

文章编号: 1673-2049(2008)01-0076-08

典型空间结构平均风压分布及绕流特性的数值模拟

李清雅, 叶继红

(东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:运用计算流体力学技术,基于 FLUENT 6.1.22 流体动力学数值模拟平台,采用雷诺应力模型,对球壳、悬链面壳及椭圆双曲抛物面壳这 3 类结构的平均风压分布及绕流特性进行了深入研究。首先将数值模拟结果与风洞试验结果进行对比,验证了数值模拟方法的正确性;然后系统研究了风速、风向角、地面粗糙度、缩尺比、矢跨比等因素对结构风压分布及其绕流特性的影响;最后在 B 类场地下,根据结构形式和风压分布规律,对结构的压力系数进行面积上的加权平均得到工程上实用的体型系数,可供设计参考。

关键词:计算流体力学;数值模拟;空间结构;平均风压;压力系数

中图分类号: TU311.3 文献标志码: A

Numerical Simulation of Characteristics of Mean Wind Pressure Distribution and Flow Field on Typical Spatial Structures

LI Qing-ya, YE Ji-hong

(School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: Based on FLUENT 6.1.22 soft platform with Reynolds stress model (RMS), authors implied the computational fluid dynamics (CFD) numerical simulated technology to research mean wind pressure distribution on typical spatial structures, such as dome, catenoid and elliptic hyperbolic paraboloid, as well as the characteristics of fluid influence around the structures. The numerical simulation results were found to have good agreement with the wind tunnel experimental results. The characteristics of wind pressure distribution and the flow field were discussed by considering some parameters, such as wind velocity, wind direction angle, roughness of terrain, scale and rise-span ratio. Finally, based on the structure shape and the regularity of wind pressure distribution, in site category B, the local wind pressure coefficient of every region was gained, which can provide reference for the engineering design.

Key words: computational fluid dynamics; numerical simulation; spatial structure; mean wind pressure; pressure coefficient

0 引言

随着现代建筑美学的发展和实用功能要求的提

高,三维空间结构的应用越来越多,并以其大空间、多功能、内部布置灵活等突出优势,在建筑结构中发挥着越来越重要的作用。风,即空气相对于地球表

收稿日期: 2007-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678036)

作者简介: 李清雅(1982-),男,河北威县人,工学硕士研究生, E-mail: liqingya@yahoo.cn.

面的运动,主要是太阳对地球大气的不均匀加热所引起的。直观地说,风是由于大气中热力和动力现象的时空不均匀性,使相同高度的两点之间产生压差所造成的^[1]。因为地球表面阻力等因素的影响,大气边界层整个区域内的流动形式均为湍流。大跨空间结构往往比较低矮,处于湍流度高的地区,当风吹过屋面时会产生复杂多变的气流分离和再附,其风压分布十分复杂,因此风荷载成为结构设计的主要控制荷载。中国现行的《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)中仅给出了简单体型的建筑结构风荷载取值方法,对于复杂形体的结构只能通过费用高、周期长的风洞试验确定风荷载的大小及分布。

目前,对空间结构的平均风压能够进行较准确的数值模拟,属于稳态计算范畴。因此,本文中笔者运用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术,基于 FLUENT 6. 1. 22 软件平台,通过控制变量法,对几类典型空间结构的受风特性进行了深入的研究。最后在 B 类场地下,根据结构形式和风压分布特点,对结构的压力系数进行面积上的加权平均得到工程上实用的体型系数,可供设计参考。

1 计算方法

本文中涉及的风均为低速、不可压缩、黏性的牛顿流体^[2-4]。计算流体动力学是通过计算机数值计算和图像显示,对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析。流体流动要受物理守恒定律的支配,其基本定律包括:质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。对于良态风,不需考虑热交换,其基本控制方程^[5-7]如下。

1.1 质量守恒方程

假设流体不可压,密度 ρ 为常量,得

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为速度矢量 \mathbf{u} 在 x 、 y 、 z 方向的分量。

1.2 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (4)$$

式中: p 为流体微元体上的压力; τ_{xx} 、 τ_{yy} 、 τ_{zz} 分别为因分子黏性作用而产生的作用在微元体表面上的黏性应力 τ 的分量; F_x 、 F_y 、 F_z 为微元体上的体力。

由此可见,控制大气湍流流动的基本方程是一组非线性联立的偏微分方程组,从数学上无法得到解析解,故需寻求数值模拟方法求解。数值模拟方法可分为直接数值模拟方法(DNS)和非直接数值模拟方法。DNS 方法就是直接用瞬时的 Navier-Stokes 方程对湍流计算,理论上可以得到相对准确的计算结果,但其对计算机的内存空间和计算速度的要求非常高,目前处于探索性阶段。非直接数值模拟方法中,当稳态计算时,采用涡黏模型和雷诺应力模型(RSM)较多,但前者采用各向同性的湍动黏度来计算湍流应力,难于考虑旋转流动及流动方向表面曲率变化的影响,而后者克服了这些缺点,对雷诺方程中的湍流脉动应力直接建立微分方程式并进行求解。综合求解精度和计算时间,笔者采用 RSM。

