

上海世博园区客运码头人流组织方案及适应性分析

吴娇蓉, 冯建栋, 王 昊

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 2010 年上海世博会园区内轮渡水门客运码头是高强度高密客流集散的重要场所之一. 通过客运码头内人流的活动链分析、人流寻路特性分析、人流安全性要求研究, 提出客运码头功能分区方法、各类步行设施设置推荐值、人流流线组织方法. 依托行人仿真平台, 研究人流组织方案适应性评价标准和评价方法, 结合上海世博园区内 1 号轮渡水门的案例分析, 开展适应性评价, 提出人流组织方案优化方法.

关键词: 上海世博园区客运码头; 人流组织; 适应性分析; 评价标准

中图分类号: U 491.2

文献标识码: A

Pedestrian Flow Organization and Adaptability Analysis of Passenger Terminal in Expo 2010 Garden

WU Jiaorong, FENG Jiandong, WANG Hao

(Key Laboratory of Road and Transportation Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Ferry terminal of Watergate and ferry passenger in EXPO 2010 Shanghai Garden is one of the important places with a commitment to high strength and high density passenger flow distribution. Through the analysis of activities chain, routing feature and security requirement of the pedestrian traffic inside the passenger terminal, the function zoning method of a ferry terminal is proposed and the dimension of various walking facilities and streamlines organization method is recommended. Based on the pedestrian simulation platform, the criteria and evaluation methods of the adaptability of the flow organization scenario are studied, and the optimization method in combination with the case studies of the 1st Watergate and ferry passenger in Expo2010 Garden is proposed.

Key words: ferry terminal in EXPO 2010 Shanghai Garden;

pedestrian flow organization; adaptability analysis; evaluation criteria

2010 年世界博览会在上海举办, 水上交通是世博期间出入园区及越江的主要交通工具, 承担着重要的运输任务. 世博园区内黄浦江水域面积约 1.6 km², 浦西岸线自南浦大桥至卢浦大桥长约 2.9 km, 浦东岸线自南浦大桥至后滩倪家浜长约 5.7 km^[1]. 在 2010 年 5 月 1 日—10 月 31 日为期半年的世博会运营期间, 平均入园的日参观人流为 39.8 万, 通过在园区围栏内设置轮渡水门等基础设施, 确保每日平均有 16 万参观客流的越江需求(约占总越江客流的 40%). 深入研究世博园区客运码头区域进出轮渡水门的人流组织方案; 制订有效的交通管理措施及应急措施; 开展轮渡水门人流组织方案适应性分析, 有助于分析 2010 年上海世博会水上交通集散人流目标实现方法, 也为其他大型活动人流运营组织提供理论支持.

1 国内外研究现状

水门的概念为本次世博会首次提出, 因此在文献中没有水门方面的研究成果; 有关城市轮渡的研究大都集中在轮渡的经济分析、前景预测方面^[2]; 轮渡航线配船的研究集中在应用线性或非线性规划、神经网络、蚁群算法以及借助其他软件和数学工具对航线的配船数量加以确定和优化^[3-4].

国内对于行人流的交通组织研究较少, 大型活动交通组织主要针对车辆^[5], 行人流的交通组织还处于起步阶段, 主要是对人流组织目标、原则和重点问题的分析或是对仿真软件在行人组织中应用的初步探

索.文献[6-7]提出了大型活动或赛事的交通需求和步行人流特点.文献[8]指出换乘站和枢纽内的流线具有多向性、不均衡性、复杂性等特点,在客流组织管理上以流线互不交叉、短捷合理、明确清晰为基本原则,加强流线的通过性和导向性.文献[9-10]分析了北京奥林匹克公园内的行人空间分布特征,通过行人交通流数据采集和模型参数标定,采用行人仿真工具对北京奥运会行人设施和管理方案进行综合分析,提出行人设施及行人疏散组织方案的优化建议.这些研究从不同角度论述了人流组织需要关注的问题,部分结论和研究方法可以在上海世博园区内客运码头人流组织方法和适应性评价研究中予以借鉴.

