

门窗系统失效对轻钢结构屋面风致易损性影响

张皓¹,尹浩¹,刘鹏飞¹,张锡龙²,董超²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中国建筑第二工程局有限公司,辽宁 沈阳 110000)

摘要 目的 研究在风荷载作用下,低层冷弯薄壁型钢结构房屋门窗系统失效对屋面失效破坏产生的影响。方法 建立二层冷弯薄壁型钢结构模型,采用蒙特卡洛方法模拟计算不同抗风压等级门窗在风压及飞掷物共同作用下的失效概率;两种门窗系统失效状态,采用基于构件的易损性评估法建立不同门窗系统失效状态下屋面的风致易损性曲线。结果 抗风压强度等级对门窗系统的风致失效概率存在较为显著的影响,迎风面门窗的失效会使屋面达到各极限破坏状态所需的名义风速有不同程度的降低。结论 适当地提高门窗抗风压等级可有效降低迎风墙面形成无遮掩洞口的概率,避免因室内压力骤增造成屋面过早破坏,在结构抗风设计中应合理考虑外门窗抗风性能及影响。

关键词 风荷载;低层冷弯薄壁型钢结构;易损性;抗风设计

中图分类号 TU392.1 文献标志码 A

Effects of Doors and Windows System Failure on Wind Fragility of Light Steel Roof

ZHANG Hao¹, YIN Hao¹, LIU Pengfei¹, ZHANG Xilong², DONG Chao²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Construction Second Engineering Bureau Ltd, Shenyang, China, 110000)

Abstract: The purpose of this paper is to study the influence of doors and windows system failure of low-rise cold-formed thin-walled steel structure on the failure of roof system under wind load. A two-story cold-formed thin-walled steel structure model is established, and the failure probability of doors and windows with different wind pressure levels under the combined action of wind pressure and flying objects is simulated by Monte Carlo method. Two kinds of door and window system failure states are proposed. The wind-induced vulnerability curves of roof under different failure states of door and window system are established by component-based vulnerability assessment method. The results show that the wind pressure strength grade has a significant effect on the wind-induced failure probability. The failure of windward doors and windows will reduce the nominal

收稿日期:2022-03-22

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1100404);国家自然科学基金重点项目(51738007);沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目(RC220171)

作者简介:张皓(1983—),男,教授,博士,主要从事工程结构防灾减灾等方面研究。

wind speed required for the roof to reach each limit failure state to varying degrees. It is concluded that appropriately increasing the wind pressure level of doors and windows can effectively reduce the probability of forming an uncovered opening on the windward wall surface, and avoid premature damage to the roof caused by the sudden increase of indoor pressure. The wind resistance performance and influence of external doors and windows should be reasonably considered in the wind resistance design of the structure.

Key words: wind loads; low-rise cold-formed thin-wall steel structure; fragility; wind-resistant design

低层冷弯薄壁型钢结构是一种新型轻钢结构体系,其主体龙骨骨架由型钢组合而成,再利用各类板材作为围护构件形成围护系统。文献[1]研究表明:低层冷弯薄壁型钢结构体系具有良好的环保性能以及抗灾性能,且具有功能布局灵活多样等特点。我国地处西北太平洋西岸,海陆热力性质差异大,常年遭受台风灾害,已有风灾调查结果表明^[2]:受风压和飞掷物的共同影响,轻钢结构门窗、屋面板等围护构件的失效概率高于主体结构。近年来,国内外学者从多个角度对风荷载作用下低层建筑围护构件及系统抗风性能进行研究。关于飞掷物对围护构件抗风性能影响方面,A. D. Cope 等^[3]通过风洞试验,建立了考虑多因素影响的低矮建筑门窗遭受飞掷物冲击破坏的概率模型;宋芳芳等^[4]通过理论分析,研究了风致碎片分布、碎片飞行轨迹等因素导致围护构件损伤破坏的计算方法。关于门、窗等围护构件失效后造成低层建筑内风压变化方面,T. Stathopoulos 等^[5]应用快速溶解膜技术模拟墙面突然开洞时结构风致内压的瞬态响应;T. K. Guha 等^[6]根据风洞试验数据,得到不同建筑体积、洞口尺寸与建筑风致内压特性之间的关系。关于风荷载作用下冷弯薄壁型钢屋面系统失效研究方面,K. Myuran 等^[7]进行了屋面—檀条节点抗拉疲劳破坏试验,基于试验结果建立并验证了节点静力疲劳抗拉性能模型;M. Mahendran 等^[8]研究了屋面板跨度、檩条间距等因素对冷弯薄壁型钢屋面系统中屋面板与檩条连接节点拉脱破坏的

