

文章编号:1673-2049(2006)01-0017-06

柱壳屋盖的等效静风荷载

倪振华,段 旻,谢壮宁

(汕头大学 土木工程系,广东 汕头 515063)

摘要:根据弹性恢复力的模态展开式和计算响应的拟静力公式导出产生屋盖结构最大峰值响应的等效静风荷载。给出两种计算等效静风荷载的途径,一种表示为模态等效静风荷载的加权组合,另一种表示为背景分量与共振分量的加权组合。利用同步多点压力扫描技术对一个柱壳屋盖结构进行了风洞试验。采用完全二次型组合法(CQC法)和平方总和开方法(SRSS法)计算了不同风向角下竖向位移的峰值响应,说明了模态耦合的影响。将两种途径计算的柱壳屋盖等效静风荷载分布与平均风荷载分布作了比较,分析了相应的峰值响应与平均响应。分析结果表明:许多结点的等效静风荷载远大于平均风荷载,而且脉动风效应和共振效应也应引起重视。

关键词:等效静风荷载;柱壳屋盖;完全二次型组合法;平方总和开方法

中图分类号:TU312.1

文献标志码:A

Equivalent Static Wind Loads of Cylinder Roof

NI Zhen-hua, DUAN Min, XIE Zhuang-ning

(Department of Civil Engineering, Shantou University, Shantou 515063, Guangdong, China)

Abstract: The equivalent static wind loads (ESWL) producing maximum peak responses of roof-structures were formulated based on the modal expansion of the resilience and the quasi-static equation for calculating responses. Two approaches to compute ESWL were presented, where one approach was expressed as a weighted combination of the modal equivalent static wind loads, and the other was expressed as a weighted combination of the background component and resonant component. Wind tunnel experiments of a cylinder roof were conducted by means of the synchronous multi-pressure scanning technique. The peak responses of the vertical displacement at different wind azimuths were calculated with the complete quadratic combination (CQC) method and the square root sum of square (SRSS) method, and the effects of modal coupling were checked. The distributions of the equivalent static wind loads on the cylinder roof obtained from two approaches above were compared with the mean wind loads, and the corresponding peak responses and mean responses were analyzed. The analysis results indicate that the equivalent static wind loads acting on many nodes are much greater than the mean wind loads, and the effects of fluctuating wind and resonance are deserving of attention.

Key words: equivalent static wind load; cylinder roof; complete quadratic combination method; square root sum of square method

收稿日期:2005-12-16

基金项目:国家自然科学基金项目(50378052)

作者简介:倪振华(1945-),男,浙江上虞人,教授,博士生导师,工学硕士,E-mail:zhni@stu.edu.cn。

0 引言

风荷载通常是大跨屋盖结构荷载设计中的控制荷载。中国《建筑结构荷载规范》和国外一些建筑规范中采用平均风荷载乘以风振系数或阵风因子的方式确定结构设计风荷载,这种方式实际上只适合于确定铅垂悬臂型结构的建筑表面水平风荷载。作用于屋盖结构的风荷载主要是竖向风荷载,其中平均风荷载分量并不占主要成分。国外文献报道的大跨屋盖的有效阵风因子一般比高层建筑的阵风因子要高得多^[1],中国许多沿海城市设计单位也反映中国现行规范中风振系数的设计方法较难应用于大跨屋盖。

在建筑结构风振分析中等效静风荷载(Equivalent Static Wind Loads,ESWL)是工程上比较容易接受的方式。笔者所说的“等效”是指在这组所谓静风荷载作用下结构的某种最大响应与实际动风荷载产生的最大响应相同。各国不少学者对等效静荷载的计算方法进行了研究。Holemes 将本征正交分解技术(Proper Orthogonal Decomposition,POD)与荷载-响应-相关方法(Load-Response-Correlation,LRC)相结合^[2],把结构响应表示为少数几阶模态贡献的响应线性组合,进而将等效静风荷载表示为平均荷载、背景荷载和一个或多个共振荷载分量的组合^[3]。Ginger 等应用协方差积分法(POD 法)和 LRC 法计算了低矮房屋屋盖的峰值荷载响应和等效静风压的分布^[4],并将结果与澳大利亚的相应规范进行了比较。Zhou 等提出将等效静风荷载分解为平均、背景和共振 3 部分^[5],其中背景部分由 LRC 法确定,共振部分由惯性力形式表达。Chen 和 Kareem 通过模态惯性荷载分量的加权组合或者背景荷载与共振荷载分量的组合阐明了桥梁多模态抖振响应的等效静荷载分布^[6],并在考虑由结构和气动耦合效应引起的模态响应分量相关性的情况下,确定了等效静荷载分量的荷载加权因子。

