

文章编号:1674-2974(2016)11-0001-06

不同外部平台宽度对大跨建筑屋盖风荷载的影响*

李正农[†], 陈 策

(湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘 要:为了研究外部平台宽度对大跨屋盖风荷载的影响,在B类地貌中对无平台和5个典型平台宽度下的刚性模型进行风洞测压试验,得到了各工况下的屋盖表面平均风压系数和脉动风压系数.研究表明:外部平台增大了大跨结构屋盖的平均风荷载.随着平台宽度的增大,屋盖的平均风荷载先增大后减小.平台宽度12 m时最不利,其最大增幅达到33%.平台宽度20 m时增幅达到20%;外部平台增大了大跨结构屋盖的脉动风荷载,平台宽度12 m时最不利,其增幅达到11%.平台宽度20 m时,增幅为8%,其余平台宽度下的增幅基本在5%以内.屋盖背风面边缘的脉动风荷载随着平台宽度的增加而减小,平台宽度20 m时可达19%.

关键词:大跨建筑;外部平台;刚性模型;脉动风荷载;风洞试验

中图分类号:TU973

文献标识码:A

Influence of Various External Platform Widths on Wind Loads of Large-span Buildings

LI Zheng-nong[†], CHEN Ce

(Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: In order to study the influence of external platform width on wind loads of large-span buildings, wind tunnel tests of six rigid models with various platform widths were carried out. In particular, the characteristics of mean wind pressure coefficient and fluctuating wind pressure coefficient were studied. The test results show that the enlargement of platform widths increases the mean wind loads. The mean wind loads change from small to large and to small again with the increase of platform width. The most unfavorable situation occurs when the platform width is 12 meters, and its growth rate reaches 33%, while its growth rate is 20% when the platform width is 20 meters. Meanwhile, the increase of platform widths increases the fluctuating wind loads. The most unfavorable situation takes place when the platform width is 12 meters, and its growth rate reaches 11%, while its growth rate is 8% when the platform width is 20 meters, and the rate is lower than 5% in other cases. The fluctuating wind loads on the leeward side decrease when the width of platform increases. The maximum decrease reaches 7% when the platform width is 20 meters.

Key words: large-span buildings; platform; rigid model; fluctuating wind loads; wind tunnel test

* 收稿日期:2015-11-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278190, 51178180, 51478179), National Natural Science Foundation of China(51278190, 51178180, 51478179)

作者简介:李正农(1962-),男,湖北武汉人,湖南大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: zhn88@263.net

随着社会经济和技术的发展,大跨结构被广泛应用于展览馆、体育馆和机场候机厅等大型公共建筑.这些大跨结构大都具有自重轻、柔度大、自振频率低的特点,风荷载是其结构设计的主要控制荷载.

在以往的研究当中,文献[1-3]对某些具有特定外形的屋面进行了研究,分析了屋面几何形状对屋面风压分布的影响.文献[4-6]对大跨建筑的悬挑结构这一特殊结构形式进行了风荷载研究,得到了一些有意义的结论.文献[7]分析了周边建筑对大跨屋盖风荷载的干扰效应.文献[8]应用风洞模拟方法研究了透风性女儿墙对尖屋顶风荷载的影响,得出了各种透风性女儿墙都能不同程度地降低尖屋顶的平均风压和负压峰值的结论.文献[9]采用有限元时程分析方法对大跨网架进行了动力计算,探讨了立墙开孔对屋盖风振响应的影响,结果表明墙面开孔会大幅增加屋盖的静动力风荷载.文献[10]则通过对一个开合屋盖体育场的刚性模型进行风洞试验研究,结果表明活动屋盖的开启,可有效减小固定屋盖和活动屋盖的平均风荷载.文献[11]对7种长宽比矩形截面高层建筑的荷载进行研究,对比分析了不同情况下高层建筑的层体型系数与建筑长宽比的相关规律.文献[12-13]通过风洞测压实验,研究了风场类型及周边干扰对高层建筑风荷载的影响,研究表明:周边干扰对高层建筑风荷载的影响不仅与周边建筑的相对位置有关,还与建筑所处的风场类型有关.

