

复杂环境城市隧道设计关键技术研究及应用

孙统立, 方忠强, 陈浩

(华设设计集团股份有限公司水下隧道智能设计、建造与养护技术与装备交通运输行业研发中心, 江苏 南京 210014)

摘要: 以目前江苏省已建成通车的最长双向6车道城市土体隧道——南通市啬园路隧道为背景, 结合其周边环境复杂、环保要求高、下穿被交路及河道和设置地下匝道的特点, 分析复杂环境城市隧道设计关键技术。实际应用表明: 城市隧道应重点考虑总体平纵横布置, 做好防灾救援设计; 隧道基坑呈现高低坑异形基坑特征, 需根据内外坑距离 B 与内坑深度 h 的关系, 考虑相互影响并进行一体化设计; 主匝道分合流处主体结构跨度达23.3 m, 采用折板拱结构型式; 结合地面道路总体布置, 提出采用竖井分散型通风方案。所得结论对于复杂环境城市隧道的建设具有参考作用。

关键词: 隧道总体设计; 防灾救援; 高低坑基坑; 大跨结构; 竖井分散型通风

中图分类号: U452

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0394-05

Research and Application of Key Technologies in Design of Urban Tunnel in Complex Environment

SUN Tongli, FANG Zhongqiang, CHEN Hao

(Research and Development Center for Intelligent Design, Construction and Maintenance Technology and Equipment of Underwater Tunnels, Transportation Industry, Huashe Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: Taking the Nantong Seyuan Road Tunnel, the longest two-way six-lane urban soil tunnel completed and opened to traffic in Jiangsu Province as the background, combined with its complex surrounding environment, high environmental requirements, and the characteristics of underpass intersected roads and rivers, and setting underground ramps, the key technologies for designing urban tunnels in the complex environment are analyzed. The practical application shows that the urban tunnels should focus on overall horizontal and vertical layout, and the good job in disaster prevention and rescue design. The tunnel foundation pit presents the characteristics of high and low pits with irregular shapes. The integrated design should be carried out by considering the mutual influence based on the relationship between the distance B between the inner and outer pits and the depth h of the inner pit. The main structural span at the junction of the main ramp reaches 23.3 m, and a folded slab arch structure type is used. Combined with the overall layout of the ground road, a shaft decentralized ventilation scheme is proposed. The conclusions obtained have reference value for the construction of urban tunnels in complex environment.

Keywords: overall design of tunnel; disaster prevention and rescue; high and low pit foundation pit; long-span structure; shaft decentralized ventilation

0 引言

随着隧道与地下空间的发展, 城市地下道路因其对周边环境影响小、占地少和拆迁少等优点而得到广泛应用。在城市地下道路设计中, 应根据工程影响区域的城市总体规划及交通功能等需求, 协调好交通疏解、地下管线、河道及其他公用设施的关

系。应根据其技术标准、水文地质条件、景观、环保要求等因素, 对隧道总体设计、防灾救援、结构设计和隧道通风等进行综合比选^[1]。

以江苏省内已建成最长双向6车道城市土体隧道——南通市啬园路隧道为背景, 对其设计关键技术进行分析, 所得结论为复杂环境城市土体隧道的建设提供技术参考。

1 工程概况

1.1 项目位置与规模

南通市啬园路(跃龙路—通富路)快速化改造

收稿日期: 2024-07-05

基金项目: 江苏省交通运输科技项目(2019Y22); 江苏省省级战略性新兴产业发展专项资金项目(苏发改高技[2020]645)

作者简介: 孙统立(1978—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事隧道与地下结构工程设计与施工技术研究工作。

