

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230110

# 防渗墙缺陷对围堰渗流及变形场的影响研究

凌小康<sup>1</sup>, 麻建飞<sup>2</sup>

(1. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 防渗墙缺陷是水利工程施工运维期间不可避免的工程问题, 准确、系统地分析防渗墙缺陷对围堰的影响是评价围堰稳定性的重要条件。基于某土石围堰中混凝土防渗墙, 建立有限元模型, 采用流固耦合计算方法, 通过改变有限元模型中防渗墙单元的材料参数模拟防渗墙的不同缺陷, 系统地研究了防渗墙缺陷位置对围堰浸润线、流速矢量场及变形场的影响。结果表明, 防渗墙底部缺陷对围堰浸润线、流速矢量场和变形场影响不大, 随着防渗墙缺陷的上移, 防渗墙后围堰浸润线、孔隙水压力值和变形值不断升高; 围堰流速在缺陷区域呈“沙漏”状, 最大流速先增大后趋于稳定, 发生位置由围堰溢出位置移动至缺陷区域。研究结果可为防渗墙设计施工和围堰稳定性分析提供参考。

**关键词:** 防渗墙缺陷; 围堰; 渗流; 变形; 流固耦合

**中图分类号:** TV551.3<sup>+</sup>1; TV543<sup>+</sup>.82

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)12-0142-05

## 1 引言

防渗墙是水利水电工程建设过程中有效的防渗手段, 具有防渗效果优异、适应性好及经济性的优点。在围堰、土石坝和覆盖层地基中应用广泛<sup>[1]</sup>。但受施工条件、地质情况及运行条件的影响, 防渗墙不可避免地会产生裂缝<sup>[2]</sup>、渗透系数不达标<sup>[3]</sup>和墙体厚薄不均<sup>[4]</sup>等现象, 从而对工程建设及运维期间的安全稳定产生不利影响。因此, 开展防渗墙缺陷影响研究对水利工程的理论分析和工程应用具有重要意义。针对防渗墙缺陷对渗流及变形的影响, 已开展了大量研究。如张嘎等<sup>[5]</sup>采用有限单元法, 建立围堰计算模型, 研究了裂缝尺寸对渗流结果的影响; 盛金昌等<sup>[6]</sup>以冶勒水电站工程为背景, 分析了防渗墙开裂对坝基稳定性的影响; 李少明<sup>[7]</sup>采用渗流有限元分析方法, 研究了防渗墙裂缝尺寸和渗透系数对渗透坡降和单宽流量的影响; 高江林等<sup>[8]</sup>采用饱和-非饱和有限元理论, 建立了防渗墙缺陷的数值模拟方法, 研究了多种防渗墙缺陷对渗流特性的影响; 甘磊等<sup>[9]</sup>结合流体和化学动力理论, 研究了两种施工缺陷形式下防渗墙中孔隙率的演化规律。虽然已有研究取得了很多有意义的成果, 但还需结合两个关键因素进行研究: ①防渗墙在施工运维期间

出现缺陷的位置具有不确定性, 需明确不同缺陷位置对渗流、变形和稳定性的影响; ②计算方法的有效性, 围堰处于一个应力场与渗流场共同作用的系统中, 这就要求计算时采用流固耦合的计算方法。因此, 本文以某围堰工程为例, 采用有限元数值软件建立有限元模型, 通过改变有限元模型中防渗墙单元的材料参数模拟防渗墙的不同缺陷, 系统地研究了防渗墙缺陷位置对围堰渗流及变形场的影响, 旨在为防渗墙设计施工和围堰稳定性分析提供参考。

## 2 计算原理

### 2.1 流固耦合分析基本理论

流固耦合是渗流场和应力场相互作用的现象<sup>[10]</sup>, 流固耦合的机理见图1。其中渗流场对应力场的主要影响有: ①在渗流场的作用下, 介质由于软化效应, 其渗透系数、变形参数和强度参数均

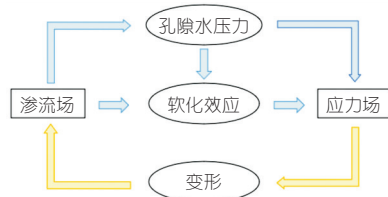


图1 流固耦合机理

Fig. 1 Fluid solid coupling mechanism

收稿日期: 2023-02-01, 修回日期: 2023-03-23

作者简介: 凌小康(1998-), 男, 硕士, 研究方向为水工结构设计, E-mail: 18810658077@163.com

会发生变化,间接影响应力场;②渗流场产生的孔隙水压力作为体积力作用在介质上,直接引起应力场的重分布。应力场对渗流场的主要影响有在应力场的作用下,介质发生变形,导致流体被挤入(挤出)介质中的孔隙,直接影响介质中的渗流场。应力场与渗流场的相互作用,形成了一个闭环的耦合系统,在围堰建设运维过程中相互影响。

