

# 基于多区网络模型的千米建筑 冬季热压分布研究<sup>\*</sup>

哈尔滨工业大学 贾欢渝<sup>☆</sup> 王砚玲 刘 京

中国中建设计集团有限公司 满孝新

**摘要** 采用多区域网络模型 CONTAM 3.1 模拟某虚拟千米建筑的冬季热压变化规律,选取大连地区为代表城市,详细分析了千米建筑中不同孔口两侧的压差和空气流量,并与其他 5 个城市的模拟结果进行了对比分析。提出采取多种有效措施来减小超高层建筑的热压作用。模拟分析表明,冬季超高层建筑中很多楼层的孔口两侧压差远远超过规范要求。若千米建筑建于我国北方,必须采取多种设置阻隔的方法,削弱热压对系统运行和人员疏散的不利影响。

**关键词** 超高层建筑 烟囱效应 热压 多区域网络模型 模拟

## Thermal pressure distribution of kilometer-height skyscraper in winter based on multi-zone network model

By Jia Huanyu<sup>★</sup>, Wang Yanling, Liu Jing and Man Xiaoxin

**Abstract** Uses CONTAM 3.1 software based on the multi-zone network model to research the features of thermal pressure in a virtual 1 000 m skyscraper in winter. Studies the pressure distribution and air flow rate of different orifices in the 1 000 m building in Dalian, and compares the simulation results with those of the five representative cities including Dubai, Guangzhou, Shanghai, Beijing and Harbin. Proposes different measures to decrease the thermal pressure of super high-rise buildings. Simulation analysis results show that the orifice pressure values in many floors exceed regulatory requirements. Diverse settings of separation in both vertical and horizontal partitions should be considered to weaken the adverse impacts on system operation and evacuation.

**Keywords** super high-rise building, stack effect, thermal pressure, multi-zone network model, simulation

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

### 0 引言

根据有关资料,截至 2014 年 1 月,我国已建成和已封顶的高度在 100 m 以上的超高层建筑有 2 680 座,200 m 以上的建筑有 380 座<sup>[1]</sup>。现在世界上的最高建筑是位于阿联酋迪拜的哈利法塔,高度为 828 m。可以预测,未来千米建筑将会屹立在世界各地。随着超高层建筑的快速发展,与之有关的问题越来越受到相关专业人员的重视。

在气候寒冷地区,冬季超高层建筑由热压产生的烟囱效应可能会带来很多安全问题,如楼梯间门、前室门、电梯门不能正常开关,起火时会加速火势在建筑内的扩散;加压系统不能正常运行等<sup>[2]</sup>。因此,研究超高层建筑的热压分布并削弱热压的影响是超高层建筑研究中的一重要课题。

目前被认为可有效减小热压的方法主要有:设置水平隔断<sup>[3]</sup>;设置竖直隔断<sup>[2-3]</sup>,包括电梯井、楼梯间井;设置封

闭的电梯前室等<sup>[2]</sup>。通过机械通风系统控制室内压力会引发其他问题,被证实为不适用<sup>[4]</sup>。Jae-Hun Jo 等人指出热压主要影响的位置是首层大厅入口门、大堂电梯门、电梯交汇处的地板,提出在典型楼层的电梯门和入口门处安装“气闸门”,以克服门两侧的压差<sup>[5]</sup>。Joonghoon Lee 等人提出采用电梯井冷却系统(E/V shaft cooling system)来减小热压并进行了模拟验证,将其用于 37 层的实际建筑中,通过测量进行了评价,结果表明该系统可有效减小热压<sup>[6]</sup>。

上述文献中研究的建筑最大高度为 263 m<sup>[5]</sup>,目前国

①☆ 贾欢渝,女,1990 年 12 月生,在读硕士研究生

150090 哈尔滨市南岗区黄河路 73 号市政环境工程学院 3311 室

(0) 18946022710

E-mail:jiahuanyu2009@126.com

收稿日期:2014-03-10

修回日期:2014-03-26

\* 中建股份科技资助项目(编号:CSCEC-2010-Z-01)