笔者根据振动系统弹性恢复力的模态展开式及计算响应的拟静力公式导出产生屋盖结构峰值响应的等效静风荷载,并给出模态等效静风荷载加权组合和背景分量及共振分量加权组合两种方式计算等效静风荷载的途径。结合风洞测压试验比较了完全二次型组合法(Complete Quadratic Combination,CQC)和平方总和开方法(Square Root Sum of Square,SRSS)计算的柱壳屋盖竖向位移峰值响应,

分析了等效静风荷载和平均风荷载的分布特点以及所产生的响应特点。

1 方法概述

1.1 模态等效静风荷载的加权组合

湍流风激励下屋盖结构风致响应的控制方程可以表示为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = \mathbf{P}(t) \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为屋盖结构有限元分析的质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵; $\mathbf{y}(t)$ 、 $\mathbf{P}(t)$ 分别为结构结点的动态位移向量及脉动风荷载向量。根据模态展开式,弹性恢复力可以表示为

$$\mathbf{Q}(t) = \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = \mathbf{K}\Phi\mathbf{q}(t) = \mathbf{M}\Phi\Lambda\mathbf{q}(t) \quad (2)$$

式中: Φ 、 Λ 、 $\mathbf{q}(t)$ 分别为模态矩阵、谱矩阵及模态坐标向量。式(2)体现了位移响应的拟静力计算性质,即只要获得弹性力 $\mathbf{Q}(t)$ 即可按拟静力分析方式得到结构位移 \mathbf{y} 。按式(2)可得出计算任意响应的拟静力公式

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Q}(t) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{u}(t)$ 为脉动风产生的结构某种响应(位移、内力或者应变、应力)向量; \mathbf{A} 为影响系数矩阵。根据式(3)得出响应的协方差矩阵以及响应荷载协方差矩阵

$$\sigma_u^2 = \overline{\mathbf{u}(t)\mathbf{u}(t)^T} = \mathbf{A}\sigma_Q^2\mathbf{A}^T \quad (4)$$

$$\sigma_{uQ}^2 = \overline{\mathbf{u}(t)\mathbf{Q}(t)^T} = \mathbf{A}\sigma_Q^2 \quad (5)$$

式中: σ_Q^2 为弹性力 $\mathbf{Q}(t)$ 的协方差矩阵, $\sigma_Q^2 = \overline{\mathbf{Q}(t)\mathbf{Q}(t)^T}$ 。记 \mathbf{A}_i 是矩阵 \mathbf{A} 的第 i 行向量,则任一响应 $u_i(t)$ 的均方根值为

$$\sigma_{u_i} = (\mathbf{A}_i\sigma_Q^2\mathbf{A}_i^T)^{1/2} \quad (6)$$

从而脉动风荷载引起的结构峰值响应(脉动峰值响应)为

$$\tilde{u}_{\max} = g\sigma_{u_i} = g\mathbf{A}_i\sigma_Q^2\mathbf{A}_i^T/\sigma_{u_i} = \mathbf{A}_i\tilde{\mathbf{Q}}_{\text{eq}} \quad (7)$$

式中: g 为峰值因子; $\tilde{\mathbf{Q}}_{\text{eq}}$ 为产生 \tilde{u}_{\max} 的等效静风荷载向量

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{\text{eq}} = g\sigma_Q^2\mathbf{A}_i^T/\sigma_{u_i} \quad (8)$$

实际风荷载(包括平均荷载和脉动荷载)产生结构峰值响应 $\hat{u}_i = \bar{u}_i + \tilde{u}_{\max}$ 的等效静风荷载为

$$\hat{\mathbf{Q}}_{\text{eq}} = \bar{\mathbf{Q}} + \tilde{\mathbf{Q}}_{\text{eq}} \quad (9)$$

