

大跨度深埋城市隧道横断面结构型式及应用

——以苏州市春申湖隧道为例

郭红敏, 贾志强

(悉地(苏州)勘察设计顾问有限公司, 江苏 苏州 215123)

摘要:以苏州市春申湖快速路工程为研究对象,分析城市快速路系统越来越多采用地下敷设形式的根本原因。结合春申湖隧道工程的工程实践,针对大跨度深埋隧道的具体应用场景,通过对比各种隧道横断面的结构型式、受力特点和适用范围,推荐具有跨越能力大、结构合理、施工方便的折板拱结构,为其他城市大跨度深埋隧道的建设提供参考。

关键词:城市快速路;深埋隧道;大跨度隧道;折板拱结构;预应力顶板

中图分类号:U452.2

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2020)12-0216-04

1 城市快速路的功能定位

随着我国经济的飞速发展,城镇化水平越来越高,城市规模不断扩大。为满足城市各组团间快速通达的需求,有效缓解日益增长的交通压力,建设城市快速路系统来进一步完善城市路网变得尤为重要。城市快速路系统具有以下功能:

(1)运输能力和社会效益巨大。快速路系统形成了城市交通骨架路网,成为缓解大城市交通压力,解决交通拥堵的重要依靠;同时加强了城市的运转效率,扩大了城市的辐射吸引能力,提升城市区位优势。

(2)自成体系。快速路系统梳理了长短距离的交通需求,分离了快慢速度的交通干扰,整体上提高了城市交通的效率与可达性,提高了地面交通效率,降低了出行时耗。

(3)形成交通保护壳。快速路系统屏蔽了过境交通,避免其大量穿越城市中心,进入城市道路干扰和混乱城市内部交通。

(4)形成大容量快速交通走廊。快速路系统能联络城市各功能组团和分区,满足城市各组团之间的交通需求,对城市空间结构的合理调整形成有力的支撑和推进。

(5)建立并完善了市内交通与市际交通的有序衔接。快速路系统提供了中长距离内部交通和对外交通的快速需求,能快速通达城市各主要节点。

2 城市快速路敷设方式的选择

城市快速路的建设,需对项目功能定位进行分析,了解项目服务对象、交通特征,明确项目要解决的问题,这是城市快速路规划和设计的基础。根据功能定位和服务对象分析,结合具体工程建设条件,确定快速路主要技术标准,如道路等级、设计车速、车道宽度、净高、荷载等级、线形设计指标、交通组织以及各专业设计标准。

城市快速路的敷设方式应综合考虑当地经济发展水平和经济承受能力,特别是城市各区域的发展规划和城市基础设施的建设现状阶段等,综合现状道路和规划红线宽度、沿线用地性质及发展规划,最终体现土地价值的充分挖掘和综合利用。

工程实践中,应综合交通功能定位、城市文化、生态环境、城市景观、工程地质、周边建筑、拆迁情况、周边路网衔接等多方面因素,通过综合分析比选确定路线敷设形式,最终达到交通功能平衡、周边路网系统衔接良好且地块价值增值提升的建设目标。

