

泥水平衡顶管技术在商周高速穿越工程中的应用

刘嘉淳¹, 李志华¹, 谈力昕², 余小明²

(1.平顶山市南水北调办公室, 河南 平顶山 467000; 2.中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘要:泥水平衡顶管技术被广泛用于穿越铁路、公路、河流等地下管线工程中,并在我国南水北调工程中发挥重要作用,但在施工中也出现了长距离施工减阻和轨迹精度控制等难题。结合商周高速顶管穿越工程,探讨了顶管机选型、注浆参数、顶进力估算和轨迹纠偏等关键技术。通过对顶力计算值与实测值的对比表明工程采用的润滑泥浆的减阻效果明显,有泥浆润滑时(15 m后)的摩阻力约为无润滑时(15 m前)的11%,实际的总顶进力约为计算值的9%。利用激光全站仪对掘进机头的轨迹偏差的分析结果表明:机头的水平轨迹偏差很小,且无明显规律;机头的下沉可能会导致轨迹容易向下偏斜。

关键词:顶管;泥水平衡;润滑泥浆;顶进力;轨迹偏差

中图分类号:U175

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2016)02-0028-05

1 工程背景

随着我国城市化进程的加快,以地下管线系统为代表的地下基础工程建设日益增多。但在管线穿越铁路、公路、河流等障碍物时,传统的明挖埋管方法受到明显的限制,而以顶管为代表的非开挖技术,由于其施工效率高、工期短、环境影响小和成本低等优势,成为城市地下管线建设的主要技术,并得到广泛应用^[1]。因为顶管技术是在地下进行施工的隐蔽性工程,而施工所在地下状况的复杂程度难以预料,地下顶进的安全隐患几率较开挖作业要大,一旦失败,带来的经济损失是巨大的。

由于顶管管道与周围地层之间存在土压力、机头迎面阻力和管道侧摩阻力等一系列复杂的荷载,导致其施工过程中不可避免会对周围地层及建筑产生影响,特别是软弱土层和砂土、粉砂层地基,引起地表沉降和隆起。因此,穿越安全等级高的道路顶管工程,其设备选型和工艺参数优化是关系工程成败的关键因素。

我国水资源分布不均匀,呈现“南多北少”的状况。南水北调中线工程起于丹江口水库,止于北京颐和园团城湖,在供水配套工程施工过程中,穿越公路、铁路、沟渠等建筑物时,由于其采用的是大管径PCCP管或钢管,且局限于现场的条件,多采用顶管穿越施工。笔者拟以南水北调中线商周高速公路顶管穿越工程为例,对其顶管机选型、润滑注浆、顶进力估算和轨迹纠偏等关键技术进行分析总结。

2 工程条件概况

河南省平顶山市境内的穿越商周高速公路顶管工程,位于张庄乡河湾村西侧,采用泥水平衡式顶管机穿越商周高速公路及引道,顶进直径3 600 mm钢筋混凝土管,施工总长约198 m。设置长宽为6.0 m×6.2 m工作井以及5.0 m×6.0 m接收坑各一座。施工地层主要为低液限黏土层,承载力较低。顶进工作始于2014年6月28日,于同年7月27日顶进完成。

穿越段交叉路面总宽度97.96 m,路基宽度125.11 m,交叉角度79.32°(图1)。穿越段路面高程56.2 m,原地面高程46.35 m,输水管道中心高程40.42 m,高速公路路面距顶管外壁顶部高差13.98 m,原始地面最小覆土厚度4.127 m,地下水位高程41.1 m(图2)。

