

盾构法过江隧道埋深的确定方法

张连才, 张 洋, 马小龙, 何丽莎

(中铁第六勘察设计院集团有限公司隧道设计分公司, 天津 300131)

摘 要: 作为加速城市化进程和改善交通现状的重要途径, 地铁线网日益密集, 地铁建设进入高潮阶段, 随之而来的地铁区间穿江过海的情况逐渐增多, 所以该类地铁隧道的设计技术问题需要重点深入研究。以哈尔滨地铁某过松花江区间为依托, 对过江隧道埋深的主要控制因素及过江隧道合理埋深进行研究。过江区间盾构隧道上方覆土层过薄, 可能会出现塌方或者涌水等严重事故。通过分析过江隧道埋深的主要控制因素, 如两端车站埋深、隧道纵向线路坡度、施工期间安全覆土、运营期间抗浮要求等, 得出过江盾构隧道的设计埋深, 总结出一套完整的盾构法过江隧道埋深的确定方法, 以期为类似工程提供借鉴和参考。

关键词: 地铁; 过江隧道; 隧道埋深; 隧道安全; 盾构法

中图分类号: U231.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2018)S-0100-05

The Determination Method of Buried Depth of Tunneling by Shield Method

ZHANG Liancai, ZHANG Yang, MA Xiaolong, HE Lisha

(CRL GROUP China Railway Tunnel Survey & Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300131)

Abstract: Currently, to promote the urbanization process, and as an important approach to improve the present traffic situation, the subway network is becoming more and more intensive; subway construction is at a climax stage, followed by a gradual increase in subways across a river or sea situation, and further study is needed to focus on technical problems in metro tunnel design. The main control factors, the buried depth of the tunnel and the reasonable burial depth of the tunnel, are studied. The overlying strata above the shield tunneling are too thin, and there may be serious accidents such as landslides or flooding. Through the analysis of the main controlling factors for a deep buried tunnel across a river, such as embedded depth of both ends of the station and tunnel longitudinal slope line, during the period of construction safety turns the soil, anti-floating during operation requirements, etc., to develop a river-crossing shield tunnel design for buried depth, and summarize a set of complete shield methods to determine the buried depth of a tunnel across the river, so as to provide a reference for similar projects.

Keywords: subway; river-crossing tunnel; tunnel depth; tunnel security; shield method

近年来, 随着我国城市规模成倍扩大, 基础设施落后的问题显现, 城市交通运输的矛盾日益突出。地铁以其安全、准时、快速的优点, 在拓展城市空间、打造城市快速立体交通网络和改善城市交通环境方面发挥越来越大的作用, 对过江隧道的需求也越来越大。由于北方地区河流较少, 气候特殊, 过江隧道的设计及施工经验较为缺乏, 所以笔者以哈尔滨地铁某区间

为依托, 对盾构法过江隧道埋深的主要控制因素进行研究。

轨道交通某线作为哈尔滨轨道交通的骨干线路, 串联松花江江南江北两岸, 在北岸可以有效联系前进、松浦两个副中心, 在南岸联系道外老城区、南岗区、省政府等组团。过江隧道是哈尔滨地铁某线的一大难点, 亦是一大闪光点。该过江隧道是全国为数不多高寒地区富水砂层的过江隧道之一, 必定是建筑史上的一个里程碑。笔者针对工程中的线路埋深系统进行分析, 并得到适用于过江隧道类似工程的埋深确定方法。

收稿日期: 2018-04-25 修回日期: 2018-07-09

第一作者: 张连才, 男, 大学本科, 助理工程师, 从事结构设计, 2224952532@qq.com

1 工程概况

哈尔滨轨道交通某线线路(见图 1)全长 38.1 km, 共设 31 座车站, 平均线间距 1.27 km; 线路起于香坊区民族学院站, 止于松北区绕城高速西侧前沙站, 整体呈 7 形走向。其中, 松浦镇站—北马路站区间为过江隧道(见图 2), 拟建长度约 3 km, 其中越江段长度 2.21 km; 由松花江江底依次穿越北侧河道→江心岛(阿勒锦州, 俗称“狗岛”)→南侧主江面; 隧道自身较长, 且水下段占比高达约 74%。

