

# 建筑结构风致内压的研究进展

顾明, 余先锋, 全涌

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 从理论分析方面概括了内压控制方程的发展过程, 评述了结构柔度、Helmholtz共振、干扰效应及结构内部分区等几个影响风致内压的主要因素, 并从风洞试验、现场实测与CFD(计算流体力学)模拟3个方面回顾与总结了国内外风致内压的研究进展, 列举了各国风荷载规范对内压的描述. 通过分析内压控制方程、影响因素以及研究方法中所存在的问题, 指出了当前内压研究中的不足, 并提出了进一步研究的建议.

**关键词:** 建筑结构; 风致内压; 风洞试验; 现场实测; 计算流体力学模拟

**中图分类号:** TU 317.1

**文献标识码:** A

## Research Progress of Wind-induced Internal Pressure in Structures

GU Ming, YU Xianfeng, QUAN Yong

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The study progress of internal pressure governing equation is first summarized from theoretical analysis. Then several main factors that affect wind-induced internal pressure including building flexibility, Helmholtz resonant effect, interferer effect and internal partitioning are reviewed, and a comprehensive survey is presented from the aspects of wind tunnel test, field measurement and computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation. Description of internal pressure in wind load codes of several main countries is presented too. Finally some limitations in current researches are pointed out by analyzing the problems existed in internal pressure governing equations, influencing factors and research methods, and some recommendations are made for further researches on internal pressure.

**Key words:** building structure; wind-induced internal pressure; wind tunnel test; field measurement; computational

fluid dynamics simulation

强风作用下, 建筑结构的风荷载不仅取决于结构外表面的风压分布, 内压的作用也不容忽视. 气流流经建筑物表面的孔隙、主开洞及其引起的柔性结构变形均可导致结构内压的变化, 其中建筑物存在主开洞时的脉动内压变化尤为重要. 强风中由于风致飞掷物的撞击, 门窗突然破坏, 气流涌入室内, 导致结构内部脉动内压增大, 屋盖、山墙等在内外压的共同作用下发生破坏的情况时有发生<sup>[1-2]</sup>.

迄今, 人们对结构风致内压的认识还不够, 也未对内压作用引起足够的重视. 工程师们在结构设计时往往忽略或只粗略地考虑了风致内压的作用, 这给结构安全带来了极大的隐患. 本文从内压控制方程、风致内压的影响因素、研究方法以及各国风荷载规范对内压的描述等方面对风致内压作了全面的回顾与评述, 以期人们对内压有一个较为深刻的认识, 最后指出了目前风致内压研究中存在的一些问题, 以及进一步研究的建议与方法.

## 1 内压控制方程

建筑结构风致内压的动力问题分为突然开洞时的瞬态内压响应和已存在开洞时由脉动外压引起的内压稳态响应. 目前各国学者已经达成共识, 即采用2阶常微分方程来描述突然开洞结构的内压响应.

Homles<sup>[3]</sup>首次采用类似于Helmholtz声学共振器原理导出了2阶非线性微分方程, 以此来描述带有主开洞建筑物的风致脉动内压

$$\frac{\rho l_e V_0}{\gamma A_0 p_a} \ddot{C}_{pi} + \frac{\rho V_0^2 q}{2\gamma^2 c^2 A_0^2 p_a^2} | \dot{C}_{pi} | \dot{C}_{pi} + C_{pi} = C_{pe} \quad (1)$$

收稿日期: 2010-08-01

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(90715040); “十一五”国家科技支撑计划(2006BAJ06B05, 2008BAJ08B14); 上海市科技攻关计划(09dz1207704)

第一作者: 顾明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土木工程抗风. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

式中:  $\gamma, \rho, p_a$  分别为洞口周边的空气比热容比、密度与压强;  $A_0$  为开洞面积;  $V_0$  为结构内部体积;  $l_e$  为洞口气流的有效长度,  $l_e = l_0 + \alpha \sqrt{a_0}$ <sup>[4]</sup>;  $l_0$  为洞口气流的实际长度, 一般指墙体厚度;  $a_0$  为洞口的名义面积;  $\alpha$  与洞口形状有关, 对于圆形开洞  $\alpha = 0.89$ , 方形开洞  $\alpha = 0.86$ , 边长之比为 2:1 的矩形开洞  $\alpha = 0.65$ , 边长之比为 10:1 的矩形开洞  $\alpha = 0.21$ ;  $c$  为孔口流量收缩系数, 文献[5]指出, 对于深开洞  $l_e/r_{\text{eff}} > 1.0$ ,  $c = 1.0$ , 对于浅开洞  $l_e/r_{\text{eff}} < 1.0$ ,  $c = 0.6$ ;  $r_{\text{eff}} = \sqrt{A_0/\pi}$  为开洞的有效半径;  $C_{pi} = p_i/q$  为内压系数;  $C_{pe} = p_e/q$  为外压系数;  $q = 0.5\rho U_h^2$  为参考动压;  $U_h$  为屋脊高度处的风速。

