

轻钢屋面自攻钉节点在台风作用下时变可靠度研究

杨娜^{1,2†}, 刘威¹, 白凡^{1,2}, 葛瀚文¹

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;

2. 结构风工程与城市风环境北京市重点实验室(北京交通大学), 北京 100044)

摘要:为建立台风作用下自攻钉节点灾后性能评估办法, 首先基于风洞试验的屋面时程风压系数数据, 结合模拟台风的风速和风向信息, 利用雨流分析法计算台风过境期间的屋面风压系数矩阵, 进而用于不同风速下的节点抗力退化模型计算。其次, 结合台风荷载模型, 采用蒙特卡罗模拟方法, 获得沿海城市自攻钉节点的时变可靠度指标, 从而实现基于概率的自攻钉节点抗风性能评估。此外, 根据模拟台风方法给出模拟台风的风速及风向的解析解, 同时得到了台风致自攻钉节点抗力退化数学模型。通过算例分析得出考虑自攻钉节点的台风致抗力退化会使其可靠度显著下降。在对轻钢屋面自攻钉节点进行可靠度评估时, 按照我国规范中的目标可靠指标较为保守。

关键词:屋面系统; 时变可靠度; 模拟台风; 自攻钉节点; 抗力退化模型; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: TU391; TU392.5

文献标志码: A

Research on Time-varying Reliability of Self-tapping Screw Joints of Light-weight Steel Roofs under Typhoon

YANG Na^{1,2†}, LIU Wei¹, BAI Fan^{1,2}, GE Hanwen¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing's Key Laboratory of Structural Wind Engineering and Urban Wind Environment,
(Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China)

Abstract: In order to establish a post-disaster performance evaluation method for self-tapping screw joints under typhoon, firstly, the time-history wind pressure coefficient data of the roof based on wind tunnel tests were collected. Secondly, typhoon simulation was carried out to get information on wind speed and direction. Then, the coefficient matrix of roof wind pressure during typhoon transit was calculated by rain-flow analysis method. Finally, the node resistance degradation model under different wind speeds was calculated. Combined with the typhoon load model, the time-varying reliability index of self-tapping screw joints in coastal cities was obtained by the Monte Carlo simulation method. Thus, the wind resistance performance evaluation of self-tapping screw joints based on probability is realized. Besides, the analytical solutions of the wind speed and wind direction of the simulated typhoon are given according to the method of simulating typhoon. Simultaneously, the mathematical model of resistance degradation of self-tapping screw joints caused by the typhoon is obtained. Through the analysis of a numerical example, it is concluded that the reliability of self-tapping screw joints is significantly reduced when the typhoon induced resistance degradation is

* 收稿日期: 2020-08-18

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0705600), National Key R&D Program of China(2018YFC0705600)

作者简介: 杨娜(1974—), 女, 辽宁大连人, 北京交通大学教授, 博士

† 通信联系人, E-mail: nyang@bjtu.edu.cn

considered. When evaluating the reliability of self-tapping screw joints for light steel roofing, the target reliability indicators in China's codes are relatively conservative.

Key words: roofing system; time-varying reliability; simulated typhoon; self-tapping screw joint; resistance degradation model; Monte Carlo simulation

随着我国制造业的发展,轻钢结构以其自重轻、工厂预制化程度高等特点,在厂房建筑中被广泛应用^[1-2]。其中部分轻钢屋面系统是由檩条及压型钢板通过自攻钉连接构成。由于屋面系统材质轻、柔度大,在局部屋面板承受较大的风吸力后,其自攻钉节点处往往会发生拔出破坏,从而导致整个轻钢屋面系统失效^[3-4]。因此,针对自攻钉节点的灾后性能评估方法亟待研究,从而为后期的屋面节点体系设计与服役期限评估提供理论支撑。

目前,学者们从不同层面对自攻钉节点的抗风性能进行了研究。在静力抗风性能方面,Xu等^[5-6]和Mahendran^[7]对澳大利亚常用的轻钢屋面自攻钉节点进行了试验研究,验证了轻钢屋面系统的失效是由于自攻钉节点处的局部破坏所致,分析了不同类型压型钢板的节点破坏过程及其抗风性能的影响因素。在节点的疲劳抗风性能方面,Morgan等^[8]和Beck等^[9]探讨了自攻钉连接式轻钢屋面发生疲劳损伤破坏的可能性,并通过疲劳试验表明,台风作用会使自攻钉节点周围的钢板局部破坏。在以往试验中,双跨足尺的屋面模型是研究自攻钉节点疲劳所常用的试验构件。然而,双跨足尺的试验模型对于建造工艺要求较高,且试验成本高、耗时长。因此,Mahendran^[10]通过研究模型较小且更易于操作的单节点试验模型替代了传统双跨足尺模型并得到广泛应用。Xu^[11]通过对循环荷载范围与均值分布的数据分析,验证了在疲劳损伤计算中,参考循环荷载范围的意义远大于参考循环荷载均值。伴随风压系数循环范围与均值的上升,风荷载循环次数集中在均值等于1/2范围处。在轻钢系统的灾后性能评估方面,宋芳芳等^[12]分析了台风作用期间轻钢结构的破坏过程,提出了风灾破坏全过程的预测分析方法等。黄国庆等^[13]、赵明伟等^[14]建立了构件抗力模型,通过预先设定构件的破坏准则,基于蒙特卡罗模拟,得到了各类构件及整体的超越破坏概率曲线。Mahendran等^[15]通过恒幅循环测试对自攻钉连接的檩条-腹板系统进行研究,给出了轻钢屋面自攻钉结构的抗疲劳曲线以及疲劳破坏设计

