

双曲型塔柱大跨凸面悬挑结构风荷载特性研究

陆煜¹, 赵善博¹, 马文勇^{1,2}, 刘小兵^{1,2}, 刘庆宽^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 风工程研究中心, 河北 石家庄 050043;

2. 河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要:通过某双曲型塔柱大跨凸面悬挑结构刚性模型测压风洞试验,得到了结构在不同风向角下的风压系数,研究了该结构上部悬挑结构和下部塔柱形结构的体型系数分布规律。结果表明:上部结构的正压区主要集中在结构外沿以及空心处内沿部分,其余部分基本为负压区。下部结构内压为负,迎风侧外压体型系数较大,背风侧外压体型系数基本上为一个稳定的负值。

关键词:双曲型塔柱;大跨凸面悬挑屋盖;风洞试验;体型系数

中图分类号:TU312.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)04-0006-05

0 引言

随着经济的发展和科技的进步,各种造型独特、结构新颖的大跨屋盖空间结构相继建成。这类结构大都具有跨度大、质量轻、柔性大、阻尼小等特性,属于典型的风敏感结构。学者们已对部分大跨屋盖悬挑结构、圆拱形悬挑结构及复杂外形结构等进行了研究^[1-7],但针对双曲型塔柱大跨凸面悬挑结构的研究仍十分有限。

结合某公园景观大型结构海之泉项目,对双曲型塔柱大跨凸面悬挑结构的风荷载特性进行了研究。该结构分为 A、B 两座钢结构,其中海之泉 A 高度约 32.0 m,平面投影轮廓直径约 79.0 m;海之泉 B 高度约 42.0 m,平面投影轮廓直径约 85.6 m,如图 1 所示。相对传统景观建筑而言,该结构尺寸较大、形状特殊,悬挑部分为具有凸起的弧面,下部结构为中空塔柱形结构,结构的风荷载特性无法依据以往经验及现有规范进行准确分析。结合风洞试验结果,研究了该结构的风荷载分布规律,为类似结构的抗风设计提供了一定参考。

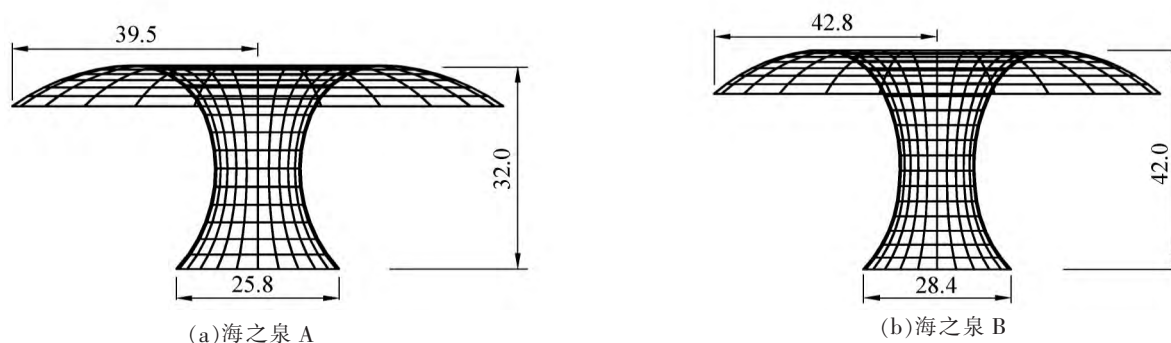


图 1 海之泉结构示意图(单位:m)

收稿日期:2014-07-06 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2015.04.02

作者简介:陆煜(1988-),男,硕士研究生,主要从事桥梁及结构的风致振动与控制研究。E-mail:luyuwind@163.com

基金项目:国家自然科学基金(51378323;51308359;51108280);河北省杰出青年科学基金(E2014210138);土木工程防灾国家重点实验室开放基金(SLDRCE12-MB-05);河北省高校百名创新优秀人才支持计划(冀教科[2013]19号)

陆煜,赵善博,马文勇,等.双曲型塔柱大跨凸面悬挑结构风荷载特性研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(4):6-10.

