

文章编号: 1674—8247(2021)01—0046—04
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.01.010

软弱围岩铁路隧道三台阶带仰拱一次开挖工法 台阶高度优化研究

李鹏宇¹ 崔光耀¹ 王庆建²

(1. 北方工业大学, 北京 100144; 2. 中铁隧道集团四处有限公司, 南宁 530000)

摘 要:为进一步提高软弱围岩条件下隧道开挖的安全性及稳定性,本文依靠玉磨铁路新平隧道工程,利用有限差分数值模拟软件 flac3D,对软弱围岩铁路隧道三台阶带仰拱一次开挖工法的台阶高度进行优化研究,主要对比了 5 种不同台阶高度开挖方案的初期支护位移及内力。结果表明:(1)采用工况 4(上台阶高度 4 m、中台阶高度 3.2 m、下台阶高度 5 m)的拱顶沉降值、拱肩收敛值、边墙收敛值均最小,分别为 22.3 mm、3.17 mm、11.9 mm;(2)工况 4 的结构安全性最高,最小安全系数最大,为 2.83;(3)综合结构位移及内力,新平隧道软弱围岩段建议采用工况 4 的台阶高度进行施工。研究成果可为类似工程施工提供参考。

关键词:软弱围岩; 铁路隧道; 三台阶带仰拱一次开挖; 工法; 台阶高度

中图分类号:U455.4 **文献标志码:**A

Optimization of Bench Height in One-step Excavation for Three Benches with Invert of Railway Tunnels in Soft Rocks

LI Pengyu¹ CUI Guangyao¹ WANG Qingjian²

(1. North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. China Railway Tunnel Group Fourth Bureau Co., Ltd., Nanning 530000, China)

Abstract: In order to further improve the safety and stability of tunnel excavation in soft rocks, this paper takes Xinping Tunnel of Yuxi-Mohan Railway as a case, employs the finite difference numerical simulation software flac 3D to optimize the bench height in one-step excavation for the three benches with the invert of railway tunnels in the soft rocks, and mainly compares the initial supporting displacement and internal force of five excavation schemes with different bench heights. The results show that: (1) The vault settlement, arch shoulder convergence, and sidewall convergence of Case 4 (upper bench height of 4 m, middle bench height of 3.2 m, and lower bench height of 5 m) are the smallest, which are 22.3 mm, 3.17 mm and 11.9 mm respectively. (2) The structural safety of Case 4 is the highest, and the minimum safety factor is the largest, which is 2.83. (3) Considering the structural displacement and internal force, it is recommended to adopt the bench height of Case 4 in the soft surrounding rock section of Xinping Tunnel. The research results may be used for reference by similar projects.

Key words: soft rock; railway tunnel; one-step excavation for three benches with invert; construction method; bench height

收稿日期:2020-07-23

作者简介:李鹏宇(1996-),男,硕士研究生。

引文格式:李鹏宇,崔光耀,王庆建. 软弱围岩铁路隧道三台阶带仰拱一次开挖工法台阶高度优化研究[J]. 高速铁路技术,2021,12(1):46-49.

LI Pengyu, CUI Guangyao, WANG Qingjian. Optimization of Bench Height in One-step Excavation for Three Benches with Invert of Railway Tunnels in Soft Rocks[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1):46-49.

随着我国西南地区铁路交通的持续发展,在铁路隧道建设过程中不可避免需要穿越软弱围岩。因此,在选定开挖工法情况下,台阶高度的选择对隧道施工的安全性和稳定性有着重要的影响。

目前,国内外专家、学者对软弱围岩条件下隧道施工的安全性及稳定性开展了研究,主要有:软弱围岩隧道不同施工方法力学行为分析^[1-2];依托实际工程利用数值模拟对下台阶含仰拱一次开挖的工法受力特性进行研究^[3-4];利用数值模拟软件对软弱围岩隧道变形及其控制技术进行研究^[5-6];依靠实际工程探究软弱围岩隧道台阶法带仰拱开挖技术的应用^[7];采用实验方法分析复杂围岩隧道变形特征^[8-10]。以上研究仅针对软弱围岩隧道带仰拱开挖工法的力学行为与围岩变形及其控制技术,对软弱围岩铁路隧道特定开挖工法的优化研究鲜有报道。因此,本文依托玉磨铁路新平隧道工程,利用有限差分数值模拟软件,对软弱围岩铁路隧道三台阶带仰拱一次开挖工法的台阶高度进行优化研究,研究成果可为类似工程施工提供参考。

