

# 三维植被网加筋草皮坡面土壤侵蚀试验研究

钟春欣<sup>1</sup>, 张 玮<sup>1</sup>, 王树仁<sup>2</sup>

(1. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 2. 连云港市灌南县港口建设管理局, 江苏 灌南 222500)

**摘要:**为研究植草型生态护坡的抗坡面侵蚀性能, 对比设置三维植被网加筋材料前后草皮护坡的植被防护效果, 探讨加筋材料提高草皮抗侵蚀性能的作用机理, 在实验室内进行了草皮护坡坡面冲刷模型试验. 试验结果表明: 当坡面流流速大于  $2\text{ m/s}$  时, 天然草皮的侵蚀模数较之裸露边坡平均减小了 90% 以上, 草皮防护作用随流速的增大而减弱, 设置三维土工网垫后, 加筋草皮的侵蚀模数较之纯草皮减小了 50% 以上, 防护优势随着流速的增大愈加显著; 天然草皮能有效地控制坡面侵蚀, 设置三维植被网加筋材料可以大大提高草皮的防护效果, 其作用机理表现在边坡土体加筋作用、覆盖防护作用、增强草皮侧向连续性 3 个方面.

**关键词:** 坡面侵蚀; 加筋草皮; 三维植被网; 抗侵蚀性能; 侵蚀模数

**中图分类号:** X173 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2007)03-0258-04

在道路、水电、护岸工程建设中, 为防止坡面侵蚀和恢复原有的生态环境, 常利用植被对已开挖的边坡进行生态坡面防护<sup>[1-2]</sup>. 三维植被网加筋草皮护坡采用种植草皮并在基土中埋设三维土工网垫的方法对裸露边坡进行防护, 能有效控制坡面侵蚀. 对三维土工网垫自身结构性能的研究显示<sup>[3-5]</sup>, 三维土工网垫具有一定的抗拉强度, 且其相对于二维土工网垫具有更为优越的抗冲刷性能. 三维植被网护坡技术在新台高速公路边坡防护、三峡工程部分风化砂土边坡防护等实际工程中的应用表明, 三维植被网加筋草皮护坡具有良好的工程效果和社会经济效益<sup>[6-7]</sup>.

草皮护坡的抗侵蚀性是指草皮抵抗降雨形成的坡面径流冲刷的能力, 草皮护坡的侵蚀模数指在一定流速的水流条件下单位时间单位面积的泥沙冲蚀量<sup>[8]</sup>. 本文拟在现有研究的基础上<sup>[9]</sup>, 通过室内边坡冲刷试验对三维植被网提高天然草皮抗侵蚀性能的机理进行分析, 对设置加筋材料前后草皮的抗侵蚀性能进行量化对比, 研究坡面水流条件对三维植被网加筋草皮抗侵蚀性能的影响, 以期促进三维植被网植草护坡技术的推广与应用.

## 1 试验材料与试验设计

### 1.1 试验材料

试验植被选用耐淹性强且易于繁殖的狗芽根和高羊茅, 按照狗芽根 75%、高羊茅 25% 的比例进行混播, 生长期 2.5 个月, 根系平均长度 120 mm, 植被平均高度 150 mm(经过修剪处理), 在种植箱内进行室外养护, 养护至满足试验要求. 试验用土壤为低渗透性的山区红壤(黏土类轻黏土), 采用分层填充夯实的方法使土壤上下均匀, 密度控制在  $1.5\text{ g/cm}^3$  左右. 考虑降雨入渗对边坡土体强度及植被生存的影响, 试验开始前将种植箱连同植被用静水淹没浸泡 48 h, 使箱内土体充分浸润, 冲刷时间内不计入降雨入渗时间. 试验用加筋材料为 EM3 型绿色三维土工网垫, 其物理性能为: 单位面积质量  $260\text{ g/m}^2$ , 纵向平均拉伸强度  $1.4\text{ kN/m}$ , 横向平均拉伸强度  $1.4\text{ kN/m}$ , 平均厚度 12 mm. 天然草皮(三维植被网加筋草皮)试件的制备工序为: 种植箱内充填土壤(→铺网→覆土)→播种→前期养护. 成草后的三维植被网加筋草皮结构断面如图 1 所示.

