

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231204002

城市曲面应急防洪屏结构优化研究*

王小东¹, 徐进超², 赵君², 顾芳芳¹

(1. 南京水利科学研究所, 江苏南京 210029; 2. 南京信息工程大学, 江苏南京 210044)

摘要: 研发新型防洪抢险装备, 对于防御城市洪涝灾害, 保障城市生命线安全具有重要的意义。采用数值仿真模拟的方法, 分析了城市曲面应急防洪屏(以下简称“防洪屏”)曲面拱度对结构受力特性的影响, 进一步对防洪屏的结构体型进行了优化研究。结果表明: 在同一挡水工况下, 随着曲面拱度的增大, 防洪屏在同一挡水条件下, 所承受的应力逐渐减小, 变形明显改善; 根据计算结果提出了优化方案, 优化的新体型防洪屏在水深小于0.8 m, 流速小于1.0 m/s挡水工况下, 结构最大应力小于材料特性指标安全极限阈值, 满足挡水安全稳定要求, 可以作为定型装备推广应用。研究成果为城市曲面应急防洪屏的优化设计提供了重要参考依据。

关键词: 城市曲面应急防洪屏; 有限元分析; 受力特性; 结构优化

中图分类号: TV122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0809-04

Structure Optimization of Curved Urban Emergency Flood-control Barriers

WANG Xiaodong¹, XU Jinchao², ZHAO Jun², GU Fangfang¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The development of innovative flood-retaining equipment is crucial for defending against urban flood disasters and ensuring the safety of urban lifelines. Using numerical simulation methods, this study investigates the impact of the curvature of curved urban emergency flood-control barriers on their structural stress characteristics and further optimizes the barrier structure. The results indicate that under the same water-blocking conditions, as the curvature of the barriers increases, the stress they endure gradually decreases, and their deformation significantly improves. Building on these findings, an optimization scheme was proposed. The proposed optimized scheme met operational conditions under water depths less than 0.8 m and flow velocities less than 1.0 m/s. Under these conditions, the structural stress remained below the yield stress of the materials, meeting the requirements for safe and stable water-blocking. These findings provide a valuable reference for the optimized design of curved urban emergency flood-control barriers.

Keywords: curved urban emergency flood-control barriers; finite element analysis; stress characteristic; structural optimization

* 收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2024-01-08

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020022, 2021024)、水利部重大科技项目(SKS-2022014)、江苏省科技计划项目(BZ2023021)资助

作者简介: 王小东(1984—), 男, 正高级工程师, 硕士。主要从事洪涝灾害、灾害防御技术等相关研究。E-mail: xdwang@nhri.cn

通信作者: 徐进超(1983—), 男, 讲师, 博士。主要从事水旱灾害防御等相关研究。E-mail: jexu@nuist.edu.cn

0 引言

近年来,随着我国城市化进程的不断推进,城市热岛及雨岛效应凸显,短历时强降雨导致的城市洪涝灾害多发频发,“城市看海”现象连年发生,城市洪涝灾害问题日趋严重^[1-2]。统计显示,我国有三分之二以上的城市发生过不同程度的暴雨洪涝灾害,严重威胁人民生命财产安全和社会稳定。应对城市暴雨链生洪涝灾害,频繁暴露出我国城市防灾减灾治理的不足和城市内涝应急抢险装备的短板,强化灾中应急处置与救援装备建设,对提高城市的整体防灾减灾韧性具有至关重要的作用。

针对新型防洪抢险装备,国内外学者开展了一些探索和研究。丁泽霖等^[3]对一种移动式防洪墙的力学性能进行了研究,并结合有限元分析方法,对其体型参数等进行优化分析。W.Guo等^[4]采用实验结合数值仿真模型对充气式橡胶坝在地铁入口等城市洪涝应急抢险中的应用进行了研究,对橡胶坝的挡水受力特性和应用进行了探索。针对功能高分子材质的L型城市应急防洪屏,徐进超等^[5]采用理论分析方法对其挡水稳定性进行了探究,得到了防洪屏在挡水过程中的稳定条件,并对其结构受力特性进行了初步的分析。为了进一步研究防洪屏在不同动、静水作用下的挡水受力特性,探索其体型优化措施,论文采用数值仿真模拟,对不同曲面拱度条件下的防洪屏结构受力特性及其体型优化开展研究,如图1所示。

