

大型客运码头风荷载特性和风环境分析

李波, 杨庆山, 侯亚委, 陈爱国

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 采用刚性模型测压风洞试验与 CFD 数值模拟相结合的方法, 对大型客运码头风荷载特性和风环境进行了分析。结果表明, CFD 数值模拟得到的码头屋盖风荷载分布与试验结果相吻合, 能够用于模拟复杂建筑群的绕流; 客运码头建筑物的布置形式对其屋盖风荷载影响较大, 降低屋盖下方附属建筑物的高度, 可以有效缓解气流在屋盖前缘的分离, 减小作用于其上的风荷载。码头风环境分析结果表明, 建筑物对气流的干扰作用是引起风加速的主要原因, 算例客运码头的风环境问题较为突出。

关键词: 风洞试验; 数值模拟; 风压分布; 速度比; 风环境

中图分类号: TU973.212

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.17.033

Wind load characteristics and wind environment of a large ferry terminal

LI Bo, YANG Qing-shan, HOU Ya-wei, CHEN Ai-guo

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Wind tunnel tests using a rigid model and CFD numerical simulation were conducted to investigate the wind load distribution and the wind environment of a large ferry terminal. Wind load distributions on the roof of the ferry terminal obtained with numerical simulation agreed well with those using wind tunnel tests. It was shown that the provided numerical model can be used to simulate the airflow around the ferry terminal; the layout of buildings in the ferry terminal affects the wind load on the roof obviously; with decrease in the height of ancillary buildings under the roof, the separation of airflow at the edge of the roof is relieved and wind load acted on the roof decreases. Analysis of wind environment showed that the interference effect of buildings on air flow is the main reason for wind speed increasing, and the problem of wind environment around the ferry terminal is prominent.

Key words: wind tunnel test; numerical simulation; wind-pressure distribution; wind speed ratio; wind environment

近年来,随着海岛旅游资源的不断开发利用,我国在海滨地区建设了一大批地标性大型客运码头,造型独特的大跨屋盖在这些客运码头中得到了广泛应用。由于大跨屋盖结构具有自重轻、柔性大、自振频率低等特点^[1-2],风荷载往往是结构设计中的控制性载荷^[3-4];再加之海滨地区风场往往具有基本风压大的特点,确定该类结构的风荷载特性,并对其风环境进行评估便成为该类建筑抗风设计及运营预警系统必不可少的内容之一。

唐山湾国际旅游岛客运码头是唐山湾国际旅游岛建设项目的地标性建筑,由一大二小呈品字形布置的贝壳形悬挑屋盖与两层弧形观光平台组成。其中,两

个小贝壳完全相同,并以大贝壳主轴为轴线左右对称(图1)。大贝壳屋盖悬挑长度为72 m,小贝壳屋盖为

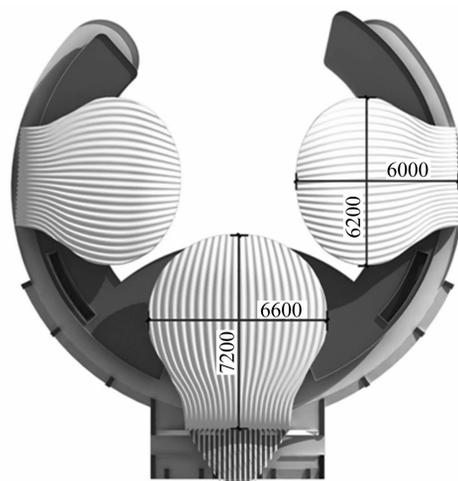


图1 唐山湾国际旅游岛客运码头 (单位: cm)

Fig. 1 Ferry terminal in Tangshan bay for island tourism (unit: cm)

基金项目: 国家自然科学基金项目(91215302, 51378060); 高等学校学科创新引智计划资助(B13002); 中央高校基本科研业务费资助(2014JBM088)