RSM 属于高雷诺数的湍流计算模型。在固体壁面附近,由于分子黏性的作用,湍流脉动受到阻尼作用,雷诺数很小,因此在近壁区,采用非平衡的壁面函数^[8]来修正 RSM 模型,以模拟壁面附近的复杂流动现象。壁面函数法实际上是一组半经验的公式,用于将壁面上的物理量与湍流核心区内待求的未知量直接联系起来。

2 平均风压分布的 CFD 数值模拟

2.1 计算模型

2.1.1 几何建模

模型四周封闭,几何缩尺比为 1 : S,模型尺寸为 $x \times y \times z$,计算区域的大小满足阻塞度小于 3% 的要求,最终计算域的断面取为 $b_y \times c_z$,长度取为 a_x ,其中, $a \geq 30$ 、 $b \geq 15$ 、 $c \geq 10$,模型中心距入口边界的距离约为计算域长度的 1/3。参考坐标系为: x 正方向为来流方向, z 方向为建筑物高度方向。以球壳结构为代表,局部网格划分如图 1 所示,计算区域如图 2 所示,其余类同。

2.1.2 参数控制及网格划分

本文中仅模拟平均风压,相当于稳态计算,空间离散格式采用 1 阶或 2 阶迎风格式,综合参考收敛

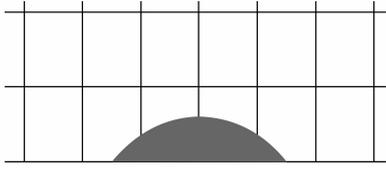


图1 局部网格划分(y轴方向视图)

Fig. 1 Partial Mesh Division (View from y-axis Direction)

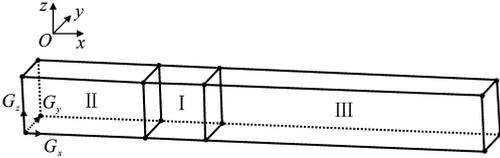


图2 计算区域

Fig. 2 Computation Region

性和计算精度而定。流场计算方法为 SIMPLE(求解压力耦合方程组的半隐式方法)的改进形式 SIM-
PLEC,即协调一致的 SIMPLE 算法。在进行迭代
计算时,当所有控制方程的相对迭代残余量均小于
 1×10^{-3} ,且通过计算区域的质量流量达到稳定值,
以保证其满足质量守恒定律,此时认为所得流场进
入稳态。

对计算区域进行网格划分时,采用分块法:因为
建筑物为曲面结构,所以 I 区划分为混合网格,网
格主要由四面体组成,个别位置可以有六面体、锥
体或楔形体,为了提高网格质量,主要对四面体
网格进行了光滑并交换单元面;II区、III区为六
面体网格(图 2)。

2.1.3 边界条件

入口边界条件:来流风速沿高度按指数规律变
化,模型化后 x 方向风速剖面(模型比为 1 : S)
的表达式为: $U(z) = U_{10}(S z/10)^{\alpha}$,其中 U_{10} 为 10 m
高度处的平均风速,不考虑 y 方向、 z 方向的
风速, z 自建筑物底部算起。来流湍流特性通过
用户自定义函数(UDF)直接给定湍动能 k 和湍
动耗散率 ϵ

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{3}{2} (U_{10} I)^2 \\ \epsilon &= C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: C_{μ} 为系数, $C_{\mu} = 0.09$; l 为湍流长度尺
度,取迎风面的最大尺寸; I 为湍流强度,参考
日本规范中的取值^[9]。

出口边界条件:出流接近完全发展,流场内任
意物理量 Ψ 沿出口法向梯度为 0,即 $\frac{\partial \Psi}{\partial n} = 0$,
采用自由出流的边界条件。

流域顶部及两侧:采用对称边界条件,相当
于自由滑移的壁面。计算域底部及计算模型:选
用无滑

移的壁面条件。计算域越长,精度越高,并且
在计算模型的远端可采用较稀疏的网格划分,
所以适当加长计算域,可提高“性价比”。

2.2 计算结果分析

现以球壳结构为代表进行参数分析。

2.2.1 与风洞试验结果的对比分析

在分析算例及风洞试验数据^[10-11]的基础上,
按照风压分布规律,给出了计算模型(矢跨比
 $f/l = 1/3$)的关键点及分区编号,如图 3 所示。
A、D、G 区的高度约为 $f/8$, B