内外没有学者对千米建筑的热压问题进行研究。而建筑高度是影响热压分布的一个重要因素,特别是在寒冷地区,对超高层建筑的热压分布进行研究尤其重要。

超高层建筑的竖向高度大,冬季由建筑内外温差引起的热压作用对建筑设计和相关系统运行都提出了新的挑战。本文采用 CONTAM 3.1 软件<sup>[7]</sup>模拟一栋虚拟的千米建筑在不同地区的热压分布,选取大连为代表城市,并与迪拜、广州、上海、北京、哈尔滨 5 个典型地区的计算数据进行对比分析,在此基础上提出了有效减小热压作用的方法和对千米建筑设计建造的建议。

1 研究对象

目前世界上还没有建成的千米建筑,本研究属前瞻性研究。按照现有超高层的相关设计虚拟了某千米建筑,建筑高度 1 000 m,占地面积 28 100 m<sup>2</sup>。塔楼地上部分 220 层,地下部分 4 层。总建筑面积约为 140 万 m<sup>2</sup>,是一个集商业、办公、酒店、服务式公寓于一体的建筑综合体。建筑由下至上分为 4 个功能分区:商业区、办公区、高级公寓区、宾馆区。建筑分区和各区域冬季室内设计温度见表 1。办公层平面图见图 1。

表 1 建筑分区和冬季室内设计温度

| 高度/m      | 功能   | 层数      | 模拟使用<br>平均层高/m | 冬季室内<br>设计温度/℃ |
|-----------|------|---------|----------------|----------------|
| 0~100     | 商业建筑 | 1~20    | 5              | 18             |
| 100~600   | 办公建筑 | 21~131  | 4.5            | 20             |
| 600~800   | 高级公寓 | 132~176 | 4.5            | 22             |
| 800~1 000 | 酒店宾馆 | 177~220 | 4.5            | 22             |

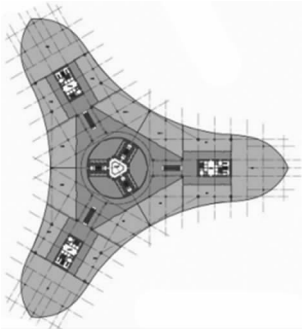


图 1 办公层平面图

2 研究方法

Jae-Hun Jo 等人将一座 69 层建筑的电梯门和建筑外门的热压测试值与 CONTAM W 软件的模拟值进行了对比分析,发现二者吻合较好<sup>[5]</sup>。本研究中采用 CONTAM 3.1 软件对此千米建筑进行建模和模拟分析。

受模拟软件应用条件和孔口数量的限制,必须对实际建筑进行简化。在建筑平面的基础上进行如下简化:把不规则的建筑平面简化为规则形状,各种设计参数不变,不考虑建筑内部同一平面各房间之间的隔断。简化后的办公层平面见图 2。为描述方便,将建筑的西向部分记为 A 区,北向部分记为 B 区,东向部分记为 C 区;连接 3 个区域的中

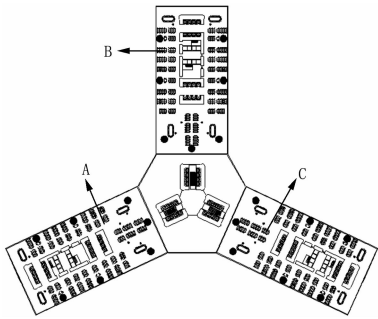


图 2 简化后的办公层平面图

间部分为核心筒。核心筒和 A,B,C 区的楼梯间和电梯间平面示意图见图 3 和图 4。电梯的设计方案共有 4 种,如图 5 所示。初始模拟基本工况 B-1 采用如下竖向交通方案:楼梯间按照 4 个功能分区进行分隔(即 20 层、131 层、176 层为分隔层),电梯间采用方案 1。贯穿电梯在功能分区或每 10 层左右设置电梯门。

