

深圳大运会主体育场罩棚风压分布的数值模拟

孙晓颖, 朱晓洁, 武岳, 沈世钊

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, sunxy_hit@yahoo.com.cn)

摘要: 为了求得体育场罩棚的风载体型系数, 基于 Reynolds 时均 $N-S$ 方程和 RSM 模型对深圳大运会主体育场罩棚风压分布特性进行了数值模拟. 采用有限体积法对控制微分方程进行离散, 并采用 SIMPLE 压力校正算法来实现非线性方程的迭代求解. 将数值计算结果与风洞试验结果进行了对比, 两者吻合较好, 在此基础上, 分析了风向角和风攻角对风压分布的影响, 探讨了罩棚周围流场的绕流特性, 并根据罩棚的结构形式及风压分布特点, 给出了最不利风向下罩棚表面的区域平均风压系数以及罩棚设计风荷载的计算方法. 结果表明: 风向角对风荷载的影响较大, 不同风向角下, 来流的分离和漩涡脱落作用均有较大的不同. 风攻角对罩棚表面风压分布的影响不大, 对罩棚局部峰值的影响在 15% 以内, 整体影响在 5% 以内.

关键词: 数值模拟; 计算流体力学; 风压分布; 区域平均风压系数; 深圳大运会体育场

中图分类号: TU312.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)08-1183-06

Numerical simulation of wind pressure distribution on the stadium for Shenzhen universiade

SUN Xiao-ying, ZHU Xiao-jie, WU Yue, SHEN Shi-zhao

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, sunxy_hit@yahoo.com.cn)

Abstract: In order to get the shape factor of wind load on the stadium, numerical simulation of wind pressure distribution was performed on the stadium for Shenzhen universiade based on the Reynolds-averaged $N-S$ equations and Reynolds stress equation model (RSM). The finite volume method was employed to discretize the governing differential equations and the SIMPLE pressure correction iteration algorithm was adopted to solve the nonlinear equations. Numerical results are found to have good agreement with experimental results. On this basis, the characteristics of wind pressure distribution and the flow field characteristics were discussed by considering wind direction and wind attack angles. At last, according to the roof shape and the regularity of wind pressure distribution, mean wind pressure coefficients of regions were provided. The results show that wind direction has great influence on the separation and vortex shedding of the wind flow. The angle of attack has little influence on the wind pressure distribution on the roof, its influence on the local peak value is less than 15% and that on the whole influence is less than 5%.

Key words: numerical simulation; computational fluid dynamics (CFD); wind pressure distribution; mean wind pressure coefficients of regions; the stadium for Shenzhen universiade

深圳大运会体育中心包括主体育场、体育馆、游泳馆等, 建成后将作为 2011 年世界大学生

运动会的主要场馆. 主体育场平面为椭圆形, 长轴约 275 m, 短轴约 253 m. 容纳观众 6 万人, 设 3 层高低错落的看台, 看台结构形式为钢筋混凝土框架. 屋面为马鞍形的钢结构单层折板壳, 由 20 个形状相同, 但大小不一的单元拼合而成(图 1). 屋面标高最高点为 53 m, 最低点为 36 m, 高低差约 17 m.

收稿日期: 2008-09-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90815021, 50908068);
中国博士后科学基金资助项目(200902407).

作者简介: 孙晓颖(1975—), 女, 博士, 讲师;

武岳(1972—), 男, 教授, 博士生导师;

沈世钊(1933—), 男, 教授, 中国工程院院士.

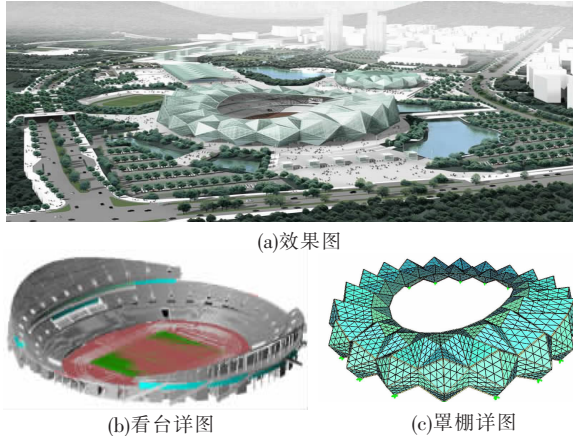


图1 深圳大运会体育场示意图

主体育场罩棚结构形式复杂,属风敏感结构,风荷载是控制结构设计的主要荷载之一,其风荷载取值在现行《建筑结构荷载规范》(GB50009-2001)中找不到合适的体型系数.因此本文利用CFD技术对罩棚表面的风压分布进行了数值模拟,分析了风向角及风攻角对风压分布规律的影响,探讨了罩棚周围流场的绕流特性,为工程结构设计的风荷载取值提供必要的指导.

