

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230189

# 康苏水库溢洪洞水力特性三维数值模拟研究

彭 诚, 杜 楠, 吴 昊

(湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司, 湖南 长沙 410007)

**摘要:** 以康苏水库工程溢洪洞为基础, 采用 FLOW 3D 软件中 RNG 紊流模型和 VOF 模型研究了溢洪洞内水流特性, 分析了原设计方案不同工况的流速流态及相对消能率, 并与模型试验结果作对比, 验证了数值模拟研究结果的可靠性, 进而针对原设计方案中溢洪洞上游渐变段易产生水翅、消力池产生远驱式水跃、下游冲沟水流不归槽等问题, 提出了修改方案。结果表明, 修改方案能有效地减弱水翅现象, 通过增加多级消能, 能明显减小下游冲沟水流流速, 减轻河床冲刷, 可为设计提供参考。

**关键词:** 溢洪洞; 水翅; 消能; 数值模拟

中图分类号: TV651

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0117-04

## 1 工程概况

康苏水库工程位于新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州乌恰县康苏镇境内, 为 IV 等小(1)型水库, 总库容  $977 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。挡水建筑物采用沥青混凝土心墙砂砾石坝, 最大坝高 51.3 m。溢洪洞布置于右岸。消能防冲设计标准为 20 年一遇洪水, 洪峰流量为  $235 \text{ m}^3/\text{s}$ 。工程消能方式采用底流消能, 溢洪洞采用 WES 实用堰, 堰顶高程 2 514.20 m, 孔口尺寸为  $2.0 \text{ m} \times 5.5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$  (孔数  $\times$  宽  $\times$  高), 最大下泄流量  $675 \text{ m}^3/\text{s}$ 。溢洪洞由进水渠段、进口控制段、无压隧洞段、出口消力池等部分组成, 总长 520.43 m。进水渠段长 98.53 m, 喇叭形进口, 左侧墙成 1/4 椭圆曲线布置, 进口底板高程 2 512.00 m。溢洪洞洞身段长 368.06 m, 纵坡比 1 : 50, 城门洞型断面。从上游至下游依次为上游渐变段、中部洞身段、出口渐变段及出口消力池, 池长 40.0 m, 其中 16.46 m 位于洞内, 23.54 m 位于洞外, 位于洞外部分消力池扩散角  $12.0^\circ$ , 池深 4.0 m, 底板高程 2 491.50 m, 消力尾坎顶高程 2 495.50 m。为了利用天然冲沟, 在消力池后设置消力塘, 进行二次消能, 消能后的洪水经冲沟流至下游河床。消力塘深 6.0 m, 长 20.0 m, 宽 40.0 m; 底板高程 2 489.50 m, 墙顶高程 2 503.00 m。冲沟防护采用梯形断面, 底部宽度为 10.0 m, 开挖边坡比 1 : 0.75 (右岸)、1 : 1 (左

岸)。溢洪洞结构布置图见图 1。为探讨康苏水库溢洪洞水力特性, 通过三维数值模拟<sup>[1-3]</sup>, 对比分析了不同方案的流速模态, 有效解决了原设计方案存在的问题, 结果可供借鉴。

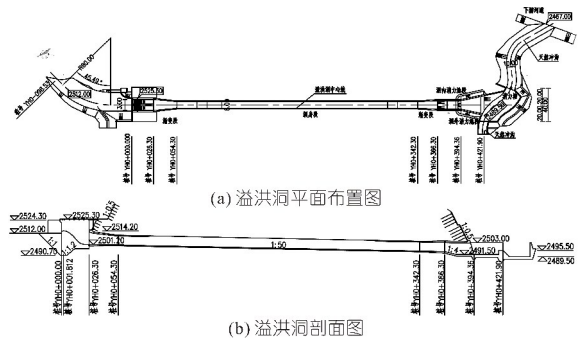


图 1 溢洪洞结构布置图(单位: m)

