

软弱围岩隧道悬臂掘进机铣挖法开挖参数优化研究

康向文¹, 刘永奎¹, 李 正², 张同乐³

¹国家能源集团西藏电力有限公司加查冷达分公司, 西藏 山南市

²中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京

³中国铁路北京局集团有限公司保定工务段, 河北 保定

收稿日期: 2025年9月20日; 录用日期: 2025年10月10日; 发布日期: 2025年10月24日

摘 要

悬臂式掘进机在隧道施工中应用越来越广泛, 尤其在变形、爆破扰动控制严格的隧道工程中优势明显。目前有关悬臂式掘进机破岩机理、截割效率以及地质适应性等方面的研究成果较为丰富, 但在悬臂掘进机铣挖隧道的开挖参数优化方面, 研究相对较少, 相关成果也不成体系。论文以某公路隧道涉铁段为工程背景, 开展了铣挖施工参数优化数值仿真分析和现场监测试验研究。根据数值仿真和现场实测结果, 建议该公路隧道涉铁段V级围岩铣挖施工过程中上台阶长度采用24 m、下台阶长度采用24 m, 开挖进尺控制在2 m以内, 台阶高度无量纲比为10 (上台阶): 5 (下台阶): 4.2 (仰拱)。

关键词

软弱围岩隧道, 悬臂式掘进机, 参数优化, 数值仿真

Research on Optimization of Construction Parameters of Milling Method of Cantilever Tunnel Boring Machine in Soft Rock Tunnel

Xiangwen Kang¹, Yongkui Liu¹, Zheng Li², Tongle Zhang³

¹Garcha Lengda Branch of National Energy Group Tibet Electric Power Co., Shannan City Xizang

²China Electric Construction Group Beijing Survey and Design Institute Co., Beijing

³China Railway Beijing Group Company Limited Baoding Maintenance Section, Baoding Hebei

Received: September 20, 2025; accepted: October 10, 2025; published: October 24, 2025

Abstract

The cantilever type roadheader is increasingly utilized in tunnel construction, particularly in projects

文章引用: 康向文, 刘永奎, 李正, 张同乐. 软弱围岩隧道悬臂掘进机铣挖法开挖参数优化研究[J]. 土木工程, 2025, 14(10): 2460-2469. DOI: 10.12677/hjce.2025.1410265

requiring strict control of deformation and blasting disturbances. While extensive research has addressed its rock-breaking mechanisms, cutting efficiency, and geological adaptability, systematic studies on the optimization of excavation parameters remain limited. This study conducts numerical simulations and on-site monitoring to optimize milling construction parameters for the highway tunnel, which intersects with a railway. Findings recommend a milling configuration with an upper step length of 24 m, a lower step length of 24 m, controlled excavation footage of 2 m, and a dimensionless step height ratio of 10:5:4.2 (upper step: lower step: elevation arch).

Keywords

Soft Surrounding Rock Tunnel, Cantilever Type Roadheader, Parameter Optimization, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前水工隧洞和交通隧道施工通常采用“钻爆法”施工,钻爆法施工爆破震动大、安全风险大[1]。相较于钻爆法,悬臂式掘进机铣挖施工为机械开挖法的一种方式,具有安全环保、自动化程度高、围岩扰动小、减少超挖等优点,在强度较低的围岩中掘进效率较高[2]。在岩石隧道近接施工过程中,采用悬臂式掘进机开挖,是降本止损、提质争效的主要技术路径。

近年来,部分学者在悬臂式掘进机地质适应性、二衬步距以及支护形式等方面开展了初步探索,也取得部分成果。黄基富[3]结合相关工程案例,分析了不同断面大小、地质条件下的地铁、铁路隧道采用悬臂掘进机施工的工效、能耗问题,综合对比分析了其主要性能和适应性,对能否采用悬臂掘进机、如何选择、主要运作性能等提出了建议,并将悬臂式掘进机隧道分为沉降变形不敏感和敏感地段,不敏感地段可以弱化原初期支护。李志军[4]等依托高原某铁路隧道,从开挖方案、施工进度等层面研究了悬臂掘进机在松散堆积岩体中的适用性,结合开挖试验段结果,表明悬臂掘进机法适用于台阶法高度 4.0~7.5 m、宽度 5.5~8.5 m 的断面开挖。李昌宁和雷向峰[5]依托武广客运专线几座大断面隧道,认为在围岩强度适中、节理裂隙发育、变形控制严格的条件下,采用悬臂掘进机施工效果显著。武发辉[6]根据悬臂式掘进机在泥岩隧道中的适用情况,根据各种机械长度得到掌子面与二次衬砌之间需要 111 m。朱廷宇[7]依托滇红西隧道,通过数值模拟分析得出在小断面Ⅳ级围岩,初期支护可取消系统锚杆,并可以加大钢架间距的结论。然而,在悬臂掘进机铣挖隧道的开挖参数优化方面,研究相对较少,此外,在绝大多数实际工程中,悬臂式掘进机隧道在施工过程中开挖参数不明确也是一种普遍现象,部分工程为了施工方便,松散破碎地层的上台阶长度甚至超过 50 m,存在较大的安全隐患。