上海世博会期间,园区内客运码头陆域聚集高密度人流,在陆域范围同时考虑轮渡水门不同客流特征,进行合理客流人流组织的研究在文献中很难找到可供参考的理论.本文将通过客流活动链理论讨论码头功能分区的方法,研究人流组织原则和适应高强高密客流的各类步行设施设置推荐值,采用行人仿真技术开展人流组织方案适应性评价标准和方法研究.

2 客运码头陆域功能分区和人流组织原则

2.1 客流活动链和码头功能分区

上海世博园区内的客运码头游客活动可分为上船和下船两个过程,根据上、下船两种客流需求得出两类活动链.第一类,乘船游客→进入码头陆域入口→码头陆域广场(信息查询、购票、排队等)→候船厅→上船;第二类,下船游客→下船→下船通道→码头陆域出口→世博园区.按照客流活动链中排队、候船、集散等活动的内容,将码头除候船厅等建筑设施用地外的其他空间划分了几个功能区.¹ 正常步行区:为进出码头区游客提供通行功能的区域.² 排队等候区:即将进入候船厅游客的排队等候空间.³ 缓冲区:较高密度客流排队等候乘客的应急疏散空间,同时也作为排队等候区域和集散区的分隔^[11].

2.2 人流组织原则

2.2.1 客运码头陆域游客寻路和应急逃生行为特征

(1) 寻路.水门及轮渡的乘客均是初次到达码头,为了到达目的地而产生寻路行为.寻路行为除了受行人的内在因素(性别、年龄等)影响之外,主要受外部因素——原生信息和后加信息的影响.原生信息主要指建筑物的平面布局、出入口及厕所等设施

所在位置、形状、色彩或空间特色所传达的信息.后加信息主要指附加于建筑的设备,其中最为重要的就是引导标志系统.

(2) 应急逃生.紧急情况下,码头客流的快速疏散对于游客安全至关重要.这里主要考虑候船厅出入口和排队缓冲区的设置对于应急逃生的影响.⁴ 出入口:除主出入口之外,候船厅应另设紧急出入口,平时不开放.出入口设置的位置不同,对游客的逃生时间有显著影响.⁵ 排队缓冲区:人群拥挤排队的人均空间小于 $0.4 \text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 时,被认为是具有较高风险的人群聚集密度,不满足排队区域安全预警条件;若不设安全缓冲空间,一旦发生异常事件,发生群集伤害事故的概率很高^[11].因此,设置安全缓冲空间,使排队行人的潜在人均空间扩大一倍,人群的聚集风险将会大大降低.

2.2.2 客运码头陆域人流组织原则

为实现码头安全、有序、高效、通畅、便利集散人流的目标,人流组织需遵循以下原则:

(1) 人流流线应符合游客行走、寻路习惯.流线简单明确,慢进快出,通过渠化减少并尽量避免人流交叉、冲突.人流流线及路径布置应尽量节约占地,使场地能充分发挥作用.

(2) 客运码头陆域主出入口至候船厅出入口视线良好.在合适的位置安装引导标识,加快游客对目的地的定位,减少不必要的绕行、徘徊.

(3) 人流流线需重点考虑行人寻路和应急逃生对人流组织的影响.

3 客运码头陆域各类步行设施设置要求

按照客运码头陆域功能分区,推荐各功能分区的设施设计值如下:

(1) 码头及候船厅出入口宽度.根据《城市道路交通规划设计规范(GB50220—95)》,渡轮站进出口的尺寸应根据客运量的大小具体确定.日客运量在1~3万人次的,进口宽度应不小于6m,出口宽度应不小于8m;日客运量在3~5万人次的,进口宽度应不小于8m,出口宽度应不小于10m.

