

城市地下道路明挖与盾构工法对比分析

李非桃

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100082)

摘 要: 首先,对城市地下道路在规划阶段进行工法选取时主要考虑的影响因素进行了总结归纳;然后,对明挖和盾构这 2 种工法在实施及运营阶段的优缺点进行了比较分析,并且通过 2 项工程实例的介绍,阐述了实际工作中工法比选的内容;最后,提出了在城市地下道路的规划设计中应对几个关键点继续研究和探讨的建议。

关键词: 城市地下道路;明挖;盾构;环境影响;运营安全

中图分类号: U455.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)11-0145-07

0 引言

随着城市化的发展和工程技术水平的进步,建设地下道路已经成为各大城市缓解交通拥堵、完善路网结构、改善城市环境的重要手段。但由于地下道路工程技术复杂、造价昂贵、实施不可逆^[1],在工程前期研究阶段通常会对其施工方法进行充分论证和比选。

明挖法和盾构法是目前在城市地下道路建设中常用的 2 种工法。明挖法是地下工程施工中最基本的施工方法,施工技术成熟、应用广泛;但随着大直径盾构设备制造水平的发展和国产化率的提高,近 10 a 来盾构法也得到了越来越多的应用。这 2 种工法都有比较明显的优缺点,如何取舍十分关键。

本文通过北京广渠路东延、东六环入地改造几个工程案例,对 2 种工法进行对比分析,并结合工法对城市地下道路规划设计中应重点关注的问题提出几点建议。

1 工法选取的影响因素

1.1 地下道路类型

近年来规划建设的地下道路大体可概括为 3 类:第 1 类是以地下道路来突破自然地形屏障,完善路网结构^[1]。这一类地下道路一般为穿江、穿海、穿山隧道,采用盾构工法较多,部分采用沉管法、矿山法。如上海长江隧道、武汉三阳路隧道、深圳妈湾跨

海通道等,均采用盾构工法。

第 2 类是以道路下沉来提升城市地面环境品质,修复城市空间^[1]。这一类地下道路在国外以波士顿大开挖(明挖法)为典型,目前国内以北京东六环入地改造工程(盾构法)为此类型代表。

第 3 类是以地下道路进行扩容,避让核心区拥堵区域,实现核心区高效对外联系^[1]。这一类地下道路的实施是为了提升老城区通行能力,缓解交通拥堵。北京广渠路东延项目(明挖法)和深圳春风路隧道(盾构法)为此类工程代表。

1.2 规划功能定位

城市主要道路一般除承担交通功能以外,其路由也有可能是其他市政设施的通道。因此地下道路的规划功能定位为多功能通道还是单一道路交通干道,也是决定工法选取的重要因素。

1.2.1 多功能通道

多功能通道中若道路与浅层市政设施共建,一般采用明挖工法。如北京广渠路东延项目为城市道路与综合管廊共线,采取双层闭合框架结构,明挖法施工,如图 1 所示。

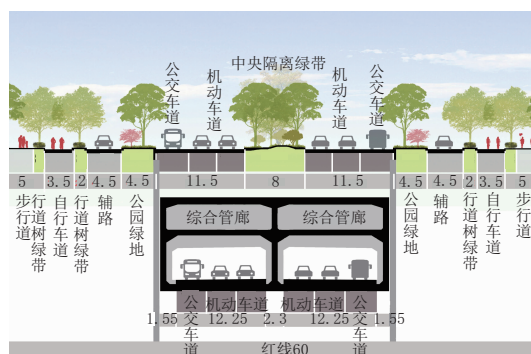


图 1 北京广渠路东延项目横断面示意图

收稿日期: 2022-03-08

作者简介: 李非桃(1984—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事城市道路和公路设计及研究工作。

若道路与深层市政设施共建,一般采用盾构工法,充分利用盾构断面。如武汉三阳路隧道和济南穿黄隧道为公铁两用隧道,采用盾构工法,城市道路和地铁分层布设,如图 2 所示。

