

上海深层地下空间利用现状与技术挑战

王文渊, 王 新, 姜 弘

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200125]

摘要: 在现存土地资源不足以承载城市的快速发展和城市安全以及环境问题日益突出的背景下, 深层地下空间的开发是化解建设矛盾、维护社会稳定的重要手段。通过调研上海已建成的苏州河深隧道调蓄工程、硬X射线科学实验装置、静安大宁停车库等6个深层地下空间工程案例, 分析了上海当前深层地下空间利用的现状与不足。目前, 上海点状的基础工程(如桩基础)已较多进入深层地下空间, 同时形成了超深基坑、超深竖井、超深盾构隧道等建造技术, 但功能性的深层地下空间开发较少, 且其探索范围主要集中于较浅部的深层地下空间, 埋深尚未突破60 m, 与国际发达城市相比, 在深度利用上仍存在差距, 缺少系统性规划和制度保障, 深部岩土体力学理论尚未建立, 软土深层地下空间开发技术尚未得到验证。针对不足以及上海的砂性土分布广、承压水高、环境保护要求高等建设条件特征, 探讨了上海未来地下深层空间开发面临的深层承压水治理、竖井建造、盾构隧道建造等方面的建造技术挑战。

关键词: 深层地下空间; 利用现状; 深层承压水治理; 竖井建造; 盾构隧道建造; 技术挑战

中图分类号: U451

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)04-0001-07

Utilization Status and Technical Challenges of Deep Underground Space in Shanghai

WANG Wen yuan, WANG Xin, JIANG Hong

[Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China]

Abstract: Under the background that the existing land resources are not enough to carry the rapid development of the city and urban safety, as well as the increasingly prominent environmental problems, the development of deep underground space is an important means to resolve the construction conflicts and maintain the social stability. By investigating 6 deep underground space engineering cases of Suzhou River Deep Tunnel Storage Project, hard X-ray scientific experimental equipment, Jing'an Daning Parking Garage and so on built in Shanghai, the present situation and deficiency of deep underground space utilization in Shanghai are analyzed. Currently, the punctate foundation engineering (such as pile foundation) in Shanghai has entered deep underground space, and at the same time, the construction technologies of ultra-deep foundation pit, ultra-deep shaft and ultra-deep shield tunnel have been formed, but the development of functional deep underground space is less, and the exploration scope is mainly concentrated on the shallow deep underground space. The depth of burial has not yet exceeded 60 m. Compared with the international developed cities, there is a gap in deep utilization, lack of systematic planning and institutional support, deep geotechnical physical theory has not been established, and the development technology of soft soil deep underground space has not been verified. In view of the shortage and the construction conditions characteristics of wide distribution of sandy soil, high confined water and high environmental protection requirements in Shanghai, the construction of future underground deep space development in Shanghai facing the technical challenges such as the control of deep confined water, construction of shaft and construction of shield tunnel, overburden water control, shaft construction, and shield tunnel construction is discussed.

Keywords: deep underground space; utilization status; control of deep confined water; shaft construction; shield tunnel construction; technical challenge

0 引言

21世纪以来, 上海经济高速发展, 人民生活水平显著提升, 然而土地资源供应却跟不上城市的快速发展。深化立体城市发展, 向空中和地下索取空间资源成为上海摆脱土地资源匮乏困境的重要手段。

