

石笼护坡结构的设计方法

金德钢¹ 陈润夏² 孙丽丽²

(1. 宁波市水利水电规划设计研究院, 浙江 宁波 315012; 2. 江阴格宾金属复合材料有限公司, 江苏 苏州 215128)

摘要 河道治理过程中大量使用的石笼护坡结构缺乏相关设计规范的支持。为了规范石笼护坡结构的设计工作, 本文从石笼护坡的技术参数、糙率、确定石笼护坡结构的初始设计厚度、允许切应力等方面, 全面阐述了石笼护坡结构的相关设计理论, 并给出了详细的设计步骤, 供国内相关工程技术人员参考。

关键词 河道护岸; 石笼护坡结构; 雷诺护垫

中图分类号: TV861 文献标识码: B 文章编号: 1006-764X(2007)S2-0155-04

在河道整治工程中, 传统的河道护岸或护坡, 水下多采用抛石, 水上多采用干砌石或混凝土预制块。当采用浆砌片石或混凝土时, 由于不透水, 阻断了河道内自然生态系统的循环, 已不能适应生态治河的理念。而由双绞六边形金属网内填充块石或卵石的石笼护坡具有抗冲刷能力强、自透水性、整体性强、抗风浪性强、施工简便、造价低廉等特点, 同时又是生物易于栖息的多孔隙结构, 所以常被用于自然性生态河道建设^[1-5]。该项技术在国外已有近百年的应用历史, 江阴格宾金属复合材料有限公司于 2000 年引进的该项技术, 已先后在多项工程中应用, 取得很好的效果, 得到同行的一致好评。但也存在一些令人担心的问题。诸如: ①业主或设计人员由于对制作石笼网垫的钢丝的防腐寿命缺乏准确了解, 致使在设计时选用低防腐性能的钢丝, 这种错误对结构的使用寿命而言是致命的; ②由于缺乏规范的支持, 在确定石笼网垫的厚度时往往不通过准确计算, 仅凭经验来确定等。本文在对数年来工程经验和科研成果进行总结的基础上, 推介石笼护坡结构的设计方法, 以供相关工程技术人员和规范制定人员参考。

1 石笼网垫的相关设计参数

1.1 各种钢丝的防腐性能分析

典型的石笼网垫结构如图 1 所示。用于制造石笼网垫的钢丝为热镀锌/镀铝锌低碳钢丝, 钢丝的抗腐蚀性直接决定结构的设计寿命, 所以在设计和应

用该结构时, 钢丝的选择尤为重要。各种钢丝防腐性能比较见表 1。

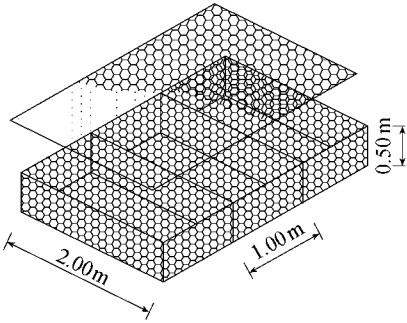


图 1 典型的石笼网垫结构
表 1 各种防腐钢丝的防腐年限

防腐钢丝种类	最低镀层量 指标/(g·m ⁻²)	设计使用寿命/a	
		陆地	水中
热厚镀锌	230	20	6
热厚镀锌覆塑	230	63	45
镀高尔凡(GALFAN)	230	60	40
镀高尔凡(GALFAN)覆塑	230	120	100
热镀 10% AL-Zn 合金钢丝	300	100	55
热镀 10% AL-Zn 合金钢丝覆塑	300	140	120

注 ①资料来源于中国钢铁研究总院检验报告 2006 钢检(F)字第 015 号—中性盐雾试验; ②GALFAN 即为 5% AL + 95% Zn; ③10% AL-Zn 合金钢丝即为 10% AL + 90% Zn; ④要求覆塑厚度≥0.5 mm。

