

建筑造型对悬挑屋盖风荷载的影响^{*}

李波^{1,2†}, 魏梓曦¹, 单文姗¹, 杨庆山^{2,3}

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;

2. 结构风工程与城市风环境北京市重点实验室, 北京 100044; 3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要:通过同步测压刚性模型风洞试验,对设置不同建筑造型悬挑屋盖的风荷载特性进行了研究,讨论了肋条高度、波纹间距对该类屋盖风荷载的影响.结果表明:在所选参数范围内,肋条高度对悬挑屋盖风荷载的作用机制影响不大,但当来流与屋盖波纹呈一定夹角时,波纹间距将在一定程度上改变屋盖波纹部分风压的作用机制,该部分风压功率谱及屋盖正压达最大时的风向角均发生变化.肋条高度对悬挑屋盖最不利负压(0°风向角)影响很小,但随着屋盖肋条高度的增加,屋盖最大正压(110°风向角)逐渐减小.最不利负压工况(0°风向角)时,屋盖平底、波纹部分风压均对波纹间距不敏感,最不利正压工况(130°风向角)时,随着波纹间距的增加,屋盖平底、波纹部分风压均减小,尤其是波纹部分.

关键词:悬挑屋盖;风荷载;风洞试验;肋条;波纹

中图分类号:TU973.213

文献标志码:A

Effect of Architectural Surfaces on Wind Load of Cantilever Roof

LI Bo^{1, 2†}, WEI Zixi¹, SHAN Wenshan¹, YANG Qingshan^{2, 3}

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing's Key Laboratory of Structural Wind Engineering and Urban Wind Environment, Beijing 100044, China;

3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: High-Frequency-Pressure-Integration tests were carried out in a wind tunnel by using rigid models to investigate the effects of architectural surfaces on the wind load acting on the cantilever roof, with emphasis on the height of ribs and the space of waves. The test results show that in the range of the selected parameters in this paper, the height of ribs doesn't change the mechanism of wind load, but the space of wave affects the mechanism to some extent when inflow and waves are intersected, resulting in the variations of the PSD of wind load and the wind direction of the maximum wind pressure case. When the height of ribs increases, the maximum wind suction keeps the same (wind direction is 0°), but the maximum wind pressure decreases (wind direction is 110°). When the space of waves increase, the maximum wind suction also keeps the same (wind direction is 0°), but the maximum wind pressure deduces (wind direction is 130°), especially on the part of wave.

Key words: cantilever roof; wind load; wind tunnel tests; ribs; waves

^{*} 收稿日期:2017-05-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378060), National Natural Science Foundation of China(51378060); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B13002), Program of Introducing Talents of Discipline to Universities(B13002)

作者简介:李波(1978—),男,湖北武汉人,北京交通大学教授,工学博士

[†] 通讯联系人, E-mail: libo_77@163.com

悬挑屋盖在体育场、会展中心等大型公共建筑中得到了广泛应用,具有跨度大、结构柔、材料轻等特点,对风荷载十分敏感^[1-2].为了增强建筑物的艺术表现力,屋盖表面往往设置肋条、波纹等复杂的建筑造型,这些造型可能改变来流在屋盖表面的绕流方式,使得作用于屋盖的风荷载发生变化.

对光滑表面悬挑屋盖风荷载分布规律及其作用机制已建立了较为完整的认识.通过测压风洞试验,Nakamura等^[3]和李秋胜等^[4]给出了悬挑屋盖的风压分布特征,傅继阳等^[5]通过风洞试验和原型实测相结合研究了一悬挑屋盖的风荷载特征,Melbourne等^[6]和Zhao等^[7]则讨论了该类屋盖表面风压的作用机制.Guirguis等^[8]和Sun等^[9]还分析了不同倾角对屋盖风压分布的影响.Cook^[10],Killen等^[11]和Letchford等^[12]分析了设置不同下部看台的悬挑屋盖风荷载规律.值得注意的是,上述研究均未考虑悬挑屋盖表面建筑构造的影响,与实际工程存在一定的差距.

风荷载是一种与绕流方式密切相关的气动性载荷,一些学者注意到建筑表面的复杂构造可能会对其所受风荷载产生影响.李波等^[13]以雁栖湖会展中心为例,根据风洞试验结果,对比了光滑表面与表面设置肋条的悬挑屋盖风荷载分布规律.张建等^[14]、罗尧治等^[15]均以体育场悬挑屋盖为例,分别采用风洞试验与CFD数值模拟的方法分析了波纹对悬挑屋盖平均风荷载的影响,发现波纹状表面对屋盖上下表面风压的相关性影响较小,波峰处风压明显大于相邻波谷处风压,而且大于光滑屋面相应区域的风压.实际上,各类建筑表面都设有复杂的建筑构造,韩志慧等^[16]、沈国辉等^[17]、艾辉林等^[18]讨论了高层建筑表面构造对其风荷载的影响.可以看出,少数学者结合实际工程分析了表面建筑构造对建筑表面风荷载的影响,但研究仅限于特殊个案,并未展开深入研究.

本文在已有认识的基础上,以工程中最常见的矩形平面悬挑屋盖为研究对象,通过测压风洞试验研究不同高度的肋条、不同间距的波纹对悬挑屋盖风荷载的影响规律,为工程实践提供参考.

