

DOI: 10.7672/sjgs2024190086

同一始发井内顶管双向顶进后背体系 设计与施工技术*

张兆军¹, 彭焱锋¹, 刘维正², 鲜斌琪¹, 谭际鸣², 张毅¹

(1. 中铁隧道集团二处有限公司, 河北 三河 065201; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

[摘要] 针对地下管廊工程中进行两段及以上顶管作业的情况, 基于南昌市丹霞路道路及综合管廊工程 EPC 项目顶管工程实例, 对在同一始发井内同时进行双向顶管作业技术进行分析研究。建立数值计算模型, 对相关结构体系受力进行分析, 并结合有限元数值模拟的方法, 对不同施工顺序下的受力特性进行对比。结果表明: 在相同荷载下, 顶推一侧两舱时后背墙受到的最大弯矩较对称顶进时大, 后背体系结构在各工序下均满足受力与稳定性要求。揭示了在较大顶管始发井内采用肋板式后背墙作为背部支撑、通过钢套箱后靠背分配主顶油缸反力、同时设置双排双向后背体系方式的可行性。进一步提出后背墙结构的施工与拆除技术, 并通过实际工程中后背墙变形监测验证了实施效果。

[关键词] 综合管廊; 顶管; 双向顶进; 后背体系; 数值模拟; 监测

[中图分类号] TU990

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)19-0086-08

Design and Construction Technology of Back System of Two-way Jacking Pipe in the Same Starting Well

ZHANG Zhaojun¹, PENG Yanfeng¹, LIU Weizheng², XIAN Binqi¹, TAN Jiming², ZHANG Yi¹

(1. China Railway Tunnel Group No. 2 Engineering Co., Ltd., Sanhe, Hebei 065201, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: According to the situation of two or more pipe jacking operations in the underground pipe gallery project, based on the pipe jacking engineering example of the comprehensive pipe gallery EPC project of Danxia Road in Nanchang, the technology of two-way pipe jacking operation in the same originating well was analyzed and studied. A numerical calculation model was established to analyze the stress of the relevant structural system. Combined with the finite element numerical simulation method, the stress characteristics under different construction sequences were compared. The results show that: under the same load condition, the maximum bending moment of the back wall when pushing two pipes on one side is larger than that when pushing symmetrically. The back structure meets the requirements of stress and stability in each engineering process. The feasibility of using rib type back wall as back support, distributing the reaction force of main jacking cylinder through the back of steel boxed box, and setting double row and two-way back system in the large jacking launching well is verified. The construction and demolition technology of the back wall structure is further proposed, and then verified by the deformation monitoring of the back wall in the actual project.

Keywords: utility tunnel; pipe jacking; bi-directional jacking; back system; simulation; monitoring

0 引言

在道路综合管廊工程建设中, 当需要进行两段及以上的顶管作业时, 通常情况下采取的方式是分段先后进行。这种传统方式下顶管设备的后背体系具有较大空间, 且可以利用工作井后壁安装后背

* 湖南省建设科技计划(KY202108); 中铁隧道局集团科技创新计划(隧二研合 2020-08)

[作者简介] 张兆军, 正高级工程师, E-mail: 515340213@qq.com

[收稿日期] 2024-03-17

体系,设计施工均较为简便。目前一般的后背结构形式主要有板桩式、重力式和拼装式。拼装式后背需要现成的预制件,而桩板式后背的稳定性和抗扭性没有重力式好,但重力式后背存在结构尺寸大的缺点。分步分段施工存在工期长、闲置工作面的问题,对于资源充足、工期紧迫的工程项目而言尤为不利。此外,若其中一段顶管作业出现问题,将直接影响后续作业的进行,工期受工程条件等各方因素影响较大。