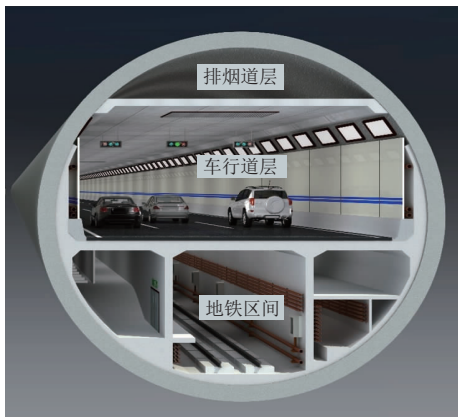


图 2 武汉三阳路隧道横断面示意图

1.2.2 单功能通道

单一性质的道路交通隧道需要分析其交通功能。若以承担集散交通为主,则宜浅层设置并采用明挖工法,利于沿线进出口衔接。如深圳前海地下道路主要承担前海片区的快速集散功能,设置了多处进出口,采用浅埋明挖法施工,如图 3 所示。若以承担过境交通为主,则可考虑采用盾构法深层设置。如北京东六环入地改造工程以承担城市副中心周边地区过境交通为主,在副中心核心区域不设进出口,以盾构形式穿越,如图 4 所示。



图3 深圳前海地下道路示意图

1.3 环境敏感性

随着各大城市景观环境要求的提高和环保意识的增强,无论采用何种工法都必须满足当地日益增长的环保要求。对于环境敏感性高的地区,明挖法的环保措施代价和实施难度不断加大,盾构法相比则更具优势。仍以北京东六环入地改造工程为例,北京城市副中心环境敏感性高,入地改造段下穿区域为现状公园绿地,以盾构形式穿越避免了对地表植被的破坏,降低了环境影响。



图 4 北京东六环入地改造工程示意图

1.4 小结

以上列出的是在规划层面面临工法选择时主要考量的3个因素。任何一个因素都不能单方面地决定工法选择,一定是权衡利弊后综合比选的结果。如北京广渠路东延项目和深圳春风路隧道均位于城市核心区,且隧道内无进出口;北京广渠路东延项目和东六环入地改造工程均位于北京城市副中心,环境敏感性同样高;深圳春风路隧道和北京东六环入地改造工程均选取了盾构工法,北京广渠路东延项目则以规划功能为最重要考量,最终选取了明挖工法。

2 明挖与盾构工法综合比较

2.1 社会及环境影响

明挖工法的社会影响主要包括对现况交通的影响、对市政管线的影响和社会舆论的影响等。

城市地下道路为线性工程,明挖施工影响面较广,特别是在建成区,首先需要进行交通导改和管线迁改。交通导改将挤压既有道路资源,影响通行效率,增加出行成本;管线迁改将改变已有的地下管线体系,易对居民生产生活造成不便。同时,大面积的征地、拆迁、地上物迁改等也会对社会舆论造成负面影响,社会稳定风险相对较高。

明挖工法的环境影响主要表现在水环境、大气环境、声环境和地质环境^[2]等方面。

水环境的影响分为地表水和地下水两类,地表水影响主要指生产生活污水的排放,一般在市政管网系统较完善的地区可以通过接入污水系统解决;地下水的影响主要指施工期间对地下水的扰动,破坏地下水平衡。为保持地下水位的稳定,目前很多城

市都已禁止在施工期间采用大范围降水方案,并采取了征收水资源税等措施。

大气环境的影响主要表现在施工、运输车辆的尾气污染和施工期间的扬尘污染。

声环境的影响主要指运输车辆和施工机械的噪声影响。一般施工期间会采取增高围挡高度(起到一定隔音效果)、增加喷洒降尘作业频率、工厂化施工等方式来降低这几类影响。

地质环境影响主要指基坑开挖后地质结构产生变化,导致地表沉降等现象出现,特别是临近高层建筑的基坑可能影响建筑物的稳定性。因此,施工期间对周围敏感点的监测十分重要。

盾构工法相对明挖工法在施工期间影响范围小,仅是在盾构井及配套明挖段的区域存在与明挖工法类似的问题。在盾构掘进区间,社会影响主要体现在盾构下穿时可能造成的如地表沉降、建筑物或地铁位移等风险。盾构施工时应重点做好下穿风险源时盾构的掘进控制以及风险源监测工作。环境影响主要指盾构出渣的环境影响。目前国内大直径盾构以采用泥水平衡盾构机为主,渣土含水量高、粒径小,且含有外加添加剂,一般不能直接作为路基填料、绿化种植土等材料再利用,大部分被弃用,会造成一定的环境污染。

