

# 山地城市复合地层大断面类矩形顶管 关键技术与应用

朱文会, 史宁强, 吴祥祖, 夏国志

[林同棧国际工程咨询(中国)有限公司, 重庆市 401121]

**摘要:** 经对比了类似环境、地层、不同工法施工的优缺点, 重庆市天宫殿下穿快速路项目首次采用岩石类矩形顶管工法, 顶管机采用复合多刀盘+滚筒开挖的创新设备, 验证了类矩形顶管开挖回填土、岩层复合地层的可行性, 实现了路堤段无竖井工况由桩筏板钢筋混凝土结构提供反力始发。路基下临坡段通过埋设管棚、延长棚洞结构、纵向/水平滑动顶管机实现受限条件下接收, 研发了管节翻转装置, 尝试了半环管节试验, 取消管节背水面嵌缝, 探索了岩石段、回填土/岩石上软下硬地层掘进控制措施, 做出了地面塌陷、障碍、冒浆等异常情况的应急响应, 为对须严格控制周边环境情况下穿越回填土、浅覆岩隧道提出了新的设计、施工解决方案。

**关键词:** 类矩形顶管机; 复合地层; 下穿高速; 始发接收; 掘进控制; 风险与应急

中图分类号: U452.2\*5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0235-11

## Key Technologies and Application of Large-section Rectangular-like Pipe Jacking in Composite Strata of Mountainous Cities

ZHU Wenhui, SHI Ningqiang, WU Xiangzu, XIA Guozhi

[T.Y. Lin International Engineering Consulting (China) Co., Ltd., Chongqing 401121, China]

**Abstract:** After analyzing and comparing the advantages and disadvantages of different construction methods under similar environments and stratum conditions, the rock rectangular-like pipe jacking method is applied in the Chongqing Tiangongdian Underpass Expressway Project for the first time. The pipe jacking machine is an innovative composite equipment with multi-cutterhead + roller excavation, which verifies the feasibility of rectangular-like pipe jacking in composite strata of excavation backfill and rock, and realizes the reaction force starting from the pile-raft reinforced concrete structure in the section of the embankment without vertical shafts. In the slope-adjacent section, the pipe jacking machine is received under the restricted conditions by embedding pipe roofs under the subgrade, extending the shed tunnel structure, and using longitudinal/horizontal slipping. The turnover device of pipe segments is researched and developed. The semi-circular pipe segment test is tried. The caulking on the backwater surface of pipe segments is eliminated. The control measures for the tunneling in the rock sections and backfill soil or rock strata that are soft on top and hard at the bottom are explored. The emergency response is handled for abnormal situations such as ground subsidence, obstacles and mud leakage. The new design and construction solutions are proposed for tunnels passing through the backfill soil and shallowly covered rock under the condition that the surrounding environment must be strictly controlled.

**Keywords:** rectangular-like pipe jacking machine; composite strata; underpass expressway; launching and receiving; tunneling control; risk and emergency response

## 0 引言

随着城市化进程的加速, 城市基础设施建设需

求日益增长, 采用矩形顶管工法新建下穿道的工程案例已日益渐多, 与传统的明挖法与暗挖法相比, 矩形顶管新建下穿隧道无须断道、迁改管线、污染小、安全性高, 在上海、天津、郑州、杭州、苏州、宁波、广州、武汉、包头、佛山、南昌、嘉兴、珠海等城市, 现已积累了大量的砂土、粉土、淤泥、黏土等不同类型地层的工程建造经验, 同时在成都卵石地层已修建完成多条下穿道<sup>[1-2]</sup>。随着工程经验的积累, 为了更好

收稿日期: 2025-06-17

基金项目: 重庆市建设科技计划项目, 超大断面矩形顶管在装配式下穿道工程的研究与应用(城科字2023第1-10号)

作者简介: 朱文会(1983—), 男, 本科, 正高级工程师, 重庆市建委库隧道副主任工程师, 从事地下空间设计、施工、咨询、培训相关工作。

的优化矩形结构受力,在设计过程中逐渐将矩形优化为顶部起拱,四角导圆角的类矩形断面形式。

地层适用性方面,在强度较高的孤石填土地层、软岩地层,规范中明确不宜采用矩形顶管施工<sup>[3]</sup>。莆田下穿火车站项目在微风化岩层中盲区集成了滚筒和铣挖头,但在实际施工过程中,由于考虑到工程风险较高,该顶管仅在填土地层掘进后,并未在岩层中顶进<sup>[4]</sup>。

重庆两江新区组团N区道路立交C交通节点A匝道下穿机场及内环高速(后续简称重庆天宫殿下穿快速路项目),受接线条件控制洞顶为浅覆土,其洞身段地质条件为中风化填土夹杂孤石、泥岩地层,是国内首次在岩石类地层采用矩形顶管工法进行顶推施工,验证了开挖土、岩层复合地层可行性<sup>[5]</sup>,实现了路堤段无竖井始发、临坡段接收这一在山地城市较为典型的下穿道进洞与出洞特殊工况的转换。设计在结合黄伟<sup>[6]</sup>、王金一<sup>[7]</sup>、李建高<sup>[8]</sup>等对已建软土地层车行、人行通道顶管的案例基础上,提出了适宜山地城市的类矩形顶管建造的设计方法,施工期间通过参考李俊玲<sup>[9-10]</sup>、吴列成<sup>[11]</sup>、吴森阳<sup>[12]</sup>、戴兵<sup>[13]</sup>、胡文<sup>[14]</sup>、许源<sup>[15]</sup>等对已建软土地层矩形顶管建设经验,现场通过得当的掘进控制,有效的减阻措施,及时的应急响应,确保了地表沉降可控,取消了管节内侧嵌缝,管节后部经置换注浆后无渗漏水,正常掘进期间日均掘进进尺1.5 m/(环·d<sup>-1</sup>),最快掘进速度3 m/(环·d<sup>-1</sup>),该工程已于2024年4月底贯通。