针对顶管后背墙及土体受力变形近年来也累积了一些研究成果。丁猛猛^[1]研究了多排顶管矩形始发井在始发井施工及顶管顶进时围护结构的受力及变形趋势,得出在破除洞门时水平位移与内支撑轴力逐渐增大、顶进时内力先增大后减小再增大的结论。刘熙媛等^[2]研究了圆形顶管工作井后背墙及土体的应力、位移空间分布特征,认为后背墙土体水平位移与油缸顶力呈近似线性关系。朱龙等^[3]通过对圆形沉井在不同顶力作用下后背土体反力和位移变化进行分析研究,认为在顶力作用下沉井后背土体发生的位移较小,并表现为整体移动。魏丽敏等^[4]认为顶力作用在整个圆周上引起土体作用力变化,传统计算方法仅适用于顶力作用于沉井底部的浅埋沉井。毛海和^[5]通过分析矩形顶管工作井后背墙在巨大推力作用下其荷载传递机制以及土体变形对抗力影响研究,认为后背墙结构受力可按平面应变问题处理,在保证结构安全储备的同时简化计算。武永华^[6]采用土力学中有关地基塑性区理论计算后背土体抗力,提出了当塑性深度达到后背宽度的1/4且后背形状为方形时的后背土体强度计算公式。王宁等^[7]认为后背土体受顶推力作用产生的水平位移是以隧道中心处为最大值的弓形分布、土体在顶推力二次作用下会产生更为显著的变化,并提出了后背土在顶推压力作用下产生水平位移与土压力的经验公式。

目前,针对顶管后背墙结构设计与双向顶进施工方法的研究,多集中在通过施工过程中改变后背墙结构,从而实现同一始发井内双向依次顶进的技术改良。李汉愿^[8]研究了复杂环境下长距离大口径管道单基坑的双向顶进,提出了通过对工作坑及作业平台进行改良以提高其承载力、通过增设中继间来分担后背墙顶力的单基坑两侧依次顶进施工技术。卢斌等^[9]出于节省工期的考虑,提出了无中继间情况下的顶管施工方案。

综上所述,从目前已有的国内外研究成果来看,研究方向多从实际工程出发,提出对顶管双向

顶进分步作业的技术改进,鲜有对同时进行双向顶管作业的研究^[10]。为此,本文以南昌市丹霞路道路及综合管廊工程 EPC 项目顶管工程实例为依托,对同一始发井内顶管双向顶进后背体系的设计与施工技术进行研究。

1 工程概况

南昌市丹霞路(沿江北大道—青山湖北大道)道路及综合管廊工程 EPC 项目线路呈东西走向,西起沿江北大道,途经青山北路和江纺花园路,东至青山湖北大道,全长约 1.9km。综合管廊西起七里路综合管廊,途经已建成的青山路综合管廊,东至青山湖北大道,全长约 1.56km,均为 3 舱。项目包含管廊主体工程(2 段明挖段+2 段顶管段)、设备安装工程、管廊节点工程。

K0+436.2—K0+757.8 管廊顶管段综合管廊布置在道路南侧车行道、绿化分隔带及非机动车道下,顶进地层主要为细砂层、砾砂。顶管段为三舱圆形结构,分别为 2 600mm 燃气仓、3 500mm 综合舱及 3 500mm(均为管片内径)电力舱组成。

在本工程中,顶管机的顶进路线上存在 1 个 19°的转角,而顶管机在作业过程中难以精确改变顶进方向,因此本工程不能采用一次顶进的方式,而需要在转角处设置竖井,分段顶进,且两段顶进方向不是 180°的完全反向。另外由于城市用地存在诸多限制,工程规划中将顶管吊装口与管廊进风口设置在同一竖井内,这就使得始发井的平面面积较大,不宜采取在单向顶进结束后将后背墙换向设置以反向顶进的传统双向顶进方式。同时出于加快施工进度、节省工期的需要,经研究比选,最终决定采用在同一始发井内分别设置双向后背墙的方案。

在本工程中,顶管始发井场地占地 1 万 m²、深约 16m,分上、下 2 层。顶管均由始发井往西、东两端始发,分别在青山北路管廊、顶管接收井接收,分段顶进长度为 82.5m 和 154.2m。综合管廊顶管段平面与顶管井横断面分别如图 1,2 所示。