1 风洞试验概况

1.1 试验风场

本次试验在北京交通大学风洞实验室BJ-1号回流式风洞的高速试验段完成,该风洞(如图1所示)洞体平面尺寸为41.0 m×18.8 m,其中,高速试验段尺寸为:3.0 m×2.0 m×15.0 m,低速试验段

尺寸为:5.2 m×2.5 m×14.0 m.经第三方校核,风洞风场品质优秀.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》(GB 50009—2012)的规定,按模型缩尺比模拟了B类风场(地面粗糙度指数 $\alpha=0.15$),风场平均风速与湍流度剖面如图2所示(图中, Z 、 Z_r 、 U 、 U_r 、 α 分别为高度、参考点高度、风速、参考点处风速和地面粗糙度指数).本次试验中,参考点设置在模型屋盖顶点,并且参考点处所测得的风速谱与Karman谱相同.

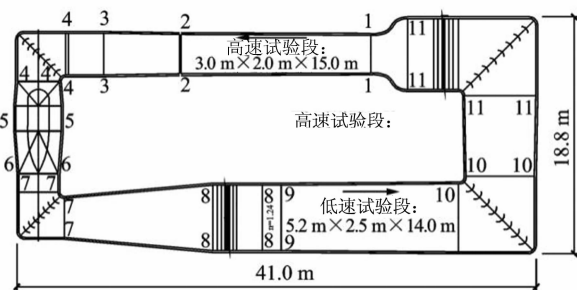


图1 北京交通大学风洞实验室

Fig. 1 Wind tunnel laboratory in Beijing Jiaotong University

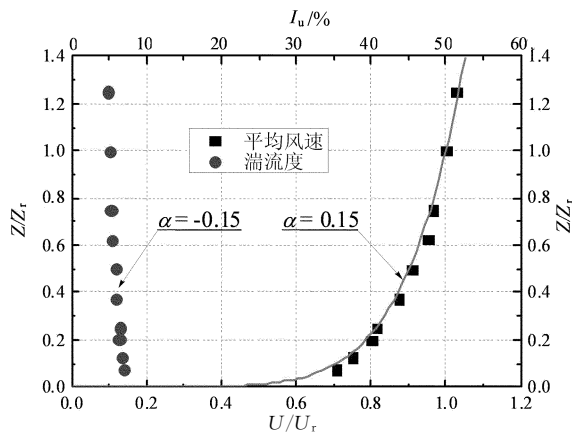


图2 平均风速与湍流度剖面

Fig. 2 Mean wind speed and turbulence intensity profiles

1.2 试验模型设计

参考实际工程,本次试验选取长宽比为3:1,倾角为10°的悬挑屋盖作为研究对象.屋盖悬挑区域投影尺寸为60 m×20 m,顶点处距地面20 m.根据风洞尺寸,几何缩尺比选为1:100.但受模型制作工艺限制,屋盖模型最小厚度为10 mm,对应原型屋盖厚度为1 m,比实际工程大,这是悬挑屋盖测压风洞试验普遍存在的问题.文献[19]指出在进行悬挑屋盖测压风洞试验时,可以适当放宽屋盖厚度的缩尺比限制.为了增加试验模型雷诺数,对模型屋盖表面进行处理,使其具有一定的粗糙度.

参考实际工程中常见肋条尺寸,本文选取的肋条宽度 B 均为3 mm(原型0.3 m),肋条纵向与屋盖

跨度方向一致;肋条间距 L 均为 18 mm(原型 1.8 m),模型表面均匀布置 10 条;肋条高度 h 分别取为 0、 $L/6$ 、 $L/3$ 、 $L/2$ (对应原型分别为:0 m、0.3 m、0.6 m、0.9 m),分别记为模型 R0、R1、R2、R3,重点考察肋条高度对悬挑屋盖风荷载的影响。值得注意的是,模型上肋条尺寸小,肋条顶面无法设置测压点。文献[13]研究表明,当肋条投影面积和屋盖面积的比值较小时,肋条上风荷载对屋盖主体结构设计风荷载影响很小,但对围护结构设计风荷载影响较大。因此,在本文中仅讨论不同高度的肋条对悬挑屋盖主体结构风荷载的影响。图 3 所示为测点布置图,图 4 所示为肋条屋盖风洞试验模型。

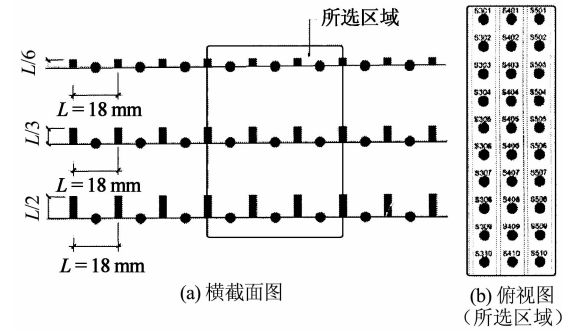


图 3 肋条屋盖测点布置图

Fig. 3 Taps on the roofs with different rib height

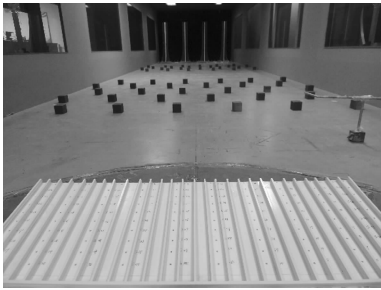


图 4 肋条屋盖风洞试验模型

Fig. 4 Wind tunnel model of the roof with ribs

参考实际工程中常见波纹尺寸,本文选取的波纹宽度 D 为 68 mm(原型 6.8 m),波纹纵向与屋盖跨度方向一致;波纹矢高 H 为 15 mm(原型 1.5 m),在屋盖中部均匀布置 5 条。为了考察波纹间距对悬挑屋盖风荷载的影响,试验中波纹间距 S 分别取为 $2H$ 、 $3H$ 、 $4H$ (原型分别为:3 m、4.5 m、6 m),分别记为模型 W1、W2、W3(如图 5 所示)。图 6 所示为波纹屋盖风洞试验模型照片。