收稿日期: 2013-05-23 修改稿收到日期: 2013-08-24

第一作者 李波 男, 博士, 副教授, 1978年生

60 m。风荷载是唐山湾国际旅游岛客运码头屋盖设计的控制性载荷,并且,码头局部风环境是影响其运营预警系统的主要指标。

本文以唐山湾国际旅游岛客运码头为例,进行了海滨大型客运码头的刚性模型测压风洞试验^[5-6],结合计算流体力学(CFD)数值模拟结果^[7-8],研究了客运码头大跨屋盖的风荷载分布特性。在此基础上,分析了屋盖下方附属建筑物对其风压的影响,并对客运码头局部风环境进行了分析,为该类建筑的抗风设计与运营预警系统奠定基础。

1 风洞试验与数值模拟概况

1.1 风洞试验^[9-11]

本次试验在北京大学力学与工程科学系低速风洞中进行,该风洞试验段为圆形开口。在正式试验前,首先通过尖塔和立方体粗糙元的组合,按照我国《建筑结构荷载规范》(GB50009-2001)的规定,模拟了 1/100 的 A 类风场(地面粗糙度指数 $\alpha = 0.12$),风场平均风、湍流度剖面及脉动风速功率谱如图 2 所示。

图 2 中, z 、 H_g 、 U 、 U_g 、 α 分别为高度、梯度风高度、风速、梯度风高度处风速和风速剖面幂指数。试验模型为刚性模型,采用 ABS 材料和有机玻璃板制作。根据实际建筑物的大小和风洞试验阻塞率的要求,模型几何缩尺比选为 1:100,风洞试验模型如图 3 所示。考虑到两侧小贝壳的对称性,本次风洞试验仅对大贝壳和一侧小贝壳布设测点。采用双面测压技术,每个测压贝壳的上、下表面对应位置各布置 114 个测压点,共计 456 个测压点,其中 412 个测点位于贝壳对风荷载敏感的屋盖部分(图 4)。测点处设置测压管,用来测量各点的瞬时风压,为了获得尽可能高的频率响应,在连接测压孔和扫描阀的每一根塑料管中均接有限流器。试验采用美国 Scanivalve 公司机械扫描阀测压系统,采样频率 400 Hz,每个通道采样点数为 3 900。

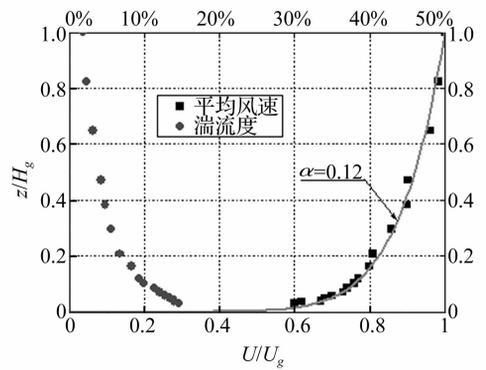
风洞试验中,风向角记为 β ,本文定义模型正南方向的中轴线为 0° 角(参见图 3)。在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内每转动 10° 测试一次,即模拟 36 个风向。

在结构风工程中,物体表面的压力通常用对应于参考点的无量纲压力系数表示,该系数可按式确定:

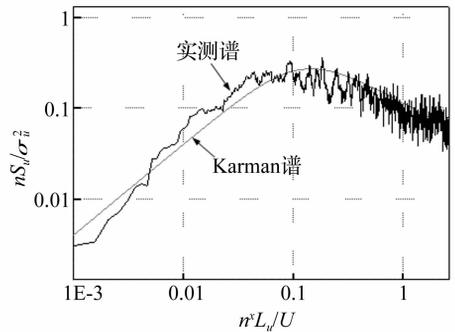
$$C_{pr}^i = \frac{P_i - P_\infty}{P_0 - P_\infty} \quad (1)$$

式中: C_{pr}^i 为测压点 i 处相应于参考点的压力系数; P_i 为作用在测点 i 处的压力; P_∞ 、 P_0 分别是试验中参考高度处的总压与静压(本次试验中,参考点设置在模型顶部高度处)。