2 结构体系设计与受力分析

本工法双向顶进后背体系结构包括由钢筋混凝土筑成的肋板式后背墙及其背部斜撑,如图 3 所示。在该体系中,双向顶进后背墙互为独立式结构,后背墙横向连接工作井中隔墙及侧墙,竖向锚入工作井结构底板,反向设置钢筋混凝土斜撑与后背墙连接成整体,后背墙及斜撑结构设计厚度依据顶管总推力进行受力验算。顶管机推进系统安装前,在后背墙上安装钢套箱,以使反力均匀作用在后背墙上,防止单个主顶油缸反力造成后背墙开

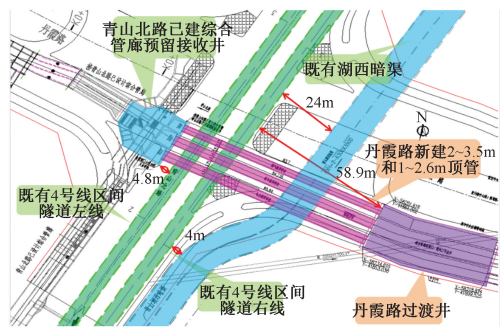


图 1 综合管廊顶管段平面

Fig. 1 Plan of pipe section at the top of utility tunnel

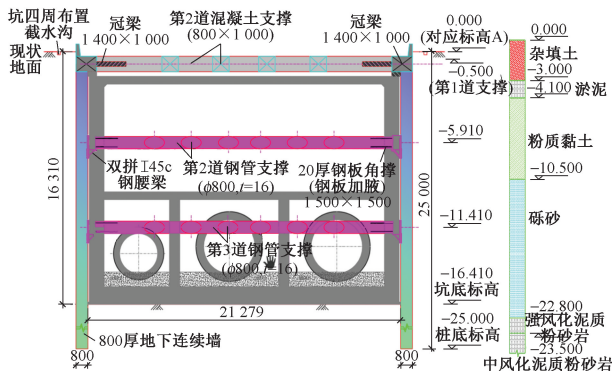


图 2 顶管井三舱管廊基坑支护横断面

Fig. 2 Cross section of foundation excavation support of pipe jacking well

裂。钢套筒与后背墙之间缝隙采用细石混凝土填充密实。顶管顶进完成后,需利用绳锯切割拆除后背墙及其背部斜撑。

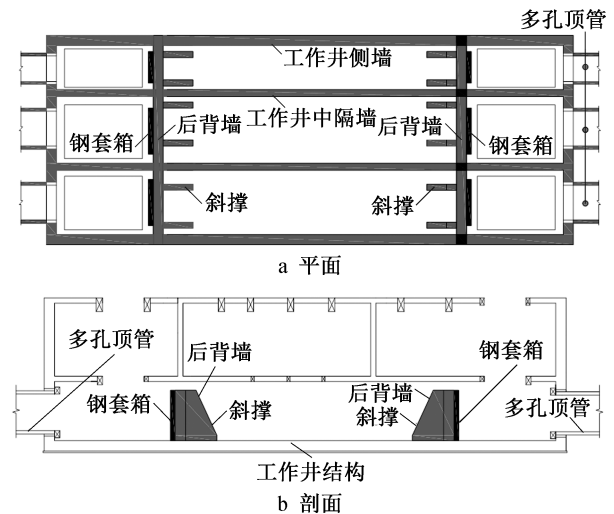


图 3 顶管后背体系布置

Fig. 3 Layout of rear backrest system after pipe jacking

2.1 后背墙稳定性验算

根据本工程地质勘测资料及该结构体系的设计尺寸,采用简化平面进行稳定性验算(见图 4),土

层参数如表 1 所示。

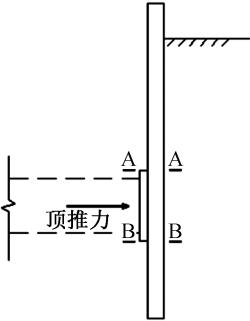


图 4 计算位置

Fig. 4 Calculation position

表 1 土层参数

Table 1 Soil parameters

层号	土类名称	层厚/ m	天然重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩 擦角/ $(^\circ)$
1	填土	3.28	18.00	19.00	5.00
2	黏性土	4.10	18.00	19.00	15.00
3	细砂	2.00	18.00	19.00	25.00
4	砾砂	10.00	18.00	19.00	37.00

