

文章编号: 1674—8247(2020)03—0012—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.03.003

# 中老铁路会富莱隧道软岩大变形控制技术研究

余小周

(中国国家铁路集团有限公司, 北京 100038)

**摘要:**中老铁路会富莱隧道位于老挝琅勃拉邦地质缝合带,在隧道开挖期间,出现了围岩大变形情况。针对会富莱隧道围岩变形特点,文章分析了施工各阶段围岩的基本变形规律。经综合比较分析,提出采用圆形断面代替原类马蹄形断面的优化设计,并优化初期支护措施、合理增加变形量,同时采用短台阶快速初支成环施工工艺,有效控制了围岩变形,成功遏制住了会富莱隧道软岩大变形。通过比较,隧道衬砌断面设计优化在会富莱隧道软岩大变形控制中起到了决定性的作用。本次研究的软岩大变形技术已被中老铁路广泛应用,有效地解决了中老铁路琅勃拉邦地质缝合带隧道软岩变形的难题。

**关键词:**隧道; 软岩; 大变形; 控制技术; 断面优化

中图分类号:U456.3<sup>+</sup>1 文献标志码:A

## Study on Control Technique for Large Deformation of Soft Rocks in Huifulai Tunnel of China-Laos Railway

YU Xiaozhou

(China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100038, China)

**Abstract:** Huifulai Tunnel of China-Laos Railway is located in the geological suture zone in Luang Prabang of Laos, where the large deformation of surrounding rocks occurs during the tunnel excavation. According to the deformation characteristics of the surrounding rocks in Huifulai Tunnel, the basic deformation rules of surrounding rocks at each construction stage are analyzed. After comprehensive comparative analysis, the optimal design of circular section is proposed to replace the horseshoe-like section. In addition, the initial support measures are optimized, the deformation amount are reasonably increased. In the meanwhile, the construction technology of short-step rapid primary support ring is applied to effectively control the deformation of surrounding rocks and successfully restrain the large deformation of soft rocks in Huifulai Tunnel. By comparison, it can be seen that the optimization of tunnel lining section design plays a decisive role in controlling the large deformation of soft rocks in Huifulai Tunnel. The technique for large deformation of soft rocks studied in the research has been widely applied in China-Laos Railway, which effectively solves the problem of soft rocks deformation in the tunnel located at the geological suture zone in Luang Prabang of Laos.

**Key words:** tunnel; soft rock; large deformation; control technique; section optimization

隧道软岩大变形控制是国内外隧道修建的重大技术难题<sup>[1]</sup>。过去隧道在遇软岩大变形时,往往采取注浆、长锚杆加固等措施。由于隧道地质千变万化,相同措施对于不同隧道的软岩变形处理效果不尽相同。中

收稿日期:2020-04-15

作者简介:余小周(1979-),男,高级工程师。

引文格式:余小周. 中老铁路会富莱隧道软岩大变形控制技术研究,2020,11(2): 12-17.

YU Xiaozhou. Study on Control Technique for Large Deformation of Soft Rocks in Huifulai Tunnel of China-Laos Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 12-17.

老铁路会富莱隧道为单线隧道,受作业面限制,不宜采用长锚杆施工,故前期采用注浆方式未能控制围岩变形,后通过变形后拆换拱的方式解决变形问题。但这种事后处理的换拱方式既耽误工期,又大大增加了施工成本,故需对该隧道大变形控制技术作进一步研究。

## 1 工程概况

中老铁路会富莱隧道位于老挝琅勃拉邦、乌多姆赛省,全长 6 969 m,为设计速度 160 km/h 的单线隧道。隧区属构造剥蚀、溶蚀中高山地貌,地面高程 400 ~ 1 200 m,相对高差约 800 m,地形起伏大。自然横坡  $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ,隧道最高处为灰岩陡坎、陡壁。隧区多被第四系土层覆盖,斜坡地带植被较好,基岩零星出露。隧道洞身通过侏罗纪下统砂泥岩(480 m),石炭系板岩(5 629 m),二叠系下统灰岩(860 m)。洞身穿越会富莱 1 号断层、普巴道山断层、会富莱 2 号断层、夫发南大山复向斜、班会海断裂破碎带。

