

地铁横通道转大断面正洞施工力学规律分析*

杨林¹, 汪洋², 姬付全¹, 陈培帅¹

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;

2. 中交二航局(昆明)建设有限公司, 云南 昆明 650000)

[摘要] 针对横通道转大断面正洞施工过程复杂、力学转换频繁、施工安全风险高的问题,以乌鲁木齐地铁黄山街站为背景,采用数值仿真手段,对其转正洞施工过程中围岩及支护结构应力、位移进行分析,结果表明:在横通道转正洞施工时,采用“横通道框架梁+交叉口中隔壁”的支护形式,施工过程中的位移、应力在可控范围内;转正洞施工过程中,临时支撑拆除是整个破壁施工关键工序,施工过程中应注意加强现场监测。

[关键词] 地铁;横通道;框架梁;大断面;施工力学;数值模拟

[中图分类号] U231⁺.3;U455.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0020-05

Analysis of Mechanical Law in Construction of Subway Cross Passage to Large-section Main Tunnel

YANG Lin¹, WANG Yang², JI Fuquan¹, CHEN Peishuai¹

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China;

2. CCCC SHEC(Kunming) Construction Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract: In view of the complex construction process, frequent mechanical conversion and high construction safety risk of the main tunnel with large cross section, taking Huangshan Street Station of Urumqi subway as the background, the stress and displacement of surrounding rock and support structure during the construction of the main tunnel were analyzed by numerical simulation. The results show that: During the construction of the cross passage to the main tunnel, the support form of cross passage frame beam+intersection partition wall is adopted, and the displacement and stress during the construction process are basically within a controllable range. During the construction process of the cross passage to the main tunnel, the removal of temporary supports is a key process for the entire wall breaking construction. During the construction process, attention should be paid to strengthen in-situ monitoring.

Keywords: subways; cross passage; frame beams; large section; construction mechanics; simulation

0 引言

在城市地铁修建过程中,由于场地等因素影响,进地铁正洞施工一般采用竖井或横通道形式进入,由于在转正洞过程中对正洞附近围岩多次扰动,造成其交叉口位置施工安全风险高。目前国内许多专家、学者对其开展了研究,章剑^[1]以八苏木隧道土卜子斜井转正洞施工为背景,分析了“小导洞扩挖法”“大包法”“小包法”3种转正洞施工力学规律;周嵩等^[2]以某近千米埋深的大断面双洞

TBM隧道斜井进正洞工程为背景,通过数值仿真手段对进正洞施工过程中围岩应力、应变进行了分析;刘仁旭等^[3]以东天山隧道斜井1号风道转正洞为背景,研究分析扩挖法直接进正洞施工可行性;刘毅等^[4]以深圳轨道交通工程新莲区间隧道斜井转正洞施工为背景,研究了垂直挑顶进洞施工方案、施工流程和施工要点。兰少波^[5]以某地铁2号线交叉通道转主隧道为背景,分析了“双孔间隔柱法”“扇形扩张法”“闸门爬升法”3种方法的力学响应。以上所涉及的横通道或正洞断面较普通,鲜有高横通道转大断面隧道施工案例,而这类情况施工安全风险更突出。鉴于此,本文以乌鲁木齐地铁黄

* 中交二航局科技研发项目(EHYF-2020-B-11-085)

[作者简介] 杨林,高级工程师,E-mail: 744417987@qq.com

[收稿日期] 2024-09-20

山街站长高横通道转大断面正洞施工为背景,对转正洞施工力学进行分析,验证了所采取支护措施的可行性,为今后工程设计和施工提供参考。

1 工程概况

乌鲁木齐地铁黄山街站全长 248m,车站主体结构开挖跨度 23.4m,开挖高度 21.9m,埋深 25.1~33.9m,共设置 3 座竖井及横通道,车站主体采用双侧壁导坑法施工。车站段地质条件复杂,施工难度大,地下水位在车站底板以上,地层主要由第四系全新统杂填土、中更新统圆砾、卵石、第三系全风化砾岩、侏罗系强风化~中风化泥岩构成,场地地表普遍分布厚度不均的人工填土,其地质情况如图 1 所示。

