

文章编号: 1674—8247(2024)05—0092—08

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.05.016

中老铁路盐岩地层隧道断面型式研究

赵万强¹ 李金宜¹ 罗禄森¹ 王志杰²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031;

2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘 要:中老铁路盐岩地层隧道施工中出现基底塌陷、衬砌开裂等病害。为保证该隧道安全施工和健康服役,采用现场勘探、数值计算、理论分析、监控量测等方法对隧道断面型式进行研究。结果表明:(1)蛋形断面围岩变形略小于原马蹄形断面,但塑性区面积大幅增加;椭圆形、圆形断面有利于围岩稳定;(2)马蹄形断面拱顶存在应力集中,蛋形断面墙脚应力较大,椭圆形、圆形断面受力均匀,且椭圆形安全系数大于圆形;(3)将断面面积、衬砌周长、洞周变形率、围岩塑性区面积比、最小安全系数作为评价指标,综合考虑施工因素,圆形断面型式最优;(4)隧道采用圆形断面施工后,围岩变形、应力大幅度减小,衬砌无裂缝,仰拱底鼓情况改善。

关键词:铁路隧道;盐岩地层;断面型式;数值计算;层次分析法;现场量测

中图分类号:U459.1

文献标志码:A

Study on Tunnel Section Types in Salt Rock Strata for the China-Laos Railway

ZHAO Wanqiang¹ LI Jinyi¹ LUO Lusen¹ WANG Zhijie²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China; 2. MOE Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: During the construction of tunnels in salt rock strata for the China-Laos Railway, issues such as base collapse and lining cracks have emerged. To ensure the safe construction and healthy operation of these tunnels, a comprehensive study on tunnel section types was conducted using methods including field exploration, numerical calculations, theoretical analysis, and monitoring measurements. The results indicate: (1) The deformation of surrounding rock in the egg-shaped section is slightly less than that in the original horseshoe-shaped section, but the plastic zone area increases significantly. Elliptical and circular sections are more conducive to the stability of surrounding rock. (2) Stress concentration occurs at the vault of the horseshoe-shaped section, while the wall feet of the egg-shaped section experience higher stresses. Elliptical and circular sections exhibit uniform stress distribution, with the elliptical section having a higher safety factor than the circular one. (3) Considering the section area, lining perimeter, deformation rate around the tunnel perimeter, ratio of plastic zone area in surrounding rock, and minimum safety factor as evaluation indicators, along with construction factors, the circular section type is determined to be the optimal choice. (4) After adopting the circular section for tunnel construction, the deformation and stress of surrounding rock are significantly

收稿日期:2023-08-28

作者简介:赵万强(1970-),男,教授级高级工程师。

引文格式:赵万强,李金宜,罗禄森,等.中老铁路盐岩地层隧道断面型式研究[J].高速铁路技术,2024,15(5):92-99.

ZHAO Wanqiang, LI Jinyi, LUO Lusen, et al. Study on Tunnel Section Types in Salt Rock Strata for the China-Laos Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(5):92-99.

reduced, no cracks are observed in the lining, and the uplift of the invert is improved.

Key words: railway tunnel; salt rock strata; section type; numerical calculation; analytic hierarchy process; field measurement

盐岩地层含有大量石膏、氯盐、芒硝等易溶盐^[1],其较好的蠕变性及易形成空腔的特点,成为天然气等存储的最优介质^[2]。

1990年,Hunsche U^[3]对盐岩进行真三轴试验,研究盐岩蠕变与破坏,基于Drucker-Prager准则建立盐岩强度理论。陈锋^[4]等对盐岩扩容损失特性进行研究,建立了含泥盐岩剪胀角模型。岩遇水易溶解、强腐蚀性^[5]及强膨胀性,给隧道施工带来极大的困难^[5]。当前对于含盐隧道的认识大多停留在沿海隧道。Li^[6]通过扫描电镜、能谱等设备对中国东海岸1980—1996年建成的隧道结构混凝土成分变化进行研究,发现沿海隧道化学侵蚀有氯离子侵蚀、钙浸出、镁离子侵蚀和氯化镁侵蚀。含盐地层山岭隧道的研究屈指可数,刘高金^[7]针对国内已运营含盐隧道,对不同盐类成分的隧道破坏原因做出分析。Li^[8-10]等通过现场调研、室内试验、理论分析、现场测量等手段,对中老铁路盐岩隧道灾变机理、致灾因子进行研究。然而,目前对盐岩隧道断面形式的研究还不清晰。

此外,当前针对隧道断面型式的研究大多基于常规地质条件大断面隧道^[11],特殊岩层铁路隧道断面研究罕见。王午阳^[12]基于解析解,采用退火法优化隧道

结构受拉问题,提出最优隧道断面;谷莉薇^[13]和李凌志^[14]采用荷载结构法计算结构受力,优化隧道断面。

综上所述,国内外学者对盐岩性质进行了一系列研究,但研究成果未能有效匹配盐岩地层隧道断面型式设计。为此,本文采用现场勘探、数值模拟、现场量测等方法,从围岩稳定性、结构安全性对隧道断面型式进行研究,采用层次分析法进行断面型式比选,研究成果可保证隧道安全施工、长期服役。

