

任兰红, 单军, 徐嵩. 闽南红砖大厝庭院形态对屋面风压与风场的影响研究[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 94-99. [REN Lanhong, SHAN Jun and XU Song. Impact of Courtyard Morphology on Wind Pressure and Wind Field of Red Brick Dwelling in Minnan[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 94-99. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.018.]

闽南红砖大厝庭院形态对屋面风压与风场的影响研究^{*}

任兰红¹, 单军¹, 徐嵩²

(1. 清华大学 建筑学院, 北京 100084; 2. 天津城建大学 建筑学院, 天津 300384)

摘要: 基于 ANSYS Fluent 软件选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 以闽南红砖大厝民居为对象, 通过数值计算、分组对比分析庭院与厝埕的进深对风场及屋面风压分布的影响并探讨利于抗风的建筑形式。研究表明: ①随院落宽度的增加屋面最大平均风压系数绝对值呈现显著地降低又升高, 最大降低 21.2%; 庭院宽度与进深的比例为 1.5 时屋面最大平均风压系数和整体平均风压系数绝对值最小, 利于防风。②随院落进深的增加, 屋面最大平均风压系数绝对值呈现显著地降低又升高, 最大降低 26.0%; 庭院宽度与进深的比例为 0.67 时屋面最大平均风压系数和整体平均风压系数绝对值最小, 利于防风。③有厝埕的屋面最大平均风压系数绝对值、整体平均风压系数绝对值与无厝埕相比均显著下降, 最大平均风压系数绝对值降低了 48.7%; 随着厝埕进深的减小, 除少量测点外, 平均风压系数绝对值降低, 降低最大幅度为 26%。

关键词: 闽南红砖大厝; 庭院宽度和进深; 厝埕; 风压系数

中图分类号: X43; X915.5; U448; TU312.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)01-0094-06
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.018

地处我国东南的闽南沿海为台风多发之地, 闽南沿海传统民居在台风的适应性层面有诸多应对^[1], 对闽南沿海传统民居台风环境适应性的研究可以挖掘台风易发区具有良好抗风性能的地域性建造规律, 用于聚落保护^[2-3]、启迪兼顾抗风性能与地域特色的闽南建筑设计, 具有重要的理论意义与应用价值。

近年来, 对传统民居抗风性能的研究逐渐由定性^[4-6]转为定量^[7-9], 研究方法包括实测研究、风洞实验^[10]与计算机模拟研究^[11], 其中 CFD 数值模拟技术的运用已经日趋完善, 并取得了丰富的成果: 李煜等通过 CFD 数值模拟研究建筑高度、建筑与山脚间距以及山地地形对高层塔式仿古建筑表面的风压分布和风场绕流特性, 得出高层塔式建筑表面风压绝对值与建筑高度成正比, 与建筑和山脚的间距成反比^[12]; 刘顺等通过数值模拟研究多种风向角下建筑阳台对其表面风压与风场绕流的影响, 得出建筑阳台会引起迎风面风压沿高度方向的变化, 尤其对迎风面顶部阳台及之上区域的影响最显著^[13]; 严彪等通过数值模拟得出土楼屋盖不利于防风, 提出在土楼屋脊设置导风环板实现疏导屋盖风压的气动抗风措施^[1]。因而知, 通过 CFD 对传统建筑进行风荷载特性数值模拟是一个可拓展的研究方向, 具有实际应用价值。

由于闽南沿海民居种类众多, 不同类型民居

应对台风环境的措施有显著差异, 因此有必要对特定的闽南沿海民居的风场特性进行深入研究。因此, 本文采用得到广泛应用的 CFD 求解器之一 ANSYS Fluent 17.0 对闽南红砖大厝民居屋面的风压特性进行数值模拟, 通过分组对比探讨其特有的庭院与前埕的宽度与进深对屋面极值风压系数分布的影响, 进而定量分析其抗风性能, 为台风易发区闽南民居的抗风优化设计提供参考。

1 研究对象

闽南红砖大厝是闽南地区(厦门、漳州与泉州)特色的传统民居之一, 建筑布局为对称的合院, 通常坐北朝南, 典型形制是四合中庭形式的三间张(三开间)两落大厝, 南侧入口建筑为“下落”, 北侧主体为“上落”, 亦称“顶落”, 两侧厢房为“榑头”。民居正前方通常是由围墙围合下落建筑形成的空地, 称为“埕”, 其宽度与主厝宽度一致, 为加工农业或副业的场地。