近几年来,外部平台被越来越多地采用到大跨建筑设计中,它具有联系各主要场馆、人员分流疏散,和良好的建筑景观效果等优点.外部平台对于大跨建筑屋盖风荷载影响如何,以往的研究还鲜有这个方面的结论.本文以设置外部平台的大跨体育馆为研究对象,研究外部平台的宽度对于屋盖平均风压系数、脉动风压系数的影响,取得了一些有工程参考意义的成果.

1 风洞试验简介

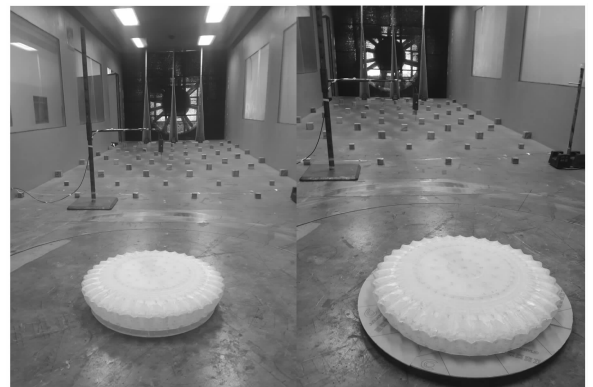
1.1 试验概况

大跨建筑最大高度30 m,屋盖平面投影近视为圆形,直径136 m.外部平台为圆环形,设置在体育馆外部6 m高度处(体育馆二层楼面高度),平台由立柱支撑.平台宽度选取4 m,8 m,12 m,16 m,20 m 5个典型宽度.试验模型按照1:200的缩尺比制作,风洞试验模型如图1所示.在模型的屋盖表面共布置133个测点,具体测点布置见图2.定义正西方

向来流为 0° 风向角.由于大跨建筑的对称性,本文仅对 0° 风向角进行分析.

1.2 风场模拟

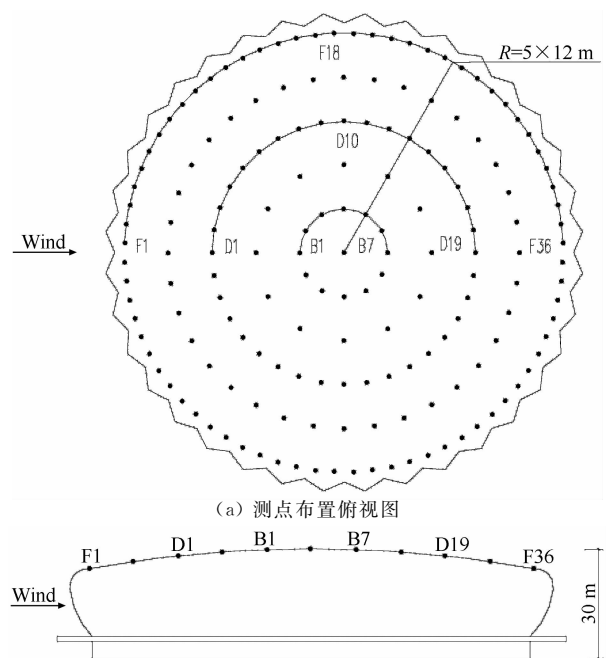
试验在湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室HD-3风洞进行.HD-3风洞为闭口回流式风洞,模型试验区横截面宽3 m,高2.5 m,转盘直径1.8 m.地貌类型按照B类地貌考虑,按照《建筑结构荷载规范》(GB 50009 2012)取糙度系数 $\alpha = 0.15$,几何缩尺比为1:200,试验风速为10 m/s.B类地貌的风剖面和湍流度剖面,如图3所示.



(a) 无平台 (b) 平台宽度20 m

图1 风洞试验模型图

Fig. 1 The wind tunnel test model



(a) 测点布置俯视图

(b) 测点布置剖面图

图2 风洞试验测点布置

Fig. 2 The measuring point arrangement

1.3 试验数据处理

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,测点的净风压系

数 $C_{Pi}(t)$:

$$C_{Pi}(t) = \frac{P_i(t) - P'_i(t)}{\frac{1}{2} \rho V_H^2} \quad (1)$$

式中: $P_i(t)$ 为体育馆模型上单面测点 i 的风压, $P'_i(t)$ 为参考高度处的静压, ρ 为空气密度, V_H 为模型前方来流未扰动区参考高度处的平均风速, 参考高度取模型顶部高度 30 m, 即风洞高度 150 mm.