考虑 6m 宽后座墙背后被动土压力,忽略黏性土的黏聚力,使用下式进行计算:

$$p_{ep} = \sum (\gamma z) K_p \quad (1)$$

$$K_p = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

$$E_{pk} = \sum (p_{ep} z) b \quad (3)$$

式中: γ 为土体重度,在地下水位线以上取天然重度,地下水位线以下取饱和重度; z 为计算土层厚度; b 为后座墙宽度; φ 为土体内摩擦角; p_{ep} 为计算处被动土压力。

计算结果如图 5 所示。

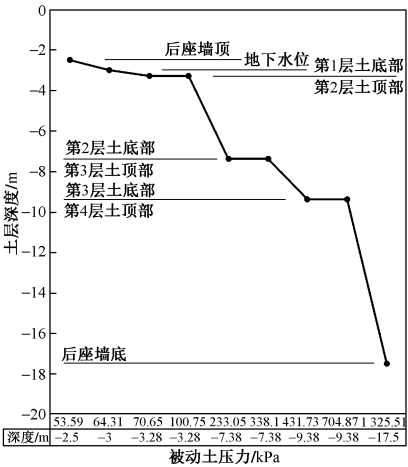


图 5 后座墙背后被动土压力

Fig. 5 Passive earth pressure behind back wall

由式(3)计算得合力 $E_{pk} = 58\,475.13\text{kN} > 50\,000\text{kN}$,后背墙结构稳定。

2.2 不同工况下的力学性质对比

利用 Abaqus CAE 建立有限元模型,采用三维可变形壳模拟,将对向后靠背肋板间视为连续墙体。材料属性设置为弹性模量 30GPa、泊松比 0.15,密度采用 $2\,400\text{kg}/\text{m}^3$,材料截面采用均质壳体。分析步选用静力通用类型。由于不考虑结构间的相互接触问题,故不设置相互作用属性。模型底部设置为完全固结,如图 6 所示。

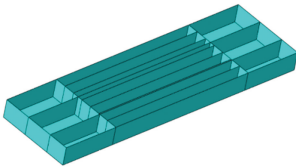


图 6 Abaqus 计算模型
Fig. 6 Abaqus calculation model

为了初步分析顶管顶推方案的影响及比选效果,分别模拟 3 种不同顶管施作顺序工况下的 4 种情况,如表 2 所示。

表 2 不同顶推方案

Table 2 Different pushing schemes		
顶推方案	顶管施作顺序	备注
工况 1	先施作两侧	—
工况 2	先施作中间	—
工况 3	先顶推一侧两舱	先施作较宽侧
工况 4		先施作较窄侧

后续重点就顶推过程中导致的后背墙截面受力情况进行分析。朱龙等^[3]的研究表明,在顶力作用下的后背土体位移抛物线形状并不明显,基本保持整体向后位移,因此可采用集中荷载方式在模型中各舱间的分隔面上施加荷载。

加荷时后背墙截面各点所受弯矩的分布云图如图 7 所示,以上各工况的截面中线弯矩进行对比如图 8 所示。由于先施作中间与先施作两边的工况下仅有顶管作业先后顺序不同,二者结果可看作同一工况两个阶段的后背墙截面弯矩分布情况。由仿真分析结果可知,4 种工况下截面中线上各点所受弯矩的分布情况相似。对于先顶推一侧两舱的工况 1 和工况 4,二者所受正向弯矩最大值较另外两种工况高出了 33.32%,所受反向弯矩最大值则高出了 33.36%。对于工况 2 和工况 3,二者所受最大正负弯矩值没有太大差异,可以认为对称顶进施工法的先后顺序改变对后背体系所受最大弯矩没有明显影响。