Liu 和 Saathoff<sup>[6]</sup> 认为气流在开洞中会形成一个收缩段, 进而采用流体动力学中的非定常等熵伯努利方程导出了一个更为严格的内压控制方程. 他们还进行了参数对比分析, 得知该方程比 Homles<sup>[3]</sup> 方程具有更大的适应性, 它可适用于任意大小的压强变化. 不过 Liu 和 Saathoff<sup>[6]</sup> 定义  $\int_1^2 \frac{\partial v}{\partial t} dl = \frac{dv_2}{dt} l_e$ ,

而 Vickery<sup>[7]</sup> 指出目前所被接受的气塞有效长度  $l_e$  应为  $\int_1^3 \frac{\partial v}{\partial t} dl = \frac{dv_0}{dt} l_e$ . 其中,  $v_0$  为气流在收缩段的速度,  $v_2$  为气流在开洞中的空间平均速度, 位置 1 处于建筑物外, 位置 2 位于收缩段, 位置 3 处于建筑物内但远离孔口.

Vickery<sup>[4,7]</sup>, Vickery 和 Bloxham<sup>[8]</sup> 均认为孔口气流具有很高的非定常性, 孔口附近不存在收缩流动区域, 而更适合用一个能量损失系数  $C_L$  来量化气流与孔口的摩擦损失, 进而采用非定常孔口流量方程导出了相似的内压控制方程.

Sharma 和 Richards<sup>[5,9]</sup> 首次运用 CFD(计算流体动力学)研究了建筑结构内压的瞬态响应, 并将 CFD 计算结果与风洞试验作了对比, 验证了 CFD 计算结果的正确性. 从 CFD 导出的气流速度矢量图中可以看到孔口静压式收缩确实存在. 他们还进一步指出, 内压的瞬态振动衰减率表明内压控制方程中除了非线性阻尼损失以外, 还存在额外的一个线性阻尼项, 它来源于孔口附近黏性剪应力, 进而他们修正了内压控制方程.

为从理论上研究背景孔隙(例如通风孔、墙壁小裂缝等)对内压响应的影响, 余世策等<sup>[10]</sup> 在忽略背景孔隙处的气体惯性效应与背风面的风压脉动等假设条件下, 利用伯努利方程推导了考虑背景孔隙的内压控制方程, 进一步完善了内压响应理论.

Oh 等<sup>[11]</sup> 指出, 当建筑物开洞较小时, 墙厚的作用将变得明显, 此时有必要考虑实墙的剪应力效应. 由于摩擦而产生的压力降可由“管道—摩擦方程”来表示. 于是他们进一步修正了内压控制方程, 并指出对于多开洞或背景孔隙结构, 可对每一个开洞或背景孔隙建立内压控制方程, 于是可得一个内压控制方程组, 但必须补充一个质量守恒方程才能进行内压响应求解.

以上内压控制方程只是针对存在单一主开洞且无内部分区的刚性建筑物而言的. 而实际建筑物存在多个分区, 且在大风中, 建筑物可能会出现多个主开洞, 这时结构内压的空间相关性大为降低, 不能仅用一个内压值来描述结构内压的变化, 有待进一步开展结构风致内压的基础理论研究, 以期建立数学模型来预测此时的内压响应及其对结构的作用.

## 2 风致内压的影响因素

影响风致内压的因素有很多, 诸如主开洞及孔隙、结构柔度、Helmholtz 共振效应、干扰效应以及结构内部分区等, 其中对建筑物主开洞的大小、位置及孔隙率等的研究较多<sup>[12-14]</sup>, 而对结构柔度、Helmholtz 共振、干扰效应及结构内部分区的研究相对较少.

### 2.1 结构柔度对内压的影响

以上内压控制方程都是针对刚性房屋提出的, 当考虑结构的柔度后, 结构内部体积将在内外压的作用下发生变化, 从而内压控制方程也会发生一定的变化.

Sharma 和 Richards<sup>[15]</sup> 提出了迎风面开洞的柔性结构的内压控制方程, 并指出当结构屋盖或墙的自然频率远大于突然开孔时的 Helmholtz 频率时, 在内压作用下, 结构将以准静态方式响应, 但它没有考虑背景孔隙和屋面外压的影响.

