

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.11.008

# 低矮异型建筑立面洞口对下击暴流风压作用的影响研究

王辉<sup>1,2</sup>, 吴亚雄<sup>1</sup>, 吴学健<sup>1</sup>, 吴安超<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:**为了研究下击暴流的风场特性及其对建筑物的作用,文章采用雷诺时均NS方程(Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, RANS)模拟下击暴流风场,在最大风速位置和来流风垂直于建筑立面情况下,对凹型、T型、L型3类异型低矮建筑内外表面所受风压的分布特点进行研究,并与立方体建筑对比,重点分析立面洞口设置方式对风压分布的影响。结果表明:对于3类异型建筑,洞口位置变化对外表面风压系数影响较小,对内表面风压系数影响较大,其中迎风面开洞对内表面风压系数分布影响最显著,而穿堂风是导致内表面风压系数降低的主要原因;当前后两面开洞时,迎风面居中靠近洞口上、下缘位置风压系数存在骤增和骤减现象,凹型建筑洞口上、下缘风压系数差值最大,为0.288,而T型建筑洞口上、下缘风压系数差值最小,为0.137;凹型、L型建筑5种洞口模式之间迎风面横向中线处风压系数差异较小,而T型建筑5种洞口模式下该处风压系数差别较大;与封闭模式相比,单面开洞时,凹型、T型和L型建筑屋面内外风压合力下合风压系数增幅最大,分别为348.6%、493.6%、250.7%。

**关键词:**下击暴流;异型建筑;洞口位置;内外表面风压;数值模拟

**中图分类号:**TU312.1;V211.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1003-5060(2023)11-1484-08

## Study on the effect of facade openings on wind pressure for low-rise irregular buildings under downburst

WANG Hui<sup>1,2</sup>, WU Yaxiong<sup>1</sup>, WU Xuejian<sup>1</sup>, WU Anchao<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to study the wind field characteristics of downburst and its effect on buildings, Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS) method, which solved N-S equation with renormalization group (RNG)  $k-\epsilon$  turbulence model, was used to simulate the wind field of downburst. Considering the maximum wind speed position and the incoming wind vertical to the building facade, the distribution characteristics of wind pressure on the internal and external surfaces of concave, T-shaped and L-shaped low-rise buildings were studied and compared with those of cubical buildings, focusing on the influence of the setting mode of facade openings on the wind pressure distribution. The results show that for the three types of irregular buildings, the change of opening position has little impact on the wind pressure coefficient on external surface, but it has a great impact on the wind pressure coefficient on internal surface. Among them, the opening on the windward side has the most significant impact on the internal surface pressure coefficient distribution, and the ventilation is the main reason for the reduction of internal surface pressure coefficient. When opening on both front and rear sides, the wind pressure coefficient in the center of the windward side near the upper and lower edges of the opening increases and decreases sharply. The wind pressure coefficient difference of the upper and lower edges of the concave building opening is the largest, which is 0.288, and the wind pressure coefficient difference of the upper and lower edges of the T-shaped building opening is the smallest, which

**收稿日期:**2022-03-31; **修回日期:**2022-05-12

**基金项目:**亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题资助项目(2020ZB24)

**作者简介:**王辉(1973—),男,安徽安庆人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师。

is 0.137. There is a small difference in wind pressure coefficients on the transverse midline of the windward side among the five opening modes of the concave and L-type buildings, but there is a great difference among the five opening modes of the T-type buildings. Compared with closed buildings, when opening on one side, the combined wind pressure coefficients of the concave, T-type and L-type building roofs under internal and external wind pressure increase the most, which are 348.6%, 493.6% and 250.7%, respectively.

**Key words:** downburst; irregular building; opening position; wind pressure on internal and external surfaces; numerical simulation