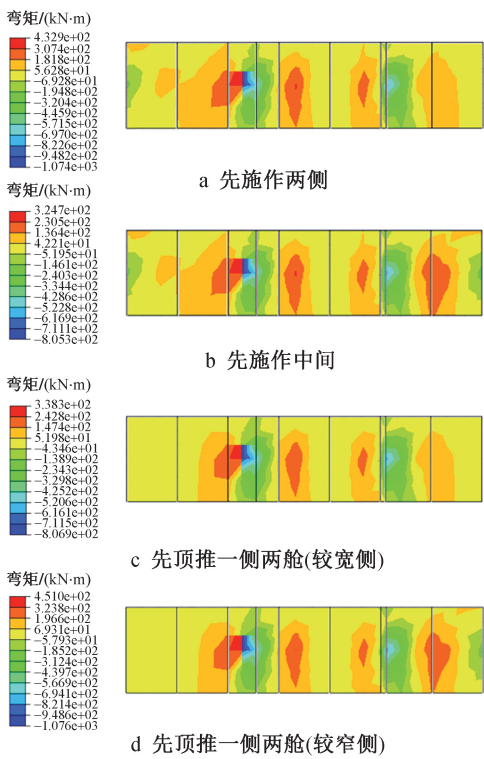


图 7 后背墙截面弯矩

Fig. 7 Bending moment of back wall

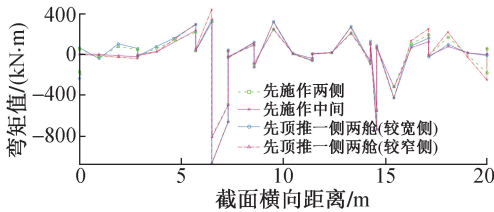


图 8 各工况截面中线弯矩分布对比
Fig. 8 Comparison of bending moment distribution at the center line of section under different working conditions

根据以上结果可知,顶进时后背墙最大弯矩均发生于各舱分隔处附近,其中较宽两舱的分隔处受到较为明显的集中弯矩作用。在相同顶进荷载下,顶推一侧两舱时后背墙受到的最大弯矩较对称顶进时大。因此,以对称的方式安排顶管施工顺序是较佳选择。

2.3 后背墙结构验算

2.3.1 后背墙设计弯矩

由上述有限元数值仿真结果可得,在先顶推一侧两舱的两种工况下,后背墙正截面中线各点所受弯矩最大值为 $1\,076\text{kN} \cdot \text{m}$;在对称施工的两种工况下,最大弯矩则为 $806.9\text{kN} \cdot \text{m}$ 。保守起见,采用设计弯矩为各工况最大值。

2.3.2 正截面受弯承载力

后背墙截面如图 9 所示,按矩形钢筋混凝土结

构计算后背墙正截面受弯承载力,根据 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》第 6.2.10 条规定,计算如式(4)所示,各参数取值如表 3 所示。

$$M_u = \alpha_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) \tag{4}$$

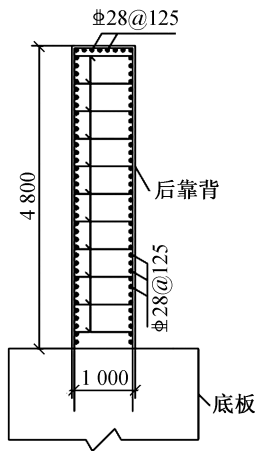


图 9 后背墙正截面示意

Fig. 9 Normal section of back wall

表 3 正截面受弯承载力计算参数取值

Table 3 Calculation parameters of flexural bearing capacity of normal section

参数名称	符号	取值大小
混凝土轴心抗压强度设计值	f_c	14.3N/mm ²
截面有效高度	h_0	0.96m
受压区等效矩形应力图系数	α_1	1.0
计算受压区高度	x	1.90m
截面宽度	b	4.8m

