

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221035

# 高防浪墙土石坝波浪爬高对比分析

银佳男<sup>1</sup>, 张彦泽<sup>2</sup>, 杨海滔<sup>1</sup>, 王胜利<sup>2</sup>, 曹宇隆<sup>3</sup>

(1. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130021; 2. 内蒙古水务投资集团有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 内蒙古引绰济辽供水有限责任公司, 内蒙古 兴安 137699)

**摘要:** 针对高防浪墙在坝坡坝顶附近由倾斜变为直立的情况, 利用数值模拟和物理模型试验的方法对波浪爬高计算进行相互印证。对不同波浪要素、坝前水深工况进行分析, 研究高防浪墙对水库波浪爬高的影响。结果表明, 同一波浪要素针对不同水库水深时, 波浪爬高随着水库水深呈倒抛物线趋势; 波浪爬高在水深位于防浪墙直立段与坝坡斜坡段交汇处最大; 当墙前水深高于直立段与斜坡段交汇处时, 与数模和物模结果相比, 规范法计算的波浪爬高偏大。研究结果可为土石坝工程设计时考虑波浪爬高影响的高防浪墙顶高程精细化设计提供参考。

**关键词:** 高防浪墙土石坝; 波浪爬高; 规范法; 数学物理模型试验

**中图分类号:** TV22

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)08-0098-03

## 1 引言

土石坝具有经济、适应地质和气候条件广且施工方法灵活简单等优点<sup>[1]</sup>, 是应用最广泛的坝型之一。随着我国能源结构的调整, 在推进绿色低碳, 兑现“双碳”目标承诺的背景下, 作为绿色能源的水电及抽水蓄能电站在保证电网安全、促进电力系统优化运行中发挥着重要作用, 在筑坝成库坝型选择过程中土石坝占比较大。目前我国已建、在建多座土石坝均采用高防浪墙的形式, 如西北口面板坝、尼尔基水利枢纽、文得根水利枢纽等; 其中抽水蓄能电站上、下水库大坝更是以土石坝为主, 如广州抽蓄上库、黑龙江荒沟抽蓄等。土石坝坝顶高程的确定包括波浪爬高、坝前风壅高度和安全加高三部分<sup>[2]</sup>。其中坝前风壅高度与水库水文气象条件相关, 安全加高则由规范严格规定。波浪爬高除了与水库水文气象条件相关外, 还与波高、坝坡坡度、波陡、坡面糙率和透水性、风速及相对于建筑物的入射波向等有关<sup>[3]</sup>。波浪爬高是指波浪在坝坡上爬高与静水面之间的垂直距离。土石坝设计时, 坝顶高程是一个重要参数, 直接关系到工程的安全和投资, 而波浪爬高是确定坝顶高程的最重要因素, 是设计时需考虑的

重点。目前土石坝设计均采用规范法<sup>[4]</sup>计算波浪爬高, 相关研究大多局限于海工工程<sup>[5,6]</sup>, 对土石坝等深水波爬高研究较少, 且大多利用经验与半经验状态, 计算出的波浪爬高偏大。鉴于此, 本文采用规范法、数值模拟、物理模型试验分别计算波浪爬高, 并分析了坝前水深对波浪爬高的影响, 旨在为土石坝工程设计中考虑波浪爬高影响的高防浪墙坝顶高程精细化设计提供参考。

## 2 规范法计算波浪爬高

根据《碾压式土石坝设计规范》<sup>[4]</sup>, 当上游坡比  $m=1.5\sim 5.0$  时, 平均波浪爬高计算公式为:

$$R_m = K_\Delta K_w \sqrt{H_m L_m} / \sqrt{1+m^2} \quad (1)$$

式中,  $R_m$  为波浪平均爬高;  $K_\Delta$  为斜坡的糙率渗透系数, 根据相似准则取 0.9;  $K_w$  为经验系数, 取 1;  $H_m$  为平均波高;  $L_m$  为平均波长;  $m$  为斜坡的坡度系数, 取 2.1。

