

长距离大直径直线形泥水平衡顶管施工技术

王浩, 王时雨, 赵鹏, 解宝东, 刘长旭, 赵鑫

(中交一航局第三工程有限公司)

摘 要:为解决复杂地质条件下长距离大直径直线形泥水平衡法顶管施工受地下水及复杂地质影响易产生顶进困难、顶管偏位、地表沉降等问题,文章以海口临空经济区水系整治工程 I 期治理工程施工一标段项目长距离大直径直线形泥水平衡法顶管工程为例,通过理论计算,重点对顶管设备选型、中继间配置、洞门破除及止水、管节减阻及井下承插、顶进施工等关键技术进行分析、总结,得到了复杂地质条件下长距离、大直径直线形泥水平衡法顶管施工关键技术经验积累,可为类似项目提供借鉴。

关键词:长距离;大直径;直线形;泥水平衡;顶管施工

0 引言

在现代化基础设施建设中,顶管施工作为一种非开挖地下管道铺设关键技术,因其对地表路线、周边环境影响较小等优势,被广泛应用于各个工程领域的建设中。泥水平衡顶管作为顶管工程的主要分支,因其适用土质范围广、顶进效率高、安全性高等优点得到广泛应用。常见大直径长距离泥水平衡顶管施工也面临一系列挑战及技术难题,一旦出现问题,可能面临挖掘面失稳、地面沉降、机头抱死、顶进困难等严重后果^[1],因此对设备性能、洞口破除及止水、泥浆质量、管壁减阻等提出更高的要求。本文结合海口临空经济区水系整治工程 I 期治理工程施工一标段项目工程特点,重点对设备选型、中继间布置、管节减阻及井下承插、顶进控制等关键技术进行深入研究,为相关类似项目提供参考建议。

1 工程概况

海口临空经济区水系整治工程 I 期治理工程施工一标段项目是解决海口临空经济区美兰机场南侧区域雨水堆积问题的重要排水设施枢纽。顶管工程分为 2 段,单根顶管路径总长 1 225 m,3 根内径 4.0 m 的钢筋混凝土管平行布置,单根管节长度 2.5 m。其中 2 号—3 号井顶管施工段为直线形泥水平衡法顶管施工段,单根路径长度 600 m,管道纵坡 0.174%。预制管节为 C50P8 钢筋混凝土管,C 形钢承插口,管节间设置单道橡胶圈及松木垫板,管道埋深 21~24.3 m,穿越地质层为黏土层及中砂层,局部少量生物碎屑岩,临近既

有高速公路及居民区。

根据项目总体安排,使用 2 台顶管机(1 号机、2 号机)布置于 3 号工作井内的 2 个边孔向 2 号接收井顶进,两边孔顶管施工步距 50 m,其中 1 号机到达 2 号接收井后,调转设备至 3 号工作井的中间孔顶管继续顶进,顶通后再转运至 1 号井施工,整体呈阶梯形前进。主要施工工艺包括:设备选型及安装调试、管节减阻及承插、顶进参数控制、顶进施工及线形控制、洞门破除及止水、顶进注浆、施工监测、泥浆置换、管内尾工处理、废弃泥浆处理等。

2 顶管施工设备选型及安装

2.1 设备选型

2.1.1 顶力及土压力计算

为合理配置顶管顶进施工设备,需对管道总顶力、钢筋混凝土管道传力面最大允许顶力及土压力进行计算,确保顶进施工过程中,管道允许顶力大于总顶力,管道不会在顶进施工过程中受损,避免顶进失败。同时顶进施工过程中要严格控制刀盘控制土压力 P ,将其控制在静止土压力 $P_0 \pm 20$ kPa 范围内,确保顶进施工的正常进行。本施工段管节外径 4.7 m,单次顶进长度 600 m,平均摩阻力结合地质情况取值 3.5 kN/mm²,顶管机外径略大于管道外径,为 4.72 m,管顶覆土取最大埋深 21.35 m。相关公式引用来自 DG/TJ 08—2049—2016《顶管工程施工规程》和 DG/TJ 08—2221—2016《超大型钢筋混凝土顶管管节制作、施工及验收规程》。