Fig. 1 Structural layout of spillway tunnel

## 2 数值模型建立及网格划分

### 2.1 数值模型及计算方法

采用 RNG  $k-\epsilon$  紊流模型<sup>[4]</sup>进行计算, 自由液面追踪采用 VOF 模型<sup>[5]</sup>。三维数值模型采用与原型 1 : 1 尺寸建立, 模拟范围从溢流堰进口上游 120 m 至消力池出口下游 200 m 处, 模型最低点高程为 2 454.50 m。为减少计算量, 洞身段地形简化为六面体块。三维模型见图 2。

### 2.2 网格划分

模型网格划分见图 3。x 轴方向沿溢流堰横

收稿日期: 2023-02-13, 修回日期: 2023-04-06

作者简介: 彭诚(1992-), 男, 硕士、工程师, 研究方向为水力学及水工结构工程, E-mail: pc1118@whu.edu.cn

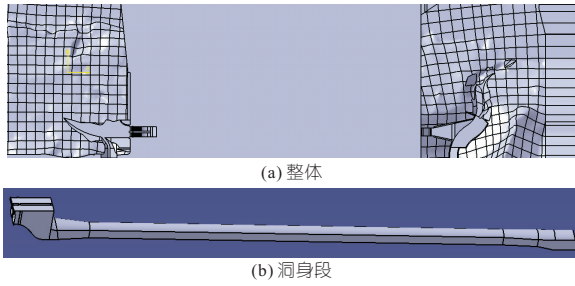


图 2 数值模拟计算模型

Fig. 2 Computational model of numerical simulation



图 3 模型网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model grid division

轴指向右岸,  $y$  轴方向表示顺水流方向,  $z$  轴方向为重力反方向。模型的原点对应于原型为  $x = 81$  平面桩号 YH0+000.0 断面,  $y = -75$  平面为溢洪洞中轴线断面,  $z = 0$  平面为 2 504.50 m 高程平面。

模型整个计算区域采用结构化网格, 为保证计算准确性, 对溢洪洞进行网格嵌套, 最大网格尺寸 2.0 m, 最小 0.1 m, 网格总数约为  $230 \times 10^4$  个。

### 2.3 计算工况及边界条件

选取两种典型工况进行数值模拟计算, 具体工况参数见表 1。

表 1 计算工况参数

Tab. 1 Parameters of calculation cases

工况	开启孔数	闸门开度/m	流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	上游水位/m	下游水位/m
设计( $P=2\%$ )	2	全开	310.40	2 520.20	2 466.11
消能( $P=5\%$ )	2	3.32	235.00	2 520.20	2 466.01

计算边界条件为上游设置为库水位边界(2 520.20 m), 下游设置为尾水位边界条件, 计算域中上表面与空气接触面设置为压力进口边界, 压力设置为标准大气压, 其余各结构面设为固壁边界, 采用固壁无滑移边界条件。

## 3 康苏水库溢洪洞水力特性分析

### 3.1 模型验证

为验证数值模型结果的可靠性, 采用物理模型试验<sup>[6]</sup>作对比, 物理模型基于重力相似准则<sup>[7]</sup>, 几何比尺为 1 : 50, 溢洪洞洞身部分采用有机玻璃制作, 消力池及消力塘侧墙采用木板制作, 其余部分采用水泥砂浆抹面。当上游库水位达到 2 520.20 m 洪水位时, 利用尾门控制消力池出口

处的天然河道水位, 通过物理模型试验实测及数值模拟计算得出各工况泄流能力见表 2。

表 2 典型工况溢洪洞泄流能力

Tab. 2 Discharge capacity of spillway tunnel

under typical conditions						
工况	上游水位/m	计算值 $Q_{\text{计}}$ / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	试验值 $Q_{\text{试}}$ / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	设计值 $Q_{\text{设}}$ / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	差值 $\Delta_1/\%$	差值 $\Delta_2/\%$
设计	2 520.20	311.09	322.83	310.40	-3.64	0.22
消能	2 520.20	244.12	239.43	235.00	1.96	3.88