隧区位于兰坪-思茅地块和南海印支地块接合部,属特提斯-喜马拉雅构造域,是古特提斯洋域分布的主体地带,总体上由大小不一的地块和微地块缝合、拼接而成。段内不良地质为岩溶、断层破碎带、岩爆、软岩大变形、顺层偏压、有害气体等。

## 2 隧道变形破坏特征

### 2.1 初期支护破坏情况

会富莱隧道施工过程中,多处段落发生围岩变形,并导致初期支护破坏,围岩水平收敛远大于拱顶下沉,线路右侧变形大于左侧,右侧边墙错台鼓出,喷射混凝土剥裂,钢拱架呈  $90^{\circ}$  弯折变形。

### 2.2 围岩变形特征

#### (1) 变形量较大且初期变形快

隧道开挖后,初期围岩变形非常强烈,变形速率较大,拱顶开挖 7 d 累计沉降达 200 mm、平均 28 mm/d,最大累计沉降量 339.7 mm;上台阶收敛累计达 554.4 mm,下台阶开挖 10 d 收敛达 1 400 mm、平均 140 mm/d,累计达 1 586.3 mm。水平收敛远大于拱顶下沉,且下台阶水平收敛大于上台阶水平收敛,存在水平挤压特性,空间越大变形越大,变形速率快。典型断面拱顶下沉和水平收敛位移监测曲线如图 1 所示。

围岩早期变形大、变形速率快,一定程度上表明围岩压力释放快,挤压强度大,隧道围岩具有软弱、稳定性低和自稳能力差的特性<sup>[2]</sup>。

#### (2) 变形持续时间长

根据监测数据反映,仰拱端头至掌子面区间的变

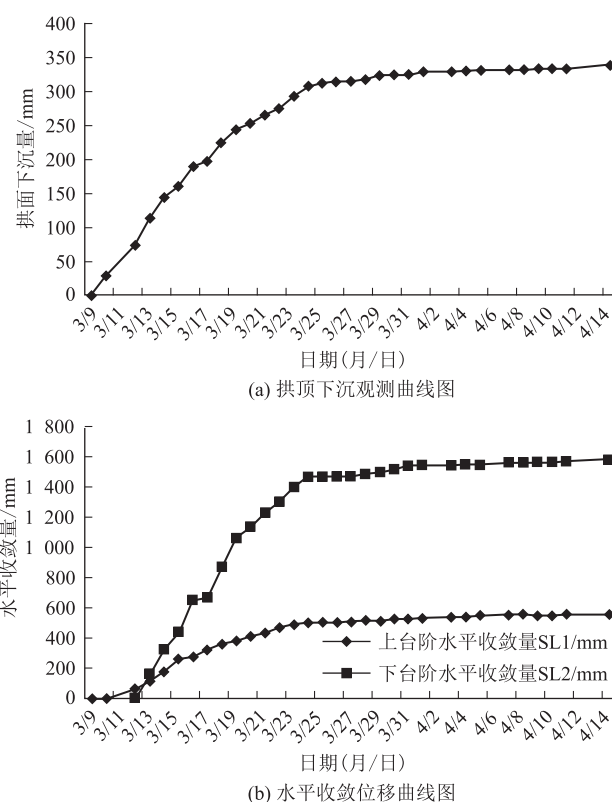


图1 DK 130+335 沉降观测曲线图

形持续时间较长,初期变形较大,后期成线性增长,无收敛趋势。过程中有扰动时,出现加速增长情况,直至仰拱封闭成环后才有收敛趋势。初支封闭后仍有变形,衬砌浇筑后才有稳定趋势,反应出围岩具有明显的流变性。