管道总顶力计算公式为:

$$F_0 = \pi \times D_1 \times L \times f_k + N_F$$

式中: F_0 为总顶力标准值, kN; D_1 为管道外径, m, 取 4.7 m; L 为管道设计顶进长度, m, 取 600 m; f_k 为管道外壁与土的平均摩阻力, kN/mm², 取 3.5 kN/mm²; N_F 为顶管机的迎面阻力, kN。

$$N_F = \pi \times D_g^2 \times \gamma \times H_s / 4$$

式中: D_g 为顶管机外径, m, 取 4.72 m; γ 为土的容重, kN/m³, 取 18.0 kN/m³; H_s 为覆盖土层厚度, m, 取 21.35 m。

经计算, $F_0 = 39\,300$ kN。

钢筋混凝土管顶管传力面允许最大顶力计算公式为:

$$F_{dk} = 0.5 \times ((\phi_1 \times \phi_2 \times \phi_3) / (\gamma_{Q0} \times \phi_5)) \times f_c \times A_P$$

式中: F_{dk} 为混凝土管道允许顶力设计值, N; ϕ_1 为混凝土材料抗压强度折减系数, 取 0.9; ϕ_2 为偏心受压强度提高系数, 取 1.05; ϕ_3 为材料脆性系数, 取 0.85; ϕ_5 为混凝土强度标准调整系数, 取 0.79; f_c 为混凝土抗压强度设计值, N/mm², 取 23.1 N/mm²; A_P 为管道的最小有效传力面积, mm², 计算得 4 780 650 mm²; γ_{Q0} 为顶力分项系数, 取 1.3。

$F_{dk} = 43\,186$ kN > 39 300 kN (总顶力), 即在总顶力作用下, 顶管管节不会破坏, 按理论值可不设置中继间。但为避免施工中出现顶进困难等情况, 本项目设置 2 个中继间。

顶进中要控制好刀盘控制土压力 P , 要求主动土压力 $P_a < P <$ 被动土压力 P_p , 主动土压力 P_a 、被动土压力 P_p 变化范围较大, 再加上理论计算与实际施工时会存在一定的误差, 一般将控制土压力 P 设置在静止土压力 $P_0 \pm 20$ kPa 范围内。顶进过程中, 根据土层变化、覆土深度变化、地表沉降监测等随时调整压力。

当为黏性土时, 被动土压力 P_p 计算公式为:

$$P_p = \gamma h \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) + 2C \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$$

当为黏性土时, 主动土压力 P_a 计算公式为:

$$P_a = \gamma h \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) - 2C \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$$

式中: h 为地面至顶管机中心高度, m, 取 23 m; φ 为土的内摩擦角, (°), 取 14.1°; C 为土的内聚力, kPa, 取 37.4 kPa。

经计算, $P_p = 776.28$ kPa, $P_a = 104.02$ kPa。

静止土压力计算公式为:

$$P_0 = k_0 \gamma h = 207 \text{ kPa}。$$

式中: k_0 为静止土压系数, 取 0.5。

控制土压力 P 的计算公式为:

$$P = P_a + P_w + \Delta P$$

式中: P_w 为顶管机所处土层水压力, kPa, 黏性土中不考虑; ΔP 为土仓施加的预加压力, kPa, 一般取 20 kPa。

经计算, $P = 124.02$ kPa。

2.1.2 顶管机头选型

根据上述计算结果, 结合规范、设计图纸、地勘情况及项目实际, 选用 DN4000 大刀盘泥水平衡顶管机, 其断面图见图 1。

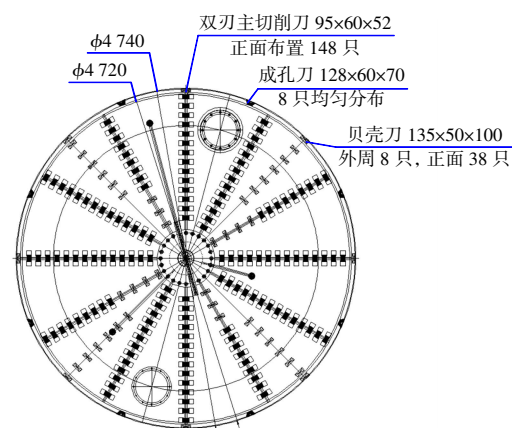


图 1 泥水平衡顶管机机头断面图(mm)