工程西连长江中路,东接通沪大道,构成南通市沿江快速大动脉,是南通市“一环一轴八射”中南环的重要组成部分(见图1),是南通市城市中心地带通往国家高速公路网最为便捷的通道。南通市啬园路快速化改造工程,主辅路均设置为双向6车道,采用隧道式快速路,车道宽 $3.5\text{ m}+2\times3.75\text{ m}$,匝道宽 $2\times3.5\text{ m}$,主路设计速度 80 km/h ,辅路 60 km/h 。该项目改造范围总长约 4.3 km ,主线隧道 3.22 km ,其中暗埋段 2.67 km ,是目前江苏省内已建成的最长双向6车道城市土体隧道。



图 1 项目地理位置图

1.2 项目特点

隧道埋深较浅,采用明挖法施工。该工程具有以下特点。

(1)周围环境复杂、景观、环保要求高。该工程位于城市中心城区南侧,沿线建构筑物、地下管线密集,道路两侧主要为住宅、学校、公共场馆、风景区等,分布有城山家园、星光耀广场、南通市体育会展中心、南通大学、啬园风景区、狼山风景名胜区等。

(2)被交路及下穿河道多。隧道连续下穿城山路、工农南路、园林路3条被交道路,下穿城山河、永红河、张家港河、闸桥拱山界河4处河道,既有河道平行于嵩园路隧道,距离隧道基坑约12 m。

(3)对称设置3对地下进出匝道。主线隧道具有高低基坑、主匝道分合流处结构跨度大的特点。

(4)通风方案控制因素多。通风设计需要综合考虑环保、景观、消防、防灾救援等因素,合理确定隧道通风方案。

2 设计关键技术

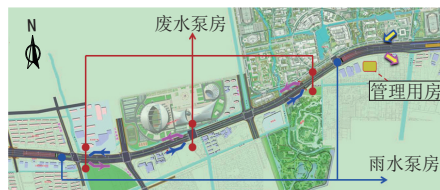
2.1 总体设计

隧道自西向东,沿既有啬园路下方敷设。隧道接地点位于城山路西侧,连续下穿城山路、工农南路、园林路、南通大学南门后出地面,对称设置3对地下匝道出入口。主线隧道洞口设2处雨水泵房,主线隧道最低点设置6处废水泵房,与匝道隧道雨

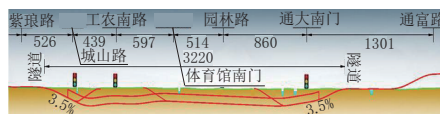
水泵房合建,雨、废水泵房均采用地下附建式。在主线隧道东侧接地点附近设一处隧道管理中心。

隧道埋深主要考虑被交管线埋深、平交口布置、河底标高和通风竖井高度等因素。隧道纵坡为W形,最大坡度3.5%,最小坡度0.3%,匝道隧道最大纵坡5%。

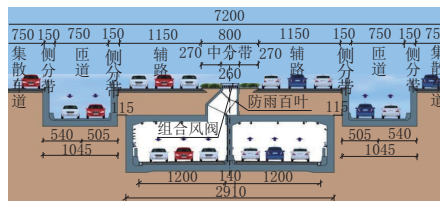
主线隧道横断面为单箱双室箱形结构,单向3车道由3.5 m+2×3.75 m组成,车道通行建筑限界为12.5 m×5.0 m(宽×高),结构单室内轮廓为13.25 m×6.25 m(宽×高)。隧道顶板上部设置分散型竖井,布置在道路中分带中部,中分带宽度为8 m,通风竖井平面尺寸为2.0 m×2.5 m(宽×长),露出地面高度0.6 m。根据道路中分带布置,地下匝道与主线隧道分离布置。隧道总体设计布置如图2所示。



(a)总平面布置图



(b)纵断面布置图 (单位: m)



(c)横断面布置图 (单位: cm)

