

文章编号: 1000-4750(2016)02-0104-07

TTU 标准模型表面风压大涡模拟及 风洞试验的对比研究

周 晷 毅, 祖 公 博, 顾 明

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 以低矮建筑标准模型TTU(德州理工大学)模型为考察对象, 基于专业计算流体动力学软件FLUENT, 对1:50缩尺模型进行了大涡模拟研究, 并在边界层风洞中对该比例模型进行了风洞试验研究, 将大涡模拟结果与风洞试验、场地实测数据进行了比较。结果表明, 大涡模拟得到的建筑模型表面平均及脉动风压与风洞试验、现场实测结果吻合较好, 没有雷诺数效应的足尺低矮建筑表面的动态风压可通过缩尺模型的大涡模拟进行预测。

关键词: TTU国际标模; 风压; 风洞试验; 数值模拟; 大涡模拟

中图分类号: TU317.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.06.0504

LARGE EDDY SIMULATION AND WIND TUNNEL TEST ON TTU BUILDING MODEL

ZHOU Xuan-yi, ZU Gong-bo, GU Ming

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on large eddy simulation, the wind pressure on the surface of standard low-rise building model TTU at a scale of 1:50 was numerically simulated through computational fluid dynamics software Fluent. At the same time, the wind tunnel test of TTU model with the same scale was carried out. The results of numerical simulation were compared with those obtained from the wind tunnel test and the field observation. The comparisons showed that the mean and dynamic pressure distribution on the model surface obtained by LES simulation is in good agreement with the results from the wind tunnel test and field observation. Thus, large eddy simulation combined with a scaled model can be used to predict the dynamic wind pressures on full-scale low-rise building with no Reynolds number effect.

Key words: TTU building model; wind pressure; wind tunnel test; numerical simulation; large eddy simulation

大量的台风灾害报告^[1-2]显示, 极端风环境下最易遭到破坏的结构是低矮建筑。近三十年来, 风工程研究者们围绕低矮房屋风荷载开展了大量研究, 其中一些建筑原形在实际风场下的测量实验可得到真实反映建筑表面风压的实测数据, 为开展结构风效应研究提供了参考标准。在这类原型实验中, 围绕美国德州理工大学风工程研究现场实验室(Texas Tech Wind Engineering Research Field

Laboratory, WERFL)的TTU建筑模型^[3-4], 学者们开展了大量风洞实验^[5-8]和数值模拟研究。Bekele和Hangan^[9]、顾明等^[10]采用雷诺时平均(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)方法对TTU模型周围流场进行了CFD(Computational fluid dynamics)数值模拟, 得到的建筑表面平均风压与实测结果吻合较好。然而, 由于该方法基于时均的Navier-Stokes方程, 得到的脉动压力与实测结果差别较大, 无法

收稿日期: 2014-06-11; 修改日期: 2014-11-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51278368, 51478359); 科技部国家重点实验室基金项目(SLDRCE14-B-10)

通讯作者: 周晷毅(1975-), 男, 湖南长沙人, 副研究员, 博士, 主要从事结构风工程研究(E-mail: zhouxytj@tongji.edu.cn).

作者简介: 祖公博(1988-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士生, 主要从事结构风工程研究(E-mail: gbzu@hku.hk);

顾明(1957-), 男, 江苏兴化人, 教授, 博士, 主要从事结构风工程研究(E-mail: minggu@tongji.edu.cn).

反映瞬时流场信息。Selvam^[11]采用较稀疏网格的大涡模拟(Large eddy simulation, LES)方法对实际尺寸的TTU建筑进行了数值模拟, 预测了模型表面的平均风压和峰值风压, 其平均风压在大部分位置与实测结果接近, 但对屋盖表面迎风前缘附近风压的预测与实测结果欠缺一致性。

由于流动分离区域的风场特性较为复杂, 为了准确模拟该区域的真实流动, 需要对粘性底层进行求解, 这就需要在粘性底层内设置若干层网格。密集的网格布置导致足尺建筑的 CFD 数值模拟模型具有巨大的网格数, 这是现阶段计算条件难以承受的。因而一般足尺建筑物的大涡模拟模拟往往只能采用较稀疏的网格布置。为了克服这一困难, 本文采用 LES 方法, 基于商业软件 FLUENT 对缩尺后的 TTU 模型进行了精细网格划分, 以直接求解粘性底层的大涡模拟, 并与相同缩尺比模型的风洞实验结果进行比较, 验证了大涡模拟结果的准确性。同时与 TTU 实测结果进行了对比, 以考察缩尺建筑物大涡模拟方法预测没有雷诺数效应的足尺建筑表面风压的有效性。