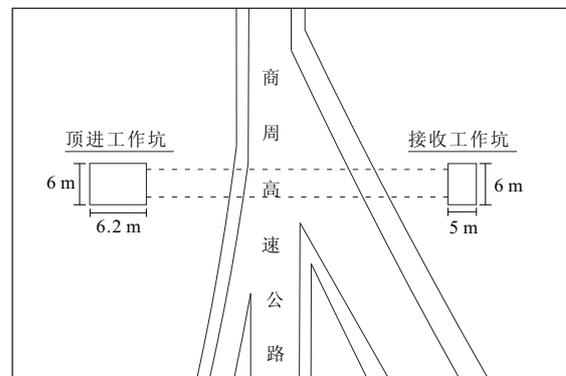


图1 穿越工程平面布置示意图

Fig.1 Layout of the crossing project

收稿日期: 2015-11-18

编辑: 杨 勇

作者简介: 刘嘉淳(1964—),男,高级工程师,主要从事水利工程设计与建筑工作。E-mail: sjyljc@126.com

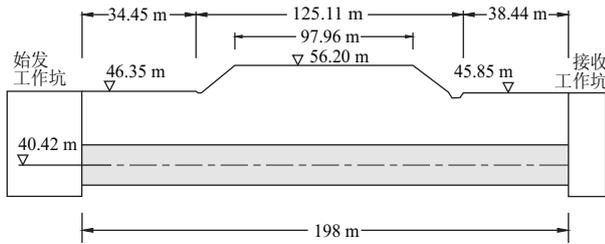


图 2 穿越工程纵向剖面图

Fig.2 Longitudinal section of the crossing project

根据先期场地岩土勘察报告,场区地质结构为土、岩双层结构。施工面主要位于第 2 层低液限黏土(Q₃^{al}),含少量钙质结构,对顶管施工有一定影响,表 1 列出了穿越地层的主要土体参数。

表 1 穿越地层土体参数

Table 1 Soil parameters of the formation crossing

含水量 W/%	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	天然孔隙比 e	液限 W _L /%	塑限 W _p /%
19.0	1.83	0.746	38.5	22.6
饱和快剪		压缩模量	承载力标准值	
C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E _s /MPa	f _k /kPa	
20	12.1	4.13	130	

3 施工工艺

3.1 顶管设备选型

本工程为穿越高速公路的大口径顶管,为确保施工安全顺利进行,根据本工程的特点和地质资料,为减小施工引起的地表沉降,保证顶管穿越对上方商州高速公路正常通行,采用泥水平衡式顶管机,弃土以泥水形式排出。泥水平衡具有顶进速度快且后期沉降速度缓慢,能有效保证穿越高速公路地表的稳定性。由于地层为较均一的黏土,在顶进过程中易发生变形及坍塌,仅使用液体(泥浆)压力平衡开挖面是不充分的,故采用小开口率带有切削齿的刀盘(图 3)以保证开挖面的稳定及掘进效率。



图 3 掘进机切削盘

Fig.3 Cutter on boring machine

工作井主顶装置分两列对称布置,共有 8 只千斤顶。主顶千斤顶为单顶程千斤顶,行程为 1 750 mm,每只千斤顶最大可提供 2 000 kN 的顶力,主顶系统最大可提供 16 000 kN 的顶力(图 4)。主顶系统操作台设在地面控制室内。



图 4 主顶系统

Fig.4 Main jacking system

3.2 润滑注浆工艺

3.2.1 泥浆配置

大直径、长距离顶管施工中常采用注浆减摩措施来减小管壁侧摩阻力,施工中管段、土体与泥浆三者的相互作用,使得管外壁形成了一定厚度的泥浆套^[2]。

为确保施工过程中管道外壁可以形成完整的泥浆套,共设置有 2 套注浆管路系统,分别为同步注浆系统和补浆系统。在地面压浆站配置好润滑泥浆,通过 2 台液压注浆泵压入输浆总管,一根总管压注到机头后的储浆箱内,再由螺杆泵把储浆箱内的浆液压入掘进机尾部的同步注浆口,另一根总管压注到管节上设置的环形分管的各个注浆孔,不断补充管外壁渗透到土层中的泥浆,以便形成管节外围完整的泥浆套。