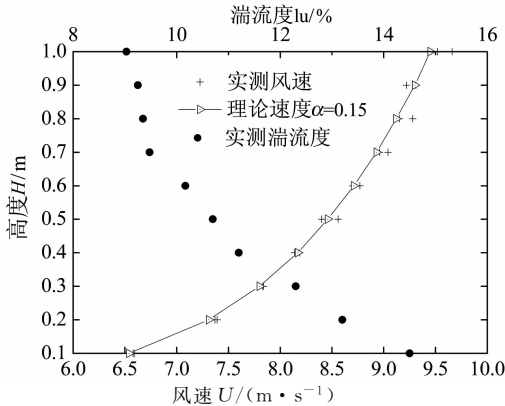


图 3 B类风场风剖面及湍流度
Fig. 3 The wind profile and turbulence intensity of terrain category B

对于每个测点, 均记录了 10 000 个 P_i 的数据. 通过对 $C_{Pi}(t)$ 的分析, 可得到各测点的平均风压系数 $C_{Pi,mean}$ 和脉动风压系数 $C_{Pi,rms}$.

$$C_{Pi,mean} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{Pi}}{N} \quad (2)$$

$$C_{Pi,rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [C_{Pi}(t) - \bar{C}_{Pi}(t)]^2} \quad (3)$$

表 1 不同平台宽度下几个测点的平均风压系数

Tab. 1 Mean wind pressure coefficient of several measuring points with different width of platform

测点号	无平台	外部平台宽度				
		4 m	8 m	12 m	16 m	20 m
B3	-0.293	-0.310	-0.286	-0.308	-0.288	-0.309
D15	-0.337	-0.366	-0.346	-0.371	-0.358	-0.367
F1	-0.895	-0.943	-0.946	-0.978	-0.931	-0.916
F2	-0.851	-0.897	-0.899	-0.929	-0.897	-0.870
F10	-0.911	-0.848	-0.837	-0.910	-0.911	-0.913
F15	-0.360	-0.429	-0.440	-0.478	-0.434	-0.430
F21	-0.153	-0.165	-0.180	-0.197	-0.176	-0.190
F28	-0.325	-0.302	-0.284	-0.264	-0.268	-0.276

就平台而言, F1~F17 奇数测点的平均风压系数绝对值随着平台宽度的增加先增大后减小, 平台宽度 12 m 时增幅最大, 达到 33%, 平台宽度 20 m 时增幅为 20%; F2~F18 偶数测点仅在 F2~F8 测点处满足平均风压系数绝对值随平台宽度增加先增后减的规律, 但

2 平均风压和脉动风压特性

由于结构的对称性, 仅在 0° 风向角下取屋盖半结构进行分析. 为了更好地研究外部平台宽度对大跨屋盖风压的影响, 本文选取了屋盖边缘的测点 F 层, 中部测点 D 层, 中部测点 B 层的风压系数进行分析. 由于屋盖边缘的特殊构造形式, 本文对 F 层测点的奇数偶数测点分开研究.

2.1 平均风压系数

图 4 为无平台和 3 种平台宽度下屋盖 F, D 和 B 层测点的平均风压系数. 表 1 给出了无平台和 5 种平台宽度下局部测点的平均风压系数. 由图 4 和表 1 可知:

1) B 层和 D 层测点的平均风压系数分别在 $-0.25 \sim -0.3$, $-0.3 \sim -0.4$ 范围内, 相对于 F 层测点的更为平稳. 有外部平台时, B 层和 D 层测点的平均风压系数绝对值有一定的增大, 增幅基本处于 10% 以内.

2) 0° 风向角作用下, F1~F18 测点位于迎风面, 平均风压系数为负. 由于屋盖边缘特殊的凹凸起伏构造, F1~F17 奇数测点和 F2~F18 偶数测点的平均风压系数分布规律不一致. F1~F17 奇数测点的平均风压系数绝对值在 F1 点最大, 随着气流流动的方向逐渐减小; F2~F18 偶数测点的平均风压系数绝对值在 F10 点突变到最大值.

