

板状碎片对建筑屋面的冲击破坏概率模型

黄 鹏, 蓝鑫玥

(同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092)

摘要: 飞掷物对建筑的冲击破坏是围护结构在强风作用下受损的主要原因之一。为针对不同围护结构建立考虑多因素影响的冲击破坏概率模型,提出了一种基于马格努斯效应的板状碎片三维轨迹方程的板状碎片冲击破坏概率模型。与现有模型相比,额外考虑了在不同风速风向向下板状碎片来源、起飞初始条件和建筑相对位置对屋面冲击破坏概率的影响。利用风速 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\sim 45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向 $0^\circ\sim 90^\circ$ 和上游建筑高度 $8.0\text{ m}\sim 12.5\text{ m}$ 作为模型的输入,实现了可考虑多因素影响的板状碎片对低矮建筑屋面冲击破坏的概率估计,验证了模型的实用性。该模型计算过程简单,可应用于建筑屋面易损性分析。

关键词: 飞掷物; 冲击破坏概率模型; 板状碎片; 建筑屋面; 强风作用

中图分类号: TU312.3

文献标志码: A

Impact Damage Probability Model of Building Roofs Impacted by Plate-Like Debris

HUANG Peng, LAN Xinyue

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

Abstract: The impact of windborne debris on buildings is one of the most important causes of envelope destruction in strong wind. To build an impact damage probability model considering multiple factors for different type of building envelopes, an impact damage probability model of plate-like debris based on the three-dimensional plate-like debris trajectory considering Magnus effect is proposed. Compared with the commonly used models, this model additionally considers the effects of parameters of debris including different sources, initial conditions and relative positions of buildings at different wind speeds and in different wind directions. An impact damage estimation of a low-rise building roof considering multiple factors is given using the wind speeds of $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\sim 45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the wind directions of $0^\circ\sim 90^\circ$, and the upstream building heights of $8.0\text{ m}\sim 12.5\text{ m}$ to verify the availability of the model. The calculation method of this model is simple and can be applied to the vulnerability analysis of building roofs.

Keywords: windborne debris; impact damage probability model; plate-like debris; building roof; strong wind

风致碎片是造成建筑围护结构破坏的主要原因之一^[1],其中板状碎片又是风致碎片中最常见的一种。由于风致碎片对建筑造成的损失惨重^[2],文献[3-7]对飞掷物运动轨迹进行研究,通过风洞实验和理论分析提出从少数工况下二维轨迹模型到全面考虑碎片尺寸、气动力和飞行姿态的三维轨迹模型,一些研究还考虑了飞行过程中的马格努斯效应^[8]。

强风中的碎片可能会损坏围护结构,从而导致内压瞬间增大^[9],使围护结构进一步失效,这种连锁反应会对风灾评估结果产生较大影响^[10],因此有必要对碎片冲击围护结构的概率进行研究。目前多基于飞掷物二维轨迹模型来描述其对门窗的冲击破坏,如HAZUS-MH风灾评估模型^[11],但是模拟完整飞行轨迹需要耗费大量计算资源。Cope^[12]给出了基于经验的门窗受碎片冲击破坏的概率模型,这一模型在结构易损性分析中得到广泛应用^[13-14]。需要注意的是,应用时模型中各参数需根据实际进行调整。Lin等^[15]在实验的基础上推导了飞掷物的量纲一化纵向速率与飞行距离的经验公式,在此基础上进行了结构易损性分析。但是目标建筑是否受冲击作用不仅与纵向飞行距离有关,还与竖向位移有关^[16]。目前的冲击破坏概率模型考虑的影响因素单一且仅考察对门窗造成的冲击破坏,但在强风过程中,低矮

收稿日期: 2022-09-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178500)

第一作者: 黄 鹏,教授,工学博士,主要研究方向为结构风工程。E-mail: huangtju@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

建筑屋面也有极大可能受到飞掷物冲击破坏。

综上所述,有必要建立一个基于飞掷物运动轨迹的冲击破坏概率模型,从而在易损性分析中考虑多种因素对冲击概率的影响。本文首先对选用的板状飞掷物轨迹模型进行讨论,通过已有的实验数据验证其在确定性分析和概率分析方面的准确性;然后对碎片的起飞概率进行分析;接下来对不同的碎片来源,综合考虑了碎片参数、起飞位置、建筑相对位置以及风速和风向对冲击破坏概率的影响,建立了板状碎片对屋面的冲击破坏概率模型;最后与常用模型进行对比来验证本文模型的实用性。

1 风致飞掷物轨迹模型

陈胜^[17]分析了不同材料的飞掷物冲击浮法玻璃的破坏结果,发现金属类飞掷物的破坏力最强,此类飞掷物多属于板状飞掷物,因此本文研究对象为板状碎片。本文定义的板状碎片的参数和取值如图1和表1所示,平板绕坐标轴Z轴逆时针方向旋转为正方向,如图为 $\theta = -90^\circ$ 的情况,此时平板法线与坐标轴X轴平行。

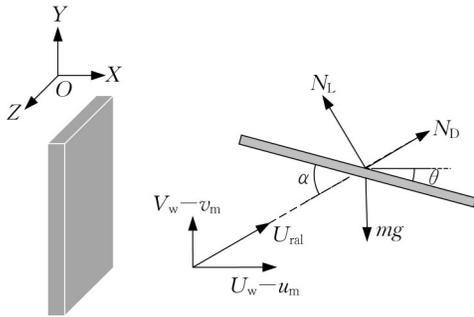


图1 板状飞掷物受力示意

Fig. 1 Forces on plate-like debris

表1 模拟中飞掷物的相关变量

Tab. 1 Parameters of debris in simulation

变量	含义	单位	概率分布	取值/计算公式
ρ_m	材料密度	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	常数	1 828
G	长宽比		常数	2
β	宽厚比		均匀分布	取值范围[5,20]
l_y	短边	m	均匀分布	取值范围[0.05,1.20]
l_x	厚度	m	计算获得	l_y/β
l_z	长边	m	计算获得	$G\cdot l_y$
θ	平板角度	$^\circ$	均匀分布	取值范围[-90,90]

