

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.12.030

穿越软硬不均地层的过河钢顶管施工案例分析

杨 仙¹, 肖宇锋¹, 崔杰平², 黎永索³

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411000; 2. 广州金土岩土工程技术有限公司, 广东 广州 510000; 3. 湖南城市学院 市政与测绘工程学院, 湖南 益阳 413000)

摘要: 以思科(广州)智慧城供水工程穿越沙湾水道段顶管工程施工为例,提出穿越软硬不均地层的长距离过河钢顶管施工过程中的重、难点主要为河水可能入侵掌子面造成涌水和坍塌、顶管轴线偏差大、顶进阻力大以及地层不均匀造成的结泥饼和滚刀偏磨等。对顶管机复合地层刀盘的二次碎岩原理、泥浆材料配合比及物理性质、方案设计及实际施工中継环数量及位置的确定、气压平衡换刀及清障的原理和技术等进行了详细说明。结合本工程特点,阐述了地质条件突变、机头偏转及轴线偏差过大等情况下的应急处理措施。本工程的顺利施工,可为类似穿越软硬不均地层的长距离过河顶管工程施工提供参考。

关键词: 钢顶管; 软硬不均地层; 河流穿越

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)12-0160-04

Case Study of Steel Pipe Jacking across River through the Hard-soft Heterogeneous Stratum

YANG Xian¹, XIAO Yu-feng¹, CUI Jie-ping², LI Yong-suo³

(1. College of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411000, China; 2. Guangzhou Jintu Geotechnical Engineering Technology Co. Ltd., Guangzhou 510000, China; 3. School of Municipal Engineering and Surveying and Mapping, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: Taking the construction of water supply project of Cisco (Guangzhou) Wisdom City across Shawan waterway as an example, it is proposed that the key and difficult points in the steel pipe jacking construction across long-distance river through the hard-soft heterogeneous stratum include water gushing and collapse caused by water invasion into working face, great deviation of pipe jacking axis, large jacking resistance, slurry cake and eccentric wear of cutter caused by uneven stratum. The key problems in construction scheme such as the secondary rock breaking principle of pipe jacking cutter in composite formation, mix proportion and physical properties of slurry, number and position determination of relay ring in scheme design and actual construction, principle and technology of cutter change and obstacle removal by pneumatic balance are introduced. Combined with the characteristics of this project, the corresponding emergency processing measures in case of sudden change of strata conditions, head

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678226)

通信作者: 崔杰平 E-mail: cuijieping1982@163.com

deflection and axis deviation are elaborated. The successful construction of this project has provided reference for similar pipe jacking construction across long-distance river through the hard-soft heterogeneous stratum.

Key words: steel pipe jacking; hard-soft heterogeneous stratum; across river

作为一种环境友好型非开挖工法,顶管施工在城市给排水管道铺设中应用广泛^[1-3]。思科(广州)智慧城位于广州国际科技创新城,是广州智能制造云产业重点建设区域。思科(广州)智慧城供水工程是该区域的供水保障项目。该项目实施的重、难点是过沙湾水道顶管工程,不仅要克服过长距离钢管顶管施工遭遇的各种问题,还涉及穿越岩层、软硬地层夹杂交替等情况。

1 工程概况

思科(广州)智慧城供水工程管道设计起点分别为石碁水厂及第二水厂,管道终点均为江湾路二街供水管。第二水厂-江湾路工程的过河段需穿越沙湾水道,顶管全长 571.4 m,顶进的钢管内径 1.4 m,壁厚 24 mm,管节长 6 m。顶管埋深 6.5~23.5 m,管顶距河底最浅覆土 6.5 m,穿越地层主要为强风化泥质粉砂岩(饱和单轴抗压强度 1.8~2.5 MPa),局部穿越中风化、微风化泥质粉砂岩(饱和单轴抗压强度 18~22 MPa)。顶管工程设置竖井 2 座,其中工作井 8 m×11 m,深 24 m,接收井 7 m×7 m,深 23 m。采用泥水平衡破岩顶管机进行施工。