总体来说,相对于明挖工法,盾构工法的社会及环境影响小,更有利于社会稳定和环境保护。

2.2 施工风险

明挖工法受周围环境影响较大,施工期间不确定的安全风险因素较多。按照施工顺序可分为支护体系施工风险、土方开挖施工风险、支撑体系及防水措施施工风险、结构体系施工风险等。随着支护技术、地下水控制技术、盖挖技术等的发展,明挖工法施工技术已相对成熟,各类风险的相关对策研究较多,本文不作赘述。

盾构工法的施工风险主要包括:地质风险、后期隧道变形与变位风险^[3]、联络通道施工风险等。

地质风险尤其是特殊地质风险是盾构工法的首要风险。特殊地质通常包括:区域断裂构造、特殊土层、特殊岩层、不利复合地质、有害气体、地下水、地下障碍物等^[4]。对于特殊地质的准确预报、盾构机的适应性和可靠性、穿越风险点的有效控制措施是避免地质风险的关键。

由于盾构隧道一般为深埋隧道,位于城市地下空间的下层,隧道实施后可能出现后期上层空间施

工卸载风险,如河道开挖、地铁施工、超深基坑施工等。外部荷载的变化将导致隧道管片结构发生超出预期的变形与变位^[3]。因此当遇到这一类风险时应进行专题研究,采取有效的防范措施。

盾构隧道的联络通道施工是另一大风险点,目前国内尚无大直径盾构隧道施工联络通道的案例。在地铁等小直径盾构中多采用矿山法施作,但也事故频发。近年来顶管法也逐渐尝试应用于联络通道的施工,施工效率及安全性提高,但应用案例相对较少。

比较而言,明挖工法施工技术相对成熟,但风险的不确定性和风险点相对较多;盾构工法尤其是大直径盾构在国内仍然处于快速发展阶段,许多技术难点尚待攻克,但施工风险相对可控。

2.3 工期

施工周期短是明挖工法的显著特点,但制约工期的外部因素较多,如征地拆迁、地上物迁改、管线迁改、交通导改、土方外运、天气以及当地政策等。具备条件的明挖段落可同时开工,各工点并联施工,工期控制相对灵活。

盾构隧道工期受外部因素影响相对较少,但土方外运效率同样是制约工期的关键因素。除此之外,盾构隧道工期主要与设备制造周期、盾构机数量以及掘进速度有关。由于盾构法为线性施工方式,采用单向掘进或对向掘进,各工点串联施工,工期相对较长。

2.4 疏散救援及通风排烟

城市地下道路一般工程规模大、交通运行环境复杂、运营安全保障要求高,应将保障突发状况下的运营安全作为首要目标,予以高度重视。目前城市地下道路的疏散救援标准尚无统一的规范指导,消防设计中遇到的问题通常要依赖特殊消防设计分析解决。

2.4.1 疏散方式

《建筑设计防火规范(2018年版)》(GB 50016—2014)、《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018)、《城市地下道路工程设计规范》(CJJ 221—2015)等规范中对地下道路人行横通道和车行横通道的间距有相关规定,总体来说人行横通道间距不大于250 m,车行横通道间距不大于500 m。

明挖隧道对于满足上述规范要求难度不大,即疏散方式采用横向逃生方式。当隧道长度较长且隧道内无进出口时,为减少逃生人员由于长期处于封

闭空间而心理恐慌导致的衍生事故,可考虑在合适的位置设置竖向逃生通道,尽快疏导人员逃生至地面。如在北京广渠路东延项目中就考虑车行隧道与两侧变配电室、排水泵房、风机房等附属用房共用竖向逃生通道,逃生人员通过附属用房逃生至地面(见图5)。

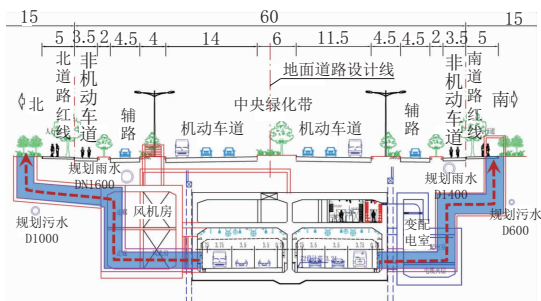


图5 北京广渠路东延项目竖向逃生示意图(单位:m)

