

南京市石臼湖风浪特性及防护设计研究

徐惠民¹, 张子龙¹, 王登婷², 任增谊¹

(1. 南京市水利规划设计院, 江苏 南京 210001; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 石臼湖是南京市面积最大的天然湖泊, 2013 年, 南京市计划进一步提升湖泊的堤防防洪能力, 以使堤防达到 20 ~ 50 年一遇防洪标准。为优化堤防护坡设计, 进行了湖泊的风浪特性分析、护坡型式及厚度与风浪关系的研究, 可为类似工程研究和设计提供参考。

关键词: 湖泊; 风浪; 爬高; 岸坡防护; 模型试验

中图分类号: TV212 文献标识码: B 文章编号: 1007-7839 (2018) 07-0001-06

Study on characteristics of wind wave and protection design of Shijiu Lake in Nanjing City

XU Huimin¹, ZHANG Zilong¹, WANG Dengting², RENG Zengyi¹

(1. *Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd, Nanjing 210098, Jiangsu;*

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu)

Abstract: The Shijiu Lake is the largest natural lake in Nanjing City. In 2013, Nanjing planed to further improve the flood control capacity of the lake, so that the levee could meet the flood control standard of 20 to 50 years. In order to optimize the design of dike slope protection, the wind wave characteristics analysis, and the relationship between the type and thickness of slope protection and the wind wave were studied, which could provided reference for similar engineering research and design.

Key words: lake; wind wave; run-up; bank slope protection; model test

0 引言

石臼湖是南京市最大的天然湖泊, 面积 214.7 km², 平均水深 2.47 m, 是长江下游青弋江、水阳江流域的调蓄性湖泊。湖泊水生生物资源丰富, 是江苏省重要的生态系统多样性湖泊。多年来, 在径流调蓄、农业灌溉、城乡供水、水产养殖及维系生态平衡等方面发挥了重要作用。同时, 湖泊的防洪安全也关系着溧水、高淳地区沿湖广大群众生命财产安全和工农业生产的安危。

1999 ~ 2002 年南京市曾对湖堤进行加固, 加

固防洪标准为 20 ~ 40 年一遇, 在防御 1999、2002、2003、2005、2010 年等年份大洪水中发挥了重要作用。但受当时条件所限, 堤防治理标准不高, 加固措施未到位, 综合功能考虑不足。

2013 年, 南京市计划进一步提升堤防防洪能力, 使堤防达到 20 ~ 50 年一遇防洪标准。石臼湖堤防工程按防洪类型分为城市防洪堤 (高淳区段, 2 级堤防)、非城市防洪堤两类 (溧水区段, 3 级堤防)。

根据现场调查, 现状护坡主要存在以下问题: 堤防迎水坡受风浪冲刷、掏蚀损毁严重, 风化较

收稿日期: 2018-06-04

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFC1404206); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重大项目 (Y218006)、重点项目 (Y218005)。

作者简介: 徐惠民 (1964—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利水电工程、岩土工程规划设计工作。

严重,尤其是部分堤段 7 ~ 10 m 高程(吴淞高程,下同)护坡受风浪多年冲刷后移位、剥落,10 m 高程纵格埂倾斜断裂,已经严重影响堤防安全。

由于各段堤防前湖面宽度、堤前水深均不相同,为因地制宜确定护坡型式,故对石臼湖堤防进行分段,对每段堤防前的风浪要素进行分析计算。根据不同的堤防坡比、风浪要素拟定护坡厚度,通过模型试验验证设计护坡的稳定性,比较堤顶弧形挡浪墙减少风浪爬高的效果,为经济合理确定堤防设计断面提供依据。

1 石臼湖风浪特性研究

1.1 研究内容

收集工程水域及其周边的风速资料,推算石臼湖水域不同方向的设计风速,根据湖面宽度和堤前水深对堤防进行分段,分别计算每段堤防的设计波要素,并分析不同规范计算公式对计算结果的影响。

1.2 研究采用的基础资料

设计洪水位: 12.50 m。

警戒水位: 为验证中水位时护坡稳定性,取警戒水位 10 m。

溧水站实测风速: 溧水气象站测站位置在永阳镇分龙岗路 4 号,测风仪器距地高度 10.9 m。图 1 为溧水气象站 2010 ~ 2011 年风向玫瑰图。从图 1 中可以看出: 常风向为 ESE 向,次常风向为 E、ENE 向; SW ~ W ~ NW 向风出现频率相对较少。