方程。Myuran等^[16]、葛瀚文^[17]结合静力及疲劳试验,考虑了在风致作用下自攻钉节点的静力极限承载力受疲劳的影响,得到其静力-疲劳统一方程,从而为该类节点抗疲劳设计和评估提供参考。

在时变可靠度研究方面,张建仁等^[18]在既有混凝土桥梁荷载和抗力的时变性基础上,建立了在役桥梁的时变可靠度计算模型。王草等^[19]考虑非平稳车载过程研究了桥梁时变可靠度评估新方法,并给出了考虑非平稳车载过程的桥梁结构时变可靠度显式计算公式。刘威等^[20]基于大气锈蚀模型和简支檩条的屈服计算理论,结合时变可靠度方法,提出了锈蚀檩条在台风作用下的可靠度计算模型。以上研究的共同特点是结构抗力的退化均服从连续分布,并均能推导出对应结构的时变可靠度显式计算公式。而对于本文主要研究的台风致损伤,轻钢屋面自攻钉节点抗力退化随每次台风荷载的发生而突变。此时基于显式的时变可靠度公式推导将不再适用,因此选择蒙特卡罗方法进行研究。

综上所述,本文首先通过模拟台风(风向和风速)方法,即基于风压系数时程数据,通过雨流分析法得到台风通过期间的风压系数矩阵;再结合自攻钉节点的承载力随循环荷载幅值的退化规律,计算出不同风速下损伤值的变化情况,从而得到自攻钉节点在台风作用下的抗力退化模型;继而进行基于概率的自攻钉节点抗风性能评估,分析并预测各沿海城市自攻钉节点的时变可靠度指标及服役寿命。

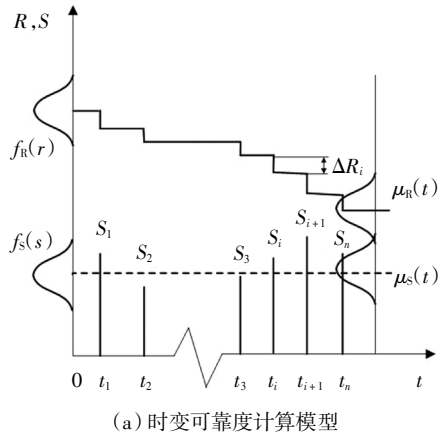
1 时变可靠度计算模型

本文通过蒙特卡罗模拟,设计了屋面自攻钉节点在台风致疲劳作用下的时变可靠度计算程序。图1(a)给出了自攻钉节点疲劳破坏的时变可靠度计算模型,即自攻钉节点抗力 R 及台风荷载 S (不考虑其他荷载效应)的变化模型。每当轻钢屋面系统遭遇一次台风荷载 S_i ,自攻钉节点抗力 R_i 下降 ΔR_i 。 $f_R(r)$ 、 $f_S(s)$ 分别为抗力、荷载的概率密度函数, $\mu_R(t)$ 、 $\mu_S(t)$

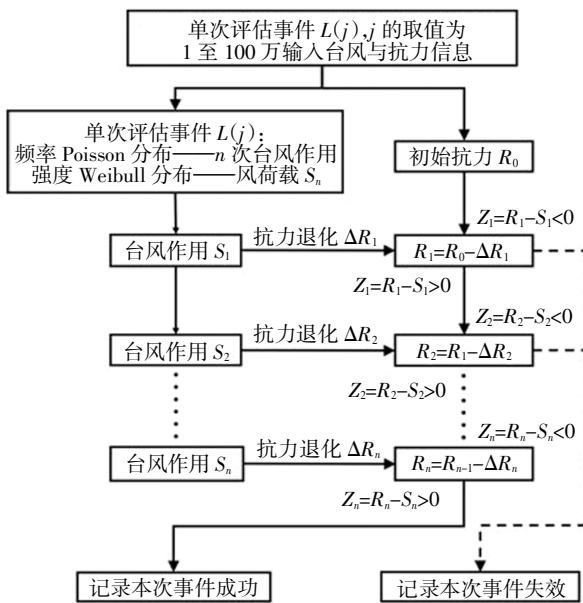
分别为抗力均值、荷载均值随时间的变化关系。

计算流程如图 1(b)所示,其中 $Z=R-S$ 为结构承载力极限状态方程,对应的极限状态是轻钢屋面系统自攻钉节点的疲劳破坏.具体步骤如下。

步骤 1:输入抗力信息及台风概率模型。



(a) 时变可靠度计算模型



(b) 时变可靠度计算流程

图 1 时变可靠度计算方法

Fig.1 Time-dependent reliability assessment method

步骤 2:对于单次台风事件 $L(j)$,随机生成对应的台风发生次数 n 及对应的 n 个台风荷载 S_n 。

步骤 3:计算由每次台风荷载 S_n 引起的抗力退化值 ΔR_n 。

步骤 4:每次台风过后,检查极限状态方程 Z_n ,若 $Z_n > 0$,则继续计算,否则停止计算,并将事件 $L(j)$ 记录为失效事件。

步骤 5:使用蒙特卡罗模拟,重复计算 100 万次,使计算结果趋于稳定的失效概率,然后将失效事件

总次数除以事件发生的总次数,得出该抗力与荷载分布模型下的失效概率。

1.1 基于概率分布的台风荷载模型

1.1.1 台风发生次数

在沿海地区,轻钢屋面系统经常遭遇风荷载影响.本文采用平稳 Poisson 过程来模拟台风发生,即在任一时间段 $(0, t_L]$ 内,台风事件发生次数 $N(t)=x$ 的概率为:

$$P\{N(t) = x\} = \frac{(\lambda \cdot t_L)^x}{x!} \exp(-\lambda \cdot t_L) \quad (1)$$