本文风压符号约定为:压力向上或向外为负,压力向下或向内为正。



(a) 平均风速与湍流度剖面



(b) 脉动风速功率谱

图 2 试验风场特性

Fig. 2 Flow characteristics in wind tunnel

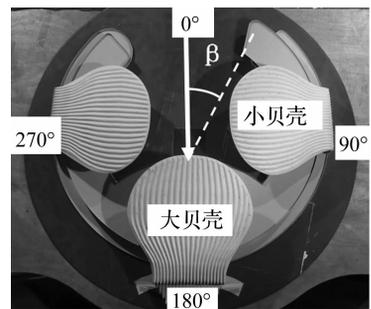


图 3 风洞试验模型

Fig. 3 Wind tunnel test models

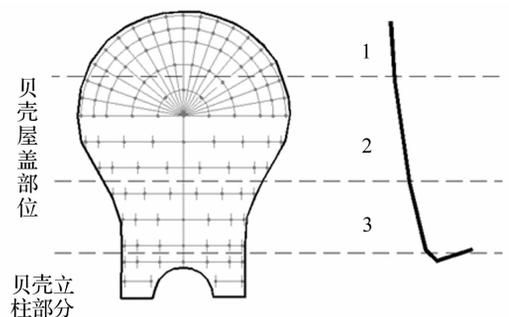


图 4 测压点布置

Fig. 4 Distribution of measured taps

1.2 数值模拟

应用 CFD 技术对建筑物表面的风压进行数值模拟是当前风工程研究和应用的一个热点。本文亦采用

CFX 计算流体力学软件^[12]对唐山湾国际旅游岛客运码头屋盖的平均风荷载进行了数值模拟,通过对比 CFD 数值模拟结果与风洞试验结果,可达到相互验证的目的。此外,借助数值可视化工具将流场显示出来,可为进一步研究屋盖周围流场绕流特性和码头局部风环境奠定基础。

在建立数值模型时,按照唐山湾国际旅游岛客运码头的实际尺寸建立几何模型,计算域的尺寸取为 $16L \times 8B \times 10H$ (L 为建筑物的顺风向长度, B 为建筑物横风向宽度, H 为建筑物高度),其阻塞率小于 3%。由于模型较为复杂,本文使用非结构化的四面体网格。在计算域的网格离散中做了特别设计:整体上将计算域分为内、外两部分,在模型附近的内域空间采用四面体单元完成内域空间的离散;在远离模型的外域空间,采用具有规则拓朴结构的六面体单元进行离散。数值模型的混合体网格单元总数为 360 万左右。计算模型表面网格划分如图 5 所示。

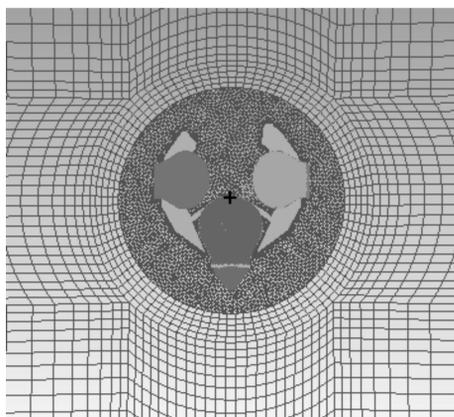


图 5 数值分析模型

Fig. 5 Numerical analysis models

在数值模拟中,采用 CFX 中能有效模拟钝体空气动力流动现象、并经过大量实验和研究验证具有较高精度的剪切应力输送 (SST) 模型^[12]。SST 模型采用自动壁面处理方式模拟壁面附近的流动,即使在相对较粗的计算网格下也可获得精确的结果,保证了计算结果的准确性。来流采用我国规范《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)中规定的 A 类地貌风剖面。由于出流接近完全发展,数值模拟中采用完全发展出流边界条件,流场任意物理量沿出口法向的梯度为零。流体域顶部及两侧采用对称边界条件,等价于黏性流动中的自由滑移壁面。建筑物表面及地面则采用无滑移的壁面条件。

