

异曲面空间气枕膜结构风荷载特性试验研究

李晓男¹ 薛儒² 王棋¹ 白笑天² 闫建新¹ 刘涛¹

1. 石家庄建拓房地产开发有限公司, 河北 石家庄 050000

2. 石家庄市建筑设计院有限责任公司, 河北 石家庄 050033

[摘要]为解决异曲面空间气枕膜结构风荷载无规范明确取值、风致效应复杂的工程难题,以某实际工程项目为原型,采用1:70缩尺刚性模型开展风洞测压试验研究。试验模拟B类风场地貌,以10°为间隔,在0°~360°范围进行不同来流方向的测算,同步采集1178个测点的风压时程数据,分析结构表面风压分布规律、典型风向角效应及风荷载体型系数特征。结果表明:结构表面以负压为主,局部内凹区出现小范围正压且数值远低于负压绝对值;悬挑边缘、屋脊、转角及气流分离区为风荷载敏感区域,体型系数与风吸力极值显著超出规范值;垂直于结构长轴/屋脊的风向为最不利风向,风吸力达到峰值;结构曲率、悬挑长度与平面形状是影响风荷载分布的关键因素。研究结果可为同类异曲面气枕膜结构的抗风设计提供精准试验依据与数据支撑。

[关键词]异曲面空间结构;气枕膜结构;风荷载特性;风洞试验;体型系数

DOI: 10.33142/ucp.v3i2.19991

中图分类号: TU383

文献标识码: A

Experimental Study on Wind Load Characteristics of Air Pillow Membrane Structure in Heterogeneous Surface Space

LI Xiaonan¹, XUE Ru², WANG Qi¹, BAI Xiaotian², YAN Jianxin¹, LIU Tao¹

1. Shijiazhuang Jiantuo Real Estate Development Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

2. Shijiazhuang Architectural Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050033, China

Abstract: In order to solve the engineering problem of wind load without standardized and clear values and complex wind-induced effects in the structure of air cushion membrane with different curved surfaces, a wind tunnel pressure measurement test was conducted using a 1:70 scale rigid model based on a practical engineering project as a prototype. Experimental simulation of B-class wind field topography, with 10° intervals, measuring different inflow directions in the range of 0°~360°; synchronously collecting wind pressure time history data from 1,178 measurement points, analyzing the distribution law of wind pressure on the surface of the structure, typical wind direction angle effect, and wind load shape coefficient characteristics. The results show that the surface of the structure is mainly under negative pressure, and there is a small range of positive pressure in the local concave area, which is much lower than the absolute value of negative pressure; The overhanging edge, ridge, corner, and airflow separation zone are wind load sensitive areas, and the shape coefficient and wind suction extreme values significantly exceed the standard values; The wind direction perpendicular to the long axis/ridge of the structure is the most unfavorable wind direction, and the wind suction reaches its peak; Structural curvature, cantilever length, and planar shape are key factors affecting the distribution of wind loads. The research results can provide accurate experimental basis and data support for the wind resistance design of similar heterogeneous surface airbag membrane structures.

Keywords: heterogeneous surface spatial structure; air cushion membrane structure; wind load characteristics; wind tunnel testing; shape coefficient

引言

近年来,随着我国城市化建设的快速推进,以及工作、生活多样性的不断提升,众多特殊场馆,如:大型体育场

馆、铁路枢纽站房、会展中心、文化场馆等众多具备明显特殊艺术文化符号的建筑应运而生。此类城市更新项目为满足不同的艺术文化与功能性要求,多数将采用异形大跨

空间结构。此类机构通常会突破原有的传统矩形、圆形、弧形等规则形的屋面与外立面形式,采取与曲面、折板、悬挑、波浪等多类型曲面或相互组合的情况出现,从而呈现出不同的艺术美感,在建筑美学与使用功能上具备明显优势。然而,伴随而来的通常便是跨度大(大于80m)、自重轻、阻尼小、自振频率低、空间效应显著等特征。