Sharma<sup>[16]</sup> 再次发展了迎风面开洞的柔性结构的内压控制方程, 当结构以准静态方式响应于内外压联合作用时, 在考虑了柔性结构的外压效应后, 重新修正了内压控制方程, 它不同于 Vickery<sup>[4]</sup>, Sharma 和 Richards<sup>[15]</sup> 所得的结果. 他进一步研究了无阻尼 Helmholtz 共振频率, 可知当结构柔度增加时, Helmholtz 共振频率减小了. 另外, 结构的柔度还增加了内压系统的阻尼.

低矮建筑物的自振频率一般较高, 故在内压作用下, 屋盖与墙的反应一般以准静态方式出现. 这一

点和柔性结构是有明显区别的.

## 2.2 Helmholtz 共振对内压的影响

导致主开洞建筑物的内压发生脉动的原因有很多,来流风中的湍流、尾流与分离流区中的湍流以及 Helmholtz 共振均能引起结构内压的脉动. Sharma 和 Richards<sup>[17]</sup>指出,如果其 Helmholtz 频率落在了自由湍流功率谱中的较大能量区,且内压系统的阻尼不大时,便会发生共振现象,这时在 Helmholtz 频率附近的脉动内压会显著放大,出现很高的脉动内压峰值,从而导致构件的疲劳破坏等.

当风垂直吹向建筑物的开洞时,共振激发是自由流中的湍流所致.在切向流下,共振激发受到横穿孔口的漩涡影响,它将引起结构内部的空气大幅压缩,而内部空气压缩后,其压强增大,气流将会反向而排出,接着一个新的漩涡又开始形成,如此循环.如果洞口的漩涡脱落频率与 Helmholtz 频率一致,将会出现共振现象.

在斜风向下,建筑物的屋盖表面会形成“锥形涡”,若此处或附近存在主开洞时, Helmholtz 共振极有可能发生.这时,内压控制方程中的激励  $C_F(t)$  将由开洞处的时变外压系数  $C_{pe}(t)$  与代表“涡脱动力”的额外激励  $C_{eddy}(t)$  组成.而激励项  $C_{eddy}(t)$  受到切向流下与 Helmholtz 共振相关的诸多变量的影响,例如: Strouhal 数,开洞宽度与墙面边界层厚度的比值,相对于开洞墙面的风向角  $\theta$ ,迎风墙面边缘到开洞处的距离  $d$  以及开洞位置是否位于分离流区等等.

Sharma 和 Richards<sup>[17]</sup>仅通过风洞试验研究了斜风下内压的 Helmholtz 共振对内压的影响,提出了内压控制方程中额外激励项  $C_{eddy}(t)$  的存在,并说明了影响  $C_{eddy}(t)$  的诸多因素,但未详细研究这些因素对它的影响,也未在理论上给出  $C_{eddy}(t)$  的表达式.

## 2.3 干扰效应对内压的影响

Liu 和 Rhee<sup>[18]</sup>通过风洞试验研究了干扰效应对建筑物内压的影响.他们对于一个带有主开洞的平屋顶建筑的缩尺模型进行了风洞试验,并在试验模型的前方不同位置放置圆柱体施扰物,在层流(湍流度 1%)与湍流(湍流度 10%)2 种气流条件下研究了干扰效应对受扰建筑物的脉动内压影响.实验结果表明:①施扰建筑与受扰建筑的横向距离变化对脉动内压的影响非常显著;②在层流均匀风条件下,由于结构自身的干扰效应,背风面开洞处的脉动内压要比迎风面开洞处的大;③同样是层流均匀风条件,当受扰建筑的前方出现干扰建筑时,若受扰建筑的开

洞面积较大,从脉动内压功率谱上可以观察到双峰值,其对应的频率为漩涡脱落频率与 Helmholtz 共振频率,若调整干扰物的横向位置,漩涡脱落频率会发生移动,当漩涡脱落频率与 Helmholtz 频率相近时,将会引起强烈的“双共振”现象.若建筑物开洞面积较小时,则只能出现对应于漩涡脱落频率的单峰值.

干扰效应不仅对结构外压有较大的影响,对内压的影响也很显著,不容忽视. Liu 和 Rhee<sup>[18]</sup>只通过风洞试验研究了圆柱施扰建筑对受扰建筑的影响,而不同类型的施扰建筑实质上表示不同类型的干扰漩涡,其他类型施扰建筑(如低矮建筑等)对不同类型的受扰建筑(如大跨屋盖结构等)的内压干扰也有待进一步研究.

