

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-292-06

西安地区下沉式广场风环境研究 ——以幸福林带下沉式广场为例

陶 钰¹ 狄育慧¹ 蒋 婧^{1,2}

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048;

2. 西安建筑科技大学西部绿色建筑国家重点实验室 西安 710055)

【摘要】 下沉式建筑能有效利用地下空间提升土地利用率,同时规避地下建筑通风不良、采光不足等问题,具有重要的开发意义和应用价值。以西安市幸福林带下沉式广场为研究对象,通过计算流体力学(CFD)方法对下沉广场风环境进行数值模拟,改变其下沉高度,得到三种工况下沉式广场的风压云图、速度云图,分析三种不同下沉高度对下沉式广场风环境的影响,分析下沉式广场内流场特性、人行高度区舒适性。模拟结果表明:三种下沉高度均满足1.5m人行高度区的舒适性;三种下沉高度均有利于下沉区域内建筑自然通风的引入;增加下沉高度有利于下沉区域建筑的自然通风,尤其是加大迎风面的下沉高度;下沉区域建筑在4.5m下沉高度的下沉广场内建筑自然通风效果最好。

【关键词】 下沉式广场;数值模拟;下沉高度;人行高度;风环境

中图分类号 TU924 文献标识码 A

Study on the Wind Environment of the Sunken Square in Xi'an Area ——Take the Sinking Square of the Happy Forest Belt as an Example

Tao Yu¹ Di Yuhui¹ Jiang Jing^{1,2}

(1.School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048;

2.State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055)

【Abstract】 Sunken buildings can effectively use underground space to improve land utilization rate, while avoiding the problems of poor ventilation and lack of lighting in underground buildings, which has important development significance and application value. Taking Xi'an's happy forest belt sinking square as the research object, numerical simulation of the sinking square wind environment by calculating fluid mechanics (CFD) method, changing its sinking height, obtaining the wind pressure cloud map and speed cloud map of the sunken square in three working conditions, analyzing the influence of three different sinking heights on the sinking square wind environment, and analyzing the characteristics of the sinking square internal flow field and the comfort of the high area of the people. The simulation results show that the three subsidence heights meet the comfort of the 1.5m walking height zone, the three sinking heights are conducive to the introduction of natural ventilation in the subsidence area, and the increase of the subsidence height is conducive to the natural ventilation of the building in the sinking area, especially the

基金项目: 西安工程大学研究生创新基金项目(chx2021041); 西安工程大学(柯桥)研究生学院产学研协同创新项目(19KQZD05); 国家自然科学基金青年项目(51908438); 西部绿色建筑国家重点实验室开放基金项目(LSKF202004); 西安工程大学教学改革重点项目(21JGZD11)

作者(通讯作者)简介: 陶钰(1997-),女,在读硕士研究生, E-mail: 875736880@qq.com

收稿日期: 2021-10-19

sinking height of the oncoming wind. The natural ventilation effect of the building in the sunken area building at the sinking height of 4.5m is the best.

【Keywords】 Sinking square; Numerical simulation; Sinking height; The height of the walk; Wind environment

0 引言

随着我国城市空间不断向立体化演进, 地下空间的开发已成为国际上正在兴起的稳步发展趋势。下沉式空间作为一种新型的城市公共空间, 是联系地下空间和地上空间的节点空间, 是二者功能转换的纽带。下沉式公共空间的开发已经成为一种势不可挡的趋势, 极大地丰富了城市公共空间, 对城市建设具有重要意义^[1-4]。

