

复杂条件下城市过河隧道结构方案研究

邹 涛

(上海市政交通设计研究院有限公司, 上海市 200030)

摘 要: 以上海市某过河隧道为例,综合考虑充分利用地下空间、发挥道路交通功能、保护周边环境等因素,对隧道过河的明挖、暗挖方案进行深入对比,确定了明挖叠层结构方案,结合围堰分幅施工;同时根据周边环境条件,采用合理的基坑支护体系,对基坑开挖施工进行了全过程数值模拟。结果表明,开挖对周边环境的影响满足规范要求。

关键词: 过河隧道;盾构法;叠层结构;数值模拟

中图分类号: U449.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)12-0198-05

0 引 言

城市地面土地资源的紧缺促进了城市空间向地下发展,地下交通系统已成为城市地下空间利用的重要组成部分^[1]。但是大型城市中心区建设环境复杂,对隧道工程结构方案、施工工法都提出了更高的要求^[2]。

本文以上海市某过苏州河隧道为例,详细介绍了在充分利用地下空间、发挥道路交通功能、保护周边环境的要求下,对于城市过河隧道不同结构方案的比选过程。

1 工程概况

拟建隧道位于上海市西部中环线与外环线之间,道路基本呈东西走向,规划为城市次干路,双向 4 车道,主线设计车速 40 km/h。

地面道路西侧沿线主要为工业、教育科研用地,东侧主要为成熟居住区,现状地下管线众多。

苏州河深层排水调蓄管道工程(以下简称深隧)包括一级调蓄管道、综合设施和二三级管道等。深隧主线盾构段北起工作井,与隧道结构平面斜交,隧道于深隧主线上层布置;二三级管道平面基本与隧道平行,采用盾构施工。

隧道与深隧主线及二三级管道位置关系图见图 1。

本工程方案的研究重点在于过苏州河的实施工

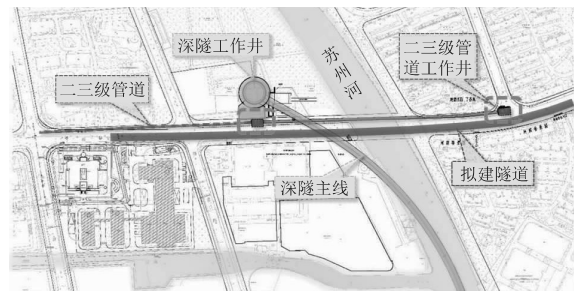


图 1 隧道与深隧主线及二三级管道位置关系图

法,应结合沿线用地和实际情况进行多方案比选,根据方案的合理性和可行性,确定功能最优、规模合理、交通适应性强、可实施性强、对周边环境影响最小的方案。

2 设计方案比选

过河隧道的主要修建方法有围堤明挖法、钻爆法、盾构法、沉管法和 TBM 全断面掘进机法^[3]。本工程苏州河宽度 60 m,根据工程规模、地质条件,明挖方案比较了平铺、叠层结构方案;暗挖方案比较了沉管及矩形、圆盾构方案。

2.1 比选原则

(1)过河节点应考虑苏州河河床底标高,满足河底最小覆土要求。

(2)苏州河以东道路两侧局部居民小区围墙间距仅 24 m,隧道建设空间有限。平面布置需尽量避免拆除小区围墙及周边建筑。

(3)周边布置有深隧主线、二三级管道等市政设施,需处理好与市政工程的关系,做好预留。

(4)需考虑接线道路的重要交叉口交通组织方案,出入口布置应与周边路网相匹配。

收稿日期: 2021-03-23

作者简介: 邹涛(1989—),男,硕士,工程师,从事地下结构设计工作。

2.2 明挖方案

2.2.1 平铺方案

针对出入口平行、前后依次接地2种设置方式,将隧道方案分为3种。限于文章篇幅,仅介绍比选后的推荐方案。

隧道暗埋段为单层双孔箱涵,纵断面最大纵坡6%,过河段河底最小覆土1.1 m。隧道与深隧相交处埋深11 m,与深隧主线竖向间距29.9 m,与二三级管道最小净距1.1 m。平铺方案隧道平面图、结构横断面图见图2、图3。东端敞开段距南侧小区围墙仅0.5 m,施工期间需拆除围墙并还建。



