

台风动力作用下大跨度航站楼屋盖连续风揭形态及机理研究

刘凌峰^{1,2}, 柯世堂^{1,2}, 任贺贺^{1,2}, 吴鸿鑫^{1,2}, 李文杰^{1,2}, 田文鑫^{1,2}

(1. 南京航空航天大学土木与机场工程系, 江苏 南京 210016;
2. 南京航空航天大学江苏省机场基础设施安全工程研究中心, 江苏 南京 210016)

摘要: 大跨度航站楼屋盖的风揭作用是影响其结构安全的重要因素之一, 现有研究仅考虑了良态风气候和静力风荷载作用, 难以解释强台风动力荷载作用下屋盖结构的真实风揭形态与发生机制。鉴于此, 本文基于 WRF、CFD 和 LS/DYNA 开展了台风作用下大跨度航站楼连续风揭破坏全过程数值模拟。开展台风“黑格比”风场模拟, 并以某国际机场航站楼为例, 模拟台风作用下航站楼屋面连续风揭全过程, 对比分析不同风向角下屋盖的风揭破坏形态及风损率, 揭示了台风作用下大跨度航站楼风揭破坏机理。结果表明, 航站楼屋盖迎风边缘极值风压较大, 上吸下压作用明显, 最大风压系数差值为 12.41; 达到临界风速时, 屋盖迎风边缘局部被风揭起, 随着风速增大, 引发“连锁效应”, 导致屋面连续风揭破坏, 屋面撕裂方向与来流方向一致; 基于屋面单元失效前后内能变化规律给出能量失效指标 K , 可用于指导大跨度航站楼屋盖抗风揭设计。

关键词: 大跨度航站楼; 连续风揭形态; 台风; 破坏机理

中图分类号: TU312⁺.1; TU352.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)03-0539-11

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.03.010

Study on the form and mechanism of continuous wind uplift of large-span terminal roof under typhoon

LIU Lingfeng^{1,2}, KE Shitang^{1,2}, REN Hehe^{1,2}, WU Hongxin^{1,2}, LI Wenjie^{1,2}, TIAN Wenxin^{1,2}

(1. Department of Civil and Airport Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Jiangsu Airport Infrastructure Safety Engineering Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The wind uncovering effect of the roof of a large-span terminal building is one of the important factors affecting its structural safety. Existing studies only consider the benign wind climate and static wind load effects, which are difficult to explain the real wind uncovering pattern and occurrence mechanism of the roof structure under the strong typhoon dynamic load. Based on WRF, CFD and LS/DYNA, this paper carries out the numerical simulation of continuous wind damage of a large-span terminal building under the action of typhoon. The wind field simulation of typhoon "Hegeby" was carried out firstly. The continuous wind uncovering process of the terminal roof under the typhoon was simulated by taking an international airport terminal building as an example, and the wind damage pattern and wind damage rate of the roof cover under different wind angles were compared and analyzed to reveal the wind damage mechanism of the large-span terminal building under the typhoon. The results show that the extreme wind pressure at the windward edge of the terminal roof is higher, and the effect of upward and downward pressure is obvious, and the maximum pressure difference coefficient is 12.41. When the critical wind speed is reached, the windward edge of the roof is partially lifted by the wind, and then the "chain effect" triggers the continuous wind damage of the roof, and the tearing direction of the roof is consistent with the incoming flow direction. The energy failure index K is given based on the law of internal energy change before and after the failure of roof units, which can be used to guide the design of large-span terminal building roofs against wind uncovering.

Keywords: large-span terminal; continuous wind-induced damage pattern; typhoon; damage mechanism

收稿日期: 2023-02-22; **修订日期:** 2023-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078251); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20211518, BK20210309); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NS2021050, NE2020007)

大跨空间结构因其形体优美、经济适用等特点,在机场航站楼和大型体育场馆得到广泛应用,但因其自重轻、柔度大、自振频率低等特性,风荷载成为其控制荷载。相关风灾事故调查表明,大跨度结构在风荷载作用下整体破坏现象并不多见,但屋盖表面局部撕裂、局部脱落或局部掀开导致整个屋面遭受破坏的例子却时有发生^[1-4]。其中,北京首都机场T3航站楼屋盖结构更是连续发生三次风揭破坏事故^[4],造成了严重的经济损失和社会影响。

中国是世界上受风灾影响较为严重的国家之一,每年登陆台风个数为7~9个。加之中国海岸线曲折绵长,沿海地区工程结构与各类建(构)筑物遭受台风破坏乃至倒塌的案例屡见不鲜^[5]。与良态风相比,台风由于具有较高的平均风速、强烈的湍流和突增的风切变,对大跨度屋盖结构的气弹扰动作用更为剧烈。因此,系统研究台风作用下大跨度航站楼屋盖结构风致破坏机理具有重要的工程意义。

国内外学者对屋面的抗风揭承载性能进行了大量研究^[6-10],但大多采用动态或静态加载方式的试验方法和数值模拟方法对屋面抗风揭性能进行研究。在此基础上,许秋华等^[11]通过抗风揭承载性能对比试验,提出了在既有直立锁边金属屋面板不同区域采用不同间距夹具的方法。孙瑛等^[12]针对直立锁边屋面系统开展抗风揭试验,发现试验方法对屋面系统的破坏形式和承载力均有明显影响。刘军进等^[13]采用接触单元建立直立锁边金属屋面有限元实体模型,模拟其破坏过程,并确立了破坏判定准则。李正良等^[14]在对直立锁缝屋面系统非线性响应全过程研究的基础上,建立了多失效模式下带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析方法。既有研究为屋盖抗风揭设计提供了理论依据和多种试验标准,但均未考虑非正常风荷载下大跨度屋面由于局部失效引起的屋盖连续性风揭现象。

鉴于此,本文以某机场大跨度航站楼屋盖结构为研究对象,基于WRF、CFD和LS/DYNA开展了台风作用下屋盖结构连续风揭全过程的数值模拟,分析屋盖表面平均风压、脉动风压和绕流特性等气动性能,提出基于材料性能的屋面壳体结构失效准则,给出风揭破坏临界风速并阐释破坏全过程形态,最后提炼出屋盖结构在台风作用下的连续风揭破坏机理,为大跨度航站楼屋盖结构抗风揭设计提供了参考和借鉴。

1 中尺度台风模拟

1.1 WRF模式简介

Weather research and forecasting model(WRF)

是一个中尺度预报模式和数据同化系统,用于模拟从几十米到几千千米的中尺度天气。本文采用的WRF版本是4.3.1。WRF系统中有两个动力学解算器,它们分别是由美国国家大气研究中心(NCAR)开发的ARW(advanced research WRF)解算器和美国国家环境预测中心(NCEP)开发的NMM(nonhydrostatic mesoscale model)解算器^[15]。本研究使用的ARW动力学求解器,集成了完全可压缩的非静水欧拉方程。这些方程使用地形跟踪的质量垂直坐标和交错的Arakawa-C网格进行求解。该模式还支持水平嵌套,允许通过高分辨率网格对感兴趣的区域进行特定的表示。ARW有许多物理参数化方案选项,包括微物理方案、积云参数化方案、行星边界层方案、陆面模型方案等。目前,WRF模式被广泛应用于气象相关研究,如实时数值天气预报、数据同化开发、参数化物理方案研究和区域气象模拟等。