图2 总体设计布置图

2.2 防灾救援

主线隧道全长 3.22 km,其中暗埋段长 2.67 km,根据《城市地下道路工程设计规范》(CJJ 221—2015),按二类防火要求设计。

隧道工程的防灾体系通过工程建筑、结构、通风、给排水及消防、供电照明和综合监控等各子系统的安全或功能的冗余设计来构建,并通过监控系统将各子系统构成一个有机整体,以实现隧道总体的防灾、减灾和救灾功能。其核心措施是隧道结构的耐火保护、通风排烟系统、消防疏散、自动灭火系统和其他消防措施^[2]。长大城市隧道的防灾救援设计主要包含以下方面。

(1)主动防灾:为确保行车安全、车行道两侧设置0.81 m防撞侧石;在进出洞口处设置光过渡段,通

过设置加强照明,有效消除进出洞时的黑洞效应。

(2)被动防灾:设置灭火器、消火栓系统以及顶板防火内衬对主体结构进行防火保护,隧道内的装修材料均采用不燃材料。耐火极限采用RABT升温曲线,耐火时间不低于2.0 h。

(3)火灾情况下的紧急疏散和救援:考虑单孔、单点隧道火灾情况。两孔车道间隔约120 m设一处人行横洞,安全门之间间隔40 m设置安全疏散指示灯,间距约500 m设置一处车行横洞。当一孔隧道内发生火灾事故时,另一孔隧道即刻启动应急封闭措施,火灾隧道内乘行人员可以通过人行或车行横通道疏散到另一孔隧道,火源上游车辆通过车行横通道调头进入另一孔隧道。

(4)火灾工况下的防排烟系统:隧道设置分散型竖井通风,在火灾工况下排除烟气。

2.3 高低坑基坑

隧道基坑长3.22 km,宽29.3~52.8 m(废水泵房处宽61.0 m),深0.9~14.7 m(雨、废水泵房处深18.3 m),基坑具有规模大、深度大、宽度大的特点,地下匝道出入口呈现高低坑特征。

隧道基坑所处地层主要为1-1粉土(局部为粉质黏土)、1-3粉土、粉砂、1-3a软粉质黏土、2-3粉砂、2-4粉质黏土夹粉砂、2-4c粉砂。地下潜水主要分布于1-1层、1-3层及2-3层,基坑距离长江直线距离不到2 km,地下水水力联系密切,设置坑外止水帷幕和坑内降水相结合。基坑开挖易引发流砂、管涌等问题,施工风险较大。

根据基坑深度、周边环境的重要性及与基坑距离划分为不同的安全等级及环境保护等级^[3],如表1所列。

表1 基坑安全等级及环境保护等级				
基坑深度/m	安全等级	环境保护等级	围护结构侧移	地表沉降
$H>10$	一级	一级	$0.18\%H$	$0.15\%H$
$7<H\leq10$	二级	二级	$0.3\%H, \leq30\text{ mm}$	$0.25\%H$
$H\leq7$	三级	三级	$0.7\%H, \leq50\text{ mm}$	$0.55\%H$

关于坑中坑基坑计算方法及相互影响,许多学者根据工程实践从数值计算、模型试验和现场监测等方面进行了深入的研究^[4],如图3所示。该隧道基坑内外坑距离 $B=11.6\text{ m}$,外坑 $H=1.015\sim11.55\text{ m}$,内坑 $h=0\sim11.688\text{ m}$ 。外坑设计时,根据匝道基坑深度,分别采用放坡、SMW工法桩、钻孔灌注桩;内坑设计时,根据主匝道高低坑高差,分别采用放坡、重力式挡墙和钻孔灌注桩,同时考虑外坑附加荷载,按土层厚度 H 折算为等效荷载,作用于内坑表面,如表2所

列。选取高低坑典型断面(MK3+800),围护计算结果如图4所示。

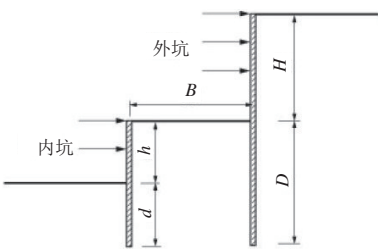


图3 坑中坑断面示意图

表2 基坑围护结构设计

区段	里程范围	基坑深度/m	围护型式
1	MK3+630~3+900、 MK4+320~4+643、 MK5+485~5+740	1.015 ~ 11.55 (外坑H)、	放坡、SMW工法桩、 φ1000@1200 钻孔桩 (外坑)
		0 ~ 11.688 (内坑h)	放坡、重力式挡墙、 φ800@1000 钻孔桩 (内坑)