大刀盘泥水平衡顶管机利用具有一定压力的泥水与土的混合体作用在顶管开挖面上, 在开挖面上形成一层泥浆层(泥浆护壁)。泥水压力透过泥浆层与开挖面上的水、土压力相平衡, 保持开挖面不会发生坍塌与沉降。主顶进系统共有 10 只 3 000 kN 双冲程等推力油缸, 行程 3 500 mm, 总推力 30 000 kN, 10 只双冲程油缸组装在油缸架内, 主顶系统由 PLC 可编程序计算器控制。

2.1.3 中继间配置

为减少管节所受顶力设置中继间, 根据规范要求中继间需用数量计算公式为:

$$n = \pi \times D_1 \times f_k \times (L + 50) / 0.7 f_0 - 1$$

式中: n 为中继间数量(取整数); f_0 为中继间设计允许顶力, kN, 取 17 500 kN。

经计算, $n = 1.87$, 故设置 2 个中继间。

施工中应考虑现场实际情况, 实际布置中继间的数量和里程要在试验段根据注浆效果和顶程阻力计算确定。根据规范要求第 1 道中继间宜布置在顶管机后方 20~50 m 的位置^[2], 后续中继间

的间隔距离计算公式为:

$$S'=K(F_3-F_2)/(\pi \times D_1 \times f)$$

式中: S' 为中继间的间隔距离, m; F_2 为顶管机的迎面阻力, kN, 取 7 602 kN; F_3 为设计允许顶力, kN, 取 43 186 kN; f 为管道外壁与土的平均摩阻力, kPa, 取 3.5 kPa。 K 为顶力系数, 取 0.5。

经计算, $S'=344.5$ m, 向上取整, 2 个中继间的间隔距离为 345 m, 即 50 m、395 m 处各设置 1 个中继间。

2.1.4 吊装设备选型

吊装设备选择主要考虑顶管机和管节, 顶管机分 2 部分吊装, 前壳体重约 75 t, 后壳体重约 24 t, 管节重约 32 t, 最大吊重量 75 t。本工程 3 号工作井设置 1 台 95 t 龙门吊, 进行管节及顶管设备吊装; 2 号接收井选用 1 台 250 t 汽车吊进行顶管设备转场吊装。

2.2 设备安装

顶管施工设备安装主要包括后靠背安装、导轨安装、主顶系统安装、洞口土体加固及止水设备安装、照明和通风系统安装等。

后靠背由钢板、井壁混凝土墙、混凝土墙后背土体 3 部分组成, 采用汽车吊配合人工进行安装定位, 确保钢板与管道轴线垂直, 并与后靠混凝土壁面贴紧。导轨采用成型钢轨, 由 45 kg/m 重型钢制作, 导轨间距 2.4 m, 导轨底部与工作井底之间通过型钢连接支撑。

主顶系统主要包括千斤顶、主顶机组、顶管机安装、顶铁安装。千斤顶支架用 16 号槽钢加工而成。支架体要有足够的刚度, 稳定性好, 两支架平行、等高, 纵坡与管道设计坡度一致。千斤顶采用 10 只双冲程等推力油缸, 行程 3 500 mm, 单台推力 3 000 kN, 总推力 30 000 kN, 主顶油缸环形对称布置, 支架预留 4 个千斤顶位置, 以防止顶力不足。顶管机分成 2 节运输至现场, 包括刀盘及前壳体、后壳体。在井上进行第 1 节刀盘组装, 采用龙门吊分 2 节吊入工作井, 顶管机刀盘位置距洞口止水圈 1 m 左右。