## 2.4 内部分区对内压的影响

以上内压控制方程只是针对结构内部无分区且只存在单一主开洞的建筑物,然而现实中的大多数建筑物均存在多个房间及多个开洞,因此有必要研究结构内部分区对内压的响应.

Saathoff 和 Liu<sup>[19]</sup>指出,在强风条件下,由于突然开洞,绝大多数建筑物的各个房间的内压不尽相同.对于多分区多开洞的建筑物,可对每一开洞建立相应的内压控制方程,这样对于建筑物中的任一房间可获得一系列内压控制方程来计算其时变内压.他们还运用上述方法分析了单一分区、两分区及四分区建筑物的各房间的时变内压.结果表明,由于迎风墙面突然开洞而导致的峰值内压与 Helmholtz 共振频率将随开洞面积的增大、有效内部体积的减小而增大.

Sharma<sup>[20]</sup>进一步研究了建筑物在存在两分区且外墙带有 1 个主开洞时,隔墙上的门是否打开 2 种情况下的内压响应.

当隔墙上的门关闭时,内压响应可利用单一分区结构的内压控制方程来求解,只是此时的内部体积  $V_0$  需要进行折减.研究表明,与相同尺寸的无隔墙建筑物相比,带有不透风隔墙与主开洞的结构内压系统的阻尼减小了,但 Helmholtz 共振频率却增大,总体而言,带有不透风隔墙与主开洞的房屋脉动内压要高于相同尺寸的带有主开洞但无隔墙房屋.

当隔墙上的门敞开时,每个开洞都可被模拟为一个 Helmholtz 共振器,如图 1 所示.2 个子分区的内压响应可由外开洞与内开洞处的气塞位移  $x_1, x_2$  来表示.通过理论分析与风洞试验表明,当建筑物存在 1 个带有开洞的隔墙时,2 个子房间的内压均表现出 2 个共振模态,其中在低频共振模态处,无外开洞

的分区 2 的脉动内压要高于分区 1.

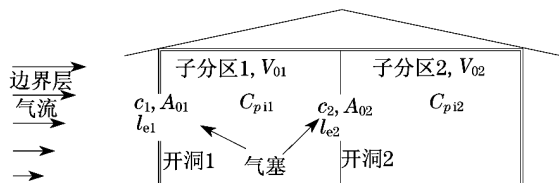


图 1 带有内外开洞的建筑物<sup>[20]</sup>

Fig.1 Model of a building with an external and an internal opening

考虑结构内部分区后,虽然结构更加符合实际情况,但以上研究并未考虑当结构存在内部分区时,结构柔度与背景孔隙对内压的影响.

### 3 风致内压的研究方法

风致内压动力问题是一个复杂的流体动力学问题,其影响因素也很多,很难从理论上进行精确分析,必须依靠风洞试验、现场实测以及 CFD 模拟等手段来进行研究.

#### 3.1 内压的风洞试验

楼文娟等<sup>[21]</sup>对 2005 年前的内压风洞试验的发展已作了一个较为全面的回顾与评述.

最近,Ginger 等<sup>[13-14,22]</sup>通过风洞试验研究了各种主开洞与内部体积对内压响应的影响.研究表明:①结构平均内压基本等于主开洞处的平均外压;②脉动内压与峰值内压均受到结构的开洞面积与内部体积的显著影响,脉动内压还受到来流风速、开洞处的惯性系数与流量系数的影响;③内压功率谱在接近 Helmholtz 频率处表现出峰值.随着结构内部体积的增大,内压功率谱上表现出 2 阶频率峰值.

Oh 等<sup>[11]</sup>通过 6 个低矮建筑模型,研究了更大范围内的背景孔隙与主开洞比值下的内压响应.由试验得到:①当背景孔隙与开洞面积的比值较大时,采用内压控制方程组可较准确地预测内压的均方根值;②当结构仅有背景孔隙时,由于背景孔隙的阻尼效应,脉动外压被大大削弱了;③对于所有的开洞情况,城市郊区地貌的内压均方根值与峰值均高于开敞农村地貌.

Kopp 等<sup>[23]</sup>研究了 1 个低矮房屋在 10 种不同工况(包括墙面不同的开洞面积与位置、阁楼与居住空间之间的开洞等)下的内压响应.研究指出:①增大开洞面积,将增大 Helmholtz 共振,因此也增大了峰值内压,尤其是当风垂直吹向开洞的情况;②屋盖峰值外压与内压有很大的相关性;③阁楼与居住层之

间的天花板可用来减小屋面板上的风荷载,天花板上的净压要略大于居住空间的内压.

