

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.06.015

张桂荣, 张家胜, 王远明, 等. 河流冲刷作用下石笼网生态护坡技术研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(6): 112-119. (ZHANG Guirong, ZHANG Jiasheng, WANG Yuanming, et al. Preliminary study on eco-slope protection with stone cage under river scouring[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(6): 112-119. (in Chinese))

河流冲刷作用下石笼网生态护坡技术研究

张桂荣¹, 张家胜^{1,2}, 王远明³, 邵 勇⁴

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098; 3. 黑龙江省三江工程建设管理局, 黑龙江 哈尔滨 150040; 4. 江苏省水利工程建设管理局, 江苏 南京 210029)

摘要: 与传统护坡相比,生态护坡强调在满足岸坡稳定性的同时达到修复生态、保护环境的目的。概括了河流岸坡生态护坡的内涵和特点,总结了常用于河流岸坡的生态护坡技术,重点介绍了石笼网生态护坡作为一种柔性护坡方式在国内外研究进展及其在工程中的应用。通过对已有理论和试验的分析,阐明了影响石笼网结构护坡性能的主要设计参数。在此基础上,结合工程中出现的问题,提出需要进一步研究的内容:石笼网结构抗冲刷特性研究、石笼网填石料级配、厚度与抗冲流速关系的研究及石笼网与植被的结合试验研究。通过对石笼网结构的深入研究,以获取更多的理论支撑,进一步优化石笼网结构的设计,更好地指导工程实践。

关 键 词: 河流岸坡; 生态护坡技术; 石笼网结构; 设计参数

中图分类号: TV861

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2018)06-0112-08

传统的河流岸坡防护形式大多是采用现浇混凝土结构、干砌石、预制混凝土块体等刚性结构。这种刚性结构在保护岸坡稳定性、防止水土流失等方面起到了一定的作用,但同时对河道岸坡的生态环境造成了不同程度的破坏。业内人士提出了基于生态护坡、河流健康和生态河流的“生态河道”等概念,即在保证岸坡稳定性的同时,能够实现生态系统的自我修复,改善岸坡生态环境;集景观性、安全高效性、生态性于一体,实现“人与自然和谐共处”、“回归自然”、“修复河流生态系统”,从而实现真正意义上建设生态河流的目标。

1 河流岸坡生态护坡发展现状

1.1 河流岸坡生态治理的内涵与特点

针对河道岸坡失稳破坏以及对河流的生态性要求,国外相关学者最先开始对河道治理技术进行反思,并提出了相应的理念和技术,如“土壤生物工程”护岸技术、透水生态混凝土、“自然型护岸”技术等^[1-2]。国内相关学者在借鉴国外生态理念、技术的基础上,继续提出了更为系统的治理理念。生态航道的提出^[3]更加丰富了河流岸坡生态治理的内涵,景观性、安全高效性与生态性是不可或缺的组成要素。曹民雄等^[4]指出我国的生态航道建设起步于生态护坡,岸坡的生态治理应满足生态航道的要求;杜林凤^[5]提出河流的生态治理应包括数字航道优化岸坡的治理;刘均卫^[6]从生态长江的角度出发,指出岸坡的生态防护应与水生态监测、航道生态工程、船舶生态工程相适应;张威等^[7-8]认为岸坡的生态治理应考虑到航道的线性选择、疏浚抛泥处理等方面;马殿光等^[9]认为河流岸坡生态治理的内涵应同时兼顾合理设计结构形式、因地制宜选择护岸材料、合理运用植被措施、航道的景观与水质、生态施工、健康的管理组织与措施6个方面,同时具备安

收稿日期: 2018-03-12

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405100); 2017年江苏省水利科技重点攻关项目(2017010)

