根系边坡表层土体的内摩擦角， φ_0 为无根系边坡表层土体的内摩擦角， γ_r 为有根系边坡表层土体的容重， γ_0 为无根系边坡表层土体的容重， K_r 为有根系边坡表层土体的稳定系数， K_0 为无根系边坡表层土体的稳定系数。则

$$\Delta K = K_r - K_o = \frac{\operatorname{tg}\varphi_r - \operatorname{tg}\varphi_o}{\operatorname{tg}\alpha} + \frac{1}{h\sin\alpha} \left(\frac{C_r}{\gamma_r} - \frac{C_o}{\gamma_o} \right) \quad (3-6)$$

由试验求得, $\operatorname{tg}\varphi_r = 0.529$, $\operatorname{tg}\varphi_o = 0.494$, 则
 $\operatorname{tg}\varphi_r - \operatorname{tg}\varphi_o = 0.529 - 0.494 = 0.035$, $C_r = 19.81\text{kPa}$, $C_o = 11.57\text{kPa}$
 $\gamma_r = 16.7\text{KN/m}^3$, $\gamma_o = 15.6\text{KN/m}^3$, $h = 25\text{cm}$, 则

$$\Delta K = K_r - K_o = \frac{0.035}{\operatorname{tg}\alpha} + \frac{1}{0.25\sin\alpha} \left(\frac{19.81}{16.7} - \frac{11.57}{15.6} \right) = \frac{0.035}{\operatorname{tg}\alpha} + \frac{1.78}{\sin\alpha} \quad (3-7)$$

ΔK 与 α 的关系曲线见图 3-12。

由图 3-12 ΔK 与 α 的关系曲线图以及现场挖验植物根系可以得出以下结论:

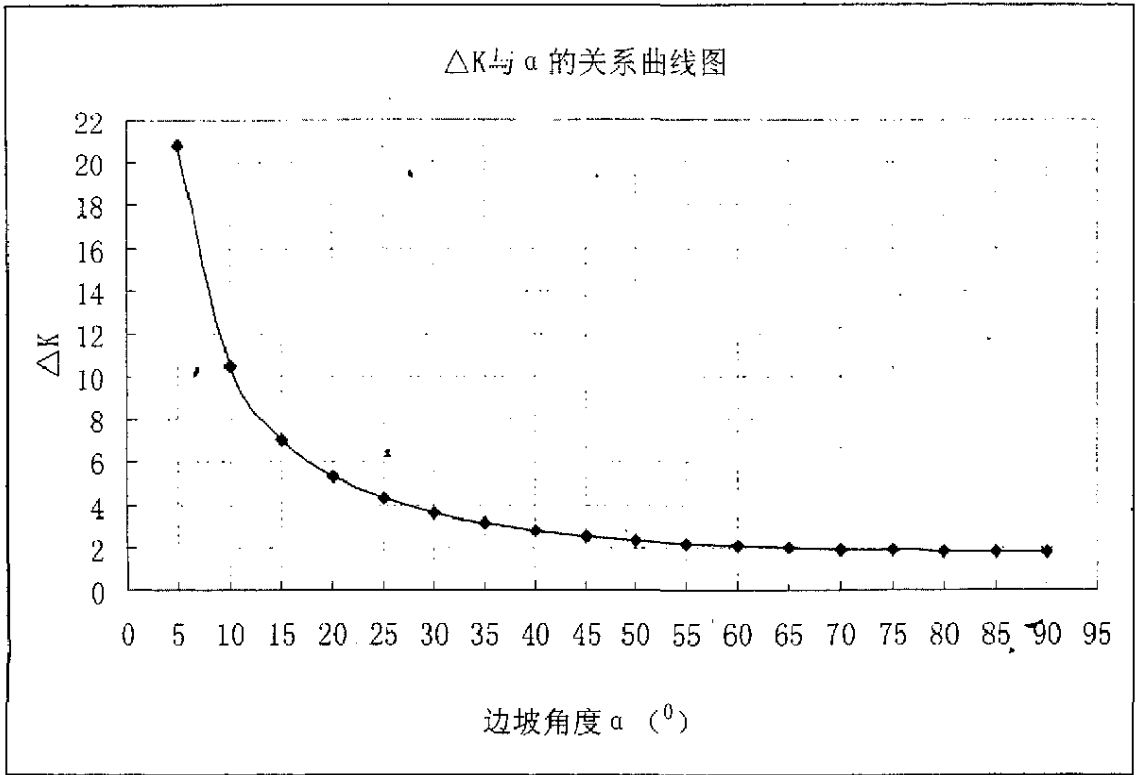
(1) 当边坡坡度在 25° 以下时, 有根系边坡的安全系数比无根系边坡的安全系数增大在 4 以上。植被生长良好, 乡土植物容易入侵, 植被覆盖后侵蚀停止。无根系边坡和有根系边坡均是稳定的, 称之为稳定边坡, 边坡表层土体不进行防护即可达到稳定状态, 草本植物的根系形态为平面构造, 进行表层土体的绿色防护起到的作用主要是绿化环境和防止雨水冲蚀。

(2) 当边坡坡度在 $25^\circ \sim 55^\circ$ 之间时, 有根系边坡的安全系数比无根系边坡的安全系数增大值约在 2~4 之间, 无根系边坡为次稳定边坡, 需要对边坡进行植被防护。当表层土体的植被生长良好时, 草本植物根系形态呈立体构造, 其错综复杂的根系对整个土体的结果起着重要固持作用, 在根系的膨压作用下, 根系与表层土体间产生轴向压力, 根系与土体紧密粘合在一起, 增大了根系与土体接触的表面积, 使得根系与表层土体间的摩擦阻力也增大, 从而使得有根系边坡表层土体的稳定系数明显高于无根系边坡表层土体的安全系数。

(3) 当边坡坡度超过 55° 时, 有根系边坡的安全系数比无根系边坡的安全系数增大值约为 2, 基本上为一限值。随着坡度的变化, 生长在坡面上的草本植物的根系, 往往向坡面下方延伸, 几乎不向坡面上方和土层深处延伸。因此, 当坡面变陡, 坡度增大时, 根系分布层变薄。即使在坡面土体疏松, 有利于根系侵入的良好基础条件下, 仍会发生根系向坡面下方延伸的现象。可以认为坡面变陡, 坡度增大时, 草本植物的根系形态从立体构造变化为平面构造。正因为如此, 在陡坡上引种草本植物时, 其根系先端部位即使形成疏松的风化土层, 根系也不能侵入, 难于达到固定风化土层的目的。

由此可见, 在坡度不超过 55° 时, 植物根系对提高土体的强度是不容置疑的。这也正是边坡表层土体进行绿色防护的重要原因。

根系的网络见照片 3-4。

图 3-12 ΔK 与 α 的关系曲线图

照片 3-4 植被根系的网络作用

由以上分析可以看出，边坡发生移动时，在克服土体本身的内聚力和内摩

擦力的同时，还必须克服根系表面与土体间的摩擦力或根系的抗拉力，这也是根系固土护坡的实质所在。

3.6 不同根系重量的剪应力测定

土中根的含量不同，根对土体的加筋作用的效果不同，因而植物对边坡稳定性的影响程度就不同。随着深度的增加，根在土中的含量就越来越少。衡量根在土中含量的一个常用的指标是“根的面积比率”（Root Area Ratio，简记为 RAR），它指的是在一个土层面上（水平断面或垂直断面）根的截面面积与总断面面积的比率。还有一种衡量土中根的含量方法就是“根的生物量集度”，即单位体积土中根的质量，它和 RAR 存在一定的转化关系^[27]。实验过程中用到的环刀体积均在 $64.106\sim 64.307\text{cm}^3$ 之间，所以在本论文中为了方便起见，将根系重量解释为单个环刀体积内根系的质量，单位为 g。

3.6.1 江北车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量的关系

江北车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量的记录见表 3-17~3-20；江北车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量的关系图见图 3-13~3-16。

表 3-17 江北车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量关系表

试样编号	环刀编号	环刀体积 cm^3	根系重量 g	百分表 读数 10^{-2}mm	量力环 校正系数 $\text{kg}/\text{cm}^2/0.01\text{mm}$	剪应力 10^{-3}kPa	施加 荷载 kg/cm^2
JBY-11	11	64.106	3.500	19	0.0238	45.22	0.5
JBY-12	39	64.106	1.090	15		35.70	0.5
JBY-13	35	64.307	1.980	17		40.46	0.5
JBY-14	20	64.106	1.130	16		38.08	0.5

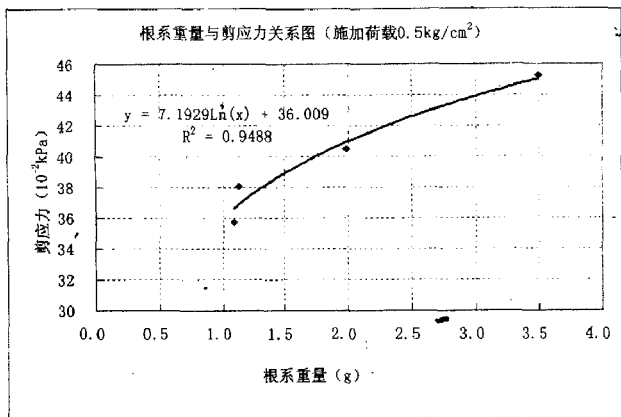
图 3-13 江北车站根系重量与剪应力关系图 (施加荷载0.5kg/cm²)

表 3-18 江北车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量关系表

试样编号	环刀编号	环刀体积 cm ³	根系重量 g	百分表 读数 10 ⁻² mm	量力环 校正系数 kg/cm ² /0.01mm	剪应力 10 ² kPa	施加 荷载 kg/cm ²
JBY-15	33	64.207	1.330	28.5	0.0238	67.83	1.0
JBY-16	39	64.106	0.620	27		64.26	1.0
JBY-17	33	64.207	2.360	30		71.40	1.0
JBY-18	45	64.106	1.090	28		66.64	1.0

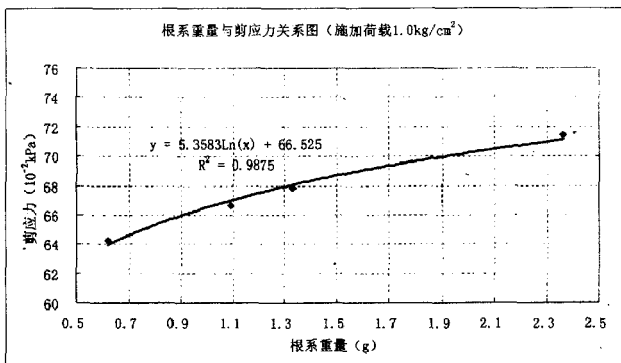
图 3-14 江北车站根系重量与剪应力关系图 (施加荷载1.0kg/cm²)

表 3-19 江北车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量关系表

试样编号	环刀编号	环刀体积 cm ³	根系重量 g	百分表读数 10 ⁻² mm	量力环校正系数 kg/cm ² /0.01mm	剪应力 10 ⁻² kPa	施加荷载 kg/cm ²
JBY-19	47	64.307	0.790	34	0.0238	80.920	1.5
JBY-20	45	64.106	1.530	45		107.100	1.5
JBY-21	11	64.106	1.045	38.6		91.868	1.5
JBY-22	48	64.106	0.865	37		88.060	1.5
JBY-23	39	64.106	1.175	41.2		98.056	1.5