本文基于重庆市天宫殿下穿快速路项目,类矩形顶管采用“复合多刀盘+滚筒”分层开挖形式,经现场验证可适应强度 $\leq 50$  MPa岩层(对掘进段孤石进行点荷载试验),工程在无竖井工况下始发临坡段接收,总结了软岩地层减阻及渣土改良、超浅埋防塌陷处理、填土地层串浆应急处置、设备遇障地面开竖井进行轴承及刀具更换、半环管节试验、地表沉降控制等关键技术。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

重庆天宫殿下穿快速路项目原设计为暗挖工法,其工程地质及周边环境与距离西侧约200 m 2016年初通车的金童路隧道较为类似,两隧道均在浅覆盖层情况下穿机场和内环高速,地质均为回填土及泥岩(见图1至图5)。金童路隧道单洞长度为725 m,2012年9月开工,2016年2月通车,为2座分

离式2车道隧道,洞顶距离内环高速8.2 m,隧道洞身下半断面为基岩,上半断面为回填土,采用在暗挖段加设扩大断面管棚室,管棚搭接方案,结合超前注浆、径向注浆、地表注浆进行填土段施工,因重庆填土多为开山石风化形成,既有泥岩风化所形成的泥土又有砂岩未风化的大块石,其孔隙率大,土与块石无法有效粘结,因此采用注浆方案对地层进行加固,极易串浆、且造价高、效果差,隧道按CRD工法开挖期间多次出现地表沉降、路面塌陷,洞内收敛变形超限等情况。



图1 隧道平面位置示意图



图2 金童路隧道现场施工照片

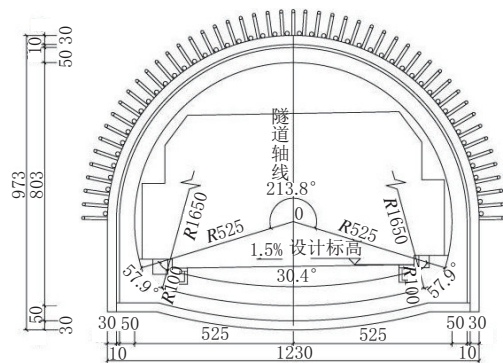


图3 金童路隧道V级填土支护断面图(单位:cm)

重庆市天宫殿下穿快速路项目与金童路隧道同期设计,原设计采用矿山法,且已完成隧道口部施工,结合金童路隧道建设过程中存在的问题,比选了盖挖法、顶管法等施工工法,由于上部道路为内环快速、机场高速,盖挖法须临时占道,现场协调难度极大,在调研了福建莆田下穿火车站项目顶管未在岩

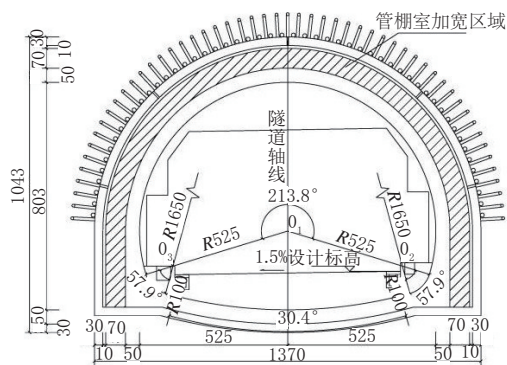


图4 金童路隧道V级填土管棚室支护断面图(单位:cm)

层中顶进的原因,结合重庆市轨道交通岩层及填土段盾构的工程经验,提出了采用类矩形顶管进行填土及岩层的设计方案。

1.2 项目简介

重庆市天宫殿下穿快速路项目隧道全长 176 m,平面线性为直线,纵向坡度 1.3%,隧道净空按 2 车道

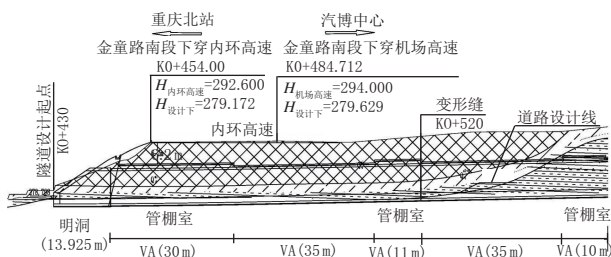


图5 金童路隧道纵断面图

标准布置,设计为类矩形断面,预制管节为 70 cm 厚 C50 钢筋混凝土,隧道上部覆土 4~6 m,下部为岩层,穿越地层主要为泥岩、回填土地层,无地下水,围岩级别属 V 级(见表 1)。沿线下穿内环高速、机场高速,该处道路交通繁忙,管网密集,顶管于路基段始发、临坡段接收。项目于 2022 年 12 月开工,2024 年 4 月完工,采用白班单班作业,其有效施工时间只有 180 d,正常掘进期间日掘进 1.5 m/(环·d<sup>1</sup>)。具体如图 6 至图 10 所示。

