

凸出架空肋梁对大跨悬挑屋盖风荷载影响研究

王辉¹, 李将将¹, 汤志远¹, 钟才敏², 桑立娟²

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 230009 合肥; 2. 上海中森建筑与工程设计顾问有限公司, 200062 上海)

摘 要:针对某带有凸出架空肋梁的大跨悬挑屋盖,采用 RANS 方法开展风压分布模拟研究,并基于风向变化,通过定义风压干扰因子 IF,探究凸出肋梁对屋盖风荷载的影响特性。结果表明:屋盖总体呈现负压,受到气流分离和锥形涡的共同作用,屋盖迎风檐口及其角部风压较大;0°~165°、180°~345°风向段屋盖上表面风压变化呈对称性,而屋盖下表面不同区域风压随风向变化具有不同步性。对比有无凸出肋梁的情况,0°风向下2种情况风场结构差异较小,但肋梁会阻止其后方涡量增值区的形成;270°风向下凸出肋梁的干扰作用显著,2种情况的屋盖上方两者风速差异明显,尾流区存在涡旋回冲屋盖,无肋梁时风速梯度大且涡量分布集中。肋梁对屋盖风压总体起到遮蔽减小效应,且对屋盖顶部区域效应更明显,270°风向减小效应最显著;在肋梁与来流夹角较小的风向段屋盖 IF 值对风向变化较敏感,其峰值达到-3.8 和 3.7,导致局部风压增大及正负压交替,0°风向下此效应更显著。

关键词:大跨屋盖;凸出肋梁;数值模拟;屋盖风压;干扰因子

中图分类号:TU312+.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2026.01.018

文章编号:1000-4939(2026)01-0192-08 **CSTR:**32414.14.cjam.issn.1000-4939.2026.01.018

Study on the influence of protruding overhead rib beams on wind load of large span cantilever roof

WANG Hui¹, LI Jiangjiang¹, TANG Zhiyuan¹, ZHONG Caimin², SANG Lijuan²

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, 230009 Hefei, China;

2. Shanghai Zhongsen Architectural and Engineering Design Consulting Co., Ltd., 200062 Shanghai, China)

Abstract: For a large span cantilever roof with protruding overhead rib beams, the RANS method is used to simulate the wind pressure distribution. Based on the change of wind direction, the influence characteristics of protruding rib beams on the roof wind load are explored by defining the wind pressure interference factor (IF). The results show that the overall roof shows negative pressure, due to the comprehensive effect of airflow separation and conical vortex, the wind pressure at the windward eaves of the cantilever roof and its corners is higher. The wind pressure on the upper surface of the roof varies symmetrically from 0° to 165° and from 180° to 345°, while the wind pressure at different areas on the lower surface of the roof varies a-

收稿日期:2023-10-18

基金项目:亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题(No. 2020ZB24)

作者简介:王辉,教授。E-mail: hfutwh@sina.com

引用格式:王辉,李将将,汤志远,等.凸出架空肋梁对大跨悬挑屋盖风荷载影响研究[J].应用力学学报,2026,43(1):192-199.

WANG Hui, LI Jiangjiang, TANG Zhiyuan, et al. Study on the influence of protruding overhead rib beams on wind load of large span cantilever roof[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2026, 43(1): 192-199.

synchronously with the wind direction. Comparing the cases with and without protruding rib beam, the difference of wind field structure between the two cases is small in 0° wind angle, but the rib beam can prevent the formation of vortex value-added area behind it. The interference effect of protruding rib beam is significant in 270° wind angle, and the difference of wind speed between the two cases above the roof is obvious. There is vortex back to the roof in the tail flow area, and the wind speed gradient is large and the vortex distribution is concentrated when there is no rib beam. The rib beams have an overall shielding effect on the roof wind pressure, and the effect is more obvious on the top area of the roof, with the most notable reduction effect being in the 270° wind angle. In the wind direction section where the angle between the rib beam and the incoming flow is small, the IF value of the roof is more sensitive to the change of wind direction, and its peak value reaches -3.8 and 3.7 , which leads to an increase of local wind pressure and the alternation of positive and negative pressure, and this effect is more significant in the wind angle of 0° .

Key words: large span roof; protruding rib beam; numerical simulation; wind pressure on roof; interference factor

大跨屋盖结构具有跨度大、自重轻、外形多样等特点,广泛应用于大空间多功能场馆。然而,其刚度、阻尼较小,高速度风极易使结构产生过大响应,影响建筑的正常使用或者出现局部结构垮塌。屋盖风致破坏的主要原因是强风在屋盖边缘气流发生分离或者形成锥形涡^[1],导致屋盖表面形成负压集中区,造成局部破坏。对于部分造型复杂的屋盖,其表面带有凸出构件,与光滑屋面相比,气动特性有所改变,气流的碰撞、分离、回流等现象加剧^[2],直接影响其风荷载作用。

