

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.04.008

朱海生, 陈健, 张桂荣, 等. 生态袋挡墙护岸结构设计及其力学性能变化[J]. 水利水运工程学报, 2015(4): 48-55. (ZHU Hai-sheng, CHEN Jian, ZHANG Gui-rong, et al. Structural design of retaining wall with ecological geo-textile bags and its changes in mechanical properties[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 48-55.)

生态袋挡墙护岸结构设计及其力学性能变化

朱海生¹, 陈健¹, 张桂荣², 王蔚¹, 方绪顺²

(1. 江苏省水利工程建设局, 江苏 南京 210029; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 目前我国河流整治工程中过度硬化现象仍然普遍, 亟需开发和应用兼具生态保护、资源可持续利用以及符合工程安全需求的生态护岸技术。生态袋挡墙护岸技术是能够将生态岸坡和墙体工程完美融合的系统, 该系统解决了结构工程与生态工程结为一体的难题。以南京市板桥河岸坡整治工程为例, 详细研究了生态袋挡墙护岸结构的设计、施工及植被种植技术。通过现场试验段的全过程跟踪, 总结归纳出影响生态袋挡墙护岸工程质量的主要因素为生态袋体质量、加筋材料质量、袋内土体密实度、植被覆盖度等。以生态袋这一典型柔性护岸材料为例, 通过对比全新生态袋、工程中已使用 1.5 年的生态袋力学性能和抗老化性能, 评估生态袋的耐久性, 研究生态岸坡工程质量与生态袋物理力学性能的内在联系, 结论表明使用 1.5 年后的生态袋力学性能保持率较好, 但较难满足 30 年使用寿命的设计要求。必须进一步改进生态袋护岸工程设计和施工方案, 以满足工程耐久性能与力学性能要求。

关键词: 生态袋; 生态护岸; 结构型式; 耐久性; 力学性能

中图分类号: TV861

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)04-0048-08

1 生态袋护岸技术概述

传统的岸坡防护技术主要以水泥、钢筋等高耗能产品为材料进行岸坡治理, 防护效果立竿见影, 但是这种硬质防护技术封闭僵硬, 切断了岸坡土体、植物与生物之间的有机联系, 破坏了岸坡及河流的生态系统^[1], 不利于河流水质的改善。针对上述问题, 结合岸坡生态防护工程实例, 国内外学者提出了生态护岸或生态岸坡的概念^[2-4]并逐渐完善。河流生态护岸, 一是要满足防洪抗冲标准要求, 重点是构建稳定、抗冲刷的护岸结构; 二是需满足岸坡生态平衡要求, 构建能透水、透气、适合植物生长的生态防护平台, 建立良好的河岸生态系统。

生态护岸不仅仅是指利用植被来保护和修复生态环境, 采取一些结构性措施来保持边坡稳定是必要的^[5]。在与结构性稳定措施的结合下植被才能更好更有保障地生长, 才更能保证河流岸坡工程生态设计目标的实现。国内外工程技术人员已提出多种形式的生态柔性护岸结构, 常见的岸坡防护与植被恢复技术主要包括有石笼、生态袋、预制联锁块、土工格室、三维植被网垫、生态砖和鱼巢等^[6]。近年来开发的柔性生态护坡袋由聚丙烯或聚酯纤维为原材料制成的双面熨烫针织无纺布加工而成, 袋内充填混有植被种子的营养土(或砂土, 植被种子也可涂抹在生态袋体表面), 具有抗紫外线、抗老化、无毒、不助燃、裂口不延伸的特点。

收稿日期: 2014-12-23

基金项目: 水利部公益性行业专项经费资助项目(201301022); 水利部“948”项目(201204); 2012年度江苏省水利科技项目(2012009, 2012030); 2011年度江苏省交通运输科学研究计划项目(2011Z01-1)