影响,对现行标准中的自攻钉抗拉脱能力设计方法提出了修改建议。

目前国内外研究在评估低层冷弯薄壁型钢结构屋面风致易损性时,较少考虑风压及飞掷物对门、窗造成开孔破坏的影响。基于此,笔者采用基于构件的易损性评估法,研究门窗系统失效程度对低层冷弯薄壁型钢结构屋面风致易损性的影响,可提升低层冷弯薄壁型钢结构抗风性能,促进该类结构的推广应用。

1 易损性分析方法

基于构件的易损性评估法,按如下功能函数判断构件的失效状态:

$$Z = E - S. \quad (1)$$

式中: E 为构件的抗风能力; S 为风荷载对构件的作用效应。假设 $Z < 0$ 时,构件失效。

建立门窗、屋面板的荷载概率模型及抗风能力概率模型,基于蒙特卡洛法模拟计算各名义风速下围护构件的近似失效概率:

$$P_1 = \frac{M_i}{M}. \quad (2)$$

式中: P_1 为围护构件的失效概率; M_i 为达到失效状态的围护构件数量; M 为模拟次数。

引入损失率 R ,用来描述构件的损坏程度:

$$R = \frac{M_c}{N}. \quad (3)$$

式中: N 为结构围护系统中某一类构件总数(面积); M_c 为失效构件的数量(面积)。

结构围护系统中各类构件超越某一破坏等级的概率计算方法如下:对构件重复进行

n 次蒙特卡洛模拟,将第 m 次模拟中构件达到这一破坏等级的状态记为 w_m ,在模拟过程中计算构件损失率 R ,当构件达到或者超过这一破坏等级时,记 $w_m = 1$,反之记 $w_m = 0$;此时构件超越这一破坏等级的概率 M 可按式(4)进行计算,其余破坏等级超越概率的计算方法与此相同。

$$M = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n w_m .$$

(4)

2 围护构件荷载概率模型

2.1 风压概率模型

低层房屋的围护系统在风灾中主要受垂直于其表面方向的平均风压和脉动风压影响,通过阵风效应因子 G 反映瞬时脉动风压对围护构件的影响。综合文献[9–13]的建议,选择式(5)对作用在围护构件上的风压值进行计算:

$$w = 2.04 \times \frac{1}{2} \rho v_0^2 \mu_h (GC_p - GC_{pi}) .$$

(5)

式中: w 为风压,Pa; G 为阵风效应因子; ρ 为空气密度,取 1.25kg/m^3 , v_0 为 10 min 平均风速; μ_h 为风压高度变化系数; GC_p 为外风压系数; GC_{pi} 为内风压系数,与 3 s 阵风风速配套使用,风速时距取 10 min 平均风速以匹配中国荷载规范,风速时距换算系数为 $2.04^{[10]}$ 。假设 GC_p 、 GC_{pi} 、 μ_h 均服从从正态分布, GC_p 、 GC_{pi} 的均值与名义值之比为 0.95,变异系数为 $0.12^{[11]}$, μ_h 的名义值为 1,变异系数为 $0.19^{[12]}$,随机抽样时仅保留偏离均值不超过 2 倍标准差的抽样值。

2.1.1 外风压系数取值

结构外风压系数主要与建筑体型、风向角有关,笔者主要考虑不同抗风压等级门窗失效对屋面系统易损性的影响,设垂直于屋脊的来流风向为唯一风向角,即最易导致门窗失效的风向角,综合文献[3,9–13]的建议,建立风向角下围护系统外风压系数分区(见图 1 及表 1)。