洞口土体加固采用高压旋喷桩, 洞口采用预埋钢环施工工艺, 预埋钢环根据圈梁标高分 2 块进行预埋。洞口止水环采用双道橡胶板止水装置, 为防止顶管机出洞时泥砂或地下水涌入基坑, 在顶进方向的墙壁上安装止水环, 翻板作为帘布的刚性支撑使帘布压紧在管节上, 起到密封作用。

在工作井每个仓室顶部横梁上安装 1 盏 400 W 的 LED 灯。管道内采用 36 V 电压照明, 照明灯具每节管内设置 1 只。顶管施工放置通风机、灭火器、气体检测仪、便携式氧气瓶等应急防护设施。

3 管节减阻及防渗

3.1 管节外壁涂蜡

为了减低顶管施工过程中管节与周围土体间的摩擦, 对每根管节外侧采用改性石蜡进行涂刷, 施工时将石蜡加热融化, 采用滚刷均匀涂刷至管节表面。

3.2 触变泥浆制备

施工准备阶段, 按照配合比配置顶进泥浆, 触变泥浆配比见表 1。

表 1 触变泥浆配比表

地质类型	泥浆材料组成/kg			泥浆性能指标	
	膨润土	PAM 聚丙烯酰胺	水	黏度/(Pa·s)	相对密度
黏土层	100	0.30	5 000	96	1.02
砂层	100	0.67	3 300	120	1.12

注: 触变泥浆随着地质、注浆压力以及顶力值变化, 浆液性能指标不断调整, 上述配比只是在相对地质中较为常用的施工配比。

3.3 管节间防渗漏浆处理

管节间连接为承插式连接, 承插口间设置橡胶圈及松木垫板, 橡胶密封圈外观和任何断面都必须致密均匀, 无裂缝、孔隙或凹痕等缺陷, 牢固地粘结在混凝土管的槽口上。下管前均匀涂薄一层硅油, 使承插时橡胶圈不移位、不反转、不露出管外。木衬垫采用松木加工, 厚度 15 mm, 通过射钉与混凝土粘贴固定, 增设雨水膨胀胶条, 并在橡胶止水圈后增加 1 道防水土工布编织的石棉绳。

4 顶管顶进

开挖面土体经大刀盘切削, 搅拌后通过输送管道采用泥水方式输送至地面沉淀池, 泥水经过沉淀后, 废弃泥浆通过压滤机压缩成含水量较小的泥饼, 排至堆土场, 满足环境保护和水土保持的相关要求, 清水再通过回流管道输送至顶管机泥水仓中重复利用。1 节管节顶进结束后, 缩回主千斤顶, 吊放下一节管节再继续顶进。

4.1 顶进参数控制

4.1.1 顶力控制

通过数据统计, 顶进过程中最大顶力值为 26 670

kN, 顶力随着进程的增加逐渐增大, 顶力值均未超过管节允许顶力。地质变化、注浆情况、施工间歇等因素对顶力影响较大。若泥浆浓度较大, 导致泥水仓中压力较大, 排泥困难, 会导致顶力值有所上升。若遇生物碎屑岩, 堵管时常发生, 造成施工间歇, 顶力值上升。且顶管线形变化大、管节间出现渗漏浆液也会导致顶力增加, 造成顶进困难。

4.1.2 顶进速度控制

在始发洞口外侧土体加固区的初始顶进速度为 20 mm/min, 进入黏土层后, 正常顶进速度控制在 20~50 mm/min, 平均耗时 150 min/节, 每台 4 节/d。进入中砂层中, 正常顶进速度稍有增大, 平均耗时 120 min/节, 每台 4~5 节/d。若遇特殊情况, 造成施工间歇, 每节管节耗时有延长。

4.1.3 顶管机压力控制

在黏土层中, 顶管机控制压力为 0.08~0.14 MPa, 均在主动土压力与被动土压力范围之间, 控制压力范围合理。在中砂层中, 顶管机控制压力为 0.002~0.04 MPa, 控制压力<主动土压力。由于在砂层中, 泥砂在泥水仓中容易下沉, 导致排泥管道极易堵塞, 排泥困难, 通过增大泥水仓出泥量和出泥速度, 减小控制压力。