收稿日期: 2024-09-27

基金项目: 中国土木工程学会资助项目(CCE52024KT09), 超大城市深层地下空间利用策略与前瞻技术

作者简介: 王文渊(1992—), 女, 硕士, 工程师, 从事隧道、地下结构的工程设计及科研工作。

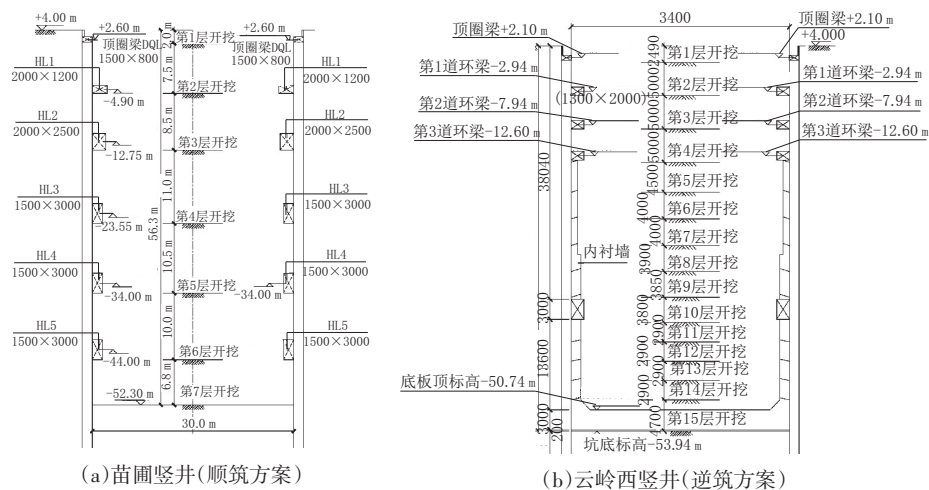


图2 竖井开挖分层示意图^[3](单位:mm)

战。主要难点包括超深基坑工艺配套不足、承压水治理难度大及环境保护要求高。

1.1.3 关键技术与创新

(1)超深地下连续墙施工

引进新型铣槽机,提升地下连续墙深度至150 m,通过工序优化、落实分段测斜等措施,将成槽的垂直度提升到1/1 000,优化接缝防水质量。

(2)超深地基加固技术

开发超深地基加固技术,提升施工深度至110 m,通过接缝声波透射法检测及针对性加固,确保接缝质量。

(3)超深承压水治理

通过原位水文勘测试验,优化降水方案,提升井点管垂直度至1/500,保证井点出水效率。

(4)实施效果

两座超深竖井的逆作和顺作法施工均成功,提升地下连续墙垂直度标准至1/1 000,优于国际标准。苗圃竖井的顺作施工围护结构变形和周边建筑沉降量均控制在极低水平,节约了工期,安全和质量控制均达到预期目标。

1.2 案例二:硬X射线科学实验装置工程

硬X射线自由电子激光装置项目包含5个超深基坑工程和4段盾构隧道区间,项目总长度约3 110 m。工程线路如图3所示,地质水文条件剖面如图4所示。



图3 硬X射线工程线路图(单位:m)

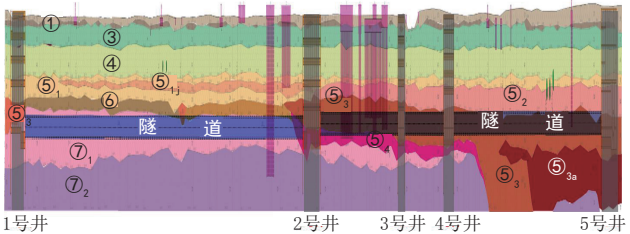


图4 地质水文条件剖面图

基坑最大深度45.45 m,为5号井,位于上海市浦东新区张江园区。工作井规模55 m×76 m(内净),采用1 200 mm厚地下墙,墙深89.8 m,采用900 mm厚止水帷幕TRD,帷幕深69 m,采用10道混凝土支撑。

该工作井采用超深铣接头地下连续墙工艺施工,通过调整混凝土配合比提高混凝土施工性能,适当降低混凝土的早期强度,确保基坑开挖前达到设计强度,在此基础上减少二期槽铣槽难度,提高地下连续墙施工精度。地下连续墙垂直度均小于1/1 000。

该工程施工地点为上海富水软土地区,基坑底位于⑤₃层粉质黏土层。为减少开挖期间围护渗漏情况,提出了双帷幕地下水控制技术,采用深地墙+浅止水的形式,在地墙外侧5~10 m距离设置围绕基坑一周的TRD水泥土墙,深度为69 m(隔断⑦₂层承压水)。上海隧道工程有限公司联合上海工程机械厂有限公司研制了新型TRD80E设备,并在场地内完成了非原位86 m深TRD试验段施工。TRD施工深度为目前世界第一。