#### 3.2 内压的现场实测

Robertson 等<sup>[24]</sup>对 2 个现代农业雨篷屋盖结构(silsoe dutch barn; drayton dutch barn)的内外表面风压进行了现场实测.结果表明,屋盖结构上的风荷载变化很大,这主要取决于结构内部所包含的阻塞类型.

Fahrtash 和 Liu<sup>[25]</sup>对 3 幢内部体积与开洞面积均不同的建筑物内压进行了现场实测,验证了前人推导的内压控制方程的正确性.从实测的内压功率谱可以看出 Helmholtz 频率处的共振能量较小,即弱共振,这表明了内压脉动时存在较大的阻尼.由此可知:对于一般建筑物,尽管建筑物上的大开洞可导致较大的内压脉动,但开洞、墙与屋盖提供了足够的阻尼而阻止了 Helmholtz 共振的发生.

Robertson<sup>[26]</sup>对 Silsoe 门式刚架结构进行了阵风荷载现场实测.研究表明,当存在 1 个主开洞时,应变谱与内压谱表现出高度的一致,给出的动力放大因子可以考虑较高的峰值应力.给出的阵风持续时间可方便用于预测无开洞时的结构构件的峰值应力.在强风下所观察到的“向上抬举”现象,这是由于 Helmholtz 共振效应引起的.

Yeatts 和 Mehta<sup>[27]</sup>描述了 WERFL(风工程研究实测实验室)对风致内压的实测研究.结果表明:①当无主开洞时,平均内压系数的范围为  $\pm 0.25$ ;②当开孔率为 1%,2%,5%时,内压系数平均值变化不大,其中迎风开洞为 2%时,瞬态内压系数峰值最高;③对于突然开洞的测量表明,内压并未表现任何的显著内压超载,而随后的稳态内压脉动产生了更大的峰值内压.

Kato 等<sup>[28]</sup>对位于东京的 1 栋 120 m 的高层建筑楼顶上空的风向与风速、墙面上的风压、大气压以及风致内压进行了现场实测,并将实测结果与缩尺比为 1:300 的模型风洞试验结果进行了对比.得到如下结论:①内压系数约为 -0.26,且在整个大楼的高度上表现得相对一致;②内墙与门对平均内压系数的测量影响不大,同一层不同位置的平均内压测量值基本相同;③从风洞试验得到平均风压系数,再通过质量守恒定律计算得到的平均内压系数近似为 -0.26,这与实测值相当吻合.

Ginger 和 Letchford<sup>[29]</sup>对 WERFL 低矮建筑物进行了现场实测研究,得到了屋盖表面的外压与内部不同测点的内压.研究结果表明:①在确定迎风墙

面风荷载时,准定常理论是适用的,但对于气流分离与再附区域,准定常理论不再适用;②当建筑物处于名义封闭状态时,内压与外压不相关,高于特征频率  $f_c$  的内压脉动得到削弱,这将会导致内压阵风因子小于外压阵风因子;③当建筑物存在一个 2% 的迎风面主开洞时,内压随洞口附近外压的变化而变化,内压的空间相关性很好. 内压与大部分外压却不太相关,但屋盖迎风边缘的外部负压与内部正压相关性好,从而导致了较大的屋盖净压.

Ginger<sup>[30]</sup>对 TTU(Texas Tech University)实测房屋在名义封闭与大开洞 2 种情况下的风致内压进行了实测,并与理论分析结果进行了比较. 研究指出:①结构内压主要受外压分布、开洞位置及大小控制,脉动内压还受到结构内部体积与覆层柔度的影响;②名义封闭建筑物的平均与脉动内压系数要比外压系数小,且随着迎风与背风开洞面积比的增大而增大,高于特征频率的脉动内压将被大大削弱,从而导致一个较小的内压阵风因子;③当建筑物存在一个主开洞时,内压将与迎风墙面的外压同步脉动. 迎风墙面的主开洞导致了屋盖、边墙及背风墙的净正压减小,净负压增大. 与洞口处的脉动外压相比, Helmholtz 频率附近的内压能量增大. 开洞面积的增大将减小阻尼,但同时也增大了共振的可能性,这也增大了建筑物所有区域在 Helmholtz 频率附近的净压能量.

通过内压的现场实测,不仅可以验证上述内压控制方程及所取参数的正确性,更能与风洞试验和 CFD 计算结果进行对比,指出通过风洞试验和 CFD 模拟内压中存在的问题及改进方法和可行性. 现场实测是采用风洞试验和 CFD 方法研究结构内压的基础.

### 3.3 内压的 CFD 模拟

近年来随着计算机的发展,CFD 逐渐应用于结构风致内压的研究中. 采用 CFD 模拟研究风致内压,不仅可以对内压响应进行 3 维求解,还能研究洞口附近的气流特性.

