

# 注水式城市应急防洪箱结构优化研究

王小东<sup>1</sup>, 徐进超<sup>2</sup>, 赵 君<sup>2</sup>, 高英倩<sup>3</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044;  
3. 泰州思百瑞水务有限公司, 江苏 泰州 225000)

**摘要:** 针对一种新型高分子材质的防汛应急抢险新装备——注水式城市应急防洪箱(以下简称“防洪箱”), 采用有限元分析方法研究了不同材质防洪箱不同挡水高度下箱体的应力、应变和变形等特性。结果表明, 箱体的应力集中区主要在迎水面和箱体两侧; 随着迎水面挡水高度的增加, 箱体内、外水位差的减小, 箱体最大应力和最大变形逐渐减小。ABS、LLDPE、HDPE 及 PP 四种材质中, ABS 材质的防洪箱箱体在相同条件下的最大变形相对较小。在此基础上对防洪箱的结构进行了优化研究, 优化方案下, 箱体在同一工况下的应力、应变及变形均有较大的改善, 其最大应力由原型型的 16.09 MPa 下降至优化体型的 7.31 MPa, 最大变形由 0.78 cm 下降至 0.13 cm, 箱体结构受力特性有了明显的改善。

**关键词:** 城市应急防洪箱; 有限元分析; 受力特性; 材料特性; 结构优化

**中图分类号:** TV87      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-7709(2023)12-0134-03

## 1 引言

近年来, 城市热岛及雨岛效应凸显, 短历时强降雨导致的城市暴雨洪涝灾害多发频发<sup>[1-3]</sup>。目前我国 600 多座城市中有一半以上均存在着严重的城市洪涝问题<sup>[4]</sup>。随着我国经济的快速发展, 城市化进程的加快, 城市防洪抢险新技术、新设备的需求也日益增长<sup>[5]</sup>。目前, 针对新型防洪抢险装备, 已开展了一些探索和研究<sup>[6-7]</sup>。其中新型高分子材质的防汛应急抢险装备——注水式城市应急防洪箱在使用时, 仅需通过专用连接件将相邻箱体搭接, 并向箱体内注水, 即可快速构筑挡水高度约为 0.5 m 的防汛应急挡水子堤。箱体左右两侧及背水侧均设有专用连接凹槽, 便于相邻箱体快速连接并实现子堤拐弯延伸功能, 此外, 防洪箱箱体底部设有平铺型防渗系统(图 1)。这种由高分子材质制成的防洪装备普遍具有绿色环保、安装便捷、可重复使用等显著优点, 能较好地适用于城市内涝抢险等场景, 但目前针对此类高分子材质的新型防洪装备研究还较为少见<sup>[8]</sup>, 其设计和应用还缺乏相关的理论支撑。为此, 本文采用

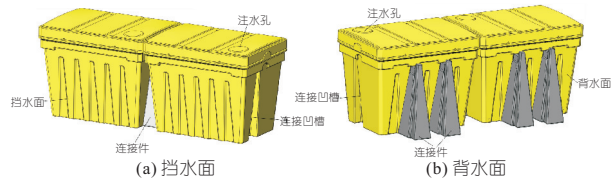


图 1 注水式城市应急防洪箱示意图

Fig. 1 Structure of urban emergency flood control box

数值仿真模型对比分析了不同材质的注水式城市应急防洪箱箱体挡水受力特性, 并在此基础上, 对防洪箱的体型结构进行优化研究, 以期对防洪箱的进一步优化设计提出参考依据。

## 2 数值仿真模型

假定防洪箱在挡水过程中符合弹性材质的特点, 则可采用下式来描述其受力特性:

$$Mx'' + Cx' + Kx = F(t) \quad (1)$$

式中,  $M$  为质量矩阵;  $C$  为阻尼矩阵;  $K$  为刚度矩阵;  $x''$ 、 $x'$ 、 $x$  分别为加速度矢量、速度矢量和位移矢量;  $F$  为静力载荷;  $F(t)$  为力矢量。

