

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.06.010

张壮, 潘毅, 陈永平, 等. 高速明渠流条件下高性能加筋草皮抗侵蚀特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(6): 77-83.
(ZHANG Zhuang, PAN Yi, CHEN Yongping, et al. Experimental studies of anti-erosion ability of high-performance reinforced turf on high-speed open channel[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(6): 77-83. (in Chinese))

高速明渠流条件下高性能加筋草皮抗侵蚀特性研究

张 壮^{1,2}, 潘 毅^{1,2}, 陈永平^{1,2}, 胡玉植³, 张同鑫^{1,2}, 李 琳⁴

(1. 河海大学 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. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014; 4. 杰克逊州立大学 土木与环境系, 杰克逊 密西西比 39217)

摘要: 现有针对高性能加筋草皮的抗侵蚀性能研究, 大多建立在大规模试验基础上, 重点研究允许冲刷流速和表面切应力。为了研究高速明渠水流条件下高性能加筋草皮侵蚀过程, 对天然草皮和3种高性能加筋草皮共48个样品进行培植, 并布置在高速明渠流的倾斜水槽中, 通过不同坡度和流量分别进行间断和不间断冲刷试验, 分析流速、流量和侵蚀量的关系。结果表明, 间断和不间断冲刷的侵蚀速率有明显差异, 说明初始冲刷引起了高性能加筋草皮的大部分侵蚀。样本侵蚀过程显示侵蚀速率随侵蚀量的增加而降低, 证明明渠高速水流作用下加筋草皮存在“侵蚀上限”特征。此外, 还讨论了流量和生态加筋网结构对侵蚀过程的影响, 并尝试拟合了平均侵蚀速率与水流表面流速的关系。

关 键 词: 护坡; 高性能加筋草皮; 抗冲刷能力; 初始冲刷; 侵蚀上限

中图分类号: TV131.6; TV133 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2018)06-0077-07

随着社会进步, 人们对于工程的生态性越来越重视, 我国也在大力推进生态文明建设和“海绵城市”等生态建设的国家战略^[1]。在此背景下, 生态护坡由于良好的外观、生态性能以及抗侵蚀能力而受到青睐, 已广泛应用于边坡、航道、溢洪道、海堤和大坝工程。但在大流量高速水流冲刷下, 天然植被护垫很容易破坏, 进而导致灾难性后果, 例如美国卡特里娜飓风造成的大规模海堤破坏^[2]。因此, 人们使用各种柔性侵蚀控制产品(rolled erosion control products, RECP)进行植被保护^[3], 生态加筋网(turf reinforcement mat, TRM)是一种已经广为使用的柔性侵蚀控制产品。在种植植被之前, 将生态加筋网埋置在土中, 植被生长过程中其根茎穿过生态加筋网, 使土壤、植被、生态加筋网三者紧密结合在一起, 形成一个生态防护系统^[4], 即加筋草皮。有研究表明, 在保持植被护坡的生态和景观功能前提下, 跟天然草皮相比, 加筋草皮的抗侵蚀能力可提高1倍以上^[5]。因此, 加筋生态护坡有着广泛的应用前景。

近年来, 随着制造工艺的发展和各种高性能材料的应用, 人们设计出了高性能生态加筋网(high performance turf reinforcement mat, HPTRM)用于培植高性能加筋草皮。常见的高性能生态加筋网是一种由高强度三维结构尼龙丝制成的土工织物, 有95%以上的空隙率。植物根部在高性能生态加筋网的空隙中生长, 并在三维结构中相互盘绕, 形成抗侵蚀能力更强的高性能加筋草皮。

针对加筋草皮抗侵蚀能力的研究最早出现在20世纪80年代, Hewlett等^[6]进行了大比尺模型下的恒定流冲刷试验, 发现三维加筋草皮系统的抗侵蚀能力要优于二维加筋草皮系统。Nelson^[5]在大型水槽中进行了不同坡度下的恒定流冲刷试验, 得出不同条件下的允许最大冲刷流速和表面切应力。2005年“卡特里娜”

