

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.04.002

基于 CFD 的台风下住宅入户门安全隐患分析

陈效平¹, 何志鹏¹, 马文涛², 敖鑫¹, 文学¹, 刘志辉¹

(1. 邵阳学院 高效动力系统智能制造湖南省重点实验室, 湖南 邵阳 422099;

2. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为明确台风引发住宅入户门安全事故的机理, 以台风风向、入户门开角为自变量, 采用 CFD 数值模拟方法, 搭建某住宅的台风绕流模型, 通过虚拟实验得到台风绕流压强场, 再对比分析不同工况下入户门表面的风压分布及风载荷大小, 进而确定引发入户门安全事故的主要因素。结果表明: 台风下入户门所受风载荷大小与风向密切相关, 与门开角的关联性不大; 当台风风向为 20° 时入户门所受风载荷最大, 最易引发入户门安全事故。

关键词: 台风灾害; 入户门; 建筑安全; CFD

中图分类号: TU312⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)04-0010-07

引文格式: 陈效平, 何志鹏, 马文涛, 等. 基于 CFD 的台风下住宅入户门安全隐患分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(4): 10-16.

CFD-Based Analysis of Safety Hazards of Residential Entry Doors Under Typhoons

CHEN Xiaoping¹, HE Zhipeng¹, MA Wentao², AO Xin¹, WEN Xue¹, LIU Zhihui¹

(1. Hunan Key Laboratory of Smart Manufacturing for High-Efficiency Power Systems, Shaoyang University, Shaoyang Hunan 422099, China; 2. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of a clarification of the mechanism of safety accidents brought about by typhoons on residential entrance doors, a CFD numerical simulation method has been adopted with typhoon wind direction and entrance door opening angle as independent variables to build a typhoon flow model for a certain residential building, thus obtaining the pressure field of typhoon flow based on virtual experiments, followed by a comparison and analysis of the wind pressure distribution and load size on the entrance door surface under different working conditions so as to determine the main factors causing entrance door safety accidents. The results indicate that the wind load on the entrance door under typhoons is closely related to the wind direction, but not much related to the door opening angle; with a 20° wind direction of a typhoon, the maximum wind load thus obtained on the entrance door is likely to cause safety accidents.

Keywords: typhoon disaster; residential entrance door; building safety; CFD

台风对人身财产安全构成了巨大威胁^[1]。2023 年有十余场台风在南海至西北太平洋海域生成, 第 9 号台风“苏拉”(No.2309)于 9 月初登陆广东珠海, 致使我国南方大部分铁路于 9 月 1 号、2 号停运。台

风登陆引发的建筑事故屡见不鲜, 与砖混结构等基础设施相比, 门窗等配套设施的抗风强度相对较低。尤其是玻璃材质的门窗, 在台风天气下更容易受损^[2-4], 且被台风破坏的门窗极易对人身财产造成二次伤害^[5]。

收稿日期: 2024-05-31

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(20B534); 湖南省自然科学基金资助面上项目(2021JJ30631); 邵阳学院研究生科研创新基金资助项目(CX2023SY081)

作者简介: 陈效平, 男, 邵阳学院讲师, 博士, 主要研究方向为高性能抗风结构设计, E-mail: chenxping99@163.com

因此,研究台风致门窗损坏的机理,对门窗的抗风设计以及安全隐患排查具有重要的指导意义^[6-7]。

早在1992年,黄本才等^[8]便研究了风致窗玻璃破碎这类工程事故,分析了玻璃窗上风荷载的合理取值,为玻璃窗的抗风设计奠定了基础;布占宇等^[9]研究了台风致窗户破坏时房屋的振动响应,发现门窗被台风破坏后房屋的振动加剧,提出在设计房屋时应考虑门窗破坏等突然开孔的情况;刘何清等^[10]研究了门窗开启对房屋风阻的影响,得出了门窗开启时房屋总风阻的计算式,并编制了相应的计算机程序;林树枝等^[11]研究了台风致厦门市建筑受损的情况,并探讨了强台风环境下的建筑设计方法,发现门窗抗风设计方法的主要缺陷是局部风压取值偏低;赵福云等^[12]通过CFD(computational fluid dynamics)方法研究了风速对多门窗建筑流场的影响,阐述了室内空气流动的物理机制。

