

DOI: 10.7511/jslx20200903001

并列三柱体风致干扰 DDES 模拟分析

张爱社^{*1}, 高翠兰², 王元雷³

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 济南 250101; 2. 山东建筑大学 交通工程学院, 济南 250101;
3. 山东省建筑设计研究院有限公司第八分院, 济南 250001)

摘要:采用基于 SST $k-\omega$ 湍流模型的延迟分离涡模拟方法 DDES (Delayed detached eddy simulation), 对三并列线性布置柱体的风荷载和流场特性进行了数值模拟。为验证方法的有效性, 对单个三维方柱绕流进行了计算分析, 比较计算值与试验结果的风荷载特征, 两者符合较好。然后采用 DDES 研究了三并列方柱对称布置时, 间距比对中间受扰建筑风致干扰的问题。数值结果表明, 间距比较小时对受扰建筑风荷载分布有较大影响。总的来看, 当间距比约为 3.0 时, 受扰建筑的影响达到最大。同时, 数值分析了三方柱周围瞬态流场特征, 探讨了临近建筑之间的干扰机理。结果表明, SST-DDES 方法能够较好地预测绕方柱流动分离问题, 可为群体高层建筑气动相互干扰研究提供参考。

关键词:并列三柱体; 干扰效应; 延迟分离涡模拟; 风荷载; 湍流模型

中图分类号: TU312; O368 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-4708(2021)06-0748-06

1 引言

方形截面是高层建筑典型的断面形式, 风流经单个高层建筑时会产生流动分离和尾涡等复杂流动现象。实际工程中, 建筑物之间还存在着相互干扰影响, 有时这种干扰作用不能忽略, 必须进行深入探讨。由于涉及的因素多, 影响机理复杂, 群体建筑风致干扰效应仍是目前结构抗风领域研究的热点之一。群体建筑风致干扰按照相互位置可分为三类情况^[1], 即建筑物之间串列布置、并列布置和任意布置。

对于相邻建筑的风致干扰, 目前的研究大多局限于两个建筑的相互影响, 只有少部分文献考虑了三个建筑物的相互干扰问题。文献[2]通过大量试验得到了方形截面群体高层建筑干扰效应的系统性结论。研究结果指出, 对于三并列建筑, 两个施扰建筑的协同干扰作用比两个施扰建筑在其他布置情况时的影响强, 比单个施扰建筑的干扰作用也明显。文献[3]讨论了建筑物间距对三个并列建筑风压分布的影响, 结果显示在一定间距范围内, 中间受扰建筑压力变化随着间距增加而增加。总的来看, 对于相邻三个建筑的风致干扰试验研究, 由

于试验工况多和试验工作量大而使得这方面的试验研究仍有待深入开展。

随着计算机性能的提升和计算流体力学 (CFD) 的发展, 许多学者应用 CFD 方法来研究风致干扰问题。文献[4, 5]采用雷诺平均 (RANS) 模型分析了群体建筑周围的风场分布, 讨论了计算参数取值对结果的影响。文献[6]应用大涡模拟 (LES) 模型分别对单个标准模型 (CAARC 模型) 和相邻两个建筑的风荷载进行了计算, 得到了较为合理的结果, 但复杂湍流的准确预测在工程上仍是极具挑战的问题。RANS 方法通过使用近壁面区域模型能够预测流场均值, 但不能捕捉流场脉动特性。LES 模拟和直接数值模拟使用精细网格可以预测湍流平均和脉动值, 但在壁面附近仍需要尺度很小的网格, 导致计算资源消耗很大。混合 RANS/LES 方法利用了两者的优点, 即在近壁面区域采用 RANS 方法, 以减少网格数量; 在远离壁面的区域采用 LES 模拟, 保证能捕捉到大尺度分离流动。分离涡方法^[7] DES (Detached-eddy Simulation) 是混合 RANS/LES 方法之一, 是在计算效率、精度和资源要求等方面综合评价较好的方法。文献[8]对 DES 方法做了综述性分析, 指出了该方法的优缺点和发展方向。Strelets^[9] 基于 SST $k-\omega$ 模型发展了 SST-DES 模型, 进行了典型大分离流动分析, 并比较了 SST-DES, SA-DES 以及

收稿日期: 2020-09-03; 修改稿收到日期: 2020-12-27.

基金项目: 国家自然科学基金 (50678122) 资助项目.

作者简介: 张爱社* (1969-) 男, 博士, 教授

(E-mail: acclan@263.net).