1 LES 数值模拟方法

1.1 控制方程

大涡模拟方法的控制方程为空间滤波后的 N-S 方程^[12]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; u_i 、 u_j 为速度分量; p 为压力; μ 为流体运动粘度; 式中带有上划线的量为滤波后的场变量; $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$ 被定义为亚格子应力。为了使方程封闭, 需要建立亚格子模型。常用的 Smagorinsky 亚格子模型因其形式简单, 数值运算稳定, 成为一种广泛应用的亚格子模型。在 Smagorinsky 亚格子模型中:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = C_d \alpha_{ij} \quad (3)$$

式中: $\alpha_{ij} = -2\bar{\Delta}^2 \left| \bar{S} \right| \bar{S}_{ij}$ ($\bar{\Delta}$ 为格子过滤尺寸)。由于该方法中模式系数 C_d 为常数, 存在耗散过大的问题, 故本文采用最小误差法动态确定模式系数 C_d ^[13]。

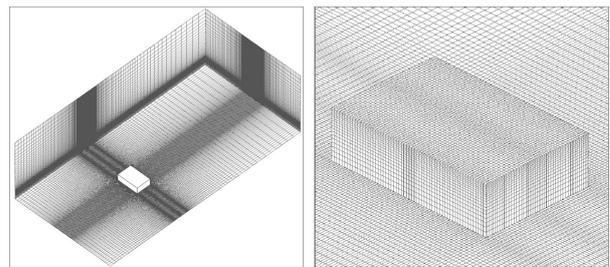
$$C_d = \frac{M_{ij} L_{ij}}{M_{ij} M_{ij}} \quad (4)$$

式中: $L_{ij} = \overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} - \overline{\tilde{u}_i} \overline{\tilde{u}_j}$; $M_{ij} = 2(\Delta_2^2 \left| \bar{S} \right| \bar{S}_{ij} - \Delta_1^2 \left| \bar{S} \right| \bar{S}_{ij})$ 。这一动态确定模式系数的方法, 即动态 Smagorinsky 方法(Dynamic Smagorinsky Model), 该方法比标准 Smagorinsky 模型更合理, 但缺点是会导致较大的数值震荡。为了克服计算的困难, 一般采用平均系数法, 即对式(4)右端项的分子分母分别求系综平均, 最终的模式系数为:

$$C_d = \frac{\langle M_{ij} L_{ij} \rangle}{\langle M_{ij} M_{ij} \rangle} \quad (5)$$

1.2 网格划分和算法

1) 计算区域: 计算域大小为 $15L \times 10H \times 5B$, 模型上游来流区域为 $5L$, 下游尾流区为 $10L$, 如图 1(a)所示。



(a) 计算区域 (b) TTU 模型

图 1 计算域及网格布置

Fig.1 Calculation region and the mesh discretization

2) 网格划分: 计算域采用非均匀结构化网格划分方法, 共计 1 800 204 个六面体网格(图 1(b))。在 TTU 模型附近, 为了准确模拟近壁面流动, 采用较密网格布置, 靠近模型的第一层网格高度为 0.0005 m, 对应的壁面 $y^+ < 5$; 在远离 TTU 模型位置采用较稀疏网格布置, 网格伸展率不超过 1.1。

3) 边界条件: 基于 Fluent 内置的 RFG(Random flow generation)方法^[14]产生大涡模拟脉动速度入口边界条件。采用基于 RANS 的大气边界层平衡自保持边界条件方法^[15]定义平均风速、湍动能 k 和湍动能耗散率 ε 剖面, 如式(6)~式(8)所示, 并以此作为 RFG 方法的主要输入参数。

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (6)$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{C_1 \cdot \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) + C_2} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z+z_0)} \sqrt{C_1 \cdot \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) + C_2} \quad (8)$$