本文选取厦门鼓浪屿历史街区典型的三间张闽南红砖大厝为研究对象(表 1 中 RB 模型), 其长(D_1)宽(L)分别为 18.00 m、12.10 m, 檐口高度 4.3 m, 庭院宽度(L_1)和进深(L_2)均为 4.46 m, 厝埕进深为 6.05 m(图 1), 屋面坡度 θ 为 21.8°。基

* 收稿日期: 2020-07-17

修回日期: 2020-09-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“应对台风-暴雨耦合灾害的海湾型城市智慧韧性规划理论研究”(52078330)

第一作者简介: 任兰红(1986-), 女, 汉族, 山东临沂人, 博士, 助理研究员, 主要从事建筑防风研究。E-mail: qlly222@126.com

通讯作者: 单军(1966-), 男, 汉族, 北京人, 教授, 博士生导师, 主要从事民族与乡土建筑研究。E-mail: shanjun@tsinghua.edu.cn

于典型模型 RB, 以庭院的宽度、进深以及厝埕的进深为变量, 据单一变量原则, 依次产生文中的研究模型共 3 组: ①第一组 FA、FB、FC, 探讨庭院宽度对屋面风压及风场的影响; ②第二组 FA、FD、FE, 探讨庭院进深对屋面风压及风场的影响; ③第三组 FA、RA、RB、RC, 探讨厝埕及其进深对屋面风压及风场的影响, 共 8 个(表 1)。

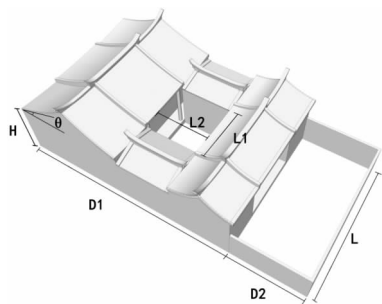


图 1 厦门鼓浪屿历史街区典型的三间张闽南红砖大厝

2 数据来源与模拟方法

2.1 计算公式

(1) 模型选取

本研究采用 RNG 湍流模型, 通过修正湍流黏度, 并且考虑平均流动中的旋转以及旋流流动可以更加好地处理高应变率以及流线弯曲度较大的流动, 进而使得数值模拟的结果更加准确。其流体控制微分方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_k \eta_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + \rho \varepsilon; \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_\varepsilon \eta_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned} \quad (1)$$

式中: k 为湍流动能; ε 为湍流耗散率; $\eta_{eff} = \gamma_t + \eta_t$, $\eta_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}$ 为湍动黏度; C_μ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 α_k 和 α_ε 均为湍流模型的经验系数; G_k 为由于平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项。

(2) 风压系数

风压系数是无量纲常数, 可以评估风对建筑的作用力, 以模型屋檐高度 H 处的风压作为无量纲化的参考风压, 则某一点的风压系数为:

$$C_{pi} = p_{w,m} / (\frac{1}{2} \rho_a v_H^2). \quad (3)$$

式中: $p_{w,m}$ 为模型表面某一点的风压; ρ_a 为空气的

质量密度; v_H 为屋檐 H 高度处的平均风速。

为分析屋面不同区域风压分布, 对屋面进行分区: 由上至下, 由左至右, 依次为 1~16(图 2), 每个分区内以 1 m×1 m 为单元, 取其几何中心作为测点, 并计算对各区域内平均风压系数 \bar{C}_p , 即:

$$\bar{C}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{pi}. \quad (4)$$

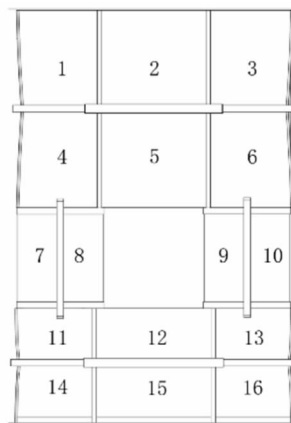


图 2 屋面分区编号

2.2 计算域与网格设置

本研究计算域高度取 3 倍建筑高度, 长度、宽度均为建筑边长的 6 倍, 建筑物位于流域前 1/3, 保证尾流充分发展, 控制阻塞比不超过 3%。该计算区域的网格划分采用非结构化四面体网格, 对建筑和近地面区域进行适当加密, 其它区域网格逐渐稀疏。

