



扰流板对分离泡诱导下平屋盖表面风荷载的影响研究

董欣 邹云峰

EFFECTS OF SPOILER ON WIND LOAD OF FLAT ROOFS EXPOSED TO SEPARATION BUBBLE

DONG Xin, ZOU Yun-feng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.12.0872>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

倒角化处理对于矩形高层建筑风荷载特性的影响机理研究

EFFECT OF ROUNDED CORNERS ON WIND LOAD CHARACTERISTICS OF RECTANGULAR TALL BUILDINGS

工程力学. 2021, 38(6): 151-162, 208 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.07.0451>

冷却塔群塔风致干扰脉动风压频谱特性与相关性

TIME-FREQUENCY CHARACTERISTICS AND RELEVANCE OF FLUCTUATING WIND PRESSURE OF GROUPED COOLING TOWERS

工程力学. 2021, 38(10): 44-53 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.09.0683>

行业标准《屋盖结构风荷载标准》的主要内容

MAIN CONTENTS OF THE STANDARD FOR WIND LOADS ON ROOF STRUCTURES

工程力学. 2018, 35(7): 1-6 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.06.ST03>

非高斯风压峰值因子估计：基于矩的转换过程法的对比研究

A COMPARATIVE STUDY ON MOMENT-BASED TRANSLATION PROCESS METHODS FOR THE PEAK FACTOR ESTIMATION OF NON-GAUSSIAN WIND PRESSURES

工程力学. 2020, 37(4): 78-86 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.04.0201>

矩形高层建筑非高斯风压时程峰值因子计算方法

PEAK FACTOR ESTIMATION METHODS OF NON-GAUSSIAN WIND PRESSURES ON A RECTANGULAR HIGH-RISE BUILDING

工程力学. 2017, 34(7): 177-185, 223 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.02.0134>

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

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

工程力学. 2021, 38(11): 66-78, 133 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.10.0738>



订阅号：面向读者



订阅号：面向作者

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1000-4750(2022)01-0059-10

扰流板对分离泡诱导下平屋盖表面 风荷载的影响研究

董 欣^{1,2}, 邹云峰³

(1. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092; 2. 上海防灾救灾研究所, 上海 200092;

3. 中南大学土木工程学院, 湖南, 长沙 410075)

摘 要: 通过风洞测压试验, 研究对比了设置扰流板前后, 分离泡诱导下平屋盖表面风压特性的变化; 基于此, 分析了扰流板作用机理, 并给出了扰流板的推荐倾角。研究了平屋盖表面风压分布及统计值的变化, 结果表明: 设置扰流板后, 除迎风前缘附近, 屋面平均和脉动风压均减小; 分离区内风压偏度和峰度值显著降低, 非高斯脉动特性减弱。探讨了扰流板对于顺风向和横风向风压相关特性的影响: 顺风向风压相关性减弱; 横风向风压相关性的减弱仅体现在迎风前缘附近。给出了平屋盖表面风荷载整体合力(矩)的变化, 发现当扰流板倾角为 0°、10°和 20°时, 整体合力均值分别减小 6.3%、8.2% 和 6.6%; 倾覆力矩均值分别减小 18.2%、21.9% 和 23.3%。基于所得风荷载, 对平屋盖整体结构进行静力响应分析, 发现设置扰流板将减小主体结构柱底轴力、柱底弯矩和跨中位移, 最大降幅分别为 13.1%、15.6% 和 10.1%。综合风压统计值、风压相关性、整体合力和内力响应指标, 指出分离泡诱导下, 所考察工况范围内的平屋盖表面扰流板推荐倾角为 10°。

关键词: 扰流板; 分离泡; 风压统计值; 风压相关性; 整体合力

中图分类号: TU312+1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.12.0872

EFFECTS OF SPOILER ON WIND LOAD OF FLAT ROOFS EXPOSED TO SEPARATION BUBBLE

DONG Xin^{1,2}, ZOU Yun-feng³

(1. Tongji Architectural Design (Group) Co. Ltd, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Shanghai 200092, China;

3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hu'nan 410075, China)

Abstract: Through wind tunnel test, wind pressure characteristics of flat roofs exposed to separation bubble with or without spoilers were investigated and compared. Based on this, the mechanism of the spoiler for reducing wind-induced effect and the recommended inclination were given. Distribution and statistics of wind pressures were demonstrated. It is shown that the mean and fluctuating pressures are reduced by setting the spoilers, except those near the leading edge. In the separated region, the skewness and kurtosis of wind pressures significantly decrease, which implies the less obvious non-Gaussian nature. The influence of spoilers on wind pressure correlation was analyzed. It is observed that the longitudinal correlation attenuates dramatically, while the degenerative transverse correlation only occurs near the leading edge. The variation of total uplift forces and overturning moment were given. For the spoilers with inclination of 0°, 10° and 20°, the total mean uplift forces are decreased by 6.3%, 8.2% and 6.6% respectively, the total mean overturning moment are decreased by 18.2%, 21.9% and 23.3% respectively. With the obtained wind loads, the static response analysis was conducted. It is

收稿日期: 2020-12-02; 修改日期: 2021-04-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51408353); 国家自然科学基金面上项目(52078504); 上海市自然科学基金项目(19ZR1421000); 上海市青年科技启明星计划项目(15QB1404800)

通讯作者: 邹云峰(1984—), 男, 湖南隆回人, 副教授, 工学博士, 主要从事结构风工程研究 (E-mail: yunfengzou@csu.edu.cn).

作者简介: 董 欣(1982—), 女, 江苏扬州人, 正高工, 工学博士, 主要从事结构风工程研究 (E-mail: dongxinseu@163.com).

demonstrated that the axial force at the column bottom, the moment at the column bottom and the displacement at the roof center can be reduced by up to 13.1%, 15.6% and 10.1% respectively. Based on the statistics, the correlation, the total force, and the structural internal force, the recommended inclination of spoilers on flat roofs is 10° within the investigated scope.