本文以某公路隧道为依托工程,采用三维有限差分程序开展数值仿真分析,研究不同开挖参数(台阶高度、台阶长度和开挖进尺)对于围岩变形控制和支护结构受力的影响程度,确定合适的开挖参数,以期为依托工程施工提供理论依据,也为类似工程提供借鉴。

2. 工程概况

某公路隧道为抽水蓄能工程厂区内新建两车道公路隧道,进口段与既有铁路紧邻,最小间距约 100 m,涉铁区段围岩以石英千枚岩为主,夹少量的碳质千枚岩条带。研究对象为进口 K107+820~K107+941Ⅳ级围岩段,埋深为 50 m。根据点荷载试验该区段岩石垂直层理抗压强度 20 MPa~40 MPa,平行层理抗压

强度 12 MPa~25 MPa，现场掌子面及边墙照片见图 1。根据隧道施工进度与现场围岩条件、施工方法等适配关系，采用徐工 XTR6/280 悬臂式掘进机两台阶法、带仰拱进行施工。



Figure 1. Photos of the tunnel face and side walls of a highway tunnel with Grade V surrounding rock
图 1. 某公路隧道 V 级围岩掌子面和边墙照片

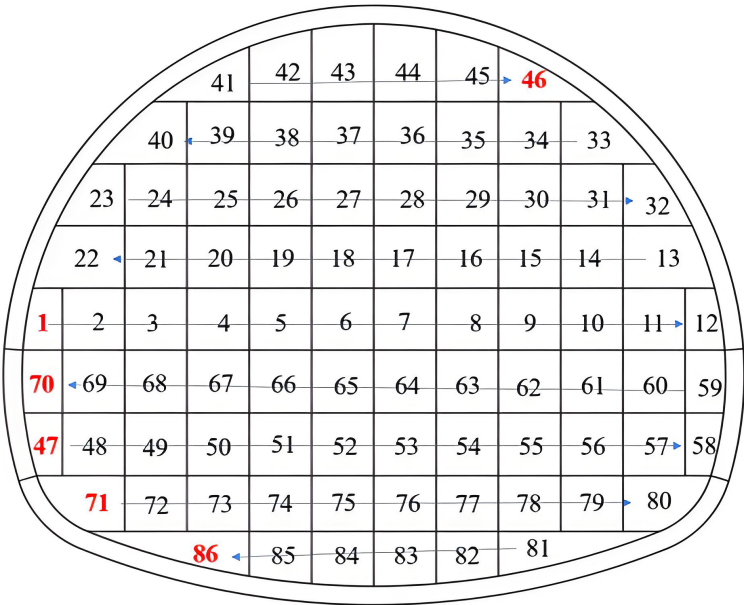


Figure 2. Cantilever roadheader excavation path
图 2. 悬臂式掘进机开挖路径

3. 铣挖隧道施工下围岩的变形规律

3.1. 数值模型

为降低模型边界效应的影响，模型尺寸设定为 100 m × 100 m × 90 m。围岩采用莫尔 - 库仑本构模型，支护结构采用弹性本构模型。徐工 XTR6/280 悬臂式掘进机截割头最大截割面积和体积分别为 0.942 m²、0.997 m³，据此，可在数值模拟中将悬臂掘进机单次开挖近似定义为“null”去体积约 1 m³ 的单元，

悬臂掘进机开挖网格和开挖路径如图 2 所示，其中上台阶共计 46 组，下台阶 24 组，仰拱 16 组。

为在数值模拟中真实反映悬臂式掘进机施工力学响应，本文采用荷载梯度释放法[8] [9]来模拟隧道开挖，通过“null”去一个组并即刻进行一次平衡，待达到预定收敛后进行下一循环的开挖，直至隧道开挖完成。此方法将原本一次性释放的围岩应力分散到循环开挖的掌子面每一个分组单元中，实现了围岩应力的均匀梯度释放，延长了开挖及应力释放的全过程。该模拟方式与悬臂式掘进机的实际开挖工况较为相符，提升了数值模拟的仿真度。数值模型均采用 6 面体单元，地层参数根据地勘资料及现场实测所得，见表 1，初期支护结构设计参数见表 2。