URANS 的计算结果。文献[10]改进了 Strelets 的 SST-DES 模型,提出了基于 SST 模型的延迟 DDES(delayed detached-eddy simulation)方法,即 SST-DDES 实现模式。在近壁面区域布置合适的网格尺度, SST-DDES 方法包含了更多的近壁信息,提高了 RANS 和 LES 交界处的求解质量,从而可以有效模拟大分离流动问题。

本文在上述研究方法的基础上,对于高 Re 数大分离流动问题,应用有限体积法,采用基于 SST $k-\omega$ 模型的 DDES 方法数值求解流动控制方程。以此为技术手段,模拟了并列三方柱相互气动干扰问题。本文首先介绍了数值分析方法,其次给出了方柱绕流的计算结果并与试验值进行比较,最后探讨了间距比对受扰建筑风荷载的影响。

2 数值方法

不可压缩粘性流体,过滤后的连续方程和动量方程表示为

$$\partial u_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

SST $k-\omega$ 两方程湍流模型的输运方程为

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \frac{\rho k^{3/2}}{l_{\text{DDES}}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] +$$

$$2(1-F_1)\rho\sigma_{\omega 2} \left[\frac{\partial k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] / \omega + \alpha \frac{\rho}{\mu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (4)$$

式中 $\mu_t = \rho \alpha_1 k / [\max(\alpha_1 \omega, F_2 S)]$

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4), \quad F_2 = \tanh(\arg_2^4)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left[\frac{\sqrt{k}}{C_\mu \omega d_w}, \frac{500\nu}{d_w^2 \omega} \right], \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d_w^2} \right]$$

$$\arg_2 = \max \left[\frac{2\sqrt{k}}{C_\mu \omega d_w}, \frac{500\nu}{d_w^2 \omega} \right]$$

$$CD_{k\omega} = \max \left[2\rho\sigma_{\omega 2} \left[\frac{\partial k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] / \omega, 10^{-10} \right]$$

$$P_k = \min(\mu_t S^2, 10C_\mu \rho k \omega)$$

对于高 Re 数大分离流动问题,基于 SST $k-\omega$ DDES 模型,湍流长度尺度 l_{DDES} 定义为

$$l_{\text{DDES}} = l_{\text{RANS}} - f_d \max(0, l_{\text{RANS}} - l_{\text{LES}}) \quad (5)$$

式中 $l_{\text{RANS}} = \sqrt{k} / C_\mu \omega$, $l_{\text{LES}} = C_{\text{DES}} h_{\text{max}}$, h_{max} 为网格最大尺寸, C_{DES} 为 DES 常数。

$$C_{\text{DES}} = C_{\text{DES1}} F_1 + C_{\text{DES2}} (1 - F_1)$$

$$f_d = 1 - \tanh[(C_{d1} r_d)^{C_{d2}}]$$

$$r_d = (\nu_t + \nu) / [\kappa^2 d_w^2 \sqrt{0.5(S^2 + \Omega^2)}]$$

本文常数取值为

$$C_\mu = 0.09, \quad \kappa = 0.41, \quad \alpha_1 = 0.31, \quad C_{\text{DES1}} = 0.78$$

$$C_{\text{DES2}} = 0.61, \quad C_{d1} = 20, \quad C_{d2} = 3$$

3 建筑布置与数学模型

3.1 几何模型

沿横向选取三个并列建筑进行数值模拟分析。为便于与试验结果进行比较,本文采用与文献[11]类似的三建筑布置形式,如图 1 所示,建筑 A 为受扰建筑,建筑 B 和 C 为施扰建筑,三者为方形截面尺寸和高度均相同的高层建筑。本次模拟计算只考虑施扰建筑 B 和 C 关于受扰建筑 A 对称布置和对称移动 ($y = \|y_b\| = \|y_c\|$) 的情况。建筑 A 固定不动,施扰建筑 B 和 C 可移动范围为 $y/b = 1.5 \sim 9.0$, 其中 b 为建筑物宽度。建筑物 A, B 和 C 的高宽比均为 6:1。