1.2 物理参数化方案选取及参数设置

为了有效和准确地模拟本文研究区域的大气运动,WRF模式设置了三层双向嵌套网格(如图1所示)。最外嵌套层覆盖菲律宾海西部和中国南海北部等区域,由 397×247 个网格点组成,水平网格分辨率为9 km,可模拟台风“黑格比”路径;中间嵌套层由 481×247 个网格点组成,水平网格分辨率为3 km;最内层由 481×247 个网格点组成,水平网格分辨率为1 km。利用NCEP开发的FNL(Final)全球运行分析数据(<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>)作为最外嵌套层的初边界条件,该数据集的空间分辨率为 1.0° ,时间分辨率为6 h。FNL数据通过WRF预处理系统与相应的WRF网格进行交互,边界条件每6 h施加一次。该模拟在垂直方向分为33层,地图投影采用Lambert方案。通过对比不同方案的模拟结果,最终确定采用YSU(Yonsei University)边界层方案和Kain Fritsch积云对流参数化方案,对台风“黑格比”进行了54 h的高精度模拟,模拟结果将作为后续CFD降尺度运算的边界条件,详细参数设置如表1所示。

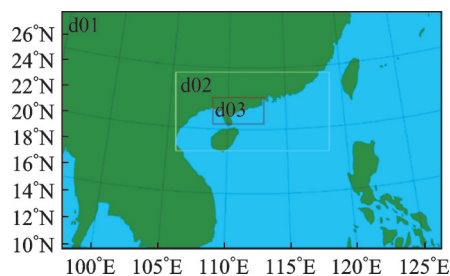


图1 WRF模拟计算区域

Fig. 1 WRF simulation computing area

表1 WRF模式参数设置

Tab. 1 WRF mode parameter setting

WRF参数	最外层d01	中间层d02	最内层d03
积分时间步长/s	54	18	6
短波辐射	RRTM方案		
长波辐射	Dudhia方案		
路面过程	Noah方案		
微物理方案	Lin方案		
模式动力框架	ARW非静力		

1.3 有效性验证及风剖面拟合

图2(a)给出了WRF模式输出的“黑格比”台风的模拟路径,由图可知“黑格比”台风在西太平洋上空沿西偏北方向移动,模拟路径与实际路径基本一致,平均误差为24 km。图2(b)和(c)分别给出了台风“黑格比”最小中心气压和最大风速模拟值与日本台风网实测值的对比曲线,从图中可以看出,台风最小中心气压和最大风速模拟值与实测值变化规律基本一致,最小中心气压平均误差为1.5%,最大风速平均误差为8%,模拟结果较为准确。

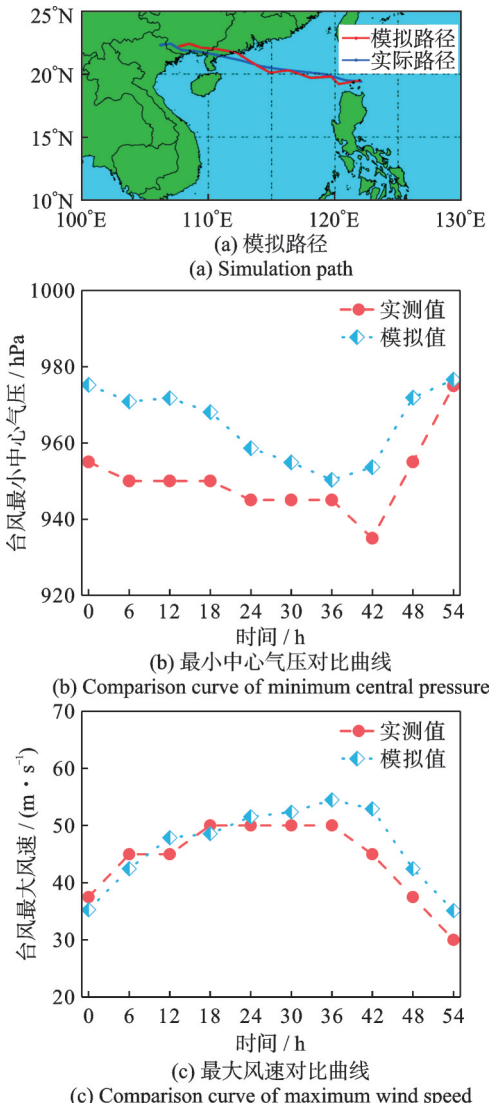


图2 WRF模式输出的“黑格比”台风场

Fig. 2 Hagupit typhoon field output by WRF mode

对台风登陆时刻航站楼附近近地台风场的WRF模式数值模拟输出结果进行后处理,周期为10 min,并基于最小二乘法给出拟合曲线,如图3所示。拟合得到的10 m高度处基本风速为22.6 m/s,地面粗糙度指数为0.086。

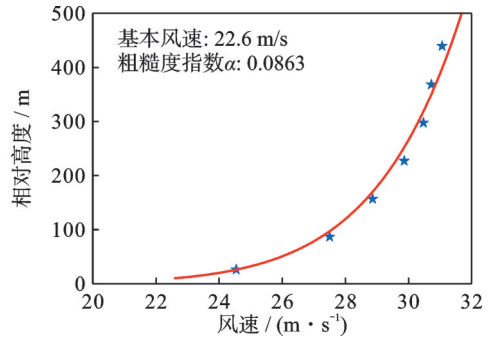


图3 航站楼附近近地面模拟风速及拟合曲线

Fig. 3 Near-surface simulated wind speed and fitted curve near the terminal

2 WRF-CFD中/小尺度耦合

2.1 工程概况

本文以某国际机场北区扩建工程航站楼为工程背景,台风登陆时,航站楼距离登陆点约50 km。航站楼共两层,东西方向长355.91 m,南北方向长654.58 m,屋盖上弦最高点距地面54.21 m,两翼最低点距地面31.67 m,整体最大高差为22.54 m。屋盖沿南北方向高差变化起伏较大,整体呈波浪形;东西方向呈阶梯式抬升,高差较大;屋盖结构体系与下部结构通过钢立柱连接,协同受力,周边维护结构均采用玻璃幕墙。考虑实际结构屋盖大悬空屋檐及变高差局部屋盖等构造细节,建立航站楼3D足尺模型,如图4所示。

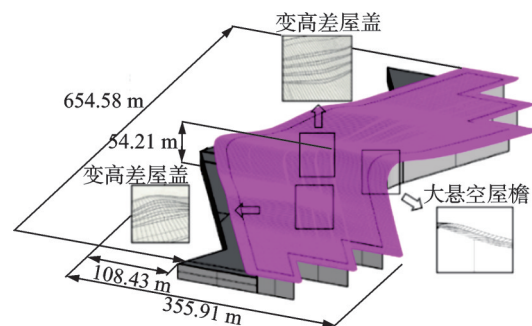


图4 航站楼整体模型及细节展示

Fig. 4 Overall model and details of the terminal

定义航站楼中心轴为0°风向角,来流方向以逆时针方向为正角度方向。由于模型是以中轴线为对称轴的轴对称结构,故仅进行0°~180°风向角下航站楼风荷载数值模拟,风向角间隔为15°,如图5所示。

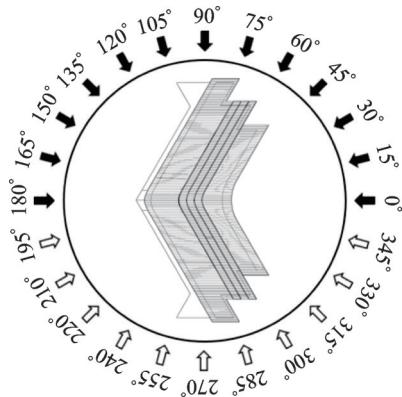


图5 风向角示意图

Fig. 5 Wind direction angle diagram

2.2 CFD模拟及有效性验证

为保证流动能够充分发展,CFD计算流域取为 5400 m×3200 m×300 m(流向x×展向y×竖向z),航站楼置于距离计算域入口1600 m处,整体计算域阻塞率为2.9%,满足阻塞率小于3%的要求^[16]。由于航站楼屋盖形状复杂,采用混合网格离散形式将整个计算域分为内、外两个部分:内部区域采用四面体网格,并对航站楼周围局部网格进行加密,外围区域采用高质量六面体网格。表2给出了内部区域不同网格方案下的网格质量,综合考虑计算精度和效率,本文采取1300万网格总数作为网格划分方案,计算域及网格具体划分如图6所示。计算域入口采用速度入口,参考高度取航站楼屋盖最高处(54.21 m),计算域顶部和侧面采用等效自由滑移壁面的对称边界条件,计算域出口采用压力出口边界条件,地面以及建筑物表面采用无滑移壁面边界条件。