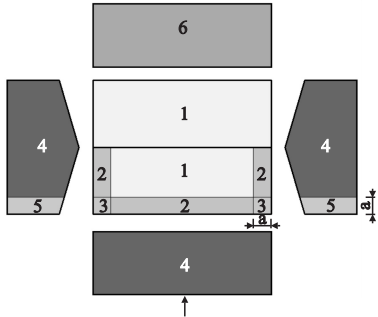


图 1 外风压系数分区

Fig. 1 External wind pressure coefficient partition

表 1 围护系统风压系数名义值

Table 1 Nominal value of wind pressure coefficient of enclosure system

分区	GC_p	分区	GC_p
1	-1.0	4	+1.0
2	-1.8	5	+1.0
3	-2.8	6	-0.6

2.1.2 内风压系数取值

对于门窗失效造成的内风压变化,采用文献[14]建议的公式进行计算。简单体型低层房屋单墙开洞状态下内风压系数计算如下:

$$GC_{pi} = GC_{pe} .$$

(6)

式中: GC_{pe} 为开孔所在墙面的外部风压系数; GC_{pi} 为建筑内风压系数。

简单体型房屋迎风、背风墙面对开洞状态下内风压系数计算如下:

$$GC_{pi} = \frac{GC_{pw}}{1 + (A_L/A_W)} + \frac{GC_{PL}}{1 + (A_W/A_L)} .$$

(7)

式中: A_W 、 A_L 分别为迎风、背风墙面开孔面积; GC_{pw} 、 GC_{PL} 分别为迎风、背风墙面外风压系数。

2.2 飞掷物冲击破坏概率模型

门窗飞掷物破坏概率采用 Cope^[3] 提出的模型进行计算:

$$P_D(v) = 1 - \exp(-a \times N_a \times b \times c \times d) .$$

(8)

式中: $P_D(v)$ 为发生飞掷物冲击破坏的概率; a 为潜在飞掷物的比例; N_a 为拟定的飞掷物总数; b 为飞掷物击中房屋的比例; c 为玻璃门窗占迎风墙面面积的比例; d 为飞掷物冲击动量

超过破坏临界的概率。 a, b 和 d 均是经调整后与 10 min 平均风速配套使用的参数。

3 围护构件抗风能力概率模型

3.1 门窗抗风能力概率模型

根据定级检测压力差值 P_2 ,《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法》(GB/T 7106—2008)^[15] 将门窗的抗风压能力分为 9 级,如表 2 所示。

表 2 建筑外门窗抗风压性能分级

Table 2 Wind pressure performance classification of building doors and windows kPa

分级	P_2	分级	P_2
1	$1.0 \leq P_2 < 1.5$	6	$3.5 \leq P_2 < 4.0$
2	$1.5 \leq P_2 < 2.0$	7	$4.0 \leq P_2 < 4.5$
3	$2.0 \leq P_2 < 2.5$	8	$4.5 \leq P_2 < 5.0$
4	$2.5 \leq P_2 < 3.0$	9	$5.0 \leq P_2 < 5.5$
5	$3.0 \leq P_2 < 3.5$		

假设门窗抗风压承载力服从正态分布,分布参数按以下方法确定。

首先指定建筑的外门窗抗风压强度等级,取该等级的 3 个试件为一组;然后根据表 2 中各强度等级 P_2 上下界确定的均匀分布,对该组试件进行随机抽样,以每组试件中 P_2 的最小值作为该组试件的定级值。

根据下式确定正态分布参数。

$$\frac{P_2 - \bar{P}}{\bar{P} \times C_{ov}} = \Phi^{-1}(0.33).$$
 (9)

式中: P_2 为该抗风压强度等级门窗多组样本定级值中的 0.33 分位值, \bar{P} 为该抗风压等级门窗的抗风压承载力均值; C_{ov} 为抗风压承载力的变异系数; Φ^{-1} 为标准正态分布函数的反函数。