#### (3) 围岩变形在空间分布不均匀、不对称

从隧道施工过程监测数据和隧道破坏程度上看,整个隧道变形均较严重,但不同里程段落变形特征不同。同时还在线路左右变形量相差较大的情况,形成不对称收敛。变形量中下台阶变形大于上台阶,隧道不同位置变形位移曲线如图 2 所示,上台阶和下台阶收敛监测如图 3、图 4 所示。

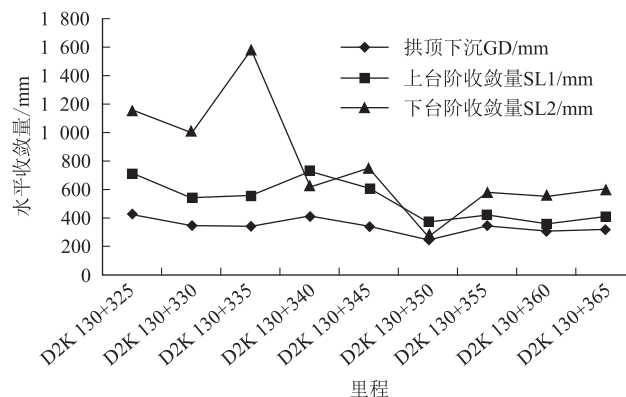


图2 隧道不同位置变形位移曲线图

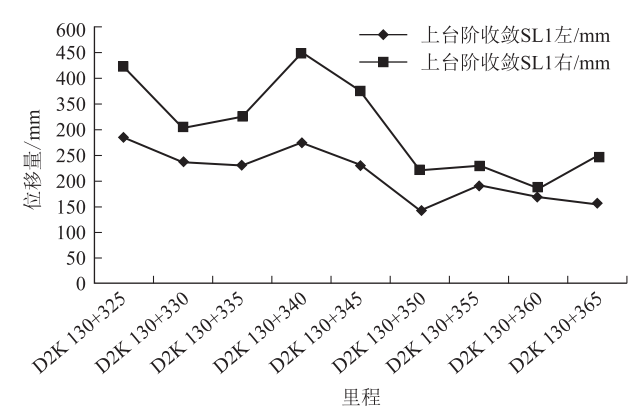


图 3 上台阶收敛监测图

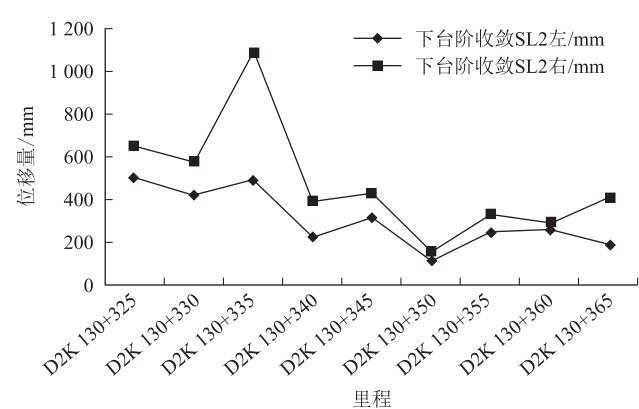


图 4 下台阶收敛监测图

2.3 围岩大变形原因分析

会富莱隧道位于老挝琅勃拉邦缝合带北边界,地质构造极其复杂,变形段位于会富莱 1 号断层与普巴道山断层锐角挟持地带。隧道穿越地层岩性以薄层状板岩夹炭质板岩为主,属软质岩,岩层受多期构造运动影响,挤压断裂极为严重,产状十分紊乱。挤压过程中产生的层间滑移,加剧了岩石的碎裂与糜棱化,围岩整体表现出结构疏松、强度极低等特点。在埋深不大、地应力不高的情况下,岩体强度极低易使围岩出现较大的塑性变形。参照国内类似工程判识标准,会福莱隧道岩体强度与地应力比达到中等~严重大变形程度<sup>[3]</sup>。