Sharma<sup>[9]</sup>首次采用 CFD 模拟了建筑物在突然开洞时的内压瞬态响应与孔口气流特性,并与风洞试验结果进行了对比,证明了 CFD 方法的有效性. Sharma 指出:① CFD 方法能正确计算结构的 Helmholtz 频率,从而可通过 Helmholtz 频率来研究各种气流条件与各种类型孔口的流量特性;② CFD 方法还能有效地预测内压的衰减率;③通过 CFD 可方便观察到孔口中气流流速的特性,孔口中确实形

成了 1 个气流静脉收缩段.

卢旦和楼文娟<sup>[31]</sup>利用 CFD 模拟了建筑物突然开洞瞬时的流场变化,获得风致内压的 Helmholtz 频率和孔口气流的等效线性阻尼,并与风洞试验结果对比,再次验证了 CFD 方法能够准确模拟突然开孔结构在孔口处的气体流动状态. 他们还利用孔口气流振荡曲线,采用参数拟合方法进一步获得了内压传播方程中的各特征参数.

卢旦<sup>[32]</sup>再次利用 CFD 稳态计算中的  $k-\epsilon$  湍流模型和非稳态计算中的大涡模拟方法分别对开孔结构内外表面的平均风压和脉动风压进行了数值模拟. 结果表明,采用稳态计算方法可很好地模拟结构表面的平均风压,而采用大涡模拟方法进行脉动内压计算时,只是低频区的计算结果才与风洞试验吻合.

## 4 各国风荷载规范对内压的描述

经过近几年的发展,各国风荷载规范对内压的规定已经得到了很大的完善,但各国规范均未提及建筑物在突然开洞情况下的内压系数取值,并且它们对内压的取值往往偏于危险<sup>[17,23,29,33]</sup>.

澳大利亚/新西兰风荷载规范(AS/NZS 1170.2:2002)<sup>[34]</sup>对建筑物名义封闭与带有主开洞 2 种情况下的内压系数作了详细描述,其中当存在主开洞时,内压系数如表 1 所示. 表中  $C_{pe}$  为主开洞处的外压系数.

表 1 结构内压系数<sup>[34]</sup>

Tab.1 Internal pressure coefficients for buildings

开洞面积与其他墙面和屋顶面总面积之比	主开洞位置			
	迎风面	背风面	侧风面	屋顶面
$\leq 0.5$	-0.3,0	-0.3,0	-0.3,0	-0.3,0
1.0	-0.1,0.2	-0.3,0	-0.3,0	-0.3,0.15 $C_{pe}$
2.0	0.7 $C_{pe}$	0.7 $C_{pe}$	0.7 $C_{pe}$	0.7 $C_{pe}$
3.0	0.85 $C_{pe}$	0.85 $C_{pe}$	0.85 $C_{pe}$	0.85 $C_{pe}$
$\geq 6.0$	$C_{pe}$	$C_{pe}$	$C_{pe}$	$C_{pe}$

ISO 风荷载规范<sup>[35]</sup>也分别对名义封闭与带有主开洞的建筑物内压进行了详细描述. 其中对于名义封闭的建筑物内压取值与 AS/NZS 1170.2:2002<sup>[34]</sup>一致,带有开洞的建筑物内压系数取值与 AS/NZS 1170.2:2002<sup>[34]</sup>略有不同.

欧洲风荷载规范<sup>[36]</sup>对建筑物墙面有无主开洞 2 种情况的内压分别进行了描述. 当建筑物的某墙面开洞面积为其他墙面的开洞面积的 2 倍时,  $C_{pi} = 0.75C_{pe}$ ; 当某墙面的开洞面积至少 3 倍于其

他墙面开洞面积时,  $C_{pi} = 0.9C_{pe}$ ; 当某墙面的开洞面积为其他墙面开洞面积的 2~3 倍时, 可采用线性插值来计算内压系数. 而当建筑物处于名义封闭时, 内压系数可由图 2 来确定. 图中,  $h, d$  分别为建筑物的高度与深度;  $\mu$  为孔隙率.