收稿日期: 2018-04-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401505); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20130833)

作者简介: 张 壮(1995—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事海岸防灾研究。E-mail: 1191671402@qq.com

通信作者: 潘 毅(E-mail: panyi@hhu.edu.cn)

飓风之后,加筋生态护坡受到了广泛关注,对其抗侵蚀能力的研究也不断深入。Meer 等^[7-8]使用越浪模拟器进行了现场冲刷试验,得出草皮破坏与单位堤顶长度累计越浪量有关的结论。Thornton 等^[9-10]在实验室中使用越浪模拟器进行了模拟海堤背水坡的冲刷试验,发现加筋草皮的抗侵蚀能力是天然草皮的 2~4 倍。Pan 等在 1:1 的大型水槽中进行了一系列越浪冲刷试验,研究了海堤内坡高性能加筋草皮护坡侵蚀特征,发现侵蚀速率随侵蚀量增加而不断减少直至停止侵蚀,并将此特征概括为“侵蚀上限”^[11-13]。

现有针对高性能加筋草皮抗侵蚀能力的研究,大部分通过现场试验或大比例尺模型试验进行,这是因为现场和大比尺模型试验能够准确地重现侵蚀过程,研究结果更为可信。但是,在大比例尺模型试验过程中很难准确记录流速和侵蚀量,因此无法对侵蚀过程和速率-侵蚀关系进行量化分析。为了研究流速与侵蚀速率的关系,Pan 等利用侵蚀功能测试装置(erosion function apparatus,EFA)对高性能加筋草皮样品进行了测试^[13-14],结果显示侵蚀速率与流速之间近似呈线性关系。但是,侵蚀功能测试装置中水流为压力流,而海堤背水坡的越浪和溢流是明渠重力流,因此测试结果不能准确反映海堤背水坡上高性能加筋草皮系统的实际侵蚀过程。

为了进一步研究高速明渠水流条件下高性能加筋草皮系统的侵蚀过程,设计了模拟斜坡溢流冲刷的倾斜水槽试验,选取不同型号的高性能生态加筋网样品培植高性能加筋草皮,通过对比试验,测量不同坡度、流速和冲刷时间下不同样品的冲刷数据,分析得出高性能加筋草皮的侵蚀特性。

1 样品培植

加筋生态护坡抗侵蚀性能试验测试样品种植在配合明渠高速水流加筋草皮测试仪^[15]设计的植草模型箱中。模型箱尺寸为 59 cm×19 cm×20 cm(长×宽×高),并在底部留有透水孔。选择生态护坡常用的狗牙根(又称百慕大草)作为试验草种。这种草因其强固土作用而常被用作公路、铁路、水库等护坡绿化材料。试验所用种植土为生态护坡工程中常用的黏性土。采用 3 种型号的高性能生态加筋网进行高性能加筋草皮的培植。3 种型号生态加筋网结构型式见图 1,主要特征均为整个生态加筋网由 1 根聚酰胺纤维按照一定规律缠绕而成,并在生态加筋网上表面的横向、纵向和斜向有相互交错的较长单方向纤维,用来增加生态加筋网的整体性及与植被的结合力。编号 7010、7020 和 7220 的生态加筋网的厚度、底面特征和填充物等有所不同。7010 厚度约为 10 mm,顶面为纤维乱绕并包含较长的单方向纤维交错,底面为较规则的倒金字塔状,如图 1(a);7020 厚度约为 20 mm,顶面为聚酰胺单丝纤维乱绕并包含较长的单方向纤维交错,底面为较规则的倒金字塔状,如图 1(b);7220 厚度约为 18 mm,顶面为聚酰胺单丝纤维乱绕并包含较长的单方向纤维交错,下部为倒金字塔状,底面为了适应某些工况而做成平面,如图 1(c)。