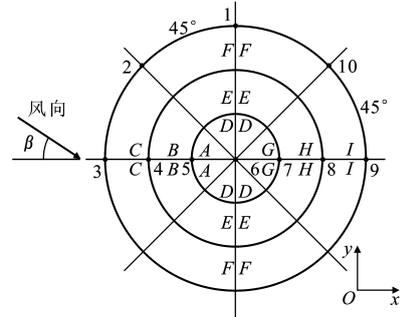


图3 计算模型关键点及区域编号

Fig. 3 Key Points and Zone Bits of Calculation Model

(E、H)区、C(F、I)区的高度二等分剩余矢
高。图 4 为数值模拟与风洞试验的结果比较。
图 5 为关键点处的压力系数。

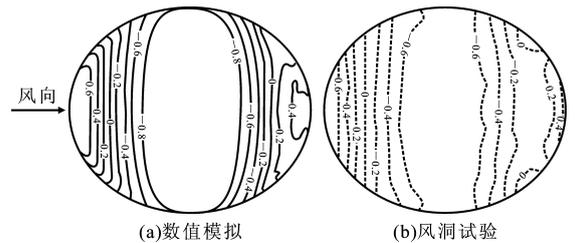


图4 数值模拟结果与风洞试验结果

Fig. 4 Numerical Simulation Results and Wind Tunnel Test Results

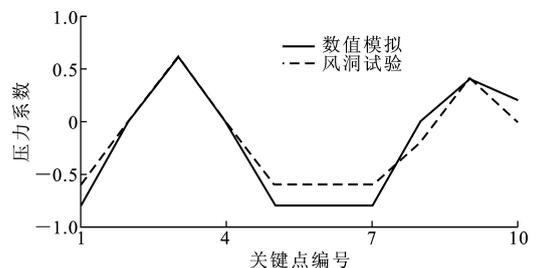


图5 关键点处的压力系数

Fig. 5 Pressure Coefficients on Key Points

从图 4、5 可以看出,数值模拟结果与风洞
试验结果吻合相当好,压力系数的分布规律
几乎完全一致。二者误差相对较大的地方发
生在球壳结构的顶部及背风面,最大绝对值
误差为 0.20,如果按面积加权平均得到中
国荷载规范中的体型系数,误差将会

更小,说明本文数值模拟计算参数选择合理、正确。

顶部及背风面产生较大的误差说明流场的分离及再附会引起更加紊乱的涡运动,究其原因数值模拟与风洞试验是 2 种不同的研究方法,数值模拟有其不足,风洞试验也存在不完善的地方,所以,描述复杂涡运动会产生误差。但是两者分布规律的相似性说明这 2 种研究方法具有可行性,所以,实际工程中应将两者相互结合,以得到与实际情况更相符的结果。

2.2.2 风速变化对计算结果的影响

本文中选择了 4 种风速 v , 分别为 10、20、30、40 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 以矢跨比 1/3 为例, 考察在其余参数不变的情况下, 风速变化对风压的影响, 各关键点的压力系数如图 6 所示。由图 6 可知, 在良态风范围内风速变化对结构风压分布的影响可以忽略。

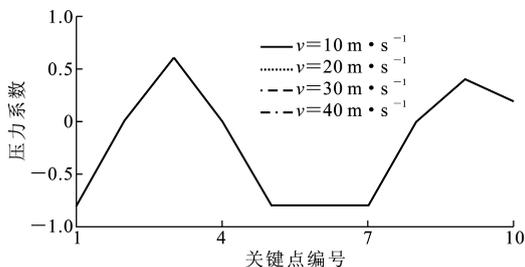


图 6 不同风速时的压力系数

Fig. 6 Pressure Coefficients Under Different Wind Velocities

2.2.3 地面粗糙度对计算结果的影响

本文中选取了中国荷载规范规定的 4 类地貌 (A、B、C、D 类地貌), 计算模型不变, 考察不同地貌对结构平均风压的影响, 图 7 为各关键点在不同地貌下的压力系数变化情况。从图 7 可以看出: 3、9 关键点处, 即迎风面及背风面下部受地貌影响较大, 对其余部分影响较小, 尤其是两侧及背风面中部几乎没有影响; 4 类地貌下的风压分布规律基本相同, 平均风压绝对值按 A、B、C、D 四类地貌依次增大, 其中 A、B 两类地貌的计算结果相差甚微。这说明不同地貌对风压分布的影响是有限的, 其分布规律主要受制于自身特征。

2.2.4 缩尺比对计算结果的影响

本文中研究了 3 种模型缩尺比 (1:1、1:200、1:400) 结构的平均风压分布情况。图 8 为不同缩尺比下各区域的体型系数。从图 8 可以看出, 平均风压分布形态基本没有变化, 最大绝对值误差为 0.015, 这说明缩尺比在一定范围内变化而引起的雷