根据多年的工程实践, 笔者建议业主和设计人员优先选用热镀 10% AL-Zn 合金钢丝和镀高尔凡(GALFAN)钢丝, 因为覆塑钢丝在施工时容易破损, 一旦破损, 其防腐性能较未覆塑的还要差。

1.2 糙率

石笼结构的糙率 n 主要由石笼结构类型和填

石的粒径分布情况以及外包网丝控制。在实际设计中,一般不考虑网丝的影响。研究者们(Simons 等)^[6]认为:石笼结构的糙率是填石平均粒径以及一些相关水力因素的函数。笔者对这些公式进行试算,发现其值与原型实测数据相比,偏差较大。目前在设计中,推荐采用表 2 所示的实验数据^[7]。

表 2 石笼结构曼宁糙率设计参考值

产 品	厚度/cm	填石粒径/cm	糙率 n
石笼网垫	15	8~15	0.0277
	20	8~15	0.0277
	30	8~15	0.0277
石笼网箱	30	10~20	0.0301
	50	10~20	0.0301

1.3 石笼护垫初始设计厚度的确定

确定石笼护垫的糙率后,对明渠均匀流可根据曼宁公式(式 1)确定流速:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

式中: v 为水流流速, m/s; n 为糙率(见表 1); R 为水力半径, m; i 为河床梯度。

然后根据图 2^[7],通过水流流速确定石笼网垫的初始设计厚度。

当岸坡受海浪的冲击和航行水道受船只航行所引起的波浪冲击而产生侵蚀时,在确定石笼网垫初始设计厚度时主要考虑的因素是波浪高度 H_s 和护坡角度 θ 。在设计时,采用式(2)计算。

$$t_m = \begin{cases} \frac{H_s}{2\cos\theta} & \cot\theta \leq 3 \\ \frac{H_s}{4(\cos\theta)^{\frac{1}{3}}} & \cot\theta \geq 2 \end{cases} \tag{2}$$

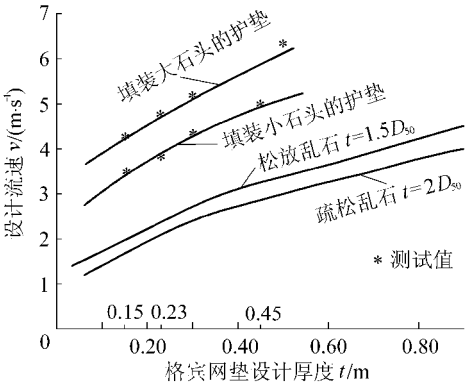


图 2 石笼网垫的初始设计厚度参考

在确定石笼网垫的初始设计厚度时,应综合考虑多方面的因素。当护坡承受海浪或者大型船舰航行时产生的波浪冲击时,应采用式(1)、式(2)中的最大值;一般河道仅应用式(1)即可。

1.4 允许切应力的计算

石笼网垫允许切应力的计算公式为

河床 $\tau_c = 0.1(\rho_s - \rho_w)D_{50}$ (3)

河堤 $\tau_s = \tau_c \sqrt{1 - \frac{\sin^2\theta}{\sin^241^\circ}}$ (4)

河道水流对石笼网垫的牵引切应力:

河床 $\tau_c = \rho_w \gamma i$ (5)

河堤 $\tau_m = 0.75 \rho_w \gamma i$ (6)

式中: τ_b, τ_m 为主动切应力, Pa; τ_c, τ_s 为允许切应力, Pa; ρ_w 为水密度, kg/m³; ρ_s 为石头密度, kg/m³; D_{50} 为填石的平均粒径, m; γ 为河道平均水深, m; θ 为河堤倾斜度(°)。

关于石笼网垫抗冲刷安全稳定方面的设计准则,国外主要有两种观点。其一是给河道水流对石笼网垫的牵引切应力乘以一个安全因子,其实质是给石笼网垫设置安全储备,这种观点的典型代表是美国联邦公路局^[6];其二是从石笼网垫和石笼网箱的极限变形角度考虑,即考虑整个石笼结构的整体效果,认为整体石笼结构的允许切应力应该较单个石笼体提高 20%,这种观点的典型代表是意大利的马克菲尔公司^[7]。

