



Computational Method for Vegetated Slope

植被防护土坡的 • 计算方法 •

周成 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



南京水利科学研究院出版基金资助出版

植被防护土坡的 ● 计算方法 ●

周成 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了植被防护土坡的常用技术及计算方法。从土力学、土壤学、植物学的角度,介绍了植被防护土坡的机理、类型及计算分析方法和设计原则。

本书实用性较强,适合从事植被生态护坡工程的设计、施工技术人员使用,亦可作为教学、科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

植被防护土坡的计算方法 / 周成著. —北京:中国水利水电出版社, 2008

ISBN 978-7-5084-5557-0

I. 植… II. 周… III. 植被—护坡—计算方法 IV. U418.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 060221 号

书 名	植被防护土坡的计算方法
作 者	周成 著
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales @ waterpub. com. cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	140mm×203mm 32开本 5.375印张 144千字
版 次	2008年12月第1版 2008年12月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	20.00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



Sponsored by publishing fund of Nanjing
Hydraulic Research Institute (NHRI)

Computational Method for Vegetated Slope

Written by Zhou Cheng

China WaterPower Press

Abstract

During the design and construction of slope protection, retaining walls, anchorage bars and anti - slide piles are the most commonly used techniques. Slope stabilization by vegetation bio - engineering methods is still considered as the routine activities of landscape engineering. People plant on slope just for greening purpose. However, if some special plants with strong and long root system such as vetiver grass etc. are adopted for slope stabilization and in combination with some necessary geotechnical structures, the environmental and economic advantages will play a more and more important role in both engineering and gardening practice.

In this book, a new slope protection mechanism by vegetation bio - engineering stabilization technique is proposed, i. e. , progressive deformation and decomposition control, to actively prevent other than passively protect. The mechanism of vegetation bio - engineering stabilization of slopes, various vegetated protection techniques and design principles are introduced, simple soil mechanic model for vegetated soil and analytical solutions for vegetated slopes are proposed. Simply generalized consolidation theory for unsaturated soil and progressive deformation analysis method for slopes are implemented in a general finite element method. Soil deformation caused by rainfall, creep, anisotropic fabric change and artificial disturbance in the slope with/ without vegetation are analyzed. Practical vegetation bio - engineering stabilization measures are suggested for design.

This book is sponsored by publishing fund of Nanjing Hydraulic Research Institute (NHRI). Research on vegetation bio - engineering stabilization of slope is sponsored by Natural Science Foundation of China (NSFC).

前言

目前在土坡工程防护设计中，仍然采用传统的挡墙、喷锚、抗滑桩等护坡技术，植被防护土坡一般还仅局限于园林工程师的活动范畴，似乎植被防护土坡只是一种“绿化”环境的行为。其实，在提倡环境保护的今天，利用一些根系发达的植被，把园林工艺学和土力学与环境岩土工程技术结合到一起应用到实践中去，可以很好地实现土坡防护的社会经济效益和生态效益。植被防护土坡的土力学计算和设计理论的研究在国内还没有引起人们的普遍关注，国内比较有代表性的关于土坡植被防护技术的专著仅有西南交通大学的周德培和张俊云教授编写的《植被护坡工程技术》（人民交通出版社，2003年）等几部。

为了弥补目前土坡生态防护领域缺少设计理论和计算方法的不足，帮助建立从传统的“被动性支护”向经济的“主动性防御”转变的土坡渐进变形防护新机制，笔者撰写了《植被防护土坡的计算方法》一书。本书从土力学、土壤学、植物学的角度，介绍了植被根系防护土坡的机理、类型及计算分析方法和设计原则。本书主要特点是理论与实践相结合，把复杂的土力学理论和数学模型以简单的方式阐述表达，供计算和设计直接使用。同时在高端数值分析理论方面，介绍了非饱和土与饱和土的简化固结理论以及简单解析和数值分析方法，

可以应用于土坡地下水位上下的非饱和与饱和土的渐进变形计算和分析。希望通过本书与从事植被生态护坡技术研究与应用的設計、施工技术人员及教学、科研人员的进行探讨并得到大家的指正，以便使笔者的研究应用水平进一步提高。

