

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0081

徐麦菊, 叶伟, 徐章耀, 等. 某土石坝上游护坡型式改变影响坝顶高程的试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 149-154. XU M J, YE W, XU Z Y, et al. Experimental study on effect of the upstream slope protection type change of an earth rock dam[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 149-154. (in Chinese)

某土石坝上游护坡型式改变影响 坝顶高程的试验研究

徐麦菊¹, 叶伟², 徐章耀³, 刘永强³, 马福恒²

(1. 平顶山市昭平台水库管理局, 河南 平顶山 467300; 2. 南京水利科学研究院 大坝安全与管理研究所, 南京 210029;
3. 河南省白龟山水库管理局, 河南 平顶山 467301)

摘要: 针对病险水库除险加固过程中会出现的上游护坡型式改变的情况, 基于物理模型试验, 研究各工况下干砌石与混凝土两种类型护坡的波浪爬高及越浪情况, 确定护坡类型变化对波浪爬高和坝顶高程的影响。以某水库大坝为例, 采用 1: 15 的模型比尺进行了不同护坡型式典型断面的波浪物理模型试验。研究发现, 由于干砌石、混凝土两种型式护坡的糙渗系数相差 0.15, 干砌石护坡改为混凝土护坡后最大波浪爬高计算值增长 0.56 m, 试验值增长 0.6 m, 此情况下坝顶的现状高程不能满足规范要求; 改变护坡型式后波浪冲击坝顶胸墙而产生的跃浪量也会增加, 胸墙收到的最大波浪压力从 15.9 kPa 增至 17.8 kPa。试验的成果对类似除险加固工程的设计工作具有借鉴意义。

关键词: 土石坝; 护坡; 坝顶高程; 模型试验; 糙渗系数

中图分类号: TV 641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0149-06

Experimental study on effect of the upstream slope protection type change of an earth rock dam

XU Maiju¹, YE Wei², XU Zhangyao³, LIU Yongqiang³, MA Fuheng²

(1. Management Bureau of Zhaopingtai Reservoir, Pingdingshan 467300, China;

2. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Management Bureau of Baiguishan Reservoir, Pingdingshan 467301, China)

Abstract: In view of the upstream slope protection type change in the process of the reinforcement of dangerous reservoirs, we conducted a physical model test to study the wave run up and overtopping situation of the dry masonry slope protection type and the concrete type, and determined the effect of slope protection type change on the wave run up and crest elevation. In this paper, we took a reservoir dam for a case study. A wave physical model test of a typical section of the slope protection types was carried out at the scale of 1: 15. The test results showed that the roughness coefficients of the dry masonry and concrete types differed by 0.15. After the change of slope protection type from dry masonry to concrete, the calculation value of the maximum wave run up increased by 0.56 m, and the test value increased by 0.6 m. In this condition, the original crest elevation could not meet the standard requirements. In addition, after the change of slope protection, the wave overtopping will also increase. The maximum wave pressure on the parapet will increase from 15.9 kPa to 17.8 kPa. The results of the test can provide a reference to the design of similar reinforcement projects.

Key words: earth and rockfill dam; slope protection; crest elevation; model test; roughness coefficient

收稿日期: 2018-01-20 修回日期: 2018-04-07 网络出版时间: 2018-04-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20180426.1803.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51779155); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y716007)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51779155); Fundamental Research Funds for Central Public Welfare Research Institutes(Y716007)

作者简介: 徐麦菊(1974), 女, 河南陕县人, 高级工程师, 主要从事水工结构安全和管理的工作。E-mail: 5087363@163.com

20 世纪 50 年代至 70 年代我国修建了大量水库, 由于历史原因及设计施工水平的限制, 多数大坝存在病险问题。一般而言, 常见的水库病险主要分 7 个方面: 防洪、抗震、大坝结构、大坝渗流、输、泄水建筑结构、金属结构和机电设备及管理设施等^[1-4]。其中, 大坝结构病险问题又主要包括护坡破损、坝坡不稳定、断面不足等 3 个方面。通常, 土石坝上游可采用块石、现浇混凝土及预制混凝土块等型式^[5]进行护坡整治。以昭平台水库为例, 水库除险加固过程中将主坝上游护坡型式由原干砌石改为混凝土面板。然而, 护坡型式的改变将影响糙率渗透性系数^[6-10], 影响波浪爬高, 使得坝顶高程不满足要求, 继而影响大坝的防洪。