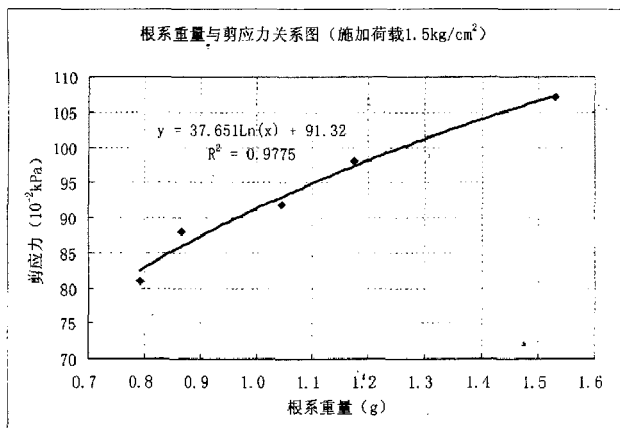
图 3-15 江北车站根系重量与剪应力关系图 (施加荷载 1.5kg/cm²)

表 3-20 江北车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量关系表

试样编号	环刀编号	环刀体积 cm ³	根系重量 g	百分表读数 10 ⁻² mm	量力环校正系数 kg/cm ² /0.01mm	剪应力 10 ⁻² kPa	施加荷载 kg/cm ²
JBY-24	39	64.106	1.430	47	0.0238	111.86	2.0
JBY-25	35	64.307	5.000	49.2		117.10	2.0
JBY-26	48	64.106	4.400	48		114.24	2.0
JBY-27	20	64.106	0.800	45		107.10	2.0

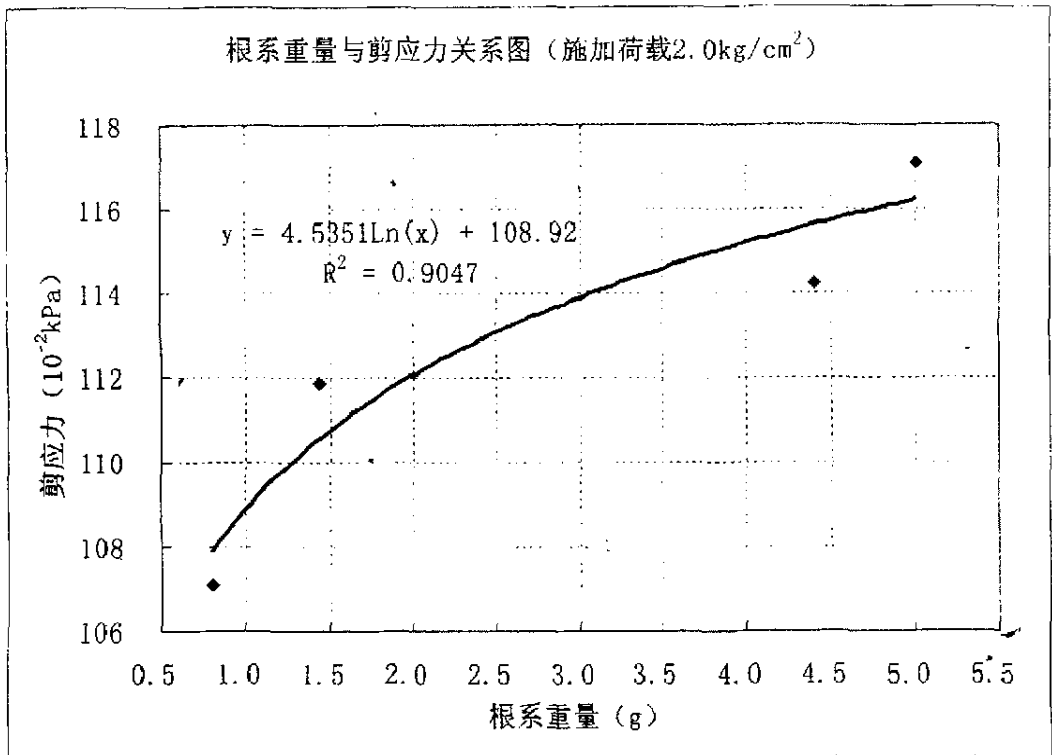


图 3-16 江北车站根系重量与剪应力关系图 (施加荷载2.0kg/cm²)

3.6.2 鱼嘴车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量的关系

鱼嘴车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量的记录见表 3-21~3-24; 鱼嘴车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量的关系图见图 3-17~3-20。

表 3-21 鱼嘴车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量记录表

试样编号	环刀编号	环刀体积 cm ³	根系重量 g	百分表 读数 10 ⁻² mm	量力环 校正系数 kg/cm ² /0.01mm	剪应力 10 ⁻² kPa	施加 荷载 kg/cm ²
YZY-11	45	64.106	0.810	16	0.0238	38.08	0.5
YZY-12	35	64.307	0.920	18		42.84	0.5
YZY-13	20	64.106	0.720	16		42.84	0.5
YZY-14	39	64.106	0.860	17		40.46	0.5
YZY-15	48	64.106	0.620	15		35.70	0.5

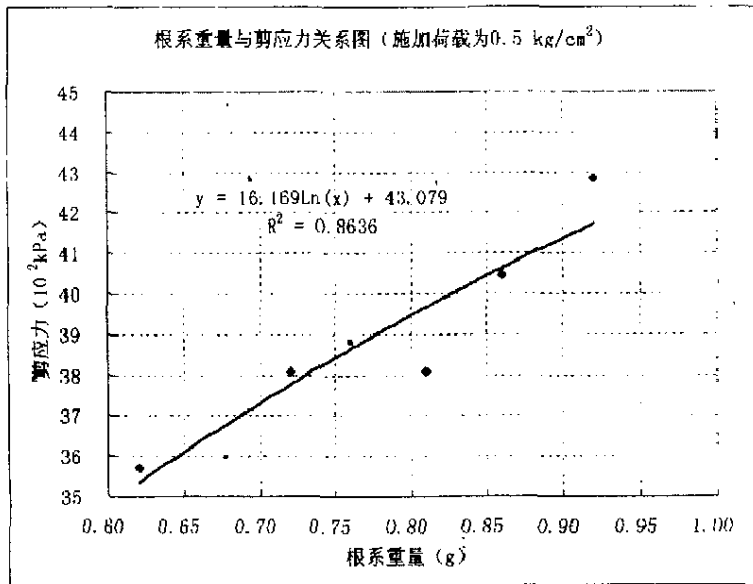
图 3-17 鱼嘴车站根系重量与剪应力关系图 (施加荷载0.5kg/cm²)

表 3-22 鱼嘴车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量记录表

试样编号	环刀编号	环刀体积 cm ³	根系重量 g	百分表读数 10 ⁻² mm	量力环校正系数 kg/cm ² /0.01mm	剪应力 10 ⁻² kPa	施加荷载 kg/cm ²
YZY-16	20	64.106	1.440	31.4	0.0238	74.732	1.0
YZY-17	47	64.307	0.770	29		69.02	1.0
YZY-18	11	64.106	0.780	29		69.02	1.0
YZY-19	45	64.106	0.560	27.5		65.45	1.0
YZY-20	33	64.207	0.700	29		69.02	1.0

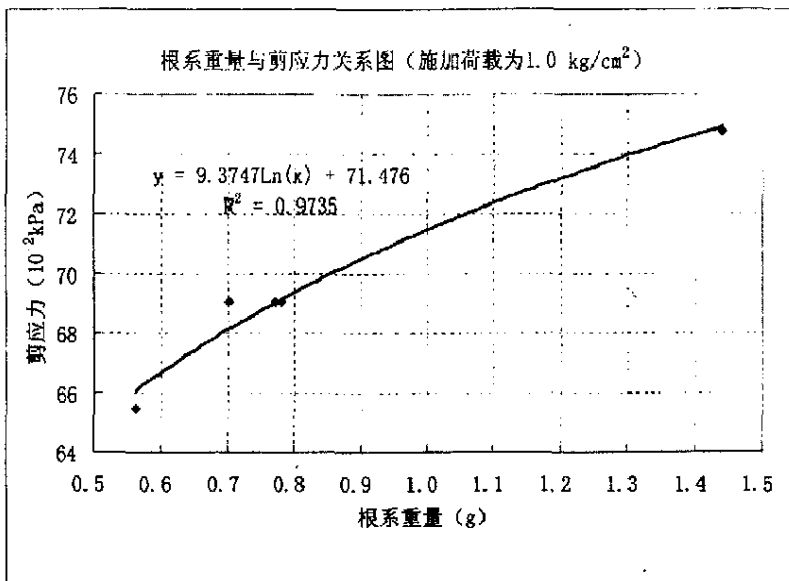
图 3-18 鱼嘴车站根系重量与剪应力关系图 (施加荷载1.0kg/cm²)

表 3-23 鱼嘴车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量记录表

试样编号	环刀编号	环刀体积 cm ³	根系重量 g	百分表 读数 10 ⁻² mm	量力环 校正系数 kg/cm ² /0.01mm	剪应力 10 ⁻² kPa	施加 荷载 kg/cm ²
YZY-21	47	64.307	0.735	35	0.0238	83.30	1.5
YZY-22	45	64.106	0.640	31		73.78	1.5
YZY-23	47	64.307	1.535	40		95.20	1.5
YZY-24	45	64.106	0.750	33		78.54	1.5

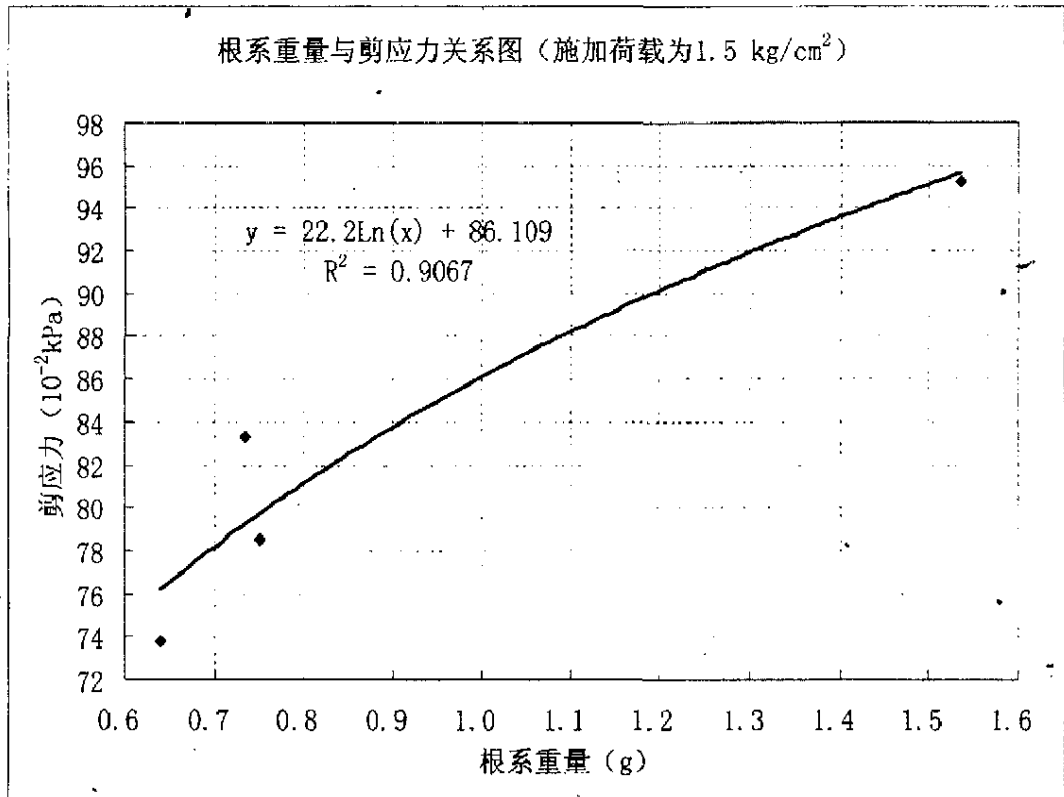
图 3-19 鱼嘴车站根系重量与剪应力关系图 (施加荷载1.5kg/cm²)

