

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.016

张同鑫, 潘毅, 张壮, 等. 加筋生态护坡技术的应用与发展[J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 110-117. (ZHANG Tongxin, PAN Yi, ZHANG Zhuang, et al. Application and development of TRM technology in revetment works [J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(6): 110-117. (in Chinese))

加筋生态护坡技术的应用与发展

张同鑫, 潘毅, 张壮, 苏致远, 王倩, 徐圣卓, 胡玉植, 陈永平
(河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 在越来越注重工程生态性的今天,生态护坡在道路、堤防、城市水利等方面得到了广泛应用。然而很多情况下,生态护坡在强度上无法满足工程设计的要求。加筋生态护坡是土工织物与植草相结合形成的一种护坡形式,在保证工程生态性的同时大大提高了生态护坡的强度,近年来逐渐得到重视与应用。综合介绍了加筋生态护坡的发展历程,将其概括为传统生态护坡、普通加筋生态护坡和高性能加筋生态护坡3个阶段,在此基础上对加筋生态护坡使用的不同结构型式和材质的土工合成材料进行了分类总结,针对国内外加筋生态护坡技术的研究现状和主要结论,结合实例分析了加筋生态护坡的工程应用,指出在保护边坡、减少水土流失及改善生态环境方面的作用。最后,展望了未来需要研究的方向。

关键词: 加筋生态护坡; 加筋草皮; 三维植被网

中图分类号: U656.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2017)06-0110-08

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^[1-2]。传统护坡一般是采用混凝土、砂石料等材料,在设计时多考虑力学等方面的因素,以保证其稳定性和经济效益,但难以恢复自然植被,不利于生态环境的保护和水土保持,在外观上较为单调生硬。加筋生态护坡(turf reinforcement mat,简称TRM)作为生态护坡形式之一,指利用活性植物并结合土工合成材料等,在坡面构建一个具有自身生长能力的防护系统,通过植物的生长对边坡进行绿化与加固。加筋生态护坡的出现,在发挥生态效应的同时很大程度上提高了护坡的抗水力侵蚀能力。

现有的加筋生态护坡普遍采用的是在土壤表面种植指定种类的草皮之后铺设土工网垫的加筋方式,通过植物的生长活动达到根系加筋、茎叶防冲蚀的目的,在坡面形成茂密的植被覆盖,有效抑制暴雨径流对边坡的侵蚀,增加土体的抗剪强度,从而大幅提高边坡的稳定性和抗冲刷能力,最终在坡面构建一个具有自身生长能力的防护系统。

本文分别从加筋生态护坡发展历程、加筋生态网结构形式、国内外研究现状、加筋草皮使用情况等方面对加筋生态护坡的发展、研究和应用进行综述,为加筋生态护坡的深入研究和广泛应用提供参考。

1 加筋生态护坡发展历程

作为一项兼顾强度和生态的新兴技术,加筋生态护坡的出现至今只有几十年历史,其发展历程可概括为传统生态护坡、加筋生态护坡和高性能加筋生态护坡3个阶段。

1.1 传统生态护坡

最早有记载的生态护坡出现在1591年的中国明代,通过栽植柳树来加固河岸。1633年,日本人采用铺

收稿日期: 2016-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51309092); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015B16014)

作者简介: 张同鑫(1994—),男,天津人,主要从事海岸防灾研究。E-mail: 378206634@qq.com

通信作者: 潘毅(E-mail: panyi@hhu.edu.cn)

草皮、栽树苗的方法治理荒坡,成为日本生态护坡的起源。进入20世纪以后,传统草皮护坡得到更进一步的发展,日本以及欧美等都在草皮护坡的应用技术和种植工艺上开展了大量研究和实践。

我国在生态护坡技术方面起步较晚,20世纪90年代前多采用撒草种、穴播或沟播、铺草皮、片石骨架植草等方法^[3]。90年代后期,生态护坡得到了快速发展。学者们对植草护坡的科学性、可行性和工程实践应用等诸多问题进行了研究,逐渐形成了较为系统的科学理论。如周锡久等对植被护坡的力学依据、效果及应用注意事项进行了分析^[4-5],周培德等对植被护坡的机理及应用范围有系统而详尽的介绍^[6]。

