

外滩空箱式防汛墙人群荷载限值研究

施玉青

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 随着城市更新的不断推进,外滩空箱式防汛墙的结构安全备受关注。外滩地区人流密集,人群荷载是影响结构安全的关键因素之一,亟待明确合理的人群荷载限值。基于外滩空箱式防汛墙顶部结构的实际设计参数,运用有限元法对不同人群荷载下防汛墙顶部结构的受力情况进行模拟与分析,揭示了其内力分布规律。结果表明:满足顶部结构安全要求的人群荷载限值为 5.0 kN/m^2 ,建议将人流密度控制在 7 人/m^2 以内。研究结果可为后续防汛墙的安全评估、加固设计以及日常管理提供重要的理论依据和参考。

关键词: 防汛墙;人群荷载;结构安全;外滩

中图分类号: TU99

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0201-04

Research on Crowd Load Limit of Hollow-box Flood Control Wall in the Bund

SHI Yuqing

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: With the continuous advancement of urban renewal, the structural safety of the hollow-box flood control wall in the Bund has drawn increasing attention. There is a dense flow of people in the Bund, and the crowd load is one of the key factors affecting the structural safety. In the densely populated Bund area, crowd load is a key factor affecting structural safety, therefore it is urgent to clarify the reasonable limit of crowd load. Based on the actual design parameters of the top structure of hollow-box flood control wall in the Bund, the finite element method is used to simulate and analyze the stress situation at the top structure of flood control wall under various crowd loads, and reveal the internal force distribution patterns. The results indicate that the crowd load limit to meet the safety requirements of top structure is 5 kN/m^2 . It is recommended that the pedestrian density is controlled within 7 persons per square meter. The research results can provide the important theoretical basis and reference for the subsequent safety assessment, reinforcement design and routine management of flood control wall.

Keywords: flood control wall; crowd load; structural safety; the Bund

0 引言

近年来,水利工程中因为堆载引发的工程事故时有发生。2009年莲花河畔景苑的防汛墙、2013年跃进河防汛墙^[1]和2017年闵南船厂防汛墙^[2]等险情均由堆载所致。墙后荷载不仅限于堆载,对于外滩防汛墙而言,人群荷载更是其主要受力荷载。

外滩防汛墙于1991—1993年分3期实施完成,后续于2009年进行了加固改造^[3]。外滩是上海最著名的景区之一,是市区内游客和市民最为集中的区域之一。在大型活动或节假日期间,外滩的人流密度通常达到极高水平,甚至发生过踩踏事故^[4]。初

步估算,外滩踩踏事故发生期间,平均人流密度为 $6\sim 7 \text{ 人/m}^2$,峰值区域可能达到 $7\sim 8 \text{ 人/m}^2$,换算下来人群荷载峰值为 $4.9\sim 5.6 \text{ kN/m}^2$ (按每个人 70 kg 考虑),过高的人群荷载可能会对防汛墙结构产生影响。

关于荷载导致工程建(构)筑物破坏的研究,已有诸多学者进行了探讨。杨敏等^[5]分析出上海某工业房屋顶坍塌的主要原因是长期堆载;张琳琳等^[6]研究了墙后堆载下高桩承台式防汛墙变形规律;董学刚等^[1]分析了上海市市区段黄浦江防汛墙墙后堆载限值,但并未对空箱式防汛墙进行研究;汪振^[7]开展了堆载引起岸坡土体与高桩码头相互作用机制的试验研究。关于人群荷载对结构的影响,主要集中于建(构)筑物对人群荷载的动力响应分析^[8-13]。

针对外滩及水利管理部门高度关注的外滩防汛

收稿日期: 2025-01-10

作者简介: 施玉青(1992—),男,硕士,工程师,从事水工结构设计工作。

墙人群荷载限值问题,本文基于有限单元法,通过研究外滩空箱式防汛墙在人群荷载作用下的结构受力,确定了人群荷载限值,并给出了具体的人流密度数值,为今后防汛墙的安全评估、加固设计以及日常管理提供了理论依据和参考。

1 外滩空箱式防汛墙简介

外滩空箱式防汛墙北至人民英雄纪念碑、南至新开河路,总长度约1 470 m。

外滩空箱式防汛墙范围图见图1。

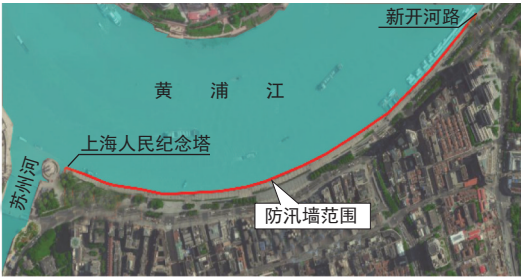


图1 外滩空箱式防汛墙范围图

外滩防汛墙为1级水工建筑物,标准段基本结构形式为前管桩、后板桩的高桩承台梁板空厢结构,每幅墙宽约21.0 m。空厢顶标高6.9 m,厢体内底板标高3.5 m,厢体宽12.0~15.5 m;桩基后排钢筋混凝土板桩作为挡土结构,底板及墙后地坪标高3.5~3.6 m。标准段空厢防汛墙断面图见图2。