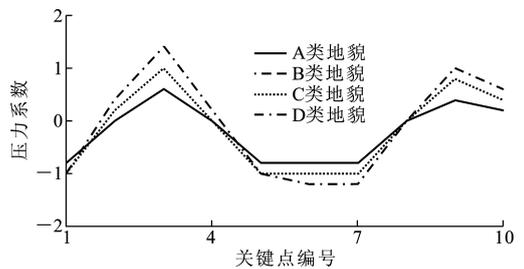


图 7 不同地貌下的压力系数

Fig. 7 Pressure Coefficients Under Different Categories

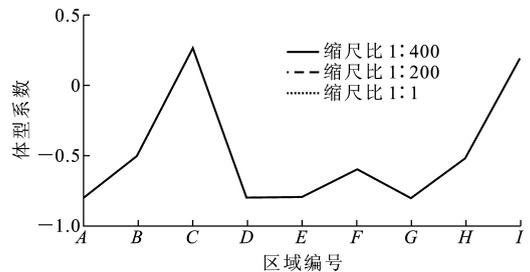


图 8 不同缩尺比下的体型系数

Fig. 8 Shape Coefficients Under Different Scale Ratios

诺数差异, 对平均风压计算结果的影响很小。

3 风压分布特性

3.1 球壳结构

矢跨比是球壳结构的主要控制尺寸, 在其余因素不变的前提下, 笔者对 6 种矢跨比 ($f/l = 1/5$ 、 $1/4$ 、 $1/3$ 、 $1/2$ 、 $1/1$ 、 $3/2$) 进行了计算, 以期得到球壳结构表面平均风压的分布规律。

矢跨比的变化对球壳结构表面平均风压的分布规律并无太大影响, 只是数值上有所差别, 在前 1/4 部分 (C 区、B 区) 变化最为剧烈, 其次是后 1/4 部分 (H 区、I 区), 两侧的变化最为平缓, 这一点在实际工程中值得注意。当矢跨比小于等于 1/3 时, 背风面下部的再附现象较为明显, 处于正压区; 而当矢跨比大于 1/3 时, 没有出现再附现象, 处于负压区, 如图 9 所示。总体而言, 球壳的风荷载体型系数分布规律十分相似, 尤其是矢跨比在 1/4~1/2 时, 在具体数值上也相差甚微; 随着矢跨比的增大, 风荷载体型系数绝对值在各个区域都有所增大。

中国荷载规范中给出了球壳结构体型系数的计算公式, 但尚存在不足之处: 矢跨比小于 1/4 时, 风压皆为向上的吸力; 矢跨比大于 1/4 时, 迎风面有部分正压区。这样笼统地处理显然不够合理, 已有的风洞试验资料与本文的数值模拟也证明了这一点, 且在矢跨比 1/4 处, 按规范计算不能够平滑衔接。图 10 为数值模拟与规范结果的比较。从图 10 可以

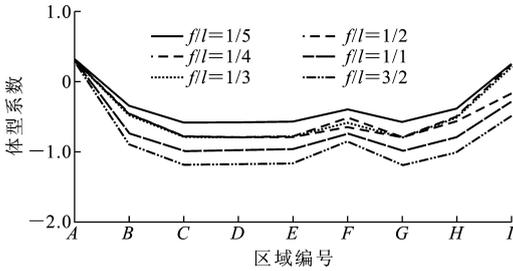
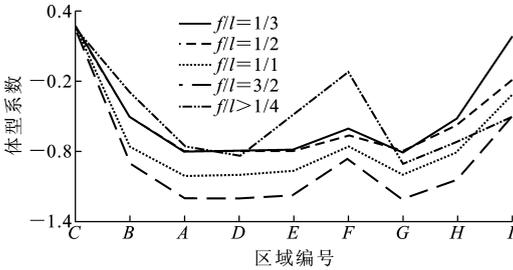
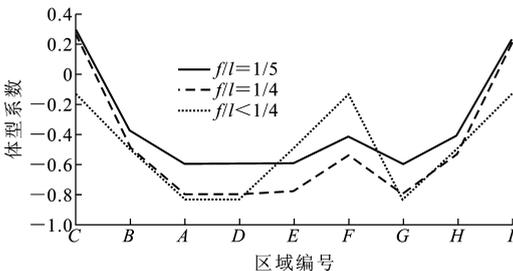


图9 不同矢跨比下的体型系数

Fig. 9 Shape Coefficients Under Different Rise-span Ratios



(a) f/l > 1/4



(b) f/l <= 1/4

图10 数值模拟与规范的体型系数比较

Fig. 10 Comparisons of Shape Coefficients Between Numerical Simulation Results and Code Results

看出,数值模拟与规范结果分布趋势大致相同,迎风面两侧二者结果差异较为明显,数值模拟得到的风吸力更大些,这样实际工程中按规范处理就会偏于不安全。矢跨比为 1/4、1/3、1/2 时,大部分区域与规范吻合相对较好,矢跨比为 1/5、1/1、3/2 时,两者数值差别明显:矢跨比为 1/5 时,风压绝对值较规范偏小,而矢跨比为 1/1、3/2 时,风压绝对值较规范值偏大。同时注意到,当矢跨比小于等于 1/4 时,数值模拟结果显示在迎风面及背风面的下部存在正压区,而规范结果皆为负压区。