姜树海和范子武^[11]定量评估了坝顶高程的时变特性, 论证了陡变性作用对大坝防洪安全的影响极为显著。焦景辉等^[12]提出在混凝土板上采用台阶结构加糙以降低坝顶高程, 这一措施使糙率渗透性系数数值降低到了砌石标准(0.75~0.8), 大大节省了工程投资。乔树梁^[13]进行了坝顶高程确定的影响因素的分析, 认为需要根据水库所在地风速、上游坡比、不同的运行工况等综合条件进行分析计算。可见, 坝顶高程与护坡型式、采取的措施和环境条件等多个因素有关^[14-18]。护坡型式改变后复核波浪爬高、跃浪量等对大坝防洪至关重要^[19-23]。

某水库拦河坝原上游护坡为砌石, 除险加固工程改为混凝土, 从而增加了风浪爬高, 安全评价复核认为主坝坝顶高程不满足规范要求, 对大坝防洪安全不利^[24]。为进一步确定护坡类型变化对波浪爬高的影响, 本文选取拦河坝典型断面, 采用 1:15 的模型比尺进行了断面波浪爬高物理模型试验, 模拟得到了不同工况下干砌块石及混凝土两种护坡型式下的波浪爬高, 测量了越浪和胸墙结构波浪压强等。综合试验成果, 分析了上游护坡型式改变对坝顶高程的影响。

1 试验系统

波浪试验在南京水利科学研究院波浪水槽(见图 1)中进行, 水槽长 64 m、宽 1.8 m、深 1.8 m。水槽可同时产生波浪、水流和风等多种环境因素。水槽的工作段分割成 0.8 m 和 1.0 m 两部分, 0.8 m 段用来布置物理模型和进行模型试验, 另一段则用于扩散造波板的二次反射波。水槽的一端配有消浪缓坡, 另一端配有丹麦水工研究所(DHI)生产的推板式不规则波造波机。造波系统由计算机自动控制产生需模拟的波浪要素, 可根据需要产生规则波和

不同谱型的不规则波。为消除水槽试验中波浪的多次反射, 造波板上安装 DHI 研制的二次反射吸收装置(ARC)。波压力采用 CSY-0 型压力监测系统测量。波浪要素和爬高采用电阻式波高、爬高仪测量, 由计算机自动采集处理; 越浪量采用接水箱称取水重。

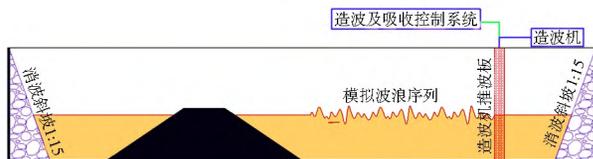


图 1 水槽、造波机及模型示意图

Fig. 1 Diagram of the flume, wave maker, and model

2 试验模型

2.1 模型设计

水库拦河坝为黏土斜墙砂壳坝, 断面见图 2。现状坝顶高程 181.8 m, 最大坝高 35.5 m, 坝顶长 2 315 m, 顶宽 7.0 m、净宽 6.4 m。防浪墙高 1.2 m, 墙顶高程 183 m。除险加固主坝上游护坡由原干砌石护坡改为混凝土面板护坡, 胸墙也在以往的维护工程中发生变化。由于水库水域面积较大, 承受较大风浪作用, 根据相关规范, 计算平均波浪爬高时干砌石护坡糙率系数取 0.75, 混凝土护坡糙率系数取 0.90, 两者相差 0.15, 使得风浪爬高增加, 可能导致坝顶高程不足。为进一步确定护坡型式改变对风浪爬高及胸墙越浪的影响, 需通过断面物理模型试验, 测量设计洪水位和校核洪水位情况下两种类型护面的波浪爬高及胸墙顶的越浪情况。

