

# 地铁盾构下穿既有高速铁路桥梁的关键施工技术 ——以济南地铁9号线穿越济青高铁黄东联络线为例

王恒旭

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南郑州 450001

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19690

**[摘要]** 本文以济南地铁9号线荷花路站~小清河东站区间盾构下穿济青高铁黄东联络线为工程实例, 结合工程地质条件、盾构隧道与铁路桥梁的位置关系, 系统研究盾构下穿既有高铁桥梁的关键施工技术。通过试验段施工确定合理掘进参数, 重点阐述施工准备、隔离桩加固、盾构掘进姿态控制、出土量管控、管片拼装及注浆加固等核心技术措施, 提出下穿前、中、后全流程安全控制方案。研究表明, 采用优化后的施工技术与控制措施, 可有效控制地层变形, 避免对高铁桥梁桩基造成不利影响, 保障铁路运营安全, 为同类地铁盾构下穿既有高速铁路桥梁工程提供实践参考与技术借鉴。

**[关键词]** 地铁盾构; 下穿; 高速铁路桥梁; 施工技术

## 引言

随着我国城市轨道交通与高速铁路网络的快速发展, 地铁线路与既有高速铁路交叉穿越的工况日益增多, 盾构下穿既有高速铁路桥梁成为工程建设中的重难点问题。济南地铁9号线荷花路站~小清河东站区间盾构需下穿济青高铁黄东联络线桥梁, 下穿段地质复杂、距离桥梁桩基较近, 对施工技术提出了极高要求。基于此, 本文以该工程为实例深入研究盾构下穿既有高速铁路桥梁的关键施工技术与安全控制措施, 解决施工中的技术难题, 为我国同类工程的施工提供可行的技术方案与实践经验, 推动地铁盾构施工技术在涉铁工程中的优化与发展。

## 1 工程概况

济南地铁9号线荷花路站~小清河东站区间盾构隧道, 左线长1861.601m、右线长1859.690m, 管片为 $\Phi 6400\text{mm}$ 通用衬砌环, C50混凝土、抗渗P10。区间下穿济青高铁黄东联络线(双线城际铁路, 时速120km/h), 对应运营里程K5+870~K5+935、运营桥墩144~146#, 下穿处覆土约18m, 左、右线与铁路交角分别为 $72^\circ$ 、 $68^\circ$ , 隧道外缘距桥墩桩基最小8.91m。涉铁主要影响区按50m设计, 左线穿越长度109.5m(73环), 右线112.5m(75环)。为保障安全, 盾构侧穿前在隧道两侧外缘3.0m处打设168根 $\Phi 0.8@1\text{m}$ 、长26.2m的钻孔隔离桩, 桩顶设砼支撑及冠梁, 养护28天达到设计强度后方可开展下穿施工<sup>[1]</sup>。

## 2 地铁盾构下穿既有高速铁路桥梁的关键施工技术

### 2.1 施工准备

施工准备主要包括技术准备与隔离桩加固。技术准备需调查周边管线及建筑物, 对接产权单位、补勘重难点区域并

布设监测点; 审核图纸、学习规范, 编制专项方案, 加固周边建筑物及管线并做好技术与安全交底; 培训技术人员与进场工人, 完善作业指导书, 强化现场技术管控。隔离桩加固需在盾构隧道两侧外缘1.0m处打设168根 $\Phi 0.8@1\text{m}$ 、长26.2m的钻孔隔离桩, 桩顶设砼支撑及冠梁, 养护28天达到设计强度后方可开展下穿施工<sup>[1]</sup>。