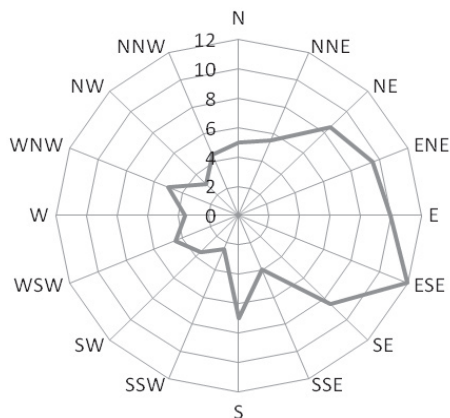


图 1 溧水气象站 2010 ~ 2011 年风向玫瑰图

图 2 为采用溧水气象站 1981 ~ 2010 年各方向年最大风速资料得到的经过高度及陆—水订正后石臼湖水域不同方向 1.0 倍多年平均年最大风速玫瑰图。从图 2 中可以看出: 强风向为 NNE 和 E 向,风

速为 15 m/s; 次强风向为 ENE 和 ESE 向,风速为 14 m/s; 其中 SE、SSE、S 向风速最大值小于 10 m/s 其余方向风速最大值均大于 10 m/s。

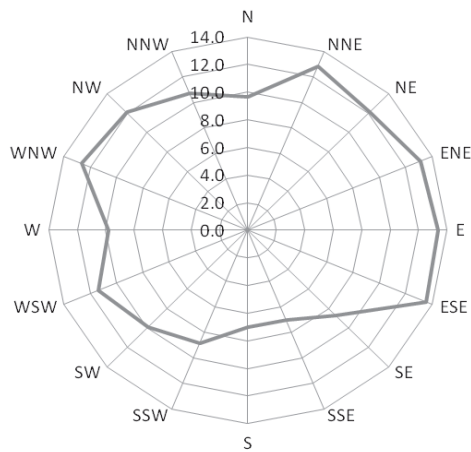


图 2 高度及陆—水订正后湖区不同方向 1.0 倍多年平均年最大风速玫瑰图

1.3 研究成果

1.3.1 堤防分段

由于风浪特征的影响因素主要是风速、吹程和堤前水深。因此,需根据堤防迎风向的不同和堤前湖面宽度对堤防进行分段计算风浪要素。堤防分段的原则是堤防的走向及堤前风区长度、堤防前沿水深基本相同。

图 3 为石臼湖风浪计算分段示意图。其中 A 段、A1 段为溧水区的非城市防洪圈,堤防级别为 3 级; B 段为高淳区的城市防洪圈,堤防级别为 2 级。

1.3.2 堤防分段风浪要素计算

根据《碾压式土石坝设计规范》《堤防工程设计规范》^[1-2] 的规定,采用溧水气象站 1981 ~ 2010 年不同方向最大值多年平均统计结果并进行高度及陆—水订正后,得到石臼湖不同条件下的设计风速,详见表 1。其中 1.0 倍多年平均年最大风速发生在 B 段,风速值为 13.1 m/s。表 2 列出了各段湖面宽度(风区长度)。

表 1 石臼湖各段全年最大值多年平均计算风速

位置	(m/s)		备注
	1.0 倍多年平均年最大风速	1.5 倍多年平均年最大风速	
A	12.6	18.9	
B	13.1	19.7	
A1	8.9	13.4	

