苏库恰克水库抛石防浪护坡的设计和应用

杨　剑[1],罗文忠[2]

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京　210098;2.叶尔羌河流域管理处设计院,新疆 喀什　843017)

摘要:针对苏库恰克水库主坝段受到风浪冲蚀较严重的现状,对主坝段部分严重冲蚀段进行抛石护坡,从坝坡稳定性角度考虑了所需的抛石粒径和抛石级配,得出抛石代表粒径为 12 cm,抛石厚度为 30 cm,从运行情况看抛石护坡效果较好.另外从抛石起动拖曳力角度讨论了抛石粒径公式,指出设计时可从坝坡稳定和石块起动拖曳力两方面综合考虑抛石粒径.

关键词:抛石护坡;护坡设计;抛石粒径;苏库恰克水库

中图分类号:TV640.39　　文献标识码:B　　文章编号:1006-7647(2005)S1-0108-03

1　水库概况

苏库恰克水库是叶尔羌河流域平原灌区大型水库之一,工程等别为Ⅱ等大(2)型,位于莎车县的艾里西湖镇内的遥路其栏杆与阿克栏杆之间,地理位置为东经 77°15″,北纬 38°45″,控制着莎车县的大部分灌区和新疆生产建设兵团农三师的部分团场,现有耕地 3.7 万 hm^2.水库于 1974 年 11 月开工,1985 年完成一期工程.现有库容 9 800 万 m^3,可调节库容 8 300 万 m^3,死库容 150 万 m^3. 土坝全长 21.2 km,其中主坝长 13.4 km,为砂质黏土心墙坝,主坝高 7.5 m,一般坝高为 4~5 m,副坝长 7.8 km,坝高 1~3 m.

由于库区盛行西北风,最大风速 14~24 m/s,平均风速 15.7 m/s,使东坝段坝坡冲蚀严重,曾采用过 20 cm 粗芦苇护坡,但由于风浪较大,坝坡填土被库水冲蚀消减,形成约 50~100 cm 的坎,效果不佳.也曾采用沿坝线内坡种树的方法,利用柳树发达的根系稳定坝坡,由于柳树种植在每年的 3~4 月,到了冬季还未成材,就由于库区结冰、冰推力较大,使树苗折断或连根拔起,树苗不能成活.抛石护坡是水库坝坡的一种较为古老的护面方法,具有价格便宜,柔性好,施工方法简单的特点,而且库区附近有充足的料源,故于 1999 年 5 月采用了抛石护面的方式对坝坡进行护面,经过这几年的运行发现抛石护坡效果较好.

2　抛石防浪护坡设计

2.1　抛石的粒径

依据斯维(Svee)推导岸坡块体的稳定性方程[1],并考虑岸坡方向的平衡得到抛石粒径公式:

$$d_{50} = \frac{K_r H}{(S-1)\cos\theta(1-\tan\theta\tan\phi)} \tag{1}$$

式中:d_{50}为换算球形设计抛石粒径,cm;H 为波高;K_r 为特定抛石块体常数,一般为 0.30~0.37;θ 为坡角;ϕ 为摩擦角;S 为抛石的相对密度.当波浪回落时,抛石块体间有水冲出,故 $\tan\phi$ 可取为 0,方程可简化为

$$d_{50} = \frac{K_s H}{(S-1)\cos\theta} \tag{2}$$

式中:K_s 为特定抛石块体常数,一般为 0.35~0.58.

另外,依据《碾压式土石坝设计规范》[2]以质量为设计指标计算抛石粒径:

$$Q_{50} = \frac{\gamma_k H^3}{5.5(\gamma_k - \gamma_w)m} \tag{3}$$

$$Q = 0.85 Q_{50} = 0.525\gamma_k d^3 \tag{4}$$

$$d = 0.85 d_{50} \tag{5}$$

式中:Q 为设计抛石的质量,t;Q_{50}为抛石的平均质量,t;d_{50}为抛石的平均粒径,m;m 为坝坡边坡系数;γ_k 为抛石的容重,kN/m^3;γ_w 为水的容重,kN/m^3.

