



设有空中花园的高层住宅建筑自然通风的研究

同济大学 杨洁[☆]

天津大学 涂光备

香港理工大学 易伟雄

摘要 对设有空中花园的建筑群内流场进行了数值模拟,分析了来流方向、建筑物间距、建筑物高度及空中花园体积等因素对建筑物自然通风的影响。模拟结果表明,在上游建筑物上设置空中花园可以改善下游建筑物的自然通风效果;在第 1 排建筑物上设置空中花园和在前 2 排建筑物上设置空中花园,对下游建筑物自然通风的影响没有明显区别。

关键词 空中花园 高层住宅 上游建筑物 下游建筑物 自然通风 流场 数值模拟

Natural ventilation of high-rise residential buildings with sky-garden

By Yang Jie[★], Tu Guangbei and Francis Yik

Abstract Simulates the air field around buildings with sky-garden and analyses the influence of air flow direction, distance between buildings, building height and sky-garden volume on natural ventilation of buildings. The result shows that building sky-garden in upstream buildings actually enforces the natural ventilation of downstream buildings and that the influence on downstream buildings has no significant difference of building sky-garden in the first row buildings and in front two rows buildings.

Keywords sky-garden, high-rise residence, upstream building, downstream building, natural ventilation, air field, numerical simulation

★ Tongji University, Shanghai, China

①

0 引言

建筑物的自然通风受很多因素的影响,主要包括建筑物的体形、间距、空间排列位置、所处环境、当地气象状况等,其中,建筑物间距对下游建筑物自然通风的影响很大^[1]。而城市中的建筑物很少是远离其他建筑物而孤立存在的,尤其现在城市化进程日益加快,城市建筑密度日益提高,为了充分利用有限的土地面积,建筑物大多设计成高层形式,而且,建筑物间距也受到很大的限制。因此,亟需对高层建筑群周围流场进行研究,为改善建筑物自然通风水平提供指导。为了弥补建筑物间距的不足,设想在高层建筑物上设置空中花园,以减小上游建筑物对下游建筑物自然通风的影响。

建筑群周围风环境的研究方法一般可分为实

地观测、风洞试验和计算机模拟 3 种。其中,实地观测是最直接的方法,但由于建筑群风环境的测试区域较大及气象参数的瞬变性,使得实测非常困难;风洞试验是传统的研究方法,可用以针对各种风速、风向对建筑群内风环境的影响进行系统的分析研究;计算机模拟以近十几年发展起来的计算风工程(CWE)理论为基础,利用计算机技术对建筑

①[☆] 杨洁,女,1965 年 9 月生,博士,博士后,讲师
200092 上海四平路 1239 号同济大学供热供燃气、通风与空调研究所
(0) 13681667389
E-mail: yangjieyang@sina.com
收稿日期:2003-05-15
一次修回:2003-07-04
二次修回:2004-01-08

群内流场进行模拟。相对于风洞试验来讲,计算机模拟的周期短,成本低,而且可以形象、直观地展示模拟结果。因此,笔者采用数值模拟的方法,对设有空中花园的建筑群内流场进行计算,以期为建筑群自然通风设计提供指导。

1 建筑群周围流场的数值模拟

1.1 湍流模型

目前,在 CWE 的模拟中,常用的湍流模型有改进的 $K-\epsilon$ 模型和大涡模拟模型(LES)等。事实上,每个湍流模型都有其优缺点,例如采用 LES 模型进行模拟的结果不仅与实测及风洞试验结果有很好的一致性,而且还可以提供流场的瞬时信息,而采用其他模型进行模拟的结果只能描述流场的时均特性,但 LES 要求计算机有很强的计算能力,而且计算时间也很长;而标准的 $K-\epsilon$ 模型由于计算成本低,且预测较为准确而成为一种广为应用的湍流模型。采用标准的 $K-\epsilon$ 模型和 LES 模型对本文问题进行模拟,其结果并不存在规律性的差异。因此,本文的模拟采用标准的 $K-\epsilon$ 模型。