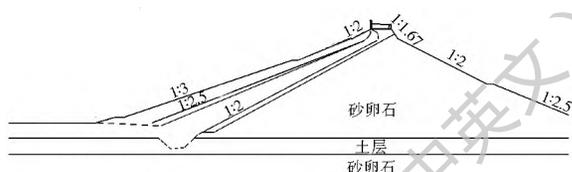


图 2 试验断面

Fig. 2 Typical test section

试验断面选择拦河坝上游坝坡至挡浪墙结构, 并分别构建了干砌块石和混凝土面板两种护坡模型。试验首先制作胸墙、干砌块石和混凝土面板模型; 制作过程保证重量和几何相似, 且将重量、几何误差分别控制在 3%、1% 以内。然后对试验断面按几何比尺缩小后进行放样, 构筑大坝断面, 断面尺寸误差也控制在 1% 以内(见图 3)。大坝 170.00 m 高程设有宽 2 m 的平台, 上坡有两种坡度, 177.00 m 高程以上坡度为 1:2.0, 177.00~170.00 m 高程为 1:2.5; 下坡 170.00~157.00 m 高程为 1:3.0, 以下至坝脚为 1:3.5。坝顶设有胸墙, 防浪墙顶高

程为 183.00 m, 墙顶设有 5 cm 宽挑檐。

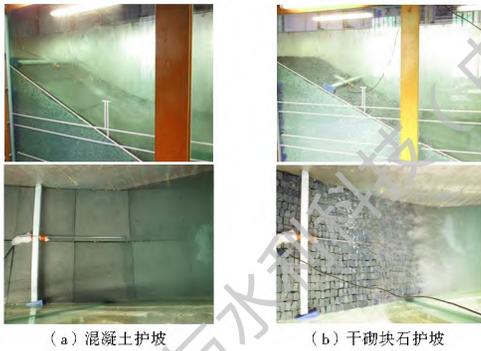


图3 不同护坡型式的波浪爬高试验模型

Fig. 3 Wave run up test models for different types of slope protection

试验遵照 JTJ 234-2001《波浪模型试验规程》相关规定^[25], 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 $L_r = 15$, 时间比尺: $T_r = L_r^{1/2}$, 重量比尺: $P_r = L_r^3$, 压强比尺: $P_r = L_r$ 。试验分别采用规则波和不规则波进行, 以不规则波为主, 规则波作为对比, 每组试验重复 3 次。

波浪的平均波高和平均周期采用莆田试验站公式。

$$\frac{gH_m}{W^2} = 0.13 \tanh[0.7(\frac{gh_m}{W^2})^{0.7}] \cdot \left\{ \frac{0.0018(\frac{gD}{W^2})^{0.45}}{0.13 \tanh[0.7(\frac{gh_m}{W^2})^{0.7}]} \right\} \quad (1)$$

$$T_m = 4.438 H_m^{0.5} \quad (2)$$

式中: H_m 为平均波高(m); T_m 为平均波周期(s); W 为平均波周期(m/s); D 为风区长度(m); h_m 为水域平均水深(m); g 为重力加速度, 取 9.81 m/s^2 ; W 为设计风速(m/s); 正常运用条件下的 1 级、2 级坝, 采用多年平均年最大风速的 1.5~2.0 倍; 非常运用条件下, 采用多年平均年最大风速。

由当地气象局提供的 1980-2011 年气象资料, 分方向统计后可得该地区年最大平均风速为 15.0 m/s 。由于当地气象局观测场高度 145.7 m , 风杆高度 10.5 m , 而水库校核洪水位为 180.75 m , 高于观测场高度。因此, 将气象站风速进行修正得到相应水面上风速, 为 19.5 m/s ; 多年平均年最大风速取为 24.0 m/s 。从而, 试验所用波浪要素的依据风速分别取 15.0 m/s 、 19.5 m/s 和 24.0 m/s 等 3 种。拦河坝为 2 级, 正常运用条件下取多年平均年最大风速的 1.5 倍, 因此, 风速分别取为 22.5 m/s 、 29.3

m/s 和 36.0 m/s 。在正常运用和非正常运用情况下的风区长度分别为 5454 m 和 5600 m , 由上述 3 种风速及 1.5 倍的值, 采用莆田试验站公式计算得到坝前校核洪水位(非正常运用条件)和设计洪水位(正常运用条件)波浪要素列于表 1。