式中： u_* 为摩擦速度； κ 为卡曼常数； C_μ 为模型常数； z 为距地面高度； z_0 为地面粗糙长度； C_1 和 C_2 可以通过对风洞试验湍动能剖面的拟合得到，本文采用分段拟合：在0.2 m高度以下， $C_1 = 40.2$ ， $C_2 = -160.3$ ；在0.2 m以上， $C_1 = -245.7$ ， $C_2 = 2684.4$ 。Zheng等^[16]用该方法对标准高层建筑模型绕流进行了大涡模拟，得到了与风洞实验较吻合的建筑表面平均和脉动风压结果。模型表面及计算域底面采用无滑移壁面条件；计算域出口采用压力出口，即压力梯度为零；计算域两侧及顶面采用对称边界。

4) 求解方法：采用PISO算法对速度压力耦合方程进行求解。为了更快的得到统计稳定的湍流场，在开始大涡模拟前，采用Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对流场进行定常模拟，将得到的流场结果作为大涡模拟的初始条件。动量方程、湍动能及湍动能耗散率方程均采用二阶精度离散格式。动量方程采用Bounded Central Differencing离散格式，时间离散为二阶全隐格式，时间步长 $\Delta t = 0.0005$ s，模拟实际流动时间20 s。

2 TTU 模型风洞试验

刚性模型测压风洞试验在同济大学土木工程防灾减灾国家重点实验室的TJ-2风洞中进行。TJ-2风洞为回流式的边界层风洞，该风洞长15 m，宽3 m，高2.5 m。本文根据风洞试验阻塞比的要求以及其他学者普遍采用的缩尺比例，确定几何缩尺比为1/50，缩尺模型的主要尺寸为 $L \times B \times H = 276 \text{ mm} \times 184 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$ ，顶面坡度斜率为1/60(图2)。试验模型表面测压点的布置见图3。

本文风洞试验及数值模拟的风压系数都采用与现场实测^[17]相同的处理方法，即以TTU模型屋檐高度处来流的平均风速对表面风压无量纲化，相应的平均风压系数 $C_{p\text{mean}}$ 、脉动风压系数 $C_{p\text{rms}}$ 和峰值风压系数 $C_{p\text{peak}}$ 分别为：

$$C_{p\text{mean}} = \frac{\bar{p} - p_0}{0.5\rho\bar{U}_H^2} \quad (9)$$

$$C_{p\text{rms}} = \frac{\sigma_p}{0.5\rho\bar{U}_H^2} \quad (10)$$

$$C_{p\text{peak}} = \frac{\hat{p} - p_0}{0.5\rho\bar{U}_H^2} \quad (11)$$

式中： \bar{p} 为采样周期内得到的平均风压； p_0 为参考静压； ρ 为空气密度； \bar{U}_H 为TTU模型屋檐高度处来流的平均风速； σ_p 为脉动风压均方根值； \hat{p} 为仿照现场实测直接从风洞试验/数值模拟风压时程样本中挑选的风压极值。



图2 边界层风洞中的TTU模型

Fig.2 Model of TTU building in boundary layer wind tunnel

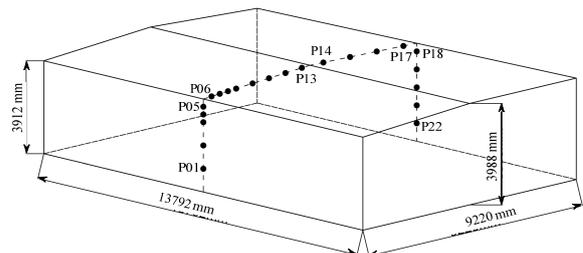


图3 TTU实际建筑的尺寸及测点布置

Fig.3 Dimension of TTU building and layout of measuring points

3 数值模拟结果及与风洞试验、实测的比较

3.1 风场比较

图4和图5分别给出了风洞实验(图中“WT-TJ”)和数值模拟(模型前 $5H$ 位置)(图中“LES-TJ”)的平均风速剖面和流向湍流度剖面，并与TTU的现场实测风场情况^[4]进行了比较，图6为风洞实验和数值模拟在屋檐高度风速时程的功率谱。由图可见，风洞试验和数值模拟的风场与实测风场具有良好的一致性。