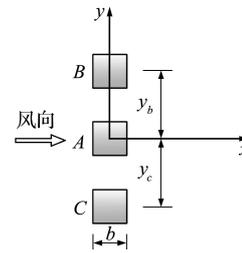


图 1 三方柱建筑并列布置

Fig. 1 Three square-cross buildings layout in parallel

3.2 计算域、网格和边界条件

计算区域取 $20H \times (5H + 2y) \times 5H$ (流向 \times 横向 \times 高度), 流向断面阻塞率小于 3%, 计算域大小满足计算风工程相关要求^[12]。由于建筑形体规则且简单, 本文计算采用结构化网格。在 DDES 方法中, RANS 和 LES 方法的切换是基于网格密度进行的。流动分离区需要布置细分网格, 即在建筑物近壁面附近要使用精细网格, 才可以捕捉流动特征的重要信息。建筑壁面附近的第一层网格厚度设为 $0.005b$, 能使得最底层网格无量纲高度 $y^+ < 5$, 平面网格剖分如图 2 所示。计算时间步长取为 0.002 s 。

计算区域的边界条件如下, 进口处采用速度入口边界条件, 速度沿入口高度呈指数规律变化, 指数 α 取 0.15。入口处的湍流度按式(6)取值。

$$I / I_0 = (z / z_0)^{-0.05 - \alpha} \quad (6)$$

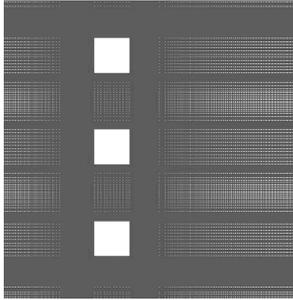


图 2 水平截面网格划分
Fig. 2 Grid layout in plan

在基于 SST $k-\omega$ 的 DDES 方法中,入口处的湍动能 k 和耗散率 ω 为

$$k = \frac{3}{2} [I(z) \cdot v(z)]^2, \quad \omega = \frac{1}{C_\mu} \frac{\epsilon}{k} \quad (7,8)$$

出口采用充分发展边界条件;计算域的侧面取对称边界,顶面取滑动边界;建筑壁面和计算域底面取无滑移边界条件。

本文数值计算在 ANSYS/Fluent 平台进行,上述入口边界条件可通过 UDF 函数输入。压力与速度的耦合采用 SIMPLEC 算法。

4 计算结果与分析

4.1 算法验证

为了正确采用基于 SST $k-\omega$ 模型的 DDES 方法来分析并列建筑之间的相互干扰问题,本文首先采用以上方法对 CAARC 标准模型进行了数值分析。在网格独立性的基础上,将分析结果与试验和相关文献的数值计算结果进行了比较,结果列入表 1。由表 1 可知,平均阻力系数 C_d 和升力系数 C_l 与试验值都很接近,阻力系数脉动值 C'_d 和升力系数脉动值 C'_l 与文献结果的误差都在可接受范围

内。这些微小误差可能是由于边界条件的设置不同而产生的。因此,本文数值方法可用于复杂流动的计算。

表 1 风力系数比较

数据来源	方法	C_d	C'_d	C_l	C'_l
文献[13]	试验	1.79	0.28	0	0.30
文献[14]	LES	1.94	0.33	0.015	0.42
文献[15]	DDES	1.88	0.21	0.007	0.32
本文	DDES	1.86	0.20	0.011	0.32

4.2 流场分析

综上所述,相邻建筑周围的流场受到多个因素的影响,本文仅讨论三个相同建筑并列,其中两个施扰建筑对称布置的情况,分析因素主要是建筑间距的影响。图 2 给出了三种典型间距比下,在 $2/3$ 建筑高度处,三个临近建筑物周围的绕流流场分布情况。对于间距比 y_b (或 y_c)/ $b=1.5$ (图 3(a)),狭管效应较明显。间隙流与建筑物外侧的剪切流相互作用,从间隙处脱落的涡与两侧柱体的尾流混合在一起,流动峰值偏斜于施扰建筑一侧,流场结构不稳定。受扰建筑尾流回流没有施扰建筑明显。随着间距增加,当间距比 y_b (或 y_c)/ b 达到 2.5 时(图 3(b)),通过间隙的流动发生对称偏斜脱落。中间受扰建筑的尾流区域较长,而两侧的施扰建筑尾流区域较小。受扰建筑的涡脱模式与两侧的施扰建筑也不同。流动经过建筑群一定距离后,逐渐形成单一的尾流区域。当间距比 y_b (或 y_c)/ $b=3.5$ 时(图 3(c)),狭管效应减弱,各个建筑物的尾流区相互影响也进一步减轻。总的来说,随着间距增大,局部的间隙流动在减弱。