针对大跨屋盖结构,文献[3-4]分别对曲面大跨封闭屋盖和大跨开合屋盖进行风荷载特性模拟,获得不同风向下屋盖风压的分布规律,表明屋盖造型会对其风压分布产生显著影响。文献[5]对强台风下挑檐双坡低矮建筑进行大涡模拟,表明挑檐致使屋面迎风前缘的流动分离提前发生,但其对屋盖风压分布影响甚微。对于凸出构件,文献[6]对不同肋壁夹角的肋条进行 LES 数值模拟,分析肋条对平面湍流的减阻原因,获得不同形状肋条的减阻机理。文献[7]对 11 种设置不同形式眉头和屋脊的低矮双坡悬挑模型开展风洞试验,研究不同屋面凸出设计对屋面风压的影响,表明镂空屋脊的挡风效果最好。文献[8]针对在金属屋面板设置梯形凸出构件的建筑进行缩尺比例为 1:10 的风洞试验研究,结果表明凸出构件对屋面压力有明显的降低作用。上述研究对象集中于光滑屋盖或设置小尺度凸出构件的屋盖,针对屋盖表面设有多根凸出肋梁的半封闭大跨悬挑屋盖,特别是大跨度架空弧形凸出构件,研究工

作开展不足。由于肋梁及其底部镂空外形显著改变气流流动方式,考虑到大跨屋盖对风荷载的敏感性,尚需针对具体建筑,开展相关研究工作。

以某科技馆的扇形大跨悬挑屋盖为研究对象,考虑交错凸出肋梁对气流的干扰,采用雷诺时均(RANS)模拟方法模拟建筑周边风场,分析屋盖风压分布特性,获取风载体型系数随风向变化的规律;同时,通过与无凸出肋梁的光滑屋盖进行比较,深入分析肋梁构件对屋盖风压特性的影响,为复杂屋盖的抗风设计提供有效参考。

1 CFD 模拟方法

1.1 湍流模型

Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型提出新的涡流黏度表达式,并对湍流耗散率 ε 的输运方程进行修正,能够满足雷诺应力的数学约束,避免停滞点异常和尾流区发散^[9]。因此,该模型能较好地模拟流体流动分离、再附着和再循环^[10],准确捕捉近壁面湍流效应,对建筑风场进行模拟时能够获得较高精度,关于湍动能 k 与耗散率 ε 方程如下。

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (2)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中: $u_i (i=1,2,3)$ 为流体沿 i 方向的速度分量; μ, ν 为流体动力、运动黏性系数; μ_t 为涡流黏度系数; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 分别为湍动能 k 与湍流耗散率 ε 对应的 Prandtl 数; 经验常数 $\sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.2, C_2=1.68$ 。

1.2 风场边界条件

入口边界条件选择速度入口, 地貌条件按 B 类, 根据现行《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[11], 风速剖面在梯度风高度 Z_g 内采用指数率, 即

$$U_z = U_0 \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^\alpha \quad (4)$$

式中: U_z 为 Z 高度处的平均风速; U_0 为 10 m 高度处的基本风速, 取 $U_0=27.1$ m/s; Z_0 为风场参考高度, 取 $Z_0=10$ m。湍流剖面参考日本荷载规范^[12], 仅考虑沿来流方向的湍流, 湍动能 k 和湍流耗散率 ε 表达式为

$$k = 1.5 (U_z I)^2, \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_u} \quad (5)$$

式中: U_z 为平均风速; 经验常数 C_μ 取 0.09; L_u 为湍流特征尺度且 $L_u = 100 (Z/30)^{0.5}$; I 为湍流强度, 表达式为

$$I = \begin{cases} 0.23, Z \leq Z_b \\ 0.1 \left(\frac{Z}{Z_g} \right)^{-(\alpha+0.05)}, Z_b < Z \leq Z_g \\ 0.1, Z > Z_g \end{cases} \quad (6)$$

式中: Z_b 为标准参考高度, $Z_b=5$ m; α 为地表粗糙度指数, $\alpha=0.15$; Z_g 为梯度风高度, $Z_g=350$ m。

出口选择自由出流, 两侧和顶面采用对称边界, 其余壁面设置为无滑移壁面。

2 模型建立和方法验证

2.1 工程概况

科技馆由主副 2 个分馆组成, 建筑中部的天桥连接副馆 2 层和主馆 2 层及主馆附近地面。屋盖整体形状呈“折扇形”, 横向高度从主馆至副馆递减, 纵向中间高两边低, 副馆外侧存在凸出建筑墙体。屋盖中部封闭, 而其周边为悬挑形式, 整体通过 11 榀大跨度弧形横梁组成的肋梁传递屋盖荷载, 6 榀主肋梁交汇于建筑中部, 5 榀次肋梁于分馆边缘处