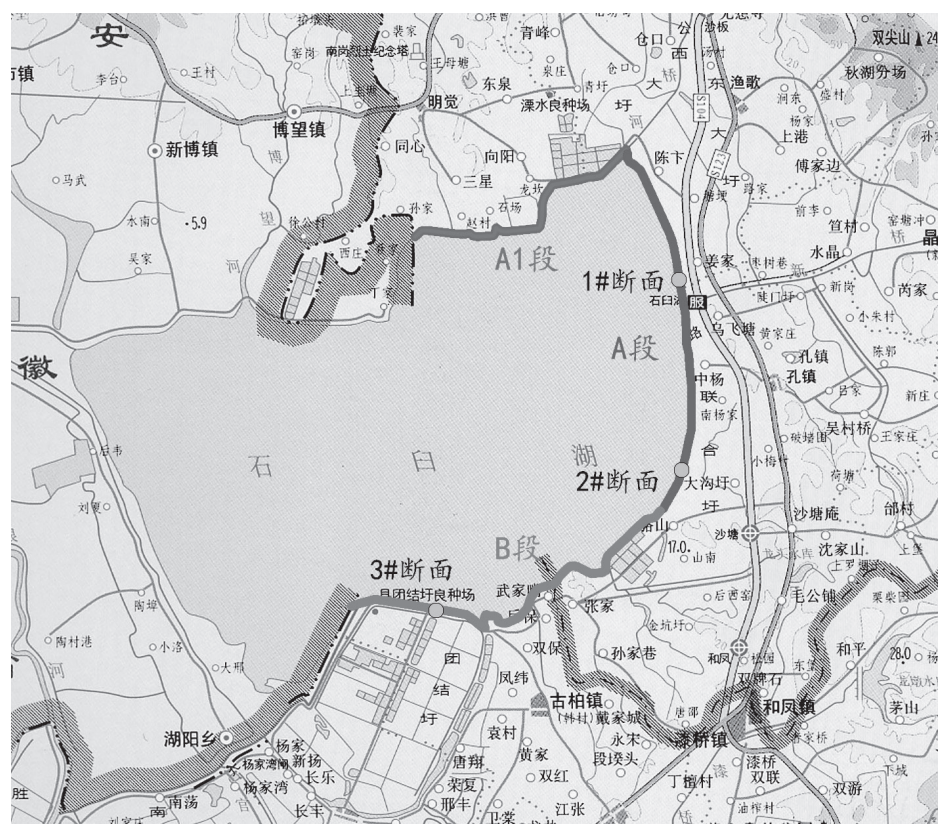


图 3 石臼湖风浪计算分段示意图

表 2 石臼湖不同位置风区长度

位置	风区长度 (km)	备注
A	12.6	
B	11.4	
A1	11.5	

根据《碾压式土石坝设计规范》《堤防工程设计规范》的规定, 风浪要素均是采用莆田试验站公式进行计算的, 但是对计算风速的选取略有差别:《碾压式土石坝设计规范》规定警戒水位下的 1 级、2 级坝, 采用多年平均年最大风速的 1.5 ~ 2.0 倍; 警戒水位下的 3 级、4 级、5 级坝, 采用多年平均年最大风速的 1.5 倍; 非常运用条件下, 采用多年平均年最大风速。《堤防工程设计规范》规定设计波浪的计算风速可采用历年汛期最大风速平均值的 1.5 倍。

经比较分析及考虑实测风速资料情况, 项目组按《碾压式土石坝设计规范》计算了各水位下风浪要素成果如下:

(1) 警戒水位:

A 段在 1.5 倍多年平均年最大风速情况下计算得到有效波高为 0.81 m;

B 段在 1.5 倍多年平均年最大风速情况下计算得到有效波高为 0.82 m, 也是石臼湖各段中警戒水位所算得的最大有效波高;

A1 段在 1.5 倍多年平均年最大风速情况下计算得到有效波高为 0.62 m。

(2) 设计洪水位:

A 段在 1.0 倍多年平均年最大风速情况下计算得到有效波高为 0.74 m, 在 1.5 倍多年平均年最大风速情况下计算得到有效波高为 1.05 m;

B 段在 1.0 倍多年平均年最大风速情况下计算得到有效波高为 0.74 m, 在 1.5 倍多年平均年最大风速情况下计算得到有效波高为 1.07 m, 该波高为石臼湖所考虑的所有水深、所有分段情况下计算得到的最大有效波高;

A1 段在 1.0 倍多年平均年最大风速情况下计算得到有效波高为 0.51 m, 在 1.5 倍多年平均年最大风速情况下计算得到有效波高为 0.75 m。

1.3.3 石臼湖护坡厚度及波浪爬高验算

根据《堤防工程设计规范》《碾压式土石坝设计规范》的规定, 对护坡混凝土板厚度及波浪爬高进行计算。由于 2 种规范关于计算护坡混凝土板厚度公式有所区别, 所以分别采用 2 种规范

的公式对各堤段在坡度为 1:1.5 和 1:3.0 情况下进行计算, 对各段在现状代表坡度的混凝土厚度, 只采用《堤防工程设计规范》规定的公式进行计算。

对应上述风浪特性的混凝土板厚度、波浪爬高、干砌块石厚度设计值计算成果如下:

石臼湖 A 段、B 段混凝土板 ($B=2.0\text{ m}$) 所需稳定厚度为 $15\text{ cm} \sim 20\text{ cm}$, A1 段混凝土板 ($B=2.0\text{ m}$) 所需稳定厚度为 $10\text{ cm} \sim 15\text{ cm}$, 如现有的混凝土板厚度低于该数值, 则存在一定安全隐患。