由于前述联络通道施工风险等问题,盾构隧道设置横通道难度极大,因此大多采用竖向逃生方式,利用逃生楼梯(滑梯)实现上层向下层逃生(见图6),对于双层交通隧道则上、下层互为逃生。由于盾构隧道埋深较深,没有条件设置专用的直通地面竖向逃生通道,一般利用隧道两端的竖井进行集中疏散。



图6 盾构隧道逃生楼梯

由此可知,明挖隧道的疏散方式更灵活,根据项目特点和周边环境可以调整横、竖向逃生的结合方式。但对于2舱隧道而言,由于上下行交通仅有一墙之隔,横向逃生具有二次事故的风险。盾构隧道由于埋深、断面形式等特点,采用竖向逃生的方式是受到广泛认同的,但尚缺少防火规范支撑。对于单层交通隧道而言,盾构下层空间一般可设置专用疏散救援通道,相比明挖隧道的横向逃生更加安全。

2.4.2 救援方式

明挖隧道的事故救援车辆一般是通过主洞口或者匝道进出口驶入隧道并到达事故地点。由于隧道内的交通事故极易造成交通拥堵,救援车辆也极有可能面临因堵车而无法及时到达事故现场的风险,

特别是城市道路较少设置应急车道,更加剧了这一风险。

盾构隧道若为双层交通隧道,则面临与明挖隧道同样的风险。目前国内盾构隧道以单层交通隧道为主,其救援方式通常是利用盾构下层的专用疏散救援通道(见图7),使救援人员可以快速抵达事故地点,避免了社会交通的干扰。但由于疏散救援通道联通至隧道两端竖井,人员、车辆、设备等需要通过竖井疏散,因此车辆尺寸、设备类型等在一定程度上受限。

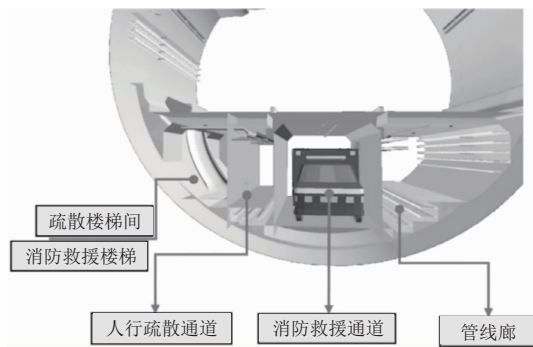


图7 盾构下层空间布置示意图

2.4.3 通风排烟方式

明挖隧道一般采用纵向排烟方式,通过风机产生的通风压力使隧道内的烟气沿隧道轴线流动并通过竖井或洞口排出^[5]。在纵向排烟过程中,烟气向火灾下游移动,至竖井或隧道洞口排出。这样会导致隧道受灾面积增大,不利于人员疏散。因此,目前在有条件的情况下多采用分段式纵向通风,增加竖井并将隧道通风在纵向上分段。但竖井的增加也会影响地面的景观,特别是在建成区,竖井的设置需要与城市景观相结合。

由于盾构隧道为圆形断面,隧道上部的空间可以设为排烟道,用于火灾工况下的排烟。因此,重点排烟模式广泛应用于盾构隧道^[6]。重点排烟方式使烟气通过隧道顶端设置的排烟口进入排烟道,再通过排烟道连通竖井排出。这种方式能够快速、高效地排出烟气。

明挖隧道有条件时也应考虑设置重点排烟,提高排烟效率。如北京广渠路东延项目在设计时考虑利用上方管廊层空仓来设置重点排烟通道(见图8)。

2.5 经济性

明挖隧道的土建费用主要包括围护结构费用、土方开挖费用、降水费用、主体结构费用等。影响明挖隧道土建费用的因素主要有地质条件、基坑深度、施工工艺等。盾构隧道的土建费用主要包括盾构设