### 1.2 试验设计

试验设备由浅水泵、进水管线、压力表、阀门、喷嘴, PVC 板种植箱等构成, 其中种植箱尺寸为  $700\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ , 试验管线布置见图 2. 试验中喷嘴出流为宽度 400 mm、厚度 10 mm 的片状水流, 用于模拟恒

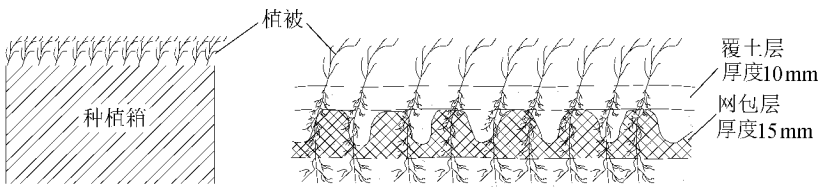


图 1 加筋草皮结构断面

Fig.1 Profile of turf slope reinforced with 3D vegetation net

定的坡面薄层水流条件.针对裸露基土、天然草皮及三维植被网加筋草皮 3 种护坡形式,分别在 $2\text{ m/s}$ 、 $3\text{ m/s}$ 、 $4\text{ m/s}$ 流速下进行室内坡面冲刷试验.鉴于本次试验旨在探讨加筋材料提高草皮抗侵蚀性能的作用机理,并对有无设置加筋材料的草皮护坡防护效果进行对比研究,故不考虑坡度及坡长对草皮抗侵蚀性能的影响,将坡度设置为水平,坡长依据种植箱尺寸设为 $700\text{ mm}$ .调整好喷嘴位置,启动浅水泵,调节阀门至试验流速,进行坡面冲刷试验.

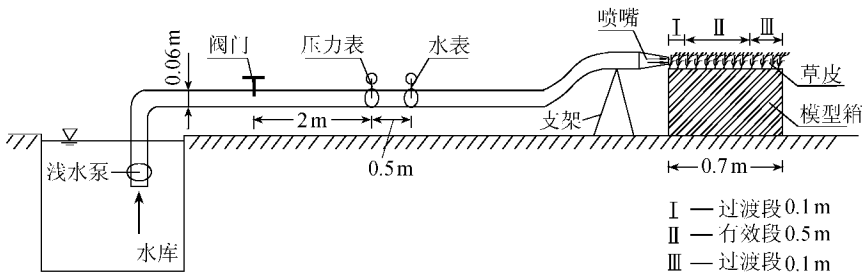


图 2 试验管线布置

Fig.2 Layout of experimental pipe line

1.3 试验数据收集及整理

试验中记录压力表稳定时的读数、冲刷开始及结束时的水表读数、冲刷前后插入土体中的钢尺刻度,观察草皮的冲蚀过程,测定达到完全破坏时的冲刷时间.根据开始及结束时的水表读数和历时,求出相应的试验流量,计算出平均坡面流速;由钢尺读数计算出平均土壤冲蚀深度.根据土壤冲蚀深度及冲刷历时,计算出一定水流条件下单位时间单位面积的泥沙冲刷量,即侵蚀模数.

2 试验结果与分析

2.1 三维植被网提高天然草皮抗侵蚀性能的作用机理

植被护坡主要依靠植物的地下根系及地上茎叶的作用,可概括为植被的水文效应和根系的力学效应两方面<sup>[10-11]</sup>.在坡面径流作用下,草皮可以为坡面提供良好的覆盖层.草的茎叶能够降雨截留,削弱溅蚀,增大糙率并减缓坡面流速.草的表面根系形成了一层土-根的复合护面层,增强了裸露基土的抗冲蚀能力.同时草的深根锚固了基土<sup>[12]</sup>.设置三维土工网垫不仅能对边坡土体起加筋作用,而且有利于植被根系在网垫内的缠绕生长,从而增强对基土的锚固作用.