混凝土板厚度、波浪爬高、干砌块石厚度的最大值均发生在 B 段, 在设计洪水位下, B 段最大混凝土板厚度为 23 cm , 最大波浪爬高为 2.71 m , 所需干砌块石最大厚度为 37 cm 。

在相同的风速条件下, 护坡厚度和风浪爬高对坡度都比较敏感, 坡度越缓, 需要的护坡厚度和风浪爬高越小, 其中风浪爬高对坡度更为敏感; 而护坡厚度对护坡在垂直堤轴线方向的分块尺寸也比较敏感, 分块尺寸越大, 需要的护坡厚度越小。

在坡度较陡 (1:1.5) 时, 利用《堤防工程设计规范》计算得出的护坡厚度偏大, 而坡度较缓 (1:3.0) 时, 根据《堤防工程设计规范》计算得出的护坡厚度略微偏小。

2 堤防护坡模型试验研究

为了更准确地对加固方案进行验证和分析, 参考水库护坡系列模型试验研究成果^[3-8], 对不同波浪条件下堤防护坡稳定性和风浪爬高进行了模型试验, 为合理确定护坡厚度、采取必要的坡面消浪措施提供重要依据。

2.1 试验设备及仪器

波浪试验在南京水利科学研究院河港研究所长波浪水槽中进行, 该水槽可同时产生波浪、水流和风。水槽长 175 m 、宽 1.2 m 、深 1.8 m 。水槽

的工作段平均分割成各 0.6 m 宽的两部分, 一部分用来安放模型断面和进行模型试验, 另一部分用于扩散造波板的二次反射波。水槽的一端配有消浪缓坡, 另一端配有推板式不规则波造波机, 由计算机自动控制产生所要求模拟的波浪要素。该造波系统可根据需要产生规则波和不同谱型的不规则波。

波浪要素采用电阻式波高仪测量, 由计算机自动采集和处理。越浪量采用接水箱称取水重。

2.2 模型设计

试验遵照《波浪模型试验规程》^[9] 相关规定, 采用正态模型, 按照 Froude 数相似律设计。根据设计水位、波浪要素、试验断面及试验设备条件等因素, 模型几何比尺取为 15, 各物理量比尺如下:

几何比尺: $L_r=15$

波压力比尺: $p_r=L_r$

时间比尺: $T_r=L_r^{1/2}$

重量比尺: $P_r=L_r^3$

越浪量比尺: $q_r=L_r^{1.5}$

2.3 试验断面的选取

本次试验对石臼湖选取了 3 个典型断面。石臼湖典型断面位置图见图 3。图 4 ~ 图 6 为 3 个断面示意图, 其中 1#、2# 断面为非城市防洪圈, 采用石臼湖 A 段波要素; 3# 断面为城市防洪圈, 采用石臼湖 B 段波要素。1#、3# 断面堤顶设弧型挡浪墙。

2.4 试验断面的模拟

试验首先制作防浪墙、干砌块石和混凝土板模型, 制作过程中保证其重量和几何相似, 重量误差控制在 3% 以内, 几何误差控制在 1% 以内。然后对试验断面按几何比尺缩小后进行放样, 构建试验断面。

