

市域高速铁路顶管联络通道钢管节受力性能研究

方涛

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:上海市域高速铁路盾构段拟采用机械法顶管施工联络通道。由于隧道埋深较大,开孔率过大不利于主线隧道受力状况,因此联络通道衬砌拟采用无加劲肋钢管节形式。为了确定不同管壁厚度条件下的管节变形和受力性能变化规律,以及最优管节厚度,采用 Ansys 软件进行分析,同时利用现行国家给排水工程规范,验算了钢管节稳定性。结果表明,相比较于常用的混凝土管节和钢混凝土复合结构管节,无加劲肋钢管节能大大降低主线隧道开孔率。

关键词:市域铁路;联络通道;顶管法;钢管节;受力性能

中图分类号: U412.35+1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)02-0173-04

0 引言

目前国内联络通道普遍采用冻结法预先对开挖土体及周边区域进行加固,然后采用矿山法开挖。国内针对冻结法开挖联络通道已有深入研究,且形成了一套完备的施工流程^[1]。在地质条件允许的情况下,国内工程界也采用其他预支护方法,例如注浆^[2-4]、竖井^[5]、管棚导管^[6]、深层搅拌加固^[7]等。但是,矿山法存在工期长、施工环境恶劣、质量隐患等问题。

为了提高联络通道施工安全性,国内外相继进行了联络通道机械掘进的研究。2000年左右,上海和南京地铁在地质条件较好的区间尝试采用矩形顶管法来修建联络通道^[8-13];广州采用组合式盾构施工地铁某车站联络通道^[14]。近年来,无锡和宁波地铁相继尝试掘进机施工联络通道^[15-16];香港屯门至赤鱗角连接线工程实现了复杂地层条件下的顶管法施工联络通道^[17]。

现有的机械法联络通道多采用混凝土衬砌或钢混凝土复合衬砌。衬砌厚度影响主线隧道开口率,开口率过大不利于隧道的整体受力性能。

市域铁路工程盾构段埋深较大,部分联络通道位于承压水层中。为保障施工安全,应采用机械式顶管法修建联络通道。联络通道拟采用无加劲肋钢管节,既满足逃生需求,又控制主线隧道开口率。本

文采用数值分析方法,确定管节厚度,并利用现行国家给排水工程规范来验证管节稳定性。

1 背景简介

市域铁路功能介于国铁与地铁之间,是地铁与国铁衔接的纽带。机场联络线是上海城市总体规划确定的市域铁路的重要组成部分。上海市拟建的市域铁路机场联络线工程盾构段采用外径9 m、厚度0.45 m混凝土管片衬砌,如图1所示。

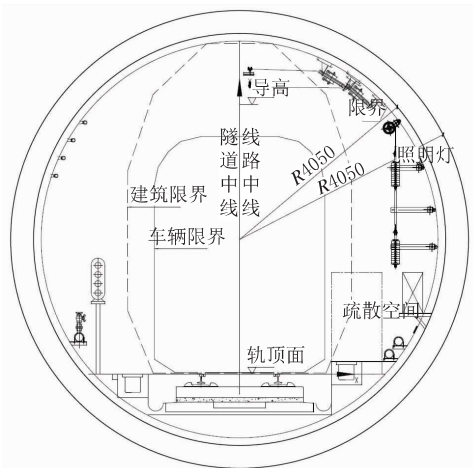


图1 主线盾构隧道示意图(单位:mm)

我国现行《地铁设计规范》(GB 50157—2013)规定,2条单线区间隧道之间长度达到一定时,需要设置联络通道,用于消防疏散。相比较于地铁,市域铁路的载客量更大,运行速度更快,对疏散要求更高。针对自身特点,设计单位制定满足消防需求的消防通道截面尺寸,如图2所示。为了满足双向逃生门的布置需求,联络通道内径不能小于3.9 m。

收稿日期:2020-06-15

基金项目:市域高速铁路机械法联络通道建造技术(19DZ1201003)