对于异曲面结构的复杂屋面以及外立面形式的存在,会使风绕流过程呈现强烈的三维特性,流场在结构表面极易发生分离、再付等现象,伴随着涡锥、涡脱等流场现象,导致表面风压分布极不均匀,局部区域会出现远大于规范取值的风吸力,造成潜在工程安全风险。同时,对于多数区域的荷载预估也会偏高,造成工程成本的不必要浪费,并且对于开敞性穹顶结构,上下表面均存在风吸与风压,荷载预估不准确(过低或过高)都会对建筑的安全造成不利的风险。我国现行《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)^[1]仅对规则拱形屋面、球形屋面、双坡屋面等简单体型给出风荷载体型系数,对于非对称曲面、大悬挑、波浪造型、折板组合等异形结构,规范无明确取值依据。异形曲面空间结构多数会选择采用:钢结构、膜结构、网架等轻质材料,整体刚度偏低,在强风作用下易产生显著风致振动,长期脉动风作用还可能引发结构疲劳破坏,直接威胁结构安全与正常使用。

气枕膜结构因其具备:轻质高强、造型灵活、透光节能、自洁耐久等优势特点,可实现大跨度无柱覆盖,同时降低结构自重与后期维护成本。当前大型场馆、交通枢纽、商业屋面等工程中应用日益广泛,材料与施工技术持续成熟,已成为现代大跨空间结构的重要发展方向之一。因此,针对性地开展风荷载风洞试验研究,获取精准风荷载数据,已成为保障工程设计安全、经济、合理的迫切需求。风洞试验能够真实模拟大气边界层风场环境,精确测量结构表面风压分布、体型系数、极值风压等关键指标,是目前复杂建筑结构风荷载研究最可靠、最权威的手段^[2]。本文将以太行山片区滨水商业街项目为研究模板,通过刚性模型测压试验,对此类结构表面风荷载特性进行研究。

日本、美国、欧洲等国通过风洞试验对悬挑屋盖、曲面屋盖、体育场罩棚等结构进行研究,提出了适用于本国规范的体型系数建议值。国内学者针对体育场罩棚、高铁站房、大跨网壳等结构开展了大量风洞试验研究,在大跨屋盖平均风压、脉动风压、风致响应、体型系数等方面取得丰富成果。安苗等^[3]通过风洞试验研究了椭圆形体育馆悬挑罩棚的风荷载分布规律,指出波浪造型对风压分布影响显著;叶高宏等^[4]对蘑菇形悬挑屋盖进行风洞试验,揭

示了建筑间干扰与地形对风荷载的不利效应;崔世鹏等^[5]对铁路站房大跨度悬挑曲面屋盖开展风洞试验,明确挑檐为极值风压集中区域。

总体来看,现有风洞试验研究多针对规则或单一异形体型,针对多类型异形组合、大曲率曲面、超长悬挑、周边受密集建筑干扰的异形大跨空间结构的系统性风洞试验仍较为缺乏,试验数据难以直接支撑复杂工程设计。因此,开展多体型、多工况、多参数的异形大跨空间结构风洞试验研究,具有重要理论价值与工程应用价值。

1 试验概况

1.1 风洞试验简介

本试验为刚性模型测压试验,在边界层风洞试验室的低速试验段内进行。试验区中心转盘处截面为4.38m×3.00m,试验段长度达24m,能较好地模拟出大气边界层风场特性。此低速试验段内最大风速可达30.0 m/s,通过高精度压力传感器配合微压差计来监控调整来流风速,以确保试验流场的精准性与稳定性。

试验测试系统包括:

风速控制系统:精确控制来流风速,保证风场稳定;

风向角控制系统:电动高精度转盘,实现风向角精准定位;

风场测试系统:采用高精度测试设备,完成平均风速剖面、湍流度、粗糙度指数等参数校验;

风压测试系统:采用高精度电子压力扫描阀系统,同步采集模型表面所有测点的风压时程数据,采样频率与采样时间满足规范要求。

本次试验以10°为风向角的最小减隔,在0~360°的风向角范围内连续调整,对目标建筑的36个风向角进行基础风压系数的测算。试验过程如图1所示。试验参数如表1所示。