试验现象表明,采用天然草皮护坡存在如下缺陷:(a)表土易被冲刷,且水流对深层基土的冲刷作用不可抵挡;(b)草间的侧向连续性不足,容易发生单独的草冲蚀或大面积土壤-根系位移而产生的局部破坏.利用三维植被网加筋可以起到以下作用:(a)对边坡土体网络加筋作用,提高土体的强度,增强坡体的稳定性;(b)自身对基土的覆盖防护作用,可以限制网下基土中大于网眼尺寸的土块起动;(c)草根在网内缠绕,对根系起联结作用,增强草间的侧向连续性,提高草皮的整体性.坡面径流冲刷下的草皮抗冲性能可以用流速和水流历时来描述,即在一定的坡面水流条件下,草皮护坡达到完全破坏所需要的时间<sup>[13]</sup>.

根据试验中测定的草皮在各级抗冲流速下的抗冲历时,点绘出抗冲流速与抗冲历时( $t$ )的关系曲线,如图 3(横坐标采用对数坐

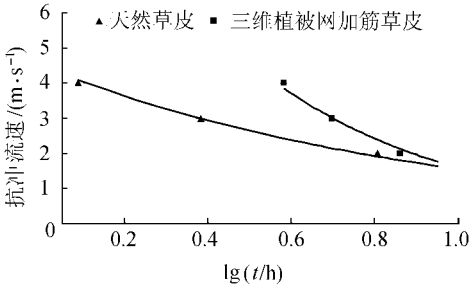


图 3 草皮的抗冲性能

Fig.3 Erosion-resisting characteristics of turf

标)所示.由图3可知,抗冲流速越大,抗冲历时越短.在相同的流速条件下,三维植被网加筋草皮护坡较天然草皮护坡能够抵挡更长时间的水流冲刷,特别是在大流速情况下,三维植被网加筋草皮的防护优势更为显著.

2.2 3种护坡形式的抗侵蚀性能对比

试验得到了裸露边坡、天然草皮护坡、三维植被网加筋草皮护坡分别在2 m/s、3 m/s、4 m/s流速下的侵蚀模数,见表1.图4显示了天然草皮护坡和三维植被网加筋草皮护坡的侵蚀模数随流速变化的趋势:在相同植被及坡面条件下,侵蚀模数随着坡面流速的增大而增加,与坡面流速成正比.

表1 3种护坡形式的侵蚀模数对比

| Table 1 Comparison of erosion modulus of three slope protection modes |                                           |                                                             |                |                |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------|----------------|
| 护坡形式                                                                  | 试验流速/<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 侵蚀模数/<br>( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 占裸露边坡<br>百分比/% | 占天然草皮<br>百分比/% |
| 裸土                                                                    | 2                                         | 103.22                                                      | —              | —              |
|                                                                       | 3                                         | 114.29                                                      | —              | —              |
|                                                                       | 4                                         | 119.74                                                      | —              | —              |
| 天然草皮                                                                  | 2                                         | 0.60                                                        | 0.58           | —              |
|                                                                       | 3                                         | 5.27                                                        | 4.61           | —              |
|                                                                       | 4                                         | 19.78                                                       | 16.52          | —              |
| 三维植被网<br>加筋草皮                                                         | 2                                         | 0.72                                                        | 0.69           | —              |
|                                                                       | 3                                         | 2.25                                                        | 1.97           | 42.69          |
|                                                                       | 4                                         | 3.71                                                        | 3.10           | 18.76          |

