

多层地下空间工程空腔利用研究

吴限红

(上海城市空间建筑设计有限公司, 上海市 200092)

摘要:为解决城市地下空间集约化建设带来的结构空腔利用问题,以广州南沙新区明珠湾起步区地下环路及公共地下空间(二期)项目为例,结合国内大型复杂市政综合体项目,在项目区位、布置规则、功能系统、周边环境等约束条件下,分析了宝库、海绵城市、全钒液流电池、智能交通设施、无人仓储物流5种方案的可行性,从设置要求、应用面临的难题等方面进行探讨,并提出评价指标表。分析表明:宝库设置规范严苛,对空腔的集中性与完整性要求较高,难以适配零散分布的空腔形态;海绵城市方案契合生态发展需求,要求空腔集中设置,改造复杂度高;全钒液流电池对周边环境存在潜在影响,需要满足严格的防火、防爆及环保要求;智能交通设施可在具备相应场地条件的区域设置;无人仓储物流方案布局灵活性高,契合低空经济发展需求,具备较强的应用可行性。

关键词: 地下空间工程;空腔利用;宝库;海绵城市;全钒液流电池;智能交通设施;无人物流;低空经济
中图分类号: TU93 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2026)04-0031-05

Research on Utilization of Cavities in Multi-layer Underground Space

WU Xianhong

(Shanghai City Space Architectural Design Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to address the issue of the utilization of structural cavities resulting from the intensive construction of urban underground space, taking the Guangzhou Nansha New District Mingzhu Bay Start-up Area Underground Loop Road and Public Underground Space (Phase II) Project as an example, combined with the large-scale complex municipal complex projects in China, and under the constraints of project location, layout rules, functional systems and surrounding environment, the feasibility of five schemes, namely treasure houses, sponge cities, all-vanadium redox flow batteries, intelligent transportation facilities and unmanned logistics warehousing is analyzed. The discussion is conducted from aspects such as setting requirements and the difficulties faced by the application. And the evaluation index table is proposed. The analysis shows that the treasure house has strict setting specifications, and the concentration and integrity of the cavity are required to be relatively high, making it difficult to adapt to scattered cavity forms. The sponge city scheme is in line with the ecological development needs, requiring the centralized setting of cavities and having a high complexity of reconstruction. All-vanadium redox flow batteries have potential impacts on the surrounding environment and need to meet the strict fire prevention, explosion prevention and environmental protection requirements. The intelligent transportation facilities can be set up in areas with corresponding site conditions. The unmanned warehousing and logistics scheme has high layout flexibility, conforms to the development needs of the low-altitude economy, and has the stronger application feasibility.

Keywords: underground space engineering; cavity utilization; treasure house; sponge city; all-vanadium redox flow battery; intelligent transportation facilities; unmanned logistics; low-altitude economy

0 引言

近年来,随着城市化快速发展,地下空间开发成为缓解城市土地资源紧张等问题的重要手段。与此同时,随着整体开发规模的扩大以及设计水平、施工

工艺的提升,地下结构集约化程度逐步提升,城市地下交通、地下公共服务设施、地下市政工程、地下人防工程采用共同集约化建设的方式,不仅减少了反复开挖与投资,同时也提高了地下空间资源利用率,成为解决“城市病问题”的有效方案^[1-3]。常见的集约化建设包括地下空间与地铁车站共建^[4-5]、地下环路与综合管廊共建^[6-7]、地下空间与综合管廊共建^[8]等。然而,集约化建设带来高效利用的同时,受制于