表 1 岩土物理力学参数取值推荐表

| 岩性名称   | 天然<br>重度/<br>(kN·m <sup>-3</sup> ) | 天然抗压强<br>度标准值/<br>MPa | 饱和抗压强<br>度标准值/<br>MPa | 地基<br>承载力基本<br>容许值/kPa | 水平抗力系数<br>的比例系数/<br>(MN·m <sup>-4</sup> ) | 水平抗力<br>系数/<br>(MN·m <sup>-1</sup> ) | 基底摩擦<br>系数 | 天然内摩<br>擦角 φ/(°) | 天然内<br>聚力 c/kPa |
|--------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|------------|------------------|-----------------|
| 填土     | 19.25                              |                       |                       |                        | 10*                                       |                                      | 0.25*      | 20               | 8               |
| 强风化泥岩  | 24.50*                             | —                     | —                     | 300*                   |                                           | 20*                                  | 0.30*      |                  |                 |
| 中等风化泥岩 | 25.10                              | 9.52                  | 6.16                  | 1 000                  |                                           | 60*                                  | 0.35*      | 32.3             | 484             |
| 强风化砂岩  | 23.50*                             | —                     | —                     | 400*                   |                                           | 25*                                  | 0.30*      |                  |                 |
| 中等风化砂岩 | 26.30                              | 30.39                 | 22.97                 | 1 200                  |                                           | 310*                                 | 0.40*      | 34.6             | 1 130           |

注:\*表示经验值。



图6 重庆市天宫殿下穿快速路项目平面示意图



图7 顶管管节预制

2 项目创新点及应用

2.1 复合地层类矩形顶管设备创新关键技术

重庆市天宫殿下穿快速路项目选用中铁装备研

发世界首台类矩形硬岩顶管 CRCC1112 号,设备采用六刀盘+六滚筒复合破岩技术,刀盘开口率 30% 左右,开挖尺寸为 10 420 mm×7 570 mm(宽×高)、纠偏角度左右 1.4°,上下 2.1°,工作压力 0.3 MPa,整机功率 3 576 kW,总装机重量 1 000 t。类矩形硬岩顶管机主要由刀盘、盾体、驱动系统、螺旋输送机、纠偏系统、触变泥浆、油脂、水、电气、顶推、导向和控制系统等多个系统组成,可满足强度≤50 MPa 岩层的切割,类矩形硬岩顶管机如图 11 至图 12 所示。

类矩形岩石顶管机配置 6 个铺板式刀盘,采用前 3 后 3 两组平行轴式布置,相邻两个刀盘的切削区域相互交叉,刀盘开口率在 30% 左右。刀盘刀具配置有中心滚刀、双刃滚刀、刮刀、边刮刀、焊接撕裂刀及可更换撕裂刀。刀盘在盾体圆弧外,有较大超挖量,相比前盾外轮廓,最高差值约 120 mm。

因多刀盘组合开挖存在开挖盲区,采用 6 滚筒开挖处理盲区。在矩形顶管上下各布置 2 个滚筒,左右各布置一台滚筒,滚筒刀具采用截齿,类矩形岩石

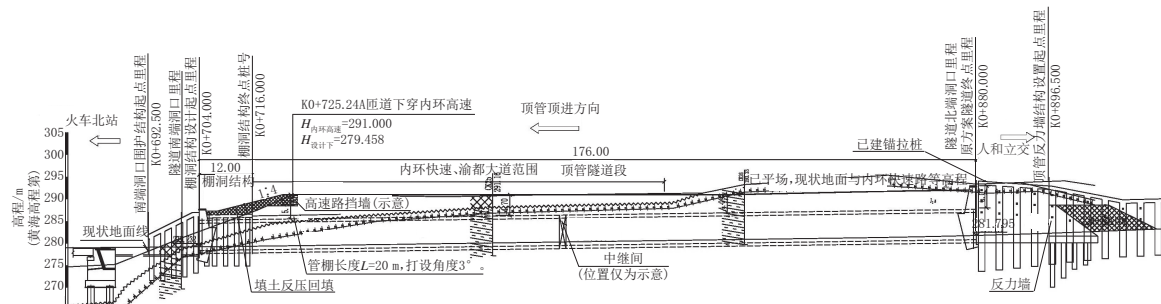


图8 重庆市天宫殿下穿快速路项目地质纵断面(单位:m)



图9 隧道进口位置



图10 隧道出口位置



图11 “掘进号”矩形顶管机工厂组装



图12 “掘进号”矩形顶管机始发

顶管刀盘刀具配置见表2和表3。滚筒结构如图13和图14所示。

2.2 受限条件下始发、接收创新技术

由于重庆市山城特性,地势起伏大,交通呈立体

表2 类矩形岩石顶管刀盘刀具列表 单位:把

| 序号 | 刀具          | 数量  |
|----|-------------|-----|
| 1  | 切刀          | 190 |
| 2  | 15.5寸中心双联滚刀 | 24  |
| 3  | 15.5寸单刃滚刀   | 6   |
| 4  | 15.5寸双刃滚刀   | 70  |
| 5  | 贝壳形过渡撕裂刀    | 60  |
| 6  | 边刮刀         | 48  |

