

背风墙面开孔的低矮房屋风致内压响应研究

黄 鹏, 陈 胜, 黄舜杰

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 风灾中原本封闭的结构被破坏后将变成开孔结构, 结构内压突然增大, 将会加剧对结构的破坏。当前对风致内压的研究主要关注结构迎风面开孔的情况, 而忽略了背风墙面开孔时的内压响应。从理论上推导了背风墙面开孔结构风致内压响应的计算方法, 依据同济大学浦东实测基地低矮房屋在台风作用下的实测数据, 对比了实测和理论计算得到的内压体系自振频率和内压响应, 验证了该计算方法的准确性。最后对背风墙面合理开孔面积进行研究, 建立了一套能够改善屋盖在强风中受力的开孔方法, 并验证了该方法对于调控屋盖所受合力具有显著的效果。

关键词: 风致内压; 背风墙面开孔; 现场实测; 开孔面积
中图分类号: TU312.1; TU317.2 **文献标志码:** A **DOI:**10.13465/j.cnki.jvs.2020.15.006

Wind-induced internal pressure response of low-rise buildings with leeward wall opening

HUANG Peng, CHEN Sheng, HUANG Shunjie

(State Key Lab of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In wind disasters, closed structures after destroyed become opening ones, and their internal pressure suddenly increases to aggravate their damages. At present, the study on wind-induced internal pressure mainly is concentrated on structures with windward wall opening, ignoring cases of structures with leeward wall opening. Here, firstly the calculation method for wind-induced internal pressure response of structures with leeward wall opening was deduced theoretically. Then, natural frequencies of an internal pressure system and its internal pressure responses obtained from field measurements of low-rise buildings in the experimental base of Tongji University and those gained using the theoretical calculation method were compared to verify the correctness of the theoretical method. Finally, the reasonable opening area on leeward wall of low-rise buildings was studied to establish a set of opening methods for improving the load-bearing ability of low-rise buildings' roofs under strong wind. It was shown that these methods have an obviously good effect on adjusting forces exerted on roofs.

Key words: wind-induced internal pressure; leeward opening; field measurement; opening area

国内外风灾调查研究表明, 飞掷物在强风作用下极容易破坏门窗等围护结构, 造成建筑迎风墙面出现开孔, 从而使结构内压骤增, 最终导致屋盖和围护结构在内外压共同作用下承受很大的荷载并发生严重的破坏^[1-2]。因此, 为了提高建筑物抵抗风灾破坏的作用, 研究开孔建筑风致内压响应应具有重大的意义。通过研究者近 40 年来的努力, 迎风墙面开孔结构风致内压响应的机理研究已经相对较为成熟。Holmes^[3]提出采用 Helmholtz 声学谐振器的原理推导出一个二阶微分方程来描述带有主开孔建筑物的风致内压响应方程, 这为后来采用二阶微分方程作为存在主开孔建筑的内压响

应控制方程的研究奠定了基础; 余世策等^[4]通过伯努利方程和气体绝热方程推导了考虑背景孔隙且存在开孔的内压响应方程; Oh 等^[5]提出采用 MED 的方法来计算存在背景孔隙的风致内部风压响应, 并对结论进行了实验验证; 余先锋等^[6]推导了迎风面单开孔两空间结构在屋盖以动力和准静态两种方式响应时的内压控制方程组。

此外, 研究人员还对影响开孔结构风致内压响应的因素进行了广泛的探讨, 主要有主开孔的大小及孔隙面积、干扰效应、结构柔度、建筑物内部分区和 Helmholtz 共振频率等。Saathoff 等^[7]建立了多种开孔情况下单一分区、两分区和四分区建筑物各房间的内压控制方程, 并发现内压峰值随开孔面积的增大和有效内部体积的减小而增大; Liu 等^[8]通过风洞实验表明干扰效应对带有主开洞的建筑内压响应的影响不容忽

基金项目: 国家自然科学基金(51678452)
收稿日期: 2018-11-20 修改稿收到日期: 2019-06-01
第一作者 黄鹏 男, 博士, 教授, 1974 年生

视;Stathopoulos 等^[9]通过实验发现背景孔隙的存在对内压极值有极大的削弱作用;Vickery 等^[10]通过实验发现了背景孔隙对内压响应的阻尼效应;Sharma 等^[11]利用 CFD 考虑了结构柔度对迎风面开孔建筑内压响应的影响,发现当结构的自振频率远大于突然开孔时的 Helmholtz 频率时,结构在内压作用下将以准静态方式响应。

