

# 地铁盾构小半径下穿铁路施工技术

张 军 徐 盟 高瑞军 靳 灿

中国建筑第四工程局有限公司 陕西西安 710000

**摘 要:**在地铁工程开挖中,采用了以平衡式盾构机为动力关节的方法,实现了快速便捷、稳定性较高的开挖施工。本文结合某城市轨道交通4号线的具体实例,对该段地铁盾构小半径下穿铁路施工技术进行了分析,详细介绍了工程重难点,并阐述了工程沉降控制的主要措施,对该技术在实际工作中的应用提出了一些具体的意见。

**关键词:**小半径;盾构;地铁施工

## 1 地铁盾构法的关键技术及难点

### 1.1 中轴误差的调整

在大型盾构施工中,将其转向半径设定在550米以内,是传统上的一项非常困难的施工方案,因此应注意小半径施工过程中的质量控制。为了确保工程的安全性,关节装置必须采用密闭式结构,并且要求将其关节式液压缸的长度数量设计误差保持在合理的区间内,所以对其轴向的控制是一个重难点。

### 1.2 管片装配的管理

此次项目采用的管片是通用环。通用环的尺寸对盾构设备的工作部位和空隙尺寸都有一定的规定,因而要防止出现不合理的情况,从而对工程的进度产生不利的作用。

### 1.3 轨道交通的沉降防治

该工程所处的地段位于现有铁路下方,其占用量很大,因而在开挖过程中要充分重视地铁沉降所带来的不稳定因素。为了确保地铁的施工和地铁的正常运行,为了防止地铁的沉降,在施工中必须对地面进行加固处理。

## 2 小半径盾构工程的控制要点

### 2.1 管片选取方法的计算

在盾构施工作业中,盾尾空隙应尽量控制。由于盾尾空隙的尺寸受其位置及间距的影响,因此在安装过程中必须严格遵循设计与建造的规定。在选取管片点时,按以下公式进行了求解:

$$C = W \cdot D/R \quad (1)$$

在公式中,C表示楔形量,W表示管板环宽度,D表示管板外半径,R表示弯曲半径。假定R是600米,那么C=22.67毫米。

从计算的角度来看,在实际的工程作业中,如果继续进行拼装的话,将会增加整个斜楔的尺寸。所以,根据汽缸的冲程和盾构机尾部的空隙,还应根据盾构机的冲程和盾构机的空隙来确定其它的管片电位。在此项目中,本工程所使用的19台掘进器均采用了19个液压缸,在F区段19个拼装点上,按(1)式求出相应的楔形数量。

经分析,确定了13、14、15、16、17、18号油缸的装配点位,可达到R=600米、左拐弯管段楔形-22.67毫米的规定。但若继续选取这些部位进行组合,其整体楔形值将会大于-22.67毫米。在装配时,F块体主要集中在这6个气缸上,然后考虑到尾气孔与气缸的形状差异,用其它部位进行装配。为了使盾尾之间的间隔均一,减少了推进缸的冲程差异,使盾构在较小的半径区内能够安全地进行拼装。

### 2.2 掘进方式的选取

按照公式(2):

$$\delta = p \times \zeta = \frac{T}{R} \times \zeta \quad (2)$$

公式中, $\delta$ 表示管段的位移,p表示管身的外力, $\eta$ 表示变形

因子,T表示盾构机械的推力,R表示回转半径。

结果表明:①管件的变形与其受力成正比;②回转半径与管段的变形成反比。为此,应合理地减小盾构的推动力,增加回转半径,以保证管道在施工中不会产生偏移,从而实现对管段的定位。

在地铁开挖之前,采用同一地层50米的地铁进行了试掘,对地铁开挖的各项指标和地表沉降进行了细致的记录和分析。依据试掘条件,遵循“少扰动,快通过”的思想,制定了相应的施工工艺。

## 3 工程沉降防治措施的探讨

工程沉降防治一般有以下原则:①在盾构开挖之前,依据沉降控制标准进行沉降数值预测,采用类似的方法进行开挖,优选施工工艺,加固基础;②在盾构掘进过程中,采用信息化技术,实现了对掘进参数、注浆参数和土仓压力的实时监控;③在施工中后期的管理:二次注浆、补浆。

### 3.1 制定沉降的控制标准

盾构地铁通过的区间条件比较特殊,上部有既有铁路等,为了保证工程的安全性,采取了相应的措施。根据《铁路地铁监控量测技术规程》(TB/T10121-2007)和《建筑变形测量规范》(GB50911-2013)、《城市轨道交通工程监测技术规范》(JGJ8-2016),并根据有关的设计资料进行施工。通过对工程施工现场下穿铁路的危险性分级的分析,得出了施工场地的沉降与地面沉降的防治指标:1毫米/天的地表沉降(盾构段)日变化率,3毫米/天的最大沉降速度和20毫米的累积变形。地面凸出(盾构段)的日变化率,以1毫米/天为基准,以3毫米/天为最大,以20毫米为最大沉降控制量。综合考虑上部结构类型、健康状况和使用年限等因素,设计了相应的结构沉降控制指标,即:1~2毫米/天的日均沉降,10~20毫米的累积沉降,0.002的区域倾角。