在 F10 测点的平均风压系数绝对值不仅没有增大, 而且在平台宽度 4 m 时有 7% 的减小. 产生这种现象的原因是外部平台使得来流向建筑物顶面的绕流增强, 气流在屋盖迎风面边缘的流体分离加剧. 同时, 屋盖边缘的凹凸起伏造型对气流的运动也产生显著影响.

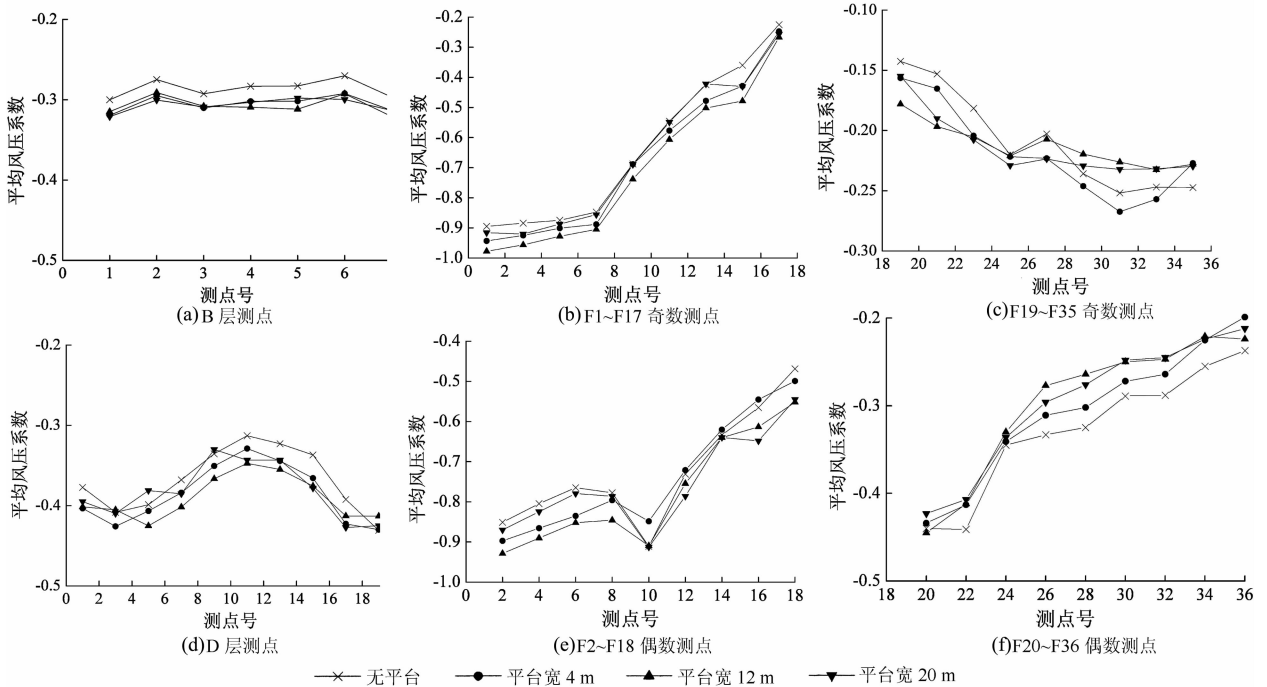


图4 不同平台宽度下屋盖平均风压系数对比

Fig. 4 Changes of mean wind pressure coefficient with different width of platform

3) 0° 风向角作用下, F19~F36 测点位于背风面. F20~F36 偶数测点的平均风压系数绝对值随着气流流动的方向逐渐减小; F19~F35 奇数测点的变化趋势却相反.

就平台而言, 奇数测点在 F19~F23 处的平均风压系数绝对值不同程度的增大, 平台宽度 12 m 时增幅最大, 达到 29%, 平台宽度 20 m 时增幅为 24%; F29~F35 测点处的平均风压系数绝对值在不同宽度平台时有增大也有减小, 但增减的幅度均在 10% 以内. 偶数测点的平均风压系数绝对值不同程度地减小了. 随着平台宽度的增加, 偶数测点的平均风压系数绝对值先减小后增大, 平台宽度 12 m 时减幅最大, 达到 19%, 平台宽度 20 m 时减幅为 15%; 产生这种现象的原因是外部平台使得建筑物背后的回旋尾流沿建筑物表面向上的流动受到阻碍, 气流在屋盖背风面边缘的流体分离减弱. 同

时, 屋盖边缘的凹凸起伏造型对气流的运动产生显著影响.