膨润土泥浆经过大于 30 min 的充分搅拌,抽入储浆箱进行水化,时间大于 6 h,再通过液压注浆泵压入管内。在膨润土泥浆压入以前,对储浆箱内水化的泥浆再一次搅拌,以减少压浆管道的阻力。注浆泵站由单缸液压注浆泵和液压力站组成,注浆量 $Q=80 L/min$,注浆压力 $P=0.08 \sim 0.10 MPa$ 。

工程所用的膨润土浆液,是通过在钙基膨润土的悬浮液中加入适量纯碱的方法来达到其基本的性能指标。其配比为:水(2 400 kg)+钙基膨润土(200 kg)+CMC(3 kg)+纯碱(10 kg)。配置好的膨润土泥浆的基本参数为:密度 $1.05 \sim 1.08 g/cm^2$,漏斗黏度 30~40 s,泥皮厚 3~5 mm。配置好的泥浆如图 5 所示。

3.2.2 注浆孔布置

本工程采用每 2 节管节设置一组注浆孔,每组

6个1寸注浆孔,60°均分设置,每组注浆孔有独立的阀门控制。注浆管路及注浆孔布置见图6。



图5 配置好的润滑泥浆

Fig.5 Lubrication mud applied

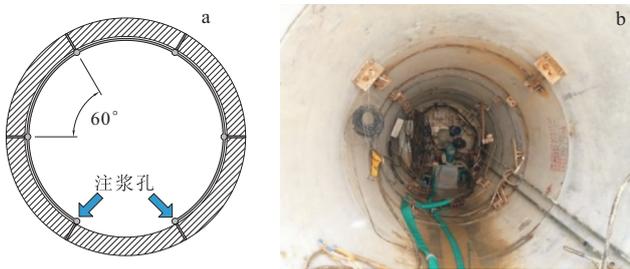


图6 管内注浆管路及注浆孔布置

Fig.6 Slurry injection pipelines and holes inside the pipe

3.2.3 注浆参数

注浆工艺主要控制参数是注浆压力和注浆量。注浆压力的确定应结合上覆地层产生的水土压力值。注浆压力值不宜过高,应根据浆液的黏度和管路输送长度,以及管壁处的土压力值经试验确定。经验表明,二者相等或相近时易于使地层保持稳定。合适的注浆压力应既能使浆液顺利地注入管段外壁,又不会严重扰动地层。选用的注浆压力值应不使膨润土悬浮液从注浆孔喷出,在孔口周围形成高压密区,成为阻碍浆液继续流出和扩散的柱塞。另外,泥浆局部的过大压力(或称“憋压”)可能导致泥浆沿地层裂隙向上涌出或引起地表变形。

注浆量与开挖作业的超、欠挖量有关,通常情况下控制在同步跟踪压浆量为管节外理论空隙体积的8倍左右,补压浆量一般为管节外理论空隙体积。

4 顶进力计算及对比

顶进力的计算可分为管侧摩阻力与迎面阻力2部分,而摩阻力的计算方法大多基于2种不同的假设:①开挖面稳定假设,即管周土体经开挖后得到充分支撑,与管壁不直接接触或仅部分接触;②管土全接触假设,即土体开挖后随即塌落在管周,与管壁直接接触。

王承德^[3]、何莲等^[4]采用管土全接触假设并考虑了泥浆减阻作用,Milligan等^[5]、Haslem^[6]、Shimada等^[7]、Khazaei等^[8]则采用开挖面稳定假设,分别计算管道与土体、泥浆之间的作用力。

根据中国非开挖技术协会行业标准《顶管施工技术 & 验收规范》^[9]顶管的顶力可按下式计算(亦可采用当地的经验公式确定):

$$P = f\gamma D_1 \times \left[2H + (2H + D_1) \times \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{\omega}{\gamma \times D_1} \right] \times L + P_s \quad (1)$$