3.2 悬链面结构

悬链面是指曲线方程为式(6)的悬链线(图 11)绕某一轴旋转得到的旋转曲面(图 12),其方程为

$$z = -a[\ln(|x| + \sqrt{x^2 - a^2}) - \ln a] + h \quad (6)$$

$$z = -a[\ln(\sqrt{x^2 + y^2} + \sqrt{x^2 + y^2 - a^2}) - \ln a] + h \quad (7)$$

控制参数取悬链面底表面半径 a 和顶表面半径 b ,本文中 b/a 的取值范围为 3~20,悬链面的平面图及分

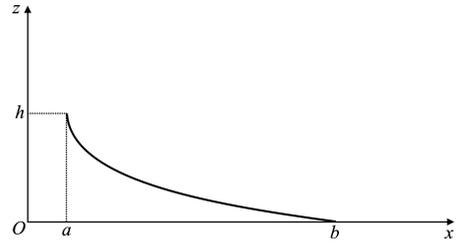


图11 悬链线

Fig. 11 Catenary

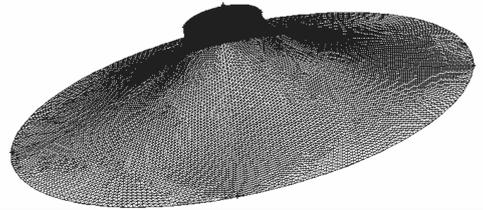


图12 悬链面三维示意

Fig. 12 Three-dimension of Catenoid

区编号如图 13 所示, $l/m \approx 1$ 。

图 14 为悬链面风压分布随 b/a 的变化。从图 14 可以看出,结构迎风面及背风面下部处于正压区,其余部分处于负压区,这

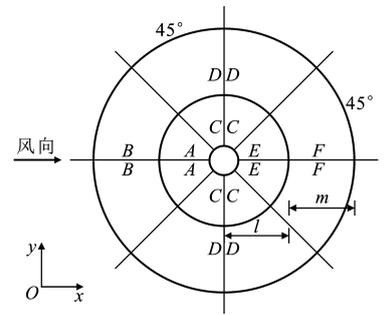


图13 悬链面区域编号

Fig. 13 Zone Bits of Catenoid

说明在结构两侧及背风面上部有漩涡脱落,产生气流分离,而在背风面下部气流再附,迎风面下部和两侧上部区域的风压绝对值较大,分别产生最大压力和吸力。A 区和 F 区的风压最为接近,迎风面顶部与背风面下部由来流撞击再附而产生的压力大致相当。

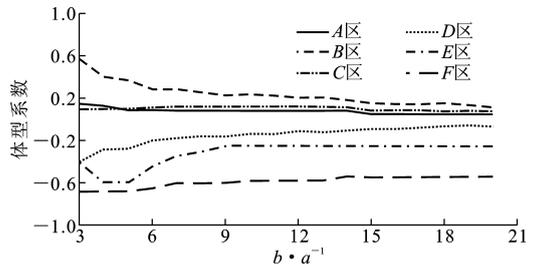


图14 体型系数随 b/a 的变化

Fig. 14 Changes of Shape Coefficients vs b/a

当控制参数 $b/a < 9$ 时,参数变化对悬链面的风压分布特性影响较大,并且随 b/a 的增大各区域风压绝对值都有减小的趋势;当 $b/a > 9$ 时,风压分布特性基本保持稳定。

3.3 椭圆双曲抛物面结构

椭圆双曲抛物面壳平面投影的长短轴之比取为定值 8/5,矢跨比为马鞍面的主要控制尺寸,其平面图及分区编号、三维示意图如图 15、16 所示。

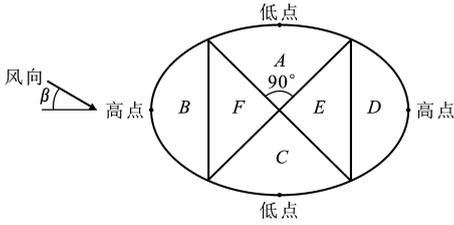


图 15 椭圆双曲抛物面区域编号

Fig. 15 Zone Bits of Elliptic Hyperbolic Paraboloid

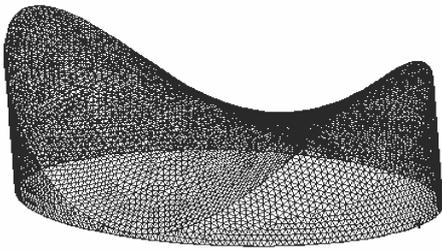


图 16 椭圆双曲抛物面三维示意

Fig. 16 Three-dimension of Elliptic Hyperbolic Paraboloid

3.3.1 风向对屋面风压分布的影响

图 17 为矢跨比在 1/12、1/6 两种情况下,风向顺时针旋转时,风向角变化对结构风压分布产生的影响。从图 17 可以看出,风向角变化对结构产生的影响与矢跨比关系不大,并且绝大部分情况下整个结构均处于负压区。