表 3-24 鱼嘴车站有根系边坡表层土体剪应力与根系重量记录表

试样编号	环刀编号	环刀体积 cm ³	根系重量 g	百分表 读数 10 ⁻² mm	量力环 校正系数 kg/cm ² /0.01mm	剪应力 10 ⁻² kPa	施加 荷载 kg/cm ²
YZY-25	33	64.307	2.660	45	0.0238	107.10	2.0
YZY-26	39	64.106	2.670	53		126.14	2.0
YZY-27	11	64.106	0.850	47		111.86	2.0
YZY-28	33	64.207	1.020	50		119.00	2.0
YZY-29	11	64.106	0.960	42		99.96	2.0

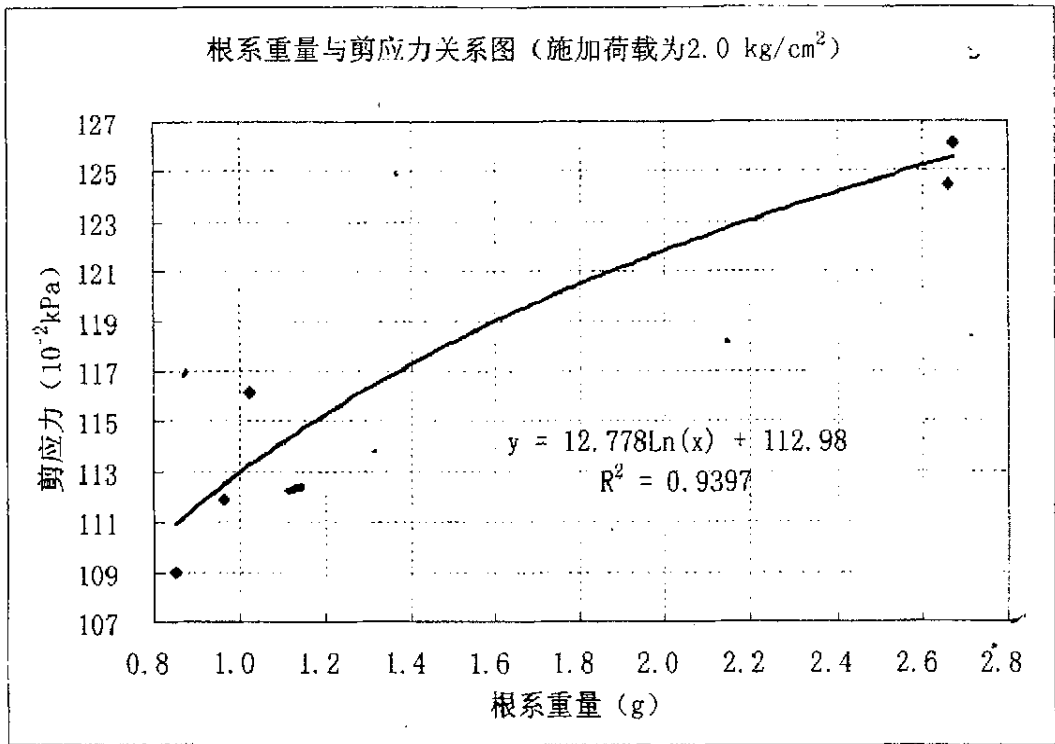


图 3-20 鱼嘴车站根系重量与剪应力关系图 (施加荷载2.0kg/cm²)

从以上研究可以看出, 根系重量的多少和抗剪强度的关系可以用下列公式表示:

$$y = a\ln(x) + b \quad (3-8)$$

式中:

x——根系重量 (g);

y——抗剪强度 (kPa)。

对 x 求导, 得出 $y' = \frac{a}{x}$, 可以看出, 当 $x \rightarrow \infty$, y' 趋于零, 抗剪强度增加的幅度就会减小, 这说明 $y = a\ln(x) + b$ 是有界的, 当 x 达到一定值时, 抗剪强度的增加幅度为一个限值, 这说明在此时抗剪强度就是一定值。

影响根系重量的因素主要有以下三种:

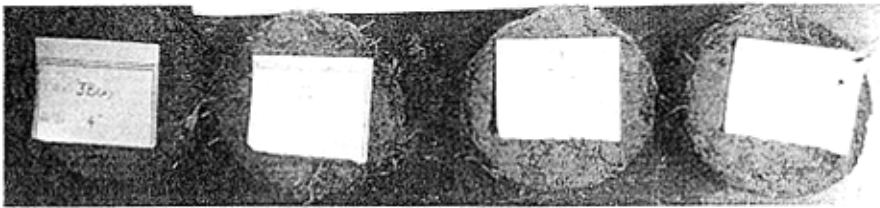
(1) 根系的生长密度: 当根系的密度比较大时, 即植被在生长良好的状态下, 其错综复杂的根系对整个土体的结构性起着重要固持作用, 在根系的膨压作用下, 根系与土体产生轴向压力, 使根系与表层土体紧密粘合在一起, 而根系分叉越多, 其结构越复杂, 根系与土体接触的面积越大, 根系与土体间摩擦阻力也越大, 所以根系的固土能力越强。

(2) 根系的直径大小：草本植物的根系主要是须根通过网络土体，对其上坡位的土体有牵拉作用，对其下坡位的土体还有垂直于坡面方向上的压力作用，从而可以阻止表层土体的滑移。须根还有吸附土体的作用，能改善土体的容重、团聚度等，增强土体的抗侵蚀能力。根系的这种固土能力与植被类型、年龄、以及土壤特性都有关系。一般来说，年龄越大的同一类型植被，其根系越发达，即其直径也就越大，固土能力越强，土体颗粒间的粘结程度也就较好。

(3) 根系的长度：在生长条件良好的情况下，根系愈长，分叉愈多，其抗剪强度愈大，径级愈高及表面积愈大，则根与土体间的摩擦阻力也就越大^[68]。

所以随着根系重量的增加，减少或抑制表层土体整体移动无疑具有不可低估的作用。

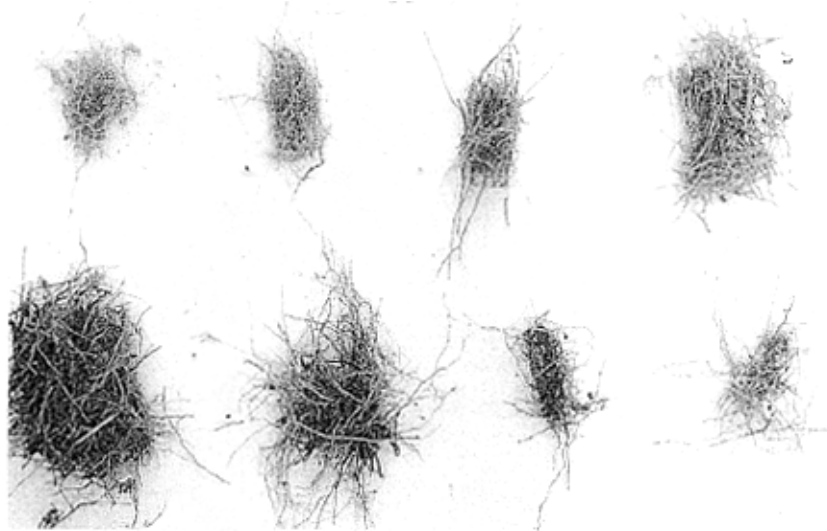
有根系边坡表层土体剪切后的效果见照片 3-5、3-6。



照片 3-5 有根系边坡表层土体直接剪切试验后



照片 3-6 有根系边坡表层土体直接剪切后根系在土中分布



照片 3-7 根系称量后

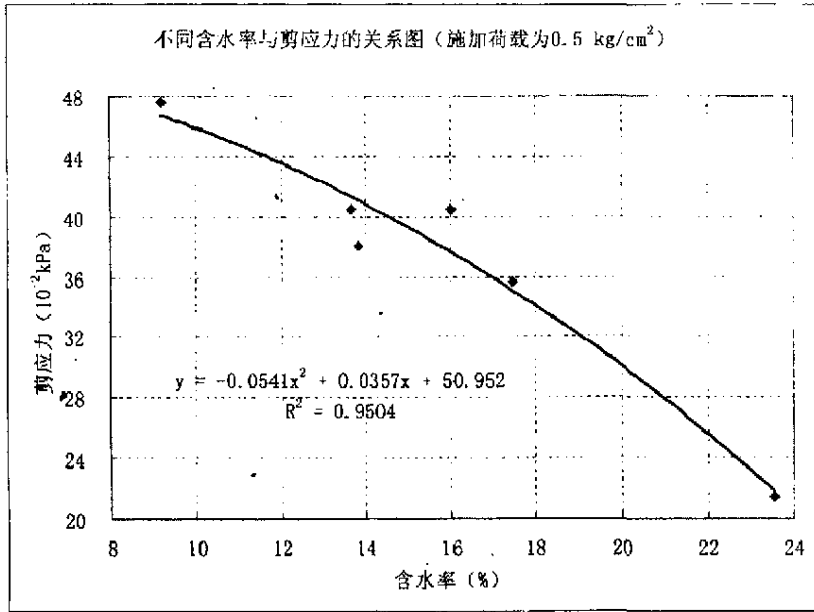
3.7 不同含水率的剪应力测定

3.7.1 不同含水率的剪应力

下面做的是不同含水率情况下的土的抗剪强度。具体见下列表 3-25~3-28, 图 3-21~3-24。

表 3-25 不同含水率的剪应力图表 (施加荷载为 0.5 kg/cm^2)

试样编号	平均含水率 %	百分表读数 $\cdot 10^{-2} \text{ mm}$	量力环校正系数 $\text{kg/cm}^2 / 0.01 \text{ mm}$	剪应力 10^{-2} kPa	施加荷载 kg/cm^2
JBW-10	23.526	9	0.0238	21.42	0.5
JBW-11	16.006	17		40.46	0.5
JBW-12	13.66	17		40.46	0.5
YZW-14	17.454	15		35.70	0.5
YZW-15	9.209	20		47.60	0.5
YZW-16	13.848	16		38.08	0.5

图 3-21 不同含水率下的剪应力 (施加荷载 0.5 kg/cm^2)表 3-26 不同含水率的剪应力图表 (施加荷载为 1.0 kg/cm^2)

试样编号	平均含水率 %	百分表读数 10^{-2} mm	量力环校正系数 $\text{kg/cm}^2 / 0.01 \text{ mm}$	剪应力 10^{-2} kPa	施加荷载 kg/cm^2
JBW-13	23.526	19	0.0238	45.22	1.0
JBW-14	16.006	29		69.02	1.0
JBW-15	13.66	25		59.50	1.0
YZW-17	17.454	24.5		58.31	1.0
YZW-18	9.209	31		73.78	1.0
YZW-19	13.848	28		66.64	1.0