1 工程概况

中老铁路友谊隧道位于中国与老挝交界处,穿越国境线,为设计速度160 km/h的单线铁路隧道。隧道全长9 595.407 m,老挝境内长2 425 m,起讫里程为DK0+000~DK2+425,最大埋深243 m,围岩等级均为IV、V级。

友谊隧道盐岩段开挖揭示围岩主要为含硬石膏、泥灰质角砾石盐岩,最大含盐量超过90%,盐岩呈条带状、巨厚层状及块状。采用天然场音频大地电磁法对友谊隧道(DK0+000~DK1+600)进行物探,施工超前钻探同步揭示岩层总体表现为由小里程向大里程含盐量逐渐增多,盐岩分布情况如图1所示。

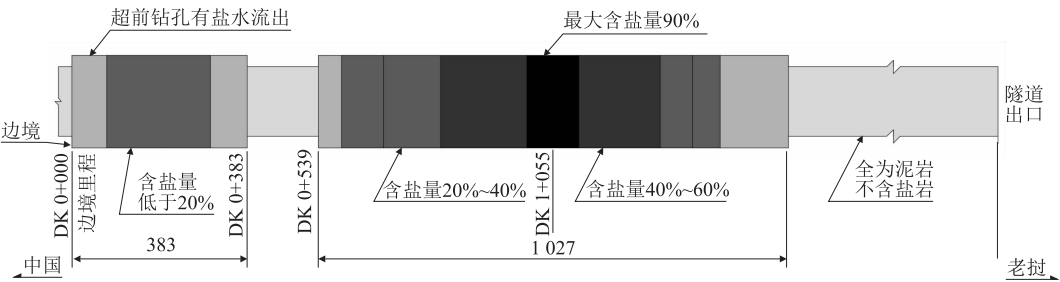


图1 盐岩分布情况图(m)

隧道原断面为三心圆马蹄形,如图2所示,开挖面积80.68 m³,断面周长30.01 m。初期支护为25 cm的C25喷射混凝土,二次衬砌为45 cm厚的C45素混凝土。在施工期间,原二次衬砌素混凝土段出现大量裂缝、初期支护表面盐结晶膨胀,隧道仰拱出现塌陷、底鼓开裂等灾变^[15]。在含盐量较低的地段易产生溶蚀孔洞,恶化隧道基底、围岩的受力条件;在含盐量较大的地段,石盐、石膏、硬石膏的淋滤浸出液对混凝土、钢结构具有强烈化学侵蚀及物理膨胀作用,破坏隧道的衬砌和防水结构。

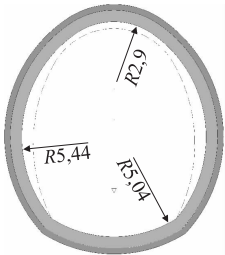
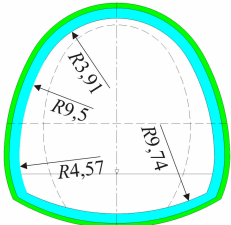
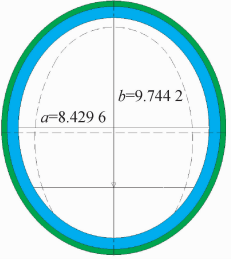
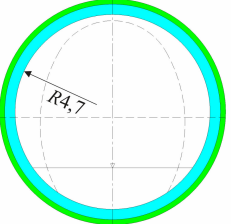


图2 原设计马蹄形断面图

2 盐岩段隧道断面型式研究

根据 TB 10003 – 2016《铁路隧道设计规范》^[16]对膨胀岩隧道断面设计要求(断面型式可以选择圆形或接近圆形断面),本文将六圆弧蛋形、椭圆形、圆形 3 种断面与原设计进行对比,从围岩变形受力、隧道结构安全性、施工经济性等角度综合比选出最优断面。拟优化断面型式如表 1 所示,图中初期支护为 25 cm 厚的 C25 喷射混凝土,二次衬砌为 45 cm 厚的 C40 钢筋混凝土。

表 1 断面型式表

| 断面型式 | | 开挖面积 /m ³ | 断面周长 /m |
|-------|---|-------------------------|------------|
| 六圆弧蛋形 |  | 92.69 | 34.71 |
| 椭圆形 |  | 87.69 | 33.29 |
| 圆形 |  | 93.31 | 34.24 |