表2 不同网格方案下的网格质量

Tab. 2 Grid quality under different grid schemes

网格方案	网格总数	网格最小正交质量	网格歪斜度
一	300万	0.42	0.73
二	800万	0.48	0.58
三	1300万	0.52	0.54
四	4350万	0.54	0.51

大涡模拟选用不可压缩流控制方程,通过UDF文件定义台风风场,亚格子模型采用Smagorinsky-Lilly模型,时间步长取为0.001 s,通过SIMPLEC方法进行离散方程的求解,该方法收敛性好且适合时间步长较小的大涡模拟计算。

计算域所在地为A类地貌,平均风速沿高度的变化采用指数风剖面表示:

$$V = V_{10}(h/10)^{\alpha} \quad (1)$$

式中, V_{10} 为10 m高度处10 min的平均风速,取值为22.60 m/s; α 为地面粗糙度指数,由WRF输出结果拟合的台风过境时航站楼所在区域地面粗糙度指数为0.086; h 为测点高度。

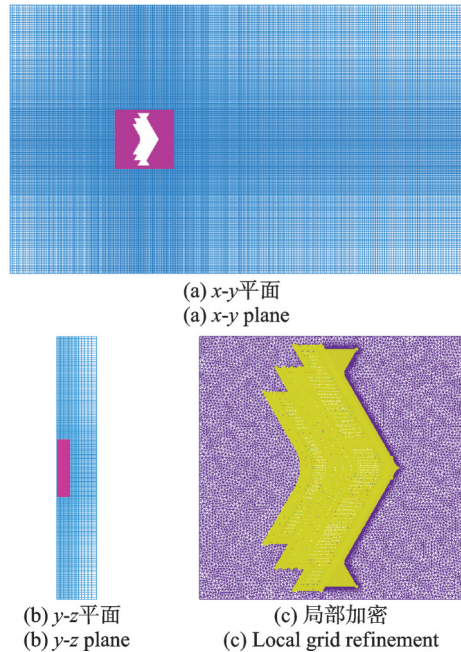


图6 计算域及加密网格划分示意图

Fig. 6 Schematic diagram of computational domain and grid refinement division

湍流度计算式为:

$$I_u = c_{10}(10/h)^{-\alpha} \quad (2)$$

式中, c_{10} 为10 m高度处名义湍流度,根据对“黑格比”台风的同步监测结果为0.201^[17]。

图7给出了UDF设置结果与航站楼前方(屋檐前方10 m处)的平均风速、湍流度模拟结果对比曲线,可见航站楼前方平均风速和湍流度剖面均与UDF设置的进风口处吻合较好,流场达到稳定。

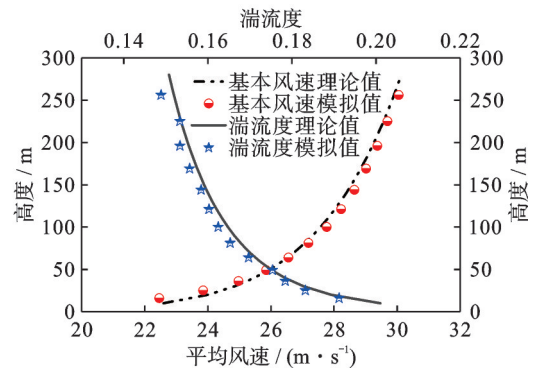


图7 平均风速与湍流度剖面

Fig. 7 Mean wind speed and turbulence profiles

2.3 气动性能分析

2.3.1 平均风压特性

图8给出了台风场作用下航站楼典型风向角下屋盖表面风压分布图。对比发现在台风作用下不同风向角对屋盖表面的平均风压影响较大,迎风屋面边缘及屋盖变高区最高处均出现了高负压区,在屋盖变高区迎风处出现了正压区;背风面及屋面内凹处风压系数绝对值较小,变化相对平缓,同时因来流

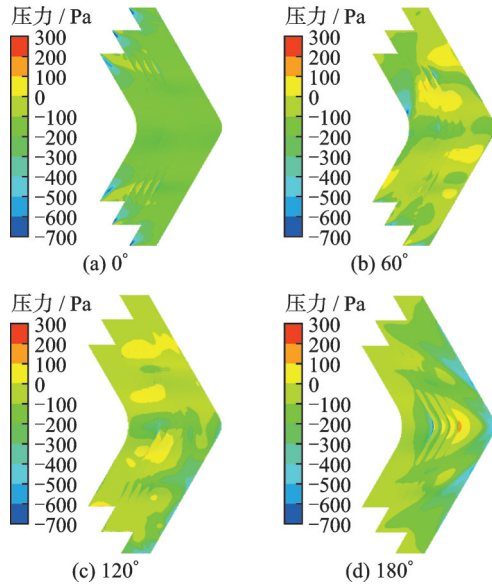


图 8 台风场作用下典型风向角航站楼表面风压分布
Fig. 8 Typical wind pressure distribution on the surface of the terminal under the action of the typhoon field

再附导致某些局部区域出现了正压。

图 9 给出了台风场环境中不同风向角下悬空屋檐风压系数极大、极小值分布。由图可知,随着风向角的增大,屋檐风压系数极值整体呈现先减小后增大的趋势,30°时风压系数差值达到最大值 12.41。

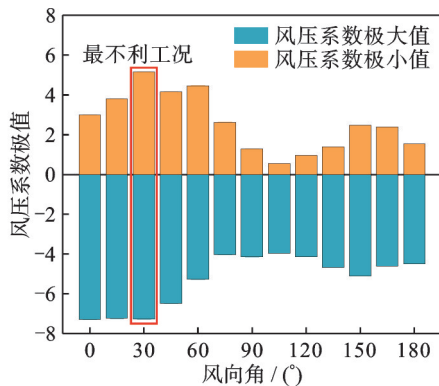


图 9 台风场中不同风向角悬空屋檐下风压系数极大、极小值分布

Fig. 9 Distribution of maximum and minimum values of wind pressure coefficients of overhanging eaves for different wind direction angles under typhoon field

2.3.2 脉动风压特性

测点脉动风压系数定义为:

$$C_{p,rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [C_p(i) - C_{p,mean}]^2 / (N-1)} \quad (3)$$

式中, $C_p(i)$ 为某测点的瞬时风压系数; $C_{p,mean}$ 为平均风压系数; N 为总样本点数。

同时考虑到大跨屋盖表面风压分布呈现的空间不均匀性,通常采用极值风压的包络值对该结构进行设计^[18],计算公式如下:

$$\hat{C}_{pi} = \bar{C}_{pi} \pm g\sigma_{pi} \quad (4)$$

式中, \hat{C}_{pi} 、 \bar{C}_{pi} 、 σ_{pi} 分别表示测点 i 的风压系数极值、均值和根方差; g 为测点 i 的峰值因子。屋盖表面风荷载脉动性强,非高斯性明显,采用估算非高斯过程的改进峰值因子法计算^[19],其表达式为:

$$g = h_1 \left\{ \beta + \frac{\gamma}{\beta} + h_3 (\beta^2 + 2\gamma - 1 + \frac{1.98}{\beta^2}) + h_4 \left[\beta^3 + 3\beta(\gamma - 1) + \frac{3}{\beta} (\frac{\pi^2}{6} - \gamma + \gamma^2) + \frac{5.44}{\beta^3} \right] \right\} \quad (5)$$