1.3 试验数据分析

在结构风工程中,悬挑屋盖表面风压通常用对应于参考点的无量纲风压系数表示,其定义如下:

$$C_{pr,i}(t) = \frac{P_{U,i}(t) - P_{L,i}(t)}{P_{\infty} - P_0} \tag{1}$$

式中: $C_{pr,i}(t)$ 为测压点 i 处相应于参考点的风压系数; P_{∞} 、 P_0 分别是试验中来流在参考高度处的总风压与静风压; $P_{U,i}(t)$ 为上表面测压点 i 处测得的风压;与上表面相对应位置处, $P_{L,i}(t)$ 为下表面测压点 i 处测得的风压。

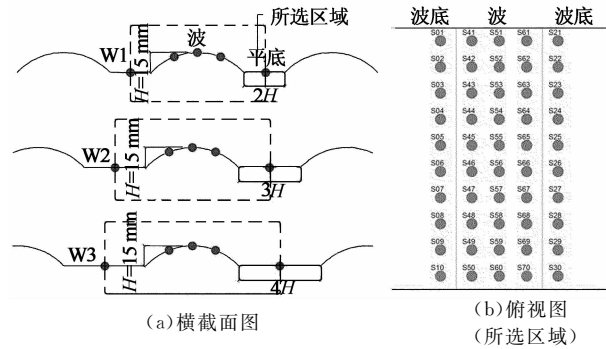


图 5 波纹屋盖测点布置图

Fig. 5 Taps on the roofs with different waves interval

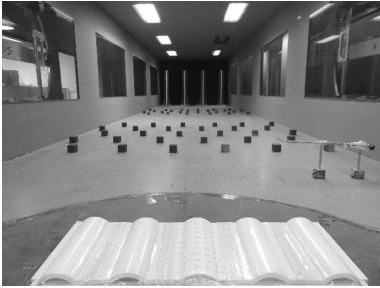


图 6 波纹屋盖风洞试验模型

Fig. 6 Wind tunnel model of the roof with waves

为了更好地说明建筑造型对屋盖主体结构设计风荷载的影响,本文选取悬挑屋盖中间区域(如图 3、图 5 所示),通过积分得到该区域对屋盖主体结构抗风结构设计起控制作用的风致弯矩系数,定义如下:

$$C_M(t) = \frac{\sum_i C_{pr,i}(t) A_i L_i}{AL} \tag{2}$$

式中: A_i 为测点 i 所代表的附属面积; A 为区域总面积; L_i 为测点 i 到悬挑屋盖后边缘端部的距离; L 为悬挑屋盖跨度。

风压系数和风致弯矩系数的均值、标准差分别表示平均风荷载、脉动风荷载特征,可按下式确定:

$$\bar{C}_{p,i} = E[C_{pr,i}(t)], \tag{3}$$

$$\tilde{C}_{p,i} = \sqrt{E[C_{pr,i}^2(t)] - \bar{C}_{p,i}^2}, \tag{4}$$

$$\bar{C}_M = E[C_M(t)], \tag{5}$$

$$\tilde{C}_M = \sqrt{E[C_M^2(t)] - \bar{C}_M^2}. \tag{6}$$

式中: $\bar{C}_{p,i}$ 、 $\tilde{C}_{p,i}$ 分别表示测压点 i 处的平均风压系数和脉动风压系数; $\bar{C}_M$ 、 $\tilde{C}_M$ 分别表示屋盖中间区域的平均弯矩系数和脉动弯矩系数。

本文风压和风力符号约定为:向上或向外为负,向下或向内为正。

2 肋条高度的影响

柱状涡和锥形涡是屋盖风荷载的主要作用机制^[20-21],下面将首先选取上述机制最为典型的 0°、40°风向角,通过风压分布说明肋条对风荷载作用机制的影响,然后通过弯矩系数定量说明肋条高度的

影响规律。

2.1 风压分布特性

图 7 给出了 0°和 40°风向角时,三种肋高屋盖平均风压系数、脉动风压系数分布云图。

可以看出,0°风向角时,气流在屋盖前缘发生分离,在非角部区域形成明显的柱状涡机制,且随着肋条高度的增加,屋盖上平均风压系数和脉动风压系数均稍有增加,但并不显著,这说明肋条高度对顺风风向柱状涡作用机制影响不大。