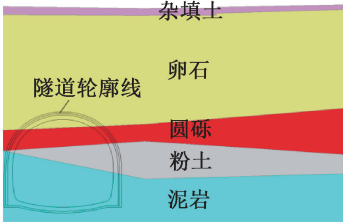


图 1 隧道断面地质剖面

Fig.1 Geological profile of tunnel section

本工程中横通道高度为 24.5m,宽 6m,由横通道进正洞需进行破壁施工,施工过程中由于围岩多次扰动,交叉口处支护结构受力体系转换频繁,施工安全风险极高。为降低施工安全风险,横通道破壁前,在与正洞交叉口位置施作框架梁支撑体系,框架梁穿过横通道中隔壁顶住横通道初支顶部,通过“框架梁+横通道中隔壁”联合支撑体系作用(见图 2),避免力系转换过程中支护结构受力过大而出现破坏情况。

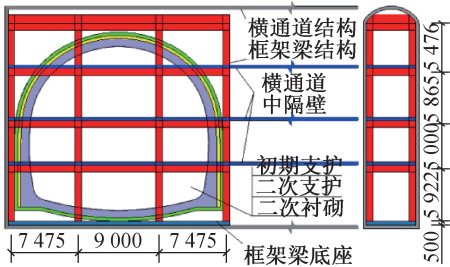


图 2 框架梁支撑体系

Fig.2 Support system of framework beam

2 三维数值模拟

2.1 模型建立

为尽量减少边界效应的影响,在垂直于正洞方向长度按 2 倍洞径(即 80m),竖向取 70m,沿正洞方向取 48m,模型从上往下依次为杂填土、卵石、圆砾

及泥岩,如图 1 所示。模型中正洞隧道初期支护、二次支护及二次衬砌,横通道初期支护,框架梁均采用三维实体单元模拟,隧道临时支护及横通道临时支护均采用板单元模拟,如图 3 所示,土体采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,支护结构采用弹性本构模型,除了模型上表面为自由面外,其余面均采用法向位移约束。

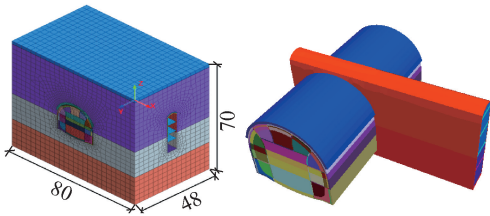


图 3 三维模型(单位:m)

Fig.3 Three dimensional model(unit:m)

对于初期支护参数,按刚度等效的原则将钢拱架弹性模量折算到初期支护上计算^[6-8]。其等效计算公式如下:

$$E_c = E_0 + \frac{A_s E_s}{A_c} \tag{1}$$

式中: E_c 为折算后初期支护弹性模量(MPa); E_0 为原初期支护喷射混凝土弹性模量(MPa); A_s 为钢拱架或钢格栅拱架截面面积(m^2); E_s 为钢材弹性模量(MPa); A_c 为混凝土截面面积(m^2)。

计算参数如表 1 所示。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

项目	弹性模量/MPa	泊松比	重度/($N \cdot m^{-3}$)	黏聚力/($N \cdot m^{-2}$)	内摩擦角/($^{\circ}$)
杂填土	1	0.32	18 000	10×10^3	15
卵石	30	0.32	19 000	30×10^3	24
圆砾	70	0.30	21 000	100×10^3	30
泥岩	200	0.30	23 000	300×10^3	30
梁柱	35×10^3	0.20	24 000	—	—
超前加固	100	0.29	21 000	100×10^3	26
横通道支护	31.9×10^3	0.23	23 000	—	—
隧道初期支护	32.5×10^3	0.23	23 000	—	—
隧道二次支护	32.7×10^3	0.23	23 000	—	—
隧道二次衬砌	31×10^3	0.23	23 000	—	—
横通道横撑	34.5×10^3	0.23	23 000	—	—

2.2 开挖工序说明

在数值模拟过程中,开挖顺序与实际一致,如图 4 所示,单次开挖进尺 1.5m,左、右导洞错距 12m,导洞内台阶错距 3m;中导洞上台阶左、右侧错开 12m,中下台阶错距 3m;临时支撑一次拆除长度及二次衬砌一次施工长度均按 9m 算。