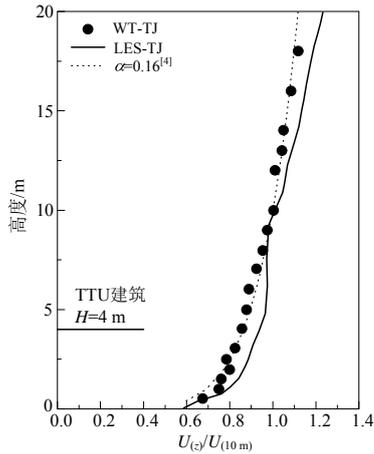


图 4 平均风速剖面

Fig.4 Mean velocity profile

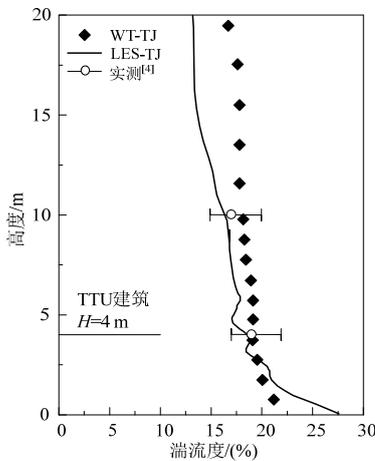


图 5 湍流度剖面

Fig.5 Turbulence intensity profile

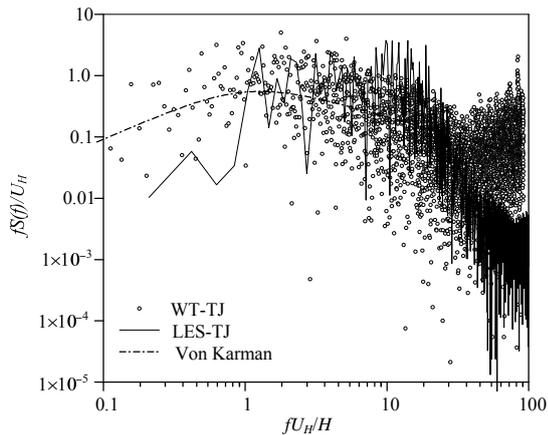


图 6 沿流向速度谱

Fig.6 Along-wind velocity spectra

3.2 流场分析

图 7 给出了计算域对称面的时均风速矢量图。由图可见，在屋檐尖角处发生较强烈的流动分离，气流在屋盖中后部发生再附现象。在建筑附近能观察到三处明显的漩涡，分别位于迎风面附近靠近地

面位置、屋盖上方迎风前缘和背风墙面的尾流区，屋脊处没有出现气流分离的情况。三处主要漩涡中，屋盖上方流动分离产生的漩涡距离建筑最近且最为明显，该漩涡对屋盖产生了明显的吸力作用，并贡献了较大的脉动能量。

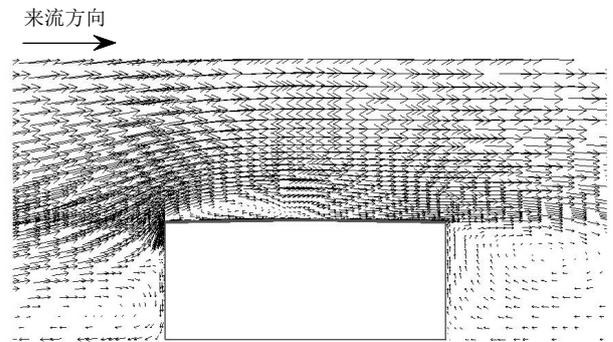


图 7 流场平均风速矢量图

Fig.7 Simulated mean velocity vector field

3.3 风压系数比较

图 8~图 10 分别给出了本文风洞试验(图中“WT-TJ”)和 LES 方法(图中“LES-TJ”)得到的 TTU 模型中线上平均、脉动和峰值风压系数，图中 A-B 为迎风墙，B-C 为屋盖，C-D 为背风墙。为体现本文方法的模拟精度，图 8~图 10 还给出了 Levitan 现场实测结果^[17](图中“实测”)、西安大略大学的风洞实验结果^[5](图中“WT-UWO”)和 Selvam 的足尺 LES 模拟结果^[11](图中“LES-Selvam”)。其中 Selvam^[11]给出了多组平均风压系数和峰值风压系数结果，本文仅选取 Selvam 认为与场地实测最接近的一组进行比较。