式中: x 为自然数; λ 为 Poisson 强度,即台风频率。

1.1.2 台风风速分布

在台风致疲劳作用下,不同风速导致的承载力退化程度不同.而 Weibull 概率分布在风荷载强度分析中广泛应用,其双参数曲线能拟合实际风速分布模型,故台风风速的累积分布函数可表示为:

$$F_s(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{u}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

式中: v 为 10 min 计平均风速, m/s; β 和 u 分别为服从 Weibull 分布的形状及尺度参数。

1.1.3 风荷载标准值

参考《建筑结构荷载规范》^[21],风荷载标准值 w_k (单位为 kN/m^2) 为:

$$w_k = \beta_{gz} \mu_{s1} \mu_z w_0 \quad (3)$$

$$w_0 = \frac{v^2}{1600} \quad (4)$$

式中: β_{gz} 为阵风系数; μ_{s1} 为风荷载局部体型系数; μ_z 为风压高度变化系数; w_0 为基本风压, kN/m^2 。

1.2 台风致自攻钉节点抗力退化模型

为研究台风期间屋面自攻钉节点的疲劳性能,从而得到其损伤值与风速的关系.本文参照 Jancauskas 等^[22]的模拟台风方法,首先基于风洞试验的屋面时程风压系数数据,结合台风通过时的风速和风向信息,利用雨流分析法计算台风过境期间的实际尺寸屋面风压系数矩阵.结合自攻钉节点抗力退化特性,计算不同风速下自攻钉节点由台风作用导致的抗力退化情况,从而得到轻钢屋面中自攻钉节点抗力退化模型。

1.2.1 风洞实验屋面风压系数矩阵

本文屋面风压系数时程数据基于东京工业大学(Tokyo Polytechnic University, TPU)的空气动力学数据库^[23],该数据库基于模拟郊区低矮建筑风洞试验.其中,试验缩尺模型比例为 1:100,速度缩尺比例为 1:3,时间缩尺比例为 3:100.模拟风场的风速对应

于实际 10 m 高度处 22 m/s. 为考虑风荷载作用下轻钢屋面的最不利位置, 选择平屋面屋角处为测试点. 采样频率为 15 Hz, 采样时长 600 s. 包括了 0~180°风向内间隔为 15°的 13 组数据, 每组数据由 9 000 个时程风压系数组成. 房屋模型的长、宽、高分别为 240 mm、160 mm、40 mm.

在估算结构因疲劳损伤而导致的抗力退化时, 诸如 Minner 损伤准则等的线性损伤理论是基于荷载的循环次数. 因此, 需要将本文获取的风压系数时程数据转换成循环荷载作用次数的分布形式. 利用雨流分析法^[24], 可将风荷载时程曲线转换为若干个荷载循环, 进而用于抗力退化值的计算.

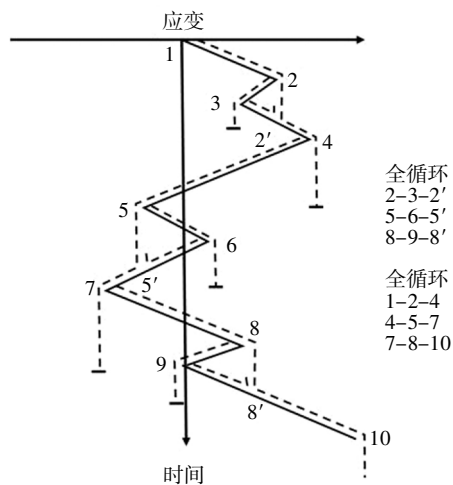
雨流分析以双参数法为基础, 基本原理如图 2 所示. 对于风压系数时程记录的每个荷载循环, 根据该循环荷载的均值和范围进行分类. 通过雨流分析法得到了风向为 0~180°, 间隔为 15°的 13 个风压系数循环矩阵. 矩阵的第一行和第一列分别为由“风压系数”表示的循环荷载的范围和均值, 每个单元内给出了对应的荷载循环次数. 表 1 列出了 45°风向处的

风压系数矩阵. 有些正压循环单元(屋面向下风压作用), 对屋顶造成的疲劳损伤可忽略^[22], 故不包括在分析矩阵中.

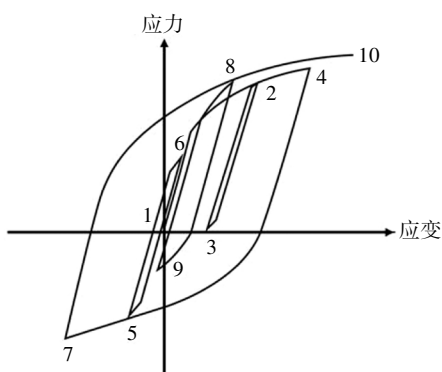
表 1 45°风向处风压系数矩阵

Tab.1 Matrix of wind pressure coefficient

循环荷载均值	at 45° wind direction									
	循环荷载范围									
	0.2	0.6	1.0	1.4	1.8	2.2	2.5	2.9	3.3	3.7
0.1	92.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.4	590.5	48.5	5.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.6	291.0	32.0	13.0	6.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.9	28.0	3.0	1.0	1.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.2	8.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0
1.4	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.5	0.0
1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0
2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
2.2	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.5	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0



(a) 雨流分析法示意图



(b) 应力-应变响应

图 2 雨流分析法原理图

Fig.2 Principle of the rain flow count method

1.2.2 模拟台风法

1) 模拟台风概述

通常仅根据最大风速来指定设计风, 而疲劳对应的是一段时期内风压的作用, 因此有必要根据风速和风向在其持续时间内的变化来指定设计台风, 假设为 5 h^[22]. 在台风通过期间, 通常会在风眼路径的边缘生成最大破坏程度的风荷载, 其风速根据台风行进速度矢量进行叠加.