式中: P 为计算的总顶力(kN); γ 为管道所处土层的重力密度(kN/m³); D_1 为管道的外径(m); H 为管道顶部以上覆盖土层的厚度(m); φ 为管道所处土层的内摩擦角(°); ω 为管道单位长度的自重(kN/m); L 为管道的计算顶进长度(m); f 为顶进时,管道外壁与周围土体之间的摩擦系数,其取值可按表2所列数据选用; P_s 为顶进时顶管掘进机的迎面阻力(kN)。

表2 顶进管道与其周围土层的摩擦系数

Table 2 Friction coefficient between the pipe and soil

土层类型	湿土摩擦系数	干土摩擦系数
黏土、亚黏土	0.2~0.3	0.4~0.5
砂土、亚黏土	0.3~0.4	0.5~0.6

在采用土压平衡或者泥水平衡顶管技术施工时,切削刀盘的迎面阻力可以用如下经验公式进行计算:

$$P_s = 13.2 \times \pi \times D_s \times N \quad (2)$$

式中: D_s 为掘进机外径(m); N 为土的标准贯入值。

由于穿越高速公路段时覆土厚度出现了明显的变化,将穿越轨迹按覆土厚度分为3段:原地面穿越段 L_1 与 L_3 ,以及路基穿越段 L_2 。主要计算参数见表3。

表3 主要顶力计算参数

Table 3 Main parameters of thrust estimation

f	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	D_1/m	D_s/m	H/m	L/m	$\varphi/(^\circ)$	$\omega/(kN \cdot m^{-1})$
				$H_1 = 4.13$	$L_1 = 34.54$		
0.2	18.3	3.6	3.65	$H_3 = 4.13$	$L_3 = 38.44$	12.1	4 71
				$H_2 = 13.98$	$L_2 = 125.11$		

将各参数代入式(2)得迎面阻力:

$$P_s = 13.2 \times \pi \times 3.65 \times 4 = 605.45 \text{ kN}$$

各项进段摩阻力为: L_1 段摩阻力 $P_{\text{I}} = 7\,776.37$ kN, L_2 段摩阻力 $P_{\text{II}} = 8\,654.42$ kN, L_3 段摩阻力 $P_{\text{III}} = 81\,861.10$ kN。总顶进力为: $P = P_s + P_{\text{I}} + P_{\text{II}} + P_{\text{III}} = 98\,897.34$ kN。

施工过程中实际顶进力值通过千斤顶直径、千斤顶数量和油压压力表读数来计算求得,如图 7 所示。顶进力计算值与实测值的对比表明,顶进力在约 15 m 之前计算值小于实测值,这可能是由于机头及工具管顶进时无法进行同步注浆使得管土摩阻力系数增大,管周摩阻力上升明显。在 15 m 之后顶进力计算值远大于实测值,说明减阻泥浆开始发挥作用且效果显著,实测值与计算值的最大值分别为 9 010.04 kN 与 98 897.34 kN,实测值为计算值的 9.11%。从实际顶进力曲线来看,无润滑段的单位面积摩阻力 $f_{\text{无润滑}} = 21.77 \text{ kPa}$,与理论计算值相近;润滑段单位面积摩阻力 $f_{\text{润滑}} = 2.40 \text{ kPa}$,为无润滑时的 11.02%。

FSTT(French Society for Trenchless Technology) 在 2006 年的《Microtunneling and Horizontal Drilling》^[10] 一书中提出当注浆情况良好时,摩阻力可降至 1 kN/m^2 ,当注浆情况较差时摩阻力可达 $5 \sim 25 \text{ kN/m}^2$ 。据此说明本工程采用的润滑泥浆充分填充了管壁与土体间的环空,减小了摩阻力。