2.5 试验方法

先进行波浪要素率定, 然后构建试验断面, 试

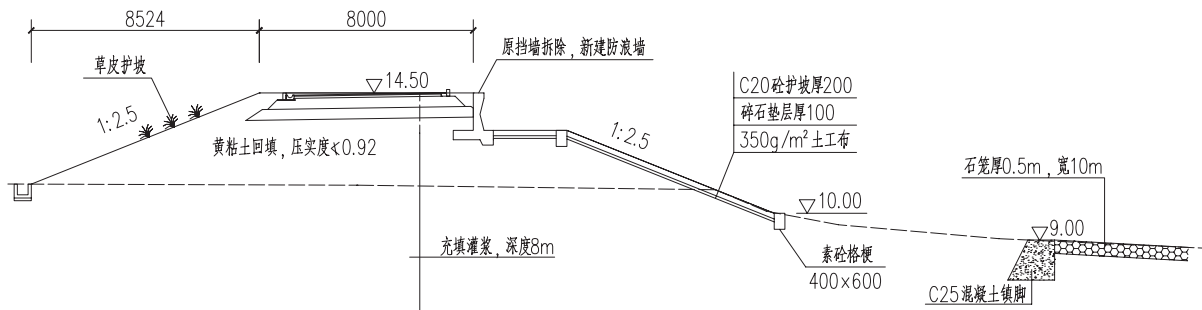


图 4 1# 断面示意图

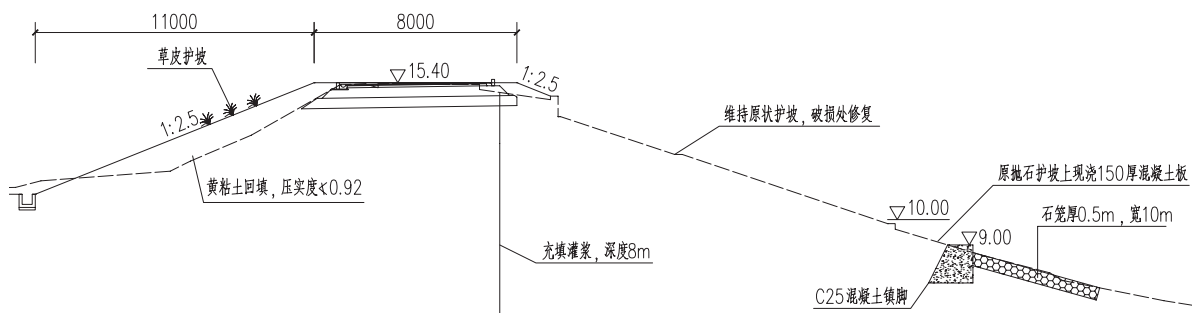


图5 2#断面示意图

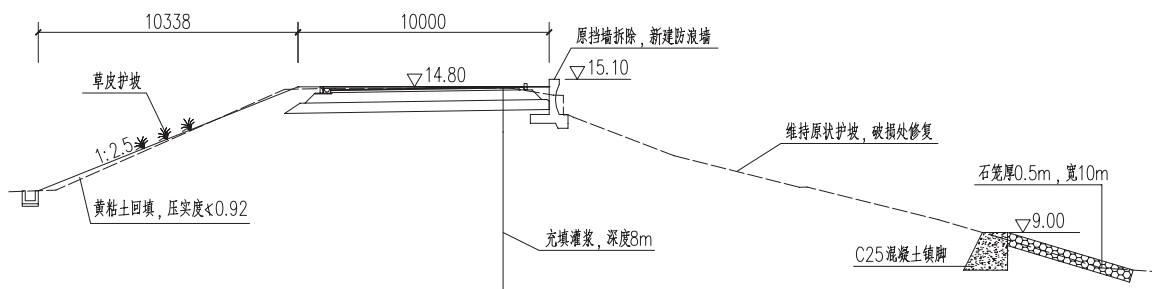


图6 3#断面示意图

验时先用小波作用,以使堤身密实,然后按设计波要素造波,进行各项内容的试验。

试验断面各部位在波浪作用下的稳定性情况时,每一波况累计试验持续时间不小于原型3h,为保证试验结果的可靠性,每组试验至少重复3次。当3次重复试验的试验结果差别较大时,则增加重复次数。每次试验均重新铺放断面。

2.6 试验结果

(1) 防浪墙、素混凝土格梗、C25混凝土镇脚、石笼等的稳定性

设计拟定的石臼湖各断面的防浪墙、素混凝土格梗、C25混凝土镇脚、石笼等均满足波浪作用下的稳定性要求。

(2) 混凝土板的稳定性

石臼湖1#断面,在设计洪水位、1.5倍多年平均最大风速波浪作用下,稳定的混凝土板厚度为20cm(板宽为2m)和25cm(板宽为1.5m);2#、3#断面,15cm厚的混凝土板便有很好的稳定性,但是板宽不应小于1.5m。

(3) 波浪爬高及堤顶高程

石臼湖1#断面设计顶高程为14.5m,在设计洪水位+1.0倍多年平均年最大风速波浪作用时,波浪爬高至13.1m,在设计洪水位+1.5倍多年平均年最大风速波浪作用时,波浪爬高至13.8m。

石臼湖2#断面设计顶高程为15.4m,在设计

洪水位+1.0倍多年平均年最大风速波浪作用时,波浪爬高至13.6m,在设计洪水位+1.5倍多年平均年最大风速波浪作用时,波浪爬高至14.7m。

石臼湖3#断面设计顶高程为15.1m,在设计洪水位+1.0倍多年平均年最大风速波浪作用时,波浪爬高至13.7m,在设计洪水位+1.5倍多年平均年最大风速波浪作用时,波浪爬高至14.4m。