图2 平铺方案隧道平面图

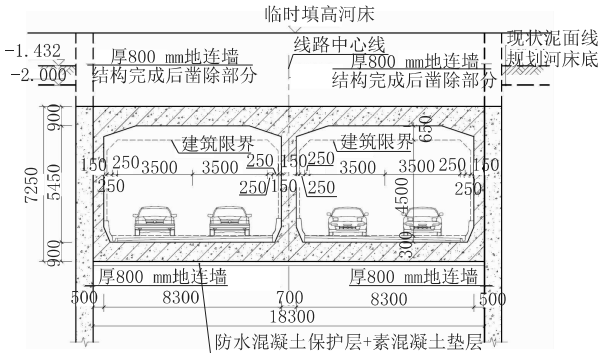


图3 平铺方案隧道结构横断面图(单位:mm)

2.2.2 叠层方案

隧道暗埋段随埋深增大由单层单孔箱涵逐渐变化为叠层箱涵。上层车行方向为自西向东,下层为自东向西,出入口前后依次接地,纵断面最大纵坡6.5%,过河段河底最小覆土1.0 m。隧道与深隧相交处埋深17 m,与深隧主线竖向间距23.9 m,与二三级管道最小净距4.6 m。叠层方案隧道平面图、结构横断面图见图4、图5。东端敞开段与南、北侧小区围墙最近距离7.5 m,提供了充足的施工空间,施工期间无需拆除小区围墙。

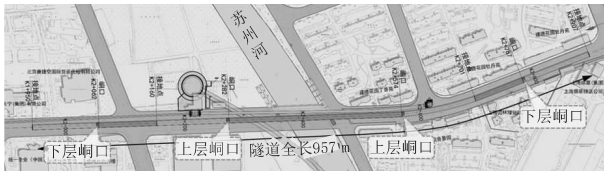


图4 叠层方案隧道平面图

叠层方案用地集约,隧道距两侧建筑远,沿线小区围墙无须拆迁,能释放更大空间用以敷设二三级管道和管线。因此,明挖方案中推荐叠层方案。

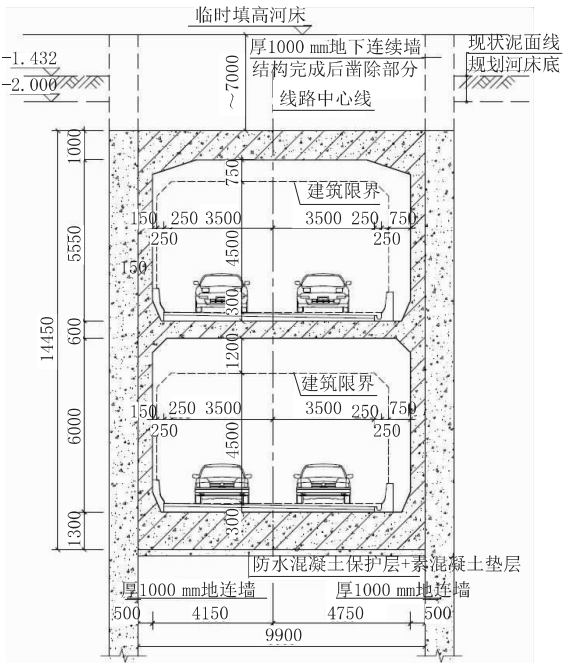


图5 叠层方案隧道结构横断面图(单位:mm)

2.3 暗挖方案

2.3.1 沉管方案

隧道南北平铺布置,过河段采用沉管法。沉管段长约90 m,最大纵坡6%,河底最小覆土1.1 m。沉管方案隧道平面图见图6。



图6 沉管方案隧道平面图

可采用1节、2节管节沉放方案,但均存在以下问题:(1)干坞施工在深隧主线上大量卸土,存在上浮风险;(2)干坞围护结构侵入西岸南北侧地块,距南侧写字楼近,需采取保护措施;(3)管节沉放期间影响苏州河通航。

2.3.2 圆盾构方案

采用 $\phi 14.5$ m圆盾构,盾构段长292 m,隧道最大纵坡6%,河底最小覆土8.2 m。隧道与深隧相交处埋深22.8 m,与深隧主线竖向间距18.1 m,与二三级管道最小净距2.5 m。圆盾构方案隧道平面图、结构横断面图见图7、图8。圆盾构埋深大,导致隧道规模大。西端八字形出入口交通绕行,东端依次接地交通功能较差。隧道与深隧相交处,深隧主线上方覆土仅18.1 m,卸载较大时存在上浮风险。