1 试验概况

1.1 试验模型

该风洞试验在石家庄铁道大学风工程研究中心风洞实验室低速试验段内进行。该风洞是一座串联双试验段回/直流大型多功能边界层风洞,低速试验段宽 4.4 m,高 3.0 m,长 24.0 m,最大风速大于 30.0 m/s,风速连续可调,本次试验风速采用 16 m/s。

试验模型(如图 2)主要采用有机玻璃和 ABS 板两种材料制成,模型缩尺比为 1:125,模型表面共布置 840 个测点。其中,模型 A 共布置测点 192 对,内外表面各 192 个;模型 B 共布置测点 228 对,内外表面各 228 个。采用内外点同步测压的方式,采样频率为 312.5 Hz。为研究方便,以悬挑结构外缘所在水平面为界,将结构分为上、下两部分,以海之泉 A 为例,剖面示意图如图 3。测点布置如图 4 所示。

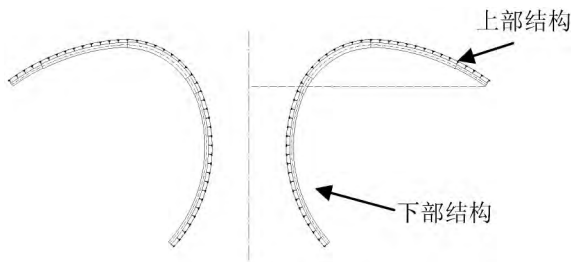


图 2 风洞试验模型示意图

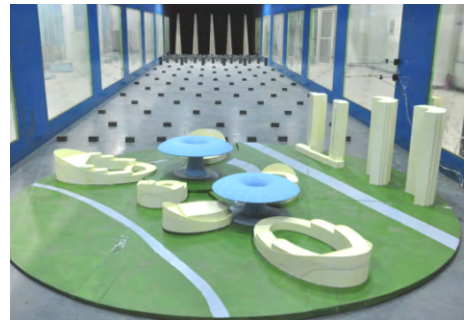
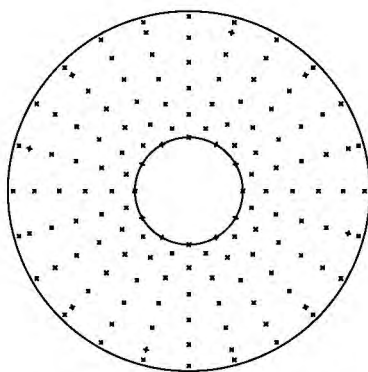
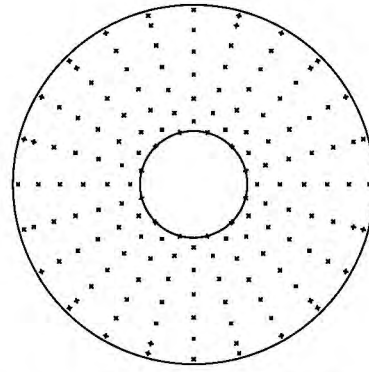


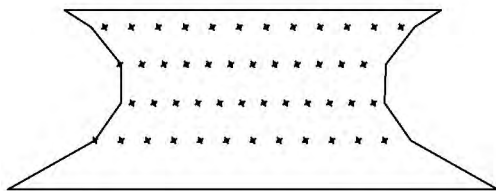
图 3 海之泉 A 模型剖面示意图



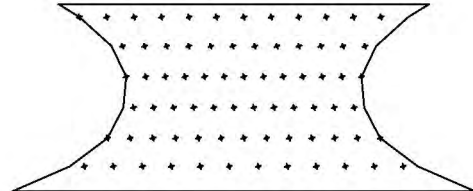
(a)海之泉 A 悬挑顶部测点布置图



(b)海之泉 B 悬挑顶部测点布置图



(c)海之泉 A 下部测点布置展开图



(d)海之泉 B 下部测点布置展开图

图 4 海之泉模型测点布置图

1.2 试验工况和风场模拟

定义风由北向南为 0° 风向角,风向角按逆时针方向增加,间隔 10° 为一个风向角,共 36 个风向角,图 5 为模型方位与试验风向角示意图。

海之泉项目所在地地貌类型为 B 类,试验时采用尖劈和粗糙元等用被动模拟的方法进行模拟。

2 数据处理方法

采用无量纲风压系数来描述结构表面的风压

$$C_{pi} = \frac{P_i - \bar{P}_s}{\bar{P}_{t,h} - \bar{P}_s} = \frac{P_i - \bar{P}_s}{0.5\rho\bar{V}_h^2} \quad (1)$$