从总体上看, 外部平台增大了大跨结构屋盖的平均风荷载. 随着平台宽度的增大, 屋盖的平均风荷载先增大后减小. 平台宽度 12 m 时最不利, 其最大增幅达到 33%. 平台宽度 20 m 时为 20%.

2.2 脉动风压系数

图 5 为无平台和 3 种平台宽度下屋盖 F, D 和 B 层测点的脉动风压系数. 表 2 给出了无平台和 5 种平台宽度下局部测点的脉动风压系数. 由图 5 和表 2 可知:

1) B 层和 D 层测点的脉动风压系数基本处于 0.08~0.10 范围内, 相对平稳. 有外部平台时, 测点的平均风压系数绝对值不同程度地增大了. 平台宽度 12 m 时增大最明显, 增幅约 10%.

表 2 不同平台宽度下几个测点的脉动风压系数

Tab. 2 Fluctuating wind pressure coefficient of several measuring points with different width of platform

测点号	无平台	外部平台宽度				
		4 m	8 m	12 m	16 m	20 m
B3	0.079	0.081	0.081	0.088	0.081	0.086
D15	0.091	0.091	0.092	0.097	0.089	0.095
F1	0.186	0.194	0.202	0.204	0.195	0.196
F2	0.188	0.185	0.190	0.199	0.191	0.186
F4	0.188	0.184	0.190	0.205	0.193	0.184
F9	0.219	0.225	0.231	0.236	0.229	0.215
F32	0.123	0.115	0.108	0.107	0.101	0.100
F33	0.117	0.109	0.105	0.103	0.097	0.099