2.3.3 矩形盾构方案

(1)采用9.9 m $\times$ 7.6 m矩形盾构,北线盾构段长293 m,南线盾构段长154 m,纵断面最大纵坡7%,



图7 圆盾构方案隧道平面图

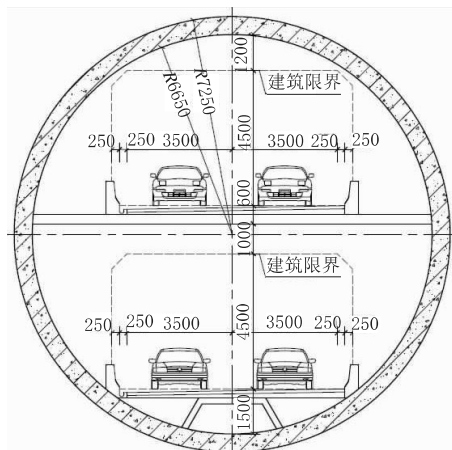


图8 圆盾构方案隧道结构横断面图(单位:mm)

过河段河底最小覆土 2.7 m。隧道与深隧相交处理深 12.6 m,与深隧主线竖向间距 28.3 m,与二三级管道最小净距 1.6 m。矩形盾构方案隧道平面图、结构横断面图见图 9、图 10。隧道西岸南侧工作井侵入地块 4.2 m,距离高层建筑 3.4 m,与深隧盾构段水平距离 2.1 m,工作井施工难度大,必须先于深隧实施。



图9 矩形盾构方案隧道平面图

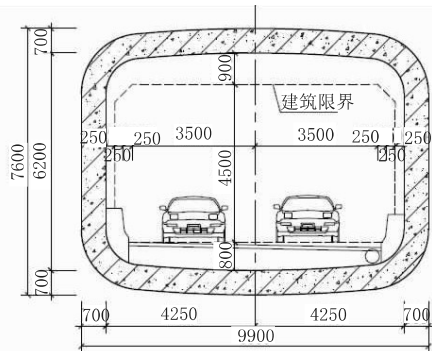


图10 矩形盾构方案隧道结构横断面图(单位:mm)

(2)采用 11 m × 13.25 m 双层矩形盾构,盾构段长 293 m,纵断面最大纵坡 6.5%,过河段河底最小覆土 6.1 m。隧道与深隧相交处理深 21.1 m,与深隧主线竖向间距 19.8 m,与二三级管道最小净距 4.9 m。双层矩形盾构方案隧道平面布置与圆盾构方案隧道

平面布置基本一致。双层矩形盾构方案结构横断面图见图 11。双层矩形盾构缺点同圆盾构方案,隧道埋深大,深隧主线卸载较大时存在上浮风险。

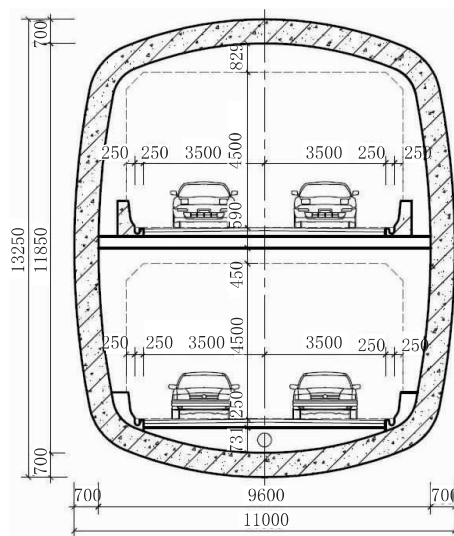


图11 双层矩形盾构方案隧道结构横断面图(单位:mm)

2.4 推荐方案

综合考虑工程造价、交通功能、周边环境影响、相关工程条件、施工工艺,针对云岭西路过苏州河的建设条件,最终推荐选用明挖叠层方案。各方案对比见表 1。

3 基坑支护方案设计及环境保护

3.1 过苏州河方案

苏州河节点河道宽度 60 m,为保证施工期间苏州河正常防汛及通航功能,采用两阶段围堰-导流的分幅明挖施工,围堰采用钢平台+拉森钢板桩,施工期间需拆除现状两岸防汛墙并重建。

本段基坑深度 18.8~22 m,基坑安全等级为一级^[4]。围护采用厚 1.0 m 地下连续墙(叠合墙形式),支撑采用 3 道混凝土支撑+3 道钢支撑,以增大围护结构刚度和稳定性。