随着公众对建筑安全问题的日益关注,抗风门窗产品如雨后春笋般出现。J. J. Bae等^[13]研究了不同风速下卷帘门的风载荷,设计出一款抗风高速卷帘门;A. L. Jaffe等^[14]研究了不同台风风速下车库门的风载荷,预测了导致车库门故障的台风风速;谢继文等^[15]提出了一种能有效抵御台风灾害的窗户保护装置;张乾丰等^[16]针对窗户易被台风卷起物破坏的情况,设计了一款智能抗台风窗户保护装置。综上,目前大部分学者的研究重点在于台风对门窗的致损情况,以及设计抗风门窗等减灾措施,而针对台风天气下门窗引发的次生灾害的研究还较少。

鉴于此,本文从某起入户门安全事故入手,利用计算流体力学(CFD)数值模拟方法,以建筑方位、入户门开角为自变量,研究了强台风天气下某三室两厅住宅的入户门受到的风压及风载荷,分析了造成入户门安全事故的主要因素,以期为此类安全事故的预防提供理论指导。

1 搭建台风绕流模型

1.1 入户门事故分析

图1所示为台风天气下某起入户门安全事故。由图1可见,台风天气下入户门易对人体造成次生伤害。特别是城郊和农村等缺乏防护设施的场所,普遍存在此类隐患^[17]。然而,通过合理的建筑设计,有望减少此类灾害的发生。为此,本文以不同建筑方位、入户门开角的住宅为对象,研究其入户门上的风载荷,分析易引发如图1所示事故的方位与门开角,进而通过设计手段降低此类安全事故的风险。

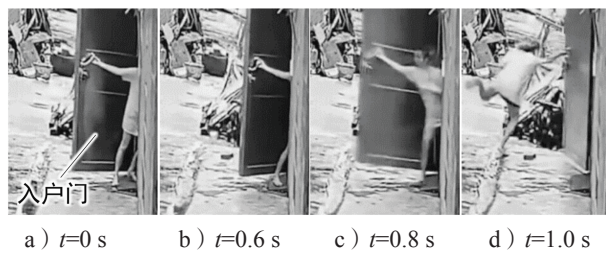


图1 某住宅入户门安全事故

Fig. 1 A safety accident occurrence at a residential entrance door

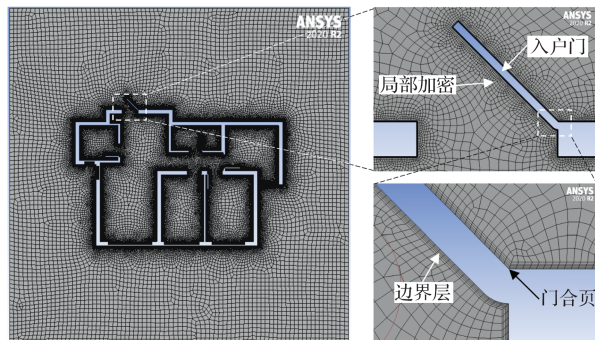
1.2 住宅的几何模型与网格模型

图2a所示为所模拟住宅的几何模型。由图可见:该住宅为三室两厅型,其入户门与图1中相似,均为外开门。该住宅共有6扇门与6面窗,模拟实验中,除入户门以外的门均设为开启,窗户均关闭。根据相对性原理,本文采用台风风向 α 代替建筑方位进行研究, α 与入户门开角 θ 是本研究的自变量。

如图2b所示为所模拟住宅的网格模型。由图可见:网格模型为自适应的四边形网格,全局网格单元尺寸为200 mm;为保证数值模拟的稳定性与精度,对住宅壁面附近的网格进行局部加密,加密网格单元尺寸为10 mm;考虑到台风的流速较高,壁面处的流速梯度较大,对壁面网格划分了5层边界层^[18],以保证数值模拟结果的可靠性。



a) 几何模型



b) 网格模型

图2 住宅的几何模型与网格模型

Fig. 2 Geometric and grid model of residential buildings

1.3 数值模拟方案

为研究台风风向对入户门所受风压的影响,在 4 种风向 ($\alpha=0^\circ, 15^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) 下进行了台风绕流实验。为研究门开角对入户门所受风压的影响,对 4 种开角 ($\theta=0^\circ, 15^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) 的入户门进行了实验。这 16 项数值模拟实验的基本参数如表 1 所示。

表 1 风压特性实验方案

Table 1 Experimental scheme for wind pressure characteristics

序号	风向 $\alpha/(^\circ)$	门开角 $\theta/(^\circ)$	序号	风向 $\alpha/(^\circ)$	门开角 $\theta/(^\circ)$
1	0	0	9	45	0
2	0	15	10	45	15
3	0	45	11	45	45
4	0	90	12	45	90
5	15	0	13	90	0
6	15	15	14	90	15
7	15	45	15	90	45
8	15	90	16	90	90