但是目前对开孔结构内压响应的研究大多数只考虑了迎风面出现开孔的情况,却忽略了背风墙面出现开孔时风致内压的作用。很多时候建筑背风墙面也会存在开孔,特别是台风过境前后风向会发生变化,原先迎风墙面上的开孔可能会出现在背风墙面,其对建筑内压响应的影响不容忽视。此外,屋盖结构在强风中受内外压共同作用时很容易发生破坏^[12]。为了改善屋盖在强风中的受力状况,可以考虑在结构完好的情况下,人为在背风墙面制造开孔引入负压并对开孔面积进行调节,从而减小屋盖结构在强风中的受力。因此,对于背风墙面开孔结构的风致内压响应展开深入研究,具有重要的理论意义和实用价值。

本文首先从理论上推导了背风墙面开孔结构风致内压响应的计算方法,然后依据同济大学浦东实测基地低矮房屋在台风作用下的实测数据,验证了该计算方法的准确性,最后对背风墙面合理开孔面积进行探究,建立了一套致力于改善屋盖在强风中受力的开孔方法,并利用实测的风压时程数据进行开孔效果分析,验证了该方法对于调控屋盖所受合力有显著的效果。

1 背风墙面开孔结构内压响应理论研究

1.1 计算模型及基本假设

为了推导背风墙面开孔结构的内压响应方程,本文建立了考虑迎风墙面孔隙且背风墙面存在单一开孔的计算模型,如图 1 所示。该模型在结构的背风面上设置了一个面积足够大的开孔,在迎风墙面一侧设置了均匀分布的孔隙。

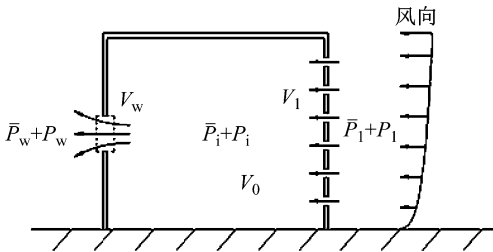


图 1 背风墙面开孔结构内压响应计算模型

Fig. 1 Calculation model of internal pressure response for structure with openings on leeward walls

同时,方程推导时还需满足以下几个基本假设:

(1) 结构内压在空间上完全相关,这是内压理论

分析的基本条件,并且已经过实验的验证^[13];

(2) 结构内部气体符合绝热定律,即结构内部气体的压力和密度需满足以下方程^[14]:

$$P_i / \rho_i^\gamma = \text{常数}$$

式中: γ 为比热比,一般取为 1.4; P_i 、 ρ_i 分别为结构内部气体的压力和密度;

(3) 背风墙面仅存在单一开孔,且其面积远大于迎风墙面的孔隙面积;

(4) 单个背景孔隙面积很小,可忽略迎风墙面上背景孔隙处进入气体的惯性效应^[15];

(5) 结构为刚性结构,忽略围护结构的柔度对内压脉动的影响。

1.2 方程推导

根据非定常形式的伯努利方程,可建立气体在孔口处的偏微分方程为:

$$\frac{1}{\rho_a g} \frac{\partial p}{\partial s} = - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} - S_f \quad (1)$$

式中: p 为气压, s 为孔洞处气流的路径长度, u 为路径上任意断面上的气体流速, S_f 为摩擦损失梯度。当气体流经孔洞,压力从 P_e 减小 P_i 。对式(1)沿流线积分,可得:

$$P_e - P_i = \rho_a \frac{dU}{dt} \int \frac{A}{a(s)} ds + \Delta p_{\text{loss}} \quad (2)$$

式中: A 和 U 分别为孔洞的断面面积和气流流速。 $a(s)$ 为路径上任意断面的面积, Δp_{loss} 为通过孔口气体的压力下降值,该部分能量损失是由于孔口摩擦所造成的,如下所示:

$$\Delta p_{\text{loss}} = \frac{1}{2} C_L \rho_a U^2 \quad (3)$$

式中: C_L 为孔口损失系数,将式(3)代入式(2),可以得到气体单向流经孔洞的非定常伯努利方程:

$$\Delta p = \frac{1}{2} C_L \rho_a U |U| + \rho_a L_e \dot{U} \quad (4)$$

式中: Δp 为孔口两侧的风压下降值, C_L 为孔口损失系数, U 为气流流速, L_e 为孔口等效深度:

$$L_e = \int \frac{A}{a(s)} ds = \int \frac{u(s)}{U} ds \quad (5)$$

由此,可建立背风墙面孔口两侧瞬态气压下降值与气流速度的关系:

$$P_i - P_w = \frac{1}{2} C_L \rho_a U_w |U_w| + \rho_a L_e \dot{U}_w \quad (6)$$