3.2 对苏州河深层排水调蓄管道工程的影响

基坑开挖卸载对下卧隧道的影响以竖向变形为主,选择合适的施工方案,能在一定程度上减小基坑开挖对下卧隧道造成的变形影响^[5]。按照工期计划,深隧主线先于隧道施工,隧道先于二三级管道施工。隧道与深隧主线平面交角为 31°,平面交叉长度约 25 m。该段隧道基坑深度 17 m,围护采用厚 0.8 m 地连墙,共设置 5 道支撑,坑底采用三轴搅拌桩加固。深隧衬砌采用 C60 钢筋混凝土,顶覆土 40.9 m,内径 10 m,管片厚度 0.65 m,衬砌顶部内水压假定为 0.5 MPa。场地地层物理力学参数见表 2。

表 1 方案比选

方案	对周边建筑影响	对深隧主线影响	交通功能	建安费 / 亿元	总工期 / 月	
明挖	平铺	小区围墙需拆除并还建	与主线竖向间距 29.9 m, 影响较小	出入口便捷	4.3	24
	叠层	小区围墙无拆除	与主线竖向间距 23.9 m, 影响较小	出入口局部绕行	4.9	24
暗挖	沉管法	小区围墙需拆除并还建	干坞在主线大量卸土, 存在上浮风险	出入口便捷	6.0	27
	圆盾构	小区围墙无拆除	与主线竖向间距 18.1 m, 存在上浮风险	出入口交通功能差	8.4	30
	平铺矩形盾构	小区围墙需拆除并还建, 西岸工作井侵入地块	与主线竖向间距 28.3 m, 必须先于深隧实施, 影响大	纵坡 7%, 交通组织困难	7.1	33
	双层矩形盾构	小区围墙无拆除	与主线竖向间距 19.8 m, 存在上浮风险	出入口交通功能差	7.5	30

表 2 土层物理力学参数

土层编号	土层名称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\phi/(\text{^\circ})$	层厚 / m
② ₁	粉质黏土	18.5	23	17.5	2.2
③	淤泥质粉质黏土	17.5	12	14.0	5.6
④	淤泥质黏土	17.0	14	12.0	8.8
⑤ ₁	黏土	17.6	20	19.0	7.4
⑤ ₃	粉质黏土夹粉砂	17.9	22	22.0	13.8
⑤ ₄	粉质黏土	19.5	46	23.0	4.4
⑦	粉砂夹粉质黏土	19.4	7	31.5	4.8
⑧ ₁	粉质黏土	18.0	28	22.0	5.7
⑧ ₂	粉质黏土、粉砂互层	18.7	30	24.0	25.8

采用 Midas/GTS 建立三维有限元计算模型（见图 12），分析基坑开挖对深隧衬砌结构变形的影响。土体采用 3D 实体单元进行应力变形分析，地连墙、深隧衬砌采用 2D 板单元，内支撑采用 1D 梁单元。根据基坑开挖过程，定义数值模拟施工步：（1）初始应力场分析；（2）修建深隧盾构段；（3）施工地连墙；（4）分 5 次开挖土层及施工内支撑。土体采用修正 Mohr-Coulomb 模型，深隧衬砌、地连墙、内支撑采用弹性模型。

图 13 给出了基坑开挖过程中深隧衬砌结构竖向、水平变形发展曲线（在深隧盾构完成后设置位移清零步）。由图 13 可知，衬砌变形随着开挖深度的增加而不断增大，以竖向变形为主，最大竖向变形 7.2 mm，最大水平变形 1.3 mm。由于基坑内的开挖