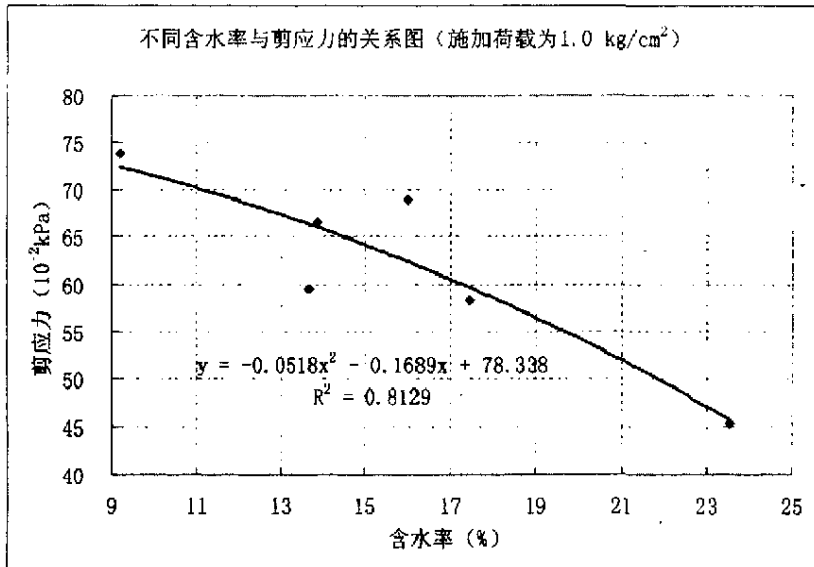
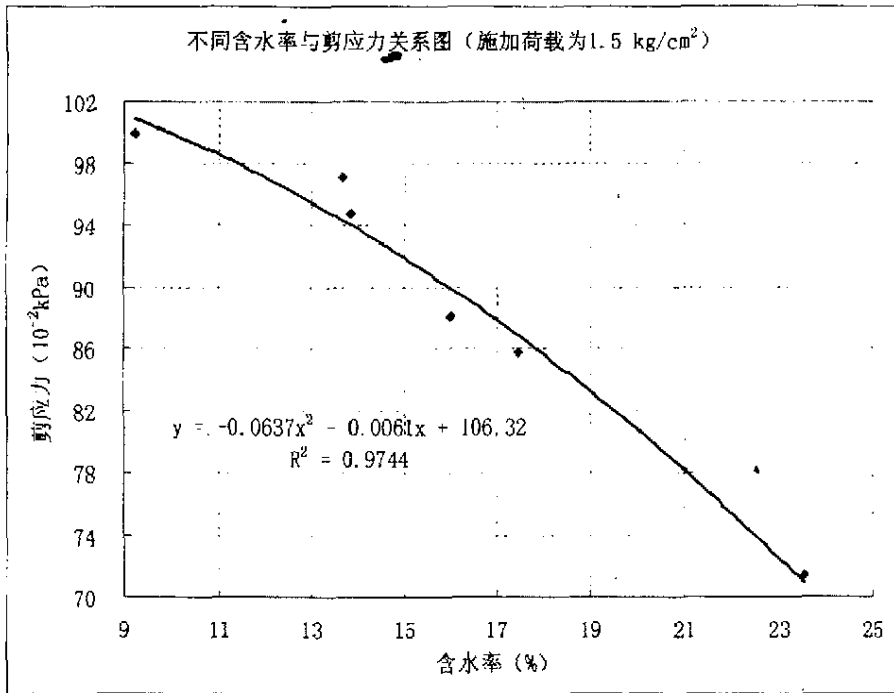
图 3-22 不同含水率下的剪应力 (施加荷载 1.0 kg/cm^2)

表 3-27 不同含水率的剪应力图表 (施加荷载为 1.5 kg/cm^2)

试样编号	平均含水率 %	百分表读数 10^{-2} mm	量力环校正系数 $\text{kg/cm}^2 / 0.01 \text{ mm}$	剪应力 10^{-2} kPa	施加荷载 kg/cm^2
JBW-13	23.526	30	0.0238	71.40	1.5
JBW-14	16.006	37		88.06	1.5
JBW-15	13.66	40.8		97.10	1.5
YZW-17	17.454	36		85.68	1.5
YZW-18	9.209	42		99.96	1.5
YZW-19	13.848	39.8		94.72	1.5

图 3-23 不同含水率下的剪应力 (施加荷载 1.5 kg/cm^2)表 3-28 不同含水率的剪应力图表 (施加荷载为 2.0 kg/cm^2)

试样编号	平均含水率 %	百分表读数 10^{-2} mm	量力环校正系数 $\text{kg/cm}^2 / 0.01 \text{ mm}$	剪应力 10^{-2} kPa	施加荷载 kg/cm^2
JBW-16	23.526	42	0.0238	99.96	2.0
JBW-17	16.006	50		119.00	2.0
JBW-18	13.66	51		121.38	2.0
YZW-20	17.454	48		114.24	2.0
YZW-21	9.209	56		133.28	2.0
YZW-22	13.848	53		126.14	2.0

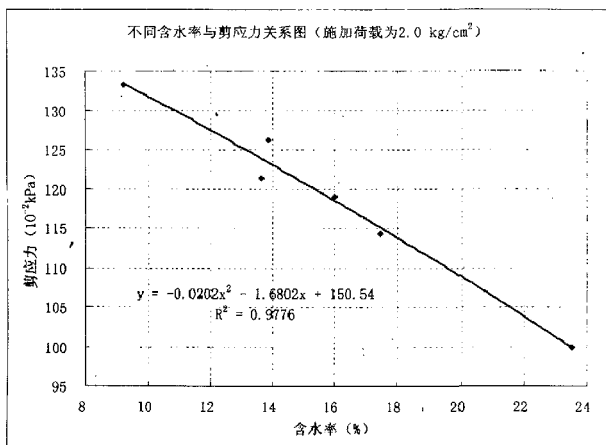


图 3-24 不同含水率下的剪应力 (施加荷载 2.0 kg/cm^2)

3.7.2 不同含水率剪应力值的分析

一般情况下, 土中的水呈液态。当粘性土中的水分较少, 只含有强度结合水时, 土是干燥的, 颗粒彼此很接近, 粒间联结牢固, 土呈固态, 具有较高的强度, 能抵抗较大的外力而不发生变形。如果土中水分增多, 即除强结合水外, 还出现弱结合水时, 由于结合水膜的增厚, 微毛管孔隙充水, 土变湿润, 联结被削弱, 但仍能抵抗一定能够外力而不致变形^[136]。

由 3.7.1 节的图表可以看出, 土体的剪应力随含水率的增大而逐渐减小, 呈开口向下的二次抛物线形式。土体水分过多过少会影响根系的生长发育和根系功能的发挥。当土体水分较高时, 土体会缺氧导致根系呼吸速率下降, 无氧呼吸还会导致根系中乙醇等有毒产物的积累, 导致根尖死亡, 对边坡表层土体的固持能力显著降低。原因是土提水分较高时, 土体颗粒和根系间的摩擦力显著减小, 促使草本植物根系的抗剪强度急剧下降。

降雨是诱发边坡失稳的重要因素之一, 所以在降雨等因素导致土体水分增高时, 经常发生坡面滑落。进行绿色防护, 植物通过吸收和蒸腾坡体内水分, 降低土体的孔隙水压力, 增加土体内聚力, 提高土体抗剪强度, 有利于边坡体的稳定。当然, 当含水率低到一定限度时, 土体的抗剪强度就会达到一个定值, 不会无限增大。

因此，在含水率高的时候，抗剪强度就会显著降低。另一方面，水分条件差常造成植物枯死，特别是降水量的多寡常制约植被的分布和生长发育。对水分条件差的坡面，只有建造一定的生长发育基础厚度，才能维持植物正常生长发育。因此，有必要对基础的含水量、水分供给状况等予以特别的重视。

第四章 岩质路堑边坡表层土体变形的有限元分析

4.1 有限元分析的基本条件

边坡表面存在一定厚度的土层，是边坡绿色防护的前提条件。传统的极限平衡方法只能分析表层土在坡面稳定性，不能分析表层在重力作用下的变形情况。本部分采用通用有限元程序对边坡表层土的变形进行数值模拟，以求确定边坡表层土体在重力作用下的变形与坡高坡度的关系。

有限元模拟的基本条件：

据参考文献[14][48][137]，草本植物根系 90%分布在坡面以下 0~30cm 的范围内，因此本文讨论坡面表层 25cm 范围内的岩土体表层变形。

边坡的绿色防护是在稳定的边坡上进行的，在设定有限元模拟计算的边界条件时，认为边坡体不变形。

有限元分析中的土体材料普遍采用 DP(Drucker-Prager)材料^[139]，这涉及到三个参数：

C ——粘聚力(KPa)；

φ ——内摩擦角(°)；

ϕ_f ——膨胀角(°)。

其中膨胀角 ϕ_f 被用来控制体积膨胀的大小，对压实的颗粒状材料，当材料受剪时，颗粒将会膨胀，如果膨胀角 ϕ_f 为 0，则不会发生体积膨胀。如果膨胀角 $\phi_f = \varphi$ 在材料中将会发生严重的体积膨胀，一般来说，膨胀角 $\phi_f = 0$ 是一种保守方法。

对 DP 材料，其等效应力的表达式为：

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{3}\{S\}^T [M] \{S\}\right]^{1/2} \quad (4-1)$$

其中：

$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ ，为平均应力或静水压力；

$\{S\}$ ——偏差应力；

β ——材料常数；

$[M]$ ——Mises 屈服准则中的 $[M]$ 。

上面的屈服准则是一种经过修整的 Mises 屈服准则，它考虑了静水应力分量的影响，静水应力（侧限压力）越高，则屈服强度越大。

材料常数 β 的表达式如下：

$$\beta = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (4-2)$$

其中， φ 为内摩擦角。

材料的屈服参数定义为 $\sigma_y = \frac{6C \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$ ，

其中， C 为内聚力。

屈服准则的表达式如下：

$$F = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{1/2} - \sigma_y = 0 \quad (4-3)$$

有限元模拟分析时，土层参数即为直接剪切试验的结果，见表 4-1：

表 4-1 土层参数的取值

参数	变形模量 E (kPa)	泊松比 μ	密度 ρ (g/cm ³)	内聚力 C (kPa)	内摩擦角 φ (°)	膨胀角 ϕ_f (°)	重力加速度 (m/s ²)
无根系	3.5	0.35	1.56	11.57	26.3	0	9.8
有根系	3.5	0.30	1.67	19.81	27.9	0	9.8