台风过境时, 风眼到达不同位置的风速取决于中心压力 p 、台风风速最大时的半径 R' 、风眼前进速度 U 以及地形和其他气象因素. 当 $r' = R'$ 时(如图 3 所示), 所产生的峰值风速方向与最大峰值压力方向一致. 根据从模型房屋屋面角部得到的不同风向下的风压系数时程矩阵, 当台风行进 2.5 h 后, 模型房屋位于风眼路径的边缘, 此时行进速度与切向速度夹角 α 为 0° , 台风风向角度 θ 为 75° , 也就是自攻钉节点的最不利风向情况. 根据计算房屋与台风的相对运动, 得到风眼距房屋不同位置处的风向及风速.

由于自攻钉节点的疲劳损伤值与对应荷载幅值下循环次数有关, 而根据风洞试验数据得到的风压

系数矩阵中,荷载循环次数取决于分析时间间隔的时长.文献[22]指出,在台风过境期间,选取分析时间间隔(Δt)为15 min最接近真实工况,其中台风总作用时间5 h内的第一次、最后一次分析时间间隔选为7.5 min.并假定在该时间间隔内,建筑物所受到的风向角度和平均风速恒定.

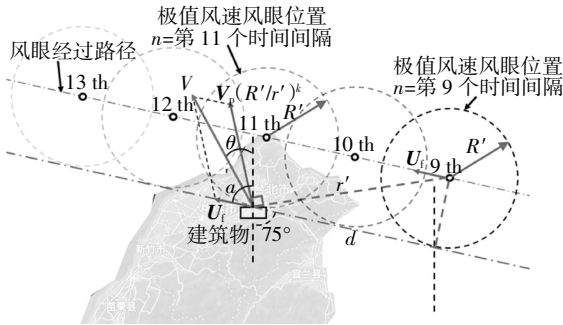


图3 模拟台风通过期间的风速和风向分析模型

Fig.3 Analytical model of wind speed and direction during simulated typhoon passage

2)模拟台风风速的确定

为了确定模拟台风的风速, Walker 等^[25]给出经验公式用于计算距台风中心为 r' , 10 m 高度处的最大 10 min 计平均风速 V .

$$V = V_p(R'/r')^k + U_f \tag{5}$$

式中: $V_p = C\sqrt{1010 - (p \times 10)}$, p 为台风中心大气压, kPa; R' 为峰值风速处的半径, km; 切向速度 $V_p(R'/r')^k$ 及前进速度 U_f 为向量相加(见图3); C 和 k 为常数, 可由台风数据拟合得到; K 为地形摩擦损失因子; 以下参数假定^[11]为当 $r' = R'$ 时出现的峰值风速参数, 适用于郊区一类的地形条件, 阵风因子取 1.7, 3 s 最大峰值风速为 70 m/s. 其中, 台风中心大气压 $p = 93$ kPa, 风眼前进速度 $U_f = 2$ m/s, 峰值风速处半径 $R' = 25$ km, $C = 4.5, k = 0.67$.

3)模拟台风风速及风向随过境时间的关系

基于上述模拟台风模型及特征:(a)可计算台风通过期间不同时段的风速大小. 其中, 由于风洞试验模拟的是 4 m 高度处, 所以还需要将经验公式计算的 10 m 高度处 10 min 计风速按公式(6)转化为房屋模型所对应的 4 m 高度处的 10 min 计平均风速;(b)利用三角几何关系和向量加法法则可计算不同时段的风向.

以第 11 个分析时间间隔, 即图 3 中 $T = 2.5$ h、切向速度与行进速度夹角为 $75^\circ, r' = R' = 25$ km 这

一情况为例, 计算可得 10 m 高度处最大 10 min 计平均风速约为 42 m/s, 即台风最大切向速度为 40 m/s, 前进速度 U_f 为 2 m/s. 按照《建筑结构荷载规范》, 转化为房屋模型所对应 4 m 高度处 10 min 计平均风速为 42 m/s, 即:

$$V_z = V_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \tag{6}$$

式中: V_z 为所求高度 z m 处的 10 min 计平均风速, m/s; V_{10} 为 10 m 高度 10 min 计平均风速, 地形条件为郊区, 风压高度变化系数截断高度为 10 m, 风速剖面指数 α 取 0.15.

式(7)和式(8)分别给出了本文模拟台风方法所得到的风速(4 m 高度处 10 min 计)及风向的解析解:

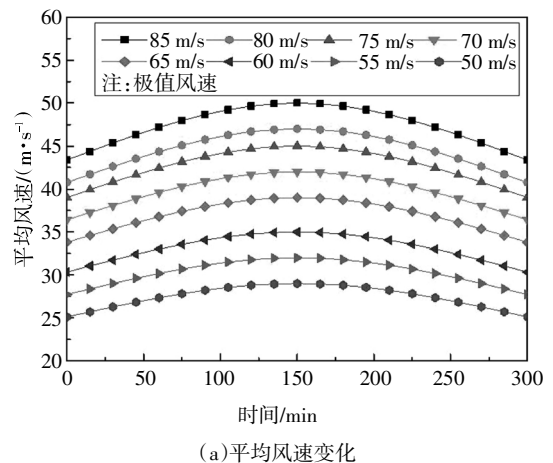
$$V = \sqrt{\left[V_p \left(\frac{R'}{r'} \right)^k \right]^2 + (U_f)^2 + 2 \cdot U_f \cdot V_p \left(\frac{R'}{r'} \right)^k \cdot \cos \alpha} \tag{7}$$

式中: $r' = \sqrt{(R'^2 + d^2)}$, $a = \frac{\pi}{2} - \left[\arctan \left(\frac{R'}{d} \right) \right]$, $d = |U_f \cdot (9000 - T)|$, $T = \Delta t \cdot (n - 1)$, $n = 1, 2, 3, \dots, 21$.