作者简介:方涛(1991—),男,博士,工程师,主要从事隧道及地下工程的研究工作。

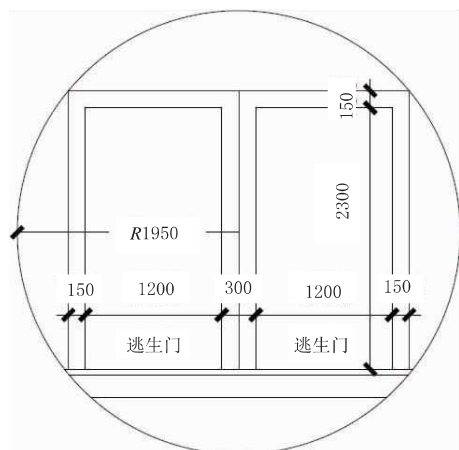


图2 联络通道建筑限界(单位:mm)

2 模型建立

2.1 模型简化

在一般顶管计算中,忽略纵向受力和变形,采用二维平面应变分析。本文采用水土分算形式的梁-弹簧计算模型研究联络通道受力特性,如图3所示。图中: H 为联络通道埋深; H_0 为地下水位埋深; H_1 为顶部水头高度; q_1 为垂直土压力; q_2 为拱背土压力; e_1' 为隧道顶部土侧压力; e_2' 为隧道底部土侧压力; g 为隧道自重; k_n 为单位面积内等效地基土弹簧系数; p_w 为外部水压力; R 为联络通道半径。考虑到联络通道最不利的埋置深度,联络通道计算埋深 $H=55\text{ m}$ 。

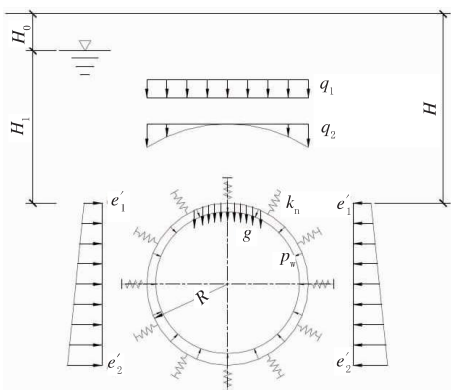


图3 联络通道计算模型

2.2 水文地质条件

根据地质调查报告,计算联络通道处的土层分布如图4所示。其中⑦₂层灰黄~灰色粉砂层天然含水量22.9%,天然孔隙比 $\varepsilon=0.646$,渗透系数4.86 m/d,侧压力系数 $K_0=0.3$,地层抗力系数为59 400 kN/m³。根据承压水长期观测结果,该层水头埋深6 m左右,相应标高为-1 m,即 $H_0=1\text{ m}$ 。

2.3 模型参数

由前述,统一假定隧道顶部上覆土厚度55 m,地下水水位位于地表下1 m,地表超载20 kPa。不考

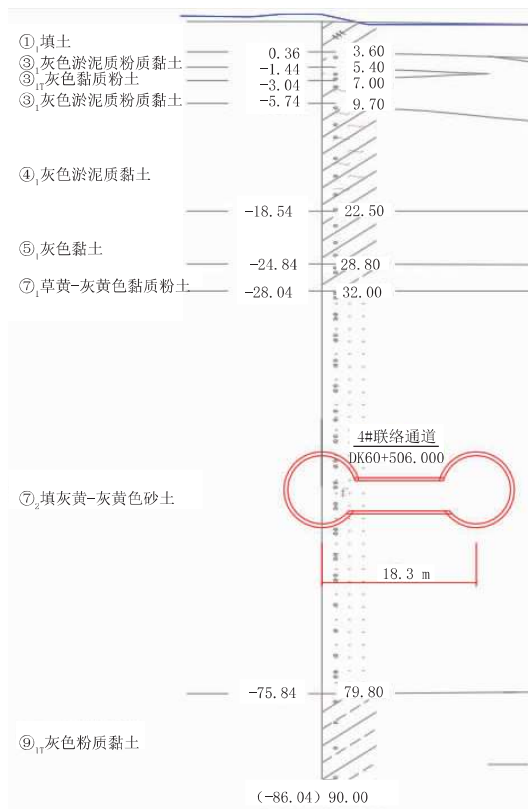


图4 地质条件(左侧数字为地层相对标高,右侧数字为地层绝对标高;单位:m)