作者简介: 朱海生(1962—), 男, 江苏苏州人, 高级工程师, 博士, 主要从事水利工程建设管理工作。

E-mail: 2367114561@qq.com

这项柔性生态加筋挡墙技术适用于较陡岸坡的侵蚀防护,与常规灌木植被防护技术相比,能抵御相对较大的流速,并起到护脚和增加岸坡稳定性的作用。生态袋袋体本身具有较高的挠曲性,可适应坡面的局部变形,并可形成阶梯坡状,特别适合于岸坡坡度不均匀的区域^[7-8],并具有施工简单,能适应较大变形的优势。

生态袋加筋挡墙为主动柔性防护系统,是以土工格栅取代条带加筋,生态袋袋体作为墙面板的一种新型柔性加筋挡墙,集柔性结构、生态、环保、节能四位于一体^[9],实现了结构安全和生态绿化的同步,为护坡建设领域的生态环保建设提供了技术保证。本文就生态袋加筋挡墙在水利工程岸坡防护实际应用中的设计要点与力学性能变化规律进行阐述,供实际工程参考。

2 生态袋挡墙护岸设计与施工

板桥河是南京市一条重要的通江河道,全长20.21 km,流经南京市江宁区、雨花区,经板桥河闸汇入长江。板桥河雨花台区境内河道长8.38 km,是该区的重要泄洪通道。为保护沿河两岸人民群众的防洪安全,适应该区域经济发展的需要,本次对板桥河区界至汤巷沟1.71 km河段(桩号K0+000~K1+710)进行治理。岸坡防护工程中分别采用了草皮护坡、生态袋护坡、草皮护坡结合生态袋挡墙(图1)、生态袋护坡结合金属丝网箱挡墙等多种生态护岸结构型式。

2.1 生态袋挡墙护坡及材料的技术要求与设计要点

生态袋挡墙护岸技术主体结构包括生态袋、排水联结扣、加筋格栅及植被等。相比作为辅材的三维排水联结扣和加筋格栅,生态袋袋体本身是整个生态护坡体系最重要的组成部分,袋体本身的物理力学性能决定了整个生态岸坡的工程质量。

(1)生态袋:本试验段使用两种生态袋:①袋体质量 152 g/m^2 ,尺寸 $110.0\text{ cm}\times 50.0\text{ cm}$,纵向拉伸强度 9.5 kN/m ,横向拉伸强度 9 kN/m ,CBR顶破强度 $1\ 900\text{ N}$,等效孔径为 0.12 mm ;②袋体质量 110 g/m^2 ,尺寸 $110.0\text{ cm}\times 50.0\text{ cm}$,纵向拉伸强度 4.3 kN/m ,横向拉伸强度 5.4 kN/m ,CBR顶破强度 $1\ 500\text{ N}$,等效孔径为 0.18 mm 。

(2)三维排水联结扣:三角内磨擦紧锁结构,将单个生态袋联结成整体结构,整体受力,具有较好的稳定性。

(3)生态袋的扎口带:具有抗紫外线和单向自锁结构功能。

(4)生态袋填充物:应根据不同工程、岸坡岩土状况和植被品种的具体要求进行选配,由专业技术单位提供必要的技术和施工方案;根据工程实践,袋体充填饱和度宜控制在 $72\%\sim 78\%$ 之间。

(5)排水管采用PVC50型,管端用 200 g/m^2 反滤土工布包裹,向外坡度 5% ,呈梅花状布置,间距 2 m ;阻水膜向外坡度为 5% 。

(6)双向土工格栅:经向和纬向断裂强力 $\geq 50\text{ kN/m}$ 。采用面层间设置加筋格栅来连接生态袋和墙后土体。格栅采用反包工艺,以加强面层与墙后填土稳定性。

生态袋挡墙护岸施工单元工程分为坡面修整、生态袋填充作业、生态袋挡墙(护坡)垒砌、植被种植等4个工序,其中生态袋填充作业、生态袋挡墙(护坡)垒砌2个工序为主要工序。