国外下沉式建筑已经发展到了相当成熟的阶段, 国内下沉式建筑的发展比国外晚了半个多世纪。LI C G 总结了城市地下空间利用的成功经验提出了如何将地下空间作为扩大区域城市功能影响的重要手段并加以治理的建议^[5], Li W 等着重分析了国际地下商业空间开发的优点与不足^[6], 杨钊针对城市下沉式广场的现状与问题提出现阶段城市下沉广场空间的空间构成及空间环境要素的设计方法^[7]。党春红等以西安幸福林带项目为例, 从人性化、舒适度、全龄化方面展开研究, 为其他下沉式商业街的理论研究和实践设计提供借鉴^[8]。另一方面, 城市风环境作为城市微气候的主要组成部分, 是影响室外空间热舒适度感知和城市热岛效应的重要因素^[9,10], 而位于地下的公共空间由于受气候、建筑结构、建筑周围的微环境的影响^[11-13], 了解这类空间的风环境特征以及对其进行科学的调控就显得尤为重要。

现有理论研究虽然指出下沉空间在城市立体化发展中的重要性, 但大多研究仍是从建筑学或城市规划学的角度对下沉空间本身的研究, 缺乏从室外街区风环境角度对下沉式开放空间的研究。下沉部分具有活跃的自然通风, 能够及时补给新鲜空气, 顺畅排除污染物, 促进地下空间的生态环境质量。为了满足人类对优质公共空间环境氛围的追求, 有必要对该类型空间的风环境进行研究。本文以西安市幸福林带下沉广场为研究对象, 采用计算流体力学 (CFD) 方法对其风环境进行数值模拟, 比较不同下沉高度对下沉广场内风环境的影响, 对了解和改善下沉式开放空间的风环境具有实际意义。

1 数值模拟

1.1 物理条件

依据西安市气象局对西安市 2020 年气候数据统计可知, 西安地理位置为东经 107.40~109.49, 北纬 33.42~34.45 度之间。年平均气温约为 13.6℃, 年平均湿度约为 69.6%, 年平均风速为 2.0m/s, 全年盛行风向为东北风。

1.2 模拟工况

研究对象为西安市碑林区幸福林带 C-2 段下沉式广场, 三维模型如图 1 所示。广场下沉面积 793.5m²。广场建筑尺寸为 37.8m×22m×3.5m (长×宽×下沉深度)。在设计下沉广场时, 下沉高度是否合理, 直接影响到地下空间的自然通风效果。考虑到地下空间施工困难, 而且一般地下建筑对高度都有相对要求 (不能太高), 所以本文中下沉广场高度变化时, 分别选取常见的下沉高度为 3.5m、4.5m、5.5m 三种工况进行分析。

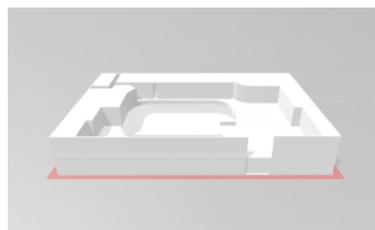


图 1 下沉广场三维模型

Fig.1 3D model of sunken square

1.3 确定计算域

由于建筑物室外风环境属于绕流问题^[14], 针对此类问题, 选择合适的室外流场计算域可以很好的反映出建筑物周围的流场特性。在确定合适的计算域前, 首先考虑所选区域的阻塞率受到建筑物的影响不得大于 5%, 这里阻塞率指的是建筑物顺风向投影的面积与计算域该方向的面积比值。由于目前各种文献中对计算区域选取大小还没有统一规定, 本文选取计算区域时结合相关资料^[15], 确定模拟计算域的大小为: 长度×宽度×高度分别为原下沉广场的 4 倍、7 倍、4 倍。则计算域定为: 长×宽×高=160m×150m×14m, 其中来流入口与建筑物迎风面间距为 3 倍的建筑物高度, 出口与建筑物背风面间

距为 6 倍建筑高度。

1.4 数学模型及边界条件

本文采用标准 $\kappa-\varepsilon$ 模型进行模拟计算，室外风场来流边界条件的确定主要由来流的速度分布、风向、湍流强度和湍流耗散决定^[16]。由于受到近地面粗糙度的影响，来流风会在与地面垂直的高度方向上产生速度梯度与速度边界层，其速度分布的特点与距离地面高度、地面粗糙度有关^[17]。一般表述速度边界层这一分布特性的函数有对数边界层分布函数法与指数边界层函数法，本文参考了 ASHRAE 手册中给出的指数边界层函数法对入口来流速度来进行定义，其表达式为式 (1)：

$$V_h = V_{ref} \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^a \quad (1)$$