根据地表沉降观测数据显示, 当控制压力<主动土压力, 地表沉降位移在允许范围内, 满足设计及规范要求, 未出现地表沉降等现象。由于在顶管上方覆土中分布 12 m 厚的中风化岩层, 能有效减少正面土压力对顶管施工的影响。

4.1.4 刀盘电流控制

刀盘电流在黏土层中应为 25~30 A, 砂层中应为 23~27 A, 且电流无明显变化, 保证电流值正常。

4.2 顶进施工及线形控制

4.2.1 始发顶进方向

由于顶管机头及管节存在自重, 且设计轴线为下坡趋势, 为防止顶进过程中机头及管节下沉无法控制, 故调整机头顶进方向, 顶进始发前 50 m 时保证顶进线路与设计轴线夹角为 2°~3°, 50 m 后逐步调整为设计轴线方向, 减小机头因自重对管节线形的影响, 整体管内底高程与轴线均符合规范及设计要求。

4.2.2 管节下放及安装

吊装机械采用 100 t 龙门吊, 为避免下管时吊装伤及管身混凝土, 配备专用吊具进行吊装。存

储、运输时, 管节呈直立状态堆放, 下管时需将管节吊离地面 30 cm 以内^[2], 配合龙门吊小勾将管节翻转成水平状态, 缓慢起吊, 待稳定后正常下管。

4.2.3 顶进中线形复核

工具管出洞后的轴线方向与姿态的正确与否, 对以后管节的顶进将起关键作用。实现管节按设计轴线顶进, 做好顶进轴线偏差的控制和纠偏量的控制是关键。顶进期间每顶进 50 m 对仪器台位置及机头位置进行复核, 每日对激光准直仪位置进行复核, 通过测量机头位置偏差指导顶管机纠偏。

4.2.4 顶进注浆减阻

每个注浆断面布置 5 个注浆孔, 管底不布置注浆孔。注浆孔在管材厂预留前 20 节管材每节布置 1 环注浆孔, 之后管节每 2 节布置 1 环注浆孔, 见图 2。

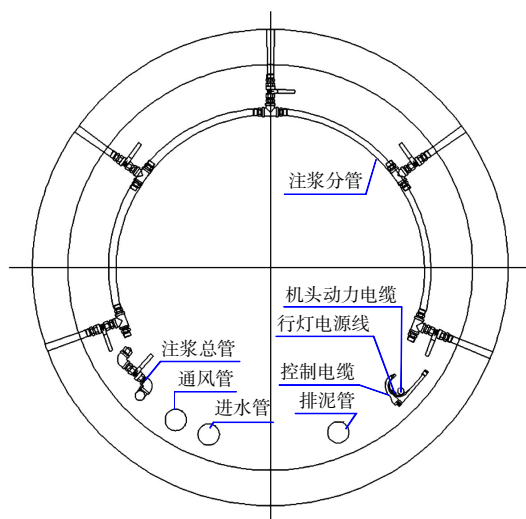


图 2 管道内注浆孔布置示意图

在顶进过程中, 通过压浆环管向管节外壁压注一定数量的减阻泥浆, 采用多点对称压注使泥浆均匀的填充在管节外壁和周围土体间的空隙, 来减少管节与土体间摩阻力, 起到降低顶进阻力的效果。机头同步注浆由地面液压注浆泵通过 $\phi 40$ mm 管路压送到机头处储箱内, 再由螺杆泵定量压入机头壳体处, 在机头处安装隔膜式压力表, 以检验浆液是否到达指定位置。

4.2.5 沉降位移监测

在穿越阶段, 当顶管推进到建(构)筑物前方 30 m 处时, 进行初始值监测; 在未达到建(构)筑

物时, 监测次数为 1 次/d; 当顶管机头推进到建(构)筑物后, 监测频率调整为 2 次/d; 机头越过建(构)筑物后, 恢复为 1 次/d。施工结束后, 穿越建(构)筑物仍存在后期沉降的问题。需对穿越处建(构)筑物继续进行跟踪监测; 同时对于穿越道路和建(构)筑物地段及时用迟凝泥浆置换原有的触变浆液。施工监测持续到顶进施工后 1~2 个月, 并做好后期注浆加固, 直到沉降基本稳定为止。