式中: P_i 和 P_w 分别为结构内部及背风墙面的瞬态风压; U_w 为开孔处气流的速率; A_w 为孔口面积。

由假定(2),可得空气密度变化与压强变化的关系:

$$dP_i = \frac{\gamma P_a}{\rho_i} d\rho_i \quad (7)$$

式中: γ 为比热比, 一般取为 1.4; P_a 为大气压。

根据假定(4), 可建立气压下降值与孔隙处气体流速的关系:

$$P_1 - P_i = \frac{1}{2} C'_L \rho_a U_1^2 \quad (8)$$

式中: P_1 为迎风墙面的瞬态风压; C'_L 为孔隙处的损失系数; U_1 为孔隙处气流的速度。

根据假定(5)及质量守恒原理可得:

$$\rho_i (A_1 U_1 - A_w U_w) = V_o \frac{d\rho_i}{dt} \quad (9)$$

式中: ρ_i 为结构内部气体的密度, 气流的涌进和流出将会对气体密度造成变化; A_1 为迎风墙面孔隙面积; V_o 为结构内部的体积。

将式(7)、(8)代入式(9)可得:

$$U_w = \frac{A_1 U_{10}}{A_w} \sqrt{\frac{C_{p1} - C_{pi}}{C'_L}} - \frac{V_o q}{\gamma P_a A_w} \dot{C}_{pi} \quad (10)$$

式中: U_{10} 为参考风速; C_{p1} 和 C_{pi} 分别为迎风墙面孔隙处和结构内部的瞬态风压系数; q 为参考动压, $q = 1/2 \rho_a U_{10}^2$ 。

对式(10)求导, 可得:

$$\dot{U}_w = \frac{A_1 U_{10}}{2 A_w \sqrt{C'_L (C_{p1} - C_{pi})}} (\dot{C}_{p1} - \dot{C}_{pi}) - \frac{V_o q}{\gamma P_a A_w} \ddot{C}_{pi} \quad (11)$$

最后, 将式(10)和(11)代入式(6), 即可得背风墙面开孔结构考虑迎风墙面孔隙的内压响应方程:

$$K_1 \ddot{C}_{pi} - \frac{K_2}{\sqrt{C_{p1} - C_{pi}}} (\dot{C}_{p1} - \dot{C}_{pi}) - K_3 (K_4 \sqrt{C_{p1} - C_{pi}} - \dot{C}_{pi}) | (K_4 \sqrt{C_{p1} - C_{pi}} - \dot{C}_{pi}) | + C_{pi} = C_{pw} \quad (12)$$

式中: C_{pw} 为背风墙面开孔处的瞬态风压系数; K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为:

$$K_1 = \frac{\rho_a L_e V_o}{\gamma P_a A_w}, K_2 = \frac{\rho_a L_e A_1 U_{10}}{2 A_w q \sqrt{C'_L}},$$

$$K_3 = \frac{C_L \rho_a q V_o^2}{2 (\gamma P_a A_w)^2}, K_4 = \frac{A_1 U_{10} \gamma P_a}{q V_o \sqrt{C'_L}}$$

2 背风墙面开孔结构内压响应现场实测研究

2.1 实测概况

现场实测主要依托同济大学浦东实测基地, 基地内建造有一座 40 m 高的格构式测风塔以及一栋屋面坡角可调的实测房, 实测房如图 2 所示。该实测房共三层, 考虑到实测房的第三层易于封闭和该层的风速也相应较大, 本文将背风墙面开孔结构的内压实测点布置在浦东实测房的第三层, 具体布置形式及风向角定义如图 3 所示。在房屋的南侧窗户处布置一个尺寸为 400 mm × 400 mm 的开孔, 在迎风墙面、背风墙面和结构内部布置三个风压测点, 内压点布置在距地面 0.8 m 处。



图 2 实测低矮房屋

Fig. 2 Low-rise building of field measurement

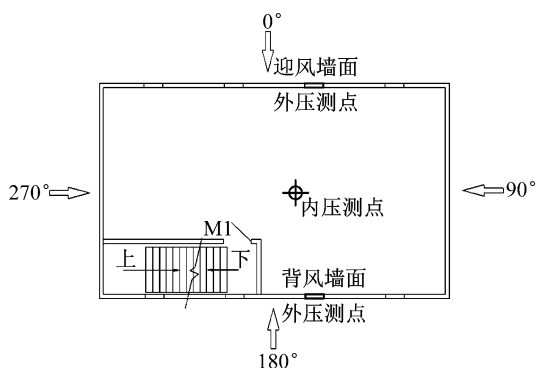


图 3 背风墙面开孔结构的内压实测布置图

Fig. 3 Arrangement of internal pressure measurement for structure with opening on leeward wall