正截面受弯承载力 $M_u = 1\,365.49\text{kN} \cdot \text{m}$, 大于设计弯矩 $M_d = 1\,076\text{kN} \cdot \text{m}$, 满足要求。

2.4 不同工况下的受力变形特性分析

由 Abaqus 模拟在上述不同顶进顺序下同时进行双向顶进时的各纵向分隔面位移情况(见图 10), 可以看出,在各工况下最大位移均发生于后背墙连接处,在优先施作边侧顶管的情况下最大位移均发生于侧边。出于各侧边与分隔面位移同步的考虑,认为先施作两侧的施工顺序较优。

3 施工与拆除要点

本工程中,顶管始发工作井兼做综合管廊后期运营的吊装口和通风口,工作井主体结构均按永久结构设计;因本工程在同一顶管始发工作井内双向顶进,为提供顶管顶推的反作用力,在工作井内设计后背墙及其背部斜撑,均为临时结构,顶管贯通后,需永久拆除,确保综合管廊运维要求。

3.1 施工要点

为了保证结构的整体性与连续性,从而提高后

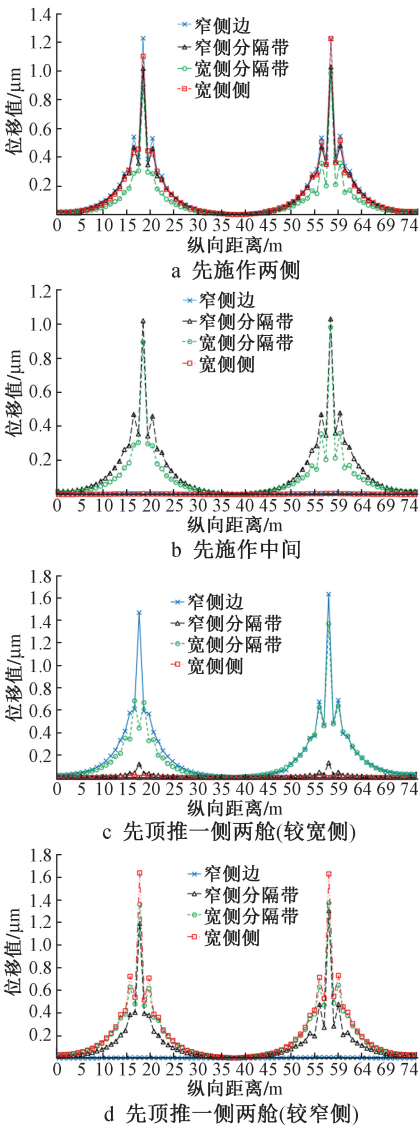


图 10 双向顶进各工况下各纵向分隔面上位移对比

Fig. 10 Comparison of displacement on each longitudinal separation surface under various working conditions

背墙的支撑能力与稳定性,双向顶管后背墙及其背部斜撑与工作井主体结构同步施工。后背墙横向连接工作井中隔墙及侧墙,墙体厚度 1 000mm,竖向锚入工作井结构底板,主筋锚筋工作井侧墙及底板不小于 35d (d 为钢筋直径),反向设置钢筋混凝土斜撑与后背墙连接成整体,混凝土强度等级 C40。

顶管机推进系统安装前,在后背墙上安装钢套筒进行反力均匀作用在后背墙上,防止单个主顶油缸反力造成后背墙开裂。钢套筒与后背墙之间缝隙采用 C25 细石混凝土填充密实。