截断。单榀肋梁是上下两根肋梁组成的桁架梁(图 1), 上肋梁高 1.5 m, 凸出且架空布置于屋面。

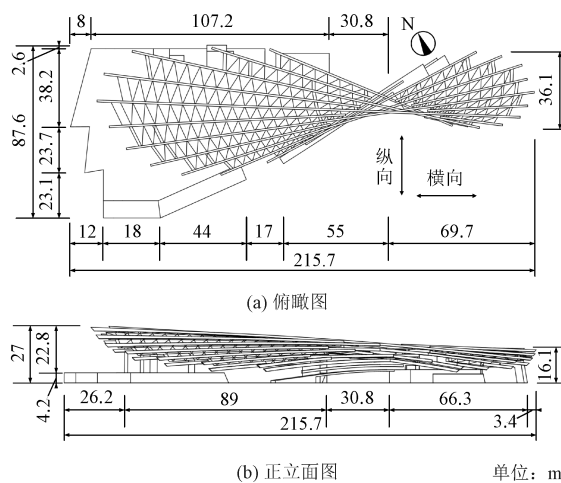


图 1 科技馆

Fig. 1 Science and Technology Museum

2.2 计算模型及方法验证

2.2.1 几何建模与计算域

对科技馆进行足尺精细建模, 保留影响气流流动的细部构造, 如主馆的平台、连接主副馆的天桥(图 2)。取场馆长度方向 $D=220$ m, 高度方向 $H=30$ m, 为忽略计算边界对结果影响, 确定计算域范围为: $L_x=8D, L_y=12D, L_z=5H, x$ 为横风向、 y 为顺风向、 z 为高度方向, 横截面的最大阻塞率小于 3%; 科技馆位于 x 方向近中心位置, y 方向约 1/3 处, 如图 3 所示。

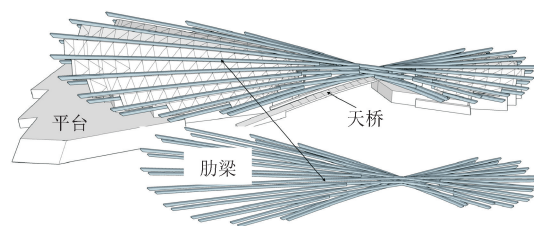


图 2 科技馆实体模型

Fig. 2 Physical model of Science and Technology Museum

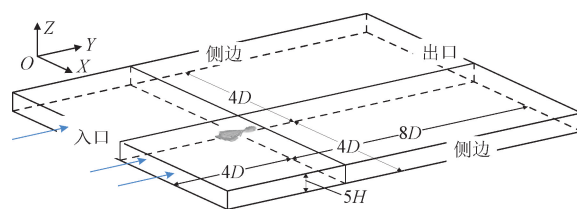


图 3 计算域

Fig. 3 Computation domain

2.2.2 网格划分及求解参数

由于建筑外形复杂, 壁面凹凸起伏, 四面体网格

划分方法存在较大的迭代误差。选择基于“马赛克”技术的 Poly-Hexcore 网格,壁面和近壁面区生成 Poly 网格,其余区域用六面体网格填充。屋盖表面网格最小尺寸为 0.3 m,网格增长率为 1.1,近壁面边界层设置 5 层 Poly 网格,第一层网格高度为 0.01 m;选择 Scalable 壁面函数,壁面的 y^+ 满足大于 11.25 的要求。为精准捕捉流场核心区的气流流动,对建筑周边 200 m 内区域进行加密处理,网格划分如图 4 所示。

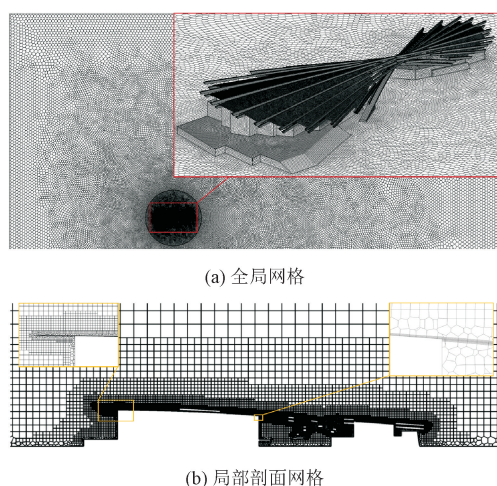


图4 网格划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mesh generation

计算时采用 3D 双精度分离求解器,控制方程中对流项的离散采用二阶迎风格式,压力速度耦合采用 SIMPLEC 算法。当控制方程的迭代残余量均小于 10^{-4} ,且屋盖表面监测点风压值趋于稳定,即认为计算已经收敛。

2.3 网格无关性分析

以 3 种不同网格精度的模型进行网格无关性分析,以 B 型网格精度作为基础网格,设定网格增长率为 1.15、1.05,获得 A、C 2 种网格,A 型网格的屋盖网格尺寸调整为 0.5 m。A、B、C 网格数量分别为 210 万、330 万和 480 万,提取 0° 风向下点 1、2 处 Y 向风速和屋盖表面点 3、4、5 处风压(图 5),分析 3 种网格在测点处的风速或风压偏差,图中 U/U_{ref} 代表 U_z/U_0 , P 为屋盖表面测点风压。由图 5 可知,基于 3 种网格精度得到的各点风速、风压比较接近,A、C 型网格与 B 型网格在各测点的风速、风压偏差小于 10%,B、C 型网格的风速、风压偏差更小。考虑到计算效率,选择 B 型网格用于后续研究。