此外,为确定入户门所受风载荷的极值,即最容易造成安全事故的建筑方位(风向),补充了如表 2 所示的 12 项实验。

表 2 极限风载荷实验方案

Table 2 Experimental scheme for ultimate wind load

序号	风向 $\alpha/(^\circ)$	门开角 $\theta/(^\circ)$	序号	风向 $\alpha/(^\circ)$	门开角 $\theta/(^\circ)$
1	0	15	7	24	15
2	10	15	8	30	15
3	15	15	9	45	15
4	18	15	10	60	15
5	20	15	11	75	15
6	22	15	12	90	15

数值模拟实验中,流体密度为 1.225 kg/m^3 ,黏度为 $1.789 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,压强为 101 kPa ;台风的风速设为 50 m/s (强台风级)。

1.4 台风绕流场控制方程

台风绕流场的模拟依赖于连续性方程和动量守恒方程^[19-20]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0, \\ \frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \nabla^2 u = \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u. \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; u 为流速, m/s ; p 为压强, Pa ; μ 为黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

湍流模型方面, RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型充分考虑了均匀流动中的旋流,能精确处理高应变率、高流线弯曲程度的流动问题^[21],适合模拟台风绕流场。因此本研究采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial k \rho}{\partial t} + \nabla(k \rho u) = \nabla[\alpha_k(\mu + \mu_t) \nabla k] + G_k + \rho \varepsilon, \\ \frac{\partial \varepsilon \rho}{\partial t} + \nabla(\varepsilon \rho u) = \nabla[\alpha_\varepsilon(\mu + \mu_t) \nabla \varepsilon] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k + \frac{C_{2\varepsilon} \varepsilon}{k} \rho \varepsilon. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$; $\eta = \frac{k}{\varepsilon} \nabla u$;

k 为湍动能, J ; ε 为湍流耗散率, m^3/s^2 ; μ_t 为湍流黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; G_k 为湍动能 k 受速度梯度的影响而产生的项; α_k 、 α_ε 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 C_μ 、 η_0 及 β 均为经验系数,其值分别为 1.39, 1.39, 1.42, 1.68, 0.084 5, 4.377, 0.012。

2 数值模拟的后处理

图 3 所示为表 1 中第 15 项数值模拟结果的表压强云图。

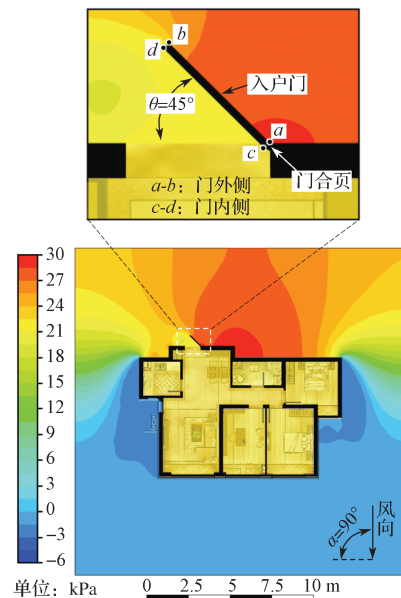


图 3 第 15 项实验的模拟结果

Fig. 3 Simulation results of experiment 15

由图 3 可知,台风天气下,住宅内的压强分布较均匀,而住宅外的压强呈对称分布。为了明确入户门的受力情况,以第 15 项数值模拟结果为例,介绍入户门所受风压及风载荷的确定方法。其中,点 $a \sim d$ 表示入户门的 4 个顶点,其中,点 a 、 b 位于门外侧,点 c 、 d 位于门内侧,点 a 、 c 靠近门合页处。

2.1 入户门所受风压

图 4 所示为图 3 中入户门两侧的风压分布曲线。由图 4 可见:入户门内、外侧分别等距测量了 20 个数据点。由于入户门宽为 950 mm ,因此点 b 、 d 距门合页 950 mm 。由图 4 不难看出,风向 $\alpha=90^\circ$ 、门开角 $\theta=45^\circ$ 时(第 15 项模拟实验),入户门外侧的压强变化较大、内侧的压强变化较小,且外侧压强大