式中: $\bar{\mathbf{Q}}$ 为平均风荷载向量。由式(5)得响应 $u_i(t)$ 与荷载 $\mathbf{Q}_j(t)$ 的协方差为

$$\sigma_{u_i Q_j}^2 = \sum_k a_{ik}\sigma_{Q_{kj}}^2 = \sum_k a_{ik}\sigma_{Q_{jk}}^2 \quad (10)$$

式中: a_{ik} 、 $\sigma_{Q_{kj}}^2$ 分别为 \mathbf{A} 与 σ_Q^2 的相应元素。根据式(9)、(10)得 $\hat{\mathbf{Q}}_{\text{eq}}$ 中第 j 元素为

$$\begin{aligned}\bar{Q}_{j,\text{eq}} &= \bar{Q}_j + \frac{g}{\sigma_{u_i}} \sum_k \alpha_{ik} \sigma_{Q_{jk}}^2 = \bar{Q}_j + \frac{g}{\sigma_{u_i}} \sigma_{u_i Q_j}^2 = \\ &\bar{Q}_j + g \rho_{u_i Q_j} \sigma_{Q_j}\end{aligned}\quad (11)$$

式中: \bar{Q}_j 为平均风荷载; $\rho_{u_i Q_j}$ 为响应 $u_i(t)$ 与荷载 $Q_j(t)$ 的相关系数, $\rho_{u_i Q_j} = \sigma_{u_i Q_j}^2 / (\sigma_{u_i} \sigma_{Q_j})$ 。由式(11)可知: 式(9)表示的等效静风荷载即以 LRC 法计算峰值响应的荷载模式^[7], 文献[7]中只考虑了背景响应, 本文的 $u_i(t)$ 则包含所有模态响应。由式(2)可以进行式(12)计算

$$\tilde{Q}_{\text{eq}} = g \mathbf{M} \Phi \mathbf{A} \sigma_q^2 \mathbf{A} \Phi^T \mathbf{M} \mathbf{A}_i^T / \sigma_{u_i} \quad (12)$$

式中: σ_q^2 为模态响应协方差矩阵, 由随机振动理论按式(13)计算

$$\begin{aligned}\sigma_q^2 &= \int_0^{+\infty} \mathbf{S}_q(n) \mathrm{d}n = \int_0^{+\infty} \mathbf{H}^*(n) \Phi^T \cdot \\ &\mathbf{S}_q(n) \Phi \mathbf{H}(n) \mathrm{d}n\end{aligned}\quad (13)$$

产生脉动峰值响应 \tilde{u}_{imax} 的等效静风荷载 \tilde{Q}_{eq} 也可按模态加权组合的方式表示。实际上, 式(2)可以表示为

$$\begin{aligned}\mathbf{Q}(t) &= \mathbf{K} \mathbf{y}(t) = \mathbf{K} \sum_j \varphi_j q_j(t) = \\ &\mathbf{M} \sum_j \varphi_j \omega_j^2 q_j(t) = \sum_j \mathbf{Q}_{j0} q_j(t)\end{aligned}\quad (14)$$

式中: ω_j 、 φ_j 、 $q_j(t)$ 分别为第 j 阶无阻尼固有圆频率、振动模态及模态坐标, $\omega_j = 2\pi n_j$; \mathbf{Q}_{j0} 为第 j 阶模态惯性力, $\mathbf{Q}_{j0} = \mathbf{M} \varphi_j \omega_j^2$ 。式(3)变为

$$u_i(t) = \mathbf{A}_i \sum_j \mathbf{Q}_{j0} q_j(t) = \sum_j [u_i(t)]_j \quad (15)$$

式中: $[u_i(t)]_j$ 为响应 u_i 的第 j 阶模态分量, $[u_i(t)]_j = \mathbf{A}_i \mathbf{Q}_{j0} q_j(t)$ 。根据完全二次型组合法(CQC法), 脉动峰值响应为

$$\begin{aligned}\tilde{u}_{\text{imax}} &= g \sigma_{u_i} = g \left[\sum_j \sum_k \sigma_{(u_i)_j}^2 \sigma_{(u_i)_k}^2 r_{jk} \right]^{1/2} = \\ &g \left[\sum_j \sum_k \sigma_{(u_i)_j} \sigma_{(u_i)_k} r_{jk} \right]^{1/2}\end{aligned}\quad (16)$$