Key words: spoiler; separation bubble; statistics of wind pressures; correlation of wind pressures; total force

扰流板 (spoiler) 的起源最早可追溯至生物界, 飞鸟落地前翅膀上表面小羽翼展开以减小升力。德国工程师观察到此现象, 将其衍生并应用于飞机机翼, 以削弱或推迟流体的分离运动, 避免飞机产生失速。由于扰流板的轻质、小体积、简易等特点^[1], 后续学者继续将该装置推广至结构风工程领域。对于低矮建筑, 扰流板可减小有组织的旋涡 (如分离泡和锥形涡) 在建筑物表面诱导产生的强风吸力^[2]; 对于高层建筑, 扰流板可破坏脱落旋涡的相干性, 从而减小建筑物的横风向荷载^[3-4]。

本文的研究载体为低矮建筑。就低矮建筑而言, 扰流板同时适用于平屋盖、双坡屋盖和曲面屋盖的抗风设计。Wu^[5]在低矮建筑平屋盖周边设置了扰流板。通过风洞测压试验, 给出了扰流板长度对于屋盖表面面积平均风压的影响。结果表明, 扰流板可有效减小迎风角附近的强风吸力, 并抑制风压脉动。Trung 等^[6]研究了扰流板对于低矮建筑顶部多孔遮阳屋面板风压、风压概率密度函数以及上、下表面风压相关系数的影响。指出, 相比于固体护墙和透孔护墙, 扰流板对于减小多孔遮阳屋面板表面风压的效用更为显著; 当扰流板高度增加, 其效用减弱。Kopp 等^[7]在双坡屋盖 (坡度 4 : 12) 周边设置了扰流板, 发现此时屋盖所有区域 (角部、边缘、内部) 的风吸力均有所减小。考虑到双坡屋盖屋脊附近可能产生的强吸力, Ozmen 等^[8]沿双坡屋盖 (坡度 3 : 12) 边缘和屋脊两侧设置不同高度的扰流板。指出当扰流板高度合宜, 屋盖中心线、迎风角附近和屋脊端部的极值风吸力均有所降低; 当扰流板高度减小, 屋面吸力的降幅将更为显著。Franchini 等^[9]沿不同曲率曲面屋盖的迎风边缘设置扰流板, 以分析其对曲面屋盖表面风吸力的影响。指出扰流板下部为高压区, 上部和后部为低压区, 如此压力梯度催生了与屋盖表面平行的射流。该射流促使锥形涡远离屋盖表面, 以减小其诱导下的平均吸力。为了探究扰流板形状参数的影响, Li 等^[10]在双坡屋盖 (坡度 7 : 12) 边缘和屋脊处分

别设置扰流板, 研究屋面风吸力随扰流板高度、宽度和倾角的变化。结果表明, 当扰流板设置在山墙上部时, 可显著减小屋面风吸力, 扰流板较优倾角为 $10^\circ \sim 25^\circ$; 而设置在屋脊上部的扰流板对于屋面风吸力的影响并不显著^[11]。上述研究表明, 扰流板可用于减小低矮建筑表面风荷载, 但其缺点在于来流作用下, 扰流板表面可能出现较大风吸力, 进而对其产生一定的破坏性^[5, 7, 10]。对此, Khodakarami 等^[12]提出并论证了一种构想——在建筑顶部边缘安放倒置的机翼型扰流板, 如此扰流板表面形成向下的风压力, 可减小结构侧移和基底倾覆力矩。

综上, 国内外学者均通过风洞试验, 验证了扰流板对于减小不同类型屋盖表面风压的有效性。然而, 研究较多针对锥形涡作用工况, 其对于分离泡诱导的风压特性影响尚不明确。此外, 上述文献中已有关于扰流板长度和高度影响的研究; 实质上, 扰流板倾角也将显著影响屋盖表面的风压特性。因此, 本文考察了分离泡作用下, 设置不同倾角扰流板前后, 平屋盖表面风压特性及结构内力响应的变化; 基于此, 分析了扰流板作用机理, 并给出了所考察工况范围内的扰流板推荐倾角。

1 风洞试验

1.1 风场模拟

本文风洞试验是在湖南大学风工程试验研究中心 HD-2 大气边界层风洞中完成的。试验段宽 3 m、高 2.5 m、长 17 m。参考点设置在屋盖高度处, 该处风速为 10 m/s。试验地貌为 B 类, 相应的风速剖面、湍流度分布及参考点处的脉动风速谱模拟结果见图 1。

1.2 模型设计

试验模型为平屋盖 (图 2), 边长 D 为 600 mm, 高 H 为 200 mm, 几何缩尺比 1 : 200。分别在 3 个试验模型表面设置不同几何参数的扰流板, 另保持 1 个试验模型表面无扰流板。扰流板几何参

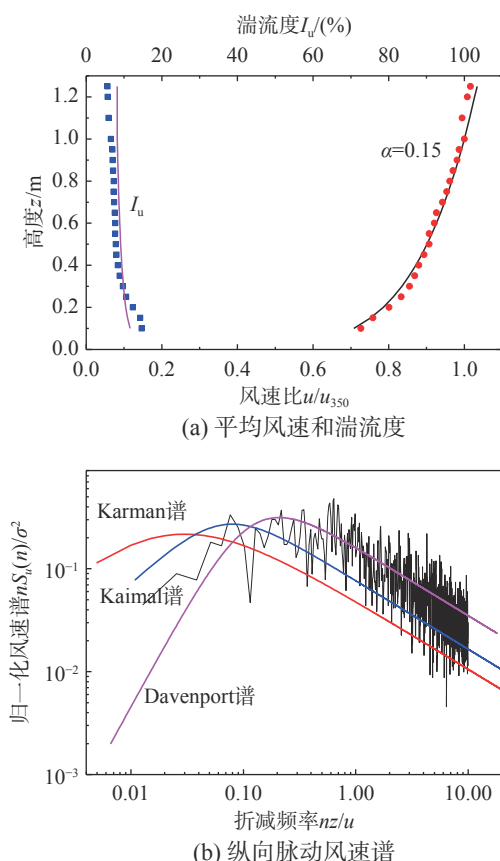


图1 风洞中对大气边界层的模拟(B类地貌)

Fig. 1 Simulation of Terrain B in wind tunnel

数如表1所示。平屋盖表面测点布置如图3所示。试验风向角为 $0^\circ \sim 45^\circ$ ，间隔 5° 。由于分离泡的产生工况为垂直风向^[13-15]，故文中研究均针对 0° 风向展开。

试验中，采用电子压力扫描阀对模型表面风压进行同步测量。采样频率为325 Hz，每个测点采集6600个数据，采样时长20.3 s。

2 试验结果和讨论

2.1 风压统计值

2.1.1 平均和脉动风压分布

图4和图5分别给出了FM1、FRL1、FRL2和FRL3表面的平均和脉动风压分布。可见分离泡诱导下，四种模型表面较强风吸力(脉动)均位于屋盖前半部分^[16]。相比而言，FM1表面强吸力(脉动)所占区域面积较大；设置扰流板后，强吸力(脉动)集中在迎风前缘附近。在四种屋盖的后半部分，风吸力(脉动)分布趋于均匀。