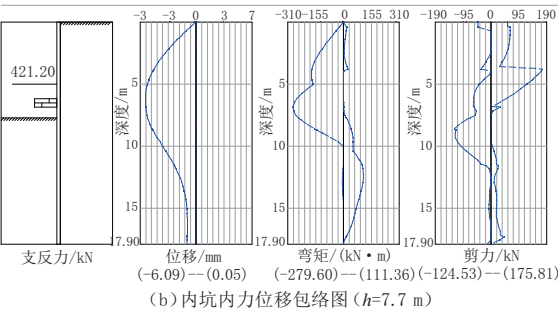
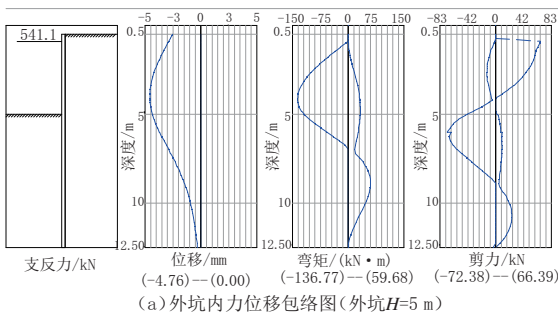


图4 高低坑典型断面围护计算结果(MK3+800)

2.4 主匝道分合流大跨结构

在主匝道分合流处,结构跨度通常较大。南京玄武湖隧道、苏州独墅湖隧道,主匝道分合流处结构最大净跨达到22 m^[5]。对于深埋大跨结构设计,常采用的结构型式有矩形结构、折板拱结构和预应力结构,具体如表3所列。

在地下匝道接入主线隧道处,结构净跨达到23.3 m。顶板为折板拱结构,底板为平板结构,起拱高2.2 m,结构净高8.45 m,顶板厚1.6 m,底板厚2.0 m。采用折板拱结构后,覆土厚度2.9 m。主匝道分合流处大跨结构计算如图5所示。

表 3 深埋大跨结构设计

方案优缺点	方案 1:矩形	方案 2:折板拱	方案 3:预应力
优点	结构简单,施工方便,结构容易衔接	结构受力较好,板厚较小	刚度大、抗剪能力及抗疲劳性能好,结构衔接较容易
缺点	大体积混凝土结构温度裂缝问题突出,板厚较大,经济性差	与两侧结构衔接需采用堵头墙或设过渡段	工艺复杂,技术要求高,容易产生预应力损失,地下工程应用较少
工程实例	独墅湖隧道、方兴湖隧道、苏州 G312 阳澄西湖隧道、武汉东湖隧道	玄武湖隧道、蠡湖隧道、苏锡常南部高速太湖隧道	北京地铁亦庄线明挖区间