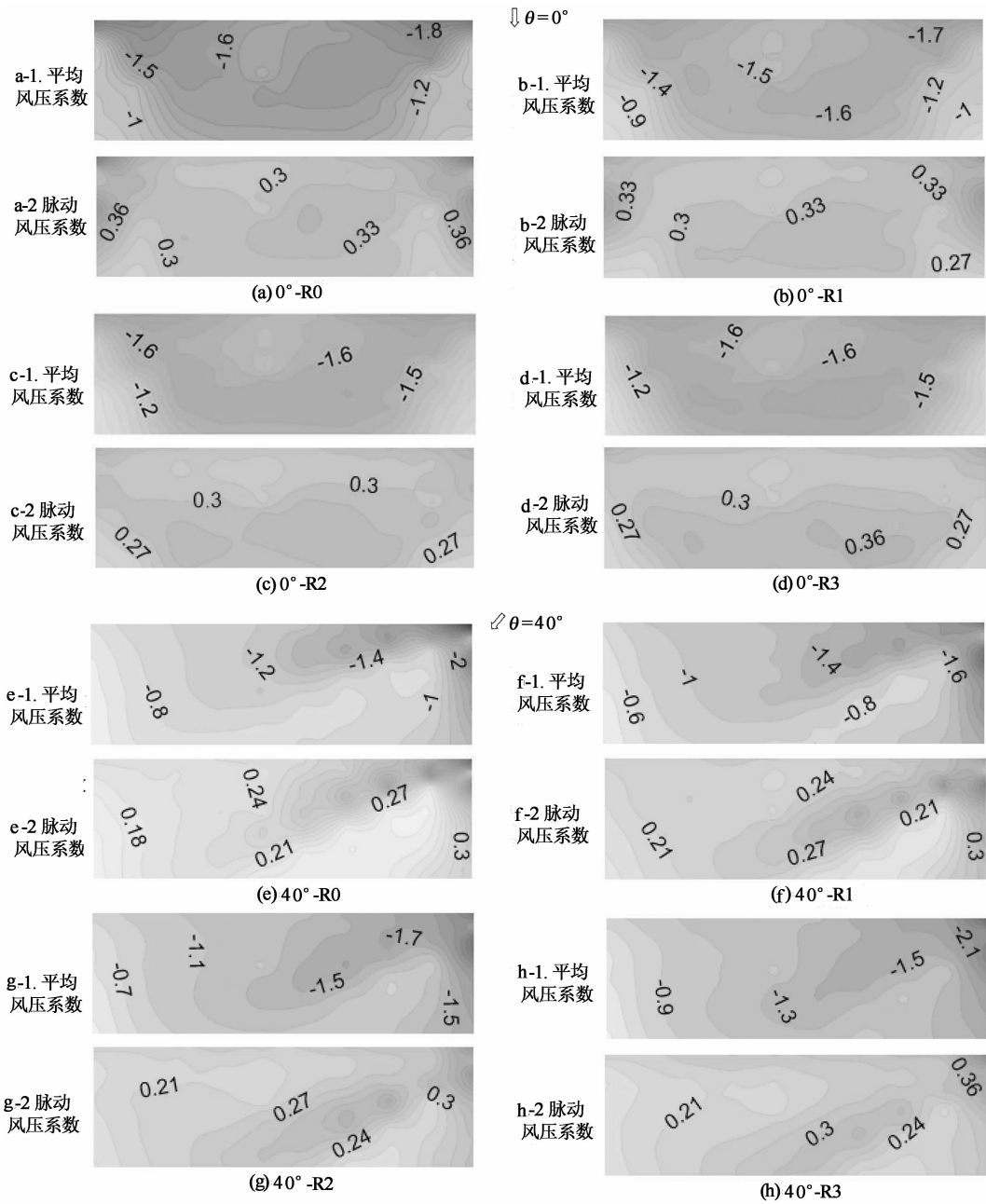


图 7 肋条屋盖风压系数分布图
Fig. 7 Distribution of wind pressure coefficients of the roof with ribs

40°风向角时,气流在迎风角部(右上角)发生强烈分离,在靠近屋盖长轴区域内形成较为明显的锥

形涡作用机制^[21],但是,肋条高度的增加减缓了锥形涡的形成与发展,致使锥形涡的强度逐渐减弱,

R3 屋盖上锥形涡的涡轴已经基本消失. 以上表明, 肋条高度对斜风向锥形涡作用机制有较大影响.

图 8 给出了屋盖弯矩系数随风向角的变化曲线. 可以看出, 不同高度肋条屋盖所受平均风荷载、脉动风荷载随风向角的变化规律相同. 在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向角范围内, 随着风向角的增大, 屋盖所受的平均风吸力和脉动风力逐渐减小; 90° 风向角时, 平均风力几乎为零, 与此同时脉动风力达到最小值; 风向角由 90° 增加至 110° 的过程中, 屋盖所受风力为风压力, 且平均风压力和脉动风压力均稳步增长; 110° 风向角时, 平均风压力和脉动风压力值达到最大; $110^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 风向角范围内, 随着风向角的变化, 平均风压力逐步递减至零, 而脉动风压力先减小, 140° 风向角后有小幅增加. 与平均风荷载的变化相比较, 脉动风荷载随风向角的变化规律较为复杂, 在负压区, 0° 风向脉动风荷载最大, 而在正压区, 110° 风向角脉动荷载最大.

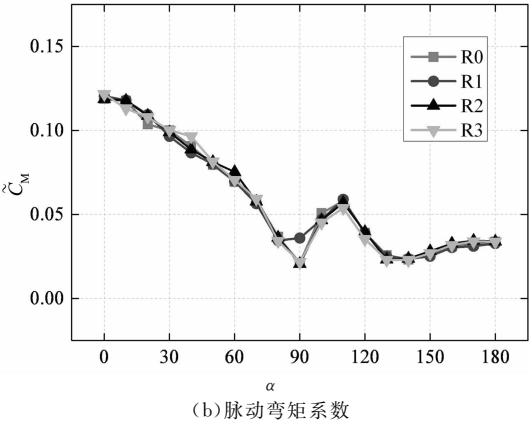
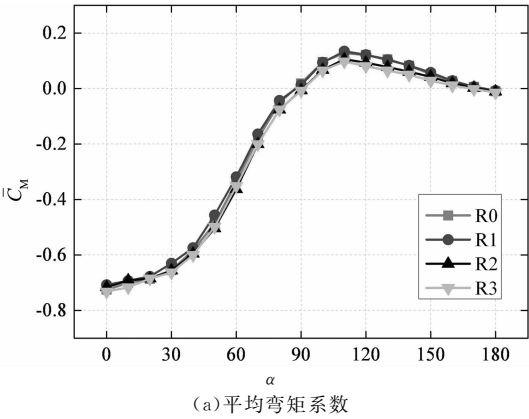