Tachikawa^[3]在1983年提出了考虑马格努斯效应的风致飞掷物运动方程如式(1)~(3)所示:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \left(\frac{A \cdot \rho_a}{2m} \right) \left[(C_{DS} + C_{DR})(U_w - u_m) - (C_{LS} + C_{LR})(V_w - v_m) \right] U_{rel} \quad (1)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \left(\frac{A \cdot \rho_a}{2m} \right) \left[(C_{DS} + C_{DR})(V_w - v_m) + (C_{LS} + C_{LR})(U_w - u_m) \right] U_{rel} - g \quad (2)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \left(\frac{A \cdot l_y \cdot \rho_a}{2I} \right) (C_{MS} + C_{MR}) U_{rel}^2 \quad (3)$$

式中: U_w 为风速纵向分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; V_w 为风速垂直分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; u_m 为飞掷物速度纵向分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_m 为飞掷物速度垂直分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; U_{rel} 为相对速率, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; A 为飞掷物面积, m^2 ; g 为重力加速度, $g=9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; m 为飞掷物质量, kg ; I 为飞掷物惯性矩, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; ρ_a 为空气密度, $\rho_a=1.225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; x 为飞掷物纵向位移, m ; y 为飞掷物竖向位移, m ; t 为飞行时间, s ; C_{DS} 、 C_{DR} 、 C_{LS} 、 C_{LR} 、 C_{MS} 和 C_{MR} 为考虑马格努斯气动力系数,表达式如式(4)~(6)所示:

$$C_{DS} + C_{DR} = R_D(\gamma) C_{DR0} (C_{DR}/C_{DR0}) + C_{DS} - \bar{C}_{DS} \quad (4)$$

$$C_{LS} + C_{LR} = R_L(\gamma) C_{LR0} (C_{LR}/C_{LR0}) + C_{LS} \quad (5)$$

$$C_{MS} + C_{MR} = R_M(\gamma) C_{MR_{max}} (C_{MR}/C_{MR_{max}}) + C_{MS} \quad (6)$$

式中: C_{DR0} 为飞掷物在最大转速时的阻力系数均值; C_{LR0} 为飞掷物在最大转速时的升力系数均值; $C_{MR_{max}}$ 为最大力矩系数均值; \bar{C}_{DS} 为静定阻力系数的均值; C_{DR}/C_{DR0} 、 C_{LR}/C_{LR0} 和 $C_{MR}/C_{MR_{max}}$ 为气动力系数随转速的变化关系; R_D 、 R_L 和 $R_M = e^{6.1279 \cdot w_0 \cdot (R_w(\gamma) - 1)}$ 表征三维转动对气动力的影响,其中 γ 为板状碎片的倾角,取值如表2所示。

表2 倾角气动力系数

Tab. 2 Aerodynamic coefficient of tilted angle

$\gamma/(\circ)$	R_D	R_L	R_w
0	0.845	0.485	0.298
15	0.853	0.507	0.285
30	0.892	0.546	0.301
45	0.983	0.591	0.406
60	1.057	0.722	0.576
75	1.055	0.853	0.754
90	1.000	1.000	1.000

引用林华坛^[18]修正的气动力模型来求解运动方程。其中 C_{DR0} (C_{DR}/C_{DR0})可查询图2a的等高线图获得。 $C_{MR_{max}}$ ($C_{MR}/C_{MR_{max}}$)和 C_{LR0} (C_{LR}/C_{LR0})由式(7)~(9)计算获得:

$$C_{MR_{max}} = 0.0039e^{6.1279 \cdot w_0} \quad (7)$$

$$C_{MR}/C_{MR_{max}} = -5.8474 \left(w/w_0 \right)^2 + 6.7008 \left(w/w_0 \right) - 0.8909 \quad (8)$$

$$C_{LR0}(C_{LR}/C_{LR0}) = (0.2626 \ln(1000l_y) - 0.5125) \cdot (R_c/R_{et0})^{-0.2} \cdot \begin{cases} C_{LR0,P} & \omega/\omega_0 \geq 0 \\ C_{LR0,n} \cdot \lambda_{LR0} & \omega/\omega_0 < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: R_c 为当前风速下的厚度雷诺数; R_{et0} 为风速 $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的厚度雷诺数; $C_{LR0,P}$ 为顺时针时的参考升

力系数; $C_{LR0,n}$ 为逆时针旋转时的参考升力系数,可通过查询图2b的等高线图获得; ω 为量纲为一碎片转速; ω_0 为量纲为一稳定转速, $\omega_0 = 0.1939 \ln(G \cdot \beta^{0.3}) + 0.177$; λ_{LR0} 为对应宽厚比条件下图2b中 ω/ω_0 为1和-1时的升力系数比值。

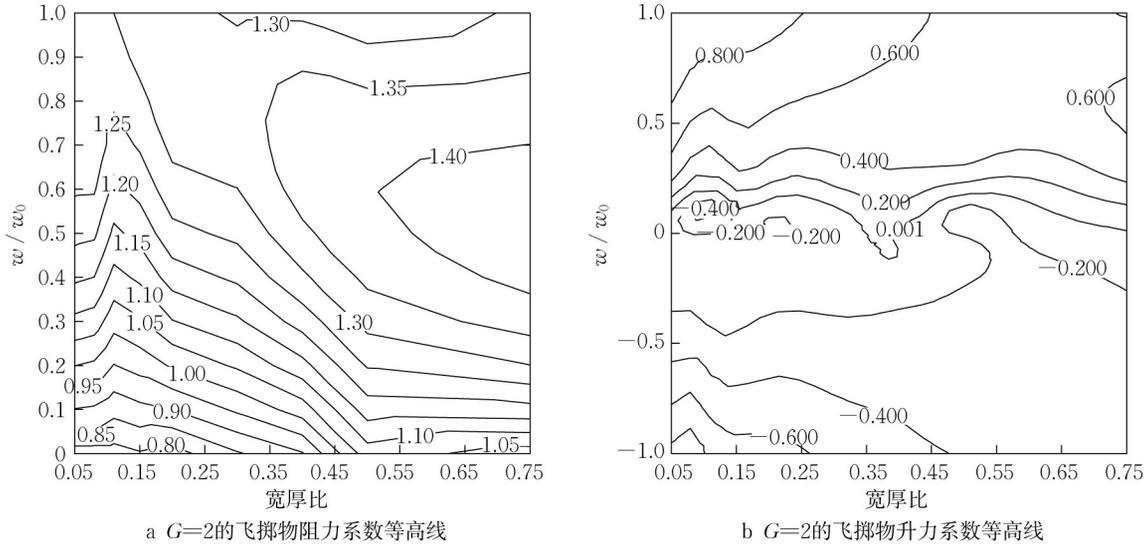


图2 风速 $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时飞掷物阻力系数和升力系数等高线^[18]

