

文章编号: 1674—8247(2022)02—0011—09
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.02.003

高速铁路沿线轻钢类建筑物失效运动路径数值仿真研究

张丽君¹ 赵雷¹ 孙新宇²

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 中国国家铁路集团有限公司, 北京 100844)

摘要:轻钢类建筑物失效入侵高速铁路沿线事故日趋增长,已成高速铁路路外环境整治的一项主要内容,轻钢类建筑物失效运动路径亟待开展研究。本文基于TTU实测模型参数,采用Lsdyna-ICFD计算模块进行数值模拟分析,将模拟结果与实测对比,验证模拟方法的有效性;基于此方法模拟高铁沿线轻钢类建筑物门式刚架轻钢建筑的4个风向角流场及4个风速流场,结合N-S方程采用稳态方法进行求解,分析不同风速风向向下建筑表面风荷载的变化规律;采用ICFD计算模块进行流固耦合分析,揭示不同风速、风向向下连接失效屋面板的风致漂移规律。计算结果表明:屋盖最大风吸荷载约616.63 N,最大漂移距离约为569.65 m。

关键词:实测模型;数值模拟;风荷载;流固耦合;风致漂移

中图分类号:U238 文献标志码:A

Numerical Simulation for Failure Path of Light Steel Buildings along High-speed Railway

ZHANG Lijun¹ ZHAO Lei¹ SUN Xinyu²

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway, Beijing 100844, China)

Abstract: The accidents of light steel buildings invading high-speed railways due to failure are increasing day by day, and it has become a main content of the remediation of the external off-railway environment. The path of light steel buildings' failure is urgently needed to be studied. In this paper, based on Texas Tech University Building Model measured model parameters, the Lsdyna-ICFD calculation module is used for numerical simulation analysis, and the simulation results are compared with the measured data to verify the effectiveness of the simulation method. Based on this method, four wind direction angle flow fields and four wind speed flow fields of light steel buildings with portal frames along the high-speed railway are simulated, the N-S equation is solved by the steady-state method, and the variation law of wind load on the building surface under different wind speeds is analyzed. The ICFD calculation module is used for fluid-structure coupling analysis, and the wind-induced drift law of the failed roof slabs connected downward with different wind speeds and winds is revealed. The calculation results show that the maximum wind suction load of the roof is about 616.63 N and the maximum drift distance is about 569.65 m.

Key words: measured model; numerical simulation; wind load; fluid-structure interaction; wind-induced drift

结构风效应的数值模拟是利用计算流体力学方法通过计算机模拟建筑结构周围风场,确定作用在建

收稿日期:2022-04-14

作者简介:张丽君(1995-),女,在读博士研究生。

基金项目:中国铁路总公司科技研究开放计划(N2020T004)

引文格式:张丽君,赵雷,孙新宇.高速铁路沿线轻钢类建筑物失效运动路径数值仿真研究[J].高速铁路技术,2022,13(2):11-19.

ZHANG Lijun, ZHAO Lei, SUN Xinyu. Numerical Simulation for Failure Path of Light Steel Buildings along High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2):11-19.

筑结构上的风效应,称为数值风洞^[1-6]。与一般流体动力学问题不同的是,风绕建筑物流动主要涉及高雷诺数湍流、分离流和强三维流动,其核心是湍流问题^[7-9]。国内外专家对大风作用下房屋结构的安全性开展了大量的研究^[10-13],但是,难以满足高速铁路沿线轻钢类建筑物安全评估的需求,尤其是未能确定其运动轨迹,以指导高速铁路路外环境整治。基于此,本文利用数值仿真分析,模拟高速铁路沿线轻钢类建筑物-门式刚架轻钢建筑的4个风向角流场及4个风速流场,并结合N-S方程采用稳态方法进行求解,分析不同风速、风向下建筑表面风荷载的变化规律,采用ICFD计算模块进行流固耦合分析,揭示不同风速、风向下与连接失效屋面板的风致漂移规律。

1 数值模拟方法验证

TTU模型(Texas Tech University Building Model)试验是风工程学界的标尺模型之一,对风工程研究产生了广泛影响。TTU模型与本次试验模型均为典型的低矮双坡建筑,通过对比计算TTU模型,可验证本文数值模拟方法的准确性。

1.1 模型概述

模型几何尺寸为9.1 m × 13.7 m × 3.93 m,坡度约为1/60,如图1所示。建立CFD数值模型,选用RANS Spalart-Allmaras模型为湍流模型。

(1) 计算域尺度

$B \times H \times L = 124.128 \text{ m} \times 39.88 \text{ m} \times 147.52 \text{ m}$,阻塞比为1% < 5%。

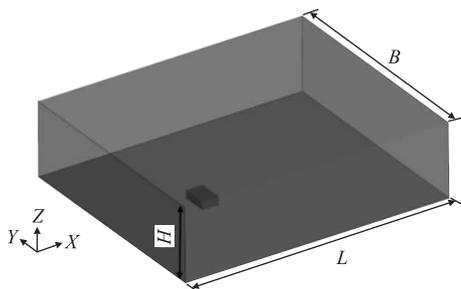


图1 计算域图

(2) 边界条件

速度剖面如式(1)所示。

$$v(z) = v_{10} \times \left(\frac{z}{z_{10}}\right)^{\alpha} \quad (1)$$

式中： v_{10} ——10 m高度的风速；

A ——粗糙度指数；

Z ——实际流场相对大气边界层底部的高度；

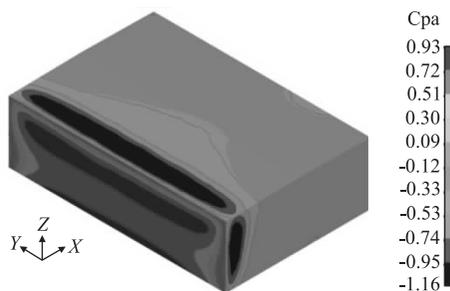
z_{10} 取10 m。

(3) 网格划分

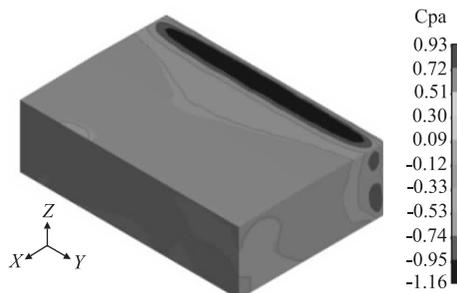
采用四面体网格,流场核心区网格加密,最小网格尺度0.15 m,计算流域最大网格尺度约2.27 m,位于流场出口位置附近。