式中, C_{pi} 为 i 点的风压系数; P_i 为测点 i 的压力; $\bar{P}_s$ 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。为方便使用,参考点高度取 $h=10$ m,下文分别采用 $\bar{C}_{pi}$ 和 $\hat{C}_{pi}$ 表示 C_{pi} 的均值和均方根值,分别称为平均风压系数和脉动风压系数。

当结构上下表面或者内外表面同步测压时,定义测点净压系数

$$C_{pni} = C_{pei} - C_{pii} \quad (2)$$

式中, C_{pni} 为 i 点位置的净压系数; C_{pei} 和 C_{pii} 为 i 点位置的外部测点和内部测点的风压系数。 $\bar{C}_{pni}$ 和 $\hat{C}_{pni}$ 表示 C_{pni} 的均值和均方根值,称为平均净压系数和脉动净压系数。

体型系数可由测点的平均风压系数(或者平均净压系数)计算得到

$$\mu_i = \frac{\bar{C}_{pi}}{(Z_i/h)^{2\alpha}} \quad \mu_{ni} = \frac{\bar{C}_{pni}}{(Z_i/h)^{2\alpha}} \quad (3)$$

式中, μ_i (μ_{ni}) 称为测点 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, B 类地貌 α 取 0.16^[5]。同理可得外压体型系数和内压体型系数。

3 试验结果分析

3.1 上部悬挑结构的风荷载分离区

两结构具有相似的外形,以海之泉 A 为例进行研究。为了有效地研究具有凸面外形的大跨悬挑结构的风荷载特性,在模型上表面选取 0° 风向角下与来流平行的轴线处的 12 个测点(沿来流方向分别记为 1~12 号)作为特征观察点,按所处位置将其分为 2 组,图 5(a)和图 5(b)分别给出了所选特征点的体型系数。

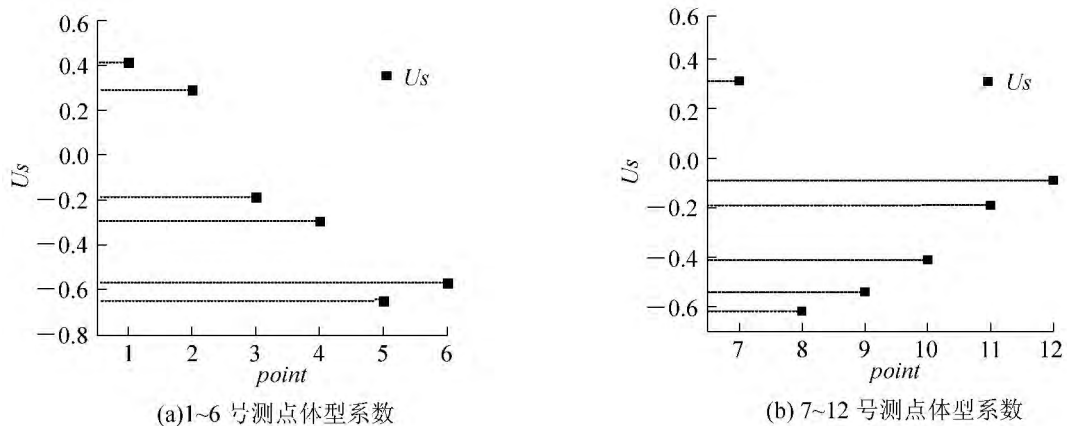


图 6 特征点体型系数图

从图 6(a)中可以看出,凸面悬挑结构迎风风向测点 1、2 号的体型系数为正值,而 3~6 号测点的体型系数为负,可以判断结构该方向的气流分离点位于 2、3 号测点之间,而结构关于中心对称,因此该凸面悬挑

