

软弱破碎围岩条件下大断面钻爆法隧道全断面 机械化施工支护结构设计

曹东杰¹, 李为国¹, 张建安², 李忻轶²

[1.深圳深高速基建环保开发有限公司,广东 深圳 518057;2.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:为提高山岭隧道施工信息化、机械化水平,结合深汕合作区通港大道实际项目情况,研究在软弱破碎围岩条件下,适应大断面山岭隧道全断面机械化施工的支护结构设计。根据数值模拟分析,设计采用超前管棚支护、掌子面玻璃纤维筋加固等技术措施可加强隧道围岩整体稳定性,并有效控制掌子面变形,实现大断面隧道全机械化施工。后续结合实际现场监测数据反演,形成完整隧道机械化施工技术路线,为相关类似工程提供参考。

关键词: 钻爆法隧道;机械化施工;掌子面加固;超前支护;管棚;玻璃纤维筋

中图分类号: U455.41

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)08-0214-04

0 引言

随着我国基础设施建设的飞速发展,山岭隧道工程日益增多,传统钻爆法施工的信息化、智能化、机械化程度还相对较低,无法适应目前国家倡导的安全、低碳、环保、低能耗的发展要求。因此,提高隧道机械化信息化施工水平是目前隧道工程发展的重要方向和课题^[1]。

当前众多在建或已建隧道虽然应用了大量施工机械^[2],但大多还局限在打设锚杆、架设钢架等单一工序^[3-4],还没有实现全工序的机械化施工,并且应用范围也局限于地质条件较好的小断面隧道施工,软弱破碎围岩条件下大断面隧道的全工序机械化施工配套技术尚不成熟。

深汕生态环境科技产业园基础设施及配套项目通港大道项目1#隧道为单洞四车道山岭隧道,内轮廓最大宽度近19 m,毛洞开挖面积约230 m²,洞身位于强、全风化千枚岩及砂岩等软弱围岩地层,地下水发育,并穿越破碎带等不良地质,地质条件复杂。

隧道建设拟采用全工序机械化施工,不同工序拟投入设备详见表1,全工序流程见图1。

其中,三臂凿岩台车设备作业面需求最小宽度不小于5 m,净高不小于6 m;混凝土湿喷机械手、锚杆钻注一体机施工需求作业面宽度不小于4 m,净高不小于5.5 m,其余台车等设备根据隧道开挖断面进行适配组装。

根据各工序拟投入设备参数及作业空间要求,对隧道开挖工法、超前措施、临时支护,以及隧道洞身结构进行专项设计^[5],为设备作业提供施工条件,实现隧道全机械化施工。

1 工程概况

通港大道规划为城市主干路,南起红海大道,北至深汕大道,路线全长10.6 km。设计车速60 km/h,按双向8车道设计,1#隧道按单洞4车道规模建设,全长约1.3 km,总体布置见图2。

隧道内轮廓采用三心圆,拱部半径10.0 m,边墙半径5.8 m,仰拱半径22 m,角隅半径1.5 m。隧道最大内净宽18.762 m,隧道最大内净高11.542 m(见图3)。

2 工程地质情况

拟建地区沿线地层主要为人工填土层(Q^{ml})、第四系冲洪积层(Q^{al+pl})、第四系残坡积层(Q^{dl+el}),下伏基岩主要为晚侏罗系花岗岩($J_{3\eta\gamma}$)、早侏罗系砂岩、石英岩、千枚岩等(J_{1js}),局部为早白垩系花岗岩($K_{1\eta\gamma}$)。

收稿日期:2023-06-13

作者简介:曹东杰(1987—),男,硕士,工程师,从事工程建设管理工作。

通信作者:张建安(1987—),男,硕士,高级工程师,从事隧道及地下工程设计工作。电子信箱:zhangjianan@smedi.com

表 1 全工序机械化施工设备

工序	沟槽施工	二衬养护	二衬浇筑	钢筋绑扎	防排水	仰拱	预加固及初期支护		开挖 / 地质预报
设备	整体式沟槽模板台车	温控自动喷淋养护台架	无骨架衬砌模板台车	半自动防水板铺设及钢筋定位绑扎台架	桥模一体仰拱栈桥	锚杆钻注一体机	混凝土湿喷机械手	半自动立拱装台架	三臂凿岩台车