式中, $\gamma = 0.5772$, 为欧拉常数; h_1 、 h_3 、 h_4 为 Hermite 级数法的参数, $\alpha = 1/\sqrt{1 + 2h_3^2 + 6h_4^2}$ 、 $h_3 = \gamma_3/[6(1 + 6h_4)]$ 、 $h_4 = (\sqrt{1 + 1.5(\gamma_4 - 3)} - 1)/18$, 其中 γ_3 和 γ_4 分别为信号的斜度值和峰值度; $\beta = \sqrt{2\ln(vT)}$, 其中 v 为单位时间内数据穿越平均值的次数, T 为计算时间长度。

台风场作用下悬空屋檐压差极值较大且方向朝上,此时屋盖极易发生掀起破坏,为探究不同风向角下航站楼屋盖风揭形态,采用大涡模拟技术获得台风场作用下航站楼表面风压系数时程曲线。在航站楼表面共设置 502 个测点,其中上屋檐共 396 个测点,下屋檐共 106 个测点,如图 10 所示。同时,考虑到航站楼体型十分复杂,为便于后续说明,再次人为将航站楼定义为前端屋盖、中部天窗与后端屋盖,并结合航站楼屋盖形状对其进行分区,如图 11 所示。

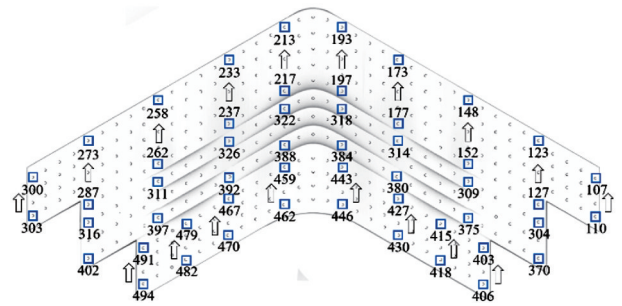


图 10 屋盖测点布置图

Fig. 10 Roof cover measurement point layout

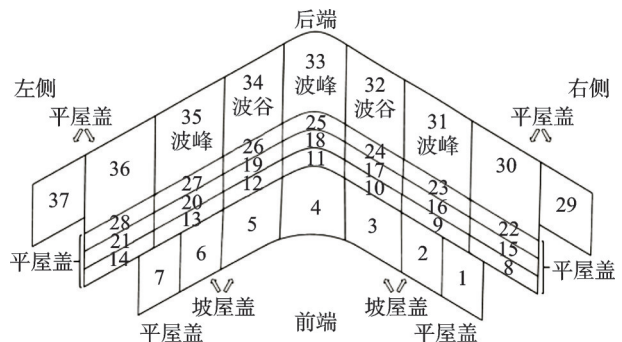


图 11 航站楼屋盖分区示意图

Fig. 11 Schematic of the roof cover partition of the terminal

图 12 为航站楼最不利风向角下屋盖表面脉动风压系数分布图与极值风压系数分布图,分析可得:在台风场作用下,航站楼后端屋盖 5 区迎风前缘处脉动效应较强;在上屋檐迎风前缘出现绝对值较大的极值负压,下屋檐出现较大的极值正压,迎风屋檐上吸下顶作用明显,进行航站楼屋盖抗风设计时,需着重考虑。

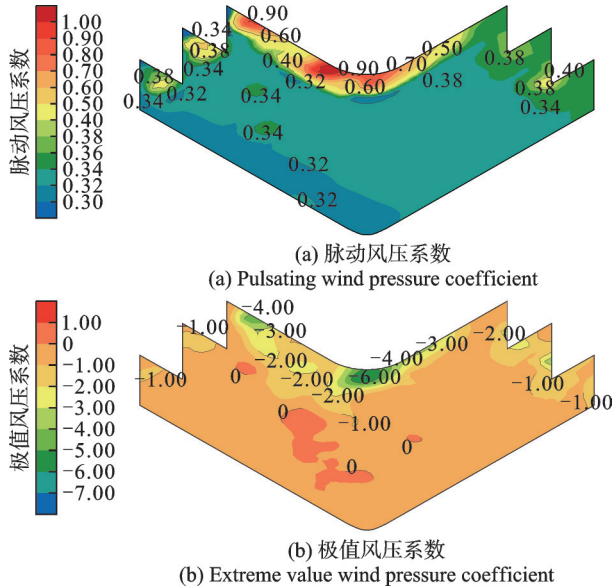


图 12 最不利风向角下航站楼屋盖表面脉动风压系数和极值风压系数分布

Fig. 12 Distribution of pulsating wind pressure coefficient and extreme value wind pressure coefficient on roof cover surface of terminal under the worst wind direction angle

2.3.3 绕流特性

图 13 给出了台风影响下部分工况的屋盖风速流场图。分析可知:台风场作用下航站楼挑檐处及

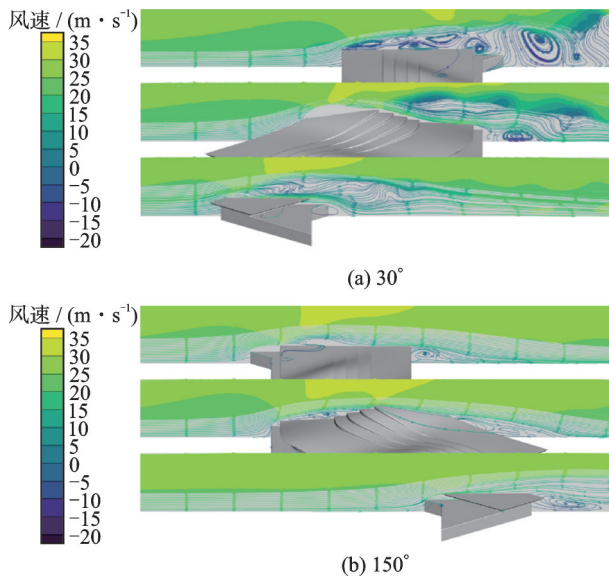


图 13 台风影响下部分工况屋盖风速流场图

Fig. 13 Wind speed flow field diagram of roof cover under the influence of typhoon

变高差处均发生流动分离,且 30°工况下旋涡脱落及回流的现象更加明显且影响范围更广,因此 30°工况下风压脉动值及极值均较大;在航站楼前部与顶部均出现加速效应,30°工况下加速效应更明显。

3 风揭形态与破坏机理

3.1 有限元建模

本文建立的航站楼三维有限元模型主要由主体结构和屋盖两个部分组成。主体框架部分均采用梁单元 beam161,依照实际建筑采用多种截面进行精细化建模。屋盖结构采用壳单元 shell163,主体框架与屋面板之间连接的 T 型支托也采用梁单元 beam161 进行简化模拟,屋盖壳单元与 T 型支托之间的连接采用壳单元与梁单元节点刚域耦合,以达到位移协调的目的。图 14 为航站楼屋盖模型示意图。