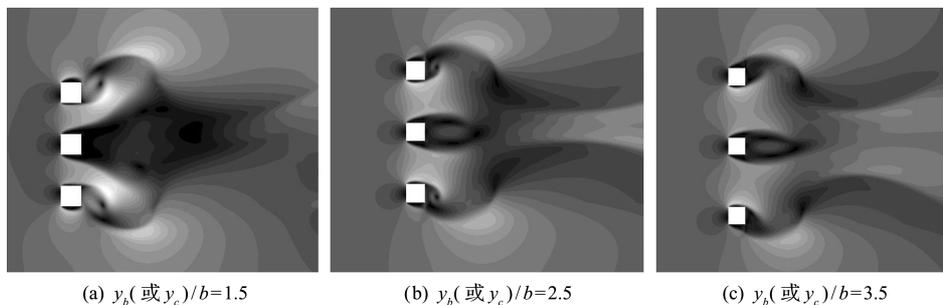


图 3 并列建筑周围流场分布
Fig. 3 Flow field around three side-by-side buildings

4.3 风压干扰分析

本文采用建筑侧面的平均和脉动风压系数来

讨论建筑表面的风压变化特征,并采用风压干扰因子 IF 来分析相邻结构间距变化对受扰建筑风压的

影响, IF 定义如下,

$$IF = \frac{\text{受扰建筑侧面(平均、脉动)风压系数}}{\text{单体建筑侧面(平均、脉动)风压系数}}$$

4.3.1 受扰建筑侧立面风压分布

本文讨论的施扰建筑 B 和 C 在受扰建筑 A 两侧对称并列布置, 因此只需选择受扰建筑 A 的一个侧立面进行分析。因为建筑 A 的侧立面位于临近建筑的通道内, 所以 A 的侧立面受到的干扰效应最为显著。为了应用上述数值方法并与试验结果^[11]进行比较, 本文计算的 $y/b = 1.5 \sim 9.0$, 递进间隔为 0.5, 共 16 种对称布置情况, 以研究受扰建筑 A 侧面平均和脉动风压受干扰特征。图 4 给出了 4 种间距布置时的平均风压系数干扰因子 IF 的分布情况(立面左边靠近迎风面)。可以看出, 当干扰间距 $y/b = 1.5 \sim 3.5$ 时, 建筑 A 侧立面靠近迎风面的位置处, 平均风压最大干扰因子 IF 达到 1.45~2.0, 并且间距越小, 干扰因子越大。整个侧立面上大部分区域的平均风压的 IF 值都大于 1, 因此可见建筑物之间平均风压的相互影响较为严重。随着间距比逐渐增大, 侧面上的最大 IF 值逐渐减小。当间距 $y/b = 7.0$ 时, 侧面上很大区域的平均风压 IF 值趋近于 1, 建筑物之间的干扰效应变得很弱。这与文献^[11]的试验结果是一致的。

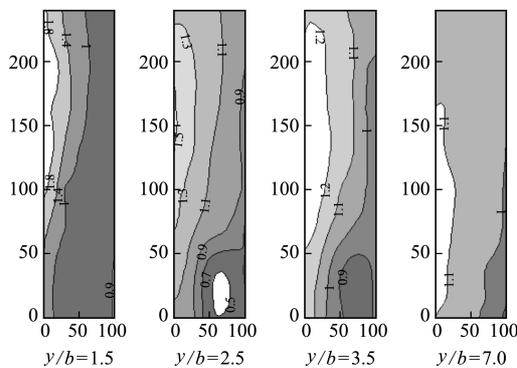


图 4 受扰建筑侧面平均风压影响因子分布
Fig. 4 Mean wind pressure IF distribution on the side wall of the disturbed building

四种典型位置处受扰建筑侧立面脉动风压干扰因子分布变化情况如图 5 所示。可以看出, 间距比越小, 脉动干扰因子 IF 值越大。当 $y/b = 1.5$ 时, 最大 IF 值达到 1.7, 位置也是靠近迎风侧; 随着间距比增加, 最大 IF 值减小, 侧面的 IF 值逐渐趋于均匀; 当间距比达到 7.0 时, 整个侧面大部分区域的 IF 值接近于 1.0, 干扰效应基本消失。