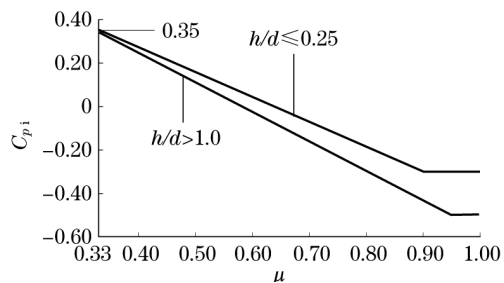


图 2 无主开洞的建筑物内压系数<sup>[36]</sup>

Fig. 2 Internal pressure coefficients for buildings without dominant openings

英国风荷载规范<sup>[37]</sup>对名义封闭、带有主开洞、开敞的建筑物内压系数进行了详细描述. 对于名义封闭结构, 当两相对的墙面可透风而其他墙面封闭时, 若来流风垂直吹向透风墙, 内压系数取值 0.2; 若来流风垂直吹向封闭墙, 内压系数取值 -0.3. 对于带有主开洞的建筑物, 内压系数取值与欧洲风荷载规范一致. 对于开敞结构, 则根据开敞的墙面数, 风向角的不同而取不同的内压值.

美国风荷载规范<sup>[38]</sup>以内压系数与阵风效应因子乘积的形式  $GC_{pi}$  给出了封闭、部分开敞以及完全开敞建筑物的内压系数. 当完全开敞时,  $GC_{pi} = 0$ ; 当部分开敞时,  $GC_{pi} = \pm 0.55$ ; 当封闭时,  $GC_{pi} = \pm 0.18$ .

印度风荷载规范<sup>[39]</sup>考虑了开洞大小对内压的影响. 当开洞面积小于 5% 时, 内压系数取  $\pm 0.2$ ; 当开孔率为 5%~20% 时, 内压系数取  $\pm 0.5$ ; 当开孔率大于 20% 时, 内压系数取 0.7; 而对于一面墙敞开的各种情形, 内压系数随结构深宽比的不同而取不同的值.

日本风荷载规范<sup>[40]</sup>指出正确计算内压时必须考虑墙面开洞的位置与大小, 但只给出了名义封闭建筑物的内压系数取值 0 或 -0.4.

中国风荷载规范<sup>[41]</sup>也只给出了封闭式建筑物的内压系数, 其按外表面风压的正负情况取值 -0.2 与 0.2.

从各国风荷载规范对内压的描述中可知, 它们还是落后于当前风致内压的研究进展. 为了适应工程实践的需要, 需要将现有的内压研究成果体现于风荷载规范之中, 以供结构工程师在设计时使用.

## 5 结语及展望

近年来, 尽管国内外对建筑结构风致内压的研究取得了一定的成果, 通过风洞试验、现场实测以及 CFD 数值模拟较为全面地研究了主开洞大小、位置、来流风速等因素对内压的影响; 但仍然有一些重要的基础和应用问题. 为此, 提出进一步的研究建议:

(1) 建筑物在大风时可能会出现多个主开洞, 这时结构内压的空间相关性大为降低, 不能仅用一个内压值来描述结构内压的变化. 因此有必要进一步开展结构风致内压的基础理论研究, 以期建立数学模型来预测此时的内压及其对结构的作用.

(2) 目前已经建立起来的内压控制方程及相应的 Helmholtz 频率已得到了风洞试验与 CFD 数值模拟的验证, 但很少与内压的现场实测结果进行比较. 而现场实测是采用风洞试验和 CFD 方法研究结构内压的基础, 因此有必要进一步开展内压的现场实测研究, 以此验证上述内压控制方程及所取参数的正确性, 更能与风洞试验和 CFD 结果进行对比, 指出通过风洞试验和 CFD 模拟内压中存在的问题及改进方法和可行性.

(3) 采用 CFD 稳态计算方法可很好地模拟结构表面的平均风压, 而 CFD 大涡模拟方法只能对低频区的脉动内压进行模拟计算<sup>[32]</sup>, 因此有必要进一步开展计算流体力学湍流模型的研究, 以期能准确计算结构脉动内压.

(4) 结构柔度、Helmholtz 共振、干扰效应以及结构内部分区等因素对内压影响的研究稍显不足, 有必要进一步展开风洞试验研究. 另外, 内外压的相关性问题, 如何通过内外压来产生净压, 二次开洞以及强风中是否开洞的概率问题等等, 也亟待解决.

(5) 开展气动弹性模型风洞试验研究柔性屋盖在内外压共同作用下的气动弹性现象和气固耦合效应; 开发一些适用于实际工程风洞试验研究中的内压实用计算方法.