虑土层起拱效应,地层的侧压力系数为0.3,地层抗力系数为59 400 kN/m³。根据设计经验,选用钢管节厚度50 mm、55 mm、60 mm、65 mm、70 mm共5组钢管节,模型编号为No.1~No.5。计算采用单位管节环宽(1 m)。

忽略管节厚度引起的衬砌轴线变化,则5组计算模型的通用参数如下:垂直土压力 $q_1=504\text{ kPa}$;拱背最大土压力 $q_{2\max}=19.4\text{ kPa}$;拱顶水压力 $q_{wot}=540\text{ kPa}$;拱底水压力 $q_{wob}=580\text{ kPa}$;拱顶侧向土压力 $e_1=151.2\text{ kPa}$;拱底侧向土压力 $e_2=162.8\text{ kPa}$ 。钢材统一选用Q345号钢,考虑材料的抗压强度设计值为280 MPa,弹性模量206 000 MPa。

2.4 计算模型建立

根据模型简化,钢管节采用梁单元简化,为了方便施加外荷载和地基弹簧,将管节等圆心角剖分为360个单元。Ansys计算模型如图5所示。

对于梁单元,外部土压力荷载需分配到单元节点上,在施加前计算合力并分解到 x 、 y 方向。水压力的施加采用面荷载的方式。其外部荷载如图6所示。为了尽量反映隧道的收敛变形情况,只在隧道拱顶和拱底处施加 x 方向约束。