式中， V_h 为任意高度处的风速，m/s； V_{ref} 为参考高度处的风速，一般指气象资料中给出的风速值，m/s； H_{ref} 为对应参考风速的高度，一般指气象台的测量高度，通常这个高度为 10m； H 为对应 V_h 的任意高度，m。

我国建筑结构荷载规范 GB 5009-2001 按地面粗糙度将地貌分为四类，从西安地理气候特性来看，西安全年平均风速为 2.0m/s，模拟的下沉广场位于城市市区，粗糙度取 0.22，使用 UDF 编程对入口速度边界条件进行定义。本文风速采用 2.0m/s，全年盛行东北风，风向趋于稳定，所以本文在风向选取上采用定风向稳态模拟，在建立模型时将下沉建筑与来流方向成一定角度 (45°)。本模型上空面、两侧面设置时对其采用 Symmetry 边界条件，地面及建筑物表面设置为 Wall 边界条件，出流面边界条件选择 Pressure outlet，在建模时计算域内采用四面体非结构化网格，下沉广场构造模型的网格划分如图 2 所示。

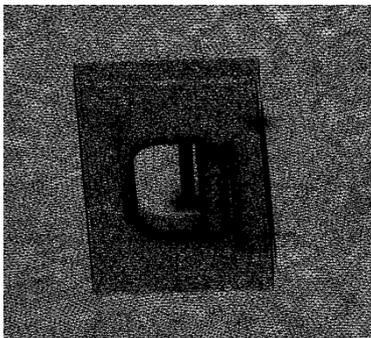
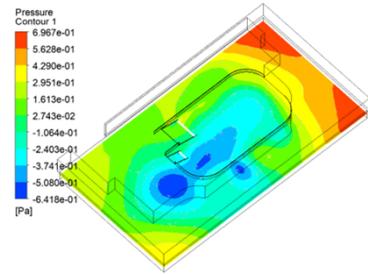


图 2 模型网格划分

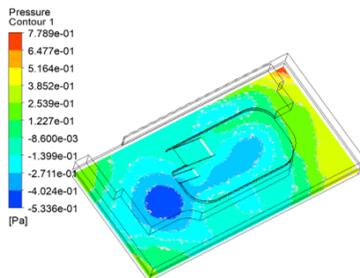
Fig.2 Model grid division

2 模拟结果及分析

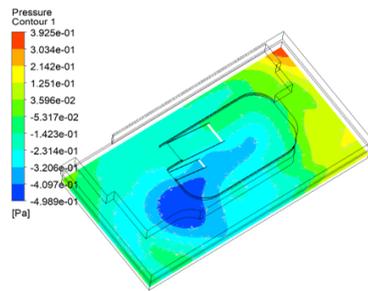
2.1 三种下沉高度风压分布



(a) 3.5m 下沉高度风压云图



(b) 4.5m 下沉高度风压云图



(c) 5.5m 下沉高度风压云图

图 3 三种工况下风压分布云图

Fig.3 Cloud map of wind pressure distribution under three operating conditions

图 3 为不同下沉高度下 (3.5m、4.5m、5.5m)，下沉广场风压分布状况详图，其等值线间距为 0.22~0.23Pa。从图 3 可以看出，通过模拟得到的室外风场的模拟结果流场符合一般的流场规律，即建筑迎风面均出现正压，背面和广场入口一般出现负压，且由于气流在背风面出现了一定的分离，产生了一定大小的涡流；下沉广场入口处及背面涡旋区始终出现为负压。对于本文研究的下沉区域，广场内正风压区域都呈现出中间大、两端小的变化趋势。其压力分布有正压和负压，这是由于建筑物与来流风向成一定角度，背风面局部地区带有一定涡流。随着下沉高度的增加，下沉区域靠近入口处的正压区域增大，背风和下沉入口区域涡旋区域减小，当