在 2016 年第 16 号台风“马勒卡”作用下, 实测基地采集到了实测房屋盖表面、迎、背风墙面及房屋内部的风压时程数据。本文选取迎风墙面外部风压系数均值最大的 15 个实测段的风压数据作为样本, 对内压响应及外部风压荷载的数据进行分析。

2.2 内压体系自振频率验证

通过实试验证理论方式推导的内压体系自振频率, 实测段的风速应尽可能大且风向角尽可能小。本节选取了一段平均风速为 8.316 m/s, 平均风向为 28.78°的实测数据进行研究。在该风速时程作用下, 低矮房屋测得的内压系数功率谱密度如图 4 所示。由图可知该内压体系的自振频率约为 5.535 Hz。

背风墙面开孔结构内部风压体系的自振频率是结构体系的固有属性, 只与孔口特性、结构体积、开孔及孔隙面积等结构参数有关, 而与参考风速, 迎、背风墙面外部风压等荷载参数无关。依据该体系的结构参数和前文所建立的风致内压响应方程, 可以用强迫激振法计算内压体系的自振频率。强迫激振下, 结构体系的风压系数时程及功率谱密度如图 5 所示, 由图可知内压体系的计算自振频率为 5.127 Hz, 与实测结果的误差为 $(5.127 - 5.535) / 5.535 = -7.37\%$ 。这可能是由于实测基地的密封性不足导致结构存在较多孔隙,

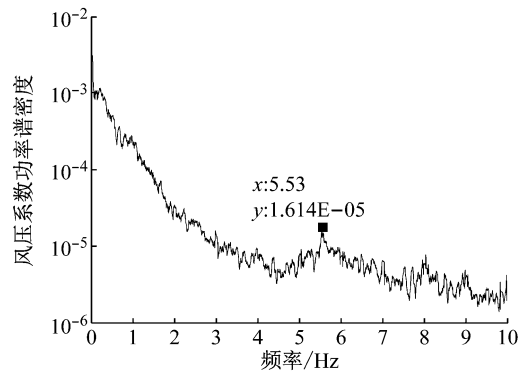
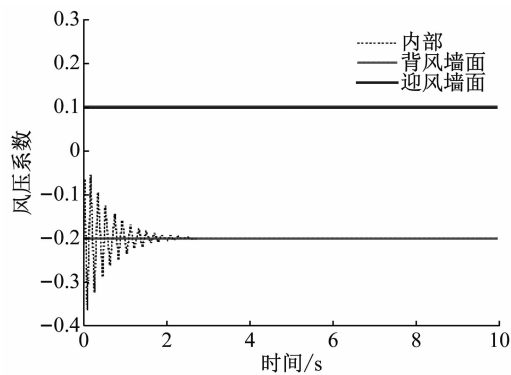
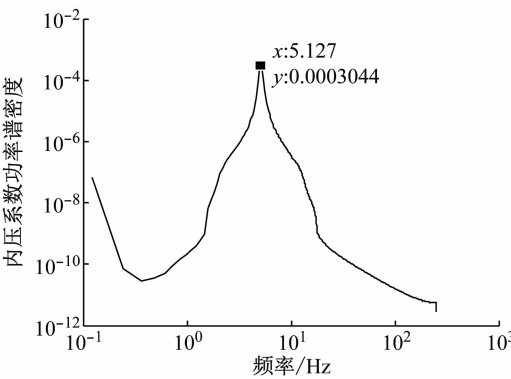


图4 内压系数功率谱密度图

Fig. 4 Power spectral density of internal pressure coefficient



(a) 风压系数时程图



(b) 内压系数功率谱密度图

图5 强迫激励下计算得到的结构风压系数时程及内压系数功率谱密度图

Fig. 5 Time history of wind pressure coefficient and power spectral density of internal pressure coefficient for structure calculated under forced excitation

影响实测的结果。因此,本文所建立的风致内压响应方程具有一定的准确性。

2.3 实测及计算所得内压系数对比验证

本节采用选取的台风“马勒卡”15个实测段的迎、背风墙面的风压时程数据作为外压激励,通过前文所建立的背风墙面开孔结构内压响应方程,计算在外部风压荷载作用下内压响应的响应时程,并将该计算时程与实测测得的内压时程进行对比分析。图6为15个实测段,实测及计算所得的内压系数的均值及脉动

的对比图。

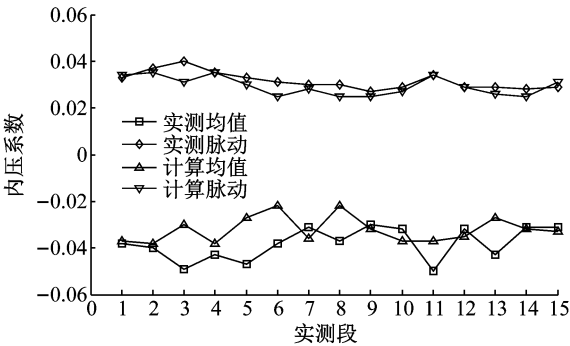


图6 各实测段实测及计算所得内压系数均值及脉动对比图
Fig. 6 Comparisons of mean and fluctuating internal pressure coefficient from field measurement and calculation in different field measurement sections