与文献现场实测和风洞试验结果相比，本文风洞实验所得平均风压系数(图 9)和峰值风压系数(图 10)与 TTU 的实测结果吻合良好。脉动风压系数(图 9)在迎风面比实测结果略大，但整体上比西安大略的风洞实验结果更接近实测值。

由本文的风洞试验和缩尺模型 LES 数值模拟结果进行比较可见(图 8~图 10)，整体上二者吻合得较好。除个别测点外，LES 模拟所得平均风压系数与风洞实验结果十分一致。LES 预测的脉动风压系数和峰值风压系数在屋盖中后部和背风区与风洞实验结果基本吻合，而在迎风面和屋盖迎风前缘区域略小于风洞实验。

与文献的足尺大涡模拟结果相比，本文 LES 所得平均和峰值风压系数在屋盖各个位置与实测结果更为接近。尤其是在 TTU 的屋盖表面，足尺 LES

与实测结果差异较大,而本文的缩尺模型 LES 结果与现场实测吻合良好。

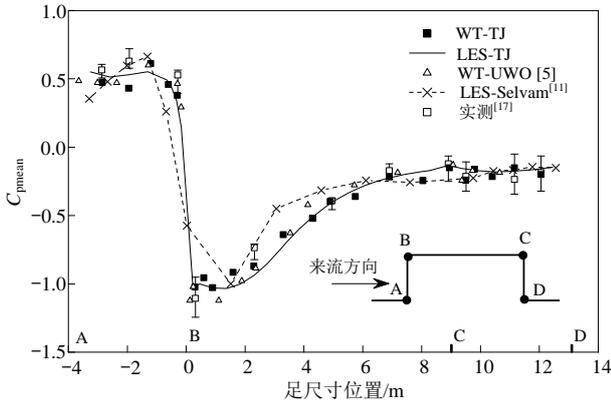


图8 平均压力系数

Fig.8 Mean pressure coefficients at mid-plane locations

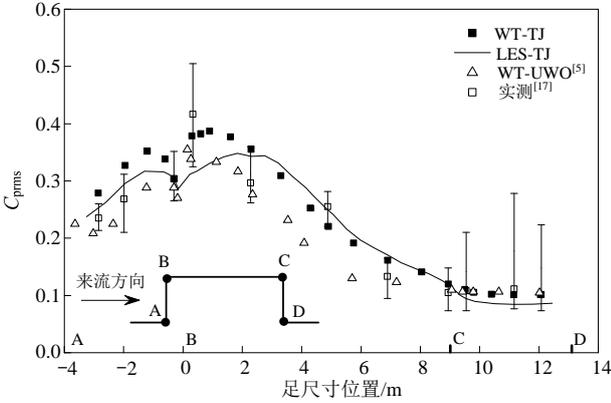


图9 脉动压力系数

Fig.9 RSM pressure coefficients at mid-plane locations

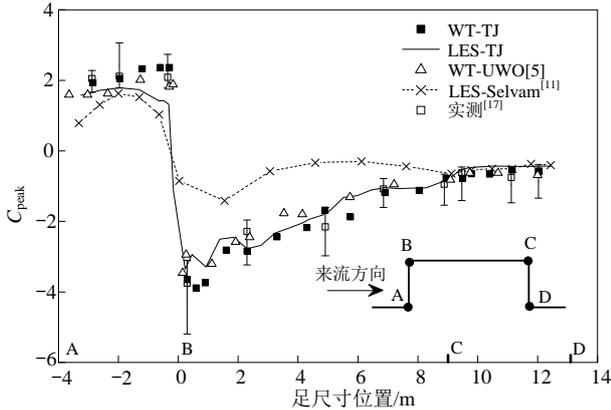


图10 峰值压力系数

Fig.10 Peak pressure coefficients at mid-plane locations

3.4 风压系数相关性比较

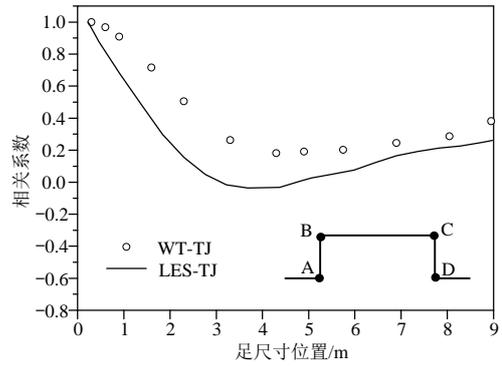
两个随机变量 X 与 Y 的相关系数定义如下:

$$\rho_{XY} = \frac{\text{Cov}(X,Y)}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}} \quad (12)$$