2 屋盖风压分布特性

本节将基于风洞试验与数值分析结果给出唐山湾国际旅游岛客运码头屋盖风压分布图,揭示该类结构风压分布特性。

2.1 典型风向角风压分布

图 6 给出了 0° 风向角大贝壳平均压力系数分布图(屋盖悬挑端为来流前缘)。由图可以看出,屋盖上表面数值模拟结果与试验结果吻合较好,下表面所反映的风压分布规律也基本一致,可以认为本文所采用的数值方法能够模拟唐山湾国际旅游岛客运码头屋盖风压分布。 0° 风向角时,屋盖上表面均处于负压(风吸)区,来流前缘平均压力系数值最大,达到 -1.5 ,且急剧衰减;随着距离的增加,风压衰减速度逐渐减缓,屋盖中部平均压力系数减小至 -0.3 ;屋盖后缘平均压力系数基本保持不变,大致为 -0.3 。屋盖下表面在来流前缘出现正压区,并向里延伸,最大值达到 0.6 ,屋盖中部两侧下表面负压达到最大,其值为 -0.4 。以上说明,来流在屋盖前缘产生了显著的分流,分离流表现出较为典型的柱状涡特性^[13-14]。

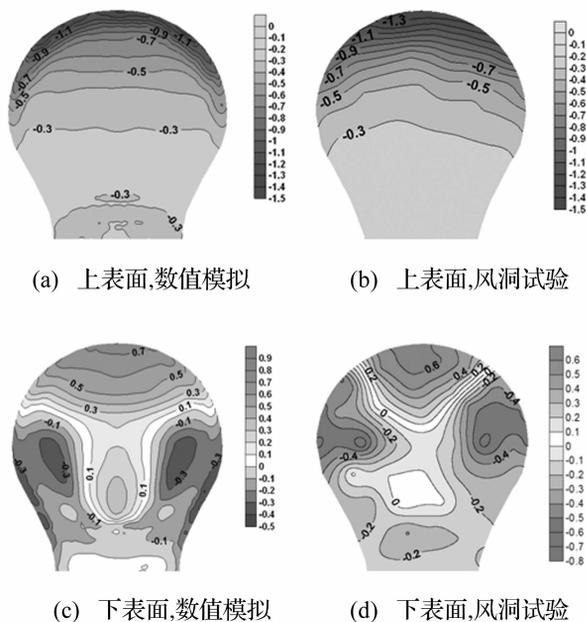


图 6 0° 风向角大贝壳平均压力系数分布图

Fig. 6 Mean pressure coefficient distribution (Large Shell, 0 degree)

图 7 给出了 270° 风向角小贝壳平均压力系数分布图(屋盖悬挑端为来流前缘)。由图可以看出,小贝壳上表面风压分布规律和大贝壳相似,但是平均压力系数数值明显小于大贝壳,来流前缘最大负压值仅为 -1.1 。下表面小贝壳平均风压分布与大贝壳存在较大不同,正压区出现在来流后缘,最大值仅为 0.2 ,中部边缘负压最大,其值为 -0.4 。以上说明,位于上游的小贝壳遮蔽作用明显,气流在屋盖前缘的分离得到了一定缓解。

为了更好地说明风压分布规律,本文将贝壳屋盖部分划分为 3 个区域(图 4),在各个区域,将其中所包含的测压点按面积加权平均即可得到屋盖各区的平均

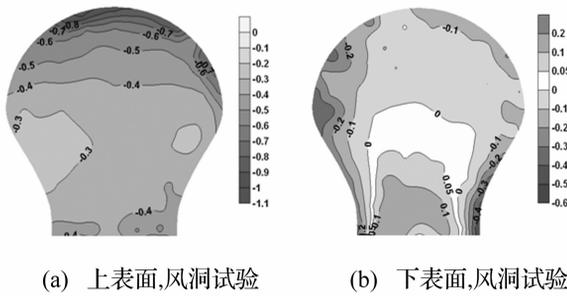


图 7 270°风向角小贝壳平均压力系数分布图
 Fig. 7 Mean pressure coefficient distribution
 (Small Shell, 270 degree)