(2) 排队等候区平均空间需求 $0.4 \text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$,相当于美国道路通行能力手册(HCM2000)中D级服务水平^[11].不同的排队绕行区应便于识别,与各候船厅正对设置,且与人流主要通道方便连接,并能

容纳不少于一艘船额定载客量的 60% 的人数。

(3) 缓冲区平均空间需求 $0.6 \text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$, 这样排队空间加缓冲空间, 保证人均占有空间不少于 $1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 。

不同的功能分区之间宜设置一定的隔离设施进行分隔, 其中排队等候区人流之间宜设置柔性隔离设施(临时栏杆等), 客流缓冲区与正常步行区中的下船通道之间宜设置硬隔离设施(活动栅门等); 其他区域之间视情况设置相应的隔离设施。

按照上海世博园区游客在码头陆域上、下船两类出行活动链的人流活动特征、人流组织原则及码头功能分区, 确定合理的人流动线, 实现上、下船游客在码头区域的空间离散化。在此基础上, 还需考虑引导和控制人流使用的隔离设施对应急情况下紧急疏散的影响, 最终确定客运码头陆域人流组织方案, 园区内 1 号轮渡(L1)水门(M1)码头陆域人流组织方案见图 1。图中候船厅从左向右依次为: 1° L1-L2 , 0° M1 西 , $\gg \text{ M1 中 1}$, $\frac{1}{4} \text{ M1 中 2}$, $\frac{1}{2} \text{ M1 东}$ 。

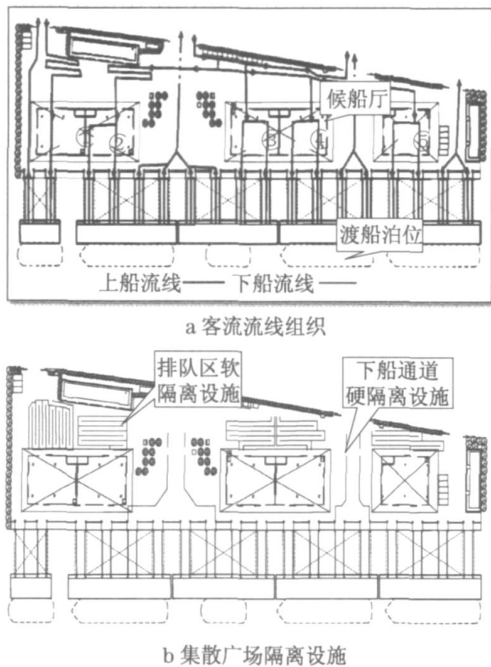


图 1 世博园区内 1 号码头人流组织图

Fig. 1 Pedestrian flow organization of ferry terminal No. 1 in EXPO2010 Shanghai Garden

4 客运码头陆域交通组织方案适应性分析

为评价园区内轮渡水门客运码头陆域的人流组

织方案对于高峰日越江世博游客需求的适应性, 采用了在国际上先进、业内认为最有效的行人仿真模型之一——Legion 仿真平台, 开展深入分析。高峰时段的客运码头各设施和人流组织方案的适应性分析, 将充分考虑人流随机到达情况下对码头集散功能的要求, 凡到达船只载客量均按满员考虑。对于使用水门入园的客流, 综合考虑交通便捷性和入园的客流比例以及票价影响。

4.1 人流组织方案适应性评价标准与方法

人流组织方案的适应性评价聚焦于客运码头陆域候船厅、集散广场绕行及隔离设施布置的适应性、客流需求与航线班次适应性。后者的适应性分析主要针对客运码头运营期间客流需求远超过航线供给能力时, 临时关闭码头入口决策的启动时机选择, 不是本文讨论的重点。本文重点研究前者的适应性, 即随机到达的游客进入码头陆域后, 游客分布, 陆域各功能空间占用、使用情况, 人流流线清晰、简单和便捷程度等。依托行人仿真平台, 选取码头区域累积平均密度图、空间利用图进行分析, 其中空间利用图可以起辅助评价作用。