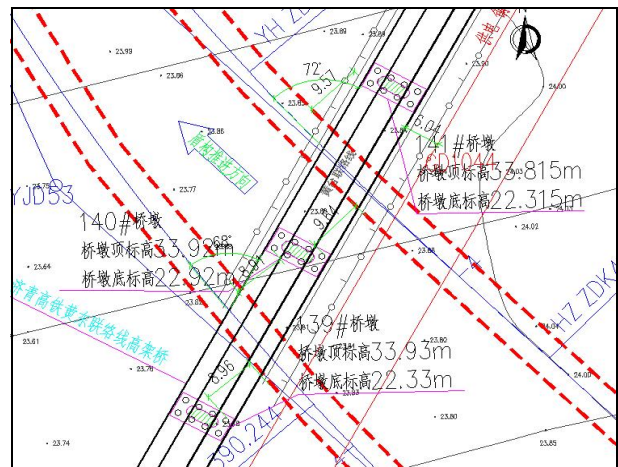


图1 区间隧道与济青高铁黄东联络线高架桥平面位置关系图

### 2.2 盾构下穿施工方法及操作要求

#### 2.2.1 试验段施工

根据施工要求, 正式下穿前100m范围作为试掘进段, 试验段设置里程为左ZDK43+427.819~ZDK43+527.819、右YDK43+429.150~YDK43+529.150, 此段施工要对推进参数认真控制, 将推进的各项技术参数(如推力、推进速度、出土量、正面土压力)和地面沉降结合起来进行收集、统计、分析, 掌握适应地层的盾构合理的推进参数, 以科学地指导后续施工。具体施工参数如下表1:

表1 试掘进参数

控制项目	控制参数名称	参数设置
盾构机姿态控制	水平偏差 (mm)	-30~+30
	水平趋势 (mm/m)	0~1
	竖直偏差 (mm)	-30~+20
	竖直趋势 (mm/m)	-5~5
掘进参数	千斤顶总推力 (KN)	8000~20000
	刀盘扭矩 (KN·m)	1000~2500
	刀盘转速 (rpm)	0.8~1.0
	掘进速度 (mm/min)	30~50
	土仓压力 (bar)	2.0
	注浆压力 (MPa)	0.1~0.3
	注浆量 (m <sup>3</sup> )	6.5

## 2.2.2 盾构下穿段掘进

### 2.2.2.1 盾构机姿态控制

#### (1) 盾构掘进方向控制

结合本标段盾构区间施工特点,采用综合管控方法控制掘进方向,确保盾构沿设计轴线推进。

一是结合自动导向系统与人工测量辅助方式监测盾构姿态。该系统配备有导向、自动定位、掘进程序软件及显示器,可在盾构机主控室全天候动态呈现盾构机当前位置与隧道设计轴线的偏差及变化趋势,为掘进方向调整提供实时依据,确保盾构始终在允许偏差范围内推进<sup>[2]</sup>。随着盾构持续推进,导向系统后视基准点需逐步前移,此时需通过人工测量进行精确定位,结合线路实际走向校核自动导向系统的测量数据,复核盾构机位置与姿态,进一步保障掘进方向的准确性。

二是通过分区操作推进油缸控制掘进方向。依据线路条件制定的分段轴线拟合控制计划、导向系统反馈的盾构姿态信息,结合隧道地层实际情况将推进油缸按上、下、左、右分为四组,每组油缸均配备行程测量与推力计算功能,通过调节各组油缸推力实现掘进方向控制。具体操作如下:上坡段适当加大下部油缸推力,下坡段加大上部油缸推力;左转弯曲线段加大右侧油缸推力<sup>[3]</sup>,右转弯曲线段加大左侧油缸推力;直线平坡段则保持各组油缸推力一致,确保盾构平稳推进。

#### (2) 盾构掘进姿态调整与纠偏

由于该施工区域受软弱地层摩擦阻力小、线路变坡或急弯等因素的影响,盾构机易出现姿态偏差,需及时调整纠偏。

首先,可参照上述分区操作推进油缸的方法,调整各组油缸推力,将盾构机姿态纠正至符合要求的范围。其次,在曲线段及变坡段掘进时,可利用盾构机仿形刀进行局部超挖,或在轴线允许偏差范围内提前进入曲线段掘进,减少姿态偏