下击暴流是极具破坏性的强对流天气,该天气一旦发生,剧烈的下沉气流短时间内猛击地表,并以飞快的速度沿地表扩展,对地表构筑物破坏极大<sup>[1]</sup>。

目前,关于下击暴流对于建筑的作用多是针对立方体型封闭建筑开展研究,内容主要涉及暴流场的构成特点、建筑所处位置、地形等主要因素对建筑风压的影响,多采用风洞试验方法和计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟方法。文献[2]通过下击暴流风洞试验,研究立方体型封闭建筑表面风压与径向距离的关系,发现建筑迎风立面的风压与距离风暴中心的径向距离呈负相关,当  $r_d = D_0$  ( $r_d$  为径向距离,  $D_0$  为喷射初始直径)时,其达到最大值;文献[3]以数值方法模拟下击暴流对立方体型建筑的作用,结果表明,来流风在迎风面和屋面转角处易形成绕流,到达背风面产生涡旋,但背风面气流流速略低,导致背风面风压值较小;文献[4]采用数值模拟方法,探究下击暴流对平屋面建筑的风压作用,发现当建筑远离地面喷射中心时,屋面平均风压由正压转为负压;文献[5]采用数值方法,模拟分析地形对高层建筑立面风压的影响,结果表明,背风面的吸力随地面粗糙度的增加而显著减小,迎风面和侧风面风压则基本不受影响。

相对于封闭建筑,当建筑出现洞口时,洞口位置的灌入风或穿堂风会引起建筑绕流发生改变,当外部与内部的气流共同作用时,开洞建筑与封闭建筑的风压存在显著差异。相关研究多是针对常态风作用下的立方体型开洞建筑。文献[6]研究常态风下开洞低矮建筑的风压特性,结果表明,同种风况条件下,其背风面开洞数目越少、迎风面开洞数目越多,无论背风面还是迎风面,其风压呈增大趋势;文献[7]通过风洞试验,对开洞高层建筑的风致内外压差值(净压)开展研究,发现受扰建筑迎风面开洞时,净压对迎风面的作用小于侧面和背风面;文献[8]以数值方法研究开洞高层建

筑的风压干扰效应,结果表明,串联布局时,迎风面开洞受扰建筑的平均静风压系数与建筑间距呈正相关,而并列布局时,侧面开洞受扰建筑的平均静风压系数与建筑间距无关。实际工程中异型低矮建筑普遍存在,当其遭受下击暴流作用时,由于外形复杂、凹凸转角更多,尤其存在洞口时,其风压分布更复杂,而目前关于下击暴流作用下的异型建筑风压,以及立面洞口设置方式对风压的影响,相关研究很少。

本文以低矮异型建筑为对象,考虑立面洞口设置的变化,基于雷诺时均 NS 方程(Reynolds averaged Navier-Stokes equations, RANS),模拟分析下击暴流作用下立面设置洞口建筑的内外表面风压,揭示洞口设置方式对内外风压分布影响的规律,为抗风设计提供依据。

## 1 数值模拟方法及其验证

本文采用射流模型模拟下击暴流风场的形成发展以及对建筑的风压作用,该模型相对于环涡模型,能更好地再现下击暴流风场的基本特征<sup>[9-10]</sup>。

### 1.1 控制方程

基于 RANS 建立下击暴流风场控制方程,采用重整化群(renormalization group, RNG)  $k-\epsilon$  湍流模型封闭控制方程进行迭代求解<sup>[11]</sup>。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

$$u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (3)$$

$$u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] +$$



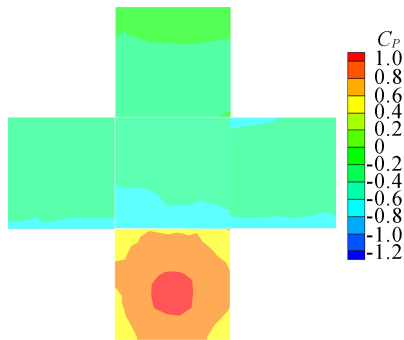


图 5 模拟场立方体建筑  $C_p$  云图

由图 4、图 5 可知,迎风面和背风面的模拟值与试验值吻合较好,在侧风面位置,虽然两者偏差相对较大,但最大差值仅为 0.11,说明数值方法能够精确模拟下击暴流风场,有效预测下击暴流风场对建筑的风压作用。