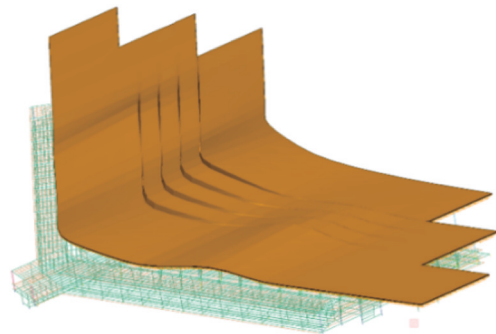


图 14 屋盖模型示意图

Fig. 14 Roof cover model schematic diagram

3.2 风揭分析方法及动力特性

现有研究表明,直立锁边金属屋面的破坏形式主要有屋面板锁边处的脱扣破坏、T 型支托的破坏以及屋面板撕裂破坏三种。合理布置抗风夹可防止屋面板发生脱扣破坏^[20],因此本文仅考虑另外两种破坏形式。屋面板材料选用 YX-400 型氟碳喷涂铝镁锰合金,弹性模量取为 70000 MPa,泊松比为 0.3,材料密度取为 $2.73 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ 。材料本构模型关系采用如图 15 所示的双折线表示,屈服强度取为 170 MPa,抗拉强度取为 220 MPa。采用 LS/DYNA 提供的单元侵蚀技术(*MAT_ADD_EROSION),该算法是一种非保守的数值策略,因此正确选择准则至关重要。本文设置 T 型支托最大拉应力为 220 MPa,超过该限值即认为发生脱扣破坏;设置屋面板最大拉应力为 220 MPa,超过该限值即认为发生屋面板撕裂破坏。

实际上,大跨度航站楼在风荷载作用下,其结构的破坏形式类似于屈曲模态下的材料失效破坏,可将风荷载视为一种拟静力荷载。为了降低加载过程

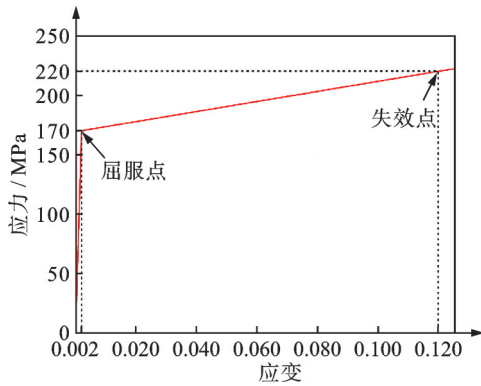


图 15 简化的本构关系模型

Fig. 15 Simplified constitutive relationship model

中的动力效应,防止出现类似冲击荷载的效应,本文采用增量动力分析(IDA)方法,对航站楼结构有限元模型进行非线性分析。设置起始风速为 20 m/s,按 5 m/s 的风速阶梯进行逐级加载,采用 0.1 s 的计算步长,每阶风速计算时间设为 5 s 即 50 步,以保证结构充分反应。

模型建立后,基于 Block Lanczos 方法^[22]求解该航站楼的结构特性,图 16 给出了本文航站楼模型前 100 阶自振频率随振型阶数变化的曲线。由图可知,航站楼结构基频仅为 0.703 Hz,前 100 阶频率近似呈线性增长趋势且均小于 3 Hz,结构柔性更强且频率分布相对集中。前 6 阶,航站楼屋盖变形较大,主体结构变形可以忽略;第 7 阶后,航站楼主体结构也出现较大变形,但仍以屋盖结构变形为主,最大变形发生在屋盖翼缘处,鉴于此,后文仅针对屋盖结构进行分析。

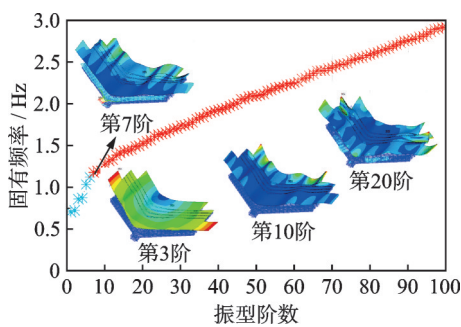


图 16 前 100 阶固有频率

Fig. 16 First 100th order natural frequencies

3.3 风揭形态分析

本文通过屋面风损率对屋面风揭破坏程度进行定量评估,定义风损率为破坏屋面面积占屋面总面积的比率,表达式为:

$$Wind\ Loss = \frac{A_{Loss}}{A_{Total}} \times 100\% \quad (6)$$

式中, A_{Loss} 为风揭破坏屋面面积; A_{Total} 为屋面总面积。

图 17 给出了不同风向角下屋盖风损率统计图。从图中可以看出,屋盖风揭风速随着风向角的增大呈现先增大后减小的趋势,0°、15°和 30°在风速达到 40 m/s 时就发生连续风揭破坏,为最危险风向角。发生风揭破坏的风速区间为 40~65 m/s,说明不同风向角下航站楼抗风揭能力差异显著。风揭破坏风速分布与风压系数极值分布关系基本一致,风压系数极值较大的工况风揭风速较小。

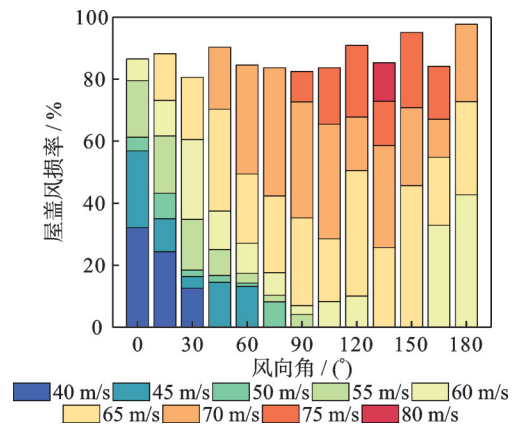


图 17 不同风向角下屋盖风损率统计图

Fig. 17 Statistical chart of wind damage rate of roof cover under different wind direction angles

定义当屋盖风损率达到 80%,认为屋盖完全风毁,屋盖风毁风速随风向角的增大呈现与风揭风速相同的趋势,最小风毁风速为 55 m/s,最大风毁风速为 80 m/s。航站楼设计时需考虑当地风向年分布率,合理设置航站楼朝向。

风揭破坏是由于局部结构达到承载力极限发生破坏,继而导致该区域内的力重分布、撕裂处应力集中,继而发生“连锁效应”,导致大面积的风揭破坏。为详细描述风揭破坏各阶段,选取 0°和 30°两个不利工况下航站楼屋盖风揭破坏过程进行分析,如图 18 和 19 所示。由图 18 和 19 可知,在两个工况下,屋盖迎风前缘(0°风向角前端 3 至 5 区;30°风向角前端 5 区、6 区)变形较大,屋面其余部分变形较小。分析认为屋盖边缘区域的屋面曲线变化弧度较大,气流在该位置产生较强的分离对流,从而形成了较强的垂直风吸力和水平切向力。来流的分离导致这些区域的平均和脉动风压系数均较大,随着风速的增大,屋面达到抗拉强度发生撕裂,屋面板被风掀起,如图 18(b)和 19(b)所示。屋面掀起后,迎风面积进一步增大,屋面板开始翻卷,翻卷方向与来流方向平行,屋面板被撕裂成多块,如图 18(c)和 19(c)所示。随着风速的进一步增大,屋盖撕裂从前端发展到中部、后端,最终在 60 m/s 风速下,两个工况的屋盖都被风吹落,发生完全风毁。图 20 给出了不同风向角下航站楼迎风边缘部分屋面加速度图。从图中可以看