累积平均密度图记录仿真期间码头内各区域的人流平均密度累积情况, 是衡量一个场所使用效果的最好工具。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, 越接近灰度 1 表示人均密度越低。结合服务水平分级, 可以评判码头区域人流组织方案的合理性。美国通行能力手册《HCM2000》根据行人空间的大小, 给出排队等候行人和正常行走行人的服务水平分级(见表 1)。由于世博园区客运码头服务对象是旅游观光人流, 因此确定服务水平的评价标准应同时考虑舒适性和运输要求。人流组织方案适应性评价标准为: 码头陆域集散广场各区域(包括排队绕行广场、候船厅、售票广场、进站通道、下船通道等)人均空间指标对应的服务水平在 D 级及其以上, 集散广场与渡船相连的上、下船通道、趵船、广场出站通道等区域由于设施使用特点, 人均空间指标对应的服务水平可控制在 E 级及其以上。如果码头陆域仿真得到的各区域累积平均密度满足上述要求, 则可认为人流组织方案合理。

依据表 1 排队等候与正常行走区服务水平分级, 需要对累积平均密度图中颜色进行标准化(见表 2)。通过对累积平均密度图的分析, 可以发现场所中哪些部位或地点在仿真期间较长时间出现较高密度(超出预期服务水平相应的密度指标)。根据客流移动特征和人流组织方案, 从中找出异常的(或不期望

出现的) 人流高密度点(或拥堵点), 借此判断人流在移动路径中的通畅程度, 间接判断移动过程中人流的舒适性、安全性、延误程度和寻路难易程度等, 是判断人流组织是否合理的重要依据。

表 1 排队等候与正常行走区服务水平分级表

Tab. 1 Service level of waiting area and walking area

服务水平	人流密度/(人·m ⁻²)	
	排队等候区	正常行走区
A	< 0.82	< 0.18
B	0.82~ 1.08	0.18~ 0.27
C	1.08~ 1.79	0.27~ 0.45
D	1.79~ 3.57	0.45~ 0.71
E	3.57~ 5.26	0.71~ 1.35
F	> 5.26	> 1.35

表 2 累计平均密度图与服务水平对应表

Tab. 2 Cumulative average density map corresponding to the the service level

灰度	人流密度/(人·m ⁻²)	服务水平	
		排队等候区	正常行走区
灰度 1	0~0.31	A	A—B
灰度 2	0.31~0.43	A	B—C
灰度 3	0.43~0.72	A	D
灰度 4	0.72~1.08	A—B	E
灰度 5	1.08~2.17	C—D	E—F
灰度 6	>2.17	D—F	F

空间利用图通过记录仿真期间每位乘客的每一步的位置, 揭示了一个场所多少空间正被使用。不同的灰度值代表某一空间单元仿真期间被占用的时间长度。大量使用的区域显示灰度 5 和灰度 6; 使用较少的区域显示灰度 1; 无法利用(到达)的区域显示白色。空间利用图能说明一个场所中哪个区域最多以及最少被使用; 能够对诸如“如果这个区域没被经

常使用, 能否被用作凉亭或售货亭”的问题的解决提供良好的支持。

采用空间利用图, 可以分析人流组织方案中各通行路径是否利用均衡, 也即各路径人流分配是否均匀。如果上船与下船客流在集散广场内上下船通道的利用上分布比较合理, 障碍物(如饮水台、厕所、取款机、绿化等)对人流影响或干扰较少, 各出入口和绕行设施排队入口、候船厅主要入口人流利用相对均衡, 则表明集散广场人流组织方案在布置隔离设施、充分利用各有效通行区域方面是比较合理的。另外, 空间利用图还可以看出人流流线交织与冲突情况, 表现为人流流线(即图中的同一色系的簇状线条)是否交叉, 如果人流流线在隔离设施附近没有形成明显的拐点, 流线顺畅, 冲突点少, 分布比较均匀, 则表明人流组织方案对流线的处理比较合理。

空间利用图与累积平均密度图是相互映衬、相互补充的。如果某个区域或某条路段经常被乘客使用, 且经常比较拥挤, 则该区域或路段无论在空间利用图还是累积平均密度图中显示的颜色都趋向灰度 6。如果障碍物明显阻挡了客流, 在空间利用图中表现为客流动线在障碍物附近发生明显不自然(流畅)的转向, 在累积平均密度图中该障碍物附近人流通行的区域一般呈现趋向灰度 5 和灰度 6 的颜色。