压力系数,该系数可按下式确定:

$$\bar{C}_j = \frac{\sum_i (\bar{C}_{j,u}^i - \bar{C}_{j,l}^i) A_j^i}{\sum_i A_j^i} \quad (2)$$

式中: \bar{C}_j 为j区的平均压力系数; $\bar{C}_{j,u}^i$, $\bar{C}_{j,l}^i$ 分别为j区所包含的测点*i*处上表面、下表面平均压力系数; A_j^i 为j区所包含的测点*i*所代表的面积。图8给出了大贝壳分区平均压力系数随风向角的变化曲线。由图可以看出,随着风向角的变化,位于屋盖悬挑端部的1区均为风吸力;当风向角为0°时,其上平均压力系数最大,达到-1.4;随着风向角度数的增加,平均压力系数逐渐减小;当风向角为90°时,平均压力系数最小,仅为-0.1;进一步增加风向角,1区平均风压系数基本维持在-0.2。在各个风向角作用下,2区和3区平均压力系数基本相同,且随风向角变化的规律性不强;需要注意的是,当风向角为0°~110°时,2区和3区均为风吸力,当风向角为120°~180°时,2区和3区均为风压力。

以上说明,0°风向角为最不利工况,1区风荷载是影响结构安全的主导因素;位于大贝壳下方的附属建筑物对风压分布有一定影响。

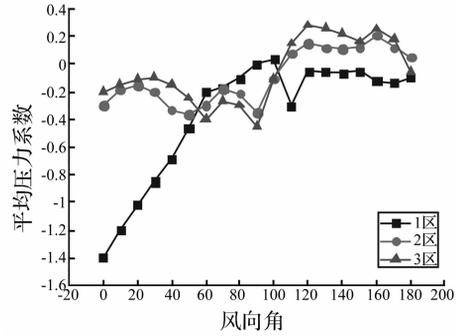


图 8 分区平均压力系数随风向角变化曲线
 Fig. 8 Mean pressure coefficient in different wind directions

2.2 附属建筑物对屋盖风压分布的影响

本节将采用数值方法,讨论最不利工况时(0°风向角),不同附属建筑物设置对大贝壳风压的影响,从气动抗风的角度,提出减小唐山湾国际旅游岛客运码头屋盖风致效应的建议。

图9给出了两层附属建筑物(原始情况)、一层附属建筑物、无附属建筑物三种工况时,气流流经大贝壳的速度流线图。由图可以看出,当设置两层附属建筑物时,来流在屋盖前缘的分离最为剧烈;并且,由于屋盖与附属建筑物之间距离较小,受遮蔽效应的影响,来流在屋盖根部产生回流。减小附属建筑的高度后,气流在屋盖前缘的分离得到了一定程度的缓解,屋盖根部回流消失。

图10给出了上述三种情况,屋盖分区平均压力系

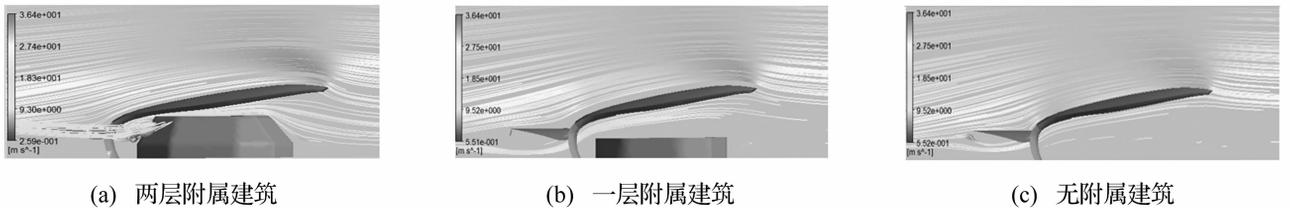


图 9 大贝壳风场流线图(0°风向角)
 Fig. 9 Wind streamlines of large Shell (0 degree)