Table 1. Main rock mechanical parameters of surrounding rock and support
表 1. 围岩及支护主要岩体力学参数

材料参数	密度/kg·m ⁻³	弹性模量/GPa	泊松比 μ	摩擦角/°	粘聚力/MPa	抗拉强度/MPa
V 级围岩	2200	1.25	0.40	22	0.10	1.00
初期支护	2420	23	0.2			

Table 2. Some parameters of the initial support structure of grade V surrounding rock
表 2. V 级围岩初期支护结构部分参数

初支型钢钢架 (型号@间距/cm)	喷射混凝土 (型号、厚度/cm)	钢筋网 ($\phi 8$ /间距 cm)	系统锚杆		
			型号	长度/m	环×纵/(m×m)
I18@60	24	20×20	D25 中空注 浆锚杆	3.5 (拱部) 6.0 (边墙)	0.6×1.0

3.2. 围岩变形规律

在最小台阶理论长度条件下，即上台阶开挖长度 18 m (含设备长度 15.5 m，设备需前进、后退、转向工作长度 2.5 m)、下台阶开挖长度 18 m，上台阶高度 5.5 m、下台阶高度 2.0 m、仰拱高度 2.1 m，不同开挖阶段围岩水平位移和竖向位移如图 3，图 4 所示。

根据图 3 和图 4，在隧道施工过程中，围岩以竖向变形为主，施工结束后拱顶累计沉降 32.32 mm。施工过程中，上台阶开挖引起的拱顶沉降 17.33 mm，占拱顶累计沉降量的 53.62%；下台阶开挖后拱顶沉降 28.66 mm，占拱顶累计沉降量的 35.06%，而仰拱开挖扰动仅占 11.32%。可以看出，在隧道施工过程中，上台阶开挖对围岩的扰动最为显著，是施工中的关键步序。

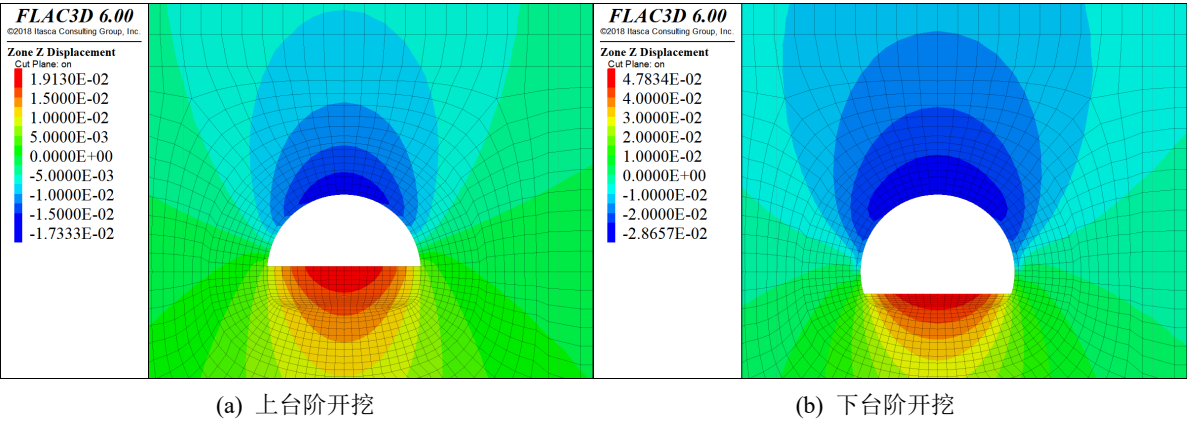


Figure 3. Cloud diagram of vertical displacement of surrounding rock during excavation (unit: m)
图 3. 开挖过程中围岩竖向位移云图(单位: m)