收稿日期: 2025-07-20

作者简介: 吴限红(1990—),女,学士,工程师,从事建筑设计工作。

建筑功能布置需求及结构型式,往往形成结构空腔。

目前,众多学者对地下空间集约化建设及空间改造进行了研究^[9]。丹麦哥本哈根伦霍尔德清洁中心将车库整合为地下清洁中心,法国雷阿勒商场统筹空间将旧商场整合为城市综合体^[10]。在针对地下结构空腔的分析中,胡潇帆^[11]对不同形式下深埋地下环路结构方案标准段进行了分析,研究了加设结构空腔的必要性及经济效益。程光华等^[12]在对我国城市地下空间开发利用的研究中,提出城市在规模化开发中面临着新老建筑整合协同的问题,新老建筑在衔接过程中,必然产生部分未设置建筑功能的空腔。王浩^[13]针对城市既有地下工程结构,提出了结构空腔填充法、结构加固封堵法等。一方面,地下结构空腔属于地下建筑集约化建设过程中用于控制投资的一个手段;另一方面,结构空腔占用了地下空间的资源,且会成为未来既有地下工程结构处置中的一个复杂点,而城市地下空间开发具有不可逆性,建成后很难再扩大体积或改变用途^[14]。与此同时,近年来随着低空空域管理改革的深化和低空空域飞行需求的释放,低空经济有望成为城市新的经济增长引擎^[15-17],地下工程空腔在低空经济中的应用亦需要进行探究。然而,目前针对空腔利用的研究仍较匮乏。

因此,以广州南沙新区明珠湾起步区地下环路及公共地下空间(二期)工程为例,结合大型复杂市政综合体项目,探究多种空腔利用方案的优缺点及适用条件,并提出空腔利用评价指标表,可为类似项目空腔利用分析提供参考。

1 工程概况

1.1 项目概述

广州南沙明珠湾区地下环路及公共地下空间(二期)工程位于广州市南沙新区横沥岛尖,是南沙中央商务核心区,处于粤港澳大湾区几何中心位置。

该项目位于横沥岛起步区大元路、金融大道、新北路、新联路等4条市政道路下方,含公共地下空间7.0万m²、地下环路5.92 km和综合管廊4.9 km等三大功能系统。该项目秉承“集约、绿色、智慧”的建设理念,采用结构共建方式,促进城市地下空间集约高效发展。项目总投资约80亿元,其中建安费约65亿元。图1为项目总平面效果图。

该项目地下共4层,地下一层主要为公共地下空间,地下二层为地下环路及综合管廊,地下三层、四



图1 项目总平面效果图

层为综合管廊,最大埋深约22 m。地下一层层高5.2~6.9 m,地下二层层高约5.9 m,地下三层层高约3.6 m。

1.2 空腔设置原则

(1)功能需求原则

覆土过深情况下,地下环路开挖、建造、回填后,若不采用空腔方案,地下环路顶部覆土过深,压实度低,根据以往工程经验,容易出现路面沉降、路面开裂等问题。

(2)结构性能、经济合理性原则

覆土过深情况下,顶覆土作为竖向永久荷载,使得环路结构尺寸大大增加。此外,结构主要依靠桩基承担竖向荷载,竖向荷载的增加,导致承压桩的数量增加。因而,设空腔减少覆土荷载,可以节省总投资造价。

1.3 设置类型与规模

该项目结构空腔主要分为两种类型:类型A位于结构内部,上部为功能区;类型B位于地下一层,空腔上方为厚填土。类型A主要由综合管廊上下翻越地下环路交叉口引起,分散度高,难以利用。这里主要讨论类型B,其分布如图2所示。

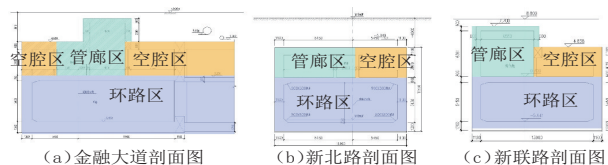


图2 空腔典型剖面图

(1)金融大道在B1层布置双孔空腔,金融大道子项目1长度约1 284 m,子项目2长度约1 552 m,总长度约2 836 m,宽度为3.0~8.15 m,高度约3 m,面积约16 200 m²。

(2)新联路(横沥中路南侧)在B1层布置单孔空腔,长度约165 m,宽度约9.4 m,高度为3.2~3.8 m,面积约1 593 m²。

(3)新北路(横沥中路南侧)在B1层布置单孔空

腔,长度约 153 m,宽度为 4.7~8.25 m,高度约 3 m,面积约 922 m²。

2 案例调研

经实际案例调研,大型复杂市政综合体项目空腔利用案例主要有南京江北新区中心区地下空间、郑州市民公共文化服务区南区地下交通系统及地下空间,分别在宝库和海绵城市方面进行了利用。

2.1 南京江北新区中心区地下空间——宝库

南京江北新区中心区占地约 16 km²,其中中央商务区(CBD)区域占地面积约 7.6 km²。地面 24 地块共规划 20 栋高强度开发摩天大楼,主要用于办公、商业、酒店等。