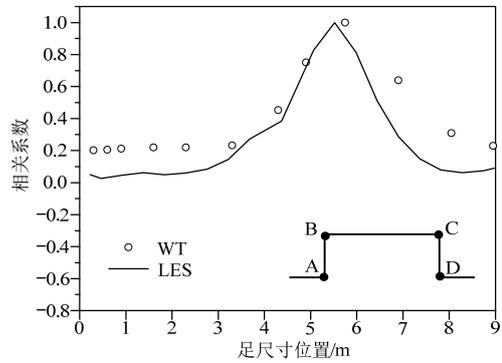
式中: X 与 Y 之间的协方差定义为 $\text{Cov}(X,Y) =$

$\overline{(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}$; $D(X)$ 和 $D(Y)$ 分别代表随机变量 X 和 Y 的方差。

图 11 给出了屋盖表面测点间(测点位置见图 3)的风压系数相关性曲线。图 11(a)为屋面迎风边缘测点 P06 与屋盖上各测点间的风压系数相关性;图 11(b)为屋脊附近测点 P14 与屋盖上各测点间的风压系数相关性。大涡模拟与风洞试验测点间风压相关性总体上具有相同的趋势,即随着距离的增大,测点脉动风压之间的相关性减弱;然而,大涡模拟结果中测点间的风压相关性比风洞试验要更弱一些。



(a) P06



(b) P14

图 11 风压系数相关性

Fig.11 Correlation of wind pressure coefficients

3.5 风压系数谱比较

图 12 为风洞试验和 LES 数值模拟所得测点的风压系数自谱比较,限于篇幅,这里仅给出部分测点的比较结果。由图 12 可以看出:在各表面上,风洞试验和 LES 数值模拟所得测点的风压系数自谱基本吻合。对于屋面迎风边缘测点 P06,LES 得到的风压系数自谱在低频区域的能量比风洞试验小,这与图 9 反映的情况一致。图中功率谱曲线没有明显的尖峰,说明 TTU 模型沿流向方向上没有发生明显的漩涡脱离现象。