本文采用 FLUENT 软件,其解算器采用非结构化网格和控制容积法,特别适合于解决几何形体较为简单,但物理现象特别复杂的流动问题。

1.2 计算区域

建筑物周围的风场很复杂,相邻建筑物对风场的影响不容忽视。为此,建筑物外绕流的计算区域应足够大。如果按照实际建筑小区确定计算区域,那么,计算区域将包括太多计算节点,对计算机计算能力的要求会很高,计算时间也会很长。如果能对建筑群进行合理的简化,将有助于减小模拟区域,降低模拟成本。笔者将城市中高建筑密度的高层住宅建筑群简化为 9 幢相同体型的建筑物行列式布置的建筑群(见图 1)。由于城市中的建筑群,尤其是住宅建筑群,多是由多幢形状相同或相近建

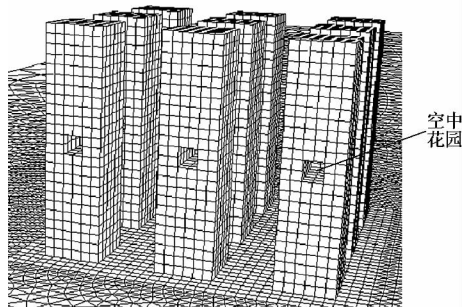


图 1 设有空中花园的模拟建筑群

筑物规则排列组成,因此,该简化的建筑群模型基本可以代表多个建筑物组成的建筑群的情况。

恰当地设计计算区域可以真实地预测建筑群中的流场特性,并降低模拟成本。许多致力于 CWE 的学者对计算区域的确定作了大量的尝试^[2~4],他们确定的计算区域均远远大于建筑物各个方向的尺寸。笔者在参考了以往研究的基础上,通过试算确定住宅建筑群流场模拟的计算区域为:建筑物上游区域、下游区域和宽度分别为建筑物宽度 3 倍、10 倍和 6 倍,高度为建筑物高度 3 倍的区域。

FLUENT 软件中的画图及网格生成软件 GAMBIT 提供了一种对称(SYMMETRY)边界类型。当把一个边(或面)设为 SYMMETRY 类型时,此边界上的流量、温度、压力等的梯度都等于零,于是,这个边(或面)的两侧会存在相同的物理现象,这相当于该计算区域与多个相同的计算区域相连。这样既可以相应地减小计算区域的面积,又接近实际情况,因为工程中建筑物常常和其他建筑物相邻,其周围的流场也与其相邻建筑物周围的流场相邻。所以,本文的模拟将计算边界设为 SYMMETRY 类型。

1.3 网格形式

对于工程中经常遇到的复杂几何形状流场,如果只使用结构化网格,往往不能生成足够的网格而使 CFD 的应用范围受到限制。而非结构化网格不仅可以很好地适应复杂形状的流场,而且还可以方便地对局部网格结构进行调整。从而可以大大地减少网格的数目和缩短网格生成的时间。结构化和非结构化网格的合理结合尤其适用于对大尺度建筑群周围流场的预测。

本文的模拟采用结构化和非结构化网格相结合的网格形式。由于本文主要研究建筑物外表面上的流场分布情况,因此,在建筑物附近采用较细的六面体结构化网格,这样可获得较为准确的计算结果;而远离建筑物的区域采用较稀疏的四面体非结构网格(见图 1)。计算实践表明,这种网格形式的选取是适合本文研究对象的。

2 数值方法的风洞试验验证

相对风洞模拟试验,计算机模拟既经济又高效。但计算机模拟的方法必须是可信的,其模拟结果才有意义。笔者在同济大学土木工程防灾国家

重点实验室的低速、回流式建筑(桥梁)边界层风洞 TJ-2 中进行了风洞试验,以验证本文采用的计算机模拟方法。

风洞试验取来流入射角 θ 分别为 0° , 30° 和 45° , 风速为 10 m/s, 来流流型为 C 类地貌大气边界层来流(湍流风场), 风洞的试验段见图 2。风洞试验结果和数值模拟结果的比较见图 3, 图中 F1 为模型的迎风面, F3 为背风面, F2 和 F4 为侧面。