本书主要基于笔者的课题组承担的国家自然科学基金（渐进变形与生态护坡）、水利部技术创新推广基金（裂隙土控制与防治）及科技部科研院所技术创新基金（土坡变形自适应防护）资助的研究项目的部分内容撰写而成，并得到南京水利科学研究院出版基金的资助。

第3章中香根草根系生态加固土的试验工作主要由周荣官和张继宝完成，李东兵和陈晓红参加了第1章和第7章的写作，并作了编校。

周 成

2008年3月于南京

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 土坡的水土流失	1
1.2 土坡的滑移破坏和渐进变形	4
1.3 常见的结构防护土坡技术	6
1.4 常见的植被防护土坡技术	7
1.5 植被防护土坡需要研究的关键问题	11
1.6 本书的主要研究内容	15
2 常见的土坡滑移破坏及渐进变形计算方法	18
2.1 土坡水土流失的估算方法	18
2.2 土坡滑移破坏的极限平衡理论分析方法	20
2.3 土坡渐进变形的数值分析方法	20
2.4 土坡渐进变形的近似解析方法	24
3 植被防护土坡的作用	25
3.1 生态护坡对土坡稳定性的影响	25
3.2 植被根系的分布特性	26
3.3 植被根系的强度	27
3.4 植被根系的固土理论与模型	27
3.5 带根系土的室内及现场试验	28
3.6 香根草根系生态加固土的试验	28
3.7 小结	35
4 植被防护土坡的土力学本构理论与模型	36
4.1 常见的土的强度与变形特性	36
4.2 常见的土力学本构理论与模型	40

4.3	植被防护土坡的土力学本构理论与模型	46
4.4	本构模型计算的收敛算法	52
4.5	模型的验证与应用	64
4.6	小结	72
5	植被防护土坡的有限元数值计算方法	73
5.1	引言	73
5.2	一般土坡变形分析的影响因素及其作用	75
5.3	一般土坡的有限元数值计算模型和方法	81
5.4	有限元计算植被防护土坡的功能简介	89
6	植被防护土坡的近似解析方法	91
6.1	引言	91
6.2	饱和状态下植被根系生态加固土的广义弹黏塑性模型	91
6.3	广义吸力作用下坡土的应力平衡方程及解答	94
6.4	植被防护土坡变形的近似解析模型和方法	95
6.5	植被防护土坡的近似强度解析模型	98
7	设计与计算范例	103
7.1	工程场地的调查与分析	103
7.2	结构防护土坡的工程分析与设计	106
7.3	植被防护土坡的工程分析与设计	109
7.4	植被防护土坡的有限元数值计算和分析	129
7.5	植被防护土坡的近似解析计算和分析	135
7.6	小结	141
8	结语与展望	142
	参考文献	144

1

绪论

1.1 土坡的水土流失

土坡一般会面临水土流失和崩塌或滑移等问题，因此非常需要了解导致这些问题的原因及防治措施。一般来说，重力是驱使土坡滑移的主要因素，风力和水力作用则是水土流失的主要原因，植被防护可以有效防止水土流失和土坡滑移。

水力、风力和冰冻等外力的冲击作用、拖拽或掀翻作用、冻融干湿循环等物理风化作用以及化学或生物风化作用，使岩体破裂粉碎或使土颗粒之间的胶结断开，从而面层土脱离地表并随外力作用迁移，一般把这一过程称为水土流失。边坡表层受风力、水力物理风化作用，使面层土开裂碎解成细粒状、条片状，在重力、水力、风力作用下沿坡面“剥落”；边坡松散土层在降雨或地表径流的集中水流冲刷侵蚀作用下，沿坡面形成沟状“冲蚀”破坏；先形成密集的“纹沟”，继而发展成“细沟”，逐步加大直至发展成“切沟”或“冲沟”密布于坡面，引起坡面坍滑等破坏；另外，松散坡土被水流挟裹搬运形成“泥石流”。水土流失一般从几厘米到几十厘米深，其中以“细沟”侵蚀破坏作用最强。