1.2 计算结果

TTU模型数值模拟风压系数如图2所示。模型的迎风面主要以正压为主,风压系数在0.51以上;背风面主要以负压为主,风压系数在-0.33 ~ -0.53之间;屋盖为负压,屋盖的风压系数普遍在-0.12 ~ -0.53范围内;建筑物侧面为负压,风压系数普遍在-0.12 ~ -0.53范围内。屋盖和建筑物侧面存在很强的来流分离现象,形成分离区,分离区受负压,风压系数超过-1。



(a) 轴侧图1



(b) 轴侧图2

图2 TTU模型风压系数图

将数值模拟结果与TTU实测中轴位置的风压系数对比,结果吻合较好,表明本文的数值风洞计算方法可靠,对比结果如1所示。

表1 风压系数对比表

中轴位置 /m	风压系数		误差 /%
	TTU 实测	数值模拟	
1.07	0.60	0.53	11.67
4.12	-1.06	-0.91	14.15
10.77	-0.21	-0.20	4.76

2 建筑表面风荷载数值模拟

2.1 模型概述

分析模型为门式刚架轻型房屋钢结构,模型尺寸为6 m × 3 m × 4.5 m(长 × 高 × 宽),模型墙面与屋面

均采用 YX35-125-750 (V-125) 型单层压型钢板, 屋面板与檩条采用自攻螺钉波峰连接。经计算分析发现风荷载作用时计算域 $36\text{ m} \times 25\text{ m} \times 45\text{ m}$ 范围外的风场稳定, 不影响建筑物的表面风荷载, 为提高模型的计算效率, 故取模型的计算域为 $36\text{ m} \times 25\text{ m} \times 45\text{ m}$ ($B \times H \times L$), 如图 3 所示。

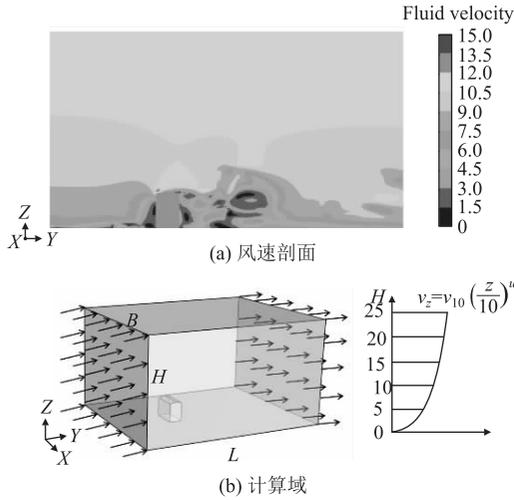
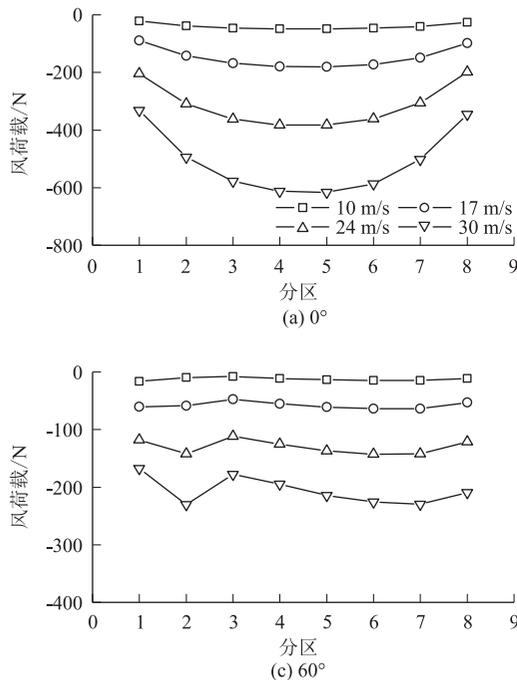


图3 计算域示意图

2.2 计算结果与分析

2.2.1 A 区风荷载

4 个风向角下计算建筑 A 区表面风荷载曲线如图 4 所示。风荷载普遍小于 0, 为风吸力。当风向角一定时, 随着速度的增加, 风荷载增加。当风向角为 0° 时, A 区表面风荷载曲线呈抛物线型, 其中 A-4 区和 A-5



区的荷载较大, 风荷载在 $-40 \sim -620\text{ N}$ 范围内; 当风向角为 30° 时, A 区表面风荷载曲线呈抛物线型, 在 A-5 区位置风荷载最大; 当风向角为 60° 时, A 区表面风荷载曲线在 A-2 区和 A-3 区位置发生突变; 当风向角为 90° 时, A 区表面风荷载在 A-1 区位置风荷载最大, 在 A-4 区 ~ A-6 区位置风荷载较小接近 0。4 个风速下计算建筑 A 区表面风荷载曲线如图 5 所示, 相同风速下, 随着风向角的增加, 风荷载普遍减小, 风向角为 0° 时风荷载最大, 但是在 A-1 区是 90° 风向角时风荷载最大。