波浪要素及规范法<sup>[4]</sup>计算的波浪爬高见表 1。

表 1 波浪要素

Tab. 1 Wave characteristics

波浪要素	波浪 1	波浪 2	指标	波浪 1	波浪 2
波长/m	18	23.4	周期/s	3.39	3.87
波高/m	1	1.5	波浪爬高/m	1.65	2.29

收稿日期: 2022-05-16, 修回日期: 2022-09-21

基金项目: 国家重点研发计划(SQ2020YFF0423889)

作者简介: 银佳男(1992-), 男, 工程师, 研究方向为水工结构, E-mail: 1041627884@qq.com

## 3 波浪爬高计算

### 3.1 数值模拟

#### 3.1.1 控制方程

波浪流动的特点<sup>[7]</sup>为:①自由表面随时间不断变化;②水流紊动性强;③波浪传播过程中遇到建筑物波面易破碎。为更好地模拟坝前波浪特性,采用 FLUENT 内置的两方程 RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  紊流模型、压力速度耦合的 PISO 算法求解非定常状态下紊流问题,并利用 VOF 方法对波浪自由表面进行跟踪。标准  $\kappa$ - $\epsilon$  模型是一种高雷诺数的模型,RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  理论提供了一个考虑低雷诺数流动粘性的解析公式,更适合涉及低雷诺数流动的波浪问题的模拟。控制方程为:

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y = 0 \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial a_q}{\partial t} + \frac{\partial (ua_q)}{\partial x} + \frac{\partial (va_q)}{\partial y} = 0 \\ \sum_{q=1}^2 a_q = 1 \quad q=1,2 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $u$ 、 $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的流体速度; $p$  为流体压强; $\rho$  为流体密度; $\mu$  为流体动力粘滞系数; $a_q$  为体积分数,若  $a_q = 1$  表示第  $q$  相占据整个网格单元。

为减小反射波的影响,采用松弛造波法。造波方式采用速度边界法,3 阶 Stokes 波形方程为:

$$\begin{aligned} \eta &= a \cos(kx - \omega t) + \\ &(\pi a^2 / L) f_2(d/L) \cos 2(kx - \omega t) + \\ &(\pi^2 a^3 / L^2) f_3(d/L) \cos 3(kx - \omega t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$f_2(d/L) = \frac{[2 + \text{ch}(2kd)] \text{ch}(kd)}{2 \text{sh}^3(kd)} \quad (6)$$

$$f_3(d/L) = \frac{3}{16} \left[ \frac{1 + 8 \text{ch}^6(kd)}{\text{sh}^6(kd)} \right] \quad (7)$$

式中, $\eta$  为波面; $L$  为波长; $d$  为水深; $H$  为波高; $k$  为波数; $\omega$  为角速度。

#### 3.1.2 计算域及网格划分

上游坝坡坡比为 1:2.1,数值波浪水槽左侧为造波边界,右侧为消波区,网格模型采用混合网格划分计算域见图 1(左侧为四边形结构化网格,右侧斜坡段为三角形混合网格)。根据相关研究成果<sup>[8]</sup>,水平方向网格尺寸小于 1/60 的波长、垂



图 1 计算网格

Fig. 1 Computational grid

向网格尺寸小于 1/20 的波高时,即可造出满意的数值波浪,故选取网格尺寸  $\Delta x = L/80$ 、 $\Delta y = H/20$ ,时间步长取  $\Delta t = T/500$ 。在自由水面和斜坡段附近网格局部加密,结构化网格与非结构化网格的连接处理见图 2。根据 FLUENT 文档,光滑混凝土表面粗糙度  $k_s$  取  $5 \times 10^{-4}$  m。