工作井周边重要建(构)筑物有高压铁塔、磁悬浮,高压铁塔处⑨层水位降深0.91 m,磁悬浮处⑨层水位降深0.89 m,⑨层停抽后,水位快速恢复至原始水位。高压铁塔墩柱处最大累计沉降2.93 mm,磁悬浮处墩柱不均匀最大累计沉降0.55 mm,均小于报警

值。因此,⑨层降压效果较好,对周边重要建(构)筑物影响较小。

1.3 案例三:静安大宁停车库

静安大宁深层停车库位于静安区大宁街道,地上占地面积 286 m^2 ,地下占地面积 836 m^2 ,由两座地下19层停车库组成。地下一层为设备层,地下一层以下为地下停车设备层,采用19层钢结构设计。

该项目单个竖井开挖直径为 23 m ,深度约 50 m 。深层停车库剖面如图5所示,竖井掘进工法如图6所示。



图5 深层停车库剖面示意图

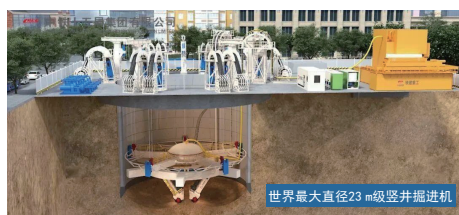


图6 竖井掘进工法示意图

在施工技术方面,该项目采用了我国自主研发的“梦想号”垂直盾构设备进行掘进。“梦想号”垂直盾构设备是目前全球最大的竖井掘进机,整机高约 10 m ,总重量达 650 t ,最大开挖深度可达 80 m ,同时具备 $14\sim 23\text{ m}$ 断面自由变径开挖能力。该设备的使用,不仅提高了施工效率,还保证了施工质量,对于地下深层空间的开发具有重要意义。

在设计方面,该项目创新采用了一种“井底环梁+十字梁”的组合式竖井刃脚结构。这一结构通过减小封底混凝土厚度,降低了封底混凝土施工的系统风险,提高了施工的安全性和效率。同时,通过在竖井外侧周边布置抗拔桩,并在桩顶设顶圈梁,与井壁共同组成抗浮体系,增强了结构的稳定性^[4]。该结构总体设计方案剖面如图7所示。

此外,创新采用了夹持器进行世界最大衬砌管片环的吊装作业,降低了吊装施工风险,提高了吊装精度和效率。通过仿真模拟水下混凝土流动性和扩展度的理论参数,并结合实际测定情况,优化了导管

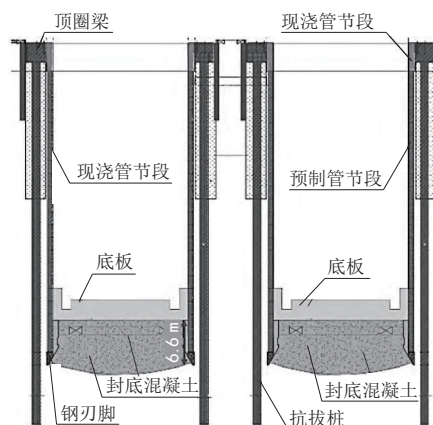


图7 结构总体设计方案剖面示意图^[4]

布置方案,确保了水下灌注封底混凝土的质量。

目前,该项目已完成施工,施工过程效率较高,对周边环境影响较小。

1.4 案例四:北横通道

北横通道是国内首条多点进出长大深层地下道路,其利用地下空间的深度也已达 48 m ,深度超过 40 m 的路段长达 2.6 km 。

北横通道西接中环北虹路立交,东至内江路,全长 19.1 km 。Ⅱ标全长 $7\,788.77\text{ m}$,主体部分(约 6.4 km)为盾构隧道,从中江路工作井始发,至筛网厂工作井接收,按“单管、双层、双向、6车道”布置,采用1台 $\phi 15.56\text{ m}$ 泥水气压平衡盾构机——“纵横号”施工。沿线穿越地层以⑦₁和⑦₂为主,均为砂质土层且赋存承压水,易引起开挖面失稳和盾尾渗流等问题。图8所示为北横通道隧道的三维示意图。