2.1 围岩稳定性分析

2.1.1 模型建立

采用 FLAC3D 和友谊隧道相关设计资料建立数值模型,模型左右边界至隧道距离为 4 倍开挖宽度,上下边界至隧道距离为 4 倍开挖高度。

围岩采用 Mohr-Coulomb 模型,初期支护采用弹性模型。通过室内试验,并结合现场勘察资料及相关规范,围岩及支护材料参数如表 2 所示。

表 2 围岩及支护参数表

| 材料 | 弹性模量 /MPa | 泊松比 | 密度 /(g/cm ³) | 内摩擦角 /(°) | 黏聚力 /kPa |
|-----------|--------------|-----|-----------------------------|--------------|-------------|
| 盐岩 | 254 | 0.4 | 2.1 | 25 | 55.6 |
| C25 混凝土 | 23 000 | 0.2 | 2.4 | — | — |
| C40 钢筋混凝土 | 33 500 | 0.2 | 2.5 | — | — |

2.1.2 围岩变形

4 种断面型式下围岩变形如图 3 所示,将拱顶沉降、仰拱隆起、最大水平收敛汇总,如表 3 所示。

表 3 洞周围岩位移表 (cm)

| 断面型式 | 拱顶沉降 | 仰拱隆起 | 拱腰收敛 |
|--------|-------|------|-------|
| 三心圆马蹄形 | 13.05 | 6.82 | 24.05 |
| 六圆弧蛋形 | 12.75 | 6.84 | 23.92 |
| 椭圆形 | 10.86 | 6.75 | 22.40 |
| 圆形 | 10.90 | 6.58 | 20.34 |

由表 3 可知,4 种断面围岩变形云图相近,拱顶沉降均远大于仰拱隆起,拱腰处围岩竖向位移基本为 0,隧道未发生整体下移。4 种断面围岩水平变形最大值均发生在隧道拱腰处。以原设计断面围岩变形为基准,六圆弧蛋形断面拱顶沉降增加 2.30%,仰拱隆起增加 0.30%,拱腰收敛减小 0.54%,围岩变形与原设计基本一致。椭圆形断面拱顶沉降减小 16.78%,仰拱隆起减小 1.26%,拱腰收敛减小 6.86%;圆形断面拱顶沉降减小 16.48%,仰拱隆起减小 3.52%,拱腰收敛减小 15.43%。圆形断面、椭圆形断面均对隧道拱顶沉降及拱腰收敛有非常明显的改善,但对仰拱隆起的控制相对较差。椭圆形断面对拱顶沉降的控制效果略优于圆形断面,但对拱腰收敛的控制效果远差于圆形断面。

2.1.3 围岩塑性区

4 种断面型式塑性区面积结果如表 4 所示。原设计断面、六圆弧蛋形断面围岩塑性区呈“猫脸”分布,在拱肩处明显向 45° 斜向发展,椭圆形断面、圆形断面塑性区斜向发展程度小,基本呈“矩形”分布,洞周围岩受力均匀。六圆弧蛋形断面塑性区面积较原设计断面大,增长 20.54%,与其开挖面积较大有关。椭圆形断面、圆形断面塑性区体积较原断面小,分别减小 9.97%、13.05%。

围岩稳定性需综合围岩变形及围岩塑性区分布情况,六圆弧蛋形围岩变形略小于原设计,但其塑性区分布较原设计增长较大。椭圆形、圆形断面均能有效减小围岩变形,减小洞周围岩塑性区分布,减小隧道开挖对围岩的扰动。

2.2 支护结构安全性分析

2.2.1 模型建立

通过 ANSYS 建立友谊隧道荷载 – 结构模型,采用 beam188 单元模拟衬砌,采用 combine14 单元模拟围岩与衬砌作用。盐岩遇水溶解后重结晶体积增大、Cl⁻ 离子锈蚀钢筋产生的锈胀压力以及硫酸盐侵蚀均会对