作者简介: 张桂荣(1979—),女,湖北钟祥人,教授级高级工程师,主要从事环境岩土工程与地质灾害防治研究。

E-mail: grzhang@nhri.cn

全性、绿色性、生态性、景观性与人水和谐的特点。

因此,河流岸坡的生态治理应基于生态护坡技术,同时满足护岸、防洪、通航等生态航道要求,把岸坡治理和生态环境紧密联系在一起。

1.2 河流岸坡防护材料与应用研究

岸坡生态治理工程首先要满足岸坡稳定性、耐久性、施工简易性、经济性的要求,21 世纪以来生态护坡技术与生态护坡材料的研究得到了飞速发展。黄奕龙^[10]总结了日本植被型生态护岸技术;Thyy V 等^[11]以老挝湄公河为例论述了 Soda 护岸技术;史云霞等^[12]通过研究英国布雷克诺克河岸坡的防护措施,介绍了椰子纤维卷护岸技术;李一兵^[13]总结常用的生态护岸技术,提出了土工格室、三维土工网垫在护底工程、护滩工程的不同应用;丁清华^[14]通过工程案例的介绍,阐明了生态袋在河湖岸坡治理中的优点。表 1 列出了目前河流岸坡治理工程中最常用的生态材料及生态护坡技术^[11,13,15-17],总体上分为植被型生态护岸和综合型生态护岸。

表 1 不同生态护坡材料、技术研究对比
Tab. 1 Comparison of different materials and techniques of ecological slope protection

生态材料	技术特点	使用范围或优缺点
香根草	在河流岸坡上种植香根草进行岸坡防护(植被生态型)。	适用水流流速大、砂性土质岸坡。
柴捆、树枝(Soda 技术)	主要采用柴捆和树枝,做成柴笼的形式,里面加以沙石置于河床(植被生态型)。	多用于坡度较缓的河流岸坡。
三维土工网垫	采用特殊的土工织物制成网垫,通过独特的坡表加筋锚固性和植被综合作用于边坡(综合型)。	多适用于河流流速较缓、航道等级较低,常水位以上的坡面。
土工格室	施工垫层铺设土工格栅或土工格室,通过格室与植草综合作用于边坡(综合型)。	相较于三维网垫,该结构也可用于河道的护底、护滩工程。
仿木桩	以彩色聚合物水泥砂浆为材料,制成木桩形式安装在岸坡处(综合型)。	具有较好的整体性,但实际工程施工较慢。
生态混凝土	多孔混凝土、填充料与表层土相互结合作用于边坡(综合型)。	有较好的整体性,但其植物的成活率较差。
生态袋	具有不透土过滤功能的生态袋,以三维排水联结口的构成形式作用于岸坡(综合型)。	能够用于较陡的岸坡,且有利于生态系统的快速恢复。
石笼	石笼和内部填石料的共同作用,形成石笼网箱作用在岸坡上(综合型)。	适用水流较大、波浪推力较大的岸坡,也可用于保护河床、治理滑坡。

1.3 石笼网护坡结构发展现状

河流岸坡稳定性主要受控于水流冲刷作用、岸坡岩土体抗冲性能等。因此,河流岸坡护岸结构首先要考虑抗水流冲刷的性能。相较于其他生态护坡技术,石笼网结构在抗水流冲刷方面有着很大的优势,其多孔隙结构防浪效果好,并且结构本身抗水流冲刷能力强,能抵抗最高达到 8 m/s 的水流冲刷。

20 世纪初石笼网护垫第 1 次应用到意大利雷诺河的岸坡防护工程上。我国在 20 世纪 90 年代初引进这项技术,并将这种结构应用在护岸和挡墙两个领域。图 1 是石笼网结构在我国东北地区河流岸坡、堤防上的应用。最初的石笼网护坡结构多采用单一的石笼网与填石料结合作用于岸坡,经过工程的实践应用,发现石笼网结构与植被相互结合能达到更好的防护效果,更能契合生态护坡的要求。王沛芳等^[18]学者利用石笼网结构与植被的相互作用,改良石笼网结构的设计和施工工艺,用于河流净污工程。

目前,工程中较多采用石笼网与植被的组合结构。



图 1 河流岸坡、堤防石笼网结构
Fig. 1 Structure of stone cage net in river bank slope and embankment