于内侧压强, 此时入户门呈关闭趋势。

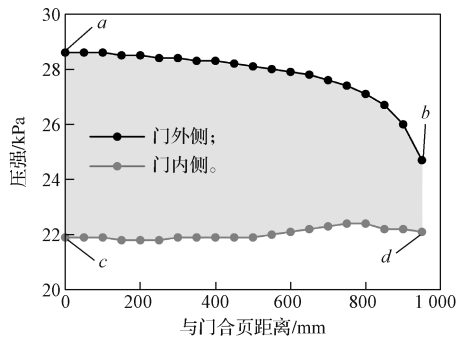


图4 第15项实验的入户门风压

Fig. 4 Wind pressure on the entrance door of experiment 15

2.2 入户门所受风载荷

入户门受到的合力 $F_{\text{合}}$ 可表示为

$$F_{\text{合}} = F_{\text{外}} + F_{\text{内}} = \sum_{i=1}^n p_{abi} \Delta L - \sum_{i=1}^n p_{cdi} \Delta L. \quad (3)$$

式中: $F_{\text{内}}$ 和 $F_{\text{外}}$ 分别为门内、外侧受到的压力; n 为入户门单侧的采样点个数; ΔL 为采样间距; p_{cdi} 和 p_{abi} 分别表示门内、外侧第 i 个采样点的压强; 合力 $F_{\text{合}}$ 等价于图4中阴影部分的面积。

入户门受到的合力矩 $M_{\text{合}}$ 可表示为

$$M_{\text{合}} = M_{\text{外}} + M_{\text{内}} = \sum_{i=1}^n p_{abi} L_i \Delta L - \sum_{i=1}^n p_{cdi} L_i \Delta L. \quad (4)$$

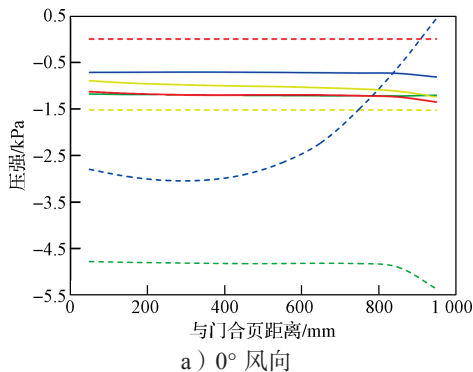
式中: $M_{\text{内}}$ 与 $M_{\text{外}}$ 分别为门内、外侧受到的力矩; L_i 为门内侧或外侧第 i 个采样点与门合页的距离; $M_{\text{合}}$ 以逆时针(关门)为正, 以顺时针(开门)为负。

考虑到入户门的运动方式为旋转, 因此本研究以合力矩作为入户门风载荷的衡量指标。

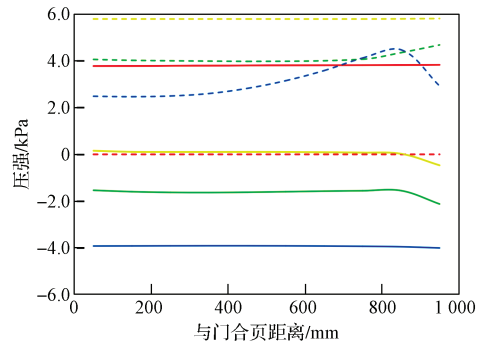
3 数值模拟结果与分析

3.1 台风风向对入户门风压的影响

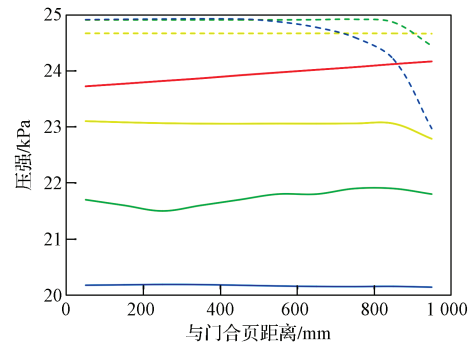
图5展示了不同台风风向下入户门两侧的风压分布。由于入户门关闭时内侧空气不流动, 因此门开角 $\theta=0^\circ$ 时入户门内侧的表压强为0, 如图5a与5b所示。为便于对比分析, 图5c与5d省略了 $\theta=0^\circ$ 时门内侧的风压数据。同理, 图6a中门内侧风压数据均为0。