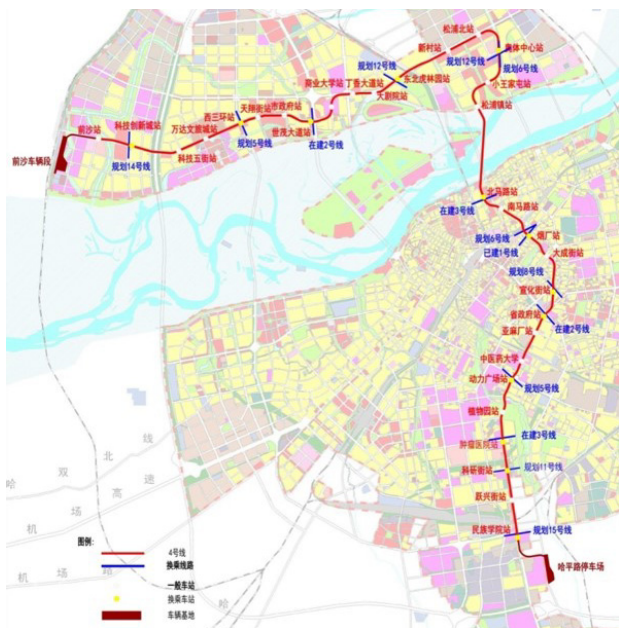


图 1 哈尔滨某线线路

Fig.1 Phase I Project of Harbin Line 4

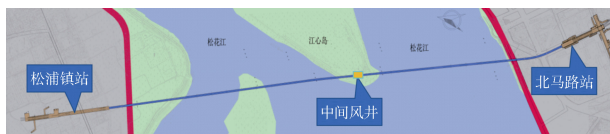


图 2 过江区间线路

Fig. 2 River crossing route

根据地质勘察报告, 过江区间处于松花江漫滩区。松花江河床宽 293~1 000 m, 水深 1.5~8 m, 历史最高水位 120.89 m, 百年一遇洪水位 120.91 m, 常水位标高为 115.8 m, 抗洪设防水位 118.1 m, 河床冲刷后河底地形资料显示, 在冲刷清淤后松花江主河槽河底最低标高为 104.3 m, 故过江隧道范围河床冲刷最低标高 104.3 m, 隧道上方松花江河床、冲刷、水位均较为稳定; 陆域段地面标高在 117~120 m, 该单元土层以砂类土为主, 中间掺杂不连续粉质黏土层, 故判定隧

道穿越区以细中砂、粗砂为主。

2 影响隧道埋深的因素

2.1 区间两端车站及周围建筑

2.1.1 两端车站

江南北马路站为明挖 3 层岛式车站, 站台宽 14 m, 车站长度 357.5 m; 是某线与在建某线的换乘车站, 换乘形式为通道换乘; 也是盾构接收站, 覆土 3 m, 地面标高 119.40 m, 轨面标高 96.298 m。江北松浦镇站为明挖双层岛式车站, 站台宽 12.6 m, 车站长度 513 m; 是盾构始发站, 覆土 3 m, 地面标高 116.073 m, 轨面标高 101.45 m。盾构隧道附属工程共包含 4 处联络通道, 1 处中间风井。

2.1.2 周围建构筑物

本区间下穿周围建构筑物如下: 北岸防洪堤坝, 属于夯土堤坝, 坝下无截渗板墙等设施, 堤坝上方现状为江湾路, 隧道穿越该堤坝, 埋深 15~17 m; 南岸防洪措施包括外侧活动钢闸桩基、内侧截渗板墙, 隧道由截渗板墙及活动钢闸桩基下方穿越, 竖向最小间距约 1.5 m。故北马路站处隧道入江点覆土 19.3 m, 松浦镇站处隧道入江点覆土 10.1 m。