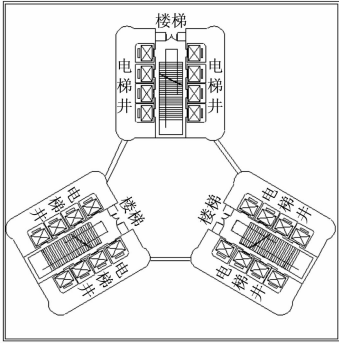


图 3 核心筒楼梯间和电梯间平面示意图

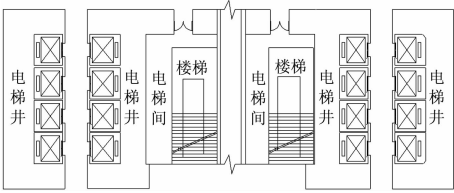


图 4 A,B,C 区楼梯间和电梯间平面示意图

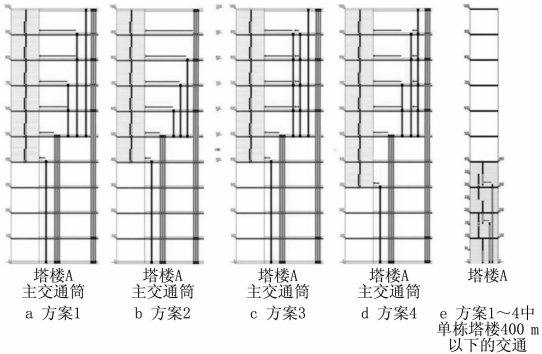


图 5 4 种电梯设计方案

在此基础上采用 CONTAM 3.1 软件进行建模,每层核心筒和塔楼的楼梯间和电梯间根据不同的建筑功能在设

置上有差别,建筑1层和2层的CONTAM建模平面图如图6和图7所示。

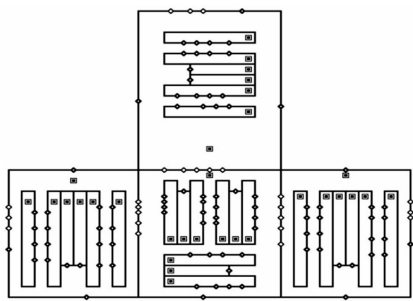


图6 建筑1层的CONTAM建模平面图

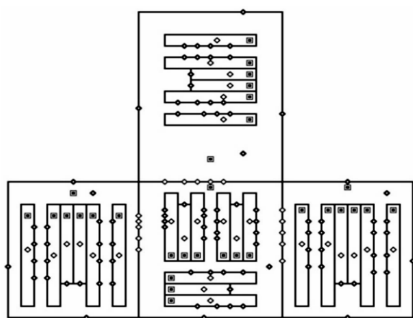


图7 建筑2层的CONTAM建模平面图

标准层门、窗和墙的参数设置如表2所示。底层外门尺寸为6 m×2.4 m,有效渗风面积为0.25 m<sup>2</sup>;楼梯间与前室的防火门尺寸均为1 m×2 m,有效渗风面积为0.020 5 m<sup>2</sup>;电梯门的尺寸为1.5 m×2 m,有效渗风面积为0.056 5 m<sup>2</sup>。

表2 开口的位置和状态设置

|           | 位置              | 状态 | 数量         |
|-----------|-----------------|----|------------|
| 底层大门      | A,B,C区1层入口处     | 打开 | 9          |
| 走廊门       | A,B,C区分别与核心筒相通处 | 打开 | 15(每层)     |
| 核心筒电梯门    | 核心筒的电梯井处        | 关闭 | 24(按照交通方案) |
| A,B,C区电梯门 | 分支的电梯井处         | 关闭 | 16(按照交通方案) |
| 楼梯间门      | 核心筒和塔楼          | 关闭 | 9(每层)      |
| 前室门       | 电梯前室与楼梯间前室      | 关闭 | 12(每层)     |
| 渗风孔口      | 每面墙体            | 渗透 | 按实际面积确定    |