3 种生态加筋网的加筋草皮样品采用同样的种植步骤,包含了土工保护毯压顶、固定、施肥和播种过程。4 个月后草的平均高度达到 30 cm(见图 2)。

2 高速明渠流冲刷试验

2.1 试验装置与观测手段

试验采用河海大学明渠高速水流加筋草皮测试仪^[15]。

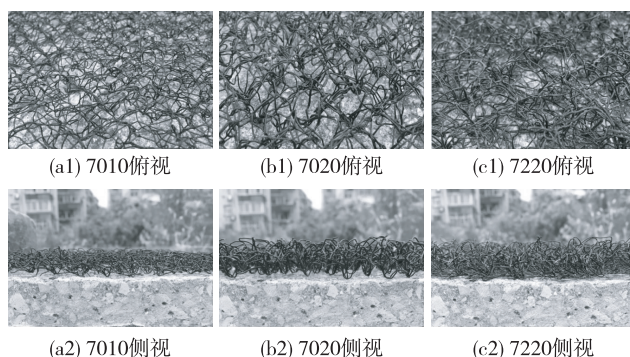


图 1 3 种不同生态加筋网测试样品

Fig. 1 Testing specimens of HPTRM



图 2 加筋草皮样品

Fig. 2 Growth process of specimens

试验装置由地下水库、水泵、输水管道、超声波流量计、有机玻璃水槽(宽度为0.2 m)、PVC板模型箱和移动式草箱支架等组成。水流由输水管道进入有机玻璃水槽水平段,经过斜坡加速进入试验测试段。设计坡度分别为1:3,1:2,1:1,代表了海堤背水坡,河堤向水坡和山路边坡的典型情况。在斜坡段的底部预留安装测试样品的样品槽。试验装置见图3。

由明渠水力学可知,如果斜坡段的长度足够长或坡度很小,在斜坡下端某位置处及以下水流流态将从非均匀流过渡为均匀流,可以近似将斜坡段最终的水流流态看作是明渠均匀流。试验过程中主要记录测试段水流表面流速、流量及草皮样品侵蚀量。流量通过超声波流量计测得,表面流速通过高速摄像机BIV技术拍摄处理获取。草皮抗水流冲刷强度以侵蚀量为表征。因为单点的土壤侵蚀量本身具有一定随机性,而土面本身的不平整也使得这种随机性更加明显。为了减小这种随机性和测量位置选取对试验结果的影响,测量试验土面高程时,每次都测量植草模型箱中部12个点,然后取这12个点的平均值作为该次测量的土面高程,冲刷前后的土面高程之差即为侵蚀量。

2.2 试验组次

为了进行不同坡度和流量下的抗水力侵蚀能力测试,对7220,7020,7010共3种样品分别培植12份加筋生态护坡样品,同时培植12份天然草皮样品作为对照组。同一种加筋方式的不同样品采取同等条件培植,培植过程中尽量保证草株密度、草高度等因素的一致性。

本次试验对4种样品进行了3个不同坡度、3个不同流量以及不同时长的水力冲刷测试,具体方案见表1。

表1 试验组次设置

Tab. 1 Test cases for each type of HPTRM

测试仪坡度	不同单宽流量下的间断冲刷			不间断冲刷($1\,386\,\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
	$1\,098\,\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	$1\,260\,\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	$1\,386\,\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	
1:3	组次1	组次2	组次3	组次4
1:2	组次5	组次6	组次7	组次8
1:1	组次9	组次10	组次11	组次12

间断冲刷试验的冲刷时间为3 h,共进行5次土面高程测量,测量时间点分别为冲刷前及冲刷后30,60,120和180 min。不间断冲刷试验的冲刷时间为5 h,冲刷使用的单宽流量为 $1\,386\,\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$,在冲刷之前和之后进行土面高程测量。

2.3 试验结果及侵蚀特征分析

2.3.1 试验结果和初步分析 坡度为1:3,1:2,1:1时的土壤侵蚀发展过程见图4。流量1,2,3对应的单宽流量分别为1 098, 1 260和 $1\,386\,\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ 。长时间组对应不间断冲刷5 h后测得的侵蚀量。