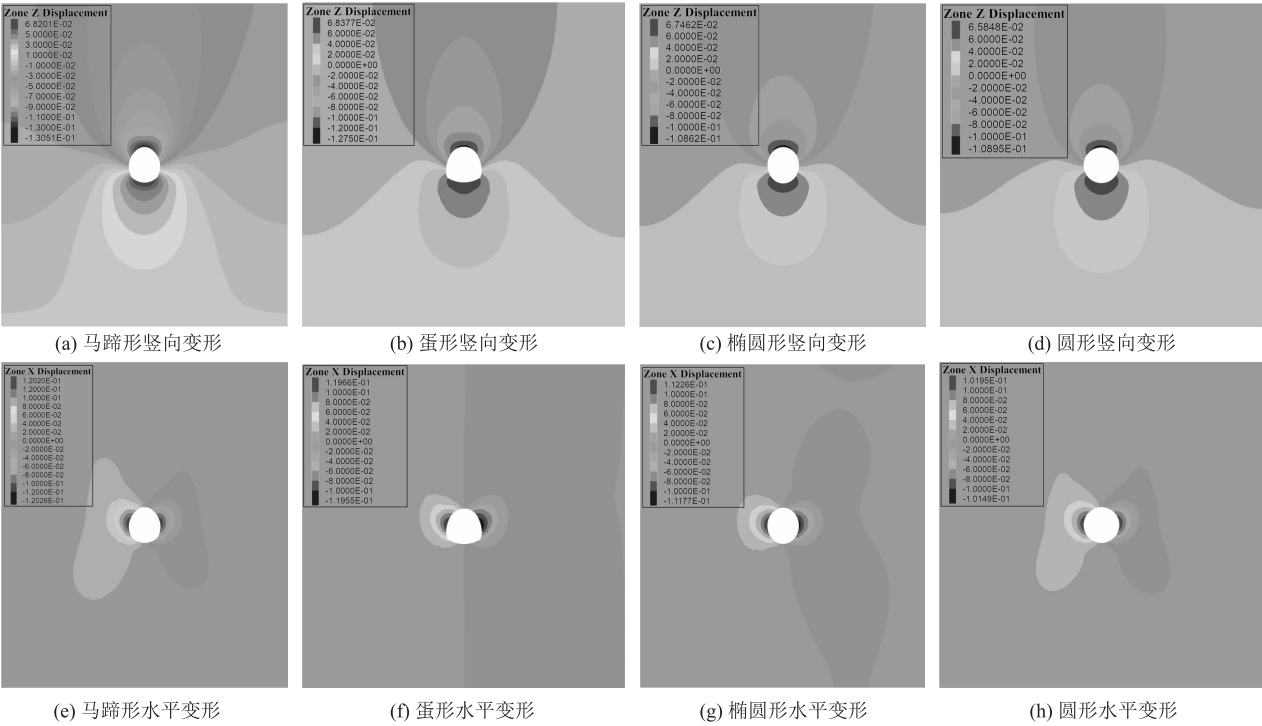


图 3 洞周围岩位移云图

| 表 4 洞周塑性区分布表 | | |
|--------------|--|-------------------|
| 塑性区分布及形状 | | 面积/m ² |
| 三心圆马蹄形 | <div>Zone State By Average</div> <div>None shear-p shear-p tension-p</div> | 762.877 |
| 六圆弧蛋形 | <div>Zone State By Average</div> <div>None shear-p shear-p tension-p</div> | 919.607 |
| 椭圆形 | <div>Zone State By Average</div> <div>None shear-p shear-p tension-p</div> | 686.807 |
| 圆形 | <div>Zone State By Average</div> <div>None shear-p shear-p tension-p</div> | 663.307 |

隧道衬砌产生膨胀压力,文献[17]采用围岩降级的方法计算膏盐地层隧道衬砌所受围岩压力。根据文献[1],在对支护安全性分析时,衬砌受到 250 kPa 膨胀压力,如图 4 所示。

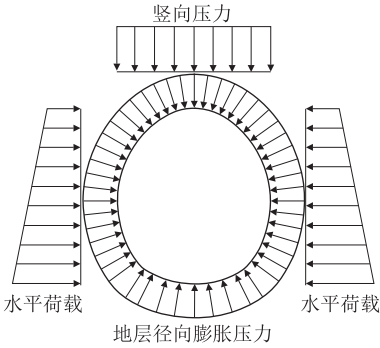


图 4 膨胀压力作用示意图

2.2.2 结构内力分析

结构内力和安全系数结果如表 5 所示。相较于原设计断面,六圆弧蛋形断面安全系数平均提升 12.13%,椭圆形断面安全系数平均提高 42.53%,圆形断面安全系数平均提高 21.27%。

由表 5 可知,原设计断面在拱顶处有较大应力集中,弯矩高达 -720 kN·m,此处也是断面最为薄弱处,安全系数低至 1.98,不满足设计要求,需要进行补强,在其拱脚处也存在应力集中现象。六圆弧蛋形断面拱顶曲率大,能有效减小拱顶处的应力集中,但其拱脚应力集中现象被放大,弯矩可达 -1 014 kN·m,此处安全系数仅 1.3,在盐岩隧道中,拱脚处存在较大膨胀地层压力,尤为危险。椭圆形、圆形断面受力较为均匀,弯矩较大值位于拱脚与拱肩处,在拱顶处安全系数