4.3.2 受扰建筑背风面风压分布

根据图 3 表征的三并列建筑在三种间距比情况下的流场分布情况, 受扰建筑迎风面受到的干扰

效应不是很明显, 而受扰建筑背风面的流动却变得较为复杂, 所以本节主要讨论背风面风压分布特征。图 6 和图 7 分别表示四种典型位置处受扰建筑背风面平均风压 IF 值和脉动风压 IF 值的分布特点。可以看出, 当间距比小于 2.5 时, 背风面平均风压最大 IF 值约为 1.2; 当间距比大于 3.5 时, 背风面大部分区域的平均 IF 值都小于 1.1; 间距比达到 7.0 时, 背风面的干扰影响基本消失。背风面的结构顶部脉动风压 IF 值(图 7)基本在 1.05 以内, 当间距比等于 7.0 时, 干扰因子接近于 1.0。

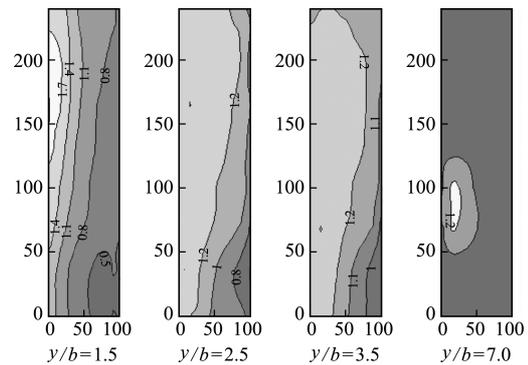


图 5 受扰建筑侧面脉动风压影响因子分布
Fig. 5 RMS wind pressure IF distribution on the side wall of the disturbed building

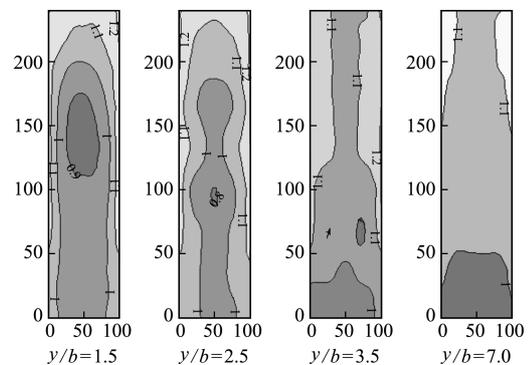


图 6 受扰建筑背风面平均风压影响因子分布
Fig. 6 Mean wind pressure IF distribution on the back wall of the disturbed building

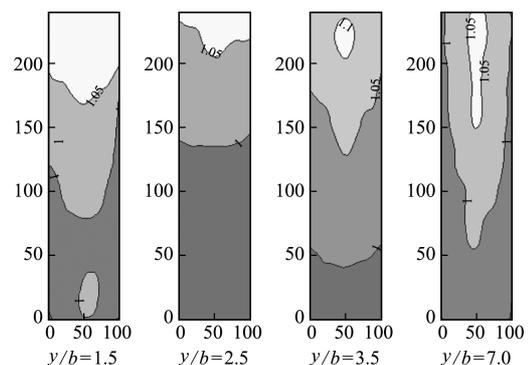


图 7 受扰建筑背风面脉动风压影响因子分布
Fig. 7 RMS wind pressure IF distribution on the back wall of the disturbed building

5 结 论

为模拟高 Re 数湍流流经建筑物的分离流动, 本文采用基于 SST k - ω 模型的 DDES 方法, 数值模拟了三个并列布置建筑的气动干扰问题, 讨论了建筑周围流场、风压分布与相邻建筑间距之间的关系, 结论如下。

(1) 应用基于 SST k - ω 模型的 DDES 方法对三并列建筑之间的气动干扰进行分析, 得到的结果与相关模型试验结果基本一致, 说明本文应用的分析模型能有效模拟邻近建筑物风场相互影响以及风绕建筑的分离流动问题, 而其计算成本比 DES 方法小很多。

(2) 本文计算结果表明, 当并列间距 $y/b \approx 1.5$ 时, 中间受扰建筑侧面平均和脉动风压干扰因子分别达到 2.0 和 1.7; 当间距比 $y/b > 3.5$ 时, 建筑之间的相互干扰逐渐消失。

(3) 当建筑间距比 $y/b = 1.5 \sim 2.5$ 时, 由于受扰建筑两侧间隙流之间的相互影响, 使得建筑背风面的平均风压干扰因子 IF 值最大达到 1.2, 脉动 IF 值为 1.05。