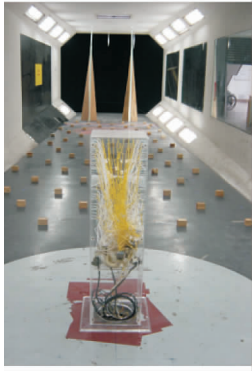


图 2 C 类地貌大气边界层风洞试验段

文献[5~6]指出, 相邻建筑物的存在会对建筑物周围流场产生影响, 因而会影响建筑物外表面上风压系数的分布从而影响建筑物表面上形成的风压差 Δp , 而风压差是自然通风主要驱动力之一。

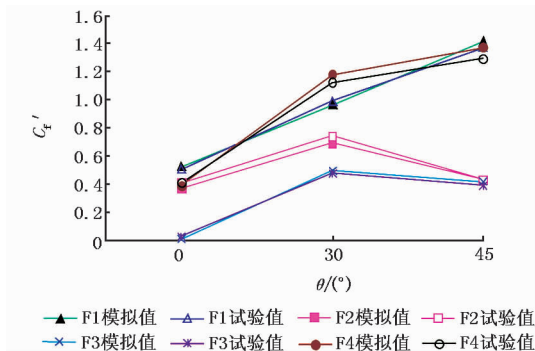


图 3 湍流风场中模型表面上风压差系数 C_f' 的模拟值和试验值

$$\Delta p = C_f' \frac{\rho}{2} v_z^2 \quad (1)$$

式中 C_f' ——风压差系数, 作用于建筑物上的风压差相当于理论风压差的百分数;

ρ ——空气密度, kg/m^3 ;

v_z ——计算高度处的来流速度, m/s 。

本文中, C_f' 定义为建筑物某部分的外表面(某个单元的外表面或某个外表面上)可能的最大风压差系数, 即:

$$C_f' = \frac{2}{\rho v_z^2} \Delta p_{\max} \quad (2)$$

从图 3 可以看出, 数值模拟结果与风洞试验结果吻合得较好, 存在着一致的规律性, 即数值模拟

结果可以较真实地反映建筑物外表面上风压系数 C_f 的分布, 因而本文所采用的数值模拟方法可以用于高层住宅建筑自然通风的研究。

3 数值模拟及结果分析

由式(2)可知, 当风速不变时, 建筑物围护结构外表面上的 C_f' 值越大, 就意味着自然通风的动力 $\Delta p_{\max}$ 越大, 即风压差系数大的单元自然通风的驱动力大, 自然通风效果好。因此, 本文通过模拟力求找出提高建筑群中各建筑物 C_f' 值的方法。

笔者对设有空中花园的高层住宅建筑群内流场进行数值模拟, 目的是研究在上游建筑物上设置空中花园是否会对下游建筑物的自然通风产生积极的影响; 来流特性、建筑物布局特性及建筑物本身特性等因素对建筑物自然通风效果的影响。由于风压差系数不是来流风速的函数^[7], 因此, 本模拟统一取来流风速为 4 m/s。模拟建筑群布局及来流方向见图 4, 其中 b1 为建筑物 1, b2 为建筑物

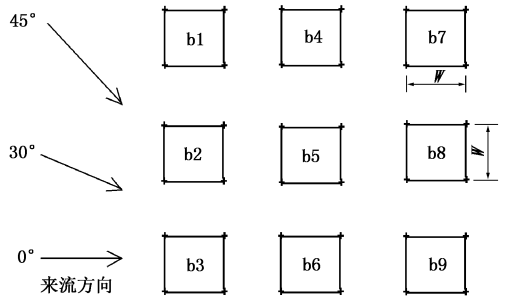


图 4 模拟建筑群布局及来流方向示意图

2, 以此类推; 模拟对象为建筑群 B(只有第 1 排建筑物(b1~b3)设有空中花园)和建筑群 C(前 2 排建筑物(b1~b6)设有空中花园)及作为对比的建筑群 A(不设空中花园)。