### 2.2 有效应力方程

基于太沙基有效应力原理,渗透介质在三向体系的情况下,介质中的总应力由介质骨架和其中的水、气共同承担<sup>[11]</sup>,其表达式为:

$$\sigma = \sigma' + [\chi u_w + (1 - \chi) u_a] \quad (1)$$

其中  $\chi = \chi(s)$

式中,  $\sigma$  为总应力;  $\sigma'$  为有效应力;  $u_a$  为孔隙气压;  $\chi$  为饱和度  $s$  的函数,当渗透介质完全饱和时,  $\chi = 1$ ;  $u_w$  为孔隙水压力。

### 2.3 应力平衡方程

渗透介质的应力平衡方程由虚功原理表示,即外力的虚功与内力虚功之和等于零<sup>[12]</sup>,其表达式为:

$$\int (\delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} - \delta \mathbf{u}^T \bar{\mathbf{f}}) dV - \int \delta \mathbf{u}^T \bar{\mathbf{T}} dS = 0 \quad (2)$$

式中,  $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$  为虚应变矩阵;  $\delta \mathbf{u}$  为虚位移矩阵;  $\boldsymbol{\sigma}$  为应力矩阵;  $\bar{\mathbf{f}}$  为体力矩阵;  $\bar{\mathbf{T}}$  为面力矩阵;  $S$  为面积边界;  $V$  为流体速度。

### 2.4 渗流连续性方程

渗流介质中的流体应满足渗流连续性方程,即某时段内,流入流出单元体的质量差等于单元体内液体质量的变化<sup>[13]</sup>,其表达式为:

$$\frac{d}{dt} \left( \int \frac{\rho_w}{\rho_w^0} s p dV \right) = - \int \frac{\rho_w}{\rho_w^0} s p v_w dS \quad (3)$$

式中,  $\rho_w$  为流体密度;  $\rho_w^0$  为流体参照密度;  $v_w$  为流体流入单元的平均速度;  $s$  为饱和度;  $p$  为孔隙率。

通常计算时采用反向欧拉法近似积分,同时将孔隙水压力作为变量,渗流介质中流体的渗流行为遵循 Darcy 定律。

## 3 防渗墙缺陷对围堰渗流及变形场的影响

### 3.1 研究模型

以某土石围堰为研究背景,建立有限元模型,模型尺寸为 200 m × 60 m,其中堰体高 20 m,宽 78 m;堰基深取 2 倍堰体高度,为 40 m,沿堰基分别向上下游延伸 61 m;防渗墙尺寸为 1 m × 22 m。

研究模型边界条件包括 2 部分:①堰基部分

左右两边界为水平约束,底边界为全约束,上边界无约束;②堰体部分上游设置 18 m 深的静水压力边界和孔隙水压力边界条件,下游设为自由出流边界。研究模型见图 2。

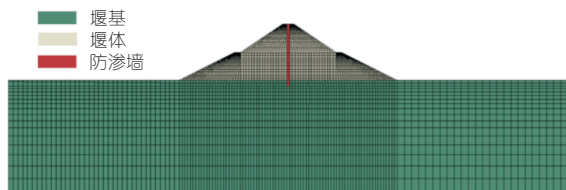


图 2 研究模型

Fig. 2 Research model

通过改变防渗墙单元的材料参数模拟防渗墙的不同缺陷,在防渗墙的不同位置预制缺陷,具有缺陷的单元赋予堰体的材料参数。数值计算共采用 23 个计算方案,第 1 个计算方案中防渗墙不包含任何材料缺陷,其余 22 个计算方案代表防渗墙的 1~22 号单元分别被赋予了堰体的材料参数。防渗墙的几何特征见图 3。