图8 北横通道隧道三维示意图

在北横通道新建工程Ⅰ标中山公园工作井的施工中,成功完成了 118 m 超深地下连续墙试验。这一试验采用了MC96成槽机,实现了在复合软土地基中 118 m 成槽的垂直度达到 $1/1\,000$ 以上,为超深地下连续墙护壁泥浆的比重、黏度、含砂率等指标提供了重要数据,同时也为提高超深地下连续墙铣槽工效奠定了基础^[5]。

1.5 案例五:周家嘴路越江隧道

上海周家嘴路越江隧道起自浦西周家嘴路-内江路路口,迄于浦东东靖路-张杨北路路口,全长

4.45 km,其中江中段长 2.57 km。该隧道采用盾构法施工,隧道直径为 14.5 m,按单管双层双向 4 车道设计。隧道最大覆土深度近 45 m,隧道底部最大水压力约为 0.6 MPa。

在盾构隧道管片接缝防水技术方面,通过量化分析和研究,确定了接触面应力和闭合压缩力均符合设计防水要求的弹性密封垫方案。通过优化密封垫防水槽位置、减少接缝错台量、加强角部防水能力等措施,显著提升了隧道防水性能。研究表明,该弹性密封垫设计方案合理可行,防水技术措施切实有效^[6]。

1.6 案例六:虹梅南路越江隧道

1.6.1 工程概况

虹梅南路隧道位于上海黄浦江南段,北起闵行区虹梅南路-永德路,南至奉贤区西闸公路以南 600 m。虹梅南路隧道工程全长 5 260 m,其中盾构隧道长 3 390 m。

盾构段隧道外径 14.5 m,管片厚度 600 mm,管片拼装采用 9+1 模式。隧道采用 1 台直径 14.93 m 混合式盾构(泥水气压平衡盾构)进行施工。隧道横剖面如图 9 所示,纵剖面如图 10 所示。

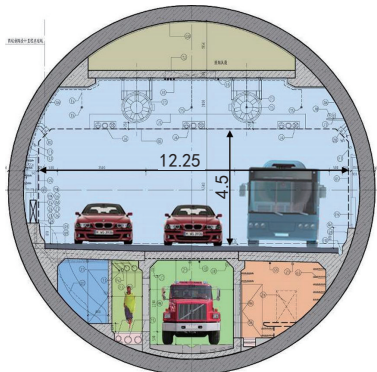


图9 虹梅南路越江隧道横剖面示意图(单位:m)

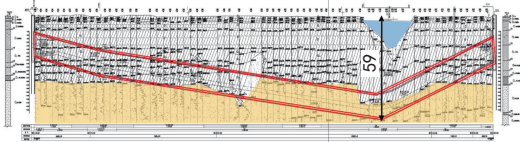


图10 虹梅南路越江隧道纵剖面示意图(单位:m)

1.6.2 主要特点与难点分析

该隧道最大埋深 59 m,大埋深条件下衬砌受力更加复杂,大埋深盾构对地层的扰动机理更复杂。长距离、全断面穿越⑦₂层粉细砂层,摩擦效应强烈。长距离、多工况穿越运营高压、有毒、易爆石化管线,施工风险极高。

1.6.3 关键技术与实施效果

(1)超深埋越江隧道的性能化设计方法

通过改进超深埋盾构隧道衬砌荷载的计算方法,并对隧道的横向与纵向结构设计模型进行优化和细化,提出了一套适用于超深埋盾构隧道的性能化设计理论,提高了隧道结构的稳定性和耐久性。