生态袋加筋挡墙设计与施工要点:①生态袋挡墙垒砌时由低到高,层层错缝垒砌;②生态袋垒砌时水平面向坡外倾斜 5% ,便于平台排水和快速滤水;③生态袋埋在基底的数量典型比例是 $1:8$,即在地面以上每8层需在地下埋1层;④墙后回填土:建议每放置一层生态袋即压实墙后填土,这样可保持墙体笔直并能控制回填土压实;⑤混凝土基座并非必需,因为生态袋加筋柔性挡墙能适应基准面的缺陷和较大变形,设计人员可根据实际工程确定是否需要设置混凝土基座或其他型式的基座。

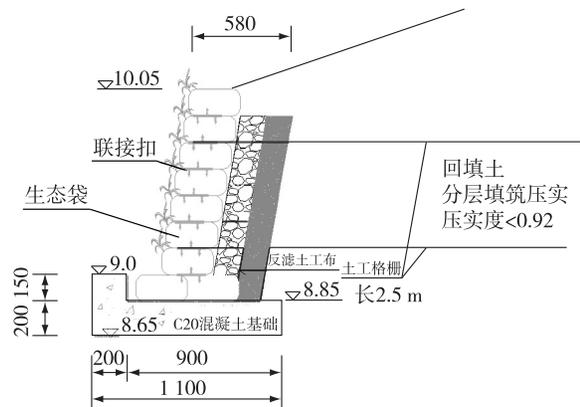


图1 生态袋挡墙设计(高程:m,长度:mm)

Fig. 1 Design of a retaining wall with ecological geo-textile bags (unit: elevation in m, length in mm)

2.2 植被种植技术与效果

生态护岸技术的核心是实现植被防护与工程结构的有机结合。因而,植被种植及其生长情况是影响生态护岸工程效果的重要因素。示范段工程采用了如下几种植被种植技术,种植效果见图2。



图2 试验段生态袋挡墙照片

Fig. 2 Photos after completion of 5 months for retaining wall with ecological geo-textile bags

(1)活枝插播种植技术。在生态袋中顺坡向和沿坡向每隔0.5 m插入活柳条、迎春花、长春藤等,顶端稍微出露,并与坡面保持垂直。这种技术适用于乔、灌、花类植物,植物层次丰富,也可构筑各色图案。

(2)袋内夹层种植技术。这种技术选用特殊的生态植被袋,将选定的植物种子通过两层木浆纸附着在生态袋内侧,加工缝制或胶结而成。施工时在袋内装入现场配置的可供植物生长的营养土或经处理后的疏浚土,封口后按照施工要求堆砌,结合后期的洒水、养护即可实现植被恢复和生态防护。

(3)表面抹草籽种植技术。这种技术将粘合剂、细粒填土与草籽、花籽混合,均匀涂抹在生态袋表面,覆盖无纺布等覆盖物,并根据天气情况洒水保持湿润。这一种植技术草籽发芽率高,覆盖效果好。

表1列出了生态袋护坡3种植被种植方式优缺点。

表1 生态护岸植被种植方式优缺点

Tab. 1 Advantages and disadvantages of vegetation planting modes of ecological revetment

种植方式	具体种植技术	优点	缺点	造价/(元·m ⁻²)
插播	常青藤、爬山虎、凌霄,按墙顶1层、墙面3层间隔插播	成活率较高,根系入土深,植物层次丰富	损坏袋体	20~25
喷播种植	将黏合剂(或泥浆)、细粒土与草籽、花籽混合,均匀涂抹在生态袋表面,并覆盖无纺布等覆盖物	施工简单	出苗不均匀	10
夹层种植	带可降解的隔层袋	造价低	出苗效果不好	5