2.2 隧道纵向线路坡度

列车在轨道上运行, 受到牵引力、基本运行阻力、曲线阻力、风阻力和坡道阻力等 5 种力的作用。前 4 种阻力是和列车运行方向相反的力, 而坡道阻力具有两重性。当列车位于下坡道的时候, 坡道阻力与列车行进方向相同, 给列车一个向前的力, 促使列车加速运行; 当列车位于上坡道的时候, 坡道阻力与列车行进方向相反, 使列车减速运行^[1]。

2.2.1 不同坡度加速坡的优选

由表 1 对比结果可以看出, 随着加速坡的坡度增大, 列车的启动加速时间逐渐缩短, 其牵引用电量也逐渐减小, 这说明在车站两端设置加速坡可以降低列车的牵引能耗。此外还说明, 加速坡的坡度在 12‰以下时, 其节能效率在 9%以下; 加速坡的坡度在 22‰~26‰时, 节能效率可达到 20%~25%^[2]。

2.2.2 过江隧道纵向坡度选定

结合以上综合数据得出, 本工程隧道方案中北马路站端线路坡度为 24‰, 松浦站端线路坡度为 26‰。根据《铁路隧道设计规范》, 隧道内的坡度可设置为单面坡或人字坡, 地下水发育的长隧道宜用人字坡。故

表1 不同加速坡方案的牵引计算

Tab. 1 Traction calculation of different acceleration slope schemes

加速坡的 坡度/%	比选条件: 区间长度 1 363 m, 加速坡长 250 m, 最高运行速度 65 km/h						
	启动时间/h	加速距离/m	运行时间/s	制动初速/(km/h)	电能消耗/(kW·h)	能耗差/(kW·h)	节能率/%
-3	24.6	250	99	55.7	25 671	0	0
-6	23.0	219	101	52.3	24 358	-1 313	5.11
-8	22.3	218	100	53.1	24 847	-824	3.21
-10	22.8	212	100	51.8	24 396	-1 275	4.97
-12	21.6	198	101	49.6	23 429	-2 242	8.73
-14	20.9	188	101	48.0	23 052	-2 619	10.2
-16	19.8	150	102	45.5	22 063	-3 608	14.05
-18	19.6	150	105	44.1	21 821	-3 850	15.0
-20	18.6	158	102	43.8	21 584	-4 087	15.92
-22	17.4	137	103	40.7	20 630	-5 041	19.64
-24	16.8	131	103	39.5	20 173	-5 498	21.42
-26	15.8	122	105	38.5	19 104	-6 567	25.58

本隧道方案在中间风井处的线路纵向坡度设置为人字坡;根据铁路隧道设计规范:隧道坡度不宜小于3‰^[3],在最冷月平均气温低于-5℃的地区,地下水发育的隧道宜适当加大坡度。基于哈尔滨冬季的平均气温,在中间风井处的坡度选取为25‰和16.2‰。故哈尔滨某线过江隧道纵断面呈W形,如图3所示。

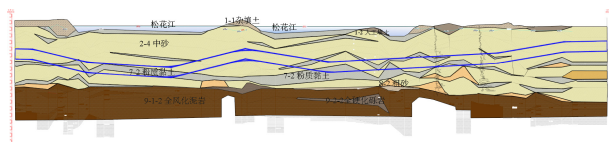


图3 过江隧道纵向线路坡度设计

Fig. 3 Design of cross river tunnel vertical line slope

2.3 过江隧道施工安全

盾构隧道常常要求在江底冲刷线以下有一定的最小覆土厚度,以保证盾构的顺利掘进和结构的抗浮安全^[4]。针对超浅覆土段,从盾构施工和结构抗浮安全的角度,对水下隧道临界覆土厚度用解析解的计算方法进行研究,得出确定最小覆土厚度的方法:考虑盾构施工要求时,根据正面挤压力大于静止土压力、小于被动土压力来确定最小覆土厚度^[5]。综合考虑施工掘进要求和结构抗浮控制,参考国内成熟理论的研究成果,得出过江隧道最小覆土的计算如下:

$$d > \frac{\frac{4P_g}{\pi D_{\text{盾}}^2} - 2c\sqrt{K_p} - H_w\gamma_w}{\gamma_w + \gamma'K_p} - \frac{D_{\text{盾}}}{2} \quad (1)$$