为了更直观地对比实测与计算结果的误差,表1统计了15个实测段总体的实测和计算所得内压系数均值和脉动值的误差。由表可见计算所得的风压系数均值与脉动值都略小于实测的结果,其相对误差分别为-13.16%和-9.38%,计算所得的结果与实测所得的数据符合的较好。这说明了本文所建立的背风墙面开孔结构的内压响应的计算方程具有较高的准确性。

表1 实测及计算所得内压系数均值与脉动值的误差

Tab. 1 Deviation of mean and fluctuating internal pressure coefficient from field measurement and calculation

参数	数值
实测风压系数均值	-0.038
计算风压系数均值	-0.033
均值误差/%	-13.16%
实测风压系数脉动值	0.032
计算风压系数脉动值	0.029
脉动值误差/%	-9.38%

3 背风墙面合理开孔方法的研究

3.1 方法设计

由于开孔的调节方法既需要涉及到内压响应的计算,又要涉及到屋盖结构振动响应的计算,是十分复杂和繁琐的问题。因此本文将重点考虑通过开孔方法对内压响应进行调节来减小屋盖所承受的荷载作用,而不考虑屋盖本身的结构特性对屋盖响应的影响。具体的操作流程如下:

首先确定开孔面积的范围,然后根据内压的初值和一系列结构参数及迎、背风墙面的外部风压时程,采用本文所建立的计算内压响应的方法,计算各个开孔面积所对应时间区段的内压响应时程。最后再根据事先确定的评判指标评估该时间区段最为合适的内压响应时程,并把其所对应背风墙面开孔面积作为该时间区段的合理开孔面积。而该时间区段,内压响应的

终值即为下一时间间隔内压的初值。确定每个时间间隔的合理开孔面积流程,如图 7 所示。

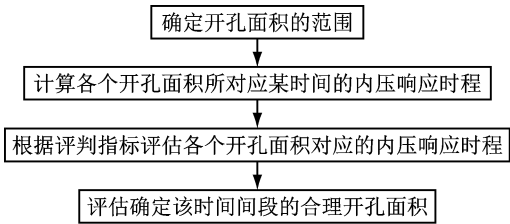


图 7 确定每个时间区间的合理开孔面积流程图
Fig. 7 Flow chart to obtain the rational opening area for each time interval

3.2 评判指标

评判指标的评判重点是屋盖外部风压和内压对屋盖所作用的合力的情况。为了使该合力均值的绝对数值较小,且脉动也尽可能的小,本文选取屋盖合力均值的绝对值与脉动值的乘积,以其数值最小作为评判屋盖所受合力和背风墙面开孔面积合理与否的评判指标,该指标的公式如式(10)和(11)所示。其中, T 为评判指标, P_{all} 为屋盖所受合力, P_e 为屋盖外部风压, P_i 为内压。

$$T = \overline{P_{all}} \cdot \widetilde{P_{all}} \tag{10}$$

$$P_{all} = P_e - P_i \tag{11}$$

3.3 影响因素的研究

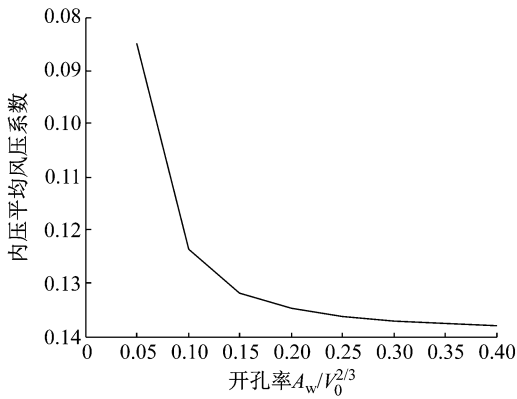
3.3.1 开孔面积

开孔面积一方面会影响内压体系的自振频率,另一方面也会影响背风墙面外部风压荷载对内压体系的作用程度。从理论上来说,开孔面积的范围越大越好,开孔面积的调控数越多越好。本文利用实测所得某段荷载时程数据,采用背风墙面开孔比作为开孔面积调控的控制参数进行不同开孔面积所对应的内压时程的分析计算。图 8 为不同开孔率所对应的内压响应均值及脉动的计算结果。