图4中正值表示土面下降(即土壤受到侵蚀),负值表示土面上升。对于统计结果中出现的个别点侵蚀量负增长情况,经分析可能有2个原因:一是土壤在泡水后会有略微膨胀;二是测量误差。仅在个别点出现了曲线下降,且下降的量非常小(0.1~1.3 mm),因此并不影响对试验数据的整体分析。在1:1坡度试验中由于操作不当,个别7020样品出现了破坏,因此图4(h)中侵蚀数据有所缺失。

图4中并未给出天然草皮样品(对照组)的侵蚀量发展过程,这是因为试验中对照组的样品全部破坏。破坏大致可分为两种形式:整体破坏和功能性破坏。整体破坏为样品整体从植草模型箱中冲出,功能性破坏为草皮样品出现明显冲坑(超过3 cm)。所有对照组样品均在第1个30 min的冲刷过程中发生整体性破坏或功能性破坏。由于本文主要关注内容为加筋草皮的抗侵蚀特性,因此对于天然草皮的破坏不予讨论。



(a) 1:3坡降测试仪 (b) 1:2坡降测试仪 (c) 1:1坡降测试仪

图3 不同坡度条件下的明渠高速水流测试仪结构示意图

Fig. 3 Three testing flumes with different slopes for high velocity flow

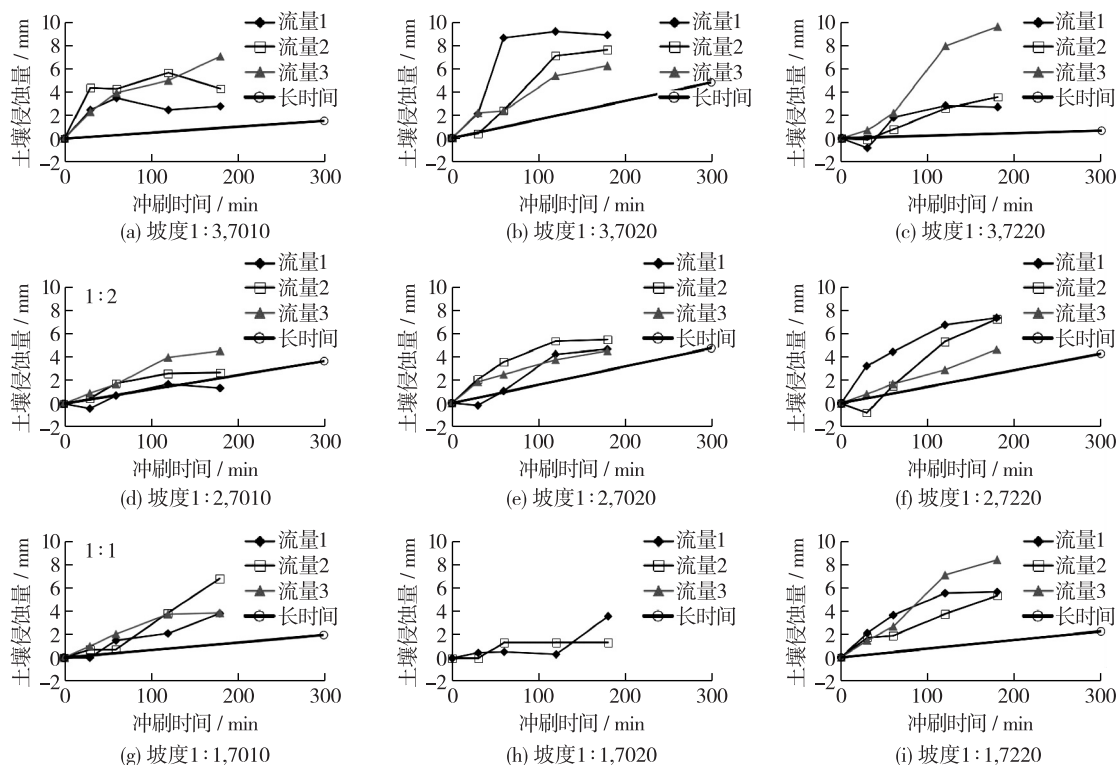


图 4 不同坡度不同样品的土壤侵蚀量发展曲线

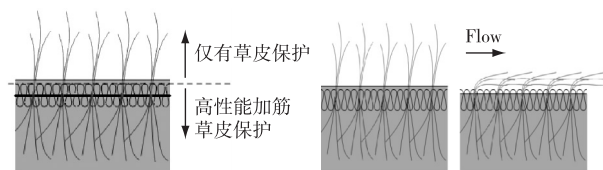
Fig. 4 Measured erosion depths of vegetated HPTRM specimens during model tests