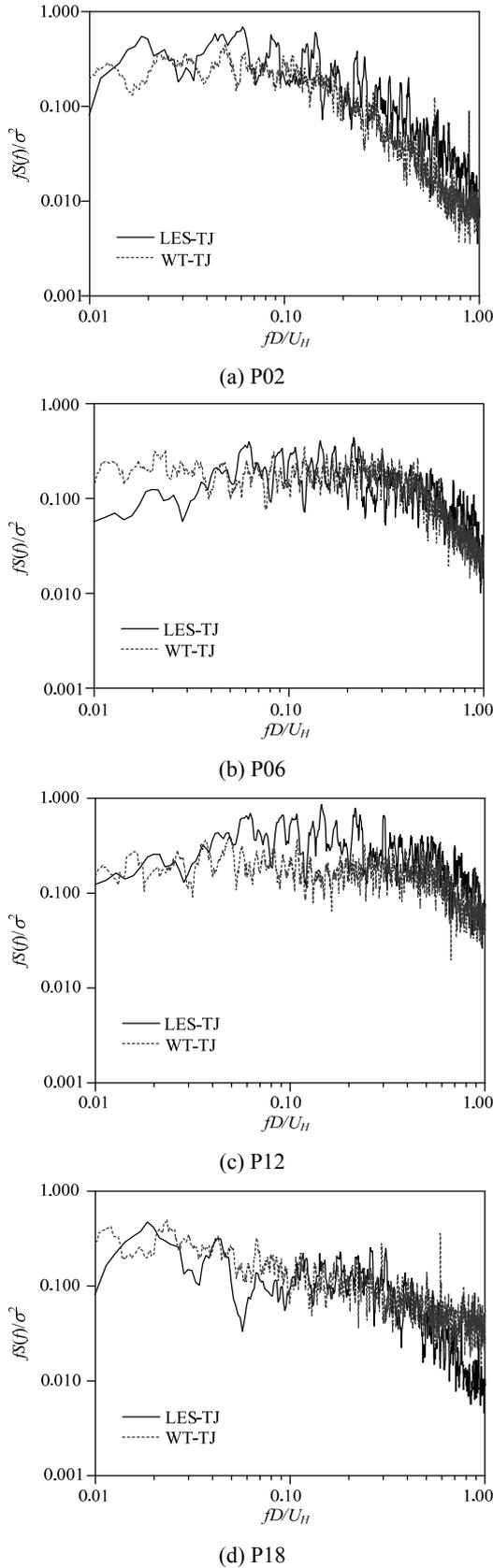


图 12 风压系数自谱

Fig.12 Spectrum of wind pressure coefficients

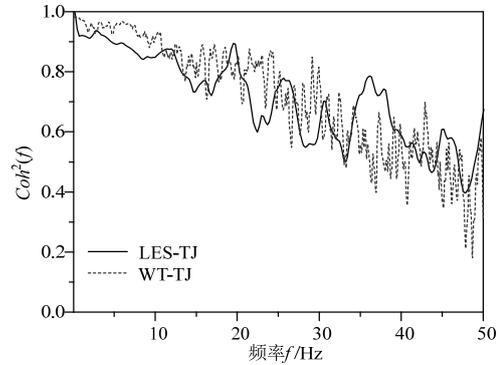
图 13 为本文风洞实验和 LES 方法所得的测点风压系数的相干性比较。测点 i 和测点 j 的脉动风

压相干函数定义如下，

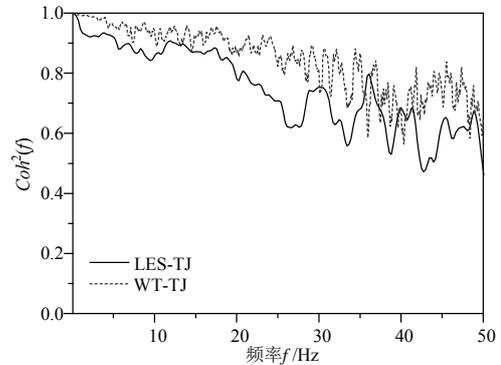
$$Coh_{ij}^2(f) = \frac{|S_{ij}(f)|}{S_{ii}(f)S_{jj}(f)} \quad (13)$$

式中： $S_{ii}(f)$ 和 $S_{jj}(f)$ 分别为测点 i 和 j 的风压自谱； $S_{ij}(f)$ 为测点 i 和 j 的风压互谱。

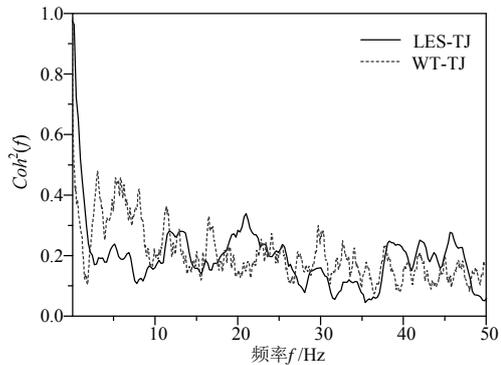
由图 13 可见，风洞试验和 LES 数值模拟所得测点风压系数相干性具有较一致的规律性，即迎风墙面相邻测点(图 13(a))和屋盖上方相邻测点(图 13(b))由于距离很近，故在各个频率点相干性均较高。而迎风墙面与背风墙面面的测点(图 13(c))、屋盖迎风前缘与后缘的测点(图 13(d))风压相干性则相对较低。与图 11 的结果类似，大涡模拟结果中测点间相关性比风洞试验要更弱一些。