4.2 适应性评价步骤

根据世博会运营期间高峰小时 1 号轮渡(L1)水门(M1)客流实测数据, 采用仿真技术得到轮渡水门码头在高峰小时客流状态下的累积平均密度分布图和空间利用图(图 2, 3)。由图 2 得到 1 号轮渡(L1)水门(M1)各区域服务水平评价结果, 见表 3。

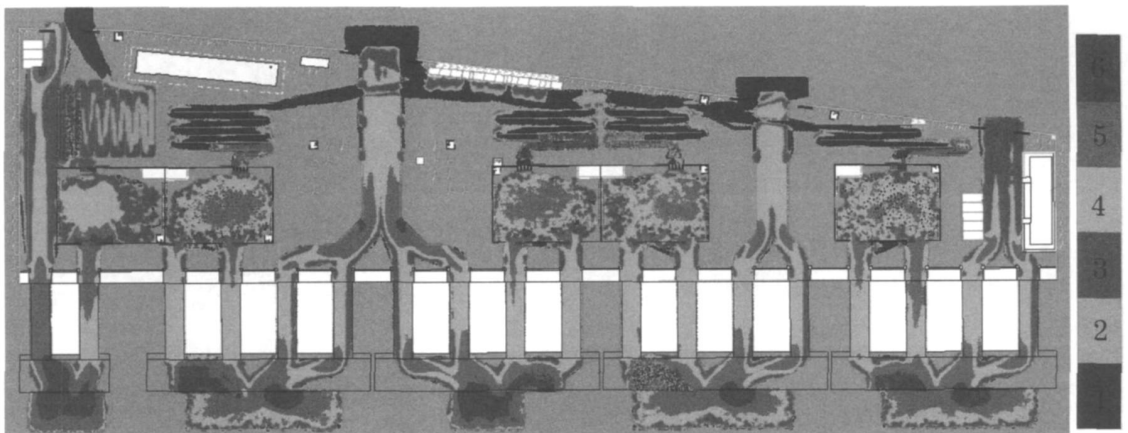


图 2 园区内 1 号码头高峰小时人流累积平均密度分布图

Fig. 2 Peak hour cumulative average density map of ferry terminal No. 1

表 3 园区内 1 号码头各区域服务水平评价

Tab.3 Evaluation of the service level in ferry terminal No. 1 area

区域	性质	服务水平
L1 L2 进站通道	步行	A—B
L1 L2 排队绕行区	等候	大部分 A, 少部分 B—D
L1 L2 候船厅	等候	大部分 A—B, 少部分 C
L1 L2 上船通道	步行	E—F
L1 L2 趸船及渡船	步行等候	C—E
L2 L1 下船通道	步行	E—F
L2 L1 下船通道(广场延伸段)	步行	D—E, 个别区 F
M1 进站通道	步行	A—B
M1 排队绕行区	等候	大部分 A, 少部分 B—D
M1 候船厅	等候	大部分 A—B, 少部分 C
M1 上船通道	步行	E
M1 趸船及渡船	步行等候	C—E
M1 下船通道	步行	E
M1 下船通道(广场延伸段)	步行	D—E, 个别区 F

从图 2 及表 3 可以看出,密度较高的区域分为以下几类:

(1) 渡船,由于较狭小的船舱空间容纳大量的乘客,所以密度很高。

(2) 候船厅及其与上船通道连接的入口,由于有大量的乘客在厅内候船并持续较长时间,故密度也较高;另外,大量乘客通过候船厅与上船通道连接的入口进入通道,在该区域产生短时拥堵,故密度较高。

(3) 候船厅前排队绕行广场,尤其是接近入口

的排队绕行区由于一定时间内在排队绕行广场等候的乘客不能进入候船厅,故有部分乘客会聚集在此等待一定时间,密度相对较高。

(4) 下船通道中存在明显转角的区域,由于喜欢走捷径等行人特性,人流在转角处一般会产生局部拥堵,转角内侧人员步速减缓,外围人员尽量向转角靠拢并对内侧人员造成压力,故转角处及邻近区域密度也较高。