2.3 风速与风向选取

登台入闽型是发生频率最高的路径^[14], 已有学者对登台入闽、登陆地点为厦门的台风风场的风向进行实测得到台风风向主要是 ENE 67.5°^[15], 即本研究数值模拟的风向。据厦门气象统计得出超强台风在登录台风中比例最大, 即以超强台风的最低值 51.0 m/s 为确定风速的依据。

2.4 边界条件设置

模拟的地面粗糙度定为 B 类地区, 即 0.16; 来流入口边界条件为速度入口, 出口边界条件采用完全发展的出流边界条件; 计算域顶部以及两侧采用自由滑移的壁面条件; 建筑表面与地面采用无滑移壁面条件; 残差小于 10^{-4} 时为收敛判断标准。

表 1 研究模型汇总

模型编号	庭院宽度/进深	庭院宽度 L_1 /m	庭院进深 L_2 /m	厝埕宽度/进深	厝埕宽度 L /m	厝埕进深 D_2 /m
FA	1.00	4.46	4.46	—	—	—
FB	1.50	6.69	4.46	—	—	—
FC	2.00	8.92	4.46	—	—	—
FD	0.67	4.46	6.66	—	—	—
FE	0.80	4.46	5.58	—	—	—
RA	1.00	4.46	4.46	1.50	12.10	8.07
RB	1.00	4.46	4.46	2.00	12.10	6.05
RC	1.00	4.46	4.46	2.50	12.10	4.84

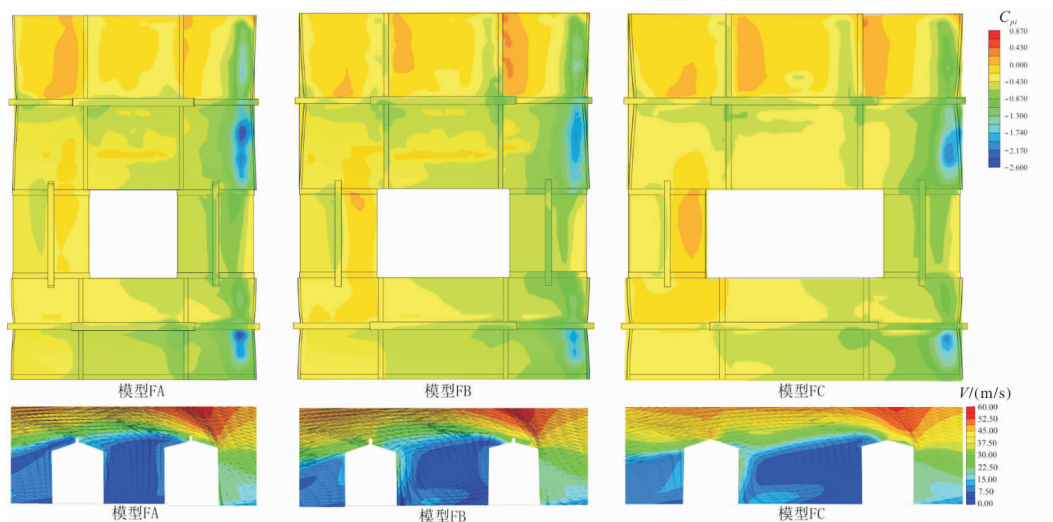


图3 不同庭院宽度条件下闽南红砖大厝屋面平均风压系数分布及庭院东西向风场绕流

3 结果与分析

以上述三组模型为研究对象,计算建筑表面风压分布及风场,对比分析闽南红砖大厝的两种庭院形式:四合院围合而成的庭院与由墙体和下落围合而成的厝埕的几何形态对容易受到风致破坏的屋面的风压系数及其风场的影响,特别是对屋面产生极大吸力而引起破坏的最大风压系数绝对值及其空间分布特征的分析。