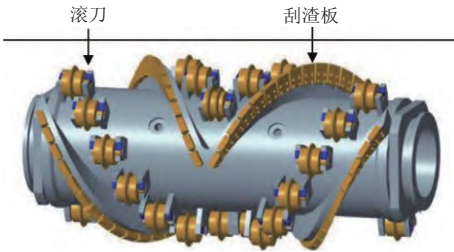


图13 破岩滚筒

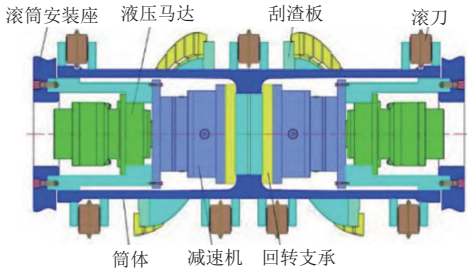


图14 滚筒结构示意图

表3 类矩形岩石顶管盲区处理装置(滚筒)列表

| 序号 | 盲区处理装置          | 数量           | 备注  |
|----|-----------------|--------------|-----|
| 1  | 滚筒数量/个          | 6            |     |
| 2  | 滚筒规格 A/B(直径-数量) | φ850 mm×2 个  | 上部  |
| 3  | 滚筒规格 C/D(直径-数量) | φ850 mm×2 个  | 左、右 |
| 4  | 滚筒规格 E/F(直径-数量) | φ1100 mm×2 个 | 下部  |
| 5  | 滚筒 A/B 功率/kW    | 200          |     |
| 6  | 滚筒 C/D 功率/kW    | 200          |     |
| 7  | 滚筒 E/F 功率/kW    | 200          |     |

形式,前期道路修建后,在保证上部道路不中断交通的情况下修建后续下穿道实施难度极大。该工程北侧进洞口为已完成新建道路的高边坡,南侧出洞口为20 m的路基段接桥梁,为此,在始发时采用单独设置反力墙承受顶推荷载;由于接收洞口位于高速路下方,须考虑直接出洞所引起的沉降、塌陷对地表

高速的影响,因此,结合周边环境,顶管机贯通后须进行纵向滑移、水平移动方可拆机。因此本工程顶管路基段始发,临坡段接收,是本工程的难点。

2.2.1 进行顶推阻力计算

参考《综合管廊矩形顶管技术标准》(T/CMEA 14—2020),顶进阻力估算可主要考虑迎面阻力与管道摩阻力如图 15 所示。

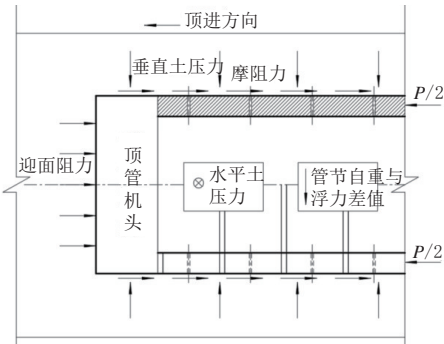


图 15 矩形顶管顶进阻力构成示意图

$$P = 2(B + H)lf_k + B'H'P_c$$

当顶进轴线位于水面以上且土体为黏性土时,

$$P_c = K_0\gamma\left(h + \frac{2}{3}H\right)$$

当顶进轴线位于水面以下且土体为砂性土时,

$$P_c = K_0\gamma\left(h + \frac{2}{3}H\right) + \gamma_w h_w$$

式中: $K_0$ 为静止土压力系数, $K_0 = 1 - \sin \varphi$ , $\varphi$ 为土体摩擦角, $^\circ$ ; $\gamma$ 为土体容重, $\text{kN/m}^3$ ; $h$ 为管道埋深, $\text{m}$ ; $\gamma_w$ 为水的容重, $\text{kN/m}^3$ ; $h_w$ 为地下水位线到顶管机机头底部 $\frac{1}{3}H$ 的高度, $\text{m}$ 。

则总顶推力  $P=2\times(7.55+10.4)\times176\times5+7.5\times7\times10.42\times(1-0.52)\times25.27\times(6+7.55\times2/3)=42\,148.42\,\text{kN}$ ,  
式中: $B$ (管节宽度) $=7.55\,\text{m}$ ; $H$ (管节高度) $=10.4\,\text{m}$ ; $f_k=5\,\text{kN/m}^2$ (参考《综合管廊矩形顶管技术标准》(T/CMEA 14-2020)表 4.4.3 说明);顶管机宽度  $B'=7.57\,\text{m}$ ,顶管机高度  $H'=10.42\,\text{m}$ , $\varphi=31^\circ$ , $h=6\,\text{m}$ , $\gamma=25.27\,\text{m}$ 。

最大顶进力应小于后座墙提供反力的 0.7 倍,则实际可以配置推顶力 60 212.03 kN。

2.2.2 反力墙设计

管节顶进过程中,由反力墙提供足够的顶推反力并保持较好的稳定性。为避免反力墙发生较大的变形,甚至破坏,导致顶管顶进方向失控;在顶管顶进施工过程中,须严格控制液压千斤顶最大推力,确保其小于后座墙提供反力的 0.7 倍,即 60 212.03 kN。如图 16 和图 17 所示。

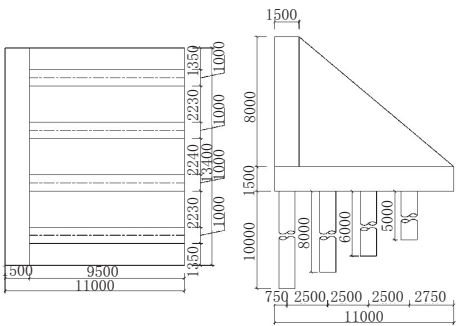


图 16 反力墙平面、剖面图



图 17 反力墙现场照片

反力墙采用 C40 钢筋混凝土墙,长 13 400 mm,高 8 000 mm,厚 1 500 mm,后靠墙设置 4 道厚度为 1 000 mm 的肋墙。反力墙及其斜撑设置桩筏板基础:板长 13 400 mm、宽 11 000 mm、厚 1 500 mm;筏板基础前后五排桩,反力墙前侧及正下方设置两排抗拔桩,直径 $\phi 1000\,\text{mm}$ ,第一排长 10 000 mm,第二排长 8 000 mm,间距 2 500 mm,反力墙后侧设置两排承载桩,第一排长 6 000 mm,第二排长 5 000 mm。经计算抗倾覆安全系数  $K_s=1.656$  大于规范要求抗倾覆安全系数 1.6,结构抗倾覆满足要求。经筏板截面强度及裂缝验算,抗压、抗弯、裂缝均满足规范要求,根据计算结果选配 20B25 钢筋。同时在施工期间采用土石堆载进行反压增加抗力,以避免推力过大导致筏板起翘。