2.1.2 平均和脉动风压剖面

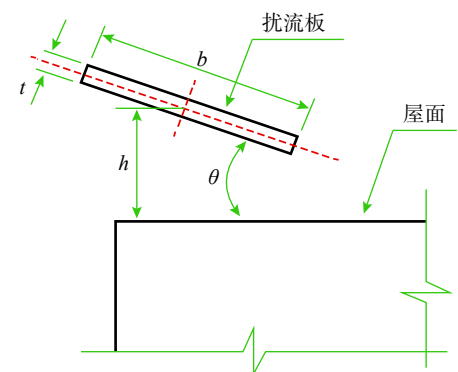
本节进一步量化对比设置扰流板前后，分离泡诱导下平屋盖表面风压数值的变化。考虑到分



(a) 整体模型



(b) 扰流板局部



(c) 扰流板几何参数

图2 试验模型

Fig. 2 Experimental model

表1 试验模型及扰流板设置

Table 1 Experimental models and settings of spoilers

模型	扰流板布置方式	扰流板几何参数
FM1	无扰流板	—
FRL1	沿周边布置	$b=20\text{ mm}$, $\theta=0^\circ$, $h=9\text{ mm}$, $t=2\text{ mm}$
FRL2	沿周边布置	$b=20\text{ mm}$, $\theta=10^\circ$, $h=9\text{ mm}$, $t=2\text{ mm}$
FRL3	沿周边布置	$b=20\text{ mm}$, $\theta=20^\circ$, $h=9\text{ mm}$, $t=2\text{ mm}$

离泡诱导的顺风向风压具有统一特性^[17-18]，故以图3中的Column1为研究对象，绘制该列测点的平均和脉动风压剖面，如图6所示。图中采用FM1表面分离泡再附长度 $0.5D$ 对横坐标进行无量纲化处理。需要说明的是，分离泡再附长度的确定参考了Akon等^[19]和Kim等^[20]的PIV(particle image velocimetry)风洞试验结果。

由图6可见，设置扰流板前后，平屋盖表面平均和脉动风压剖面均呈现先增大后减小的变化

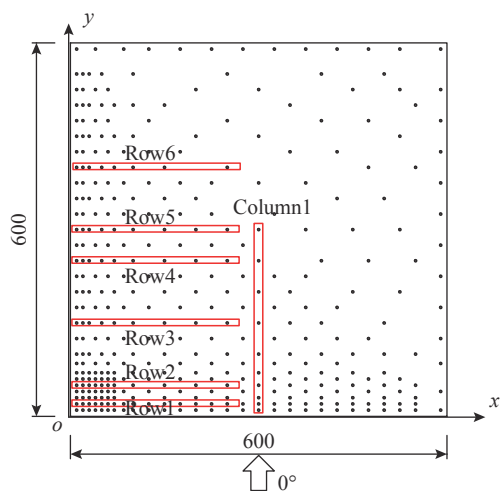
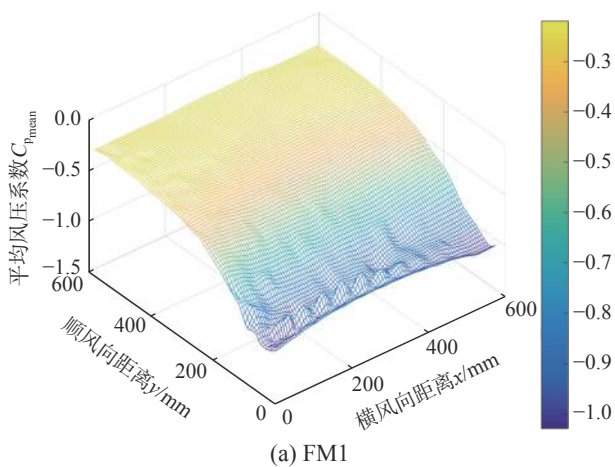


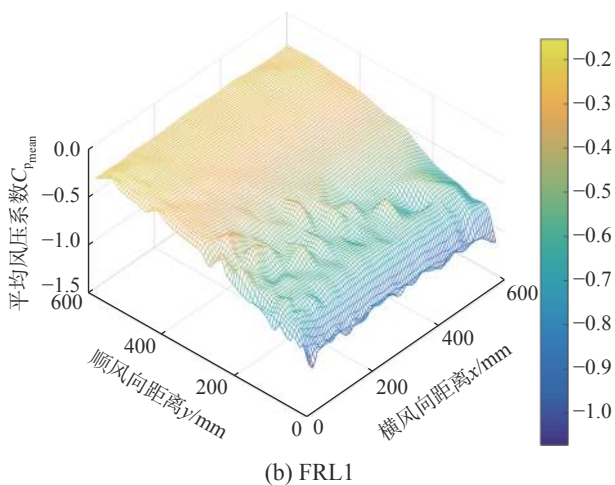
图3 测点布置图 /mm

Fig. 3 Tap locations

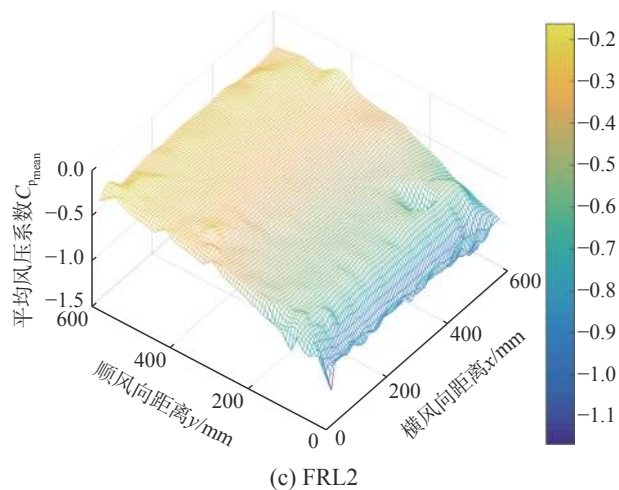
趋势。所不同的是,设置扰流板后,风压剖面峰值更加靠近迎风前缘,这预示着分离泡纵向尺寸减小。对比图中的风压数值可见,在 $y < 0.05D$ 范围内(迎风前缘附近),FRL1、FRL2和FRL3表面平均和脉动风压将大于无气动措施的工况(FM1);这就是说扰流板可能增大平屋盖迎风前缘附近风压。除此范围之外的平均和脉动风压均减小。