从图 17 还可以看出,风向角为 0°、15°时,来流在高点分离,然后由于马鞍坡度的影响,使气流少部分再附,D 区、E 区产生正压,但数值不大;随着风向角的增大,D 区、E 区的吸力逐渐增大,尤其是 E 区随着矢跨比的增大,变化梯度有增大的趋势;风向角为 75°之前,最大风吸力都是在 B 区,之后,风偏向从低点吹来,B 区风吸力迅速减小,此时,E 区、F 区的吸力较大;风向角的变化对低点附近的 A 区、C 区影响最小,其风压绝对值振动幅度比较窄,说明气流的分离、漩涡脱落结构高点、尖棱处更容易发生,且相对于平缓的低点变化更为剧烈。

3.3.2 矢跨比对屋面风压分布的影响

图 18 为风向角在 0°、45°、90°时平均风压分布随矢跨比的变化曲线。从图 18 可以看出,矢跨比的变化对风压分布的总体特征影响不是太明显,风向角为 0°时,B 区风荷载体型系数 μ_s 变化最大,风向角为 90°时,E 区、F 区风荷载体型系数 μ_s 变化最

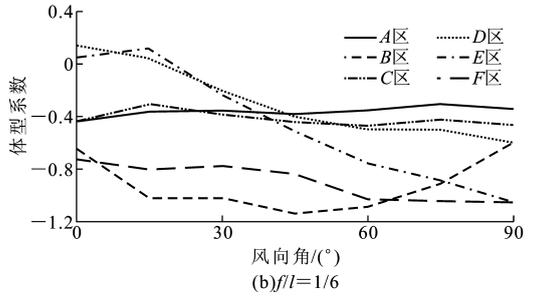
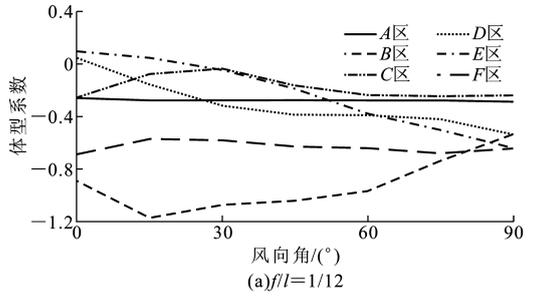


图 17 体型系数随风向角的变化

Fig. 17 Changes of Shape Coefficients vs Wind Direction Angles

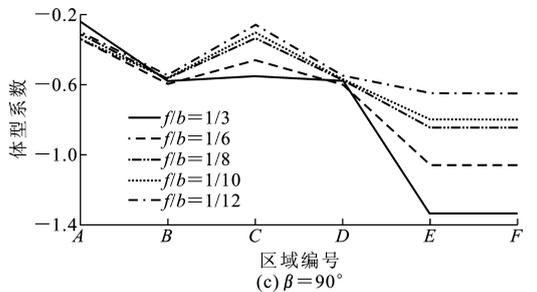
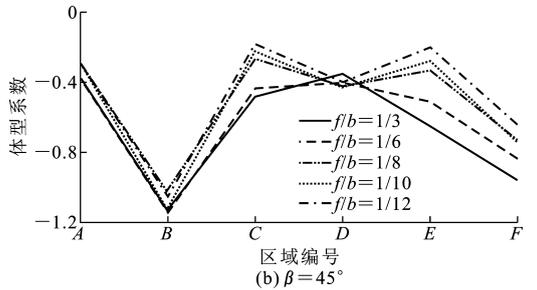
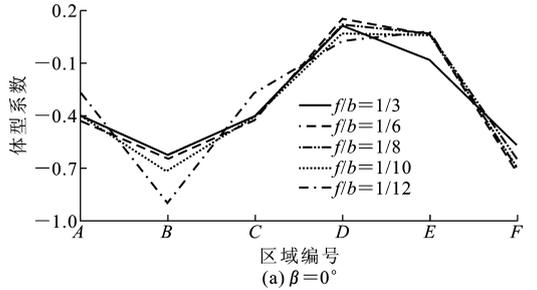


图 18 体型系数随矢跨比的变化

Fig. 18 Changes of Shape Coefficients vs Rise-span Ratios 大,其共同点是吸力较大,气流分离严重,说明矢跨比的变化会对这些区域产生一定的影响,但也比较有限。

4 分区风荷载体型系数

本文中根据数值模拟结果,以B类场地为代表,按照第3节分析,将3类结构的风荷载体型系数 μ_s (压力系数 C_p 按面积加权的平均值)制成表格,供工程设计参考,如表1~3所示。压力系数 C_p 的计