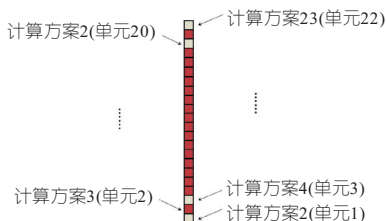


图 3 防渗墙几何特征

Fig. 3 Geometric features of cutoff wall

### 3.2 计算参数

堰基参数源自地质勘测资料,将堰体视为均质体,防渗墙参数取自设计资料,计算参数见表 1。

表 1 计算参数

Tab. 1 Calculation parameters

材料	重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	渗透系数 /( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$
堰体	22.6	$1 \times 10^{-8}$	12.2	0.35
堰基	18.5	$1 \times 10^{-7}$	20.2	0.30
防渗墙	22.0	$8 \times 10^{-9}$	$10^3$	0.23

### 3.3 计算初始条件

研究模型为流固耦合计算模型,涉及的初始条件有初始孔隙比、初始饱和度和初始孔压力。通常将这三个初始条件设为 1,为有限元计算提供一个迭代的初始条件,模型会根据荷载、边界条件和材料参数等获得堰体各处的实际值,作为后续计算的初始状态。

### 3.4 计算结果与分析

#### 3.4.1 防渗墙缺陷位置对浸润线的影响

浸润线是指围堰内渗透水流形成的饱和区域与非饱和区域的分界线,是围堰稳定性分析中关键的影响因素。防渗墙的缺陷会影响浸润线的形

状,因此确定防渗墙缺陷位置对浸润线的影响是围堰病害诊断和治理的关键问题。

浸润线以围堰孔隙水压力为0的等值线表示,如图4、5所示。由图4可知,围堰内孔隙水压力呈条带状分布,在防渗墙部位出现了明显的弯折点,孔隙水压力在防渗墙后迅速减小,体现了防渗墙良好的防渗效果。由图5(a)、(b)可知,防渗墙底部的缺陷只影响了防渗墙底部小范围内的孔隙水压力分布,对围堰孔隙水压力分布和浸润线几乎无影响。由图5(c)、(d)可知,随着防渗墙缺陷的上移,防渗墙后围堰浸润线不断升高,同时围堰下游溢出点高度不断提高。由图5(f)可知,当防渗墙缺陷移动至初始浸润线(防渗墙无缺陷下浸润线)上部时,防渗墙缺陷位置不再影响浸润线形状,但防渗墙后围堰的孔隙水压力继续增加,孔隙水压力值为-58 kPa(吸力)。表明防渗墙缺陷位置在初始浸润线上部时,缺陷位置对墙后浸润线不再起控制作用,但缺陷仍会使围堰孔隙水压力值增加,对围堰产生不利影响,缺陷位置离围堰顶部越近,围堰孔隙水压力越大。

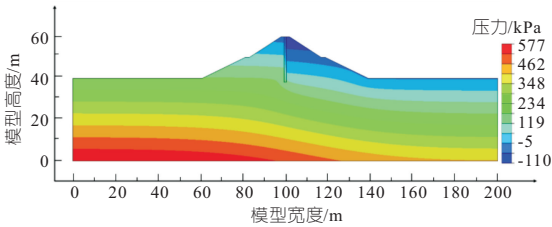


图4 方案1孔压云图

Fig. 4 Pore pressure results in scheme 1

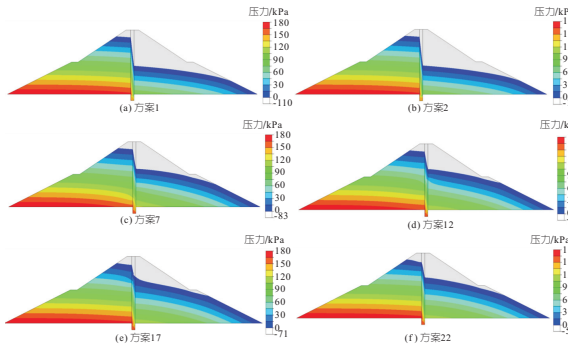


图5 防渗墙缺陷下围堰孔压云图

Fig. 5 Pore pressure results in different anti-seepage defects

分别提取各方案围堰的浸润线(图6)。由图6可知,防渗墙缺陷主要影响防渗墙后的浸润线,防渗墙缺陷位置越高,防渗墙后围堰浸润线也越高,同时围堰下游溢出点高度也不断提高。