1 新平隧道工程概况

1.1 地质条件

玉磨铁路新平隧道(D1K 46+290~D1K 60+780)起于大开门河双线大桥,穿越鲁奎山、写莫村、扬武西,止于扬武中桥,全长 14 835 m。地形左高右低,山间沟壑纵横,地面高程为 1 150~1 782 m,相对高差约为 632 m,最大埋深约为 578 m。隧道地质条件复杂,不良地质段落几乎涵盖了整座隧道,管段内基本以软岩为主。

1.2 隧道结构

隧道为马蹄形断面,初支厚 25 cm,采用喷射 C25 混凝土支护;二衬厚 50 cm,采用 C25 模筑混凝土。隧道高 11.7 m,跨度为 14.2 m。

2 研究情况

2.1 计算模型

以新平隧道为研究背景,建立计算模型,如图 1 所示。



图1 计算模型图

示。计算模型模拟地层的范围为:隧道底部与上部取 3~5 倍洞高,约 60 m,总高度为 120 m;横向两端取 3~5 倍洞径,约 60 m,总宽度为 120 m。模型的边界条件为:上边界无约束,下边界为垂直约束,四周为水平约束。

2.2 施工方案

该段隧道采用三台阶带仰拱一次开挖法,施工顺序为:①开挖上台阶;②施作拱部初期支护;③开挖中台阶;④施作左右边墙支护;⑤开挖下台阶及仰拱;⑥同时施作左右墙角支护及仰拱,根据围岩变形及现场情况施作二次衬砌。施工方法示意如图 2 所示。

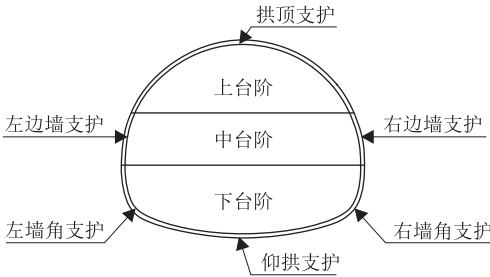


图2 施工方法示意图

2.3 计算工况

为研究台阶高度对施工安全性及稳定性的影响,建立 5 组计算工况,如表 1 所示。

表1 计算工况表

工况	上台阶高度/m	中台阶高度/m	下台阶高度/m
1	4.5	3.2	4.5
2	4	3.7	4.5
3	5	2.7	4.5
4	4	3.2	5
5	5	3.2	4

2.4 计算参数

计算模型的材料物理力学参数如表 2 所示。

表2 2 材料物理力学参数表

类别	厚度/cm	重度/(kN/m³)	泊松比	弹性模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚/MPa
V级围岩	-	19	0.36	1.2	25	0.10
加固圈	350	25	0.41	1.45	30	0.12
初支	25	24	0.2	20	-	-
仰拱	25	24	0.2	20	-	-

2.5 测点布置

为了解开挖过程中围岩的动态信息,并据此判断施工的安全性和合理性,在二衬结构的拱顶、右拱肩、右边墙、右拱脚等共 8 个位置设立监测点,采集各测点位置的应力信息,测点布置如图 3 所示。