对于密度相对较高的区域,如(1),(2),(3)类区域,由于设施和场所自身特性及人流集散需要,区域密度较高属正常情况,而对于(4)类密度较高的区域则需重点关注,通道转角也就是人流流向发生明显改变的拐点,需通过引导或改善设施布置方式和形式,降低其密度。如水门下船通道,可通过改变两个泊位下船通道的合并角度,如将直角转角改为钝角,降低转角处人流密度。在本次人流组织和集散广场设计时,已经充分考虑了上述可能出现的问题,在下船通道合并时尽量采用一个较大的角度,同时考虑了广场区域设施布局的整体美观要求。

由图 3 得到 1 号轮渡(L1)水门(M1)中流线受到较大限制或妨碍的位置,见表 4。从图 3 还可以看出候船厅、集散广场(尤其是轮渡候船厅前排队绕行广场)、售票广场及与各排队绕行广场相连接的道路等由于客流流动频繁,其利用率都较高。在广场布置及人流管理时应尽量保证这些区域和设施的流通性较好,尽量减少障碍物的影响。

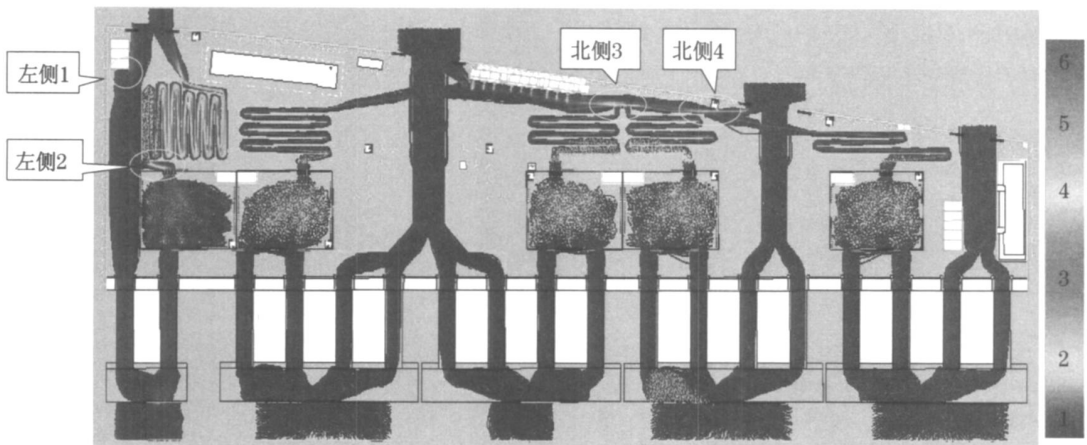


图 3 园区内 1 号码头高峰小时空间利用图

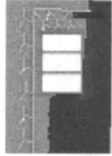
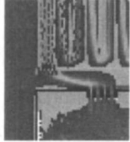


Fig. 3 Peak hour space use map of ferry terminal No. 1

综合以上分析,上海世博园区内 1 号轮渡(L1)水门(M1)的人流组织及集散广场绕行与隔离设施设计较为合理,无明显的人流冲突,在条件受限情况

下可避免引起不必要的拥堵,设施能较好地服务于高峰小时客流需求(表 5),并没有发现因人流组织和集散广场设计引起的较为突出的问题。

表 4 园区内 1 号码头流线受限区域分析及对策

Tab.4 Analysis and measures of streamline restricted areas in ferry terminal No.1