3 模拟结果及分析

3.1 典型地区千米建筑竖向热压分布

以大连为典型地区,分析不利气候条件下的冬季热压变化。大连地区冬季空气调节室外计算温度为-12.9℃,大气压力为101 727 Pa。

1层有与外界直接相通的入口,与其他楼层的建模不同;20层位于100 m高度处,处于中和界以下,并且是商业建筑和办公建筑的分界层,具有代表意义;106层位于483 m高度处,位于中和界附近;176层位于800 m高度处,位于中和界以上,是高级公寓区与酒店区的交界处;220层为顶层。故选取1层、20层、106层、176层、220层作为典型层进行分析。典型层核心筒贯通电梯附近孔口两侧(以下分析大部分

皆为此位置)的压差(气体流入建筑内为正压,流出建筑为负压,下文压差取值方法与此相同,均代表孔口两侧的压差)见表3,建筑1层气流流动方向如图8所示。

表3 大连地区典型层不同位置门两侧的压差 Pa

|      | 核心筒楼梯间门 | 核心筒电梯门 |
|------|---------|--------|
| 1层   | 120.4   | 362.9  |
| 20层  | 88.8    | 141.1  |
| 106层 | -36.0   | 0.4    |
| 176层 | 78.0    | -103.2 |
| 220层 | -218.7  | -370.9 |

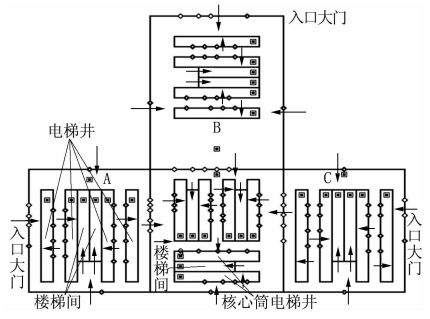


图8 建筑1层气体流动方向

图9给出了建筑竖直高度上不同位置的压差。从表3和图9可以看出,在核心筒的楼梯间门和电梯门处,1层的

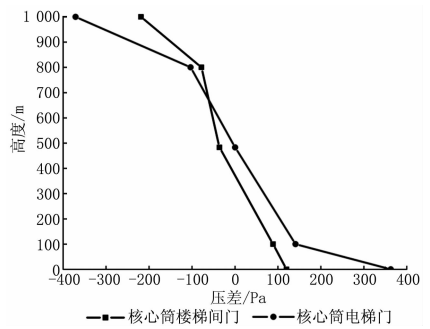


图9 千米建筑不同位置压差变化曲线

压差分别为120.4 Pa和362.9 Pa,大大超过了ASHRAE标准的规定值(电梯门和楼梯间门两侧压差应分别不超过25 Pa和50 Pa)。根据文献[8]可知,楼梯间门两侧的最大压差不超过87 Pa才能确保门能打开;相关实验测试表明,一般情况下压差达到125 Pa就需要两个人合力才能打开门<sup>[9]</sup>,并且会严重影响电梯门的开关。而此处模拟得到的电梯门两侧的压差为362.9 Pa,是125 Pa的2.9倍,影响更大。此时空气在压差的驱动下上升,由下至上在整个竖井中迅速传播。

由图9可以看出,在中和界以下冷空气从室外流向建筑内部,中和界以上空气从建筑内部流向室外。中和界以下楼梯间门和电梯门的压差要大于中和界以上,气流会以较快速度从下向上流动。另外楼梯间按照功能分区设置了隔断,核心筒贯穿电梯未设置隔断,纵向隔断导致了核心筒楼梯间门的压差小于电梯门。

3.2 不同气候条件对千米建筑热压的影响

3.2.1 6 个典型地区的气候条件

在大连地区千米建筑冬季热压分布特性模拟基础上,进一步选取迪拜、广州、上海、北京、哈尔滨 5 个典型地区进行热压分布模拟对比。室内设计参数不变,6 个典型地区的冬季室外参数取值见表 4。

表 4 典型地区的冬季室外设计参数

|           | 迪拜      | 广州      | 上海      | 北京      | 大连      | 哈尔滨     |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 模拟用室外温度/℃ | 12      | 5       | -4      | -12     | -12.9   | -30     |
| 室外大气压力/Pa | 101 325 | 101 950 | 102 510 | 102 040 | 101 727 | 100 410 |