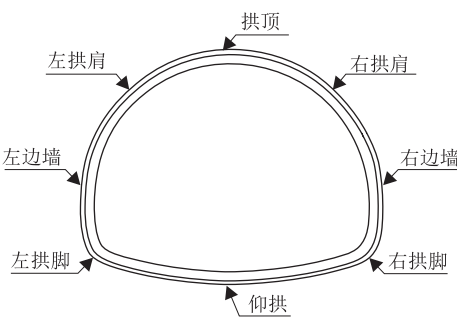


图 3 测点布置图

3 计算结果分析

3.1 位移分析

提取各工况隧道及围岩位移云图如图 4~5 所示。

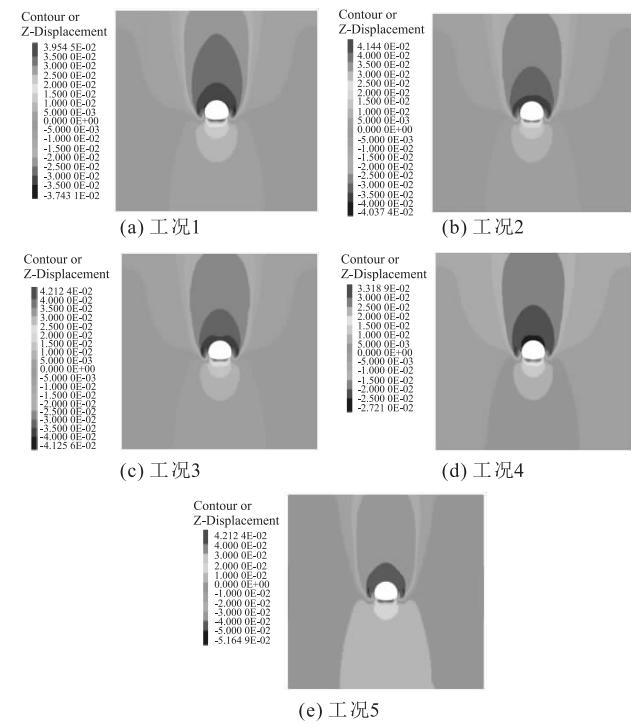


图 4 隧道及围岩竖向位移图

由图 4、图 5 提取各监测点数据,并计算拱顶沉降、拱肩收敛和边墙收敛,如表 3 所示。

表 3 初期支护位移值表

工况	拱顶沉降/mm	拱肩收敛/mm	边墙收敛/mm
1	29.6	4.11	23.50
2	32.40	4.20	19.60
3	31.7	4.21	24.5
4	22.30	3.17	11.90
5	39.90	4.46	21.30

由表 2 可知,工况 4 的拱顶沉降值、拱肩收敛值和边墙收敛值均为 5 种工况中最小,分别为 22.30 mm、

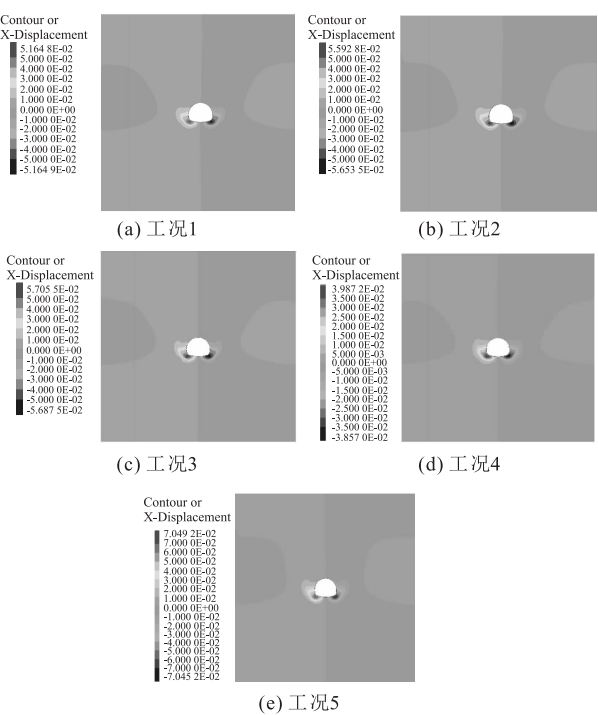


图 5 隧道及围岩水平位移图

3.17 mm、11.9 mm,明显小于其他 4 种工况。

3.2 内力分析

将提取出的隧道初支结构各监测点计算量测数据代入式(1)~式(4),计算结构的轴力、弯矩和安全系数^[11]。

$$N = \frac{1}{2}E(\varepsilon_{\text{内}} + \varepsilon_{\text{外}})bh \tag{1}$$

$$N = \frac{1}{12}E(\varepsilon_{\text{内}} + \varepsilon_{\text{外}})bh^2 \tag{2}$$