4.2.6 进出洞口与管节连接

为保证顶管进洞后管节与洞口不产生相对位移, 管节端头需与井口进行连接处理, 处理措施为现浇环形钢筋混凝土保护圈, 保护圈长度为 400~600 mm, 采用 C50P8 混凝土, 设置 2 道遇水膨胀橡胶止水条, 预埋钢环外露表面需涂厚浆型环氧沥青漆。

4.2.7 顶管护壁泥浆置换

在管节贯通后, 为防止顶部土体在自重作用下下沉及地表出现沉降, 应对触变泥浆套的浆液进行置换。置换浆液采用水泥浆掺合适量的粉煤灰。待压浆体凝结后(一般在 24 h 以上)方可拆除注浆管路, 并换上闷盖将注浆孔封堵。注浆材料为普通硅酸盐水泥, 水泥浆配比为水:水泥=4:1, 注浆压力为 0.8~1.2 MPa。

4.2.8 管内尾工处理

当管道置换泥浆后进行管道接缝处、注浆孔以及打泥孔封堵, 防止管道通水后渗漏水。采用刮刀等工具清理超出管节内壁的变形木垫板, 采用水泥砂浆填堵密封, 表面抹平。注浆孔封堵采用外方管堵住接头, 随后表面采用水泥砂浆抹平。打泥孔封堵先将打泥孔清理干净, 然后采用水泥砂浆填充打泥孔, 随后再用水泥浆抹平表面。

4.3 顶进废弃泥浆处置

选取板框压滤机+砂石分离系统分离+沉淀池沉淀的综合处理工艺。泥浆浓度是影响压滤机处理能力的重要因素, 因此在泥浆池中添加高效絮凝剂溶液来辅助泥浆快速沉淀, 以提高压滤机进浆的浓度。高效絮凝剂添加量为 3%, 溶液浓度为 0.5%。同时为了避免泥浆沉淀而不流动, 导致泥浆泵附近区域以外的泥浆无法抽排至压滤机中, 在泥浆泵附近安装 2 台 5.5 kW 的搅拌电机, 增加泥浆池泥浆的流动, 确保泥浆池中泥浆全部处理。

泥浆相对密度在 1.1~1.15 时, 压滤机的处理

能力与顶管顶进速率相匹配, 满足 2 台顶管机同时在黏土中顶进的施工生产需求。若 2 台顶管机在不同地层中顶进时, 泥浆相对密度控制在 1.05~1.15 时, 满足顶管顶进需求; 若 2 台顶管机同时在砂层中顶进时, 1 台压滤机的处理能力即可满足顶进要求。

4.4 特殊情况下中继间启动及操作

4.4.1 中继间启动原则

当因特殊天气、设备故障等造成长时间停工或地质变化、顶进距离等原因导致施工最大顶力超过管节允许顶力时, 启动中继间^[3]。

启动首个中继间, 若中继间至机头管节可正常顶进, 尝试利用主顶系统对后续管节顶进, 若顺利顶进, 再尝试关闭首个中继间, 仅利用主顶系统, 如可正常顶进, 则仍然采用主顶系统进行管节顶进施工; 如不能正常顶进, 则采用首个中继间+主顶系统进行顶进施工; 若仍然无法启动, 则启动第 2 个中继间, 后续施工依次类推。通过顶进试验段, 充分掌握地质及顶力, 中继间配置数量及时进行动态更新。

4.4.2 中继间操作要点

中继间安装时应检查各部件工作正常, 安装完毕进行调试。多组中继间的使用应编组作业, 从顶管机头向后按程序依次将每段管节向前推移, 一组千斤顶伸出时, 其它中继间保持不动, 当所有中继间依次完成顶伸后, 主顶千斤顶最后完成顶进作业^[3]。顶管机头进入接收井后, 对中继间前后管道压注双液浆, 以防止外侧泥浆通过中继间渗漏^[3]。浆液压注完成后, 从第 1 组起逐组拆除千斤顶, 千斤顶拆除后运出管线外^[3]。