图 1 隧道全工序机械化施工示意

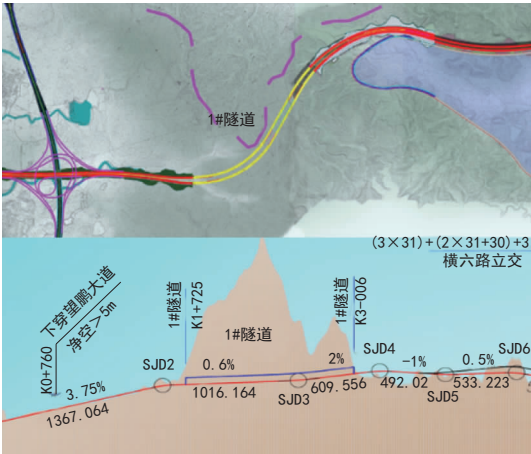


图 2 隧道总体布置

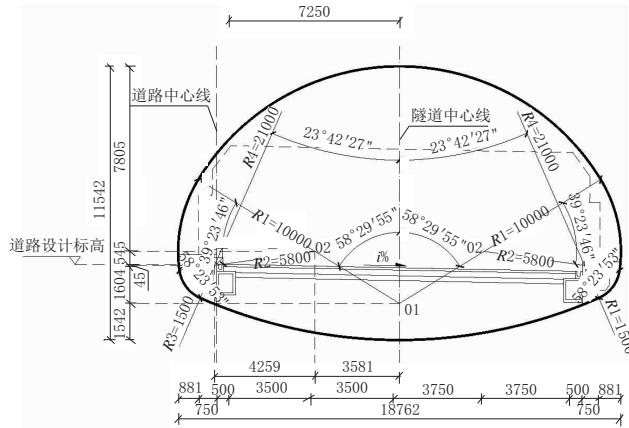


图 3 隧道内轮廓示意

受区域断裂构造影响,局部岩石变质作用强烈,受断裂构造影响,多发育母岩为沉积岩的变质岩,如千枚岩等。隧道围岩物理力学性质见表 2。

沿线主要构造有节理裂隙、莲花山断裂和韧性剪切带。基岩裂隙水主要分布于基岩的风化裂隙和构造裂隙中。

本项目机械化全断面施工段地质断面见图 4,隧道埋置于中 / 微风化砂岩层中,岩质较坚硬,局部可能出现点滴状出水,勘察判别为Ⅳ级围岩。

表 2 隧道围岩岩体物理力学性质

地层编号	地层名称	岩土状态	岩石单轴抗压强度标准值 (天然)	岩石单轴抗压强度标准值 (饱和)
⑥ ₂		强风化	9.1	2.5
⑥ ₃₋₁	千枚岩	中风化(块状)	17.1	16.9
⑥ ₃₋₂		中风化(柱状)	17.0	13.1
⑦ ₂		强风化	11.4	11.4(平均值)
⑦ ₃₋₁	砂岩	中风化(块状)	41.3	36.7
⑦ ₃₋₂		中风化(柱状)	57.4	51.9
⑦ ₄		微风化	60.5	59.7

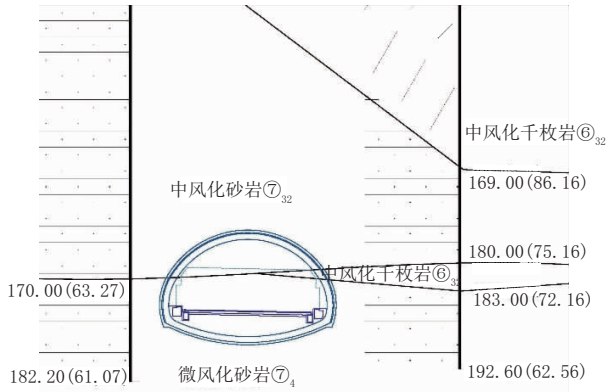


图 4 隧道所处地层横断面

3 全断面施工支护结构设计

在本项目复杂地质条件下,为实现隧道全工序机械化施工,根据凿岩台车、湿喷机械手等设备作业空间要求,设计隧道开挖工法采用预留核心土全断面台阶法(见图 5)施工。该工法可实现隧道施工从超前支护、开挖到架设初支拱架、施工锚杆及喷射混凝土,再到敷设防水层和施工二次衬砌等所有工序的机械化施工^[6]。