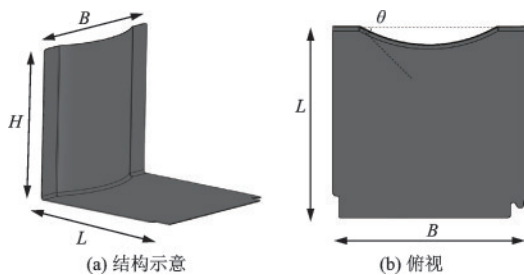


图1 城市曲面应急防洪屏结构及拱度

Fig.1 Sketch and curvature of urban flood-control barriers

1 数值仿真模型

假定防洪屏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' 和 x 分别为加速度矢量、速度矢量和位移矢量, $F(t)$ 为力矢量。假定物理量都不随时间而变化,可得到线性静力方程为:

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

式中, F 为静力载荷。式(2)表明,静力荷载值与时间和惯性无关。防洪屏在挡水过程中,其结构受力分析模型可简化为基于上式的本构方程。

基于上述理论,采用Ansys Mechanical软件中静力分析模块^[6],对防洪屏在不同挡水高度条件下的应力、应变和变形等特性进行分析。选取防洪屏的长 \times 宽 \times 高($L \times B \times H$)分别为1 044 mm \times 1 050 mm \times 1 000 mm。在模拟分析中,假定防洪屏始终与地面紧贴,不发生相对滑动。其中水流产生的动水压力 $F_{动}$ 采用动量定理进行计算^[7]。防洪屏模型网格采用0.01 m进行划分,网格数量为16万个。

2 结构受力特性分析

王小东等^[8]对4种常见高分子材料的力学特性进行了对比分析,结果表明:ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物)、LLDPE(线性低密度聚乙烯)、HDPE(高密度聚乙烯)、PP(聚丙烯)等材料中,ABS材质防洪屏在挡水过程中变形最小。对材质为ABS(弹性模量为2.39 GPa,泊松比为0.399),曲面拱度 $\theta = 0^\circ$ 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 和 75° 等6种角度下的防洪屏在0.2~0.8 m挡水高度下的受力特性进行了研究。

结果表明,无拱度的防洪屏在挡水过程中,迎水面产生较大的应力和变形,其最大应力主要集中在迎水面和承水面的交界处,如图2(a)所示,最大变形发生在迎水面顶部。与无拱度防洪屏受力特性类似,城市曲面应急防洪屏在挡水过程中,随着挡水高度的增大,所受的应力、应变和变形也逐渐增大。最大应力发生在防洪屏迎水面和承水面交界处两侧的边缘,在该处存在应力集中,如图2(b)、(c)所示,最大变形发生在防洪屏迎水面的顶端两侧。

对比不同曲面拱度的防洪屏可知,防洪屏采用挡水曲面体型可有效分散防洪屏在挡水过程中的应力,极大的改善防洪屏的应变和变形,见表1及图

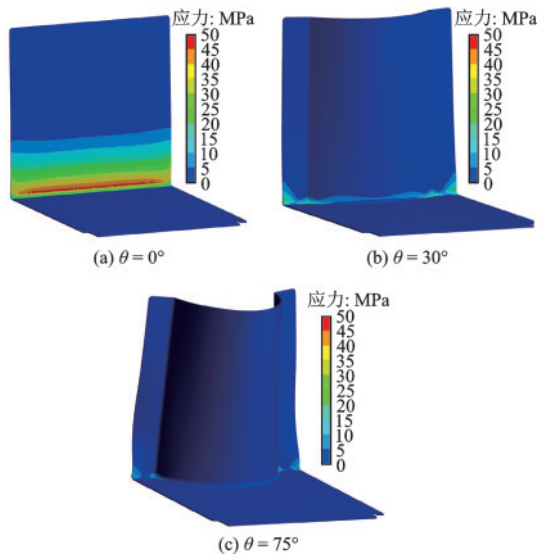


图2 典型工况下防洪屏结构受力特性:挡水高度0.6 m
Fig.2 Structure stress characteristics of curved flood-control barriers with retaining water depth of 0.6 m

表1 不同曲面拱度体型防洪屏的结构受力特性

Table 1 Structural stress characteristics of flood-control barriers with different curvature