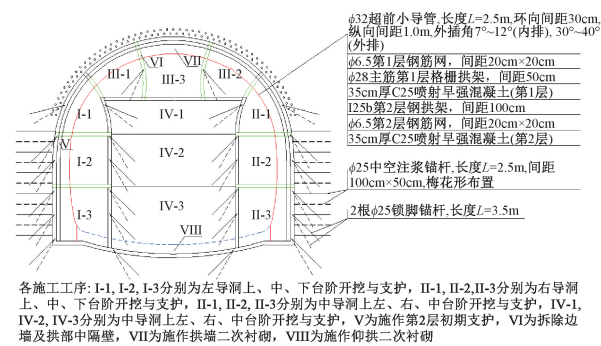


图 4 大断面隧道支护及工序

Fig. 4 Large cross-section tunnel support and process

3 计算结果分析

3.1 位移结果

3.1.1 地表竖向位移分析

在交叉口地表(地表测线 1)及横通道顶部地表(地表测线 2)设监测点,隧道开挖完成后其监测曲线如图 5 所示;取 2 个地表测点中心点,其随着隧道破壁施工竖向位移历程曲线如图 6 所示。

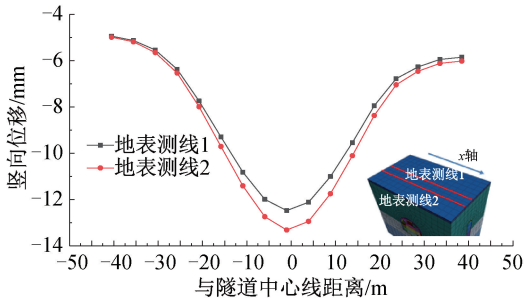


图 5 地表测点竖向位移曲线

Fig. 5 Vertical displacement curves of surface monitoring points

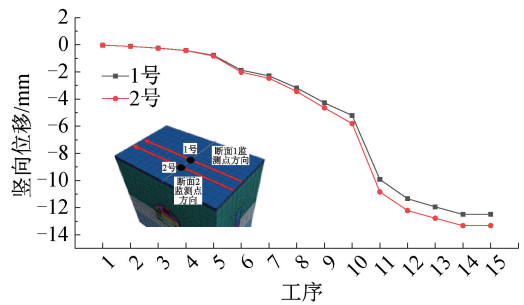


图 6 地表特征点竖向位移里程曲线

Fig. 6 Vertical displacement mileage curves of surface characteristic points

在大断面隧道开挖完成后,地表竖向位移云图如图 5 所示。由图可看出,在隧道开挖完成后,地表最大位移出现在交叉口正上方位置,地表沉降呈典型凹槽状,在隧道中心上方地表沉降值最大,其中地表测线 1 最大沉降值为 12.48mm,地表测线 2 最

大沉降值为 13.32mm。这主要是由于位移是从横通道破洞施工开始,横通道开挖过程中的位移暂时清零,计算位移都是相对于破洞前施工的位移;另外,横通道范围支护措施较强,很好地支承围岩,抑制了隧道开挖过程中围岩进一步沉降。

由地表特征点历程曲线可看出,在拆除边墙及拱部临时支护前即工序 10 时,断面 1 隧道上方地表沉降值为 5.21mm,断面 2 隧道上方地表沉降值为 5.81mm,隧道开挖完成后断面 1 隧道上方地表沉降值为 12.74mm,断面 2 隧道上方地表沉降值为 13.58mm;拆撑前断面 1,2 的地表沉降值分别占总沉降值的 40.90%,42.78%,后续过程的沉降占总沉降的 57%以上,这说明拆除临时支护的过程是整个隧道开挖过程的重点工序,在施工过程中要加强监控量测。

3.1.2 横通道顶部位移分析

由图 7 可看出,整个曲线主要分 2 部分,第 1 部分在工序 10(临时支撑拆除)以前,第 2 部分在工序 10 后;从数值上看,工序 10 施工时横通道顶部最大沉降值为 4.18mm,隧道开挖完成后横通道支护结构顶部最大沉降值为 11.58mm,后续过程的沉降占总沉降的 63.9%。