为利于后期顶管顶进完成采用绳锯切割拆除后背墙体系。后背墙施工前,应结合在有限空间内,绳锯切割分块拆除的大小提前预埋 PCV 穿绳

孔,避免后期绳锯切割时进行水钻取孔。同时在工作井中板与后背墙顶部位置预埋吊环,便于绳锯切割分块拆除吊装。

3.2 拆除要点

顶管贯通完成后,拆除顶管设备及后配套设施,工作井吊装孔封闭前,需永久拆除顶管后背墙及其背部斜撑钢筋混凝土结构。采用绳锯切割拆除方案,步骤如图 11 所示。

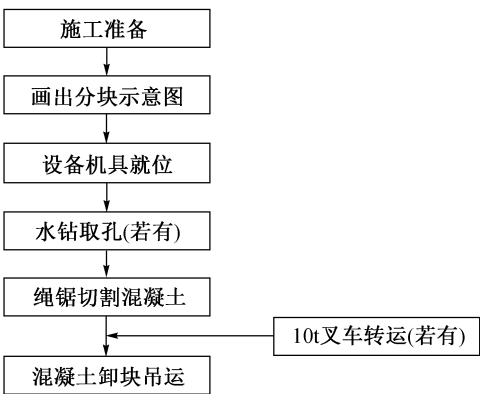


图 11 绳锯切割拆除方案步骤

Fig. 11 Rope saw cutting and removal scheme

依据设计图纸及现场吊具载荷需要计算分块大小,必须考虑吊装设备的起重能力进行合理分块。将要切除的后背墙及斜撑进行分块喷漆标识。

后背墙采用自上而下的顺序进行分层切割和拆除,利用 4 台 10t 手拉葫芦和 10t 叉车的相互组合方式拆除。

后背墙混凝土切割主要采用金刚石水钻孔机和金刚石绳锯联动,首先利用钻孔机在后背墙上打设绳锯穿绳孔及吊装孔,再利用绳锯把斜撑间后背墙切割成钢筋混凝土块,用 10t 叉车将混凝土卸块转运至底板吊装口指定区域,把钢筋混凝土块吊运至地面,并利用破碎炮凿成小块混凝土后外运至弃渣场。

4 顶进过程中后背墙变形监测

顶进过程中,在每舱后背墙受力最大的关键区域部位,墙体的顶部、根部以及与顶管设备直接接触的部位安装墙体水平位移传感器监测点。按照自动化监测仪每日实时准确测量后背墙的位移情况,通过数据采集仪收集传感器的位移大小、变化趋势及其他情况数据。对收集到的数据进行处理和分析,对后背墙的受力状况及其安全性进行评估。如图 12 所示,通过实时监测在优先施作两侧顶管,其次施作中间顶管的工况下,随着顶管顶进长度不断增加,后背墙水平位移均呈现逐渐加大现象,因后背墙两端与主体结构侧墙相互锚固相连,

形成固端梁体系,综合舱位于后背墙中部,跨中弯矩及受弯曲挠度值最大,其最大位移值为 3mm;而燃气舱顶管与侧墙支座距离最近,且顶管直径最小,所受顶推反力最小及弯曲挠度最小,最大位移值仅为 1.8mm;电力舱顶管受弯曲挠度次之,最大位移值仅为 2.1mm,均满足施工控制要求。

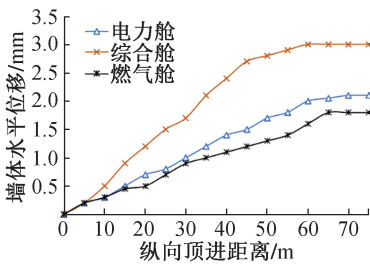


图 12 顶管顶进过程后背墙变形监测曲线

Fig. 12 Back wall deformation monitoring curve during pipe jacking

5 结语

1)大型复杂结构的施工仿真分析对于保证施工安全非常重要,对施工顺序、施工造价甚至施工图设计会产生较大影响,通过仿真分析施工过程中的不安全因素,合理调整设计施工方案。

2)数值模拟结果表明,在多排顶管顶进时的顶力作用下,后背墙正截面所受弯矩最大值出现在两舱分隔处附近,两侧对称施工时施作的先后顺序对最大弯矩没有明显影响。在相同顶进荷载下,顶推一侧两舱时后背墙受到的最大弯矩较对称顶进时大。