3 软岩大变形控制技术

随着隧道软岩大变形逐渐增多,世界范围内的隧道和地质专业人士试图对大变形的潜势进行有效划分,但所有这些划分都存在相当大的局限性,尚不具备普遍的指导意义,无法有效指导各类隧道软岩大变形施工。会富莱隧道 D2K 130+330~D2K 130+360 段设计为 V 级围岩,采用 V a 复合衬砌,开挖揭示围岩为

板岩、炭质板岩,呈深灰、灰黑色,偶夹灰绿色玄武岩团块。板岩、炭质板岩板状构造,薄层状为主,局部夹中厚层,炭质板岩含炭量高,污手,质软,遇水易软化;玄武岩致密块状,质坚硬,呈团块状,分布无规律。受区域构造影响,掌子面岩层产状扭曲变形严重,揉皱发育,岩体挤压破碎强烈,节理裂隙发育,岩体呈碎石、片状,部分手掰易断,结构面光滑,未见地下水。

鉴于掌子面开挖揭示的地质情况,将 V a 复合衬砌改为 V 级加强 III 型衬砌,设间距 0.6 m 的全环 H175 型钢钢架<sup>[4]</sup>,超前支护采用  $\phi 42$  小导管,拱墙采用长 4.0 m 的  $\phi 42$  注浆锚管,二衬采用厚 45 cm 的钢筋混凝土。采用铣挖法施工,以减少爆破施工对围岩的扰动。

该段预留变形量 60 cm,最大变形量 158 cm。采取措施后初支变形仍侵限,最大侵限超 98 cm,表明以上措施不能控制大变形。

3.1 软岩大变形处理措施

采用“扛、放结合,重视围岩自承能力”的原则,软岩大变形处理采用以下措施:

- (1) 改变断面形状,加强钢架支护,增大边墙及仰拱曲率,增强结构承载能力。
- (2) 适当加大初期支护预留变形量,释放地应力。
- (3) 采用长短锚杆结合,提高围岩自身承载能力。
- (4) 施工做到短进尺、弱爆破、快挖、快支、快锚、快封闭成环<sup>[5]</sup>。

3.2 优化开挖轮廓线

原设计断面为类马蹄形衬砌断面,二衬厚度 45 cm。本次研究了渐变衬砌断面(考虑二衬台车不更换,二衬内轮廓不变)和圆形衬砌断面,提高围岩自稳和初支受力能力如图 5 所示。其中,渐变衬砌断面二衬厚 50~93 cm,圆形衬砌断面二衬厚 45 cm,钢架均采用 H175 型钢,喷厚 25 cm 的 C30 混凝土<sup>[6]</sup>。

3.2.1 安全性分析

通过对比,3 种结构承载能力均应能满足荷载要求,各型衬砌承受软岩变形径向荷载的能力如表 1 所示。

表 1 衬砌承受软岩变形径向荷载能力对比表			
衬砌断面类型	类马蹄形	渐变衬	圆形
二衬厚度/cm	45	50	45
径向荷载/MPa	0.16	0.58	0.85