图 8 肋条屋盖弯矩系数

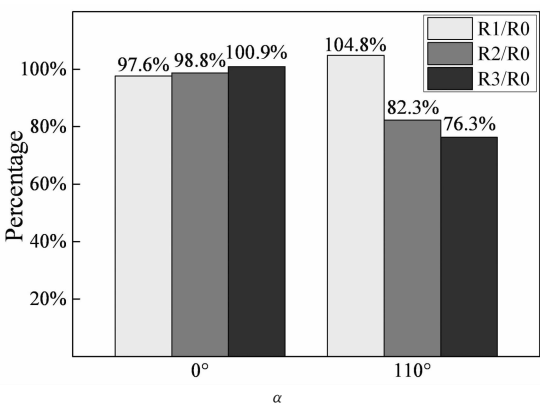


图 9 肋条屋盖弯矩系数对比图

Fig. 9 Comparison of bending moment coefficients of the roof with ribs

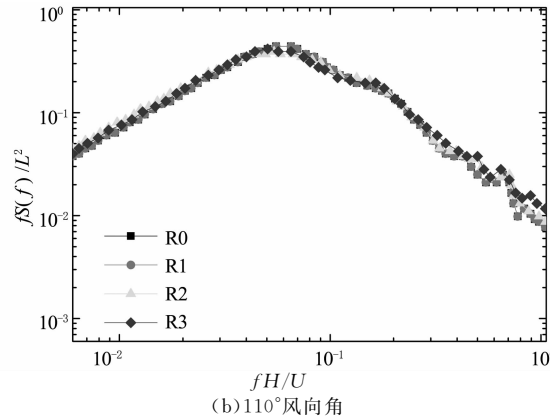
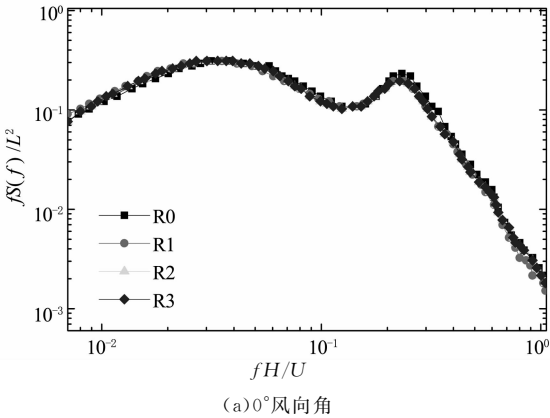


图 10 肋条屋盖弯矩系数功率谱

Fig. 10 Power spectra of bending moment coefficients of the roof with ribs

2.2 最不利风向弯矩系数

图 9 给出对屋盖主体结构设计起控制作用的 0° 和 110° 风向风致弯矩系数对比图, 图 10 给出了上述工况弯矩系数功率谱.

由图 9 可以看出, 在 0° 风向角即最大负压情况下, 三种肋高屋盖的弯矩系数的比值相差很小, 且均与平屋盖在目标区域内的弯矩系数相接近, 说明肋高的改变对最不利负压影响很小. 在 110° 风向角即最大正压情况下, 随着屋盖肋高的增大, 风致弯矩系数逐渐减小, 从 R0 到 R3 约减少了 24%, 说明肋条高度的增加对带肋屋盖最大正压的影响较大.

由图 10 可得, 0° 风向角下目标区域的弯矩系数功率谱在低频处和高频处各有一个峰值, 同时具有

宽带和窄带两种信号特征,而 110° 风向角下目标区域的弯矩系数功率谱仅在低频处有一个峰值,表现为明显的宽带特征.通过对比可知,风向角的变化对带肋悬挑屋盖上风荷载作用机制的影响很大.但是随着肋条高度的增加,各悬挑屋盖上弯矩系数的自功率谱曲线的变化趋势十分接近,基本不受肋条高宽比的影响,说明了来流风并未改变带肋屋盖上风荷载的作用机制.该结论与文献[13]中相应的结论一致.

3 波纹间距的影响

3.1 风压分布特性

图 11 给出了风向角为 0° 、 90° 时,不同间距波纹屋盖的风压系数分布图.在图 11 中通过对比发现, 0° 风向角时,不同波纹间距屋盖平均风压仍为负压,波纹间距的变化未对平均风压分布产生明显影响,柱状涡仍是波纹状

屋盖上风压的主要作用机制,随着波纹间距的增加,平均风压有变小趋势.屋盖迎风前缘处风压脉动较大,沿来流方向,脉动风压系数逐渐减小,且波峰处脉动风压较波谷处脉动风压偏大. 90° 风向角时,风向与波纹垂直,波纹对风压分布产生了较大影响;波纹迎风面出现正压,来流在波纹顶面分离,形成负压;随着波纹间距的增大,波峰处负压增大,迎风面正压区减小;对比屋盖 W1、W2、W3 的脉动风压,可发现脉动风压分布规律基本相同,且相差不大.图 12 为屋盖中部风致弯矩系数平均值和脉动值随风向角的变化.

由图 12 可以看出,整体而言,屋盖波纹间距对屋盖弯矩系数影响较小,但在控制性风向(0° 、 130°)波纹间距有一定影响,尤其是 130° 正压工况.

3.2 最不利风向弯矩系数

图 13 给出了对屋盖主体结构设计起控制作用的最不利风向弯矩系数对比图,图 14 为上述工况弯矩系数功率谱.