### 3.4.2 防渗墙缺陷位置对围堰渗流速度的影响

渗流速度是指渗流在过水断面上的平均流速,通过渗流速度可以清晰地反映围堰中渗流的

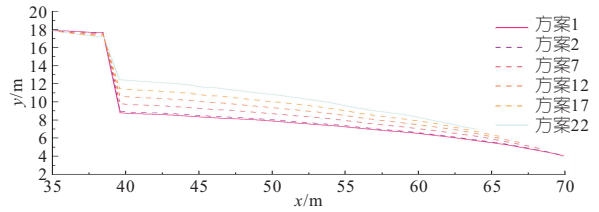


图6 围堰浸润线

Fig. 6 Seepage line of cofferdam

特点,不同防渗墙缺陷位置下围堰渗流矢量场见图7。由图7(a)、(b)可知,防渗墙底部缺陷对围堰流速矢量场影响不大,最大流速约  $4.52 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ,均出现在防渗墙后溢出位置。由图7(c)~(f)可知,随着防渗墙缺陷上移,围堰在防渗墙缺陷位置的流速受到影响,最大流速先增大后趋于稳定,最大流速分别为  $1.53 \times 10^{-6}$ 、 $1.63 \times 10^{-6}$ 、 $1.62 \times 10^{-6}$ 、 $1.48 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ,均出现在防渗墙缺陷位置。这是因为防渗墙缺陷上部和下部的防渗墙仍具有完整的形状,保持较好的防渗效果,使得围堰内渗流向防渗墙缺陷位置聚拢,从而加速围堰内防渗墙缺陷位置的渗流速度。

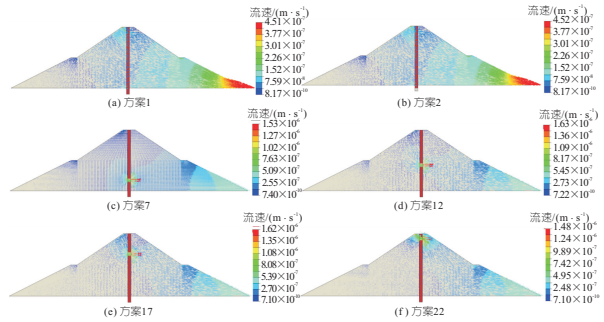


图7 防渗墙缺陷下围堰流速矢量场云图

Fig. 7 Flow velocity vector results in different anti-seepage defects

分别提取各方案下围堰防渗墙位置的渗流速度(图8)。由图8可知,随着防渗墙缺陷位置的上移,防渗墙位置渗流速度逐渐减小,但最大渗流速度基本相同,且均发生在防渗墙缺陷位置。

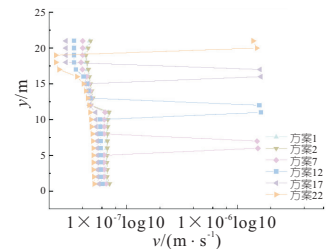


图8 防渗墙位置渗流速度

Fig. 8 Seepage velocity at the position of cutoff wall

### 3.4.3 防渗墙缺陷位置对围堰变形场的影响

围堰变形场是指围堰体在渗流等作用下形状发生的变化。变形场能直观地体现围堰安全稳定

状态。不同防渗墙缺陷位置下围堰变形场见图 9。由图 9 可知,防渗墙缺陷主要影响防渗墙后围堰的变形场,随着防渗墙缺陷的上移,防渗墙后围堰变形场逐渐增大,防渗墙前的围堰变形变化不大。方案 1、2、7、12、17、22 最大水平变形位置均发生在围堰上游顶部区域,最大水平变形值分别为  $1.72 \times 10^{-4}$ 、 $1.72 \times 10^{-4}$ 、 $1.70 \times 10^{-4}$ 、 $1.68 \times 10^{-4}$ 、 $1.65 \times 10^{-4}$ 、 $1.64 \times 10^{-4}$  m。