3.2.2 1 层不同位置门两侧压差比较

5 个城市的建筑内部压差和空气流量变化规律与大连地区类似,但数值有显著差异,1 层核心筒贯通电梯附近孔口两侧的压差见表 5。

表 5 1 层不同位置门两侧压差 Pa

|     | 核心筒楼梯间门 | 核心筒电梯门 |
|-----|---------|--------|
| 迪拜  | 24.2    | 75.6   |
| 广州  | 50.3    | 152.0  |
| 上海  | 85.4    | 256.5  |
| 北京  | 117.1   | 352.7  |
| 哈尔滨 | 194.2   | 592.3  |
| 大连  | 120.4   | 362.9  |

从表 5 可以看出,广州、上海、北京、哈尔滨、大连地区核心筒电梯门两侧的压差分别是迪拜的 2.0、3.4、4.7、7.8、4.8 倍,如此大的压差会对电梯运行、人员疏散造成严重影响。在严寒和寒冷地区修建超高层建筑时对此问题需高度重视。

3.2.3 典型地区千米建筑 1 层不同位置空气流量比较

以 1 层为研究目标,研究核心筒附近不同位置通过门流入的空气量。各城市 1 层不同位置孔口的空气流量见表 6,塔楼 1 层外门处的空气流量见图 10。

从表 6 和图 10 可以看出,广州地区建筑各孔口的空气流量是迪拜地区的 1.6 倍左右,哈尔滨地区建筑各孔口的空气流量是迪拜地区的 3~4 倍。说明在较寒冷地区,冬季会有大量的室外空气流入建筑内部,会导致大堂温度偏低,不仅增加建筑热负荷,还会严重影响人员的舒适性和增加安全

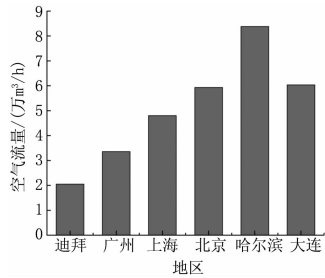


图 10 典型地区千米建筑 A 区 1 层外门处的空气流量

表 6 6 个城市千米建筑 1 层不同位置孔口的空气流量 m³/h

|     | 塔楼入口门    | 核心筒楼梯间门 | 核心筒电梯门  |
|-----|----------|---------|---------|
| 迪拜  | 6 839.5  | 2 076.5 | 2 408.9 |
| 广州  | 11 187.0 | 3 349.0 | 3 805.4 |
| 上海  | 16 011.8 | 4 735.1 | 5 361.8 |
| 北京  | 19 776.1 | 5 801.6 | 6 580.2 |
| 哈尔滨 | 27 941.1 | 8 048.3 | 9 202.3 |
| 大连  | 20 120.8 | 5 899.4 | 6 693.1 |

疏散的风险。室内外温差越大的地区,该问题就越严重。

由以上分析可以看出,冬季室内外温差越大的地区,热压影响越大。迪拜的哈利法塔的成功修建,不仅与成熟的技术有关,当地冬季气温较高也带来了很大的优势,能极大地减小热压的不利影响。而对于我国的上述 5 个城市,热压作用的影响均较明显,在修建千米建筑之前,必须充分考虑如何采取有效措施减小热压带来的不利影响。

3.3 改善千米建筑竖向热压分布的措施探讨

3.3.1 模拟工况的描述和编号

实际建筑设计中如果增加水平方向和竖直方向的隔断,经过层层阻隔,热压也层层分割,其衰减程度随建筑内部隔断的层次及严密性的不同有很大差别。依据此原理设置 7 种模拟工况(见表 7),楼梯间按照 4 个功能分区进行分隔(即 20 层、131 层、176 层为分隔层)。以大连为例,对 7 种工况下千米建筑的热压变化进行计算分析。