下沉高度为 5.5m 时, 局部正压比下沉高度 3.5m、5.5m 都要大; 综合来看, 下沉广场在三种下沉高度下前后压差基本处于 3~4Pa 之间, 有利于下沉广场内建筑自然通风的引入。

建筑物不同表面间的风压差是形成建筑内自然通风的主要驱动力, 在整个下沉广场建筑风压图中选取下沉区域迎风面最大风压区最大风压、下沉区域迎风面侧面正压区最大风压、下沉区域迎风面部分负压区最大负压, 沿截取压力点再对下沉区域建筑两侧压差进行分析。下沉区域不同下沉高度各截面的风压差变化如图 4 所示。从图 4 可以看出, 对于下沉区域建筑迎风面来说, 随着下沉高度的增加, 下沉广场内的风压差增大, 说明下沉高度越大, 越有利于自然通风。对于建筑迎风面侧面来说, 随着下沉高度的增加, 下沉广场内的风压差呈先增大后减小的趋势, 最大值出现在 4.5m 下沉高度处, 说明下沉高度有一个最适值, 超过最适值再增加下沉高度, 下沉区域内建筑自然通风逐渐变差。对于迎风面部分负压区来说, 随着下沉高度的增加, 下沉广场内的风压差逐渐减小, 原因是广场内负压区随着下沉高度的增加压力在增大, 前后压差减小。综上, 增加广场下沉高度有利于下沉区域建筑的自然通风, 特别是加大迎风面的下沉高度。

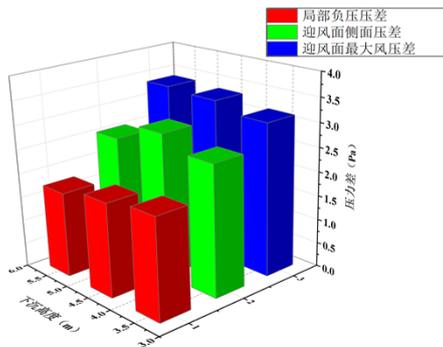


图 4 三种工况下不同立面压差

Fig.4 Different façade pressure differentials under three operating conditions

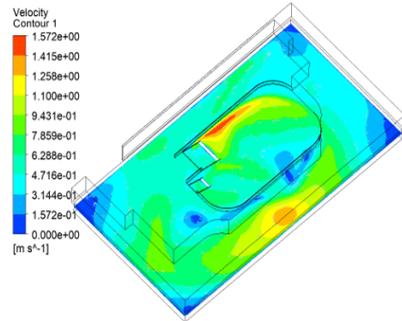
2.2 人行高度区域速度流场

图 5 表示了三种不同下沉高度下距地面 1.5m 截面处的速度场, 此水平区域为人行区, 是人们经常活动最能感知的范围和整个微气候区域最关键的区域, 国内外很多学者对“人行高度区”内风速大小引起的行人不舒适性等问题做了大量研究, 通过大量的测试及调查统计得出表 1 的关系^[18], 结合

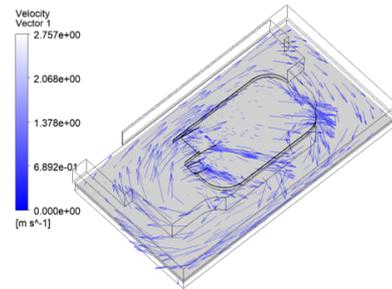
表 1 对下沉广内人行区舒适性进行评价。

表 1 室外风速与舒适度评价

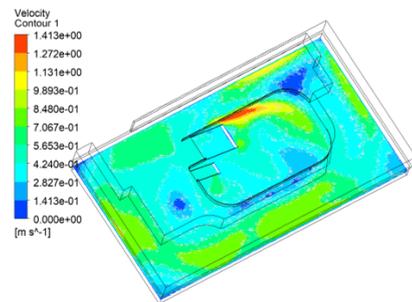
Table 1 Outdoor wind speed and comfort evaluation					
风速	$V < 5$	$5 < V < 10$	$10 < V < 15$	$15 < V < 20$	$V > 20$
舒适感	舒适	不舒适, 行动受影响	极不舒适, 行动严重受影响	不能忍受	危险