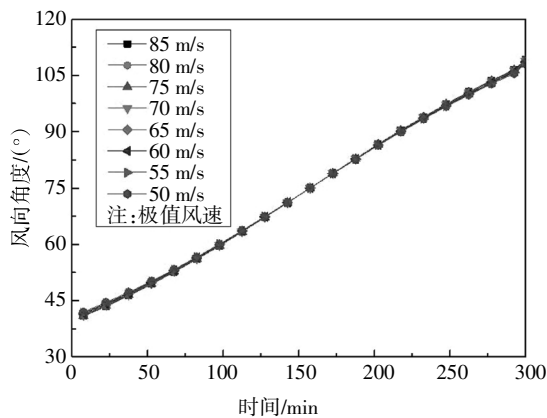
$$\theta = \frac{5}{12} \pi \pm \arccos \left\{ \frac{V^2 + U_f^2 - \left[V_p \left(\frac{R'}{r'} \right)^{0.57} \right]^2}{2 V U_f} \right\} \tag{8}$$

式中: θ 为风向角度; a 为行进速度与切向速度夹角; r' 为建筑物至风眼距离, m; d 为建筑物与台风风眼在路径上的投影距离, m; T 为台风作用时间, s; n 为分析时间间隔, s; n 为分析次序. 且式(7)(8)所涉及的其他距离单位均为 m, 时间单位均为 s.

图 4 给出了模拟台风通过期间, 3 s 计极值风速 50 ~ 85 m/s 下, 阵风因子为 1.7 时, 4 m 高度处屋面角位置 10 min 计平均风速和风向变化.



(a)平均风速变化



(b)平均风速的风向变化

图 4 不同极值风速台风作用期间的风速及风向变化

Fig.4 Variation of wind speed and direction during typhoon action with different extreme wind speeds

由于台风最大切向风速与前进速度 U_f 存在较大差距,使得风向夹角受极值风速影响较小,故在本次分析中,极值风速对各风向角度影响趋于同一条直线。

1.2.3 基于模拟台风法转换的实际尺寸屋面风压系数矩阵

根据风洞试验时程风压系数数据,对每个时间间隔内的风压系数矩阵(见表 1)进行如公式(9)的转换,从而得到实际尺寸下屋面风压系数矩阵(见表 2),具体转换方法如下:

1)通过对 1.2.1 节 13 个不同风向角度的屋面风压系数矩阵之间选取相近的矩阵进行线性插值,从而确定图 4 中 21 个时间间隔内对应风向角度的风压系数矩阵。

2)使用式(9)将风压系数矩阵(荷载循环次数)从风洞模型条件转换为实际尺寸条件。

$$N_f = N_{wt} \cdot \frac{V_1}{V_{wt}} \cdot \frac{T_1}{T_{wt}} \cdot \frac{1}{\text{缩尺比}} \quad (9)$$

式中: N_f 为实际尺寸屋面风压系数矩阵的循环次数; N_{wt} 为风洞实验屋面风压系数矩阵的循环次数; V_1 为图 4 中的最大 10 min 平均风速, m/s; T_1 为速度 V_1 的持续时间, s, 即分析时间间隔; V_{wt} 为风洞中的平均风速, 约为 10 m 高度处 22 m/s; T_{wt} 为风洞作用时间, 约为实际条件下 20 000 s。

对于 15 min 分析时间间隔, 通过上述计算方法可以得到 21 个实际尺寸建筑的风压系数矩阵。以 3 s 极值风速为 70 m/s 的台风为例, 45° 风向下的实际尺寸风压系数矩阵见表 2。通过观察风压系数矩阵, 发现大量循环集中在低循环均值和低循环范围处。随着循环均值或循环范围的增大, 循环次数变得更小。

表 2 45°实际尺寸风压系数矩阵
Tab.2 Matrix of wind pressure coefficients for actual dimensions at 45° kPa

循环荷载均值	循环荷载范围									
	0.2	0.6	1.0	1.4	1.8	2.2	2.5	2.9	3.3	3.7
0.1	697	11	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	4 475	368	38	15	0	0	0	0	0	0
0.6	2 205	243	99	45	15	8	0	0	0	0
0.9	212	23	8	8	15	8	0	0	0	0
1.2	61	15	0	0	0	15	15	0	0	8
1.4	15	8	0	0	0	0	8	8	4	0
1.7	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
2.0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.2	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.5	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1.2.4 台风致自攻钉节点抗力退化模型

根据 1.2.3 节可得到一次台风过境期间 21 个时间间隔(对应于 21 个风向角度)的实际尺寸建筑风压系数矩阵。为结合抗力退化值与荷载的关系, 需将风压系数 C_p 转化为已知风速下的风荷载值 w , kN/m²:

$$w = C_p \cdot w_0 \quad (10)$$

式中: $w_0 = v^2/1 600$ 。

考虑常见轻钢屋面檩条间距为 1 m, V125 型压型钢板单跨长度为 0.25 m, 则风荷载作用面积为 0.25 m²。为便于计算抗力退化值, 将式(10)中风荷载值 w 写为用力表达的形式, 即:将表 2 风压系数矩阵中的第一行循环荷载范围写成力表达的形式:

$$w' = 0.25C_p \cdot w_0 \quad (11)$$

基于相关自攻钉节点疲劳和静力的统一试验结果^[17], 在不同荷载范围作用下, 单次循环荷载作用下的抗力退化值 ΔF (单位为 kN)与荷载范围 w' 有如下关系:

$$\Delta F = 3 \times 10^{-5} \cdot (w')^{1.630 2} \quad (12)$$

对于每一个转化后的实际尺寸屋面风压系数矩阵, 通过累积该矩阵中不同循环荷载范围 w' 下的抗力退化值 $\Delta F \cdot N_f$, 可以得到 n 个循环荷载范围下的累积抗力退化值^[22]:

$$\Delta F_n = \sum_{i=1}^n (\Delta F_i \cdot N_{f_i}) \quad (13)$$

对于以某一速度过境的台风,通过计算可得21个时间间隔的实际尺寸屋面风压系数矩阵的抗力退化值.以3s计极值风速70m/s为例,给出了其抗力退化的时程分布(如表3所示).其中为便于计算,表格中风速均为10min计风速.通过叠加每个时间间隔内的抗力退化值,进而得到抗力退化值随台风作用时间的分布曲线.