3)在不同顶进顺序下,同时进行双向顶进时各纵向分隔面的最大位移均发生于后背墙连接处,在优先施作侧边顶管的情况下最大位移均发生在侧边。

4)顶管始发井同时设置双向顶管后背体系、采用肋板式后背墙作为背部支撑、钢套筒后靠背分配主顶油缸反力的方案在力学上可行。宜同时进行后背墙结构与顶管井主体结构施工,采用绳锯切割方式对后背墙及斜撑钢筋混凝土结构拆除。

5)实时监测结果表明,采用本文所述方法进行双向顶进时的后背墙变形量均满足施工控制要求,证明了本文提出的后背墙体系与施工技术的可行性。

参考文献:

[1] 丁猛猛. 多排顶管矩形始发井的结构稳定性研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2021.
DING M M. Research on structural stability of multi-row pipe jacking rectangular launch well [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2021.

[2] 刘熙媛,张世华,高立康,等. 枝江尾矿库排水工程圆形顶管工作井后背墙及土体的应力与位移特征分析[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(10):1672-1681.
LIU X Y, ZHANG S H, GAO L K, et al. Characteristic of stress and displacement of back wall and soil of circular working shaft for pipe jacking in drainage project of Zhijiang end mine reservoir[J]. Tunnel construction, 2021, 41(10): 1672-1681.

[3] 朱龙,徐震,白占伟,等. 大顶力作用下圆形沉井后背土体受力变形特性分析[J]. 上海交通大学学报,2014,48(11):1510-1516.
ZHU L, XU Z, BAI Z W, et al. Behavior of resisting soil behind a circular caisson well with large jacking force[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014,48(11):1510-1516.

[4] 魏丽敏,向远华,陈果元,等. 顶管工程工作井位移与土抗力分析[J]. 岩土力学,2009,30(8):2397-2402.
WEI L M, XIANG Y H, CHEN G Y, et al. Analysis of displacement and soil counterforce for working well of pipe jacking engineering[J]. Rock and soil mechanics, 2009, 30(8):2397-2402.

[5] 毛海和. 顶管矩形工作井复合式后背墙反力分布研究[J]. 岩土力学,2007(6):1212-1216.
MAO H H. Reaction distribution investigation and structural analysis of composite thrust wall of rectangular pipe jacking shaft[J]. Rock and soil mechanics, 2007(6):1212-1216.

[6] 武永华. 顶管施工时后背土体抗力理论计算[J]. 施工技术,2013,42(S2):88-89.
WU Y H. Calculation of soil resistance in the pipe jacking construction[J]. Construction technology, 2013, 42(S2): 88-89.

[7] 王宁,高毅,于少辉,等. 矩形顶管隧道群施工对后背土体扰动规律的初步研究[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(3):413-420.
WANG N, GAO Y, YU S H, et al. Disturbance of rectangular pipe jacking tunnel group construction on soil behind working shaft[J]. Tunnel construction, 2019,39(3):413-420.

[8] 李汉愿. 复杂环境下长距离大口径管道单基坑双向依次顶进施工技术[J]. 国防交通工程与技术,2020,18(3):38-42.
LI H Y. On the successive two-way jacking construction techniques for a long-distance, large-diameter pipeline of a single foundation pit in complex environment[J]. Traffic engineering & technology for national defence, 2020,18(3):38-42.

[9] 卢斌,马永志,陈松,等. 某河道整治项目长距离大直径顶管无中继间施工技术研究及应用[J]. 广东水利水电,2020(8):94-98.
LU B, MA Y Z, CHEN S, et al. Research and application of seamless construction technology of Pingshanhe underground storage tank and water purification station[J]. Guangdong water resources and hydropower, 2020(8):94-98.

[10] M I PEERUN, D E L ONG, C DESHA. A strategic review on enhanced DEM simulation and advanced 3-D particle printing techniques to improve pipe-jacking force prediction[J]. Tunnelling and underground space technology, 2022(123):104415:1-16.