3.1 庭院宽度对屋面风压系数的影响

根据图3第一组模型中不同庭院宽度条件下闽南红砖大厝屋面平均风压系数及庭院东西向风场可知,在三个模型的上落和下落的背风面的东侧均形成各屋面的最大平均风压系数绝对值。在模型FA条件下庭院宽度较小,庭院东西向未形成完整的由下至上的反向旋涡;在庭院进深一定时随着庭院宽度的增大,庭院东西向逐渐形成完整的由下至上的反向旋涡。模型FB条件下庭院东西向形成完整的由下至上的反向旋涡,反向旋涡可以减弱来流的冲击力,减弱气流在屋面的分离和再附着,因此模型FB屋面的最大平均风压系数绝对值小于模型FA。当庭院的宽度进一步增大,即模型FC的庭院东侧反向旋涡距离东侧榫头较远,反向气流对来流的减弱程度降低,进而使模型FC屋面的最大平均风压系数绝对值较模型FB有所增大。综上,随院落宽度的增加上落和下落的最大平均风压系数绝对值呈现显著地降低又升高:上落屋面最大平均风压系数绝对值依次为2.61、2.06、2.18,最大降低了21.1%,下落屋面最大平均风压系数绝对值依次为2.50、1.97、2.15,最大降低了21.2%,即庭院宽度与进深的比例为1.5时对屋面产生最大风致破坏的反向吸附力最小,利于防风。

基于图4不同庭院宽度条件下闽南红砖大厝屋面分区测点的平均风压系数可知,除西北测点1外,随着庭院宽度的增加,屋面平均风压系数绝对值均有所降低,其中测点6、16、9、10先降低又升高,分别对应上落、下落屋面最大风压系数绝对值及东侧榫头背风面和迎风面,其它测点均依次降低,主要是由于庭院宽度进一步增加后东

西向反向旋涡减弱来流气流的强度降低。整体上,庭院宽度与进深的比例为1.5时屋面整体平均风压系数绝对值最小。

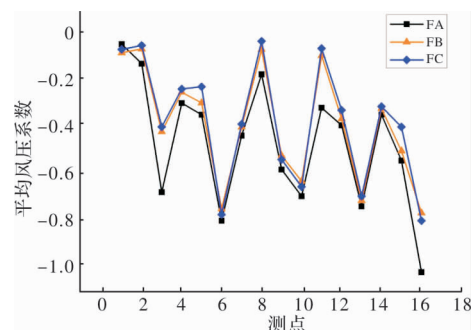


图4 不同庭院宽度条件下闽南红砖大厝屋面分区测点的平均风压系数

3.2 庭院进深对屋面风压系数的影响

根据图5第二组模型中不同庭院进深条件下闽南红砖大厝屋面平均风压系数及庭院南北向风场可知,在模型FA条件下庭院进深较小,庭院南北向未形成完整的由下至上的反向旋涡;在庭院宽度一定时随着庭院进深的增大,庭院南北向逐渐形成完整的由下至上的反向旋涡。模型FD条件下庭院南北向形成完整的由下至上的反向旋涡,反向旋涡可以减弱来流的冲击力,减弱气流在屋面的分离和再附着,因而模型FD屋面的最大平均风压系数绝对值小于模型FA;当庭院的宽度进一步增大,即模型FE,庭院北侧反向旋涡距离上落较远,反向气流对来流的减弱程度降低,进而使模型FE上落屋面的最大平均风压系数绝对值较模型FD有所增大。由于模型FE与FD的庭院南侧风场差异较小,因而模型FE下落屋面的最大平均风压系数绝对值与模型FE差值较小。综上,上落最大平均风压系数绝对值呈现显著地降低又升高:随庭院进深的增加上落屋面最大平均风压系数绝对值依次为2.61、1.92、2.54,最大降低了26.0%,下落屋面最大平均风压系数绝对值依次为2.50、2.29、2.25,最大降低了21.2%,即庭院宽度与进深的比例为0.67时对屋面产生最大风致破坏的反向吸附力最小,利于防风。