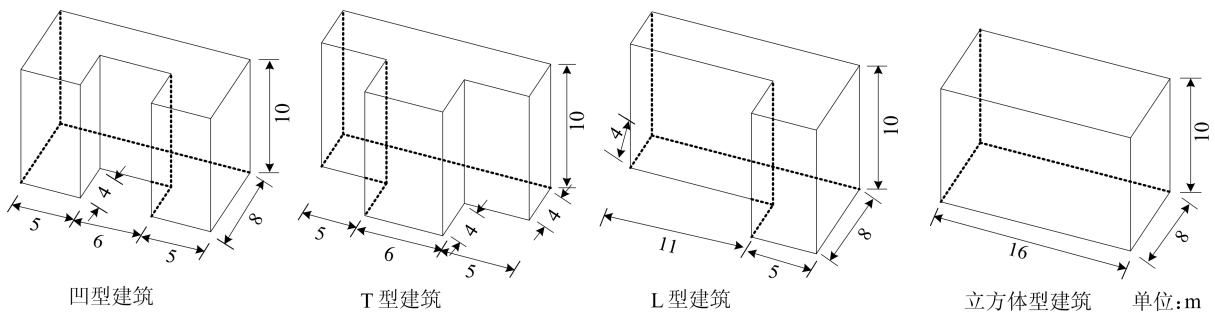


图 6 4 类建筑外形及尺寸

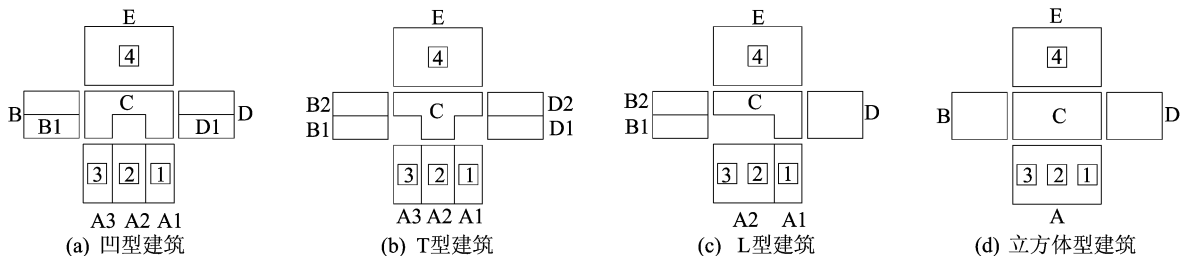


图 7 4 类建筑开洞预设位置

表 1 建筑开洞 5 种洞口模式

洞口模式	洞口位置	洞口编号
模式 1	封闭	
模式 2	单面开洞	2
模式 3	两面开洞	2,4
模式 4	单面双开洞	1,3
模式 5	两面三开洞	1,3,4

### 2.1 洞口位置对表面风压影响

针对凹型、T 型、L 型 3 类异型建筑,模拟 5 种洞口模式下建筑受下击暴流的作用情况。定义面平均风压系数  $\bar{C}_p$  为建筑表面风压系数平均值(简称“面压系数”)。3 类异型建筑 5 种洞口模

## 2 开洞异型建筑风暴作用模拟

以凹型、T 型、L 型和立方体型 4 类低矮建筑为对象,4 类建筑的外形及尺寸如图 6 所示。考虑来流风垂直建筑立面情况,研究立面开洞时内外表面风压分布特点,以及洞口设置方式对风压的影响特点。建筑考虑封闭、单面开洞(居中)、两面开洞(居中)、单面双开洞(两侧)和两面三开洞(前面两侧、后面居中)5 种模式,如图 7 所示,见表 1 所列。图 7 中,A、B、C、D 表示建筑不同立面,方形小框及数字表示开洞位置及洞口编号。在一定范围变化的开洞率对建筑室内外的风压影响较小<sup>[15]</sup>,因此采用相同开洞率 7.5%,洞口形式为正方形。参考图 1、图 2 建立计算域,射流管道直径  $D_0=1\ 000\ \text{m}$ 。

式下,其外表面、内表面面压系数  $\bar{C}_p$  值分别如图 8、图 9 所示。

由图 8 可知,3 类异型建筑在 5 种洞口模式下,外表面  $\bar{C}_p$  变化趋势基本一致,仅部分区域存在一定差异,凹型、T 型和 L 型的  $\bar{C}_p$  最大差值分别为 0.116、0.232、0.231。对比 3 类异型建筑,模式 1 与模式 2 下建筑外表面  $\bar{C}_p$  差异均不大,单面开洞建筑个别区域的  $\bar{C}_p$  值略低于封闭建筑。对比模式 2 与模式 3,穿堂风的形成对 3 类异型建筑外表面  $\bar{C}_p$  影响不同,凹型建筑的穿堂风能显著降低局部区域外表面  $\bar{C}_p$ ,而 T 型、L 型建筑的穿堂风会提高外表面局部区域的  $\bar{C}_p$ 。