宝库位于一区 1 段地下四层及地下五层。地下四层建筑面积为 5 550 m²,宝库核心区使用面积为 1 520 m²;地下五层建筑面积为 3 760 m²,宝库核心区使用面积为 1 273 m²。根据宝库建设规模及规范相关要求设置配套消防设施,地下四层平面、地下五层平面及宝库断面见图 3 至图 5。



图 3 地下四层宝库平面示意图



图 4 地下五层宝库平面示意图

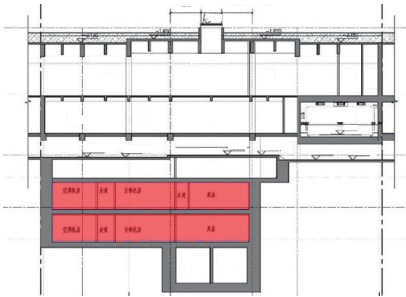


图 5 宝库断面示意图

2.2 郑州市民公共文化服务区南区地下交通系统及地下空间——海绵城市

常西湖中央绿轴地下空间结合海绵城市建设,利用地下二层结构空腔收集南侧约 74 hm²范围雨水,空腔有效蓄水容积可达 39 000 m³,蓄水池断面如图 6 所示。

海绵城市工程雨水回用系统位于地下二层结构空腔内,总面积约 19 000 m²。

每座结构空腔均设计雨水处理机房,超过空腔蓄水容积的雨水排入渠南路主干管,最终排入贾

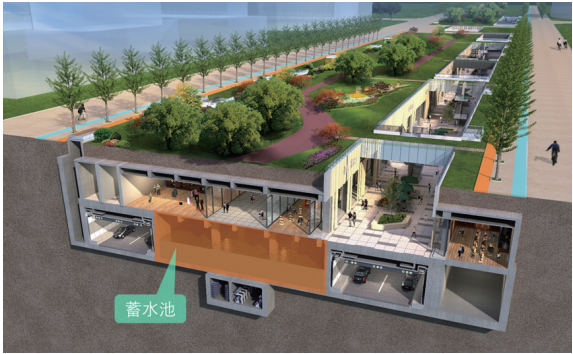


图 6 海绵城市蓄水池断面图

裕河。

结构空腔内雨水处理机房对收集的雨水进行过滤、消毒处理,满足雨水回用的水质要求。雨水回用系统处理工艺为:雨水经集水池物理沉淀后,投加絮凝剂进入砂滤罐过滤,砂滤罐出水加氯消毒,处理后的雨水由清水箱储存,并提升接入室外供水管网,与灌溉系统联动。雨水处理系统设计规模 100 m³/h。

3 空腔应用研究

3.1 方案一:宝库

3.1.1 设置要求

(1)库体层高:库房面积 200 m²以下,每层净高不低于 4 m;库房面积 800 m²以上,每层净高不低于 5 m。

(2)地下库建筑应为双墙回廊式,回廊净宽一般为 600~800 mm,四面贯通,转角处设折射装置。

(3)出、入库通道:通道是构成库房结构的要素之一,应单一设置,做到无观察死角,便于警戒与监控。

(4)应设置专用卸货区。

(5)应设置配套工作用车的存放、检修、专用电梯等设施。

(6)防水等级应采用 I 级。

宝库按丁类仓库设防,并在内部设置自动灭火系统。根据《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)(2018 年版),每个防火分区允许的最大建筑面积为 1 000 m²,安全出口不应少于 2 个,疏散距离不应大于 45 m,耐火等级不应低于二级。门应向疏散方向开启,门的最小净宽不宜小于 0.9 m。图 7 为宝库示意图。

3.1.2 应用问题与结论

宝库设置规范严格,对空间的集中性、安全性要求较高,与该项目零散分布的空腔特征适配性较低,



图7 宝库示意图

大规模应用受限。可结合具体需求进行小规模尝试,需要严格按照规范优化消防、疏散及配套设施设计。因此,宝库并非该项目空腔利用的优先方案。

3.2 方案二:海绵城市

3.2.1 设置要求

(1)选址:选择地势相对较低的位置,有利于雨水依靠重力自流进入处理机房,但要注意避免位于易受洪水淹没的区域。

(2)规模:根据雨水收集量 and 处理需求确定机房的规模。需要综合考虑服务区域的面积、降雨量、雨水回用需求等因素,通过水文计算和用水分析,确定合适的处理能力,一般以每天处理多少立方米雨水为设计指标。