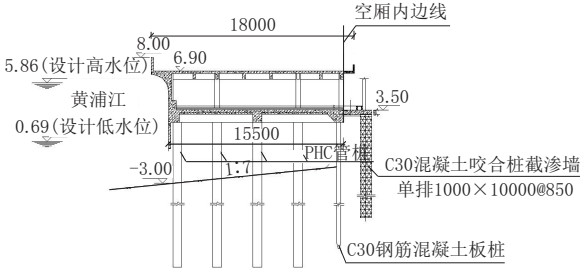


图2 标准段空厢防汛墙断面图(单位:mm)

外滩空箱式防汛墙人群荷载限值主要由防汛墙顶部结构确定。顶部结构为肋板结构,顺河道方向宽21.0 m,垂直于河道方向长18.0 m,其中外挑1.5 m椭圆平台。面板为非等跨布置,顺河向跨径2.1~8.4 m,垂直于河道方向跨径1.0~2.4 m。空箱式防汛墙顶部横梁、纵梁、面板均采用C25钢筋混凝土,横梁规格为350 mm×700 mm,纵梁规格为250 mm×700 mm,面板厚度为180 mm。

外滩空箱式防汛墙顶部结构平面图见图3。

根据《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008)和外滩防汛墙的结构配筋,防汛墙顶部结构在单一内力下的允许承载能力见表1。

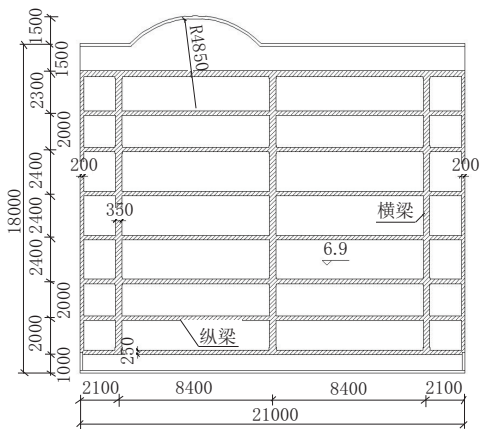


图3 外滩空箱式防汛墙顶部结构平面图(单位:mm)

表1 外滩防汛墙顶部结构的允许承载能力

构件类型	内力	允许承载能力
横梁	弯矩/(kN·m)	462.72~604.08
	剪力/kN	728.88
纵梁	弯矩/(kN·m)	-317.73~236.3
	剪力/kN	352.59
面板	弯矩/(kN·m)	12.86

2 人群荷载下结构受力分析

为了更好地分析肋形结构的受力,尤其是外滩空箱式防汛墙面板为非等跨布置的情况,本次运用有限元法进行结构内力分析。

2.1 模型构建

根据空箱防汛墙顶部结构实际尺寸建立有限元模型,网格边长0.5 m,共生成1 665个计算点,1 588个计算单元。 X 向为顺河道方向, Y 向为垂直于河道方向。有限元计算模型见图4。

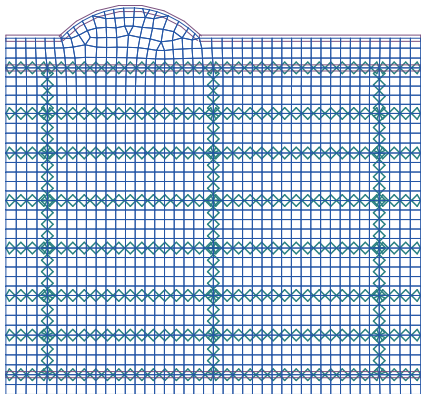


图4 有限元计算模型

2.2 力学参数

混凝土结构采用线弹性本构($E=28\text{ GPa}$, $G=11.2\text{ GPa}$, $\gamma=25\text{ kN/m}^3$)。

2.3 计算荷载

外滩防汛墙人群荷载限值研究所需考虑的荷载

主要为结构自重、人群荷载和铺装荷载。

结构自重按照实际结构尺寸考虑。

铺装荷载按照实际顶部结构实际铺装材料:厚 25 mm 花岗岩+厚 20 mm 水泥砂浆+厚 25 mm 轻骨料混凝土+厚 4 mm SBS 防水卷材+厚 1.5 mm 防水涂料+厚 20 mm 水泥砂浆,加权计算为 1.75 kN/m²。