根据主路敷设位置不同,快速路分为地面快速路、高架快速路和地下隧道快速路(全暗埋、半敞开式、全敞开式)3种形式。



(a)地面快速路 (b)高架快速路 (c)地下隧道快速路

图1 城市快速路3种敷设形式

地面快速路占地大,对两侧地块的分隔严重,在土地价值不高的郊区和偏远地区有应用价值,在

收稿日期:2020-08-10

作者简介:郭红敏(1970—),男,本科,高级工程师,从事桥梁隧道设计工作。

地价昂贵的城市核心区和城市建成区较少采用。

在城市用地受限时，常用城市高架桥和城市隧道的快速路敷设形式。这 2 种敷设形式的优缺点比较见表 1。

表 1 城市高架桥和城市隧道的优缺点比较

优缺点	高架桥	隧道
工程难度与空间利用率	结构工程量相对较少,临时工程量相对较少,技术成熟工程难度一般,占用高空和部分地面空间	结构工程量相对较多,临时工程量巨大,涉及深基坑风险大而复杂,不占用高空和地面空间
适合环境	路网密集的工业用地区域,环境敏感程度低的区域	路网密集的金融区商业区,环境敏感程度高的区域
对地块影响	对周边地块价值减低	对周边地块价值增值
对周边环境景观、视线、噪声等影响	影响较大,稳评、环评通过难度大	基本无影响,稳评、环评通过难度小
施工期间周边建筑、地下水位	影响一般,施工措施费用小	影响巨大,施工措施费用巨大
施工期间交通影响	对交通影响较大,持续时间相对较短	对交通影响较大,持续时间相对较长
对地下管线影响	管线协调难度小,基本可以避让主要管线	管线协调难度大,施工期间需进行管线保护
经济发展与承受能力	工程投资相对较少,运营费用低,维护费用低	工程投资规模巨大,运营费用高,维护费用高

3 春申湖隧道工程简介

春申湖隧道工程是苏州市中环快速路的重要组成部分,项目位于苏州市城市建成区,两侧均为成熟住宅、商业用地,老路两侧管线较多,道路红线宽度受限,同时需穿越阳澄湖水源地。

该工程建设规模与已建快速路规模相适应,同时考虑远期路网规划和交通量预测,确定主线隧道采用双 6 的设计标准,并在主要交叉口设置平行匝道出入口(单向 2 车道),以满足车辆分流和汇入需求。

春申湖快速路位于城市重要的城市街区,采用隧道形式有利于处理其与周边环境的关系。采用隧道形式使上方地面道路恢复原有的形式、功能和景观,使交通与城市街区一体化,地面道路和街区在使用功能上互补且不受影响。

采用隧道形式比高架桥形式更体现出生态环保的理念,它可节约土地资源,利用地下空间,增

加城市空间使用效率;在消减汽车噪音、尾气污染等方面具有更多优势,能满足环境影响评价和社会稳定评估的要求,更能体现城市核心区域土地金贵的价值。

3.1 春申湖隧道工程结构难点

春申湖隧道工程主线隧道采用双向双 6 车道标准,在匝道汇入主线区段,隧道加宽段为双向 10 车道,从而具有大跨度的隧道宽度,单侧行车道孔跨径达到 20.8~22.8 m。

由于隧道线路受横穿河道、湖泊、轨道、桥涵和垂直方向下穿隧道结构等条件的制约,隧道暗埋段在部分区段埋深很大,顶板埋深约达 8 m。

根据结构受力要求,若采用矩形隧道结构,顶板厚度将超过 2 m,地下结构的大体量混凝土施工质量、水化热和收缩徐变等问题均难以控制。

3.2 常用隧道结构形式

目前,城市道路浅埋隧道的横断面可供选择的主要形式有矩形箱涵断面、折板拱断面和圆弧拱断面(见图 2),其中,明挖法施工的隧道以前 2 种横断面布置型式居多。



(a)矩形箱涵横断面 (b)折板拱结构横断面 (c)圆弧拱横结构断面

图 2 地下隧道常用结构形式

矩形箱涵断面构造简单、施工方便、受力明确,结构“内力-变形”计算理论和分析方法成熟;隧道横断面的结构外包高度相对较小,受到水浮力较小,可充分利用结构自重和顶板上覆土自重实现抗浮,有利于减少抗浮工程措施。

折板拱断面可充分利用建筑限界,断面利用率高;当隧道埋深较大时,可有效减少顶板上覆土厚度;在车道顶局部设置“折板”,形成折板拱形结构,可减小顶板跨度,改善顶板结构受力,进而控制结构构件厚度,减小结构自重。但相对于矩形断面而言,其构造较复杂,施工难度较大,隧道横断面的结构外包高度相对增加,从而增加了抗浮工程量。

圆弧拱断面常用于暗挖法施工的隧道,一般在隧洞穿越岩层坚硬、地质条件好时采用。

3.3 深埋隧道标准段的结构形式选择

春申湖隧道工程标准段双向 6 车道,以顶板埋深 8.73 m,对标准段单层结构和双层结构(顶板抬升增设架空层)进行方案比选汇总,见表 2。

由表 2 可知,隧道结构受周边建设、规划条件限制,隧道主体结构埋深深度超过一定厚度时(以

表 2 深埋隧道结构方案比选(每延米)