表 7 各种模拟工况编号及说明

| 说 明    |          |                                                                                                                                                                             |
|--------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| B-1 工况 | 基本工况     | 电梯采用设计方案 1,且贯穿电梯在功能分区或每 10 层左右设置电梯门                                                                                                                                         |
| S-1 工况 | 竖向交通方案 1 | A、B、C 塔楼每 10 层(50 m)错开布置电梯井道,2 个低层贯通电梯分别直通至 32 层(150 m)和 65 层(300 m)。核心筒从左至右依次设置:1~87 层的低层贯穿电梯,1~109 层的中层贯穿电梯,109~153 层的区间电梯,109~198 层的区间电梯,109~220 层的高层贯穿电梯,1~220 层的观光穿梭电梯 |
| S-2 工况 | 竖向交通方案 2 | A、B、C 塔楼竖向交通与方案 1 一致。核心筒从左至右依次设置:1~87 层的低层贯穿电梯,1~109 层的中层贯穿电梯,109~131 层的区间电梯,109~153 层的区间电梯,109~176 层的高层贯穿电梯,1~220 层的观光穿梭电梯                                                 |
| S-3 工况 | 竖向交通方案 3 | A、B、C 塔楼竖向交通与方案 1 一致。核心筒从左至右依次设置:1~87 层的低层贯穿电梯,1~109 层的中层贯穿电梯,109~198 层的区间电梯,109~198 层的区间电梯,109~220 层的高层贯穿电梯,1~220 层的观光穿梭电梯                                                 |
| S-4 工况 | 竖向交通方案 4 | A、B、C 塔楼竖向交通与方案 1 一致。核心筒从左至右依次设置:1~65 层的低层贯穿电梯,1~109 层的中层贯穿电梯,109~153 层的区间电梯,109~198 层的区间电梯,109~220 层的高层贯穿电梯,1~220 层的观光穿梭电梯                                                 |
| M-0 工况 | 横向隔断+B-1 | 在 A、B、C 塔楼的 1 层加入横向隔断,每个隔断有三道门,保持关闭状态                                                                                                                                       |
| M-1 工况 | 横向隔断+S-1 | 与 M-0 工况的区别在于由基本工况与横向隔断的组合变为了 S-1 工况与横向隔断的组合                                                                                                                                |

### 3.3.2 减小热压作用的工况分析

B-1, S-1, M-0, M-1 工况下 1 层核心筒电梯门两侧的压差和空气流量见图 11。由图 11 可知, M-0 与 B-1 工况相比, 由于增加了横向隔断, 压差减小了 98 Pa, 空气流量减小了  $1\,664\text{ m}^3/\text{h}$ ; 同样, M-1 工况由于比 S-1 工况增加了横向隔断, 其压差减小了 62 Pa, 空气流量减小了  $774\text{ m}^3/\text{h}$ 。这说明横向隔断能增大阻力, 可有效减小热压, 并且横向隔断是在建筑体上作出的更改, 不涉及整个竖向交通方案, 造价相对较低。

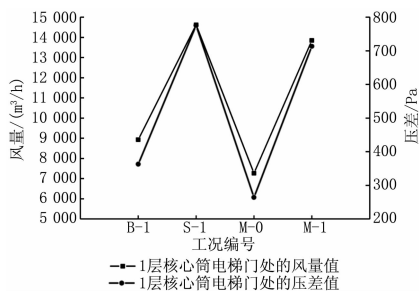


图 11 不同工况下 1 层核心筒电梯门处的空气流量和压差

S-1 与 B-1 基本工况相比, 压差增大了 412 Pa, 空气流量增大了  $5\,694\text{ m}^3/\text{h}$ , 这是由于 S-1 工况完全按照方案 1 设置, 电梯门较少, 导致压差增大。这点将在下节分析。

由图 11 还可以看出, 不同工况下压差与空气流量的变化趋势一致, 与理论分析相符。可以根据实际工程的投资和设计运行要求, 综合采用多种增加隔断的方式来减小热压的影响。

### 3.3.3 不同竖向交通方案下影响热压分布的因素

S-1~S-4 工况与 B-1 基本工况的不同之处在于竖向交通方案的贯通高度、开门位置、组合形式等, 主要体现在竖向交通的开门数量和电梯竖井的高度不同。目前超高层建筑的竖向交通主要由穿梭电梯和区间电梯组合而成, 而在组合过程中, 电梯开门的位置和层数将会影响热压的分布。