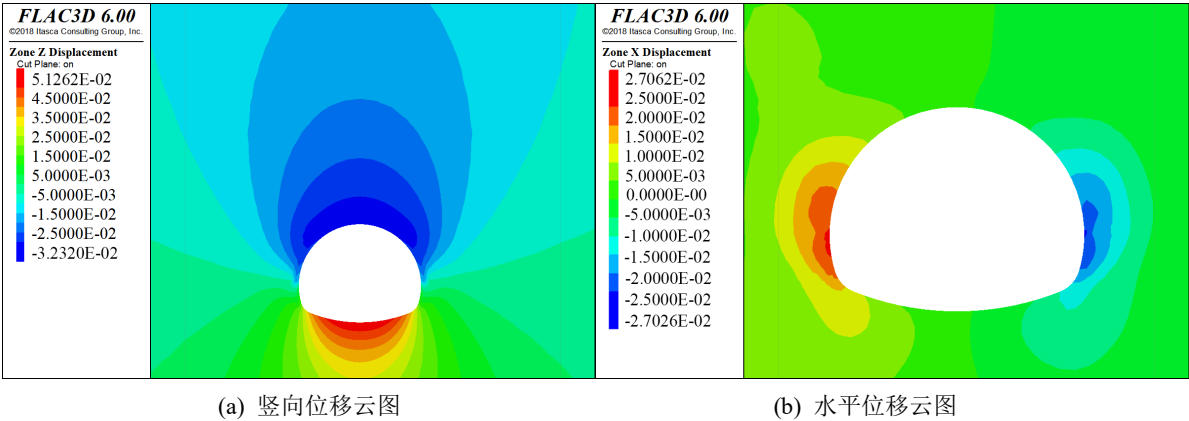


Figure 4. Surrounding rock displacement cloud map after excavation (unit: m)
图 4. 开挖结束后围岩位移云图(单位: m)

4. 不同开挖参数对围岩变形的影响

为模拟隧道开挖关键参数对围岩稳定性的影响，考虑台阶高度、台阶长度和开挖进尺三种敏感性因素，选取不同参数工况进行数值仿真分析。研究中，监测断面选在模型纵向中间位置，监测点布置如图 5 所示。

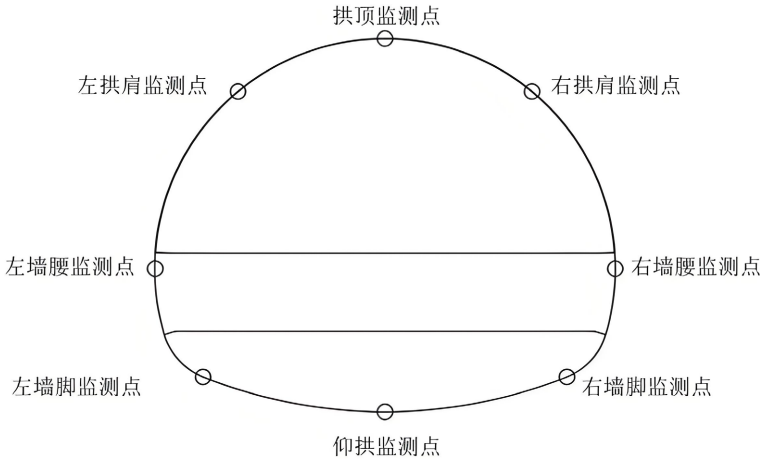


Figure 5. Layout of characteristic monitoring points
图 5. 特征监测点布置

4.1. 不同台阶高度对围岩变形的影响

铣挖隧道围岩变形规律揭示上台阶开挖是关键步序，因此考虑上台阶不同高度，仰拱高度 2.1 m 不变。为保证悬臂式掘进机可以有铣挖的操作空间，分析中，上台阶高度分别选取 6.0 m、5.5 m、5.0 m、4.5 m，台阶长度同前，循环进尺按 2.0 m 考虑。计算结果如表 3 所示。

从结果可以看出，随上台阶高度降低，拱顶沉降明显减小，而边墙水平收敛呈现先减小后增大的变化趋势，其中上台阶高度 5.0 m 时，墙腰水平收敛最小。据此，施工中推荐上台阶高度选择 5.0 m，根据开挖尺寸，下台阶即为 2.5 m，仰拱 2.1 m。将优化后的 5.0 m 上台阶高度工况与现场初期采用的 6.0 m 台阶高度的围岩变形监测数据进行对比，拱顶沉降降低了 16.60%，拱腰水平收敛降低 41.56%。台阶高度无量纲化处理后上台阶高度:下台阶高度:仰拱高度 = 10:5:4.2。

Table 3. The influence of different step heights on the displacement changes of each monitoring point
表 3. 不同台阶高度对各个监测点位移变化的影响

上台阶高度/m	竖向位移/mm		水平收敛/mm		
	拱顶沉降	仰拱隆起	拱肩收敛	墙腰收敛	墙脚收敛
6.0	35.48	53.11	16.16	49.11	26.33
5.5	32.32	51.26	15.62	40.76	22.32
5.0	29.59	49.89	13.05	28.70	20.01
4.5	26.35	47.56	10.27	34.25	21.46