(1) 会富莱隧道原设计隧道结构尺寸及轮廓按部颁参考图办理,采用 45 cm 等厚钢筋混凝土。采用

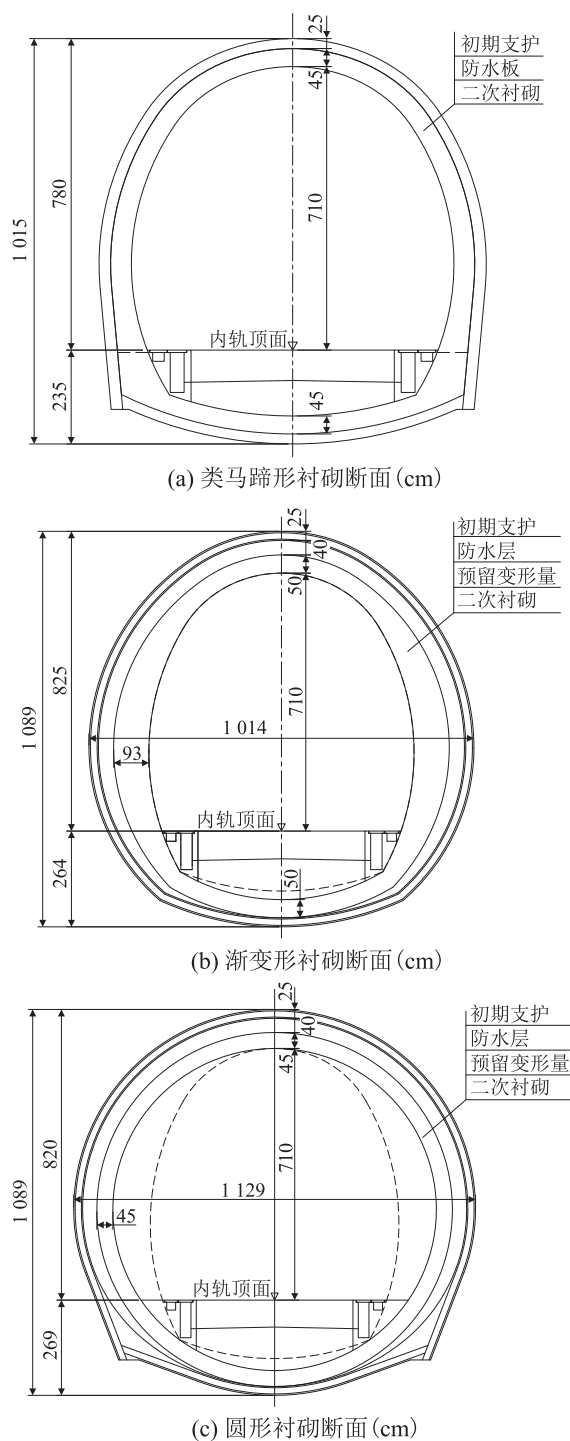


图5 三种衬砌断面图

Ansys 数值模拟软件,按荷载结构法对会富莱隧道马蹄形衬砌进行结构分析。大变形段落埋深较大,按深埋荷载施加围岩压力;同时为模拟地应力,采用径向围压施加于结构。经多次试算,受限于结构轮廓,原设计衬砌断面仅能承受 0.16 MPa 径向围岩压力。结构计算结果如图 6~图 8 所示。

由图 6~图 8 中可以看出,由于边墙脚与仰拱相接处非圆顺过渡,该处应力集中,弯矩、轴力、剪力均较

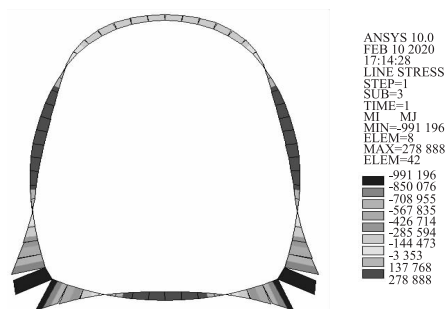


图6 类马蹄形结构弯矩图

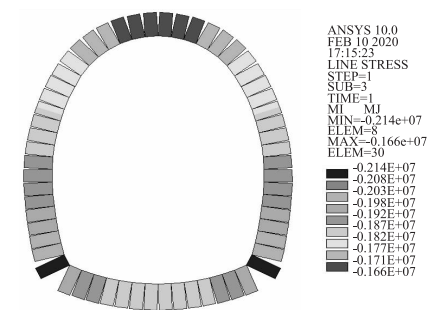


图7 类马蹄形结构轴力图

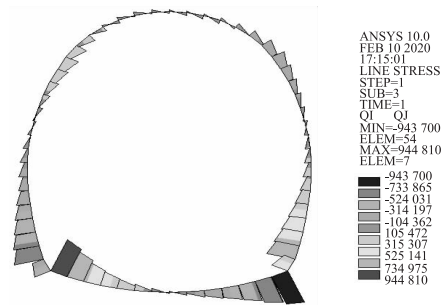


图8 类马蹄形结构剪力图

大,为结构受力的控制点。同时,结构抵抗围岩变形能力较差,仅 0.16 MPa,远小于国内大变形隧道地应力普遍水平。如仍采用原设计衬砌结构,难以抵抗隧道大变形压力,故需调整断面。