注: 差值  $\Delta_1 = [(Q_{\text{计}} - Q_{\text{试}}) / Q_{\text{试}}] \times 100\%$ ;  $\Delta_2 = [(Q_{\text{计}} - Q_{\text{设}}) / Q_{\text{设}}] \times 100\%$ 。

由表 2 可知, 在设计和消能两种工况下, 计算值与试验值差值均在  $\pm 5\%$  以内, 说明计算结果可靠, 选择的数值模型与边界条件可信。数值计算所得的泄流量均大于设计泄流量, 但相差不大, 均在  $\pm 5\%$  以内, 说明本工程实际泄流能力满足设计要求。

### 3.2 不同方案下溢洪洞水力特性分析

#### 3.2.1 原设计方案

原设计方案两种工况下溢洪洞进口流态见图 4。由图 4 可知: ①设计工况下, 溢洪洞进口前流速均小于 3 m/s, 水历经椭圆形导流墙前端时, 横向流速增大, 水流偏转, 从而在表面产生一个半径约为 1.5 m、深 0.5 m 的小空腔, 可能会对导墙造成一定的破坏。②消能工况下, 溢洪洞进口流速分布与设计工况类似, 但在表面不会产生空腔, 较设计工况好。

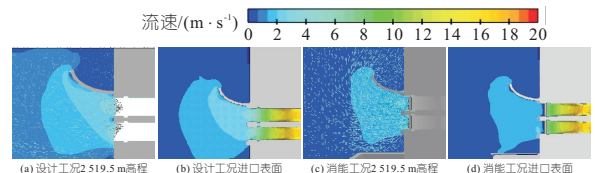


图 4 溢洪洞进口流速流态

Fig. 4 Flow pattern and velocity of spillway tunnel inlet

原设计方案两种工况下溢洪洞洞身段流速流态见图 5。由图 5 可知: ①设计工况下洞身段上游渐变段水深由中间低两侧高逐渐变为中间高两侧低, 分析其原因是由于闸孔下泄的水流在渐变段进口处开始交汇, 形成水翅现象, 使中部水深较

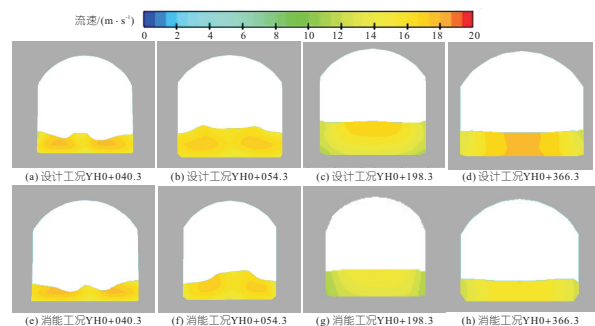


图 5 溢洪洞洞身段流速流态

Fig. 5 Velocity and flow pattern of spillway tunnel body

高。整个溢洪洞洞身断面的流速基本在 11~18 m/s 之间,表现为中部大两侧小,表面大而底部小的分布规律。②消能工况下流速流态设计工况类似,水翅现象较设计工况有所减弱。③两种工况洞身段的水位均在城门洞的直墙段以下,无明显交替的不良流态,亦无明显的掺气空腔产生。

原设计方案两种工况下溢洪洞消力池内流速流态见图 6。由图 6 可知:①设计工况消力池产生远驱式水跃,进口中部流速达 18.5 m/s,流速分布为由中间向两侧边墙逐渐减小的特征,在消力池的尾坎断面(YH0+419.9)处,流速中间大而表面和底部小,最大约为 6 m/s。②消能工况下消力池产生稍有淹没的水跃,消力池进口中部流速较设计工况略小,最大流速约为 17 m/s。③消力池尾部(YH0+417.5)断面流速分布均较均匀,无掺气空腔产生。