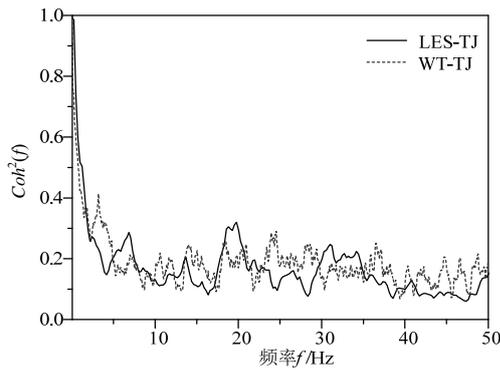
(a) P02 和 P03



(b) P06 和 P07



(c) P02 和 P21



(d) P06 和 P17

图 13 风压系数相干性

Fig.13 Coherence of wind pressure coefficients

4 结论

本文的大涡模拟与风洞试验得到的结果不仅在平均风压、脉动风压及风压相干性等统计意义上吻合较好,在风压系数频谱特性上也具有良好的一致性。同时,与足尺 TTU 模型的实测结果也吻合较好。因此,对于没有雷诺数效应问题的建筑,可基于精细划分网格的缩尺模型,采用大涡模拟能较准确地反映足尺建筑表面的动态风压。

参考文献:

- [1] Cao S Y, Ge Y J, Tamura Y. Wind damage in china caused by typhoon rananim [C]. Proceedings of the Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering. Seoul: Korea Society for Wind Engineering, 2005: 200—209.
- [2] 葛学礼, 朱立新, 于文, 等. 浙江苍南县“桑美”台风建筑灾害与抗风技术措施 [J]. 工程质量, 2006(10): 18—22.
Ge Xueli, Zhu Lixin, Yu Wen, et al. Building disaster caused by Saomai typhoon in Cangnan County, Zhejiang Province as well as the technical measure for anti-typhoon [J]. Quality of Civil Engineering and Construction, 2006 (10): 18—22. (in Chinese)
- [3] Levitan M L, Mehta K C. Texas Tech field experiments for wind loads part 1: Building and pressure measuring system [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43(1/2/3): 1565—1576.
- [4] Levitan M L, Mehta K C. Texas Tech field experiments for wind loads part 2: Meteorological instrumentation and terrain parameters [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43(1/2/3): 1577—1588.
- [5] Surry D. Pressure measurements on the Texas Tech building: Wind tunnel measurements and comparisons with full scale [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1991, 38(2/3): 235—247.
- [6] 罗攀. 基于标准模型的风洞试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- Luopan. Wind tunnel test study based on standard building models [D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)
- [7] Endo M, Bienkiewicz B, Ham H J. Wind-tunnel investigation of point pressure on TTU test building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(7): 553—578.
- [8] 谢壮宁, 刘帅, 石碧青. 低矮房屋标准模型的风洞试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 106—112.
Xie Zhuangning, Liu Shuai, Shi Biqing. Investigation into wind tunnel test of standard low-rise building model [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(6): 106—112. (in Chinese)
- [9] Bekele S A, Hangan H. A comparative investigation of the TTU pressure envelope - Numerical versus laboratory and full scale results [J]. Wind and Structures, 2002(5): 337—346.
- [10] 顾明, 杨伟, 黄鹏, 罗攀. TTU 标准风压数值模拟及试验对比[J]. 同济大学学报(自然科学版) 2006, 34(12): 1563—1567.
Gu Ming, Yang Wei, Huang Peng, Luo Pan. Wind tunnel test and numerical simulation on TTU building mode [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(12): 1563—1567. (in Chinese)
- [11] Selvam P R. Computation of pressures on texas tech university building using large eddy simulation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997(67/68): 647—657.
- [12] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method [M]. England: Pearson Education, 2007.
- [13] Lilly D K. A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method [J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1992, 4: 633—636.
- [14] Smirnov A, Shi S, Celik I. Random flow generation technique for large eddy simulations and particle-dynamics modeling [J]. Journal of Fluids Engineering-Transaction of the ASME, 2001, 123: 359—371.
- [15] Yang Y, Gu M, Chen S, Jin X. New inflow boundary conditions for modeling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97: 88—95.
- [16] Zheng D Q, Zhang A S, Gu M. Improvement of inflow boundary condition in large eddy simulation of flow around tall building [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2012, 6: 633—647.
- [17] Levitan M L, Mehta K C, Vann W P, Holmes J D. Field measurements of pressures on the Texas Tech building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1991, 38: 227—234.