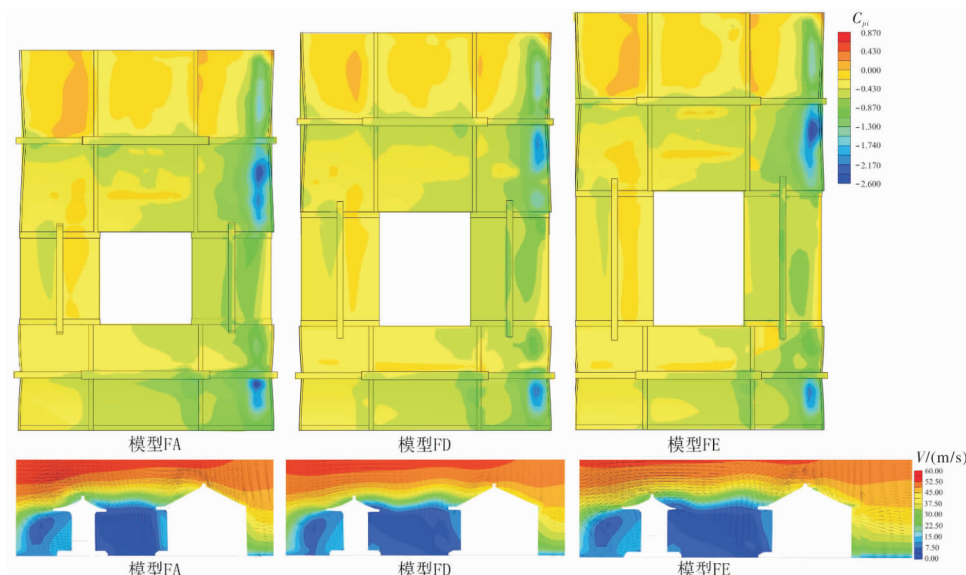


图5 不同庭院进深条件下闽南红砖大厝屋面平均风压系数分布情况及庭院南北向风场绕流

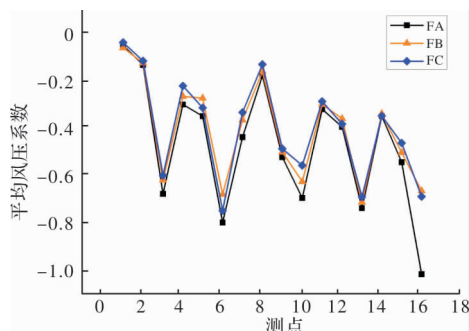


图6 不同庭院进深条件下闽南红砖大厝屋面分区测点的平均风压系数

基于图6不同庭院进深条件下闽南红砖大厝屋面分区测点的平均风压系数可知,除西北测点1外,随着庭院进深的增加,屋面平均风压系数绝对值均有所降低,其中测点6和16、5先降低又小幅度升高,分别对应上落、下落屋面最大风压系数绝对值及上落背风屋面中间区域,即庭院开间在上落背风屋面所对应的区域,其它测点均依次降低,主要是由于庭院进深进一步增加后南

北向反向旋涡减弱来流气流的强度降低而使模型FE局部受到庭院反向旋涡影响的屋面平均风压系数绝对值有所增加。整体上,庭院宽度与进深的比例为0.67时屋面整体平均风压系数绝对值最小。

3.3 厝埕进深对屋面风压系数的影响

根据图7第三组模型中不同厝埕进深条件下闽南红砖大厝屋面平均风压系数与南北向风场特征可知,在三个模型的上落和下落的背风面的东侧均形成各屋面的最大平均风压系数绝对值。有厝埕的模型RA、RB、RC屋面最大平均风压系数绝对值与无厝埕模型FA相比均有显著下降,是由于厝埕的增加使屋面尾流抬升,将上落和下落背风屋面的气流附着强度降低;由模型FA至模型RC,随着厝埕进深的减小,上落和下落屋面的最大平均风压系数绝对值呈现依次降低:上落屋面最大平均风压系数绝对值依次为2.61、1.97、1.88、1.34,最大降低了48.7%,下落屋面最大平均风压系数绝对值依次为2.50、1.46、1.42、1.32,最大降低了47.2%,即对屋面产生最大风致破坏的反向吸附力逐渐降低,利于防风。