1 数值模拟方法

基于 Reynolds 时均 $N-S$ 方程,采用雷诺应力方程模型(RSM模型)对深圳大运会主体育场罩棚表面风压分布进行数值模拟,利用有限体积法和 SIMPLE 压力校正算法来实现非线性离散化方程的解耦和迭代求解^[1-3].

考虑壁面存在对流场的影响,选用非平衡壁面函数来修正 RSM 模型,以模拟壁面附近复杂的流动现象.为了保证计算过程的数值稳定性,在运用有限体积法时,采用一阶迎风格式离散对流项,对扩散项采用具有二阶精度的中心差分格式^[4].

1.1 数值模拟方案

主要对 0° 、 90° 及 75° (风洞试验中提到的最不利风向角) 3 个风向下体育场结构的风压分布进行了 CFD 数值模拟,并且为了充分考虑风攻角对罩棚表面风压分布的影响,在各风向角下分别考虑了 0° 、 10° 及 -10° 风攻角的影响.风向角及风攻角的定义分别如图 2 和图 3 所示.

1.2 计算模型

图 4 为体育场结构的整体计算模型,包括体育场罩棚、看台及外部平台.计算域尺寸为 $18L(x) \times 8L(y) \times 10L(z)$ (分别对应 x 、 y 、 z 轴),其中 $L(x)$ 、 $L(y)$ 、 $L(z)$ 为计算模型在各风向下沿 x 、 y 、 z 方向的计算长度,模型置于距计算域入口 $6L(x)$ 处.

在生成网格过程中,由于模型的形体比较复杂,使得网格划分变得十分困难.为此,在不影响数值模拟精度的前提下,对建筑形体细部进行了简化处理^[5],并在数值模拟中采用非结构化网格,运用 Gambit 中的 size function 功能来实现网格由密到疏的过渡,从而得到了质量较好的体网格(图 5).

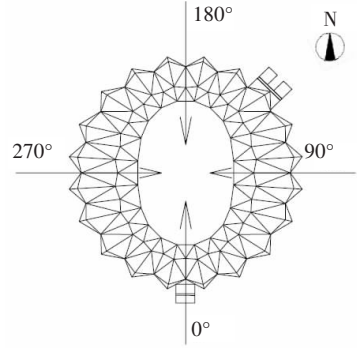


图2 风向角示意图

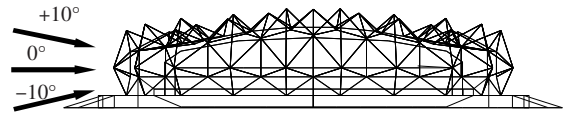


图3 风攻角示意图

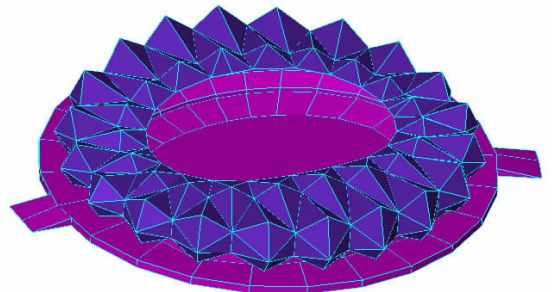


图4 体育场模型示意图

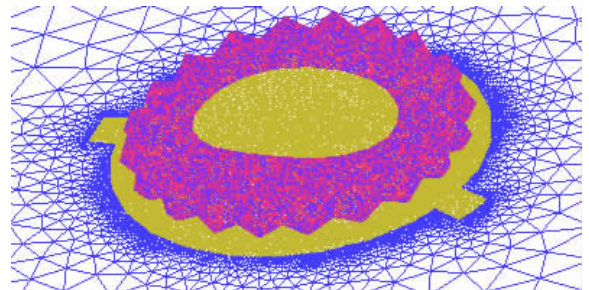


图5 计算网格局部放大图

1.3 边界条件的设置

入口边界条件:设来流为剪切流,并模拟 B 类地貌,沿 x 方向的风速剖面为: $V(z) = V_b(z/z_b)^\alpha$,其中 V_b 为标准参考高度处的平均风速(规范取 $z_b = 10\text{ m}$), α 为 0.16, z 为高度方向,自建筑物底部算起; y 、 z 方向速度为零.