比选项目	单层	双层(增架空层)	
方案描述	标准 6 m 净高,顶板覆土 8.73 m	顶板抬高至覆土 3 m, 设置架空层 5.726 m	
对地下空间利用的影响	覆土深,为远期地下空间开发留出余地	同步实施地下空间出入口对接架空层	
主体结构用量	C35/m ³	129.13	143.99
	HRB400/kg	25 826	27 357.80
	HPB300/kg	7 747.8	8 207.34
抗拔桩用量	C35/m ³		12.06
	HRB400/kg		965.10
	HPB300/kg		217.15
挖方 /m ³	573.632	556.596	
填方 /m ³	279.232	94.2	
抗浮	无需抗拔桩	需增设抗拔桩	
对管线的影响	管线协调难度小,基本可以避让主要管线	管线协调难度大,施工期间需管线保护	
施工工期	8 m 灰土回填施工,填土增加 5 个月工期	2.3 m 灰土回填施工	
	沿深度方向分 2 次浇筑	沿深度方向分 4 次浇筑,围护支撑需换支撑,抗浮桩基施工,工期增加近 4 个月。	
造价估算 / 万元	36.43	41.52	

8.73 m 为例),在满足结构受力要求的情况下,单层隧道结构的造价要比双层隧道低,且施工工期少,同时不影响远期对穿结构的实施,为后续工程的实施提供了更为有利的建设条件。隧道结构与市政管线线位距离远,将有利于管线保护和迁改,故本工程主线标准段均采用单层隧道结构方案。

3.4 大跨度深埋段隧道结构形式的选择

在匝道汇入主线区段,隧道加宽段为双向 10 车道,单行车道孔跨径 20.8~22.8 m,顶板埋深达 6~7 m。为了尽量抬高隧道内高度,抬高隧道顶板,考虑覆盖道路浅埋管线布设的需要,可以将覆土减少到 3~4 m。但是根据结构受力要求,若仍然采用矩形隧道结构,顶板厚度将超过 2 m,地下结构的大体量混凝土施工质量、水化热和收缩徐变等问题均难以控制。

春申湖隧道选用跨越能力更大、混凝土用量更省的折板拱结构或预应力顶板结构进行方案比选。

折板拱横断面及其计算结果见图 3、图 4,中廊及侧墙底部是横向受力控制断面。

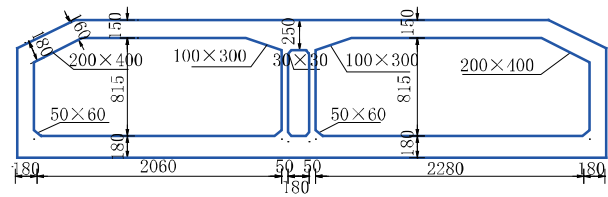


图 3 主线隧道—折板拱横断面图(单位:cm)

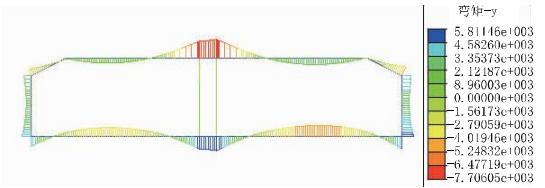


图 4 主线隧道—折板拱横断面弯矩图(单位:kN·m)

隧道主体结构采用部分预应力混凝土构件,顶板采用交叉布索型式。若考虑外侧张拉需操作空间导致基坑外扩,受场地制约,故张拉方式采用室内张拉方案,外墙为固定锚,内侧为张拉端。横向预应力索纵向布置间距 0.5 m,左、右侧交错布置。预应力钢束顶板采用型号为 15-7 的钢束,预应力索弯曲半径 10 m,负弯矩处边缘距离 22 cm,正弯矩处预应力束中心距顶板内侧边缘距离 20 cm,预应力束中心间距 18 cm。顶板采用横向预应力的横断面布置和结构计算结果见图 5、图 6。

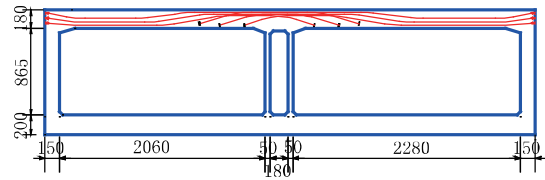


图 5 主线隧道—矩形横断面(顶板预应力)图(单位:cm)