2.2.2 B 区风荷载

4 个风向角下计算建筑 B 区表面风荷载曲线如图 6 所示, 风荷载普遍小于 0, 为风吸力。当风向角一定时, 随着速度的增加, 风荷载增加。当风向角为 0° 时, A 区表面风荷载曲线呈抛物线型, 其中 B-4 区和 B-5 区的荷载较大, 风荷载在 $-10 \sim -350\text{ N}$ 范围内; 当风向角为 30° 时, 在 B-1 区位置风荷载最大, B-8 区位置风荷载最小; 当风向角为 60° 时, B 区表面风荷载曲线在先增加再趋于平稳, 在 B-1 区位置风荷载最大, B-3 区以后风荷载变化不明显; 当风向角为 90° 时, B 区表面风荷载在 B-1 区位置风荷载最大, 在 B-4 区 ~ B-6 区位置风荷载较小且接近 0。4 个风速下计算建筑 B 区表面风荷载曲线如图 7 所示, 相同风速下, 随着风向角的增加, 风荷载普遍先增加后减小, 风向角为 30° 时风荷载最大, 但是在 B-1 区是 90° 风向角时风荷载最大。

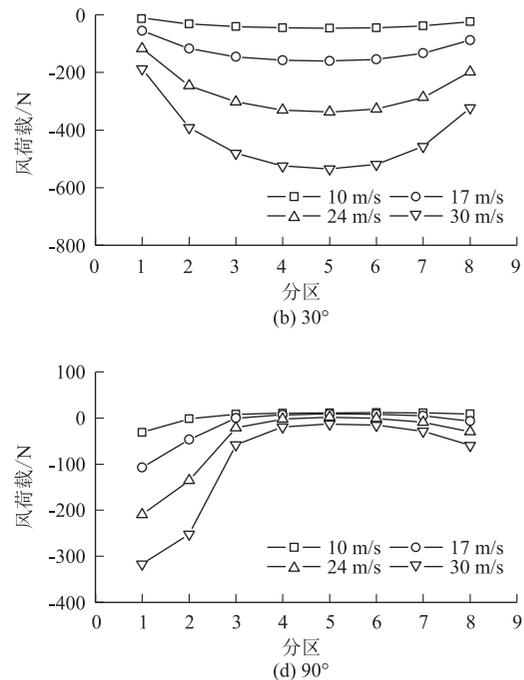


图4 4 个风向角下 A 区表面风荷载曲线图

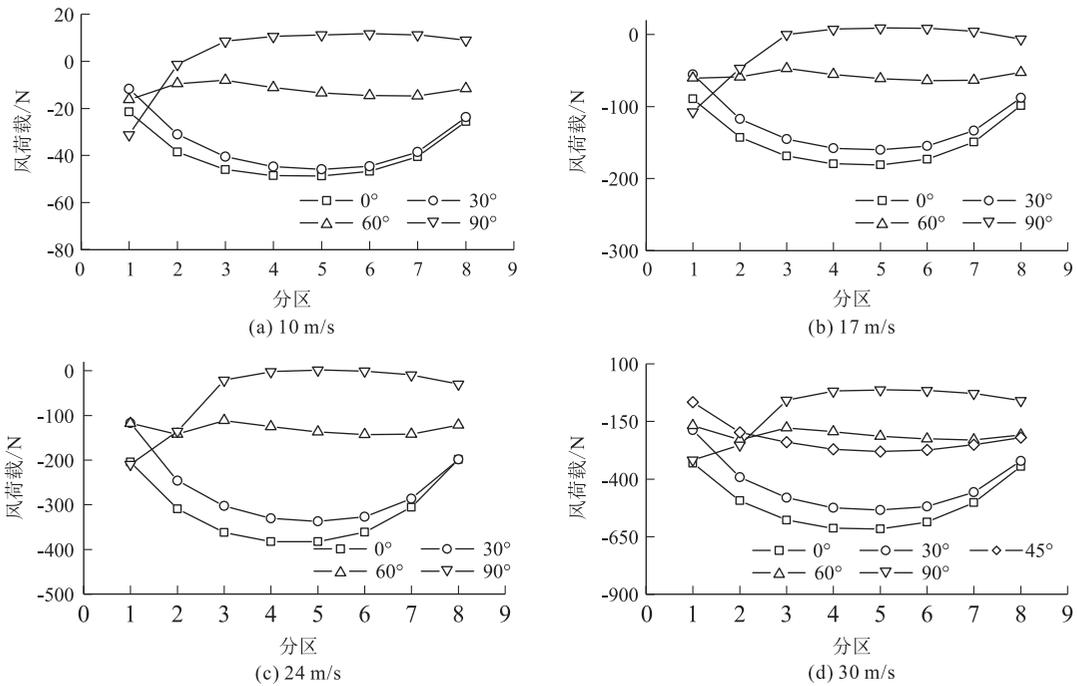


图5 4个风速下A区表面风荷载曲线图

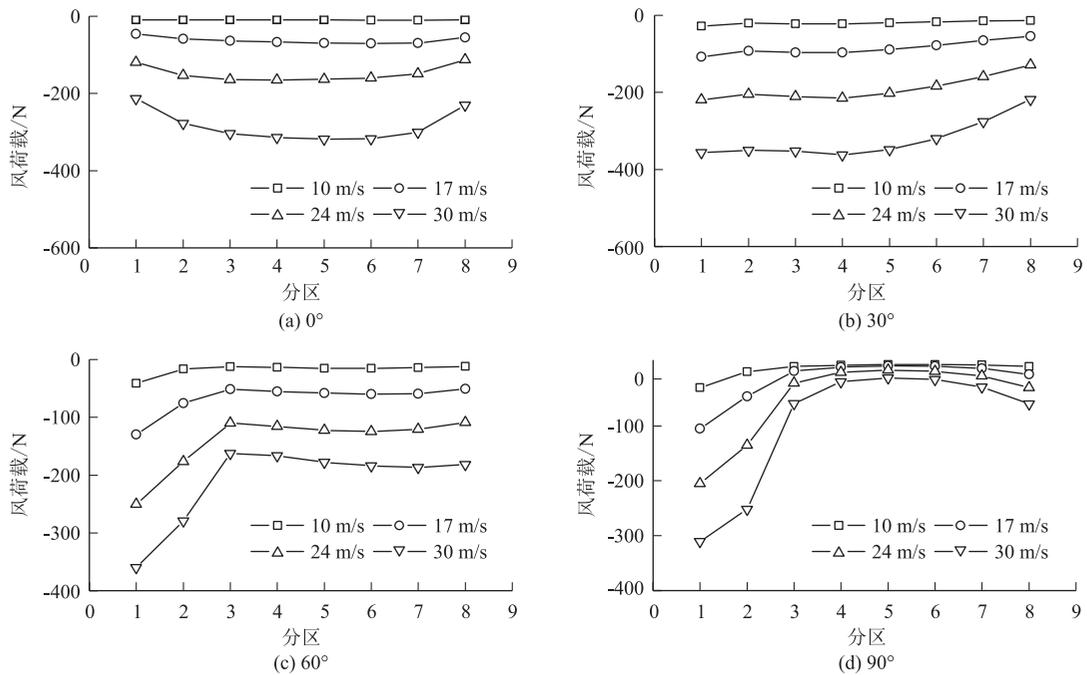


图6 4个风向角下B区表面风荷载曲线图

3 试验模型流固耦合模拟

3.1 模型概述

根据稳态计算结果可知屋盖风压系数较侧壁风压系数较高,屋盖受风吸作用较大。为提升计算效率,选取受风载作用最大区块进行屋面板风致飘逸轨迹模拟分析,采用 LS-Dyna 的 ICFD 计算模块进行流固耦合分