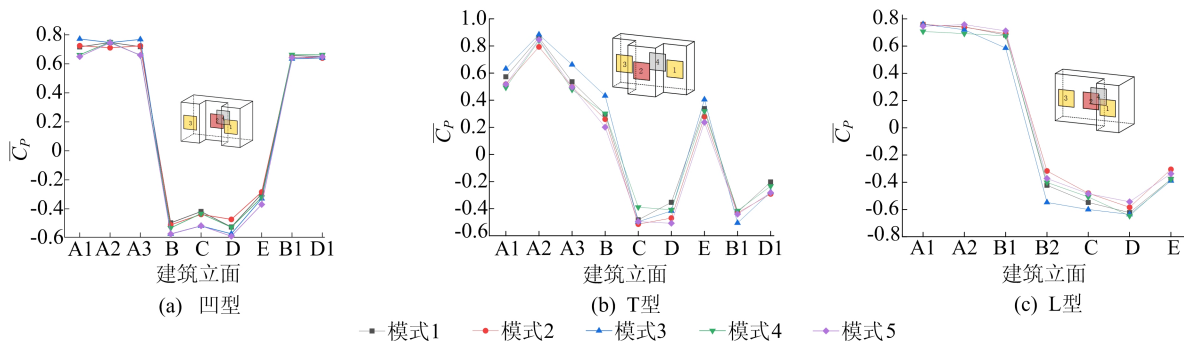


图 8 3 类异型建筑 5 种洞口模式下外表面面压系数

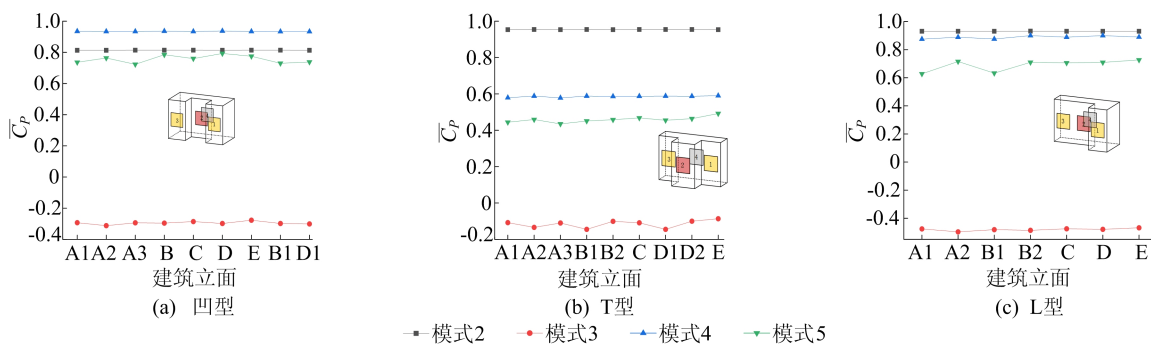


图 9 3 类异型建筑 4 种洞口模式下内表面面压系数

对比模式 3 与模式 5, 3 类异型建筑呈不同差异形式, 凹型建筑差异主要集中于开洞面, 模式 5 在开洞面  $C_p$  略有降低, 其余面  $C_p$  无明显差异; T 型建筑模式 3 外表面  $C_p$  相较于模式 5 增加, 最大增幅达 33.1%; L 型建筑由于穿堂风的影响, 模式 3 下各区域外表面  $C_p$  较模式 5 有所降低, 最大降幅达 47.3%。对比模式 2 与模式 4 以及模式 4 与模式 5, 3 类异型建筑外表面  $C_p$  在对比模式之间无明显差异。

由图 9 可知, 相较于建筑外表面  $C_p$ , 3 类异型建筑在 5 种洞口模式下内表面  $C_p$  变化较大。对比模式 2 与模式 3, 建筑两面开洞时, 由于穿堂风影响, 3 类异型建筑内部均出现吸力, 建筑内表面  $C_p$  由模式 2 的正值转为模式 3 的负值。对比模式 2 与模式 4, 凹型建筑单面双开洞较单面开洞内表面  $C_p$  平均增大 15.0%; T 型建筑单面双开洞未使内表面  $C_p$  提高, 反而较单面开洞降低, 平均降幅达 62.5%; L 型建筑这 2 种模式下内表面  $C_p$  差异不大。对比模式 4 与模式 5, 3 类异型建筑内表面  $C_p$  在各区域波动一致, 模式 5 相比于模式 4, 两面开洞使内表面  $C_p$  降低, 但仍呈正值, 凹型、T 型和 L 型建筑降幅分别为 27.0%、30.6%、39.9%。对比模式 3 与模式 5, 3 类异型建筑存在穿堂风效应, 模式 5 的穿堂风效应弱于模式