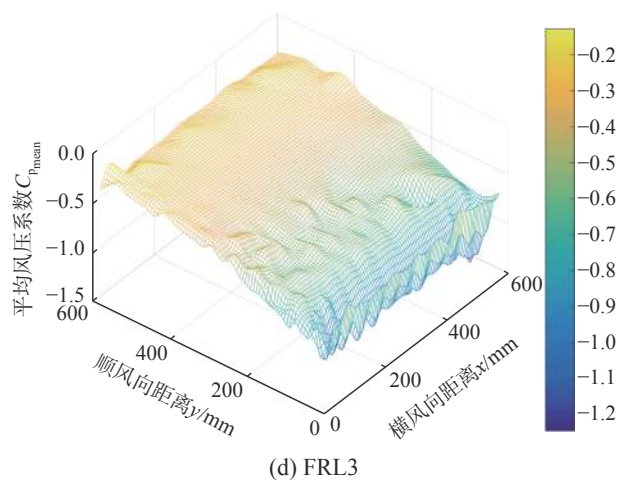
(a) FM1



(b) FRL1



(c) FRL2



(d) FRL3

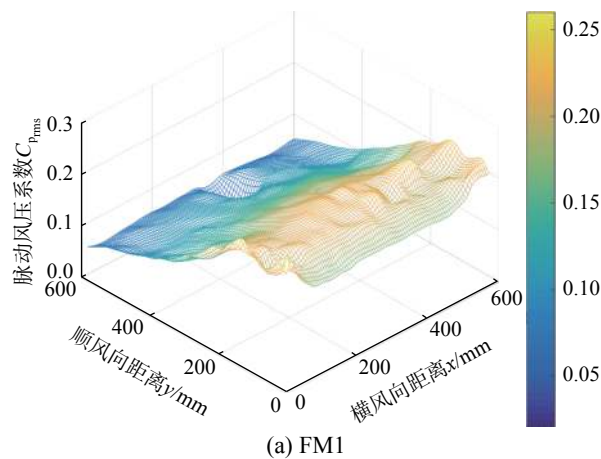
图4 平均风压分布

Fig. 4 Distribution of mean pressure

2.1.3 风压偏度和峰度分布

为了量化设置扰流板前后,平屋盖表面风压高阶矩的变化特征,仍以 Column1(图3)作为研究对象,绘制该列测点风压时程的偏度和峰度剖面,如图7所示。

根据图7,在FM1表面,风压时程偏度和峰度绝对值在顺风向呈现先增大后减小的变化趋



(a) FM1

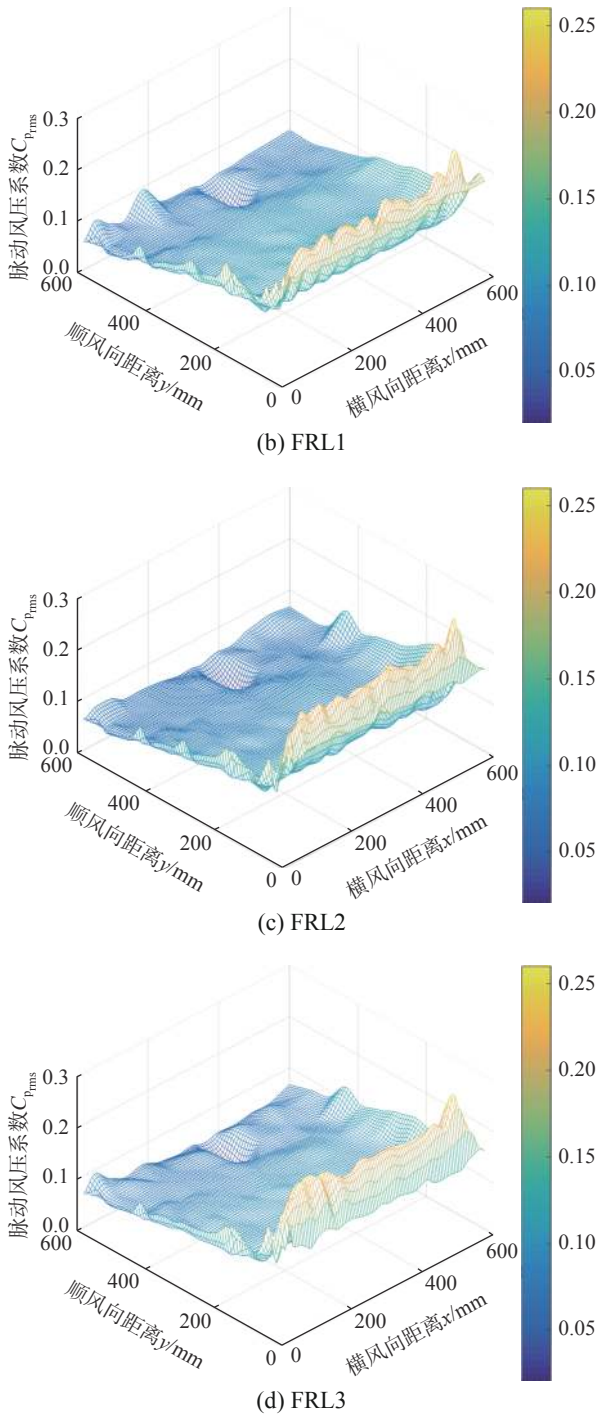
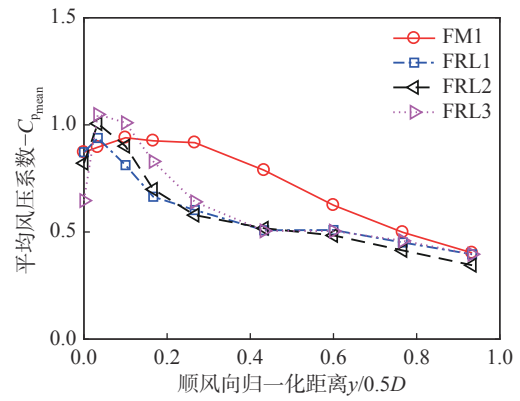


图5 脉动风压分布

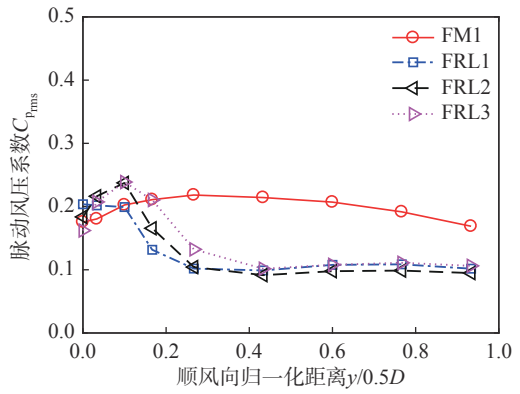
Fig. 5 Distribution of fluctuating pressure

势；FRL1、FRL2 和 FRL3 表面风压偏度和峰度变化明显趋于平缓。与 FM1 相比，在靠近迎风前缘的局部范围内 ($y < 0.1D$)，FRL1、FRL2 和 FRL3 表面风压偏度和峰度绝对值显著降低。从 $y = 0.2D$ 开始，四个模型表面风压高阶矩趋于接近。