析。根据建筑表面风荷载分析,筛选试验模型表明受风吸作用最大的板块进行流固耦合模拟,即:0°风向角下选择 A-4 区板块;45°风向角下选择 A-5 区板块;90°风向角下选择 A-1 区板块。计算时,0~2 s 约束板块,2 s 后释放板块的约束,使其在风力作用下运动,并提取屋面板运动轨迹。为提高计算效率,将 YX35-125-750(V-125)型单层压型钢板简化为截面惯性矩等

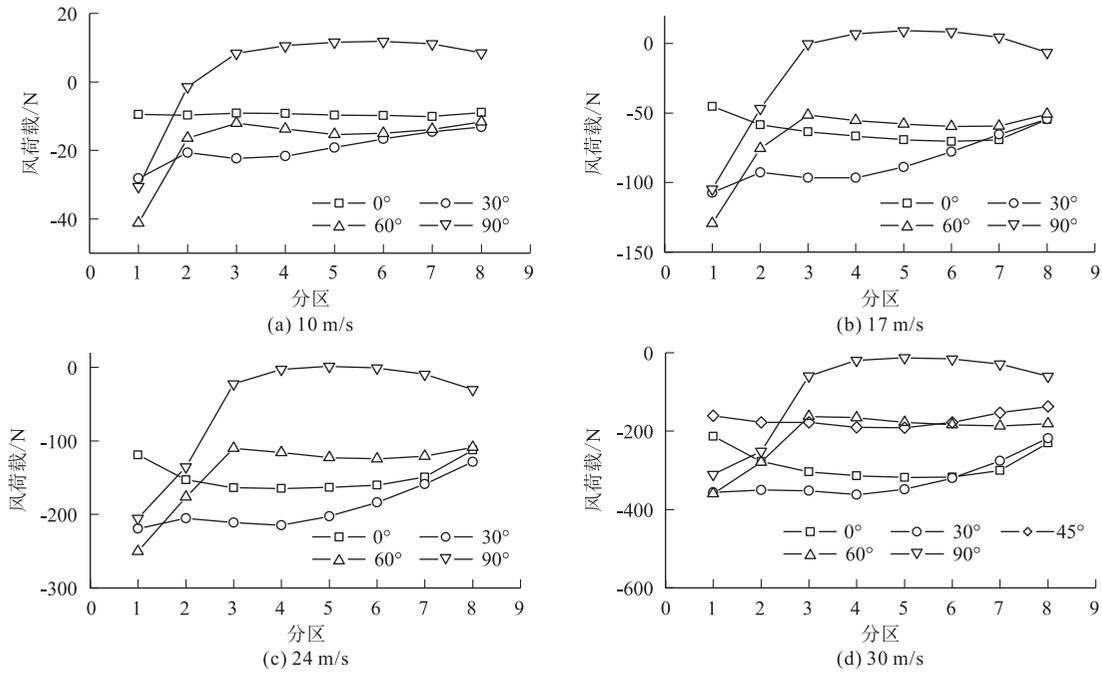


图7 4个风速下B区表面风荷载曲线图

效的矩形钢板。

3.2 计算结果及分析

3.2.1 风场变化分析

经模拟分析,不同风速作用下,风场变化相似,因此,风速为30 m/s,风向为0°的风场进行说明,屋面板运动过程中的风场变化如图8所示。结果表明: $t=0$ s时,屋面板未发生运动,此时建筑物内部风速为0 m/s; $t=2$ s时,屋面板被掀起,并发生运动,此时来流风涌入建筑物内部,带动建筑物内部流场,导致建筑物内部风场发生变化,此时内部风速可达约16 m/s,此时建筑物内部风场逐渐趋于稳定; $t=4$ s时,屋面板距建筑物约14 m,建筑物内部风场稳定,风速最高可达约18 m/s,建筑物附近风场稳定,在屋面板附近局部风场发生变化。

3.2.2 屋面板运动轨迹分析

(1) 工况1(风向角:0°;风速:30 m/s)

工况1屋面板位移时程曲线如图9所示,屋面板整体运动时间约43 s。 $t=0$ s时,屋面板受风吸力作用,此时屋面板受力大小约613.18 N,导致屋面板整体斜向脱离建筑物;受到风力作用下,屋面板在y轴正方向运动,由于风场变化,屋面板在运动过程中伴随旋转等运动姿态,加之受重力作用,屋面板在约43 s时刻触地,此后不再移动。在此期间,屋面板的运动距离约569.65 m,其中x轴方向运动距离约59.9 m,y轴方向运动距离约566.5 m。屋面板整体运动轨迹线如图10所示。