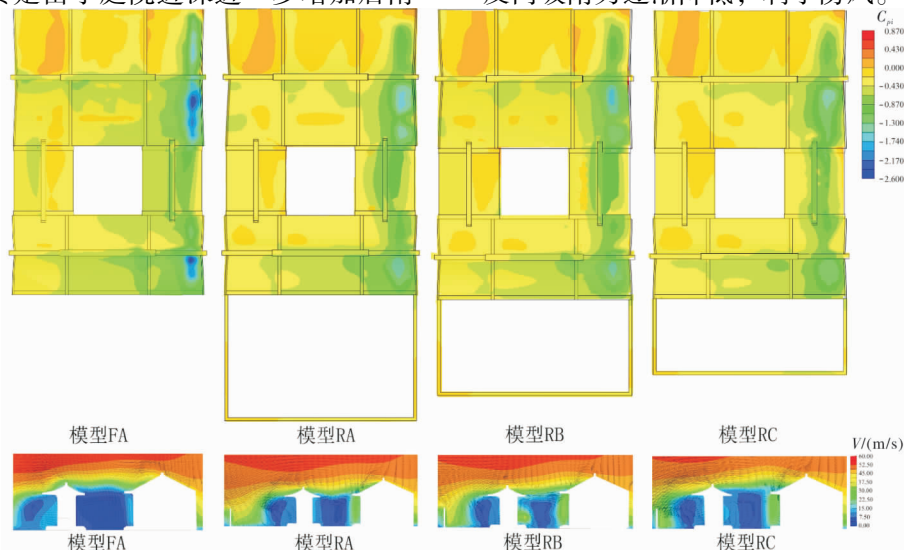


图7 不同厝埕进深条件下闽南红砖大厝屋面平均风压系数分布情况

根据图 8 不同厝埕进深条件下闽南红砖大厝屋面分区测点的平均风压系数可知, 各测点在增加厝埕后的屋面平均风压系数绝对值均有所降低, 充分说明厝埕矮墙可以抬升尾流高度, 降低气流分离与附着的强度, 从而有利于提高抗风性能。随着厝埕进深的减小, 除测点 8 和 10 平均风压系数绝对值有小幅增加(仍小于无厝埕的情况)外, 平均风压系数绝对值降低, 降低最大幅度为 26%。

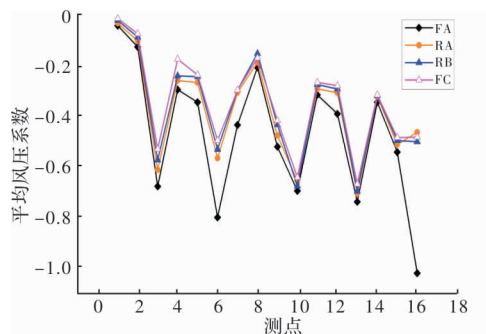


图 8 不同厝埕进深条件下闽南红砖大厝屋面分区测点的平均风压系数

4 结论

基于 CFD 数值模拟的上述对闽南红砖大厝民居不同庭院宽度、进深及厝埕进深对风场及屋面风压分布影响的研究, 得出结论如下:

(1) 院落进深一定时, 随院落宽度的增加上落和下落的最大平均风压系数绝对值呈现显著地降低又升高, 最大降低了 21.2%; 庭院宽度与进深的比例为 1.5 时对屋面产生最大风致破坏的反向吸附力和屋面整体平均风压系数绝对值最小, 利于防风。

(2) 院落宽度一定时, 随院落进深的增加, 屋面最大平均风压系数绝对值呈现显著地降低又升高, 最大降低了 26.0%, 庭院宽度与进深的比例为 0.67 时对屋面产生最大风致破坏的反向吸附力和屋面整体平均风压系数绝对值最小, 利于防风。

(3) 有厝埕的屋面最大平均风压系数绝对值、整体平均风压系数绝对值与无厝埕相比均有显著下降, 最大平均风压系数绝对值降低了 48.7%; 随着厝埕进深的减小, 除少量测点外, 平均风压系数绝对值降低, 降低最大幅度为 26%。

参考文献:

- [1] 严彪, 彭兴黔, 施维娟, 等. 福建土楼屋盖风压气动抗风措施研究[J]. 青岛理工大学学报, 2017, 38(3): 17-22, 27.
- [2] 任兰红, 曾坚, 曾穗平, 等. 福建沿海历史街区风荷载特性数值模拟与风险防控方法[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 103-109.
- [3] 任兰红, 曾坚, 曾穗平. 山地地形对鼓浪屿历史文化街区风荷载作用效应研究[J]. 山地学报, 2019, 37(1): 41-52.
- [4] 郑力鹏. 坡屋顶研究三题[J]. 建筑学报, 2003(8): 65-66.
- [5] 郑力鹏. 古代建筑防风术之借鉴[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1997(1): 113-116.
- [6] 王海松, 周伊利, 莫弘之. 台风影响下的浙东南传统民居营建技艺解析[J]. 新建筑, 2012(1): 144-147.
- [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.
- [8] ZHANG Lili, HOU Jiawen, YU Yan, et al. Numerical simulation of outdoor wind environment of typical traditional village in the northeastern Sichuan Basin [J]. Procedia Engineering, 2017, 205(11): 923-929.
- [9] FAUSTO Arpino, ASSUNTA Pelliccio, GINO Cortellesa. Experimental and numerical investigation of the effects of wind exposure on historical towns-A case study from Tivissa, Spain [J]. Energy Procedia, 2017, 133(10): 372-383.
- [10] 林钰琼, 姚佳伟, 郑静云, 等. 基于风洞可视化的环境性能建筑生形方法研究[J]. 南方建筑, 2018(2): 24-29.
- [11] 任兰红. 福建沿海部分历史文化街区减缓台风灾害措施研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [12] 李煜, 周岱, 汪汛, 等. 山区地形条件下塔式仿古建筑风压与风场绕流分析[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(7): 789-796.
- [13] 刘顺, 李秋胜. 阳台对低矮房屋表面风荷载影响的数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(7): 92-100.
- [14] 魏应植. 影响福建台风的路径、灾害和风雨特征研究[C]//中国气象学会 2007 年年会天气预报预警和影响评估技术分会场论文集. 广州: 中国气象学会, 2007: 10.
- [15] 雷鹰, 李涛, 张建国, 等. 厦门地区台风风场特性的数值模拟[J]. 工程力学, 2014(1): 122-128.