2.2.3 延长棚洞接收

顶管于内环高速路基段贯通,与上部道路呈  $39^\circ$  斜交,该段洞顶为回填土,盾壳与刀盘之间存在空隙,为防止顶管贯通时路基底部脱空,地表垮塌,设计方案为在接收端道路下部施做管棚,并采用延长钢筋混凝土棚洞形式,确保接收安全。详如图 18 和图 19 所示。

2.2.4 顶管平移半坡拆卸

顶管下穿内环高速路后于半坡接收,接收场地呈 L 形,接收端尺寸约  $12.8\,\text{m}\times19\,\text{m}$ ,拆机区域尺寸约  $8.85\,\text{m}\times16.85\,\text{m}$ 。接收段位于高架桥下方,顶管基底距离桥梁底部高差 12 m,其拆卸条件受限,不具备履带吊直接拆机条件。在隧道贯通后顶管须沿纵向滑移、水平移动至天福路侧(靠近最下层道路),采用



图18 内环高速路下施做管棚



图19 出口棚洞结构现场照片

400 t履带吊吊出。具体移动方式为在拆卸区域垂直及水平方向施做基础,铺设钢板打黄油,从而实现顶管机的移动。详如图20至图25所示。



图20 顶管接收场地三维视图1

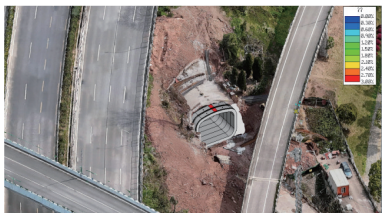


图21 顶管接收场地三维视图2



图22 顶管接收端平面航拍图

### 2.3 管节翻转装置

钢筋混凝土管节在生产时,一般是处于水平状态浇筑。在安装时,需要让混凝土管节处于垂直的状态。因此,混凝土管节在进入隧道前需要进行翻转作业。目前,小型管节多采用人力来进行翻转管节,效率低,安全隐患大。



图23 顶管机在棚洞内贯通



图24 顶管机沿纵向滑动



图25 顶管水平滑动至桥台侧面拆机区域

为解决管节翻转的问题,现场通过研制一种管节翻转装置,该翻转架对混凝土管节进行平衡支撑,通过转换吊点位置使混凝土管节平衡点发生变化实现混凝土管节的翻转。管节翻转装置,包括左支撑架、右支撑架和中间临时支撑钢架体,呈三角形布置;左右支撑架的底部设置有地脚螺栓板、顶部固定安装有半圆形轴瓦,钢轴于同一回转轴线上。该翻转架对混凝土管节进行平衡支撑,通过转换吊点位置而使混凝土管节平衡点发生变化实现混凝土管节的自动翻转。全过程机械化作业,减少人力,实现了混凝土管节的翻转并且保障了施工进度与安全。单个管节翻转效率提高50%,并且保障了施工进度与安全,如图26和27所示。



图26 翻身前检查



图 27 完成管节翻身

2.4 岩石段、回填土/岩石上软下硬地层掘进控制

(1)该岩石类矩形顶管机设计最大推力为

103 000 kN,最大推进速度为 40 mm/min,在浅覆盖层及回填土地层顶进过程中,过高的推力会造成反力墙破坏失稳、地表隆起、刀具的损耗加剧等情况,施工过程中通过设定总推力控制值为 36 000 ~ 55 000 kN,掘进过程中出现轴线偏离一定角度,及时使用纠偏油缸进行纠偏,增加减阻泥浆注入量,确保了掘进推力的可控,掘进参数详见表 4 和表 5。