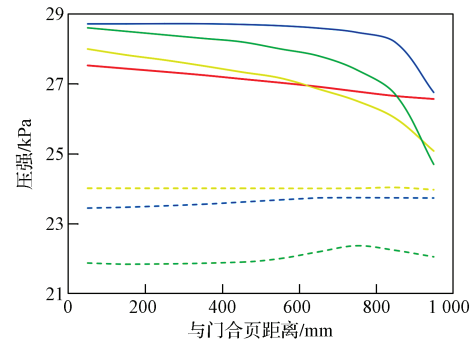
a) 0° 风向



b) 15° 风向



c) 45° 风向



d) 90° 风向

门外侧开角: —0°; —15°; —45°; —90°;
门内侧开角: ---0°; ---15°; ---45°; ---90°。

图5 不同风向下入户门的风压

Fig. 5 Wind pressure on entrance door at different wind directions

由图5可知: 风向为 0° 时, 入户门内外侧风压的分布区间为 $-5.4 \sim 0.5$ kPa; 风向为 15° 时, 风压的分布区间为 $-4 \sim 6$ kPa; 风向为 45° 时, 风压的分布区间为 $20 \sim 25$ kPa; 风向为 90° 时, 风压的分布区间为 $21 \sim 29$ kPa。显然, 随着风向增大, 台风在入户门内外侧产生的风压均显著增大, 而较高的风压会导致入户门的力学稳定性下降, 安全隐患更高。因此, 台风引发入户门事故的原因不仅与台风强度有关, 也与台风风向密切相关。此外, 风向为 0° 或 90° 时, 入户门外侧的压强普遍高于内侧压强, 此时入户门呈关闭趋势。风向为 15° 或 45° 时, 入户门外侧的

压强普遍低于内侧压强,此时入户门呈打开趋势。由图 1 可知,入户门在该事故中处于被台风吹开的状态,因此该事故中台风的风向 α 可能在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 之间。

由图 5 所示模拟结果还可以得知:当风向为 0° 时,门开角为 0° 的入户门内侧风压最大;当风向为 15° 时,门开角为 15° 的入户门内侧风压最大;当风向为 45° 时,门开角为 45° 的门内侧风压最大;当风向为 90° 时,门开角为 90° 的门外侧风压最大。显然,当门开角 θ 与风向 α 相近时,台风在入户门内侧或者外侧产生的风压最大。因此,台风天气下应尽量避免将门板朝向来风方向,以降低安全事故发生的风险。

3.2 入户门开角对入户门风压的影响

图 6 给出了不同门开角下入户门两侧的风压分布情况。

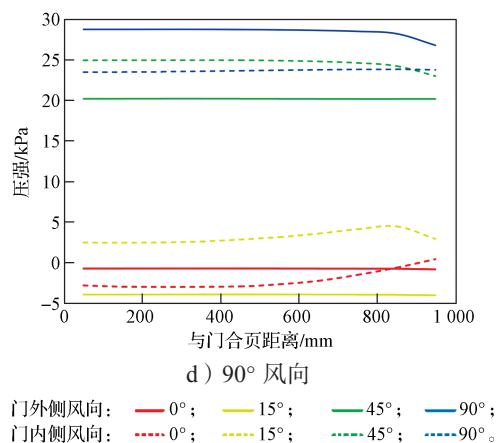
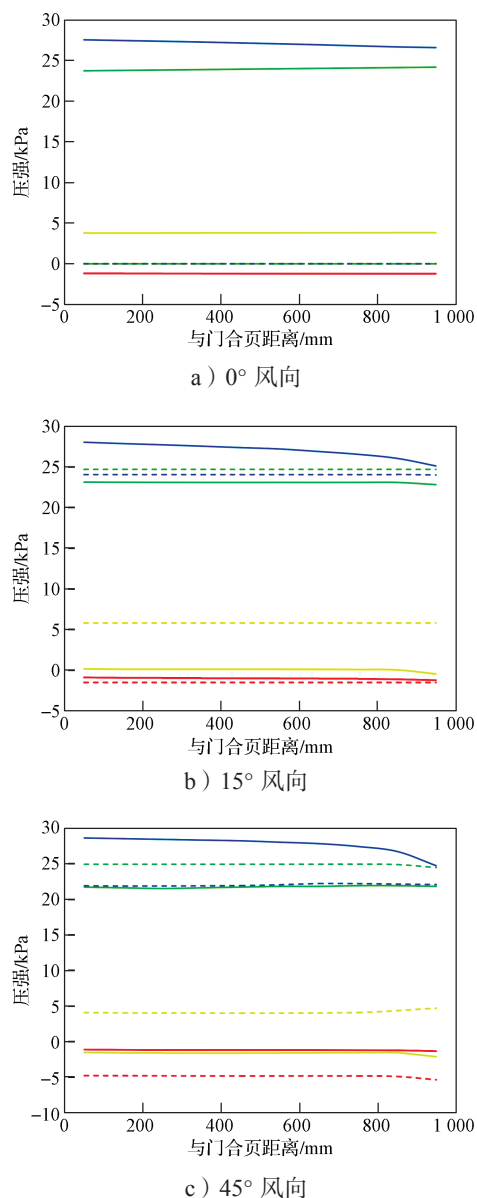