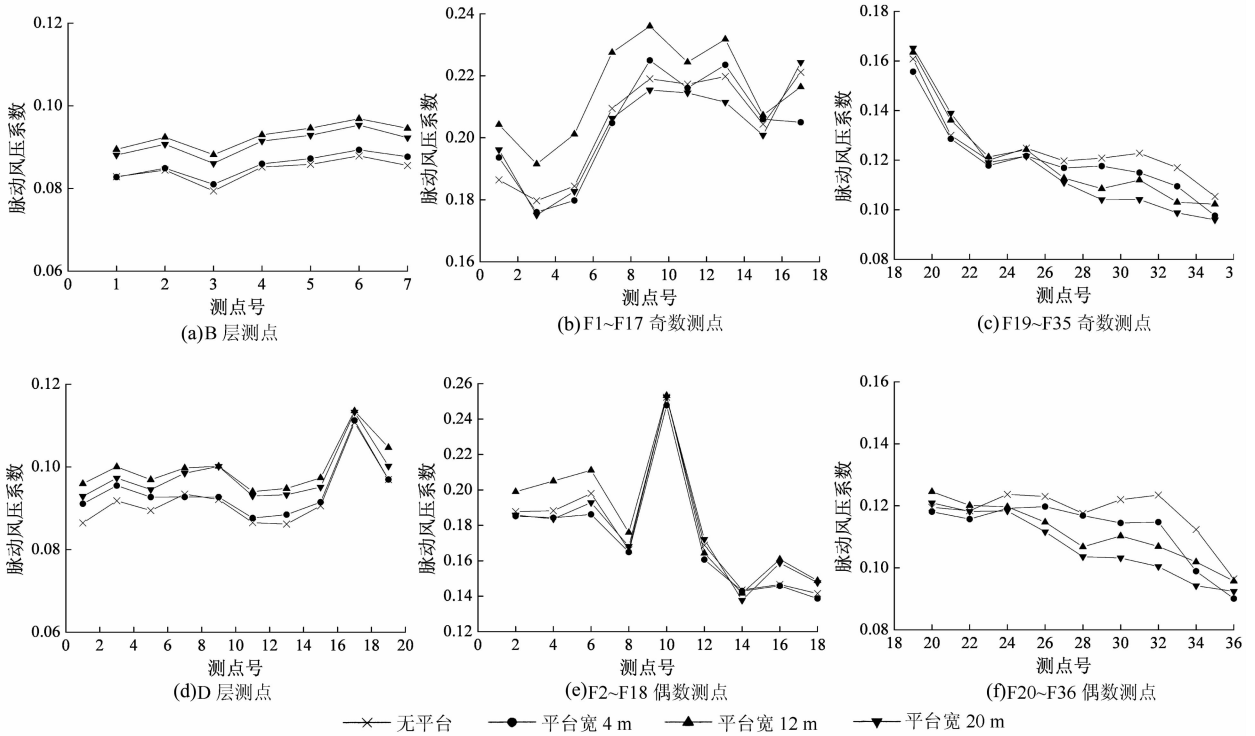


图 5 不同平台宽度下屋盖脉动风压系数对比
Fig. 5 Changes of fluctuating wind pressure coefficient with different width of platform

2)0°风向角作用下, F1~F18 测点位于迎风面. 奇数测点在 F7~F17 的脉动风压系数较大, 在靠近来流的 F1~F5 反而比较小, 这与平均风压的分布规律不一致. 偶数测点的脉动风压分布规律与平均风压的分布规律较一致, 脉动风压系数最大值和平均风压系数绝对值最大值出现位置相同. 造成这种现象的主要原因是屋盖边缘特殊的凹凸起伏构造.

2)0°风向角作用下, F1~F18 测点位于迎风面. 奇数测点在 F7~F17 的脉动风压系数较大, 在靠近来流的 F1~F5 反而比较小, 这与平均风压的分布规律不一致. 偶数测点的脉动风压分布规律与平均风压的分布规律较一致, 脉动风压系数最大值和平均风压系数绝对值最大值出现位置相同. 造成这种现象的主要原因是屋盖边缘特殊的凹凸起伏构造.

就平台而言, 平台宽度 12 m 时, 奇数测点 F1~F13 的脉动风压系数绝对值明显增大, 最大增幅为 10%, 偶数测点仅在 F2~F8 处的脉动风压系数绝对值增大, 最大增幅为 9%. 其余平台宽度对于脉动风压系数的影响基本在 5% 以内.

3)0°风向角作用下, F19~F36 测点位于背风面. F22~F36 的奇数测点和偶数测点的脉动风压系数变化趋势较为一致, 它们在数值上也比较接近, 均在来流方向上逐渐减小.

外部平台对于奇偶测点脉动风压的影响相同. 有外部平台时, F22~F36 测点的脉动风压系数绝对值不同程度地减小. 其减幅随着平台宽度的增加而增加. 平台宽度 4 m 时减幅最小, 为 7%; 平台宽度 20 m 时减幅最大, 达到 19%.

从总体上看, 外部平台增大了大跨结构屋盖的脉动风荷载, 平台宽度 12 m 时最不利, 其增幅达到 11%. 平台宽度 20 m 时, 增幅为 8%, 其余平台宽度下的增幅基本在 5% 以内. 屋盖背风面边缘的脉动风荷载随着平台宽度的增加而减小, 平台宽度 20 m 时可达 19%.

3 结 论

本文详细研究了 0°风向角下, 不同宽度的外部平台对于大跨建筑屋盖平均风压系数和脉动风压系数的影响, 得到以下结论:

1) 外部平台增大了大跨结构屋盖的平均风荷载. 随着平台宽度的增大, 屋盖的平均风荷载先增大后减小. 平台宽度 12 m 时最不利, 其最大增幅达到 33%. 平台宽度 20 m 时为 20%.

2) 外部平台增大了大跨结构屋盖的脉动风荷载, 平台宽度 12 m 时最不利, 其增幅达到 11%. 平

台宽度 20 m 时,增幅为 8%,其余平台宽度下的增幅基本在 5% 以内. 屋盖背风面边缘的脉动风荷载随着平台宽度的增加而减小,平台宽度 20 m 时可达 19%.