式中: $\sigma_{(u_i)_j}$ 为响应 u_i 第 j 阶模态分量的均方根, $\sigma_{(u_i)_j} = \mathbf{A}_i \mathbf{Q}_{j0} \sigma_{q_j}$; r_{jk} 为模态响应的相关系数, $r_{jk} = \sigma_{q_j q_k}^2 / (\sigma_{q_j} \sigma_{q_k})$, $\sigma_{q_j q_k}^2$ 为模态响应的协方差。式(16)进而可以表示为

$$\begin{aligned}\tilde{u}_{\text{imax}} &= g \sum_j \sum_k \sigma_{(u_i)_j} \sigma_{(u_i)_k} r_{jk} / \sigma_{u_i} = g \sum_j \sigma_{(u_i)_j} \cdot \\ &\sum_k \sigma_{(u_i)_k} r_{jk} / \sigma_{u_i} = g \sum_j \sigma_{(u_i)_j} \omega_j = \\ &\mathbf{A}_i \sum_j \mathbf{Q}_{ej} \omega_j\end{aligned}\quad (17)$$

式中: ω_j 为加权因子, $\omega_j = \sum_k \sigma_{(u_i)_k} r_{jk} / \sigma_{u_i}$; \mathbf{Q}_{ej} 为模态等效静风荷载

$$\mathbf{Q}_{ej} = \mathbf{Q}_{j0} g \sigma_{q_j} = \mathbf{M} \varphi_j \omega_j^2 g \sigma_{q_j} \quad (18)$$

根据式(7)、(17), 前面推导的脉动风等效静风

荷载可表示成模态等效静风荷载的加权组合

$$\tilde{Q}_{\text{eq}} = \sum_j \mathbf{Q}_{ej} \omega_j \quad (19)$$

若采用平方总和开方法(SRSS法)计算最大脉动响应 \tilde{u}_{imax} , 则式(16)中不计响应模态分量的交叉项或称耦合项, 这相当于将模态响应相关系数 r_{jk} 换为 δ_{jk} (Kronecker 符号), 这时模态等效静风荷载仍然由式(19)表示, 但加权因子变为 $\omega_j = \sigma_{(u_i)_j} / \sigma_{u_i}$ 。

1.2 等效静风荷载背景分量与共振分量的组合

根据结构风荷载和风致响应可以视为背景分量与共振分量叠加的概念, 等效静风荷载也可以表示为背景分量与共振分量的组合。类似式(7)、(16), 背景响应均方根和共振响应均方根分别为

$$\begin{aligned}\sigma_{u_{iB}} &= (\mathbf{A}_i \sigma_{Q_B}^2 \mathbf{A}_i^T)^{1/2} \\ \sigma_{u_{iR}} &= \left[\sum_j \sum_k \sigma_{(u_{iR})_j} \sigma_{(u_{iR})_k} r_{jk} \right]^{1/2}\end{aligned}\quad (20)$$

式中: $\sigma_{Q_B}^2$ 为背景荷载 $\mathbf{Q}_B(t)$ 的协方差矩阵; $\sigma_{(u_{iR})_j}$ 为共振响应 u_{iR} 的第 j 阶模态分量的均方根。于是脉动峰值响应为

$$\begin{aligned}\tilde{u}_{\text{imax}} &= g \sigma_{u_i} = g \sqrt{\sigma_{u_{iB}}^2 + \sigma_{u_{iR}}^2} = g \frac{\sigma_{u_{iB}}^2}{\sigma_{u_i}} + \\ &g \frac{\sigma_{u_{iR}}^2}{\sigma_{u_i}} = g \sigma_{u_{iB}} \frac{\sigma_{u_{iB}}}{\sigma_{u_i}} + g \sum_j \sigma_{(u_{iR})_j} \cdot \\ &\sum_k \sigma_{(u_{iR})_k} r_{jk} / \sigma_{u_i} = g \sigma_{u_{iB}} \omega_B + \\ &g \sum_j \sigma_{(u_{iR})_j} \omega_{jR} = \mathbf{A}_i (\mathbf{Q}_{eB} \omega_B + \\ &\sum_j \mathbf{Q}_{ejR} \omega_{jR})\end{aligned}\quad (21)$$

