



由于水门/轮渡码头用地条件有限,再加上突发事件的不可预测性,研究突发事件下水门/轮渡码头陆域人流逃生路径规划、应急疏散通道优化设计、永久与临时避难区布局与空间预留要求等应急疏散措施,从码头陆域关键设施运行失效时间、供给容量饱和和状态分析入手,建立世博园区客运码头应急人流疏散组织方案评价标准与方法,具有必要性和迫切性,为轮渡/水门在世博期间的客流运营组织和管理方案实施提供了参考依据。

## 1 相关文献综述

国内外对高密度人群集散安全的研究侧重于突发事件下尤其是建筑物火灾时人群安全疏散的分析。研究内容主要包括群集移动理论、人员疏散行为以及人群疏散计算机模拟仿真三个方面。Henderson, Roger L Hughes, D Helbing, Toffoli 等利用流体力学、社会学、统计物理等相关学科理论,建立人群运动的宏观模型和微观模型,宏观模型忽略个体之间的差异,而微观模型则对人流的详细行为进行描述<sup>[2]</sup>。随着北京奥运会与上海世博会在中国的成功申办,近年来国内开始了针对大型活动进行的高强客流安全集散研究。南开大学戎明彦、北京工业大学曹静等研究了静态、动态聚集人群的潜在风险指数,得出奥运场馆人群聚集风险分析方法<sup>[3]</sup>和奥运应急交通疏散预案评价体系<sup>[4]</sup>。东北大学陈宝智、武汉大学方正、香港城市大学卢兆明、中国科技大学杨立中、上海大学陈然等都进行了建筑空间人员疏散过程与计算机模拟研究<sup>[2]</sup>。同济大学吴娇蓉通过比较分析中国现行的《地铁设计规范》与美国消防协会“NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems—2007 Edition”在火灾情况下地铁车站的紧急疏散计算方法、各类疏散设施的指标取值。指出中国规范自动扶梯的疏散通行能力取值偏高,没有明确给出各类疏散设施的疏散步行速度等指标<sup>[5]</sup>。根据疏散处理原则,空间表达方式,人群表示方法,行为表示方法等建模方法的不同,目前大约有28种计算机仿真模型,其中很多模型已成功用于商业软件的开发,比较知名的软件包括 EXODUS 系列软件、EGRESS, Paxport, Legion 等。

2010年上海世博会首次提出水门概念,并且园区跨江设置,水门和越江轮渡合用客运码头,丰富了客运码头的使用功能,也对客运码头的人流疏散提

出新的要求,而在相关文献中很难找到高强客流下客运码头人流应急疏散通道的相关理论和方法。另一方面,我国对行人聚集安全理论、疏散行为的研究还处于起步阶段,除地铁站外还没有出台各种类型建筑、场站、客运码头的疏散时间评价标准。因此,本文将通过世博园区客运码头人流应急疏散情景分析、人群行为分析基础上的应急疏散通道设计方法、应急疏散通道人流组织评价方法与评价标准研究,补充和完善客运码头人流疏散方面的相关研究成果。

## 2 世博园区客运码头人流应急疏散情景分析

针对世博园区客运码头和渡船可能突发的各种应急情况,人流的应急疏散可分为以下四种情况:渡船在行驶途中(离岸后还未到达对岸)发生意外(如:船上发生火灾),船上乘客需紧急疏散(至陆域);轮渡或水门码头陆域场站内发生意外(如:候船厅发生火灾),候船厅及场站内乘客需要向外紧急疏散;渡船抵达某一轮渡或水门泊位后,渡船或码头陆域场站内发生意外,船上及场站内候船乘客需要紧急疏散至站外;轮渡或水门场站周边发生突发情况,人员通过渡船方式从码头陆域经由水域向对岸疏散。第一种情况,由于受威胁的只是船上的乘客,码头陆域乘客的安全不受影响,故码头陆域不需大规模紧急疏散,因而紧急疏散的乘客数为发生意外的渡船上的乘客,如果渡船靠岸对码头陆域的疏散通道要求也较小;第二种情况,由于是码头陆域内发生意外,码头陆域内的乘客的生命、财产安全均会不同程度受到威胁,需要全部疏散,因而,疏散量及疏散通道要求相对第一种要高一些;第三种情况,也是轮渡、水门发生突发事件时的最不利情况,渡船内及场站内候船的乘客的安全都不同程度受到威胁,需要全部向外经由站内广场向外疏散,因而相对于第一和第二种情况疏散量最大,客流组成及流向最复杂,对疏散通道的要求也最高。第四种情况,码头陆域安全,周边区域的人员涌入码头,与前三种情况完全不同。