最小,分别为 3.11、2.12,均符合设计要求。除拱腰 外,安全系数呈上小下大分布。

表 5 二次初砌内力及安全系数表

| 断面类型 | 关键点 | 轴力/kN | 弯矩/(kN·m) | 安全系数 | 轴力图 | 弯矩图 | 安全系数图 |
|--------|-----|--------|-----------|------|-----|-----|-------|
| 三心圆马蹄形 | 拱顶 | -2 388 | -720 | 1.98 | | | |
| | 拱肩 | -2 291 | 497 | 3.35 | | | |
| | 拱腰 | -2 391 | 222 | 5.05 | | | |
| | 拱脚 | -2 828 | 542 | 3.13 | | | |
| | 仰拱 | -3 136 | 105 | 4.82 | | | |
| 六圆弧蛋形 | 拱顶 | -1 743 | 363 | 4.64 | | | |
| | 拱肩 | -2 238 | -122 | 6.21 | | | |
| | 拱腰 | -2 668 | -290 | 4.29 | | | |
| | 拱脚 | -3 024 | -1 014 | 1.30 | | | |
| | 仰拱 | -2 936 | 467 | 3.35 | | | |
| 椭圆形 | 拱顶 | -1 449 | -433 | 3.11 | | | |
| | 拱肩 | -2 165 | 428 | 3.71 | | | |
| | 拱腰 | -2 208 | 14 | 7.59 | | | |
| | 拱脚 | -2 310 | -181 | 5.40 | | | |
| | 仰拱 | -2 595 | 46 | 6.05 | | | |
| 圆形 | 拱顶 | -1 787 | -631 | 2.12 | | | |
| | 拱肩 | -2 578 | 575 | 2.98 | | | |
| | 拱腰 | -2 642 | 18 | 6.57 | | | |
| | 拱脚 | -2 835 | -167 | 4.91 | | | |
| | 仰拱 | -3 281 | -55 | 5.17 | | | |

2.3 基于 AHP 的隧道断面型式比选

2.3.1 评价指标及层次结构

本文以开挖面积、衬砌周长、洞周变形率、塑性区面积比、二次衬砌最小安全系数为比选准则,4 种断面各指标值如表 6 所示。洞周变形率为水平收敛率与竖向收敛率平均值,塑性区面积比为塑性区面积与开挖面积之比。

表 6 比选指标表

| 类型 | 开挖面积 /m ² | 衬砌周长 /m | 洞周变形率/% | 塑性区面积比 | 二次初砌最小安全系数 |
|-----|----------------------|---------|---------|--------|------------|
| 马蹄形 | 80.68 | 30.01 | 2.193 | 9.46 | 1.98 |
| 蛋形 | 92.69 | 34.71 | 2.028 | 9.92 | 1.30 |
| 椭圆形 | 87.69 | 33.29 | 1.911 | 7.83 | 3.11 |
| 圆形 | 93.31 | 34.24 | 1.735 | 7.36 | 2.12 |

利用 Matlab 中 Eig 函数,得到最大特征值 $\lambda_{\max} = 5.066\ 4$ 及特征向量 $W_v = (0.265\ 0\ 0.050\ 8\ 0.155\ 4\ 0.165\ 5\ 0.363\ 2)$ 。

$$V = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 2 & 2 & 1/2 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 1/4 & 1/6 \\ 1/2 & 3 & 1 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 4 & 1 & 1 & 1/2 \\ 2 & 6 & 2 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

计算出矩阵特征值及特征向量后,需要进行一致性检验,公式为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式中:CI——一致性指标;
n——矩阵阶数;
RI——随机一致性指标,与矩阵阶数有关,当 n=4 时,RI=0.89;当 n=5 时,RI=1.12。
CR 为一致性检验指标。

计算 CI=0.016 6,CR<0.1,则认为准则层构造矩阵通过一致性通过检验。

构造矩阵如下所示,利用 Matlab 计算所得权重向量及一致性判别指标如表 7 所示。

$$C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & 5 \\ 1/3 & 1 & 1/2 & 2 \\ 1/2 & 2 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/2 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \quad C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1/2 & 1 \\ 1/2 & 2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$
$$C_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/5 & 1/9 \\ 2 & 1 & 1/3 & 1/6 \\ 5 & 3 & 1 & 1/2 \\ 9 & 6 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad C_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/5 & 1/7 \\ 2 & 1 & 1/3 & 1/5 \\ 5 & 3 & 1 & 1/2 \\ 7 & 5 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$C_5 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1/6 & 1/5 \\ 1/2 & 1 & 1/5 & 1/4 \\ 5 & 6 & 1 & 1 \\ 4 & 5 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

表7 准则层权重计算及一致性检验表

| 矩阵 | W_C | CI | CR |
|-------|-----------------------------------|---------|---------|
| C_1 | (0.482 9 0.1570 0.272 0 0.088 2) | 0.004 8 | 0.005 4 |
| C_2 | (0.455 4 0.140 9 0.262 8 0.140 9) | 0.003 5 | 0.003 9 |
| C_3 | (0.056 2 0.100 0 0.285 9 0.557 8) | 0.002 7 | 0.003 0 |
| C_4 | (0.063 0 0.109 8 0.300 5 0.526 7) | 0.006 7 | 0.007 5 |
| C_5 | (0.098 2 0.075 9 0.434 3 0.391 6) | 0.027 0 | 0.030 3 |