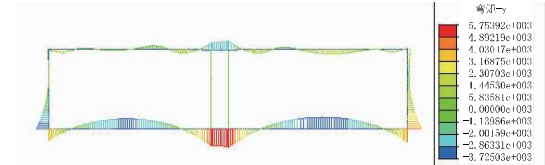


图 6 主线隧道—矩形横断面(顶板预应力)弯矩图(单位:kN·m)

隧道加宽段大跨径高覆土隧道结构方案比选见表 3。

结合既有隧道工程实践经验和本工程实际情况,隧道加宽段(双向 10 车道)、高覆土横断面采用折板拱横断面,主要基于以下几个方面的考虑:

(1)预应力结构受力较为复杂,其施工受施工人员的技术水平影响较大,后期养护要求较高,维修难度较大。

(2)顶板预应力矩形断面施工工期较长,对围护结构受力要求较高。

表 3 隧道加宽段大跨径高覆土隧道结构方案比选		
比选项目	顶板折板拱	顶板横向预应力
结构描述	板厚 1.5 m, 中管廊厚 2.5 m, 配筋 4 层 32@125 cm, 最大含钢量 200 kg/m ³	最大板厚 1.8 m, 3 层 15-7 预应力, 纵向间距 0.5 m; 混凝土拉应力 0.8 MPa, 最大压应力 7.8 MPa
截面面积 / m ²	203.21	223.81
结构设计原则	普通钢筋混凝土结构	顶板部分预应力、侧墙底板钢筋混凝土结构
施工难易程度	结构超筋、混凝土浇筑困难, 结构开裂难避免	板厚大, 混凝土开裂难控制, 预应力反拱大, 结构施工要求高
火灾	钢混结构防火技术成熟	无预应力防火规范, 风险高
耐久性	钢筋混凝土耐久性相对较好	顶板预应力收缩徐变引起开裂, 侧墙钢筋混凝土裂缝等, 耐久性差; 预应力索易腐蚀, 风险高
可靠性	较高	混凝土收缩徐变易造成预应力失效, 受力控制断面中管廊外侧无法加固, 结构安全难保证

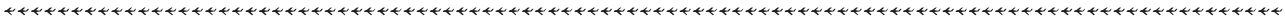
(3)折板拱结构可有效缩短顶板跨径,减少顶板、侧墙弯矩,同时增加侧墙竖向力,有利于结构受力。

(4)折板拱断面为普通混凝土结构,施工控制较为简单,可缩短施工工期,提前投入运营。

综合以上因素,本工程采用施工更易控制,工期更短、用料更少、结构受力更为明确的折板拱结构作为大跨度深埋隧道结构形式,主要用于隧道加宽段。

4 结 语

本文以春申湖隧道为例,研究大跨径深埋隧道结构形式,提出 2 种较为成熟的隧道结构形式:折板拱、顶板预应力结构。折板拱结构的受力介于拱结构和梁结构之间,能更好地发挥混凝土结构的受压承载力,提高结构的跨越能力,从而适用更大跨度的隧道结构。顶板预应力结构形式在隧道顶板施加横向预应力,使顶板处于受压状态,有利于减少混凝土开裂,提高混凝土的耐久性,但施工工期较长且工艺要求更高,基坑暴露时间更长。



(上接第 211 页)

[5] 田俊.中城地铁线路全自动巡检探索[J].都市快轨交通,2019,32(5):19-24.

[6] 车洪磊,史聪灵,胡鸽,等.综合管廊自动巡检机器人介绍及应用[J].科技支撑,2020:88-89.

[7] 裴文良,周明静,李军伟.综合管廊智能巡检机器人的设计[J].制造业自动化,2017,39(1):91-93.

[8] 孙国华.关于智能机器人巡检系统在综合管廊中的运用分析[J].经济·管理·综述,2019:194-195.

[9] 黄山,吴振升,任志刚,等.电力智能巡检机器人研究综述[J].电测与仪表,2020,57(2):26-38.

[10] GB 51354—2019,城市地下综合管廊运行维护及安全技术标准[S].

[11] 张涛,丁宁,蔡晓坚,等.综合管廊巡检机器人综述[J].地下空间与工程学报,2019,15(S2):522-533.