建筑群 C 和建筑群 A 中的模拟流场见图 5 和

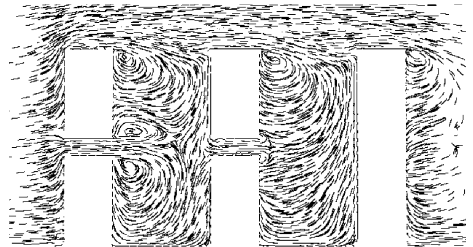


图 5 建筑群 C 流场剖面图

图 6。图中显示, 在上游建筑物上设置空中花园确实使建筑群中的流场发生了改变, 而建筑群中流场的改变将引起建筑物外表面上风压系数 C_f 分布的

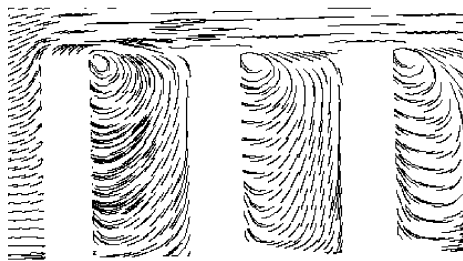


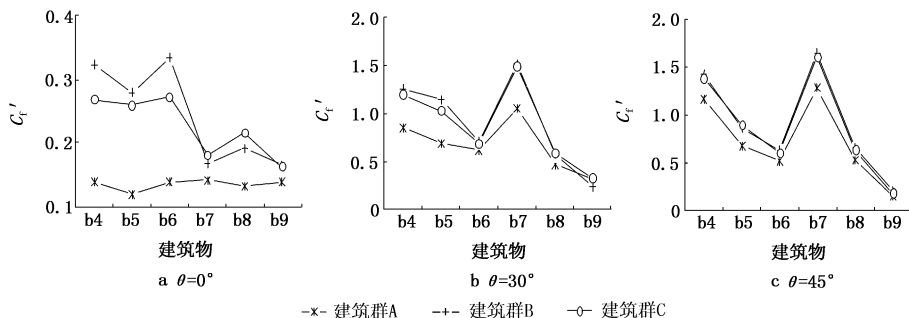
图6 建筑群A 流场剖面图

改变,从而影响该建筑物自然通风的效果。

下面对设有空中花园的建筑群中建筑物 C_f' 值的影响因素进行逐一的分析研究。

3.1 来流方向的影响

模拟建筑物间的间距 L 等于建筑物宽度 W ,这样的建筑物布局是符合香港等城市高建筑密度住宅区的建筑物布局的。模拟建筑物上空中花园的体积为 $(W/3) \times W \times (W/3)$ (宽 $\times$ 长 $\times$ 高),模拟来流入射角 θ 分别为 0° , 30° 和 45° (见图4),这几乎涵盖了香港等地区自然通风季节的所有主导风向。模拟结果表明,与建筑群A相似,建筑群B,C中各建筑物的 C_f' 值受 θ 值的影响很大。图7所示

图7 不同来流方向建筑群A,B,C中下游建筑物的 C_f' 值

为 θ 分别为 0° , 30° 和 45° ,建筑群A,B,C中各下游建筑物的 C_f' 值。从图中可以看出,由于建筑群中上游建筑物设置了空中花园,在模拟来流风向下,下游建筑物的 C_f' 值几乎都有了令人满意的提高(除去 $\theta=30^\circ$ 和 45° 时的建筑物b9,它处在来流的最下风处)。例如,当 θ 分别为 30° 和 45° 时,建筑群B中的第2排建筑物的 C_f' 平均值较建筑群A中的相应值分别提高了44%和25%,即其自然通风水平有了较大的提高。