块石间的空隙能为河流中的微生物、鱼类及其他水生物提供一个良好的生态环境;在块石表面形成的生物膜有利于水质的改善;石笼网结构空隙中生长出的植被除了为生物提供遮蔽层、避难所及有机物的来源外,亦可减缓水流冲击,促进泥沙淤积。以图 2 南京江心洲石笼网垫护岸工程为例,网垫下土层基本为岸坡原状土,含有大量的芦苇根系及其他植被根系和种子,岸坡铺设石笼网垫数月后植被从网垫块石缝隙中长出,岸坡生态环境得到优化,实现了固土、绿化与净化水质的多重效应。

虽然石笼网结构广泛应用到护岸工程中,但其研究

大多数集中在石笼网挡墙技术的研究。英国的 Sogge 1974 年首次提出了平面应力分析在石笼网挡墙研究中的适应性^[19];柴贺军等^[20]采用有限元分析法深入研究了石笼网挡墙的安全性,为石笼网挡墙的工程应用提供了可靠的理论支撑。但是,在河道岸坡治理工程中应用较多的贴坡式石笼结构研究相对较少,其结构设计、施工等方面仍然存在诸多问题,如石笼网结构的厚度、防波浪冲刷性能、坡脚设计等。国内多数石笼网护坡结构设计参数和相应的理论都是依据国外标准或国内现有施工经验。已有工程案例表明,石笼网结构的破坏与石笼网内填石料级配及填石料流失有密切关系。因此,网垫中颗粒的逊径含量对网垫稳定性的影响;水流冲刷作用下石笼网抗冲刷破坏临界流速和极限流速的界定,这些都将是今后研究的重点。

2 石笼网结构特点和优势

2.1 石笼网结构特点

石笼结构主要分为直立式、台阶式和贴坡式(见图 3)。直立式护岸结构横断面多为“品”字结构,在工程中多以石笼挡墙的形式出现,这种结构往往对地基要求较高,要有一定的承载力;台阶式护岸结构使用石笼网箱构成台阶式结构,适用于不同高度的岸坡;贴坡式护岸结构主要用于斜坡的防护,单元网垫为机器编制的六边形双绞合钢丝网垫,其表面涂有高尔凡或镀锌等防腐措施,内部填充相应级配的块石,由块石和钢丝网箱构成整体防护结构,其斜坡段和水平段长度可以根据工况进行不同程度的调整。

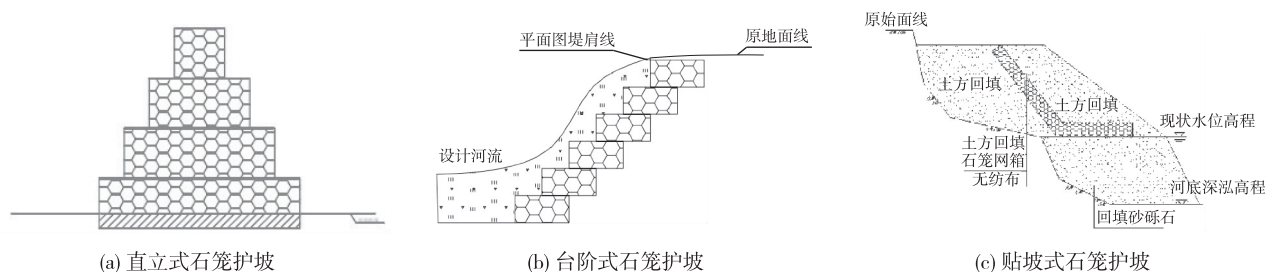


图 3 石笼网护坡结构

Fig. 3 Slope protection structure with stone cage net

2.2 石笼网护坡结构优势

目前,坡面植草护坡技术在坡面防护中广为应用,虽然植被护坡在加固边坡和生态绿化等方面有着不可替代的优越性,但是依靠植被根系只能对表层土体进行加固,而对于深层土体其强度并没有得到明显的加强;在防冲刷方面只能做到防降雨径流冲刷,对于河流冲刷防护效果很差。石笼网护垫以其结构特点在河流冲刷防护方面则有独特的优势。选取了一般的柔性护岸结构和石笼网结构进行对比,具体见表 2。



图 2 南京江心洲石笼网垫生态护岸工程实例
(完工 5 个月后)

Fig. 2 Application of stone cage net structure in engineering of central shoal in Nanjing