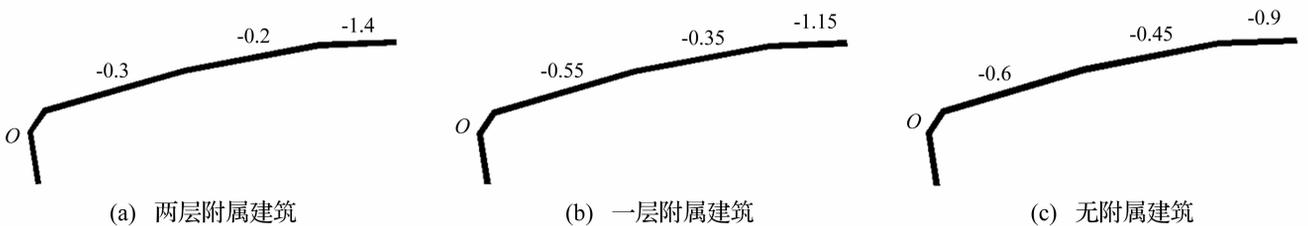


图 10 平均压力系数(0°风向角)
 Fig. 10 Mean pressure coefficient(0 degree)

数分布图。由图可以看出,由于气流分离程度得到了一定程度的缓解,减小屋盖下方附属建筑物的高度,可以有效的减小1区风荷载,但是,由于屋盖根部回流消失,2区和3区风荷载有所增加。

对悬挑屋盖而言,悬挑根部弯矩是其控制性载荷。风荷载作用下屋盖悬挑根部O处弯矩系数可以采用下式计算:

$$C_M^O = \frac{\sum_i \bar{C}_{j_i} A_j l_j}{\sum_i A_j \cdot L} \quad (3)$$

式中: \bar{C}_j 表示为j区的平均压力系数; A_j 表示为j区面积; l_j 表示为j区荷载对O点的矩; L 表示为屋盖悬挑长度。

前述三种工况计算得到的屋盖悬挑根部O处弯矩系数分别为: -0.366、-0.356、-0.328,这说明减小屋盖下方附属建筑物高度有利于减小屋盖风荷载。

3 风环境分析

建筑物的布局会显著影响局部风环境,在局部区域可能形成高风速区,这将引起行人不舒适,甚至不安全的风环境问题,海滨建筑尤甚。上节通过屋盖风压分布,验证了本文数值模型的有效性,本节将采用数值方法对唐山湾国际旅游岛客运码头风环境进行分析,为其运营预警系统奠定基础。

3.1 分析方法^[15]

风环境的主要感受对象是人,弧形观光平台是唐山湾国际旅游岛客运码头主要人流聚集区,二层平台风环境问题最为突出。本文在研究中以二层平台为主要研究对象,鉴于平台相对于大贝壳主轴轴线基本对称,仅在平台左半部分均匀布置了17个测点(图11),用以考查唐山湾国际旅游岛客运码头风环境。