表 1 断面试验波浪要素

Tab. 1 Wave parameters in the test

水位	$H_{1\%}/\text{m}$	H_s/m	H_m/m	T_m/s
校核洪水位 180.75 m	1.16	0.77	0.48	3.07
	1.54	1.02	0.64	3.54
	1.93	1.28	0.80	3.96
设计洪水位 177.06 m	1.77	1.17	0.73	3.79
	2.34	1.55	0.97	4.37
	2.90	1.94	1.21	4.87

规则波采用 $H_{1\%}B$ 波高和平均周期, 不规则波的波谱采用 JONSWAP 谱。模型中的波高、波周期等物理量按重力相似准则确定。

2.2 试验内容和试验方法

试验水位分别为校核洪水位 180.75 m 和设计洪水位 177.06 m 。

试验内容包括测量设计洪水位和校核洪水位情况下, 干砌块石护坡、混凝土护坡的波浪爬高、墙顶越浪以及胸墙压强。首先进行波浪要素率定, 试验时先用小波作用, 以使堤身密实, 然后按设计波浪要素造波, 进行各项内容的试验。

(1) 斜坡护面波浪爬高试验。

在坡度为 1:2.0 的足够长斜坡上布置波高仪, 测量混凝土面板及干砌块石型式时的波浪爬高。

(2) 胸墙越浪测量断面试验。

测量一个波列作用下的越浪水体重量, 然后除以一个波列作用时间, 从而得到平均单宽越浪量。试验在大坝断面后侧安置一接水箱, 箱内置一台微型水泵, 随时将越浪水体抽出, 并称重, 以计算越浪水量。

在胸墙中心线布置压强测点, 测量胸墙压强, 进行压强测量。

3 试验成果及分析

3.1 波浪爬高试验

护坡结构型式的糙渗系数 K_Δ 是反映其消浪性能的重要参数, 不同结构型式的糙渗系数 K_Δ 使斜坡上的爬高也不相同。在校核洪水位、设计洪水位及相应波浪作用下, 波浪爬高试验结果和数值计算结果列于表 2。

表 2 不同护面波浪爬高计算及试验结果

Tab. 2 Calculation and test results of wave run up on different surfaces

水位	波浪	波浪爬高/m					
		混凝土板			干砌块石		
		试验值		计算值	试验值		计算值
		$R_{1\%}$	$R_{13\%}$	$R_{1\%}$	$R_{1\%}$	$R_{13\%}$	$R_{1\%}$
校核洪水水位 180.75 m	$H_{1\%} = 1.16 \text{ m}, T_m = 3.07 \text{ s}$	1.98	1.32	1.97	1.55	1.05	1.65
	不规则波 $H_{1\%} = 1.54 \text{ m}, T_m = 3.54 \text{ s}$	2.51	1.68	2.65	2.34	1.56	2.21
	不规则波 $H_{1\%} = 1.93 \text{ m}, T_m = 3.96 \text{ s}$	3.45	2.26	3.36	2.85	1.92	2.80
设计洪水水位 177.06 m	不规则波 $H_{1\%} = 1.77 \text{ m}, T_m = 3.79 \text{ s}$	3.08	1.91	3.11	2.61	1.72	2.59
	不规则波 $H_{1\%} = 2.34 \text{ m}, T_m = 4.37 \text{ s}$	4.35	2.91	4.32	—	—	—
	不规则波 $H_{1\%} = 2.90 \text{ m}, T_m = 4.87 \text{ s}$	5.82	3.85	5.77	—	—	—

由表 2 可见, 试验爬高结果与计算值相差不大。在校核洪水水位不规则波 ($H_{1\%} = 1.16 \text{ m}, T_m = 3.07 \text{ s}$) 作用下, 混凝土板护坡波浪爬高 $R_{1\%}$ 为 1.98 m, 加上安全超高, 已超过坝顶高程。因此, 爬高试验结果表明, 将护坡由干砌块石改为混凝土面板, 坝顶高程已不能满足规范要求。