由式(8)可推算出抗风压承载力平均值为 $\bar{P} = P_2 / (1 - 0.4399 \times C_{ov})$,标准差为 $\bar{P} \times C_{ov}$ 。假定当门窗抗风压承载力 P_0 小于其承担的总净风压值 F_0 时,门窗发生破坏。

3.2 屋面抗风能力概率模型

低层冷弯薄壁型钢结构屋面与檩条之间

的连接主要是用自攻钉连接,在风压作用下的失效模式主要有以下两种^[16]:一种是压型钢板于自攻钉头处拉脱,另一种是自攻钉于基材中拔出。对应上述两种破坏模式的自攻钉承载力计算公式如下。

抗拔出承载力:

$$N_{ot} = 0.75 t_c d f_2.$$
 (10)

式中: t_c 为自攻钉钻入基材深度,mm; d 为自攻钉直径,mm; f_2 为基材材料屈服强度,MPa。

抗拉脱承载力:

$$N_{ov} = 0.008 \times \left(9.52 - \frac{49f_y d_h}{Et}\right)^2 \times \left(\frac{h_c}{p}\right)^{\frac{3}{4}} \times \left(\frac{W_t}{W_c}\right)^{\frac{1}{5}} \times \left(12 + \frac{1\,500\,t^2}{Ld_h}\right)^{\frac{1}{3}} d_h t f_y.$$
 (11)

式中: f_y 为压型钢板板材的屈服强度,按 250 级结构级钢计算,MPa; d_h 为自攻螺钉钉头直径,mm; E 为压型钢板板材的弹性模量,GPa; t 为压型钢板厚度,mm; h_c 为波高,mm; p 为波距,mm; W_t 和 W_c 的含义见图 2,mm; L 为檩条间距,mm。

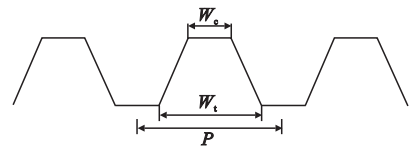


图 2 压型钢板截面示意图

Fig. 2 Section diagram of profiled steel plate

取二者间较小值作为自攻钉承载力极限值,假设自攻钉承载力相关参数均服从正态分布(见表 3), ε 是标准差。

表 3 屋面板抗风能力计算的统计参数

Table 3 Statistical parameters for wind resistance calculated of roof panel

参数	均值	变异系数	截断位置
t	名义值	0.035	均值 $\pm 2\varepsilon$
f_1, f_2	$1.27 \times$ 名义值	0.077	均值 $\pm 2\varepsilon$
t_c	名义值	0.035	均值 $\pm 1.5\varepsilon$
d	$0.98 \times$ 名义值	0.013 5	均值 $\pm 1.5\varepsilon$
N_{ov}	名义值	0.1	均值 $\pm 2\varepsilon$
E	206GPa	0.015 9	均值 $\pm 2\varepsilon$
W_c	名义值	0.05	均值 $\pm 2\varepsilon$
W_t	名义值	0.05	均值 $\pm 2\varepsilon$
P	名义值	0.05	均值 $\pm 2\varepsilon$

4 模型介绍

研究对象为二层冷弯薄壁型钢结构,结构详细尺寸如图 3 所示。屋面采用 YXB38 - 150 - 900 压形钢板,由于自攻钉间存在荷载分担现象,因此将每块屋面板上首枚自攻钉失效作为屋面板失效的判定条件。