式中, $D_{\text{盾}}$ 为盾构外直径, γ' 为土体浮重度, γ_w 为水的重度, H_w 为水深, K_p 为被动土压力系数, P_g 为盾构正面挤压力, c 为土体黏聚力。

由哈尔滨某线过江区间结构及详勘报告可知:

$$\begin{aligned} D_{\text{盾}} &= 6.34 \text{ m}, R = 3.1 \text{ m}, r = 2.75 \text{ m}, \gamma_g = 2.2 \text{ t/m}^3, \\ \gamma_c &= 2.5 \text{ t/m}^3, \gamma' = 1.0 \text{ t/m}^3, \gamma_w = 1.0 \text{ t/m}^3, H_w = 4 \text{ m}, \\ K_p &= \sqrt{2}, P_g = \lambda\gamma\left(d + \frac{D_{\text{盾}}}{2}\right), c = 4 \text{ kPa}. \end{aligned}$$

将上述相关数据代入式(1),经计算得出 $d > 6.61 \text{ m} \approx D_{\text{盾}}$ 。

根据式(1)得出:常规盾构法最小安全覆土为1倍洞径。

2.4 运营期间的抗浮要求

在运营阶段考虑大自然的营造力,为避免建成后的隧道由于长年的河床冲刷和水流的下切作用使覆土减薄而引起隧道上浮,产生路(轨)面变形、管片错台、衬砌开裂、漏水等病害,进行运营阶段的抗浮计算也是必要的^[6-7]。参考国内专家的研究成果,得出过江隧道运营期间抗浮设计最小覆土的计算公式如下:

$$d > \frac{\pi R^2 \gamma_g - \pi (R^2 - r^2) \gamma_c}{2R\gamma'} \quad (2)$$

式中, R 为管片外半径, r 为管片内半径, γ_g 为壁厚注浆材料的重度(没有注浆时为水的重度), γ_c 为管片重度。

将哈尔滨某线过江区间结构及详勘报告的相关数据代入式(2),有

$$d > \frac{3.14 \times 3.1^2 \times 22 - 3.14 \times (3.1^2 - 2.75^2) \times 25}{2 \times 3.1 \times 20} = 4.0575 \text{ m}$$

由于河床冲刷、水流的下切作用等自然营造力,使上覆土减薄而有可能引起隧道上浮,因此在隧道运营阶段可由上述公式进行抗浮计算,类似的过江区间抗浮计算在隧道外径的基础上还应考虑注浆层厚度^[8]。

2.5 隧道区间的地质因素

哈尔滨市区的地貌特征受松花江水系控制,地势南高北低,地形坡向松花江及阿什河谷,按成因形态分为剥蚀堆积冲洪积平原和侵蚀堆积冲积河谷平原。前者分布在哈尔滨南部,被松花江支流切割成不规则Δ形,总的特点是地势较高,具缓坡漫岗状起伏;后者为松花江水系冲积而成,总的特点是地势低平,微地貌发育。哈尔滨市轨道交通某线穿越松花江标段工程线路位于哈尔滨市松北区和道外区,沿线穿越城市沿江道路、江心岛及松花江。本标段地貌类型属于松花江低漫滩,地面标高 107.1~118.99 m,其中穿越松花江段河床宽 293~1 000 m,水深 1.5~8 m。由于松花江底地形复杂,存在河底深槽和冲刷线的影响,所以隧道埋深 10.93~22.6 m,江底段埋深 11.9~18.83 m。