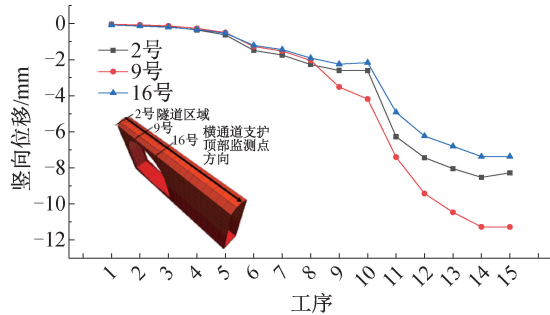


图 7 横通道顶部各特征点竖向位移曲线

Fig. 7 Vertical displacement curves of each characteristic point at the top of the cross passage

3.1.3 交叉口周边位移分析

由图 8 可看出,竖向位移除了仰拱部位为隆起外,其他部位都为沉降,越靠近拱顶沉降越大,最大沉降值为 11.65mm,最大隆起值为 8.31mm。在施工过程中,整个水平位移呈现出向隧道内外扩大趋势,且由图 8 还可看出,先行洞边墙测点水平位移值比后行洞边墙测点水平位移值要小,主要是由于先行洞开挖时已对后行洞范围围岩产生扰动,造成其变形值相对较大,另外,同侧测点水平位移值变化规律基本一致,最大水平位移值出现在后行洞边墙部位,其值为 1.39mm。

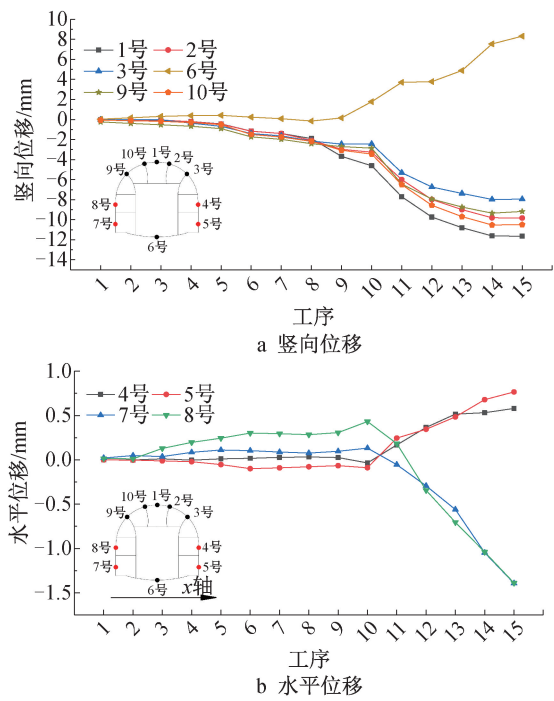


图 8 交叉口周边各特征点位移曲线

Fig. 8 Displacement curves of various characteristic points around the intersection

3.1.4 框架梁位移分析

由图 9 可看出,在隧道开挖过程中,框架梁位移也随施工进行在不断变化,其中最大沉降值出现在 5 号和 9 号测点,也就是在隧道顶部范围,最大沉降值为 10.3mm,在框架梁中底部出现隆起,最大隆起值为 3.3mm;从整个曲线的变化规律来看,在工序 10 也就是拆除临时支护结构时,各测点位移开始出现突变,不断增大,随后趋于平缓。竖向位移受隧道开挖影响较严重的部位主要集中在隧道上、下方周边梁柱上,远离隧道受影响较小,其中隧道上方出现沉降、下方出现隆起,与隧道周边围岩位移变化一致;框架梁水平位移在靠近横通道末端位置变化相对较大,其最大水平位移值为 1.53mm。

3.2 应力分析

隧道开挖后各支护结构及围岩应力云图如图 10、11 所示。

由横通道支护结构应力云图可看出,隧道开挖完成后,对原横通道的应力扰动主要集中在隧道轮廓周边,且局部存在受拉情况,其中拱顶和仰拱部位最严重,仰拱位置最大拉应力值为 5.51MPa,可能会出现混凝土开裂情况。