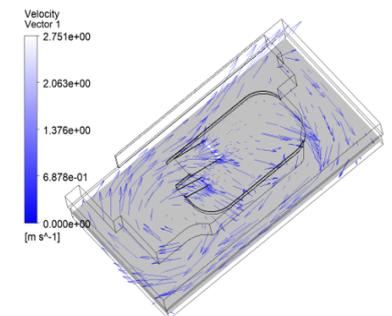
(a) 3.5m 下沉高度风速云图



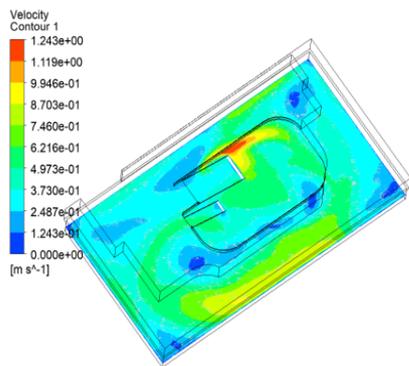
(b) 3.5m 下沉高度风速矢量图



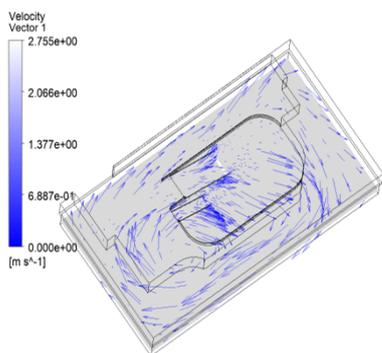
(c) 4.5m 下沉高度风速云图



(d) 4.5m 下沉高度风速矢量图



(e) 5.5m 下沉高度风速云图



(f) 5.5m 下沉高度风速矢量图

图 5 三种工况下风速分布云图

Fig.5 Wind speed distribution cloud map under three operating conditions

由图 5 结合表 1 可以看出,下沉高度为 3.5m、4.5m、5.5m 时,距地面 1.5m 截面速度分布基本都在 2m/s 以下,下沉广场内最大风速出现在下沉区域入口楼梯底部与来流风向成 45° 夹角,贴近下沉区域起始端的地带,相邻间隔区域风速呈小范围增长趋势,满足人的舒适性。进一步分析可知,在广场内风速较大区域,下沉高度为 3.5m 时形成较明显的涡旋区,且漩涡数量比 4.5m、5.5m 都要多,但涡流区域都很小,速度变化基本控制在 0.2m/s 以内;下沉高度为 3.5m、4.5m 时,距地面 1.5m 截面速度均大于 5.5m 时的速度分布,但均满足人的舒适性,最大风速也都出现在下沉区域入口楼梯底部与来流风向成 45° 夹角,贴近下沉区域起始端的地带;这两个工况与 5.5m 比较,其涡旋区范围要大,但密度较小,速度增长趋势较为平缓。下沉高度 3.5m 与 4.5m 比较而言,下沉高度为 3.5m 时,

距地面 1.5m 处风速分布平均值更大,吹风感会更强烈,但局部产生的较大风速会对人产生不适影响。

从图 5 中可以看出,三种不同下沉高度的速度场均符合一般流场规律,即随着下沉高度的变化,下沉区域会形成不同大小的涡流区,但区域的面积不是很大,密度也较小。引起下沉区域涡流区的原因是,近地面的风吹向周围建筑表面,由于地面形状的变化,一部分风沿下沉高度方向向下运动,且受到墙体壁面的冲击导致回流。综合来看,通过合理的下沉高度能够改善地下空间通风环境,下沉高度为 4.5m 时,下沉区域人行高度风速适宜,建筑自然通风效果最好,但也应避免下沉广场内由建筑自然通风带走的污染物在过大的涡旋区堆积,直接降低广场内空气品质。