Fig. 2 Contour graphs of drag coefficient and lift coefficient of debris^[18] at a wind speed of $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

利用MatLab软件编程求解式(1)~(9)获得飞掷物完整的运动轨迹。对Tachikawa^[3]与Lin等^[5]研究中的板状飞掷物轨迹进行了数值计算,并与其实验轨迹进行对比,结果如图3所示。图3a中板状飞

掷物尺寸为 $80 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, $m = 7.168 \text{ g}$, $\theta = -150^\circ$,实验风速为 $9.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;图3b中板状飞掷物尺寸为 $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$, $m = 7.168 \text{ g}$, $\theta = 0^\circ$,实验风速为 $25.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

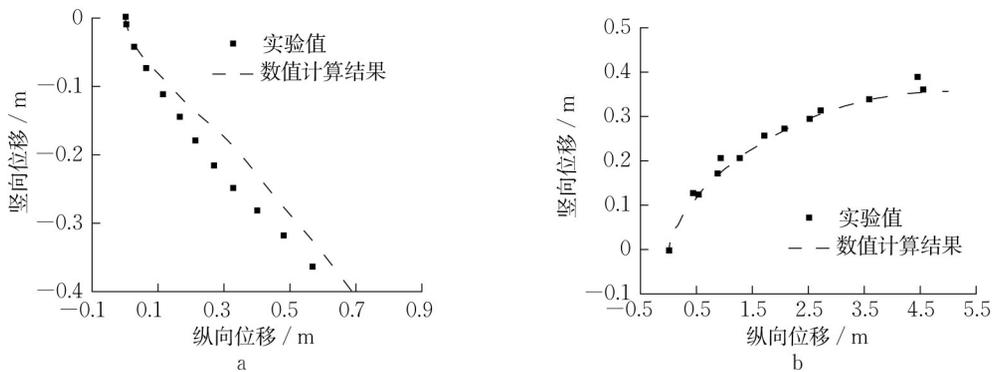


图3 板状飞掷物运动轨迹数值计算结果与实验结果的对比

Fig. 3 Comparison of simulated plate-like debris trajectories with test data

进一步对文献[6]中板状飞掷物进行概率轨迹数值计算,因飞掷物纵向位移决定飞掷物是否冲击建筑^[19],本文将数值计算的落点纵向位置的统计量与文献中的实验结果进行了对比,结果如表3所示。表中 X_0 、 H_0 、 Z_0 为起飞位置的坐标值, X_{avg} 为落点位置横坐标平均值, X_s 为落点位置横坐标均方根值。

表3中的风速是屋面平均高度(7.32m)处的10min平均风速,利用Davenport风速谱生成脉动风速作为数值模型的随机变量输入,计算步长设为 0.005 s 。从图3和表3中可见,飞掷物轨迹和落点统计值的数值计算结果与实验结果都较为吻合,因此可以将该轨迹模型用于后续冲击破坏模型的分析。

表3 尺寸1.2m×2.4m×12.7mm板状飞掷物落点纵向位置数值计算和实验结果的对比

Tab. 3 Comparison of simulated ground impact longitudinal position of a 1.2m×2.4m×12.7mm plate-like debris to test data

风速/(m·s ⁻¹)		起飞位置				落点X值统计结果			
平均值	均方根	X ₀ /m	H ₀ /m	Z ₀ /m	θ ₀ /°	实验		数值计算	
						X _{avg} /m	X _σ /m	X _{avg} /m	X _σ /m
39	6	0.6	7.3	3.7	-18.4	33	19	34.5	12.0

2 板状碎片起飞概率

碎片冲击建筑的概率可以分2步计算,首先是碎片的起飞概率,其次是起飞碎片对目标建筑的冲击概率。强风中的碎片根据其来源可以分为上游建筑围护结构(主要指屋面覆盖物)失效后成为飞掷物的碎片和来自目标建筑周围环境中散落的碎片。将前者称为第一类碎片,此时结构受到的风荷载已经超出了连接件抗力以及结构本身的自重,因此其起飞概率 $P_{\text{fly}}=1$;将后者称为第二类碎片,此时根据Wills等^[20]建立的板状碎片被风吹起来的起飞条件如式(10)所示,代入碎片随机参数可以获得不同风速下碎片的起飞概率。

$$\frac{1}{2} \rho_a U^2 C_F \geq I \rho_m l_x g \quad (10)$$

式中: U 为瞬时风速, $U=1.5\bar{U}$, \bar{U} 为平均风速, \bar{U} 取15~45m·s⁻¹; C_F 为气动力系数,板状飞掷物取0.3。

图4为第二类碎片 P_{fly} 随着平均风速的变化关系,可用式(11)进行拟合:

$$P_{\text{fly}}(\bar{U}) = 0.0254\bar{U}^2 - 0.0196\bar{U} - 3.9868 \quad (11)$$

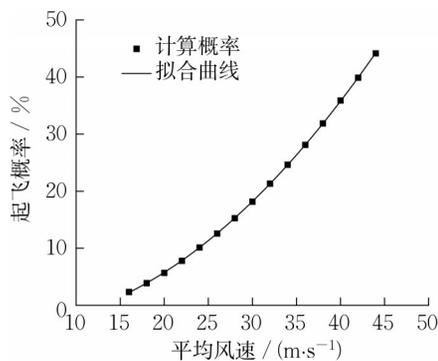


图4 不同风速下碎片的起飞概率

Fig. 4 Take-off probability of debris at different wind speeds

故任一碎片冲击目标建筑的概率 P_i 用式(12)表示:

$$P_i = P_{\text{fly}} \cdot P_{\text{crash}} \quad (12)$$

式中: P_{fly} 为碎片在强风作用下成为飞掷物的概率,对于第一类碎片 $P_{\text{fly}}=1$,对于第二类碎片 P_{fly} 利用式(11)进行计算; P_{crash} 为飞掷物冲击建筑的概率。