表 2 石笼网结构与一般柔性护岸结构对比分析

Tab. 2 Comparative analysis of cage net structure and general flexible slope protection

护岸材料	流速允许值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	适用范围	适用岸坡类型	优缺点	单价/ ($\text{元} \cdot \text{m}^{-2}$)
植生土坡	1	护坡	坡比 $\geq 1:3.0$	生态好,费用低; 不耐冲刷。	15~20
三维土工网垫	2	护坡	坡比 $\geq 1:2.5$	生态性好,施工便捷; 耐久性一般。	25
土工格室	2	护坡	坡比 $\geq 1:2.0$	生态好,施工快; 不耐冲刷。	40~50
生态袋	3	挡墙 护坡	各种岸坡	适用于软基、生态性好;耐久性较差。	100~120
石笼网垫	4	挡墙 护坡	冲刷严重岸坡	整体性好,抗冲刷、透水强;植被易恢复,护滩护岸俱佳。	150

3 石笼网护坡结构关键设计指标分析

石笼网结构用于岸坡防护取得良好效果的同时,其结构设计参数和施工等方面仍存在许多问题。国内外对其可行性的研究分析较少,大多数工程都是依靠施工经验或是国外的设计标准。国内外对石笼网护坡结构研究主要集中在如下几个方面。

3.1 石笼网垫厚度与临界流速的关系

马克菲尔公司早在 20 世纪 80 年代就在美国科罗拉多大学进行了大量模型试验和对已建工程的反分析,最后得出了各种厚度网垫的抗冲流速,见表 3^[21]。

表 3 石笼网垫厚度与流速关系

Tab. 3 Relationship between thickness and velocity of flow

类型	厚度/mm	石料规格/mm	填石平均粒径/m	临界流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	极限流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
石笼网垫	150~170	70~100	0.085	3.5	4.2
		70~150	0.110	4.2	4.5
	230~250	70~100	0.085	3.6	5.5
		70~150	0.120	4.5	6.1
	300	70~120	0.100	4.2	5.5
		100~150	0.125	5.0	6.4

表 3 的石笼网抗冲流速与厚度的关系仅单独考虑了石笼网结构,相关试验^[21]表明,当石笼网结构表面有覆盖物时,将会对临界流速产生一定的影响。表 4 给出了石笼网结构面层覆有沥青时的厚度与流速关系。

对比表 3 和 4,沥青垫层对石笼网垫厚度和流速的关系有很大的影响,在覆盖沥青后发现,同一厚度的网垫抵抗冲刷的能力明显提高。而实际工程多是石笼网与植被根系的结合,如果采用覆盖沥青的方式提高网垫

的抗水流冲刷能力,则失去了石笼网护岸结构的多孔隙特性,并且沥青覆盖层的存在影响植被有效生长,这样就失去了生态护坡的意义。可利用水槽冲刷物理模型,且在石笼网底部铺腐殖土种植植被,待植被长成后进行水槽冲刷试验,从而得出相应结果。利用该试验成果研究植被根系对网垫和流速关系的影响,更加接近

表 4 石笼网垫厚度(含沥青覆盖层)与流速关系

Tab. 4 Relationship between thickness and velocity of flow (asphalt overlay)

类型	厚度/ mm	石料 规格/mm	沥青面层/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	临界流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
石笼网垫	150~170	70~90	80~120	5.5
	230~250	70~120	120~160	6.3
	300	100~150	60~200	7.0

工程实际,同时满足生态护坡要求。

3.2 波浪荷载作用下石笼网厚度设计参数

对于大型河道、航道而言,风力和航船都会产生不同程度的波浪,而波浪作用在石笼网上将产生复杂的水动力问题,且波浪的涨退会产生两种作用效果截然不同的波推力和波吸力。Maccaferri 总部、荷兰 Delft 水力实验室及岩土工程研究所相互合作研究,得出了波浪作用下石笼网的设计参数^[22]。考虑坡内地下水的渗透力时,利用极限平衡法计算分析可知下滑比顶出危险,则控制下滑稳定性的石笼网厚度采用如下经验式^[23]计算。

$$\delta \geq \frac{h(1 + \tan\theta \tan\varphi) \sin\theta}{(s-1)(1-n)(\tan\varphi - \tan\theta)} \quad (1)$$