通过比较图中不同流量、时长和不同样品的侵蚀量变化过程,可以得到以下几个共性结论:

(1) 样品长时间不间断冲刷的侵蚀速率明显低于间断冲刷的侵蚀速率。这说明初始冲刷,即从无水流到有水流的冲刷,带来的侵蚀量远大于持续冲刷的侵蚀量。出现这种情况的原因可能是:一方面根据圣维南方程^[16]公式可知,水流运动时床底切应力与水深沿程变化有关。无水流到有水流的过程可以看作是水深的剧烈变化,产生了较大的瞬时床底切应力,造成床面冲刷。另一方面 Panayiotis Diplas^[17]指出瞬时紊动应力量级决定土壤泥沙颗粒的启动,泥沙一旦启动便在水流作用下运输,产生侵蚀。这一结论对于海堤背水坡护坡有着重要参考意义。因为海堤背水坡遭受越浪水流的冲刷概率要远大于溢流冲刷,而每个越浪水体都会对背水坡产生一次初始冲刷。根据这一结论,可以预计在持续越浪情况下海堤背水坡遭受的侵蚀量和破坏将有可能比长时间溢流冲刷要大。这一推测与 Van der Meer^[18]提出的判断海堤背水坡遭受越浪破坏程度的模型预测结果相一致。

(2) 从各曲线的侵蚀发展历程来看,侵蚀量的发展存在“先快后慢”现象,在 1 h 或 2 h 后发展很慢或不再发展。这与 Pan 等提出的“侵蚀上限”概念一致^[13]。如图 5 所示, Pan 等^[13]认为表面覆土被侵蚀掉之后,随着生态加筋网的暴露,土壤抗冲刷能力提升,当水力冲刷力和抗冲刷力达到平衡时,逐渐达到“侵蚀上限”。

(3) 加筋草皮是一个综合系统,单个样品的侵蚀特征会受到生态加筋网、土体密实度、土体性质、植株密度、植株生长程度等因素的局部差异影响。虽然在培植样品的过程中对这些因素尽量进行控制,但冲刷测试结果仍然表现出明显的差异性,图 4 的侵蚀发展曲线表现出整体的规律性和个体的离散性。这是由加筋草皮本

图 5 侵蚀上限原理^[13]Fig. 5 Principle of erosion upper limit^[13]

身的性质(众多影响因素)和有限个试验样品(缺少足够的重复试验,以计算均值和降低因个体差异性造成的误差)决定的。因此,在有限个试验样品的基础上,采用控制变量法对侵蚀发展曲线进行进一步平均,即选定某一研究参数区分试验组次(忽略其他参数),对该参数相等的所有组次的侵蚀发展曲线进行平均,以探讨该参数对于加筋草皮侵蚀特性的影响。

2.3.2 综合统计分析 为了研究流量、冲刷时长和侵蚀量发展之间的关系,对同一流量(时长)下,不同样品、不同坡度下的侵蚀发展曲线进行平均,将得到的侵蚀量发展曲线绘制于图6。可见长时间不间断组的最终平均侵蚀量为2.48 mm,仅略大于其他组第1次测量时的侵蚀量,这也和之前的结论相一致,即无水流到有水流过程带来的侵蚀量远大于持续冲刷的侵蚀量。由图6还可见前2次测量的侵蚀量差别并不明显,随着冲刷时间的增加,大流量对应着大的“侵蚀上限”。以最后2次测量差值看,在流量1($1\ 098\ \text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$)下,最后2次侵蚀量几乎无差别,可以认为已达到“侵蚀上限”;在流量2($1\ 260\ \text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$)下,最后2次侵蚀量的差别略大于流量1的,但增长已非常缓慢,也可以认为达到“侵蚀上限”;在流量3($1\ 386\ \text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$)下,最后2次测量侵蚀量的增长虽已放缓,但并未完全停止,可以认为“侵蚀上限”尚未完全达到。