### 3.2 最优参数设计

在FLAC3D数值仿真和计算的基础上,在盾构地铁施工之前,选择相似的岩体进行地铁穿越。

双行曲线段累积地面最大沉降数值为11.4毫米,其下陷速度比地面沉降控制值要小,但与个别的沉降控制量较小,为了确保盾构的安全性,通过小半径曲线断面的施工工艺,合理提高土仓压力和灌浆压力,并采用改良渣土、同步注浆、二次注浆。

### 3.3 施工工艺及后期防治

在挖掘之前,确定了地铁内的干扰区,根据地铁深度为盾构深度的2倍,以地铁较短的曲线下穿越铁路深度17m左右,影响范围为34m(28环)。也就是说,开挖平面达到结构体20环+开挖穿过结构体的长度+管片脱离护板后40环。

(1)当盾构在较短的半径内时,对其进行了强化。按试掘试验预偏差(10~20毫米)维持工作面的推动力,10环开挖,测定轴向的坐标,并决定最后的预偏差,或调节工作台的推力。在短半径区间内,保证均匀的持续、慢速,以20~30毫米/分钟的速度进行

施工。对装配过程的质量进行严密的监控,并保证三次以上的复压。

## (2) 灌浆工艺

同时灌浆:加大外环的灌浆压力,采用注浆率和灌浆压力两个指标进行了严格的调控,使整个区间的沙层每环的压浆数为 6.2 立方米或注水压力为 400kPa 时,灌浆就会完成。应优先选用灌浆流量,如灌浆流量小于 6.2m<sup>3</sup>,灌水压力为 400kPa 时,应及时检查管线状况,避免因灌浆管线孔径减小造成注水压力上升,从而造成灌浆达标。如果灌浆量小于 5 立方米,灌水压力为 400kPa,则可以认为是由于拱顶沉降或由于应力的原因造成了灌注难度,因此必须进行二次灌浆,以弥补因应力引起的裂缝。

同步注浆法是为了在管片排出后,能及时、高效地填补盾尾间隙,减小对储层的干扰。同步注浆压力、注浆量、同步浆液的初凝、注浆期和注浆比等因素对已建地铁的变形有一定的作用。以盾构工程为干扰源,以夹层地基为传输媒介,以地下通道为目标,以夹心土为中介。

在盾尾 3-6 环同时进行灌浆时,对外侧的压浆力进行加固,若管段向外偏差较大,则应采取二次灌浆法对其进行压制。避免因灌浆时产生的灌浆压力引起的管道错位。

二次注浆:二次注浆应在盾尾 7-10 环内进行,二次注浆时也可选用同期注浆,当出现难以注浆时,可选用水泥砂浆进行二次注浆。然后依据地基的沉降情况进行多次重复灌浆。

二次注浆工艺参数:在二次灌浆中,以同步注浆浆为主,同时进行惰性泥浆的混合比例,以两种不同的方式进行,即以 1 立方米/环的灌浆或 400kPa 的灌浆压力进行灌浆。如果灌浆流量小于 1 立方米/环时,灌浆压力超过 400kPa,应改为混凝土泥浆。

## (3) 废渣处理

在施工过程中,除了少数地段有粉质泥,其他都是中等厚度的沙层,下穿铁路的岩层分布比较均匀。在渣土的改善中,采用了以发泡法为主,以膨胀土为辅的方法进行土壤的改造。在难以有效地防治前方沉降的情况下,利用膨胀土层进行掘进。

## (4) 开采数量的管理

按照该区域的地质条件和施工记录,每环的挖掘深度为 1.1 米,挖掘的实土方为 37.1 立方米。该产品的载重能力是 18 立方米,可对每辆卡车的进深 500 毫米进行调节。如果出现了超过标准的情况,将记录目前的长度,然后在盾构完成后进行第二次注浆。若有需要,应采用地表补灌法。

## (5) 防治后期沉降的方法

为避免因地层松动引起的长期固结沉降,对施工单位产生不利影响,在每环管段上留有注浆口,在地铁内设置一个半径较大的钻孔,并以混凝土泥浆为主,灌浆压力为 0.4~1.2MPa,灌浆的扩散范围根据实际情况确定为 0.5m。在二次灌浆泥浆固化后,灌浆时间应在灌浆结束后进行。3 米深的管道,形成 1 米的半径。管道的半径为 42 毫米,厚度为 3.5 毫米的无缝管片。灌浆孔口间隔 15 厘米,6-8 毫米,呈“梅花”型排列,在管片末端留出 1.0 米的留浆区。