联立式(3)~(5)得到以粒径为设计指标的表达式:

$$d_{50} = \frac{0.783H}{\sqrt[3]{m(\gamma_k - \gamma_w)}} \tag{6}$$

苏库恰克水库抛石的代表粒径分别采用式(2)和式(6)进行计算.其中,水库的波高采用官厅公式 $H = 0.0166 W^{\frac{5}{4}} D^{\frac{1}{3}}$ 进行计算[3],$H = 0.505$ m;水库的

作者简介:杨剑(1975—),男,新疆阿克苏人,工程师,硕士研究生,从事防灾减灾研究.

坝坡在 1:5 ~ 1:12 之间,计算时取 1:12;抛石的相对密度为 2.6.按式(2)、式(6)计算抛石的代表粒径,结果分别为 11.1 cm 和 14.8 cm,设计时取 12 cm.

2.2 抛石的级配

抛石的级配影响护坡的稳定性.尺寸变化不大的抛石空隙大,能吸收部分波能而减小爬高但所承受的力也较大.均匀级配的抛石,大石块间的空隙被小石块填充,这样可以改善内部连接,在浪压力作用下可增强护坡的整体稳定性.一般抛石的级配要求满足如下关系式[2]:

$$1.6d_{\min} \leqslant d_{50} \leqslant 0.6d_{\max} \tag{7}$$

式中:$d_{\min}$为抛石最小粒径,cm;$d_{\max}$为抛石最大粒径,cm.

2.3 抛石的厚度

抛石护坡的厚度,可以根据抛石最大粒径的质量来确定[2]:

$$t = \sqrt[3]{\frac{Q_{\max}}{0.75\gamma_k}} \tag{8}$$

式中:t 为抛石的厚度,cm;$Q_{\max}$为抛石最大粒径的质量,t.

变换式(8)可得以粒径为指标的厚度公式[2]:

$$t = \sqrt[3]{\frac{0.525\gamma_k d_{\max}^3}{0.75\gamma_k}} = 0.89d_{\max} \tag{9}$$

苏库恰克水库所采用的最大抛石粒径为 35 cm 左右,由此计算出抛石的厚度为 30 cm 即可.

3 抛石防浪护坡应用

实际应用中考虑到造价等因素不可能对抛石料进行筛分后再铺筑在坝坡上,因而选用符合或接近于上述设计控制指标的料场就显得尤为重要.施工时以勿甫渠首处的料场作为护坡用料来源之一,由于料场 4 ~ 8 cm 的颗粒占相当大的比例,占有 62.3%,不能完全满足设计要求,为了使抛石的粒径满足设计要求,我们将进水闸附近每年清淤堆在沿岸的粒径在 10 ~ 25 cm 的卵石与天然料场石料混合使用,这样基本满足前面设计的 $d_{50} = 12$ cm 的要求.混合后的抛石粒径分配曲线如图 1 所示,可以看出基本满足设计要求.

经过这几年的运行可以看出抛石护坡效果较好,可以很大程度地保护坝坡不受风浪冲蚀.而且,由于抛石护坡具有良好的柔性,冬季不怕冰冻的影响,可有效地减少边坡冻胀现象,水库结冰后冰盖下粘有的少量石子来年化冻又回落在坝坡上.从运行上可以看出影响护坡安全的最大因素是抛石粒径及抛石级配.由于设计时采用的公式大多为半经验公式,往往不能够较为全面地考虑各种影响抛石稳