(2)考虑现场实际情况,二衬内轮廓不变,衬砌拱顶仰拱厚 50 cm,边墙最厚 93 cm,形成渐变衬砌结构。采用 Ansys 数值模拟软件,按荷载结构法对会富莱隧道渐变衬砌进行结构分析。大变形段落埋深较大,按深埋荷载施加围岩压力。同时为模拟地应力,参照成兰铁路等工点经验,取 0.58 MPa 径向围压施加于结构。结构计算结果如图 9~图 11 所示。

由图 9~图 11 中可以看出,由于单线隧道属瘦高性结构,边墙弯矩明显大于拱部和仰拱部位,调整边墙仰拱曲率,同时增大边墙厚度对满足结构受力十分有利。经检算,结构每延米铺设 5 根  $\phi 25$  钢筋即可满足



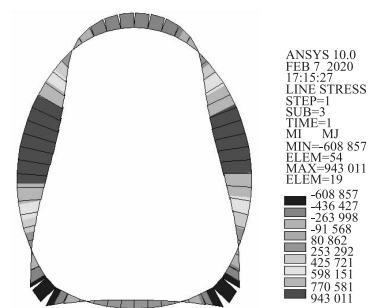


图 9 渐变结构弯矩图

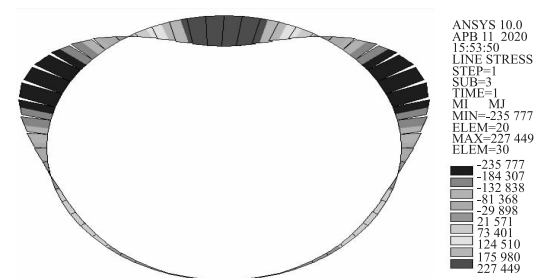


图 12 圆形结构弯矩图

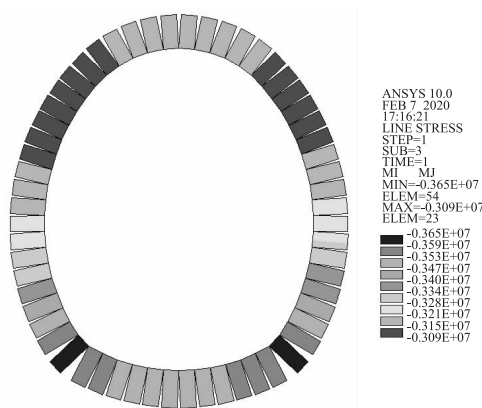


图 10 渐变结构轴力图

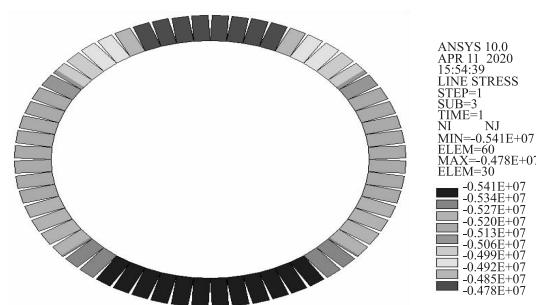


图 13 圆形结构轴力图

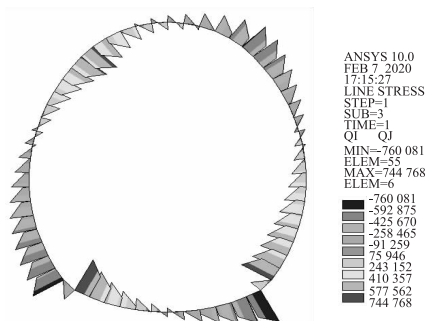


图 11 渐变结构剪力图

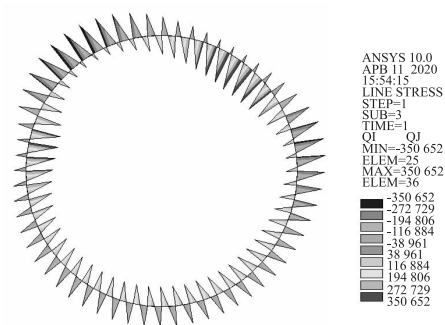


图 14 圆形结构剪力图

表 2 各断面类型衬砌造价比较表

衬砌断面类型	渐变形	类马蹄形	圆形
二衬厚度/cm	50	50	45
投资差异对比/万元	4.53	4.14	4.38

规范要求,安全系数最小点为边墙脚处。

(3)采用 Ansys 数值模拟软件,按荷载结构法对会富莱隧道圆形衬砌进行结构分析。大变形段落埋深较大,按深埋荷载施加围岩压力,圆形衬砌承载能力强,经试算最大径向荷载可达 0.85 MPa,计算结果如图 12~图 14 所示。

3.2.2 造价分析

设计对渐变形、类马蹄形、圆形 3 种衬砌断面的开挖、喷混凝土、二衬圬工等工程数量进行了估算、对比,经比较投资差异不明显,椭圆形衬砌断面投资最省,渐变形衬砌断面投资最高,各断面类型衬砌造价比较如表 2 所示。

3.2.3 选型分析