图 6 不同门开角下入户门的风压

Fig. 6 Wind pressure on entrance door at different opening angles

由图 6 可知:虽然门开角不同,但风向为 45° 或 90° 时风压普遍较大,而风向为 0° 或 15° 时风压普遍较小。其中,风向为 90° 时门外侧的风压数值总是最大的。值得注意的是,图 6 中风压数据的分布区间随门开角 θ 的变化较小,均为 $-5 \sim 30$ kPa。而图 5 中风压数据的分布区间随着风向 α 的增大而增大,风向为 0° 时分布区间为 $-5.5 \sim 0.5$ kPa,风向为 90° 时分布区间为 $21 \sim 29$ kPa。显然,台风风向 α 对入户门两侧风压的影响较大,而门开角 θ 对其影响较小。

3.3 不同门开角、风向下入户门的风载荷

上述分析阐述了台风天气下入户门内外侧风压的分布特性。然而,引发图 1 所示事故的根本原因还是入户门上的风载荷过大。为得出表 1 中 16 项实验的入户门风载荷,先由式 (5) 求出入户门内、外侧受到的力矩 $M_{\text{内}}$ 和 $M_{\text{外}}$,并记入图 7 中,然后将 $M_{\text{外}}$ 、 $M_{\text{内}}$ 相加得到风载荷 $M_{\text{合}}$ 记入图 8 中。由于入户门关闭时内侧空气不流动,所以 $\theta=0^\circ$ 时入户门内侧受到的力矩为 0。由图 7 可知:入户门两侧的力矩随台风风向的改变而显著变化,但是随门开角的变化不明显且无规律。

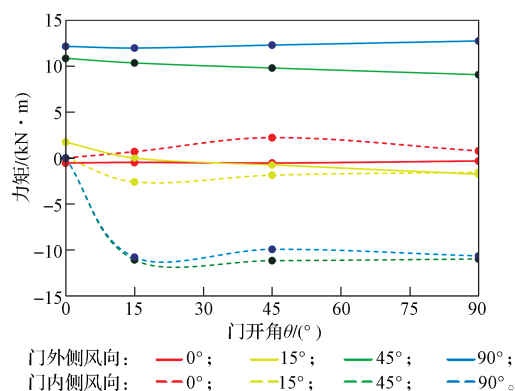


图 7 不同工况下门上的力矩

Fig. 7 Torque on the door under different working conditions

由图8可知:入户门开角 $\theta=0^\circ$ 时门上风载荷随风向的增大而增大,且风载荷数值大多为正。由于风载荷的方向以开门为负、关门为正,因此开角 $\theta=0^\circ$ 时入户门为关闭趋势,不会发生如图1所示的事故。在不考虑门开角 $\theta=0^\circ$ 的情况下,虽然 45° 与 90° 风向下入户门两侧的力矩 $M_{\text{外}}$ 与 $M_{\text{内}}$ 较大(如图7),但其风载荷 $M_{\text{合}}$ 并不大。因此,入户门两侧受到的风压较大时,其总的风载荷不一定大。由图8不难看出:同一风向下门开角不同时,入户门所受风载荷的变化较小且无规律,而不同风向下所受风载荷的变化显著。

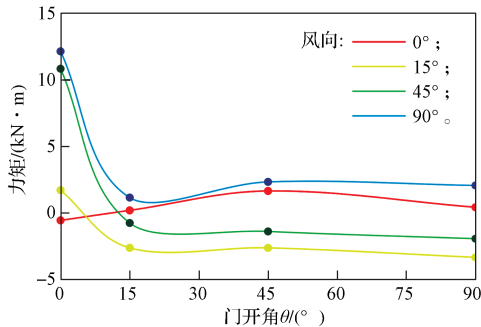


图8 不同工况下门上的风载荷

Fig. 8 Wind load on the door under different working conditions

3.4 入户门风载荷与台风风向的关系

由上述分析可知,入户门所受风载荷 $M_{\text{合}}$ 与风向 α 的关联性较强,而与门开角 θ 关联性较弱。为进一步明确风载荷与台风风向的关系,对表2中12项数值模拟实验的结果进行分析,图9展示了其入户门内、外侧力矩 $M_{\text{内}}$ 、 $M_{\text{外}}$ 及风载荷 $M_{\text{合}}$ 的模拟结果。