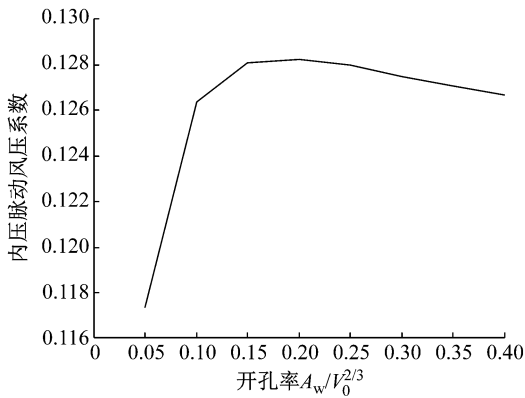
从图 8(a)中可以看出,随着开孔面积的增加,内压响应的均值逐渐由 -0.084 下降至 -0.138 ,但是下降的幅度逐渐减缓。而 -0.14 也正是该背风墙面外部风压的均值,说明内压响应的最大负压与外部风压均值相当。基于此在选定背风墙面开孔位置时,应选取外部风压均值与屋盖顶处较为相近或者绝对值稍大的位置。从图 8(b)中可以发现随着背风墙面开孔面积的增加,内压响应的脉动呈现先急剧增加,而后缓慢下降的过程。基于此,在选定背风墙面开孔面积时,应控制背风墙面的开孔面积,从而减小内压响应的脉动。

3.3.2 孔隙面积

在开孔结构中,结构背景孔隙作为内压响应的结构参数影响内压响应。本文利用实测所得某段荷载时程数据,进行不同孔隙面积所对应的内压时程的分析



(a) 内压平均风压系数



(b) 内压脉动风压系数

图 8 内压平均风压系数和内压脉动风压系数随开孔率的变化图

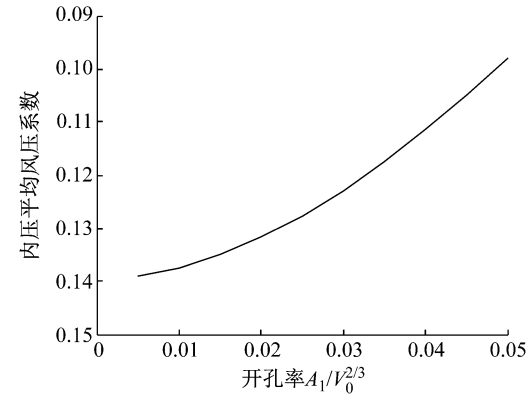
Fig. 8 Variations of mean and fluctuating internal pressure coefficient with opening ratio

计算。图 9 为不同孔隙率所对应的内压响应均值及脉动的计算结果。

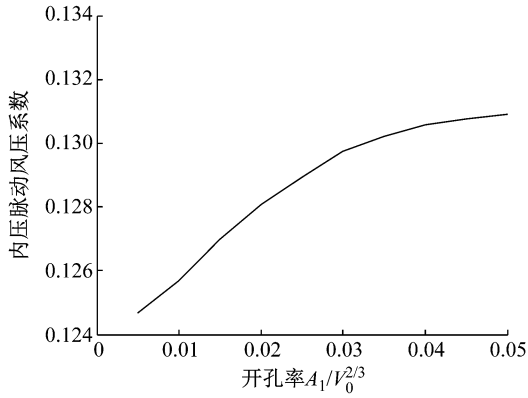
从图 9(a)中可以看出,随着孔隙面积的增加,内压响应的均值逐渐由 -0.139 上升至 -0.098 ,但是上升的幅度逐渐增快,而该背风墙面外部风压的均值是 -0.14 。因此结构孔隙面积的大小会很大程度上影响背风墙面开孔对内压响应均值的调控效果。从图 9(b)中可以发现随着迎风墙面孔隙面积的增加,内压响应的脉动呈现先急剧增加,而后增速逐渐减缓。这与背景孔隙在背风墙面上的情况相反,背景孔隙的存在并没有减小内压响应的脉动,这是因为迎风墙面风压荷载的脉动值相比于背风墙面风压荷载更大,故越大的迎风墙面孔隙面积必然会带来结构内压脉动值的增加。

3.4 开孔效果分析

本文以浦东低矮实测房屋某实测段的外部风压荷载数据作为荷载输入,包括迎、背风墙面及屋面 10 min 的外部风压时程,采样频率为 20 Hz。依据浦东低矮实测房屋的结构参数,建立背风墙面开孔结构的计算模型。定义结构背风墙面的开孔面积比的范围为 $0 \sim$