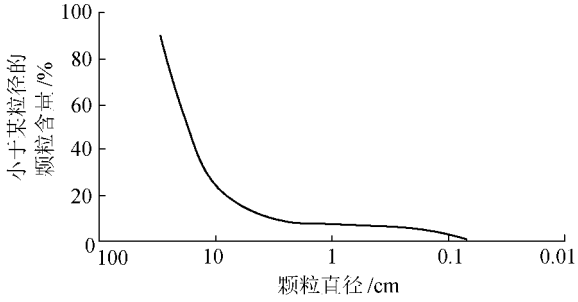

图 1 抛石料颗粒级配曲线

定的因素,使得计算结果对于本地工程应用难免出现偏差.同时,应用时为降低工程造价没有像做反滤层一样对抛石按照不同的粒径分层铺筑.事实上按粒径从小到大分层铺筑才是最为有效的办法,而目前已有部分小石子被回落的波浪带走.结合工程应用实践从理论上建立一种较为通用的设计方法,合理确定抛石的粒径控制指标,对水库抛石防浪这种古老的护面形式是十分必要的.

4 抛石防浪护坡设计方法探讨

抛石护坡设计的最终目的是确定适宜的抛石粒径、级配及相应的抛石厚度.抛石尺寸应以防止被波浪搬动为准.石块的稳定性与下列因素有关[1]:抛石的形状、尺寸、质量和挤实情况;坝坡的坡度、排水设施、抛石附着状态;波浪要素如波高、波形、波幅、质点速度、进入角频率和含气量等.由此可以看出,现有的抛石设计方法最终可以归结为以粒径指标为核心,抛石护坡的关键参数就是粒径,能建立起波长、抛石容重、内摩擦角、坝坡坡脚等与抛石粒径的关系式也就找到了可行的设计方法.

对易冲河槽边界以及土渠弯曲段的抛石设计已经有较成熟的方法,这些设计方法的理论基础主要是利用拖曳力理论形成的,拖曳力常用在抛石设计技术上,因为它描述了发生在边坡边界上的力.但对于水库的抛石护坡,由于抛石主要用于防护波浪的侵蚀冲刷,而波浪作用于坝坡边界层的机理较为复杂,能否运用起动拖曳力的相关理论建立起设计计算方法,关键在于弄清楚波浪作用于边坡边界的机理以及以护坡的哪一级粒径为代表粒径.从工程的安全考虑建议采用 d_{60}为代表粒径,则以坝坡起动拖曳力为指标的石块起动条件为[4]:

$$\frac{\tau_{mc}}{(\gamma_k - \gamma_w)d_{60}} = 0.275\pi c_f\left(\frac{a_0}{d_{60}}\right)^{1/4} \tag{10}$$

$$\tau_{mc} = \frac{1}{2}c_f\rho\mu_{mc}^2 \tag{11}$$

$$\mu_{mc} = Na_0 = \frac{\pi H}{T\sinh(2\pi h/L)} \tag{12}$$

式中:τ_{mc}为起动拖曳力;μ_{mc}为起动流速;(下转第 115 页)

泄压孔和修改基坑内部支撑设计方案等措施，支撑轴力逐渐稳定．可见，监测工作可以对工程的安全施工和不断修正、优化设计提供有价值的参考．

b．通过对图 4～7 四组实测值与预测值对比分析，不难发现预报序列与实测序列变化趋势基本一致，说明本文模型具有良好的模拟效果和自适应性，基本能反映实际轴力变化情况．为了得到关于时间序列模型的更深入认识，我们进行了 2 步预报和 3 步预报，从结果可以看出，随着预测步数的增加，预报精度也随之下降，其最大误差 δ_{max} 和平均误差 $\bar{\delta}$．也逐渐增加（见表 2）．此外我们还发现，A 组和 B 组的预测效果明显要好于 C 组和 D 组，分析当时施工情况不难发现，C 组和 D 组所在位置当时安装有塔吊等起重设备，表明施工对监测数据有着明显的干扰．