表1 球壳结构的分区风荷载体型系数

Tab. 1 Wind Shape Coefficients of Regions of Dome Structure

矢跨比	A区	B区	C区	D区	E区	F区	G区	H区	I区
1/5	-0.60	-0.37	0.30	-0.60	-0.59	-0.41	-0.60	-0.41	0.23
1/4	-0.80	-0.48	0.27	-0.80	-0.78	-0.54	-0.80	-0.53	0.20
1/3	-0.80	-0.50	0.25	-0.80	-0.79	-0.60	-0.80	-0.52	0.18
1/2	-0.80	-0.50	0.27	-0.80	-0.80	-0.66	-0.80	-0.58	-0.19
1/1	-1.00	-0.75	0.24	-1.00	-0.97	-0.75	-1.00	-0.81	-0.31
3/2	-1.20	-0.90	0.37	-1.20	-1.18	-0.86	-1.20	-1.04	-0.50

表2 悬链面结构的分区风荷载体型系数

Tab. 2 Wind Shape Coefficients of Regions of Catenoid Structure

$a \cdot b^{-1}$	A区	B区	C区	D区	E区	F区
1/3	0.15	0.56	-0.68	-0.40	-0.40	0.09
1/4	0.13	0.40	-0.68	-0.32	-0.55	0.10
1/5	0.09	0.36	-0.68	-0.28	-0.60	0.10
1/6	0.09	0.28	-0.65	-0.20	-0.45	0.11
1/7	0.08	0.28	-0.60	-0.18	-0.35	0.12
1/8	0.08	0.25	-0.60	-0.16	-0.30	0.13
1/9	0.08	0.22	-0.60	-0.16	-0.25	0.13
1/10	0.08	0.23	-0.58	-0.14	-0.25	0.12
1/11	0.08	0.22	-0.58	-0.12	-0.25	0.13
1/12	0.08	0.20	-0.58	-0.11	-0.25	0.12
1/13	0.08	0.20	-0.58	-0.12	-0.25	0.12
1/14	0.08	0.18	-0.54	-0.11	-0.25	0.11
1/15	0.05	0.15	-0.55	-0.09	-0.25	0.08
1/16	0.05	0.14	-0.54	-0.09	-0.25	0.08
1/17	0.05	0.14	-0.54	-0.08	-0.25	0.09
1/18	0.05	0.15	-0.54	-0.07	-0.25	0.07
1/19	0.05	0.13	-0.54	-0.06	-0.25	0.08
1/20	0.05	0.11	-0.54	-0.07	-0.25	0.08

5 结语

(1)来流风速、缩尺比的变化对结构的平均风压计算结果影响甚小,可以忽略;地面粗糙度亦不会对其造成太大影响,只是数值上略有差别,平均风压绝对值按A、B、C、D四类地貌依次增大,其中A、B两类地貌的计算结果相差最小。

(2)矢跨比的变化对球壳结构表面平均风压的分布规律并无太大影响,只是数值上有所差别,随着

算公式为

$$C_p = \frac{\bar{p}_i}{q_H} \quad (8)$$

式中: \bar{p}_i 为*i*点的平均风压值; q_H 为参考风压, $q_H = \frac{1}{2}\rho v_H^2$, $\rho = 1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, v_H 为参考风速,本文中取模型顶部高度处风速。

矢跨比的增大,风荷载体型系数的绝对值在各个区域都有所增大,其中,在球壳迎风面的前1/4区域变化最为剧烈,其次是后1/4区域,两侧变化最为平缓。当矢跨比小于等于1/3时,背风面下部的再附现象较为明显,处于正压区;而当矢跨比大于1/3时,没有出现再附现象。与荷载规范比较,矢跨比为1/4、1/3、1/2时,大部分区域 μ_s 与规范吻合相对较好;矢跨比为1/5时,风压绝对值较规范偏小,而矢跨比为1/1、3/2时,风压绝对值较规范值偏大。

(3)悬链面结构迎风面及背风面下部处于正压区,其余部分处于负压区。在结构两侧及背风面上部有漩涡脱落,产生气流分离,而在背风面下部气流再附,迎风面下部和两侧上部区域的风压绝对值较大,分别产生最大压力和吸力。当控制参数 $b/a < 9$ 时,其比值变化对悬链面的风压分布特性影响较大,随着 b/a 的增大,各区域风压绝对值都有减小的趋势;当 $b/a > 9$ 时,风压分布特性基本保持稳定。

(4)对于椭圆双曲抛物面结构,风向角变化对结构平均风压分布影响明显,但这种影响基本与矢跨比关系不大。绝大部分情况下结构整体均处于负压区,气流的分离、漩涡脱落在结构高点、尖棱处更容易发生,且相对于平缓的低点变化更为剧烈。矢跨比的变化会对吸力大、气流分离严重的区域产生一定影响。

(5)对3类结构分别进行区域划分,得出风荷载体型系数,并绘制成表格,方便工程设计查用。

参考文献:

References:

[1] 刘尚培,项海帆,谢黎明. 风对结构的作用——风工程

表 3 椭圆双曲抛物面结构的分区风荷载体型系数

Tab. 3 Wind Shape Coefficients of Region of Elliptic Hyperbolic Paraboloid Structure