(3)布局:合理划分功能区域,一般包括预处理区、处理设备区、清水储存区、控制区等。

图8为海绵城市蓄水池示意图。

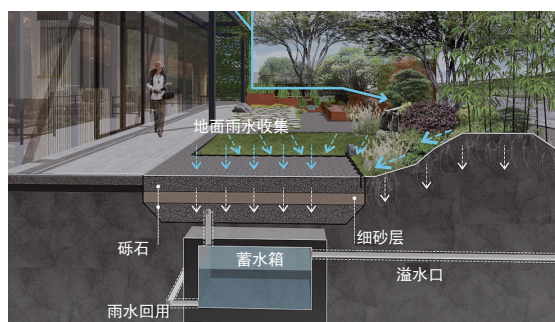


图8 海绵城市蓄水池示意图

3.2.2 应用问题与结论

该项目改造为海绵城市将面临协调、经济性和风险性问题。需要协调周边地块进行整体海绵城市需求分析,确定运营管理方。该项目空腔为零散长条形,蓄水池和设备集中布置困难,投资高、效用低,且空腔位于B1层,地下环路为B2层,改造存在一定风险。

3.3 方案三:全钒液流电池

3.3.1 设置要求

全钒液流电池储能系统有其特定的建设运行规

范,包括定义、储能形式、安全风险、选址原则、平面布置、监控系统、土建(建筑)、防火分区与分隔、防爆及其他等多方面要求。例如,火灾危险性为丁类,耐火等级不应低于二级,每个防火分区面积不大于1 000 m²,安全出口不少于2个,疏散距离不大于45 m等。图9为全钒液流电池示意图。

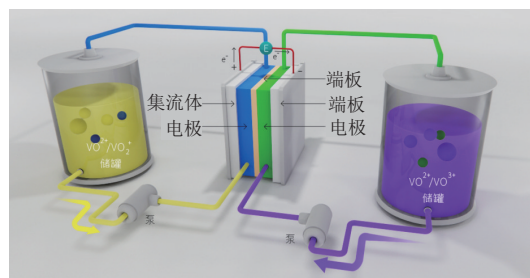


图9 全钒液流电池示意图

3.3.2 应用问题与结论

该项目若应用全钒液流电池,建筑方面需要满足一系列防火、防水、保温隔热等要求,且需要重新规划和消防报批。暖通需要设置气体检测报警和温度控制装置。监控需要配置计算机系统。结构上需要考虑运输安装可行性及增加荷载配筋。同时,项目空腔布置零散,出地面设施增加多,对周边影响大,且需要做防爆、泄爆措施,废水、污水需要分类收集处理。因此,不建议在市政道路下方设置该类有害设施。

3.4 方案四:智能交通设施

3.4.1 设置要求

平面移动类停车设备由搬运器和停车架组成。搬运器在平面内运动,可实现车辆存取,适用于多种场所,车位布置灵活,可纵向或横向布置。其建筑设计需要满足设备安装、运行、维修要求,根据车型和车位布置确定基本尺寸。平移类机械式汽车库如图10所示。

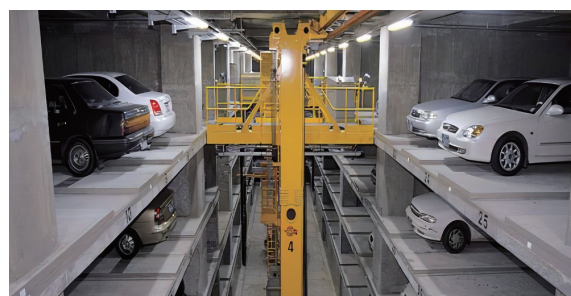


图10 平移类机械式汽车库示意图

3.4.2 应用问题与结论

该项目空腔位于市政道路下方,安全出口设置需要结合城市绿带和公共绿地,设置专用车道、升降机及等候车位。但是,新联路、新北路无绿带,空腔

无法使用。若按规范设置停车位,因单边长度太长,车辆进出时间过长;若按合理进出时间设置,需要增加安全出口、地面道路出入口及等候车位,影响城市绿带和交通组织。

3.5 方案五:无人仓储物流

3.5.1 设置要求

结合自动化设备特性、运营效率及安全规范,无人仓储物流系统设置的核心要求主要有:土建基础设置要求、自动化设备系统要求、信息系统设置要求、安全与环保要求、运维管理要求以及合规性与认证等要求。图 11 为无人仓储物流示意图。