式中: h 为石笼面层块体内外水头差,可由穿过石笼渗透坡降推算或渗流数值计算求得; θ 为坡角; φ 为摩擦角; n 为石笼填充孔隙率, $n=0.2\sim 0.3$; s 为块体密度与水密度的比值,约为 2.4。

考虑到渗流水头 h 是控制坡面局部稳定性设计的重要作用力,因此 h 的取值变得尤为关键。稳定流场中 h 的确定较为容易,而在非稳定渗流下就变得非常困难。考虑这些情况,相关专家^[23-24]通过对潮涌波浪诱发渗流场的研究计算,得出了 h 的经验取值,即取波浪高度的 1.2 倍,见经验式(2)。

$$\delta \geq \frac{0.12H(1 + \tan\theta \tan\varphi) \sin\theta}{(s-1)(1-n)(\tan\varphi - \tan\theta)} \quad (2)$$

式中: H 为波高,对于不规则波,采用有效波高。

毛昶熙等^[24]认为,式(1)和(2)比常用的赫式公式更为合理,在赫式公式的推导中只考虑了堤外作用的波浪力,并没有考虑堤内的渗流场;在公式比较和验证资料的分析中,也表明赫式公式在较陡的坡面上不能适用。上述经验式仅适用波浪作用下护坡结构局部稳定性控制标准,对于涉及护坡结构的块石大小尚无计算式,而在实际工程中发现,石笼网中填石料粒径的大小对石笼网的稳定性有较大影响。因此笔者认为,通过水槽冲刷物理模型试验,得出不同坡比、不同流速下石笼网填石料粒径的最佳配比,对完善计算式具有一定的意义。

3.3 石笼网坡脚防护设计

在河水侧向冲刷淘刷的作用下,岸坡坡脚的岩土体往往会遭到严重破坏,引起岸坡失稳下滑(图4),这种由坡脚破坏引起的近坝库岸下滑的现象十分常见。建议可采用石笼网柔性防护结构,该结构具有多孔隙,防浪效果好,整体稳定性好的特点,结构本身的抗水流冲刷能力较强,厚度 50 cm 的石笼网其抗冲临界流速为 6 m/s,能够抵御山区河流高势能水头的水流冲刷。目前,国内石笼网护坡结构用于坡脚防护的设计中,多数采用《堤防工程设计规范》计算坡脚处石笼网水平铺设长度,主要从两个方面进行考虑:①坡脚处冲刷深度;②石笼网抗滑稳定性。

根据《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)及相关研究^[25],石笼网抗滑稳定性可考虑其滑动力矩和抗滑力矩并以静力平衡条件求解满足要求的安全系数 F ;平顺护岸冲刷深度可按式(3)计算:

$$\begin{cases} h_s = H_0 [(U_{cp}/U_c)^n - 1] \\ U_{cp} = U_2 \eta / (1 + \eta) \end{cases} \quad (3)$$

$$U_c = \left(\frac{H_0}{d_{50}} \right)^{0.14} \sqrt{17.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d_{50} + 0.000\,000\,605 \frac{10 + H_0}{d_{50}^{0.72}}} \quad (4)$$



图4 江西武功山袁河流域河流岸坡坡脚失稳

Fig. 4 Instability of river bank slope in Yuanhe River Basin, Wugong Mountain, Jiangxi

$$\eta = \begin{cases} 1, \alpha \leq 15^\circ \\ 1.25 + \frac{\alpha - 20}{40}, 20^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中: h_s 为局部冲刷深度(m); U_c 为泥沙起动流速,用式(4)计算,其中 d_{50} 为床沙的中值粒径(m), γ_s 和 γ 为泥沙与水的重度(kN/m^3); H_0 为冲刷处的水深(m); U_{cp} 为近岸垂线平均流速(m/s); n 为与防护岸坡在平面上的形状有关,取 $n=1/4 \sim 1/6$; η 为水流流速不均匀系数,可根据水流流向与岸坡夹角 α 用式(5)算得。通过以上公式计算得到岸坡坡脚冲刷深度,将之作为坡脚处石笼网垂直铺设的深度。