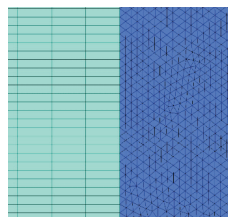


图 2 结构化网格与非结构化网格的连接

Fig. 2 Connection between structured and unstructured grid

#### 3.1.3 数值模拟结果与分析

分别采用坝前水深  $h$  为 12.0、15.0、16.5、18.0、21.0 m 作为典型计算工况。各波浪在不同工况下爬高数值计算汇总见表 2。波浪在行进过程中遇到斜坡堤后开始爬坡,流场中水质点的运动方向与波浪行进的方向一致。由计算结果可看出,随着水深的逐步减小,波浪逐渐破碎,形成卷破波。此后水体在斜坡堤上不断爬高,能量也持续耗散,直至波能与耗散的能力平衡,波浪爬高达到峰值,此时水质点运动方向与波面的传播方向垂直或开始转为与重力沿坡面的分力及摩擦力方向一致,表明水质点已无法继续升高,即将在下一秒转为回落状态。在下降过程中水质点速度又逐步增大,直至降低到最低点,在下一列波的作用下水体又开始重新爬坡。

表 2 波浪爬高数值模拟计算结果

Tab. 2 Numerical simulation results of wave run-up

水深 $h$ /m	波浪 1 爬高/m	波浪 2 爬高/m	水深 $h$ /m	波浪 1 爬高/m	波浪 2 爬高/m
21	0.56	0.77	15	1.30	1.89
18	0.61	0.85	12	0.94	1.44
16.5	1.57	2.11			

数值计算结果表明,不同波浪要素下,坝前水深在直立段与斜坡段交汇处,波浪爬高最大,且大于规范值,波浪爬高随着水深的增大是一个先增大后减小的变化过程。

### 3.2 物理模型试验

#### 3.2.1 物理模型设计

试验在水利部寒区中心实验室水槽中进行。该水槽长 36 m、宽 1.2 m、深 1.7 m。水槽首部装有液压推板式不规则波造波机，造波机系统主要由波浪水槽、机械装置、驱动装置、控制系统、波高传感器、消波装置 5 部分组成，并配置了完善的造波控制软件和分析软件。水槽尾部装有网箱式消能器，以减少波浪反射的影响。试验采用坝顶防浪墙前的波浪爬高测量，同时采用 GL-ULD200 数字浪高仪电测和实时摄、录像记录波浪爬高。

模型试验按重力相似准则设计。根据《水工(常见)模型试验规程》<sup>[9]</sup>，本次模型试验几何比尺  $\lambda$  为 15，时间比尺  $\lambda_t$  为 3.87，糙率比尺  $\lambda_n$  为 1.57。模型比尺确定公式为：

$$\lambda = l_p / l_m \tag{8}$$

$$\lambda_t = \lambda^{1/2} \tag{9}$$

$$\lambda_n = \lambda^{1/6} \tag{10}$$

式中， $l_p$ 、 $l_m$  分别为原型长度和模型长度。

#### 3.2.2 物理模型试验结果与分析

大坝坡面及防浪墙均采用有机玻璃按照模型比尺制作。按照模型比尺输入造波参数，先进行波浪要素的率定，然后构建试验断面并通过波高仪实测及高速摄像机观测波浪爬高。为保证试验结果的可靠性，每组试验重复 3 次，当 3 次重复试验结果差别较大时，则增加重复次数。物理模型试验结果见表 3，从试验结果看，当水位在防浪墙直立段与斜坡段以下时，波浪爬高随水深的增加而增大，当水深在直立段与斜坡段交汇处达到峰值，继续增大水深，爬高减小。

表 3 波浪爬高物理模型试验结果

Tab.3 Physical model test results of wave run-up

模型试验 水深/m	波浪 1		波浪 2	
	模型试验	换算实际	模型试验	换算实际
	爬高/mm	爬高/m	爬高/mm	爬高/m
1.4	38	0.57	53	0.79
1.2	48	0.72	73	1.10
1.1	106	1.59	142	2.13
1.0	93	1.39	130	1.95
0.8	64	0.97	99	1.48