$$KN \leq \varphi\alpha R_a bh \tag{3}$$

$$KN \leq \varphi \frac{1.75R_1bh}{6e_0/h - 1} \tag{4}$$

式中: $\varepsilon_{\text{内}}$ 、 $\varepsilon_{\text{外}}$ ——结构内外侧应变;

b ——截面宽度,取 1 m;

M ——弯矩;

N ——轴力;

E ——弹性模量;

h ——截面厚度;

α ——轴向力偏心影响系数;

φ ——构件纵向弯曲系数;

R_1 ——混凝土抗拉极限强度;

R_a ——混凝土抗压极限强度;

K ——安全系数。

3.2.1 轴力

处理计算所得数据并绘制监测断面轴力分布图,如图 6 所示。

由图 6 可以看出,5 种工况轴力分布规律相似,均处于压应力状态。轴力绝对值峰值均出现在拱顶位置,分别为 4 579 kN、4 490 kN、4 781 kN、3 974 kN、5 003 kN。工况 4 轴力绝对值峰值最小且基本小于其他 4 种工况相应位置的轴力绝对值。

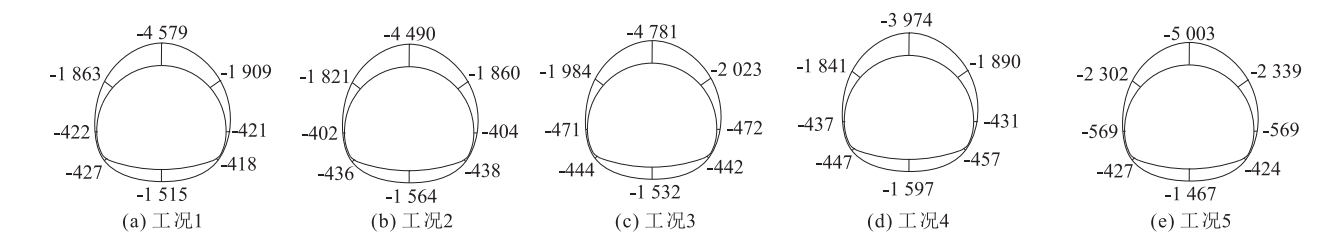


图 6 监测断面轴力图(kN)

3.2.2 弯矩

处理计算所得数据,绘制监测断面的弯矩分布图,如图 7 所示。

由图 7 可以看出,5 种工况弯矩分布规律相似。弯矩绝对值峰值均出现在拱顶位置,其峰值分别为 24.6 kN·Wm、25.5 kN·m、23.8 kN·m、19.1 kN·m、28.1 kN·m。工况 4 边墙为负弯矩,其弯矩绝对值峰

值最小且小于其他 4 种工况相应位置的轴力绝对值。

3.2.3 安全系数

提取数据,计算得到各监测断面安全系数,绘制监测段面安全系数分布图,如图 8 所示。提取各工况的最小安全系数并与工况 1 进行对比,同时计算安全系数增大百分比,如表 4 所示。

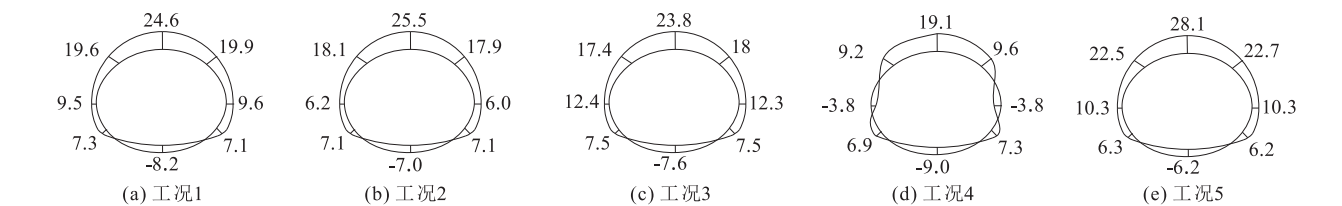


图 7 监测断面弯矩图(kN·m)