3 飞掷物冲击建筑屋面概率

3.1 上游建筑屋面覆盖物损坏产生的飞掷物

起飞的碎片称为飞掷物,对于起飞的第一类碎片,利用1.2节给出的数值模型进行轨迹计算,考虑风速、风向、起飞高度以及建筑间距对冲击结果的影响。根据屋面覆盖物材料的情况,认为其损坏所产生的飞掷物尺寸固定不变:2.4m×1.2m×12.7mm, $m=66.87\text{kg}$,目标建筑与相邻建筑之间的间距为3.6m或5.8m。模拟中 \bar{U} 取值范围为30m·s⁻¹~45m·s⁻¹,风向区间为0°~90°,风向定义如图5所示。

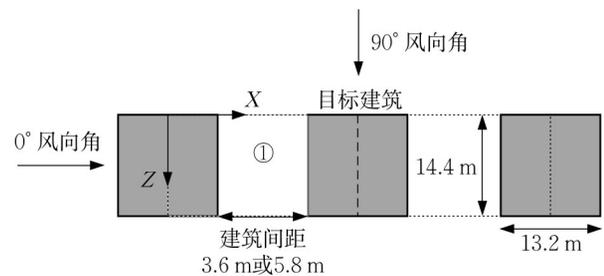


图5 目标建筑与周围建筑之间的关系

Fig. 5 Relationship between target building and surrounding buildings

图6为飞掷物冲击目标建筑屋面时的示意图,图中 H 为轨迹高度, (X_0, H_0, Z_0) 为飞掷物起飞位置, x 为纵向位移。从图中可以看出,飞掷物轨迹纵向位移在目标建筑屋面端点时的高度(H_{down} 、 H_{up})与屋面端点高度的相对关系决定了飞掷物是否冲击目标建筑屋面。模拟了不同工况下飞掷物的轨迹,获得对应的 H_{down} 和 H_{up} 。模拟中 X_0 取值为0~5.53m, H_0 取值为0.64~8.64m。

图7给出了当建筑间距 $S_L=5.8\text{m}$ 飞掷物在不同风速和风向向下 $H_{\text{down}}-H_0$ 和 $H_{\text{up}}-H_0$ 随 x 的变化关系。图例中的数字前2位表示风速,后2位表示风向,如3060表示风速为30m·s⁻¹、风向为60°。

从图7可以看出飞掷物轨迹竖向位移与纵向位移之间呈线性关系,线性函数的斜率与截距随风速和风向的不同而不同,即 x 、 H 、 H_0 之间的关系为

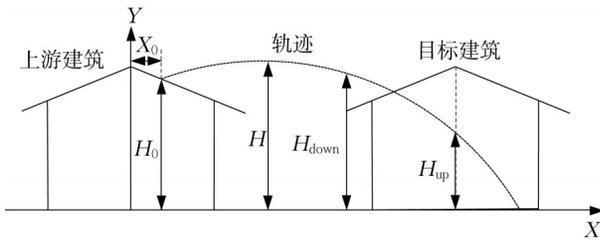


图6 模拟建筑与参数定义

Fig. 6 Building simulated and definition of parameters

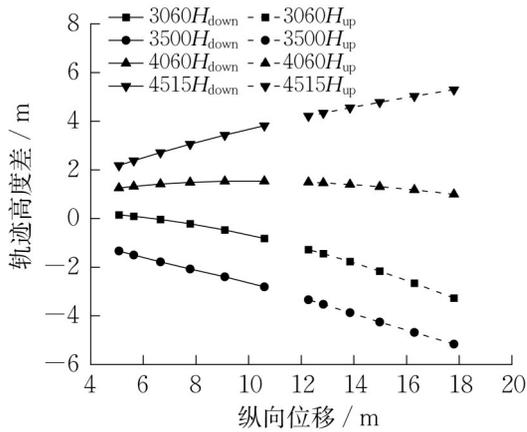


图7 不同风速风向下轨迹高度差与纵向位移

Fig.7 Vertical and longitudinal displacement at different wind speeds and in different wind directions

$$H = k(\bar{U}, n)x + H_0 + b(\bar{U}, n) \quad (13)$$

式中: n 为风向; k 与 b 是线性函数的拟合参数, 取值如图8所示。

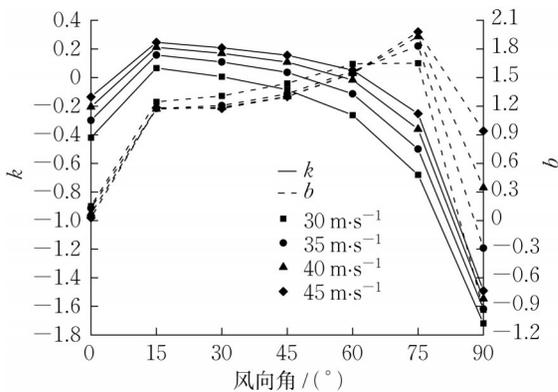


图8 不同风速风向下拟合函数的参数

Fig.8 Parameters of fitting function at different wind speeds and in different wind directions

对式(13)的适用性进行验证, 改变建筑间距为3.6m, 引入总误差考察计算结果的准确性, 总误差计算式如式(14)所示:

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_{H,down}^2 + \epsilon_{H,up}^2} \quad (14)$$

式中: ϵ 为总误差, 满足工程精度要求 $\epsilon < 0.1$; $\epsilon_{H,down}$ 和 $\epsilon_{H,up}$ 分别为屋面两端点处轨迹高度用2种方法计算的相对误差, 表达式为 $\epsilon_{H,down} = |H_{S,down} - H|/H_{S,down}$ 和 $\epsilon_{H,up} = |H_{S,up} - H|/H_{S,up}$, $H_{S,down}$ 为模拟轨迹在檐口对应横坐标处的高度, $H_{S,up}$ 为模拟轨迹在屋脊对应横坐标处的高度。

图9给出了不同情况下的总误差。从图中可以发现, 当起飞高度较大时 ($H_0 > 5m$) 各工况下总误差满足工程精度要求, 虽然在起飞高度较小的情况下总误差较大, 但是在较小的起飞高度情况下, 飞掷物不会对目标建筑屋面产生冲击。综上所述, 可以认为式(13)适用于起飞的第一类碎片对目标建筑冲击情况的判断。