比较这两种设计观点,可见前者是偏保守的,而后的设计思路充分考虑了结构的整体性以及后续植被对结构抗冲刷性能的补强作用,与工程实际更加接近。考虑到马克菲尔公司多年的经验,笔者建议应用第二种设计准则,这与我国土木水利行业多年来的设计理念相反,工程师需做设计理念上的改变。相关的计算公式如下:

安全核算 $\tau_b \leq 1.2 \tau_c$ (7)

$\tau_m \leq 1.2 \tau_s$ (8)

1.5 石笼网垫/反滤层(或裸土)界面处的流速

根据曼宁公式,石笼网垫/反滤层(或裸土)界面处的流速按照式(9)计算:

$$v_b = \frac{1}{n_f} \left(\frac{D_{50}}{2} \right)^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

式中: n_f 为糙率(对于无反滤层和铺设土工布取 0.02,对于碎石反滤层取 0.025)。

为了满足设计安全的要求, v_b 必须小于等于衬砌下裸土所能允许的最大流速。衬砌下裸土所能允许的最大流速如表 3 所示^[7]。

根据有关实验成果,石笼网垫下铺设土工布后,极大地降低了流速,大约为 1/2 ~ 1/4 的 v_b (具体数值与选取的土工布特性有关),可有效地提高护坡的稳定性。在水流流速较大的河道中,建议在石笼网垫下铺设土工布。

1.6 石笼网垫的潜在变形

当水流对网垫的切应力达到导致填石做“初始

移动'的临界值时,石笼网垫每个格室内的填石将向下游移动,随着切应力的增加和更多填石运动的发展,石笼网垫的变形将越来越大(图3)。

表3 允许流速参考值

土质类别	允许流速/(m·s ⁻¹)	
	无反滤层	有反滤层
细砂	0.46	0.76
砂土	0.52	0.76
软黏土	0.60	0.91
淤泥	0.76	1.06
粗砂	0.76	1.52
硬黏土	1.13	1.52
砾石	1.22	1.82
扁砾石	1.52	1.67
坚硬黏土	1.82	1.82

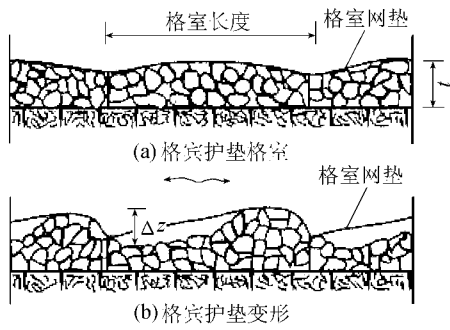


图3 网垫变形示意图

设计中用参数 $\frac{\Delta z}{D_{50}}$ 来估计石笼网垫的变形度,这里 Δz 表示一个格室内填石表面最高位置与最低位置的差值(如图4所示)。护垫有效变形系数计算公式如下:

河床 $C_{*b} = \frac{\tau_b - \tau_c}{(\rho_s - \rho_w)D_{50}}$ (10)

河坡 $C_{*s} = \frac{\tau_m - \tau_s}{(\rho_s - \rho_w)D_{50}}$ (11)

护垫格室中,上游部分的填石厚度折减量为 $\frac{\Delta z}{2}$,因此,为了保证土壤不直接暴露在水流冲刷下,要求:

$\frac{\Delta z}{D_{50}} \leq \alpha(t/D_{50} - 1)$ (12)