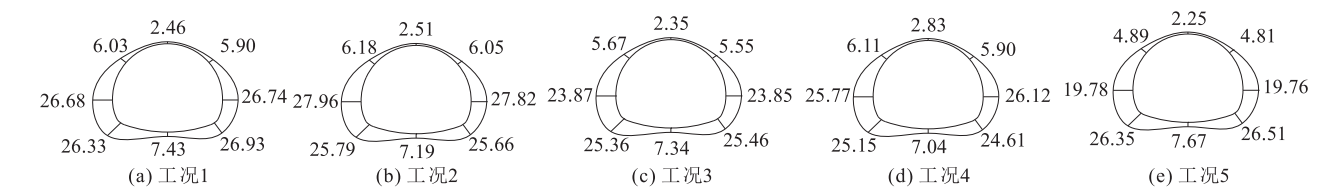


图 8 监测段面安全系数分布图

表 4 最小安全系数表		
工况	最小安全系数	增大百分比/%
1	2.46(受压控制)	-
2	2.51(受压控制)	2.03
3	2.35(受压控制)	-4.47
4	2.83(受压控制)	15.03
5	2.25(受压控制)	-8.54

由图 8、表 3 可知,5 种工况的安全系数分布规律相似,最小安全系数出现在拱顶部位。5 种工况的最小安全系数分别为 2.46、2.51、2.35、2.83、2.25。其中,工况 4 的最小安全系数最大,相对于工况 1 提高了 15.03%,满足规范要求。

4 结论

本文依靠玉磨铁路新平隧道工程,利用有限差分数值模拟软件 flac3D,对软弱围岩铁路隧道三台阶带仰拱一次开挖工法的台阶高度进行优化研究,得出以下主要结论:

- (1)在 5 种计算工况中,工况 4(上台阶高度 4 m、中台阶高度 3.2 m、下台阶高度 5 m)的拱顶沉降值、拱肩收敛值、边墙收敛值均为最小,分别为 22.30 mm、3.17 mm、11.9 mm。
- (2)在 5 种计算工况中,工况 4 的结构安全性最高,最小安全系数最大,为 2.83。

(下转第 93 页)

参考文献:

[1] 田卫东. 天坪隧道横洞工区正洞及平导揭煤防突技术[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(4): 82–86.
TIAN Weidong. Technology of Uncovering Coal and Outburst Prevention in Hengdong Work Area of Tianping Tunnel[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(4): 82–86.

[2] 朱艳峰, 张雪松, 黄明普. 新凉风垭隧道煤系地层段施工关键技术研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(9): 1967–1973.
ZHU Yanfeng, ZHANG Xuesong, HUANG Mingpu. Study on the Key Construction Technology of New Liangfenya in Coal Measure Strata [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(9): 1967–1973.

[3] 丁浩江, 岳志勤, 杨英, 等. 玉京山隧道“四位一体”揭煤防突施工技术[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(6): 47–53.

DING Haojiang, YUE Zhiqin, YANG Ying, et al. “Four-in-one” Outburst Prevention Construction Technology for Uncovering Coal of Yujingshan Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(6): 47–53.

[4] 煤安监技装[2019]28 号,防治煤与瓦斯突出细则[S].
Mei An Jian Ji Zhuang[2019] No. 28, Rules for Prevention of Coal and Gas Outburst[S].

[5] 中铁二院工程集团有限责任公司. 新建重庆铁路枢纽东环线鸽子岩隧道施工图设计[R]. 成都 :中铁二院工程集团有限责任公司,2017.
China Railway Eryuan Engineering Group Co. , Ltd. Detail Design of Yaoziyan Tunnel in the East Ring Road of Newly-built Chongqing Railway Hub [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co. , Ltd. ,2017.