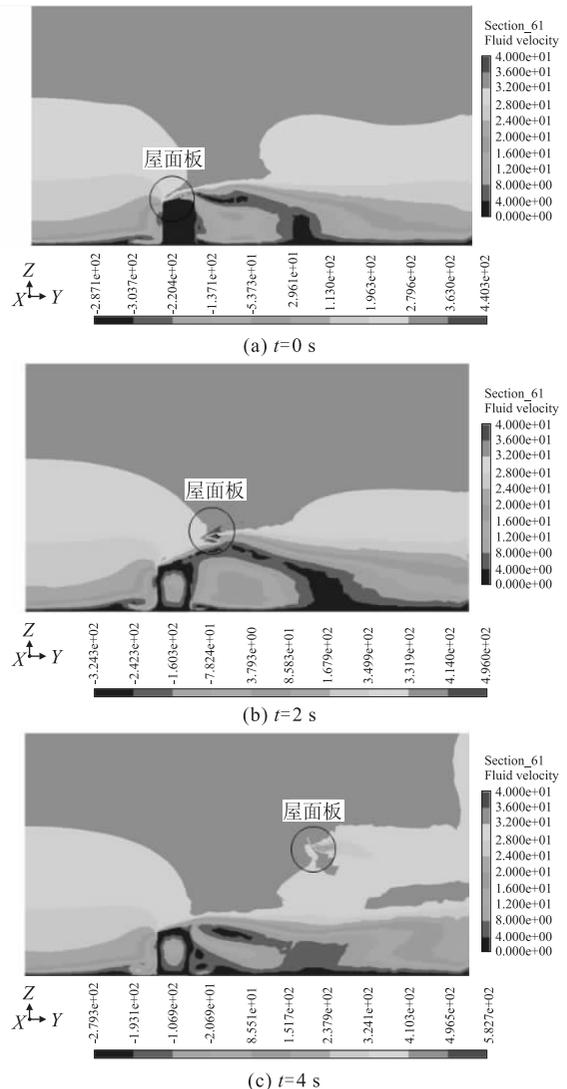


图8 风场变化图

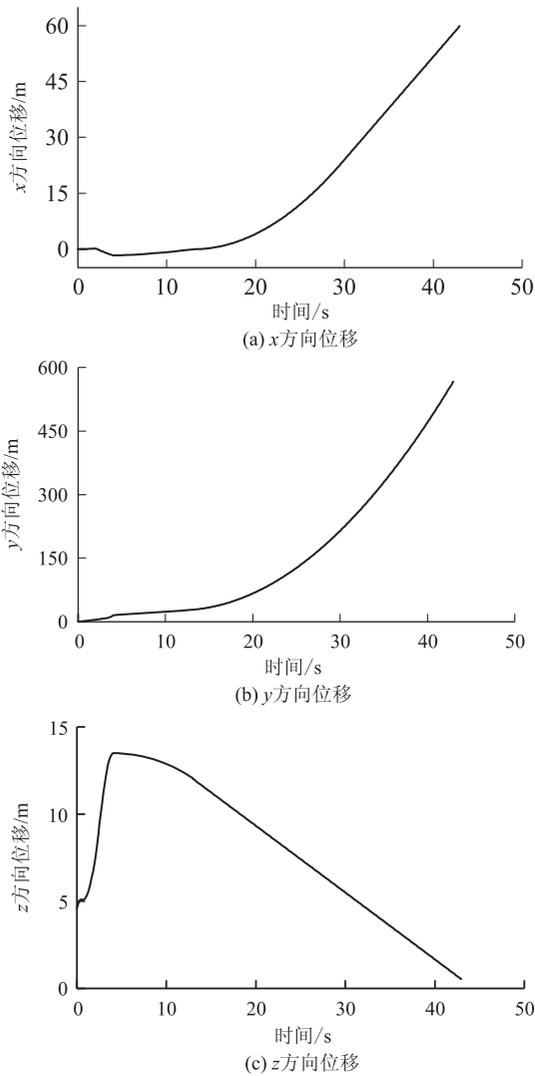


图9 工况1屋面板位移时程曲线图

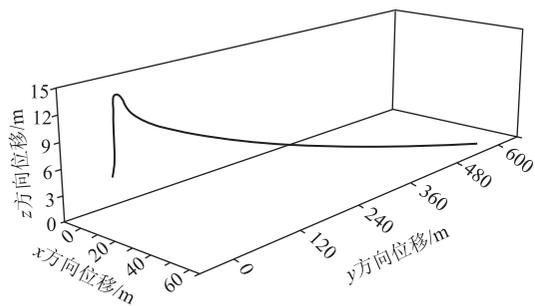


图10 工况1屋面板运动轨迹图

(2) 工况2(风向角:45°;风速:30 m/s)

工况2屋面板位移时程曲线如图11所示,屋面板整体运动时间约21.8s。 $t=0$ s时,屋面板受风吸力作用,此时屋面板受力大小约281.30N,导致屋面板整体斜向脱离建筑物;受到风力作用下,屋面板在y轴正方向运动,由于风场变化,屋面板在运动过程中伴随

旋转等运动姿态,加之受重力作用,屋面板在约21.8s时刻触地,此后不再移动。在此期间,屋面板的运动距离约283.8m,其中x轴方向运动距离约4.36m,y轴方向运动距离约283.77m。屋面板整体运动轨迹线如图12所示。