### 3.3 计算结果对比

图 3 为规范法、数值模拟法、物理模型试验计算得到的波浪爬高对比。结果表明，同一种波浪要素针对不同水库水深时，波浪爬高随着水库水深呈倒抛物线趋势。当墙前水深高于直立段与斜坡段交汇处时，与数模和物模结果相比，规范法计算的波浪爬高偏大约 70%。当墙前水深低于直

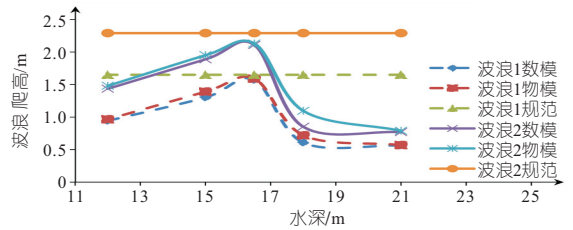


图 3 综合各工况波浪爬高图

Fig.3 Wave run-up under comprehensive conditions

立段与斜坡段交汇处时，与数模和物模结果相比，规范法计算的波浪爬高偏大约 40%。数值模拟法、物理模型试验波浪爬高在防浪墙直立段与斜坡段交汇处取得极值，3 种方法得到的波浪爬高结果大小接近。

## 4 结论

不同波浪要素上下游高挡墙的土石坝采用数值模拟及物理模型试验验证的方法对波浪爬高进行分析，并与规范法相比较，研究了波浪爬高的发展过程及变化规律，在工程设计过程中，应考虑不同水深下防浪墙对波浪爬高的影响，按照规范法计算的波浪爬高结果偏高。因此，可结合物理模型试验和数学模型仿真分析的方法，对波浪爬高进行修正，对工程进行精细化设计。

### 参考文献：

- [1] 孔宪京, 周扬, 邹德高, 等. 高面板堆石坝面板应力分析及抗挤压破坏措施[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6):153-158,257.
- [2] 水利水电规划设计总院. 中国混凝土面板堆石坝图册[M]. 北京:中国水利水电出版社,1993.
- [3] 陈国平, 王铮, 袁文喜, 等. 不规则波作用下波浪爬高计算方法[J]. 水运工程, 2013(增刊1):151-159.
- [4] 中华人民共和国水利部. 碾压式土石坝设计规范: SL274-2020[S]. 北京:中国水利水电出版社,2021.
- [5] 于洋, 赵宏元, 项雨略. 糙渗系数不同的复合式斜坡堤波浪爬高计算[J]. 港工技术, 2020, 57(1):1-4.
- [6] 谭安平. 规则波和不规则波在珊瑚礁上防波堤爬高的数值模拟和特征分析[D]. 广州:华南理工大学, 2020.
- [7] 王鹏. 基于 FLUENT 的海堤越浪数值模拟[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
- [8] 胡杭辉, 邓争志, 胡子俊, 等. 基于 Fluent 的二维非线性数值波浪水槽构造及验证[C]// 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会, 2017.
- [9] 中华人民共和国水利部. 水工(常见)模型试验规程: SL155-2012 [S]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.

## Assessment of Flood Resources Utilization Potential in the Xizhijiang River Basin Based on SWAT Model

YANG Ji<sup>1a</sup>, JU Xin-hui<sup>1a</sup>, LI Li-qun<sup>2</sup>, ZHOU Peng-cheng<sup>3</sup>, GONG Yi-qing<sup>1b</sup>

(1a. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering; 1b. Institute of Water Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Changsha Water Conservancy Bureau, Changsha 410100, China; 3. Hunan Water Resources and Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd., Changsha 410007, China)