人群荷载在现行水利行业规范中并无明确规定,参考《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012),外滩地区属于人群密集地区,按照人员密集的楼面取 3.5 kN/m²。为研究空箱式防汛墙人群荷载限值,另行取 4.0、5.0 kN/m²这 2 种情况进行分析。

2.4 计算工况

为了分析外滩空箱式防汛墙在人群荷载作用下的结构受力,设计了 3 种荷载布置方案,见表 2、图 5。

表 2 外滩空箱式防汛墙顶部结构设计荷载布置方案

布置方案	组合项目	备注
荷载组合 1	自重+满跨活荷载	见图 5(a)
荷载组合 2	自重+隔跨布置方案 1	见图 5(b)
荷载组合 3	自重+隔跨布置方案 2	见图 5(c)

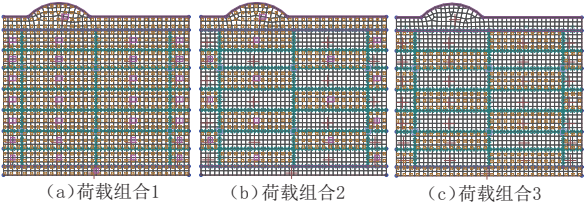


图 5 荷载组合示意图

荷载分项系数根据《水工混凝土结构设计规范》确定:自重的不利荷载分项系数取 1.05,有利荷载分项系数取 0.95;人群荷载的分项系数取 1.20。

2.5 计算结果

根据有限单元法,可得出不同荷载组合下的结构受力。图 6 为人群荷载取 5.0 kN/m²时防汛墙面板的弯矩分布图。

由图 6 可知:3 种荷载组合下,防汛墙面板顺河向弯矩(M_x)分布规律基本一致,负弯矩出现在支座位置,正弯矩出现在跨中位置,其中中跨的跨中位置正弯矩最大;垂直于河道方向弯矩(M_y)分布规律与顺河向弯矩(M_x)分布规律基本一致,中跨的跨中位置正弯矩最大。

3 种人群荷载下,不同荷载组合对于外滩空箱式防汛墙顶部结构的内力包络值见表 3。

由表 3 可知,横梁、纵梁、面板的内力包络值随着人群荷载的增大而增大,即梁、板的内力与人群荷载成正相关关系,但内力增长速度慢于人群荷载增

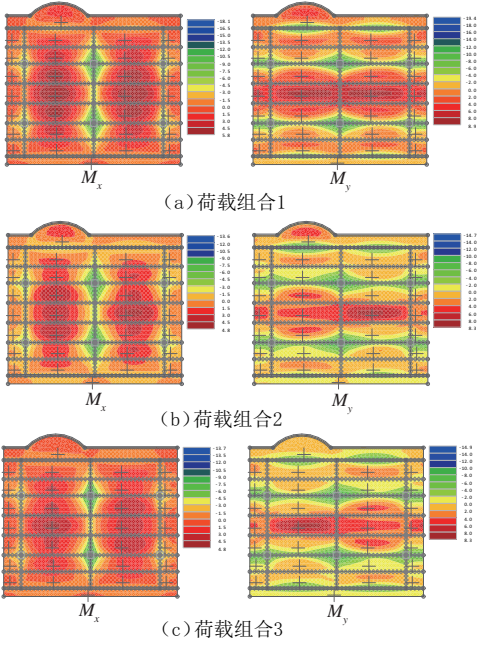


图 6 5.0 kN/m²人群荷载下防汛墙面板弯矩分布图

表 3 内力包络值

构件类型和内力		人群荷载/(kN·m ⁻²)		
		3.5	4.0	5.0
横梁弯矩/(kN·m)	+M	211.7	237.0	262.3
	-M	-230.5	-257.9	-285.2
横梁剪力/kN		182.2	203.7	225.1
纵梁弯矩/(kN·m)	+M	112.1	126.0	139.9
	-M	-157.3	-176.7	-196.1
纵梁剪力/kN		96.6	108.3	120.0
面板弯矩/(kN·m)		6.76	7.67	8.48

加速度。

3 人群荷载限值探讨

外滩空箱式防汛墙顶部人群荷载应视为动载更为合理,简化为静力分析时,应考虑动力和静力的转换关系,工程上通过引入动力系数而将动力问题巧妙地转化为静力问题。参考车辆关于动力系数的研究成果^[14-15]和《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012),动力系数取为 1.1~2.0。

通过对比面板、横梁、纵梁的受力和允许承载能力,外滩空箱式防汛墙的人群荷载限值由面板确定。不同动力系数下,面板的弯矩荷载效应组合设计值 S 与结构构件的截面承载力设计值 R 的关系见表 4。