随着生态护坡应用范围的不断扩大,它的局限性也越来越明显。一方面,传统生态护坡植物根系的作用力和作用范围有限,对边坡稳定性的提升也有限;另一方面,植被的生长特点决定了在初始时植被作用力较弱,难以发挥良好护坡效果^[7]。如何使生态护坡既能满足生态工程的需求,又可以提高植被护坡的抗水力侵蚀能力,成为了人们亟需解决的问题。

1.2 加筋生态护坡(TRM)

经过不断的尝试与研究,人们采用土工材料与植草护坡相结合的手段来提高生态护坡的护坡效果,即加筋生态护坡技术,用于加固护坡的土工材料称作加筋生态网(Turf Reinforcement Mat)。加筋生态网的出现,在发挥生态效应的同时很大程度上提高护坡的抗水力侵蚀能力,因此得到了广泛应用。

1988年,Chen等系统论述和总结了利用抛石,碎石,或加筋生态网对路边渠道边坡进行柔性加筋的技术^[8];1996年,Theisen对加筋生态护坡的应用效果,理论依据和应用注意事项进行了较为系统的论述,指出加筋生态网能够控制土壤侵蚀,加固植物根系和土壤^[9]。在国内,加筋生态护坡技术起步于20世纪90年代末。1999年,王连新对三峡工程中采用的土工格栅植草技术进行了论述^[10]。2002年,谭发刚等提出了土工网垫植草技术,指出其“前期固草,后期护坡”的功能^[11]。

1.3 高性能加筋生态护坡(HPTRM)

2005年8月,卡特里娜飓风引发的强烈风暴潮使得墨西哥湾沿岸水位大幅度提升^[12],海堤背水面所采用的传统植草护坡技术无法抵御风暴潮造成的越浪和波浪溢流,这促使世界各地的学者们开始将更多的精力投向了加筋草皮技术的革新与发展^[13],设计并投入使用了高强度加筋生态网。

目前,国内越来越多的工程开始注意到生态的重要性并发现了加筋草皮的优势,但由于发展较晚,推广程度仍不高。国外研究与开发时间明显更长,拥有较为成熟的理念与思路。在注重环保的工程理念下,加筋草皮获得了更多的研究和更为广泛的应用。

2 加筋生态网结构主要型式

加筋生态护坡的核心为加筋生态网,其结构型式和质量在很大程度上决定了加筋生态护坡的性能。

2.1 二维加筋生态网

二维加筋生态网是应用较早的加筋生态网,例如采用在三峡工程中的土工格栅植草技术^[10]。土工格栅作为常见的地基土加筋方式,较自然地作为早期的生态护坡加筋使用,提高生态护坡的整体稳定性和一定范围内的抗水流冲刷性能(如图1(a))。但其开孔较大,对于土壤抗侵蚀能力的增强依然有限,因此在高速水流冲刷作用下,不足以提供护坡所需的强度。另一种常用的二维加筋生态网为生态袋(如图1(b))。生态袋由聚丙烯(PP)或者聚酯纤维(PET)为原材料制成的双面熨烫针刺无纺布加工而成的袋子,有的内层附有可降解的纸层并装有草种和帮助植被生长的肥料,在使用时生态袋内部装土搭建边坡或置于边坡表面,使植被穿过生态袋生长。近年来较广泛用于高速公路边坡,矿山,河道的边坡绿化。

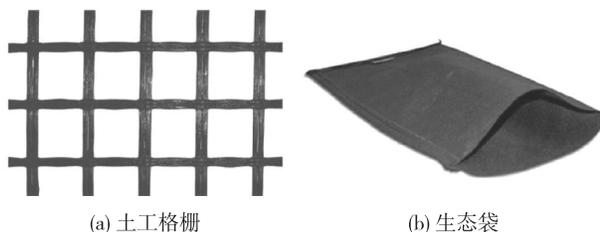


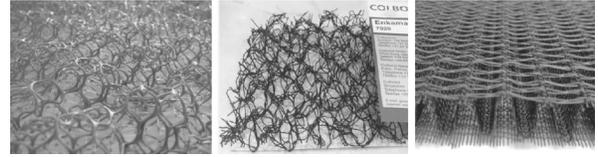
图1 二维加筋生态网结构示例

Fig. 1 Examples of two-dimensional TRM

2.2 三维加筋生态网

三维加筋生态网是目前最常用的一种生态护坡加筋方式。相比于二维加筋生态网,三维加筋生态网的三维结构能够使得加筋生态网、植被根系和土壤更紧密地结合,进一步提升了加筋生态护坡的整体强度和抗水力侵蚀能力。