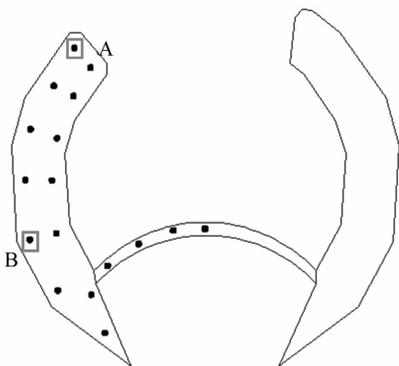


图11 平台测点布置
Fig. 11 Measured points in platform

由于缺乏完善的当地气象观测数据,本文将主要依据风速比(计算所得要评价区域的风速与远端同一高度的来流风速的比值)对二层观光平台的风环境进

行评估分析。本文所进行的风环境分析在0°~360°范围内,按气象学规定每隔15°进行一次,即模拟24个风向(主要风向角仍与图3相同)。

3.2 分析结果

图12给出了平台测点风速比均值、最大值、最小值随风向角的变化曲线,图13给出了风速比大于1.0(即产生风加速的区域)的测点所占比例随风向角变化直方图。

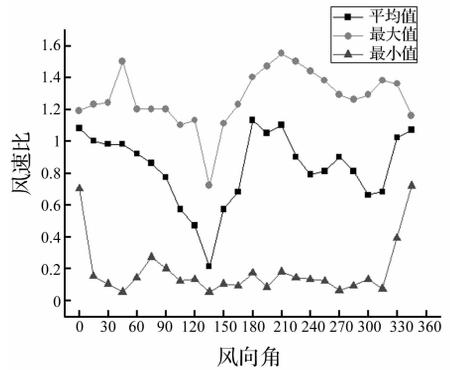


图12 不同风向角下风速比值图
Fig. 12 Ratios velocity in the different wind directions

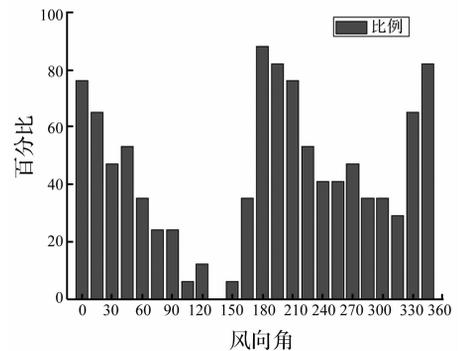


图13 风加速区域比例直方图
Fig. 13 Histogram of wind acceleration region ratio

由各测点风速比的均值变化看出,二层观光平台风加速情况整体而言不显著,但从测点最大风速比变化可以看出二层观光平台的局部风加速情况较为突出。180°风向角时,各测点的平均风速比最大,其值为1.2,虽然该风向角最大风速比为1.4,但是风速比大于1.0的区域所占比例达到88%。最大风速比出现在210°风向角,其值达到1.55,风速比大于1.0的区域所占比例为76%。

图14给出了180°和210°风向角时,二层平台2m高度处的风速比等值线图。可以看出,由于气流受到贝壳及附属建筑物的阻碍,平台区域的窄道效应显著,位于来流方向平台一半的区域风速比在1.2~1.4之间,风加速较为严重。

图15给出了两个典型测点A、B(图11)的风速比

随风向角变化图。由图可见,位于平台前端的测点 A, 风速比均小于 1, 当其位于来流前缘时 (345° 风向角), 风速比最大, 为 0.81。而位于平台中部的测点 B, 大多数风向角时风速比超过 1.0, 当其位于来流前缘 (225° 风向角)、后缘 (45° 风向角) 时, 风速比最大, 其值达到 1.5。这说明, 距建筑较远区域, 风加速不显著, 甚至某

些区域不产生风加速。但处于建筑范围内的区域, 无论其位于来流前缘还是后缘, 都有风加速问题。因此, 建筑物对气流干扰是引起风加速的主要原因。

通过数值模拟还可以看出, 唐山湾国际旅游岛客运码头二层观光平台风环境问题较为突出。

4 结 论

本文以唐山湾国际旅游岛客运码头为例, 采用风洞试验与 CFD 数值模拟相结合的方法, 研究了大型客运码头屋盖的风荷载特性, 在此基础上, 对客运码头风环境进行了分析, 可以得到如下主要结论:

(1) 通过与风洞试验结果对比可以看出, 本文所采用的 CFD 数值模型可以较好的模拟复杂建筑群绕流问题, 能对其风压分布、风环境进行仿真模拟。

(2) 位于客运码头屋盖下方的附属建筑物, 对屋盖风压分布的影响较为显著, 减小附属建筑的高度, 可以缓解气流在屋盖前缘的分离, 有效减小作用于屋盖表面的风荷载。

(3) 建筑物对气流的干扰是引起风加速的主要原因, 由于建筑布置较为紧密, 唐山湾国际旅游岛客运码头二层观光平台风环境问题较为突出。

参 考 文 献

[1] Holmes J D. Wind Load of Structures (Second Edition) [M]. Oxon: Taylor & Francis, 2007.