4.2. 不同台阶长度对围岩变形的影响

徐工 XTR6/280 悬臂式掘进机机身长度 15.5 m，为保证机器有铣挖的操作空间，上台阶长度最小 18 m，数值模拟中，只改变上台阶长度，上台阶长度分别采用 18~40 m，下台阶长度分别采用 18~30 m，台阶高度取值按 4.1 节优化后结果取值。不同工况的分析结果如图 6 所示。

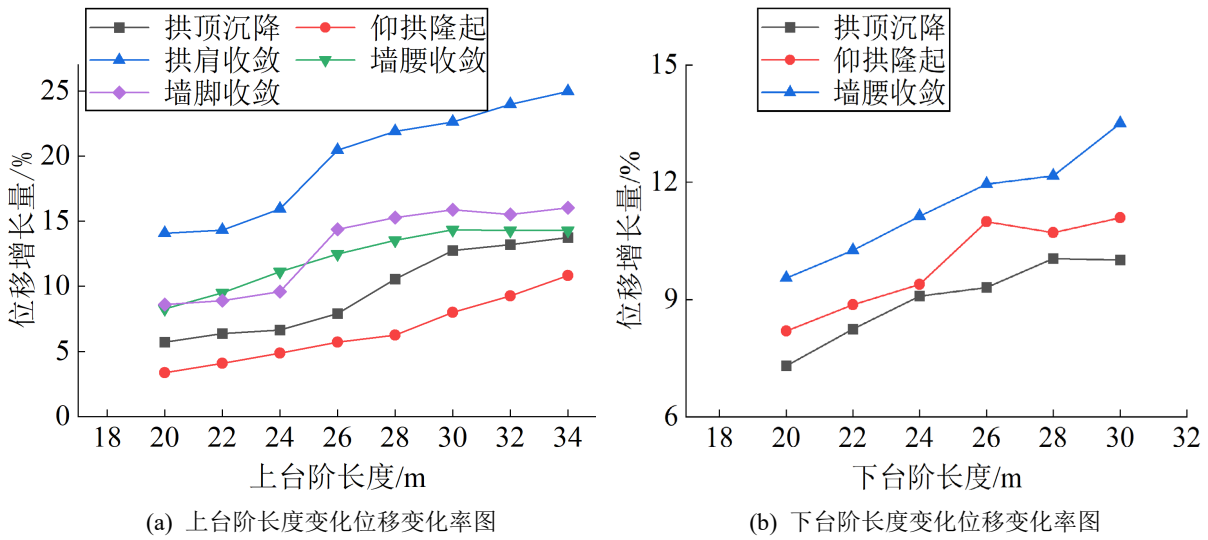


Figure 6. Deformation growth rate diagram for different step lengths
图 6. 不同台阶长度变形增长速率图

由图 6 可知，随着台阶长度不断增加，围岩变形量逐渐增加，上台阶长度增至 24 m 后围岩拱顶下沉、拱肩和墙脚水平收敛显著增长。上台阶长度在 24 m 范围以内隧道变形量增长量(除拱肩部位)在 7% 以内，上台阶长度在 24~30 m 范围内隧道变形增长量为 10% 左右，上台阶长度大于 30 m 各部位变形增长量为 15% 以上；下台阶长度变化对隧道整体变形影响较小，为使得隧道支护结构尽早的封闭成环并结合施工因素，下台阶长度也不宜超过 24 m。综合考虑现场实际施工情况，上台阶和下台阶长度均以 24 m 为宜。

4.3. 不同开挖进尺对围岩变形影响

针对涉铁 V 级围岩区段，在优化后的台阶高度和台阶长度条件下，分别对开挖循环进尺 1.0 m、2.0 m、3.0 m 三种工况的施工效应进行了对比分析，监测断面各监测点变形结果如表 4 所示。

Table 4. The impact of different excavation advances on the displacement changes of each monitoring point
表 4. 不同开挖进尺对各个监测点位移变化的影响

开挖进尺/m	竖向位移/mm		水平收敛值/mm
	拱顶沉降	仰拱隆起	拱腰水平收敛
1.0	28.11	47.32	34.30
2.0	32.32	51.26	40.75
3.0	37.84	56.26	48.24

不同开挖进尺对围岩变形影响相对明显，随循环进尺的增加，围岩变形呈加速增长趋势。根据表 4 并结合现场实际情况，同时兼顾施工效率等因素，V 级围岩隧道开挖进尺宜控制在 2 m 以内较为合适。