(2)超大直径盾构装备的安全控制技术

针对超大直径盾构装备,在理论上解决了刮刀在全断面砂性地层中的磨损问题,并通过实践验证了其在确保盾构机长距离推进安全方面的有效性。

(3)环境保护与施工控制方法

在环境保护方面,掌握了超深埋超大直径泥水平衡盾构的施工扰动机理,并建立了以曲率为控制标准的盾构参数调整方法。这一方法的应用,确保了双线 4 km 隧道在反复穿越乙烯管等敏感区域时的施工安全。

(4)深埋隧道质量信息化管理与监控技术

“虹梅南路隧道管片全寿命管理系统”的设计和开发,实现了隧道 BIM 模型及其系统集成的设计、施工信息向养护阶段的完整传递。该系统的应用为隧道全寿命期的智能化运维养护提供了有力支持。

(5)长大隧道火灾疏散与消防救援技术

在长大隧道火灾疏散与消防救援方面,提出了利用隧道下部空间作为专用疏散救援通道的策略。通过研究和实践构建了直通地面的消防救援专用车行通道,并提出了相应的消防救援策略,以提高隧道在火灾情况下的疏散效率和救援响应速度。

2 存在的不足

(1)在深度利用上存在差距。

目前,上海最深建筑基坑——徐家汇中心虹桥路地块 T2 塔楼工程,深度达 37.2 m;最深地铁车站基坑是轨道交通 14 号线豫园站,深度达到 36 m;最深市域铁路车站基坑是机场线华泾站,深度达 44 m;最深停车库基坑是静安大宁街道某停车项目,深度达 50 m;最深变电站是静安世博变电站,深度达 33.5 m;最深市政基坑工程是苏州河深隧调蓄示范段云岭西路竖井,深度达 58.65 m;最深科学实验用竖井是张江硬 X 射线科学装置项目,深度达 45.45 m;最深隧道是苏州河深隧调蓄示范段的主隧段,埋深达 60 m。按照《上海市地下空间概念规划》对地下空间深度的划分,深度超过 40 m 属于深层地下空间范畴。建筑类项目尚未涉足深层地下空间,配套停车设施以点状涉足深层地下空间,市政类隧道如北横通道、周家

嘴路越江隧道、虹梅南路越江隧道等局部以线状涉足深层地下空间。整体来看,上海深层地下空间利用深度仅40~60 m,除苏州河深隧调蓄工程外尚没有形成系统性的深层地下空间的应用规划。

在国际上,日本在建磁悬浮中央新干线多个基坑深度达到了80~90 m,隧道的埋置深度也达到了100 m;日本东京圈排水系统竖井深度达65 m,主隧道埋深超过50 m;日本东京地铁南北线埋深达43 m,都营大江户线埋深达49 m;日本东京地下道路埋深超过40 m,部分规划深度达到100 m;韩国首尔规划大深度快速轨道交通,市区段埋深达到40 m;俄罗斯莫斯科地铁车站埋深普遍在50 m以下,有些车站埋深在80~100 m;法国巴黎下水道系统均处于地面以下50 m;新加坡深层排水隧道埋深20~40 m,电力隧道最深达到60 m,地下储油库埋深达到150 m。

在国际上,深层地下空间的利用深度从40 m到150 m均有应用案例。新加坡和日本东京是深层地下空间开发程度相对较高的城市。相比之下,上海在深层地下空间利用方面与国际上发达城市还存在一定差距。