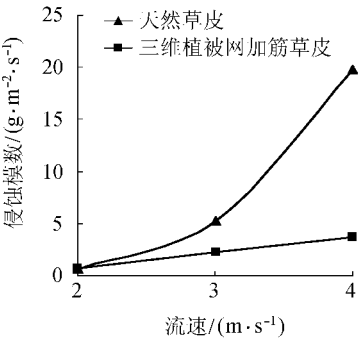


图4 侵蚀模数随流速变化趋势  
Fig.4 Relationship between erosion modulus and flow velocity

从表1可知:与裸露边坡相比,在流速为2 m/s的水流条件下,天然草皮与加筋草皮的侵蚀模数分别占裸露边坡的0.58%和0.69%,即其侵蚀模数比裸露边坡的侵蚀模数分别减小了99.42%和99.31%,可见草皮对基土的防护效果十分显著.当流速达到4 m/s时,天然草皮与加筋草皮的侵蚀模数比裸露边坡的侵蚀模数分别减小了83.48%和96.90%,可见随着流速的增大,植被对基土的防护作用也随之减弱.这是由于当水流条件达到一定强度后,植被茎叶对坡面泥沙的掩护作用减弱,坡面近底流速增大,坡面附近的泥沙颗粒因失去庇护受到更大的水流拖曳力,导致更多的泥沙起动,侵蚀模数相应增大.

与天然草皮护坡相比,在流速为3 m/s的水流条件下,三维植被网加筋草皮护坡的侵蚀模数为天然草皮护坡的42.69%,单位面积的泥沙冲蚀量减少了57.31%.流速达到4 m/s时单位面积加筋草皮护坡的泥沙冲蚀量较天然草皮护坡减少了81.24%.由此可见,由于三维植被网的立体网络构造限制了网下大尺寸土块的起动,使得设置加筋材料后的草皮护坡抗侵蚀性能得到显著增强.

试验结果表明:当流速小于2 m/s时,草皮根系对土壤颗粒的锚固作用及茎叶的覆盖作用,使得水流仅能使覆土层中的少量细颗粒泥沙起动,此时三维植被网加筋草皮与天然草皮对基土的防护作用相近;当流速大于2 m/s时,大量的大颗粒泥沙开始被起动冲刷,而三维植被网通过限制尺寸大于网眼尺寸的土块起动,大大减少了泥沙的冲蚀量,从而对基土发挥了有效的防护作用.由此可见,坡面流速越大,设置三维植被网加筋材料的草皮抗侵蚀优势越显著.

3 结论及建议

在边坡防护工程中,植被护坡不仅能涵水固土、稳定边坡,同时可以美化生态环境,是一种重要的边坡防护技术<sup>[14]</sup>.植被能有效提高基土的抗冲蚀能力,但植被的防护作用随着坡面流速的增大而减弱.植被种类、土壤性质、加筋材料、边坡特征(坡度和坡长)等对草皮护坡的抗侵蚀性能均存在不同程度的影响.设置三维植被网加筋材料可以大大提高天然草皮的抗坡面侵蚀性能,其作用机理表现为:对边坡土体的加筋作用、限制网下大于网眼尺寸土块起动的覆盖防护作用以及提高草间的侧向连续性3个方面.在相同植被及坡面条件下,侵蚀模数随着坡面流速的增大而增加,与坡面流速成正比.在低流速水流条件下,植被根系对土壤颗粒的锚固作用以及植被茎叶的覆盖作用能够有效地抵御水流冲蚀,此时设置加筋材料对于提高草皮的抗冲蚀性能并无明显作用;在大流速水流条件下,设置三维植被网加筋材料能显著提高天然草皮的抗冲蚀性能,即流速越大,三维植被网加筋草皮的防护优势越显著.