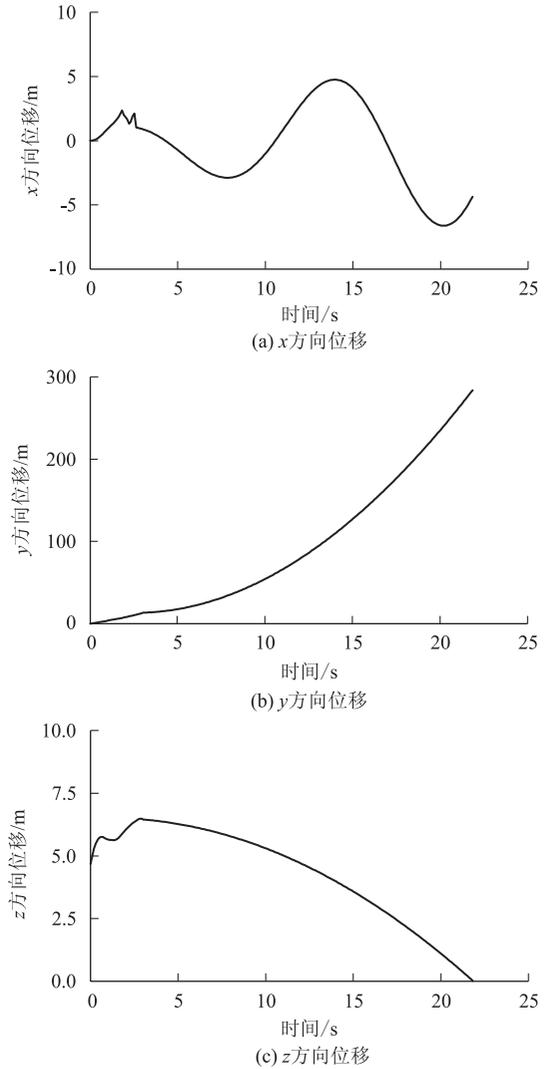


图11 工况2屋面板位移时程曲线图

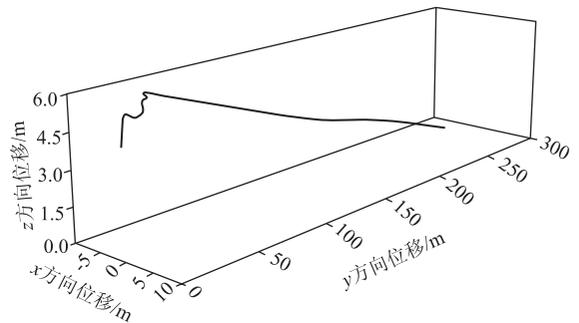


图12 工况2屋面板运动轨迹图

(3) 工况3(风向角:90°;风速:30 m/s)

工况3屋面板位移时程曲线如图13所示,屋面板整体运动时间约34.6 s。 $t=0$ s时,屋面板受风吸力作用,此时屋面板受力大小约317.06 N,导致屋面板整体斜向脱离建筑物;受到风力作用下,屋面板在y轴正方向运动,由于风场变化,屋面板在运动过程中伴随旋转等运动姿态,加之受重力作用,屋面板在约34.6 s时刻触地,此后不再移动。在此期间,屋面板的运动距离约277.28 m,其中x轴方向运动距离约16.81 m,y轴方向运动距离约276.77 m。屋面板整体运动轨迹线如图14所示。

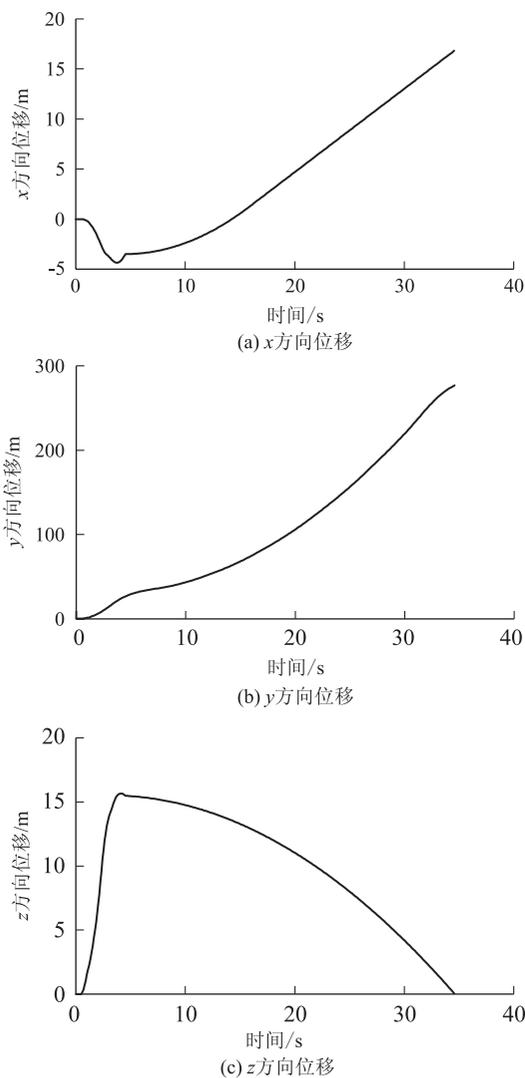


图13 工况3屋面板位移时程曲线图

(4) 工况4(风向角:0°;风速:24 m/s)

工况4屋面板位移时程曲线图15所示,屋面板整体运动时间约27.4 s。 $t=0$ s时,屋面板受风吸力作用,此时屋面板受力大小约382.38 N,导致屋面板整体斜向脱离建筑物;在风力作用下,屋面板在y轴正方向运动,由于风场变化,屋面板在运动过程中伴随旋转

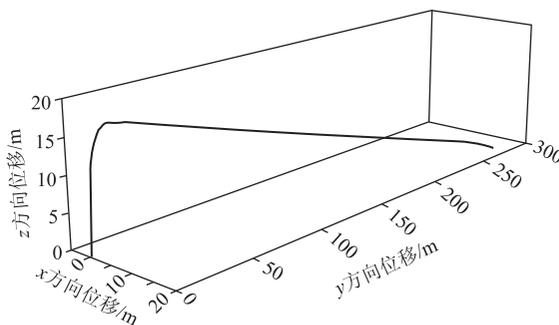


图14 工况3屋面板运动轨迹图

等运动姿态,加之受重力作用,屋面板在约27.4 s时刻触地,此后不再移动。在此期间,屋面板的运动距离约69.1 m,其中x轴方向运动距离约-2.13 m,y轴方向运动距离约69.07 m。屋面板整体运动轨迹线如图16所示。