(2)多为局部点线状利用,为浅层工程的深部延伸,未成系统。

a. 深层地下空间缺少系统性规划

目前,上海没有对深层地下空间资源进行统计和评估,未掌握可以进行深层地下空间开发的区域,也未了解深层地下空间与既有、规划建设地下中浅层设施可能存在的矛盾。

基于深层地下空间资源保护,上海缺少规划控制文件,地下中浅层建设项目审批不考虑对深层地下空间的占用,以至于适宜开发的深层空间加深,难度和风险加大。

关于深层地下空间的系统规划,上海尚未形成指导性文件,以至于对深层地下空间的利用效益存在争议。

b. 深层地下空间开发缺少制度保障

不同于浅层地下工程,深层地下工程的建造关系重大安全问题,而且建成后的改造难度和风险也非常大。目前上海在深层地下空间领域尚未确立基础理论研究、规划控制、环境保护、安全建造与运营、技术创新与应用等方面的制度保障体系。

c. 现有深层地下空间案例不能代表未来发展

目前上海涉足深层地下空间开发的案例非常少,深度大多停留在地下40~60 m,其成功经验并不

能完全指导更深层空间的开发,不能代表上海深层地下空间的未来发展。

d. 深部岩土体力学理论尚未建立

现有岩土体力学理论不适用于深层空间开发,借助苏州河深隧工程,国内学者研究了圆筒形结构的荷载模式,由于案例深度远远达不到未来深层地下空间开发的水平,未能建立深部岩土体力学理论。深部岩土体力学特性具有很强的地域特点,上海亟须借助原位测试和室内试验确立深部岩土体力学理论,以更好地指导地下空间建造技术的研发和应用。

e. 软土深层地下空间开发技术尚未得到验证

当前深层地下空间开发技术应用于地下40~60 m的埋深范围,难以满足未来上海向地下60~100 m深层拓展的需求,且常规竖井建造及盾构隧道建造中存在断面灵活性局限的问题。为适应未来上海软土地区深层地下空间开发向更深层发展及开发灵活性等方面的要求,需要探索创新的建造技术或优化措施。这些前沿方案涵盖:多圆复合型盾构机、偏心多轴异形盾构工法、部分断面隧道掘进技术、螺旋式H&V盾构工法、顶管-盾构任意切换急曲线施工工艺;旋转式刀具更换“Sunrise Bit”工法、盾尾抗水压油脂密封与盾尾刷更换技术;纤维混凝土、超高耐久性混凝土材料在地下结构中的应用;等等。然而,上述先进的施工技术、工艺、材料以及设备的研发基本停留于理论研究或初步开发阶段,实际工程的应用案例较少,需要先对其适应性进行深化研究与实际操作试验,再进行技术推广与成果转化。

f. 深层地下空间开发涉及的重大安全问题没有得到解决

现有地下连续墙深度达到150 m,地基加固深度也超过了86 m,然而更深的明挖竖井的承压水风险并未得到解决。大幅度抽降承压水对地面及浅层设施的影响显著,如何治理承压水仍然是深层地下空间开发需要解决的技术难题。针对长距离深埋盾构隧道施工可能存在的开挖面失稳、刀具过度磨损、盾尾密封失效、盾体变形、结构透水等重大风险,安全施工技术和风险管理措施仍需要进一步验证。另外,深层地下空间工程封闭性更强,现有技术没有解决长距离逃生疏散与消防救援的重大安全问题。

3 技术挑战

(1)承压水治理

上海地区承压水分布在第⑦层和第⑨层,这两

层承压水在有些区域呈连通状态。据上海地区已有工程的长期水位观测资料,承压含水层水位呈年周期性变化,承压水头埋深的变化幅度一般在3~11 m。当⑦层浅且厚、⑨层与⑦层基本属连通状态时,竖井(基坑)及深埋隧道的施工难度和风险相对较大。

当盾构穿越承压含水层时,承压水的高压状态增加了密封装置尤其是盾尾密封装置失效的风险,一旦密封不严,地下水、泥浆等将涌入盾构机内部,严重影响施工进度与质量,甚至引发安全事故。为防止泥浆和承压水从洞门处涌入工作井,必须设置高效、可靠的密封装置。盾构机的分体始发也是一大挑战。在软土地区,分体始发过程中的每一步操作都必须极其谨慎,以防止因承压水影响导致的基座变形、后盾系统失稳等问题。