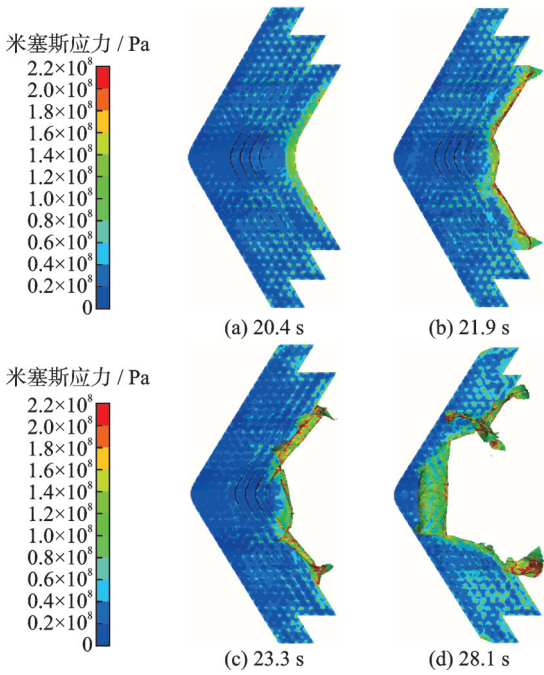


图 18 0°风向角下航站楼风揭破坏图

Fig. 18 Terminal wind damage at 0° wind direction angle

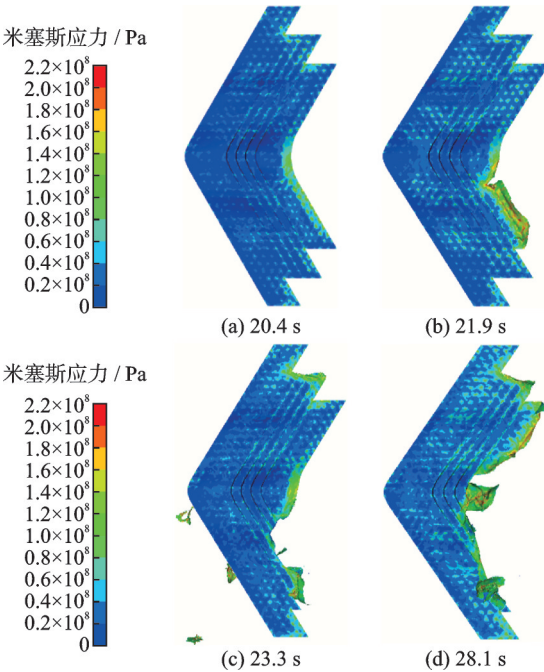


图 19 30°风向角下航站楼风揭破坏图

Fig. 19 Terminal wind damage at 30° wind direction angle

出,屋面风揭分多个阶段,与来流方向垂直的迎风边缘首先发生风揭破坏。

图 21 给出了部分工况下屋盖风揭破坏形态。分析可知屋盖风揭始于迎风边缘局部破坏,继而屋盖被风掀起、翻卷,接着折弯直至吹落。当迎风面积较大时,如 0°与 180°风向角下,屋盖发生局部破坏后,将引起屋盖大面积风揭破坏;而随着迎风面积的减小,屋盖发生局部破坏后,仅引起小范围风揭破坏,随着风速增大,迎风边缘产生新的破坏点,导致其余部分再次发生连续风揭,形成多阶段破坏。

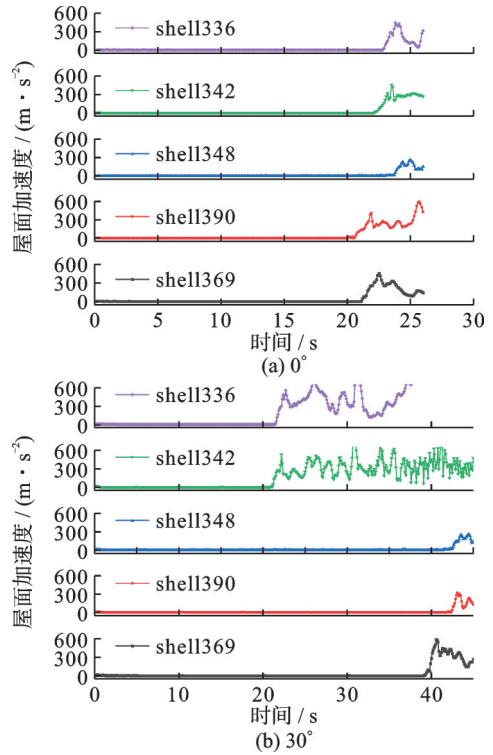


图 20 不同风向角下航站楼迎风边缘部分屋面加速度图

Fig. 20 Roof acceleration diagram of the windward edge of the terminal at different wind direction angles

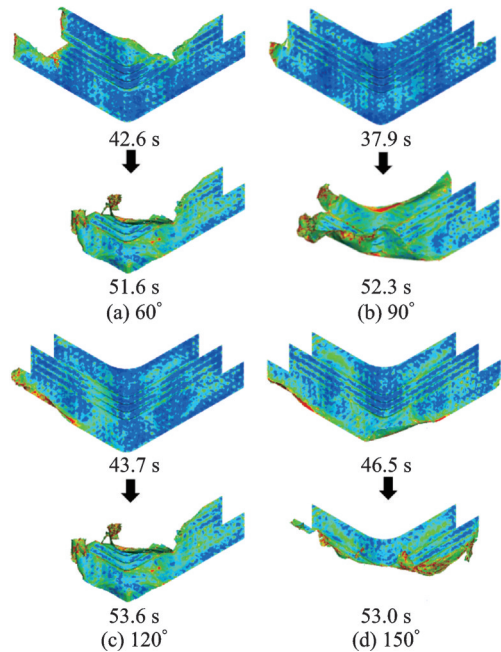


图 21 部分风向角作用下屋盖连续风揭破坏形态图

Fig. 21 Continuous wind damage pattern diagram of roof cover under partial wind direction angles

3.4 风揭破坏机理

为探究台风作用下航站楼屋盖连续风揭破坏机理,根据上述屋盖失效前、后变形特性,选取 0°和 30°工况进行分析。将单元失效过程简化为如图 22 所示,主要包括 T 型支托失效和屋面板失效两种失效形式。在 T 型支托失效前,每块屋面板由 4 个支托支撑,随着

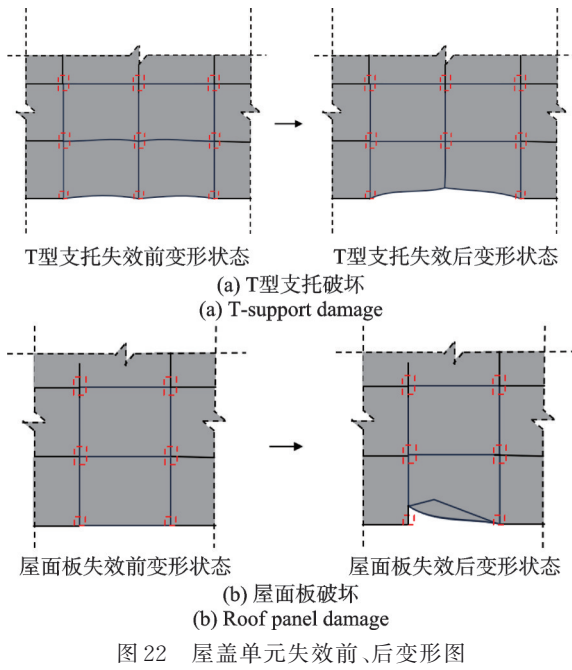


图 22 屋盖单元失效前、后变形图

屋面风荷载增大, T 型支托达到抗拉强度失效后, 相邻两块屋面板的其他支托及支托附近屋面板所受拉力增大; 屋面板失效后, 屋面板被掀起, 引起屋面内力重分布, 导致周围屋面板内能增大, 发生连续破坏。