从图中还可以看出,建筑群B和建筑群C中各建筑物的 C_f' 值分布很相似,而且,其值也很相近,尤其当 $\theta=30^\circ$ 和 45° 时,建筑群B和建筑群C中第3排建筑物的 C_f' 值几乎相同。对于建筑群

B,当 θ 分别为 0° , 30° 和 45° 时,第3排建筑物的 C_f' 平均值较建筑群A中的相应值分别提高了53%, 27%, 28%;而建筑群C中第3排建筑物的 C_f' 平均值较建筑群A中的相应值分别提高了62%, 31%, 23%。

可见,在建筑群中上游建筑物上设置空中花园,在来流以入射角 $\theta=0^\circ$, 30° 或 45° 掠过建筑群时,都会对该建筑群中绝大多数下游建筑物的自然通风产生积极的影响,使其通风效果较为理想。而且,建筑群中仅第1排建筑物设置空中花园和前两排建筑物均设置空中花园对建筑物自然通风效果的影响是很相近的。

3.2 建筑物间距的影响

研究发现,建筑群平面密度越大,相邻建筑物的相互影响就越大。当建筑物周围无遮挡时,建筑物后面的尾流和分离旋涡得到充分的发展;当建筑物被周围建筑物遮挡时,形成尾流干扰流,建筑物的间距越小,分离旋涡越没有空间充分发展,相互的影响就越大。当建筑物的间距小到一定程度时,建筑物之间便形成稳定的旋涡,风则直接掠过建筑

物的顶部。因此,建筑物的间距对建筑群中流场的分布有很大的影响^[8]。同时,建筑物间距也是决定一定土地面积上所能产生的建筑面积的主要因素之一。因此,对于“寸土寸金”的高建筑密度的城市中心地带,建筑物的间距设计备受关注。

针对建筑物间距 L 分别为 W , $2W$, $3W$ 的建筑群B和建筑群C周围流场进行模拟,实际上,这样的建筑物间距可以代表香港等大城市住宅建筑布局中一个建筑物被其他建筑物包围的绝大多数情况。模拟建筑物上的空中花园体积为 $(W/3) \times W \times (W/3)$, $\theta=0^\circ$ 。建筑群B和建筑群C中各建筑物的 C_f' 值见图8。

由图8可知,当建筑物间距增大时,建筑群B和建筑群C中的第2排建筑物的 C_f' 值有所增加;对于我们特别关注的第3排建筑物,其上的 C_f' 值随着 L 的增加有明显的提高。例如,对建筑群B来讲,当 L 从 W 增加到 $2W$ 时,建筑物b9的 C_f' 值增加了82.6%;当

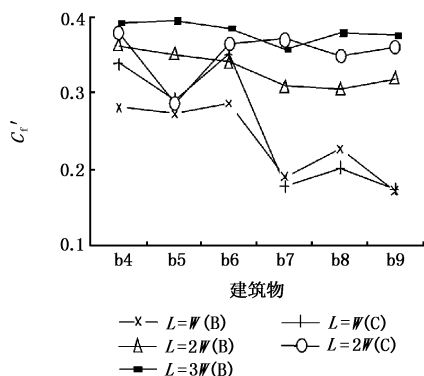


图 8 L 对建筑群 B、C 中下游建筑物 C_i' 的影响

建筑群 B 和建筑群 C 的模拟结果,可以看出,对于相同的 L 值,该两类建筑群中下游建筑物的 C_i' 值比较接近。

3.3 建筑物高度的影响

建筑物高度也直接影响着一定土地面积上所能产生的建筑面积。针对建筑物的高度 H 分别为 $3W$ 和 $4W$ 的建筑群 B 和建筑群 C 周围流场进行模拟, $\theta=0^\circ$, $L=W$, 空中花园的体积为 $(W/3) \times W \times (W/3)$ 。模拟结果见图 9。