各断面类型衬砌综合指标比较如表 3 所示。结合未开挖段隧道埋深逐渐增大,围岩受普巴道山断层影响更加严重,变形程度可能加大的实际情况,初支开挖轮廓采用圆形衬砌断面。

表 3 各断面类型衬砌综合指标比较见表

衬砌类型	渐变形	类马蹄形	圆形
安全	次	中	优
经济	次	优	中
衬砌台车	加固	更换	更换

3.3 优化开挖工艺

采用初支拱架一次性封闭成环工法。下台阶一次

性挖出仰拱断面,仰拱初支与下台阶边墙初支一同施工,快速成环,减少围岩变形。上台阶距离下台阶6.75 m,进尺2.25 m/d,初支封闭成环分别需要2 d、3 d,初期支护成环快,受力结构较好,极大地降低了安全风险,变形量较小,安全可控<sup>[7]</sup>。V级围岩平均进度55 m/月,平均开挖2 d 3个循环共4.5 m,每循环16 h,进尺1.5 m。除去机械设备耽误及超前钻孔用时等,正洞平均进度55 m/月。

### 3.4 强化钢架和锁脚锚杆施工

钢拱架接头部位应加强线型控制,做好工字钢接头焊接,确保钢拱架的线型安全圆顺<sup>[8]</sup>;加强锁脚锚杆质量控制,严格斜插角度钻锁脚孔,采用快速凝浆液或树脂(药包)快速锚固<sup>[9]</sup>,宜在拱脚设2排锚杆。

### 3.5 强化监控量测运用

加强监控量测,实施量测报警管理,制定报警分级管理,在变形达到一定程度后,及时采取加固措施,确保施工安全;通过对监控量测数据进行分析,适当调整预留变形量<sup>[10]</sup>,本隧道开挖拱顶预留30~50 cm,单边收敛预留40~60 cm,确保了隧道净空要求。

## 4 结束语

本文通过对会富莱隧道软岩大变形特征进行总结<sup>[11]</sup>,针对性试验研究隧道软岩大变形控制技术,确保了隧道净空要求,会富莱隧道变形稳定后,拱顶沉降最大26 cm,单边收敛最大38 cm。后期隧道开挖过程中也未出现围岩变形超限的情况,取得了良好的效果。解决了中老铁路难点工程工期问题,降低了施工成本,保证了作业安全,为中老铁路顺利实施提供了可靠的保障。经综合分析和实践证明,通过优化隧道开挖轮廓断面,合理预留变形量,加强初期支护措施,优化开挖工法,严格施工工序管控,能有效遏制隧道软岩大变形。其中隧道轮廓断面优化控制变形效果显著,值得进一步研究和推广。