来流湍流特性通过直接给定湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 值的方式来定义

$$k = \frac{3}{2}(V(z) \cdot I)^2, \varepsilon = \frac{1}{l} \cdot 0.09^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}}$$

式中: l 是湍流特征尺度; I 为湍流强度. 我国现行荷载规范没有给出 I 的明确定义, 对 B 类地貌的模拟参考日本规范中第 II 类地貌取值^[6]

$$I = \begin{cases} 0.23, & z \leq z_b; \\ 0.1(z/z_G)^{-\alpha-0.05}, & z_b \leq z \leq z_G. \end{cases}$$

式中: $z_b = 5 \text{ m}$, $z_G = 350 \text{ m}$.

出口边界条件: 流场任意物理量 ψ 沿出口法向梯度为零, 即 $\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0$.

流体域顶部和两侧: 自由滑移的壁面条件.
建筑物表面和地面: 无滑移的壁面条件.

2 计算结果分析

2.1 风向对罩棚表面风压分布的影响

对 0° 风向下罩棚表面风压分布的风洞试验数据与数值模拟结果进行了对比(见图6). 图7为 0° 风向下(无风攻角)罩棚表面的风压分布. 给出了图8所示1-10测点的风压分布系数. 可以

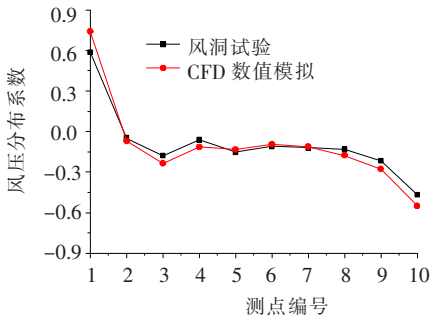


图6 风洞试验与数值模拟结果的对比(0° 风向)

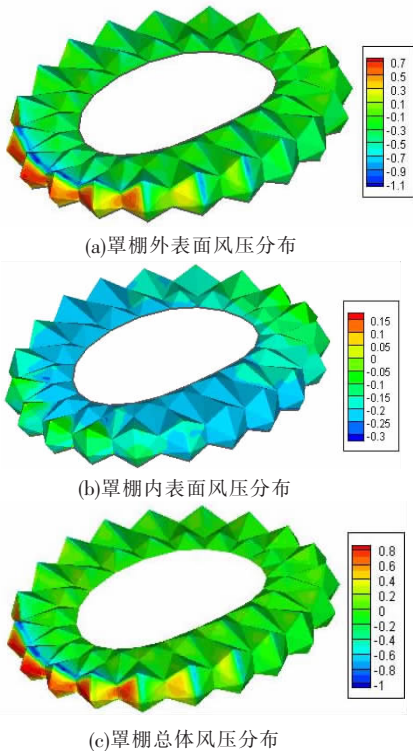


图7 0° 风向下(无风攻角)罩棚表面风压分布

看出两者的计算结果的吻合较好, 说明数值模拟方法具有较好的可信性.

结果表明, 各风向下体育场罩棚表面风压分布规律基本相同, 仅数值上略有不同. 从风压分布规律上看, 与风洞试验结果基本吻合.

2.1.1 罩棚外表面的风压分布规律

罩棚外立面在迎风面以正压为主, 背风面和侧风面以负压为主. 随着外立面从迎风侧向背风侧过渡, 风荷载从正压逐步向负压过渡, 并且分布更趋向于均匀. 由于屋面呈多棱锥状, 使得棱锥边缘气流分离大, 外立面出现较大的负压.

罩棚顶部上表面以负压为主, 在迎风前缘的屋脊处气流分离大, 出现较大负压, 而远离迎风一侧的罩棚顶部上表面, 整体上也以风吸力为主, 但是数值较小, 并且局部会出现正压.