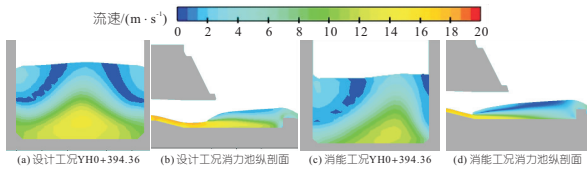


图 6 溢洪洞出口消力池流态

Fig. 6 Flow pattern of stilling basin at outlet of spillway tunnel

消力塘及下游冲沟流速流态见图 7。由图 7 可知:①设计工况下,水流流出消力池后在斜坡跌坎

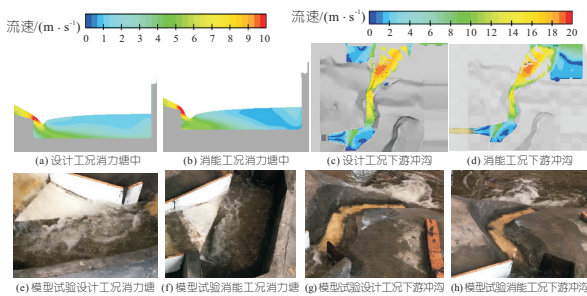


图 7 消力塘及下游冲沟流态

Fig. 7 Flow pattern of stilling pond and downstream gully

处流速较大,最大达 10 m/s,易冲击跌坎,造成破坏。消力塘后水流流速约为 7 m/s,水流在冲沟转弯段流速较大,不能归槽,而是直接翻过岸坡冲沟进入河道,容易对岸坡及下游河床造成严重的冲刷。②消能工况下,消力塘断面流速分布与设计工况类似,消力塘后流速较设计工况略小,约为 6 m/s。水流在冲沟转弯段流速流态与设计工况类似。

两种工况下溢洪洞各断面流速、水深分布见表 3。由表 3 可知:①各工况下数值模拟流速最大的位置与模型试验相同,均在反弧段末断面(桩号 YH0+026.30)处,设计工况为 18.39 m/s,消能工况为 17.92 m/s。②设计工况下,水跃跃首位于 YH0+383.0 断面处,消力池中断面(YH0+394.30)水深增大,消能工况下,水跃跃首位于斜坡上 YH0+376.5 断面处,为稍有淹没水跃,故在消力池斜坡末断面(桩号 YH0+377.90)水深较大,表面流速较小。③各工况数值模拟与模型试验的洞身段水深最大处均位于上游渐变段的末端,设计工况为 2.73 m,消能工况为 2.13 m,均在溢洪洞直墙段以下。

对比数值模拟、模型试验水深和平均流速结果可知,洞身段水深差值较小,流速差值略大,而消力池段水深差值较大,流速差值较小。分析原因:①由于形成水跃,在消力池中部断面(桩号 YH0+394.30)水流表面漩滚掺气,数值模拟某瞬时状态紊动水流的水深,而模型试验得到的是在一定时间内的平均水深;②数值模拟网格为 0.1 m,难以完全模拟此处的掺气状态。

### 3.2.2 修改方案

为解决溢洪洞内水翅现象,改善出池水流及下游冲沟水流冲岸问题,提出了修改方案:①将溢流堰前椭圆形导流墙修改为圆弧形,闸墩尾部由半圆形修改为尖形;②隧洞外段的消力池挖深 2 m,底板高程为 2 489.50 m,与尾坎以 1:1 斜坡

表 3 溢洪洞各特征断面流速、水深分布

Tab. 3 Velocity and water depth distribution of characteristic section of spillway tunnel