差,实现精准纠偏。此外,若盾构机出现滚动超限时,需及时采用盾构刀盘反转的方式,快速纠正滚动偏差,避免偏差扩大影响施工质量,确保盾构机姿态始终符合施工规范要求。

### 2.2.2.2 出土量控制

盾构机掘进过程中,施工人员必须严格控制好出土量,可以说这是控制地层损失率最直接、最有效的手段。出土量将根据盾构掘进的不同地质情况进行控制。

出土量控制必须以碴土体积控制为主,重量复核为辅。隧道内值班人员对每一箱渣土方量进行量测并进行记录,渣土运至井口进行垂直吊装时龙门吊司机对每一箱渣土重量称重记录。

根据每环出土量公式:

$$V=K \times \pi \times D^2 \times L/4$$

其中:K代表土体松散系数,取决于土质、盾构掘进参数、土体改良情况等,本工程土质为硬塑性粉质黏土,松散系数K取(1.2~1.3);

D代表开挖直径,本工程为6.68m;

L代表掘进长度,本工程为1.5m

实方为52.3m<sup>3</sup>

最终结算结果为:  $V=K \times \pi \times D^2 \times L/4=1.2(1.3) \times 3.14 \times 6.68^2 \times 1.5/4=63 \sim 68\text{m}^3$

### 2.2.2.3 管片拼装

本标段盾构隧道的结构形式采用通用型衬砌环,强度等级C50,抗渗等级P10,管片拼装采用错缝拼装方式。

#### (1) 管片安装程序

管片具体安装施工方法如下:

管片进场-运输-安装区清理-收油缸-管片安装-顶伸油缸-螺栓紧固-螺栓三次紧固。

### 2.2.2.4 同步注浆

同步注浆是指盾构机掘进过程中,同步向管片与围岩之间的环形间隙注入浆液,填充间隙、固定管片、防止围岩变形,其是盾构掘进中非常重要的一个辅助工序。注浆材料选用适配本标段地层的水泥砂浆,兼顾流动性与早期强度,通过盾构机自带注浆系统,按设计压力和注浆量匀速注入,确保间隙填充饱满。施工中实时监测注浆压力、流量及浆液凝结时间,根据围岩情况动态调整参数,避免出现注浆不足导致管片沉降或注浆过量引发围岩扰动,保障隧道结构稳定性。注浆量按下式进行计算:

$$Q=V \times \lambda$$

$\lambda$ —指注浆率(浆液填充系数取1.3~1.8)

V—盾构施工引起的空隙(m<sup>3</sup>)

$$V=\pi(D^2-d^2)L/4$$

D—指盾构切削外径 (m) (切削外径6.68m)

d—指预制管片外径 (m) (预制管片外径6.40m)

L—回填注浆段长即预制管片每环长度(预制管片每环宽1.5m)

根据公式计算的1.5m宽每环注浆量为:

$$V=(3.34^2 \times 3.14 \times 1.5 - 3.2^2 \times 3.14 \times 1.5) \times (1.3 \sim 1.8) = 5.6 \sim 7.8 \text{ m}^3$$

即注浆量为5.6~7.8m<sup>3</sup>/环。

#### 2.2.2.5 二次注浆

二次注浆的作业时间一般为管片脱出盾尾7环左右。针对管片渗漏水、隧道沉降、地面沉降,对其进行二次补浆;进、出洞特殊时期,可根据现场情况进行紧急注浆,注入位置满足距盾尾大于10m,以防地层中的泥水和衬砌外围的浆液从盾尾间隙挤入盾尾,损坏盾尾钢丝刷。

二次注浆作业一般每隔5环注浆一次,每环注浆量大致为1m<sup>3</sup>,具体注浆量需依据地表沉降程度、隧道渗漏水状况的严重程度灵活把控。注浆时,要把浆液流量严格控制在10~15L/min,确保浆液能沿着管片外壁均匀渗流,避免劈裂土体、形成团状加固区,从而保障注浆效果。

#### 2.2.3 盾构下穿联络线桥桩主要控制措施

##### 2.2.3.1 盾构下穿前控制措施

(1)加强与业主、设计院、监理及产权等单位的沟通。对盾构下穿施工影响范围内的铁路桥139#桥墩至141#桥墩范围进行全面调查,进一步收集相关资料,记录铁路桥梁(包括原始状况的录像资料和照片)盾构施工前的现状。对现状进行拍照、录像。