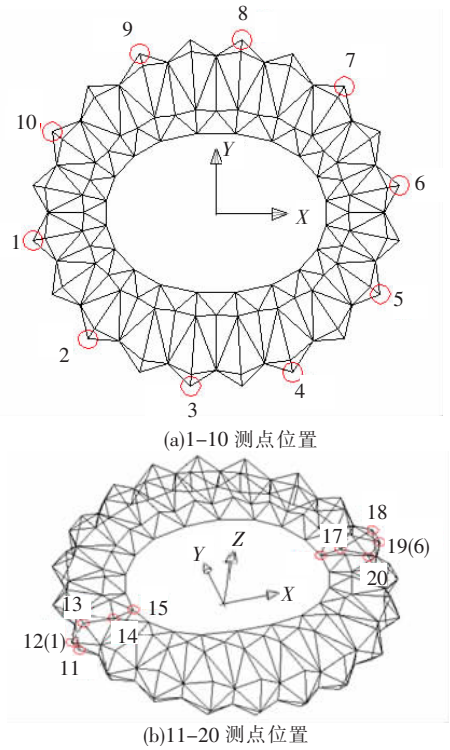


图8 罩棚表面测点布置

2.1.2 罩棚内表面的风压分布规律

罩棚内表面整体上以负压为主, 但是由于罩棚的顶部是开敞的, 并且在下部与看台之间有局部开敞的空间, 所以使得内表面在迎风侧与背风侧局部出现正压.

2.1.3 罩棚总体风压分布规律

罩棚立面在迎风侧以正压为主, 背风侧和侧面以负压为主. 罩棚顶面以负压为主, 其迎风前缘负压最大, 而远离迎风一侧的顶面, 虽然也以风吸力为主, 但数值较小, 并且局部会出现正压.

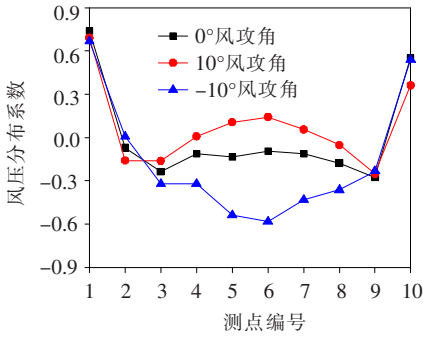
2.2 风攻角对罩棚表面风压分布的影响

对不同风攻角下罩棚表面的风压分布进行了

CFD 数值模拟,在各风向角下均考虑了 $\pm 10^\circ$ 风攻角的影响.表 1、图 9 和图 10 分别给出了不同风攻角下罩棚表面风压峰值信息,及各测点的风压系数曲线(测点布置如图 8 所示).

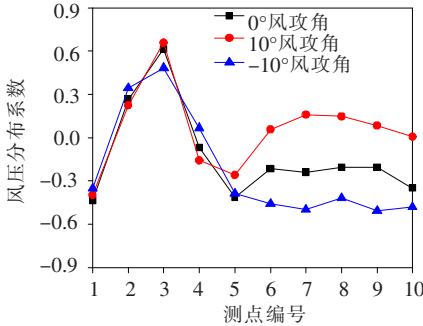
表 1 不同风攻角下罩棚表面的峰值风压系数

风攻角	0°风向		75°风向		90°风向	
	最大正压	最大负压	最大正压	最大负压	最大正压	最大负压
0°	0.87	-1.10	0.77	-1.49	0.81	-1.58
10°	0.84	-1.32	0.90	-1.44	0.83	-1.65
-10°	0.80	-0.79	0.71	-0.98	0.66	-0.97



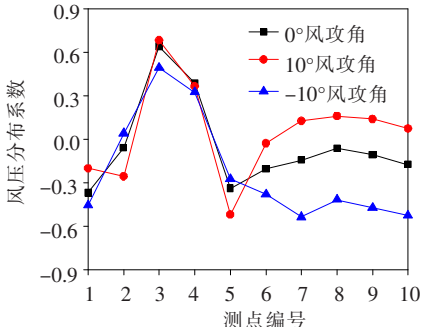
(1-3 和 9-10 测点位于迎风面,4-8 测点位于背风面)

(a) 0°风向时各风攻角下测点 1-10 的风压系数



(1-5 测点位于迎风面,6-10 测点位于背风面)

(b) 75°风向时各风攻角下测点 1-10 的风压系数



(1-5 测点位于迎风面,6-10 测点位于背风面)

(c) 90°风向时各风攻角下测点 1-10 的风压系数

图 9 不同风攻角下测点 1-10 的风压系数

2.2.1 风攻角对风压峰值的影响

和 0° 风攻角时相比,0° 风向下,有攻角时罩棚表面的最大正压有所降低,最大负压在风攻角为 $+10^\circ$ 时增大, -10° 时降低;75° 风向下,有攻角时罩棚表面最大负压有所降低,最大正压在风攻