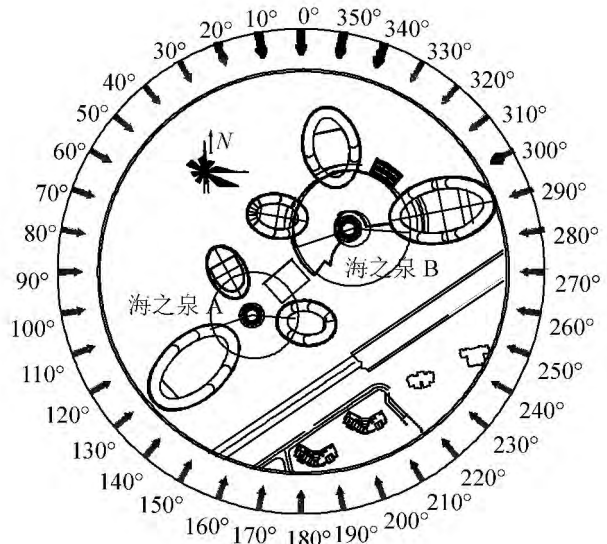


图 5 模型方位与试验风向角

结构的外部分离区域为如图 7(a)所示的阴影区域,界限在 2、3 号测点所夹圆环区域内。从图 6(b)中可以看出,凸面悬挑结构迎风向测点 7 号的体型系数为正值,而 8~12 号测点的体型系数为负,可以判断结构该方向的气流分离点位于 7、8 号测点之间,因此凸面悬挑结构的内部分离区域为如图 7(b)所示的阴影区域,界限在 7、8 号测点所夹圆环区域内。

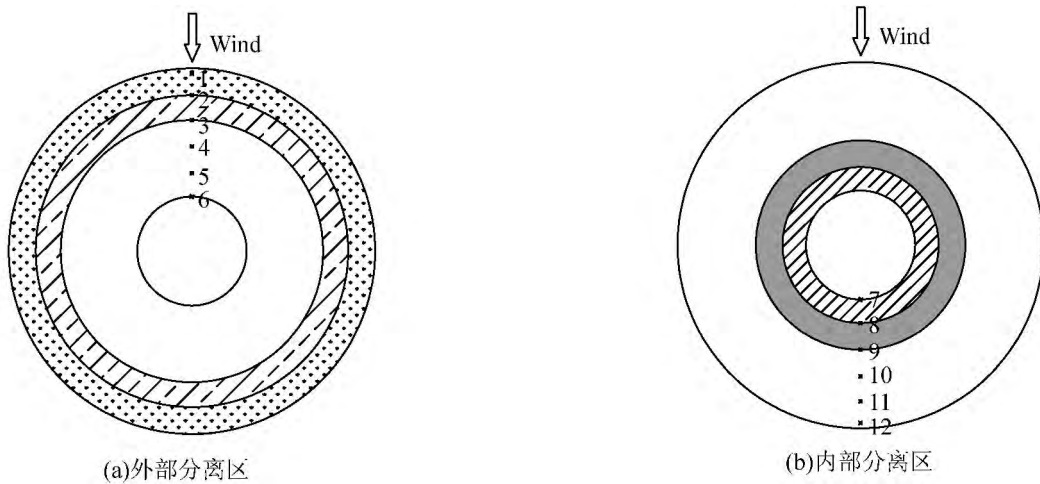


图 7 海之泉 A 悬挑结构分离区范围图

以上分析表明,上部大跨悬挑结构的正压区主要集中在结构外沿以及空心处内沿部分,其余部分基本为负压区。

3.2 下部塔柱结构体型系数分布

海之泉的下部结构为中空塔柱形结构,属于典型的空间薄壁结构,其自身对风的作用十分敏感。结合上部大跨凸面悬挑结构的影响,结构整体受到风荷载的影响会更加明显,因此对海之泉下部结构的风荷载特性进行研究是十分有必要的。

结构的外压体型系数和内压体型系数可分别由布置在结构外壁和内壁上的测点得到的风压系数经公式(3)求得。图 8 为 0° 风向角下海之泉 A 下部结构不同高度处周向测点的体型系数分布图。图中横轴刻度表示周向测点的方位角,定义正迎风向测点角度为 0° 。图中 C1~C4 依次为由高向低交错排列的海之泉 A 下部结构周向测点,每一周有 12 个测点组成,参见图 4(c)。