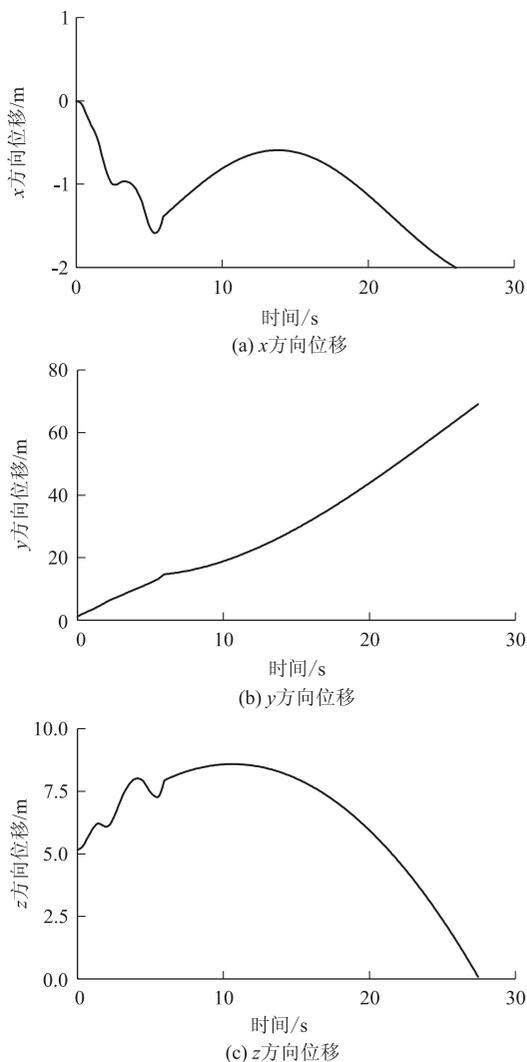


图15 工况4屋面板位移时程曲线图

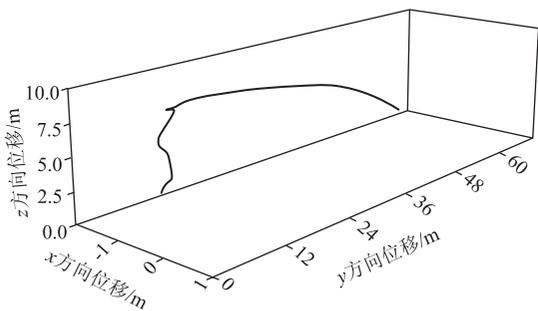


图 16 工况 4 屋面板运动轨迹图

(5) 工况 5 (风向角:0°; 风速:17 m/s)

工况 5 屋面板位移时程曲线如图 17 所示,屋面板整体运动时间约 5.6 s。t=0 s 时,屋面板受风吸力作用,此时屋面板受力大小约 179.40 N,导致屋面板整体斜向脱离建筑物;在风力作用下,屋面板在 y 轴正方向运动,由于风场变化,屋面板在运动过程中伴随旋转等运动姿态,加之受重力作用,屋面板在约 5.6 s 时刻

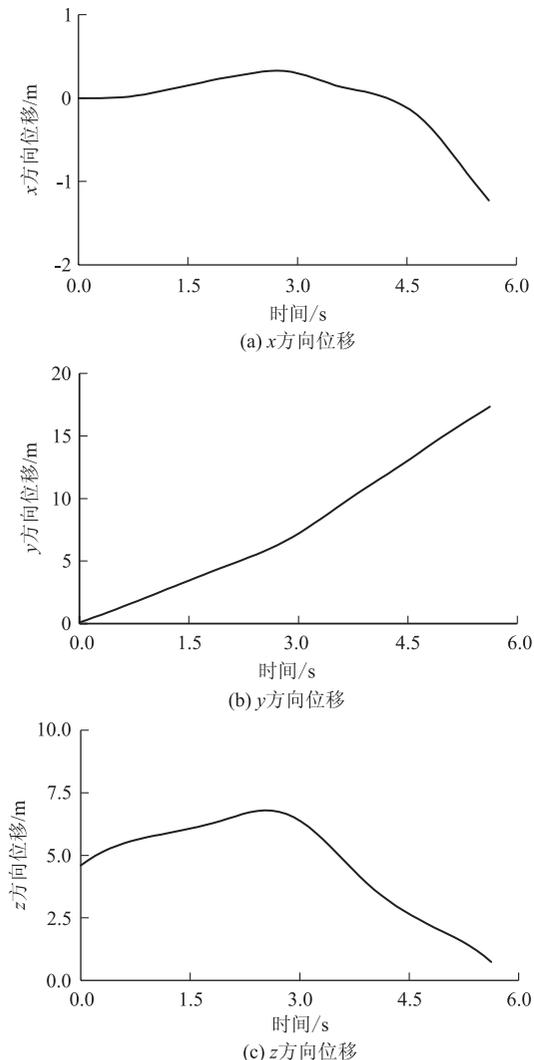


图 17 工况 5 屋面板位移时程曲线图

触地,此后不再移动。在此期间,屋面板的运动距离约 17.38 m,其中 x 轴方向运动距离约 -1.23 m,y 轴方向运动距离约 17.34 m。屋面板整体运动轨迹线如图 18 所示。

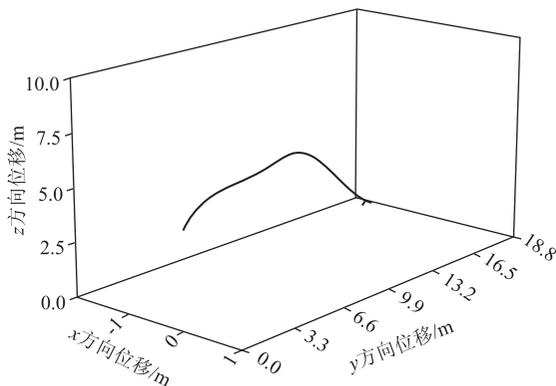


图 18 工况 5 屋面板运动轨迹图

根据上述结果可知,在相同风速下,不同风向角作用下,屋面板受风吸力作用不同,在风向角为 0°时,屋面板受风吸力作用最大,屋面板运动距离最远;不同风速工况下,随着风速的增加,屋面板运动距离增加。屋面板位移对比如图 19 所示。