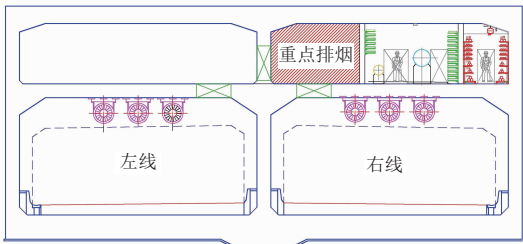


图 8 北京广渠路东延项目重点排烟示意图

备摊销费用、管片及主体结构费用、土方费用等。影响盾构隧道土建费用的因素主要有地质条件、隧道长度、盾构机直径和数量等。常规来说,盾构隧道的单延米造价要高于明挖隧道。以近 5 a 北京、深圳、武汉等地几处双向 6 车道地下道路统计结果为例,明挖隧道造价约为 50 万元 / 延米,盾构隧道造价约为 65 万元 / 延米。但由于明挖隧道受所处地理位置和周围环境影响较大,交通导改、管线拆改、征地拆迁等费用在整体造价中的占比有时较高,因此应结合项目具体情况进行综合造价比选。

3 工法比选实例

北京广渠路东延项目和东六环入地改造工程是



图 9 北京广渠路东延项目平纵面图

表 1 北京广渠路东延项目工法对比表

方案类型	施工交通、环境影响	管线迁改 /km	施工风险	总工期 / 月	对后续地铁建设影响	地下空间利用率
明挖法	6.57 km 明挖段,影响范围大、时间长	13(雨、污水),18(其他)	相对大	28	预留条件影响较小	管廊和车行隧道共构,地下空间利用率高
盾构法	2.3 km 明挖段以及综合管廊仍需明挖施工,影响范围大、时间长	6(雨、污水),6(其他)	相对小	51	后期实施难度大,影响较大	管廊和车行隧道分离设置,地下空间利用率低

盾构法施工车行隧道对现状道路交通影响小,但对于本工程存在以下问题:(1) 仅约 4.2 km 隧道具备盾构条件;(2)综合管廊仍需要明挖施工;(3)施工工期长;(4)规划地铁线路难以实现。广渠路东延

北京市重点工程,位于北京城市副中心内。2 个项目均设置了地下道路,在项目研究前期都进行了充分的工法比选论证工作。

3.1 北京广渠路东延项目

北京广渠路东延项目是北京市区通往城市副中心的 1 条主要的快速通道。道路规划为城市主干路,道路红线宽度为 60 m,双向 6 车道,全长约 7.6 km,见图 9。

北京广渠路东延项目分为地面道路和地下道路两部分,其中地面为景观大道;地下道路按照 80 km/h 标准进行设计,隧道全长 6.57 km,隧道内无进出口。

项目位于北京通州已建成区,线位沿现况通朝大街,运河东、西大街布设。该线位不仅为交通主干线,也是规划的综合管廊干线路由。项目沿线与 2 条现况轨道和 1 条河道相交,规划有 3 条轨道线穿越。

该项目前期研究过程中对工法选择进行了充分论证(见表 1)。明挖法结构断面布置灵活且适用性强、并可将管廊和车行隧道等有效结合(见图 10)。但明挖施工对现状交通影响较大,现场施工条件受制约。结合现场情况,考虑采用半铺盖法及分幅施工法。

项目盾构法比选横断面如图 11 所示。经论证,明挖法较盾构法更具优势,最终选择明挖法施工。隧道采用双层闭合框架断面,上层设置综合管廊、重点排烟通道以及远期预留空间,下层为双