图 23 给出屋面单元失效内能变化对比图, 图 24

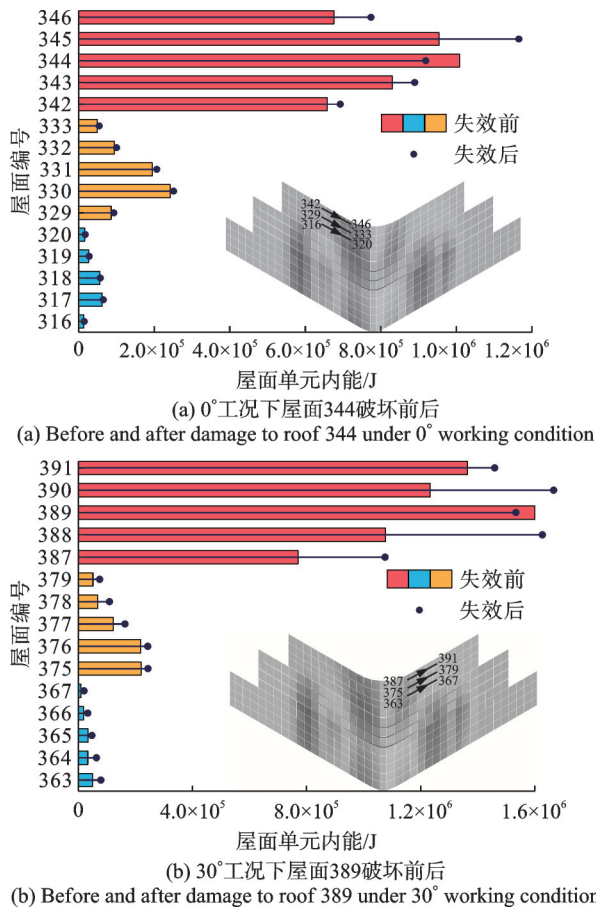


图 23 屋面单元失效前、后内能变化

Fig. 23 Internal energy change before and after roof unit failure

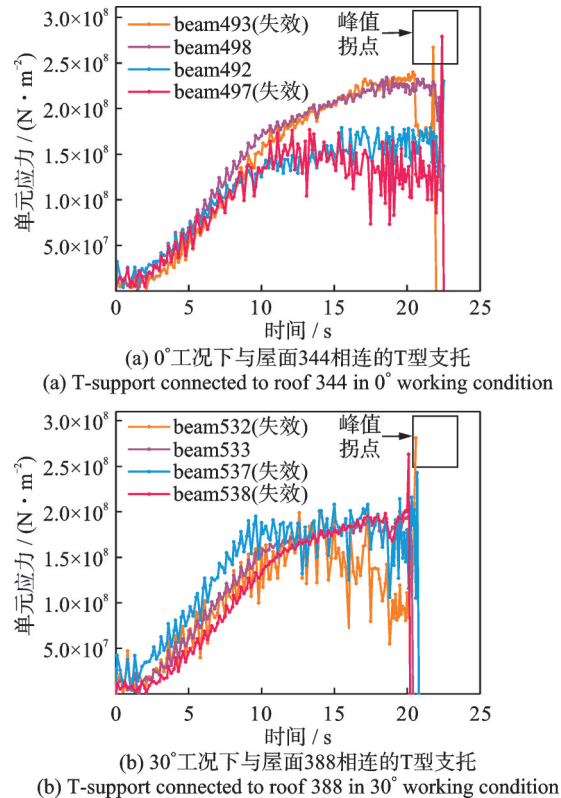


图 24 与撕裂屋面相连的 T 型支托的应力时程曲线

Fig. 24 Stress time-history curves of the T-support connected to the tearing roof

给出了与撕裂屋面相连接的 T 型支托的应力时程曲线。屋面发生破坏后与之相连的 T 型支托应力呈现先减小后增大的趋势, 屋面因撕裂导致自由度增加, 在风荷载的作用下产生震荡作用, 屋面单元动能快速增大, 受动力荷载作用 T 型支托应力急剧增大, 达到抗拉强度发生断裂破坏。T 型支托的断裂导致屋面约束减小, 屋面动能和内能急剧增大, 屋面被风掀起, 并引起周围其他屋面内能的增大, 导致连续风揭现象的发生。

图 25 给出了部分屋面内能时程曲线。自加载开始, 初始屋面内能随台风驱时间逐渐积累, 当屋面内单元因失效破坏, 屋面内能下降, 周围屋面内能增加, T 型支托破坏后, 屋面内能急剧增加, 发生连续风揭破坏。

基于结构损伤指数相关准则^[23] (DM based rule), 以屋面单元失效前、后的内能变化为指标, 提出台风作用下大跨度航站楼的风揭能量准则。定义能量风揭指标 K 为某屋面单元能量 E_{roof} 与该屋面横向相邻屋面单元吸收的内能 E'_{roof} 之比, 当能量风揭指标 K 超过容许内能比 $[K]$ 时, 屋面将发生风揭破坏, 表达式为:

$$[K] = \frac{E_{\text{roof}}}{E'_{\text{roof}}} \quad (7)$$

$$K \geq [K] \quad (8)$$

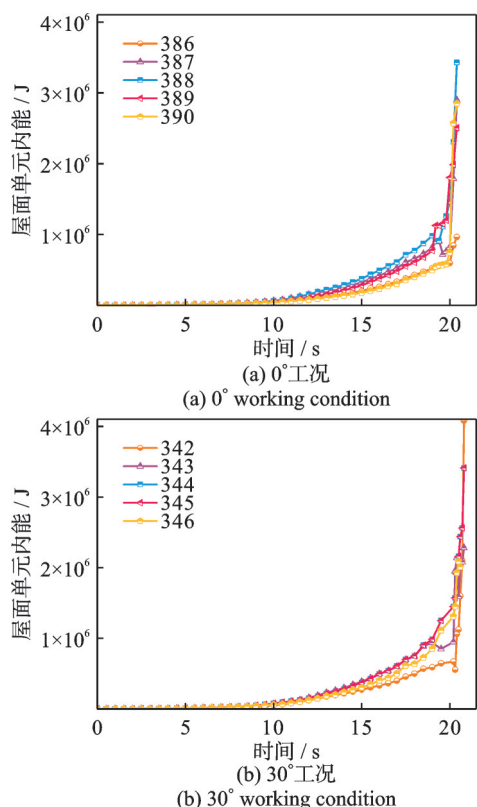


图 25 部分屋面失效前、后内能时程曲线

Fig. 25 Internal energy time-history curves before and after partial roof failure

表 3 给出了 0° 风向角下风揭屋面单元急剧增大点内能 E_{roof} 、相同时刻下横向相邻未风揭屋面单元内能 E'_{roof} 和容许能量比 $[K]$, 归纳后取单元激增点内能为 $2.0 \times 10^6 \text{ J}$, 横向相邻未风揭屋面单元内能为 $1 \times 10^6 \text{ J}$, 则容许能量比 $[K]=2$, 台风驱大跨度航站楼风揭能量准则为:

$$K \geq [K] = 2 \quad (9)$$

表 3 屋面容许能量比 $[K]$ Tab. 3 Roofing allowable energy ratio $[K]$

编号	E_{roof}/J	$E'_{\text{roof}}/\text{J}$	$[K]$
387	1.79×10^6	8.42×10^5	2.13
388	2.30×10^6	1.18×10^6	1.95
389	1.80×10^6	7.50×10^5	2.40
343	1.93×10^6	9.66×10^5	2.01
344	2.28×10^6	1.23×10^6	1.85
345	2.08×10^6	9.10×10^5	2.29

4 结 论

本文基于 WRF、CFD 和 LS/DYNA 开展了台风作用下大跨度航站楼连续风揭破坏全过程数值模拟, 并以某国际机场航站楼为例进行了风致连续破坏全过程的模拟。主要结论如下:

(1) 采用 WRF 模式可以有效模拟台风近地面

风场, 获取了“黑格比”台风过境全过程登陆点最不利风剖面, 采用最小二乘法得出平均风剖面指数为 0.086。

(2) 本文采用降尺度方法可有效模拟此类大跨度航站楼结构的三维台风风场, 与来流方向垂直的屋盖迎风前缘发生较强的流动分离, 上吸下压作用明显。

(3) 风揭破坏主要由迎风边缘屋盖局部受拉破坏引起, 即风压极值最大区域; 屋盖局部风揭后引起邻近区域应力激增, 进而引发与来流方向平行的连续性风揭破坏。

(4) 屋盖风揭破坏主要包括 T 型支托失效及屋面板失效两种失效形式, 最不利风向角为 0° 、 15° 和 30° , 临界风速为 40 m/s, 其余风向角下, 临界风速区间为 45~65 m/s。

(4) 基于屋面单元失效前、后内能变化规律, 结合结构损伤指数相关准则, 提出台风作用下大跨度航站楼风揭失效准则, 当风揭能量指标 $K \geq 2$ 时, 航站楼发生风揭破坏。

(5) 屋面风揭始于屋面风压压差极值处, 始于局部屋面板风揭, 继而引发连续风揭现象。可以通过在屋面压差极值区域减小 T 型支托间距、增强屋面板材料强度等方法增强屋面板抗风揭能力。

参考文献:

- [1] KASPERSKI M. Design wind loads for low-rise buildings: a critical review of wind load specifications for industrial buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 61(2-3): 169-179.
- [2] DAVENPORT A G. Wind effects on civil engineering structures[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1984, 11(4): 1025-1026.
- [3] 孙炳楠, 傅国宏, 陈鸣, 等. 94 年 17 号台风对温州民房破坏的调查[J]. 浙江建筑, 1995(4): 19-23.
- [4] 龙文志. 提高金属屋面抗风力技术探讨 首都机场 T3 航站楼屋面不要第四次再被风掀开[J]. 中国建筑金属结构, 2013(15): 62-68.
- [5] 刘军进, 崔忠乾, 李建辉. 直立锁边金属屋面抗风揭性能研究现状及展望[J]. 建筑科学, 2018, 34(5): 118-124.
- LIU Junjin, CUI Zhongqian, LI Jianhui. Research status and prospect of the performance of standing seam metal roof under wind uplift load[J]. Building Science, 2018, 34(5): 118-124.
- [6] HABTE F, ASGHARI MOONEGHI M, GAN CHOWDHURY A, et al. Full-scale testing to evaluate the performance of standing seam metal roofs under simulated wind loading[J]. Engineering Structures, 2015, 105: 231-248.

- [7] RAMSEYER C, SHADRAVAN S. Bending capacity of cold-formed Z-purlins supporting a standing seam roof system with torsional bracing[J]. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 2016, 1(4): 177-188.
- [8] 王静峰, 王海涛, 陆健伟, 等. 大跨度敞开式金属屋面抗风揭模拟试验研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2015, 17(6): 9-15.
WANG Jingfeng, WANG Haitao, LU Jianwei, et al. Experimental studies on wind resistance of large-span open metal roofing panels[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2015, 17(6): 9-15.
- [9] 王宏斌, 贾占坤, 冯绍攀, 等. 直立锁边铝镁锰屋面系统抗风揭试验研究[J]. *工业建筑*, 2018, 48(9): 176-180.
WANG Hongbin, JIA Zhankun, FENG Shaopan, et al. Experimental research on the wind uplift capacity of alumin-magnesium-manganese alloy with standing seam [J]. *Industrial Construction*, 2018, 48(9): 176-180.
- [10] 陈阳. 金属屋面系统抗风揭试验动态加载序列研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
CHEN Yang. Research on dynamic loading sequence of the wind resistance test of metal roof system disaster [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [11] 许秋华, 万恬, 刘凯. 直立锁缝金属屋面加强抗风揭能力的优化设计[J]. *工程力学*, 2020, 37(7): 17-26.
XU Qiuhua, WAN Tian, LIU Kai. Optimal design of strengthening wind exposure resistance of vertical whip-stitch metal roofing board[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(7): 17-26.
- [12] 孙瑛, 武涛, 武岳. 直立锁边屋面系统风揭破坏全过程试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(12): 41-48.
SUN Ying, WU Tao, WU Yue. Experimental study on wind uplift failure process of standing seam roof system[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(12): 41-48.
- [13] 刘军进, 崔忠乾, 李建辉, 等. 铝镁锰直立锁边金属屋面抗风揭性能试验研究与理论分析[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(5): 19-31.
LIU Junjin, CUI Zhongqian, LI Jianhui, et al. Experimental study and theoretical analysis on performance of aluminum-magnesium-manganese standing seam metal roof under uplift wind load[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(5): 19-31.
- [14] 李正良, 王成, 王涛. 带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(10): 75-83.
LI Zhengliang, WANG Cheng, WANG Tao. Reliability analysis of wind-uplifted resistance of standing seam roof system with anti-wind clips[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(10): 75-83.
- [15] 陈玲, 赖旭, 刘霄, 等. WRF 模式在风电场风速预测中的应用[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2012, 45(1): 103-106.
CHEN Ling, LAI Xu, LIU Xiao, et al. Application of WRF model to wind speed forecasting in wind power farms[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2012, 45(1): 103-106.
- [16] 卢春玲, 李秋胜, 黄生洪, 等. 大跨度复杂屋盖结构风荷载的大涡模拟[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(1): 1-10.
LU Chunling, LI Qiusheng, HUANG Shenghong, et al. Simulation of large eddy of wind load on a long-span complex roof structure[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(1): 1-10.
- [17] 李秋胜, 戴益民, 李正农, 等. 强台风“黑格比”登陆过程中近地风场特性[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(4): 54-61.
LI Qiusheng, DAI Yimin, LI Zhengnong, et al. Surface layer wind field characteristics during a severe typhoon ‘Hagupit’ landfalling[J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(4): 54-61.
- [18] 顾明, 黄鹏, 周晖毅, 等. 北京首都机场3号航站楼风荷载和响应研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(1): 40-44.
GU Ming, HUANG Peng, ZHOU Xuanyi, et al. A study on wind loads and responses of terminal 3 at Beijing capital airport[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(1): 40-44.
- [19] KAREEM A, ZHAO J. Analysis of non-Gaussian surge response of tension leg platforms under wind loads [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1994, 116(3): 137-144.
- [20] 刘威. 带抗风夹的直立锁边金属屋面系统抗风性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
LIU Wei. Wind resistant performance of standing seam metal roof system with anti wind clip[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [21] 傅继阳, 谢壮宁, 李秋胜, 等. 大跨屋盖结构考虑模态耦合的等效静力风荷载[J]. *力学学报*, 2007, 39(6): 781-787.
FU Jiyang, XIE Zhuangning, LI Qiusheng, et al. Equivalent static wind loads on long-span roof structures with modal response correlations[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, 39(6): 781-787.
- [22] 王飞天, 柯世堂, 王晓海, 等. 强风作用下超大型冷却塔结构失效准则与强健性分析[J]. *振动工程学报*, 2021, 34(4): 739-747.
WANG Feitian, KE Shitang, WANG Xiaohai, et al. Structural failure criterion and robustness analysis of super-large cooling towers subjected to strong winds[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(4): 739-747.

第一作者:刘凌峰(1998—),男,硕士。

E-mail: liulf_nuaa@163.com

通信作者:柯世堂(1982—),男,博士,教授。

E-mail: keshitang@163.com