(2)备足各类盾构施工消耗材料(油脂、泡沫等);同步注浆材料应联系供货商保证连续及时供应;与管片厂家协调沟通,管片供应确保及时、足量。

(3)下穿前对盾构机配套使用的龙门吊、电瓶车、循环水泵等设备进行全面检修,保证设备各系统在下穿过程中连续运转,避免因设备故障引起的停机。

##### 2.2.3.2 盾构下穿过程中控制措施

(1)盾构下穿期间需加密监测频次,重点监测围岩沉降、管片位移及周边环境变形,采用自动化监测与人工复核相结合的方式,实时采集监测数据并分析反馈,及时发现异常情况,为施工调整提供数据支撑,确保下穿过程安全可控,监测数据需留存归档,保障施工全过程可追溯。

(2)结合下穿段地层特性及监测数据,动态调整同步注浆参数。若监测显示围岩沉降偏大,适当增加注浆量、微调提高注浆压力,确保管片与围岩间隙填充饱满;若出现注浆压力异常升高,及时减小压力、控制注浆速度,避免扰动围

岩或损坏管片,始终以监测数据为依据,实现注浆参数精准适配,保障隧道结构稳定。

(3)盾构下穿过程中严格控制掘进速度,保持均衡匀速推进,避免速度忽快忽慢导致围岩扰动加剧。合理设定推进参数,确保刀盘转速、推进油缸推力稳定,减少对周边地层的扰动,同时保障管片拼装质量,避免因推进不均衡引发管片错台、渗漏等问题,确保下穿施工平稳有序推进,降低施工风险<sup>[5]</sup>。

(4)下穿期间,结合监测数据及线路设计要求,实时调整盾构机姿态。采用自动导向系统与人工测量复核相结合的方式,精准把控盾构掘进方向,通过分区调节推进油缸推力,及时纠正姿态偏差,避免盾构机抬头、低头或偏移轴线,确保盾构沿设计轴线匀速下穿,减少对周边环境及隧道结构的影响。

##### 2.2.3.3 盾构下穿完成后控制措施

盾构管片采用增设注浆孔特殊设计,设计范围内管片增设注浆孔(由普通地段全环6个注浆孔增设至全环16个注浆孔),当桥梁变形达到报警值时,利用洞内增设注浆孔进行洞内360°深孔注浆,注浆范围为管片外扩3.0m,以减少盾构施工对桥桩的影响,确保铁路运营安全。注浆管采用Φ32厚3.5mm的小导管,注浆管长3.0m,注浆管纵向设置间距为1.5m,注浆浆液采用水泥浆。水泥浆水灰比=1:1(重量比)。

#### 结束语

本文结合济南地铁9号线穿越济青高铁黄东联络线工程系统总结了地铁盾构下穿既有高速铁路桥梁的关键施工技术与安全控制措施。通过科学的施工准备、合理的参数优化、精准的过程管控,有效控制了盾构掘进对高铁桥梁的影响,确保了铁路运营安全与隧道施工质量,验证了所采用施工技术的可行性与适用性,可为更多同类工程提供技术支撑。

#### [参考文献]

- [1]何彦霏.地铁盾构隧道下穿既有铁路施工措施研究[J].建筑技术开发,2025,52(11):42-44.
- [2]徐龙德.复杂环境下地铁下穿铁路变形监测技术研究[J].工程技术研究,2025,10(17):9-12.
- [3]王彦.地铁盾构下穿既有铁路安全防护措施研究[J].铁道工务,2025,3(04):70-75.
- [4]王贞杰,张伟.复杂条件下地铁盾构三次下穿铁路桥孔施工工艺[J].城市建筑空间,2025,32(S1):330-331.
- [5]林家楨.地铁盾构下穿高速铁路路基的变形控制方案研究[J].水利与建筑工程学报,2025,23(01):93-101.