作为判别风压非高斯特性的量化指标^[21-23]，Kumar 指出当风压时程偏度和峰度的绝对值分别大于 0.5 和 3.5 时，可认为风压服从非高斯分布；



(a) 平均风压



(b) 脉动风压

图6 平均和脉动风压剖面

Fig. 6 Profiles of mean and fluctuating pressure

否则，则认为风压服从高斯分布^[21, 24]。由图 7 可见，当平屋盖周边设置扰流板，且扰流板倾角为 10° 和 20° 时，分离区内风压趋于高斯分布。

2.2 风压互相关性

2.2.1 顺风向风压互相关性

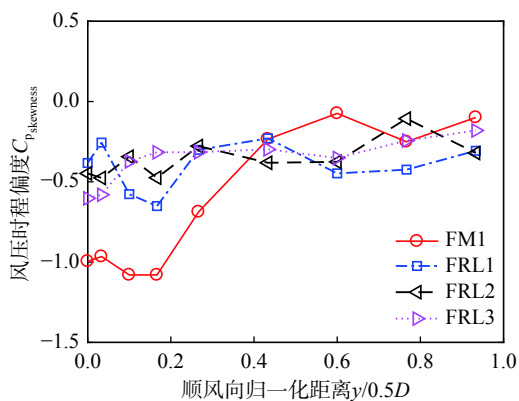
根据本文 2.1.2 节中的风压剖面，推测设置扰流板后，平屋盖表面分离泡纵向长度可能减小。本节通过顺风向风压互相关系数，进一步考察扰流板对于分离泡纵向长度的影响。以 Column1(图 3)中迎风前缘处的测点为参考点，绘制其余测点与参考点的风压互相关系数，如图 8 所示。图中横坐标采用分离泡的再附长度 $0.5D$ 进行无量纲化处理。

为便于比较，采用 Saathoff 等^[25] 提出的式 (1) 量化顺风向风压相关长度，计算结果如表 2 所示：

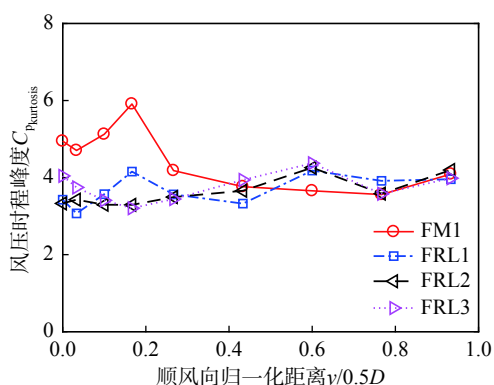
$$L_{\text{corr}} = \int_0^l R_{\text{pp}} dy \quad (1)$$

式中： R_{pp} 为顺风向风压相关系数； l 为积分范围 ($0.5D$)。

由图 8 可见，在 FM1 表面，顺风向风压相关系数随着与参考点距离的增加而减小；从测点列



(a) 偏度



(b) 峰度

图 7 风压时程偏度和峰度剖面

Fig. 7 Profiles of skewness and kurtosis of wind pressures

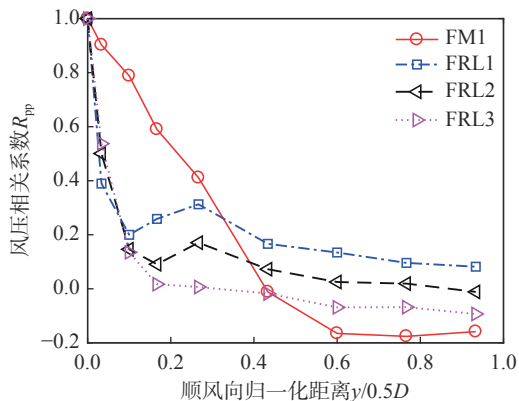


图 8 顺风向风压相关系数曲线

Fig. 8 Longitudinal correlation coefficients

表 2 顺风向风压相关长度对比

Table 2 Longitudinal correlation length

模型	FM1	FRL1	FRL2	FRL3
L_{corr}	0.2903	0.1856	0.1022	0.0883

的中点开始, 相关系数转为负值, 这可能与分离泡诱导下风压脉动的驻波特性和反馈机制有关^[26-27]。对于 FRL1、FRL2 和 FRL3, 顺风向风压相关性在 $y < 0.1D$ 范围内加速衰减; 其中, FRL3 表面顺风向

风压相关性的衰减速率最快。风压相关性的衰减速率直接体现为相关长度的数值: FM1 表面顺风向风压相关长度最大; 设置扰流板后, 该相关长度随着扰流板倾角的增大而减小。据此可以推测, 当扰流板倾角增大, 分离泡纵向尺寸减小, 且强度也可能减弱。

2.2.2 横风向风压互相关性

Kiya 等^[27]指出分离泡在横风向呈现发卡涡的形状, 即其诱导下的风压在横风向亦具有一定的相关特性^[28]。考虑到分离区内不同部位风压横风向相关特性可能各异, 本节在平屋盖表面随机选取 6 行测点 (图 3), 以每行右侧端部首个测点为参考点, 计算其余点与其风压互相关系数, 并采用式 (1) 量化各测点行的横风向风压相关长度, 如图 9 所示。

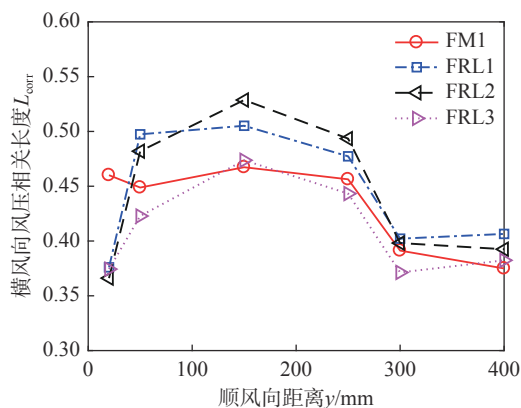


图 9 横风向风压相关长度

Fig. 9 Transverse correlation length

对于 FM1, 当 $y < 300$ mm 时, 横风向风压相关长度基本接近; 这就是说, 在分离泡作用范围内, 风压在横风向具有相似的相关特性。在再附点处 ($y = 300$ mm), 横风向相关长度显著减小; 此时, 剪切层中高频、小尺度湍流成分增多^[26], 旋涡脱落进程加快, 风压横风向相关性减弱。