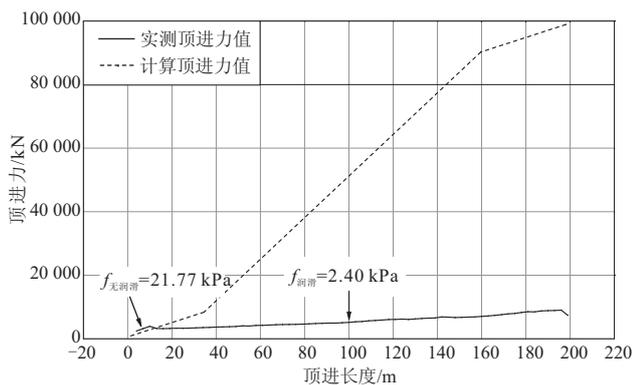


图 7 顶进力计算值与实测值对比

Fig.7 Thrust estimation and field data

5 轨迹偏差及纠偏技术

5.1 轨迹偏差

在实际的顶管施工过程中,受机头导航、纠偏的影响,没有管道的轨迹为真正的直线,管节在开挖空间内呈扭曲排列,这一现象被 Haslem^[6] 称之为“蠕动”(wriggle)。过大的轨迹偏差不仅会引起机头接收困难,还会导致顶进力增大及地面变形。

在本工程施工过程中采用连续测量与间断测量相结合的方式。连续测量即在工作坑后方安放一台全站仪,全站仪按照设计顶进轴线方向发出一束激光,照射到掘进机的光靶上,机手按照激光指示路线操控机械顶进。间断测量则是每顶进一节管后,测量人员对激光经纬仪进行校核,并且采用水准仪和水平尺分别测量已顶进管道高程偏差情况与管道水

平偏差情况。图 8 与图 9 分别显示了顶管施工轨迹水平与高程偏差随顶进距离的变化情况。

通过图 8 可以发现,机头的水平位置偏差较为平均,多数保持在 $-5 \sim +5 \text{ mm}$ 之内。竖直方向的偏差在图 9 中则较为规律,在 140 m 之前机头均位于设计轨迹之下,直到距接收工作井 50 m 左右才逐渐向上调整至设计轨迹附近。这是可能由于机头质量较重,在承载力较低的地层中顶管机受机头竖向不对称力产生向下偏转的趋势所致。

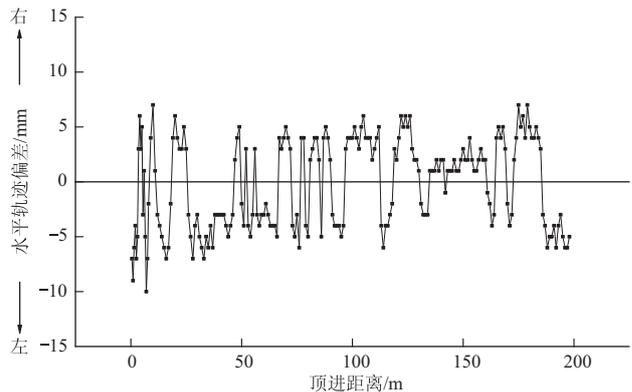


图 8 顶管施工轨迹左右偏差曲线图

Fig.8 Horizontal trajectory deviation

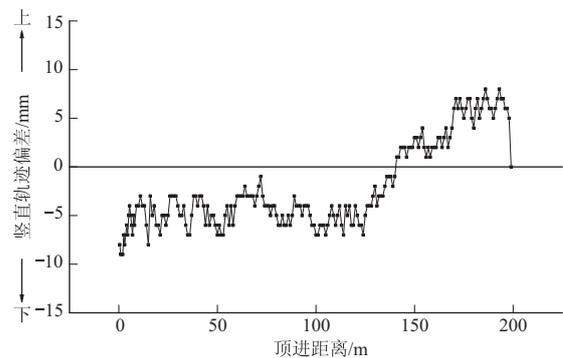


图 9 顶管施工轨迹高程偏差曲线图

Fig.9 Vertical trajectory deviation

5.2 轨迹控制及纠偏技术

按照施工前所掌握的工程区域地质资料,当顶管机穿越性质不同的地层时可能发生偏转。通过对机头标靶位置的测量可以得到机头偏差的曲线图,再根据光靶上激光点的位置与参考标准点的位置关系,可以预测机头的走向趋势。如果机头偏转有增大的趋势,则需要采取纠偏措施,纠偏采用设置在机头后的纠偏千斤顶实施。纠偏时每顶进 1 m 测量一次,记录数据并进行比较,如果顶进线路有回归设计轨迹的趋势,则保持此纠偏参数一段距离后停止纠偏。当水平和竖直偏差同时出现并都需要进行纠偏时,先对竖直偏差进行纠偏再处理水平偏差。