表 2　4 组轴力数据预测误差值　%

预测步数	A 组		B 组		C 组		D 组	
	δ_{max}	$\bar{\delta}$	δ_{max}	$\bar{\delta}$	δ_{max}	$\bar{\delta}$	δ_{max}	$\bar{\delta}$
1 步预测值	4.52	1.41	4.20	1.39	6.42	2.23	8.25	3.06
2 步预测值	4.52	2.23	6.93	2.07	9.56	3.54	10.05	4.33
3 步预测值	7.90	2.70	7.28	2.88	13.94	4.70	15.57	5.21

3　结论与建议

a．时间序列动态预测对基坑安全监测工作具有一定的参考价值．

b．时间序列预测模型具有很强的自适应性，预测精度较高，但随着预测步数的增加预报效果也随之下降．

c．工程的施工干扰对数据的准确采集有着明显的影响，所以在进行监测工作时应注意减少工程施工对监测的不良影响．

d．时间序列预测模型在进行短期预报时有着很好的效果，但如何进一步提高时间序列预测模型的预报周期尚待进一步研究．

参考文献：

[1] 田铮．动态数据的处理与方法[M]．西安：西北工业大学出版社，1995：25-48．

[2] 吴中如，沈长松，阮焕祥．水工建筑物安全监控理论及应用[M]．南京：河海大学出版社，1990：36-52．

[3] 华似韵．随机过程[M]．南京：东南大学出版社，1988：1-10．

[4] 汪荣鑫．随机过程[M]．西安：西安交通大学出版社，1987：3-15．

[5] 夏乐天，朱永忠．工程随机过程[M]．南京：河海大学出版社，2000：163-180．

[6] 张树京，齐立心．时间序列分析简明教程[M]．北京．清华大学出版社，2003：78-87．

（收稿日期：2005-09-08　编辑：马敏峰）

（上接第 109 页）

c_f 为阻力系数；ρ 为水的密度；a_0 为波浪作用下水质点在床面附近的水平方向振幅；L 为水面波波长；h 为水深；T 为周期．

式（10）的左侧也就是希尔兹希在分析单向流中泥沙起动时所用的参数，由式（11），作用于坝坡上的波浪起动拖曳力条件可以转化成起动流速条件，而起动流速可由式（12）计算，这样公式（10）所计算出的抛石代表粒径是波浪高、周期等的函数．再依据从坝坡稳定性方程建立起的抛石粒径与波浪浪高、坝坡等设计参数的函数关系式（式（1）），这样综合考虑就找到了既有理论依据又能够应用于水库防浪抛石护坡实际工程中的一般关系式，从而扩大了应用范围．由于目前对于波浪高、周期等没有统一的公式，而且不同的坝坡取决于回落波还是涌波也是不一样的，所以本文没有给出抛石护坡的统一计算式，可根据不同情况采用公式（2）或式（6）或（10）分别计算抛石粒径，结合工程安全、抛石稳定等因素选取最佳抛石粒径．

5　结论与建议

水库抛石护面是最为古老的一种护面形式之一，其料源广泛、造价低廉、易于施工，但缺乏系统的设计方法，本研究基于坝坡稳定方程来确定抛石粒径，从工程运行情况来看效果较好．事实上抛石设计中波浪因素是较难确定的，这进一步增加了设计方法所得结果的不确定性．另外采用何种粒径作为计算代表粒径是值得研究的．本文从抛石的起动拖曳力角度建立了可用于设计的代表粒径公式，在实际应用中可结合坝坡稳定性公式综合考虑选优，对设计具有一定的指导意义和应用价值．

参考文献：

[1] 斯蒂芬森 D．堆石工程水力计算[M]．北京：海洋出版社，1984：221-225．

[2] 中华人民共和国水利部．SL274—2001 碾压式土石坝设计规范[S]．北京：中国水利水电出版社，2002．

[3] 左东启，王世夏，林益才．水工建筑物[M]．北京：海洋出版社，1984：221-225．

[4] 钱宁．泥沙运动力学[M]．北京：水利电力出版社，1980．

（收稿日期：2005-05-09　编辑：骆超）