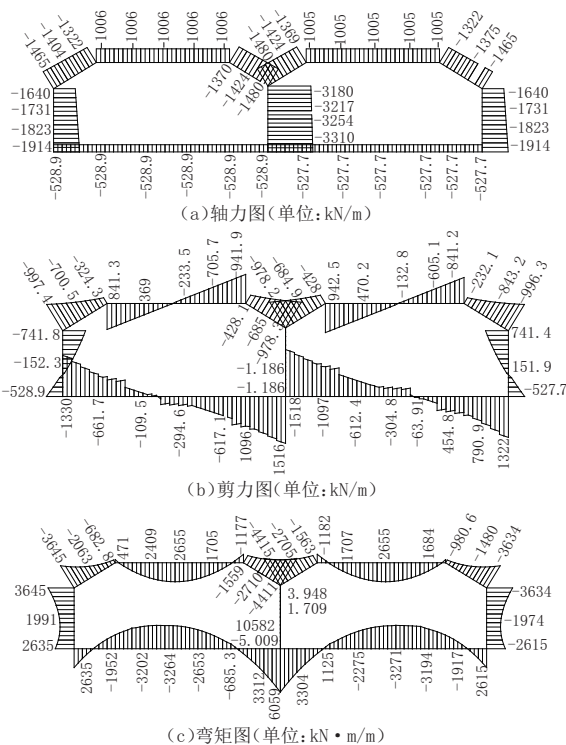


图 5 主匝道分合流大跨结构内力

隧道底板厚度达 2.0 m,结构顶底板跨度为 51.2 m,属于大体积混凝土结构。针对大体积混凝土结构温控防裂,主要对策措施如下^[6]。

(1)从控制混凝土的水化升温、延缓降温速度、减小混凝土收缩、提高混凝土的极限拉伸强度、改善约束条件和设计构造等方面采取相应措施。

(2)通过掺入混凝土外加剂,如抗裂剂、微膨胀剂及高效减水剂等,提高混凝土的抗裂性能,减少干缩应力。

(3)改善约束条件,削减温度应力。采取分层浇注,每层厚度 30~50 cm,合理设置施工缝、变形缝、后浇带。

(4)降低混凝土入模温度,选择气温较适宜的时间进行浇筑,根据外界气温、季节采取相应措施。

(5)禁止表面喷洒冷水,使混凝土产生温度应力而导致混凝土表面开裂。

(6)设置构造钢筋网片,在截面突变和转折处底板、中墙、顶板与墙转折处、孔洞转角及周边增加斜向构造配筋,以改善应力集中,防止裂缝。

(7)预埋循环冷却水管,降低混凝土内外温差。

2.5 分散型竖井通风

城市隧道常用的通风方式有竖井型自然通风、纵向通风高风塔、竖井分散机械通风等型式,如表 4 所列。隧道通风方案的选择需要综合考虑城市规划、环保、消防、景观和工程造价等因素综合确定^[7]。

表 4 隧道通风方式比选

方案优缺点	方案 1:竖井型自然通风	方案 2:纵向通风高风塔	方案 3:竖井分散机械通风
优点	型式简单,布置于道路中分带内,利用自然通风、自然光照明,节能	布置于隧道两端,能满足环评、消防要求,对中分带宽度无要求	布置于道路中分带内,能满足环评、消防要求,排烟可靠度高,能耗低
缺点	无能耗,排烟可靠度低,消防验收困难,中分带开孔尺寸较大	能耗高,受规划限高制约,景观影响大	竖井对地面中分带宽度有要求,需考虑景观效果
工程实例	南京西安门隧道、上海外滩隧道、无锡太湖大道隧道	上海北虹路地道、南京玄武湖隧道、苏州元和塘西	常州龙城大道隧道、南京长江隧道

该项目周边有狼山风景名胜区、鼋园景区等重点保护单位。项目周边规划限高 15 m,且环境复杂、景观和环保要求高。竖井型自然通风、纵向通风高风塔型式,因规划限高、消防、景观等因素制约,无法实施。经方案比选,最终采用竖井分散机械通风方案,该通风方式得到规划、环评和消防部门的认可。

结合地面道路中分带布置通风竖井,竖井内设置轴流风机,通风废气或烟气自隧道顶部竖井经风机排至地面辅道中分带。地面道路中分带宽度 8 m,隧道顶板开孔 2 m×2.5 m。单向隧道机械通风竖井纵向间距约 60 m,局部下穿路口处间距加大,如图 6 所示。