3.2 越浪量

由于波浪爬高只是表示波浪在斜坡上的爬升高度, 而坝顶实际采用带挑檐的直立胸墙结构。因此, 需要模拟坝顶胸墙结构, 通过越浪量试验, 观测波浪的越顶状况。试验中波浪作用于坝顶胸墙的状况见图 4, 各工况下胸墙越浪量列于表 3。



(a) 校核洪水水位 (b) 设计洪水水位

图 4 不同工况下波浪对胸墙的作用

Fig. 4 Effect of the wave on the parapet under different conditions

表 3 越浪量测量结果

Tab. 3 Measurement results of the wave overtopping

水位	波浪要素 (不规则波)	越浪量 $\text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$	
		混凝土面板	干砌块石
校核洪水水位	$H_{1\%} = 1.16 \text{ m}, T_m = 3.07 \text{ s}$	1.0×10^{-3}	5.1×10^{-4}
	$H_{1\%} = 1.54 \text{ m}, T_m = 3.54 \text{ s}$	1.1×10^{-3}	6.3×10^{-4}
	$H_{1\%} = 1.93 \text{ m}, T_m = 3.96 \text{ s}$	1.4×10^{-3}	8.3×10^{-4}
设计洪水水位	$H_{1\%} = 1.77 \text{ m}, T_m = 3.79 \text{ s}$	1.2×10^{-4}	0
	$H_{1\%} = 2.34 \text{ m}, T_m = 4.37 \text{ s}$	1.4×10^{-4}	0
	$H_{1\%} = 2.90 \text{ m}, T_m = 4.87 \text{ s}$	1.5×10^{-4}	0

从试验结果可看出, 即使是在设计洪水水位、24 m/s 风速下的波浪 ($H_{1\%} = 2.90 \text{ m}, T_m = 4.87 \text{ s}$) 的情况下, 越浪量也较小, 只有 $1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$ 。然而, 在试验过程中 (图 4) 可看到, 由于胸墙和挑檐

的作用, 虽然越过胸墙的水量较小, 但波浪作用于胸墙时溅起较大水花。如果遭遇 7~9 级左右大风作用, 溅起的水体受风力影响可能越过胸墙。如考虑风力对爬高后波浪的影响, 越浪量将会有较大增加。

3.3 胸墙压强

为分析校核洪水水位、设计洪水水位及相应波浪要素组合下波浪爬高对胸墙作用, 胸墙自上而下布置了 6 个测点, 测量所受压强, 测点布置见图 5。由于设计洪水水位时波高较小, 波浪难以作用到胸墙上部, 使得胸墙所受波浪压力较小。校核洪水水位 15 m/s 的风速压强试验结果见表 4。由表可见, 在校核洪



图 5 挡浪墙压力传感器布置图

Fig. 5 Layout diagram of pressure sensors in wave wall

表 4 校核洪水水位压强试验结果 (风速 15 m/s 时波浪作用)

Tab. 4 Pressure test results at the check flood level (wave action at the wind speed of 15 m/s)

测点号	kPa			
	混凝土板护坡		干砌块石护坡	
	最大值 p_{\max}	有效值 $p_{13\%}$	最大值 p_{\max}	有效值 $p_{13\%}$
1	10.0	6.5	8.2	5.2
2	11.7	8.3	10.5	7.9
3	13.4	9.4	13.1	8.9
4	17.8	12.5	15.9	10.3
5	16.2	11.3	15.6	10.0
6	15.9	10.4	15.1	9.5

水位、根据 15 m/s 的风速得到的不规则波($H_{1\%} = 1.16 \text{ m}$, $T_m = 3.07 \text{ s}$)作用下,混凝土面板护坡情况下胸墙最大压强为 17.8 kPa。

4 结论

本文以某水库大坝为例,采用 1:15 的模型比尺进行了不同护坡型式下的波浪断面物理模型试验,由试验可以得到如下结论。

(1) 将上游护坡型式由干砌块石改为混凝土面板后,糙渗系数发生了显著变化,坝顶高程已不能满足规范的要求。

(2) 试验中观察到由于大坝胸墙顶部设有挑檐,波浪上爬后被反卷会水库,因此越浪量较小。但实际情况是在发生较大波浪作用时,风速也较大,如果在试验中考虑风的影响,越浪量将会有较大幅度的增加。