对于 FRL1、FRL2 和 FRL3, 其迎风前缘附近的横风向相关长度小于 FM1 (降幅约 27%); 在 $50 \text{ mm} < y < 250 \text{ mm}$ 范围内, 三个模型表面的横风向相关长度逐渐接近或超过 FM1; 从 $y = 300$ mm 开始, 四个模型表面横风向相关长度接近。因此可以推测, 扰流板可削弱迎风前缘附近的风压横风向相关性。随着来流向下游发展, 旋涡诱导的风压横风向相关性将呈现增强的趋势。值得注意的是, 当扰流板倾角达 20° 时, 风压横风向相关长度基本均小于或接近于无气动措施的工况。

2.3 屋面整体合力(矩)及结构内力响应

2.3.1 整体合力和倾覆力矩

如 2.1 节所述, 设置扰流板后, 平屋盖迎风边缘附近风压增大, 其余部位平均和脉动风压均减小; 综合作用下, 其对平屋盖表面整体合力和倾覆力矩的影响尚不得知。本节即考察设置扰流板后, 平屋盖表面整体合力和倾覆力矩的变化。

分别采用式 (2) 和式 (3) 计算整体合力和倾覆力矩 (图 10)^[29] (由于来流风向为 0° , 故本节仅考察绕 x' 轴的力矩 M_x)。

$$C_F(t) = \sum_{i=1}^n (C_{pi}(t)A_i) / \sum_{i=1}^n A_i \quad (2)$$

$$C_{Mx} = C_F \cdot d_y / D \quad (3)$$

式中: $C_F(t)$ 为整体合力系数; $C_{pi}(t)$ 为测点 i 的风压系数时程; A_i 为测点 i 的附属面积 (采用 Voronoi 法进行划分^[30]); n 为目标区域内的测点总数; C_{Mx} 为整体倾覆力矩系数; d_y 为合力作用点与 x' 轴的距离。

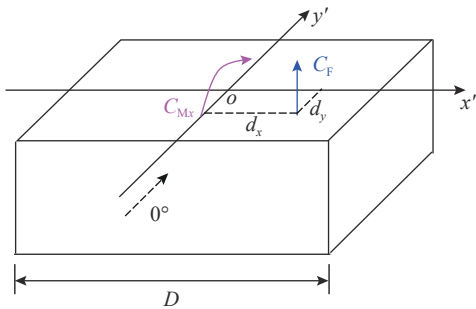


图 10 整体合力和倾覆力矩示意图
Fig. 10 Schematic of total uplift force and overturning moment

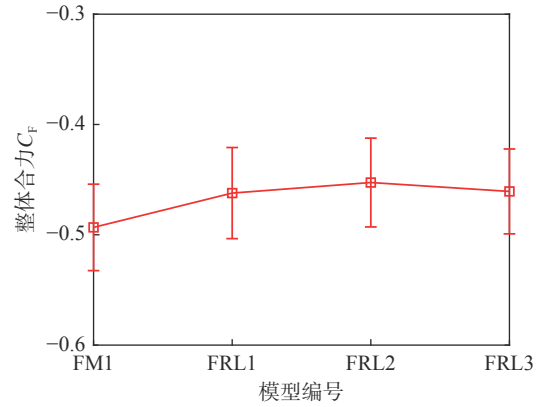
图 11 给出了 FM1、FRL1、FRL2 和 FRL3 表面整体合力 C_F 、倾覆力矩 C_{Mx} 的均值和标准差。

在整体合力方面, 相比于 FM1, 当扰流板倾角为 0° 、 10° 和 20° 时, 平屋盖整体合力均值分别减小 6.3%、8.2% 和 6.6%, 标准差变化较小。在倾覆力矩方面, 相比于 FM1, 当扰流板倾角为 0° 、 10° 和 20° 时, 平屋盖倾覆力矩均值分别减小 18.2%、21.9% 和 23.3%, 标准差分别减小 8.0%、9.9% 和 16.3%。这就是说, 平屋盖倾覆力矩将随着扰流板倾角的增大而减小。

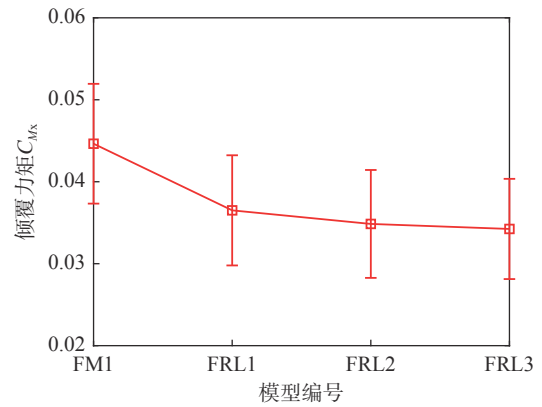
2.3.2 主体结构内力响应

2.3.1 节量化了设置扰流板后, 平屋盖整体合力和倾覆力矩的变化。该变化将通过屋盖结构传递至主体结构。本节即建立足尺平屋盖结构三维

模型 (图 12), 设置一组假设的结构构件参数; 根据测压试验结果, 在各附属面积内分别施加经换算后的风荷载, 对结构进行静力响应分析, 以考察结构内力响应的变化。



(a) 整体合力



(b) 倾覆力矩

图 11 平屋盖表面整体合力(矩)的均值和标准差
Fig. 11 Mean and standard deviation of total uplift force and overturning moment

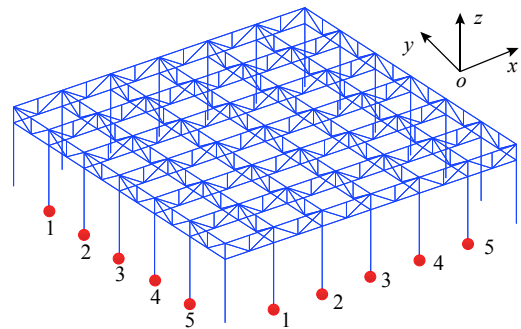


图 12 平屋盖结构三维模型
Fig. 12 Three dimensional model of flat roof

图 13 分别对比了静力响应分析所得四种模型柱底轴力、柱底弯矩 M_y (柱底弯矩 M_x 的变化趋势同 M_y) 和屋盖跨中位移。为便于比较, 图中纵坐标均设置为增量: $100\% \times (\text{FRL1/FRL2/FRL3 响应} - \text{FM1 响应}) / \text{FM1 响应}$ 。