影响边坡水土流失的因素很多，有干旱程度、降雨强度、降雨的冲蚀力、径流量的大小、水流速度和流量、水流冲刷挟带泥沙的能力、地表粗糙度、坡度、坡长、土质类型及结构、土颗粒之间的胶结程度、土的含水量、植被类型等。其中，水土流失的外因——水力、风力和冰冻的作用大小一般受流速、流量和土坡坡度、坡长及粗糙度的影响，而决定抵抗水土流失的内因——土的内在摩擦和黏结作用的强弱则受土的基本特性、土颗粒之间的

胶结程度、土颗粒间的物理化学作用等的影响。一般地,级配良好的粗砾石的可蚀性较低,而均匀的粉土和砂土的可蚀性较高,土的可蚀性随黏粒和有机质的含量及含水量的增加而降低,随离子强度的减少而增加。在较长较陡的土坡中设置横向的截流浅沟,利用植被防护增加地表粗糙度、降低水力冲刷和风力能量,以及利用植被根系增加土的强度,能够很好地抑制水土流失的程度^[1~2] (Gray 和 Sotir, 1996; 唐德富和包忠谟, 1991)。

根据交通部出台的《交通、水运交通发展三阶段战略目标》,2010 年全国公路总里程将达 180 万 km,其中二级以上公路达 36 万 km,2020 年全国公路总里程将达 230 万 km,其中二级以上公路达 55 万 km,2040 年公路总里程将超过 300 万 km,其中高速公路总里程达 8 万 km。我国有 2/3 国土处于山区或丘陵地区,公路的大量建设会形成大量的边坡。边坡的开挖使地表植被遭到破坏,水土流失加剧,同时还可能造成崩塌、滑坡等,给工农业生产和人民生活带来严重危害。

我国目前正在面临两大主要水利生态环境难题:一是水土流失,水土流失面积占国土面积的 1/3 左右;另一个则是水资源短缺和水环境恶化。黄河流经的黄土高原是世界上水土流失最为严重的地区,平均每年向黄河输入泥沙 16 亿 t,造成黄河下游泥沙淤积、河床抬高、水资源紧缺。长江上游金沙江、嘉陵江及三峡区间、中游支流等地区水土流失也非常严重,常常会发生滑坡和泥石流。水土流失、水资源短缺和水污染等生态问题已经成为水利良性发展的重要制约因素,搞好水土保持以及水环境的改良需要全新的理论支撑^[3~4] (董哲仁, 2003)。

西方国家非常注重水土保持以及水环境改良等生态环境建设问题^[5~9] (O'Neill 等, 1986; Odum, 1989; Gosselink, 1990; Mitsch, 2000, 2004)。我国近几年水利工作的重点,如治淮等大江大河治理、南水北调工程、病险水库除险加固、人畜饮水工程、大型灌区节水改造等水利工程建设,都在遵循着开发利用水资源的同时兼顾生态系统健康的研究思路和研究主题。我国近几

年长江防洪建设工作方针也已经形成以堤防为基础、三峡工程为骨干、水土保持相结合的综合防洪体系。

依照传统水利工程学的做法,江、河、湖、海的堤防岸坡为了防止水流和波浪对岸坡土体的冲蚀和淘刷造成侵蚀、塌岸等破坏,往往会采用砌石护坡、堆石护坡、现浇或预制混凝土板护坡等。传统施工工艺,不仅费时费钱,而且有时还会产生工程质量问题。另外,在大气、水和生物作用下地表面层会发生劣化/风化。干湿、冷热和冻融等引起的物理风化,以及溶解、水化、水解、酸化和氧化等引起的化学风化甚至生物风化,都会引起面层材料的劣化或失效。堤坝及边坡中由于长期经受风力和水力侵蚀、湿胀干缩、热胀冷缩等的作用,往往还会在土坡内部引起许多裂隙等^[10](沈珠江,2004)。裂隙是危及土工建筑物安全的主要灾害之一,如何解决堤坝及边坡中的裂隙问题,多年来也一直是国内外岩土力学专家致力研究的重大课题。这些问题如果还只是采用传统水利工程学的做法(例如灌浆)去解决,往往还会带来其他方面(例如生态环境方面)的问题。