2 顶管施工的重、难点

顶管施工中的重、难点主要有:

① 顶管工程下穿河道,若施工控制不当,河水侵入掌子面,会导致涌水、坍塌等严重施工风险;

② 该顶管段长达 571.4 m,易出现轴线偏差大的问题,需通过严格控制来保证顶管轴线不出现过大偏差;

③ 顶管距离长,顶进阻力大,需采取注浆减阻技术减小摩阻力,加设中继环来克服摩阻力;

④ 顶管穿越的地质为强风化泥质粉砂岩,局部穿越中风化、微风化泥质粉砂岩;局部岩层强度高,地质复杂多变、软硬夹杂交替,容易造成结泥饼和滚刀偏磨等问题。

3 顶管施工方案

3.1 破岩顶管机刀盘碎岩原理

选择具有碎岩功能的 DN1 400 顶管掘进机进行顶管施工。顶管穿越的地层为强风化泥质粉砂

岩,局部穿越中风化、微风化泥质粉砂岩,地质复杂多变、软硬夹杂交替,因此顶管机刀盘设计成布置有各种刀具的复合地层刀盘(见图 1),可以在软硬地层中掘进。复合地层刀盘碎岩包括 2 个步骤:①一次破碎,主要依靠双刃滚刀。刀盘工作时,滚刀与开挖面岩体接触,在刀盘压力和扭矩作用下,在开挖面刻划出一系列同心圆沟槽;同时,刀具多次对岩石产生挤压、剪切综合作用,并将作用传递给周围岩体,使之产生径向裂纹,裂纹延伸至滚刀刻划出的沟槽或自由面,形成岩石碎块。②二次破碎,主要依靠刀盘后圆锥回转破碎装置,该装置包括外圆锥桶和内圆锥转子,可将较大的石块挤压碾碎,使排渣尺寸满足要求,再由排泥泵将碎石经泥管运走。



图 1 复合地层破岩顶管机刀盘

Fig. 1 Cutter of pipe jacking machine for rock breaking in compound strata

3.2 泥浆方案

泥浆减阻是长距离顶管减少摩阻力的重要手段^[4]。顶管施工过程中,理想情况下注入的润滑泥浆能在顶管外围形成完整的泥浆套^[5],摩阻力可由 12~20 kN/m² 减至 3~5 kN/m²。施工过程中应严格控制触变泥浆配比,以保障良好的减阻效果。本工程泥浆材料为水、钠基膨润土及 CMC,泥浆配合比及物理性能指标如表 1 所示。

表 1 泥浆配合比及物理性能指标

Tab. 1 Mud mix proportion and physical performance indexes

配合比(质量比)	密度/(g·cm ⁻³)	漏斗黏度/s	泥皮厚度/mm
水:钠基膨润土:CMC 为 240:30:1	1.05~1.08	30~40	3~5

选择 BW-200 压浆泵进行注浆减阻。位于顶管机后的 4 节管道,管道前端布置 4 个触变泥浆同步注浆孔,在圆周上呈 90° 均布,经过不断压浆,在管外壁形成一个泥浆套(见图 2)。以后的管节,每间隔 3 节管道设置一道注浆孔,用来对泥浆套进行补浆。

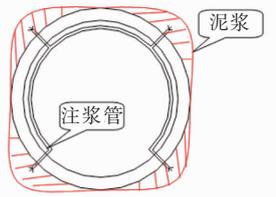


图 2 顶管注浆示意

Fig. 2 Schematic diagram of grouting in pipe jacking

3.3 顶进力计算

顶管段长 571.4 m,管顶覆土取 15.25 m,顶进力计算公式如下:

$$F = F_0 + f_0 L + F_1 \quad (1)$$

式中: F 为总推力, kN; F_0 为初始推力, kN; f_0 为每米管子与土层之间的综合摩擦阻力, kN/m; F_1 为上坡顶进管道重力在顶进轴线的分力, kN, 本工程为水平顶进, F_1 为 0 kN; L 为管长。