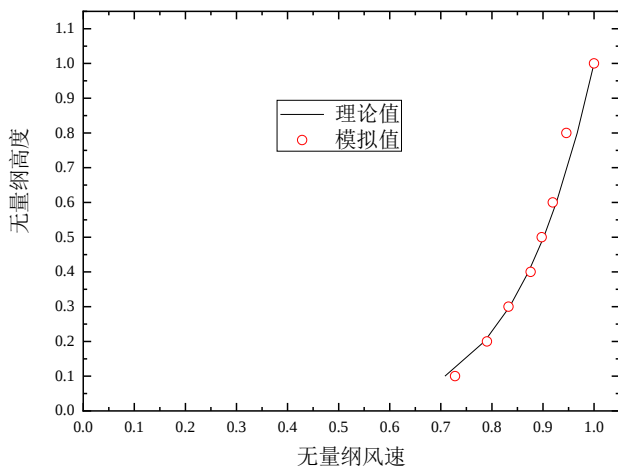
图1 风洞试验照片

表 1 试验技术参数小结

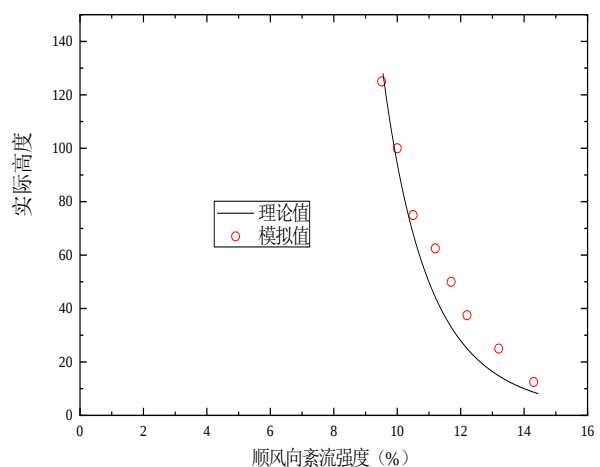
参数分类	参数名称	指标
气象、地貌及建筑环境	地表粗糙度类型	B
	基本风压 (100 年)	0.4kPa
模型参数	试验断面尺寸	4.4m 宽 × 3m 高 × 24m 长
	模型缩尺比	1 : 70
	模型形式	刚性模型
	测点总数	3346
试验参数	自由来流风速	16m/s
	采样频率	330Hz
	采样时间	30s
	风向角范围	0°~360°
	风向角间隔	10°

1.2 试验模型设计与制作

本次试验选取实际工程缩尺模型为研究对象,其结构特点包含:曲面悬挑屋盖、波浪形罩棚、大跨度网壳、气膜凸起等结构特性。采用刚性模型缩尺测压的形式,在满足几何相似性的同时进行缩尺建模,并进行实体模型的构建,在表面设置测压管路,与扫描阀连接,从而完成基础风压数据的测算。



(a) 平均风速剖面



(b) 紊流度剖面

图 2 平均风速剖面和紊流度剖面

1.4 数据处理方法

本文采用无量纲体型系数来描述结构表面的风压

$$\mu_{i,\theta} = \frac{C_{pi,\theta}}{(Z_i/h)^{2\alpha}} \quad (1)$$

其中, $\mu_{i,\theta}$ 为测点 i 处的体型系数, Z_i 为测点 i 所处的高度, α 为地貌粗糙度指数, A、B、C 和 D 类地貌 α 取值分别为 0.12、0.15、0.22 和 0.30。

$$C_{pi,\theta} = \frac{P_{i,\theta} - \bar{P}_s}{P_{t,h} - \bar{P}_s} = \frac{P_{i,\theta} - \bar{P}_s}{0.5\rho\bar{V}_h^2} \quad (2)$$

其中, $C_{pi,\theta}$ 为 i 点在 θ 风向角下的风压系数, $P_{i,\theta}$ 为

模型材料: 采用 ABS 工程塑料板, 保证模型刚度足够, 试验中不发生变形;

缩尺比例: 综合考虑风洞试验段尺寸、模型阻塞率、测点布置空间, 确定模型几何缩尺比为 1 : 70, 可较好地反应气枕凸起对建筑表面凹凸性的影响, 满足风洞试验要求;

测点布置: 根据结构体型特征, 在悬挑边缘、屋脊、转角、曲面凸起/凹陷处等风敏感区域进行加密布置, 整体采用分区连续编号, 上下表面同步布置测点, 实现净风压同步测量。模型测点上下表面双层布置, 测压点总数达到 1178 个, 可完整捕捉结构表面风压分布细节。

1.3 风场模拟

按照我国《建筑结构荷载规范》与《建筑工程风洞试验方法标准》(JGJ/T 338-2014), 本次试验模拟 B 类地貌大气边界层风场。通过尖劈、粗糙元等装置模拟风速剖面与湍流特性, 风场校验结果显示: 风速剖面指数 $\alpha=0.15$, 地面湍流度与规范目标值吻合良好, 满足试验精度要求。平均风速剖面和紊流度剖面如图 2 所示