## 3.4 沉降的监控和数据分析

地面沉降观测站的加密布置:在下穿铁路前方 20 米处进行地面沉降观测站的加密布置,即在中心线上的 5 米处布置一个观测站。

建筑测量点位:在铁路与地铁中心线相匹配的地点布置测量;在地铁顶部,每 5 至 10 米处设置一次测站,从密集到稀疏;铁路的转角处,构造变形的地点布置测量。

## 地面沉降观测资料的时间过程

对地下通道轴以上垂直方向的地表沉降观测站和地下沉降的加密观测站的沉降时程进行分析,从 6 月 12 号起对地面沉降进行了观测,直至 8 月 8 号,盾构从开挖的影响区域离开,沉降基本平稳。在整个盾构施工中,沉降率和最大沉降量都未发生超过 2/3 的

预警,说明了该工程的设计参数是正确的,并采取了适当的沉降控制。

从 6 月 12 日到 6 月 22 日,初期的沉降量相对平稳,前期最大沉降量约为 1.5 毫米,说明在工程期间,工作台的土仓压得到了很好的控制。从 6 月 22 日至 6 月 28 日,地铁开挖经过了地区沉降监测,其沉降量一直呈均匀、平稳的增长趋势,而地面沉降的时间以这一时期为主。在开挖过程中,其沉降曲线具有较好的特点,且呈现出较好的抛物线性。地面加密观测站最大沉降于 6 月 28 日,最大沉降量为 5.7 毫米,最大沉降为 7 月 4 日,最大为 8.18 毫米。在盾构施工后期,加密观测站出现了地面回弹的倾向,最后达到 3-4 毫米。地面沉降观测站无显著的回弹现象,与周边土壤的改变相联系。自 8 月 8 号起,地面沉降及沉降观测站趋于平稳。

在盾构贯通后,在地铁上部的中轴两边的地面沉降 2 小时的观测中,各个观测区的沉降量在平均范围内起伏不大,且在考虑到工程干扰和观察的情况下,沉降量和沉降变化率都比较平稳。

## 3.5 沉降监测结论

通过对实测资料的统计,表明该工程的整体沉降稳定,且沉降的变化量很少。累积沉降率为 8.18 毫米,还不及 20 毫米累积沉降量的 2/3,因此累积的沉降量没有报警。铁路最大沉降 5.99 毫米,也没有达到既有铁路累积沉降 10 毫米的 2/3,没有出现任何报警事件。在此基础上,在沉降量的最大变化为 0.99 毫米/天,超出了 1 毫米/d 的 2/3,但是没有达到控制值,而且没有连续的黄色警告。

从监控程序和信息系统反馈来判断,监控计划落实得很好,采取的对策也很有效,通过信息系统的预警系统对黄色的报警进行了及时的处理,为地铁工程的成功实施提供了有力的保障。

在对地铁工程沉降的影响因素进行分析后,提出了采用下列施工方法来减少地面及建筑物的沉降,确保了小半径弧形断面的盾构的安全。

(1) 在施工之前,对铁路地基进行地基强化,同时进行灌浆,并进行后期的灌浆;

(2) 选取类似的岩体为实验断面,进行数据统计和分析;

(3) 预鉴定,微扰动,强注浆。加强对料斗的监控,对料斗的压差进行最优处理,并依据沉降的回馈来决定灌浆的数量;

(4) 在较短的曲率下,进行管片的选择,并根据实测的偏差情况,计算出相应的偏差,合理放慢掘进速度,加强注浆,缓慢纠正,减少偏差,确保平稳的通行。

## 4 结论

在本论文所述的地铁工程中,采用合理的管片布置方式和地铁内部加强等方法来预防下穿铁路过程中的沉降问题,并确保在开挖期间顺利进行。通过对 4 号线轨道交通的合理管理和多个部门的紧密合作,确保了该项目的成功。而在施工中,实时监控是保证项目顺利进行的关键。本工程应用了地铁盾构法,实现了该工程的主要目标,并对同类工程的施工及运行具有一定的参考价值。

## 参考文献:

- [1]童刚强. 复杂条件下盾构施工关键技术控制[J]. 天津建设科技, 2021, 31 (02): 28-30.
- [2]张学桥. 富水砂性软土层盾构小半径半径下穿公路地铁施工关键技术[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23 (12): 128-132.
- [3]吕岩. 大半径地铁盾构小半径下穿铁路施工技术[J]. 现代地铁技术, 2020, 57 (S1): 957-962.
- [4]吕涛, 李森阔, 杨果林, 等. 小半径曲线盾构地铁地面沉降变形特征研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18 (04): 198-203.
- [5]张孟喜, 张靖, 吴应明, 等. 全风化岩层中双线盾构上穿近邻地铁影响分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52 (9): 100-108.