式中: $g \sigma_{u_{iB}} \omega_B$ 、 $g \sum_j \sigma_{(u_{iR})_j} \omega_{jR}$ 分别为脉动峰值响应的背景分量和共振分量, ω_B 、 ω_{jR} 为加权因子, $\omega_B = \sigma_{u_{iB}} / \sigma_{u_i}$, $\omega_{jR} = \sum_k \sigma_{(u_{iR})_k} r_{jk} / \sigma_{u_i}$ 。根据式(21)得等效静风荷载背景分量和共振分量分别为

$$\begin{aligned}\mathbf{Q}_{eB} &= g \sigma_{Q_B}^2 \mathbf{A}_i^T / \sigma_{u_{iB}} \\ \mathbf{Q}_{ejR} &= \mathbf{M} \varphi_{jR} \omega_{jR}^2 g \sigma_{q_{jR}}\end{aligned}\quad (22)$$

式中: φ_{jR} 、 ω_{jR} 分别为第 j 阶共振模态和共振频率。于是, 脉动风等效静态风荷载表示成背景分量与共振分量的加权组合

$$\tilde{Q}_{\text{eq}} = \mathbf{Q}_{eB} \omega_B + \sum_j \mathbf{Q}_{ejR} \omega_{jR} \quad (23)$$

2 风洞测压试验

在汕头大学风洞实验室对一个柱壳屋盖结构利用同步多点压力扫描系统 DSM3200 进行了测压试验。结构原型长为 42 m, 宽为 30 m, 墙体高度为 9 m, 屋盖高度为 6 m, 模型比例为 1:60。图 1 为

屋盖原型几何尺寸。原型为桁架结构,钢管直径为 168 mm,壁厚为 5 mm,采用 ANSYS 对结构进行有限元分析,杆件取 Link8 单元,结构阻尼比为 0.02。模型屋盖部分布置了 240 个测压点,试验模型见图 2。每个测压点的样本长度为 20 480 个数据,同步采集数据的通道数为 242,采样频率为 312.5 Hz。模拟 B 类地貌,地貌粗糙度系数 α 为 0.16,基本风压假定为 0.75 kPa,试验风速为 $11.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 3 为屋面有限元分析的网格结点分布,其中四周结点固定约束。

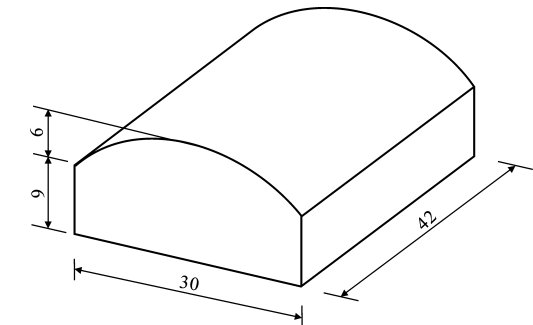


图 1 柱壳屋盖几何尺寸(单位:m)

Fig. 1 Geometry Dimension of Cylinder Roof(Unit:m)

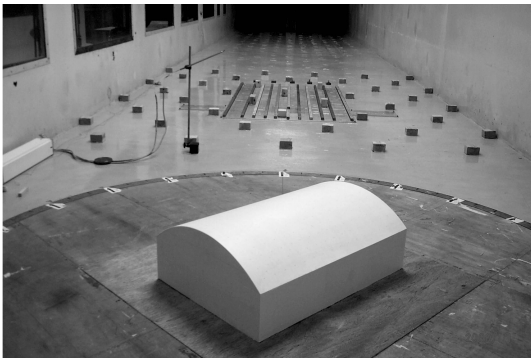


图 2 风洞试验模型

Fig. 2 Test Model of Wind Tunnel

3 风致响应和等效静风荷载

根据信号截止频率和模型几何缩比及风速缩比,得原型截止频率为 7.82 Hz,对应由 ANSYS 软件模态分析的屋盖结构第七十二阶固有频率,因此在结构风致响应分析中采用前 70 阶模态。表 1~3 分别为 0°、45°、90°风向角在利用 CQC 法和 SRSS 法计算的屋盖部分结点的竖向位移峰值响应 \hat{u}_i ,其中 0°、45°、90°风向角的最大脉动位移峰值响应分别位于图 3 中第二列的结点 22、第九列的结点 150 及第十列的结点 163 上(表 1~3 中带 * 数据)。从表 1~3 可知:由于 SRSS 法没有计入模态响应的耦合