综上所述，结合现场实际与数值模拟结果，推荐悬臂式掘进机在类似 V 级围岩中进行开挖时，上、下台阶长度均不宜超过 24 m，同时，上台阶高度控制在 5 m 左右，循环进尺采用 2 m 为宜。

5. 最优参数下的施工效应

5.1. 围岩塑性区范围

不同开挖参数对隧道围岩稳定性的影响不仅体现在围岩变形方面，还体现在围岩塑性区变化上，初始未优化开挖参数和优化台阶高度、台阶长度、开挖进尺后围岩塑性区分布形态分别如图 7 和图 8 所示。

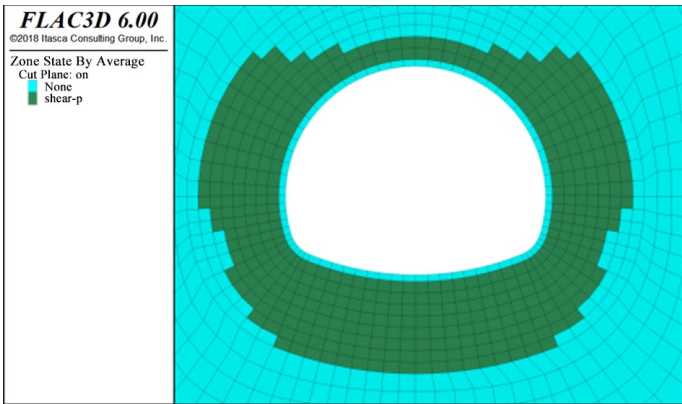


Figure 7. Plastic zone of surrounding rock before optimizing parameters
图 7. 优化参数前围岩塑性区

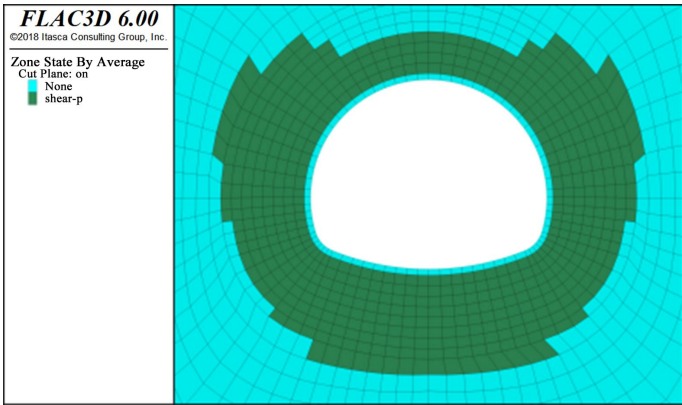


Figure 8. Plastic zone of surrounding rock after optimizing parameters
图 8. 优化参数后围岩塑性区

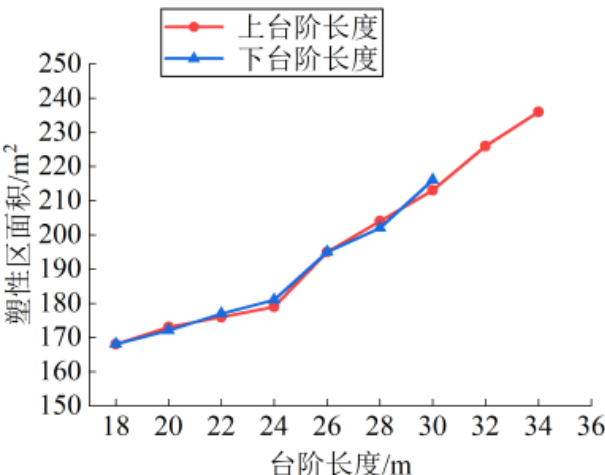


Figure 9. Variation law of plastic zone under different step lengths
图 9. 不同台阶长度下塑性区变化规律

为进一步直观反应优化参数的必要性，以台阶长度这一参数为例，提取了不同台阶长度工况中围岩塑性区范围，其变化规律如图 9 所示。

图 7 和图 8 可以看出，开挖参数优化前后塑性区分布特征相似，拱顶处塑性区深度由优化前的 1 m 增长至 2 m、墙腰由 3 m 增长至 4.7 m，均未超出锚杆设计长度(拱部 3.5 m、边墙 6 m)。从图 9 中看出，随着台阶长度增大，围岩塑性区面积逐渐增大，台阶长度超过 24 m 后塑性区加速发展，上台阶长度超过 30 m 后发展更为迅速。由此可见，优化后的 24 m 台阶长度避免了塑性区过速发展，在保障施工安全的前提下，优化的参数是较为合理的。