假定物理量均不随时间而变化, 可得到线性静力方程为:

$$F = Kx \quad (2)$$

收稿日期: 2023-07-25, 修回日期: 2023-08-31

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021024, 2020022); 中国博士后科学基金资助项目(2020T130309, 2019M651892)

作者简介: 王小东(1984-), 男, 高级工程师, 研究方向为城市内涝防御技术的开发与应用, E-mail: xdwang@nhri. cn

通讯作者: 徐进超(1983-), 男, 博士、讲师, 研究方向为水工水力学, E-mail: jcxu@nuist. edu. cn

式(2)表明,静力荷载值与时间和惯性无关。

基于式(1)、(2),采用 Ansys Mechanical 软件中的有限元分析方法<sup>[5]</sup>,分析了防洪箱在不同挡水高度条件下的应力、应变和变形等特性。选取防洪箱为 900 mm×650 mm×600 mm(长×宽×高)。在模拟过程中,假定防洪箱始终与地面紧贴,不发生相对滑动。箱体内部注水深度保持  $h_1=0.5\text{ m}$ ;迎水面挡水高度  $h_2=0.1\sim 0.5\text{ m}$ ,迎水面冲击水流流速为  $1.0\text{ m/s}$ 。箱体迎水面承受动水压力  $F_{\text{动}}$ 、静水压力  $F_{\text{静}}$  共同作用,其中水流产生的动水压力  $F_{\text{动}}$  采用动量定理进行计算<sup>[9]</sup>。防洪箱模型网格采用 5 mm 进行划分,网格数量为 175 340 个(图 2)。

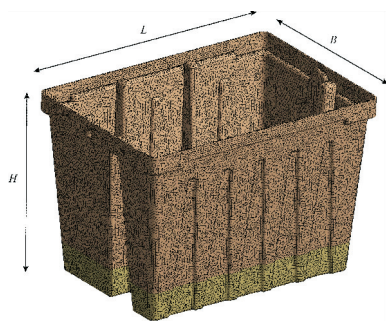


图 2 注水式城市应急防洪箱结构计算网格图

Fig. 2 Structure calculation grid of urban emergency flood control box

### 3 防洪箱结构优化研究

对 ABS(丙烯腈—丁二烯—苯乙烯)、LLDPE(线性低密度聚乙烯)、HDPE(高密度聚乙烯)、PP(聚丙烯)不同材质的注水式城市应急防洪箱的挡水特性进行对比,结果见表 1。计算所得各材质的箱体应力、应变及变形见图 3。由表 1、图 3 可知,四种材质箱体所承受的应力在各挡水高度下保持一致。挡水高度为 0.1 m 时,箱体主要承受内部的水压力,最大应力约为 16 MPa,应力集中区域主要分布于箱体两侧及迎水面,最大应力位于迎水面底部。随着挡水高度的增加,

表 1 防洪箱不同材质参数特性及结构受力特性

Tab. 1 Structural mechanics properties of flood box with different materials parameters

材质名称	密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	泊松比	挡水高度/m	最大应力/MPa	最大应变	最大变形/cm
ABS	1 040	2.39	0.399	0.1	16.09	0.009	0.78
				0.2	14.09	0.008	0.75
				0.3	11.47	0.006	0.62
				0.4	6.35	0.004	0.32
				0.5	6.41	0.003	0.26
LLDPE	929	0.368	0.439	0.1	16.14	0.050	5.01
				0.2	14.18	0.048	4.79
				0.3	11.51	0.037	3.99
				0.4	6.45	0.021	2.05
				0.5	5.99	0.021	1.70
HDPE	958	2.195	0.418	0.1	16.14	0.018	1.72
				0.2	14.16	0.017	1.65
				0.3	11.51	0.013	1.37
				0.4	6.40	0.008	0.70
				0.5	6.22	0.007	0.58
PP	902	0.915	0.443	0.1	16.13	0.020	2.01
				0.2	14.18	0.019	1.92
				0.3	11.50	0.015	1.60
				0.4	6.47	0.008	0.82
				0.5	5.95	0.008	0.68