表 4 掘进参数列表

| 参数名称                                                       |                                                    | 设定值                                                                                                                                | 备注                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 总推力/kN                                                     |                                                    | 36 000 ~ 55 000                                                                                                                    | 1.总推进力达到45 000 kN 以上时,增加减摩泥浆注入量;<br>2.降低推进速度                                                                                                                |
| 推进速度/(mm·min <sup>-1</sup> )                               |                                                    | 4 ~ 8                                                                                                                              |                                                                                                                                                             |
| 刀盘转速/(r·min <sup>-1</sup> )                                | 1#刀盘                                               | 1.0                                                                                                                                |                                                                                                                                                             |
|                                                            | 2#刀盘                                               | 0.7                                                                                                                                |                                                                                                                                                             |
|                                                            | 3#刀盘                                               | 1.0                                                                                                                                |                                                                                                                                                             |
|                                                            | 4#刀盘                                               | 1.0                                                                                                                                |                                                                                                                                                             |
|                                                            | 5#刀盘                                               | 1.1                                                                                                                                |                                                                                                                                                             |
|                                                            | 6#刀盘                                               | 1.0                                                                                                                                |                                                                                                                                                             |
| 刀盘扭矩/(kN·m)                                                | 1#刀盘                                               | 350 ~ 1 050                                                                                                                        | 1.刀盘额定扭矩为2 700 kN·m,脱困扭矩为3 200 kN·m,<br>2.由于刀盘切削土体面积受力不同,推进期间分别利用扭矩控制范围,当下部刀盘扭矩达到1 500 kN·m时,利用增加改良剂用量或用刀盘冲刷系统降低扭矩,挡扭矩达到1 800 kN·m时,停止推进,采取注入改良剂或空转措施,降低扭矩。 |
|                                                            | 2#刀盘                                               | 350 ~ 750                                                                                                                          |                                                                                                                                                             |
|                                                            | 3#刀盘                                               | 350 ~ 1 650                                                                                                                        |                                                                                                                                                             |
|                                                            | 4#刀盘                                               | 750 ~ 1 950                                                                                                                        |                                                                                                                                                             |
|                                                            | 5#刀盘                                               | 800 ~ 1 950                                                                                                                        |                                                                                                                                                             |
|                                                            | 6#刀盘                                               | 650 ~ 1 850                                                                                                                        |                                                                                                                                                             |
| 滚筒压力                                                       | 滚筒压力控制值为14 MPa,当滚筒压力增加至11 MPa 以上时,提升转速,并打开滚筒冲刷降低压力 |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                             |
| 推进顶部土压力/10 <sup>-1</sup> MPa                               | 0.43 ~ 0.48                                        | 1.推进倒渣期间,顶部土压上限0.05 MPa(根据地表冒浆情况及沉降数据适当调整);<br>2.夜班停机期间,打泥保压逐渐提升至0.55;<br>3.单次打泥量0.2 m <sup>3</sup> ;<br>4.根据土压下降速率,采取推进或者打泥措施提升土压 |                                                                                                                                                             |
| 泡沫原液比例/%                                                   | 2                                                  |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                             |
| 泡沫混合液/(m <sup>3</sup> ·10 <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> ) | ≥2                                                 |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                             |
| 泡沫膨胀率                                                      | 1 ~ 4                                              | 上部刀盘膨胀率为0,下部刀盘根据扭矩情况再调整                                                                                                            |                                                                                                                                                             |
| 冲水系统/(m <sup>2</sup> ·10 <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> )  | ≥1                                                 |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                             |
| 减摩泥浆/(m <sup>2</sup> ·环 <sup>-1</sup> )                    | ≥0.5                                               | 配合比为纳基膨润土:水:CMC:纯碱(质量比)=1:5:0.025:0.05;泥浆密度为1.13 g/cm <sup>3</sup>                                                                 |                                                                                                                                                             |
| 出渣方量/(m <sup>3</sup> ·10 <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> )  | 12.2 ~ 12.7                                        |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                             |
| 出渣重量/(t·10 <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> )                | 24.4 ~ 25.4                                        | 每斗重量进行相比较                                                                                                                          |                                                                                                                                                             |
| 同步打稠泥/(m <sup>3</sup> ·10 <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> ) | ≥0.2                                               | 配合比为钙基膨润土:水(质量比)=1.33:1;泥浆密度为1:1.35 g/cm <sup>3</sup> 。<br>上部为填土地层,根据地面沉降数据调整                                                      |                                                                                                                                                             |
| 二次补泥/(m <sup>3</sup> ·环 <sup>-1</sup> )                    | ≥4                                                 | 填充量根据顶部压力调整                                                                                                                        |                                                                                                                                                             |

根据当日地面沉降数据,及时调整注泥期间土仓压力及注泥浆量。土压根据地面沉降及不冒浆作为依据作为动态控制

(2)刀盘扭矩增大,可能是因为渣温高造成结刀盘泥饼,施工过程中主要通过对刀盘扭矩设置控制值,加强刀盘冲刷,加入泡沫剂改良渣土,每顶进 1 斗渣对渣温进行一次测量,同时降低上排中部刀盘转速,加快下排中部刀盘转速,有利于堆积于中部的

渣土通过螺旋输送机排出。

(3)由于该段隧道既有全断面岩层,又有上软下硬回填土、岩层复合地层,掘进期间须通过进行严格的渣土体积、重量统计,防止因超挖造成地面塌陷。

表5 天宫殿类矩形顶管掘进推力统计表 单位:t

| 环号 | 推力            | 环号 | 推力            | 环号 | 推力            | 环号 | 推力            |
|----|---------------|----|---------------|----|---------------|----|---------------|
| 1  | 空推            | 24 | 46 000~50 000 | 47 | 23 000~27 000 | 70 | 49 000~56 000 |
| 2  | 空推            | 25 | 25 000~41 000 | 48 | 26 677        | 71 | 48 000~54 000 |
| 3  | 空推            | 26 | 23 660        | 49 | 28 000~32 100 | 72 | 47 000~53 000 |
| 4  | 8545          | 27 | 22 000~25 000 | 50 | 29 000~34 000 | 73 | 46 000~53 000 |
| 5  | 26 000        | 28 | 22 000~31 000 | 51 | 31 000~37 000 | 74 | 47 000~51 000 |
| 6  | 26 700        | 29 | 38 432        | 52 | 33 000~37 000 | 75 | 41 000~52 000 |
| 7  | 39 800        | 30 | 27 000~29 000 | 53 | 35 000~38 000 | 76 | 48 900~50 000 |
| 8  | 39 800        | 31 | 28 000~33 000 | 54 | 35 000~38 000 | 77 | 44 678        |
| 9  | 34 500        | 32 | 29 000~31 000 | 55 | 33 000~38 000 | 78 | 44 500        |
| 10 | 35 000        | 33 | 29 000~31 000 | 56 | 35 000~41 000 | 79 | 44 970        |
| 11 | 24 590        | 34 | 28 000~3 1000 | 57 | 360 00~41 000 | 80 | 42 550        |
| 12 | 35 155        | 35 | 32 000~35 000 | 58 | 35 000~42 000 | 81 | 44 726        |
| 13 | 37 775        | 36 | 33 460        | 59 | 41 000~45 000 | 82 | 41 000~50 000 |
| 14 | 33 871        | 37 | 33 000        | 60 | 40 000~44 000 | 83 | 48 000~50 000 |
| 15 | 35 921        | 38 | 34 000        | 61 | 38 000~41 000 | 84 | 45 000~53 000 |
| 16 | 36 000        | 39 | 36 000        | 62 | 38 000~44 000 | 85 | 44 000~50 000 |
| 17 | 35 432        | 40 | 34 000~36 000 | 63 | 33 000~41 000 | 86 | 45 000~50 000 |
| 18 | 35 876        | 41 | 36 000        | 64 | 36 000~41 000 | 87 | 46 000~55 000 |
| 19 | 32 000~37 000 | 42 | 33 000~37 000 | 65 | 38 000~42 000 | 88 | 44 000~51 000 |
| 20 | 33 000~39 000 | 43 | 32 000~36 000 | 66 | 41 000~56 000 | 89 | 47 000~51 000 |
| 21 | 39 000~48 000 | 44 | 33 000~36 000 | 67 | 43 000~46 000 |    |               |
| 22 | 39 000~47 000 | 45 | 26 000~37 000 | 68 | 43 000~47 000 |    |               |
| 23 | 45 000~49 000 | 46 | 25 000~30 000 | 69 | 42 000~46 000 |    |               |