(2) 竖井建造

深大竖井的建造对上海深层地下空间开发至关重要,它不仅是盾构的始发井和接收井,也是重要的通风和人员疏散设施。如何在上海软土地区建造符合深度40~100 m地下空间开发需求的竖井,克服地下水和高应力带来的不利影响,同时做到对周边环境的低影响,是深层地下空间开发技术需要迈出的第一步。

苏州河深隧道调蓄工程工作井采用的超深地下连续墙解决了地下连续墙垂直度要求高的难题,硬X射线工程采用的TRD止水帷幕有效实现了深层止水要求,静安大宁停车库的组合式竖井刃脚结构解决了沉井实施过程中的抗浮、封底等问题。以上案例均成功实现了竖井建造,取得了较好的效果,可结合理论研究和实践经验,进一步形成一套深层竖井建造技术体系,为其推广应用打下坚实的技术基础。

(3) 盾构隧道建造

在深层地下空间开发中,盾构法最大的挑战是应对高水压、高应力、长距离,在对断面的需求上,更倾向于采用大断面一次解决空间建造,因此适应断面需求的盾构装备技术是线性空间建造的重要前提。

65~100 m深埋盾构隧道一般在第⑨层灰色砂性土层中掘进施工,超高水压力对盾构设备和管片接缝的密封要求更高。国内以加强设计和施工控制的方式实现了类似高水压条件下盾构隧道的正常掘进^[7-8],是深层盾构隧道建设的成功实践。然而,针对上海深层软土隧道超大埋深、超高水压的特点,尚无实践经验及完备的技术支撑,需要对隧道结构受力特征、结构及防水设计、盾构装备及控制系统、施

工扰动机理及影响控制等关键技术进行研究。

另外,深层盾构隧道通常需要构建连接,例如道路隧道需要匝道的设置、通风竖井或斜井的设置等。通过二级隧道将主干隧道进行联系,进而构建地下空间网络,是地下空间整体开发建造的理想状态。二级隧道与主干隧道的连接节点尚没有较成熟的建造方法,可尝试将小直径顶管或盾构在主线内机械式切削完成节点建造。目前,顶管法构建地下联通道有了案例,但盾构法建造长距离匝道的案例尚无。通过暗挖工艺实现主干盾构隧道之间的联系或主干隧道与地面的联系,是深层地下空间向网络化发展的必然需求。

4 结 语

随着上海城市化进程的加速推进,土地资源短缺、城市安全与环境问题日益严峻,深层地下空间的开发利用成为缓解这些矛盾的关键途径。本文通过调研上海已建成的深层地下空间工程案例,分析了当前深层地下空间利用的现状与不足,并探讨了未来开发所面临的技术挑战。

(1)上海在深层地下空间开发方面取得了一定进展,如苏州河深隧道调蓄工程、硬X射线科学实验装置、静安大宁停车库等项目的成功实施,展现了超深基坑、超深竖井、超深盾构隧道等建造技术的实力,但与国际上发达城市相比,上海在深层地下空间的利用深度、系统性规划、制度保障以及深部岩土体力学理论等方面仍存在较大差距。

(2)面对未来,上海深层地下空间利用范围向地下60~100 m拓展的需求以及上海的砂性土分布广、承压水头高、环境保护要求高等建设条件,对技术的挑战不容忽视。特别是深层地下空间开发涉及的重大安全问题,如承压水突涌风险、盾构机密封失效、长距离逃生疏散与消防救援等,需要更加深入的研究和技术创新,确保建设过程中的安全 and 质量。

(3)上海应加快深层地下空间系统性规划的编制,完善制度保障体系,加强深部岩土体力学理论研究和软土深层地下空间开发技术的验证与推广。同时,鼓励技术创新与应用,探索适应未来深层地下空间开发需求的新型建造技术和工艺,探索多学科交叉融合赋能深层地下空间开发建造的可能性,以实现建造技术的突破性革新,为上海乃至全球的深层地下空间开发利用提供有益借鉴。

(下转第12页)