流线受限区域 ¹⁾	区域周边环境	原因分析	建议对策
左侧 1 	停车位右下角	停车位阻挡了下船乘客至广场出口的流线	在停车位下方加设引导设施(图示白色线条), 避免乘客径直走向停车位
左侧 2 	L1 绕行排队区域进入候船厅的通道	由于绕行广场排队出口未与候船厅入口正对	根据入站客流量, 将左侧 1—2 列排队绕行区拆除, 使排队绕行区出口正对候船厅入口
北侧 3 	两排队绕行广场入口处	由于两相邻排队绕行广场入口相邻较近, 且该区域狭窄	适当将入口位置左右错开一定距离, 建议该距离不要小于 2 m
北侧 4 	广场入口旁的厕所附近	由于通道较窄, 突出的厕所一定程度上阻挡了广场入口与售票广场之间的流线	移至对流线影响小的区域, 或与右侧厕所并排放置

1) 为图 3 所示区域

表 5 园区内 1 号码头高峰小时人流组织适应性分析

Tab.5 Peak hour adaptability analysis of pedestrian flow organization of ferry terminal No.1

对应候船厅	发船间隔 ¹⁾ / min	广场排队绕行 设施长度 ²⁾ /m	广场排队区可容纳 人数 ³⁾ /人	候船厅可容纳 人数/人	极限容许最大越江 客流/(人·h ⁻¹)	高峰小时实测越江 客流/(人·h ⁻¹)
L + L2	8	234.0	936	450~ 500	3 150	3 144
M1 东	60/ 15	119.5	478	450~ 500	400	372
M1 中 1	60/ 15	123.0	492	450~ 500	400	292
M1 中 2	60/ 15	132.5	530	450~ 500	400	400
M1 西	60/ 15	179.0	716	450~ 500	400	301

1) 轮渡满载率取 0.9, 即最大载客量 450 人·船⁻¹, 水门泊位白天发船间隔 60 min, 夜间作游览船使用, 发船间隔为 15 min, 游览船载客量 400 人·船⁻¹; 2) 单列排队绕行区宽 2.0 m; 3) 人均排队面积为 0.5 m²·人⁻¹.

5 结论

本文结合码头陆域客流活动链, 提出码头陆域功能分区的概念, 结合各功能分区特点和客流需求, 研究码头陆域正常步行区、排队等候区、缓冲区中各类步行设施设置推荐值, 结合人流组织原则, 提出人流组织方案. 依托行人仿真平台, 选取码头区域累积平均密度图、空间利用图, 结合人均密度、服务水平和排队容量等指标, 以园区 1 号轮渡(L1)水门(M1)为例, 开展客运码头陆域候船厅、集散广场绕行及隔离设施布置的适应性评价研究, 进行人流组织方案的优化与调整, 为大型活动的客流运营组织和管理

方案实施提供参考依据, 丰富了国内行人交通规划的研究方法.

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 Transportation Information and Safety, 2010, 28(1): 94.

[2] 于金铭, 陶琪. 从武汉轮渡看城市轮渡的发展趋势[J]. 船海工程, 1992(6): 16.
YU Jinming, TAO Qi. From the ferry of Wuhan to see the development trend of urban ferry [J]. Ship & Ocean