4 石笼网护坡结构研究热点与难点问题

(1)河流冲刷作用下石笼网逊径颗粒流失破坏研究。在无护坡结构情况下,河流岸坡破坏多由水流冲刷下岸坡土体颗粒不断流失;岸坡土体颗粒是否起动取决于近岸水流冲刷能力和岸坡抗冲能力的大小。在铺设石笼网的岸坡上,水流冲刷将直接作用在网箱和箱内块石上。在长期水流冲刷下,石笼网破坏的其中一种形式是原本填充密实的网箱,随着逊径颗粒的不断流出,使得箱内出现较大的空间,大粒径填充块石在水流作用下开始运动并不断撞击石笼网,使得网垫发生变形破坏。另有研究^[26]表明,各种河岸抗冲力计算模型存在不同程度的缺陷,各模型只考虑了某些局部的影响因素,很难完全真实地反映各种土体的冲刷特性。石笼网垫中逊径颗粒的约束条件和天然泥沙也有所不同,运用理论计算模型很难反应块石起动情况。

(2)石笼网护坡结构抗冲刷试验中临界流速和极限流速的确定。临界流速是河道边界不发生侵蚀条件下水流的最大流速,也被称为允许流速,是反映石笼网抗冲刷性能的最重要指标。但是,在石笼网抗冲刷试验中,如何确定临界流速和极限流速及其两者之间的界限尚未有明确的定义。

(3)植被根系-石笼网共同作用的生态护坡系统。植被根系不仅对石笼网起到了锚固作用,同时植被与其周围淤积的土对石笼网结构形成有效的加筋作用,石笼网单体结构的力学性能也将发生相应的改变。已有学者对根系-石笼网的工作机理进行研究^[27],但尚缺少石笼网单体结构的应力-应变关系及其对变形特性和稳定性能的研究。

结合以上三点,石笼网抗冲性能主要受到填石料粒径的控制,同时也与网垫结构的厚度、岸坡坡比有关;通过单纯的理论分析很难建立计算模型,而根据实际工况的特点进行分类,进而采用有效的物理模型缩尺试验分类试验研究。通过室内水槽模型试验,控制纵坡比和不同的流速、水深,研究揭示水流侵蚀作用下石笼网护岸结构破坏过程;研究石笼网护岸结构网孔大小、填石料粒径及网垫厚度、岸坡坡比等与其防冲刷性能的关系。采用大型直剪仪继续开展石笼网单体结构力学指标的研究,同时考虑单体结构中根系等的加筋作用,这对完善根系-石笼网生态护坡系统具有一定的意义。

5 结 语

石笼网结构作为生态型护岸方式的一种,已经越来越多地应用到实际工程中并取得良好效果;石笼网护坡工程的应用解决了传统护岸形式对岸坡生态环境造成破坏的问题,加快了施工进度,减少了施工成本,达到岸坡防护的同时实现了岸坡内外水循环的效果。

虽然石笼网生态护坡技术已经广泛应用到我国河流岸坡生态防护工程中,但理论研究尚且缺乏,石笼网结构的关键设计指标以及石笼网结构面临的热点、难点问题还需要进一步研究。而这些问题的解决将会完善石笼网理论技术的研究,更好地推动石笼网技术的发展,促进石笼网结构在我国生态护坡领域的应用,助力水生态文明建设。

参 考 文 献:

- [1] 杨芸. 论多自然型河流治理法对河流生态环境的影响[J]. 四川环境, 1999, 18(1): 19-24. (YANG Yun. Study on the river