拱度/(°)	水深/m	最大变形/m	最大应变	最大应力/MPa
$\theta = 0$	0.2	0.012	0.000 6	1.38
	0.4	0.188	0.005 5	13.15
	0.6	0.929	0.019 8	47.41
	0.8	2.893	0.048 8	116.61
$\theta = 15$	0.2	0.002	0.000 8	1.82
	0.4	0.028	0.006 3	15.10
	0.6	0.116	0.021 0	49.91
	0.8	0.316	0.048 1	114.43
$\theta = 30$	0.2	0.001	0.000 6	1.26
	0.4	0.015	0.005 2	10.36
	0.6	0.061	0.017 4	34.60
	0.8	0.164	0.040 5	80.57
$\theta = 45$	0.2	0.001	0.000 5	1.03
	0.4	0.008	0.004 3	8.33
	0.6	0.033	0.014 3	27.94
	0.8	0.088	0.033 4	65.39
$\theta = 60$	0.2	0.000	0.000 4	0.83
	0.4	0.004	0.003 5	6.64
	0.6	0.019	0.011 7	22.32
	0.8	0.050	0.027 4	52.43
$\theta = 75$	0.2	0.000	0.000 4	0.71
	0.4	0.003	0.003 1	5.25
	0.6	0.011	0.010 3	17.67
	0.8	0.031	0.024 3	41.65

3. 挡水高度0.8 m工况下,拱度为15°时,最大变形为0.316 m,最大应力为114.43 MPa;拱度为75°时,最大变形降至0.031 m,最大应力下降至41.65 MPa。因此,在防洪屏的结构优化设计中,可采用适度的曲面拱形来有效改善其结构受力特性。

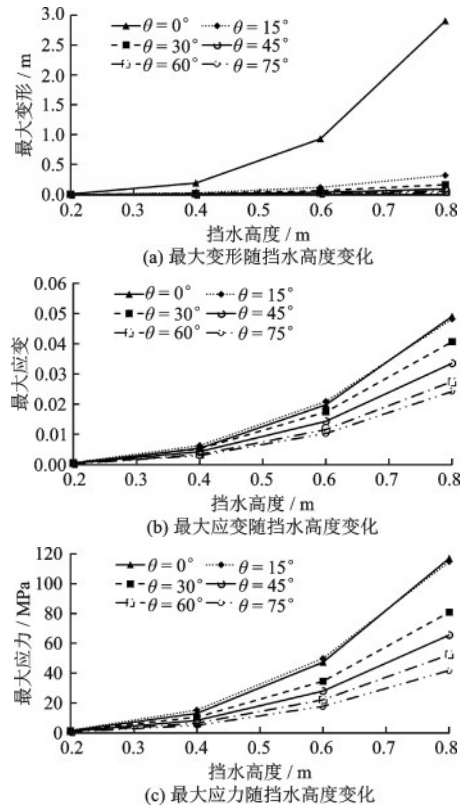


图3 不同曲面拱度防洪屏的结构受力特性

Fig.3 Structure stress characteristics of curved urban flood-control barriers with different curvature

3 优化分析

结合上述研究成果,对防洪屏的结构体型进行了优化研究。综合结构受力特性,同时考虑整体美观、制造工艺以及相互搭接、堆叠的便捷性等因素,选取最终优化方案为拱度25°,防洪屏整体长、宽、高与原体型保持一致;同时,在防洪屏应力集中区域增加两条拱形凸肋来改善其受力特性,如图4所示。

对防洪屏优化体型在挡水高度0.8 m,水流冲击流速0.2~1.0 m/s条件下的结构受力特性进行进一步的研究。由计算结果可知,采用上述优化方案后,防洪屏的应力相较原方案有较大的下

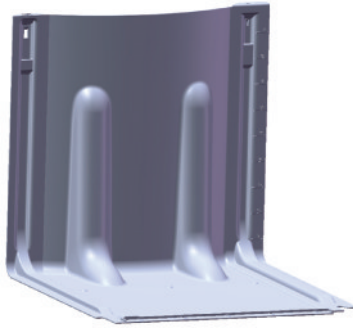


图4 城市曲面应急防洪屏优化体型

Fig.4 Optimized shape of curved urban flood-control barriers

降,见表2。在挡水高度0.8 m,流速1.0 m/s以内,防洪屏所受的最大应力为30.0 MPa,小于防洪屏材质的屈服强度安全极限阈值36 MPa^[8];变形最大约为0.065 m,整体变形相对较小,见图5及表2。