为了研究不同型号的生态加筋网之间保护性能的差异,对同一种生态加筋网在不同流量、不同坡度下的侵蚀发展曲线进行平均(见图7)。可见,前2次侵蚀量比较接近,而随着冲刷时间的增加,各样品的侵蚀量为 $7010 > 7020 > 7220$,这同样可以用“侵蚀上限”的原理来解释:在冲刷初期(初始60 min),不同型号的生态加筋网加筋草皮侵蚀发展曲线并无明显差异,这是因为开始被冲掉的土位于生态加筋网顶层,此时生态加筋网尚未发挥作用,但随着侵蚀继续向下发展,生态加筋网显露表面并开始发挥保护作用,侵蚀发展曲线出现差异。7220有相对较大的绕丝密度,且复合二维平面单丝纤维层的设置使得与地表土壤贴合较为紧密,因此保护效果强于7020和7010;7020和7010的绕丝密度差异并不大,而7010的厚度和绕丝的直径均小于7020,因此其保护效果略弱于7020。

由前文数据分析得知侵蚀速率与冲刷时间长短有关,所有间断测试样品在初始1 h冲刷及全部3 h冲刷后的平均侵蚀速率与水流表面流速的关系见图8,并给出最佳拟合线见式(1)。试验中由于测量误差等因素影响,个别侵蚀速率数据偏差较大,线性拟合中不予考虑。

$$\text{初始 } 1\text{ h}: E = 1.77v - 7.20 \quad (1)$$

$$\text{全部 } 3\text{ h}: E = 1.60v - 6.74 \quad (2)$$

式中: E 为侵蚀速率($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); v 为表面流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。本阶段研究未对式中的线性关系进行推广,故该式最好在与试验水流条件相近的条件下使用,适用流速范围为 $4.9 \sim 5.7\ \text{m/s}$ 。可见,在流速测试范围内,随着

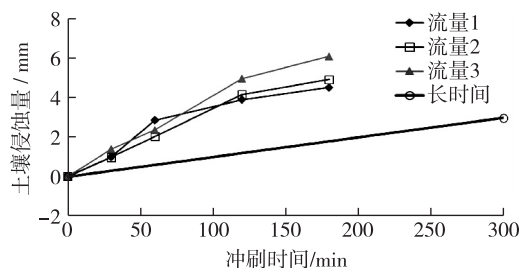


图6 流量与侵蚀量关系

Fig. 6 Relationship curves of discharge and average erosion amount

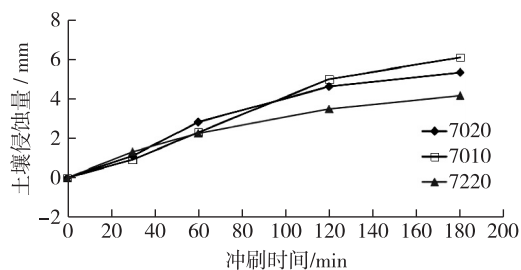


图7 不同型号生态加筋网之间比较

Fig. 7 Comparison of erosion volume development curves with different types of ecological reinforcement networks

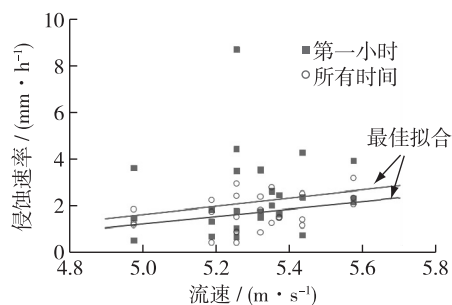


图8 流速与侵蚀速率关系

Fig. 8 Relationships between erosion rate and flow velocity

流速增加,侵蚀速率增大;同时,初始 1 h 时的平均侵蚀速率比全部 3 h 的平均侵蚀速率大约 0.5 mm/h,这证实了侵蚀速率随着侵蚀量增长而不断下降。这可以用 Pan 等的“侵蚀上限”机制来解释。