三维植被网植草护坡技术因其显著的工程效益和经济效益,正被越来越多地应用于各类边坡防护工程中,具有广阔的发展前景。针对不同的植被类型和土壤类型,考察坡度、坡长对三维植被网草皮护坡抗侵蚀性能的影响,增强三维植被网植草护坡技术的适用性是有待进一步研究的内容。

参考文献：

[ 1 ] JOHN K ,MICHAREL C ,DAVID D .A review of soil erosion potential associated with biomass crops[ J ]. Biomass and Bioenergy ,1998 ,14 ( 4 ) 351-359 .  
[ 2 ] 何蓿 陈德春 .生态护坡及其在城市河道整治中的应用[ J ].水资源保护 2005 21( 6 ) 56-58 .  
[ 3 ] 肖衡林 王钊 .三维土工网垫设计指标的研究[ J ].岩土力学 2004 25( 11 ) :1800-1804 .  
[ 4 ] 陈人豪 李济群 .固土网垫应用研究——铁路边坡铺网垫植草被防护试验[ J ].天津纺织工学院学报 ,1999 ,18( 2 ) 21-24 .  
[ 5 ] 李济群 杨春立 .固土网垫防水冲刷性能研究[ J ].天津纺织工学院学报 2000 ,19( 4 ) 34-36 .  
[ 6 ] 邱国锋 王孟霞 .三维植被网护坡在高速公路边坡中的试验[ J ].重庆交通学院学报 2002 21( 1 ) :74-76 .  
[ 7 ] 王连新 .土工网复合植被护坡法在三峡工程中的应用[ J ].人民珠江 ,1999( 4 ) 38-39 .  
[ 8 ] 张俊云 周德培 .厚层基材喷射植被护坡的抗侵蚀实验研究[ J ].西南交通大学学报 2002 37( 6 ) 628-631 .  
[ 9 ] 孙卫岳 郑海龙 .生态护坡技术的试验研究[ J ].河海大学学报 :自然科学版 2003 31( 增刊 1 ) :10-14 .  
[ 10 ] 周德培 张俊云 .植被护坡工程技术[ M ].北京 :人民交通出版社 2003 62-65 .  
[ 11 ] 刘兰田 .土石坝护坡草皮的栽植与管护[ J ].水利水电科技进展 ,1998 ,18( 4 ) 50-52 .  
[ 12 ] DALTON P A SMITH R J ,TRUONG P N V .Vetiver grass hedges for erosion control on a cropped flood plain : hedge hydraulics[ J ]. Agriculture Water Management ,1996 31 91-104 .  
[ 13 ] HEMPHILL R W ,BRAMLEY M E .河渠护岸工程[ M ]. 蔡雯 ,译 .北京 :中国水利水电出版社 2000 64-88 .  
[ 14 ] 李明珊 .洞庭湖区防洪大堤护坡方式的改进[ J ].水利水电科技进展 2000 20( 6 ) 57-58 .

Experimental research on soil erosion of turf slope reinforced  
by 3D vegetation net

ZHONG Chun-xin<sup>1</sup> , ZHANG Wei<sup>1</sup> , WANG Shu-ren<sup>2</sup>

( 1 . State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Nanjing 210098 , China ;  
2 . Harbor Construction Administrative Bureau of Guannan County of Lianyungang City , Guannan 222500 , China )

**Abstract :** Laboratory model experiments on slope scouring were performed to investigate the erosion-resisting characteristics of ecological slope protection. The effects of turf slope protection before and after reinforcement by 3D vegetation net were compared , and the mechanism of erosion-control by reinforced material was studied. The experimental results show that , when the flow velocity along the slope is over 2m/s , the natural turf protection reduces the erosion modulus of slope by over 90% , and the effect of slope protection weakens with the increase of flow velocity , meanwhile the setting of 3D vegetation net further reduces the erosion modulus by over 50% . Therefore , the natural turf has great effects on slope erosion-control and 3D vegetation net can greatly improve the effect of slope protection. The mechanism of slope protection by 3D vegetation net was described as the following aspects : reinforcement of slope soil , coverage and protection of slope soil , enhancement of side-continuity of turf.

**Key words** slope erosion ; reinforced turf ; 3D vegetation net ; erosion-resisting characteristic ; erosion modulus