5.2. 支护结构位移及应力状态

本节选取模型最中间截面($y = 45$ m)处的隧道支护结构为研究对象，以探究优化的参数下隧道支护结构位移和应力状态。在第 3 节最终优化开挖参数下，支护结构水平位移、竖向位移、最小主应力结果见图 10。

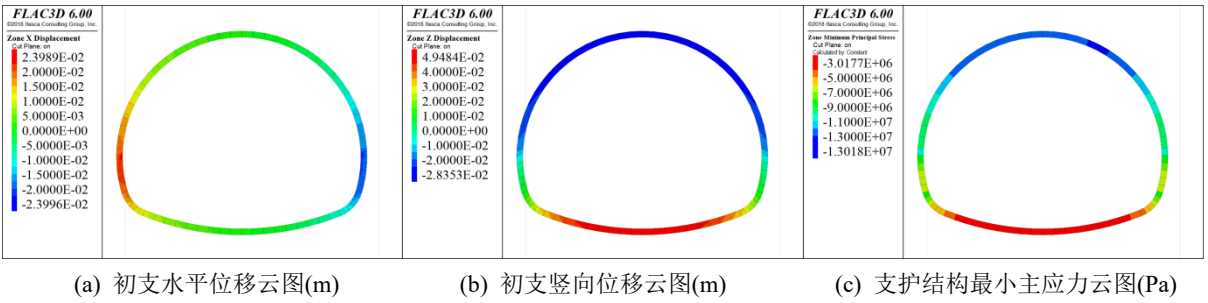


Figure 10. Support structure displacement and minimum principal stress cloud diagram
图 10. 支护结构位移和最小主应力云图

从图 10 中可以看出，在优化后的施工参数下，初支拱顶沉降 28.35 mm、仰拱隆起 49.48 mm、墙腰水平位移 23.99 mm，最小主应力的最大值为 13.02 MPa (数值模拟中将钢架以等效刚度的方式考虑进了初支内)，数值均在允许范围内，支护结构安全。

6. 现场悬臂式掘进机施工优化方案

设备自身长度 18 m (含设备长度 15.5 m，设备需前进、后退、转向工作长度 2.5 m)，由于上台阶工作

空间有限, 经过数值模拟推荐上台阶开挖长度为 24 m (最长不可超过 30 m), 其中 6~12 m 的距离为出渣工作距离, 不同的出渣长度对应不同的运输方式, 6 m 的出渣长度应采用传送带运输, 12 m 的出渣长度可以考虑装载机与运输机械配合出渣。隧道施工过程中, 优化后的纵向步距如图 11 所示。

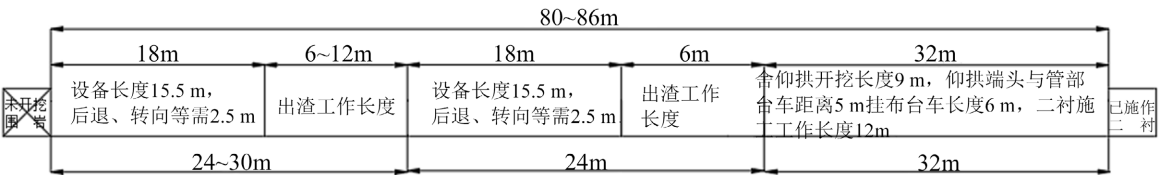


Figure 11. Diagram of longitudinal step length of cantilever tunnel boring machine milling and excavation work
图 11. 悬臂式掘进机铣挖工作纵向步距图

现场施工过程中对支护结构开展了系统的变形和应力监测。支护最大变形发生在 K107+931 位置, 最大拱顶沉降为 39.65 mm, 墙腰最大水平收敛 32.35 mm。与 4.2 节数值模拟计算出的支护结构位移相差不多, 两者皆处于允许范围内。