2.7 圆弧防浪墙防浪特性研究

为了验证圆弧防浪墙的防浪效果,对普通斜坡断面和堤顶加圆弧防浪墙典型断面进行波浪爬高及防浪效果对比验证。本次试验共选用2种断面,第一断面采用1:2斜坡至高程18.0m处,以2#断面为例,测量波浪沿该斜坡的爬高情况;第二断面将第一断面堤顶斜坡改为圆弧防浪墙的典型断面,堤顶高程及坡度等其它条件一致。研究主要结论如下:

(1) 本次试验所用波浪要素在设计洪水位,坡度为1:2的斜坡上可以爬高至15.8m。

(2) 在本次试验所用波浪要素情况下,当圆弧防浪墙顶高程为14.5m时,波浪未能越过防浪墙。

(3) 在本次试验所用波浪要素情况下,当圆弧防浪墙顶高程为14.1m时,有少许水花可以越过防浪墙,且未见成片水体越过防浪墙。因此,仍然可以起到很好的防浪作用。

3 研究结论及建议

3.1 结论

(1) 本研究的理论计算和试验验证的结果基本一致,可见,本研究所取的风浪计算参数是基本准确的,按《堤防工程设计规范》的规定计算所得的成果是可靠的,精度满足设计要求。

(2) 石臼湖各段堤防在设计洪水位+1.5倍多年平均年最大风速工况下,因风速大、吹程长,石臼湖的东、南侧堤防在现状坡比下,风浪爬高均超过2 m。

(3) 在相同的风速条件下,护坡厚度和风浪爬高对坡度比较敏感,坡度越缓,需要的护坡厚度和风浪爬高越小;而护坡厚度对护坡在垂直堤轴线方向的分块尺寸也比较敏感,分块尺寸越大,需要的护坡厚度越小。

(4) 设计拟定的石臼湖各断面的防浪墙、素混凝土格梗、C25混凝土镇脚、石笼等均满足波浪作用下的稳定性要求。

(5) 采用圆弧防浪墙有很好的防浪效果,当圆弧防浪墙顶高程为14.5 m时,没有波浪越过防浪墙顶;当把防浪墙顶高程降为14.1 m时也仅有少量水花可以越过防浪墙,但未见成片水体越过防浪墙。因此,仍然可以起到很好的防浪作用。

3.2 建议

(1) 从风浪爬高计算和试验验证结果来看,除北侧堤防外,其它段堤防设计堤顶高程均应超过14.5 m。但考虑到大幅提高堤顶高程的实施难度,堤顶超高可维持2 m,同时结合堤防防渗要求,对堤防进行加宽处理,局部风浪爬高突出的堤段,可按允许越浪设计,同时在迎水坡采取坡面消浪措

施。

(2) 石臼湖不同位置混凝土板护坡稳定厚度:石臼湖A段、B段(东、南侧堤防)混凝土板($B=2.0$ m)所需的稳定厚度为15~20 cm,A1段(北侧堤防)混凝土板($B=2.0$ m)所需的稳定厚度为10~15 cm,如现有的混凝土板厚度低于该数值,则存在一定的安全隐患,需要进行加固处理。

(3) 部分风浪较大堤段的干砌块石护坡存在因厚度不够而发生损坏的现象,考虑到直接加厚干砌块石较难实现,建议对干砌块石发生损坏的堤段采用直接在干砌块石上铺放满足厚度要求的混凝土板的加固方案。

参考文献:

- [1] GB50286-2013,堤防工程设计规范[S].
- [2] SL274-20018,碾压式土石坝设计规范[S].
- [3] 乔树梁,等.纯化水库围坝护坡风浪模型试验[R].南京:南京水利科学研究院,1998.
- [4] 乔树梁,等.鹊山水库围坝护坡风浪模型试验[R].南京:南京水利科学研究院,1998.
- [5] 乔树梁,等.丁东水库护坡风浪模型试验[R].南京:南京水利科学研究院,1996.
- [6] 潘军宁,王登婷.临淮岗洪水控制工程主、副坝护坡抗风浪试验报告[R].南京:南京水利科学研究院,2003.
- [7] 潘军宁,王登婷.临淮岗洪水控制工程主坝护坡抗风浪补充试验报告[R].南京:南京水利科学研究院,2003.8.
- [8] 余广明.堤坝防浪护坡设计[M].北京:水利电力出版社,1987.
- [9] JTJ/T 234-2001,波浪模型试验规程[S].