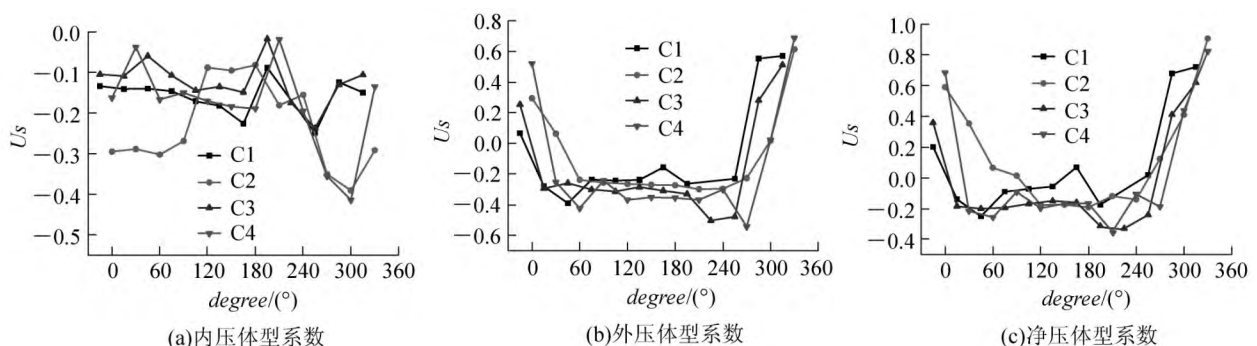


图 8 下部结构不同高度处周向测点体型系数分布

由图 8 可知:(1)结构内压体型系数均为负值,即表现为吸力;(2)正迎风面测点(0° 方位角)外压体型系数较大,两侧各约 30° 范围内外压体型系数为正, 60° 附近及背风侧测点体型系数为负,且趋于稳定;(3)结构迎风侧所承受的风荷载作用大于具有相似外形的封闭结构,而背风侧由于结构内侧负压的存在使得其所承受的风荷载绝对值小于具有相似外形的封闭结构。

4 结论

通过海之泉刚性模型测压试验结果,对具有凸面外形的大跨悬挑结构及中空塔柱形结构的体型系数进行了分析,研究了此类风敏感结构的风压分布及体型系数的变化规律。主要结论如下:

(1)上部具有凸面外形的大跨悬挑结构的正压区主要集中在结构外沿以及空心处内沿部分,其余部分基本为负压区。沿来流方向,气流在上游结构表面的分离点的水平投影位于结构水平投影的前 $1/6 \sim 1/3$ 所在范围内,气流在下游结构表面的分离点的水平投影位于结构水平投影的前 $1/6$ 范围内。

(2)下部塔柱形中空结构不同高度周向测点体型系数分布规律较为相似,结构内压体型系数始终为负值,结构正迎风面外压体型系数为正且数值较大,两侧各约 30° 范围内外压体型系数为正,两侧 60° 附近及背风侧体型系数为负且变化不大。

参 考 文 献

- [1]沈国辉,孙炳南,楼文娟,等.大跨屋盖悬挑结构的风荷载分析[J].空气动力学学报,2003,22(1):41-46.
- [2]黄明开,倪振华,谢壮宁,等.大跨圆拱屋盖结构的风致响应分析[J].振动工程学报,2004,17(3):275-279.
- [3]沈国辉,孙炳南,楼文娟,等.复杂体型大跨屋盖结构的风荷载分布[J].土木工程学报,2005,38(10):39-43.
- [4]汪丛军,黄本才,徐晓明,等.环状悬挑屋盖平均风压与风环境数值模拟[J].同济大学学报:自然科学版,2006,34(6):711-715.
- [5]田玉基,杨庆山,范重,等.国家体育场大跨度屋盖结构风振系数研究[J].建筑结构学报,2007,28(2):26-31.
- [6]鲜荣,廖海黎,李明水.大跨悬挑屋盖风压分布风洞试验分析[J].空气动力学学报,2009,27(5):572-577.
- [7]陈亚楠,周岱,孙颖昊.环状大悬臂挑篷风载特性与风场绕流分析[J].建筑结构学报,2012,33(5):53-61.
- [8]中国建筑科学研究院.GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2006.

Study on Wind Loads of Hyperbolic Columnar Structure with Large-span Convex Cantilever Roof

Lu Yu¹, Zhao Shanbo¹, Ma Wenyong^{1,2}, Liu Xiaobing^{1,2}, Liu Qingkuan^{1,2}

(1. Wind Engineering Research Center, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of Structural Health Monitoring and Control in Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Based on a hyperbolic columnar structure with large-span convex cantilever roof rigid pressure-testing model wind tunnel test, wind pressure coefficients under different wind directions are obtained. Shape coefficients distribution of the cantilever structure and the columnar structure are studied. Results show that the positive pressures of upper structure are mainly focused on the outer-edge and inner-edge of the roof, the pressures on other areas are negative. The internal pressures of lower structure are negative, the external shape coefficients on windward are relatively high, the external shape coefficients on leeward are negative with little change.

Key words: hyperbolic columnar; large-span convex cantilever roof; wind tunnel test; shape coefficients