三维加筋生态网的种类非常多,本文简单介绍有代表性的几种:EM型系列、Enkamat[®] 水土保持毯系列和VMAX系列。EM型系列三维加筋生态网原料为高强度热塑性树脂,经过一系列工艺处理形成相互缠绕,并在接点上相互溶和,网垫底部为较高模量基础层、顶部为突出平面的立体网包的层状结构网材,如图2(a)所示。Enkamat[®] 水土保持毯系列原料为聚酰胺(PA)单丝纤维,每平方米内含有长达1 800~2 700 m 不等的不规则人造丝,可将土壤抵抗溢流侵蚀的能力提升7到11倍,包括7020(标准型)、7220(平面型)等不同型号,但主要结构均为聚酰胺(PA)单丝纤维按一定规则乱绕而成,如图2(b)所示。VMAX型网垫是由高纤度多聚纱线织成的三维网垫,网垫包括一个机织底层,一个波纹中间层和顶侧贯穿整个网垫的聚筋层,如图2(c)所示。



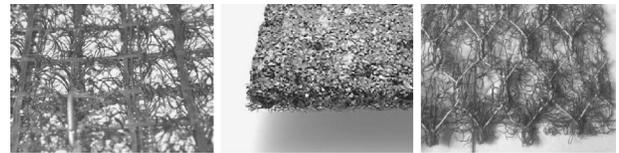
(a) EM系列 (b) Enkamat系列 (c) VMAX系列

图2 三维加筋材料结构示例

Fig. 2 Examples of three-dimensional TRM

2.3 复合型土工网垫

除了典型的二维、三维加筋生态网之外,还采用两种结构型式或两种材料结合的复合型加筋生态网。现有的复合型土工网垫包含了:如Enkamat[®] S型水土保持毯采用了二维加三维的方式来提供更高的整体稳定性和抗侵蚀强度。如图3(a)所示,三维聚酰胺(PA)单丝乱绕提供植被、土壤和加筋生态网之间的紧密结合能力,而二维土工格栅提高了护坡的整体稳定性。



(a) 二维、三维复合 (b) 聚酰胺、沥青复合 (c) 钢丝、尼龙丝复合

图3 复合型加筋生态网结构示例

Fig. 3 Examples of mixed-type TRM

Enkamat[®] A20型水土保持毯采用了聚酰胺(PA)单丝乱绕和沥青颗粒填充的复合型方式,如图3(b)所示。这种复合型的搭配,以牺牲掉一部分植被密度为代价,很大程度上提高了加筋生态护坡的抗水力侵蚀性能。国内较常见的复合型加筋网垫还有一种加筋麦克垫,如图3(c)所示。加筋麦克垫是以钢丝网和尼龙丝进行复合,钢丝网提供护坡整体的稳定性,尼龙丝提供三维结构,增强土体、加筋网、植被之间的结合力。

3 加筋生态护坡技术研究现状

加筋生态护坡的系统性研究多在2005年以后。国外学者主要通过现场试验及大比尺的室内试验,对加筋草皮的临界条件及抗侵蚀机理进行研究。国内对于加筋草皮的研究尚不多,多数是针对降雨或小流量条件下坡面水力参数、坡面侵蚀等小型室内试验,以及基于工程实践对施工工艺和成本控制方面的探讨。

3.1 国外研究现状

国外学者对加筋草皮的研究集中在加筋草皮的侵蚀临界条件和抗侵蚀机理方面。早期主要是关于河堤、道路护坡保护方面的一些研究,如英国建筑工业研究与情报协会和英国奈特龙公司对普通草皮和加筋草皮进行了对比试验,得到加筋草皮的极限抗冲流速,在水深较深的情况下可以达到6 m/s的短期流速,历时2 d的水流也能承受4 m/s的流速^[14]。