基本模型见图 4-1，图中 H (m) 为坡高， α (°) 为坡度。

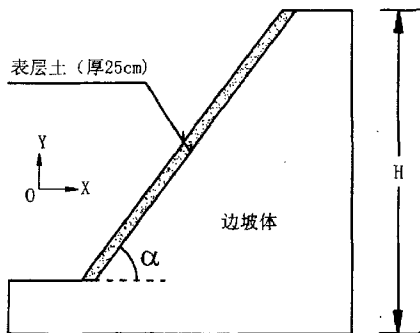


图 4-1 有限元计算模型

4.2 岩质路堑边坡表层土体变形的有限元分析

4.2.1 45 度不同坡高边坡表层土体变形分析

根据文献[137]得出的结论和直剪试验结果, 得出在 45° 5m 以下的边坡为稳定边坡, 以下只进行 45° 5m 以上的边坡的数值模拟, 并比较其变形大小。

图 4-2~4-7 是边坡坡度为 45° , 坡高为 5m、8m、10m 时表层边坡岩土体的变形图。

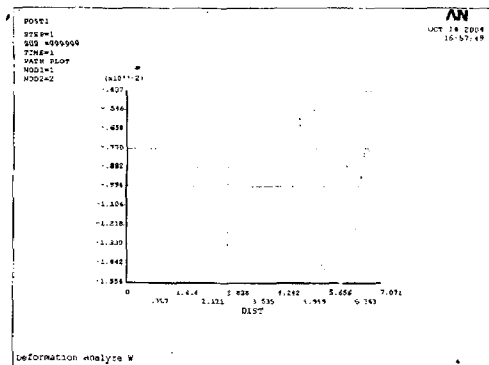


图 4-2 5m 时无根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

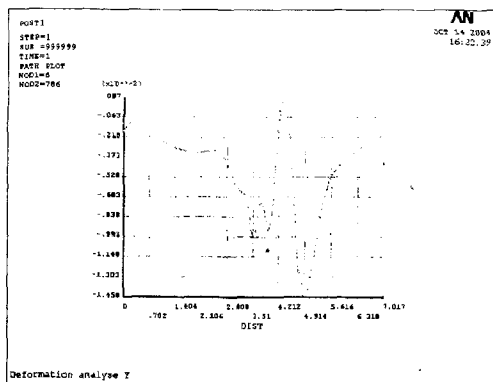


图 4-3 5m 时有根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

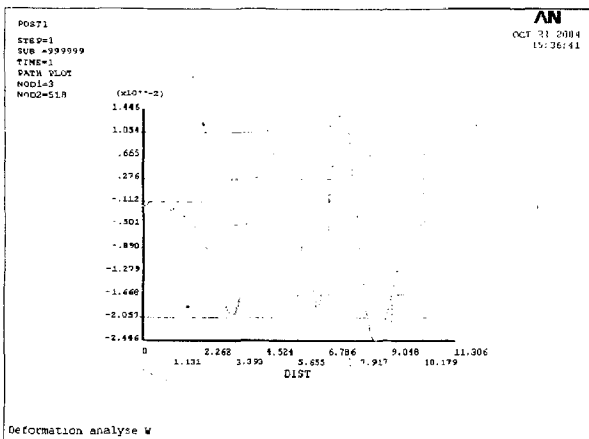


图 4-4 8m 时无根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

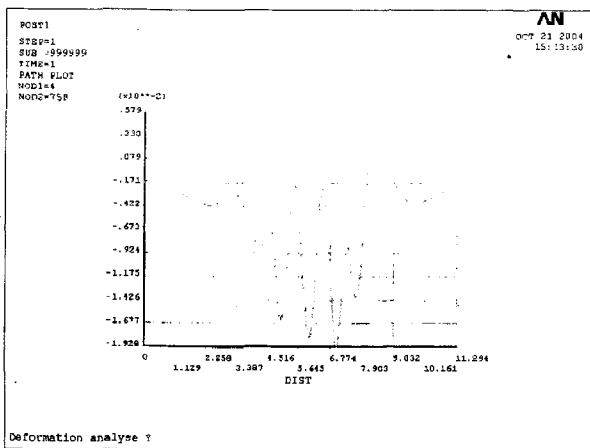


图 4-5 8m 时有根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

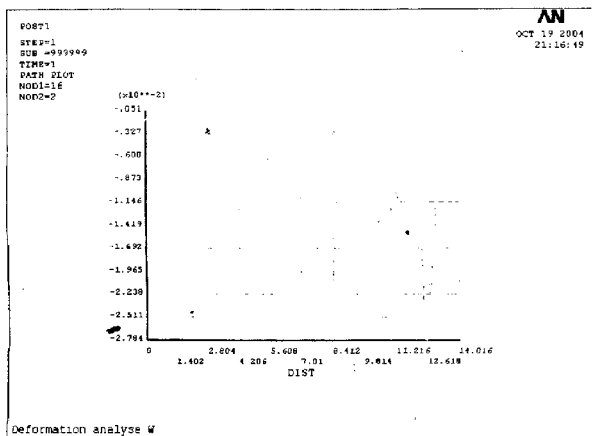


图 4-6 10m 时无根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

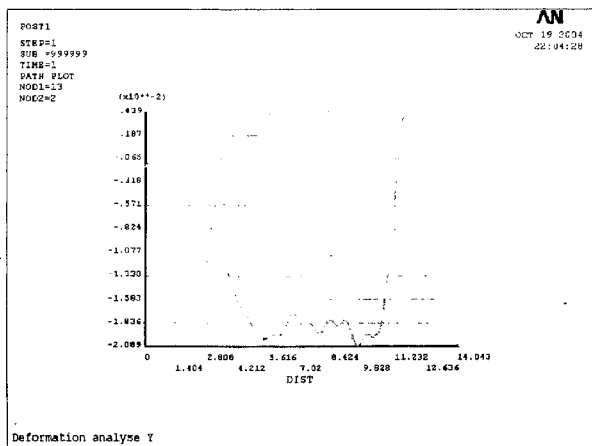


图 4-7 10m 时有根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

4.2.2 50 度不同坡高边坡表层土体变形分析

图 4-8~4-13 是边坡坡度为 50°, 坡高为 5m、8m、10m 时边坡表层土体的变

形图。

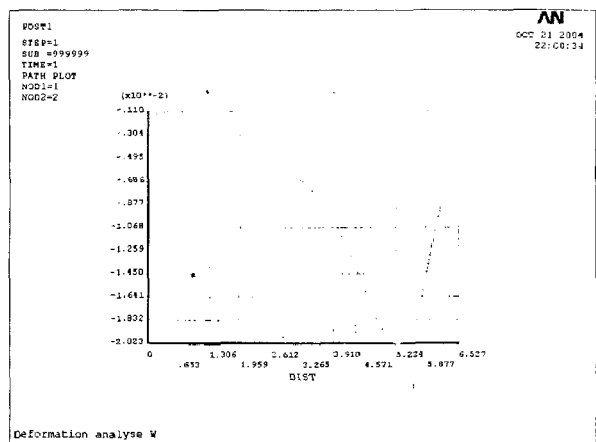


图 4-8 5m 时无根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

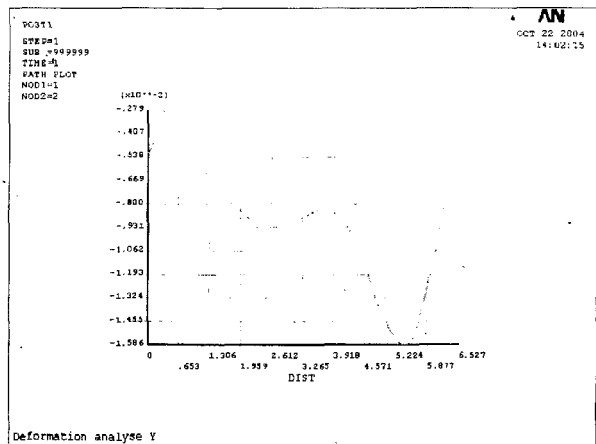


图 4-9 5m 时有根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

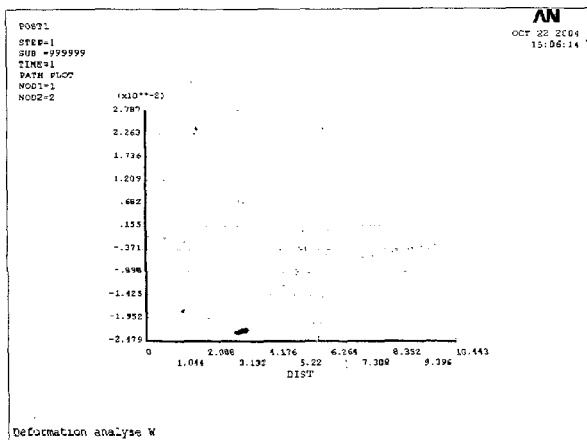


图 4-10 8m 时无根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

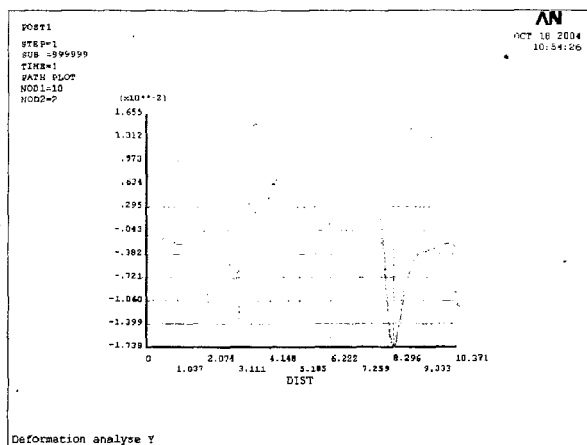


图 4-11 8m 时有根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

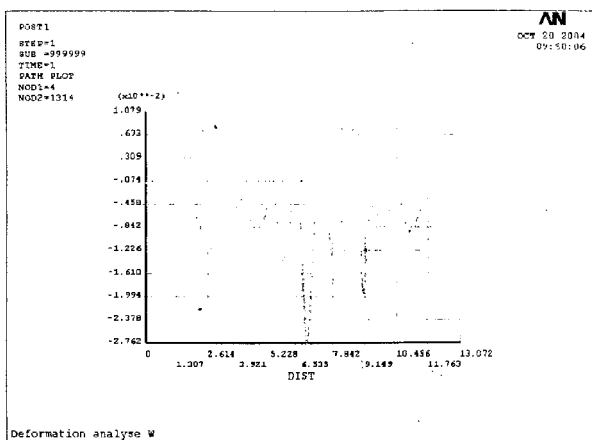


图 4-12 10m 时无根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

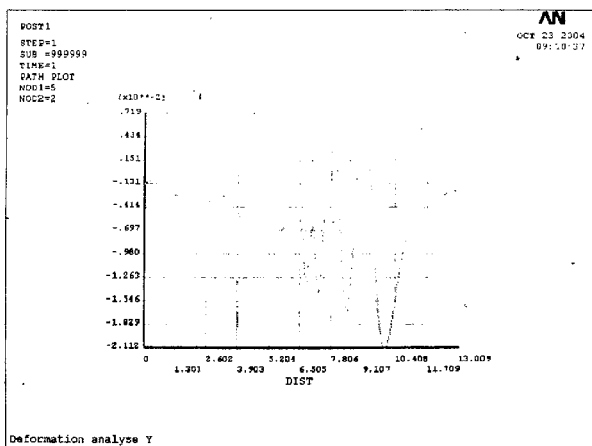


图 4-13 10m 时有根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

4.2.3 53 度不同坡高边坡表层土体变形分析

图 4-14~4-19 是边坡坡度为 53° (1:0.75), 坡高为 5m、8m、10m 时表层边坡土体的变形图。

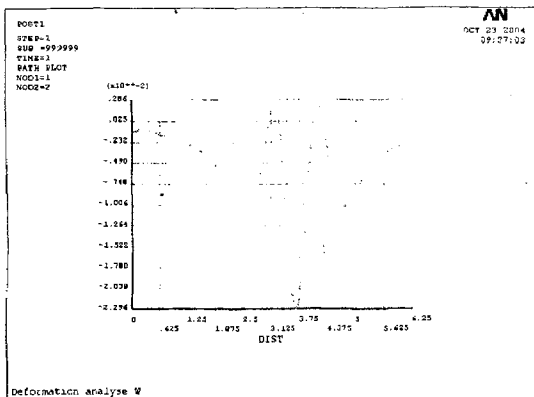


图 4-14 5m 时无根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

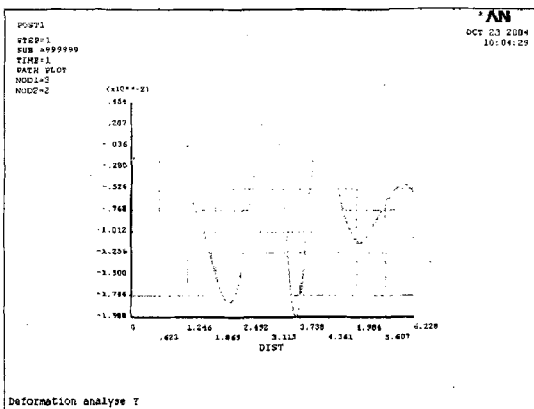


图 4-15 5m 时有根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

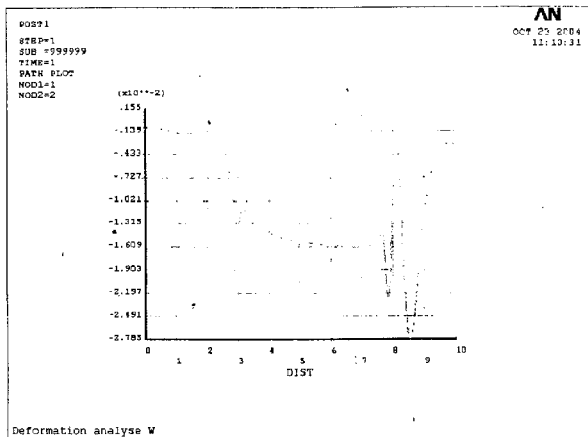


图 4-16 8m 时无根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

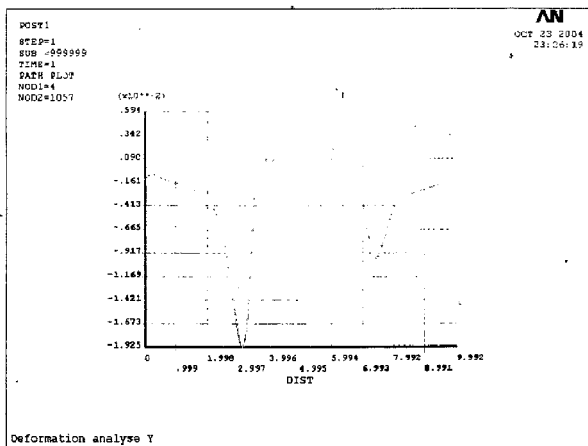


图 4-17 8m 时有根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

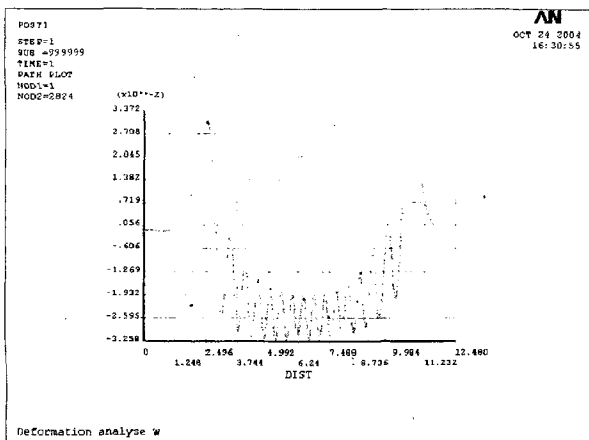


图 4-18 10m 时无根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

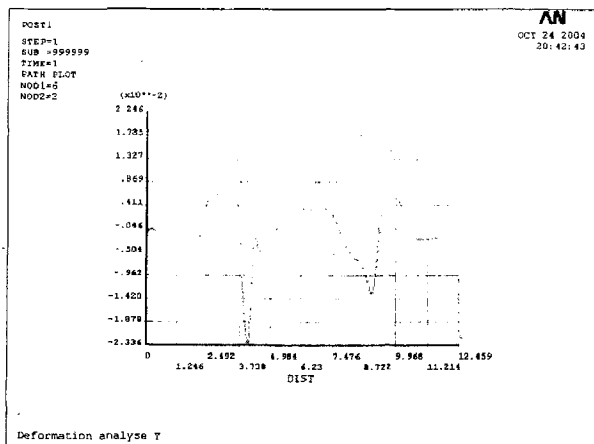


图 4-19 10m 时有根系边坡表层土体 X 方向的变形曲线图 (mm)

4.3 有无根系边坡表层土体变形对比分析

由以上图可以看出, 无根系和有根系边坡表层土体 X 方向的最大变形值见表 4-2、4-3、4-4。

表 4-2 坡度为 45°, 不同坡高边坡表层土体变形

坡高 (m)	5	8	10
无根系 X (mm)	-15.540	-24.460	-27.840
有根系 X (mm)	-14.580	-19.280	-20.890

表 4-3 坡度为 50°, 不同坡高边坡表层土体变形

坡高 (m)	5	8	10
无根系 X (mm)	-20.230	-24.790	-27.620
有根系 X (mm)	-15.860	-17.380	-21.120

表 4-4 坡度为 53°, 不同坡高边坡表层土体变形

坡高 (m)	5	8	10
无根系 X (mm)	-22.960	-27.850	-32.580
有根系 X (mm)	-19.880	-19.250	-23.360

由表 4-2、4-3、4-4 及图 4-2~4-19 可以看出:

(1) 坡度为 45°, 不同坡高的变形分析:

当坡高为 5m 时, 无根系边坡和有根系边坡的表层土体的最大变形值基本上相等, 从无根系边坡的变形曲线图 4-2 可以看出, 边坡在距坡顶 1.111m 处变形达到最大值, 在距坡底 0.5m 到 6.056m 之间, 变形值呈直线增大。而有根系边坡则是在距坡顶 2.103m 处变形值达到最大, 在距坡底 2.808m 至 4.914m 之间变形曲线呈曲线形式, 可以看出, 当有了根系的作用, 根系对边坡表层土体变形起到了约束作用。

当坡高为 8m 时, 无根系边坡在距坡顶 2.824m 处变形值达到最大, 而有根系边坡则是在距坡顶 4.144m 处变形值达到最大。有根系边坡的最大变形值比无根系边坡的最大变形值大约小 5.180mm。无根系边坡的破坏范围大概在距坡底 3.4~8.5m, 而有根系边坡的破坏范围在距坡底 4.5~8m, 可以看出, 有根系边坡的破坏范围比无根系边坡的破坏范围明显减小了 1.6m。二者的破坏形式基本相同。

当坡高为 10m 时, 无根系边坡的最大变形值为 27.840mm, 而有根系边坡

的最大变形值为 20.890mm，明显小于无根系边坡的最大变形值。无根系边坡在边坡在距坡顶 1.416m 处变形最大，边坡发生了严重的破坏，而有根系边坡在距坡顶 4.343m 处变形值最大，其相对于无根系边坡比较稳定。

(2) 坡度为 50° ，不同坡高的变形分析：

当坡高为 5m 时，有根系边坡比无根系边坡的表层土体的最大变形值大约小 4.370mm，从无根系边坡的变形曲线图上可以看出，边坡在距坡顶 1.303m 处变形达到最大值，变形趋势与 45° 5m 相似。而有根系边坡在距坡顶 1.085m 处变形值达到最大。

当坡高为 8m 时，无根系边坡最大变形值为 24.790mm，发生在边坡中部。有根系边坡最大变形值为 17.380mm，发生在距坡顶 2.075m 处。有根系边坡明显比无根系边坡的最大变形值小 7.410mm。

当坡高为 10m 时，无根系边坡的最大变形值为 27.620mm，发生在边坡中部，而有根系边坡的最大变形值为 21.120mm，发生在距坡顶 3.035m 处，比无根系边坡的最大变形值小 6.400mm。

(3) 坡度为 50° ，不同坡高的变形分析：

当坡高为 5m 时，无根系边坡的最大变形值为 22.960mm，变形最大值发生在边坡中部，有根系边坡的最大变形值为 19.880mm，发生在边坡中部。二者的变形破坏形式基本上相同。

当坡高为 8m 时，无根系边坡的变形最大值为 27.850mm，发生在距坡顶 1.5m 左右，有根系边坡的变形最大值为 19.250mm，发生在距坡底 3m 左右。

当坡高为 10m 时，无根系边坡的最大变形值为 32.580mm，发生在边坡中部，而有根系边坡的最大变形值为 23.360mm，发生在距坡底 4.153m 处，比无根系边坡的最大变形值小 9.220mm。

第五章 结论

本文以渝怀铁路绿色防护试验边坡为基础,通过对岩质路堑边坡绿色防护表层土体的抗剪强度以及不同坡高和坡度的岩质路堑边坡表层土体的加固作用进行了研究。主要得出以下结论:

(1) 当边坡坡度在 25° 以下时,有根系岩质路堑边坡表层土体的安全系数比无根系岩质路堑边坡表层土体的安全系数增大值在 4 以上。植被生长良好,乡土植物容易入侵,植被覆盖后侵蚀停止。无根系岩质路堑边坡和有根系岩质路堑边坡均是稳定的,称之为稳定边坡,边坡表层土体不进行防护即可达到稳定状态,进行表层土体的绿色防护起到的作用主要是绿化环境和防止雨水冲刷。

(2) 当边坡坡度在 $25^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 之间时,有根系岩质路堑边坡的安全系数比无根系岩质路堑边坡的安全系数增大值约在 2~4 之间;无根系岩质路堑边坡为次稳定边坡,需要对边坡进行植被防护。当表层土体的植被生长良好时,其错综复杂的根系对整个土体起着重要固持作用,在根系的膨压作用下,根系与表层土体间产生轴向压力,根系与土体紧密粘合在一起,增大了根系与土体接触的表面积,使得根系与表层土体间的摩擦阻力也增大,从而使得有根系岩质路堑边坡表层土体的稳定系数高于无根系岩质路堑边坡表层土体的安全系数。

(3) 当边坡坡度超过 55° 时,有根系岩质路堑边坡的安全系数比无根系岩质路堑边坡的安全系数增大值约为 2,基本上为一限值。无根系岩质路堑边坡是不稳的,这是因为植被生长显著不良,草本植物易早期衰退。应对边坡实施适当支护,在保证边坡的稳定前提下,采取绿色防护,但是当边坡坡度超过 75° ,则很难保证植被的后期管理。

(4) 根系重量与剪应力值的大小也有一定的关系:

首先是植被的生长密度,当其密度达到一定数值时,错综复杂的根系对整个土体的结构性起到固持作用,根系与表层土体紧密粘合在一起,而根系分叉越多,其结构越复杂,根系与土体接触的表面积越大,根系与土体间摩擦阻力也越大,所以根系的固土能力越强。

再次是根系的直径大小,草本植物的根系主要是须根通过网络土体,对其上坡位的土体有牵拉作用,对其下坡位的土体还有垂直于坡面方向上的压力作用,从而可以阻止表层土体的滑移。须根还有吸附土体的作用,能改善土体的容重,团聚度等,增强土体的抗侵蚀能力,其直径越大,固土能力越强,土体

颗粒间的粘结程度也就较好；

最后是根系的长度，在生长条件良好的情况下，根系愈长，分叉愈多，其抗剪强度愈大，径级愈高及表面积愈大，则根与土体间的摩擦阻力也就越大。

(5) 土体的剪应力随含水率的增大而逐渐减小，呈开口向下的二次抛物线形式。土体含水量较高时，土体颗粒和根系间的摩擦力显著减小，促使草本植物根系的抗剪强度急剧下降。进行绿色防护，植物通过吸收和蒸腾坡体内水分，降低土体的孔隙水压力，增加土体内聚力，提高土体抗剪强度，有利于边坡体的稳定。

(6) 当坡度为 45° ，高度为 5m 时，无根系边坡表层土体和有根系边坡表层土体的最大变形值都比较小，而且边坡是稳定的。当坡度和高度增大时，无根系边坡表层土体的最大变形值比有根系边坡表层土体的最大变形值增加幅度较大，而且无根系边坡表层土体的变形破坏范围明显高于有根系边坡表层土体。

其中 $45^\circ 10\text{m}$ 、 $50^\circ 10\text{m}$ 、 $53^\circ 8\text{m}$ 、 $53^\circ 10\text{m}$ 的无根系边坡表层土体均在边坡的中上部发生了严重的破坏，且都有以下特征：

首先，随着上部土体压力的增大，土体内部产生剪切变形，使土体在坡外方向（X 方向）的位移逐渐增大，如果向外变形的土体堆在坡面上，则对下面土体产生较大的压力，使下面一定距离坡面土体同样产生侧向变形破坏，这样的作用重复发生，导致了边坡中部土体发生巨大变形，在坡脚附近，由于坡脚边界条件的限制，坡脚处一定范围内，土体变形较小。对于有根系边坡，坡度对其变形的影响较小，坡高对其变形的影响较大。