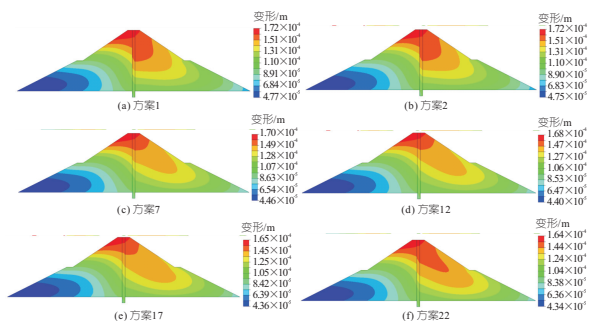


图 9 防渗墙缺陷下围堰变形场云图

Fig. 9 Deformation field results in different Anti-seepage defects

分别提取各方案下围堰防渗墙位置的变形见图 10。由图 10 可知,不同防渗墙缺陷位置下,防渗墙位置水平位移变化趋势基本一致,即水平位移值从上至下逐渐减小。

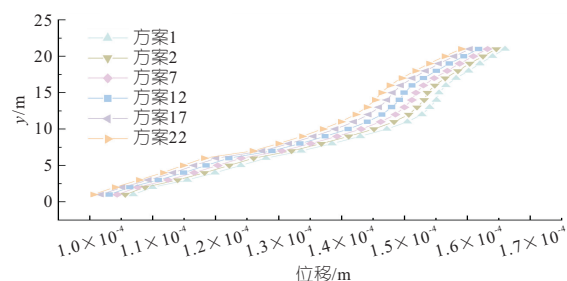


图 10 防渗墙位置变形值

Fig. 10 Deformation value at the position of cutoff wall

## 4 结论

a. 从围堰浸润线方面考虑,防渗墙底部的缺陷对围堰浸润线影响较小,但随着缺陷位置的上移,防渗墙后围堰浸润线和孔隙水压力不断升高,并且下游溢出点高度不断提高;当防渗墙缺陷上移至初始浸润线(防渗墙无缺陷)上部时,围堰浸润线维持稳定。

b. 从围堰渗流速度方面考虑,防渗墙底部缺陷对围堰渗流速度影响较小,最大流速约为  $4.52 \times 10^{-7}$  m/s,出现在防渗墙后溢出位置;随着防渗墙缺陷上移至围堰区域,防渗墙缺陷附近围堰流速受到影响,形成“沙漏”状的渗流矢量场,最大流速

相较于底部缺陷下的最大流速增大一个数量级,由  $10^{-7}$  m/s 级增加至  $10^{-6}$  m/s 级,最大流速呈先增大后稳定的趋势,均发生在防渗墙缺陷位置。这表明防渗墙上部缺陷对围堰体渗流速度影响较大。

c. 从围堰变形场方面考虑,防渗墙缺陷主要影响防渗墙后围堰的变形,随着防渗墙缺陷的上移,防渗墙后围堰变形场逐渐增大,最大水平变形场均发生在围堰上游顶部区域。防渗墙缺陷对围堰渗流场和变形场均会产生不利影响,防渗墙出现缺陷的位置越高,对围堰的渗流场及变形场的影响越大。因此,保证防渗墙上部结构在施工运维期间的完整性尤为重要。

## 参考文献:

- [1] 孙伟,包世诚,张嘎. 基于近场动力学均匀化的混凝土防渗墙等效损伤模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 1240-1250.
- [2] 严俊,温彦锋,璩爱玉,等. 深厚覆盖层上高土石坝防渗墙裂缝渗流分析模型及应用研究[J]. 水力发电, 2017, 43(9): 39-44.
- [3] 甘磊,陈官运,沈振中,等. 堤坝混凝土防渗墙渗透溶蚀演化规律研究[J]. 水利学报, 2022, 53(8): 939-948.
- [4] 邵生俊,杨春鸣. 粗粒土泥浆护壁防渗墙的抗渗设计方法研究[J]. 水利学报, 2015, 46(增刊 1): 46-53.
- [5] 张嘎,张连卫,张建民,等. 溪洛度水电站上游围堰防渗体裂缝对渗流控制的影响[J]. 水力发电学报, 2002(3): 54-61.
- [6] 盛金昌,赵坚,速宝玉. 混凝土防渗墙开裂对坝基渗透稳定性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2006(1): 23-26.
- [7] 李少明. 防渗墙质量缺陷对土石坝渗流控制的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 174-177, 169.
- [8] 高江林,严卓. 土石坝加固工程中缺陷防渗墙渗流特性研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(9): 125-128, 134.
- [9] 甘磊,刘源,沈振中,等. 混凝土防渗墙施工缺陷对其渗透溶蚀演化规律的影响[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(6): 1269-1277.
- [10] 吴梦喜,宋世雄,吴文洪. 拉哇水电站上游围堰渗流与应力变形动态耦合仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 613-623.
- [11] 李广信. 论土骨架与渗透力[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1522-1528.
- [12] 吕从聪,李宗利,李东奇. ABAQUS 渗流应力耦合分析中渗透荷载施加问题探讨[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(5): 68-72.
- [13] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(6): 1081-1106.

## 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