从生态岸坡工程运行1.5年的情况来看,活枝插播种植技术和喷播种植技术效果较好,成活率高,根系入土深;两种技术相结合在生态袋挡墙上从上至下营造了较为丰富的植物层次。南京地区生态护岸活枝插播最适合的植物为常春藤,用于生态袋挡墙的垂直绿化效果非常好,枝叶稠密,对生态袋具有较好的保护作用。喷播种植技术最适合的植被为狗牙根,狗牙根为南京本土植被,繁殖能力和侵占能力强,耐践踏,易在短时间内形成占绝对优势的植物群落。狗牙根地下茎分布在15~20 cm土层中,对岸坡浅层土体具有良好的加固作用。

3 生态袋护岸工程质量与生态袋物理力学性能

3.1 生态袋力学性能

良好的力学性能是生态袋必须具备的最基本性能。考虑到生态袋在护岸中所起的力学作用及其要承担的荷载,根据调研多个成功应用生态袋的河道生态护岸案例,结合厂家提供的资料,选取以下指标作为生态

袋的主要控制指标:纵横向断裂强度 ≥ 8 kN/m,纵横向撕破强度 ≥ 220 N/m。

当岸坡比较陡峭,生态袋所构筑的挡墙结构需通过生态袋布起加筋作用才能稳定时,应根据力学计算,对生态袋布的标称断裂强度作出要求,且应对小变形时(如10%延长率)的抗拉强度作出规定,具体需根据实际结构进行分析计算,生态袋的其余力学指标根据工程实际情况进行选配。建议采用袋体拉伸性能、撕裂强度、抗冲击性能作为生态袋的主要控制指标^[10]:

(1)拉伸性能。体现在宽条拉伸强度和握持强度两方面。宽条拉伸强度:反映袋体在纵横向单位宽度范围内能承受的外部拉力,以及相应方向的最大延展性。与传统加筋挡土墙使用的钢筋、混凝土和石块等刚性材料相比,生态袋抗拉强度明显优于其他材料。

握持强度:表示袋体抵抗外来集中荷载的能力,可以选择测试相应的横、纵向握持强度。生态袋等土工织物对集中荷载的扩散范围越大,则强度越高,在工程实际使用时就能承受更大的外部集中荷载^[11]。

(2)撕裂强度。该强度是衡量生态袋加筋挡墙抗倾覆性、抗滑性等的重要指标,其测值为沿袋体某一裂口将裂口逐步扩大过程中需要的最大拉力,能真实反映袋体在遭受破损时抵抗破坏的能力。

(3)袋体抗冲击性能。测试生态袋等土工织物抵抗外部冲击荷载的能力。工程实践中,根据实际工程的外部环境特点甄选胀破强度、CBR顶破强度、圆球顶破强度来反映该性能。

3.2 生态袋植生性能

生态袋中植被生长验证标准是袋内植被(籽)需从生态袋中长出;袋表面铺设植被需扎根进入生态袋内。根据生态袋在整个生态护坡系统中发挥的植生作用,袋体必须具备透水不透土的功能,在防止袋内填充物流失的同时,及时补充植被生长所需水分,实现水分在袋体与袋体、袋体与岸坡土体等多层面的高效流动。选择生态袋等效孔径和透水性能两个关键指标来反映生态袋的植生性能。

(1)生态袋等效孔径 O_{95} 和生态袋透水性能。等效孔径是指土工织物的最大表观孔径,是检验生态袋绿化效果的核心指标。等效孔径同生态袋单位面积质量成正相关。良好的透水性能是衡量生态袋质量优劣的重要指标,袋体填充率及其填充重量是生态袋护岸结构设计时的重要指标。若袋体材料过薄,孔径太大,受雨水侵蚀等作用袋内填充物会大量流失,造成整个袋体单位重量迅速减小,护岸结构力学性能发生巨大变化并导致其逐渐坍塌破坏;如果袋体材料过厚,孔径太小,一方面袋体透水能力降低,当水份逐渐渗入袋体时,其单位重量将大大升高,岸坡中静水压力增加,导致岸坡变形或垮塌。另外,孔径过小会阻碍植被生长以及根系延伸。