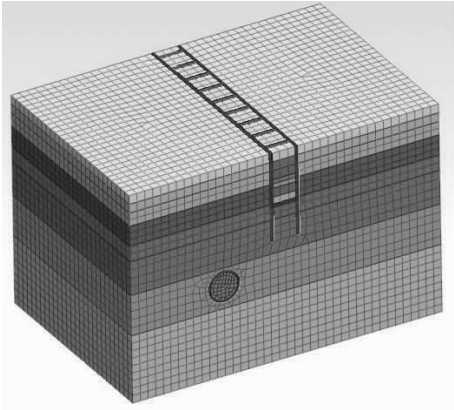


图 12 计算模型

卸载，使深隧衬砌结构发生以竖向变形为主的隆起变形，但最大变形量小于衬砌允许最大变形量 0.5% 衬砌外径的限值^[6]。

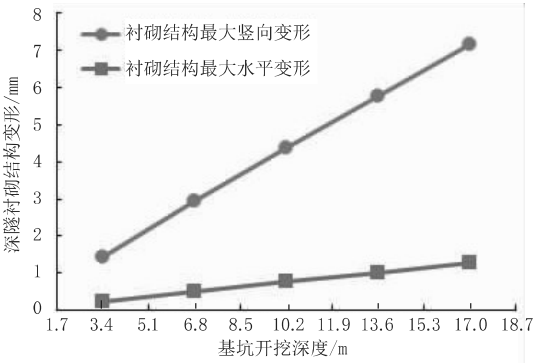


图 13 基坑开挖过程中深隧衬砌变形发展曲线

图 14 为基坑开挖完成后深隧衬砌结构变形云图。由图 14 可知，最大竖向变形位于基坑正下方衬砌拱顶处，最大水平变形位于基坑正下方两侧约 15 m 衬砌拱腰处，并沿基坑中心线呈对称分布。因此，在基坑开挖过程中应加强对深隧衬砌拱顶、拱腰部位的变形实时监测，实现信息化施工。由于深隧使用期间会遇到多种工况（满管、半管、空管），内水压会发

生相应变化,基坑开挖过程中,需控制深隧内水压,以确保深隧安全。

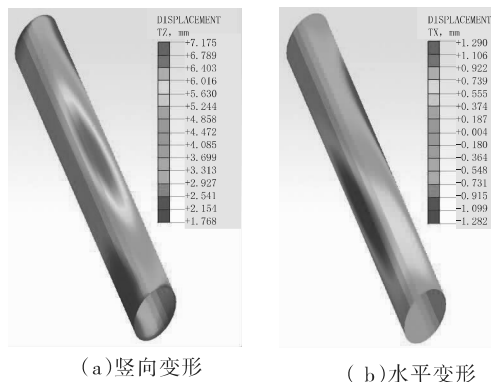


图 14 基坑开挖完成后深隧衬砌结构变形(单位:mm)

4 结 语

(1)本文对隧道的不同结构方案进行比选研究,重点对比了过苏州河不同施工法的优缺点,认为明挖叠层结构方案功能最优,规模、造价合理;采用两阶段围堰—导流,分幅明挖施工可实施性强,对周边环境影响最小,可供相似工程参考。

(2)隧道上跨深隧主线处基坑方案采用地下连续墙+内支撑体系。对基坑开挖全过程进行的数值模拟结果表明,开挖卸载使深隧主线衬砌结构产生以竖向变形为主的隆起变形,但最大变形量满足规范要求。基坑开挖过程中应加强对深隧衬砌拱顶、拱腰处的变形监测,实现基坑信息化施工,以确保深隧安全。

参考文献:

- [1] 赵慧. 我国城市地下道路研究现状及发展刍议[J]. 城市道桥与防洪, 2016(2): 5-8.
- [2] 吴金刚. 浅议大型城市地下道路工程设计要点[J]. 特种结构, 2017(34): 71-79.
- [3] 王梦恕. 水下交通隧道发展现状与技术难题—兼论“台湾海峡海底铁路隧道建设方案”[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(27): 2161-2172.
- [4] DG/T J08-61—2018: 基坑工程技术标准[S].
- [5] 王定军, 王婉婷, 段罗, 等. 基坑开挖对下卧地铁隧道的施工影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017(27): 223-232.
- [6] T/CECS 610—2019: 盾构法输水隧道结构设计规程[S].

(上接第 193 页)



图 12 工程新型连锁块结构效果图

5 结 语

“绿水青山就是金山银山”, 在大力提倡河道生态治理的今天, 生态护坡结构在中小河道治理中的

运用也越来越广泛。经回顾近几年上海地区常用的生态护坡结构, 对连锁块护坡展开了讨论。传统连锁块整体稳定性及生态景观性较差, 现结合工程实例, 对传统连锁块进行了优化与改进, 形成了一种新型连锁块护坡结构, 并介绍了其运用效果, 可供今后河道整治工程设计参考。

参考文献:

- [1] 季永兴. 城市河道整治中生态型护坡结构探讨[J]. 水土保持研究, 2001(12): 25-28.
- [2] 陈杰. 崇明区 2018 年新河镇老南横引河河道整治工程可行性研究(含初步设计)报告[R]. 上海: 上海嘉定水务工程设计有限公司, 2018.