3, 穿堂风能使建筑内表面  $C_p$  降低, 而存在较强烈穿堂风时, 建筑内表面  $C_p$  由正值转为负值。

为定量分析立面洞口位置对迎风面风压的影响, 考虑 5 种洞口模式, 比较迎风面 (A2 面) 竖直中线、迎风面横向中线位置及屋面中线的风压系数  $C_p$  分布, 如图 10~图 12 所示。

从图 10 可以看出, 3 类异型建筑除模式 2 和模式 3 外, 其余模式下在 A2 面的  $C_p$  沿高度方向均呈先减小后增大再减小的变化趋势。模式 2 相较于模式 3 在洞口附近  $C_p$  波动较小, 与其余 3 种模式的  $C_p$  变化较接近, 其总体分布趋势也是先减小后增大再减小, 最小风压出现在 1.2 m 高度处, 而最大风压出现在 7.0 m 高度处。3 类异型建筑在模式 3 下, 洞口上、下缘  $C_p$  均出现不同程度的骤增和骤减现象, 凹型、T 型和 L 型建筑在洞口上缘  $C_p$  值分别为 0.961、0.982、0.968, 其中凹型建筑模式 3 下与模式 1 相比, 在洞口上缘骤增现象最明显, 最大增幅为 12.9%; 凹型、T 型和 L 型建筑在洞口下缘  $C_p$  值分别为 0.673、0.783、0.713, 与模式 1 相比, 降幅分别为 12.7%、11.1%、22.1%。

从图 11 可以看出, 3 类异型建筑在 5 种洞口模式下, 迎风面横向中线处的外表面  $C_p$  呈大致相同的分布趋势。凹型、L 型建筑 4 种开洞模式下横向中线处的外表面  $C_p$  与模式 1 (封闭) 差别

较小,仅在局部略有差异,而洞口附近差异最显著。从凹型建筑看,与模式 1 相比,模式 4 下的洞口附近  $C_p$  出现骤减现象,最大降幅为 54.4%;模式 5 下的洞口附近  $C_p$  出现骤增现象,最大增幅

达 23.6%;模式 4 与模式 5 下的洞口附近  $C_p$  最大差值达 0.431。从 L 型建筑看,模式 3 与模式 1 相比,洞口附近出现  $C_p$  骤减现象,最大降幅达 20.4%。