综上所述,按照客流应急疏散方向的指向分为两大类:将前三种情况归为第一类,游客由码头陆域向园区内疏散;第4种情况归为第二类,游客由园区内向码头陆域疏散。第一类中,第三种情况对于轮渡/水门疏散难度最大、疏散组织及设施要求最高,

属最不利情况,故本次研究以发生第三种情况为前提,进行相关的疏散组织和适应性分析.第二类应急疏散与码头渡船的运力及组织相关,不作为本文研究对象.

### 3 客运码头人流应急疏散通道设计方法

世博园区客运码头人流应急疏散方案在人群行为分析的基础上,以保障安全、通行和疏散成本最小化为目标,包括人流逃生路径规划、应急疏散通道优化设计、永久与临时避难区布局与空间预留要求等内容.永久与临时避难区需要结合世博园区总体规划方案制定,本文不做讨论.本文将重点讨论人流逃生路径规划、应急疏散通道优化设计方法.

(1) 人流疏散路径规划方法:按照行人紧急疏散时的行为习惯(人群一般具有“归巢”性、趋光性及向阔性、恐烟火性、从众性等行为特征),考虑行人选择路径的特点(人一般有走捷径的习惯,即选取离出入口最近的路径)和由于路径长短及选取各路径人群数量不同引起的疏散时间的差异,以避免疏散路径之间人流的交织、冲突为基本原则,规划人流疏散路径.

(2) 应急疏散通道优化设计方法:采用仿真技术,识别疏散通道上的瓶颈或拥堵点,分析原因并优化通道设计,提高通行能力、疏散安全性、减少疏散时间.

#### 3.1 人流疏散路径规划

码头陆域内乘客的逃生路径主要由下船客流逃生路径和候船厅内乘客逃生路径及集散广场候船乘客逃生路径组成.以世博园区内码头 L2/M2 为例,人流逃生路径规划见图 2.码头陆域集散广场设置了大量的绕行与隔离设施,其中排队绕行区采用软隔离设施,下船通道采用硬隔离设施<sup>[6]</sup>.这些设置一定程度上会影响疏散的安全性、有序性和快速性,人流应急疏散方案实施时,应制定绕行设施的临时拆卸方案,同时也作为人流应急疏散组织的配套措施.码头 L2/M2 疏散时应有限拆除的隔离设施如图 2 所示.

#### 3.2 应急疏散通道设计

《建筑设计防火规范 GB50016—2006》中规定“5.3.15 人员密集的公共场所、观众厅的疏散门不应设置门槛,其净宽度不应小于 1.4 m,且紧靠门口内外各 1.4 m 范围内不应设置踏步.人员密集的公共场所的室外疏散小巷的净宽度不应小于 3.0 m,并应直接通向宽敞地带”<sup>[7]</sup>.结合上述规范,在码头陆

域对疏散路径中的通道提出如下要求:

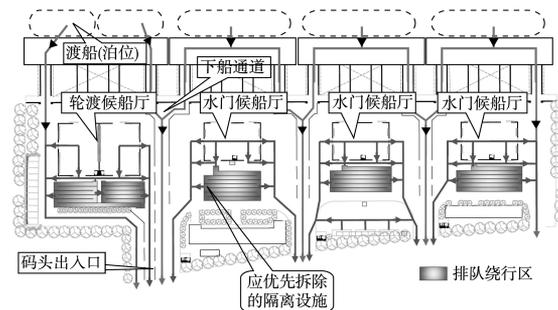


图 2 世博园区 L2/M2 码头人流逃生路径规划

Fig.2 Passenger escaping route planning of L2/ M2 terminal in Expo Garden

应急疏散时,下船乘客疏散流线仍保持与正常集散时下船流线一致,减少因下船乘客疏散流线发生剧烈变化引起的新的人流冲突和场面混乱,给人流疏散造成不必要的困难.即:下船乘客的正常出站通道即为其应急疏散通道.