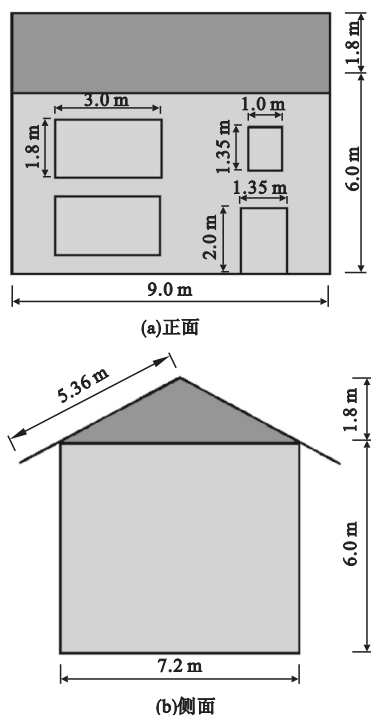


图3 结构立面图

Fig. 3 Elevation views of the structure

基于 ABAQUS 软件平台建立单块屋面压型钢板有限元模型,并将屋面板与檩条间的自攻钉连接设为铰支座,通过支座反力的变化模拟自攻钉的荷载响应,屋面板有限元模型如图 4 所示。

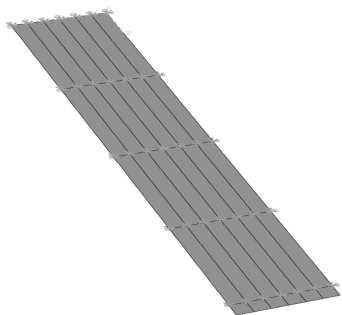


图4 屋面板有限元模型

Fig. 4 Finite element model of roof panel

按图 1 中的外风压系数分区对单块屋面板有限元模型施加三种位置、面积不同的单位面荷载,并计算各自攻钉节点处支座反力占总反力的权重,计算结果如图 5 所示。对于多个风压分区共同作用的屋面板,按叠加原理计算自攻钉受力权重。

0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	
0.014	0.063	0.048	0.063	0.014	
0.014	0.041	0.034	0.041	0.014	
0.015	0.045	0.037	0.045	0.015	
0.041	0.041	0.034	0.041	0.014	
0.014	0.063	0.048	0.063	0.014	
0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	
0.017	0.016	0.016	0.008	-0.003	
0.019	0.084	0.076	0.036	-0.002	
0.020	0.055	0.051	0.025	-0.002	
0.021	0.061	0.056	0.027	-0.002	
0.020	0.055	0.051	0.025	-0.002	
0.019	0.084	0.076	0.036	-0.002	
0.017	0.016	0.016	0.008	-0.003	
-0.001	0.000	0.000	0.025	0.058	
-0.001	0.008	-0.031	0.154	0.062	
-0.001	0.004	-0.015	0.096	0.063	
-0.001	0.004	-0.017	0.105	0.066	
-0.001	0.004	-0.015	0.096	0.063	
-0.001	0.008	-0.031	0.154	0.062	
-0.001	0.000	0.000	0.025	0.058	

图 5 自攻钉受力权重(粗线框表示施加荷载区域)

Fig. 5 Force weight of tapping nails(The thick box indicates the area where the load is applied)

5 屋面风致易损性分析

为研究门窗系统失效程度对低层冷弯薄壁型钢结构屋面风致易损性的影响,需要对门窗失效顺序及门窗系统所处失效状态进行分析。

5.1 门窗系统失效概率

选取一、三、五级抗风压强度等级的门窗,并赋予其不同的尺寸作为变量计算门窗系统的失效概率(见表4),为了保证失效概率计算结果的准确性,应考虑风压及飞掷物对门窗共同作用,门窗失效概率按式(12)计算,计算结果见图6、图7、图8。

表4 门窗尺寸

Table 4 Dimensions of doors and windows

门窗编号	长/m	宽/m	占所在墙面面积比/%
门	2.00	1.35	5.0
1 号窗	3.00	1.80	10.0
2 号窗	1.35	1.00	2.5

$$P_{\text{WD}} = P_{\text{W}} + P_{\text{D}} - P_{\text{W}}P_{\text{D}}. \quad (12)$$