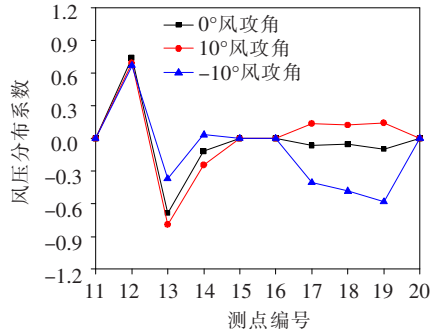
角为 $+10^\circ$ 时增大, -10° 时降低;90° 风向下,有攻角时罩棚表面最大正压和最大负压均在风攻角为 $+10^\circ$ 时增大, -10° 时降低(如表 1 所示).

另外,通过对 3 种风向下有无风攻角时罩棚表面的风压分布进行比较,可以看出风攻角对罩棚表面风压分布的影响幅度不大,局部峰值增幅在 15% 以内(如表 1 所示),整体影响在 5% 以内.

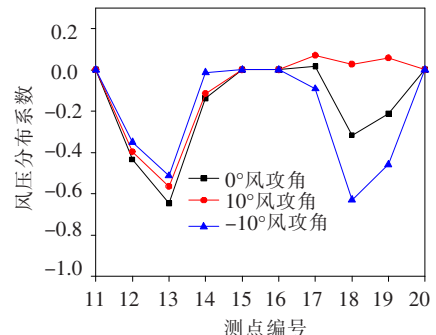
2.2.2 风攻角对罩棚表面测点风压分布的影响

从图 9 中可以看出,不同风向下,风攻角对迎风面测点的风压系数影响不大,对背风面测点的影响却很大.和 0° 风攻角时相比,10° 风攻角时背风面测点的风压系数呈增大趋势,而 -10° 风攻角时呈下降趋势.

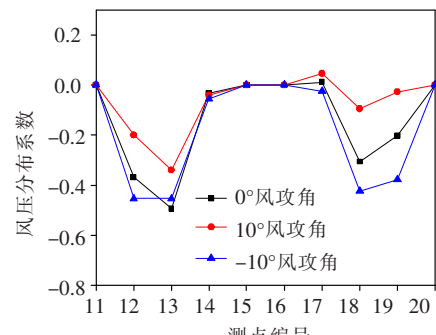
从图 10 中可以看出,各风向下不同风攻角时测点 12-13 和 18-19 的风压系数变化较大,这些测点位于气流明显分离的区域,风压变化敏感,



(a) 0°风向时各风攻角下测点 11-20 的风压系数



(b) 75°风向时各风攻角下测点 11-20 的风压系数



(c) 90°风向时各风攻角下测点 11-20 的风压系数

(11-15 测点位于迎风面,16-20 测点位于背风面)

图 10 不同风攻角下测点 11-20 的风压系数

受周围流场的影响较大.和迎风面相比,背风面测点风压系数的变化幅度大.

2.3 体育场罩棚周围流场分布特性

以 0° 风向向下风攻角为 0° 的情况为例,对罩棚的绕流特性进行了分析.图11给出了罩棚沿长轴方向剖面的流场分布图.

由图11可以看出,气流在迎风面室外台阶处向上爬升,流速减慢.稍后气流在罩棚和看台之间的非封闭洞口处分成两股,一股进入体育场内部,另一股沿着罩棚的迎风立面继续爬升,并且在罩棚顶部迎风前沿明显分离(见图11(b)),并与前方来流汇合,风速增大,使罩棚顶部上表面在前缘部分出现较大的风吸力,由于再附点沿流向方向十分靠后,所以整个罩棚顶部迎风上表面以负压为主,另外气流在分离点后方形成小的负压漩涡.而罩棚迎风侧内表面由于看台的存在,一定程度上阻碍了来流的旋涡脱落,会使局部区域出现数值不是很大的正压.此外,气流在体育场中心形成大漩涡.受上游来流的影响,气流在罩棚背风侧顶部前沿分离(见图11(c)),形成负压.由于处于上游来流的尾流区,其风压绝对值相对较小.罩棚内表面受体育场中心气旋影响,表现为以正压为主,但数值很小;背风侧外立面下部拐角处产生小的旋涡,使背风侧外立面以正压为主,数值也很小;另外,气流在体育场罩棚尾流区形成大回流漩涡.