水土流失和岸坡失稳破坏问题已经成为人类与自然环境间相互作用、相互冲突的重要问题。为了做好水土保持以及水环境改良等生态环境建设工作,保护或修复水生态系统,维护河流健康生命,就必须想办法解决上述诸如水土流失、侵蚀、崩岸、风化以及裂隙等水利水电工程建设中的岸坡防护技术难题,协调好“工程水利”与“生态水利/资源水利”这一对矛盾。人为活动所形成的许多岸坡,若仅凭自然界自身的力量去恢复生态平衡,需要经过数以千百年计的漫长年代^[11](Schor 和 Gray,1995)。因此,非常有必要研究出取代传统“硬质、非生态型”岸坡防护的“活性、生态型”岸坡防护的复合型理论和技术,找到一种既可确保岸坡稳定又能帮助改良生态环境的岸坡有效加固的经济合理的生态防护方法^[12~13](周成,2005)。

“恢复生态环境”已成为 21 世纪人类文明、经济发展的重要课题。发达国家比较重视环境绿化,如美国、法国、加拿大、澳

大利亚等国家到处绿草如茵,日本、我国香港的岸坡绿化起步也比较早,在工程建设中他们的主导思想是建设与绿化同步进行。随着我国经济实力的增强和人们环保意识的提高,对生态环境的保护与研究越来越受重视,国家颁布的《中华人民共和国水土保持法》对植被环境保护也有明文规定。许多研究表明,植被系统不但有利于涵养水源、水土保持、帮助改良生态环境,而且如遇突发暴雨,也能有效拦截雨水,延长汇流时间,削减洪峰流量,减少洪水对堤坝的冲击力^[14~17] (Gray 和 Megahan, 1980; Gray 和 Leiser, 1982; Rustom 和 Weggel, 1993; Martin, 2003)。它能够使水利水电工程建设与水土流失、水生态系统环境恶化这一矛盾得以缓解。

1.2 土坡的滑移破坏和渐进变形

在重力和渗透水压力作用下,边坡表层土呈流塑状态,发生“溜坍”等局部破坏,一般破坏深度 1m 左右。边坡内部形成一定贯通滑移面,会发生“坍塌”,伴有局部坍落,厚度一般为浅层 1~3m。当坡土发生连续破坏,形成整体滑移面,则会发生整体的位移“滑坡”,大多具有浅层性,一般为 1~3m,但有的可深达 5~6m。

土坡的滑移破坏一般可以从土的剪应力增加或抗剪强度降低两个方面去分析其成因,认识和分析这两个方面的各个因素对于防治土坡的滑移破坏非常重要。增加土坡剪应力的原因主要有:地震、土坡上新建建筑物或填方、坡脚挖方或挡土墙拆除、土坡地下水位降低、降雨或地下水位上升或降雨入渗到土坡裂隙等。降低坡土抗剪强度的原因有:风化、孔隙水压力上升、浸水膨胀、化学过程如离子交换溶解、材料软化等。

天然土的时效特征是目前水利土木工程建设成败的控制因素之一。其产生的客观原因可归咎于天然土在各种赋存环境中所具有的不同的强度和变形特性,以及土所受到的荷载水平、加载方式和其他如降雨、风化等外在的扰动条件。我国地域辽阔,地

质、地形条件复杂，在蓄水、防洪、道路及铁路等工程建设中，常常会遇到在复杂的地基中修建堤坝等土工建筑物的技术难题。在天然土坡的灾害预测与防治上也会遇到许多复杂的岩土力学与工程问题，其中较为关键的是这些土工建筑物在建成使用期间发生的变形破坏问题，例如大坝、堤防的变形破坏，路堤工后沉降、侧向变形以及边坡滑移与泥石流等。无数的岸坡在各种赋存环境中由于受到不同荷载作用和其他如洪水、降雨、冻融、风化等外在扰动的影响会发生破坏。