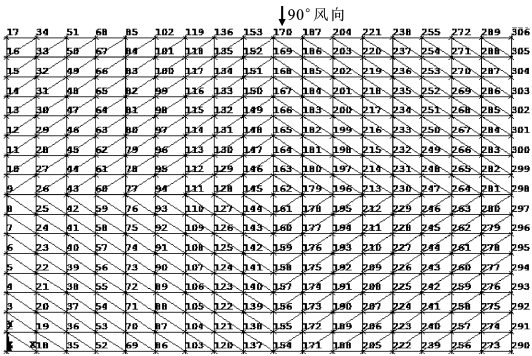


图 3 屋面有限元分析网格结点分布

Fig. 3 Grid Node Distribution of Roof for Finite Element Analysis

项,因此所计算的结点竖向位移峰值响应普遍小于 CQC 法的计算结果。3 种风向角的最大脉动位移峰值响应误差分别为 8.53%、8.73%、5.31%,但部分结点用这两种方法计算的误差超过 10%,这样的误差是不应当被忽略的。

图 4~6 分别为 0°风向角第二列结点、45°风向角第九列结点和 90°风向角第十列结点上的等效静风荷载和平均风荷载的分布,其中 F_{ESWL1} 表示由模态等效静风荷载加权组合计算的等效静风荷载分布, F_{ESWL2} 表示由背景分量和共振分量加权组合计算的等效静风荷载分布, F_{MWL} 表示平均风荷载分布。从图 4~6 可以看出:各个风向角下两种组合方法计算的各列结点上的等效静风荷载都能形成荷载包络。从图 4 可知:由于 0°风向角来流与柱面屋盖母线平行,所以平均风荷载很小,这时脉动风产生的等效静风荷载占主导地位,但对于 45°、90°风向角,平均风荷载的分布与等效静风荷载的分布比较接近。

表 4~6 分别为 0°、45°、90°风向角以两种组合方法(模态等效静风荷载加权组合与背景分量和共振分量加权组合)计算的部分结点的等效静风荷载、平均风荷载和它们的比值。从表 4 可以看出:0°风向角大部分结点上产生峰值响应的等效静风荷载远大于平均风荷载的,45°、90°风向角也有部分结点的等效静风荷载与平均风荷载的比值大于 2。等效静风荷载与平均风荷载的比值相当于中国荷载规范中的风振系数,可见对于大跨屋盖结构,在荷载设计中应用中国规范的风振系数存在明显的缺陷。

表 7 为 0°、45°、90°风向角在最大峰值响应结点上以两种组合方法计算的峰值响应和平均风荷载产生的响应与其比值,其中 \hat{u}_{i1} 为模态等效静风荷载加权组合计算的等效静风荷载产生的峰值响应; \hat{u}_{i2} 为背景分量和共振分量加权组合计算的等效静风荷

载产生的峰值响应。从表 7 可知:在 45°、90°风向角产生最大峰值响应的结点上,平均风荷载产生的响应只占等效静风荷载产生的峰值响应的 60%左右,尤其在 0°风向角产生最大峰值响应的结点上,平均风荷载产生的响应在等效静风荷载产生的峰值响应中还占不到 15%;另外,在 45°、90°风向角产生最大峰值响应的结点上,脉动峰值响应中背景分量与共振分量相当,但在 0°风向角产生最大峰值响应的结点上,共振分量超过了背景分量。这些说明大跨屋盖脉动风致响应中共振分量占有很大比例。

表 1 0°风向角部分结点的竖向位移峰值响应

结 点		22	26	33	150	155	163	276	281	288
位移峰 值/m	CQC 法	0.059 8 *	0.040 5	0.031 2	0.046 9	0.038 2	0.019 3	0.028 9	0.040 1	0.026 7
	SRSS 法	0.054 7 *	0.036 2	0.028 7	0.042 5	0.035 4	0.017 9	0.026 5	0.036 9	0.023 7
相对误差/%		8.53	10.62	8.01	9.38	7.33	7.25	8.30	7.98	11.24

表 2 45°风向角部分结点的竖向位移峰值响应

结 点		22	26	33	150	155	163	276	281	288
位移峰 值/m	CQC 法	0.017 6	0.037 9	0.030 4	0.048 1 *	0.029 5	0.034 1	0.017 8	0.029 3	0.027 5
	SRSS 法	0.016 3	0.034 6	0.028 7	0.043 9 *	0.026 7	0.031 9	0.015 4	0.027 3	0.025 8
相对误差/%		7.39	8.71	5.59	8.73	9.49	6.45	13.48	6.83	6.18