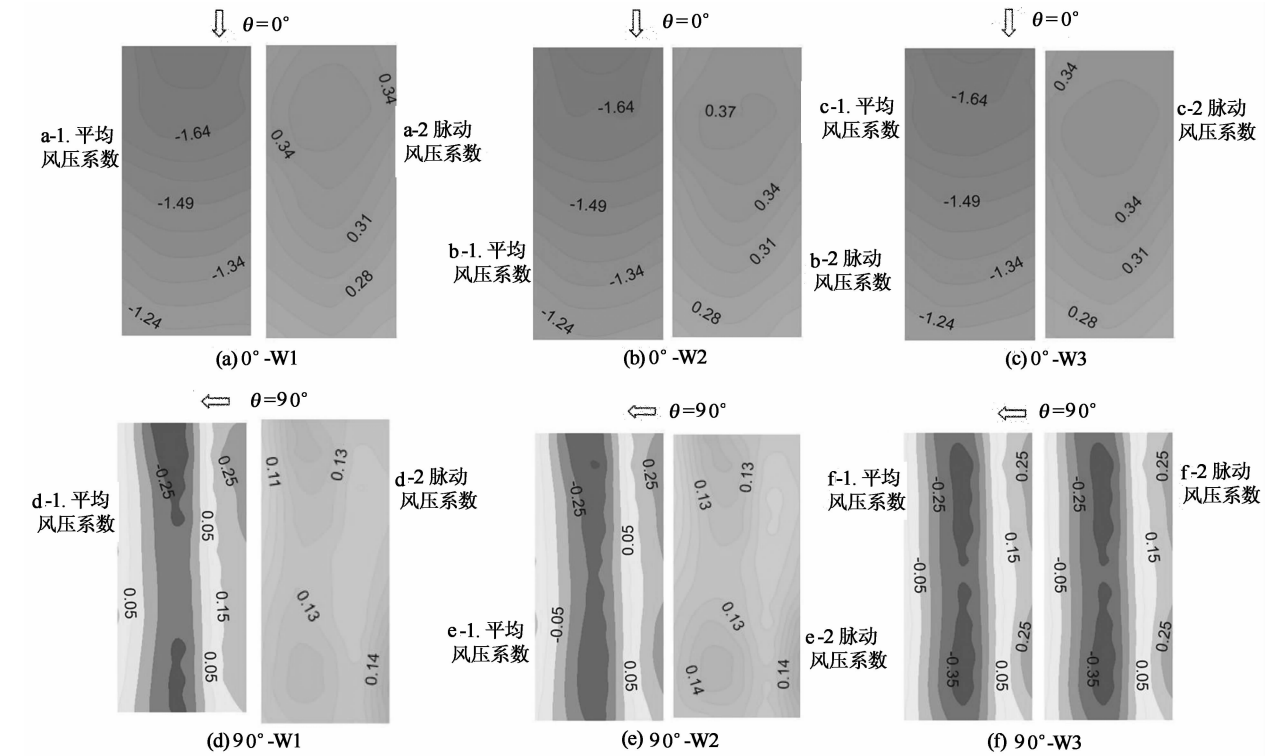


图 11 波纹屋盖风压系数分布
Fig. 11 Distribution of wind pressure coefficients of the roof with waves

由图 13 可看出, 0° 风向角(最大负压工况)时,屋盖平底、波纹部分风压均对波纹间距不敏感.但在 130° 风向角(最大正压工况)时,随着波纹间距的增加,屋盖平底、波纹部分风压均减小,并且波纹部分减小幅度较平底部分大,其中, W3 屋盖波纹部分风

致弯矩系数仅为 W1 屋盖的 63%.图 14 可看出,当来流方向与波纹呈一定角度时,波纹间距还会影响波纹部分风压功率谱的形状,在一定程度上改变该部分风压作用机制.