3 结论

以西安地区幸福林带下沉式广场为研究对象,对广场风环境进行数值模拟。通过对下沉式广场的风压云图、速度云图分析了这种建筑形式三种下沉高度工况的改变对下沉广场风环境的影响;通过改变下沉高度,截取各立面前后压差分析不同下沉广场高度下下沉区域建筑的自然通风潜能。通过上述研究的内容得出了以下结论:

- (1) 下沉式广场这种建筑形式下沉高度的改变并不影响流场的一般特性。
- (2) 当下沉式建筑与来流风成一定角度时,增加下沉广场的高度,广场内迎风面正压区增大,背风面涡旋区域增大。
- (3) 改变下沉高度的速度场,来流风在建筑迎风面下沉区域都会形成一定大小的涡旋,应避免下沉广场内由建筑自然通风带走的污染物在过大的涡旋区堆积,降低广场内空气品质。
- (4) 对于建筑迎风面来说,随着下沉高度的增加,广场内的风压差在增大,有利于下沉区域建筑的自然通风。对于建筑迎风面部分负压区来说,随着下沉高度的增加,广场内的风压差在减小。
- (5) 下沉高度为 3.5m、4.5m、5.5m 时都能满足人行高度区的舒适性。

参考文献:

[1] 谢雨杉.环境行为理论下的商业建筑下沉式广场空间环境设计策略研究[D].北京交通大学,2018:3-8.

- [2] 高春华. 城市地下商业空间建筑设计浅析——下沉广场空间视觉营造与消防功能平衡[J]. 建材与装饰,2019,(18):112-113.
- [3] 俞明健, 范益群, 张竹, 等. 城市中心活动区地下商业空间规划与设计: 沈阳亿丰地下不夜城开发利用[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(S1):1551-1556.
- [4] 田湘雯. 西安大型购物中心地下商业空间人性化设计研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.
- [5] LI C G. Sustainable Utilization of Underground Space in Urban Regeneration Areas—As an example of qingdao city[C]. International Conference of the Associated Research Centers for Urban Underground Space, 2009: 69-74.
- [6] Li W, Chen Z, Yang X, et al. International Underground Commercial Space Development and Utilization Experience[C]. Paris: Atlantis Press. Advances in Computer Science Research, 2015:494-497.
- [7] 杨钊. 现代城市下沉式广场空间设计初探[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005:64-65.
- [8] 党春红, 伍珊珊, 侯品伯格. 下沉式商业街人性化环境设计策略研究[J]. 建筑技术,2020,51(9):1094-1098.
- [9] CUI D J, HU G, AI Z T, et al. Particle image velocimetry measurement and CFD simulation of pedestrian level wind environment around U-type street canyon[J]. Building and Environment, 2019,154:239-251.
- [10] 王星心. 环渤海地区城市住区室外风环境优化设计研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020:3-5.
- [11] 刘彬. 寒冷地区CBD冬季室外风环境研究: 以西安高新软件园CBD为例[D]. 重庆:重庆大学,2017:10-15.
- [12] LIN Y J, JIN Y M, JIN H. Field study on the microclimate of public spaces in traditional residential areas in a severe cold region of China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019,16(16):2986.
- [13] 杨晓彬, 陈志龙, 赵子维, 等. 地下空间开发对城市微气候影响的研究初探[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(6):1445-1450.
- [14] 王星心. 环渤海地区城市住区室外风环境优化设计研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020.
- [15] 杨洁, 涂光备, 易伟雄. 设有空中花园的高层住宅建筑自然通风的研究[J]. 暖通空调,2004,(3):1-5.
- [16] CH Hu, F Wang. Using a CFD approach for the study of street-level winds in a built-up area[J]. Building and Environment, 2005,40(5):617-631.
- [17] 李珂. 西安地区下沉式庭院建筑自然通风及采光的研究与优化[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013:3-10.
- [18] 关宾蓉, 马国馨. 建筑设计和风环境[J]. 建筑学报, 1995,(11):44-48.