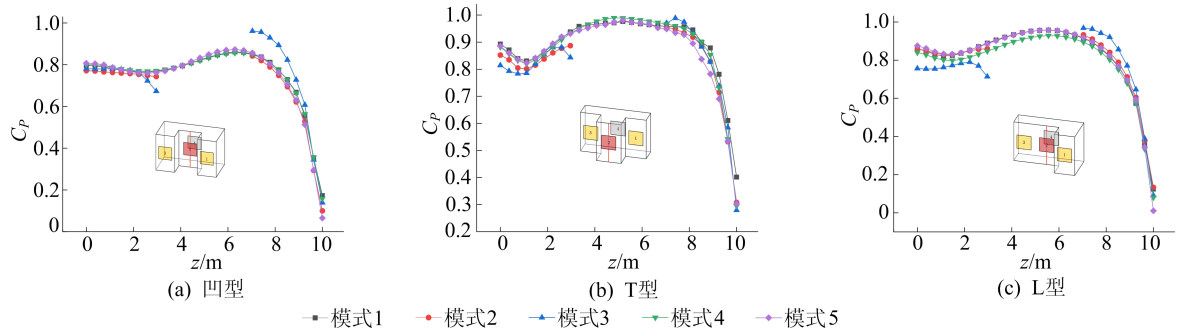


图 10 迎风面(A2面)竖直中线外表面风压系数在 5 种洞口模式下的变化

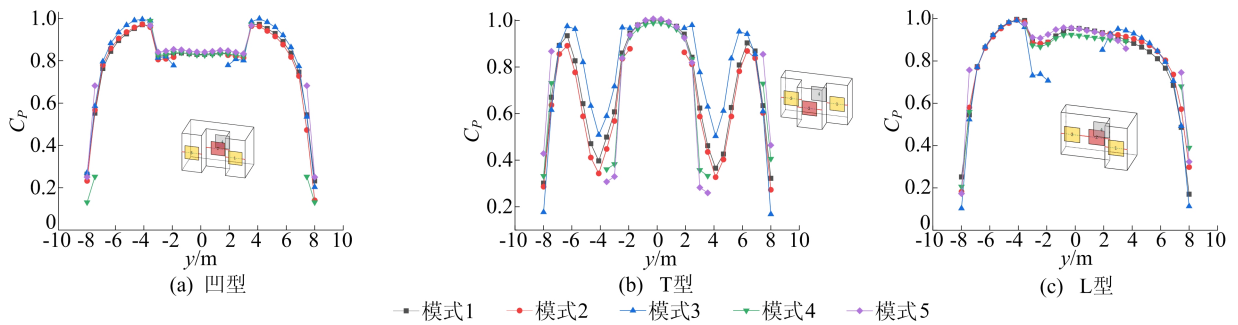


图 11 迎风面横向中线外表面风压系数在 5 种洞口模式下的变化

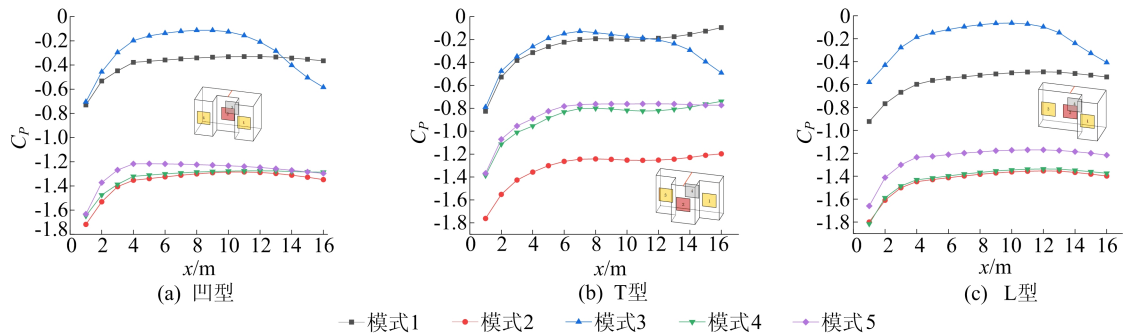


图 12 屋面中线内外风压合力下合风压系数在 5 种洞口模式下的变化

T 型建筑 5 种洞口模式下迎风面横向中线外表面  $C_p$  差别较大。对比模式 1 与模式 2,单面开洞时,迎风面横向中线处  $C_p$  总体略低于封闭模式。对比模式 1 与模式 3,模式 3 横向中线处  $C_p$  高于模式 1,两者最大差值为 0.198。对于模式 4 和模式 5,两洞口之间的  $C_p$  低于模式 1,洞口两侧则高于模式 1,两者与模式 1 的外表面  $C_p$  最大差值分别为 0.266、0.364。

建筑立面洞口形成的穿堂风会直接影响爬升屋面的气流,因此洞口位置对建筑屋面风压也会产

生影响。下面分析屋面中线处沿顺风向内外风压合力下合风压系数  $C_p$  的分布特点。

由图 12 可知:3 类异型建筑屋面前沿吸力最大,合风压系数  $C_p$  达到最大值;除模式 3 与其他模式存在差异,其余 4 种模式呈相似的变化趋势,且与模式 1 相比, $C_p$  增大,其中模式 2 增幅最大,凹型、T 型和 L 型建筑平均增幅分别为 348.6%、493.6%、250.7%;模式 3 与模式 1 相比,两面开洞时,虽然屋面后沿的  $C_p$  显著增大,但从总体看, $C_p$  却有所降低。

## 2.2 异型建筑与立方体型建筑风压对比分析

3 类异型建筑模式 3 与模式 1 的  $C_p$  差异最大,在两面开洞时(模式 3),洞口上、下缘存在骤增和骤减现象。模式 3 下,3 类异型建筑与立方体型建筑在  $z=5\text{ m}$  处的水平剖面风速流线图如图 13 所示。

立方体型建筑两面开洞时,进入迎风面洞口的

一部分气流,直接穿过建筑汇入尾流,造成此区域气流复杂流动<sup>[16]</sup>。两面开洞时,3 类异型建筑水平剖面风速流线与立方体型建筑类似,但由于存在凸出或凹进区域,易产生气旋,气流对 3 类异型建筑的撞击作用较立方体型建筑的相同区域严重。