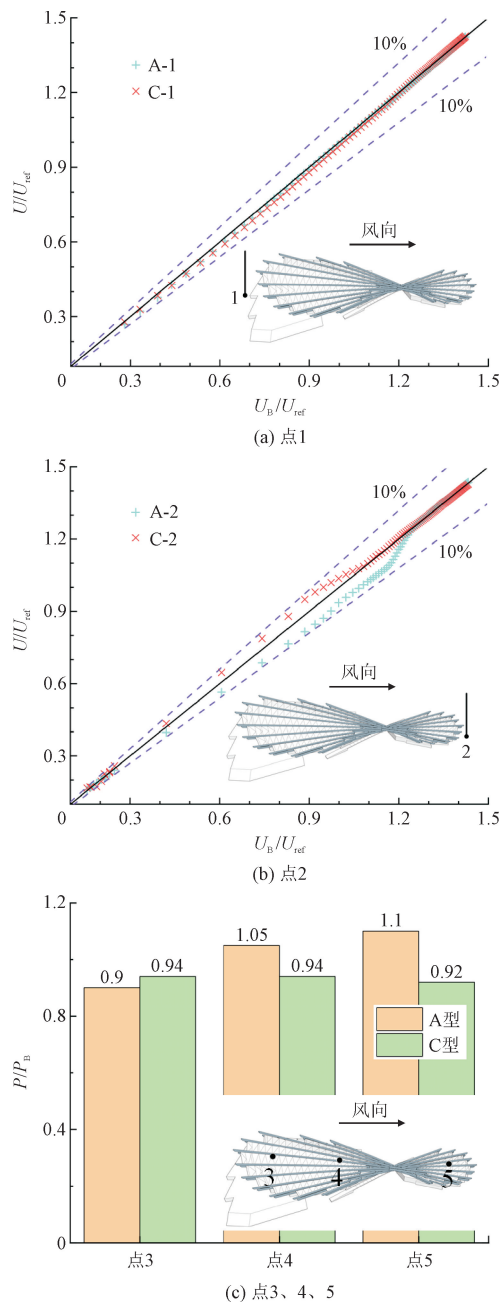


图5 网格无关性分析

Fig. 5 Grid independent analysis

3 数值模拟结果分析

采用平均风压系数 C_{pr} 描述屋盖表面风压分布,量值正为压力、负为吸力,其表达式为

$$C_{pr} = \frac{\Delta P}{0.5 \rho U^2} \quad (7)$$

式中: ΔP 为测点与前方来流压力差; ρ 为标准空气密度; U 为建筑参考高度平均风速;参考高度取屋盖最高点 24.7 m。为研究屋盖局部风压,对屋盖进行

分区,记主馆屋盖为A区,副馆屋盖为B区,A1~A17和B1~B10分区为屋盖悬挑区域,A18~A33和B11~B16分区为封闭区域,如图6所示。风向角以15°递增,共24种工况(图7)。

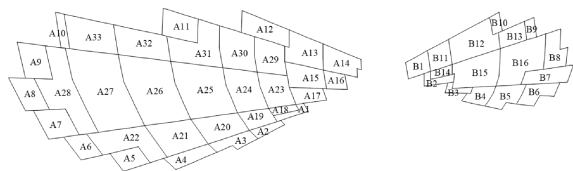


图6 屋盖分区示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the roof subdivision

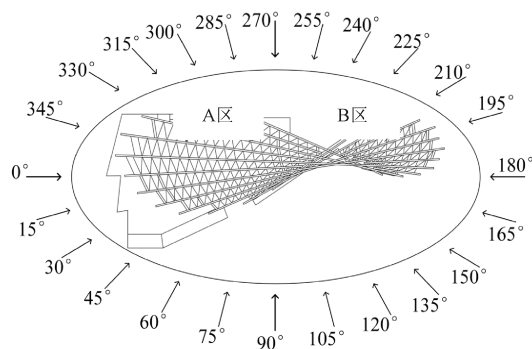


图7 风向角定义示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the wind direction definition

工程中常用风荷载体型系数 μ_s 表征屋盖所受风荷载值,表达式为

$$\mu_{si} = \left(\frac{Z_i}{Z_H} \right)^{2\alpha} C_{pri}, \mu_s = \frac{\sum \mu_{si} A_i}{\sum A_i} \quad (8)$$

式中: Z_i 为测压面 i 平均高度; Z_H 为建筑参考高度; A_i 为测压面 i 的面积。

3.1 带肋梁屋盖

3.1.1 屋盖平均风压

据模拟结果,各风向下屋盖总体呈现负压,迎风檐口处出现较强气流分离,引起屋盖负压聚集,而坡度较大的迎风分区出现局部正压。限于篇幅,以0°、270°和315°典型风向研究屋盖上表面风压分布特点,图8给出了3种风向下屋盖上表面平均风压系数分布。

由图8可知,随风向改变,各分区风压分布变化明显。3种风向角下的迎风檐口处由于发生气流分离,形成负压聚集区,且0°风向下分离效应最显著, C_{pr} 极值达到-1.3。屋盖上表面整体呈负压,量值集中于-0.4~0之间,是由于迎风面气流受到肋梁的阻挡损失速度或者沿建筑两侧流动形成回流;且建筑横向西高东低,纵向两边低中部高,导致气流在屋盖最高处分离后直接脱离屋盖,使得风压偏低。由

于肋梁与屋盖间的洞口产生峡谷效应,使流动加速形成更大屋面负压,使得0°、270°风向下屋盖迎风面部分肋梁下方的等值线产生凸出或者凹入,而315°风向峡谷效应减弱,风压等值线更光滑。