钢材近似理想弹塑性材料,钢管节计算截面为矩形,且截面高度较小。本次计算中采用弹性模型模

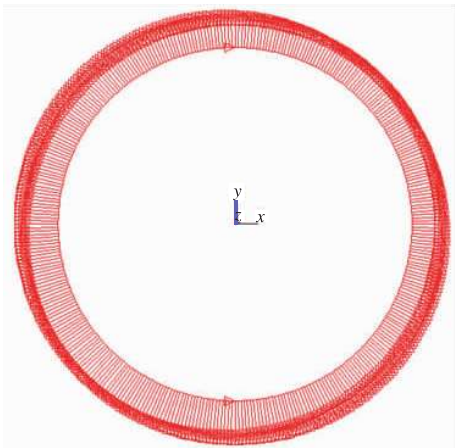


图5 Ansys 计算模型

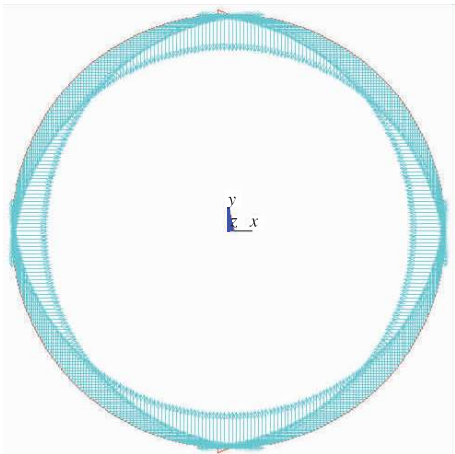


图6 外荷载示意图

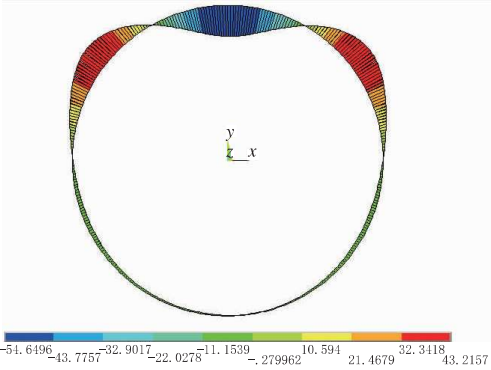
拟钢材,将塑性发展作为安全储备。

3 结果分析

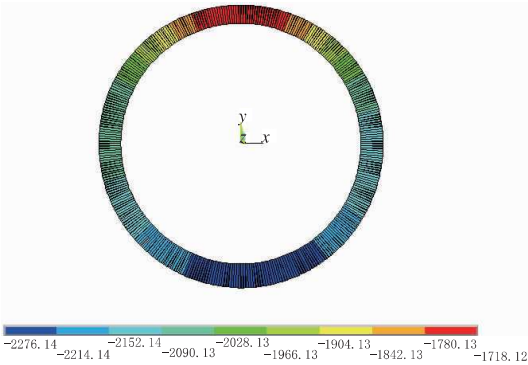
钢管设计过程中,根据两方面判别设计厚度的合理性:一方面是材料的受力性能,另一方面是管节整体收敛变形。依据计算结果,5 种模型的受力和变形的规律基本一致。图 7 所示为 No. 1 模型钢顶管的 y 向变形、轴力、弯矩图。

由图 7 可知:由于采用水土分算模型,考虑承压水影响,管节弯矩偏小,在拱顶和拱底处呈现内侧受拉,在拱腰处呈现外侧受拉。管节的轴向力较大,且全周都处于受压状态。管节整体下沉,拱顶位移大于拱底位移,收敛变形呈现“横鸭蛋”型。

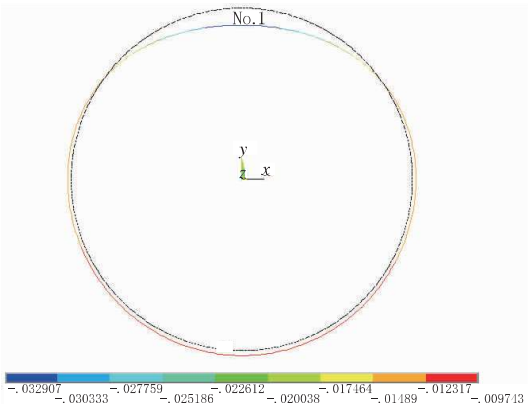
表 1 给出了 5 种厚度钢管节的计算结果。由表 1 可知,钢管在外荷载作用条件下,主要承受轴压力。5 组模型中钢管节都处于小偏心受压状态。利用压弯构件计算方法,不考虑塑性发展变形,则 5 组模型钢顶管截面正应力最大值如表 2 所示。由表 2 可知,5 组模型正截面应力远远没有达到材料强度,计算情况均满足条件。需要考察隧道收敛变形和局部屈曲情况。



(a) 弯矩图



(b) 轴力图



(c) y 向变形图

图7 工况 No.1 计算结果

表 1 5 种工况计算结果

模型 编号	弯矩 / (kN·m)		轴力 / kN		y 向变形 / mm		收敛变 形 / %
	极大	极小	极大	极小	拱顶	拱底	
No. 1	43.2	-54.7	1 718	2 276	-9.7	-32.9	0.58
No. 2	49.8	-62.5	1 703	2 267	-9.7	-32.9	0.58
No. 3	56.6	-70.5	1 689	2 259	-9.5	-29.4	0.50
No. 4	63.6	-78.5	1 675	2 251	-9.4	-28.0	0.46
No. 5	70.7	-86.6	1 662	2 244	-9.3	-26.7	0.44

注:弯矩正表示外部受拉,负表示内侧受拉;轴力正表示受压。

相对于混凝土圆顶管 0.3%D(D 为混凝土圆顶管直径)的变形要求,在现行规范层面,尚未有对圆

形钢管节收敛变形的明确要求。根据上海市工程建设规范《盾构法隧道结构服役性能鉴定规范》(DG/TJ08-212—2013)附录H中规定,盾构段及连接通道横断面的相对变形允许值,取值范围为0.3%~0.5%。本次计算中选取0.5%作为收敛变形限值。

表1还统计了5种厚度钢管节的收敛变形情况。由表1可知,随着管节厚度增加,管节刚度增大,收敛变形减小。当厚度为60 mm时,钢管收敛变形已经小于0.5%限值。

表2 5种工况截面最大正应力

钢管节厚度/mm	截面正应力/MPa
50	166
55	154
60	145
65	137
70	129

在钢结构设计中,还需要考虑局部屈曲导致的钢管节承载能力下降情况。根据中国工程建设协会标准《给水排水工程工程顶管技术规程》(CECS 246:2008)8.3节对管节临界压力的验算,计算结果显示60 mm的管节厚度,在考虑腐蚀条件下,仍然能够满足管壁稳定性的要求。