该断面支护结构受力结果见图 12, 结构应力监测结果如表 5 所示。

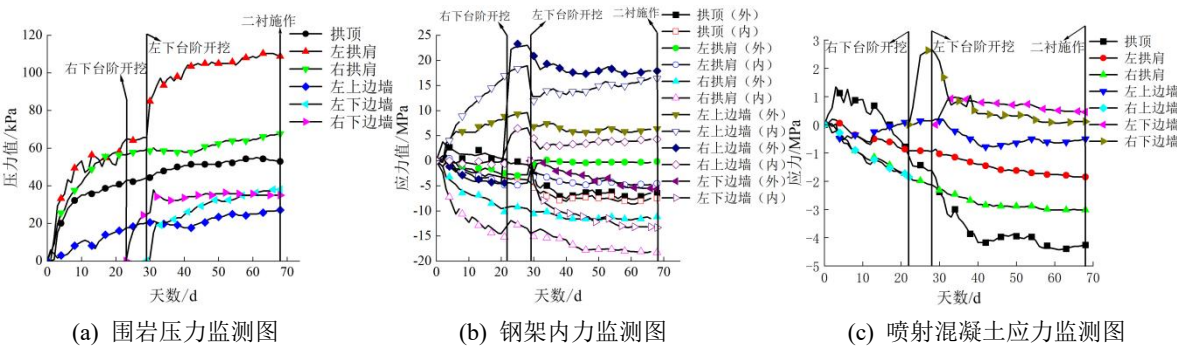


Figure 12. The supporting structure of the K107+931 section excavated by a cantilevered roadheader is subjected to stress.
图 12. 悬臂式掘进机开挖 K107+931 断面支护结构受力

Table 5. Summary of tunnel structure stress monitoring results
表 5. 隧道结构应力监测结果汇总

监测断面		钢架(钢筋)/MPa		混凝土/MPa		围岩压力/kPa
		压应力	拉应力	压应力	拉应力	
K107+979	初期支护	18.1	17.88	4.312	0.112	110.4
	二次衬砌	9.69	4.72	10.09	0.252	33.3

现场监控量测数据显示, 在优化参数施工方案下, 初期支护和二次衬砌的钢架应力、喷射混凝土应力均在材料允许强度范围内, 可见施工优化方案是合理的, 与数值模拟所得结论一致。

7. 结论

本文依托实际工程, 通过数值模拟手段, 以围岩变形控制为主要指标, 分析了不同开挖参数(台阶高度、台阶长度、开挖进尺)对铣挖隧道围岩变形的影响, 以此选出施工最优参数, 并在数值模拟和施工现场进行了合理性验证, 最终形成悬臂式掘进机施工优化方案。得到的结论如下:

- 1) 悬臂式掘进机台阶法施工数值仿真结果揭示上台阶开挖扰动引起的围岩沉降占比达 53.62%, 上

台阶开挖是施工过程中的关键控制步骤，上台阶长度和高度对隧道变形和稳定性影响至关重要，施工中应予以足够重视。

2) 与上台阶开挖参数相比，下台阶开挖参数的影响作业不显著，但考虑支护结构封闭成环时机对围岩的适应性问题，建议在满足设备作业空间条件下，下台阶长度越短越好。

3) 通过对涉铁段 V 级围岩不同开挖参数对隧道变形影响的数值仿真分析，结合现场实际施工条件，建议依托工程上台阶长度采用 24 m、下台阶长度采用 24 m，开挖进尺控制在 2 m 以内，台阶高度无量纲比为 10 (上台阶): 5 (下台阶): 4.2 (仰拱)，同时注重支护结构施工质量，尤其锚杆施作质量。

在借助数值仿真研究开挖参数对围岩变形控制影响的过程中，未考虑悬臂掘进机振动因素，后续应进一步研究振动对围岩扰动的程度，从而更加贴合工程实际。

参考文献

- [1] 王卿权. 浅析悬臂式掘进机的发展概况与趋势[J]. 矿业装备, 2012(10): 108-109.
- [2] 漆泰岳, 李斌. 悬臂式掘进机在复杂断面地铁隧道中的应用研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(4): 32-38.
- [3] 李志军, 刘广志, 周毅, 等. 高原铁路某隧道松散堆积体中悬臂掘进机法的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S2): 363-371.
- [4] 李昌宁, 雷向峰. 隧道铣挖法施工技术[J]. 隧道建设, 2012, 32(S1): 32-35.
- [5] 武发辉, 张国泰. 悬臂掘进机泥岩隧道施工技术经济效益研究[J]. 甘肃科技, 2023, 39(7): 25-28, 32.
- [6] 朱廷宇, 王唤龙, 宋智来, 等. 悬臂式掘进机在滇西红层隧道中的应用研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(3): 458-466.
- [7] 黄基富, 肖功夷. 悬臂掘进机在交通隧道施工中的实践应用与适应性研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(2): 51-62, 85.
- [8] 白海峰, 张博. 铣挖法隧道开挖工序路径及其对围岩扰动响应分析[J]. 大连交通大学学报, 2018, 39(5): 62-66.
- [9] 张同乐, 李文江. LD 公路隧道开挖施工方案优化对比研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(1): 52-59, 67.