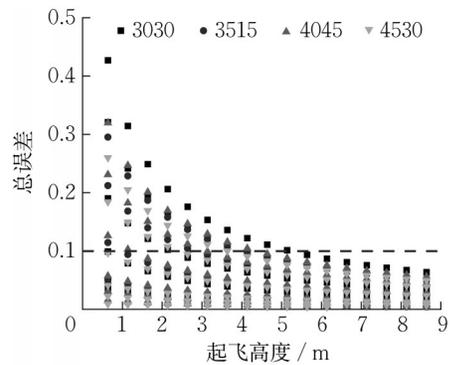


图9 不同工况下总误差随起飞高度的变化

Fig.9 Total error of different cases based on an increasing initial flight height

3.2 散落建筑周围的飞掷物

针对起飞的第二类碎片的冲击概率进行研究, 此时起飞位置和碎片参数是随机变量(如表1所示)。认为第二类碎片在图5虚线框内产生, 根据碎片所在高度是否为随机变量可将第二类碎片分为散落在空间中和散落在上游屋面。如区域1俯视图分为2个矩形: 左边矩形对应的是上游屋面, 产生于此处的碎片即为散落在上游屋面的碎片; 右边矩形对应的是建筑之间的区域, 产生于此处的碎片即为散落在空间中的碎片。

可按以下步骤计算起飞的第二类碎片对屋面冲击概率: ①输入建筑基本信息, 包括建筑占地长宽、檐口宽度、墙体高度、屋面坡度、建筑间距、上游建筑屋面高度; 输入板状飞掷物的固定参数, 包括密度、长宽比; 输入风向和平均风速。②生成板状飞掷物初始随机参数的样本空间, 包括 l_y, β, θ 和起飞位置 (X_0, H_0, Z_0) 。③将各参数输入轨迹模型进行计算,

计算步长取0.05,根据飞行轨迹和目标建筑屋面的相对位置判断冲击情况。④用 $P_{\text{crash}}=N_{\text{crash}}/N_s$ 计算冲击概率, N_{crash} 为模拟中冲击屋面的次数, N_s 为冲击概率收敛时的模拟次数,需满足式(15)的条件。

$$N_s > (\lambda_a \sigma_{P_{\text{crash}}} / \epsilon_p \bar{P}_{\text{crash}})^2 \quad (15)$$

式中: \bar{P}_{crash} 为冲击概率平均值; $\sigma_{P_{\text{crash}}}$ 为冲击概率均方根值; ϵ_p 为误差值,设 $\epsilon_p=0.05$ 以满足工程精度要求; λ_a 与置信度对应,当置信度为95%时, $\lambda_a=1.96$ 。

分别对来源于不同散落位置的飞掷物对目标建筑的冲击破坏概率进行讨论。首先是散落在上游屋面的碎片成为飞掷物时,模拟中起飞高度是一定的。 $S_L=3.6\text{m}$ 、 $H_0=10\text{m}$ 时冲击概率 $P_{\text{crash},10}$ 为标准值,图10给出了不同风速风向下 $P_{\text{crash},10}$ 的等值线图。

定义冲击概率高度变化系数 $R_{H_0}=P_{\text{crash},H_0}/P_{\text{crash},10}$,结合建筑周边情况,模拟中设定 H_0 取值为5~10m。如图11所示 R_{H_0} 随风速和风向的变化不明

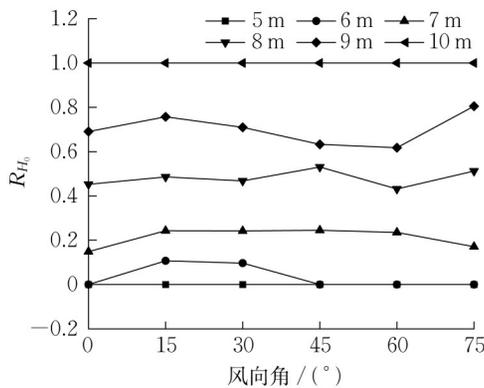


图11 R_{H_0} 与风向和风速的关系

Fig. 11 R_{H_0} at different wind speeds and in different wind directions

选取建筑间距3.6m和5.8m的冲击结果考察建筑间距对冲击概率的影响,定义 R_{S_L} 为 $S_L=5.8\text{m}$ 和 $S_L=3.6\text{m}$ 条件下冲击概率的比值。如图12a所示,风速30~45 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间内 R_{S_L} 随风向的变化情况相似,数值受风速变化的影响很小,在其他起飞高度下也有类似结果,并且起飞高度越大风速对 R_{S_L} 值的影响越小,即认为在相同起飞高度下, R_{S_L} 不随风速变化。如图12b所示,起飞高度8~10m区间内 R_{S_L} 随风向变化情况相似,数值受起飞高度变化的影响很小,在其他风速下也有类似结果,并且风速越大起飞高度对 R_{S_L} 值的影响越小,即认为当起飞高度与目标建筑高度相当或高于目标建筑高度时, R_{S_L} 便不随起飞高度变化。

综上所述,认为当飞掷物起飞高度与目标建筑

高度相当或高于目标建筑高度时, R_{S_L} 不受风速和起飞高度的影响。考虑安全性,取各风向下的最大值作为 R_{S_L} 的取值,结果如图13所示。

因此,散落在上游屋面上的飞掷物的 $P_{\text{crash}}(\bar{U}, n)$ 如式(17)所示:

$$P_{\text{crash}}(\bar{U}, n) = P_{\text{crash},10}(\bar{U}, n) \times R_{H_0} \times R_{S_L}(n), H_0 \geq H_{\text{wall}} \quad (17)$$

式中: H_{wall} 为下游建筑高度。然后考虑散落在建筑周围空间中的碎片成为飞掷物的情况,此时 H_0 也将作为随机变量输入。表4为建筑间距3.6m和5.8m工况下的结果,可以发现,在产生冲击的情况下, P_{crash} 随着风向变化不大。考虑安全性,取各风速模拟中 P_{crash} 的最大值作为各风速下 P_{crash} 的取值。