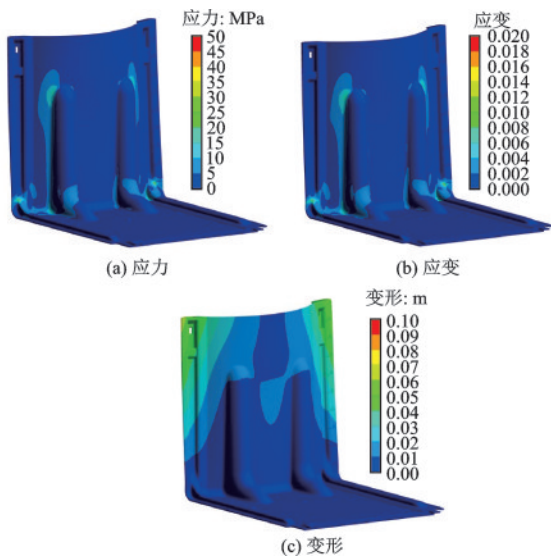


图5 防洪屏优化体型典型挡水受力特性: $h=0.8\text{ m}$, $V=1.0\text{ m/s}$

Fig.5 Stress characteristics of optimized flood-control barrier with $h=0.8\text{ m}$, $V=1.0\text{ m/s}$

表2 防洪屏优化体型不同流速条件下的结构受力特性

Table 2 Structure stress characteristics of optimized flood-barrier with different velocities

流速/ m	最大变 形/m	最大 应变	最大应 力/MPa	Fr	$(0.5 + Fr^2)/\mu$
0.0	0.053	0.012 0	25.37	0.00	1.00
0.2	0.054	0.012 1	25.56	0.07	1.01
0.5	0.056	0.012 5	26.53	0.18	1.06
0.8	0.061	0.013 4	28.33	0.29	1.16
1.0	0.065	0.014 2	30.00	0.36	1.25

防洪屏在挡水过程中,易在水流的作用下发生滑动和倾覆。王小东等^[8]的研究表明,为保证防洪屏的防滑稳定,防洪屏的长高比与来流弗劳德数需满足一定的关系:

$$L/h \geq \frac{1}{\mu}(0.5 + Fr^2) \quad (3)$$

式中,弗劳德数 $Fr = V/\sqrt{gh}$, V 为流速; h 为挡水高度; g 为重力加速度; μ 为摩擦系数。假定 $\mu=0.5$,则在最不利工况,即流速为1.0 m/s,挡水高度0.8 m时,上式中 $L/h=1.31$, $(0.5 + Fr^2)/\mu=1.25$,满足稳定条件 $L/h > (0.5 + Fr^2)/\mu$,防洪屏在各工况下均可保持稳定。

4 结 论

城市防洪领域韧性建设对于防洪抢险新技术、新装备的需求日益增长。本文采用有限元分析手段,针对一种功能高分子材质的城市内涝应急抢险新装备——城市曲面应急防洪屏,在不同挡水条件下的结构受力特性开展了研究。结果表明,在同一挡水工况下,随着曲面拱度的增大,防洪屏的变形和应力逐渐减小。在此基础上,提出了防洪屏优化体型,新体型防洪屏在水深小于0.8 m,流速小于1.0 m/s挡水工况下,结构最大应力小于材料特性指标安全极限阈值,满足挡水安全稳定要求,可以作为定型装备推广应用。研究成果为城市曲面应急防洪屏的优化设计提供了重要参考依据。

参考文献:

- [1] 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.
Chen W L, Xu Z X, Zhang Y, et al. Theoretical framework and application of urban rainstorm flood control in high-density cities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 769-778. (in Chinese)
- [2] Su C, Yuan Z W. Research on design of extensible mobile flood control wall in underground [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 9173769.
- [3] 丁泽霖,朱轩毅,张宏洋,等.基于响应面法的移动式防洪墙优化分析[J].人民黄河,2021,43(11):69-75.

(本文编辑:周小潭)

(下转第825页)