- eco-environmental improvement by rivers rich in nature[J]. Sichuan Environment, 1999, 18(1): 19-24. (in Chinese))
- [2] 徐朝辉, 步海滨, 程巍华, 等. 内河航道生态护岸的发展及应用分析[J]. 水运工程, 2009(9): 107-110. (XU Chaohui, BU Haibin, CHENG Weihua, et al. Development and application of ecological protection bank for inland waterway[J]. Port and Waterway Engineering, 2009(9): 107-110. (in Chinese))
- [3] 董哲仁. 河流健康的内涵[J]. 中国水利, 2005(4): 21-26. (DONG Zheren. River health connotation[J]. China Water, 2005(4): 21-26. (in Chinese))
- [4] 曹民雄, 申霞, 应翰海. 长江南京以下深水航道生态型整治建筑物结构研究[J]. 水运工程, 2018(1): 1-11. (CAO Minxiong, SHEN Xia, YING Hanhai. Study on ecological structures of waterway regulation in the Yangtze River below Nanjing[J]. Port and Waterway Engineering, 2018(1): 1-11. (in Chinese))
- [5] 杜林凤. 提高航道维护质量与管理水平浅谈[J]. 价值工程, 2017, 36(26): 92-93. (DU Linfeng. Discussion on improving the quality of waterway maintenance and management level[J]. Value Engineering, 2017, 36(26): 92-93. (in Chinese))
- [6] 刘均卫. 长江生态航道发展探析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(增刊1): 9-14. (LIU Junwei. Discussion on ecological waterway development of the Changjiang River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(Suppl): 9-14. (in Chinese))
- [7] 张威, 刘磊. 浅谈内河生态航道建设的设计理念和实际工程应用[J]. 工程与建设, 2015, 29(6): 783-785. (ZHANG Wei, LIU Lei. Discussion on design concept and practical engineering application of inland river ecological waterway construction[J]. Engineering and Construction, 2015, 29(6): 783-785. (in Chinese))
- [8] 顾雪永, 董占辉, 王美琳. 修复和保护近自然生态河流[J]. 中国农村水利水电, 2009(6): 92-95. (GU Xueyong, DONG Zhanhui, WANG Meilin. Restoration and protection of near natural ecological rivers[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(6): 92-95. (in Chinese))
- [9] 马殿光, 李华国, 刘新. 库区航道土质岸坡生态治理研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (MA Dianguang, LI Huaguo, LIU Xin. Study on ecological management of soil bank slope in the reservoir area[M]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [10] 黄奕龙. 日本河流生态护岸技术及其对深圳的启示[J]. 中国农村水利水电, 2009(10): 106-108. (HUANG Yilong. Ecological embankment in Japan and its application in Shenzhen[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(10): 106-108. (in Chinese))
- [11] THYY V, SOBEY I, TRUONG P. Canal and river bank stabilization for protection against flash flood and sea water intrusion in central Vietnam[J]. Cantho Press, 2006.
- [12] 史云霞, 陈一梅. 国内外内河航道护岸型式及发展趋势[J]. 水道港口, 2007, 28(4): 261-264. (SHI Yunxia, CHEN Yimei. Revetment type of inland waterway and its development trends at home and abroad[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007, 28(4): 261-264. (in Chinese))
- [13] 李一兵. 长江中下游航道整治工程绿色环保整治建筑物专题研究[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2007. (LI Yibing. Special topics on green environmental protection buildings in the middle and lower reaches of Yangtze River[R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, 2007. (in Chinese))
- [14] 丁清华. 生态袋柔性防护在河道治理中的应用[J]. 技术研发, 2011, 18(4): 58. (DING Qinghua. Application of flexible protection of ecological bag in river control[J]. Technology and Market, 2011, 18(4): 58. (in Chinese))
- [15] 肖衡林, 王钊, 张晋锋. 三维土工网垫设计指标的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1800-1804. (XIAO Henglin, WANG Zhao, ZHANG Jinfeng. Study on the design indexes of three dimensional geomat[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1800-1804. (in Chinese))
- [16] 许士国, 高永敏, 刘盈斐. 现代河道规划设计与治理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (XU Shiguo, GAO Yongmin, LIU Yingfei. Planning and construction of modern riverbank[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2006. (in Chinese))
- [17] 周跃. 土壤植被系统及其坡面生态工程意义[J]. 山地学报, 1999, 17(3): 224-229. (ZHOU Yue. Some understanding about soil-vegetation and slope eco-engineering[J]. Journal of Mountain Science, 1999, 17(3): 224-229. (in Chinese))
- [18] 王沛芳, 王超, 钱进. 景观阶梯式生态石笼护岸净污成型方法:201410036458.2[P]. 2014-05-21. (WANG Peifang, WANG Chao, QIAN Jin. Landscape ladder type ecological stone cage revetment clean formation method:201410036458.2[P]. 2014-05-21. (in Chinese))
- [19] SOGGE R L. Finite element analysis of anchored bulkhead behavior[D]. USA: University of Arizona, 1974.
- [20] 柴贺军, 孟云伟, 贾学明. 柔性石笼挡墙土压力的 PFC^{2D} 数值模拟[J]. 公路交通科技, 2007, 24(5): 48-51. (CHAI