(4)在顶管掘进之前,对滚筒的截齿全部更换为耐磨型的截齿,对既有刀盘刀具评估后部分更换,并在施工期间加强对截齿的检查和更换。详如图 28 至图 31 所示。



图 28 仓内刀盘结饼照片



图 29 顶管贯通刀盘结饼照片(上部刀盘已冲洗)

(5)现场采用在始发端架设摄像头,24 h 对高速路进行观测,并配合无人机进行巡检(见图 32)。

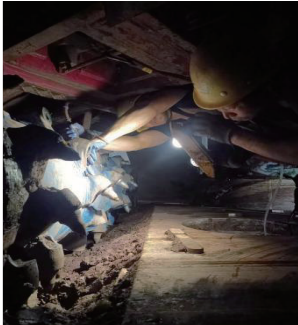


图 30 仓内更换截齿照片



图 31 贯通截齿脱落照片

3 顶管掘进风险应急处理措施

3.1 地面塌陷应急处置措施

2023 年 2 月 24 日 10:24 现场完成第 18 环顶进施



图 32 无人机巡查

工,地面监测人员进行监测工作时发现桩号 855 位置塌陷,陷坑长宽约 1 m,深约 1.5 m,该位置尚未进入内环高速,为避免后续再次出现塌陷,进行了塌陷原因分析。

根据勘察资料显示桩号 880 ~ 830 该段地层为泥岩、砂岩交互层,岩石强度在 30 kPa 左右,但实际在掘进至 860 后地层发生变化,隧道顶部变化为回填土,由于前期掘进参数主要为适应硬岩掘进,特别是顶部土压、渣土改良方面,进入回填土后顶部土压偏低、渣土改良参数不匹配,导致上部土体塌陷超挖,最终导致此次地面塌陷,在对事故分析后制定措施如下。

(1)原地面线起伏较大,浅覆盖层隧道顶部为回填土层不密实、空隙率大极易垮塌,须采取保压掘进,如图 33 所示。

(2)调整掘进参数,摸索现阶段回填土层掘进参数(主要是土压力选取、渣土改良剂加入量、改良剂型号)。

(3)塌陷区域回填渣土,陷坑内泥浆水分置换,浇筑混凝土盖板填充塌陷空腔。

(4)增加地面监测频次,布设深层地面沉降。

(5)启用黏土输送泵,增加打泥填充地层作业工序。



图 33 第 18 环顶进出现地面陷坑照片

在采取措施后,后续的掘进过程中,再未出现过地面塌陷情况。

3.1 掘进期间遇异物处理

正常掘进期间,螺旋输送机排出的是经刀盘破碎岩石泡沫剂改良后所形成的有良好塑性和流动性质量均匀的土体。但是由于类矩形顶管滚筒与刀盘部位所形成的盲区,掘进期间经常遇到大石块(由于

机场和内环高速建造时间较早,道路路基下方填筑有砂岩、泥岩及填土)、钢筋甚至异物,可能会造成刀具、甚至轴承的损坏的。在顶进过程中,安排专人通过听听土仓内滚动的异响进行判别,并对每循环渣土进行清理,并结合掘进期间刀盘扭矩是否异常,制定停机、开仓检查等方案。如图 34 至图 39 所示。



图 34 螺旋输送机出土



图 35 螺旋输送机排出的泥岩



图 36 螺旋输送机排出的砂岩



图 37 螺旋输送机排出的钢筋



图 38 开仓检查发现地质钻头图



图39 螺旋输送机排出的异物

3.3 道具及轴承更换技术措施

2023年5月28日,掘进第26环期间,掘进期间遇到的地质钻头,5号刀盘主驱动减速机发生严重异响、刀盘卡停无法启动现象造成设备停机,停机段覆盖层厚度约为4.5 m,仓内掌子上部1 m及拱顶为强/全风化泥岩、掌子面下部位为中风化泥岩,拱顶左侧空腔范围为回填土。如图40至图41所示。