5 效益分析

5.1 质量效益

施工准备阶段严格按照规范要求对总顶力、管道允许顶力、土压力、中继间布设等重要参数进行计算, 选取合理的顶进工艺, 设备选型阶段严格按照计算结果对顶管机头、注浆孔布设、中继间布置进行选配, 泥浆制备阶段严格按照配合比及既定工艺制备泥浆及布置注浆孔, 管节进场前, 严格执行“三检制”验收制度^[3], 确保管节质量。管节顶管顶进施工过程中, 管节间采用遇水膨胀胶条、松木垫板、石棉绳最大程度上降低管节间渗漏浆液, 辅以石蜡减阻, 有效保证顶管外浆套的完成性, 顶进施工采用激光准直、人工复

测等方法,严格按照“勤纠缓纠”的原则控制顶管施工线形,保证了顶管线形控制满足设计及规范要求,尾工阶段对管内注浆孔、打泥孔、中继间进行修补并及时置换管外浆套在确保顶管使用功能的前提下进一步提升整体质量。

5.2 经济效益

综合项目设计、地质及项目实际情况,结合顶力、土压力计算结果,合理选用泥水平衡顶管施工工艺,合理制定泥浆配合比及泥浆处理工艺,降低泥浆制备及泥浆处理成本约264万元,优化预制管节间防漏浆措施,有效避免顶进过程中因浆液渗漏导致顶进摩阻力增加致顶进施工困难及顶进工效降低,降低处理成本约224万元,合计约488万元。

5.3 安全效益

根据顶力、土压力计算结果,合理选用泥水平衡顶管施工工艺,确定主要顶管施工设备选型,确保顶进工艺本质安全,顶进施工过程中,按照既定泥浆配比制备泥浆,并多措施减阻降低摩阻力,确保工艺执行安全,施工过程中严格按照监测要求对顶进线路、既有建筑物进行沉降位移监测,无超预警值、报警值情况,确保实施安全,尾工阶段及时置换泥浆,确保顶通后无沉降发生,确保整体安全。

5.4 环保效益

项目采用板框式压滤机、砂石分离机、生石灰、絮凝剂等措施,将泥浆压缩成泥饼,装车运

输至指定弃土场地,同时经处理及沉淀后的清水再次流入沉淀池中循环使用,最大程度上降低了施工造成的污染,为项目营造绿色、低碳、环保的施工环境,提升项目整体绿色施工及文明施工水平,充分发挥了项目环保效益。

6 结语

本文结合海口临空经济区水系整治工程Ⅰ期治理工程施工一标段项目长距离大直径直线形泥水平衡法顶管施工案例,对顶管设备选型、中继间配置、洞门破除及止水、管节减阻及井下承插、顶进施工等关键技术分析总结,阐明了长距离大直径直线形泥水平衡法顶管施工的质量效益、经济效益、安全及环保效益,验证了相关关键技术顶管施工中的重要价值。在类似项目施工中,可结合本文所提的顶进施工控制关键技术对顶管施工进行管控,确保施工工艺执行、关键技术管控、安全质量管理到位,确保提升精细化管理水平。后续可针对顶管置换泥浆利用、复杂地质条件下土压平衡、泥水平衡工艺选择、复杂地质顶管管线形控制的方法及特殊条件下顶管复顶技术等深入研究,进一步深入研究全套顶管施工技术。

参考文献:

- [1] 关文旭,王时雨,王宏伟,等.粉质黏土、中粗砂地层顶管工程中泥浆处理关键技术[C]//地下空间和深大基坑工程技术交流会议论文集.武汉:中交第一航务工程局有限公司,2023.
- [2] DG/TJ 08-2049—2016,顶管工程施工规程[S].
- [3] DG/TJ 08-2221—2016,超大型钢筋混凝土顶管管节制作、施工及验收规程[S].