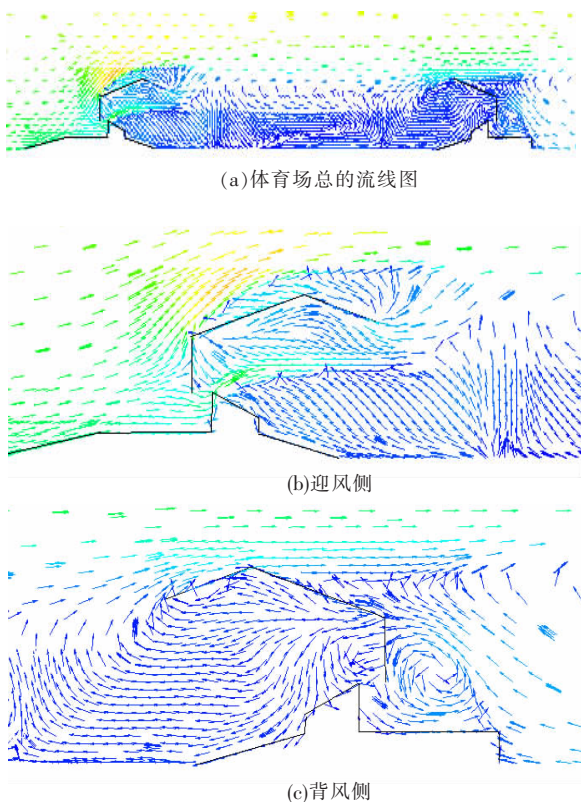


图11 罩棚长轴方向剖面流场示意(0° 风向无风攻角)

图12给出了 $z = 20\text{ m}$ 高度处罩棚周围的流场情况,可以看出,在罩棚垂直迎风面上,气流受到阻碍,一部分由罩棚和看台之间的非封闭洞口进入体育场内部,另一部分向罩棚两侧分流,并在罩棚两侧拐角处发生分离,分离流与前方来流汇合,达到很高的速度,并且在分离点后方形成旋涡;气流在体育场中心形成大的漩涡,并且在罩棚和看台之间的空间形成很多小漩涡;由于建筑物的纵向尺寸和横向尺寸均较建筑物高度大得多(纵向长度约为 275 m ,横向宽度约为 253 m ,高度为 53 m),所以尾流比较宽而短,并且尾流中有多个旋涡,大小不一,相互影响,流动状态复杂.

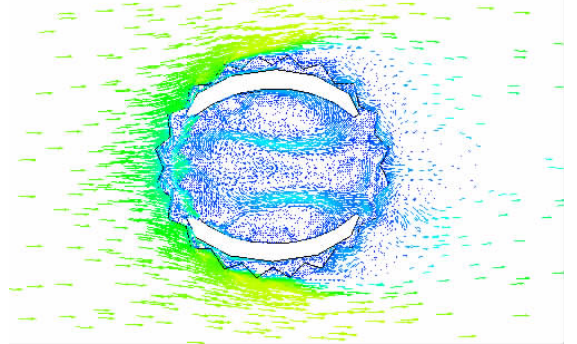


图12 $z = 20\text{ m}$ 处罩棚周围流场示意(0° 风向无风攻角)

2.4 体育场罩棚分区风压系数

体育场罩棚由20个形状相似并且尺寸相近的单元构成(如图13所示),为了工程设计应用的方便,根据风压分布的规律以及体育场罩棚的结构形式,本文给出了罩棚构成单元在最不利风向下的区域平均风压系数^[7-8].图14给出了体育场罩棚单元立面的区域平均风压系数,图15给出了体育场罩棚单元顶面的区域平均风压系数.

2.5 体育场罩棚的设计风荷载

根据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2001),并考虑到体育场的地理位置(见图16),其基本风压 w_0 取为 0.9 kN/m^2 .由于体育场结构所处环境为B类地貌,因而可由基本分压直接换算得到参考高度($H = 53\text{ m}$)处的风压 w'_0 为