由隧道支护结构应力云图可看出,在隧道开挖过程中,隧道支护结构在靠近横通道位置会出现局部应力集中,导致应力值超过混凝土极限强度值,其中初期支护最大拉应力出现在仰拱部位,其最大

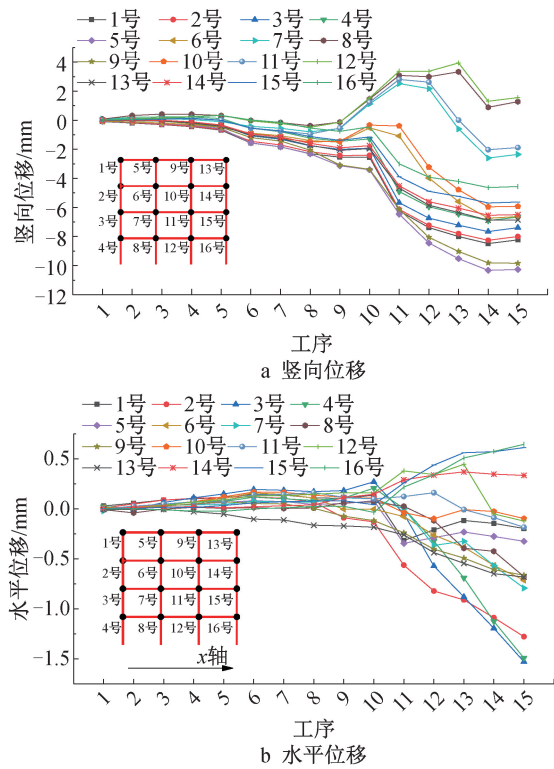


图 9 框架梁各特征点位移曲线

Fig. 9 Displacement curves of each characteristic point of the frame beam

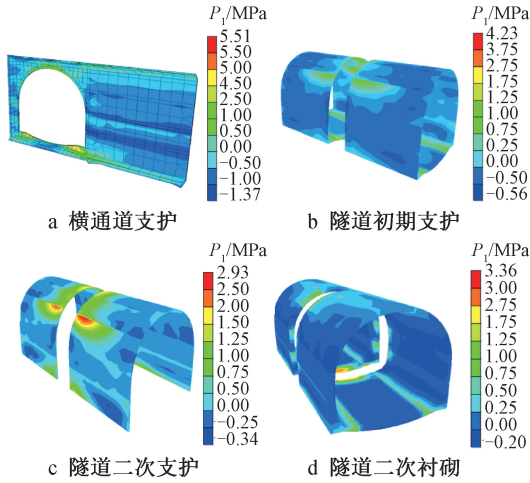


图 10 支护结构最大主应力云图

Fig. 10 The maximum principal stress of support structure

值为 4.23MPa;二次支护的最大拉应力出现在隧道左、右导洞顶部位置,最大值为 2.93MPa;二次衬砌最大拉应力位置出现在仰拱部位,其最大值为 3.36MPa。在施工中可对这些部位适当采取加强措施,防止开裂。