其中:

$$F_0 = (P_e + P_w + \Delta P) \frac{\pi}{4} B_c^2 \quad (2)$$

式中: B_c 为管外径, 取 1.42 m; P_e 为挖掘面土压力, 取 110 kPa; P_w 为地下水压力, kPa; ΔP 为附加压力, 一般取 20 kPa。

$$P_w = \rho g h = 1\,000 \times 10 \times (15.25 + 0.71) = 159.6 \text{ kPa}$$

式中: ρ 为水的密度, kg/m³; g 为重力加速度, m/s²; h 为地下水位到挖掘机中心深度。

计算可得:

$$F_0 = (110 + 159.6 + 20) \times 3.14 \times 0.71 \times 0.71 = 458.6 \text{ kN}$$

$$f_0 = RS + Wf \quad (3)$$

式中: R 为综合摩擦阻力, kPa, 取 6 kPa; S 为管外周长, m; W 为每米钢管的重力, kN/m; f 为钢管在土中的摩擦系数, 取 0.2。

计算可得:

$$f_0 = RS + Wf = 6 \times 4.46 + 7.43 \times 0.2 = 28.25 \text{ kN/m}$$

最后得出总推力 $F = 458.6 + 28.25 \times 571.4 +$

$0 = 16\,600.65 \text{ kN}$, 因总推力大于始发井设计顶力, 故需加中继环。

3.4 中继环设置

本工程设计的始发井主顶推千斤顶采用 4 台 2 000 kN 级油缸, 总顶推力为 8 000 kN。中继环采用的千斤顶方案与始发井千斤顶方案相同。

根据工程地质条件及施工经验, 施工前方案设计增加 3 个中继环, 见图 3(a)。中继环的方案设计阶段, 第一中继环一般设计在机头后 50 m 以内, 以应对掌子面可能出现的过大端阻力, 其余中继环间隔可按照中继环设计顶力的 60% ~ 80% 进行设计, 中继环设计顶力应不大于主顶力。实际施工过程中, 因泥浆方案提供了良好的润滑减阻效果, 顶管的单位长度摩擦阻力远小于计算摩擦阻力, 故只设置了 2 个中继环, 如图 3(b) 所示。其中一个中继环直接设置在顶管机机头后面, 主要考虑 3 点: ①本工程中局部穿越硬度较大的岩层, 且地层不均匀, 掌子面端阻力可能在某些局部区域超过计算端阻力, 该中继环主要作用是克服可能出现的较大端阻力; ②顶管穿越软硬不均的地层, 机头可能出现较大的偏移, 机头后的中继环能辅助机头进行纠偏; ③在机头后直接布置的中继环可以随机头顶出接收井, 进行回收利用, 节约成本。



图 3 中继环设置

Fig. 3 Relay ring setting

3.5 气压平衡式换刀及清理障碍施工

在换刀及清障过程中, 气压平衡的工作原理: 通过作用于临时掘进工作面上的气体压力来阻止地下水渗入, 保障人工操作安全。本工程顶管段穿越地层包括强风化、中风化、微风化泥质粉砂岩等地层, 地质条件复杂多变、软硬夹杂交替。加上顶进距离达到 571.4 m, 顶进过程中不可避免需要换刀。施

工中遇到更换滚刀、卡刀盘、堵仓时,先松开仓门螺栓确认岩层的透水情况,如岩层不透水或水量很小,可直接开仓人工更换刀具和清理障碍;如岩层透水量很大则辅以气压平衡手段,进行人工更换刀具和清理障碍。在气压平衡作业前,为保证作业舱内压力,防止气体外泄,需对岩土体进行密封处理。密封处理的措施为注浆水泥(化学浆)加固密封,或采用浓泥浆高压注入岩土体缝隙。