表3 70 m/s 台风致抗力退化值分布

Tab.3 Distribution of resistance degradation value caused by typhoon of 70 m/s

台风作用时间/min	风向角度/(°)	风速/(m·s ⁻¹)	抗力退化值/kN
7.5	41	31	0.007
22.5	44	32	0.014
37.5	46	33	0.014
52.5	49	34	0.016
67.5	53	34	0.016
82.5	56	35	0.017
97.5	60	35	0.018
112.5	63	36	0.019
127.5	67	36	0.021
142.5	71	36	0.023
157.5	75	36	0.024
172.5	79	36	0.022
187.5	83	36	0.020
202.5	87	36	0.018
217.5	90	35	0.016
232.5	94	35	0.016
247.5	97	34	0.016
262.5	101	34	0.016
277.5	104	33	0.016
292.5	106	32	0.015
300.0	109	31	0.007
合计损伤值		0.351	

基于上述计算流程,可计算出不同台风风速下自攻钉节点的抗力退化值随时间的分布,进而得到结构在不同风速台风侵袭后自攻钉节点承载力的下

降情况,通过拟合可确定其退化模型,如图5所示.

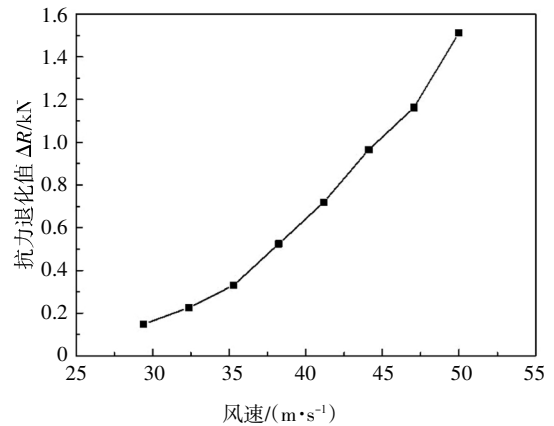


图5 台风致自攻钉节点抗力退化模型

Fig.5 Resistance degradation model of self-tapping screw joints caused by typhoon

最后通过拟合得到台风致自攻钉节点抗力退化数学模型,如式(14)所示,线性相关系数为0.9958.

$$\Delta R_i = 5 \times 10^{-8} v_i^{4.4347} \quad (14)$$

该数学模型表示轻钢屋面自攻钉节点在服役期间,每经历一次以10min计风速为 v_i (单位为m/s)的台风,其抗力退化 ΔR_i (单位为kN).

2 算例分析

根据上述台风荷载模型以及台风致节点抗力退化模型,以我国东南沿海11个城市的轻钢平屋顶屋面体系为例,分析自攻钉节点在考虑台风致抗力退化作用下的时变可靠度.选取节点形式为V125型,场地为郊区,地面粗糙程度为B类.阵风系数取1.7,局部体系系数取1.65,风压高度变化系数取1.0.轻钢屋面房屋尺寸为24m×16m×4m(长×宽×高),檩条间距为1m,V125型压型钢板单跨长度为0.25m,由此可使用公式(3)(4)得到台风风速与风荷载的关系.其中,自攻钉节点初始抗力值为1.5kN(不考虑初始抗力的随机性).

2.1 各沿海城市台风概率模型

通过统计我国东南沿海11个城市的台风数据^[20],其中包含了各地台风重现期及相应的台风风速,通过联立方程计算出服从Weibull分布的双参数 u 和 β 以及台风频率 λ ,结果整理如表4所示.

表 4 东南沿海城市台风参数

Tab.4 Typhoon parameters in southeast coastal cities

城市	u	β	λ
上海	17.49	1.50	0.25
宁波	18.16	1.61	0.30
温州	18.38	1.58	0.38
福州	18.76	1.62	0.42
厦门	19.23	1.73	0.50
台北	22.09	1.83	0.54
广州	17.00	1.72	0.49
深圳	18.41	1.77	0.54
香港	18.10	1.79	0.55
湛江	18.04	1.80	0.52
海口	18.66	1.85	0.55

2.2 各沿海城市时变可靠度计算

根据不同地区的台风荷载概率模型,结合台风致自攻钉节点抗力退化模型,利用蒙特卡罗模拟,计算轻钢屋面自攻钉节点在不同服役年限下的时变可靠度指标,即结构在(0, t_L]时段内的可靠概率 $R_p(t_L)$ 和可靠指标分别为:

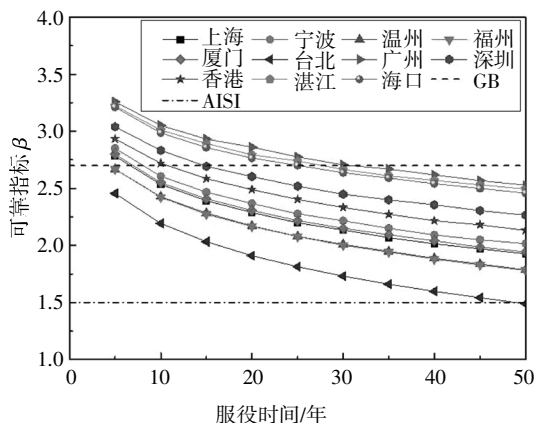
$$R_p(t_L) = P_r\{R(t) > S(t), \forall t \in (0, t_L]\} \quad (15)$$

$$\beta = \Phi^{-1}\{R_p(t_L)\} \quad (16)$$

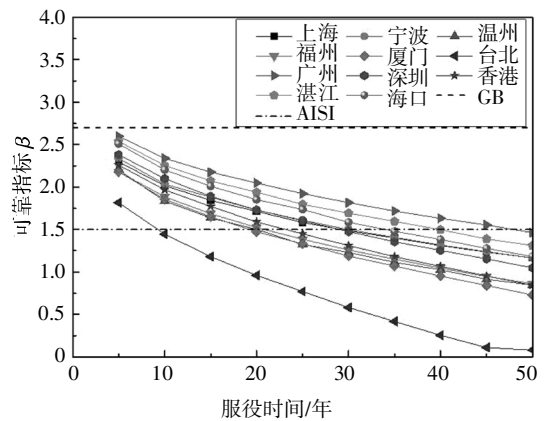
其中,若不考虑疲劳作用,则可进行初始抗力不变情况下的时变可靠度计算,此时:

$$R_p(t_L) = 1 - P_r\{R < S(t), \forall t \in (0, t_L]\} \quad (17)$$

通过对比抗力退化与不退化两种情况,计算 $t_L = 5, 10, 15, \dots, 50$ 年时的结构可靠度.绘制 11 个城市的时变可靠度指标(如图 6 所示),其中目标可靠指



(a) 不考虑抗力退化



(b) 考虑抗力退化

图 6 东南沿海城市时变可靠度汇总

Fig.6 Summary of time-varying reliability of southeast coastal cities

标基于我国《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2018)^[27]以及 AISI-S100-07 规范^[28],从而进行中规范下可靠度指标的对比分析.

2.3 可靠度计算结果与分析

时变可靠度理论反映了台风致疲劳损伤对自攻钉节点承载力退化的影响及台风的随机特性,使得轻钢围护系统的抗风设计更加科学合理,分析图 6 可得:

1)考虑抗力退化后,轻钢屋面自攻钉节点时变可靠度明显下降.随着服役时间的增加,台风发生次数的增加,台风荷载的影响也更加明显,可靠度下降程度相对增大.在本文的台风致抗力退化模型中,建筑物与台风风眼之间的最近距离为 25 km,作用时间为 5 h.而在 11 个城市风荷载模型中^[23],台风荷载的统计数据来自建筑物周围 500 km 范围内.故在本文时变可靠度分析模型下,在建筑物 500 km 半径范围内发生的台风,其风眼均会行进至距离建筑物 25 km 处,此时代表了该区域为受台风影响的极端危险区域,说明该假定涵盖了台风评估中的最不利情况.

2)本文分别参考中美两国的目标可靠指标,其中我国《建筑结构可靠度设计统一标准》所提出的可靠度规范,对应的是整个围护结构在三级延性破坏下的承载极限状态,不应小于可靠指标 2.7,但未单独针对轻钢屋面体系做出明确规定.而在美国 AISI 规范中该可靠指标规定为 1.5,且针对轻钢屋面系统,设定的可靠指标明显低于我国规范指标.基于我国规范给出的目标可靠指标,针对我国 11 个东南沿海城市,即使在不考虑抗力退化的情况下,宁波、福

州、厦门、台北等城市在 5~10 年内将达到目标可靠指标,其余 7 个城市则会在 30 年内达到该指标;而在考虑台风致自攻钉节点抗力退化的情况下,11 个城市在前 5 年服役期内均会达到该指标.因此,对于由自攻钉连接的檩条-压型钢板系统而言,我国规范的可靠指标较为保守.

3)基于 AISI 规范给出的檩条-压型钢板系统可靠指标,分析 11 个沿海城市的时变可靠度可得:在不考虑抗力退化的情况下,各城市在 50 年服役期内均不会达到目标可靠指标;而在考虑台风致抗力退化的情况下,台北将在服役 10 年左右达到目标可靠指标,上海、宁波、温州、福州、厦门、深圳、香港则会在服役 20~30 年内达到该指标,而广州、湛江、海口则有至少 35~50 年的服役期.

3 结论

针对轻钢屋面实现了基于概率的自攻钉节点抗风性能评估.对于抗力,首先利用模拟台风方法,即基于相关风洞试验的屋面时程风压系数数据,结合台风通过时的风速和风向信息,利用雨流分析法计算台风过境期间的实际尺寸屋面风压系数矩阵;结合相关自攻钉节点疲劳和静力的统一试验结果,计算台风致作用引起的抗力退化情况,从而得到台风致自攻钉节点抗力退化模型.对于荷载,参考台风荷载统计数据模型.最后,通过蒙特卡罗模拟,结合算例完成了轻钢屋面自攻钉节点的台风致时变可靠度研究,结论如下:

1)在评估台风作用对自攻钉节点的性能削弱方面,基于模拟台风方法给出了模拟台风的风速及风向的解析解,同时还给出了台风致自攻钉节点抗力退化数学模型.

2)通过时变可靠度分析,对于轻钢屋面系统,我国规范中针对轻钢屋面自攻钉节点的目标可靠指标相对保守.

3)考虑台风致抗力退化的情况,轻钢屋面自攻钉节点时变可靠指标显著下降.基于算例参数及 AISI 规范,仅考虑台风作用下,台北的轻钢屋面自攻钉节点服役年限为 10 年左右;上海、宁波、温州、福州、厦门、深圳、香港则会在 20~30 年内到达服役年限;而广州、湛江、海口则有至少 35~50 年的服役年限.