模式 3 下,4 类建筑迎风面竖直中线、横向中线处外表面  $C_p$  对比如图 14 所示。

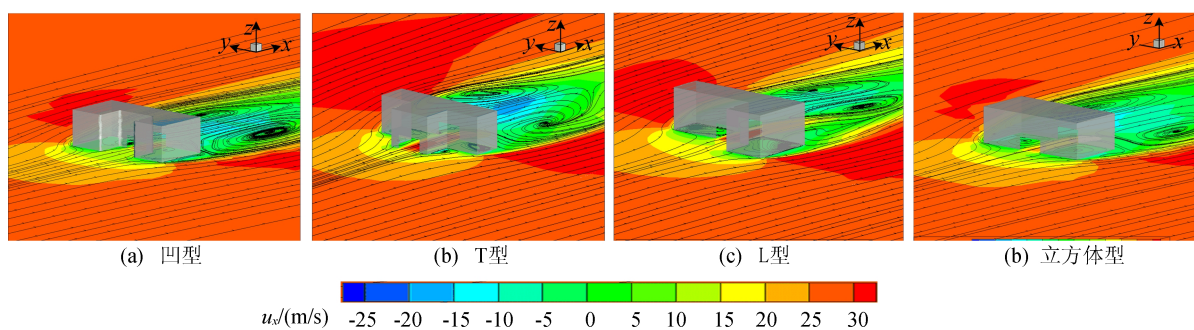


图 13 模式 3 下 4 类建筑在  $z=5\text{ m}$  处水平剖面风速流线图

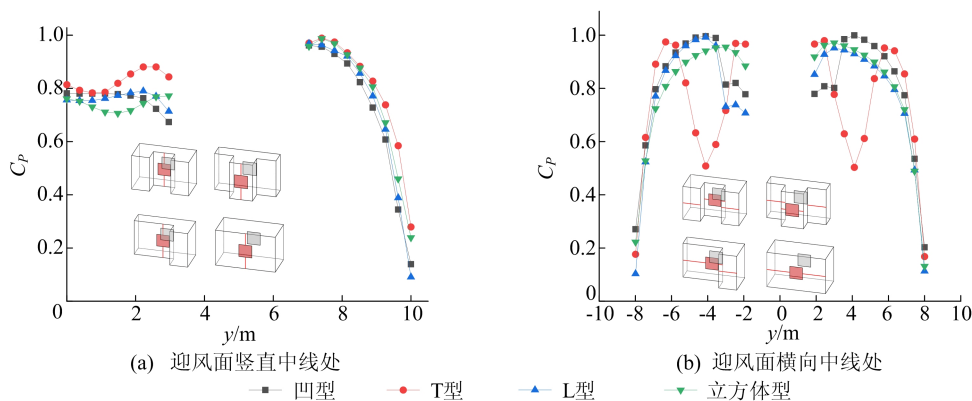


图 14 模式 3 下 4 类建筑迎风面中线外表面  $C_p$  对比

由图 14a 可知:两面开洞时,凹型建筑与 L 型建筑洞口上、下缘的  $C_p$  均低于立方体型建筑,在洞口下缘  $C_p$  出现最小值,分别为 0.673、0.713; T 型建筑洞口下部  $C_p$  呈先降低后增高再降低的趋势,与立方体型建筑洞口下部  $C_p$  分布相似,在洞口上部  $C_p$  高于立方体型建筑;4 类建筑最大  $C_p$  均出现在 7.4 m 高度处;凹型建筑与 L 型建筑洞口上、下缘  $C_p$  差值较大,分别为 0.288、0.255,高于立方体型建筑洞口上、下缘  $C_p$  差; T 型建筑洞口上、下缘  $C_p$  差值为 0.137,低于立方体型建筑洞口上下缘  $C_p$  差。

由图 14b 可知:两面开洞时,凹型、L 型和立方体型建筑均在洞口附近出现  $C_p$  骤减现象,结合图 13 分析可知,来流风在转角处产生吸力,导致异型建筑洞口  $C_p$  相较于立方体型建筑降低,其中 L 型建筑相比于立方体型建筑降幅最大,最

大降幅达 20.0%;经过 T 型建筑的来流风在转角处形成涡旋,导致转角处  $C_p$  骤减,其相对于立方体型建筑降幅达 24.9%。

## 3 结 论

本文以 3 类异型低矮建筑为对象,研究洞口设置方式对建筑内外表面风压系数分布的影响,并与立方体型建筑进行对比,得到以下结论:

1) 3 类异型建筑 5 种洞口模式下外表面平均风压系数  $\bar{C}_p$  分布趋势基本一致,仅个别区域存在一定差异。洞口引起的穿堂风对 3 类异型建筑外表面  $\bar{C}_p$  的影响不同,凹型建筑形成的穿堂风显著降低局部区域的外表面  $\bar{C}_p$ ,而 T 型、L 型建筑的穿堂风则会提高外表面局部区域的  $\bar{C}_p$ 。穿堂风会导致建筑内表面  $\bar{C}_p$  降低,较强烈的穿堂风会使

建筑内表面 $\bar{C}_P$ 由正值转为负值控制。

2) 在迎风面竖直中线位置,3类异型建筑迎风面(A2面)无洞口时,外表面 $C_P$ 分布趋势大致相同,沿高度均呈先减小后增大再减小的趋势;单面开洞时, $C_P$ 与无洞口时接近;两面开洞时,洞口上、下缘存在 $C_P$ 骤增、骤减现象。在迎风面横向中线位置,3类异型建筑5种洞口模式下外表面 $C_P$ 呈大致相同的分布趋势;凹型、L型建筑迎风面横向中线处开洞模式外表面 $C_P$ 与封闭模式差别不大,仅在洞口附近略有差异;T型建筑单面双开洞时,洞口之间的 $C_P$ 低于封闭模式,洞口两侧的 $C_P$ 则高于封闭模式。

3) 在屋面中线位置,3类异型建筑除两面开洞外,其他开洞模式较封闭模式,建筑屋面内外风压合力下合风压系数 $C_P$ 增大,其中单面开洞增幅最大,凹型、T型和L型建筑 $C_P$ 平均增幅分别为348.6%、493.6%、250.7%;两面开洞时,从总体看, $C_P$ 降低。

4) 在模式3下,凹型和L型建筑在洞口附近,迎风面竖直中线和横向中线处外表面 $C_P$ 低于立方体型建筑;T型建筑在洞口上部 $C_P$ 高于立方体型建筑,经过T型建筑的来流风在转角处形成涡旋,导致转角处 $C_P$ 骤减。

### [参 考 文 献]

[1] LOMBARDO F T, MASON M S, DE ALBA A Z. Investigation of a downburst loading event on a full-scale low-rise building[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 182: 272-285.

[2] 汪之松, 陈圆圆, 方智远, 等. 下击暴流作用下低矮建筑风荷载特性试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(9): 120-126.

[3] 柳广义, 吉柏锋, 瞿伟廉, 等. 下击暴流下立方体建筑物表面风压数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 37-41.

[4] 陈波, 贾路宇, 田晨. 下击暴流作用下平屋面风荷载 CFD 数

值模拟[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(1): 140-144.

- [5] YAN B W, MA C Y, YUAN Y J, et al. Modeling of downburst outflows and wind pressures on a high-rise building under different terrain conditions[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 48: 103738.
- [6] 孙芳锦, 张尚祥, 余磊, 等. 多个主开洞的低矮建筑风压特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(2): 314-320.
- [7] 高菁旋. 开洞超高层建筑风致内压和净压的干扰效应研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [8] 黄成杰. 开洞高层建筑风致平均内压及干扰效应数值模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [9] HOLMES J D. Physical modelling of thunderstorm downdrafts by wind tunnel jet[C]//Proceedings of the Second AWES Workshop. [S. l. : s. n. ], 1992: 29-32.
- [10] 李宏海, 欧进萍. 下击暴流作用下建筑物表面风压分布模拟[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊2): 147-151.
- [11] SENGUPTA A, SARKAR P P. Experimental measurement and numerical simulation of an impinging jet with application to thunderstorm microburst winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96: 345-365.
- [12] ZHANG Y, HU H, SARKAR P P. Comparison of microburst-wind loads on low-rise structures of various geometric shapes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 133: 181-190.
- [13] WOOD G S, KWOK K C S, MOTTERAM N A, et al. Physical and numerical modelling of thunderstorm downdrafts[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89: 535-552.
- [14] ZHANG Y, SARKAR P, HU H. An experimental study on wind loads acting on a high-rise buildings model induced by microburst-like winds[J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 50: 547-564.
- [15] 郭广帅. 下击暴流作用下开洞建筑表面风压分布特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [16] 王辉, 周正, 戴根, 等. 下击暴流作用下低层建筑立面开洞对内外风压分布影响的研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(5): 1903-1909.

(责任编辑 张淑艳)