下船通道的宽度取值为 7 m 以上,在划分下船通道时设置的隔离设施除了要考虑进站乘客正常集散时的通行需要外,还应考虑应急条件下疏散客流的通行需求,即在需要穿行或借用下船通道的位置设置必要的开口,开口宽度不小于 3 m,在下船通道快接近码头广场出入口的区域(距离出入口不小于 6 m)不设隔离设施.

为了减少排队绕行设施对候船厅内乘客疏散的影响,候船厅前设置的排队绕行区域的隔离设施距候船厅墙体净距应不小于 3 m,如遇其他障碍物时,应相应增加净距.候船厅主要出入口前的 3 m 通道作为候船厅内客流疏散应急通道的组成部分.

为了满足客流正常通行需要,同时也考虑客流应急疏散需求,候船厅前设置的排队绕行区域,其隔离设施与相邻候船厅绕行区隔离设施之间以及与周边其他障碍物(或建筑物)之间应保留不小于 3 m 的净距,困难时或需求较少时可酌情减少,但不低于 1.5 m.间距间形成的通道在应急疏散时可作为应急疏散通道.

候船厅紧急出口对应的区域不应设任何可能对人流疏散有障碍作用的设施或建筑,且紧急出入口与广场主出入口连接便利、路径清晰通达,为紧急出口预留应急疏散通道.候船厅紧急出口的宽度设计为 3 m,候船厅正常出入口的宽度设计为 6 m.

在应急疏散通道中及毗邻地区,尽量避免设置饮水台、厕所、绿化等,减少由于个别物体阻碍客流快速、有序疏散.

另外,应急疏散通道的宽度除了应满足上述要求外,还应根据各疏散路径疏散客流分配灵活调整.

## 4 客运码头人流应急疏散仿真分析

### 4.1 应急人流组织方案评价标准与方法

借助计算机仿真技术分析和评估世博园区客运码头在应急疏散时人流组织方案、码头各设施的设计与布局是否合理,评价采用的关键评价指标为疏散时间,辅助评价指标为码头各区域人流平均密度累积值.通过计算机模拟火灾发生场景,得出码头疏散通道的疏散时间、累积平均密度图和疏散图,分析码头疏散通道在疏散过程中被人流使用(或占用)的时间,各区域人流平均密度累积情况,从而判断人流疏散组织是否满足安全快速疏散要求,提出疏散时可能存在的问题,如疏散瓶颈或人流冲突重点区域,评估聚集风险.疏散路径最远点的疏散时间:即事故发生后,各疏散路径起点到码头区域出口所需的时间.疏散时间判断标准:《地铁设计规范》GB 50157—2003 第 19.1.19 条规定“应保证在远期高峰小时客流量时发生火灾的情况下,6 min(含 1 min 疏散反应时间)内将一列车乘客和站台上候车的乘客及工作人员全部撤离站台<sup>[8]</sup>”.国内建筑设计规范及其他相关消防规范中均没有明确规定疏散时间.文献[6]中给出了人流累积平均密度图与服务水平对应表.累积平均密度图可以直观和准确地确定疏散过程中的高密区和拥堵点、拥挤水平.在累积平均密度图中,颜色越接近灰度 6 表示该区域累积人流平均密度越高,拥挤水平越高,对应服务水平越低,该处可能是疏散瓶颈或者是人流冲突比较严重的区域;越接近灰度 1,人流平均密度越低,拥挤程度低,对应服务水平越高.如果累积平均图中灰度 6 和灰度 5 的区域通过进一步分析,得出该区域主要是由于人流短时向该点大量聚集造成,而不是由集散广场绕行隔离设施布置、疏散流线和路径设计引起,通过人流引导和再分配能够缓解拥挤的,则表明客运码头人流疏散通道设计是合理的.