根据试验结果和理论分析发现,床面切应力是导致坡面表层土壤侵蚀与冲刷的直接因素,并可以更好地从机理上解释加筋草皮的抗侵蚀性能。限于试验条件与时间,未对床面切应力数据进行测量。

3 结 语

利用针对生态护坡设计的明渠高速水流加筋草皮测试仪,对不同流量和坡度条件下的高性能加筋草皮样品进行了培植和抗侵蚀能力测试,得出主要结论如下:

(1)水流的初始冲刷侵蚀相对于长时间不间断冲刷侵蚀影响更大。初始冲刷,即无水流到有水流的过程导致了大部分的侵蚀,而长时间不间断冲刷造成的侵蚀影响很小。因为无水流到有水流的过程可以看作是水深的剧烈变化,因此瞬时的床底切应力很大,导致床面冲刷。

(2)从侵蚀曲线看,侵蚀量的发展存在“先快后慢”现象,在 1 h 或 2 h 后发展很慢或不再发展。这与“侵蚀上限”的概念相一致,即随着侵蚀的增加,土工保护网垫的纤维开始暴露,提升了土壤的抗冲刷能力,当水力冲刷力和抗冲刷力达到平衡时,侵蚀基本停止,达到“侵蚀上限”。流量与流速增大时,“侵蚀上限”会相应增大。

(3)流量和高性能加筋草皮的结构等因素也在一定程度上影响侵蚀速率。然而,这些因素往往在测试 1 h 之后才开始有显著影响,这可以解释为土壤的顶层主要受植被而不是高性能加筋结构的保护。随着侵蚀深度的增加,加筋结构才开始起到保护作用,这时流量和不同加筋结构的影响才开始显现。

参 考 文 献:

- [1] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等.“海绵城市”理论与实践[J].城市规划,2015,39(6):26-36.(YU Kongjian, LI Dihua, YUAN Hong, et al. “Sponge city”: theory and practice[J]. City Planning Review, 2015, 39(6): 26-36. (in Chinese))
- [2] 黄岳文,余雄.新奥尔良防洪工程体系破坏原因分析与研究[J].海洋工程,2008,26(2):112-118,123.(HUANG Yuewen, YU Xiong. Reconnaissance of New Orleans levee system failure and its implications for levee system design[J]. Ocean Engineering, 2008, 26(2): 112-118, 123. (in Chinese))
- [3] Erosion Control Technology Council. “What are rolled erosion control products?”[EB/OL]. (2016-12-17) [2018-04-02] <http://www.ectc.org/rolled-erosion-control-products-recps-> (Nov. 17, 2016).
- [4] 徐一斐,陈盛彬,邓阿琴.三维植被网预制草毯草种的筛选与配方试验研究[J].安徽农学通报(上半月刊),2011,17(9):178-180.(XU Yifei, CHEN Shengbin, DENG Aqin. On sifting and formulation-research of grass seed of prefabricated grass blanket of three-dimensional vegetation network[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2011, 17(9): 178-180. (in Chinese))
- [5] NELSON R J. Research quantifies performance of TRM reinforced vegetation [C]//RATHE E M. Proceedings of the Sessions of the Geo-Frontiers 2005 Congress, 2005: 1-11.
- [6] HEWLETT H W M, BOORMAN L A, BRAMLEY L A. Design of reinforced grass waterways[M]. 1987.
- [7] MEER J V D, SCHRIJVER R, HARDEMAN B, et al. Guidance on erosion resistance of inner slopes of dikes from three years of testing with the Wave Overtopping Simulator[J]. Coasts, Marine Structures and Breakwaters Adapting to Change, 2009, 2: 460-473.
- [8] STEENDAM G J, PROVOOST Y, MEER J V D. Destructive wave overtopping and wave run-up tests on grass covered slopes of real dikes[J]. Sborník Vědeckých Prací Lékařské Fakulty Karlovy University, 2012, 24(5): 601-6.
- [9] THORNTON C, MEER J W, HUGHES S A. Testing levee slope resiliency at the new Colorado State University wave overtopping test facility [C]//Proc Coastal Structures, 2011: 167-178.
- [10] HUGHES S, THORNTON C, SCHOLL B, et al. Wave overtopping resiliency of grass and turf reinforcement mats on sandy soils [C]//ICE Breakwater Conf Proceedings, 2013.
- [11] PAN Y, LI L, AMINI F, et al. Full-scale HPTRM-strengthened levee testing under combined wave and surge overtopping conditions: overtopping hydraulics, shear stress, and erosion analysis[J]. Journal of Coastal Research, 2013, 29(1):