在确定区间埋深时,地质因素也是不可忽略的主要因素之一。首先要根据沿线地质构造、岩土类型及分布、岩土物理力学性质、地下水埋藏条件进行工程地质分区,确定特殊性岩土的类型、成因、分布、规模、工程性质,分析其对工程的危害程度,确定沿线地表水的水位、流量、水质,河湖淤积物的分布,以及地表水与地下水的补排关系,得到地下水水位、地下水类型,了解补给、径流、排泄条件、历史最高水位、地下水动态和变化规律,还应确定岩土可挖性分级、围岩分级^[9-10]。综合其区间所处的地质因素,判断适应区间的最佳埋深。

根据以上因素,可以得出哈尔滨地铁某线隧道纵断面方案。如图 3 所示,隧道所在土层主要为中砂,局部夹杂少量粉质黏土,隧道设计为避开粗砂及泥岩层,在保证覆土安全的前提下,采用直径为 6.34 m 的盾构机(隧道外径 6.2 m,隧道内径 5.5 m,管片厚度 0.35 m),纵断面呈 W 形,线路最大坡度 26‰,隧道埋深 10.93~22.6 m,江底段埋深 11.9~18.83 m。

2.6 雨水泵房的位置

由于隧道排水设施的设置和维护不当以及暴雨强度不断增大等原因,隧道浸水事件频繁发生,所以隧

道内雨水泵房的设置对隧道的排水系统起着至关重要的作用。研究总结国内外隧道内雨水泵房的设计原则,发现隧道雨水泵房一般设置在隧道的最低点处:一是隧道的最低点处汇水量大,能使隧道内的雨水以最快的速度、最短的距离进入雨水泵房内,防止雨水长时间地滞留于隧道中,增大隧道的风险;二是可以避免隧道内排水沟出现反坡现象,使隧道中的雨水快速排到泵房,由此可以大大减少排水沟的深度,有利于隧道结构的安全、稳定,同时可以减少泵房的深度,减少工程的造价^[11]。

根据以上因素,隧道设计在排除不可抗力因素的同时,应人为地设计一处或几处隧道最低点,用于雨水泵房的设置。

3 结论

本研究发现,确定隧道埋深的因素不是单方面而是多方面的。确定地铁过江隧道埋深的主要因素是:两端车站埋深、隧道纵向线路坡度、施工期间安全覆土、运营期间抗浮要求、地质因素、雨水泵房位置。

通过隧道两端车站的埋深可以确定盾构始发及接收时的隧道覆土,通过计算施工期间安全覆土和运营期间的隧道抗浮,得到隧道施工和运营的安全埋深,水文地质限制隧道周围的环境及覆土,在以上因素的共同制约下,加入节能坡度设计原则,最终确定过江隧道的合理埋深。

参考文献

- [1] 梁广深. 地铁节能线路纵断面设计研究[J]. 都市快轨交通, 2009, 22(4): 37-40.
LIANG Guangshen. Study on longitudinal section design of subway energy saving lines[J]. Urban rapid rail transit, 2009, 22(4): 37-40.
- [2] 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [3] 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
Railway tunnel design specification: TB 10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [4] 郭德平, 何川, 周济民, 等. 水下盾构隧道施工及运营阶段抗浮计算方法探讨[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
GUO Deping, HE Chuan, ZHOU Jimin, et al. Discussion on anti-floating calculation method of underwater shield tunnel construction and operation stage[D]. Chengdu: Southwest

Jiaotong University, 2012.

- [5] 张银屏. 盾构隧道最小覆土厚度计算方法适用性研究[J]. 施工技术, 2015, 44(13): 87-91.
ZHANG Yinping. Study on the applicability of the method for calculating the minimum overburden thickness of shield tunnel[J]. Construction technology, 2015, 44(13): 87-91.
- [6] 梅奥, 张新泉. 盾构隧道[J]. 隧道建设, 1987(4).
MAYO R, ZHANG Xinquan. Shield tunnel[J]. Tunnel construction, 1987(4).
- [7] 张君, 赵林, 周佳媚, 等. 盾构隧道管片上浮的机制研究[J]. 铁道标准设计, 2016(10): 88-93.
ZHANG Jun, ZHAO Lin, ZHOU Jiamei, et al. Mechanism study on the floating of shield tunneling tube[J]. Railway standard design, 2016(10): 88-93.
- [8] 高华军. 地铁隧道盾构施工风险管理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
GAO Huajun. Research on risk management of shield

construction in subway tunnel[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.