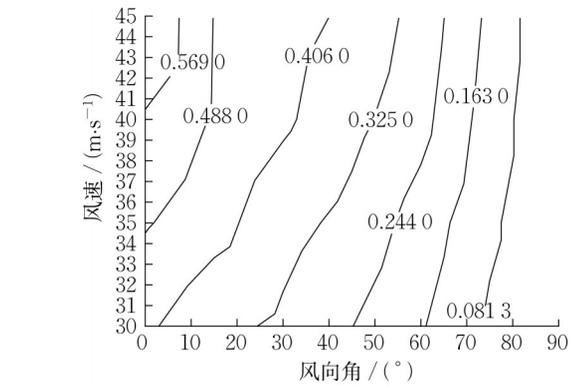


图10 标准值 $P_{\text{crash},10}$ 随风速风向分布等值线

Fig. 10 Contour graph of $P_{\text{crash},10}$ at different wind speeds and in different wind directions

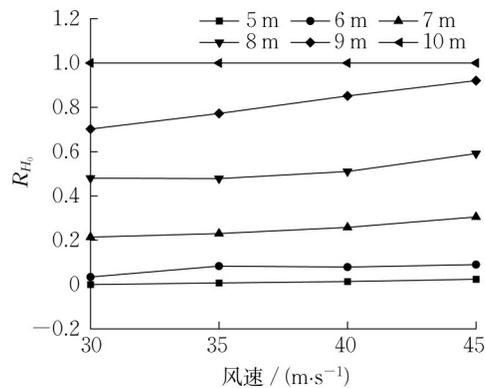


图11 R_{H_0} 与风向和风速的关系

Fig. 11 R_{H_0} at different wind speeds and in different wind directions

高度相当或高于目标建筑高度时, R_{S_L} 不受风速和起飞高度的影响。考虑安全性,取各风向下的最大值作为 R_{S_L} 的取值,结果如图13所示。

因此,散落在上游屋面上的飞掷物的 $P_{\text{crash}}(\bar{U}, n)$ 如式(17)所示:

$$P_{\text{crash}}(\bar{U}, n) = P_{\text{crash},10}(\bar{U}, n) \times R_{H_0} \times R_{S_L}(n), H_0 \geq H_{\text{wall}} \quad (17)$$

式中: H_{wall} 为下游建筑高度。然后考虑散落在建筑周围空间中的碎片成为飞掷物的情况,此时 H_0 也将作为随机变量输入。表4为建筑间距3.6m和5.8m工况下的结果,可以发现,在产生冲击的情况下, P_{crash} 随着风向变化不大。考虑安全性,取各风速模拟中 P_{crash} 的最大值作为各风速下 P_{crash} 的取值。

为了便于使用,利用式(18)对 $S_L=3.6\text{m}$ 的情况下 $P_{\text{crash}}(\bar{U})$ 进行拟合。

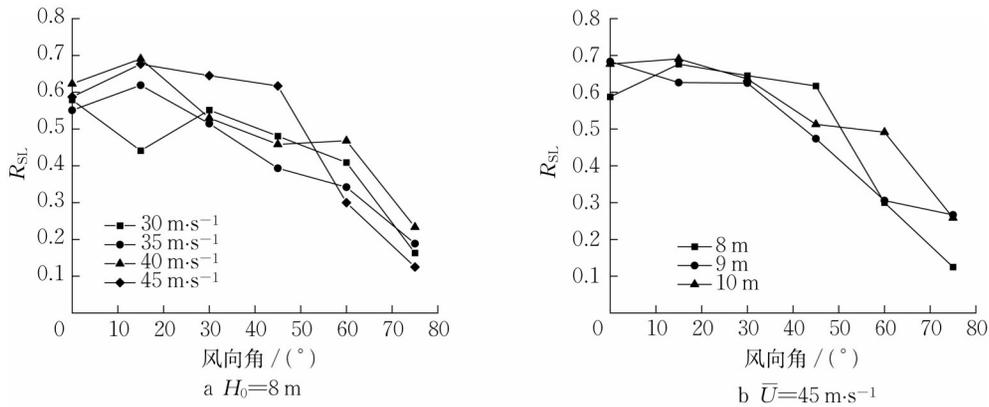


图 12 R_{SL} 随风速风向的变化情况

Fig. 12 R_{SL} at different wind speeds and in different wind directions

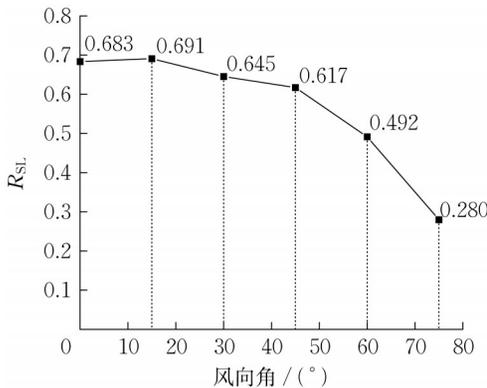


图 13 不同风向下 R_{SL} 取值

Fig. 13 Values of R_{SL} in different wind directions

$$P_{crash}(\bar{U}) = 0.4/253.2 \times (\bar{U} - 15.5) \quad (18)$$

考虑到建筑间距对冲击概率的影响,对比表中结果发现 $S_L=5.8m$ 和 $3.6m$ 情况下冲击概率的比值在不同风速下基本不变,即建筑间距对 P_{crash} 的影响不随风速变化,即有 $P_{crash|S_L=5.8} = 0.33 \cdot P_{crash|S_L=3.6}$

4 模型对比

结合前文分析提出碎片冲击破坏概率模型,并与风灾评估中常用的2种冲击破坏概率模型进行对比。常用模型描述的是散落在目标建筑周围的碎片,与本文的第二类碎片对应。

根据前文分析,第二类碎片冲击破坏概率可按以下步骤计算:①输入建筑间距、上游屋面高度、风向和平均风速。②利用式(11)计算当前风速下碎片的 P_{fly} 。③利用式(17)和(18)分别计算散落在上游屋面和空间中的第二类碎片起飞后冲击目标建筑的概率 P_{crash1} 和 P_{crash2} 。④利用式 $P_{crash} = 1 - (1 - P_{crash1}) \cdot (1 - P_{crash2})$ 计算飞掷物的冲击概率。⑤更换风向,重

表 4 S_L 为 3.6m、5.8m 时散落在建筑周围的飞掷物的 P_{crash}
Tab. 4 P_{crash} of debris scattered around the building at a S_L of 3.6m and 5.8m