隧道开挖面积等5个指标构造矩阵的 CR 均 < 0.1 ,认为构造矩阵的一致性较好。

2.3.2 方案比选

目标层构造矩阵权重向量左乘准则层构造矩阵权重向量即可得到方案层4种方案对于目标层的排序,为:

$$W = W_{Bi}^T W_C = \begin{pmatrix} 0.482\ 9 & 0.455\ 4 & 0.056\ 2 & 0.063\ 0 & 0.098\ 2 \\ 0.157\ 0 & 0.140\ 9 & 0.100\ 0 & 0.109\ 8 & 0.075\ 9 \\ 0.272\ 0 & 0.262\ 8 & 0.285\ 9 & 0.300\ 5 & 0.434\ 3 \\ 0.088\ 2 & 0.140\ 9 & 0.557\ 8 & 0.526\ 7 & 0.391\ 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.265\ 0 \\ 0.050\ 8 \\ 0.155\ 4 \\ 0.165\ 5 \\ 0.363\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.205\ 9 \\ 0.110\ 0 \\ 0.337\ 3 \\ 0.345\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

一致性检验结果为:

$$CR_{总} = \frac{CI_{总}}{RI_{总}} = \frac{\sum_{i=1}^5 W_{Vi} CI_i}{\sum_{i=1}^5 W_{Vi} RI_i} = 0.014\ 4 < 0.1 \quad (5)$$

则层次分析通过总的一致性检验。

通过层次计算,可知在友谊隧道4种断面的适用性为圆形断面(0.345 0)、椭圆形断面(0.337 3)、三心圆马蹄形断面(0.205 9)、六圆弧蛋形断面(0.110 0)。综合考虑经济性、安全性,将隧道开挖断面积、衬砌工作量、洞周变形率、围岩状态、结构安全系数等作为优化指标,圆形、椭圆形断面计算结果接近,作为盐岩隧道断面型式均较为合适,应根据工程实际需求进行选择。椭圆形断面在结构安全系数上略优于圆形断面,圆形断面在围岩稳定性上略优于椭圆形段面。

考虑到友谊隧道盐岩水溶液还具有强烈腐蚀性,需要做好结构的防水。从施工难易程度及防水结构、

施作、铺设的便利性出发,友谊隧道盐岩段后续施工采用圆形断面。

3 现场实测分析

3.1 测点布置

支护结构位移测量内容包括隧道拱顶竖向位移,拱腰、拱脚、墙脚水平位移以及仰拱隆起;埋入土压力盒对围岩压力进行监测;原马蹄形断面及施工采用圆形断面监测点位如图5所示。

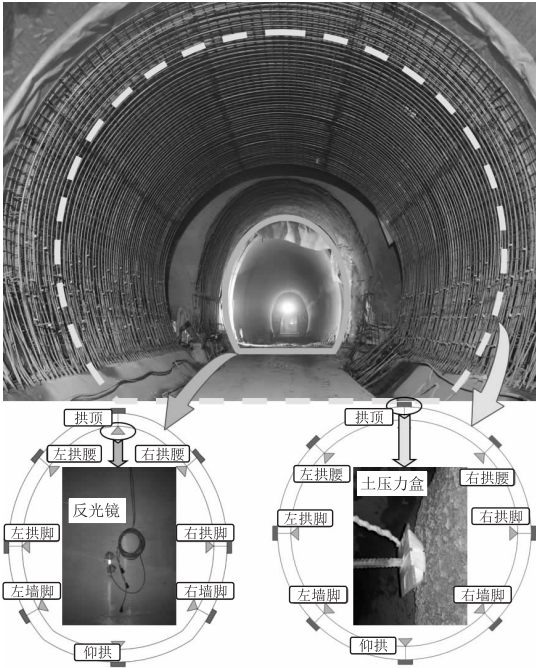


图5 现场测点布置图

3.2 实测数据分析

选取断面变更处前后监测断面进行对比分析。DK0+720断面按原设计马蹄形断面施工,该处围岩含盐量为42%,在二次衬砌素混凝土施工完成1个月后发现环向、纵向裂缝。后续施工采用圆形断面,并进行全环注浆,隧道变形稳定,衬砌无裂缝发展、无盐类结晶析出,仰拱底鼓情况得到有效控制。洞周围岩变形及洞周围岩接触压力如图6、图7所示。

DK 0+760处围岩含盐量为48%,围岩情况较DK 0+720马蹄形断面更恶劣,但根据现场实测,洞周变形及围岩压力均小于DK 0+720。原马蹄形断面拱顶沉降稳定值为165.5 mm、仰拱隆起82.8 mm、最大水平收敛261.0 mm;圆形断面拱顶沉降、仰拱隆起、最大水平收敛较马蹄形断面均有大幅度下降,分别减小28.1%、14.13%、26.7%。