但在Ⅳ级围岩条件下采用该工法一次性开挖跨度大、掌子面暴露面积大,存在拱顶坍塌、掌子面滑

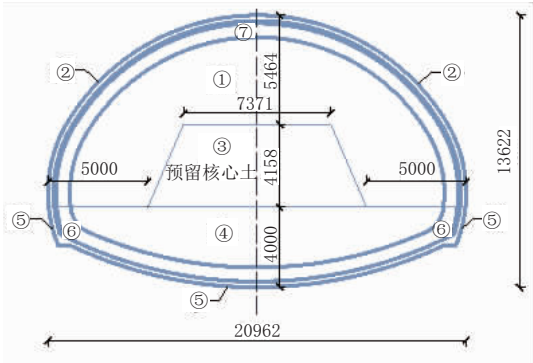


图5 预留核心土台阶法(单位:mm)

塌的风险。因此,本项目对超前支护和初期支护进行针对性的加强设计,详见表3。

表3 全断面机械化施工隧道超前支护结构设计

初期 支护	超前支护	超前管棚 $\phi 76 \times 6 \text{ mm}$, $L=9.0 \text{ m}$
	钢支撑纵距 /m	I22b 工字钢 0.75(含仰拱)
	喷射混凝土 /cm	28(含仰拱), C35
	锚杆 /m	D25 涨壳式预应力中空注浆锚杆
初期 支护	纵距 /m $\times$ 环距 /m	$L=4.5, @0.75 \times 1.0$
	掌子面加固	玻璃纤维筋

(1)超前支护和初期支护

超前支护措施采用超前管棚进行预加固。超前管棚采用 $\phi 76 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 热轧无缝钢管,外插角为 $10^\circ \sim 15^\circ$,环向间距为 40 cm ,纵向搭接长度大于 3 m ,管棚内注水灰比为 $1:1 \sim 1.5:1$ 的水泥浆,超前管棚支护措施详见图6。

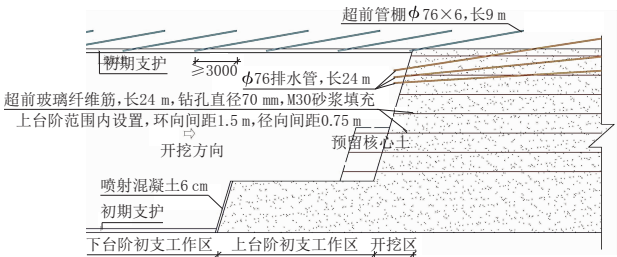


图6 超前管棚支护措施

初期支护采用常规钢架支撑结合中空注浆锚杆和喷射混凝土,详见表3。

(2)掌子面加固

针对掌子面可能的滑塌风险,参考类似工程案例^[7-8],采用玻璃纤维筋加固,单循环加固长度为 24 m ,间距尺寸为 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,梅花形布置,两个循环间需搭接 6.0 m 。成孔过程中需采取预防塌孔措施。待成孔后,尽快充填 M30 水泥砂浆并送入玻璃纤维筋,同时采取措施保证水泥砂浆填充的密实性,详见图7。

4 设计参数数值模拟分析

为分析验证设计参数合理性,对隧道支护结构

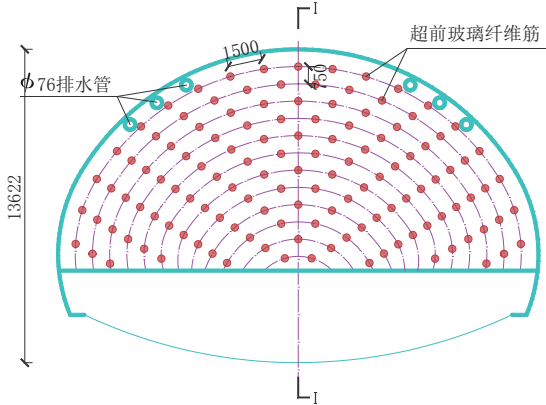


图7 掌子面玻璃纤维筋加固

运用岩土数值分析软件 MIDAS NX 建立三维空间模型进行分析(见图8)。模型建立3个 20 m 的施工段,每个施工段分成10个开挖断面,端部的两个施工段可以消除边界效应,重点研究中间施工段。