$$w'_0 = w_0(53/10)^{2 \times 0.16} = 1.53\text{ kN/m}^2.$$

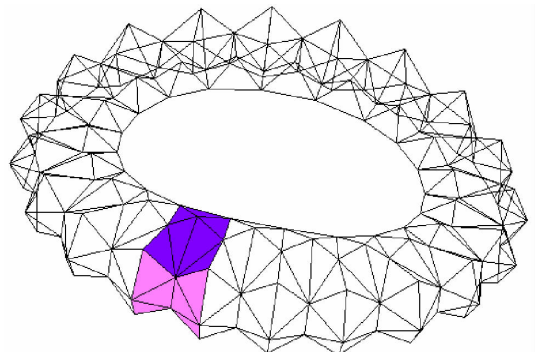


图13 体育场构成单元示意图

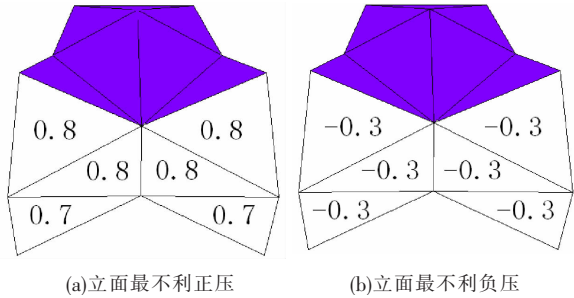


图 14 罩棚立面的区域平均风压系数

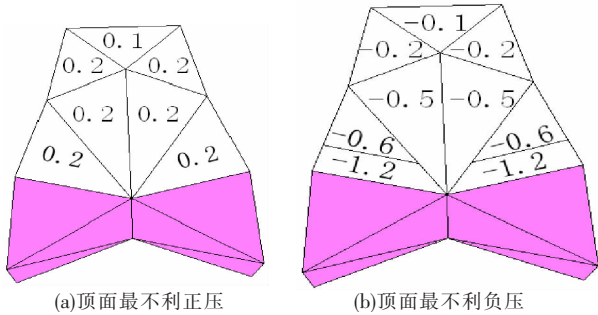


图 15 罩棚顶面的区域平均风压系数



图 16 体育场周边地区

利用图 14 和图 15 给出的区域平均风压系数 C_p , 则体育场罩棚某一局部区域的平均风压 w_p 为

$$w_p = w'_0 \times C_p = 1.53 \times C_p (\text{kN/m}^2).$$

其中 C_p 包括了高度变化系数和体型变化系数两部分, 即 $C_p = \mu_z \mu_s$.

由区域平均风压和受荷面积便可求罩棚结构所受的风荷载.

3 结 论

1) 风向角对风荷载的影响较大, 不同风向角下, 来流的分离和漩涡脱落作用均有较大的不同, 平均风压峰值的出现位置也不同, 一般来说, 屋面前缘角部来流分离最为严重, 因此在设计时, 应注意风向角对屋面风荷载的影响, 及屋面的局部处理.

2) 风攻角对罩棚表面风压分布的影响不大, 对罩棚局部峰值的影响在 15% 以内, 整体影响在 5% 以内. 和迎风面相比, 风攻角对背风面风压分布的影响大.

3) 为了工程设计应用的方便, 根据风压分布的规律以及体育场罩棚的结构形式, 给出了罩棚构成单元在最不利风向下的区域平均风压系数.

4) 根据主体育场所处地理位置和地貌类型, 给出了体育场罩棚的区域平均风压及设计风荷载的计算方法.

参 考 文 献:

- [1] JOHN D, ANDERSON J R. Computational fluid dynamics (the basics with applications) [M]. Beijing: Tshinghua Press, 2002.
- [2] MURAKAMI S. Past, present, and future of CWE: The view from 1999 [C]//Wind Engineering into 21st Century. Balkema: Rotterdam, 1999: 91 - 104.
- [3] DAVENPORT A G. Past, present, and future of wind engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90: 1371 - 1380.
- [4] DALY B J, HARLOW F H. Transport Equations in Turbulence [J]. Phys Fluids, 1970, 13: 2634 - 2649.
- [5] 孙晓颖, 林斌, 吴晓蓉, 等. 数值风洞在大跨屋盖结构风荷载确定中的应用 [J]. 建筑结构, 2008, 38 (10): 83 - 86.
- [6] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.
- [7] 孙晓颖, 武岳, 沈世钊. 平屋盖风压分布的数值模拟 [J]. 计算力学学报, 2007, 24(3): 294 - 300.
- [8] 林斌, 孙晓颖, 武岳, 等. 大庆石油学院体育馆屋面风荷载的风洞试验及 CFD 数值模拟 [J]. 沈阳建筑大学学报, 2006, 22(3): 357 - 361.

(编辑 赵丽莹)