基于以上原因,在生态袋护坡设计中需综合确定袋体等效孔径的范围。目前,国内大部分厂家生产的生态袋袋体等效孔径检测结果均为0.07~0.20 mm,国家建筑材料测试中心对国内主要生态袋生产厂家进行袋体采样检测及分析,并结合生态袋护岸工程实践,得出以下结论:当 0.15 mm $\leq O_{95}$ ≤ 0.20 mm时,垂直渗透系数 $k_v \geq 0.12$ cm/s时,基本可以保证生态袋内填充物不会流失;同时,上述指标确保了袋体良好的透水性,基本能实现袋内外水分自由流通的功能,又便于边坡内积水及时排出,保障了护岸结构的稳定。因此,建议在实际生态袋护岸工程设计中,尽量使用等效孔径在该范围内的生态袋^[10]。

(2)植被覆盖率要求。生态袋表皮植物宜充分考虑物种多样性,合理搭配草皮、花卉、藤本、矮灌木、乔木等不同类型的植物。生态袋表皮植被可通过混播(将草籽预先放在生态袋内的方法)、插播、铺草皮及喷播等方法实现,但无论使用哪种方法,在生态袋施工后3个月内均要求植被覆盖率符合常水位以上 $\geq 99\%$,常水位以下300 mm及挺水植被种植区 $\geq 50\%$ 的要求。

3.3 生态袋老化性能

在覆盖度较好的情况下,生态袋可以抵抗紫外线侵蚀,不会发生质变或腐烂,具有不可降解并可以抵抗虫害侵蚀,抗老化,无毒,抗酸碱盐侵蚀及微生物分解等特性。

生态袋护坡通常应用于河道护坡、高速公路边坡绿化、山体修复等,一般不会频繁翻修。因此,在生态护岸设计中要求生态袋护坡工程寿命最少应达到30年,这对袋体的抗老化性能提出了较高要求。考虑到在实际工作环境中生态袋老化最主要原因为阳光紫外线照射,如能在施工完毕后的较短时间内就有植被覆盖,避

免阳光直射,能很好地延长生态袋袋布的使用寿命。

4 生态袋力学性能变化规律研究

生态袋挡墙(护坡)结构存在经长时间雨淋、冻融后会塌陷,并随时间变化生态袋本身强度会逐渐降低的问题,目前国内外在该结构耐久性与稳定性方面缺乏系统研究。国内彭超等^[10]从土工合成材料角度出发,定性研究了生态袋的材料性能与生态护坡工程耐久性关系,提出可以将生态袋的理化性能指标与植被坡面工程的质量控制挂钩的观点。姚仕明等^[12]从河流动力学角度出发,研究了柔性铰链混凝土沉排的耐久性,分析研究了其护岸工程的效果。研究表明,柔性铰链混凝土沉排基本能适应河床变形,护岸效果明显,耐久性明显优于不易变形的硬性模袋混凝土。

本文以生态袋这一典型柔性护岸材料为例,通过对比全新生态袋、工程中已用过1.5年的生态袋力学性能和抗老化性能,评估生态袋的耐久性,研究生态袋护岸工程质量与生态袋物理力学性能的内在联系,提出生态袋护岸结构的设计和施工建议。

4.1 生态袋取样

护岸工程中不同岸坡位置,生态袋挡墙向阳面和背阴面的顶、底部各选取1个袋体。不同植被覆盖度:植被茂盛、稀疏位置各选取1个袋体。试样尺寸10 cm×20 cm,20 cm×20 cm,每组试验取5块试样。

4.2 研究步骤与试验结果

(1)力学性能测试。利用万能材料试验机分别测定实验组和参照组生态袋的拉伸性能、撕裂强度。现场取样的已使用1.5年的生态袋,植被覆盖度较好处表层袋体外侧植被生长良好,大部分根系已穿过袋子进入袋体内侧。现场取样倒土时较为费劲,主要是内部根系已扎入袋内土体中,并且与袋内土体融为一体。