**Abstract:** Scientific evaluation of flood resource utilization potential is an important prerequisite for carrying out flood resource utilization in the basin and alleviating the contradiction between supply and demand of water resources. To evaluate the potential of flood resource utilization in different sections of the Xizhijiang River Basin, the SWAT model was constructed to simulate the natural runoff process of Xizhijiang River Basin, and the flood resources of the basin were quantified by combining the limit analysis theory. The potential of flood resources utilization in the upper, middle and lower reaches of the basin was evaluated, and the feasibility of flood resources utilization in Xizhijiang River Basin was discussed based on the water quality conditions. The results show that the SWAT model has good applicability in runoff simulation of Xizhijiang River Basin; The inter-annual distribution of flood resources is uneven, and there are great differences in inter-annual flood resources utilization potentiality. The utilization condition of flood resources in the lower reaches is better than that in the upper reaches, while the utilization rate of flood resources in the lower reaches is lower. The average annual current and theoretical utilization potential of flood resources in the lower reaches are  $3.48 \times 10^8 \text{ m}^3$  and  $7.97 \times 10^8 \text{ m}^3$ , respectively. The water quality indexes of the main stream of Xizhijiang River Basin are not lower than the class III standard, and the utilization of flood resources in Xizhijiang River is feasible. This study can provide support for the optimal allocation of flood resources in Xizhijiang River Basin, and it has an important reference value for achievement of high quality development of the basin.

**Key words:** Xizhijiang River Basin; SWAT model; runoff simulation; flood resources utilization potential

\*\*\*\*\*  
(上接第 69 页)

## Spatiotemporal Distribution Characteristics and Key Sources of Nitrogen in Yihe River Basin Based on SWAT Model

ZHANG Guo-rui<sup>1a,1b</sup>, LIU Cheng-gao<sup>2</sup>, JIA Yu-shan<sup>2</sup>, WU Ting-feng<sup>3</sup>, YANG Chuan-guo<sup>1a,1b</sup>

(1a. College of Hydrology and Water Resources; 1b. State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shilianghe Reservoir Management Office, Lianyungang 222300, China; 3. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** In order to analyze the Nitrogen pollution status and changes in the Yihe River Basin, a SWAT model was established, and the model was calibrated based on the monitoring data of Linyi Station. Its temporal and spatial distribution characteristics were analyzed and the key pollution sources were identified. The results show that the SWAT model has good applicability in the simulation research of runoff and pollution in the Yihe River Basin; The pollution is mainly concentrated in the flood season from July to September, and the ammonia nitrogen and total nitrogen load account for 73.34% and 81.58% of the whole year; The sub-basin in the southwest and close to the water system in the northeast are the main source area of pollution; The main sources of pollution in the basin are sewage discharge, agricultural fertilization and soil loss. Taking Nitrogen fertilizer reduction, returning farmland to forest and comprehensive management measures for the changes can effectively reduce the discharge of pollution load.

**Key words:** solute simulation; SWAT model; Nitrogen pollution load; key sources; Yihe River Basin

\*\*\*\*\*  
(上接第 100 页)

## Comparative Analysis of Wave Run-up of High Wave Wall Earth Rockfill Dam

YIN Jia-nan<sup>1</sup>, ZHANG Yan-ze<sup>2</sup>, YANG Hai-tao<sup>1</sup>, WANG Sheng-li<sup>2</sup>, CAO Yu-long<sup>3</sup>

(1. China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun 130021, China;  
2. Inner Mongolia Water Investment Group Co., Ltd., Hohhot 010020, China;  
3. Inner Mongolia Yin Cao Ji Liao Water Supply Co., Ltd., Hinggan League 137699, China)

**Abstract:** In view of the case that the high wave wall changes from inclined to vertical near the dam slope and crest, numerical simulation and physical model tests were used to mutually verify the calculation of wave run-up. The working conditions of different wave elements and water depth in front of the dam were analyzed to study the impact of high wave walls on wave run-up in the reservoir. The results show that when the same wave factor is applied to different reservoir depths, the wave run-up shows an inverted parabolic trend with the reservoir depth; The maximum wave run-up occurs at the intersection of the vertical section of the wave wall and the slope section; When the water depth in front of the wall is higher than the intersection of the vertical section and the slope section, the wave run-up calculated by the standard method is larger compared with the results of mathematical and physical models. The finding can provide a reference for the refined design of the top elevation of high wave walls considering the impact of wave run-up in the design of earth-rockfill dam.

**Key words:** high wave wall earth rockfill dam; wave run-up; normative law; numerical physical model test