在现场试验测试方面,利用越浪器在一些欧洲国家(荷兰为主体)、越南等沿海地区的堤防上进行现场冲刷背水坡草皮护坡。Van Der Meer等^[15]于2007—2009年在荷兰Delfzijl, Groningen, Boonweg, Friesland, Philipsland, Zeeland等6个不同位置的海堤进行测试。Steendam等^[16]于2007—2010年在荷兰Tholen附近的海堤进行了测试,基于试验结果探讨和分析了草皮的侵蚀机理和容忍越浪量。Nelson对加筋草皮进行了溢流的现场试验研究,定义加筋草皮的破坏为12.7 mm(0.5 inch)的侵蚀,按此标准测试得到加筋草皮的容

忍剪切力为 900 Pa ^[17]。西班牙科学家在野外堤防进行了现场试验,探究了在数月自然降雨条件下不同土工织物加筋草皮对于边坡径流量和水土流失量的影响^[18]。

Thornton 等^[19]利用越浪器进行海堤背水坡实验室冲刷。背水坡利用植被箱(planter boxes) 培育草皮来代表真实的草皮护坡,并与越浪器装置相结合即可模拟越浪冲刷。他们发现好的草皮护坡可以抵御平均越浪量为 $0.37 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 的冲刷而不破坏,并且加筋草皮抵御水力荷载侵蚀能力是天然草皮的 2~4 倍。

在实验室研究方面,Pan 等通过原物尺寸的越浪试验对高性能加筋草皮(HPTRM, High Performance Turf Reinforcement Mat)的水力学性能和抗侵蚀性能进行了初步探讨,提出了加筋草皮“侵蚀上限”的概念,即在一定的水动力条件下,加筋生态护坡的侵蚀量速率会随着侵蚀量的增大而减少,最终停止侵蚀,指出这是由加筋生态网逐渐暴露后抗侵蚀能力提高引起的;并将加筋草皮的破坏机制总结为水流的持续冲刷作用和波浪力对土工网垫的撕离作用^[20],图4为Pan 等的越浪试验冲刷装置。Christopher 等通过 1:1 原型试验探究了海堤背水坡在不同草种、不同护坡方式、不同加筋方式草皮下抗越浪的破坏情况^[21]。



图4 波浪实验水槽进行原物尺寸的越浪试验(俯视图)

Fig. 4 Full-scale experimental tests of erosion of vegetated TRM system under wave overtopping conditions (top view)

除抗水流能力以外,各国学者对加筋草皮的其他方面也进行了研究。Lancaster 和 Lipscomb 等分别讨论了加筋草皮的培养和测试方法^[22]。Hoffmans 等从草皮单元上作用的垂向力入手研究了草皮对越浪的可蚀性^[20],考虑的垂向力包含了水压力波动引起的垂向力、重力、剪切力和黏滞力垂向分力、草根的束缚力等。

国外对于背水坡加筋草皮护坡的研究尤其是物理试验研究方面已经开展了大量工作。通过一系列的越浪器模拟试验(现场试验和实验室试验)、大比尺(1:1 正态模型)试验以及自然条件现场试验,取得了丰富成果。到目前为止,国外加筋生态护坡的研究主要有两个特点:一是均为大尺度研究(包括越浪模拟器、1:1 水槽试验、现场试验等);二是研究目的大多是为了找到加筋生态护坡所允许的流速或剪切力。

3.2 国内研究现状

国内对于加筋草皮的研究多数是基于工程概念实践提出,主要集中在加筋草皮的施工工艺和成本控制、草皮护坡工程的应用范围等方面。早期对于加筋草皮的研究成果主要是基于工程实践应用提出的关于施工工艺和成本控制内容。如张宝森等基于三维植被网在黄河游览区黄土边坡和长江三峡某全风化岩边坡护坡实例证明了三维植被网护坡技术的可行性^[23]。周建民等介绍了三维植被网在公路边坡应用过程中应遵循的一般设计原则,简述了施工过程中关键环节的控制,并与其他护坡方式作经济适用性的比较^[24]。李春雁等介绍了三维土工网垫在辽宁省砂堤生态护坡中的应用,表明了其在生态水利工程的应用前景^[25]。