Impact of Courtyard Morphology on Wind Pressure and Wind Field of Red Brick Dwelling in Minnan

REN Lanhong¹, SHAN Jun² and XU Song

(1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Architecture, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The RNG $k-\varepsilon$ turbulence model is selected in ANSYS Fluent software in the research, the Red Brick Dwelling in Minnan are chosen as research object. Analysis of the influence of courtyard and courtyard before dwelling on the wind field and roof wind pressure distribution were discussed, and the form of dwelling of wind resistance was discussed based on numerical calculation. Research showed that: ①The absolute value of the maximum average wind pressure coefficient of the roof decreased significantly and rose with the increase of the courtyard width, with a maximum decrease of 21.2%. When the ratio of the courtyard width to the depth was 1.5, the maxi-

imum average wind pressure coefficient and the absolute value of the overall average wind pressure coefficient were the smallest, which was good for wind protection. ②As the depth of the courtyard increased, the absolute value of the maximum average wind pressure coefficient of the roof decreased significantly, with a maximum decrease of 26.0%. When the ratio of the courtyard width to the depth was 0.67, the maximum average wind pressure coefficient and the absolute value of the overall average wind pressure coefficient of the roof were the smallest, which was good for wind protection. ③The absolute value of the maximum average wind pressure coefficient and the absolute value of the overall average wind pressure coefficient of the roofs with courtyard before dwelling were significantly reduced compared with those without courtyard before dwelling, and the absolute value of the maximum average wind pressure coefficient was reduced by 48.7%. As the depth of courtyard before dwelling decreased, except for a small number of measuring points, the absolute value of the average wind pressure coefficient decreased, with a maximum decrease of 26%.

Key words: Red Brick Dwelling in Minnan; width and depth of courtyard; courtyard before dwelling; pressure coefficient

(上接第 75 页)

Third Discussion on the Basic Definition and Characteristics of Disaster Defense Capability

KONG Feng^{1,2}

(1. College of Humanities and Development Studies, China Agriculture University, Beijing 100083, China;

2. Center for Crisis Management Research, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Integrated disaster defense capability assessment has become one of the important contents of emergency management work and research. On the basis of previous research, this research first re-understands the integrated disaster defense capability from the perspective of the complexity characteristics of disaster system and the requirements of emergency management in recent years, and then summarizes the existing multi-attribute comprehensive evaluation methods of disaster defense capability. Taking meteorological disaster as an example, 6 single index systems of integrated meteorological disaster defense capability are constructed through 68 indexes, namely system adaptability, risk identification capability, disaster preparedness and emergency response capability, technology and engineering defense capability, economic support and disaster reduction support capability, department linkage and social security capability. The method of data envelopment analysis is used to evaluate the 6 single and integrated meteorological disaster defense capability of 31 provincial administrative units in China, and rank the ability. The results show that the 6 single and integrated meteorological disaster defense capability of most provinces in China are in low level, and have different regional differences. Among them, the proportion of 31 provinces in the middle and lower levels in system adaptability, risk identification ability, disaster preparedness and emergency response ability, technical and engineering defense ability, economic support and disaster reduction support ability, department linkage and social security ability, and integrated meteorological disaster defense ability reach 70.9%, 38.7%, 32.3%, 77.4%, 67.7%, 51.6% and 77.4% respectively. The integrated disaster defense capability does not match the level of economic development in China, and there is still much room for further improvement.

Key words: integrated disaster defense capability evaluation; emergency management; economic support; disaster reduction guarantee; technology and engineering defense capability; Anthropocene; climate change