(2)测试结果及分析。表2为不同质量的新旧生态袋力学性能试验结果。

表2 新旧生态袋力学性能试验结果

Tab. 2 Test results of mechanical properties for old and new ecological geo-textile bags

性能参数	试样1(单位面积质量 152 g/m ²)			试样2(单位面积质量 110 g/m ²)			
	新生态袋	使用1.5年的生态袋(背阴处)	使用1.5年的生态袋(向阳处)	新生态袋	使用1.5年的生态袋(背阴处)	使用1.5年的生态袋(向阳处)	
纵向	拉伸强度(kN/m)	9.7	8.2	7.3	4.3	3.8	3.9
	拉伸率(%)	52	35.8	43.64	43.92	30.2	33.0
横向	拉伸强度(kN/m)	9.0	7.4	7.2	5.4	5.3	4.6
	拉伸率(%)	65	33.64	50.56	47.72	31.2	31.4

生态袋取样过程及试验过程中现象表明,使用1年半后的生态袋无论是在背阴处还是向阳处,无论表面有无植被生长,袋体完整性均较好,基本无风化现象,袋体延展性较好,力学性能保持率较好,平均强度保持率维持在85%以上。但是,按照上述强度衰减速度推测,生态袋正常使用寿命很难维持到30年(设计标准)。项目后续将继续跟踪研究,以获得更接近实际的研究结论。

就生态袋取样过程来看(图3),生态袋挡墙处袋内土体密实度及土质差异较为明显,部分袋体充填有砂土,密实度较低;而且在大部分挡墙中下部,袋体上



(a) 袋内土体充填较密实

(b) 袋内土体充填较疏松

图3 板桥河生态袋挡墙护岸结构袋体取样(2014-09-08)

Fig. 3 Bag sampling of retaining wall with ecological geo-textile bags

并未生长植被或植被覆盖度较低,尚无植被根系扎入袋内土体,土体中缺少植被根系的锚固作用。随着时间推移,生态袋老化、破损厉害,袋内土体可能暴露出来,受雨水侵蚀等引起土体流失(图4),导致挡墙沉降加大,逐渐坍塌。

图5显示生态袋护坡结构中袋内土体密实度较好,生态袋表层植被根系已进入生态袋内土体中,如同无数根小锚杆完成了袋体与土体间的再次加筋,实现了永久护岸目的并大大降低了维护费用。后期即便岸坡上生态袋老化、破损,但由于根系对土体的加筋作用,岸坡仍将维持良好的稳定性与抗侵蚀性。



图4 生态袋破坏后袋内土体流失(2014-11-19)

Fig. 4 Soil erosion after destruction of ecological geo-textile bags



图5 生态袋护坡结构袋体取样(2014-09-08)

Fig. 5 Bag sampling of slope protection structure with ecological geo-textile bags

植被根系在坡土中起着类似土钉的作用。大量研究表明草本植物最大根长密度主要集中在坡面以下约10 cm的土壤层中^[13-14],即在该范围内根系能够稳定土壤。但植被根系的加筋作用比较复杂,很难简化为一个简单的力学模型来合理确定相关参数。后续研究中将联合室内试验和现场原位测试确定不同植被根系的力学指标,建立根土相互作用的力学模型,为准确评价生态岸坡稳定性提供技术指标。

5 结 语

通过对板桥河生态袋挡墙护岸工程设计、施工及运行的全过程跟踪,结合生态袋护岸工程其他案例和本文研究成果,归纳总结出生态袋挡墙护岸工程质量主要受以下几个因素影响:

- (1)生态袋的品种、规格、技术指标与袋体内充填的土质及附属件的质量、指标等。
- (2)加筋材料的品种、规格和技术参数。
- (3)生态袋挡墙上植被根系入土深度、植被覆盖度等。
- (4)墙后回填料土质、回填密实度、饱满度及重量或体积的均匀性控制。
- (5)砌筑工艺、分层、错缝联结扣的安放等。

生态袋挡墙目前在岸坡生态防护工程中应用较为广泛,但是生态袋挡墙(护坡)结构存在经过长时间雨淋、冻融后会塌陷,并随时间变化生态袋本身强度会逐渐降低的问题,目前国内外在该结构耐久性与稳定性方面缺乏系统研究。影响生态护岸材料耐久性能的指标较多,在工程实践中,需重点分析哪些指标与岸坡工程质量联系较为密切,并进一步分析其在复杂外界环境(降雨、紫外线照射、冻融等)条件下的变化规律。在后续研究中将通过积累更多的现场监测数据和室内测试数据,直接利用生态袋的物理力学性能指标作为评价生态护岸工程质量的重要依据,为评价护岸效果提供直观可信的基础数据。

根据南京板桥河示范工程生态袋挡墙护岸结构运行现状,由于袋体充填密实度、袋体自重应力、袋体土颗粒轻微流失、墙后填土土压力等因素的综合影响,挡墙结构已发生竖向与水平位移,但由于缺少施工期和运行初期现场实测资料,不能对其变形过程进行深入分析。建议后续研究对以下几方面进行系统分析:

- (1)不同的挡墙设计高度时,墙后填土内拉筋带强度、锚固长度分析。
- (2)生态袋袋体不同充填度及不同设计高度下,挡墙沉降预留高度分析。

(3)根据岸坡坡比、挡墙高度等,分析研究适合的生态袋尺寸及其力学特性等。

参 考 文 献:

- [1] 杨海军,内田泰三,盛连喜,等. 受损河岸生态系统修复研究进展[J]. 东北师大学报:自然科学版,2004,36(1):95-100. (YANG Hai-jun, UCHIDA Taizo, SHENG Lian-xi, et al. Advances in studies on the restoration of the damaged riparian ecosystem [J]. Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition),2004,36(1):95-100.(in Chinese))
- [2] 黄岳文,吴寿荣. 感潮河道的生态护岸设计[J]. 吉林水利,2005(8):10-12. (HUANG Yue-wen, WU Sou-rong. Ecological revetment design on tidal river [J]. Jilin Water Resources,2005(8):10-12.(in Chinese))
- [3] 罗利民,田伟君,翟金波,等. 生态交错带理论在生态护岸构建中的应用[J]. 自然生态保护,2004(11):26-30. (LUO Li-min, TIAN Wei-jun, ZHAI Jin-bo, et al. Application of the ecotone theory in bilengineering design [J]. Protection of Natural Ecology, 2004(11):26-30.(in Chinese))
- [4] 陈明曦,陈芳清,刘德富. 应用景观生态学原理构建城市河道生态护岸[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(1):97-101. (CHEN Ming-xi, CHEN Fang-qing, LIU De-fu. Application of landscape ecology in construction of nature river levee [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2007,16(1):97-101.(in Chinese))
- [5] 董哲仁,孙东亚. 生态水利工程原理与技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007. (DONG Zhe-ren, SUN Dong-ya. The principle and technology of ecological water conservancy project [M]. Beijing: China Water Power Press,2007.(in Chinese))
- [6] 夏继红,严忠民. 国内外城市河道生态型护岸研究现状及发展趋势[J]. 中国水土保持,2004(3):20-21. (XIA Ji-hong, YAN Zhong-min. Research status of ecological revetment on urban river at home and abroad and its development trends [J]. Soil and Water Conservation of Chinese,2004(3):20-21.(in Chinese))
- [7] 张桂荣,赵波,饶志刚,等. 土质岸坡生态防治技术研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2012,33(5):87-91. (ZHANG Gui-rong, ZHAO Bo, RAO Zhi-gang, et al. Study on ecological controlling techniques for soil bank slope of channel [J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science),2012,33(5):87-91.(in Chinese))
- [8] 关春曼,张桂荣,程大鹏,等. 中小河流生态护岸技术发展趋势与热点问题[J]. 水利水运工程学报,2014(4):75-81. (GUANG Chun-man, ZHANG Gui-rong, CHENG Da-peng, et al. The development trends and hot issues on ecological revetment technology for medium and small rivers [J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(4):75-81.(in Chinese))
- [9] 王孔正. 柔性生态加筋挡墙的设计与计算[J]. 中国水运,2011,11(2):248-250. (WANG Kong-zheng. Design and calculation of flexible ecological reinforced retaining wall [J]. China Waterway, 2011, 11(2):248-250. (in Chinese))
- [10] 彭超,刘颖卓. 论生态袋理化性能与生态护坡工程质量的内在关系[J]. 中国建材科技,2010(增2):237-241. (PENG Chao, LIU Ying-zhuo. The internal relationship between the physical and chemical properties of ecology geotextile bag and engineering quality of ecological slope [J]. China Building Materials Science & Technology, 2010(Suppl2):237-241.(in Chinese))
- [11] SL 235—2012 土工合成材料测试规程[S]. (SL 235—2012 Specification for test and measurement of geosynthetics [S]. (in Chinese))
- [12] 姚仕明,卢金友. 两种护岸新材料的应用技术试验研究[J]. 泥沙研究,2006(2):17-21. (YAO Shi-ming, LU Jin-you. Experimental study on the application of two kinds of new materials to bank protection [J]. Journal of Sediment Research, 2006(2):17-21.(in Chinese))
- [13] NORMANIZA O, FAISAL H A, BARAKBAH S S. Engineering properties of *Leucaena leucocephala* for prevention of slope failure [J]. Ecological Engineering, 2008, 32: 215-221.
- [14] NORMANIZA O, BARAKBAH S S. Parameters to predict slope stability—soil water and root profiles [J]. Ecological Engineering, 2006, 28: 90-95.