综上所述, 延迟分离涡模拟技术结合一定的湍流模型形式能够有效模拟建筑物大分离湍流流动问题, 计算精度和计算成本均较好。本文方法可为模拟类似的钝体建筑分离流动提供有益借鉴和参考。

参考文献(References):

- [1] Zdravkovich M M. The effects of interference between circular cylinders in cross flow[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1987, **1**(2):239-261.
- [2] 谢壮宁, 顾明. 典型群体超高层建筑风致干扰效应研究[M]. 上海: 同济大学出版社, 2018. (XIE Zhuang-ning, GU Ming. *Wind-induced Interference Effects on Typical Tall Buildings*[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2018. (in Chinese))
- [3] Lim H C, Tsukamoto K, Ohba M, et al. Study on the surface pressure distribution of cubes in cross-wind arrays[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, **133**:18-26.
- [4] Zhang A S, Gao C L, Zhang L. Numerical simulation of the wind field around different building arrangements [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, **93**(1):891-904.
- [5] Ricci A, Kalkman I, Blocken B, et al. Impact of turbulence models and roughness height in 3D steady RANS simulations of wind flow in an urban environment [J]. *Building and Environment*, 2020, **171**:106617.
- [6] Elshaer A, Aboshosha H, Bitsuamlak G, et al. LES evaluation of wind-induced responses for an isolated and a surrounded tall building[J]. *Engineering Structures*, 2016, **115**:179-195.
- [7] Jou W, Strelets M, et al. Comments on the feasibility of LES for wings, and on hybrid RANS/LES approach[J]. *Advances in DNS/LES*, 1997, **4**(8):137-147.
- [8] Spalart P R. Detached-eddy simulation [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2009, **41**(1):181-202.
- [9] Strelets M. Detached eddy simulation of massively separated flows[A]. 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit[C]. Reno, 2001.
- [10] Menter F R, Kuntz M, Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2003, **4**(1):625-632.
- [11] 谢壮宁, 朱剑波. 并列布置超高层建筑间的风压干扰效应[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(10):23-30. (XIE Zhuang-ning, ZHU Jian-bo. Interference effects of wind pressures on tall buildings in side-by-side arrangement[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, **45**(10):23-30. (in Chinese))
- [12] COST Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment COST Action 732, 2007.
- [13] Obasaju E D. Measurement of forces and base overturning moments on the CAARC tall building model in a simulated atmospheric boundary layer[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, **40**(2):103-126.
- [14] Yan B W, Li Q S. Inflow turbulence generation methods with large eddy simulation for wind effects on tall buildings [J]. *Computers & Fluids*, 2015, **116**:158-175.
- [15] Sharma A, Mittal H, Gairola A. Detached-eddy simulation of interference between buildings in tandem arrangement[J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, **21**:129-140.

DDES analysis of wind-induced interference effect on three prisms aligned in parallel

ZHANG Ai-she^{*1}, GAO Cui-lan², WANG Yuan-lei³

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

3. The 8th Branch of Shandong Provincial Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Jinan 250001, China)

Abstract: The numerical simulation for wind loads and wind fields of three prisms sitting side by side in line is employed based on the shear stress transport $k-\omega$ (SST $k-\omega$) model and the delayed detached-eddy simulation (DDES). Firstly, three-dimensional flows around a single square cylinder are simulated. The time-averaged results are compared between numerical and experimental data, which shows good agreement. The DDES method is verified by comparing the computational results with the experimental results for turbulent flows around a cylinder. The numerical analysis of separation ratio effects is carried out for the interference along and across wind directions, respectively, among three square prisms aligned in parallel at equal space. The computational results indicate that the separation ratio among the prisms has a significant interfering effect on the wind load distribution on the central building. Generally, when the separation ratio is 3.0, the interference effect on the central cylinder is up to the maximum value. The interfering mechanism among the buildings is discussed preliminarily. The present results indicate that the current implementation of SST-DDES method is able to simulate turbulent flows with separation for high Reynolds numbers. The results of the paper are useful for the research of wind-induced interference effects on the tall buildings.

Key words: three prisms aligned in parallel; interference effect; delayed detached eddy simulation; wind load; turbulence model

引用本文/Cite this paper:

张爱社,高翠兰,王元雷. 并列三柱体风致干扰 DDES 模拟分析[J]. 计算力学学报, 2021, 38(6): 748-753.

ZHANG Ai-she, GAO Cui-lan, WANG Yuan-lei. DDES analysis of wind-induced interference effect on three prisms aligned in parallel [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, 38(6): 748-753.