断面位置	断面桩号	流速/(m·s <sup>-1</sup> )									水深/m						
		设计工况			消能工况			设计工况			消能工况						
		数值模拟		模型试验	数值模拟		模型试验	数值模拟		模型试验	数值模拟		模型试验				
		表	底		表	底		表	底		表	底					
堰顶	YH0+001.81	5.44	7.68	4.06	6.27	1.38	6.83	8.23	6.81	8.93	-0.37	5.44	4.65	0.79	3.32	3.15	0.17
反弧段末	YH0+026.30	17.49	18.39	15.30	12.46	4.06	17.63	17.92	14.35	3.43	1.50	1.55	-0.05	1.32	1.35	-0.03	
上游渐变段末	YH0+054.30	15.69	15.27	15.21	13.97	0.89	16.41	14.02	14.30	13.35	1.39	2.73	2.70	0.03	2.13	2.10	0.03
洞身段中	YH0+198.30	17.34	13.74	13.18	11.84	3.03	16.22	13.97	13.80	11.67	2.36	2.59	2.45	0.14	2.00	2.20	-0.20
洞身段末	YH0+342.30	17.64	14.62	14.50	11.90	2.93	16.33	14.46	12.74	12.64	2.71	2.64	2.40	0.24	2.08	2.30	-0.22
下游渐变段末	YH0+366.30	17.83	17.60	14.33		3.39	16.68	16.92	12.11		4.69	1.90	1.85	0.05	1.53	1.25	0.28
消力池斜坡末	YH0+377.90	17.88	15.60	15.21		1.51	1.95	14.43	3.70	9.19	1.28	2.00	1.85	0.15	3.21	6.50	-3.29
消力池中	YH0+394.30	0.82	15.23	4.94	9.90	-0.11	0.25	12.12	3.18	7.07	0.42	6.27	7.13	-0.86	6.34	7.88	-1.54
尾坎	YH0+419.90	4.54	6.01	7.34		-1.71	4.98	4.08	5.13		-0.34	3.50	3.18	0.32	3.08	3.10	-0.02
消力塘出口		6.02	8.51	6.54	6.01	0.70	5.87	7.75	6.79	5.21	0.65	5.11	4.70	0.41	4.01	3.83	0.18

连接,尾坎高 1.5 m,取消尾坎后的跌坎;③消力塘底板高程 2 489.50 m 不变,消力塘尾部设坎,坎高 4 m;④冲沟转弯段设二级消力塘,消力塘底板高程 2 470.00 m,塘中设高 3 m 的导流墙,消力塘下游设二级渐扩式消力池,池底高程 2 462.00 m。

修改方案设计工况下的流态见图 8。

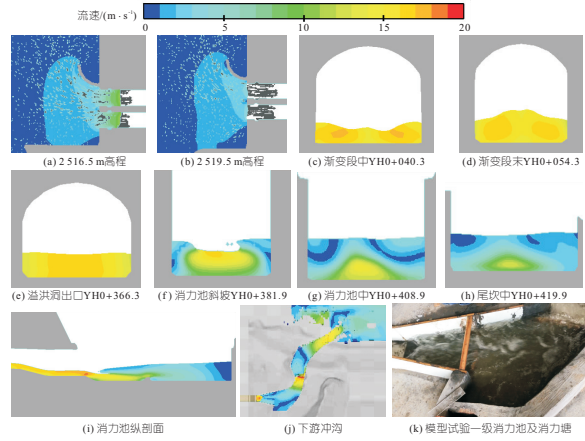


图 8 修改方案设计工况流速流态

Fig. 8 Flow rate and flow pattern under design condition of modified scheme

由图 8 可知,修改方案溢流堰进口两个高程平面的流速分布较为平顺,水流在圆形导流墙前端不产生表面空腔,流态较原方案好。在上游渐变段中,横断面中部水深相对较平缓,水流在上游渐变段末断面中部略有壅高,原方案的水翅现象得到较大改善。由纵剖面云图(图 8(i))可知,修改方案水跃跃首位于 YH0+381.9 断面附近,为稍有淹没的水跃,消能效果较原方案好,消力池中断面流速流态与原方案类似。修改方案下,水流出坎后在消力塘内较平稳。由下游冲沟表面流速分布图(图 8(j))可知,水流出消力塘进入冲沟后在冲沟的转弯段二级消力塘再次消能,水流不再翻过岸坡,水流进入二级消力池后形成稍有淹没的水跃,出池流速进一步减小。