表 3 90°风向角部分结点的竖向位移峰值响应

结 点		22	26	33	150	155	163	276	281	288
位移峰 值/m	CQC 法	0.015 1	0.019 8	0.034 0	0.027 8	0.036 2	0.050 8 *	0.027 9	0.032 8	0.016 9
	SRSS 法	0.013 8	0.018 7	0.031 6	0.024 9	0.034 7	0.048 1 *	0.026 4	0.030 5	0.015 7
相对误差/%		8.61	5.56	7.06	10.43	4.14	5.31	5.38	7.01	7.10

表 4 0°风向角部分结点的两种风荷载

结 点	22	26	33	150	155	163	276	281	288
F_{ESWL1}/N	858.7	1 768.5	2 210.3	1 769.5	987.6	1 687.5	1 158.7	2 986.3	1 678.1
F_{ESWL2}/N	873.9	1 805.3	2 184.9	1 785.3	965.8	1 654.7	1 196.8	2 864.5	1 698.3
F_{MWL}/N	10.30	31.10	10.70	120.90	84.80	96.70	942.76	1 101.30	942.49
$F_{ESWL1} \cdot F_{MWL}^{-1}$	83.37	56.86	206.57	14.64	11.65	17.45	1.23	2.71	1.78
$F_{ESWL2} \cdot F_{MWL}^{-1}$	84.84	58.05	204.19	14.77	11.39	17.11	1.27	2.60	1.80

表 5 45°风向角部分结点的两种风荷载

结 点	22	26	33	150	155	163	276	281	288
F_{ESWL1}/N	658.9	786.6	257.8	593.1	205.8	257.1	948.2	3 148.2	—254.3
F_{ESWL2}/N	674.1	768.5	278.4	585.2	215.4	268.9	936.8	3 125.6	—226.3
F_{MWL}/N	423.6	511.7	84.3	383.6	132.7	164.3	784.9	1 438.2	—157.8
$F_{ESWL1} \cdot F_{MWL}^{-1}$	1.56	1.54	3.06	1.55	1.55	1.56	1.21	2.19	1.61
$F_{ESWL2} \cdot F_{MWL}^{-1}$	1.59	1.50	3.30	1.53	1.62	1.64	1.19	2.17	1.43

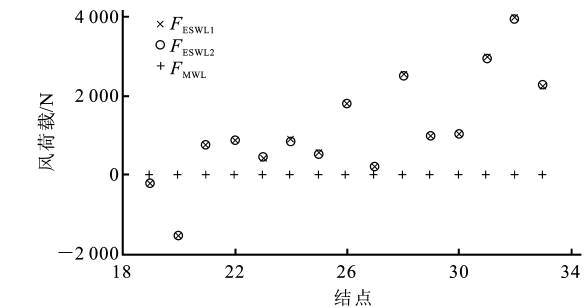
表 6 90°风向角部分结点的两种风荷载

结 点	22	26	33	150	155	163	276	281	288
F_{ESWL1}/N	469.8	1 058.6	168.5	128.4	135.7	1 468.9	506.8	1 390.9	—128.6
F_{ESWL2}/N	475.6	1 028.2	156.9	125.4	142.5	1 441.2	511.2	1 413.6	—131.8
F_{MWL}/N	439.600	848.940	11.047	185.900	123.600	1 372.600	374.500	1 052.700	—2.900
$F_{ESWL1} \cdot F_{MWL}^{-1}$	1.07	1.25	15.25	0.69	1.10	1.07	1.35	1.32	44.34
$F_{ESWL2} \cdot F_{MWL}^{-1}$	1.08	1.21	14.20	0.67	1.15	1.05	1.37	1.34	45.45

表 7 最大峰值响应结点上的响应

Tab. 7 Responses of Nodes with Maximum Peak Value Response

风向角/ (°)	最大峰值响应 所在结点	平均风荷载 产生的响应 \bar{u}_i	F_{ESWL1} 产生的 峰值响应 \hat{u}_{i1}	$(\bar{u}_i \cdot \hat{u}_{i1}^{-1})/\%$	脉动峰值响应 的背景分量	脉动峰值响应 的共振分量	F_{ESWL2} 产生的 峰值响应 \hat{u}_{i2}	$(\bar{u}_i \cdot \hat{u}_{i2}^{-1})/\%$
0	22	0.008 6	0.059 8	14.38	0.015 4	0.037 4	0.061 4	14.01
45	150	0.029 7	0.048 1	61.75	0.009 7	0.010 6	0.050 0	59.40
90	163	0.031 8	0.050 8	62.60	0.011 2	0.008 2	0.051 2	62.11