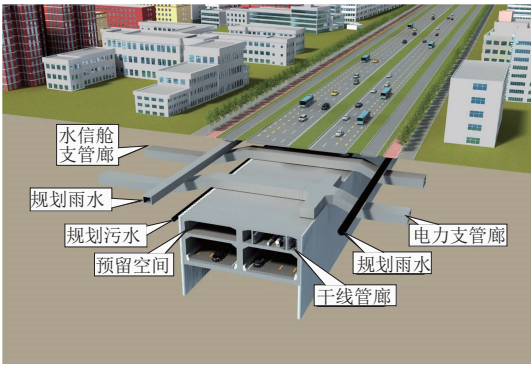


图 10 北京广渠路东延项目明挖横断面效果图

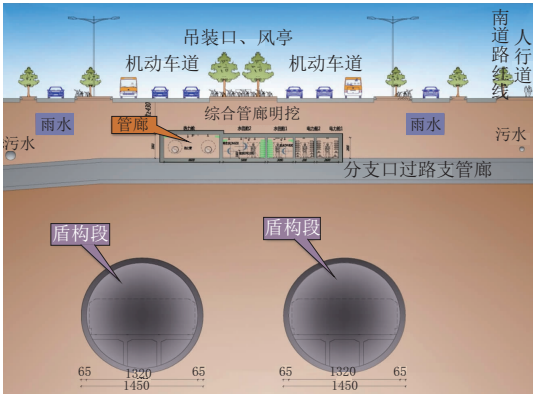


图 11 北京广渠路东延项目盾构法比选横断面

向 6 车道交通隧道，规划地铁位置预留远期穿越条件。

3.2 北京东六环入地改造工程

北京东六环入地改造工程的建设目的是有效织布城市空间、满足副中心城市规划和城市建设的需要。工程建成后主要承担着北京各远郊区县及周边

地区往来副中心的交通功能。道路性质为高速公路，双向 6 车道，设计速度 80 km/h，全长 16 km，其中地下道路长度约 9.2 km。

该项目位于副中心核心区，沿线串联了宋庄、副中心站、行政办公区、城市绿心、环球影城等重点区域。隧道段位于现况东六环西侧绿化带内，沿线规划及现况相交道路 15 条，规划及现状轨道线 8 条，河道 3 条(见图 12)。

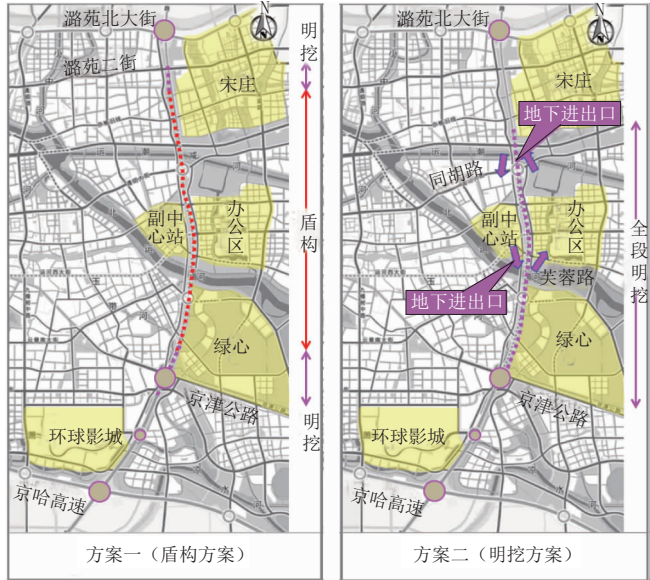


图 12 北京东六环入地改造工程工法方案比选

该项目前期研究阶段从交通功能、缝合城市效果、施工影响等方面对明挖和盾构工法进行了充分比选(详见表 2)。

表 2 北京东六环入地改造工程工法对比表

方案类型	交通功能		缝合城市		施工影响			工程投资 / 亿元
	服务对象	服务水平	隧道总长 / km	缝合区域	工期 / 月	施工环境影响	伐移树木 / 万棵	
盾构方案	过境交通	三级	9.2	绿心、办公区、副中心站、宋庄	48	小	4	约 150
明挖方案	过境 + 集散交通	四级	7.4	绿心、办公区、副中心站	36	较大	9	约 170

经比选,盾构方案隧道内服务水平较高;整体缝合城市效果好;施工伐移树木规模小、施工对环境的影响小;该地质情况下采用盾构法工艺成熟,工程投资可控。明挖方案设置直接服务区域交通的进出匝道,隧道服务水平相对较低,同时明挖施工规模较大,不可控因素相对较多。最终选择盾构方案,盾构段长度约 7.4 km,采用管片外径 15.4 m 的双洞盾构隧道,上层为重点排烟道、中间层为车行通道、下层为疏散救援专用通道以及管线廊道(见图 13)。

4 建 议

(1)合理的地下空间规划布局。合理的规划是工

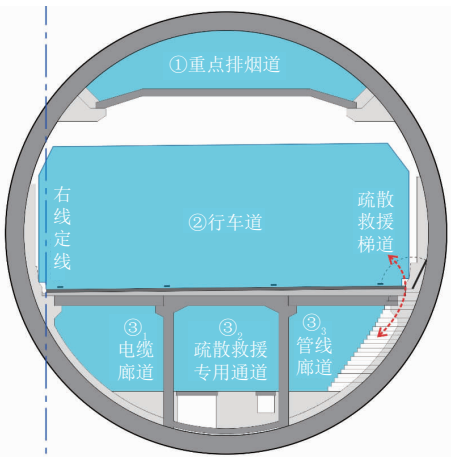


图 13 北京东六环入地改造工程盾构隧道断面

程可行的前置条件。地下空间规划中的首要任务是合理布置地下设施的竖向关系,如对一个市政设施较齐全的规划片区,综合管廊应布置在最浅层;其次是承担交通集散功能的地下道路;再次是城市轨道,过境性质的地下道路和铁路应布置在最深层。除此之外,地下商业、地下车站、地下物流、地下停车场等也应根据其功能做好规划选址。