近年来,在加筋草皮的抗水力侵蚀性能方面进行了研究。基于室内外试验,钟春欣等在使用高速有压流草皮护坡抗冲测试仪的基础上对草皮的抗冲性能、抗侵蚀性能及其作用机理等进行了探究,基于试验结果分析了加筋生态护坡的抗冲刷机理,并指出流速越大,三维植被网加筋草皮的防护优势越显著^[26]。张玮等基于试验数据分析得出加筋草皮糙率的取值范围,认为加筋草皮糙率普遍大于天然草皮糙率^[27]。胡玉植等使用明渠水流测试仪对3种不同的加筋草皮护坡及天然草皮护坡进行了顺坡水流和斜向水流冲刷作用下的试验测试。试验得出抗侵蚀性能由强到弱为三维土工网垫与土工格栅联合加筋>三维土工网垫>土工格栅>天然草皮的结论^[28]。

近年来,也有学者尝试从理论分析入手探究加筋草皮护坡的微观机理。朱力等从微观入手建立植被根系-岩土相互作用的力学模型,对其锚固力学机理进行分析^[29]。肖成志利用坡面糙率和拦污栅模型来模拟三维土工网垫和坡面植被作用,建立三维土工网垫植草护坡时坡面径流速度的计算表达式,并分析了三维土工网垫植草护坡的防径流冲刷特性^[30]。

总体来说,目前国内关于加筋草皮的研究还处在开始阶段。从初期基于工程实践探讨加筋草皮的施工工艺和成本控制方面,到现在采用物理模型试验、理论分析和数值模拟等研究手段,但多数是针对降雨或小流量条件下坡面水力参数、坡面侵蚀等小型室内试验,对于背水坡草皮护坡在高速溢流或越浪条件下的试验研究很少。

4 国内外应用情况

随着国内外基础设施建设逐渐完善,生态问题越来越受到人们的关注,20 世纪以来,加筋草皮逐渐应用到天然土质边坡、公路铁路等工程边坡、水利工程及市政工程中。

4.1 国外应用

国外对加筋草皮的应用研究与开发时间长,拥有较成熟的理念与研究,如欧美国国家提出的“自然设计方法”、日、韩提出的“与自然亲近的治河工程”等^[8]。水利工程必须兼顾生态建设是现在的必然发展趋势。

美国在行业规范上已经设立了一系列规定来测试加筋草皮的强度,如 3 000 lb/ft 的抗拉强度、50% 的抗拉伸长率等,对质量、厚度及承载率方面也有明确的数据要求。目前,加筋草皮已经用于内华达州的 Washoe 湖的防侵蚀工程、圣安东尼奥的山地边坡防水土流失的工程及德克萨斯东部、南部一些地区防海浪冲刷侵蚀的工程等,这些工程大都分布在美国沿海沿河受水流侵蚀较为严重的区域。

以路易斯安那州的佩恩大堤为例,在 2005 年夏季,飓风卡特里娜和丽塔造成的越浪严重侵蚀了佩恩大堤。在重建过程中,当地政府用加筋草皮对大堤的顶部及背部向下的坡面进行覆盖。在完工后几周,古斯塔夫飓风和艾克飓风登陆。飓风过后,80% 的堤防仍完好无损,加筋草皮的铺设明显增强了佩恩大堤在抵抗飓风方面的能力。位于悉尼的运河水土保持工程采用了加筋生态护坡,覆盖面积达到了 45 000 m²,有效防止了沿岸水土流失。

复合型土工网垫与三维加筋生态网垫相比抗水力侵蚀能力更强,但降低了植被生长密度,且造价更高,因此常与三维加筋生态网搭配使用。

国外的城市建设中也引入了加筋生态护坡的使用,例如法国在城市河道中铺设加筋草皮类似产品,有效利用水流建造各种基础设施。德国莱茵河的堤防工程建设与环境保护作为德国的城市景观,引入加筋生态护坡后起到了生态和防洪的双重效果^[31]。

4.2 国内应用

在道路建设中,加筋草皮目前已在 323 国道、昌厦公路、神延铁路、广东开阳高速公路等工程中应用并取得成功^[32],并在多地公路开展试点,有望进一步推广、实现更大面积覆盖。以新台高速公路为例,新台高速公路位于广东江门地区,当地气候炎热湿润,每年有 2~3 次台风并伴有暴雨,造成坡面破坏、水土流失,因此使用加筋生态护坡进行保护。从工程效果来看,经过雨季多次台风及其带来的暴雨之后,纯草坡防护区出现了较大程度的破坏甚至坍塌,而加筋草皮区草皮仍生长良好、坡表稳定,未受明显影响。