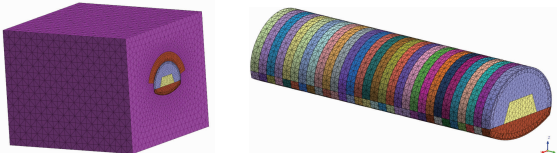


图8 分析计算模型

模型边界条件为:底面竖向位移为零,水平向自由;各侧面水平法向位移为零,竖向自由。

岩土体材料采用摩尔-库伦本构关系,取值选用《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》中附录A,IV级围岩的参数,并结合地勘报告,黏聚力 c 取 50 kPa ,摩擦角 ϕ 取 25° ,管棚与纤维筋尺寸较小,皆采用1D线单元进行模拟,以与3D单元节点耦合的方式建入模型。

施工措施模拟:(1)管棚。 20 m 长度, 3 m 搭接,每挖 8 个断面(16 m),激活下一段管棚,详见图9。

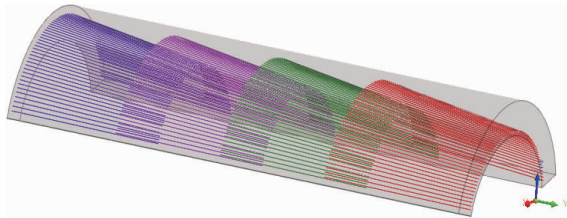


图9 超前管棚模型

(2)掌子面玻璃纤维筋加固。初始段 24 m 长,开挖至 20 m ,暂停开挖,激活下一段玻璃纤维筋,详见图10。

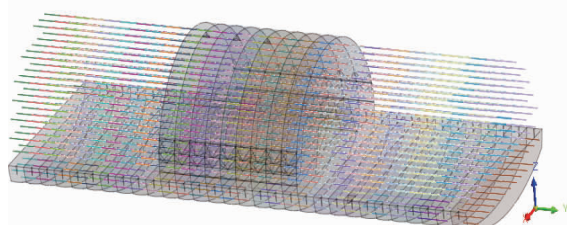


图10 掌子面玻璃纤维筋加固模型示意

施工开挖步骤模拟见图 11。

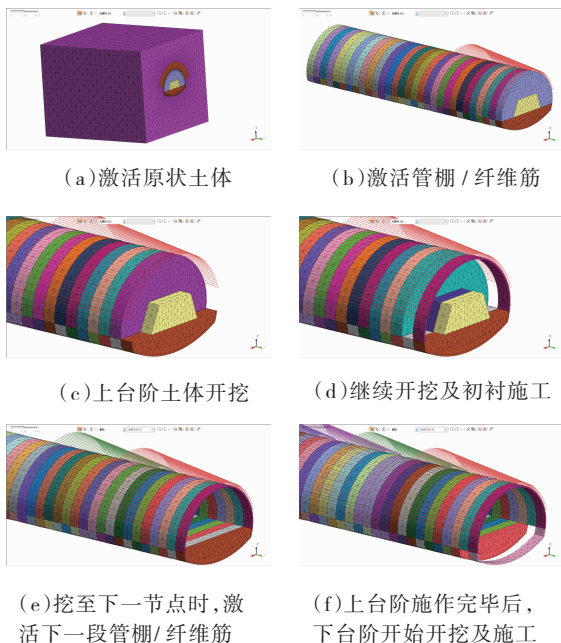


图 11 分析工序模型示意

5 理论结果分析

(1) 超前管棚分析

以位于中间区域的第三段管棚为例,管棚最大受力区域往往出现在端部,而后由于跟上的初衬施作,有了较好的支撑效果,受力逐渐减小。经计算分析,管棚受到弯矩作用约 $3 \text{ kN} \cdot \text{m}$,钢管应力约 64 kPa ,满足强度要求,结果见图 12。