### 参考文献:

- [1] 孙炳楠, 傅国宏, 陈鸣, 等. 94 年 17 号台风对温州民房破坏的调查[J]. 浙江建筑, 1994, 4: 19.  
SUN Bingnan, FU Guohong, CHEN Ming, et al. Investigation on damage of Typhoon No. 17 to civil houses in Wenzhou[J]. Zhejiang Architecture, 1994, 4: 19.
- [2] Shanmugasundaram J, Arunachalam S, Gomathinayagam S, et al. Cyclone damage to buildings and structures—a case study

- [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 84(3):369.
- [3] Holmes J D. Mean and fluctuating internal pressures induced by wind[C]// *Proceedings of the 5th International Conference on Wind Engineering*. Fort Collins: Pergamon Press, 1979: 435 - 450.
- [4] Vickery B J. Gust-factors for internal-pressures in low rise buildings[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1986, 23:259.
- [5] Sharma R N, Richards P J. Computational modelling in the prediction of building internal pressure gain functions[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 67/68:815.
- [6] Liu H, Saathoff P J. Building internal pressure; sudden change[J]. *Journal of Engineering Mechanics Division*, 1981, 107 (EM2):309.
- [7] Vickery B J. Comments on “the propagation of internal pressures in buildings” by R I Harris[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1991, 37(2):209.
- [8] Vickery B J, Bloxham C. Internal pressure dynamics with a dominant opening[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 43(1/2/3):193.
- [9] Sharma R N, Richards P J. Computational modelling of the transient response of building internal pressure to a sudden opening[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 72:149.
- [10] 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. 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] Oh J H, Kopp G A, Incullet 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 and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(8):755.
- [12] Woods A R, Blackmore P A. The effect of dominant openings and porosity on internal pressures[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 57(23):167.
- [13] Ginger J D, Holmes J D, Kopp G A. Effect of building volume and opening size on fluctuating internal pressures[J]. *Wind and Structures*, 2008, 11(5):361.
- [14] Ginger J D, Holmes J D, Kim P Y. Variation of internal pressure with varying sizes of dominant openings and volumes[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(10):1319.
- [15] Sharma R N, Richards P J. The effect of roof flexibility on internal pressure fluctuations[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 72:175.
- [16] Sharma R N. Internal and net envelope pressures in a building having quasi-static flexibility and a dominant opening[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96:1074.
- [17] Sharma R N, Richards P J. The influence of Helmholtz resonance on internal pressures in a low-rise building[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(6):807.
- [18] Liu H, Rhee K H. Helmholtz oscillation in building models[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1986, 24(2):95.
- [19] Saathoff P J, Liu H. Internal pressure of multi-room buildings[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1983, 109(3):908.
- [20] Sharma R N. Internal pressure dynamics with Internal Partitioning [C] // *Proceedings of the 11th International Conference on Wind Engineering*. Lubbock: Texas Tech University. International Association for Wind Engineering (IAWE), 2003:705 - 712.
- [21] 楼文娟, 卢旦, 孙炳楠. 风致内压及其对屋盖结构的作用研究现状评述[J]. *建筑科学与工程学报*, 2005, 22(1):76. LOU Wenjuan, LU Dan, SUN Bingnan. Review of wind-induced internal pressure and its effects on roof structures[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2005, 22(1):76.
- [22] Ginger J D, Holmes J D, Kim P Y. Effect of volume and size of opening on internal pressure fluctuations[C]// *Proceedings of the 12th International Conference on Wind Engineering*. Cairns: AWES, 2007.
- [23] Kopp G A, Oh J H, Incullet D R. Wind-induced internal pressures in houses[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134 (7):1129.
- [24] Robertson A P, Hoxey R P, Moran P. A full-scale study of wind loads on agricultural ridged canopy roof structures and proposals for design[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1985, 21(2):167.
- [25] Fahrtash M, Liu H. Internal pressure of low-rise building-field measurements[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 36(2):1191.
- [26] Robertson A P. The wind-induced response of a full-scale portal framed building[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 43(1/2/3):1677.
- [27] Yeatts B B, Mehta K C. Field experiments for building aerodynamics[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 50:213.
- [28] Kato N, Niihori Y, Kurita T, et al. Full-scale measurement of wind-induced internal pressures in a high-rise building[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 69/70/71:619.
- [29] Ginger J D, Letchford C W. Net pressures on a low-rise full-scale building[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 83(1/2/3):239.
- [30] Ginger J D. Internal pressures and cladding net wind loads on full-scale low-rise building [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126(4):538.
- [31] 卢旦, 楼文娟. 突然开孔时孔口气流动力特性参数的数值模拟[J]. *工程力学*, 2006, 23(10):55. LU Dan, LOU Wenjuan. Numerical simulation of flow dynamical parameters at sudden opening[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(10):55.
- [32] 卢旦. 风致内压特性及其对建筑物作用的研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2006. LU Dan. Study on wind-induced internal pressure and its effects on structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University. College of Civil Engineering and Architecture, 2006.