6 结 语

以河南省南水北调工程穿越商周高速公路顶管项目为案例,根据工程具体要求与掌握的施工资料进行了顶管设备的合理选择,对注浆孔的布置、触变泥浆的配置进行了分析,利用《顶管施工技术及验收规范》对顶进力进行了估计,并与现场实测值进行了对比验证,发现在顶进的初期由于无法在环空注浆,实际顶力会高于计算值;开始注浆后,减阻泥浆极大地减小了管壁摩阻力,有润滑时的单位面积摩阻力约为无润滑时的 11%。最后结合工程轴线偏差图对纠偏措施进行了介绍,发现水平偏差平均且无规律,竖向偏差受机头下偏的影响较大,轨迹易向下发展。通过本案例中若干关键问题的介绍为今后顶管施工提供了决策依据。

参考文献:

[1] 钱七虎.迎接我国城市地下空间开发高潮[J].岩土工程学报,1998,20(1):112-113.

- [2] 魏纲,徐日庆,邵剑明,等.顶管施工中注浆减摩作用机理的研究[J].岩土力学,2004,25(6):930-934.
- [3] 王承德.顶管施工中管壁摩阻力理论公式的商榷[J].特种结构,1999,16(3):22-25.
- [4] 何莲,刘灿生,帅华国.顶管施工的顶力设计计算研究[J].给水排水,2001(7):87-89.
- [5] Milligan G W E, Norris P. Site-based research in pipe jacking-objectives, procedures and a case history [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(1): 3-24.
- [6] Haslem R F. Pipe-jacking forces: From practice to theory [C] // Proceedings of ICE North Western Association Centenary Conference in Infrastructure Renovation and Waste Control. Manchester: Manstock, 1986: 173.
- [7] Shimada H, Khazaei S, Matsui K. Small diameter tunnel excavation method using slurry pipe-jacking [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, 22(2): 161-186.
- [8] Khazaei S, Shimada H, Matsui K. Analysis and prediction of thrust in using slurry pipe jacking method [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19(4/5): 355-356.
- [9] 中国非开挖技术协会.顶管施工技术及验收规范[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [10] French Society of Trenchless Technology (FSTT). Microtunneling and horizontal drilling [M]. [S.L.]: ISTE USA, 2006.

Application of Slurry Balance Pipe Jacking Technology during the Construction of Shang-Zhou Highway Crossing Project

Liu Jiachun¹, Li Zhihua¹, Tan Lixin², Yu Xiaoming²

(1. South-to-North Water Diversion Office of Pingdingshan, Pingdingshan Henan 467000, China;
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Slurry balanced pipe jacking has been widely applied in installation of pipelines crossing railways, roads and rivers, and performs significant role in South-to-North Water Diversion Project, whilst it has been constrained by lubrication and alignment control, particularly in comparatively long drives. This paper discusses key technologies including pipe jacking machine selection, slurry injection properties, thrust estimation and trajectory deviation of the tunnel boring machine (TBM) according to Shangzhou Highway pipe-jacking crossing project. The comparison between thrust estimation and field data indicates an apparent reduction in unlubricated friction (before 15 m) to 11% after utilizing lubrication mud (after 15 m), and the magnitude of final thrust is approximately 9% of the estimation. By introduction of a laser total station, trajectory deviations of the TBM were subsequently investigated. It is found that horizontal trajectory deviations are narrow and irregular, while the vertical trajectory tend to deflect beneath the designed axis caused by settlement of the boring machine.

Key words: pipe jacking; slurry balance; lubricant slurry; thrust; trajectory deviation