式中: P_{WD} 为门窗风致失效概率; P_W 为风压

破坏概率; P_D 为飞掷物破坏概率。

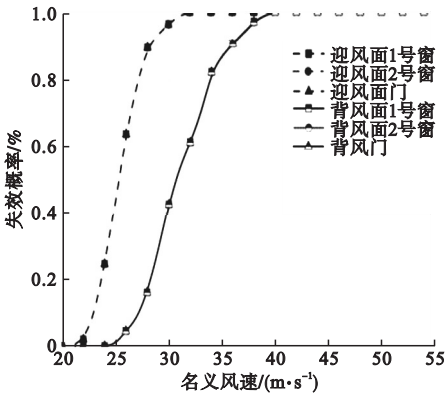


图6 一级抗风压门窗风致破坏概率曲线

Fig. 6 Wind-induced failure probability curve on primary level wind-resistant doors and windows

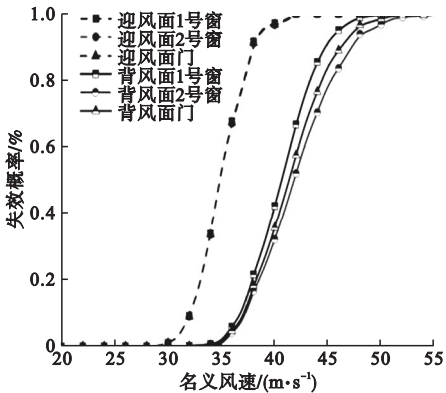


图7 三级抗风压门窗风致破坏概率曲线

Fig. 7 Wind-induced failure probability curve on three level wind-resistant doors and windows

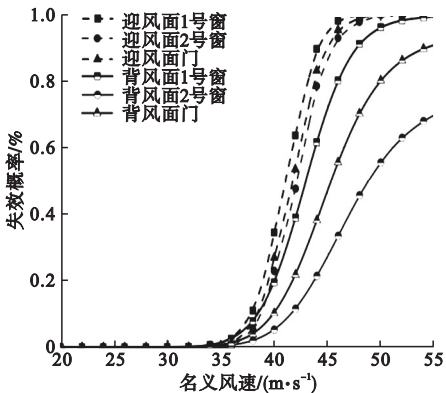


图8 五级抗风压门窗风致破坏概率曲线

Fig. 8 Wind-induced failure probability curve on five level wind-resistant doors and windows

由图6、图7、图8可知:结构处于封闭状态时,各抗风压强度等级迎风面门窗风致失效概率全部达到100%时对应的名义风速分别为

32 m/s、44 m/s、52 m/s;背风面门窗风致失效概率全部达到100%时对应的名义风速分别为40 m/s、52 m/s、80 m/s。抗风压强度等级对门窗系统失效概率的影响十分显著。

5.2 屋面易损性分析

在5.1节计算结果的基础上,将门窗系统失效状态分为两类。

第一失效状态:迎风面门窗全部失效时,内风压系数改变,需重新计算背风墙面门窗所受风荷载,因此定义迎风面门窗全部失效为门窗系统的第一失效状态。背风墙面不同抗风压等级门窗在此状态下的失效概率曲线见图9。

第二失效状态:由图9可知,进入第一失效状态后。抗风压强度等级为一、三、五级的背风墙面门窗完全失效对应的名义风速分别为24 m/s、34 m/s、40 m/s,因此可认为背风面各抗风压强度等级的门窗会继迎风面门窗失效后迅速失效,故定义门窗全部失效为门窗系统的第二失效状态。

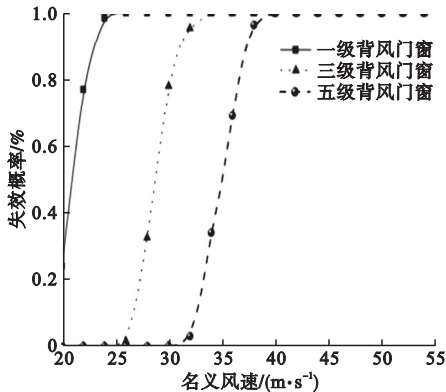


图9 第一失效状态下背风墙面门窗风致破坏概率曲线

Fig. 9 Wind induced failure probability curve of lee wall doors and windows under the first failure state