- Engineering, 1992(6): 16.
- [3] 李智, 陈明昭, 董治德. 基于神经网络的班轮航线配船优化方法[J]. 交通与计算机, 2000(1): 34.
LI Zhi, CHEN Mingzhao, DONG Zhide. An optimized method of passenger ship allotment in line based on neural network [J]. Computer and Communications, 2000(1): 34.
- [4] 金雁, 赵耀. 基于蚁群算法的航线配船[J]. 计算机工程与应用, 2007(25): 231.
JIN Yan, ZHAO Yao. Utilization of ant colony algorithms in shipping arrangement [J]. Computer Engineering and Applications, 2007(25): 231.
- [5] 杨忠振, 陈刚. 大型活动的交通组织方法研究[J]. 城市交通, 2007, 5(3): 81.
YANG Zhongzhen, CHEN Gang. Study on traffic management for major events [J]. Urban Transport of China, 2007, 5(3): 81.
- [6] 赵光华, 陈艳艳, 车广侠. 大型赛事步行人流交通特性研究[J]. 道路交通与安全, 2006, 6(2): 19.
ZHAO Guanghua, CHEN Yanyan, CHE Guangxia. Study on pedestrian flow traffic characters of special Games [J]. Road Traffic & Safety, 2006, 6(2): 19.
- [7] 刘小明, 陈艳艳, 安志强. 北京奥运行人交通组织初探[J]. 国外城市规划, 2004, 19(1): 46.
LIU Xiaoming, CHEN Yanyan, AN Zhiqiang. Beijing Olympic Games organization of pedestrian traffic [J]. Urban Planning Overseas, 2004, 19(1): 46.
- [8] 崔华伟, 贾俊芳. 铁路客运综合交通枢纽流线特点及组织研究[J]. 铁道运输与经济, 2007, 29(5): 26.
CUI Huawei, JIA Junfang. Passenger flow line characteristics and organization research in the integrated railway transport hub [J]. Railway Transport and Economy, 2007, 29(5): 26.
- [9] 沈党云, 李勃, 陈智宏. 奥林匹克公园行人交通需求预测及组织设计[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2008(1): 170.
SHEN Dangyun, LI Bo, CHEN Zhihong. Olympic Park pedestrian traffic demand forecast and organizational design [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008(1): 170.
- [10] 朱娜娜, 王江燕, 史建港. 行人仿真在奥运场馆中的应用[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(6): 85.
ZHU Nana, WANG Jiangyan, SHI Jiangang. Application of pedestrian simulation in olympic games [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(6): 85.
- [11] 吴娇蓉, 叶建红, 陈小鸿. 大型活动广场访客聚集行为控制指标研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2006(4): 599.
WU Jiaorong, YE Jianhong, CHEN Xiaohong. Analysis of the visitors gathering behavior characteristics on large scale plaza [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2006(4): 599.

(上接第 28 页)

D_a 成单调关系, Δ 随动偏应力水平的增大而增大。 D_a 可以合理反映海洋饱和粉砂循环荷载作用后不排水抗剪强度衰减的特性。

3 结论

利用 GDS 土体多功能动三轴仪和弯曲元测试系统对饱和粉砂进行了一系列试验, 研究了长期循环荷载作用下饱和粉砂的弱化特性, 得到如下结论:

(1) 饱和粉砂的刚度随循环次数的增加不断减小, 加载初期衰减较快, 后期衰减速率逐渐减缓, 长期循环加载下剪切模量最终趋于相对稳定值。动应力比越高, 刚度衰减越大, 等压固结比偏压固结刚度的弱化程度更显著。

(2) 不同的固结条件下, 循环荷载作用后饱和粉砂的不排水抗剪强度均发生降低, 并随动应力比的升高而加剧, 偏压固结相对于等压固结减弱了土体强度的弱化。

(3) 综合考虑动应力比、固结静偏应力等因素的影响, 海洋饱和粉砂在循环荷载作用下强度和刚度的弱化特性, 可以用动偏应力水平 D_a 来描述。

参考文献:

- [1] Airey D W, Fahey M. Cyclic response of calcareous soil from the northwest shelf of Australia [J]. Geotechnique, 1991, 41(1): 101.
- [2] Fahey M. Shear modulus of cohesionless soil: variation with stress and strain level [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29: 157.
- [3] Hyodo M, Hyde A F L, Aramaki N. Liquefaction of crushable soils [J]. Geotechnique, 1998, 48(4): 527.
- [4] Sharma S S, Fahey M. Degradation of stiffness of cemented calcareous soil in cyclic triaxial tests [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(7): 619.
- [5] Okur D V, Ansal A. Stiffness degradation of natural fine grained soils during cyclic loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27: 843.
- [6] Idriss I M, Singh R D, Dobry R. Nonlinear behavior of soft clay during cyclic loading [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1978, 104(12): 1427.
- [7] Yasuhara K, Hyde A F L, Toyota N, et al. Cyclic stiffness of plastic silt with an initial drained shear stress [C] // Proc Geotechnique Symp on Prefailure Deformation Behaviour of Geomaterials. London: Thomas Telford Ltd, 1997: 373- 382.