### 3.3 消能效果

为研究此消能工的消能效果,取第一级消力池进口断面为起始断面(YH0+366.30),第二级消力池出口断面为终止断面,计算相对消能率。各断面的能量  $E$  计算公式<sup>[7]</sup>为:

$$E_i = Z_i + P_i/\gamma + \alpha_i v_i^2/(2g) \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

相对消能率  $\eta$  为:

$$\eta = [(E_1 - E_2)/E_1] \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $Z$ 、 $P/\gamma$  分别为计算断面相对于基准面的位能、压能;  $\alpha$  为动能修正系数,取 1.0。

计算基准面取二级消力池底部平面,即 2 462.00 m 高程平面。消能率计算结果见表 4。

表 4 消能率计算结果

Tab. 4 Calculation results of energy dissipation

方案	工况	势能 $h_1/m$	流速 $v_1$	能量 $E_1/m$	势能 $h_2/m$	流速 $v_2$	能量 $E_2/m$	消能 率/%
原方案	设计	34.30	17.72	50.30	4.71	14.98	16.15	67.90
原方案	消能	33.93	16.80	48.32	4.56	12.65	12.72	73.68
修改方案	设计	34.47	17.20	49.55	4.70	5.63	6.32	87.25

注:流速  $v_1$ 、 $v_2$  单位均为 m/s。

由表 4 可知,原设计方案数值模拟两种工况的消能率分别为 67.90%、73.68%,分析原因为设计工况下,水流在溢洪洞消力池内发生远驱式水跃,消能效果有限;而消能工况下,形成了稍有淹没的水跃,消能率比设计工况略大。修改方案设计工况的相对消能率为 87.25%,大于原方案,分析原因为由于修改方案在天然冲沟内增设了二级消力塘及二级消力池,使水流经多次消能,进入河道流速减小,消能率增大。

## 4 结论

a. 数值模拟与模型试验结果两者泄流能力的差值均在  $\pm 5\%$  以内,溢洪洞内水流流态基本相同。

b. 修改方案基本解决了原方案出现的水翅现象;在第一级消力塘尾部设坎,加大了消力塘的水深,形成较厚的水垫,使出池水流在水垫塘内有效消能;在冲沟转弯段设置二级消力塘,强迫水流转向,解决了水流严重不归槽的问题;在冲沟下游进入河道时设置二级消力池,再次消耗下泄水流的能量,进入河道的水流流速进一步减小。

c. 本文只从流速方面简单分析了水流对下游河床的冲刷,在进一步研究中,还需在数值模型下游设置动床,以模拟水流对河床的冲刷程度。

### 参考文献:

- [1] 王月华,包中进,王斌. 基于 FLOW-3D 软件的消能池三维水流数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012,45(4):454-457,476.
- [2] 张为,陈和春,尤美婷,等. 基于 FLOW-3D 软件的块体水垫塘消能机理数值模拟[J]. 水电能源科学, 2015,33(4):103-106,84.
- [3] 包中进,王月华. 基于 FLOW-3D 软件的溢洪道三维水流数值模拟[J]. 浙江水利科技, 2012(2):5-9.
- [4] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [5] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of computational physics, 1981,39:201-225.
- [6] 林继镛. 水工建筑物[M]. 第 5 版. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [7] 赵昕,张晓元,赵明登,等. 水力学[M]. 北京:中国电力出版社,2009.