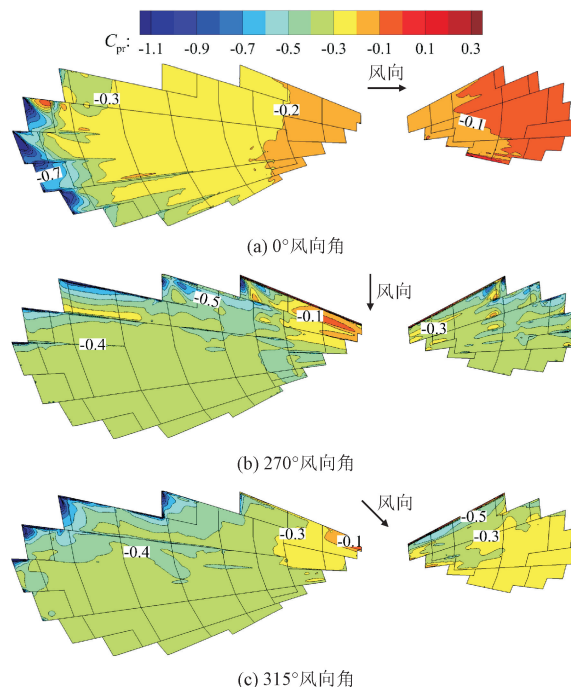


图8 0°、270°和315°风向屋盖上表面平均风压系数
Fig. 8 Mean wind pressure coefficient of top surface in 0°, 270° and 315° wind angle

另外,90°风向下屋盖迎风面坡度偏大,且屋盖前方存在坡体,气流触碰屋盖迎风面形成大面积正压区;180°风向下屋盖前低后高,受气流冲击影响,屋盖负压整体偏小。

屋盖下表面仅包含悬挑部分,占整个屋盖比例较小,且整体 C_{pr} 量值较小;屋盖大部分区域为负压,因受到向上爬升气流的冲击,迎风处存在局部正压。

3.1.2 屋盖风荷载体型系数

选定4个条带量化分析风向对屋盖风压分布的影响,条带位置如图9所示。图10给出了各风向下4个条带的 μ_s 值,具体情况如下。

1)条带1、2分区屋盖上表面 μ_s 值整体为负压,0°~180°和180°~345°风向段的变化趋势有一定对称性,均是风压先增后减,且135°~240°风向段波动幅度较大,极值为270°风向下A16分区的-0.78。

2)条带1下表面风压随风向变化出现正负压转变,整体变化趋势呈“W”形,在0°~180°和180°~345°风向段呈对称性,而A15、A16分区风压在150°~195°风向段出现正压骤降骤升,180°风向接近无压。

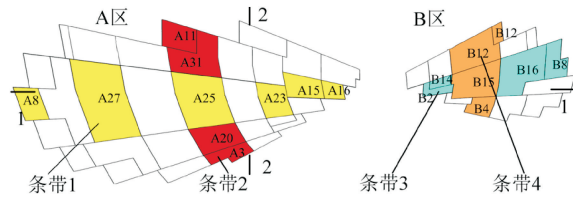
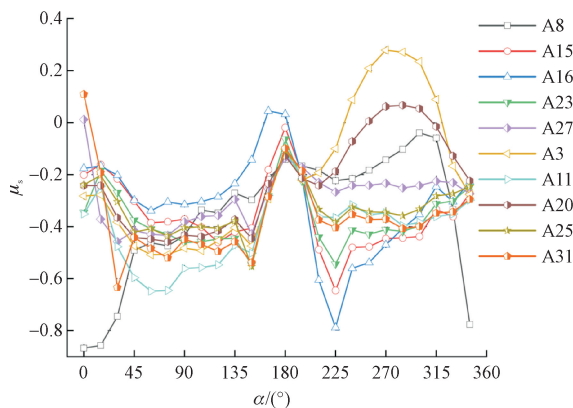