- Hejun, MENG Yunwei, JIA Xueming. PFC^{2D} numerical simulation on earth stress of flexible gabion retaining wall[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(5): 48-51. (in Chinese))
- [21] KANDARIS P M. Use of gabion for localized slope stabilization in difficult terrain[C]//The 37th U. S. Symposium on Rock Mechanics, 1999.
- [22] Hydraulic and Marine Structures Department of Delft Geotechnics. Reno Mattresses as Bank Protection in Navigation Fairways[R]. Netherland: Delft Geotechnics, 1989.
- [23] 毛昶熙, 段祥宝, 毛佩郁. 防波堤护坡块体的稳定性计算分析[J]. 港口工程, 1998(6): 1-6. (MAO Changxi, DUAN Xiangbao, MAO Peiyu. Stability calculation and analysis on slope protective blocks of breakwater[J]. Port Engineering, 1998(6): 1-6. (in Chinese))
- [24] 毛昶熙, 段祥宝, 毛佩郁, 等. 堤防渗流与防冲[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (MAO Changxi, DUAN Xiangbao, MAO Peiyu, et al. Seepage of dikes and scour defence[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower, 2003. (in Chinese))
- [25] 王俊玮, 王立志, 王洪波. 基于石笼网垫护坡的计算理论[J]. 黑龙江水利科技, 2009, 37(2): 30-32. (WANG Junwei, WANG Lizhi, WANG Hongbo. Calculation theory of slope protection based on stone cage net[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2009, 37(2): 30-32. (in Chinese))
- [26] 韩其为, 何明民. 细颗粒泥沙成团起动及其流速的研究[J]. 湖泊科学, 1997, 9(4): 307-316. (HAN Qiwei, HE Mingmin. The incipient motion and velocity of aggregated fine particles[J]. Journal of Lake Sciences, 1997, 9(4): 307-316. (in Chinese))
- [27] 曾子, 周成, 王雷光, 等. 基于乔灌木根系加固及柔性石笼网挡墙变形自适应的生态护坡[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(增刊1): 63-66. (ZENG Zi, ZHOU Chen, WANG Leiguang, et al. Bioengineering stabilization of slope via root-cable-gabion net flexible system[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2013, 45(Suppl1): 63-66. (in Chinese))

Preliminary study on eco-slope protection with stone cage under river scouring

ZHANG Guirong¹, ZHANG Jiasheng^{1,2}, WANG Yuanming³, SHAO Yong⁴

(1. State Laboratory Key of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Sanjiang Engineering Construction Bureau of Heilongjiang Province (Sanjiang Engineering Construction and Management Bureau of Heilongjiang Province), Haerbin 150040, China; 4. Water Conservancy Construction Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

Abstract: Compared with the traditional slope protection, ecological slope protection emphasizes the stability of the bank while achieving the goal of restoring the ecology and protecting the environment. This paper summarizes the connotation and characteristics of river bank slope's ecological protection and the protection technology commonly used in the river bank slope, and mainly introduces the use of stone cage as a flexible slope protection method, and its research progress and application in engineering at home and abroad. Through the analysis of the existing theories and experiments, the main design parameters affecting the slope protection performance of the cage net structure have been clarified. On this basis, considering the problems arising in the project, the topics that need further study are proposed: anti-scouring characteristics of stone cage network structure, the relationship between grading, thickness and impact velocity of rockfill material, and the combination of cage net and vegetation. Through in-depth studies of the structure of the stone cage net, we hope to get more theoretical support, so as to better guide the engineering practice.

Key words: river bank slope; ecological slope protection technology; stone cage structure; design parameters