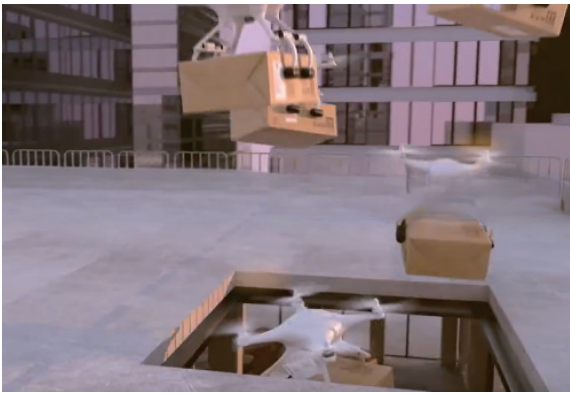


图 11 无人仓储物流示意图

3.5.2 应用问题与结论

改造为无人仓储物流需要结合周边地块进行需求分析,明确轨道式地下物流服务对象,预留连通口,无人机配送模式需要在顶板开孔并增加出地面设施,且需要从全流程考虑解决物流仓储问题。

4 空腔利用评价

为对不同空腔利用方案进行统一性评价,并对更多可拓展的利用方案进行定性及定量比较,提出评价指标(见表 1),从空间适配性、技术可行性、经济合理性、环境与政策适配性四大方面,对各种方案进行评价分析,并根据各自权重得出总评价。从表 1 可以看出,得分最高的方案为无人仓储物流,即为 5 个方案中适配该项目结构空腔的最优方案。

5 结 论

以广州南沙新区明珠湾起步区地下环路及公共地下空间(二期)工程为例,结合大型复杂市政综合体项目特征,分析了 5 种方案在地下结构空腔利用方案的优缺点,并提出了评价指标表,主要结论有:

(1)5 种利用形式优缺点

宝库因设置规范严苛,对空腔的集中性与完整性要求较高,难以适配零散分布的空腔形态;海绵城市方案契合生态发展需求,但要求空腔集中设置,改造协调复杂度高、投资与风险高;全钒液流电池储能系统因对周边环境存在潜在影响,且需要满足严格的防火、防爆及环保要求,不适用于市政道路下方;智能交通设施的适用性受限于周边绿带条件,可在具备相应场地条件的区域结合需求进行设置;无人仓储物流方案因布局灵活性高,且契合现代物流发展趋势与我国低空经济发展需求,具备较强的应用可行性。

(2)评价指标表

从空间适配性、技术可行性、经济合理性、环境与政策适配性 4 个方面进行分析并评价空腔方案合理性。该评价指标表为类似地下空间集约化建设项目中的空腔利用提供了可借鉴的决策路径,即优先考虑空间适配性、环境政策适配性,再结合技术要求与经济成本进行综合研判。

参考文献:

[1] Broere W. Urban underground space: Solving the problems of today's cities[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016 (55): 245-248.
[2] 朱合华,骆晓,彭芳乐,等.我国城市地下空间规划发展战略研究[J].中国工程科学,2017,19(6):12-17.
[3] 彭芳乐,乔永康,程光华,等.我国城市地下空间规划现状、问题与对策[J].地学前缘,2019,26(3):57-68.
[4] 陈炜.顶板大开洞深层地下结构抗震性能分析[J].中国建筑金属结构,2024,23(4):100-102.
[5] 汪国良.襄阳东津站枢纽共建地下车站结构方案研究[J].建筑结构,2020,50(增刊1):203-208.
[6] 王寿生.地下空间发展历程与新思维[J].地下空间与工程学报,2022,18(3):733-742.

表 1 空腔利用评价指标表

序号	方案	空间适配性(30%)	技术可行性(20%)	经济合理性(20%)	环境与政策适配性(30%)	总评价(100%)
1	宝库	40	40	40	60	46
2	海绵城市	40	90	40	90	65
3	全钒液流电池储能	40	40	40	50	43
4	智能交通设施	60	60	90	90	75
5	无人物流	90	60	90	90	84