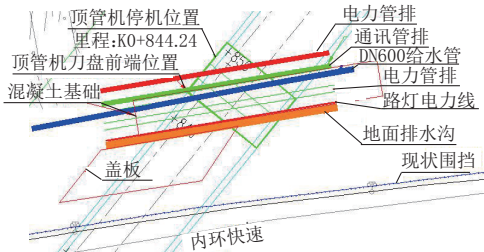


图40 停机位置平面图

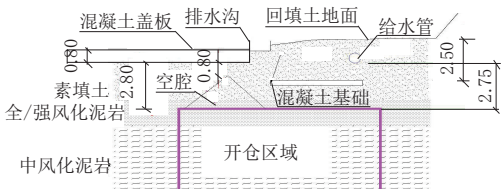


图41 开仓位置地质剖面图(单位:m)

现场采取仓内“拱顶钢管+模板+防坠网”支护方式的状态下进行开仓防护,经开仓检查发现5号刀盘部分小齿轮轴已损坏,顶管机多处刀具损坏。如图42至图46所示。

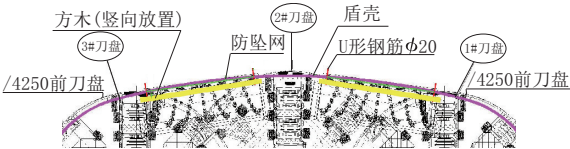


图42 开仓防护措施图



图43 开仓防护现场照片1



图44 开仓防护现场照片2



图45 损坏的小齿轮轴



图46 损坏的刀具



图47 地面开洞图照片1



图48 地面开洞图照片2

由于该停机位置尚未进入内环高速,为加快刀盘齿轮轴的更换,在地面开挖临时竖井进行设备修复,然后进行回填恢复掘进。详如图47至图49所示。

3.3 地面冒泥浆应急处理

该工程顶管掘进至高速路绿化带位置,洞顶为浅覆盖填土厚度约为4 m,采用保压掘进控制地表沉



图 49 洞口采用砂浆回填

降,期间绿化带位置多处出现冒泥浆异常情况。现场启动应急预案,隧道内及时停止掘进,保仓压,临时中断靠近绿化带处道路交通,对路面污染处进行清洗,在洞内顶管后部打入黄泥进行封堵,土仓内压力可保持稳定后再恢复掘进。详如图 50 至图 53。

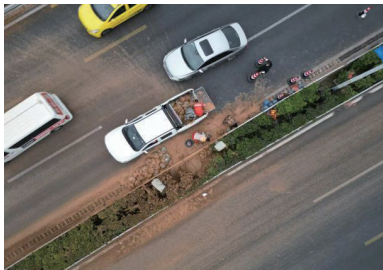


图 50 绿化带冒泥浆



图 51 隧道内泵送黄泥照片 1



图 52 隧道内泵送黄泥照片 2

5 结 论

重庆市天宫殿下穿快速路项目作为首次成功应用的岩石类矩形顶管机,虽在回填石地层使用还存在一定的局限性,在本项目顶进过程中也发生了塌



图 53 在主体后部填充黄泥

陷、障碍、冒浆等异常情况,但该工艺总体较矿山法更安全,其可行性更优,后期可通过断面标准化设计类似岩石顶管,优化设备摊销,其应用前景较好,可以为类似矩形顶管隧道提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 安关峰. 矩形顶管工程技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

[2] 马鹏, 岛田英树, 马保松, 等. 矩形顶管关键技术研究现状及发展趋势探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(10): 1677-1692.

[3] T/CMEA 14—2020, 综合管廊矩形顶管技术标准[S].

[4] 刘佼, 贾连辉, 范磊, 等. 异形断面隧道掘进机复合地层开挖自区处理关键技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(2): 345-353.

[5] 范磊, 薛广记, 舍跃斌, 等. 复合地层矩形顶管机关键技术及应用: 结合重庆天宫殿下穿快速路项目[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(9): 1605-1613.

[6] 黄伟. 大断面矩形顶管隧道管节结构优化设计[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(6): 859-867.

[7] 王金一, 邱龔. 地铁站标准化断面人行通道类矩形顶管机的针对性设计与施工技术: 以上海轨道交通 14 号线静安寺站工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(增刊 2): 565-577.

[8] 李建高. 天津新八大里黑牛城道地下通道超大断面矩形顶管工程[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增刊 1): 454-460.

[9] 李俊玲. 关于矩形顶管法施工地铁出入口始发、接收方式的研究及案例分析[J]. 城市道桥与防洪, 2021, 267(7): 203-206.

[10] 矩形顶管法在浅层地下空间施工中存在的主要问题及控制措施[J]. 城市道桥与防洪, 2022, 282(10): 174-181.

[11] 吴列成, 黄德中, 邱龔. 大断面矩形顶管法地铁站施工沉降控制技术实践: 以上海轨道交通 14 号线静安寺站工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(9): 1585-1593.

[12] 吴森阳, 陈相, 陈棚, 等. 大断面小净距矩形顶管法地铁站施工风险控制研究: 以广州地铁海傍站为例[J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(2): 382-391.

[13] 戴兵. 矩形隧道顶管在过街行人通道建设中的应用研究[J]. 城市道桥与防洪, 2024, 305(9): 174-179.

[14] 胡文. 软土地区大断面矩形顶管浅覆土下穿高速变形控制分析研究[J]. 城市道桥与防洪, 2024, 264(4): 108-114.

[15] 许源. 顶管法在城市中心轨道交通施工中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2024, 302(6): 204-207.

[16] 南力辉. 关于取消盾构管片嵌缝和手孔封堵设计的探讨[J]. 国防交通工程与技术, 2022(4): 23-25.