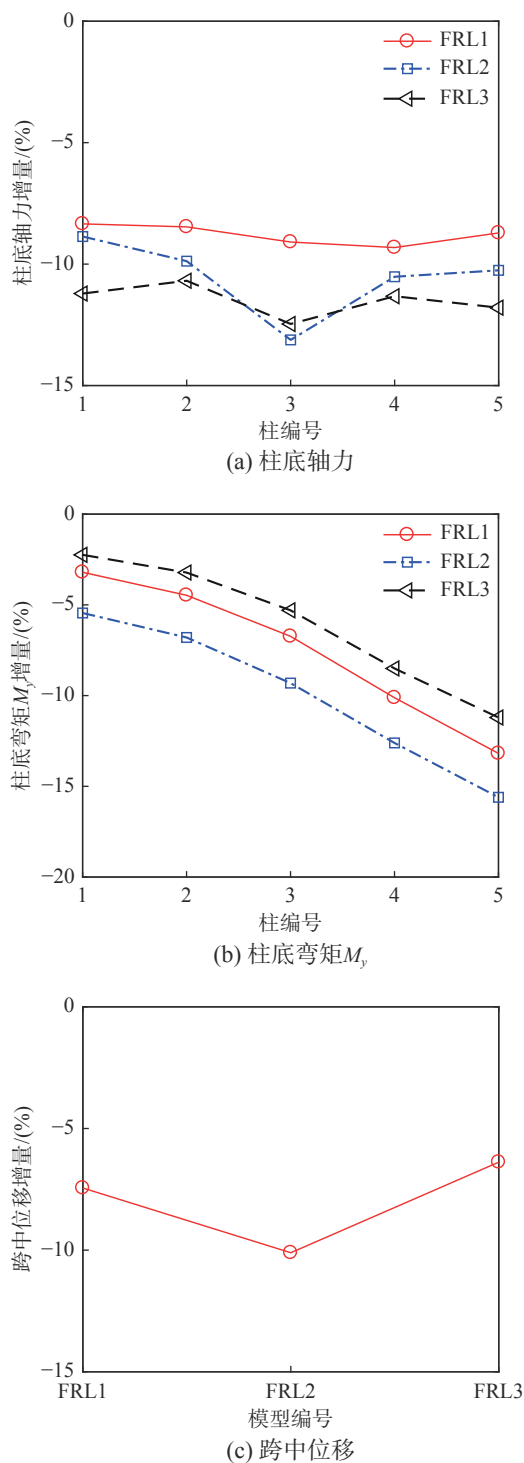


图 13 结构内力响应对比
Fig. 13 Comparison of structural internal force

由图 13 可见, 设置扰流板后, 平屋盖结构柱底轴力、柱底弯矩和跨中位移均有所减小。相比而言, 当扰流板倾角为 10° 时, 其用于减小结构内力响应的效用最为显著。此时, 柱底轴力、柱底弯矩 M_y 和跨中位移的最大降幅分别为 13.1%、15.6% 和 10.1%。

2.4 关于扰流板效用的讨论

2.4.1 扰流板作用机理分析

根据前文的研究结果可以推论: 当平屋盖迎风前缘设置扰流板后, 扰流板与屋面之间形成一股正向射流。该正向射流将部分抵消贴近壁面的逆流, 从而破坏旋涡的真空状态 (图 14)。这种气动措施并未将分离泡完全消除, 而是减小了其纵向尺寸 (可能也减小了其竖向高度), 并削弱了其作用强度。

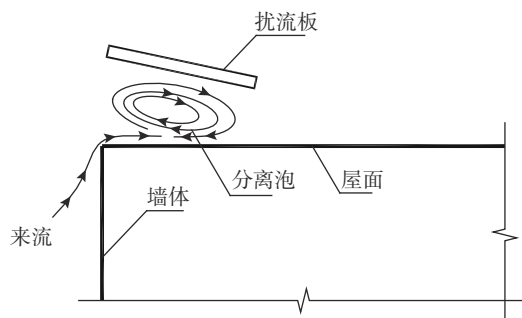


图 14 扰流板作用机理示意图
Fig. 14 Effect of spoiler on separation bubble

如此, 分离泡诱导下的平屋盖表面大部分区域风吸力减小。虽然迎风前缘附近的风吸力有所增大, 但该区域风压非高斯脉动特性减弱, 风压顺风向和横风向相关性衰退。这就是说, 分离区风压时程中出现瞬时强脉冲的概率减小, 且个别点处发生的大幅值吸力脉动并不会带动周边点形成联动效应。分离泡诱导下平屋盖表面风吸力的减小还进一步降低了屋盖整体合力、倾覆力矩和主体结构内力响应。

2.4.2 扰流板倾角影响分析

基于 2.1 节~2.3 节的分析结果, 表 3 给出了不同倾角扰流板对于减小平屋盖表面风荷载及结构

表 3 不同倾角的扰流板效用对比

Table 3 Effect of spoilers with different inclinations

对比项	FRL1(倾角 0°)	FRL2(倾角 10°)	FRL3(倾角 20°)
平均、脉动风压	•	•••	•
风压偏度	•	•••	••
风压峰值	•	•••	••
顺风向风压相关性	•	••	•••
横风向风压相关性	••	•	•••
整体合力	•	•••	••
倾覆力矩	•	••	•••
柱底轴力	•	•••	••
柱底弯矩	••	•••	•
屋盖跨中位移	••	•••	•

内力响应的效用。表中用圆点表示有效程度；圆点数量越多，则效用越突出。

由表3可见，扰流板用于减小平屋盖表面风荷载及结构内力响应的有效性并非与其倾角大小成正比。对比扰流板倾角 0° 、 10° 和 20° 三种工况，综合平屋盖表面风压统计值、风压相关性、屋面整体合力和结构内力响应，得到扰流板推荐倾角为 10° 。

3 结论

通过刚性模型风洞测压试验，研究对比了不同倾角扰流板对于分离泡诱导下平屋盖表面风压特性的影响；分析了扰流板作用机理；并给出了所考察工况范围内的扰流板推荐倾角。所得主要结论如下：

(1) 设置扰流板后，平屋盖表面分离泡纵向尺寸减小，其作用区内风吸力降低。值得注意的是，迎风前缘附近局部区域风吸力有所增大，但该区域风压非高斯脉动特性显著减弱。

(2) 扰流板使得分离泡诱导的顺风向风压相关性减弱：当扰流板倾角为 0° 、 10° 和 20° 时，相关长度分别减小36.1%、64.8%和69.6%；横风向风压相关性的衰减仅体现在迎风前缘附近，相关长度降幅约27%。

(3) 平屋盖表面风吸力的减小降低了屋盖整体合力(矩)。当扰流板倾角为 0° 、 10° 和 20° 时，整体合力均值分别减小6.3%、8.2%和6.6%。屋盖倾覆力矩与扰流板倾角成反比，其均值和标准差的最大降幅分别为23.3%和16.3%。

(4) 除风荷载外，扰流板还将进一步减小主体结构内力响应。相比而言，当扰流板倾角为 10° 时，其影响最为显著：柱底轴力、柱底弯矩 M_y 和跨中位移的最大降幅分别为13.1%、15.6%和10.1%。

(5) 扰流板通过引导正向射流抵消贴近壁面的逆流，从而破坏分离泡真空状态，减小其纵向尺寸，并削弱其作用强度。扰流板效用与其倾角密切相关。分离泡诱导下，所考察工况范围内的扰流板推荐倾角为 10° 。

参考文献：

[1] Lance W Traub, Logan Jaybush. Experimental investigation of separation control using upper-surface spoilers [J]. *Journal of Aircraft*, 2010, 47(2): 714 — 717.