测点 i 在 θ 风向角下总压, $\bar{P}_s$ 为参考点静压平均值, $\bar{P}_{t,h}$ 为参考高度 h 处总压, ρ 为空气密度, $\bar{V}_h$ 为参考高度 h 处的平均风速。参考点高度取 $h=10\text{m}$ 。对于双面布置测点的位置, 给出的测点风压系数、体型系数及相应的风压均为外内表面相减后的净风压系数、净压体型系数以及净风压。

2 风洞试验结果与分析

2.1 风压分布规律

通过对目标建筑的全风向角风洞试验数据进行分析, 得到结构表面风压分布规律如下:

所有异形大跨屋盖结构上表面绝大部分区域为负压(风吸力),仅在波浪凹陷处、折板内凹区域与边缘位置出现小范围正压,正压系数最大值区间为0.3~0.8,远小于负压绝对值-0.6~-1.3;

结构下表面迎风区域以正压为主,背风区域以负压为主,上下表面叠加后,悬挑前缘、屋脊、转角位置净风吸力显著增大,为风荷载最敏感区域;

气流在结构悬挑边缘、屋脊线、转角处发生剧烈分离,形成高负压区,风压梯度大,是围护结构最易被破坏的部位;

结构曲面曲率、波浪造型、折角变化对局部风压分布影响显著,凸起部位风吸力明显大于凹陷部位。

2.2 典型风向角下风荷载分布特性

选取0°、90°、180°、270°及最不利斜向风向角进行重点分析:

风向平行于结构长轴/屋脊:气流沿屋面平顺流动,分离效应较弱,结构表面风压分布相对均匀,负压绝对值较小,体型系数变化平缓;

风向垂直于结构长轴/屋脊:气流在迎风前缘发生强烈分离,悬挑端部与屋脊处负压急剧增大,风吸力达到全风向角最大值,为最不利风向;

斜向风向角:结构迎风转角处产生锥形涡,形成局部强吸力区,负压极值略低于垂直风向,但影响范围更大,对转角部位围护结构极为不利。

2.3 风荷载体型系数分布规律

体型系数是结构抗风设计的核心参数,本次风洞试验通过净风压系数换算得到各区域体型系数,主要结论如下:

异形大跨屋盖体型系数以负值为主,最大值(绝对值)出现在悬挑边缘、气流分离区、屋脊部位;

结构内部区域体型系数相对稳定,绝对值多在-0.4~-0.8之间,变化幅度小;

悬挑长度越大,体型系数绝对值越大,长悬挑部位须采用试验测得的体型系数,与规范数据相差较大。

3 结论

本文采用风洞试验的方法,对异曲面空间气枕膜结构的风荷载特性进行了试验研究,通过0°~360°全风向角、多参数、多工况试验,得到以下主要结论:

(1)异形大跨空间结构表面风压以负压(风吸力)为主,仅局部内凹区域出现小范围正压,正压值远低于负压绝对值;

(2)结构悬挑边缘、屋脊、转角、气流分离区为风荷载最敏感区域,该区域体型系数与风吸力极值远大于规范取值,是结构抗风设计的控制部位;

(3)风向角对风荷载分布影响显著,垂直于结构长轴/屋脊的风向为最不利风向,该风向下悬挑端部与屋脊风吸力达到最大;

(4)结构曲率、悬挑长度、平面形状是影响风荷载分布的关键参数:曲率越大、悬挑越长,端部风吸力越大;异形尖角结构转角处易产生局部强负压;

[参考文献]

- [1]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.
- [2]史涛,岳清瑞,许镇,等.基于风险源-承灾体-减灾力理论的建筑屋面附属设施风致破坏研究综述[J].工程力学,2026,4(27):1-23.
- [3]安苗,刘庆宽,马文勇,刘小兵.椭圆形体育馆悬挑罩棚风荷载分布规律的试验研究[J].工程力学,2019,36(11):199-202.
- [4]叶高宏,赵仕兴,金波,阳升,余志祥,赵雷.蘑菇形悬挑屋盖风洞试验研究[J].建筑钢结构进展,2023,25(6):68-74.
- [5]崔世鹏,王庆,刘庆岭,等.大跨度悬挑曲面屋盖结构风洞试验研究[J].特种结构,2023,40(2):94-99.

作者简介:李晓男(1986—),毕业于石家庄铁道学院四方学院土木工程专业,当前就职于石家庄建拓房地产开发有限公司,副总经理,高级工程师。