B-1 基本工况和 S-1 工况的贯穿电梯门两侧的压差对比见图 12, 2 种工况均是由下至上全部贯通, 不同之处在于 B-1 工况每隔 10 层左右会停靠; S-1 工况仅在功能分区的 20 层、131 层、176 层停靠 (设置电梯门)。S-2~S-4 工况的千米贯穿电梯均与 S-1 工况相同, 用作观光电梯。

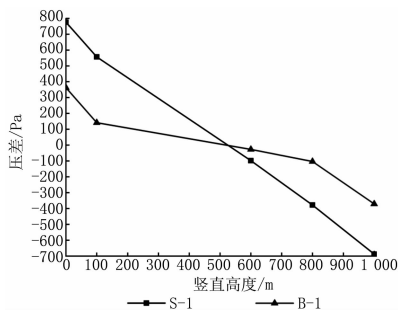


图 12 不同工况下核心筒 1~1000 m 贯穿电梯门两侧的压差对比

S-1~S-4 工况中同一高度、不同开门位置的电梯门两侧的压差比较见图 13, 其中 500 m 和 1000 m 处分别为 S-3 与 S-4 工况 500~1000 m 竖井的 500 m 和 1000 m 处电梯门两侧的压差对比; 700 m 处为 S-1 与 S-2 工况 500~700 m 竖井的 700 m 处电梯门两侧的压差对比; 800 m 和 900 m 处分别为 S-3 与 S-4 工况 500~900 m 竖井的 800 m 和 900 m 处电梯门两侧的压差对比。各种工况的具体开门方式见图 5。

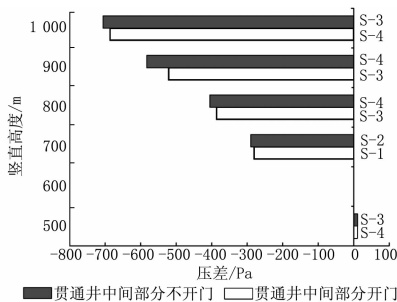


图 13 设置电梯门对核心筒典型楼层压差的影响

由图 12 可以看出, B-1 和 S-1 工况的核心筒千米贯穿电梯门两侧的压差变化趋势一致, 且满足前文所述的竖向热压变化规律, 中和界位置近似相同。在中和界以下 S-1 工况的正压差明显大于 B-1 工况, 在中和界以上负压差也有同样规律。这说明热压与竖向通道各层是否开门有关, 开门越多, 减小的压差越大。B-1 工况优于 S-1 工况。由图 13 可以看出, 只在电梯井底层和顶端设置电梯门时的压差大于同时在中间楼层设置电梯门时的压差。除顶层外, S-4 工况电梯门两侧的压差大于 S-3 工况。

核心筒不同贯穿高度的电梯井首层和顶层电梯门两侧的压差对比见图 14, 其中 300 m 处为 S-4 工况中 0~300 m 贯穿电梯井首层和顶层电梯门两侧的压差; 400 m, 500 m 和 1000 m 处分别为 S-1 工况中 0~400 m, 0~500 m 和 0~1000 m 处贯穿电梯井首层和顶层电梯门两侧的压差。

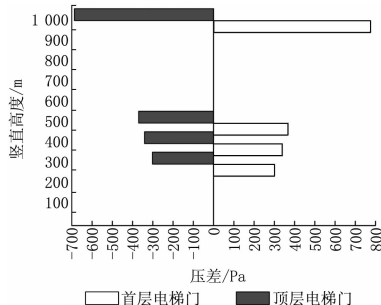


图 14 核心筒不同贯穿高度的电梯井首层和顶层电梯门两侧的压差对比

由图 14 可以看出, 核心筒中不同贯穿高度的电梯井首层和顶层电梯门两侧的压差都随贯穿高度的增加而增加, 0~1000 m 贯穿电梯井首层电梯门两侧的压差最大, 达到 775