箱体内、外压差逐渐减小,最大应力相应逐渐减小,当挡水高度为 0.4、0.5 m 附近时,箱体内、外压力基本保持平衡,此时,箱体所受应力最小,最大应力位于背水面底部。挡水过程中,不同材质箱体最大变形均发生于迎水面。随着挡水高度的增加,箱体最大变形和应变逐步减小。箱体内、外水位差最大的工况,即挡水高度为 0.1 m 时,其变形最大。挡水高度 0.1 m 时,LLDPE 材质变形最大,其最大变形为 5.01 cm;ABS 材质变形最小,最大变形为 0.78 cm。

综上所述,原防洪箱体型两侧及迎水面较易出现应力较大和变形较大的情况。对比分析初选四种高分子材质,ABS 材质最能满足防洪箱的功能需求。

为提高箱体的结构强度和通用连接性能,拟对原防洪箱箱体型作如下优化:将防洪箱挡水面改为与背水面相同体型,即设置两个可安装连接

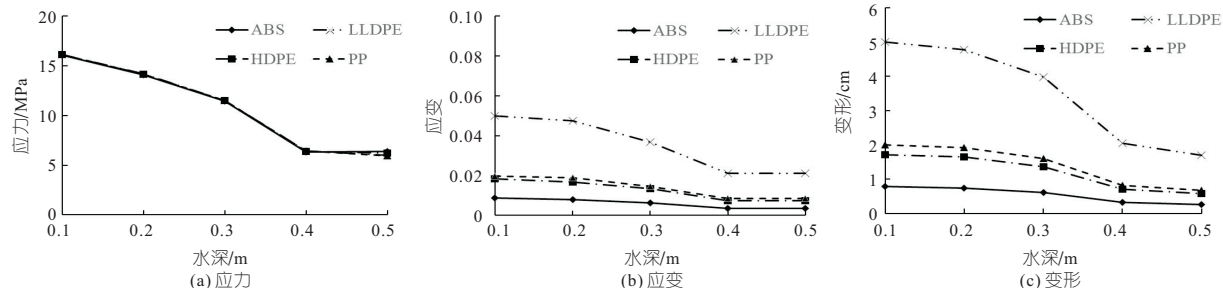


图 3 不同材料条件下防洪箱挡水受力特性

Fig. 3 Mechanics properties of flood box under different materials

件的连接凹槽,左、右两侧连接凹槽由 1 个增加到 2 个,用于改善箱体挡水面和左右两侧的结构强度,提高箱体四侧连接的通用性能及箱体之间的抗渗性能。最终箱体四侧连接凹槽总数由原来的 4 个改为 8 个,形成防洪箱体四侧相同的并列式连接路径结构,见图 4。

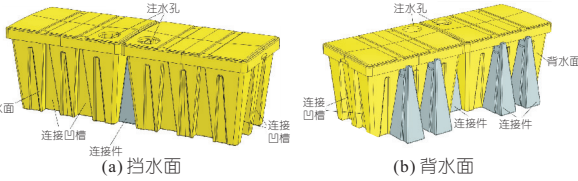


图 4 注水式城市应急防洪箱优化体型

Fig. 4 Optimization shape of urban emergency flood control box

选取 ABS 材质,进一步研究箱体优化体型的结构特性。在注水深度设置 0.5 m,挡水高度 0.1~0.5 m,水流冲击流速 1.0 m/s 条件下,优化体型的箱体应力、应变及变形特性见表 2、图 5。