在坡高大于 8m，坡度高于 53° 时，边坡的变形都比较大，这是由于坡高增大后，由土体产生的土体压力也就比较大。

以上对边坡表层土体变形的分析，没有考虑降雨、地下水等因素的影响。降雨时，雨水的入渗改变了土体的性质，使土体的抗剪强度指标 C 、 φ 值降低，同时增大了土体的容重，产生附加应力，从而造成土体的滑动失稳。

通过强度试验和有限元模拟分析，对岩质路堑边坡进行绿色防护时，边坡高度宜在 8m 以下，坡度宜在 53° 以下。

在对边坡进行绿色防护时，应与其它工程防护措施相结合，以保证植被在生长初期边坡表层土体的稳定性。

致 谢

本论文是在导师吴光教授的精心指导下完成的。在导师严格要求和谆谆教诲下，作者独立从事科研的能力得到了迅速的提高。一直以来，正是由于导师在学业上的严格要求，生活上无微不至的关怀，才使得作者能够顺利完成学业。他严谨的治学态度、渊博的理论知识、丰富的实践经验、独特的学术见解使我终生难忘。在此向我尊敬的导师表示深深的感谢！感谢导师两年多来学习上、生活上无微不至的关心和帮助！

特别感谢王磊高级工程师长期以来对我的指导和帮助！

感谢西南交通大学土木工程学院胡厚田教授、韩会增教授、谢强教授、胡仰文教授、程谦恭教授、王鹰教授、巫锡勇副教授等对作者学习上的帮助！

感谢西南交通大学土木工程学院郭永春博士、赵文博士、冯涛博士等对作者学习上的帮助！

在作者攻读硕士学位及论文撰写期间，还得到许多同学的帮助。感谢贾斌武硕士、李娅硕士、王华硕士在论文撰写过程中所给予的关心和帮助！

感谢李淑芬老师在我试验过程中给予的指导。

特别感谢赵志明博士给予我学习上、生活上的支持！

感谢所有给予我帮助和关心的老师、同学和朋友！

主要参考文献

- 1 铁道第一勘察设计院. 铁路工程土工试验规程, 中华人民共和国行业标准, TB10102-2004, J338-2004. 中国铁道出版社, 2004 年北京
- 2 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程设计技术手册. 路基 中国铁道出版社, 1992
- 3 中华人民共和国行业标准. 铁路路基设计规范 (TB10001-1999). 1999 年
- 4 中华人民共和国行业标准. 公路路基设计规范 (JTJ013-95). 人民交通出版社, 2003
- 5 中华人民共和国行业标准. 铁路路基支挡结构设计规范 (TB10025-2001). 2002
- 6 《岩土工程手册》编写委员会. 岩土工程手册. 中国建筑工业出版社, 1996 年.
- 7 铁道部第一勘测设计院主编. 铁路工程地质手册 (第一版). 中国铁道出版社, 2002
- 8 铁道部第一工程局主编. 铁路工程施工技术手册. 路基. 中国铁道出版社, 2000 年 10 月
- 9 《工程地质手册》编写委员会. 工程地质手册 (第三版). 中国建筑工业出版社, 1993 年
- 10 铁道部第一勘测设计院 编. 工程地质试验手册. 中国铁道出版社, 1995 年 .
- 11 洪毓康主编. 土质学与土力学 (公路与城市道路、桥梁工程专业用) 第二版. 人民交通出版社, 1997 年
- 12 华南理工大学、东南大学、浙江大学、湖南大学编, 杨位洸主编. 地基及基础 (第三版). 中国建筑工业出版社, 1998 年
- 13 铁道部第一设计院, 第二设计院, 第三设计院, 第四工程局编. 铁路工程地质试验方法. 人民铁道出版社, 1977 年 6 月第 1 版第 1 次印刷
- 14 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术. 人民交通出版社, 2003 年 7 月
- 15 直接剪切试验 <http://met.fzu.edu.cn/etconline/08/01/010/01/00001/index.htm>
- 16 直接剪切试验. <http://civileng.tongji.edu.cn/soil/test/dsht/zhj1.htm>
- 17 周跃 等. 云南松侧根的浅层土体加固潜能及其计算. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998 4 (5)
- 18 周跃 等. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应研究-(I) 原理和计算. 山地学报, 1999 17(1)
- 19 周跃 等. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应研究-(II) 野外直测. 山地学报, 1999 17(1)
- 20 周跃. 土壤植被系统及其坡面生态工程意义. 山地学报, 1999 17 (3)
- 21 周跃 等. 云南松侧根对浅层土体的水平牵引效应的初步研究. 植物生态学报, 1999 23(5)
- 22 周跃 等. 乔木的斜向支撑效能及其坡面稳定意义. 山地学报, 2000 18 (4)
- 23 周跃 等. 云南松幼树垂直根的土壤增强作用. 水土保持学报, 2000 14 (5)
- 24 周跃 等. 松属、青冈属乔木侧根的强度在防护林固土护坡作用中的意义. 植物生态学报, 2001 25 (1)
- 25 周跃 等. 云南松根系对土壤牵引效应测试系统的设计与实现. 山地学报, 2001
- 26 王可钧 李焯芬. 植物固坡的力学简析. 岩石力学与工程报, 1998 第 6 期

- 27 封金财, 王建华. 乔木根系护坡作用机理的研究进展. 铁道建筑. 2004 年第 3 期
- 28 野久田稔郎, 林拙郎等. 由根系抗拉强度推断其固坡效果. 水土保持科技情报. 1997 年第 1 期 25~28
- 29 CHEN Xiao—yuan, LIU Xiao—ying, LUO Yuan—pei. Effects of Soil Moisture on Dynamic Distribution of Dry Matter Between Winter Wheat Root and Shoot. Agricultural Sciences in China, Vol. 2 No. 101144—1150, October 2003
- 30 XU MING—GANG, ZHANG YI—PING, SUN BEN—HUA. Phosphate Distribution and Movement in Soil—Root Interface zone: II. The Influence of Soil Water Content and Application Rates of Phosphate. Pedosphere 5 (3): 267—274, 1995
- 31 XU MING—GANG, ZHANG YI—PING, SUN BEN—HUA. Phosphate Distribution and Movement in Soil—Root Interface Zone: I. The Influence of Transpiration Rate. Pedosphere 5(2): 115—126, 1995
- 32 任安芝, 高葆, 王金龙. 不同沙地生境下黄柳(Salix gordejewii)的根系分布和冠层结构特征. 生态学报. 2001 年 3 月, 第 21 卷第 3 期
- 33 龙忠富, 唐成斌, 刘秀峰, 尚以顺. 草本植物混播对公路边坡的防护效果研究. 中国水土保持 SWCC. 2003 年第 3 期
- 34 王立群, 陈世瑛. 草地植物根系类型划分原则的探讨. 内蒙古农业大学学报. 2003 年 9 月, 第 24 卷第 3 期
- 35 李昕, 张新全. 草本植物在荒漠化治理高速公路绿化以及铁路护坡中的作用. 四川草原草地生态, 2003 年第 5 期
- 36 李勇, 徐晓琴. 草类根系对土壤抗冲性的强化效应. 土壤学报. 1992 年 8 月, 第 29 卷第 3 期
- 37 谢春华, 关文彬, 张东升, 吴建安, 罗辑, 李童阳. 长江上游暗针叶林生态系统主要树种的根系结构与土体稳定性研究. 水土保持学报. 2002 年 6 月第 16 卷第 2 期
- 38 张文辉, 刘祥君, 刘国彬, 马克明. 川西北泡沙参种群根系生长动态及其与环境因素关系研究. 应用生态学报. 2004 年 1 月, 第 15 卷第 1 期
- 39 罗斌. 从绿色通道标准示范区段的建设浅谈植被护坡. 路基工程. 2004 年第 1 期(总第 112 期)
- 40 P. O. Nwudukwe 等. 从土柱中分离根系的便携装置. 农业新技术新方法译丛. 1989 年 No.2(总 25)
- 41 吴凡, 宋翠萍. 堤坝的植物护坡. 技术服务第 44 页
- 42 李会科, 王忠林, 贺秀贤. 地坝花椒林根系分布及力学强度测定. 水土保持研究. 2000 年 3 月第 7 卷第 1 期
- 43 满开颜. 植被对边坡的防护作用. 铁路地质和路基. 1993 年第 4 期
- 44 DoV • Leshchinsky, Ralph • H • Boedeker. 加筋土坡的稳定分析. 铁路地质与路基. 1991 年第 3 期
- 45 T.H.吴, 罗纳德 M.Mc, 罗纳德 T.E 菲利普 E.B. 土和根相互作用的研究. 铁路地质与路基. 1989 年第 3 期

- 46 Zhou, Y. et al Effects of the lateral roots of *Pinus yunnanensis* Forest on shallow soil reinforcement. *Plants and Soil*, 1997, 190: 77-86
- 47 Zhou, Y. et al. A case study of effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on shallow soil reinforcement. *Forest Ecology and Management*. 1998, 103: 107-120.
- 48 [日]山寺喜成, 安保 昭, 吉田 宽 著, 罗晶等译. 恢复自然环境绿化工程概论——坡面绿化基础与模式设计. 中国科学技术出版社. 1997
- 49 Ministry of works and transport (Nepal). Use of bioengineering in the road sector (Geo-environmental unit) 1999.2
- 50 汪思龙, 陈楚莹. 凋落物对土壤酸化的缓冲及其对根系生长的影响. *生态学杂志*. 1992, 11(4): 11—17
- 51 杨庆, 张慧珍, 栾茂田. 非饱和和膨胀土抗剪强度的试验研究. *岩石力学与工程学报*. 2004 年 2 月, 第 23 卷第 3 期
- 52 王义琴, 张慧娟, 白克智, 孙勇如. 分形几何在植物根系研究中的应用. *自然杂志科技进展*. 第 21 卷第 3 期
- 53 廖成章, 余翔华. 分形理论在植物根系结构研究中的应用. *江西农业大学学报*. 2001 年 6 月, 第 23 卷第 2 期
- 54 王慧芳, 罗承德. 高等级公路边坡绿化植物材料选择初探. *四川草原草坪园艺*. 2004 年第 3 期总第 100 期
- 55 鲁伟民. 高羊茅草坪的建植及其养护. *花卉苗木新农村*. 2004 年第 2 期
- 56 刘龙, 陈志忠, 钱东升. 高羊茅在江淮地区公路边坡栽培管理技术. *公路交通科技*. 1998 年 12 月
- 57 陈建军, 任永浩, 韩锦峰. 根际 pH 值对烟草根系生长的影响(简报)
- 58 廖兴其. 根系研究方法评述
- 59 李明山. 公路边坡绿化原则和主要管护措施——以漳龙高速公路漳州路段为例. *福建水土保持*. 2003 年 12 月. 第 15 卷第 4 期
- 60 林清, 张季如. 公路开挖边坡的稳定性分析方法研究. *长江科学院院报*. 2003 年 10 月, 第 20 卷第 5 期
- 61 周克梅, 蔡亚萍. 海堤树木根系对堤防安全的影响. 工作研究
- 62 刘国斌, 蒋定生, 朱显谟. 黄土区草地根系生物力学特性研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*. 1996 年 9 月, 第 2 卷第 3 期
- 63 赵昌恒. 徽杭高速公路边坡绿化设计及种植材料选择. *生产率系统*, 2003
- 64 杨光, 张修宇. 抗剪参数 c, φ 与应力状态的关系及工程应用. *东北水利水电*. 2004 年第 2 期 (第 22 卷 235 期)
- 65 刘顺康. 快速测量植物根系长度的方法
- 66 孙发证. 类芦的固土护坡性状的及其生产应用价值. *Grassland and Turf (Quarterly)* 2004 No. 1(Sum No. 104)
- 67 薛建辉, 王智, 吕祥生. 林木根系与土壤环境相互作用研究综述. *南京林业大学学报(自然科学版)*. 2002 年 5 月, 第 26 卷第 3 期