矢跨比	风向角/(°)	A 区	B 区	C 区	D 区	E 区	F 区
1/3	0	-0.40	-0.63	-0.40	0.11	-0.08	-0.57
	15	-0.41	-0.67	-0.40	0.08	-0.05	-0.71
	30	-0.37	-0.90	-0.45	-0.15	-0.36	-0.81
	45	-0.38	-1.13	-0.48	-0.35	-0.65	-0.96
	60	-0.30	-1.03	-0.44	-0.50	-0.96	-1.08
	75	-0.23	-0.78	-0.44	-0.47	-0.90	-1.09
	90	-0.24	-0.58	-0.55	-0.58	-1.34	-1.34
1/6	0	-0.43	-0.65	-0.43	0.15	0.06	-0.73
	15	-0.36	-1.03	-0.30	0.05	0.13	-0.81
	30	-0.35	-1.03	-0.38	-0.20	-0.23	-0.78
	45	-0.38	-1.15	-0.44	-0.40	-0.51	-0.84
	60	-0.35	-1.10	-0.47	-0.50	-0.76	-1.04
	75	-0.30	-0.92	-0.42	-0.50	-0.89	-1.05
	90	-0.34	-0.60	-0.46	-0.60	-1.06	-1.06
1/8	0	-0.40	-0.62	-0.40	0.12	0.06	-0.65
	15	-0.34	-0.72	-0.31	0.03	0.08	-0.68
	30	-0.32	-0.93	-0.30	-0.20	-0.16	-0.75
	45	-0.29	-1.02	-0.26	-0.42	-0.33	-0.73
	60	-0.29	-1.02	-0.33	-0.42	-0.64	-0.75
	75	-0.30	-0.82	-0.36	-0.42	-0.68	-0.84
	90	-0.31	-0.57	-0.33	-0.57	-0.84	-0.84
1/10	0	-0.40	-0.72	-0.40	0.07	0.06	-0.70
	15	-0.34	-0.82	-0.29	0.02	0.05	-0.70
	30	-0.31	-1.01	-0.18	-0.27	-0.11	-0.67
	45	-0.30	-1.12	-0.22	-0.43	-0.28	-0.74
	60	-0.31	-1.02	-0.29	-0.42	-0.49	-0.73
	75	-0.30	-0.80	-0.26	-0.47	-0.65	-0.79
	90	-0.34	-0.57	-0.30	-0.57	-0.80	-0.80
1/12	0	-0.27	-0.90	-0.27	0.03	0.08	-0.70
	15	-0.29	-1.18	-0.09	-0.17	0.03	-0.58
	30	-0.29	-1.08	-0.05	-0.33	-0.06	-0.59
	45	-0.29	-1.05	-0.18	-0.40	-0.20	-0.64
	60	-0.29	-0.98	-0.25	-0.40	-0.39	-0.65
	75	-0.29	-0.75	-0.26	-0.43	-0.51	-0.69
	90	-0.30	-0.55	-0.25	-0.55	-0.65	-0.65

导论[M]. 2 版. 上海:同济大学出版社,1992.

LIU Shang-pei, XIANG Hai-fan, XIE Ji-ming. Actions of Wind Load on Structures — Wind Engineering Introduction[M]. 2nd ed. Shanghai: Tongji University Press, 1992.

[2] ANDERSON J D. Computational Fluid Dynamics; the Basics with Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[3] MURAKAMI S. Past, Present and Future of CWE; the View from 1999[C]//LARSEN A, LAROSE G L, LIVESEY F M. Wind Engineering into the 21st Century. Rotterdam: Balkema Press, 1999: 91-104.

[4] DAVENPORT A G. Past, Present and Future of Wind Engineering[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90 (12): 1 371-1 380.

[5] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 128-132. WANG Fu-jun. Computation Fluid Dynamics Analysis: Principle and Application of CFD Software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 128-132.

[6] MARKATOS N C. The Mathematical Modeling of Turbulence Flows[J]. Apply Math Modeling, 1986, 10(10): 190-220.

[7] LIEN F S, LESCHZINER M A. Assessment of Turbulent Transport Models Including Non-linear RNG Eddy-viscosity Formulation and Second-moment Closure[J]. Computers and Fluids, 1994, 23 (8): 983-1 004.

[8] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics; the Finite Volume Method[M]. New York: John Wiley & Sons, 1995.

[9] 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. HUANG Ben-cai. Theory and Application Against Wind Load of Structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2001.

[10] 李元齐, 沈祖炎. 本征正交分解法在曲面模型风场重构中的应用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34 (1): 22-26. LI Yuan-qi, SHEN Zu-yan. Application of the Proper Orthogonal Decomposition Method to Wind Field Reconstruction of Models with Curved Surfaces [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(1): 22-26.

[11] 楼文娟, 卢旦, 孙炳楠. 风致内压及其对屋盖结构的作用研究现状评述[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 76-82. LOU Wen-juan, LU Dan, SUN Bing-nan. Review of Wind-induced Internal Pressure and Its Effects on Roof Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 76-82.