自然过程引起的岸坡破坏主要有两种类型：一种是短期外在的作用引起的破坏，如地震和风浪作用下的砂土液化和水流冲刷下的滑坡、崩塌；另一种就是缓慢发展的风化过程使得岸坡土体经历一个从量变到质变的积累过程，在某一诱因作用下发生突然破坏，典型的如泥石流。岸坡的失稳破坏已经成为全球性的重大地质灾害源之一，是一种常见多发的自然地质灾害，具有群发性、重复性和广泛性等特点。人们的理论研究与工程实践历来重视这一领域。土质岸坡的传统防护、加固措施大多是采用砌筑挡墙或打设抗滑桩等，这些刚性措施除了造价较高的缺点之外，对生态环境也会造成明显的损伤与破坏。同时人们也已经意识到，普通的植被系统如草皮或根系浅的植被只适于水土保持以及浅层土体的防护等。为此，需要寻求一种不仅适合于浅层土，又适合于一定埋深土的“活性、生态型”防护办法，进行复合型生态防护理论与技术的研究，将工程建设与生态环境保护有机结合起来，在确保岸坡稳定的前提下，通过植被不断改善周围环境，从而达到帮助解决水土保持以及水环境改良等生态环境建设难题的目的。

天然土的变形破坏大致表现为渐进式和突变式两大类。例如边坡的变形有的是长期的，以较低的变形速率进行，有的则以较大的变形速率进行，观测到的变形速率包括了从一年几毫米到数小时几千米的范围^[18]（Guzzetti, 1998）。风力和水力侵蚀、湿胀干缩、热胀冷缩可能引起土内裂隙的形成。岸坡土在水分蒸

发、降雨入渗的干湿循环的过程中历经裂隙产生、发展或缩小、闭合,最后吸力完全丧失的整个过程,往往就会产生渐进的变形破坏。一般地说,在主动性重力型滑坡过程中,位移速率的大小主要取决于随季节变化的土中孔压。在直线形滑坡中由于驱动力不会随时间发生很大的变化,这一特点尤为突出,位移速率一般从每年几厘米到每年几米。相比之下,由于快速的孔压增长、应力改变或强度的减少等因素的影响,被动性牵引型滑坡往往具有突发性或较大位移速率等特点。边坡的破坏滑移面往往是从一个潜在的由于结构扰动造成的薄弱区开始,逐渐形成扩大的剪切区,然后从此区发展渐进地形成潜在的滑移面。根据 Mohr - Coulomb 理论,剪切面一般会在与最小主应力方向成 $(45^\circ + \phi'/2)$ 的倾斜面上发展。短暂的暴雨一般只会引发浅层滑坡,而深层滑坡往往要历经一段长时间的雨水入渗浸泡过程。这一入渗浸泡破坏过程与土的饱和度、渗透性及裂隙发展程度相关。土层深处的孔压的消散一般要比浅层的慢,往往边坡会在降雨之后一段时间后才发生破坏^[19] (Leroueil, 2001)。这些都表明,天然土的变形破坏一般是土的位移渐进发展到一定程度的结果。即使是突变式的变形破坏,往往也是从渐进式变形的量变累积而成的质变。

1.3 常见的结构防护土坡技术

传统土坡挡墙支护技术有混凝土或砌石重力式挡墙、悬臂式挡墙、扶臂式挡墙、锚定板挡墙、柱板式锚杆挡墙、板桩或卸荷板桩式挡墙、拉杆卸荷板柱板式挡墙、卸荷板一托盘式挡墙、排桩支护挡墙、金属拉条或土工合成材料加筋土挡墙、复合土钉挡墙。其中土钉或锚杆、抗滑桩护坡技术,主要考虑深层滑移造成的破坏,适用于空间狭小地段或挡墙结构难以满足土坡稳定性的情况。另外,还有一些主要用于护岸的技术,例如抛石护岸、石笼护岸、砌石或混凝土面层护岸、混凝土铰链排等。对于胀缩变形较大或膨胀力较大的边坡,结构防护以柔性防护为宜,切不可