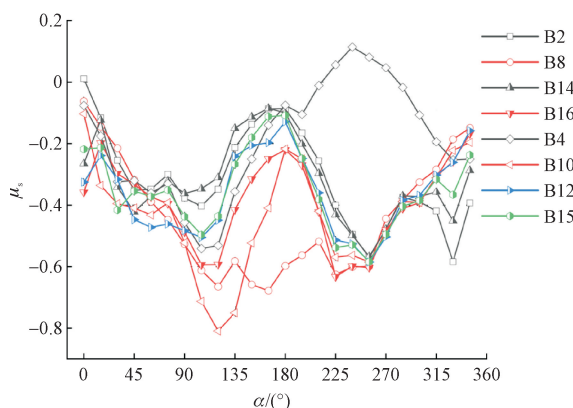
图9 条带位置示意图

Fig. 9 Position diagram of bands

条带3、4的屋盖上表面风压整体呈“W”形变化

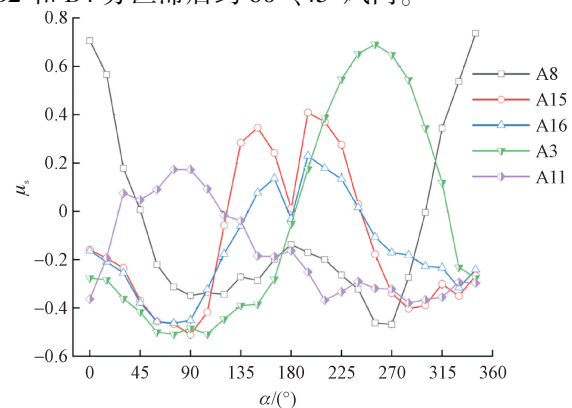


(a) 条带1和2屋盖上表面

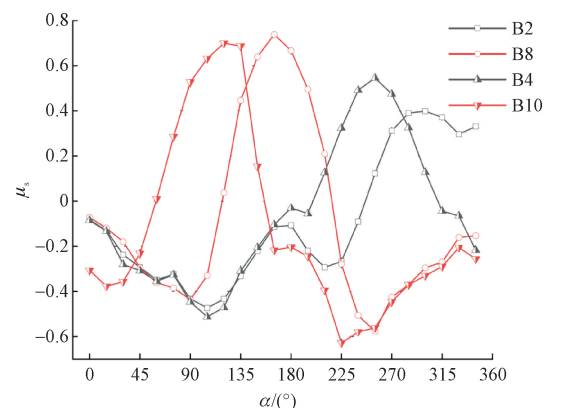


(c) 条带3和4屋盖上表面

趋势,120°风向下的 B10 分区达到极值-0.81;但悬挑区域的 B2、B8 分区变化特点不同,135°~225°风向段的 B2 分区波动微弱,195°~345°间的 B8 分区压力由负转正再转负。屋盖下表面总体表现为正负压转换,极值为 0.74 和-0.62。随风向变化,B2 和 B4、B8 和 B10 区 μ_s 值增减趋势具有不同步性,30°~255°风向段的 B8 和 B10 分区、195°~255°风向段的 B2 和 B4 分区滞后约 60°、45°风向。



(b) 条带1和2屋盖下表面



(d) 条带3和4屋盖下表面

图10 各风向下屋盖表面各条带风载体型系数

Fig. 10 Wind load shape factors of roof bands under different wind directions

3.2 肋梁对屋盖风压的干扰

3.2.1 肋梁对屋盖区域风场影响

定义有无肋梁时的建筑分别为模型1和2,0°风向时,前方来流与肋梁的夹角较小,2种模型风场类同;而270°风向时模型1、2的风场结构差异明显,表明肋梁对风场的影响显著。现选取0°风向下的截面1-1和270°风向下的截面2-2分析典型风向下肋梁对风场结构的影响。图11、图12给出了截面处风场流线、Y向风速及X向涡量(来流方向为Y向),涡量代表风场速度的旋度,可以衡量流场涡旋的强度和方向,具体情况如下。

1) 0°风向向下2种模型的截面1-1流线、风速及涡量分布基本相同,而肋梁附近存在差异。由于肋梁的干扰作用,A区肋梁前方的迎风面由正涡量转为负涡量,正涡量区则在其上方,且涡量总体强度降低,表明肋梁明显降低了风速梯度;由于气流经过肋梁形成狭道效应,模型1的肋梁交汇区形成一定尺度涡旋且风速偏大。

2) 270°风向向下截面2-2的流线、风速及涡量分布在屋盖上方和建筑尾流区差异较大。模型1尾流区受到侧面绕流的影响,形成大范围回流和低速区;屋盖迎风面肋梁前方形成小尺度涡旋和正负涡量区,且涡量值较大,近尾流区存在少量回流。模型

2 屋盖上方的风场风速偏大,等值线呈斜“U”形,这是因为屋盖迎风面缺少肋梁的阻挡作用,屋盖表面光滑,使得速度边界层范围缩小;迎风面气流紧贴屋盖,形成负涡量边界层,屋盖背风处形成涡量增值区和一定尺度涡旋,且涡量分布较为集中,涡旋导致了低速区的形成。

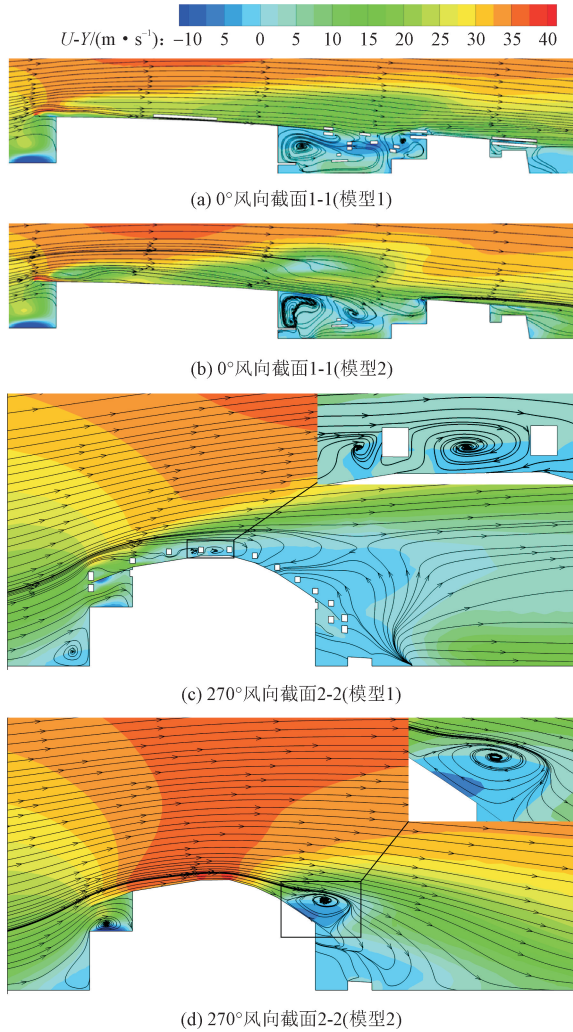


图 11 模型 1、2 的风场流线和 Y 向风速
Fig. 11 Wind field streamline and Y-direction wind speed in models 1 and 2