风向 / (°)	30 m·s ⁻¹		35 m·s ⁻¹		40 m·s ⁻¹		45 m·s ⁻¹	
	3.6m	5.8m	3.6m	5.8m	3.6m	5.8m	3.6m	5.8m
0	0	0	0.028	0.010	0.030	0.011	0.033	0.013
15	0.024	0.008	0.030	0.010	0.037	0.013	0.048	0.015
30	0.020	0.008	0.028	0.010	0.035	0.013	0.038	0.015
45	0.018	0.008	0.028	0.010	0.030	0.010	0.037	0.015
60	0	0.004	0.021	0.010	0.027	0.010	0.027	0.010
75	0	0	0	0.004	0.012	0.004	0.019	0.008
90	0	0	0	0	0	0	0	0
P_{crash}	0.024	0.008	0.030	0.010	0.037	0.013	0.048	0.015

复步骤②—④,并取各风向下的最大值作为当前风速下的 P_{crash} 。⑥利用式(12)计算得到任一碎片的 P_i 。⑦假设碎片总数为 N_A 且冲击即破坏,则 $P_D = 1 - e^{-N_A \times P_i}$ 即为碎片冲击破坏概率。

4.1 常用模型

目前在风灾评估中常用 Cope^[12] 提出的模型计算碎片冲击破坏概率,为

$$P_D(\bar{U}) = 1 - e^{-N_A \times A_d \times B \times C \times D} \quad (19)$$

式中: N_A 根据经验确定取值; A_d 为形成飞掷物的比例, $A_d = \Phi[(\bar{U} - 42.2)/4.69]$; B 为飞掷物击中目标建筑的比例, $B = 0.4/62.52 \times (\bar{U} - 15.63)$; C 为未受保护的门窗所占墙面的面积比; D 为冲击动量超过门窗破坏极限的概率, $D = \Phi[(\bar{U} - 21.88)/3.13]$ 。

从式(19)不难看出, Cope 模型认为对于空间中任一碎片 $P_i = A_d \times B \times C \times D$, 各自变量仅与风速相关。在实际使用时,需对飞掷物来源、门窗尺寸和材料及防护措施做实地调研校核该模型参数后使用。

宋芳芳等^[19]通过对碎片运动轨迹的模拟认为纵向位移决定了飞掷物是否冲击目标建筑,对此, Lin

等^[5]通过实验和数值计算方法提出了板状飞掷物的纵向位移和速率模型,为

$$Kx^* \approx 0.456(Kt^*)^2 - 0.148(Kt^*)^3 + 0.024(Kt^*)^4 - 0.0014(Kt^*)^5 \quad (20)$$

$$u^* = 1 - e^{-\sqrt{1.8K}x^*} \quad (21)$$

式中: K 为Tachikawa数, $K = \rho_a(1.5\bar{U})^2/2\rho_m l_s g$; $x^* = gx/(1.5\bar{U})^2$, $t^* = gt/1.5\bar{U}$, $u^* = u_m/1.5\bar{U}$ 分别为量纲为一纵向位移、量纲为一时间和量纲为一纵向速率,飞行时间 $t \sim N(2, 0.4^2)$ 。

若纵向飞行距离大于飞掷物起飞位置到目标建筑的纵向距离则认为飞掷物冲击了目标建筑,在此基础上结合式(22)表示的围护结构功能函数判断结构是否遭到破坏。

$$Z_g = R_g - \frac{1}{2} \mu u_m^2 \lambda \quad (22)$$

式中: R_g 为承载力, $R_g = 2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; λ 为角度因子,与冲击角度 ξ 有关,当 $1^\circ \leq \xi \leq 7.5^\circ$ 时 $\lambda = 1.5$,当 $7.5^\circ \leq \xi \leq 90^\circ$ 且宽厚比取值范围为 $[5, 20]$ 时 $\lambda = 1.0$ 。

式(20)~(22)中涉及的随机变量有飞掷物厚度、宽厚比、冲击角度和飞行时间,模拟次数为 10^5 ,由此获得 P_{crash} 。结合碎片的 P_{fly} ,最终获得任一碎片的 P_i 。

4.2 模型对比结果

对各模型的计算结果进行对比。图14给出了不同模型在不同风速下任意一个碎片的冲击概率。图14中本文模型计算的是 $S_L = 3.6 \text{ m}$ 的情况。由于上游建筑的屋面高度会影响计算结果,这里设定上游建筑的屋面高度为 8.0 m 、 10.0 m 和 12.5 m ,用字母 H_u 表示。Lin模型是根据4.1节中Lin的轨迹模型^[5]和文献[17]的计算结果,由于飞掷物起飞位置到目标建筑的纵向距离最大值对结果会有影响,根据图5所示的位置关系,这里设定其最大值为 12.4 m ,用字母 $S_{L,\text{max}}$ 表示。

从图14可以看出,Cope模型与Lin模型计算结果相差较大,而本文模型计算结果介于这2种模型之间。在上游高度与目标建筑屋面高度相当时,本文模型计算结果较接近于Cope模型的结果。这是由于Lin模型认为当飞掷物飞行距离大于飞掷物起飞位置到目标建筑的纵向距离时,便对建筑产生了冲击,而并未区分冲击墙面和屋面的情况,因此会高估冲击概率。当上游建筑屋面高度较小时,大部分飞掷物都将对立面造成冲击,因此将Lin模型应用于屋面时,这种高估会更明显。其次,Lin模型认为飞

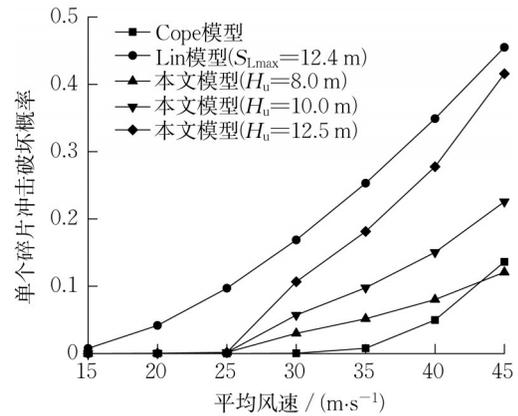


图14 冲击破坏模型对比

Fig. 14 Comparison of different impact damage models

掷物飞行时间 $t \sim N(2, 0.4^2)$,但是当上游建筑屋面高度较小时,飞行时间减少,纵向飞行距离也减少,仍按照这一假定必然高估计算结果。对于Cope模型,其参数取值基于经验结果,模型并未考虑飞掷物起飞高度和起飞位置与建筑的相对关系,应用时需要根据实际情况对参数进行调整,或许是上述原因在上游建筑屋面高度较大时低估了冲击概率。