根据第2、3节所述方法和第4节章有限元模拟所得屋面自攻钉风荷载响应数据建立屋面板风荷载概率模型及自攻钉抗力概率模型,基于蒙特卡洛方法按式(2)得到单块屋面板近似失效概率,按式(4)计算屋面整体的超越破坏概率,其中独立重复试验次数 n 取5 000次^[17],分别得到屋面在门窗系统处

于封闭状态、第一、第二失效状态下的易损性曲线(见图 10、图 11、图 12)。根据文献[18]的建议,屋面破坏等级矩阵按表 5 定义。

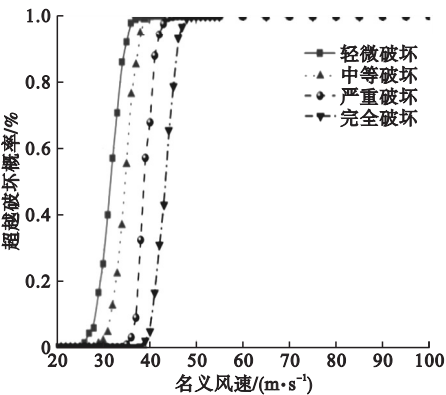


图 10 封闭状态下屋面系统风致破坏易损性曲线

Fig. 10 Wind induced damage fragility curve on roof system under closed condition

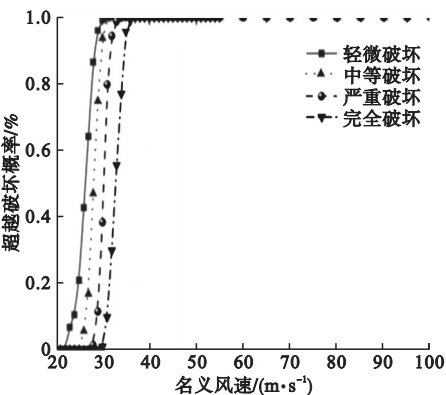


图 11 第一失效状态下屋面系统风致破坏易损性曲线

Fig. 11 Wind induced damage fragility curve of roof system under the first failure state

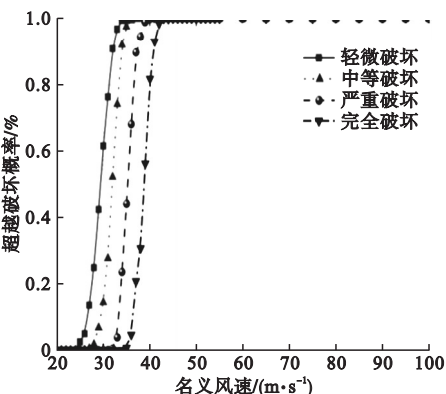


图 12 第二失效状态下屋面系统风致破坏易损性曲线

Fig. 12 Wind induced damage fragility curve of roof system under the second failure state

表 5 屋面破坏等级矩阵

Table 5 Damage level matrix of roof		
破坏等级	定性描述	屋面破坏程度
1	轻微破坏	$0 < R_D \leq 5\%$
2	中等破坏	$5\% < R_D \leq 15\%$
3	严重破坏	$15\% < R_D \leq 30\%$
4	完全破坏	$R_D > 30\%$

基于屋面风致易损性曲线可知:当名义风速为 32 m/s 时,门窗系统处于封闭、第一、第二失效状态下的屋面达到“中等破坏”状态的概率分别为:12.5%、99.5%、52.1%;当名义风速为 44 m/s 时,屋面达到“严重破坏”状态的概率分别为:99.5%、100%、100%;当名义风速为 52 m/s 时,屋面达到“完全破坏”状态的概率均为 100%。迎风面门窗的失效使屋面“中等破坏”状态的超越失效概率达到 100% 所需的名义风速降低了 9 m/s,使“完全破坏”状态的超越失效概率达到 100% 所需的名义风速降低了 13 m/s。

6 结 论

(1)抗风压强度等级对结构门窗系统的风致失效概率存在较为显著的影响;随着抗风压强度等级的提高,门窗面积对门窗风致失效概率的影响呈增大趋势。

(2)迎风面门窗的失效使屋面达到各破坏等级所需的名义风速有不同程度的降低,因此选择合适的抗风压强度等级可提高门窗系统在风灾中首次破坏的风速阈值,增加屋面的安全性。

(3)由于本分析中计算工况有限,以上分析结果暂未考虑檩条对自攻钉受力的影响及迎、背风面门窗面积比、屋面板类型、自攻螺钉间距等因素对屋面风致易损性的影响,后续研究将对上述内容适当予以考虑。

参考文献

[1] 张旭东,张利君,刘敬疆. 装配式冷弯薄壁型钢结构房屋在农房建设中的应用研究[J]. 建筑科学,2020,6(增刊 2):422-431.