## 参考文献:

- [1] 张广泽,柴春阳,宋章,等. 软岩大变形发生的边界条件及对策探讨[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(8): 27-31.  
ZHANG Guangze, CHAI Chunyang, SONG Zhang, et al. The Discussion of Boundary Condition for Large Deformation of Soft Rockmass and Its Control Countermeasures [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(8): 27-31.
- [2] 李廷春. 毛羽山隧道高地应力软岩大变形施工控制技术[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(2): 59-67.  
LI Tingchun. Large Deformation Control Technology for Maoyushan Tunnel in Soft Rock under High In-situ Stresses [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(2): 59-67.

- [3] 李国良,刘志春,朱永全. 兰渝铁路高地应力软岩隧道挤压大变形规律及分级标准研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1): 62-68.  
LI Guoliang, LIU Zhichun, ZHU Yongquan. On the Large Squeezing Deformation Law and Classification Criteria for the Lanzhou-Chongqing Railway Tunnels in Soft and High Geostress Rocks [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(1): 62-68.
- [4] 戴永浩,陈卫忠,田洪铭,杨建平,孟祥军,邓小林. 大梁隧道软岩大变形及其支护方案研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4149-4156.  
DAI Yonghao, CHEN Weizhong, TIAN Hongming, et al. Study of Large Deformation and Support Measures of Daliang Tunnel with Soft Surrounding Rockmass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 4149-4156.
- [5] 赵福善. 兰渝铁路两水隧道高地应力软岩大变形控制技术[J]. 隧道建设, 2014, 34(6): 546-553.  
ZHAO Fushan. Technologies to Control Serious Deformation of Soft Rocks with High Ground Stress: Case Study on Liangshui Tunnel on Lanzhou-Chongqing Railway [J]. Tunnel Construction, 2014, 34(6): 546-553.
- [6] 王立英,王庆林,崔小鹏. 软岩大变形隧道施工技术探讨[J]. 兰州交通大学学报, 2014, 33(1): 93-98.  
WANG Liying, WANG Qinglin, CUI Xiaopeng. Discussion on Construction Technology of Large Deformation Tunnel in Soft Ground [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2014, 33(1): 93-98.
- [7] 吴广明. 高地应力软岩大变形隧道施工技术[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(4): 94-98.  
WU Guangming. Construction Techniques for a Tunnel in Highly Deformed Soft Rock with High Ground Stress [J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(4): 94-98.
- [8] 刘仁阳. 成兰铁路杨家坪隧道活动断裂软岩大变形处治设计施工技术[J]. 企业技术开发, 2016, 35(12): 8-13.  
LIU Renyang. Design and Construction Technology in Active Faults and Large Deformation of Soft Rock Treatment in Yangjiaping Tunnel of Chengdu-Lanzhou Railway [J]. Technological Development of Enterprise, 2016, 35(12): 8-13.
- [9] 闫红江,邓志刚. 丽香铁路中义隧道高地应力软岩大变形控制技术[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 67-72.  
YAN Hongjiang, DENG Zhigang. Large Deformation Control Technology of High Ground Stress Soft Rock in Zhongyi Tunnel of Lixiang Railway [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(1): 67-72.
- [10] 赵铁山. 软岩大变形隧道灾害预防和治理施工技术[J]. 公路隧道, 2014(2): 54-57.  
ZHAO Tieshan. Construction Technology of Tunnel Disaster Prevention and Management of Soft Rock Large Deformation [J]. Highway Tunnel, 2014(2): 54-57.
- [11] 郭相武,李彪,肖仲红. 基于缝合地带软岩隧道大变形机理研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 99-105.  
GUO Xiangwu, LIBiao, XIAO Zhonghong. Study on Large Deformation Mechanism of Soft Rock Tunnel in Suture Zone [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 99-105.

(编辑:车晓娟 张红英)