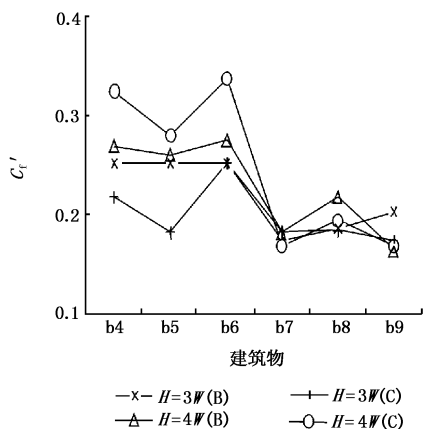


图 9 H 对建筑群 B、C 中下游建筑物 C_i' 的影响

而且建筑群 B 和建筑群 C 中第 3 排建筑物的 C_i' 值也有较小程度的提高(建筑物 b9 除外)。这一结果表明,建筑物高度在一定范围内的增加将有利于建筑群 B 和建筑群 C 的自然通风;而且,图中还显示,建筑物高度对建筑群 B 和建筑群 C 中各建筑物 C_i' 值的影响非常相近。

3.4 空中花园体积的影响

由以上模拟结果可知,在建筑群的上游建筑物上设置空中花园确实可以改善下游建筑物的自然

通风效果,但空中花园毕竟占用建筑面积,因此,建筑设计应在满足一定通风要求的前提下,尽量减小空中花园的体积。针对空中花园体积分别为 $(W/3) \times W \times (W/3)$, $(2W/3) \times W \times (W/3)$ 和 $(2W/3) \times W \times (W/6)$ 的建筑群 C 周围流场进行模拟, $\theta=0^\circ$, $L=W$ 。该模拟结果见图 10。

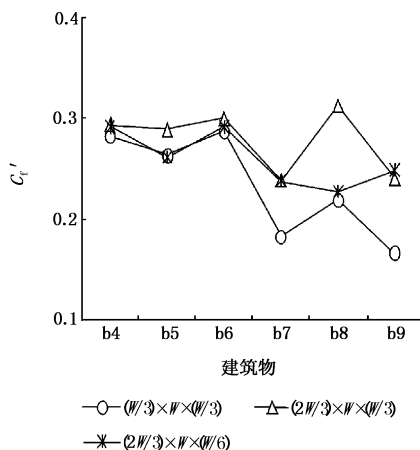


图 10 空中花园体积对建筑群 C 中建筑物 C_i' 值的影响

该建筑群,该建筑群中第 2 排建筑物的 C_i' 值平均提高了 12%,第 3 排建筑物的 C_i' 值平均提高了 39%。而空中花园体积为 $(2W/3) \times W \times (W/6)$ 的建筑群,尽管与空中花园体积为 $(W/3) \times W \times (W/3)$ 的建筑群空中花园体积相同,但该建筑群中第 2 排建筑物的 C_i' 值平均提高了 1%,第 3 排建筑物的 C_i' 值平均提高了 25%。

以上模拟结果显示,增大空中花园的体积,尤其增加其宽度,有利于建筑群中下游建筑物的自然通风;当空中花园的体积一定时,增加空中花园的宽度,减小其高度,也可以提高下游建筑物的通风水平。

4 结论

由建筑群 B、建筑群 C 及对照建筑群 A 的模拟结果可知,在上游建筑物上设置空中花园确实能提高下游建筑物的通风水平;建筑物间距和高度在一定范围内的增加都有利于建筑群中下游建筑物的自然通风;空中花园体积的增加,尤其是其宽度的增加,同样可以提高下游建筑物的通风效果。值得注意的是,模拟结果显示,只在建筑群的第 1 排建筑物上设空中花园和在前两排建筑物上设空中花园,对建筑群中下游建筑物上自然通风的影响没

(下转第 37 页)