式中: t 为石笼网垫厚度。

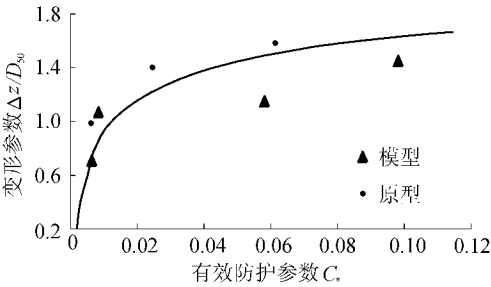


图4 变形系数和有效防护系数关系

由式(10)(11)计算有效变形系数 C_* ,由图4查得变形参数 $\Delta z/D_{50}$,应满足式(12)的要求。

2 设计程序

根据笔者多年的工程实践,参考国外成熟的设计程序,结合中国水利堤防工程的设计习惯,将石笼护坡结构的设计程序归纳如图5所示。

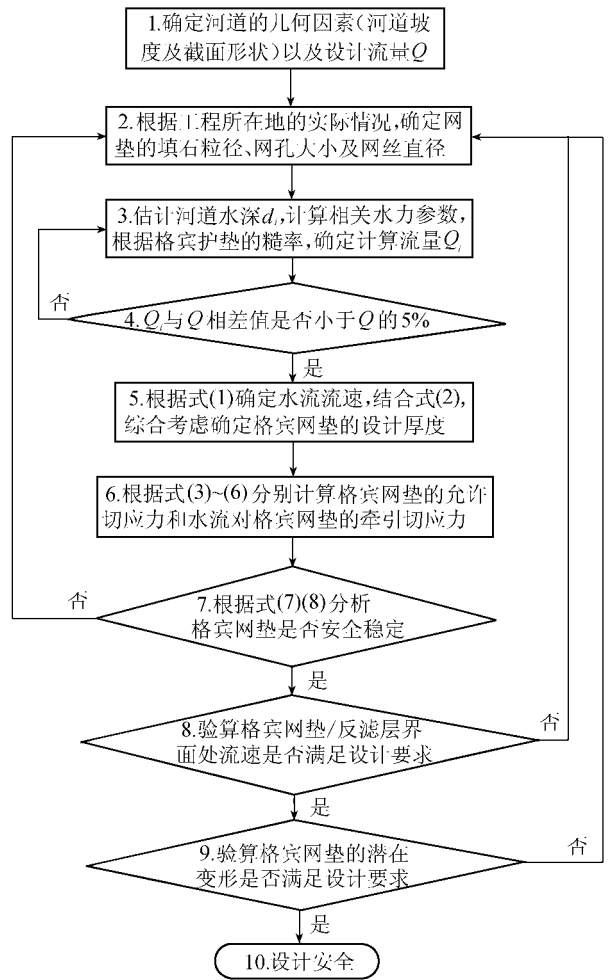


图5 石笼护坡结构设计程序

在步骤4中,如果计算流量 Q_i 与设计流量 Q 之间的误差超过5%,需重新估计河道水深 d_{i+1} ,对于后续迭代水深 d_{i+1} ,采用式(13)计算:

$d_{i+1} = d_i \left(\frac{Q}{Q_i} \right)^{0.4}$ (13)

3 结语

从2000多年前都江堰工程中使用的竹笼工法到1894年的意大利雷诺河的石笼护岸工法,使生态护岸工程到了新的层次,近年来石笼防护技术的快速发展,证明了石笼工法在水利防护工程中的重要地位。随着钢丝防腐技术的日新月异,石笼工法已成为一种安全、生态的永久工法。石笼工法在欧美、日本^[10]、韩国的应用历史证明了笔者的观点。但要

让这种工法在中国健康发展,为我国的生态水利事业作贡献,还有很多重要的工作要做,笔者认为当前首先要做的事如下:①尽快制定石笼产品的国家标准;②现行堤防设计规范,增补石笼护岸的相关设计、施工、验收等内容。限于篇幅,本文仅仅阐述了石笼护坡结构的设计方法,供设计人员参考。

参考文献:

[1] 王晓玲,王珏.格宾与雷诺护垫河岸防护结构管理[J].湖南水利水电,2006(2):84-86.
[2] 金德钢,孙尧,沈先秀.蜂巢挡墙在城市河道中的应用[J].浙江水利科技,2005(1):39-40,60.
[3] 伏永朋,赵欣,等.石笼技术在长江三峡三斗坪镇护岸防治工程中的应用[J].地质灾害和环境保护,2006(2):49-53.