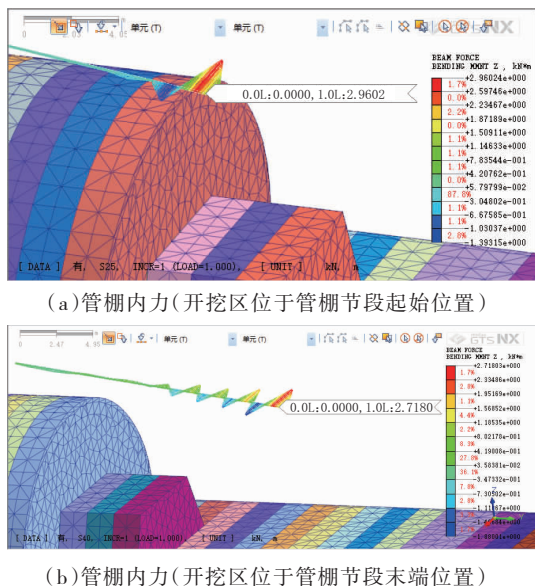


图 12 超前管棚分析结果

(2) 掌子面加固

根据分析,由于玻璃纤维筋对掌子面的加固作用,以及预留核心土的反压效应,掌子面开挖后的鼓出变形在 2 cm (锚杆附近)至 4 cm (锚杆间),掌子面

整体稳定性良好,且满足机械化施工的需求。

分析模型算得玻璃纤维筋拉力最大值约 410 kN ,其对应应力最大值约为 301 kPa (见图 13)。该结果说明,玻璃纤维筋满足自身强度要求,掌子面开挖后能够有效锚固前方岩土体,起到稳固掌子面的积极作用。

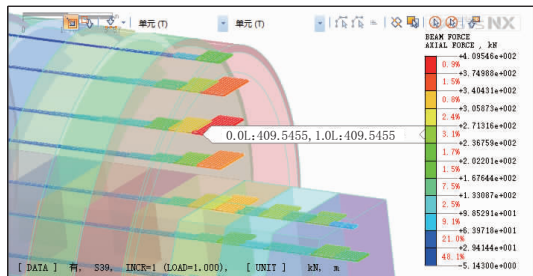


图 13 掌子面玻璃纤维筋受力分析结果

6 结论

为提高隧道施工安全性,提升隧道施工信息化、机械化程度,针对本项目隧道位于千枚岩及砂岩等软弱围岩条件,且隧道开挖断面大等实际情况,设计采用了预留核心土台阶法施工,以满足隧道全工序机械化施工条件。同时,针对软弱围岩大断面条件下预留核心土台阶法存在的风险,专项设计了超前管棚支护、掌子面玻璃纤维筋加固等技术措施。并针对专项技术措施,应用数值模拟方法进行了理论计算分析。分析结果显示,设计支护措施能够加强围岩整体稳定性,并有效控制掌子面变形,该技术方案可应用于该段隧道实际施工。

后续结合实际施工方案和监测数据反演,以进一步验证优化软弱围岩条件下大断面钻爆法隧道全机械化施工支护技术措施,形成完整设计施工技术路线,为日后类似工程提供一定参考。

参考文献:

- [1] 吴梦军,吴庆良.山岭公路隧道机械化施工现状与展望[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(3):14-21.
- [2] 林毅,王立军,姜军.郑万高铁隧道施工大型机械化配套及信息化应用探索[J].隧道建设,2018,38(8):1361-1370.
- [3] 白浪峰.大跨度公路隧道机械化施工参数优化研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(5):199-208.
- [4] 李洋,马留闯,王峰.古夫隧道软弱围岩普通型机械化配套试验性施工技术[J].隧道建设,2018,38(8):1371-1378.
- [5] 李书兵.软弱围岩隧道机械化全断面爆破开挖初期支护受力特性研究[J].隧道建设,2018,38(8):1293-1302.
- [6] 林志,谭忠,郝理.山岭隧道施工的分步式与整体式机械化[J].科学技术与工程,2019,19(36):62-72.
- [7] 薛君,郝纯宗,谭忠盛.特长公路隧道机械化配套快速施工技术研究[J].施工技术,2018(47):605-608.
- [8] 刘大刚,姚萌,张霄.郑万高铁大断面岩质隧道掌子面稳定性评价及控制措施[J].隧道建设,2018,38(8):1311-1315.