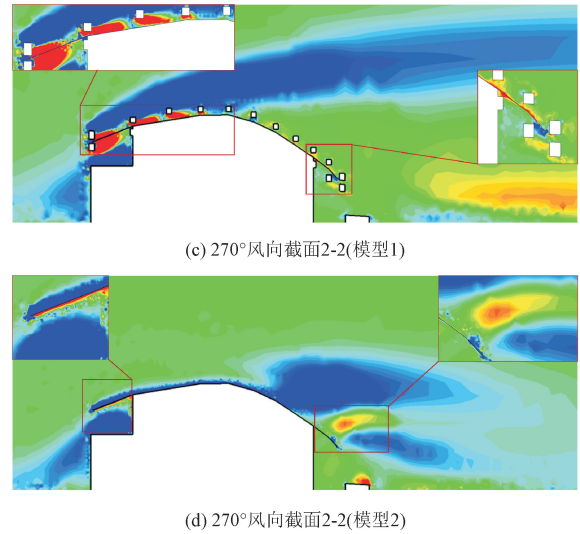
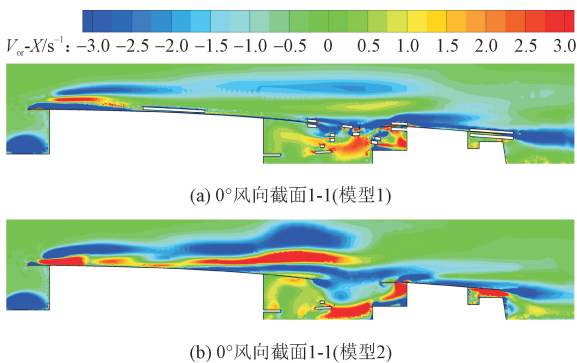


图 12 模型 1、2 的 X 向涡量

Fig. 12 X-direction vorticity in models 1 and 2

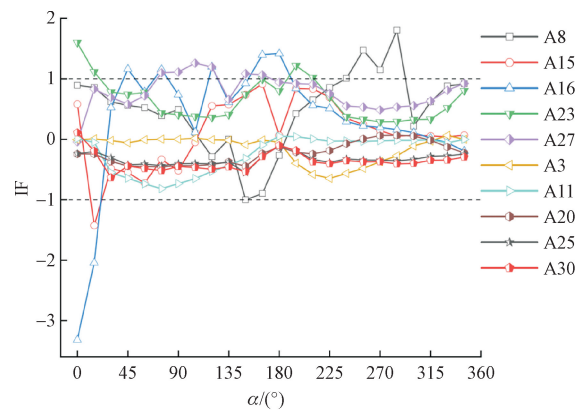
3.2.2 肋梁干扰作用量化

为量化肋梁对屋盖风压的干扰作用,定义屋盖各分区平均风压系数的干扰因子 IF 为

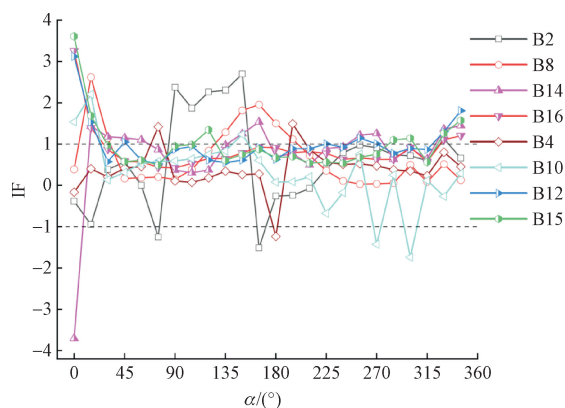
$$IF = \frac{\sum C_{pri} A_i}{\sum C_{pi} A_i} \quad (9)$$

式中: C_{pri} 为肋梁干扰下测压面的平均风压系数; C_{pi} 为无肋梁屋盖的测压面平均风压系数。

图 13 给出了 4 个条带各风向下屋盖平均风压系数的 IF 值。由图 13 可知, IF 值基本分布在 -1~1 之间,表明肋梁对屋盖风压的干扰作用总体表现为遮掩减小, 270° 风向减小程度最高, 屋盖顶部区域效应最为显著。然而, 特殊风向下局部区域的 IF 绝对值超过 1, 0° 风向最为明显, A、B 区峰值分别达到 -3.3、1.8 和 -3.8、3.7, 风压放大效应显著。



(a) A 区条带 1、2



(b) B区条带3、4

图13 各风向下屋盖部分分区平均风压系数干扰因子

Fig. 13 Interference factor of mean wind pressure coefficient for partial roof subdivision under different wind angles