Structural design of retaining wall with ecological geo-textile bags and its changes in mechanical properties

ZHU Hai-sheng¹, CHEN Jian¹, ZHANG Gui-rong², WANG Wei¹, FANG Xu-shun²

(1. *Water Conservancy Construction Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China*; 2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: At present, an excessive hardening phenomenon is still prevalent in the river regulation works of China. It is urgent to develop ecological revetment technologies for meeting the requirements of ecological protection, sustainable utilization of resources and works safety. The eco-bag retaining wall revetment is the only system which can perfectly integrate the ecological slope with wall works, and the system is a successful way to solve problems of integration of the structural engineering and the ecological engineering. In this paper, taking the bank slope regulation works of the Banqiao River of Nanjing city as a classic case, the design, construction and vegetation planting technologies of the eco-bag retaining wall revetment have been studied in detail. The field test results show that the main factors affecting the engineering quality of the retaining wall revetment of the ecological geo-textile bag are the qualities of the bag, the reinforced material, soil compactness in the bag and vegetation coverage. Taking the ecological geo-textile bag, a typical flexible revetment material, as an example, by comparing the mechanical properties and aging-resistant performance of a new ecological geo-textile bag and an old ecological geo-textile bag used for 1.5 years, the ecological geo-textile bag's durability is evaluated and studies of the intrinsic relationships between the physico-chemical properties for the ecological geo-textile bag and the engineering quality of the bank slope have been carried out too. The test results show that the retention rate of the mechanical properties is better for the ecological geo-textile bag used for 1.5 years, but it is difficult to meet the requirements of design for 30 years service life. The improved design and construction schemes for the revetment works with the ecological geo-textile bags must be further proposed in order to meet the requirements of mechanics and durability of the revetment works.

Key words: ecological geo-textile bag; ecological revetment; structure form; durability; mechanical properties