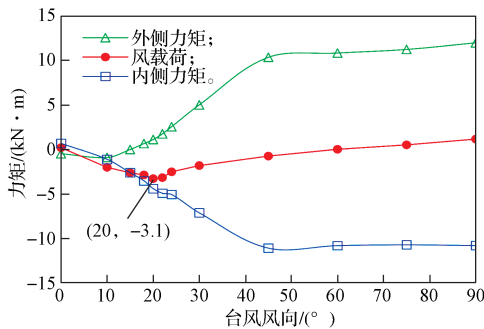


图9 入户门风载荷与台风风向的关系

Fig. 9 Relationship between typhoon direction and wind load on the entrance door

由图9可知:风向为 $60^\circ\sim 90^\circ$ 时合力矩为正,此时入户门呈关闭趋势,不会引发如图1所示的事故,而风向为 $0^\circ\sim 60^\circ$ 时,合力矩为负,此时入户门呈打开趋势。其中,风向为 $\alpha=20^\circ$ 时风载荷 $M_{\text{合}}$ 存在负极值 $-3.1\text{ kN}\cdot\text{m}$,此时入户门最容易被台风吹开,也最容易出现入户门安全事故。若进一步对图9所示风载荷曲线进行拟合,就能根据台风风向(建筑方位)

预测入户门受到的风载荷大小,为台风灾害的预防提供理论依据。

4 结论

1) 台风天气下,作用于住宅入户门上的风载荷较大,易引发建筑安全事故。研究发现,入户门上风载荷的大小与建筑方位密切相关,而与门开角的关联性不大。

2) 在台风作用下,门开角 $\theta=0^\circ$ 时,入户门始终呈关闭趋势。入户门开启时,随着建筑方位增大,入户门受到的风载荷先减小后增大,具体而言,当建筑方位为 $0^\circ\sim 60^\circ$ 时,入户门呈打开趋势;当建筑方位为 $60^\circ\sim 90^\circ$ 时,入户门呈关闭趋势。

3) 台风天气下,建筑方位为 20° 时门上风载荷出现负极值,此时入户门最容易被风刮开,从而造成安全事故。因此,在确定建筑方位时,需要考虑当地的风向,使台风风向与建筑方位的夹角尽量远离 20° ,以降低发生入户门安全事故的风险。

参考文献:

- [1] 田利,张来仪,王彦明,等.台风作用下建筑结构的研究进展[J].山东大学学报(工学版),2022,52(1):28-38.
TIAN Li, ZHANG Laiyi, WANG Yanming, et al. Research Progress of Building Structure Under Typhoon[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(1): 28-38.
- [2] 寇广辉,陈明鑫,卢世杰,等.应急永久性传染病医院抗台风深化设计[J].施工技术,2020,49(12):60-64.
KOU Guanghui, CHEN Mingxin, LU Shijie, et al. Typhoon-Resistant Deepening Design of Emergency Permanent Infectious Disease Hospital[J]. Construction Technology, 2020, 49(12): 60-64.
- [3] 黄智杰.论门窗标准化的重要性[J].居业,2019,11(5):35-36.
HUANG Zhijie. On the Importance of Standardization of Doors and Windows[J]. Create Living, 2019, 11(5): 35-36.
- [4] 王洪涛,万成龙.国家标准《建筑幕墙和门窗抗风携带物冲击性能分级及检测方法》解读[J].工程质量,2015,33(1):20-23.
WANG Hongtao, WAN Chenglong. Interpretation the National Standard of Graduations and Test Method for Performance of Exterior Windows and Doors, Curtain Walls Impacted by Windborne Debris in Windstorm[J]. Construction Quality, 2015, 33(1): 20-23.
- [5] 孟振亚.考虑干涉效应的建筑围护结构风致易损性分