左、右线隧道沿纵向共设置 76 处机械通风竖井。为同时满足运营、火灾通风需求以及运营节能和环境噪声要求,通风竖井内设置 250℃耐温 1 h 的双向轴流风机。

3 结 语

以南通市鼋园路隧道工程为背景,分析其设计

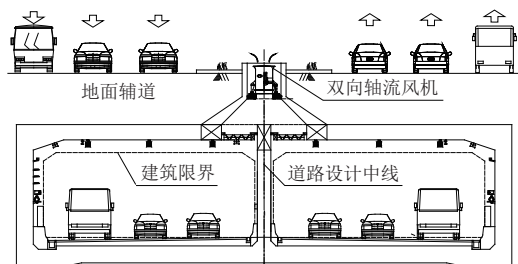


图6 通风竖井横断面设计图

关键技术,包括隧道总体设计、防灾救援、高低坑基坑、大跨结构和分散型竖井通风等,主要结论如下。

(1)城市隧道总体设计中,应根据技术标准、水文地质、建设条件等因素,对总体平纵布置、横断面设计、防灾救援以及运营管理等进行综合分析,应重点考虑雨(废)水泵房、消防泵房、变电所、管理中心(危化品检查站)、车行(人行)横通道和地下匝道的总体布置。

(2)地下匝道接入主线隧道,呈现高低坑基坑、大跨结构的特点。对于高低坑基坑需根据内外坑深度、高差、内外坑距离等因素,考虑相互影响进行一体化设计;对于主匝道分合流处大跨结构可采用折板拱断面型式。

(3)为兼顾环保、城市景观、消防等要求,在地面

中分带宽度允许时,采用竖井分散型通风方式。该方式避免了城市隧道中高风塔选址困难问题,相比竖井自然通风,地面中分带占用少,能兼顾消防、环保及景观要求,为复杂环境城市隧道的通风方案选择提供了解决方案。

该隧道工程于2017年6月开工,于2019年7月建成通车,工程实践证明其设计合理可行,为类似城市隧道的建设提供技术参考。

参考文献:

- [1] 郭小红.新编《公路水下隧道设计规范》要点解析[C]//水下隧道建设与管理技术论文集.武汉:中交第二公路勘察设计研究院有限公司,2013:3-10.
- [2] 范益群,王曦,蒋卫艇,等.水底公路隧道安全方案及消防安全性能化设计[J].中国勘察设计,2006(1):60-64.
- [3] DG/TJ 08-61—2018,基坑工程技术标准[S].
- [4] 侯新宇,蔺彦玲,薛必芳,等.坑趾系数对坑中坑基坑变形影响的敏感性分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(1):257-263.
- [5] 金丰年,周雪峰,翁杰.玄武湖隧道结构的动力计算分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1898-1902.
- [6] 方忠强,赵延喜.海底隧道大体积混凝土温度场及温度应力有限元分析[J].交通标准化,2014,42(21):115-118.
- [7] 奚峰.无锡太湖大道隧道通风方式设计[J].地下工程与隧道,2011(3):29-31.

(上接第385页)

- [14] DOWSLAND K A, THOMPSON J. Simulated annealing[J]. Handbook of Natural Computing, 2012: 1623-1655.
- [15] OTUBAMOWO K, EGUNJOBI T O, ADEWOLE A P. A comparative study of simulated annealing and genetic algorithm for solving the travelling salesman problem [J]. International Journal of Cooperative Information Systems, 2012, 4(4): 6-12.
- [16] ZOLFAGHARI S, LIANG M. Comparative study of simulated annealing, genetic algorithms and tabu search for solving binary and

- comprehensive machine-grouping problems[J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(9): 2141-2158.
- [17] BHULAI S. Nearest neighbour algorithms for forecasting call arrivals in call centers[C]//International Conference on Intelligent Decision Technologies. Cham: Springer, 2017: 77-87.
- [18] YEO A. Traveling salesman should not be greedy: Domination analysis of greedy-type heuristics for the TSP[J]. Discrete Applied Mathematics, 2002, 117(1): 81-86.