(3) 试验结果供其他除险加固工程参考,在改变护坡型式后应同时复核相应的波浪爬高,或加以物理模型试验,以合理确定坝顶高程,或采取加糙措施,以保障水库的防洪能力。

参考文献(References):

[1] 谭界雄,位敏.我国水库大坝病害特点及除险加固技术概述[J].中国水利,2010(18):17-20.(TAN J,WEI M. Summary on the dam disaster character and reinforcement technology in China[J].China Water Resources,2010(18):17-20.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2010.18.006.

[2] 张大伟,李雷.水库大坝除险加固体制机制问题与对策思考[J].中国水利,2013(10):31-36.(ZHANG D,LI L. Issues and measures related to institutional mechanism of dammed reservoir reinforcement[J].China Water Resources,2013(10):31-36.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2013.10.012.

[3] 盛金保,刘嘉焯,张士辰,等.病险水库除险加固项目溃坝机理调查分析[J].岩土工程学报,2008,30(11):1620-1625.(SHENG J B,LIU J X,ZHANG S C. Investigation and analysis of failure mechanism of reinforced dams[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(11):1620-1625.(in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1000-4548.2008.11.008.

[4] 严祖文,魏迎奇,张国栋.病险水库除险加固现状分析及对策[J].水利水电技术,2010,41(10):76-79.(YAN Z W,WEI Y Q,ZHANG G D. Status analysis and countermeasures for risk elimination and reinforcement of dangerous reservoir[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2010,41(10):76-79.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-0860.2010.10.019.

[5] 谭界雄,位敏.我国水库大坝病害特点及除险加固技术概述[J].中国水利,2010(18):17-20.(TAN J X,WEI M. Summary on the dam disaster character and reinforcement technology in

China[J].China Water Resources,2010(18):17-20.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2010.18.006.

[6] 江慧慧.水库除险加固大坝内坡干砌石护坡论证计算方法[J].企业科技与发展,2010(8):96-97.(JIANG H H. Calculation methods of protecting slope of dry laid stone of risk elimination and reinforcement dam[J].Enterprise Science And Technology & Development,2010(8):96-97.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1674-0688.2010.08.036.

[7] 卢贵.大坝贴坡技术在水库除险加固中的应用[J].企业科技与发展,2011(17):73-74.(LU G. On the application of dam fitting slope technology to reservoir reinforcement[J].Enterprise Science And Technology & Development,2011(17):73-74.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1674-0688.2011.17.026.

[8] 吴美安,孙勇,李启涛.混凝土砌块护坡护面层稳定厚度的计算方法[J].人民黄河,2006,28(1):62-64.(WU M A,SUN Y,LI Q T. Methods for calculating stable thickness of concrete protected slopes[J].Yellow River,2006,28(1):62-64.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2006.01.026.

[9] 张开富,王萍.小型水库除险加固工程上游护坡及坝顶型式探讨[J].北京农业,2012(36):117.(ZHANG K F,WANG P. Consideration of small reservoir reinforcement project of upstream slope protection and dam top type[J].Beijing Agriculture,2012(36):117.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-6966.2012.36.116.

[10] 张欣.土坝混凝土护坡设计有关问题的探讨[J].吉林水利,2016(9):11-12.(ZHANG X. Discussion on some problems in the design of concrete slope protection for earth dam[J].Jilin Water Resources,2016(9):11-12.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1009-2846.2016.09.004.

[11] 姜树海,范子武.时变效应对大坝防洪风险率的影响研究[J].水利学报,2006,37(4):425-430.(JIANG S W,FAN Z W. Influence of time varying effect on flood control risk rate for dams[J].Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(4):425-430.(in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0559-9350.2006.04.007.

[12] 焦景辉,李辉.吉林省新立城水库坝顶高程复核及加固处理研究[J].长春工程学院学报(自然科学版),2010(2):54-57.(JIAO J H,LI H. Research on the review of crest elevation and reinforcement of xinlicheng reservoir dam in Jilin Province[J].Journal of Changchun Institute of Technology(Natural Science Edition),2010(2):54-57.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1009-8984.2010.02.015.