(a) 内压平均风压系数



(b) 内压脉动风压系数

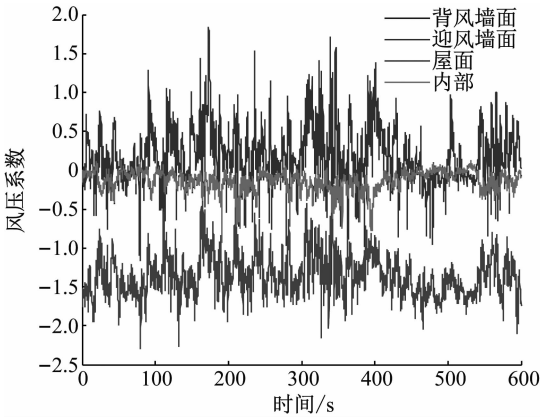
图9 内压平均风压系数和内压脉动风压系数随孔隙率的变化图

Fig. 9 Variations of mean and fluctuating internal pressure coefficient with leakage ratio

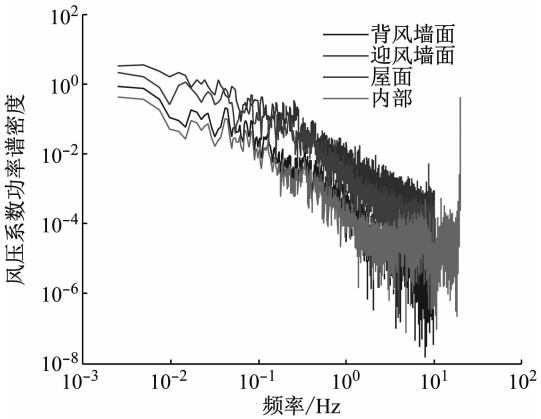
0.4,计算的时间步长为10 s。

首先通过 Matlab 程序,将该10 min的实测段以10 s为间隔进行划分。定义初始内部风压系数为0,依据外部风压时程和本文建立的内部风压响应的计算方法,计算第1个时间间段各个背风墙面开孔面积比所对应的内部风压响应时程。然后以屋盖所受合力时程的均值和脉动值的乘积最小作为评判指标,得到第1个时间间段最合理的背风墙面开孔面积比。随后再计算下一个时间间段最优的背风墙面开孔面积比。需要注意的是,除第1个时间间段内部风压系数初值为0外,其余时间间段内部风压响应的初值为上一时间间段以最优背风墙面开孔面积比为结构参数,计算所得的内部风压响应时程的终值。图10为其中一个实测段,以最优背风墙面开孔面积比为结构参数,所计算得到的风压系数响应时程及功率谱密度图。

从图10中可以看出,内部风压响应的时程和功率谱与背风墙面外部风压响应基本重合,小于屋面外部风压响应。这是由于背风墙面的负压与所选取的屋盖外压最不利控制点,即东北部角点的外部风压相比偏小。该开孔点的选取是十分不合理的,开孔点应选取



(a) 风压系数响应时程图



(b) 风压系数响应功率谱密度图

图10 某实测段,背风墙面最优开孔方法响应计算结果图

Fig. 10 Wind pressure coefficient calculated by the optimal opening method on the leeward wall

在负压足以与屋盖外侧风压相等的地方。

为了让开孔点的负压足以与屋盖外侧风压相等,从而得到更好的背风墙面开孔调控效果。本文将之前实测所得较小的背风墙面风压系数时程人为地减小0.5至-0.6左右来计算各个实测段的最优开孔面积比时程及内压响应时程,从而据此计算屋盖所受合力的均值及脉动值,结果如图11所示。

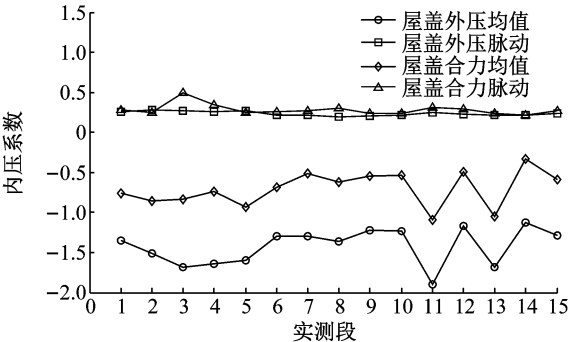


图11 各实测段屋盖外压及合力对比图

Fig. 11 Comparisons of external pressure and resultant force on the roof in different field measurement sections

从图11中可以看出,与只考虑屋盖外部风压系数

相比,通过对背风墙面开孔面积的有效调控,在屋盖合力脉动值变化不大的情形下引入背风墙面负压,可以有效地减小屋盖受力的均值,这对于屋盖的受力有着极其重要的帮助。

4 总 结

在风灾中,开孔结构的风致内压是导致结构破坏的一个重要原因,但是以往的研究都只考虑了结构迎风墙面开孔的情况,忽略了背风墙面开孔时的内压响应特点。本文利用伯努利方程、质量守恒定律和绝热气体状态方程推导了背风墙面开孔结构的风致内压响应方程,并得到了以下结论:

(1) 通过对台风作用下开孔结构的实测数据进行分析,对比了背风墙面开孔时实测与该内压响应方程计算得到的内压体系自振频率以及内压系数的均值和脉动值,发现实测结果和理论计算结果较接近,该背风墙面开孔结构内压方程具有较高的可靠性。

(2) 内压响应的均值随背风墙面开孔面积的增大而下降,且下降的幅度逐渐减缓,内压响应的最大负压与背风墙面的外部风压均值相当。内压响应的脉动随开孔面积的增大呈现先急剧增加,而后缓慢下降的过程,因此应控制背风墙面的开孔面积从而控制内压响应的脉动。

(3) 随着迎风墙面孔隙面积的增加,内压响应的均值逐渐上升且上升的幅度逐渐增快,内压响应的脉动呈现先急剧增加,而后增速逐渐减缓的过程。因此,不同于背风墙面上存在背景孔隙的情况,结构迎风墙面的背景孔隙非但不能减小内压响应的脉动,反而会增加结构内压的脉动值。

(4) 对背风墙面的合理开孔面积进行研究,以实测基地的低矮房屋为计算模型,采用实测获得的一段外部风压荷载作为荷载输入,分析了建立的背风墙面合理开孔方法对屋盖风压响应的作用,验证了该方法对于调控屋盖所受合力有显著的效果。

参 考 文 献

- [1] SHANMUGASUNDARAM J, ARUNACHALAM S, GOMATHINAYAGAM S, et al. Cyclone damage to buildings and structures - a case study [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2000, 84 (3): 369-380.
- [2] WILLS J A B, LEE B E. Vulnerability of fully glazed high-rise buildings in tropical cyclones [J]. *Journal of Architectural Engineering*, 2002, 8(2): 42-48.
- [3] HOLMES J D. Mean and fluctuating pressures induced by wind [C] // *Proc. 5th Int. Conf. on Wind Engineering*, Fort Collins, USA, 1979.
- [4] 余世策,楼文娟,孙炳楠,等. 背景孔隙对开孔结构风致内压响应的影响[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(6): 6-11.
- [5] YU Shice, LOU Wenjuan, SUN Bingnan, et al. Influence of background porosity on wind-induced internal pressure response for structures with openings [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(6): 6-11.
- [6] OH J H, KOPP G A, INCULET D R. The UWO contribution to the NIST aerodynamic database for wind loads on low buildings: Part 3. Internal pressures [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2007, 95 (8): 755-779.
- [7] 余先锋,全涌,顾明. 考虑屋盖柔度的开孔两空间结构风致内压研究[J]. *力学学报*, 2012, 44(4): 727-734.
- [8] YU Xianfeng, QUAN Yong, GU Ming. Study on responses of wind-induced internal pressure for building with internal partitioning and openings when considering roof flexibility [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(4): 727-734.
- [9] SAATHOFF P J. Internal pressure of multi-room buildings [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1983, 109 (3): 908-919.
- [10] LIU H, RHEE K H. Helmholtz oscillation in building models [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1986, 24(2): 95-115.
- [11] STATHOPOULOS T, LUCHIAN H D. Transient wind-induced internal pressures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1989, 115(7): 1501-1514.
- [12] VICKERY B J, BLOXHAM C. Internal pressure dynamics with a dominant opening [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 41(1): 193-204.
- [13] SHARMA R N, RICHARDS P J. The effect of roof flexibility on internal pressure fluctuations [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1997, 72 (1): 175-186.
- [14] SHANMUGASUNDARAM J, REARDON J. Strong wind damage due to Hurricane Andrew and its implications [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995, 22(1): 49-54.
- [15] 李寿科,田玉基,李寿英,等. 屋盖开孔建筑的内压风洞试验研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(18): 1-8.
- [16] LI Shouke, TIAN Yuji, LI Shouying, et al. Wind tunnel tests on internal pressures of buildings with a roof opening [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(18): 1-8.
- [17] 余先锋,顾明,全涌,等. 考虑背景孔隙的单开孔两空间结构的风致内压响应研究[J]. *空气动力学学报*, 2012, 30(2): 238-243.
- [18] YU Xianfeng, GU Ming, QUAN Yong, et al. Study on the responses of wind-induced internal pressure for building with internal partitioning and openings when considering background porosity [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2012, 30(2): 238-243.
- [19] OH J H, KOPP G A, INCULET D R. The UWO contribution to the NIST aerodynamic database for wind loads on low buildings: Part 3. Internal pressures [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2007, 95 (8): 755-779.