屋盖风致响应计算中考虑模态耦合项的影响。

(2)对于大跨柱壳屋盖结构,许多结点上产生峰值响应的等效静风荷载远大于平均风荷载,尤其是风场来流平行于柱壳母线的情况。可见对于大跨屋盖结构,在荷载设计中应用中国规范的风振系数存在明显缺陷。

(3)屋盖峰值响应中相当大的部分来自于脉动峰值响应,而其中共振分量又占有较大比例,因此屋盖风荷载设计中应当充分考虑脉动风效应以及共振效应。

参考文献:

References:

[1] XIE J, IRWIN P A, KILPATRICK J, et al. Determination of Wind Loads on Large Roofs and Equivalent Gust Factors[C]//Wind and Structures Editorial Committee. International Symposium on Wind and Structures for the 21st Century. Korea: Cheju Publishing Company, 2000: 417-424.

[2] HOLMES J D. Optimised Peak Load Distribution[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1): 267-276.

[3] HOLMES J D. Effective Static Load Distributions in Wind Engineering[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(2): 91-109.

[4] GINGER J D, REARDON G F, WHITBREAD B J. Wind Load Effects and Equivalent Pressures on Low-Rise House Roofs[J]. Engineering Structures, 2000, 22(6): 638-646.

[5] ZHOU Y, KAREEM A, GU M. Equivalent Static Buffeting Loads Effects on Structures [J]. Journal of Structure Engineering, 2000, 126(8): 989-992.

[6] CHEN X, KAREEM A. Equivalent Static Wind Loads for Buffeting Response of Bridges[J]. Journal of Structure Engineering, 2001, 127(12): 1 467-1 475.

[7] KASPERSKI M, NIEMANN H J. The LRC (Load-Response-Correlation) Method—a General Method of Estimating Unfavourable Wind Load Distributions for Linear and Non-linear Structural Behaviour[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1): 1 753-1 763.

图 4 0°风向角第二列结点的风荷载分布

Fig. 4 Distributions of Wind Loads on the 2nd Row Nodes for Azimuth of 0°

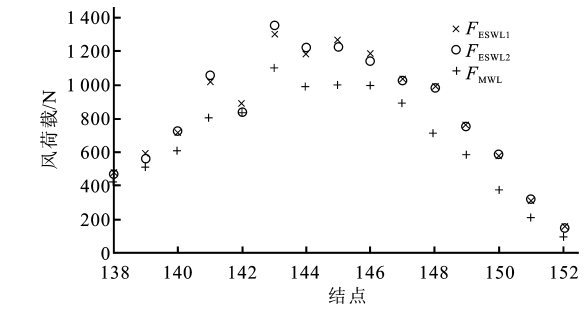


图 5 45°风向角第九列结点的风荷载分布

Fig. 5 Distributions of Wind Loads on the 9th Row Nodes for Azimuth of 45°

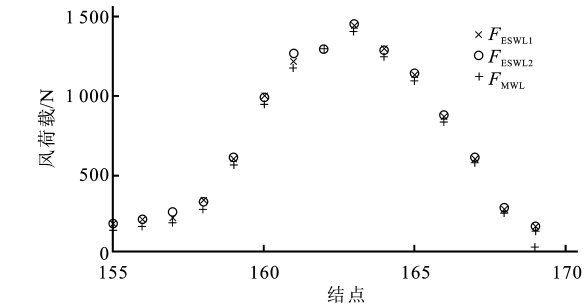


图 6 90°风向角第十列结点的风荷载分布

Fig. 6 Distributions of Wind Loads on the 10th Row Nodes for Azimuth of 90°

4 结 语

(1)以 SRSS 法计算屋盖风致响应由于忽略模态响应的耦合项,因此所计算的结点竖向位移峰值响应普遍小于 CQC 法的计算结果,在部分结点上两种方法计算结果误差是比较大的,所以有必要在