### 4.2 客运码头应急疏散通道仿真分析

以世博园区内 L2/M2 码头为例,采用行人仿真软件 Legion 进行应急疏散仿真分析.疏散仿真情景设定:码头内发生突发事件,码头内人员须快速撤离码头区;发生紧急情况时,候船厅各出入口,广场各出入口均可正常使用;在获知码头发生突发情况前,按照最不利情况——各泊位均有船只到达,下船

客流按照原有流线设计和人流组织从码头出站通道撤离;按照应急计划设计,广场中应优先拆除的绕行隔离设施均得到及时拆除,其他设施在疏散过程中保留且未被破坏;在码头运营管理人员引导下,各区域疏散客流选择较近的出口和通道有序疏散,同时一定程度考虑部分乘客可能因某路径人流拥挤从而改选其他路径的情况;单个候船厅及单艘到达船只容纳人数均为 500 人,疏散时水门各泊位对应候船厅排队人数为 100 人,售票广场容纳人数按  $1.2 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$  确定;紧急情况发生时,客运码头 L2/M2 的陆域客流量采用世博园区 L2/M2 客运码头高峰小时实测客流.

码头 L2/M2 疏散仿真累积平均密度图见图 3,各区域疏散路径长度和疏散时间如表 1 和表 2 所示.由图 3 可知,码头出入口是较高密度的区域;码头 L2/M2 左侧轮渡候船厅前两侧的通道累积平均密度较高,主要是由于这两条通道是轮渡候船厅乘客、轮渡集散广场排队绕行区等待的乘客疏散的主要通道,聚集人员较多,且同下船游客叠加,致使两条通道疏散压力较大,累积平均密度较高.另外,轮渡候船厅内靠近紧急出口的部分累积平均密度较高,主要是由于与下船乘客交织,导致厅内乘客向外疏散难度增加,形成局部拥堵.

表 1 客运码头 L2/M2 候船厅人流疏散仿真分析表  
Tab.1 Evacuation simulation analysis of waiting rooms of L2/ M2 Terminal

疏散候船厅	容纳人数	最长疏散路径/m	疏散至厅外时间/s
L2-L3	500	20.6	99
L2-L1	500	20.6	97
M2 左	500	20.8	59
M2 中	500	20.8	60
M2 右	500	20.8	56

表 2 客运码头 L2/M2 广场人流疏散仿真分析表  
Tab.2 Evacuation simulation analysis of square of L2/M2 Terminal

疏散出口	出口宽度/m	最长疏散路径/m	疏散至广场外时间/s	疏散客流来源
西出口	23	161.5	300	下船客流
中 2 出口	12	127.5	165	下船客流
中 1 出口	12	118.5	172	下船客流
东出口	12	108.0	145	下船客流

注:表中疏散时间指的是实际疏散行动的所耗的时间,不包括反应时间.疏散时间节点为该码头同类设施最长的疏散时间

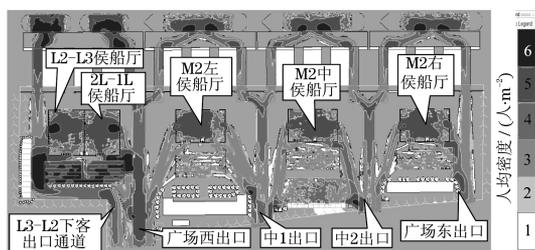


图3 客运码头L2/M2疏散仿真累积平均密度图  
Fig.3 Cumulative average density map of L2/M2 terminal evacuation simulation

最不利情况下码头到达船只的下船客流走出码头出入口的时间较长,广场内排队或候船厅的乘客疏散出码头的时间要较之少一些.由于下船乘客与候船厅内通过紧急出口向外疏散乘客人流交织、冲突,致使候船厅内通过紧急出口向外疏散客流疏散速度减缓,所需疏散时间增长(表1中L2-L3候船厅西紧急出口的候船客流最大疏散时间为1 min 39 s);而广场西侧下船通道为L3-L2下船乘客、L2-L3候船厅内候船乘客及集散广场部分排队等候乘客的主要疏散通道,疏散客流需求较大,不利情况下,共计约有超过1 400多人需从此通道疏散,故该通道成为疏散主要瓶颈(通道宽度为7 m).表2中的“最大疏散时间”为码头西侧L3-L2下船乘客经过下船通道疏散至码头广场西侧出入口的时间,约5 min.