盲目采用刚性结构。

重力式挡墙主要依靠其自重抵抗水平推力，需要通过合理设计预防外力导致的倾覆破坏、水平滑移破坏以及地基承载力不足导致的破坏。堆石或砌石挡墙还需验算水平推力造成局部的墙体剪切破坏以及基底不均匀沉降造成的局部破坏。采用金属拉条或土工合成材料加筋土，还需要考虑金属拉条或土工合成材料的局部拉断或抗拔破坏。填充土石材料的钢木石笼或混凝土铰链排建造的挡墙，还需考虑钢木结构或混凝土框架构件接头应力过大或梁柱弯扭应力过大造成的局部破坏。抛石护岸、石笼护岸、混凝土面层护岸、混凝土铰链排护岸主要考虑土坡的局部或整体崩塌和冲蚀破坏，一般需要在坡底建造挡墙结构以便稳定上部护岸结构。

1.4 常见的植被防护土坡技术

工业文明造就了大量廉价、耐久和安全的钢筋混凝土产品，使人类不再需要像祖先那样，利用树木等原始材料防护土坡堤岸，对此人们已经习以为常。但是，各类边坡的环境条件普遍较差，特别是开凿山体与填埋沟谷形成的边坡大多呈现出土石裸露、侵蚀与滑坡相当严重的景象。混凝土或砌石挡墙工程能在一定程度和一定时间内解决侵蚀与滑坡问题，但在人们对绿色生态环境的要求日益高涨的今天，缺少生态效益且造价昂贵的混凝土或砌石挡墙也越来越得不到人们的青睐。相反，价格低廉的植被生态护坡工程正日趋受到重视，表现出更佳的护坡效果与生态效益，而且它在公路凉荫、消除噪声、改善公路小气候以及建设绿色通道等方面都具有重要作用。

随着近几十年来人们对资源、环境和生态问题的日益关注，植被防护的理念逐渐进入人们的视野，欧美国家率先开始研究和应用植被防护土坡技术，已推广应用到适合植被防护土坡的各个工程领域，例如废矿复垦、公路铁路护坡、噪音隔断、固体废弃物处理、大气环境保护、建筑工地美化、河道防冲刷、地面排水

系统、水库大坝护岸、海岸抗风浪侵蚀、管道工程防护等。植被防护土坡技术造价低、环境相容性好，因而极具吸引力。植被防护土坡可以有效地降低引起土坡滑移破坏的风险，植被根系可以增加土的抗剪强度，枝茎蒸腾作用可以减小孔隙水压力，相邻植被根系之间的土拱效应及植被本身的护垫作用增加土坡的整体稳定性。通过植被储存或蒸腾水分，调整坡土的湿度，减少和降低干湿循环作用效应，从而增强坡面防冲刷、防变形的能力。但是，对于乔木类植被防护，很重的树身、风吹树干引起的上拔作用以及粗壮根茎的顶胀作用，不利于防治土坡的滑移破坏。

植被护坡的方式一般有：厚层客土种子喷播护坡、生态混凝土基材喷播护坡、挂网植草护坡、植生带育种护坡、铺草皮护坡、液压喷播植草护坡、干砌片石或浆砌片石方格或拱形骨架内植草护坡、预制混凝土框格内植草护坡、三维植被网护坡、土工格室植草护坡、香根草篱护坡、马道植草护坡、藤蔓植物护坡等^[20]（周德培和张俊云，2003）。其中，厚层客土种子喷播护坡技术，是指借助于机器把由泥炭、草纤维、木纤维、谷壳、秸秆、木屑、蛭石、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。比较新颖的土工材料联合植被护坡技术，利用土工合成材料网与坡土接触面的摩擦作用，使土中的压应力和剪应力经网格面层扩散成网格—土界面的接触应力，从而相应降低坡土中的应力，起到固土防滑作用。例如，挂网植草护坡技术，利用土工合成材料植被网垫与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、边坡溜坍和滑坡。植生带育种或者预制草坪土工合成材料网垫护坡技术，将草籽置于两层无纺布之间，利用无纺布的抗拉强度保护草籽，在出苗前防止坡面冲刷，草籽出苗及根系长成后与无纺布交互缠绕使坡土连成一个整体，形成网络状结构。三维土工网垫及土工格室植草技术，是由多层塑料凹凸网和高强度平面网或土工格室组成的立体网室结构，植被根系与土工网垫或格室连接成一体形成有力的