(上接第 49 页)

(3)综合结构位移及内力分析,新平隧道软弱围岩段建议采用工况 4 的台阶高度进行施工。

参考文献:

[1] 崔庆龙, 郑少华, 高抗. 不同开挖方法对软弱围岩隧道影响模拟研究[J]. 交通科技, 2017,(05): 86–89.
CUI Qinglong, ZHENG Shaohua, GAO Kang. Numerical Simulation for Influence of Different Excavation Methods on the Soft Rock Tunnel [J]. Transportation Science & Technology, 2017 (5): 86–89.

[2] 贾晓旭, 赵玉成. 软弱围岩隧道 CD 法和台阶法施工力学行为分析[J]. 铁道标准设计, 2016,60(7): 121–125.
JIA Xiaoxu, ZHAO Yucheng. Analysis of Mechanical Behavior of Tunneling in Weak Surrounding Rock by CD Method and Benchng Method[J]. Railway Standard Design, 2016,60(7): 121–125.

[3] 李建华, 邓涛, 刘大刚, 等. 下台阶含仰拱一次开挖工法仰拱早期受力研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018,38(7): 1115–1122.
LI Jianhua, DENG Tao, LIU Dagang, et al. Study of Early Stress Form of Inverted Arch when Simultaneously Excavated with Lower Bench[J]. Tunnel Construction, 2018,38(7): 1115–1122.

[4] 蔡闽金, 刘大刚, 邓涛, 等. 下台阶含仰拱一次开挖工法特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018,15(3): 727–733.
CAI Minjin, LIU Dagang, DENG Tao, et al. A Study on Characteristics of Simultaneous Excavation Method of Lower Bench and Inverted Arch[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018,15(3): 727–733.

[5] 李文江, 孙明磊, 朱永全, 等. 软弱围岩隧道台阶法施工中拱脚稳定性及其控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31(S1): 2729–2737.
LI Wenjiang, SUN Minglei, ZHU Yongquan, et al. Arch Springing Stability and Its Control Techniques during Construction of Tunnels

with Weak Surrounding Rocks by Bench Cut Method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(S1): 2729–2737.

[6] 关宝树. 软弱围岩隧道变形及其控制技术[J]. 隧道建设, 2011, 31(1): 1–17.
GUAN Baoshu. Deformation of Tunnels with Soft Surrounding Rocks and Its Control[J]. Tunnel Construction, 2011,31(1): 1–17.

[7] 刘招伟, 李建华. 台阶法(带仰拱)一次开挖施工技术在软岩隧道中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2018,38(2): 287–294.
LIU ZhaoWei, LI Jianhua. Application of One-Time Excavation Method of Bench and Inverted Arch to Soft Rock Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2018,38(2): 287–294.

[8] 崔光耀, 祁家所, 王明胜. 片理化玄武岩隧道围岩大变形控制现场试验研究[J]. 岩土力学, 2018,39(S2): 231–237.
CUI Guangyao, QI Jiasuo, WANG Mingsheng. Field Test Study on Large Deformation Control of Surrounding Rock of Cleaved Basalt Tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018,39(S2): 231–237.

[9] 崔光耀, 王道远, 倪嵩陟, 等. 软弱围岩隧道钢纤维混凝土衬砌承载特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017,39(10): 1807–1813.
CUI Guangyao, WANG Daoyuan, NI Songzhi, et al. Model Tests on Bearing Characteristics of Steel Fiber-Reinforced Concrete Lining of Weak Surrounding Rock Tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017,39(10) 1807–1813.

[10] 赵勇, 刘建友, 田四明. 深埋隧道软弱围岩支护体系受力特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011,30(8): 1663–1670.
ZHAO Yong, LIU Jianyou, TIAN Siming. Experimental Study of Mechanical Characteristics of Support System for Weak Surrounding Rock of Deep Tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(8): 1663–1670.

[11] TB 10003–2016 铁路隧道设计规范 [S].
TB 10003–2016 Code for Design of Railway Tunnel. [S].