世博园区客运码头在优先拆除部分隔离设施情况下未对疏散造成明显的困难,且在码头到达船只下船客流与排队广场候船客流同时疏散情况下,能将客流快速的撤离.在疏散仿真中,从候船厅疏散至厅外广场集散的最长耗时不到2 min(仿真结果1 min 39 s),码头内所有候船乘客(包括候船厅内)及下船乘客疏散至广场外的最长疏散时间约5 min,满足《地铁设计规范》对疏散时间的要求.综上所述,码头L2/M2疏散方案合理、有效和可行.

## 5 结语

在人群行为分析基础上,提出了世博园区内水门/轮渡码头陆域人流疏散路径规划、应急疏散通道设计方法;结合世博园区客运码头人流应急疏散的最不利情况,建立人流疏散仿真分析模型,采用疏散时间作为关键评价指标,码头疏散通道各区域人流平均密度累积值为辅助指标,结合累积平均密度图和疏散图建立客运码头人流疏散通道评价方法和评价标准.相关研究成果可为世博园内水门/轮渡码头

区域内步行和服务设施的合理设计提供依据和指导意见,为水门/轮渡码头在世博期间的客流运营组织和管理方案实施提供参考依据,丰富了国内客运码头人流应急疏散组织的研究理论.

## 参考文献:

- [1] 吴娇蓉,陈义红,冯建栋.上海2010世博会越江轮渡停泊特征分析[J].交通信息与安全,2010,28(1):94.  
WU Jiaorong, CHEN Yihong, FENG Jiandong. Passenger ferry docking characteristic analysis in Expo 2010 Shanghai [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2010, 28(1): 94.
- [2] 刘茂,王振.行人和疏散动力学研究现状及进展[J].安全与环境学报,2006,6(B07):121.  
LIU Mao, WANG Zhen. Pedestrian and evacuation dynamics research and development [J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(B07): 121.
- [3] 戎明彦.奥运会体育场聚集人群及其疏散风险的研究[D].天津:南开大学环境科学与工程学院,南开大学城市公共安全研究中心,2004.  
RONG Minyan. Olympic stadium crowd and the risk of evacuation research [D]. Tianjin: Nankai University. College of Environmental Science and Engineering, Center for Urban Public Safety Research, 2004.
- [4] 曹静.奥运应急交通疏散预案评价体系研究[D].北京:北京工业大学建筑工程学院,2007.  
CAO Jing. Study on evaluation system for Olympic emergency transportation evacuation [D]. Beijing: Beijing University of Technology. College of Architecture and Civil Engineering, 2007.
- [5] 吴娇蓉,冯建栋,陈小鸿.中美地铁车站火灾疏散设计规范对比与分析[J].同济大学学报:自然科学版,2009,37(8):1034.  
WU Jiaorong, FENG Jiandong, CHEN Xiaohong. Contrast and analysis on evacuation design of subway station between China and the United States [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(8): 1034.
- [6] 吴娇蓉,冯建栋,王昊.上海世博园区客运码头人流组织方案及适应性分析[J].同济大学学报:自然科学版,2011,39(1):55.  
WU Jiaorong, FENG Jiandong, WANG Hao. Pedestrian flow organization and adaptability analysis of passenger terminal in Expo2010 Garden [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(1): 55.
- [7] 中华人民共和国公安部.GB 50016—2006 建筑设计防火规范[S].北京:中国计划出版社,2006.  
Ministry of Public Security of People's Republic of China. GB 50016—2006 Architectural design code for fire protection [S]. Beijing, China Planning Press, 2006.
- [8] 中华人民共和国建设部.GB 50157—2003 地铁设计规范[S].北京:中国计划出版社,2003.  
Ministry of Construction of People's Republic of China. GB 50157—2003 Metro design specifications [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.