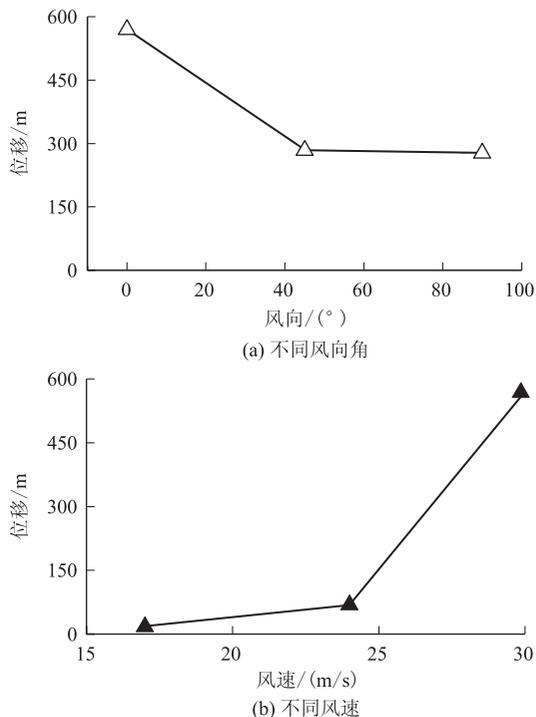


图 19 屋面板位移对比图

4 结论

根据上述分析,可得如下结论:

- (1) 基于 TTU 场地模型实测数据,采用本文数值

模拟方法准确反演了其建筑表面风压系数分布,验证了该数值模拟方法的有效性。

(2) 不同风载工况下,屋盖受风吸作用最明显,屋盖风载系数最大可达-2,但随着风向角的变化,受风吸作用最明显的板块也在变化,其中 0° 风向角下A-4板块风载最大, 90° 风向角下A-1板块风载最大,且随着风速的增加,屋盖受到的荷载增加,当风速达到 30 m/s 时,屋盖风荷载可达最大值约 616.63 N 。建议采用该风吸荷载值为计算依据,反算不同规格自攻螺钉的合理布置间距,形成螺钉规格与间距查询对照表,据此快速排查防护范围内轻钢建筑的安全性。

(3) 试验模型在风载作用下,屋盖受风力作用最明显,可能引起屋盖脱离建筑物,导致建筑物内部风场变化,使建筑物内部受较大风力作用;屋盖飞行过程中也会引起整体流域风场变化。计算结果表明:在相同风速下,不同风向角作用下,屋盖受风吸力作用不同,在 30 m/s 风速作用下,在风向角为 0° 时,屋盖受风载作用最大,屋盖运动距离最远约 569.65 m ;在不同风速工况下,随着风速的增加,屋盖运动距离增加。偏安全考虑,建议高铁沿线两侧 600 m 作为外部环境安全防护距离。

参考文献:

- [1] 张仕奇. 基于CFD对板式高层建筑的数值风洞模拟[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2021.
ZHANG Shiqi. Numerical Wind Tunnel Simulation of Slab High-Rise Building Based on CFD [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2021.
- [2] 白笑天. CFD数值模拟在钢框架结构设计中的应用研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2021.
BAI Xiaotian. The Application of CFD Numerical Simulation in the Design of Steel Frame Structure [D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2021.
- [3] 鲍小春. 非稳态数值风洞下大涡模拟方法的滤波效应研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
BAO Xiaochun. Research on Filtering Effect of Large Eddy Simulation Method in Unsteady Numerical Wind Tunnel [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.
- [4] 李鑫宇. 非稳态数值风洞模拟的压强震荡研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
LI Xinyu. Study on Pressure Oscillation of Unsteady State Numerical Wind Tunnel Simulation [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.
- [5] 王建国. 高层建筑群的数值风洞模拟[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2019.
WANG Jianchao. Numerical Wind Tunnel Simulation of High-Rise Buildings [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2019.
- [6] 王雪峰. 基于CFD数值模拟的超高层钢结构体型收进研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2019.
WANG Xuefeng. Research on the Shape of Super High-Rise Steel Structure Based on CFD Numerical Simulation [D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2019.
- [7] 余明果. 大型碟式太阳能聚光器风效应的数值计算研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
YU Mingguo. Study on Numerical Simulation of Wind Effects for Large-Scale Dish Solar Concentrator [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [8] 康绍鹏. 大型客机中机身高速运输车行驶安全性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
KANG Shaopeng. Research on Transportation Safety of Large Aircraft Middle Fuselage Rapid Transporter [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [9] 杨忱. 基于数值风洞模拟的超高层建筑风荷载特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
YANG Chen. Study on Characteristics of High-Rise Buildings Wind Load with Numerical Simulation of Wind Tunnel [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [10] 高亮. 内陆强风特性的现场实测与模拟[D]. 西安: 长安大学, 2012.
GAO Liang. Simulation and Field Measurement of the Characters of Strong Wind in Inner Land of China [D]. Xi'an: Changan University, 2012.
- [11] 卢春玲. 复杂超高层及大跨度屋盖建筑结构风效应的数值风洞研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
LU Chunling. Numerical Wind Tunnel Simulations of Wind Effects on Super High-Rise Buildings and Long-Span Roof Structures [D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [12] 余志祥. 高速铁路大型客运站建筑风荷载及流固耦合作用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
YU Zhixiang. Wind Loads and Fluid-Structure Interaction for Large High-speed Train Stations [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [13] 彭兴黔. 基于气动措施的低矮房屋抗风设计: 门式刚架房屋结构的导风设计研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
PENG Xingqian. Aerodynamic Measures of Low-Rise Buildings in Wind-Resistance Design-Wind Leading Design Research of Portal Frame Buildings [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.