根据上述分析,钢顶管厚度选取60 mm。相比于厚400 mm的混凝土管节和钢混复合结构管节,采用钢管节能够有效降低主线盾构隧道的开口率。

4 结 论

(1)考虑水土分算计算模型,在承压水影响下,管节弯矩偏小,轴压力较大,管节截面处于小偏心状态。5组模型的截面强度计算均能够满足设计要求。

(2)5组模型的隧道变形均呈现“横鸭蛋”型。在现行规范中,暂无对钢顶管收敛变形限值规定。本文根据工程经验和其他相关规定,选取0.5%D作为限值。

(3)为了满足0.5%D限值的收敛变形,管节的厚度需要60 mm。

(4)利用给排水相关规范验算钢管屈曲变形性

能。计算结果表明,在考虑腐蚀条件下,60 mm能够满足管节稳定性要求。

(5)根据设计经验,在本文相同设计条件下,混凝土管节和钢混复合结构管节的厚度一般为300~400 mm。采用钢管节能够有效降低主线盾构隧道的开口率。

参考文献:

[1] 陈湘生.地层冻结工法理论与实践[M].北京:煤炭工业出版社,2007.

[2] 李国强,苏坚深,赵斌.三重管高压旋喷注浆技术在上海地铁旁通道软土地层加固中的应用[J].建井技术,1995(2):9-12,48.

[3] 李国强,赵斌,祝树红,等.高喷与灌注复合加固技术在上海地铁旁通道软土地层加固中的应用[J].建井技术,1995(2):13-16,48.

[4] 杜建林,梁兴朴.注浆技术在联络通道开挖施工中的应用[J].广州建筑,2007(4):44-46.

[5] 徐钢.竖井法在地铁联络通道施工中的应用[J].广东土木与建筑,2006(1):31-32,52.

[6] 郭庆彪.浅埋暗挖法隧道施工在广州地铁五号线的应用[J].建筑安全,2008(4):44-46.

[7] 李永强,杨国宝.软土地层深层搅拌法加固、矿山法开挖旁通道的施工工艺[J].城市道桥与防洪,2006(4):141-144,14.

[8] 傅德明,王善根.地铁二号线陆家嘴车站至东昌路站区间隧道的联络通道,泵站顶进施工[J].上海市政工程,2000(3):77-81.

[9] 王善根.地铁2号线陆家嘴站至东昌路站区间隧道的联络通道、泵站顶进施工技术[J].上海建设科技,2000(6):18.

[10] 王善根.上海地铁二号线区间隧道的联络通道及泵站的顶管法施工[J].世界隧道,2000(5):18-22.

[11] 陈向科,何雨保,王玮.南京地铁联络通道顶进法施工技术应用[C]//大直径隧道与城市轨道交通工程技术——2005上海国际隧道工程研讨会文集.上海:同济大学出版社,2005:702-707.

[12] 高波,陈裕康.顶管法在地铁盾构区间隧道联络通道中的应用[J].施工技术,2005,34(6):19-20,23.

[13] 陈裕康,何立军.地铁联络通道顶管法施工技术分析及[J].岩土工程界,2007,10(12):48-51.

[14] 云维冬.某地铁站联络通道矿山法和组合式盾构法施工方案的比较[J].铁道勘察,2005(4):75-78.

[15] 何邦亮,丁修恒,郎志超,等.列车荷载作用下机械法联络通道—隧道结构响应[J].岩土工程学报,2019,41(增刊2):173-176.

[16] 朱瑶宏,王靖禹,董子博,等.盾构法联络通道密封垫设计及防水试验研究[J].隧道建设,2019,39(1):110-118.

[17] SCHMAEH P. Mechanized solutions for cross passage construction[C]//Challenging Underground Space: Bigger, Better, More. Barton: ACT, 2017:1106-1113.