- [9] 盾构法隧道施工及验收规范: GB 50446—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Code for construction and acceptance of shield tunneling method: GB 50446—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [10] 戴小平, 郭涛, 秦建设. 盾构机穿越江河浅覆土层最小埋深的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 782-786.
XIAO Pingdai, GUO Tao, QIN Jianshe. Study on the minimum burial depth of shield tunneling machine through shallow overlying soil[J]. Geotechnical mechanics, 2006, 27(5): 782-786.
- [11] 陶禹传, 罗肖肖. 对隧道雨水泵房设计的几点思考[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2012(33).

(编辑: 郝京红)

(上接第 91 页)

江北风井盾构接收采用回填泡沫混凝土结合水平冷冻技术, 确保盾构机顺利接收, 大大降低了施工难度, 加快了工程进度。

3) 杭州地铁规划近几年仍需要施工多条越江隧道, 4 号线南段工程越江隧道的顺利施工, 为后续地铁隧道建设提供了理论依据, 形成了方法体系, 积累了实践经验。

参考文献

- [1] 沈林冲. 杭州地铁 1 号线下穿钱塘江工程的若干技术问题[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(9): 84-88.
SHEN Linchong. Technologic problems for shield tunnel of Hangzhou metro Line 1 under Qiantang River[J]. Urban mass transit, 2011, 14(9): 84-88.
- [2] 方拥华, 史平扬, 魏志范. 杭州市地铁 1 号线钱塘江水域浅层沼气释放施工勘察[J]. 施工技术, 2011(S2): 105-107.
FANG Yonghua, SHI Pingyang, WEI Zhifan. Construction investigation of biogas release in Qiantangjiang River water of Hangzhou Subway Line 1[J]. Construction technology, 2011(S2): 105-107.
- [3] 浙江省水利河口研究院, 浙江大学. 杭州地铁 4 号线一期工程钱塘江隧道河段最大冲刷深度研究[R]. 杭州, 2014: 6-8.
- [4] 何太洪, 周冠南, 刘训华. 杭州地铁 1 号线越江隧道管片防水密封垫优化研究[J]. 地下工程与隧道, 2009(S1):

41-45.

- [5] 代仁平. 盾构隧道下穿含气地层江堤沉降控制分析[J]. 现代城市轨道交通, 2014(1): 82-85.
DAI Renping. Analysis on bank settling control of shield tunnel passing under gas formations[J]. Modern urban transit, 2014(1): 82-85.
- [6] 刘清泉, 孙宗丹, 文韬. 盾构隧道穿越河流施工控制技术[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2014(7): 69-69.
- [7] 沈林冲, 周顺华, 张金荣, 等. 杭州地铁一号线穿越钱塘江工程理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012: 5-10.
- [8] 朱春雷. 杭州地区高承压水对地铁建设的影响及对策[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(7): 105-109.
ZHU Chunlei. The Influence of high pressure aquifer on construction of Hangzhou Subway[J]. Journal of railway engineering society, 2014, 31(7): 105-109.
- [9] 杨武. 江底地铁联络通道承压水的风险控制技术[J]. 建筑施工, 2011, 33(7): 616-617.
YANG Wu. Risk control technology of confined water for subway passageway under river bottom[J]. Building construction, 2011, 33(7): 616-617.
- [10] 李斐, 陈达, 朱燕琴. 杭州地铁 1 号线彭埠站—建华站区间盾构隧道下穿有害气体土层工程设计研究[J]. 铁道标准设计, 2010(10): 108-113.

(编辑: 郝京红)