参考文献

- [1] 周绪红,姚欣梅,管宇,等.结构参数对低层轻钢房屋抗震性能影响分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(1):1-9.
ZHOU X H, YAO X M, GUAN Y, *et al.* Influence analysis of different structural parameters on seismic performance of low-rise lightweight steel buildings [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(1): 1-9. (In Chinese)
- [2] 管宇,周绪红,石宇,等.轻钢组合楼盖面内刚度和承载力计算方法研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(9):31-43.
GUAN Y, ZHOU X H, SHI Y, *et al.* Study on calculation method for in-plane stiffness and bearing capacity of thin-walled steel composite floor [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(9): 31-43. (In Chinese)
- [3] EATON K J, MAYNE J R. The measurement of wind pressures on two-storey houses at Aylesbury [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1975, 1: 67-109.
- [4] HOLMES J D. Wind loading of structures [M]. London: CRC Press, 2015: 13-17.
- [5] XU Y L, REARDON G F. Behaviour of different profiled roofing sheets subject to wind uplift [R]. Queensland: James Cook University of North Queensland, 1992: 2-8.
- [6] XU Y L, REARDON G F. Test of screw fastened profiled roofing sheets subject to simulated wind uplift [J]. Engineering Structures, 1993, 15(6): 423-430.
- [7] MAHENDRAN M. Profiled steel roof claddings under high wind forces [J]. Journal of Singapore Structural Steel Society, 1994, 5(1): 95-106.
- [8] MORGAN J, BECK V R. Failure of sheet-metal roofing under repeated wind loading [C]//Annual Engineering Conference 1976: Engineering 1976-2001. Queensland: Institution of Engineers, 1976: 290.
- [9] BECK V R, STEVENS L K. Wind loading failures of corrugated roof cladding [J]. Civil Engineering Transactions, 1979, 21(1): 45-56.
- [10] MAHENDRAN M. Behaviour and design of crest-fixed profiled steel roof claddings under wind uplift [J]. Engineering Structures, 1994, 16(5): 368-376.
- [11] XU Y L. Determination of wind-induced fatigue loading on roof cladding [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(9): 956-963.
- [12] 宋芳芳,欧进萍.轻钢结构工业厂房风灾损伤估计与预测[J].土木建筑与环境工程,2009,31(6):71-80.
SONG F F, OU J P. Wind damage estimation and prediction of light steel industrial buildings [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(6): 71-80. (In Chinese)
- [13] 黄国庆,罗颖,郑海涛,等.考虑风速变异性的风致屋面覆盖物

- 损失评估[J]. 土木工程学报, 2016, 49(9): 64—71.
- HUANG G Q, LUO Y, ZHENG H T, *et al.* Wind damage estimation for roof coverings with consideration of variability of mean wind speed [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(9): 64—71. (In Chinese)
- [14] 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 M W, GU M. Probabilistic wind vulnerability analysis of light-weight steel buildings [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43 (9): 3609—3618. (In Chinese)
- [15] MAHENDRAN M, MAHAARACHCHI D. Cyclic pull-out strength of screwed connections in steel roof and wall cladding systems using thin steel battens [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(6): 771—778.
- [16] 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.
- [17] 葛瀚文. 轻钢屋面自攻钉节点疲劳损伤计算模型及其在灾后评估中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 38—42.
- GE H W. Fatigue calculation model of screw joints used in light-weight steel roof and its application in post-disaster assessment[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019: 38—42. (In Chinese)
- [18] 张建仁, 秦权. 现有混凝土桥梁的时变可靠度分析[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 90—95.
- ZHANG J R, QIN Q. Time-dependent reliability analysis of existing concrete bridges [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(4): 90—95. (In Chinese)
- [19] 王草, 李全旺. 考虑非平稳车载过程的在役桥梁时变可靠度分析[J]. 工程力学, 2016, 33(3): 18—23.
- WANG C, LI Q W. Time-dependent reliability of existing bridges considering non-stationary load process [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(3): 18—23. (In Chinese)
- [20] 刘威, 杨娜, 白凡, 等. 锈蚀檩条在台风作用下时变可靠度计算模型[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(6): 67—74.
- LIU W, YANG N, BAI F, *et al.* Time-dependent reliability calculation model of corroded purlin under typhoon hazard [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2019, 43(6): 67—74. (In Chinese)
- [21] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 30—31.
- Load code for building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 30—31. (In Chinese)
- [22] JANCAUSKAS E D, MAHENDRAN M, WALKER G R. Computer simulation of the fatigue behaviour of roof cladding during the passage of a tropical cyclone [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1994, 51(2): 215—227.
- [23] Aerodynamic database of low-rise buildings [EB/OL]. Tokyo: Tokyo Polytechnic University, 2011. <http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/eng/contents/code/tpu>.
- [24] KHOSROVANEH A K, DOWLING N E. Fatigue loading history reconstruction based on the rainflow technique[J]. *International Journal of Fatigue*, 1990, 12(2): 99—106.
- [25] WALKER G R, REARDON G F, JANCAUSKAS E D. Observed effects of topography on the wind field of cyclone Winifred [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1988, 28(1/3): 79—88.
- [26] XIAO Y F, DUAN Z D, XIAO Y Q, *et al.* Typhoon wind hazard analysis for southeast China coastal regions [J]. *Structural Safety*, 2011, 33(4/5): 286—295.
- [27] 建筑结构可靠度设计统一标准: GB 50068—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 12—13.
- Unified standard reliability design of building structures: GB 50068—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 12—13. (In Chinese)
- [28] North American Specification for the design of cold-formed steel structural members: AISI-S100-07[S]. Washington D C: American Iron and Steel Institute, 2007: 104—105.