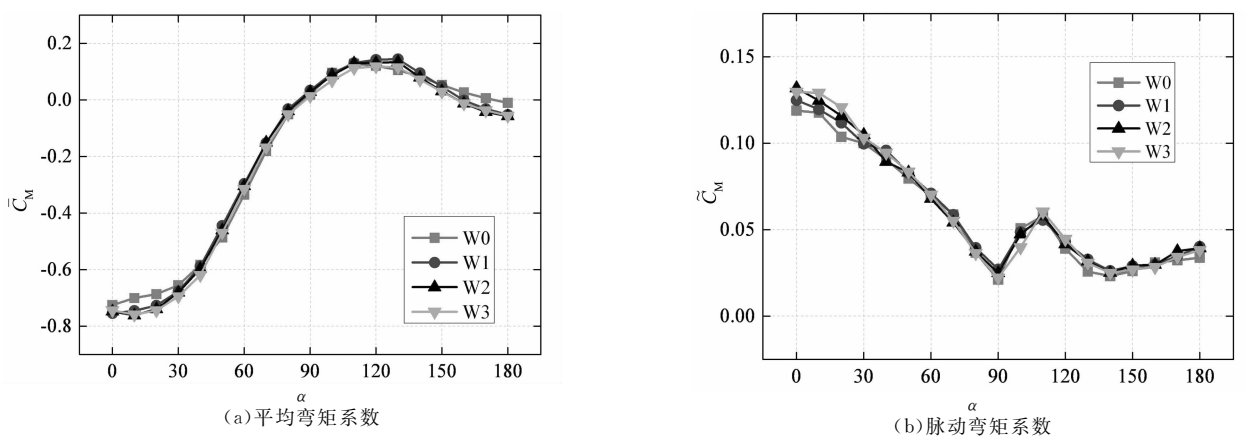


图 12 波纹屋盖弯矩系数

Fig. 12 Bending moment coefficients of the roof with waves

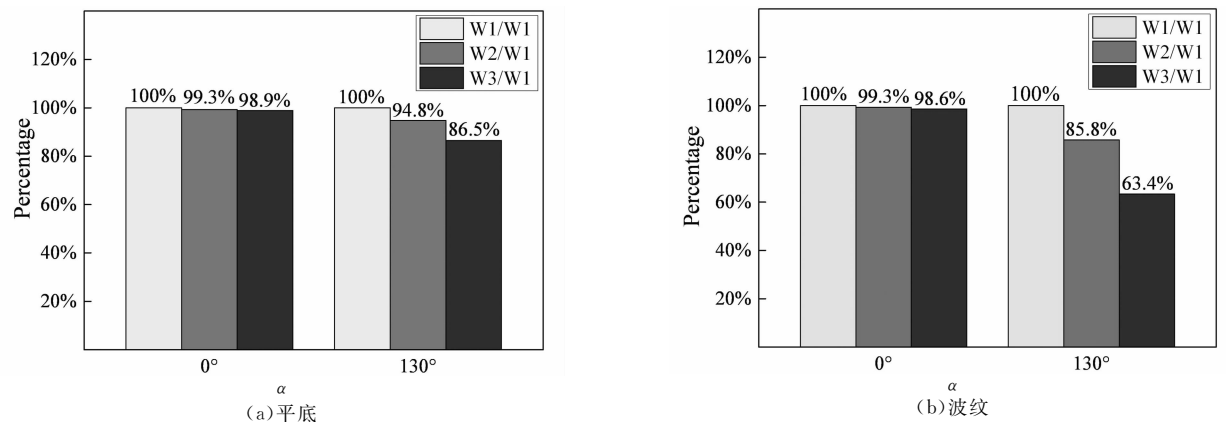


图 13 波纹屋盖弯矩系数对比图

Fig. 13 Comparison of bending moment coefficients of the roof with waves

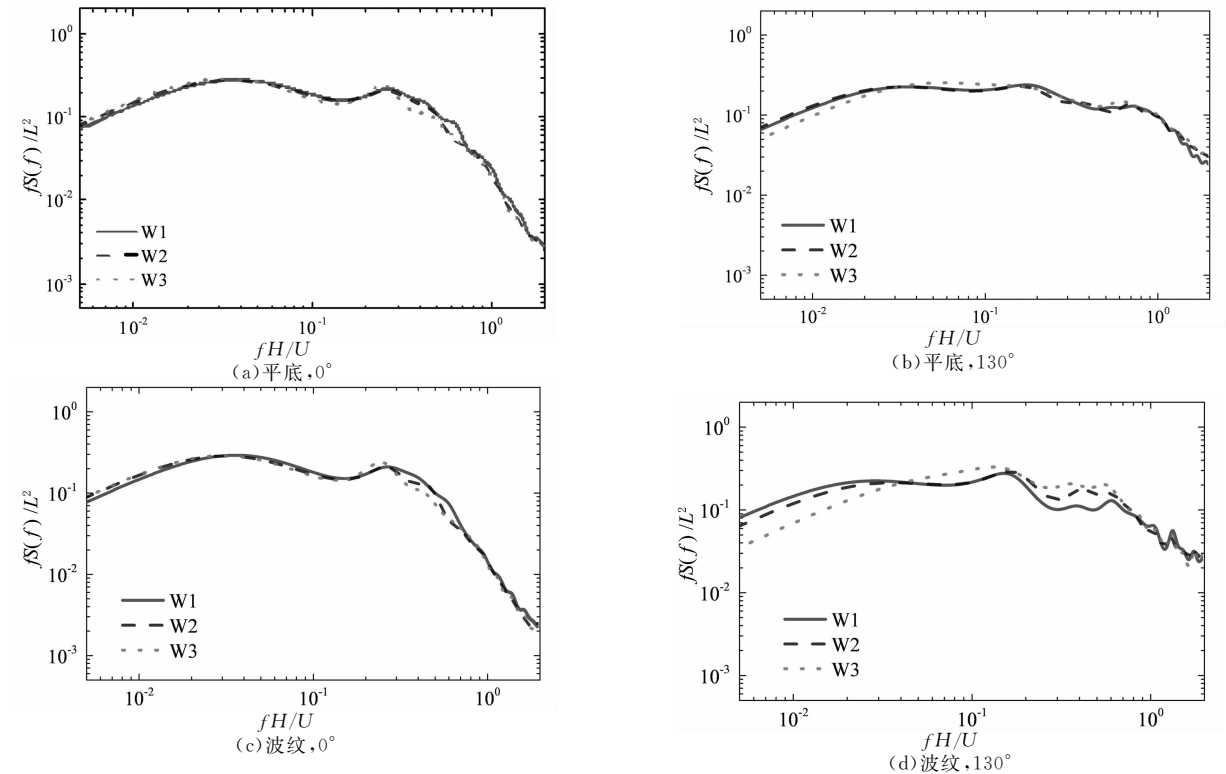


图 14 波纹屋盖弯矩系数功率谱

Fig. 14 Power spectra of bending moment coefficients of the roof with waves

4 结 论

本文通过风洞试验,研究了肋条高度、波纹间距对悬挑屋盖风荷载的影响,主要结论如下:

1)当肋条高度 H 与肋条间距 L 的比值在 $0 \sim 1/2$ 范围内时,肋条高度对悬挑屋盖风荷载作用机制影响不大,不同工况时,屋盖风荷载的功率谱曲线十分接近。当波纹矢高 H 与波纹间距 S 的比值在 $2 \sim 4$ 范围内,来流与波纹呈一定夹角时,波纹间距在一定程度上改变该部分风压作用机制,使得波纹部分风压功率谱形状发生改变。

2) 0° 风向角(最大负压工况)时,三种肋高屋盖风致弯矩系数的比值相差很小,肋条高度对最不利负压的影响很小。但 110° 风向角(最大正压工况)时,随着屋盖肋高的增大,最大正压逐渐减小, $R3$ 屋盖的弯矩系数仅为 $R0$ 屋盖的 76% 。

3) 0° 风向角(最大负压工况)时,屋盖平底、波纹部分风压均对波纹间距不敏感。但 130° 风向角(最大正压工况)时,随着波纹间距的增加,屋盖平底、波纹部分风压均减小,并且波纹部分减小幅度较平底部分大。

参考文献

- [1] HOLMES J D. Wind load of structures[M]. 2nd ed. Oxon: Taylor & Francis, 2007:162—167.
- [2] 张相庭. 结构风工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 2—3.
ZHANG X T. Wind engineering of structures[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006: 2—3. (In Chinese)
- [3] NAKAMURA O, TAMURA Y, MIYASHITA K. A case study of wind-induced vibration of large span open-type roof[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 1994, 52: 237—248.
- [4] 李秋胜, 陈伏彬, 傅继阳, 等. 大跨屋盖结构风荷载特性的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(8): 12—17.
LI Q S, CHEN F B, FU J Y, *et al.* Experimental investigation of wind load characteristics of long span roof[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2009, 36(8): 12—17. (In Chinese)
- [5] 傅继阳, 赵若红, 徐安, 等. 大跨屋盖结构风效应风洞试验与原型实测研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(9): 12—18.
FU J Y, ZHAO R H, XU A, *et al.* Wind tunnel and full-scale study of wind effects on a large roof structure[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2010, 37(9): 12—18. (In Chinese)
- [6] MELBOURNE W H, CHEUNG J C K. Reducing the wind loading on large cantilevered roofs[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 28(1/3): 401—410.
- [7] ZHAO J G, LAM K M. Characteristics of wind pressures on

- large cantilevered roofs: effect of roof inclination[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12/15): 1867—1880.
- [8] GUIRGUISA N M, EL-AZIZ A A, NASSIEF M M. Study of wind effects on different buildings of pitched roofs[J]. Desalination, 2007, 209(1/3): 190—198.
- [9] SUN Y, XIANG B, LIN B, *et al.* Parametric numerical simulation of mean wind loading on stadium cantilevered roofs[J]. Advanced Materials Research, 2011, 243/249: 989—994.
- [10] COOK N J. Reduction of wind loads on a grandstand roof[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1982, 10(3): 373—380.
- [11] KILLEN G P, LETCHFORD C W. A parametric study of wind loads on grandstand roofs[J]. Engineering Structure, 2001, 23(6): 725—735.
- [12] LETCHFORD C W, KILLEN G P. Equivalent static wind loads for cantilevered grandstand roofs[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 24(4): 207—217.
- [13] 李波, 单文姗, 杨庆山. 肋条对仿古悬挑屋盖风荷载特性的影响[J]. 振动工程学报, 2016, 29(2): 269—275.
LI B, SHAN W S, YANG Q S. Effects of ribs on wind load of archaize cantilever roof[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(2): 269—275. (In Chinese)
- [14] 张建, 李波, 单文姗. 波纹状悬挑大跨屋盖的风荷载特性[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3): 111—117.
ZHANG J, LI B, SHAN W S. Wind load on wavy-shaped long-span cantilevered roof[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3): 111—117. (In Chinese)
- [15] 罗尧治, 丁慧. 波纹表面月牙形悬挑屋盖风荷载特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(6): 1963—1971.
LUO Y Z, DING H. Wind load characteristics of crescent-shaped cantilevered roof with wavy surface[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2013, 47(6): 1963—1971. (In Chinese)
- [16] 韩志慧, 周恒毅, 顾明. 某建筑顶部装饰幕墙结构的风荷载及风致抖振响应计算[J]. 振动与冲击, 2008, 27(5): 40—43.
HAN Z H, ZHOU X Y, GU M. Computations of wind pressure and buffeting responses of a curtain wall[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(5): 40—43. (In Chinese)
- [17] 沈国辉, 钱涛, 杨晓强. 设有外镂空装饰结构的扭转体型高层建筑风荷载研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6): 68—74.
SHEN G H, QIAN T, YANG X Q. Study of wind loads on torsion shaped high-rise building with outer pierced ornament structure[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(6): 68—74. (In Chinese)
- [18] 艾辉林, 周志勇. 超高层建筑外表面复杂装饰条的风荷载[J]. 工程力学, 2016, 33(8): 141—149.
AI H L, ZHOU Z Y. Research on wind load characteristics of complex decorative strips on the outer surface of high-rise building[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(8): 141—149. (In Chinese)
- [19] CAO J X, YOSHIDA A. Wind loading characteristics of solar arrays mounted on flat roofs[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123(4): 214—225.
- [20] 陈学锐, 顾志福, 李燕. 锥形涡诱导下建筑物顶面风荷载[J]. 力学学报, 2007, 39(5): 655—660.
CHEN X R, GU Z F, LI Y. Conical vortex induced wind loading on the roof of a building[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(5): 655—660. (In Chinese)
- [21] KAWAI H. Local peak pressure and conical vortex on building[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 2002, 90(4): 251—263.