- 182-200.
- [12] PAN Y, LI L, AMINI F, et al. Influence of three levee-strengthening systems on overtopping hydraulic parameters and hydraulic equivalency analysis between steady and intermittent overtopping[J]. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 2013, 139(4): 256-266.
- [13] PAN Y, LI L, AMINI F, et al. Overtopping erosion and failure mechanism of earthen levee strengthened by vegetated HPTRM system[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 96: 139-148.
- [14] YUAN S, TANG H, LI L, et al. Combined wave and surge overtopping erosion failure model of HPTRM levees: accounting for grass-mat strength[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 109: 256-269.
- [15] 胡玉植, 潘毅, 陈永平. 海堤背水坡加筋草皮抗冲刷能力试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2015(1): 49-55. (HU Yuzhi, PAN Yi, CHEN Yongping. Experimental studies on scouring resistance of reinforced turf on land-side slope[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2015(1): 49-55. (in Chinese))
- [16] STURM T W. Open channel hydraulics[J]. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*, 2001, 54(6): B107.
- [17] DIPLAS P, DANCEY C L, CELIK A O, et al. The role of impulse on the initiation of particle movement under turbulent flow conditions[J]. *Science*, 2008, 322(5902): 717-720.
- [18] VAN DER MEER J W, HARDEMAN B, STEENDAM G J, et al. Flow depths and velocities at crest and landward slope of a dike, in theory and with the wave overtopping simulator[C] // *Proceedings of 32nd Conference on Coastal Engineering*, Shanghai, China, 2010.

Experimental studies of anti-erosion ability of high-performance reinforced turf on high-speed open channel

ZHANG Zhuang^{1,2}, PAN Yi^{1,2}, CHEN Yongping^{1,2}, HU Yuzhi³, ZHANG Tongxin^{1,2}, LI Lin⁴

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China*; 4. *Department of Civil and Environmental Engineering, Jackson State University, Jackson, MS 39217, USA*)

Abstract: The high-performance turf-reinforced mat (HPTRM) is a new type of strengthening material which has been widely used in recent years to protect the vegetation linings and enhance their anti-erosion ability. The existing studies on the erosion resistance of the vegetated HPTRM systems are mainly based on the large-scale tests and focus on the permissible flow velocity and shear stress. In order to study the erosion process of the vegetated HPTRM system under the high-speed open channel flow conditions, a total of 48 specimens of natural vegetation and three types of vegetated HPTRM systems are cultivated. In a special flume designed to generate the high-speed open-channel flow, continuous and discontinuous flushing tests are carried out under different slopes and discharges. During the testing, the erosion depths of specimens, the flow discharges and flow surface velocities are recorded. The differences in erosion rates between the continuous and discontinuous tests indicate that the first flushing of the flow, which means the process of no flow to flow, induces most of the erosion of the vegetated HPTRM systems. The erosion processes of the specimens show a decrease of the erosion rate with the increase in the erosion depth, which proves the existence of the “upper limit” of erosion, which can be explained by the exposure of HPTRM and consequent increase of the anti-erosion ability. We have also discussed the influences of the flow discharges and HPTRM structures on the erosion processes, and try to fit the relationships between the average erosion rate and the flow surface velocity with the linear relationships.

Key words: slope protection; high-performance turf-reinforced mat; erosion resistance; first-flushing; upper limit of erosion