- 68 解明曙. 林木根系固坡土力学机制研究. 水土保持学报. 1990年7—9月, 第4卷第3期
- 69 代全厚, 张力, 刘艳军, 许晓鸿. 嫩江大堤植物根系固土护堤功能研究. 中国水土保持 SWCC. 技术与措施. 1998年第12期
- 70 梁双宝. 喷混凝土植生技术在边坡防护中的应用. 线路 / 路基, 铁道标准设计. 2003 (10)
- 71 马金字. 喷混植生技术在胶新线上的应用. 路基工程, 铁道标准设计. 2004 (2)
- 72 张根生. 喷混植生技术在石质路堑边坡防护中的应用. 路基工程, 铁道标准设计. 2004 (2)
- 73 解明曙. 乔灌木根系固坡力学强度的有效范围与最佳组构方式. 水土保持学报. 1990年1—3月, 第4卷第1期
- 74 周跃, 徐强, 骆华松, 李玉辉. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应 I 原理和数学模型. 山地学报. 1999年2月, 17卷1期4~9页
- 75 周跃, 徐强, 骆华松, 李玉辉. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应 II 野外直测. 山地学报. 1999年2月, 17卷1期10~15页
- 76 刘建军, 雷瑞德, 吴钦孝, 王得祥. 秦岭天然油松、锐齿栎林根系-土壤互动效应研究. 西北林学院学报. 2002,17(1):1~4
- 77 阴可, 岳中琦, 李焯芬. 人工边坡绿化种植技术及其在香港的应用. 中国地质灾害与防治学报. 2003年12月, 第14卷第4期
- 78 小山内信智, 南哲行, 竹崎伸司, 大手桂二, 堀内成郎, 吉田延雄. 日本的水土保持坡面工程管理与维护. 水土保持科技情报. 2001年第1期
- 79 李铁军, 李晓华. 灾害防治日本有关绿化带防止泥沙灾害功能的研究. 水土保持科技情报. 2002年第6期
- 80 邱青长, 黄生文. 软粘土抗剪强度参数试验研究. 土工基础. 2004年2月, 第18卷第1期
- 81 李勇. 沙棘林根系强化土壤抗冲性的研究. 水土保持学报. 1990年7—9月, 第4卷第3期
- 82 崔浪军, 梁宗锁, 韩蕊莲, 杨建伟. 沙棘—杨树混交林生物量、林地土壤特性及其根系分布特征研究. 林业科学. 2003年11月, 第39卷第6期
- 83 史敏华, 王糠, 李任敏. 石灰岩区主要水保灌木根系分布特征与根抗拉力研究初报. 山西林业科技. 1994年3月, 第2期17~19
- 84 [日]陶山正亮. 树木很系的坡面稳定机理. 中国水土保持, 植物措施. 1990年10月
- 85 [日本]阿比一时(KAZUTOKI ABE), 岩本 胜(MASARU IWAMOTO). 树木根系在防止滑坡中的土力学作用(续). 中国水土保持, 植物措施. 1989年12月
- 86 [日本]阿比一时(KAZUTOKI ABE), 岩本 胜(MASARU IWAMOTO). 树木根系在防止滑坡中的土力学作用. 中国水土保持, 植物措施, 1989年11月
- 87 宋建农, 王苹, 魏文军, 王立臣. 水稻秧苗抗拉力学特性及穴盘拔秧性能的力学试验研究. 农业工程学报. 2003年11月, 第19卷第6期

- 88 孙启忠. 四种冰草根系抗拉性的比较. 牧草与饲料. 1990 年第 1 期
- 89 张金池, 康立新, 卢义山, 冷书法, 冯福生. 苏北海堤林带树木根系固土功能研究. 水土保持学报. 1994 年 6 月, 第 8 卷第 2 期
- 90 郝彤琦, 谢小妍, 洪添胜. 滩涂土壤与植物根系复合体抗剪强度的试验研究. 华南农业大学学报. 2000 年 10 月, 第 21 卷第 2 期
- 91 林文群. 藤本植物在生态环境中的应用. 生产率系统. 2003, 2 (总 34), 38-39
- 92 张贵忠. 铁路绿色通道喷混凝土固土技术. 西北水资源与水工程. 2003 年 12 月第 14 卷第 4 期
- 93 王芝芳, 杨亚川, 赵作善, 邓健, 廖植樨, 刘军凤. 土壤—草本植被根系复合体抗水蚀能力的土壤力学模型. 中国农业大学学报. 1996 年, 第 1 卷第 2 期
- 94 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 廖植樨, 邓健, 张心平. 土壤—草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究. 中国农业大学学报. 1996 年, 第 1 卷第 2 期
- 95 吴淑杰, 韩喜林, 李淑珍. 土壤结构、水分与植物根系对土壤能量状态的影响. 东北林业大学学报. 2003 年 5 月, 第 31 卷第 3 期
- 96 <http://www.grassae.org/cyzs/index.html>. 香根草的生态功能和特性. 2001.10.21
- 97 V. O. Sadras 等向日葵种植密度对根系生长动力学以及根长与叶面积之间关系的影响.
- 98 黄家榆, 刘俐. 岩质边坡坡度值研究. West China Exploration Engineering, 学术探讨. 1994 年 7 月, 第 6 卷第 4 期
- 99 郑颖人, 赵尚毅, 邓卫东. 岩质边坡破坏机制有限元数值模拟分析. 岩石力学与工程学报. 2003 年, 第 22 卷第 12 期
- 100 张金池, 臧廷亮, 曾锋. 岩质海岸防护林树木根系对土壤抗冲性的强化效应. 南京林业大学学报. 2001 年 1 月, 第 25 卷第 1 期
- 101 阿部和时, 岩元贤. 用树木根系的抗拉强度测定根系固定坡面的作用. 水土保持科技情报. 试验研究. 1992 年第 4 期
- 102 张云伟, 刘跃明, 周跃. 云南松侧根摩擦型根土粘合键的破坏机制及模型. 山地学报. 2002 年 10 月, 第 20 卷 5 期 628~631 页
- 103 刘跃明, 张云伟, 周跃. 云南松根系对土壤牵引效应测试系统的设计与实现. 山地学报. 2002 年 8 月, 第 20 卷 4 期 476~479 页
- 104 李鹏, 赵忠, 李占斌, 王乃江. 植被根系与生态环境相互作用机制研究进展. 西北林学院学报. 2002, 17(2):26~32
- 105 I. O. 巴吐宁, 麦来. 斯拉木. 植物根系的生态可塑性. 干旱区研究. 1995 年 6 月, 第 12 卷第 2 期
- 106 樊小林, 李生秀. 植物根系的提水作用. 西北农业大学学报. 1992 年 10 月, 第 23 卷第 3 期
- 107 吴彦, 刘世全, 王金锡. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响. 应用与环境生物学报. 1997, 3 (2): 119-124.
- 108 野久田稔郎, 林拙郎等. 由根系抗拉强度推算其固坡效果. 水土保持科技情报. 测试技术. 1997 年第 1 期

- 109 李唯, 倪郁, 胡自治, 李胜. 植物根系提水作用研究述评. 西北植物学报. 2003, 23 (6): 1056-1062
- 110 李勇, 武淑霞, 夏侯国风. 紫色土区刺槐林根系对土壤结构的稳定作用. 土壤侵蚀与水土保持学报. 1998年6月, 第4卷第2期
- 111 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究. 水土保持学报. 2003年9月, 第17卷第3期
- 112 程建峰等. 作物根系研究法最新进展.
- 113 赵成义, 黄俊梅, 王玉潮, 胡顺军. 植物根系吸水特性研究. 干旱区地理. 1999年6月, 第22卷第2期
- 114 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 田积莹. 植物根系与土壤抗冲性. 水土保持学报. 1993年9月, 第7卷第3期
- 115 姚爱兴, 王槐三, 梁祖铎. 紫花苜蓿根系生物学特性的研究. 牧草与饲料. 1989年第2期
- 116 张俊云, 周德培, 李绍才. 岩石边坡生态种植基材试验研究. 岩石力学与工程学报. 2001 20(2):239~242
- 117 申新山. 岩石边坡植生基质生态防护工程技术的研究与应用. 中国水土保持. 2003年 第10期
- 118 刘波, 李英平, 陈国立. 岩石路堑边坡防护客土喷播立体绿化技术. 市政技术. 2004 年3月, 第22卷第2期
- 119 耶俊. 植草护坡技术的研究和应用. 水运工程. 2000年第5期
- 120 周利民. 运用液压喷播技术进行植草护坡的研究. 2000年第3期
- 121 李彦, 邵伯琴等. 应用青岛结缕草加固防护铁路砂质路基边坡的研究. 中国草地. 2000 年第4期
- 122 周利民. 液压喷播植草护坡技术研究. 中国水土保持. 2003年第5期
- 123 章恒江, 章梦涛, 付奇峰. 岩质坡面喷混快速绿化新技术. 国外公路. 2000年第5期
- 124 陈绍清. 岩石边坡锚固支护的结构形式及应用. 探矿工程. 1999年第5期
- 125 王连新. 土工网复合植被护坡法在三峡工程中的应用. 人民珠江. 1999年第4期
- 126 黎军, 林延鹏. 土工格栅(格网)在公路边坡防护及路基中的应用. 公路 2000年第9期
- 127 陈锡民. 铁路路基边坡喷播植草防护. 铁道建筑. 1998年第11期
- 128 谭远发. 铁路路基边坡绿色防护技术的发展和运用. 铁道工程学报. 2001年第1期
- 129 汪智耀. 铁路路基边坡防护应推广液压喷播植草技术. 铁路工程造价管理. 1999年第 4期
- 130 李小兵. 鱼嘴车站岩石边坡绿色防护设计及施工. 路基工程. 2003年增刊
- 131 李旭光等. 日本的公路边坡绿化与防护—1994年赴日本考察报告. 公路交通科技. 1995 Vol.12 (2)
- 132 铁道第二勘察设计院, 西南交通大学, 中铁第十五工程局. 岩石边坡快速恢复植被的 工程技术研究. 西南交通大学. 2003年2月
- 133 冯俊德. 温湿地区铁路路基边坡绿色防护技术有关规定研究. 铁道第二勘察设计

院. 2002 年 6 月于成都

134 铁道第四勘察设计院, 铁道第一勘察设计院, 铁道第二勘察设计院, 铁道第三勘察设计院. 铁路路基边坡绿色防护技术有关规定研究. 铁道第四勘察设计院. 2002 年 3 月

135 王应铭. 干旱地区铁路路基边坡绿色防护技术有关规定研究. 铁道第一勘察设计院. 2002 年 2 月于兰州

136 孔德坊. 工程岩土学

137 赵志明. 工程边坡绿色防护机理与设计指标研究. 西南交通大学研究生学位论文. 2004 年 5 月

138 赵成址, 周锡九. 路堑边坡植草防护. 铁路地质与路基. 1994 年第 3 期

139 Ansys 中国. ANSYS 非线性分析指南. 2000 年 1 月

140 Ansys 中国. ANSYS 高级分析指南. 2000 年 1 月

攻读硕士学位期间发表论文及科研成果

1 发表论文

- [1] 王喜华 赵志明 判别分析在地质工程中的应用 西部探矿工程 2004, 第 4 期
- [2] 张夏临 王喜华 旁压试验在工程中的应用 西部探矿工程 2004, 第 3 期
- [3] 赵志明 王喜华 某岩石边坡的有限元分析 四川建筑 2004, 第 6 期

2 参加科研项目

- [1] 万宜铁路路基岩石高边坡稳定性分析
 - [2] 杨楼互通式立交桥桥头软土地基沉降计算
 - [3] 岩石边坡快速恢复植被的工程技术研究
-