- 析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- MENG Zhenya. Wind-Induced Vulnerability Analysis of Building Envelope Considering Interference Effect[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [6] 陈莉婷, 郑 晶, 高建清, 等. 基于 FastDTW 案例检索的台风灾害应急方案生成[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(4): 171-176.
- CHEN Liting, ZHENG Jing, GAO Jianqing, et al. Generation of Typhoon Emergency Response Plan Based on FastDTW Case Retrieval[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(4): 171-176.
- [7] 余 强, 黄逸橙, 沙 策. 台风特征参数对灾害链概率计算的影响分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 168-175.
- YU Qiang, HUANG Yicheng, SHA Ce. Influence Analysis on Typhoon Characteristic Parameters on Probability Calculation of Disaster Chain[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(8): 168-175.
- [8] 黄本才, 陈亚平. 高层建筑中玻璃幕墙的抗风设计[J]. 建筑结构学报, 1992, 13(3): 59-67.
- HUANG Bencai, CHEN Yaping. Wind Resistant Design for Glass Curtain Wall of Tall Building[J]. Journal of Building Structures, 1992, 13(3): 59-67.
- [9] 布占宇, 楼文娟, 唐锦春, 等. 台风致窗户破坏时大跨度屋面风振响应研究[J]. 工程力学, 2004, 21(2): 69-75.
- BU Zhanyu, LOU Wenjuan, TANG Jinchun, et al. Wind-Induced Dynamic Response of Long-Span Roof Structures in the Case of Sudden Opening[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(2): 69-75.
- [10] 刘何清, 徐志胜. 高层建筑某层房间门窗开启对热压中和面位置的影响[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(6): 78-80.
- LIU Heqing, XU Zhisheng. Effect of Opening of Doors and Windows on Certain Floor on Hot Pressure Neutral Plane in a High-Rise Building[J]. China Safety Science Journal, 2001, 11(6): 78-80.
- [11] 林树枝, 廖文彬. 厦门两次强台风的建筑受损调查及设计思考[J]. 福建建筑, 2019(10): 1-5.
- LIN Shuzhi, LIAO Wenbin. The Design Considerations and Surveys for the Buildings Damaged by Two Violent Typhoons in Xiamen[J]. Fujian Architecture & Construction, 2019(10): 1-5.
- [12] 赵福云, 申 广, 刘科君, 等. 多门窗建筑风压驱动自然通风数值模拟[J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(6): 1-7.
- ZHAO Fuyun, SHEN Guang, LIU Kejun, et al. A Numerical Simulation of Wind-Driven Ventilation in Buildings with Multiple Windows and Doors[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2017, 31(6): 1-7.
- [13] BAE J J, PARK I S, KIM P, et al. Design of High-Speed Roll-up Doors with Consideration of the Large Deflection of Windbars Due to Wind Loads[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(8): 3737-3744.
- [14] JAFFE A L, RIVEROS G A, KOPP G A. Wind Speed Estimates for Garage Door Failures in Tornadoes[J]. Frontiers in Built Environment, 2019, 5: 14.
- [15] 谢继文, 李国林, 高冯贤, 等. 抗台风窗户保护机械装置[J]. 河南科技, 2020, 39(2): 65-67.
- XIE Jiwen, LI Guolin, GAO Fengxian, et al. Research on Anti-Typhoon Window Protection Machinery[J]. Henan Science and Technology, 2020, 39(2): 65-67.
- [16] 张乾丰, 何一民, 袁文波, 等. 基于 SIM900A 的智能抗台风窗户保护装置的设计[J]. 机械, 2022, 49(2): 73-80.
- ZHANG Qianfeng, HE Yimin, YUAN Wenbo, et al. Design of Intelligent Anti-Typhoon Window Protection Device Based on SIM900A[J]. Machinery, 2022, 49(2): 73-80.
- [17] 刘 辉. 住宅建筑安全管理工作中存在的不利因素及对策[J]. 居舍, 2024(9): 143-146.
- LIU Hui. Unfavorable Factors and Countermeasures in Safety Management of Residential Buildings[J]. Ju She, 2024(9): 143-146.
- [18] 戴 杰, 蔡书鹏, 彭绍府, 等. 圆管流速骤增对局部阻力的影响[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(1): 67-71.
- DAI Jie, CAI Shupeng, PENG Shaofu, et al. Research on the Effect of a Sudden Current Velocity Increase on Circular Tube Local Resistance[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2022, 36(1): 67-71.
- [19] 赵福云, 文雅冰, 黄志荣, 等. 电子洁净室气流特性分布及颗粒物扩散数值模拟[J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(3): 14-20.
- ZHAO Fuyun, WEN Yabing, HUANG Zhirong, et al. A Numerical Simulation of Airflow Characteristics Distribution and Particle Diffusion in Electronic Cleanrooms[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2023, 37(3): 14-20.
- [20] 赵福云, 谭志成, 陈 皓, 等. 自然通风下大棚群内部热湿环境分布特性模拟分析[J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(2): 44-49.
- ZHAO Fuyun, TAN Zhicheng, CHEN Hao, et al. Simulation Analysis of Distribution Characteristics of Heat and Humidity Environment in Greenhouses Under Natural Ventilation[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2023, 37(2): 44-49.
- [21] 王 寅, 赵福云, 唐宇飞, 等. 非等温平行流下吹吸式通风系统流场的数值模拟[J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(4): 7-13.
- WANG Yin, ZHAO Fuyun, TANG Yufei, et al. Numerical Simulation of Flow Field in Blow-Suction Ventilation System Under the Non-Isothermal Parallel Flow[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2023, 37(4): 7-13.