## Study on Influence of Defects in Anti-seepage Wall on Seepage and Deformation of Cofferdam

LING Xiao-kang<sup>1</sup>, MA Jian-fei<sup>2</sup>

- (1. China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510610, China;
- 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** During construction and operation, it is inevitable to have such engineering problems as cutoff wall defects. It is very important to accurately and systematically analyze the influence of defects in anti-seepage wall on seepage and deformation of cofferdam. The finite element model of an anti-seepage wall cofferdam project was established. By using the fluid-solid coupling analysis method, the material parameters of anti-seepage wall element in the finite element model were changed one by one to simulate different defects of anti-seepage wall. The influence of defect location of anti-seepage wall on saturation line, velocity vector field and deformation field of cofferdam was studied. The results show that the bottom defects of the anti-seepage wall have little influence on the saturation line, velocity vector field and deformation field of the cofferdam. With the upward movement of the anti-seepage wall defects, saturation line, pore water pressure and deformation value of the cofferdam behind the anti-seepage wall increase continuously, and the velocity of the cofferdam increases firstly and then tends to be stable. The research results can provide reference for the design and construction of anti-seepage wall and stability analysis of cofferdam.

**Key words:** defects in anti-seepage wall; cofferdam; seepage; deformation; fluid-solid coupling

\*\*\*\*\*  
 (上接第 120 页)

## Three-dimensional Numerical Simulation of Hydraulic Characteristics of Spillway Tunnel of Kangsu Reservoir

PENG Cheng, DU Nan, WU Hao

- (Hunan Water Resource and Hydropower Survey Design Planning and Research Co., Ltd., Changsha 410007, China)

**Abstract:** Based on the spillway tunnel of Kangsu Reservoir Project, the RNG turbulence model and VOF model in FLOW 3D software was used to study the flow characteristics of the spillway tunnel. The flow velocity and relative energy dissipation rate under different conditions of the original design scheme was analyzed, and compared with the model test. The reliability of the numerical simulation was verified. In view of the problems in the original design scheme, such as the water-wing in the upstream transition section of the spillway tunnel, the far drive hydraulic jump in the stilling basin, and the downstream gully flow not returning to the channel, the modified scheme was proposed. The results show that the modified scheme can effectively reduce the water wing phenomenon, and can effectively reduce the downstream gully flow velocity and the riverbed scouring by adding multi-level energy dissipation, which can provide a reference for the design.

**Key words:** spillway tunnel; water-wing; energy dissipation; numerical simulation

\*\*\*\*\*  
 (上接第 136 页)

## Structure Optimization of Urban Emergency Flood Control Box

WANG Xiao-dong<sup>1</sup>, XU Jin-chao<sup>2</sup>, ZHAO Jun<sup>2</sup>, GAO Ying-qian<sup>3</sup>

- (1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Taizhou Xbarrier Technology Co., Ltd., Taizhou 225000, China)

**Abstract:** A study was performed on the stress characteristics of the urban emergency flood-control box—a new equipment made of polymer material. The finite element analysis method was used to study the stress, strain and deformation characteristics of the flood control box under different water retaining heights. The results show that the stress concentration area of the box is mainly appeared at the water retaining surface and the two sides; With the increase of the water retaining height, the difference of water level between inside and outside of box as well as the maximum stress and the deformation are gradually smaller. Compared with the ABS, LLDPE, HDPE and PP materials, the deformation of the flood control box with ABS material is relatively smaller under the same conditions. An optimization study was carried out on the scheme of the flood-control box. And the stress, strain and deformation of the optimization scheme under the same conditions are greatly improved. The maximum stress decreases from 16.09 MPa in the original form to 7.31 MPa in the optimized form, and the maximum deformation decreases from 0.78 cm to 0.13 cm. The mechanical characteristics of the box structure are obviously improved.

**Key words:** urban emergency flood control box; finite element analysis; stress characteristics; material characteristics; structural optimization