[2] Mooneghi Asghari Maryam, Kargarmoakhar Ramtin. Aerodynamic mitigation and shape optimization of buildings: Review [J]. *Journal of Building Engineering*, 2016, 6: 225 — 235.

[3] Sharma Ashutosh, Mittal Hemant, Gairola Ajay. Mitigation of wind load on tall buildings through aerodynamic modifications: Review [J]. *Journal of Building Engineering*, 2018, 18: 180 — 194.

[4] Jafari Mohammad, Alipour Alice. Methodologies to mitigate wind-induced vibration of tall buildings: A state-of-the-art review [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 33: 101582.

[5] Wu Fuqiang. Full-scale study of conical vortices and their effects near roof corners [D]. Texas Lubbock: Texas Tech University, 2000.

[6] Trung Vu Thanh, Yukio Tamura, Akihito Yoshida. Effects of various parapets on wind loading on porous sunshade roof cover sheets for a low-rise building [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2011, 14(2): 133 — 150.

[7] Kopp A Gregory, Mans Christian, Surry David. Wind effects of parapets on low buildings: Part 4. Mitigation of corner loads with alternative geometries [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, 93: 873 — 888.

[8] Ozmen Yucel, Baydar Ertan. Effect of spoiler to pressure distribution on building roof surfaces [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2015, 35(2): 119 — 127.

[9] Franchini S, Pindado S, Meseguer J, Sanz-Aandres A. A parametric, experimental analysis of conical vortices on curved roofs of low-rise buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, 93: 639 — 650.

[10] Li Gang, Gan Shi, Li Hongnan. Wind pressure mitigation on gable roofs for low-rise buildings using spoilers [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144(8): 04018104.

[11] 甘石, 李钢, 李宏男. 扰流板减小低矮房屋屋面风压试验研究[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(6): 91 — 102.
Gan Shi, Li Gang, Li Hongnan. Study on wind pressure on the roof of low-rise building alleviated by spoiler [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(6): 91 — 102. (in Chinese)

[12] Khodakarami M I, Maleki M, Mounesi-Sorkheh M. Inverse structural airfoil: A novel and effective tools for improvement of the buildings performance against wind loads [J]. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2017, 18(3): 451 — 472.

[13] Zhao Zhongshan. Wind flow characteristics and their effects in low-rise buildings [D]. Lubbock, Texas: Texas Tech University, 1997.

[14] Yeung W W H. Similarities of pressure induced by

- separation bubble in grid-generated flow [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, 93: 293 — 309.
- [15] Doddipatla S Lakshmana, Kopp A Gregory. Wind loads on roof-mounted equipment on low-rise buildings with low-slope roofs [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 211: 104552.
- [16] Ong R H, Patruno L, Yeo D, et al. Numerical simulation of wind-induced mean and peak pressures around a low-rise structure [J]. *Engineering Structures*, 2020, 214: 110583.
- [17] Zaldivar Antonio de Alba, Lombardo T Franklin, Lopez M Jason, Nevill B Justin. Development and validation of a mobile bluff-body to understand extreme wind loading [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 210: 104504.
- [18] Trunkle Julian, Abdelouahab Mohammed-Taifour, Weiss Julien. Fluctuating pressure measurements in a turbulent separation bubble [J]. *Comptes Rendus Mecanique*, 2016, 344: 60 — 67.
- [19] Akon Fahad Abul, Kopp A Gregory. Mean pressure distributions and reattachment lengths for roof-separation bubbles on low-rise buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 155: 115 — 125.
- [20] Kim Chun Kyung, Ji Seong Ho, Seong Hak Seung. Flow structure around a 3-D rectangular prism in a turbulent boundary layer [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91: 653 — 669.
- [21] Kumar K S, Stathopoulos T. Wind loads on low building roofs: A stochastic perspective [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126(8): 944 — 956.
- [22] Ko Ho Nag, You Pyo Ki, Kim Moon Young . The effect of non-Gaussian local wind pressures on a side of a square building [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, 93: 383 — 397.
- [23] Estephan Johnny, Feng Changda, Chowdhury Gan Arindam, et al. Characterization of wind-induced pressure on membrane roofs based on full-scale wind tunnel testing [J]. *Engineering Structures*, 2021, 235: 112101.
- [24] 庄翔, 董欣, 郑毅敏, 赵昕. 矩形高层建筑非高斯风压时程峰值因子计算方法[J]. *工程力学*, 2017, 34(7): 177 — 185.
- Zhuang Xiang, Dong Xin, Zheng Yimin, Zhao Xin. Peak factor estimation methods of non-Gaussian wind pressures on a rectangular high-rise building [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(7): 177 — 185. (in Chinese)
- [25] Saathoff P J, Melbourne W H. Effects of free-stream turbulence on surface pressure fluctuations in a separation bubble [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, 337: 1 — 24.
- [26] Hudy M Laura, Naguib M Ahmed, Humphreys M William Jr. Wall-pressure-array measurements beneath a separating/reattaching flow region [J]. *Physics of Fluids*, 2003, 15(3): 706 — 717.
- [27] Kiya Masaru, Sasaki Kyuro. Structure of large-scale vortices and unsteady reverse flow in the reattaching zone of a turbulent separation bubble [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1985, 154: 463 — 491.
- [28] 孙虎跃, 叶继红. 基于PIV技术的平屋盖表面分离泡流动结构研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(11): 121 — 131.
- Sun Huyue, Ye Jihong. 3D characteristics of separation bubbles around flat roofs by PIV technique [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(11): 121 — 131. (in Chinese)
- [29] Zisis Ioannis, Stathopoulos Ted. Wind-induced loads on the foundation of a low-rise building: Full-scale and wind tunnel experimentation [C]. *Structures Congress 2010*: 1120 — 1130.
- [30] Gierson L Matthew, Phillips M Brian, Duthinh Dat, Ayyub M Bilal . Wind-pressure coefficients on low-rise building enclosures using modern wind-tunnel data and voronoi diagrams [J]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2017, 3(4): 04017010-1 — 04017010-14.