综上所述,本文给出的碎片冲击破坏概率模型考虑了碎片源、建筑之间的相对关系和飞掷物起飞高度的影响,从计算结果上看在屋面冲击概率上的应用比其他模型更合理。

5 结论

基于考虑马格努斯效应的板状飞掷物三维轨迹模型,分析多种因素对冲击破坏概率的影响,建立了碎片对低矮建筑屋面冲击破坏的概率模型。通过与常用模型的对比,验证了本文模型的合理性和优越性,主要结论如下:

(1)强风中碎片能否成为飞掷物取决于当前风速、碎片的尺寸和密度,随机板状碎片起飞概率与平均风速可以用二次函数进行拟合。

(2)对于屋面结构受风压破坏而产生的飞掷物其飞行距离与轨迹高度在不同风速风向下可以用简单的一次函数进行拟合。

(3)本文冲击破坏概率模型不仅考虑了风速、碎片本身物理量的影响,还考虑了风向、起飞高度和建筑间距的影响。研究表明,对于屋面冲击概率,起飞高度对其影响不随风速风向的变化而变化,但是建筑间距对其影响随风向的不同而不同。

(4)通过对比本文屋面的冲击概率模型和常用的2种模型发现,本文模型在应用上比其他模型考虑的影响因素更为全面,计算方式更为简单,结果更加合理。可将本文模型应用于建筑屋面易损性分析。

作者贡献声明:

黄鹏:论文内容的整体规划以及修改。

蓝鑫玥:具体的数值计算分析以及论文撰写。

参考文献:

- [1] MINOR J E. Windborne debris and the building envelope[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1994, 53(1/2): 207. DOI: 10.1016/0167-6105(94)90027-2.
- [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. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0431(2002)8:2(42).
- [3] TACHIKAWA M. Trajectories of flat plates in uniform flow with application to wind-generated missiles[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 14(1/3): 443. DOI: 10.1016/0167-6105(83)90045-4.
- [4] HOLMES J D, LETCHFORD C W, NING L. Investigations of plate-type windborne debris. Part II: Computed trajectories [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2006, 94(1): 21. DOI: 10.1016/j.jweia.2005.10.002.
- [5] LIN N, LETCHFORD C, HOLMES J. Investigation of plate-type windborne debris. Part I: Experiments in wind tunnel and full scale [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94(2): 51. DOI: 10.1016/j.jweia.2005.12.005.
- [6] VISSCHER B T, KOPP G A. Trajectories of roof sheathing panels under high winds [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(8): 697. DOI: 10.1016/j.jweia.2007.01.003.
- [7] RICHARDS P J, WILLIAMS N, LAING B, *et al.* Numerical calculation of the three-dimensional motion of windborne debris [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10/11): 2188. DOI: 10.1016/j.jweia.2008.02.060.
- [8] KORDI B, KOPP G A. "The debris flight equations" by C.J. Baker [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(3/4): 151. DOI: 10.1016/j.jweia.2008.10.001.
- [9] 段旻, 谢壮宁, 石碧青. 低矮房屋瞬态内压的风洞试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2012, 45(7): 10. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2012.07.013.
DUAN Min, XIE Zhuangning, SHI Biqing. A wind tunnel study of the transient internal pressure of a low rise building[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(7): 10. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2012.07.013.
- [10] YAU S C, NING L, VANMARCKE E. Hurricane damage and loss estimation using an integrated vulnerability model[J]. *Natural Hazards Review*, 2011, 12(4): 184. DOI: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000035.
- [11] VICKERY P J, LIN J, SKERLJ P F, *et al.* HAZUS-MH hurricane model methodology. I: Hurricane hazard, terrain, and wind load modeling[J]. *Natural Hazards Review*, 2006, 7(2): 82. DOI: 10.1061/(ASCE)1527-6988(2006)7:2(82).
- [12] COPE A D. Predicting the vulnerability of typical residential buildings to hurricane damage [D]. Gainesville: University of Florida, 2004.
- [13] GARCIA, P A. Estimacion de danos producidos por viento en edificaciones industriales [D]. Puerto Rico: University of Puerto Rico (Mayaguez), 2008.
- [14] 吴风波, 冀晓文, 黄国庆, 等. 基于简化渐进破坏的低矮房屋围护结构风致易损性分析[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(5): 32. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0199.
WU Fengbo, JI Xiaowen, HUANG Guoqing, *et al.* Wind-induced fragility analysis of low-rise building envelope based on simplified progressive damage [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(5): 32. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0199.
- [15] LIN N, VANMARCKE E, YAU S C. Windborne debris risk analysis - Part II. Application to structural vulnerability modeling[J]. *Wind and Structures*, 2010, 13(2): 207. DOI: 10.12989/was.2010.13.2.207.
- [16] DAO T N, VAN DE LINDT J W, PREVATT D O, *et al.* Probabilistic procedure for wood-frame roof sheathing panel debris impact to windows in hurricanes [J]. *Engineering Structures*, 2012, 35(2012): 178. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.11.009.
- [17] 陈胜. 基于风致飞掷物冲击和风荷载破坏的低矮房屋风灾易损性研究[D]. 上海: 同济大学, 2021.
CHEN Sheng. Vulnerability study on wind disaster of low-rise buildings based on the damages by windborne debris impact and wind loads[D]. Shanghai: Tongji University, 2021.
- [18] 林华坛. 板状风致碎片马格努斯效应研究及应用[D]. 上海: 同济大学, 2020.
LIN Huatan. Research and application of Magnus effect of plate-like windborne debris[D]. Shanghai: Tongji University, 2020.
- [19] 宋芳芳, 欧进萍. 台风致碎片运动及其对围护结构冲击破坏分析[J]. *工程力学*, 2010, 27(7): 212. DOI: CNKI:SUN:GCLX.0.2010-07-034.
SONG Fangfang, OU Jinping. Typhoon-induced debris movement and impact damage analysis of structural envelopes [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(7): 212. DOI: CNKI:SUN:GCLX.0.2010-07-034.
- [20] WILLS J, LEE B, WYATT T. A model of wind-borne debris damage [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(4): 555. DOI: 10.1016/s0167-6105(01)00197-0.