我国北方大部地区,如辽宁、天津等地,堤坝众多,堤防土质较差,沙化严重,易发生严重的水土流失^[25]。21 世纪初开始,加筋草皮逐渐被利用于我国的水利工程中,它能够满足过流防冲的强度要求。目前,加筋草皮已经被利用到海河流域卫运河边坡、沈阳市蒲河团结闸、广东省飞来峡水利枢纽等工程中,减轻了水土流失的破坏,改善了流域的生态环境。以海河流域卫运河为例,利用加筋草皮及适当的土工织物排体护坡进行保护。两个汛期后,网格内草皮长满,成活率在 95% 以上,护坡护基效果良好^[33]。福建省长泰县位于福建省东南部,地处支流龙津溪与九龙江汇合口处,地势平坦且低洼,极易发生洪涝灾害。位于长泰县的九龙江北溪(龙津溪)下游防洪大坝护段坡采用加筋草皮进行护坡施工近万米,有效加固了坡面、保护了当地生态^[34]。

5 结 语

加筋生态护坡的发展历程可以总结为传统生态护坡阶段(1980 年以前)、加筋生态护坡阶段(1980—

2005)、高性能加筋生态护坡阶段(2005年以后)。其关键组成部分加筋生态网主要结构形式可以分为二维加筋生态网、三维加筋生态网和复合型加筋生态网。在此基础上,国外学者通过现场试验以及大比尺的实验室试验,对加筋草皮的临界条件以及抗侵蚀机理方面进行研究。国内对于加筋草皮的研究多数是基于工程概念实践提出,主要集中在加筋草皮的施工工艺和成本控制、草皮护坡工程的应用范围等。同时,有案例表明国外一些加筋生态护坡经受住了风暴潮的冲刷后未被破坏,并且相关的规范和测试方法等已较完善;而我国对于加筋生态护坡的使用尚在起步阶段,但已有很多在公路边坡成功应用的案例。

近年来,尤其是2005年的卡特里娜飓风以后,国内外学者围绕加筋生态护坡的抗侵蚀性能进行了大量试验研究。尽管如此,这些研究多是针对个例的研究,虽有定量的结论,但并不足以建立起加筋生态护坡的通用设计规范;而在研究内容方面,多为加筋生态护坡的允许流速和剪切力,而对于其侵蚀过程的规律和抗侵蚀机理方面的研究并不多见。目前这方面的研究方法较多地限于大尺度的试验研究或现场试验,但这两种研究方法的成本较高且不易实施,尚缺乏一种简单易行的测试方法。此外,工程中要求加筋材料在设计使用期内发挥持久的加筋作用,因此加筋材料的老化以及伴随的性能下降也是需要关心的问题之一。

参 考 文 献:

- [1] KORT J, COLLINS M, DITSCH D. A review of soil erosion potential associated with biomass crops[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1998, 14(4): 351-359.
- [2] 何衢,陈德春,魏文白.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. (HE Heng, CHEN Dechun, WEI Wenbai. Ecological bank and its application in regulation of urban rivers[J]. *Water Resources Protection*, 2005, 21(6): 56-58. (in Chinese))
- [3] 段晓明.植被护坡研究与应用现状[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(3): 474-477. (DUAN Xiaoming. The status of slope vegetation research and its application[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(3): 474-477. (in Chinese))
- [4] 周锡九,赵晓峰.坡面植草防护的浅层加固作用[J]. *北京交通大学学报*, 1995, 19(2): 143-146. (ZHOU Xijiu, ZHAO Xiaofeng. The shallow slope reinforcement effect of planting grass protection[J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 1995, 19(2): 143-146. (in Chinese))
- [5] 王可钧,李焯芬.植物固坡的力学简析[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(6): 687-691. (WANG Kejun, LI Chaofen. Brief mechanics analysis of bioengineering techniques for slope protection[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(6): 687-691. (in Chinese))
- [6] 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. (ZHOU Depei, ZHANG Junyun. Slope protection engineering technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [7] 戚国庆,胡利文.植被护坡机制及应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(11): 2220-2225. (QI Guoqing, HU Liwen. Study on mechanism and application of slope protection with vegetation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(11): 2220-2225. (in Chinese))
- [8] CHEN Y H, COTTON G K. Design of roadside channels with flexible linings[J]. *Design of Roadside Channels with Flexible Linings*, 1988.
- [9] THEISEN M S. How to make vegetation stand up under pressure[J]. *Civil Engineering News*, 1996, 8(4).
- [10] 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. (WANG Lianxin. Application of geogrid composite vegetation slope protection method in the Three Gorges Project[J]. *Pearl River*, 1999(4): 38-39. (in Chinese))
- [11] 谭发刚,杨元明,刘章龙.土质边坡植草防护技术[J]. *西部探矿工程*, 2002(6): 160-161. (TAN Fagang, YANG Yuanming, LIU Zhanglong. The soil slope planting protection technology[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2002(6): 160-161. (in Chinese))
- [12] 王晓东,王冠军,姜付仁.卡特里娜飓风的影响及启示[J]. *水利发展研究*, 2005(12): 8-13. (WANG Xiaodong, WANG Guanjun, JIANG Furen. The effects of hurricane Katrina and enlightenment[J]. *Water Resources Development Research*, 2005(12): 8-13. (in Chinese))
- [13] UBILLA J, ABDOUN T, SASANAKUL I, et al. New orleans levee system performance during hurricane Katrina: London avenue