由隧道开挖后围岩应力分布图可看出,隧道开挖后其隧道周边围岩应力发生重分布,在隧道拱顶及仰拱部位出现应力松弛情况,隧道边墙部位出现

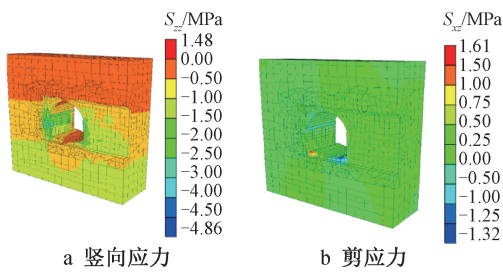


图 11 围岩应力云图

Fig. 11 Stress of surrounding rock

应力集中,其最大竖向应力值为 4.8MPa;围岩的最大剪应力主要出现在隧道拱肩和墙脚部位,最大剪应力值为 1.61MPa。

3.3 围岩塑性区分析

隧道开挖后围岩塑性区分布情况如图 12 所示。

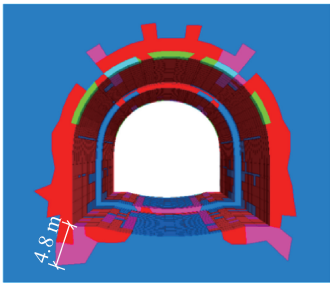


图 12 围岩塑性区

Fig. 12 Plastic zone of surrounding rock

由图 12 所示围岩塑性区分布情况可看出,隧道开挖完成后,围岩塑性区主要集中在隧道周边,其中最大塑性区深度出现在隧道墙脚部位,最大深度为 4.8m,在施工中要注意加强对墙脚部位加固,避免由于承载力不足而导致隧道上方地表出现较大沉降;在横通道与隧道交叉口位置,塑性区主要集中在隧道拱部上方位置。

4 结语

本文针对乌鲁木齐地铁横通道转正洞施工高风险问题,通过数值模拟手段对其施工过程中地表、支护结构及围岩位移、应力进行分析,得到以下结论。

1)在横通道转正洞施工时,采用横通道框架梁+交叉口中隔壁的支护形式,施工过程中的位移、应力基本在可控范围内。

2)转正洞施工过程中,临时支撑拆除是整个破壁施工的关键工序,施工过程中应注意加强现场监测。

参考文献:

[1] 章剑. 软弱围岩斜井转正洞工法动态施工力学行为分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
ZHANG J. Analysis of dynamic mechanical behavior during construction from an inclined shaft to the main tunnel in soft surrounding rock [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

[2] 周嵩, 潘岳, 刘永胜, 等. 极高地应力破碎地层斜井进正洞力学行为分析及施工优化研究 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61(4): 142-150.
ZHOU S, PAN Y, LIU Y S, et al. Mechanical behavior analysis and construction optimization for inclined shaft transitioning to main tunnel in extreme-highly stressed and fractured strata [J]. Modern tunnelling technology, 2024, 61(4): 142-150.

[3] 刘仁旭, 余昌平, 李庆鑫. 东天山隧道斜井及风道转正洞交叉口扩挖法施工技术研究 [J]. 公路, 2022, 67(7): 436-440.
LIU R X, YU C P, LI Q X. Study on construction technology of expanding excavation method at intersection of inclined shaft and positive tunnel in East Tianshan tunnel [J]. Highway, 2022, 67(7): 436-440.

[4] 刘毅, 张勇, 彭振, 等. 大跨地铁隧道斜井进洞垂直挑顶施工关键技术 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57(4): 201-207.
LIU Y, ZHANG Y, PENG Z, et al. Vertical roof ripping construction techniques for excavation of main tunnel from inclined shaft: a case study of the large-span metro tunnel in soft surrounding rock [J]. Modern tunnelling technology, 2020, 57(4): 201-207.

[5] 兰少波. 地铁车站交叉通道与主隧道转换段施工方法优化 [J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(8): 165-167.
LAN S B. Optimization of construction method for transition section between subway station intersection and main tunnel [J]. Communications science and technology Heilongjiang, 2023, 46(8): 165-167.

[6] 欧敏, 李祥东, 彭小丽, 等. 特大断面浅埋偏压隧道双侧壁工法工序优化分析 [J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(6): 96-100.
OU M, LI X D, PENG X L, et al. Optimization analysis of double-side wall construction method for super-large section shallow-buried bias tunnel [J]. Construction technology, 2024, 53(6): 96-100.

[7] 秦玉宾. 浅埋偏压小净距隧道施工方案优化 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(10): 70-76, 82.
QIN Y B. Construction scheme optimization of shallow buried, bias and small clear distance tunnel [J]. Construction technology, 2023, 52(10): 70-76, 82.

[8] 赵树杰, 邓洪亮, 李英槐, 等. 浅埋偏压隧道 CRD 法施工方案优化研究 [J]. 施工技术, 2019, 48(7): 103-108.
ZHAO S J, DENG H L, LI Y H, et al. Study on optimization of construction scheme for shallow buried and small clear distance tunnel with CRD method [J]. Construction technology, 2019, 48(7): 103-108.