[2] 张相庭. 结构风工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

[3] Prasad D, Uliate T, Ahmed M R. Wind loads on low-rise building models with different roof configurations [J]. International Journal of Fluid Mechanics Research, 2009, 36(2): 231 - 243.

[4] 孙瑛. 大跨屋盖结构风荷载特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

[5] 顾志福, 杨乐天, 陈青松. 大型机库屋面风荷载特性研究 [J]. 北京大学学报, 2008, 44(4): 501 - 506. GU Zhi-fu, YANG Le-tian, CHEN Qin-shong. Wind loading on plane roof of a large hangar [J], Beijing Daxue Xuebao, 2008, 44(4): 501 - 506.

[6] 李波, 杨庆山, 田玉基, 等. 锥形超高层建筑脉动风荷载特性 [J]. 建筑结构学报, 2010, 31(10): 8 - 16. LI Bo, YANG Qin-shan, TIAN Yu-ji, et al. Characteristics of turbulent wind load of tapered super-tall building [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(10): 8 - 16.

[7] 符龙彪, 夏育颖, 肖从真. 北京当代 MOMA 风载及风环境数值模拟研究 [J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 71 - 74. FU Long-biao, XIA Yu-ying, XIAO Cong-zhen. Numerical simulation of wind load and wind environment for Beijing MOMA [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(3): 71 - 74.

[8] 顾磊, 齐宏拓, 刘红军. 奥运网球中心赛场风荷载和风环境数值模拟分析 [J]. 建筑结构学报, 2009, 30(3): 134 - 143.

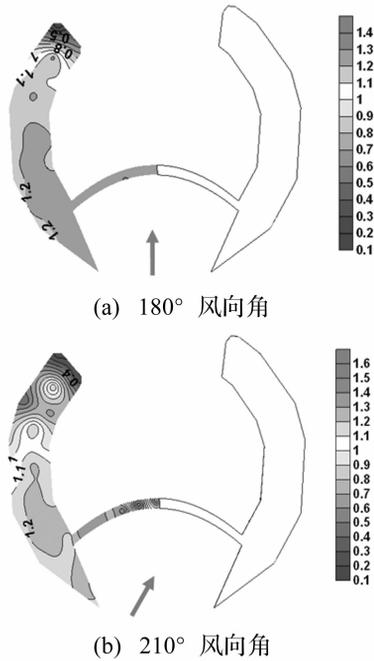


图 14 风速比等值线分布图
Fig. 14 Ratios velocity distribution

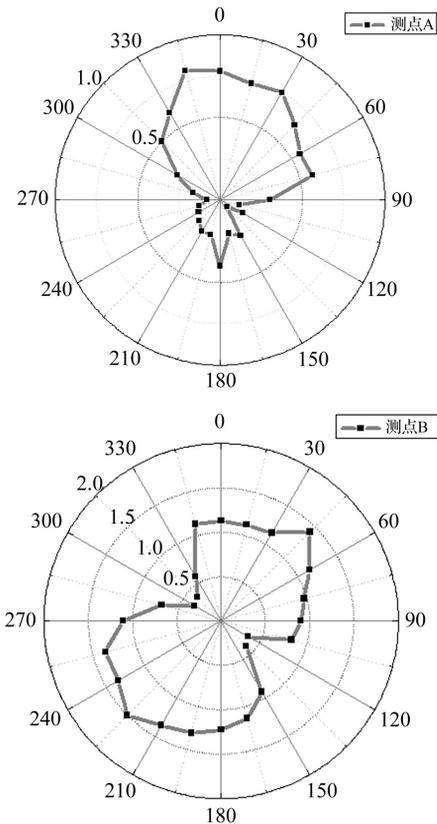


图 15 典型测点风速比随风向角变化
Fig. 15 Wind velocity ratio in different wind directions