3) 近几年来,外部平台被越来越多地采用到大跨建筑设计中,相对于无平台的大跨建筑而言,有平台大跨屋盖局部位置所承受的平均风荷载和脉动风荷载有显著增强,这对于结构是不利的,应当引起设计人员的注意.

参考文献

- [1] 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, 53(3):46-51.
- [2] 谢壮宁, 倪振华, 石碧青. 大跨屋盖风荷载特性的风洞试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2001, 22(2):23-28.
XIE Zhuang-ning, NI Zhen-hua, SHI Bi-qing. Experimental investigation on characteristics of wind load on large[J]. *Journal of Building Structures*, 2001, 22(2):23-28. (In Chinese)
- [3] 程志军, 楼文娟, 孙炳楠, 等. 屋面风荷载及风致破坏机理[J]. *建筑结构学报*, 2000, 21(4):39-47.
CHENG Zhi-jun, LOU Wen-juan, SUN Bing-nan, *et al.* Wind load on roof structures and mechanism of wind-induced damages[J]. *Journal of Building Structures*, 2000, 21(4):39-47. (In Chinese)
- [4] MARIGHETTI J, WITTWER A, BORTOLI M De, *et al.* Fluctuating and mean pressure measurements on a stadium covering in wind tunnel[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2000, 84(99):321-328.
- [5] MELBOURNE W H. The response of large roofs to wind action[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1995, 54(2):325-335.
- [6] 沈国辉, 孙炳楠, 楼文娟. 大跨屋盖悬挑结构的风荷载分析[J]. *空气动力学学报*, 2004, 22(1):41-46.
SHEN Guo-hui, SUN Bing-nan, LOU Wen-juan. Wind load on cantilevered structures of long span roofs[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2004, 22(1):41-46. (In Chinese)
- [7] 李波, 杨庆山, 冯少华, 等. 周边建筑对大跨屋盖风荷载的干扰效应研究[J]. *实验流体力学*, 2012, 26(5):27-30.
LI Bo, YANG Qing-shun, FENG Shao-hua, *et al.* Research on the interference on the wind load effect of surrounding buildings of long-span roof[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2012, 26(5):27-30. (In Chinese)
- [8] 魏庆鼎. 透风性女儿墙对尖屋顶风荷载的影响[J]. *气动实验与测量控制*, 1992, 6(1):25-33.
WEI Qing-ding. The effect of parapet with opening on wind loading of an oblique roof[J]. *Aerodynamic Experiment and Measurement & Control*, 1992, 6(1):25-33. (In Chinese)
- [9] 余世策, 楼文娟, 孙炳楠, 等. 开孔大跨屋盖结构的内部风效应研究[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2005, 39(8):1206-1211.
YU Shi-ce, LOU Wen-juan, SUN Bing-nan, *et al.* Internal wind effect for long span roof structure with openings[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2005, 39(8):1206-1211. (In Chinese)
- [10] 李寿科, 李寿英, 陈政清. 开合屋盖体育场风荷载特性试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(10):17-23.
LI Shou-ke, LI Shou-ying, CHEN Zheng-qing. Experimental investigation on wind loading of a stadium with a retractable roof[J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(10):17-23. (In Chinese)
- [11] 沈国辉, 钱涛, 罗蒋皓, 等. 不同长宽比矩形截面高层建筑的风荷载研究[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2015, 42(3):77-83.
SHEN Guo-hui, QIAN Tao, LUO Jiang-hao, *et al.* Study of wind loading on rectangular high-rise buildings with various length-to-width ratios[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2015, 42(3):77-83. (In Chinese)
- [12] 李正农, 康建彬. 风场和周边干扰对高层建筑峰值风压的影响[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2014, 41(4):78-86.
LI Zheng-nong, KANG Jiang-bin. Influence of terrain categories and surrounding interference on the peak pressure of high-rise buildings[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2014, 41(4):78-86. (In Chinese)
- [13] 李正农, 郝艳峰, 刘申会. 不同风场下高层建筑风效应的风洞试验研究[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2013, 40(7):9-15.
LI Zheng-nong, HAO Yan-feng, LIU Shen-hui. Wind tunnel test of tall building wind effect in different geomorphologic terrain categories[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2013, 40(7):9-15. (In Chinese)