Pa 左右,0~300 m 贯穿电梯井首层电梯门两侧的压差最小,在 301 Pa 左右。贯穿电梯井顶层电梯门两侧的负压差也表现出了同样的规律。这说明热压分布与竖向通道的高度有关,高度越大,竖向通道的热压作用越大。

S-1~S-4 工况下 500 m 处不同典型位置门两侧的压差对比见图 15。4 种工况 500 m 以下井道设置差别不大,且均在 500 m 处设置电梯转换,因此选取 500 m 处为典型位置进行分析。由图 15 可以看出,4 种工况下不同典型位置门两侧的压差均不相同,S-2 工况门两侧的压差最小,从减小冬季热压影响的角度分析,S-2 工况的电梯设置方案效果最好。

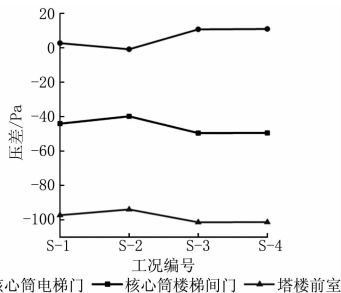


图 15 4 种工况下 500 m 处不同典型位置门两侧的压差对比

## 4 结论

4.1 可以采用 CONTAM 软件来模拟分析千米建筑中空气流动的相关问题,CONTAM 软件能有效满足千米建筑热压分析的模拟需求。

4.2 大连地区冬季室内外温差大,造成千米建筑热压过大,必然使 1 层大厅门不能正常开关,并且室外冷风侵入量大,大堂感觉偏冷,需要采取措施增加隔断,减小热压。

4.3 在不同地区,同一建筑的热压分布特性规律基本一致,但热压值会随当地气象条件变化,在我国北方地区建设千米建筑必须考虑采取减小热压的有效阻隔措施。

4.4 由热压分布规律可知,正常情况下在热压作用的影响下前室门、楼梯间门、电梯门都会出现难于开启的情况,而一旦发生火灾,会对人员疏散和救援带来不利影响。

4.5 1 层加横向隔断对削弱热压作用效果明显,并且造价低,在设计千米建筑时应尽可能多地在 1 层加整体横向隔断,如设置多层门等。可以综合采用几种方式来增加隔断以减小热压的影响,其效果好于单一措施。

4.6 竖向交通方案中应谨慎考虑观光电梯的设置,不可由下至上贯通设置。穿梭电梯和区间电梯组合的过程中,电梯井开门的位置和层数将会影响热压的大小。

4.7 竖向交通方案应充分考虑削弱热压作用的措施,建议不采取大段长竖井的穿梭电梯,而采用错开设置、多段设置的方案。

## 参考文献:

- [1] 全球摩天排行榜—世界高楼排名—高楼迷数据库[EB/OL]. [2014-02]. <http://top.gaoloumi.com/>
- [2] 高甫生. 关注超高层建筑烟囱效应可能引发的安全问题[J]. 暖通空调, 2012, 42(11): 82-90
- [3] 陈玖玖, 张杰. 超高层建筑中的烟囱效应问题及其防治措施[J]. 暖通空调, 2009, 39(增刊): 524-527
- [4] Lovatt J E, Wilson A G. Stack effect in tall buildings[G]// ASHRAE Trans, 1994, 100(2): 420-431
- [5] Jo Jae-Hun, Lim Jae-Han, Song Seung-Yeong, et al. Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings[J]. Building and Environment, 2007, 42(1): 263-277
- [6] Lee Joonghoon, Song Doosam, Park Dongryul. A study on the development and application of the E/V shaft cooling system to reduce stack effect in high-rise buildings[J]. Building and Environment, 2010, 45(2): 311-319
- [7] Walton G N, Dols W S. NIST 7521 CONTAM user guide and program documentation[S]. National Institute of Standards and Technology, 2013
- [8] Miller R S. Elevator shaft pressurization for smoke control in tall buildings: the Seattle approach[J]. Building and Environment, 2011, 46(11): 2247-2254
- [9] 王砚玲. 高层建筑火灾烟气控制的数值研究及软件开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006