4 顶管施工中的应急措施

① 地质条件突变

本次顶管工程穿越的地层力学性质差异较大,为了有效防止顶管施工时土质突然变硬导致的掘进困难,在顶管掘进机刀盘前部和泥水仓内均设置了高压水枪,可以通过高压泵输送高压水,顶进的同时对顶管机头正面进行高压冲洗,以确保解决突遇硬地层难于顶进的问题。

② 机头偏转

在顶进过程中,由于遇硬软不均匀地层,机头易发生偏转。施工过程中,可利用主顶油缸进行纠偏,利用机头刀盘的旋转方向进行纠偏,可在顶管机外壁上焊纠偏定位板。本项目机头后设置的中继环也能辅助机头进行纠偏。

③ 轴线偏差过大

本次顶管施工穿越地层差异较大,当时地层正面阻力不均匀,机头受力不均匀,形成导向偏差,容易造成管道轴线偏差。轴线与设计轴线偏差过大,管道发生弯曲,甚至造成管节损坏,接口渗漏。本次顶管工程穿越河床,埋深较浅,地层地下水丰富,管节渗漏易导致较大施工风险。

针对轴线偏差问题,处理方法如下:a. 施工前应对管道地质情况认真调查,提前预估可能出现的偏转状态,预先进行处理;b. 设置测力装置指导纠偏,应满足“勤测量、勤纠偏、小量纠”的原则;c. 采用同种规格的千斤顶,使其顶力、行程、顶速相一致,保持顶力合力线与管道中心线相重合;d. 及时收集顶管记录,分析顶管轴线偏转趋势,采取适当的纠偏量,循序渐进纠偏,切忌一次性纠偏量过大,反而导致反向偏转。

5 结语

思科(广州)智慧城供水工程穿越沙湾水道顶管工程顶进距离长,穿越地层软硬不均,施工难度大。

通过选择具有二次碎岩功能复合刀盘的顶管机,精心设计泥浆和中继间方案,采取气压换刀方案,加强顶管施工应急处理,圆满完成了该项顶管工程,可为类似穿越软硬不均地层的长距离过河顶管工程施工提供参考。

参考文献:

- [1] 戴维生,徐海峰,刘世忠,等. 过江长距离小口径钢管顶管施工案例[J]. 中国给水排水,2019,35(24):118-122.
DAI Weisheng, XU Haifeng, LIU Shizhong, et al. Case study of small diameter and long distance steel pipe jacking construction crossing river[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(24): 118-122 (in Chinese).
- [2] 许龙,汪洪涛,钟俊彬,等. 长距离钢顶管关键质量要素设计与控制[J]. 给水排水,2010,36(4):49-53.
XU Long, WANG Hongtao, ZHONG Junbin, et al. Design and control of key quality factors for extreme distance steel pipe jacking[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(4): 49-53 (in Chinese).
- [3] 马保松. 非开挖工程学[M]. 北京:人民交通出版社,2008.
MA Baosong. The Science of Trenchless Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2008 (in Chinese).
- [4] 喻军,李元海. 顶管泥浆套的物理性质对顶推力的影响[J]. 土木工程学报,2015,48(增刊2):327-331.
YU Jun, LI Yuanhai. Effect of physical properties of mud screen of pipe-jacking on jacking forces[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 327-331 (in Chinese).
- [5] 王双,夏才初,葛金科. 考虑泥浆套不同形态的顶管管壁摩擦力计算公式[J]. 岩土力学,2014(1):159-166,174.
WANG Shuang, XIA Caichu, GE Jinke. Formulae of lateral friction resistance for pipe-jacking considering different forms of mud screen [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(1): 159-166, 174 (in Chinese).

作者简介:杨仙(1982-),女,湖北天门人,博士,讲师,主要从事非开挖设计、施工及环境影响等方面的研究。

E-mail: cuijieping1982@163.com

收稿日期:2020-07-23

修回日期:2020-11-18

(编辑:衣春敏)