[13] 马中响.水库坝顶高程确定的影响因素分析[J].中国水运月刊,2016,16(4):136-138.(MA Z X. Analysis of the factors affecting the reservoir crest elevation determined[J].China Water Transport,2016,16(4):136-138.(in Chinese))

[14] 乔树梁,杜金曼,陈国平,等.湖泊风浪特性及风浪要素的计算[J].水利水运工程学报,1996(3):189-197.(QIAO S L,DU J M,CHEN G P,et al. Calculation of characteristics and factors of wind and wave in lakes[J].Hydro Science and Engineering,1996(3):189-197.(in Chinese)) DOI:10.16198/j.cnki.1009-640x.1996.03.001.

[15] 张丹.上升水库护坡工程设计[J].水利科技与经济,2011,17

- (1): 60-61. (ZHANG D. Design of slope protection in shangshen reservoir[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2011, 17(1): 60-61. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2011.01.024.
- [16] 牟忠善, 王玉鑫, 于忠华. 东湖水库围坝上游护坡及坝顶高程设计[J]. 山东水利, 2011(11): 9-12. (MOU Z S, WANG Y X, YU Z H. Design of slope protection and crest elevation in Donghu Reservoir[J]. Shandong Water Resources, 2011(11): 9-12. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-6159.2011.11.005.
- [17] 郑殿祥, 周荣星, 金瑞清, 等. 平原水库波浪爬高计算方法探讨[J]. 人民黄河, 2009, 31(3): 86-87. (ZHEN D X, ZHOU R X, JIN R Q, et al. Approach to calculation methods of wave ascent of a plain reservoir[J]. Yellow River, 2009, 31(3): 86-87. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2009.03.041.
- [18] 张士辰, 厉丹丹, 郭利娜. 基于工程安全程度与溃决概率关系的中国水库工程安全等级划分标准初步研究[C]. 大坝技术及长效性能研究进展, 2011. (ZHANG S C, LI D D, GUO L N. Preliminary study on Chinese reservoir engineering safety classification standard based on the relationship between engineering safety degree and burst probability[C]. 2011(in Chinese))
- [19] 朱嘉玲, 王震, 孙天霆, 等. 斜向规则波作用下斜坡堤波浪爬高试验研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(2): 33-37. (ZHU J L, WANG Z, SUN T T, et al. Experimental study on wave run up of sloping seawall under oblique regular waves[J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(2): 33-37. (in Chinese)) DOI: 10.7640/zggwjs201702007.
- [20] 陈培波. 波浪对石笼护面块体作用的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015. (CHEN P B. Experimental study on the wave of stone cage armor block effect[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [21] 孙开畅, 李权, 尹志伟, 等. 基于 Rackwitz-Fiessler 方法的土石坝漫顶风险数学模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(3): 327-331. (SU N K C, LI Q, YIN Z W, et al. Mathematical model of overtopping risk for earth-rock dam based on Rackwitz-Fiessler method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(3): 327-331. (in Chinese)) DOI: 10.14188/j.1671-8844.2017-03-002.
- [22] 祁国军, 袁新明. 斜坡堤栅栏板护面波浪爬高数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(5): 16-19. (QI G J, YUAN X M. Numerical simulation of wave run up on fence panels of sloping dikes[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(5): 16-19. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2012.05.004.
- [23] 常江, 柳淑学, 李金宣, 等. 滨海斜坡复式护岸断面波浪爬坡试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2015(1): 60-66. (CHANG J, LIU S X, LI J X, et al. Experimental research for wave run up on coastal compound slope revetment[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2015(1): 60-66. (in Chinese)) DOI: 10.7511/dlgsxb201501009.
- [24] 南京水利科学研究所. 河南省平顶山市昭平台水库安全评价报告[R]. 2016. (Nanjing Hydraulic Research Institute. Safety Evaluation Report of Zhaopingtai Reservoir in Pingdingshan, Henan. 2016. (in Chinese))
- [25] JT/T 234-2001. 波浪模型试验规程[S]. (JT/T 234-2001. Test Rules for Wave Model[S]. (in Chinese))