[4] 陈梅,邱郁敏.河流护坡工程生态材料的应用[J].广东水利水电,2005(2):18-19,21.
[5] 张焕洲,谢平,等.格宾网材在黄石长江干堤合兴堤段的应用[J].人民长江,2005(9):38-39,48.
[6] U. S. Department of Transportation. Design of road channels with flexible linings[D]. Federal Highway Administration, 2005.
[7] P. za Porta Maggiore, 5 BOLOGNA. Bank protection reference manual[D]. Maccaferri Pty LTD, 2005.
[8] Dale Chaychuk. The use of gabions and reno mattresses in river and-stream rehabilita-tion[J]. Stormwater Industry association 2005 Regional Conference, 2005.
[9] GB 50286—98 堤防工程设计规范[S].
[10] 日本工业标准协会. Japanese industry standard of gabions [D]. Japanese Industry Standards Association, 2002.
(收稿日期:2007-03-05 编辑:高建群)

(上接第105页)

如果根据公式(6)进行计算,该电站水轮机在设计工况下的加权平均效率为87.73%;如果根据公式(7)计算,该电站水轮机在设计工况下的加权平均效率为93.45%。可以看出,采用公式(7)计算出来的加权平均效率值比采用公式(6)计算出来的结果高出5.72个百分点,因此,如果在不了解墨西哥当地对水轮机加权平均效率计算方式的特殊规定的情况下,墨西哥水电项目业主将难以接受中国推荐的水电设备。

2.4 两种计算方式的优、缺点

从上述分析可以得到:①公式(6)的计算方式实用于机组在整个工况范围内的工作水头变化幅度大,并且变化比较频繁的情形,但是对于机组主要集中工作在设计水头附近的情形,利用公式(6)计算出来的加权平均效率将会比实际值小。②公式(7)的计算方式实用于机组主要集中工作在设计水头附近的情形,对于这种情形,该计算方式可以相对准确地描述机组设备的加权平均效率,相反,对于机组在整个工况范围内的工作水头变化幅度大,并且变化比较频繁的情形,如果采用该计算方式,显然计算出来的加权平均效率值偏大,不能客观地反映设备的真实加权平均效率。

3 结 语

中国和墨西哥在水轮机加权平均效率计算方式上存在明显差异,二者有各自的使用优点和缺点,但是考虑到中国的水电企业通常容易惯性考虑问题,

习惯于简单地将中国在国内、外广泛成功使用的水电技术规范直接运用于有一定特殊性的国家(比如墨西哥),本文对于拟进入墨西哥水电市场的企业提供指导。

本文仅仅只是针对中国和墨西哥在水电项目中水轮机加权平均效率的计算方式差异进行了探讨分析,实际上除了加权平均效率计算方式的差异外,墨西哥联邦电力委员会在IEC标准基础上制定了许多其他类似的具有本土化特征的水电建设技术标准,比如:发电机电压等级、发电机的选型原则、厂用交、直流电电压和电流等级等一些有别于IEC标准的特殊规定,均需要拟进入墨西哥电力市场的中国设备厂家和设计院作深入了解,从这个角度来说,本文起到了抛砖引玉的作用。

参考文献:

[1] 刘启钊.水电站[M].3版.北京:中国水利水电出版社,1998.
[2] 向文平.水轮发电机组效率试验[EB/OL].http://www.ceppea.org,2002.
[3] 张恩博.丰满发电厂4号水轮机效率测试研究[J].东北电力技术,1999(11).
[4] CFE. Potencial hidroeléctrico nacional[C]//Subdirección de Construcción. Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos, 2000.
[5] Valdez Ingenieros SA de CV. Estudio para la identificación de proyectos nuevos y la rehabilitación de minicentrales en la zona de Orizaba, Veracruz, México [C]//CONAE-USAID-SNL, Coordinación Técnica, 2003.

(收稿日期:2006-07-21 编辑:高建群)