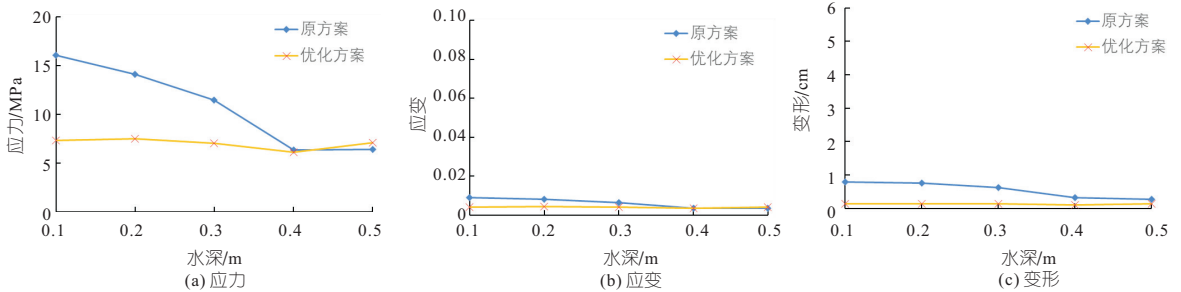


图 5 不同挡水高度下防洪箱优化方案结构受力特性分析

Fig. 5 Mechanics properties of optimization scheme flood box under different depth

## 4 结论

a. 针对一种高分子材质的注水式应急防洪箱,采用有限元分析方法,研究了箱体在不同挡水高度条件下的结构受力特性。结果表明,原体型下,箱体应力集中区主要在挡水面和箱体两侧;ABS、LLDPE、HDPE 及 PP 四种材质中,ABS 材质的防洪箱箱体在相同条件下的最大变形相对较小。

b. 针对箱体受力特性,对箱体挡水面及左右侧面进行了结构优化,进一步研究了优化方案下 ABS 材质的防洪箱箱体。结果表明,优化体型后箱体在同一工况下的应力、应变及变形均有较大的改善,研究成果为注水式应急防洪箱的优化设计提供了参考依据。

### 参考文献:

[1] SHAO M Q, ZHAO G, KAO S C, et al. Quantifying the effects of urbanization on floods in a changing environment to promote water security-A case study of two adjacent basins in Texas[J]. Journal of hydrology, 2020, 589: 125154. DOI: 10. 1016/j.

表 2 优化方案不同挡水高度下防洪箱结构受力特性  
Tab. 2 Mechanics properties of optimization scheme flood box under different depth

水深/m	最大应力/MPa	最大应变	最大变形/cm
0.1	7.31	0.004	0.13
0.2	7.50	0.004	0.13
0.3	7.01	0.004	0.13
0.4	6.10	0.003	0.11
0.5	7.08	0.004	0.13

由表 2、图 5 可看出,优化方案下,箱体的应力、应变及变形的变化规律与原方案一致,随着挡水高度的增加,其最大应力、应变及变形逐渐减小,0.4~0.5 m 挡水高度附近箱体内、外达到平衡。优化方案下,相同工作条件下,防洪箱箱体的应力、应变及变形有了较大的改善,其最大应力由原体型的 16.09 MPa 下降至优化体型的 7.31 MPa,最大变形由 0.78 cm 下降至 0.13 cm。箱体结构受力特性有了明显的改善。

jhydrol. 2020. 125154.

[2] 陈文龙,徐宗学,张印,等. 高密度城市暴雨洪涝治理理论框架及其应用研究[J]. 水利学报, 2022, 53(7): 769-778.

[3] 鲁佳慧,刘家宏,刘创,等. 深圳市洪涝风险量化评估与损失预测[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 73-75, 11.

[4] 邱国玉,张晓楠. 21 世纪中国的城市化特点及其生态环境挑战[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6): 640-649.

[5] 黄火键,徐震,张继昌,等. 贵州省防洪减灾思路与对策研究[J]. 人民长江, 2023, 54(4): 15-22.

[6] 路明,孙兴兰,李海民. 基于 workbench 的双悬臂平面钢闸门稳定性研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(6): 172-174.

[7] WANG S Z, MARIA G, LUC D, et al. Feasibility of Kinetic umbrellas as deployable flood barriers during landfalling hurricanes[J]. Journal of structural engineering, 2022, 148 (5): 04022047.

[8] 徐进超,王小东,董家,等. L 型城市应急防洪屏挡水稳定性研究[J]. 江苏水利, 2023(4): 70-72.

[9] 陈梁擎,袁沛,章立,等. 组合式防洪挡板系统抗冲击能力分析[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(12): 70-73.

## 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