(2)合理的实施顺序和工程条件预留。地下空间规划完成之后,应结合工程条件制定合理的工程实施计划。不应以工程形象或者是否具备开工条件作为开工与否的首要因素。应遵循科学合理的实施顺序,优先实施浅埋明挖的工程。同时应协调好各工程的施工工期,交叉的工程应互为工期排布的前提条件。先期实施的工程要为后续工程做好工程条件的预留。

(3)隧道运营安全。地下道路一旦发生事故,其危害远大于地面道路,特别是火灾发生时,蔓延速度快,可控性差,极易造成大规模的人员和财产损失。因此,地下道路的运营安全应作为规划设计中第一要务予以重视。目前我国关于地下道路的规范体系尚不健全,在规划设计中应适度控制工程规模,宜考虑一定的弹性和宽容度。同时,每一个隧道都应制定相应的疏散救援策略。

明挖隧道中应重视横向逃生的二次事故问题,有条件时宜优先采用竖向逃生的方式。盾构隧道中应加强疏散救援通道与外部的联系,提高利用率和疏散救援效率;应进一步研究横通道的施工工艺工法。

(4)土方的合理调配和利用。地下道路出土量巨大,出土的效率直接影响工期,因此对于土方的合理调配和利用尤为重要。首先,应加大区域整体协调力度,统筹本区域甚至跨区域的土方调配;其次,对于盾构隧道应加强渣土利用的相关研究,提高出渣的筛分水平,加大本工程的循环利用率。

(5)推动大直径盾构横断面标准化。从2004年上海长江隧道破土动工以来,国内大直径盾构地下道路迅猛发展,目前国内盾构机制造能力已突破直

径16.0 m(刀盘外径),世界最大的盾构机直径已达到17.6 m(中国香港屯门隧道)。装备制造技术已不再是制约地下道路规模和标准的因素。

目前国内地下道路以双向4车道和6车道为主,受车辆类型、道路性质、设计车速等因素影响,其采用的限界尺寸不尽相同。以双向6车道为例,目前国内同类型的地下道路限界宽度为10.5~13.0 m不等,限高为3.2~5.2 m不等,导致采用的盾构设备管片外径为14.5~15.5 m不等。

建议通过制定相关规范和标准,推动大直径盾构隧道横断面标准化,使盾构设备的生产和使用更加标准化,盾构设备的利用率更高、摊销更少,也使规划设计人员选取标准更方便,决策者的决策更有依据。

5 结 语

城市地下道路的工法比选是受多因素影响的利弊权衡过程,不能一概而论。明挖工法技术成熟,工期相对短、土建费用相对低,对于浅埋隧道优势更明显;盾构工法对社会环境影响小,疏散救援方式相对高效,宜用于深埋隧道;两种工法的施工风险均总体可控。在比选过程中应充分考虑项目所处位置、规划功能诉求、实施计划、社会影响以及经济性等,进行综合论证。

参考文献:

- [1] 张正军,邓琪.超大城市地下道路高品质发展策略探索[C]//品质交通与协同共治——2019年中国城市交通规划年会论文集.成都:中国城市规划设计研究院城市交通专业研究院,2019:1498-1507.
- [2] 方立凤.地铁明挖法施工过程社会稳定风险研究[D].天津:天津大学,2018.
- [3] 陈仁东.妈湾跨海通道前海湾隧道工法方案比选[J].地下空间与工程学报,2017,13(5):1319-1328.
- [4] 叶向前.杭州地铁区间盾构施工地质风险源分析[J].城市勘测,2012(2):173-176.
- [5] 曾国保.城市铁路隧道防灾疏散及消防方案[J].铁道工程学报,2010(8):104-107.
- [6] 王安民,郭清超,闫治国.重点排烟模式盾构隧道横断面火灾特性研究[J].结构工程师,2014,30(1):33-37.