- (ZHANG Xudong, ZHANG Lijun, LIU Jingjiang. Study on the application of prefabricated cold-formed thin-walled steel structure building in rural Housing construction [J]. Building science, 2020, 36 (S2): 422-431.)
- [2] MINOR J E. Lessons learned from failures of the building envelope in windstorms [J]. Journal of architectural engineering, 2005, 11 (1): 10-13.
 - [3] COPE A D. Predicting the vulnerability of typical residential buildings to hurricane damage [M]. Florida: University of Florida, 2004.
 - [4] 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): 212-220.
(SONG Fangfang, OU Jinping. Typhoon-induced debris movement and impact damage analysis of structural envelopes [J]. Engineering mechanics, 2010, 27 (7): 212-220.)
 - [5] STATHOPOULOS T, LUCHIAN H D. Transient wind-induced internal pressures [J]. Journal of engineering mechanics, 1989, 115 (7): 1501-1514.
 - [6] GUHA T K, SHARMA R N, RICHARDS P J. Internal pressure in a building with multiple dominant openings in a single wall: Comparison with the single opening situation [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2012, 107: 244-255.
 - [7] MYURAN K, MAHENDRAN M. Unified static-fatigue pull-through capacity equations for cold-formed steel roof battens [J]. Journal of constructional steel research, 2017, 139: 135-148.
 - [8] SIVAPATHASUNDARAM M, MAHENDRAN M. Development of fragility curves for localised pull-through failures of thin steel roof battens [J]. Engineering structures, 2016, 124: 64-84.
 - [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB50009-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
 - [10] The American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for buildings and other structures: American society of civil engineers/structural engineering institute 7-05 [S]. U. S. : American Society of Civil Engineers, 2005.
 - [11] ELLINGWOOD B R, TEKIE P B. Wind load statistics for probability-based structural design [J]. Journal of structural engineering, 1999, 125 (4): 453-463.
 - [12] The American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for buildings and other structures: American society of civil engineers/structural engineering institute 7-10 [S]. U. S. : American Society of Civil Engineers, 2010.
 - [13] 赵明伟, 顾明. 轻型钢结构风灾易损性概率分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43 (9): 3609-3618.
(ZHAO Mingwei, GU Ming. Probability wind vulnerability analysis of light-weight steel buildings [J]. Journal of central south university (science and technology), 2012, 43 (9): 3609-3618.)
 - [14] 占毅, 袁静. 简单体型低层民房风致内压系数的静态计算方法[J]. 浙江建筑, 2009, 26 (11): 18-21.
(ZHAN Yi, YUAN Jing. Statistical calculation method of wind induced intrinsic pressure coefficient for simple [J]. Zhejiang construction, 2009, 26 (11): 18-21.)
 - [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建筑外门窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法: GB/T7106—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
(Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Classification and testing method for air tightness, water tightness and wind pressure resistance of building doors and Windows: GB/T7106—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.)
 - [16] GINGER J D, MEHTA K C, YEATTS B B. Internal pressures in a low-rise full-scale building [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1997, 72: 163-174.
 - [17] 吴凤波. 台风作用下轻型钢结构的风灾易损性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
(WU Fengbo. Vulnerability analysis of light-weighted steel structures under typhoons [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.)
 - [18] GARCÍA-Palencia A J. Estimación de daños producidos por viento en edificaciones industriales [D]. Puerto Rico: University of Puerto Rico (Mayaguez), 2008.

(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)