将两断面围岩压力进行对比,圆形断面较马蹄形

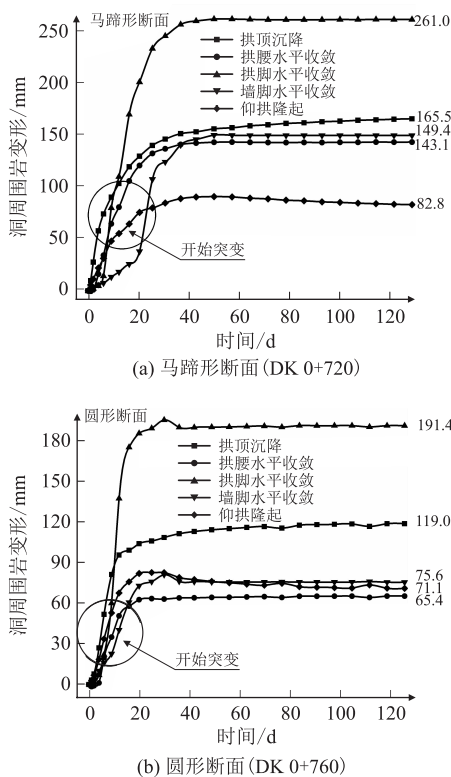


图6 洞周围岩变形图

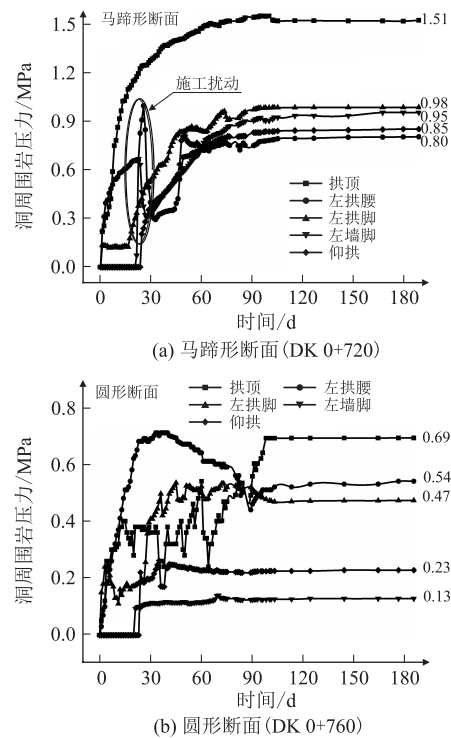


图7 洞周围岩接触压力图

断面对拱顶、拱腰、拱脚、墙脚、仰拱处围岩压力有显著优化,各位置依次减小幅度为54.30%、52.04%、32.50%、72.94%、86.32%,且墙脚、仰拱处圆形断面对围岩压力的优化作用最为明显,围岩压力最小为左

墙角处0.13 MPa,最大为隧道拱顶0.69 MPa。

围岩计算位移与现场实测对比结果如图8所示,两种断面型式计算与实测值接近,变形趋势相同,可认为数值模拟结果是合理的。

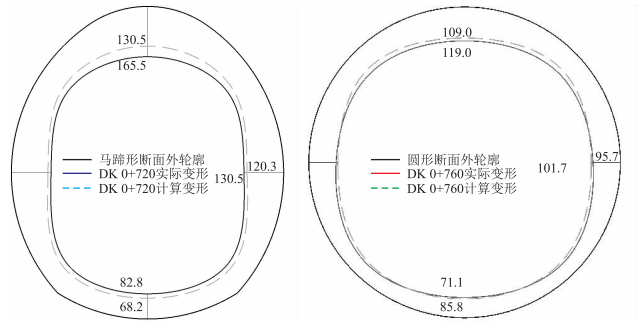


图8 计算与实测变形对比图(mm)

4 结论

根据中老铁路友谊隧道盐岩段地勘、设计资料及现场勘探结果,提出基于原马蹄形断面的3种优化型式,利用数值模拟、层次分析法、现场量测等方法对马蹄形断面、六圆弧蛋形断面、椭圆形断面、圆形断面进行比选,得到主要结论如下:

(1)六圆弧蛋形隧道围岩变形量略小于马蹄形隧道,但围岩剪切破坏塑性区发展面积较后者增长20.54%,两种断面型式塑性区呈“猫脸”分布。椭圆形、圆形隧道对围岩稳定性影响较小,椭圆形隧道围岩位移、塑性区面积均大于圆形断面,两种断面型式塑性区呈“矩形”分布。

(2)马蹄形隧道拱顶具有较大应力集中,安全系数最低点为1.98。六圆弧蛋形隧道应力集中发生在拱脚,其安全系数最低为1.3,其余部位安全系数较大。椭圆形、圆形隧道受力均匀,无应力集中现象,拱顶处安全系数最低,分别为3.11、2.12,椭圆形各部位安全系数均略大于圆形。

(3)运用AHP法对4种断面型式进行比选,将断面面积、衬砌周长、洞周变形率、围岩塑性区面积比、结构平均安全系数作为评价指标,综合考虑经济性与安全性,认为圆形、椭圆形作为盐岩隧道断面型式较好,从施工角度出发,盐岩隧道采用圆形断面最优。

(4)隧道采用圆形断面施工后,衬砌无裂缝发展,仰拱底鼓情况得到改善。圆形断面隧道衬砌变形及围岩压力均较马蹄形大幅度下降。

参考文献:

[1] 王志杰,李金宜,周飞聪,等.中老铁路膨胀性盐岩地层隧道结构体系优化及施工技术探究[J].隧道建设(中英文),2021,

- 41(1): 16–27.
- WANG Zhijie, LI Jinyi, ZHOU Feicong, et al. Structural System Optimization and Construction Technology of Tunnel in Expansive Salt Rock Stratum for China-Laos Railway [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(1): 16–27.
- [2] SINGH A, KUMAR C, GOPI KANNAN L, et al. Engineering Properties of Rock Salt and Simplified Closed-form Deformation Solution for Circular Opening in Rock Salt under the True Triaxial Stress State[J]. Engineering Geology, 2018, 243: 218–230.
- [3] HUNSCHE U, ALBRECHT H. Results of True Triaxial Strength Tests on Rock Salt [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35(4/5): 867–877.
- [4] 陈锋, 张青庆, 姚威, 等. 含泥盐岩的扩容特性与剪胀角模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(S2): 195–201.
- CHEN Feng, ZHANG Qingqing, YAO Wei, et al. Dilatation Characteristics and Dilatancy Angle Model of Mud-salt Rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 195–201.
- [5] 常兴旺, 宋章, 赵平, 等. 友谊隧道盐岩工程地质特征及防治对策[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(6): 26–31.
- CHANG Xingwang, SONG Zhang, ZHAO Ping, et al. The Engineering Characteristics and Prevention Countermeasures of Salt Rock in Friendship Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(6): 26–31.
- [6] LI Chen, WU Mengxue, CHEN Qing, et al. Chemical and Mineralogical Alterations of Concrete Subjected to Chemical Attacks in Complex Underground Tunnel Environments during 20-36 Years[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 86: 139–159.
- [7] 刘高金, 张广泽, 冯涛. 不同岩性的含盐地层隧道工程侵蚀成因探讨[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(10): 15–19.
- LIU Gaojin, ZHANG Guangze, FENG Tao. Exploration on the Causes of Erosion about Tunnel through Different Saliferous Strata [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(10): 15–19.
- [8] LI Jinyi, ZHOU Feicong, ZHOU Ping, et al. A Health Monitoring System for Inverted Arch of Salt Rock Tunnel Based on Laser Level Deformation Monitor and WFBG [J]. Measurement, 2021, 184: 109909.
- [9] ZHOU Ping, LI Jinyi, JIANG Yifan, et al. Damage Mechanism of Tunnels in the High-content Salt Rock Stratum [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(10): 7633–7652.
- [10] 王志杰, 李金宜, 邓宇航, 等. 盐岩隧道施工病害揭示及致灾因子研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 46–55.
- WANG Zhijie, LI Jinyi, DENG Yuhang, et al. On Defects and Disaster-causing Factors in Tunnelling in Salt Rocks [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(5): 46–55.
- [11] 黄铮钰. 断面几何特征对蠕变泥岩隧道底鼓的影响[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- HUANG Zhengyu. Influence of Geometrical Characteristics of Section on Floor Heave of Creep Mudstone Tunnel [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [12] 王午阳, 王华宁, 蒋明镜. 基于解析解和新准则的深埋隧道断面形状优化[J]. 力学季刊, 2022, 43(2): 227–238.
- WANG Wuyang, WANG Huaning, JIANG Mingjing. Shape Optimization of the Section of DeepBuried Tunnel Based on Analytical Solution and New Criterion [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2022, 43(2): 227–238.
- [13] 谷莉薇. 基于荷载结构法的隧道衬砌断面优化方案分析[J]. 北方交通, 2022(5): 80–83.
- GU Liwei. Analysis on Optimization Scheme of Tunnel Lining Section Based on Load Structure Method [J]. Northern Communications, 2022(5): 80–83.
- [14] 李凌志, 周骏, 滕鸣翰, 等. 基于层次分析法的超大隧道断面多准则优化分析[J]. 交通科技, 2022(4): 119–124.
- LI Lingzhi, ZHOU Jun, TENG Minghan, et al. Multi Criteria Optimization Analysis of Super Large Tunnel Section Based on Analytic Hierarchy Process [J]. Transportation Science & Technology, 2022(4): 119–124.
- [15] 罗仁立, 舒俊良, 刘志韬, 等. 中老铁路友谊隧道盐岩段衬砌开裂变形机理研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(5): 93–99.
- LUO Renli, SHU Junliang, LIU Zhitao, et al. A Study on Mechanism of Lining Cracking and Deformation in Halite Section of Youyi Tunnel of China-Laos Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(5): 93–99.
- [16] TB 10003–2016 铁路隧道设计规范[S].
- TB 10003–2016 Code for Design of Railway Tunnel [S].
- [17] 庞山, 宋玉香, 朱永全. 太行山隧道膏溶角砾岩地段合理断面型式研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(4): 48–51.
- PANG Shan, SONG Yuxiang, ZHU Yongquan. Study on Rational Section of Taihang Mountain Tunnel in Gypsum Breccia Region [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2006, 19(4): 48–51.