根据计算结果,人群荷载取 5.0 kN/m²、动力系数取 1.1 时,面板的弯矩承载力安全系数基本上接近于上述规范要求的 1.35;动力系数取值大于 1.123 时,面板的弯矩承载力安全系数小于上述规范要求。考虑到人群荷载要小于其他如车行动力荷载等,因此

表 4 5.0 kN/m² 人群荷载下的承载力安全系数

内力	动力系数	弯矩荷载效应组合设计值 S	结构构件的截面承载力设计值 R	$K=R/S$
面板弯矩	1.1	9.328	12.86	1.38
面板弯矩	1.2	10.176	12.86	1.26
面板弯矩	1.3	11.024	12.86	1.17

注:本次弯矩荷载效应组合设计值将静力结果直接乘以动力系数。

动力系数取规范下限值 1.1 较为合理。此外,空箱结构顶部的花坛等设备原设计布置在立柱位置,本次计算未予以考虑实际布置位置偏差的影响。还有,外滩防汛墙运行 30 余年,由于沉降、渗流侵蚀等,会不可避免地出现一些结构裂缝,虽然可能不会危及整个防汛墙的安全,但是也需特别关注在人群往复荷载下后续裂缝开展的问题。基于上述分析,建议外滩空箱式防汛墙顶部需严格控制人群荷载不超过 5.0 kN/m²。

根据人群密度和人群荷载的关系,按照 70 kg/人推算,5.0 kN/m² 均布人群荷载相当于 7 人/m² 的人流密度。外滩踩踏事件发生期间,外滩空箱式防汛墙顶部的人群荷载已达到临界荷载,因此后续外滩防汛墙的改造提升必须严控面板上部荷载,避免人流密集期间导致的结构破坏。

4 结 语

(1) 外滩防汛墙结构受力与人群荷载大小呈正相关关系,人群荷载增加幅值大于外滩防汛墙内力的增加幅值。

(2) 外滩防汛墙顶部人群荷载限值主要由顶部面板控制,人群荷载限值建议为 5.0 kN/m²,控制人流密度不超过 7 人/m²。

(3) 外滩防汛墙后续维修加固应重点关注顶部

面板跨中区域和板梁衔接位置,后续改造提升时必须严控面板上部荷载,避免人流密集期间导致的结构破坏。

参考文献:

[1] 董学刚,石永超.黄浦江上海市区段防汛墙墙后堆载限值研究[J]. 人民长江,2019,50(12):113-117.

[2] 仲云飞,田静.高填土下防汛墙出险的原因分析及抢险措施——以闵南船厂段防汛墙抢险为例 [J]. 城市道桥与防洪,2020(6):31-134.

[3] 郑健吾.上海市外滩防汛墙外移综合改造工程[J]. 城市道桥与防洪,1994(3):40-45.

[4] 张宇,王建成.突发事件中政府信息发布机制存在的问题及对策研究——基于 2015 年“上海外滩踩踏事件”的案例研究[J]. 情报杂志,2015,34(5):111-117;65.

[5] 杨敏,朱碧堂,陈福全.堆载引起某厂房坍塌事故的初步分析[J]. 岩土工程学报,2002(4):446-450.

[6] 张琳琳,石永超,袁昊.墙后堆载下高桩承台式防汛墙变形规律研究[J]. 城市道桥与防洪,2017(3):156-159;191.

[7] 汪振,戴启权,张宇亭,等.堆载引起岸坡土体与高桩码头相互作用机制试验研究[J]. 岩土工程学报,2024,46(增刊1):254-258.

[8] 王晋平,陈隽.人群步行荷载等效动载因子及应用[J]. 振动与冲击,2024,43(16):269-277.

[9] 王双旭.密集人群荷载作用下行桥振动响应分析[D]. 成都:西南交通大学,2020.

[10] 马斐,张志强,李爱群.大跨钢楼盖人群荷载激励下减振控制分析[J]. 振动.测试与诊断,2013,33(3):514-520;532.

[11] 张家华,高承勇,秦卫红,等.大跨度楼面人群荷载作用响应分析[J]. 建筑结构学报,2011,32(11):177-182.

[12] 张志强,马斐,李爱群,等.大跨钢结构楼盖人群荷载响应分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2011,27(3):517-523.

[13] 李昊,简方梁.人群行走荷载作用下的人致结构振动[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2010,38(4):125-130.

[14] 杨利国.交通荷载拟静力分析与动力模拟方法探析[J]. 黄河水利职业技术学院学报,2019,31(1):29-31;41.

[15] 周华飞,蒋建群,毛根海.路面不平整引起的车辆动荷载分析[J]. 中国市政工程,2002(3):12-15.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