多数区域的 IF 值在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 、 $135^\circ \sim 210^\circ$ 和 $315^\circ \sim 345^\circ$ 风向段剧烈变化,这是由于对应风向下肋梁与前方来流夹角较小,造成屋盖风压的放大效应和正负快速交替,对悬挑屋盖风压影响最为剧烈,其余风向其值变化幅度较小。

4 结 论

采用 CFD 方法对设置凸出肋梁的大跨悬挑屋盖进行风荷载模拟研究,获取屋盖风压的分布规律,并通过分析典型风向下有无肋梁流场和风压分布情况,获得肋梁对屋盖风荷载的影响特性。

1) 受建筑外形的影响,屋盖的迎风前檐、悬挑角部出现强气流分离和锥形涡,导致檐口负压集中;肋梁处的峡谷效应明显,屋盖局部负压增大。风向对有肋梁时的屋面风压分布影响显著, $0^\circ \sim 165^\circ$ 和 $180^\circ \sim 345^\circ$ 风向段屋盖上表面风压变化呈对称性,部分风向段出现正负压转换;屋盖下表面不同分区风压变化趋势有不同步性。

2) 0° 风向下,模型 1、2 的风场基本无差别,由于肋梁的干扰作用,屋盖悬挑处涡量由正转负。而 270° 风向下,2 种模型风场结构差异较大。对模型 1,肋梁阻挡气流流动,导致屋盖上方风速剪切层范围扩大,斜“U”形速度等值线消失。模型 2 的风速和涡量分布集中且偏大,表明肋梁对建筑风场产生较强的干扰作用。

3) 随风向变化,肋梁对屋盖风整体表现为遮掩减小,建筑顶部区域效应最强,特殊风向下存在对屋盖局部风压的放大作用。在肋梁与来流夹角较小的风向段,屋盖局部风荷载存在快速的正负压交替,IF 峰值达到 -3.8 和 3.7。

参考文献:

- [1] GAN S, LI G, DONG Z Q, et al. Numerical study on aeroelastic behavior of spoiler on low-rise building based on fluid-structure interaction method[J]. Journal of building engineering, 2022, 59: 105115.
- [2] 李寿科, 肖飞鹏, 张雪, 等. 女儿墙对平屋面低矮建筑风荷载特性的影响[J]. 建筑结构, 2020, 50(7): 74-79.
LI Shouke, XIAO Feipeng, ZHANG Xue, et al. Effect of parapet-wall on wind load of flat roof low-rise building[J]. Building structure, 2020, 50(7): 74-79 (in Chinese).
- [3] 文志彬, 范超, 吴琴锋, 等. 某大跨水雪综合体风荷载 CFD 数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 01): 1770-1775.
WEN Zhibin, FAN Chao, WU Qinfeng, et al. Numerical study on the wind load of a long-span water and snow complex[J]. Building structure, 2021, 51(S01): 1770-1775 (in Chinese).
- [4] 孙芳锦, 祝东涵, 张尚祥, 等. 大跨开合屋盖风压特性研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(5): 989-996.
SUN Fangjin, ZHU Donghan, ZHANG Shangxiang, et al. Wind pressure characteristics of a large span retractable roof[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(5): 989-996 (in Chinese).
- [5] 闫渤文, 马晨燕, 赵乐, 等. 强台风下带挑檐双坡低矮房屋风荷载特性大涡模拟方法适用性研究[J]. 工程力学, 2021, 38(11): 66-78.
YAN Bowen, MA Chenyan, ZHAO Le, et al. Study on the applicability of large eddy simulation method for wind load characteristics of low-rise buildings with eaves and double slopes under strong typhoons[J]. Engineering mechanics, 2021, 38(11): 66-78 (in Chinese).
- [6] 康凯, 王国付, 耿孝恒, 等. 不同肋壁夹角下肋条湍流数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(4): 960-966.
KANG Kai, WANG Guofu, GENG Xiaoheng, et al. Numerical simulations on the turbulent flows of riblets with different riblet angles[J]. Journal of engineering thermophysics, 2022, 43(4): 960-966 (in Chinese).
- [7] 杨易, 谢壮宁, 石碧青. 屋顶构造形式对传统民居风荷载特性的影响[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(2): 143-150.
YANG Yi, XIE Zhuangning, SHI Biqing. Influence of roof members on wind load characteristics of traditional low-rise residence buildings[J]. Journal of building structures, 2017, 38(2): 143-150 (in Chinese).
- [8] AZZI Z, HABTE F, VUTUKURU K S, et al. Effects of roof geometric details on aerodynamic performance of standing seam metal roofs[J]. Engineering structures, 2020, 225: 111303.
- [9] VAN HOOFF T, BLOCKEN B, VAN HARTEN M. 3D CFD simulations of wind flow and wind-driven rain Shelter in sports stadia: Influence of stadium geometry[J]. Building and environment, 2011, 46(1): 22-37.
- [10] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A, et al. A new $k-\varepsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. Computers & fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [12] AIJ. Recommendations for loads on buildings: AIJ-2019[S]. Tokyo, Japan: Architectural Institute of Japan, 2004.

(编辑 张璐)