- and orleans canal south[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(5): 668-680.
- [14] 应翰海. 生态型护岸水力糙率特性实验研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (YING Hanhai. The ecological revetment experimental study on hydraulic roughness characteristics[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [15] VAN DER MEER J, 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.
- [16] STEENDAM G J, PROVOOST Y, VAN DER MEER J. Destructive wave overtopping and wave run-up tests on grass covered slopes of real dikes[J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 2012, 1(33): 64.
- [17] NELSON R J. Research quantifies performance of TRM reinforced vegetation [J]. *Erosion of Soils and Scour of Foundations*, 2005.
- [18] ÁLVAREZ-MOZOS J, ABAD E, GIMÉNEZ R, et al. Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Part 1: Effects on runoff and soil loss[J]. *Catena*, 2014, 118: 168-178.
- [19] THORNTON C, VAN DER MEER J W, HUGHES S A. Testing levee slope resiliency at the new Colorado State University wave overtopping test facility[C]//*Proc of Coastal Structures*, 2011: 167-178.
- [20] ROBESON M D, CARPENTER T, CLOPPER C E. Design guidance for scour stop transition Mat[®] at culvert outlets[C]//*Proceedings from the Environmental Connection 2007 Conference*, 2007.
- [21] THORNTON C, SCHOLL B, HUCHES S, et al. Full-scale testing of levee resiliency during wave overtopping [C]//*Proceedings from Annual Innovative Dam and Levee Design and Construction for Sustainable Water Management*, 2012: 721-735.
- [22] LIPSCOMB C M, THEISEN M, THORNTON C I, et al. Performance testing of vegetated systems and engineered vegetated systems[C]//*Proceedings of the International Erosion Control Association Conference*, Number 34, 2003.
- [23] 张宝森, 荆学礼, 何丽. 三维植被网技术的护坡机理及应用[J]. *中国水土保持*, 2001(3): 32-33. (ZHANG Baosen, JING Xueli, HE Li. The mechanism of slope protection technology and application of 3D vegetation net[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2001(3): 32-33. (in Chinese))
- [24] 周建民, 卢春成, 赵学远, 等. 三维植被网在公路工程防护中的应用[J]. *内蒙古公路与运输*, 2001(增刊1): 7-9. (ZHOU Jianmin, LU Chuncheng, ZHAO Xueyuan, et al. Application of 3D vegetation net in highway engineering [J]. *Highways and Transportation in Inner Mongolia*, 2001(Suppl1): 7-9. (in Chinese))
- [25] 李春雁, 潘绍财, 刘铭飞, 等. 三维土工网垫在辽宁省砂堤生态护坡中的应用[J]. *西部探矿工程*, 2007, 19(12): 189-190. (LI Chunyan, PAN Shaocai, LIU Mingfei, et al. The application of 3D geomat in Liaoning Province ecological slope protection in sand embankment[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2007, 19(12): 189-190. (in Chinese))
- [26] 钟春欣, 张玮, 王树仁. 三维植被网加筋草皮坡面土壤侵蚀试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(3): 258-261. (ZHONG Chunxin, ZHANG Wei, WANG Shuren. Experimental research on soil erosion of turf slope reinforced by 3D vegetation net[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2007, 35(3): 258-261. (in Chinese))
- [27] 张玮, 钟春欣, 应翰海. 草皮护坡水力糙率实验研究[J]. *水科学进展*, 2007, 18(4): 483-489. (ZHANG Wei, ZHONG Chunxin, YING Hanhai. Experimental study on hydraulic roughness of revetment with grass cover[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(4): 483-489. (in Chinese))
- [28] 胡玉植, 潘毅, 陈永平. 海堤背水坡加筋草皮抗冲蚀能力试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2016(1): 51-57. (HU Yuzhi, PAN Yi, CHEN Yongping. Experimental studies on scouring resistance of reinforced turf land-side slope[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(1): 51-57. (in Chinese))
- [29] 朱力, 吴展, 袁郑棋. 生态植被护坡作用机理研究[J]. *土工基础*, 2009, 23(1): 46-49. (ZHU Li, WU Zhan, YUAN Zhengqi. Mechanism study on slope protection through ecological vegetation[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2009, 23(1): 46-49. (in Chinese))
- [30] 肖成志, 孙建诚, 李雨润, 等. 三维土工网垫植草护坡防坡面径流冲刷的机制分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(2): 453-458. (XIAO Chengzhi, SUN Jiancheng, LI Yurun, et al. Mechanism analysis of ecological slope protection against runoff erosion by grass jetting on 3D geomat[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(2): 453-458. (in Chinese))
- [31] 姚海萍. 城市河道生态护坡设计研究[J]. *华东科技(学术版)*, 2014(4): 100. (YAO Haiping. Study on city river ecological slope protection design[J]. *East China Science and Technology*, 2014(4): 100. (in Chinese))
- [32] 吴井生, 卢小君, 谌玉萍. 三维加筋生态网在护坡工程中的应用[J]. *江西水利科技*, 2003, 29(4): 230-232. (WU Jingsheng, LU Xiaojun, CHEN Yuping. Application of the 3-dimension earthwork mesh cushion in the slope protection

- engineering[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2003, 29(4): 230-232. (in Chinese))
- [33] 张松. 土工织物加筋草皮在水利工程的应用[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2007, 19(1): 35-37. (ZHANG Song. Application of geotechnical textile reinforced sod in water conservancy engineering[J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, 2007, 19(1): 35-37. (in Chinese))
- [34] 陈腾林. Enkamat 柔性生态护坡研究——以福建省九龙江北溪下游防洪工程为例[J]. 水利规划与设计, 2004(10): 55-58. (CHEN Tenglin. Study on enkamat-flexible ecological slope protection-a case study of the flood control project in the lower reaches of the Yangtze River in Fujian Province[J]. Water Resources Planning and Design, 2004(10): 55-58. (in Chinese))

Application and development of TRM technology in revetment works

ZHANG Tongxin, PAN Yi, ZHANG Zhuang, SU Zhiyuan, WANG Qian,

XU Shengzhuo, HU Yuzhi, CHEN Yongping

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Nowadays, more and more attentions have been focused on the eco-environmental protection of the civil works, and the ecological engineering techniques for the side-slope protection works have been widely applied to the roads, embankments, urban hydraulic projects and so on. However, in many cases, the ecological slope protection technology can not meet the requirements of the engineering design. The turf reinforcement mat (TRM) is one of the side-slope protection forms combining the geotechnical fabric and reinforced turf with the slope or river banks, which protects the ecological works and significantly improves the strength of the ecological revetment works, and the TRM technology has been gradually paid attention to and has a wide range of application in recent years. By analyzing the development course and research status of the TRM technology, its development course has been divided into three stages: the traditional ecological slope protection, common reinforced ecological slope protection and high performance turf reinforcement mat slope protection. On the basis of this classification, the different structure types and geosynthetic materials of the TRM revetment works are summarized. And the related researches and main conclusions made by scholars at home and abroad on the development course of the TRM revetment are introduced in detail in this paper. Based on the case histories, the engineering application of the TRM technology including its effects in protecting slopes, reducing soil and water losses and improving ecological environment is analyzed. Finally, the authors point out the problems that need to be paid more attention to in the future researches.

Key words: turf reinforcement mat revetment; reinforced turf; three-dimensional vegetation net