

文章编号: 1674—8247(2025)02—0087—07
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2025.02.014

水平岩层隧道底鼓整治及结构参数优化研究

王政松

(中铁二十三局集团有限公司, 成都 610072)

摘 要:针对某铁路隧道施工期间出现的仰拱隆起开裂问题,开展了现场地应力测试,揭示了仰拱隆起段的地应力主要以垂直于隧道轴向的水平应力为主,地应力为 15.24 ~ 21.69 MPa,强度应力比为 4.06 ~ 4.30,为高地应力状态。结合地层结构模型,研究了高地应力水平岩层环境下隧道仰拱半径及支护结构参数对仰拱结构受力及变形的影响。综合支护结构安全性和施工便捷性,提出了仰拱隆起段整治方案,确定了相匹配的仰拱曲率及仰拱结构参数;通过现场力学特性试验,结合后期长期监测数据,进一步验证了仰拱支护优化参数的合理性。

关键词:高地应力;水平岩层;隧道底鼓;仰拱曲率;参数优化

中图分类号:U457+.2 **文献标志码:**A

Study on Remediation and Structural Parameter Optimization of Tunnel Floor Heave in Horizontal Rock Strata

WANG Zhengsong

(China Railway 23rd Bureau Group Co. , Ltd. , Chengdu 610072, China)

Abstract: In response to the invert heave and cracking encountered during the construction of a railway tunnel , in situ geo-stress tests were conducted , and the results revealed that the principal geo-stresses in the heave zone predominantly consist of horizontal stresses perpendicular to the tunnel axis , with magnitudes ranging from 15.24 MPa to 21.69 MPa and a strength-to-stress ratio of 4.06 to 4.30 , indicative of a high geo-stress environment. Combining this with a stratum structure model , the influence of tunnel invert radius and support structure parameters on the invert 's structural loading and deformation was investigated under conditions of high geo-stress horizontal rock strata. Considering both the safety of the support structure and the convenience of construction , a remediation scheme for the invert heave section was proposed , a compatible invert curvature and associated invert structural parameters were determined. The rationality of the optimized invert support parameters was further substantiated through field mechanical property tests and subsequent long-term monitoring data.

Key words: high geo-stress; horizontal rock stratum; tunnel floor heave; invert curvature; parameter optimization

隧道在高地应力水平岩层环境下修建时,经常出现仰拱隆起现象,不仅影响隧道的正常施工,而且为隧道后期的运营埋下了安全隐患。隧道仰拱隆起的原因

诸多、机理复杂,已逐步成为国内外专家学者研究的热点^[1]。

万正等^[2]通过现场变形监测,认为地基软化和高

收稿日期:2023-04-24

作者简介:王政松(1973-),男,高级工程师。

引文格式:王政松.水平岩层隧道底鼓整治及结构参数优化研究[J].高速铁路技术,2025,16(2):87-93.

WANG Zhengsong. Study on Remediation and Structural Parameter Optimization of Tunnel Floor Heave in Horizontal Rock Strata[J]. High Speed Railway Technology, 2025, 16(2):87-93.

水压力是引起仰拱隆起的两大因素,并提出了相应的治理措施。高震等^[3]基于强度劣化理论,分析了含水率变化导致隧底围岩强度降低的底鼓变形机理。刘勇等^[4]分析了仰拱隆起病害的原因,认为高地应力是造成隧道隆起的主要原因。陈洋宏等^[5]利用数值计算软件,研究单因素和多因素耦合对隧道底鼓的影响规律,结果发现各因素影响显著性排序为:隧道埋深>侧压力系数>硬质岩弹性模量>岩层倾角>硬质岩岩层厚度。陈贵红等^[6]针对紫坪铺隧底隆起问题,根据病害不同情况分别提出不同治理措施,处置技术核心是:加固隧底围岩并设钢筋混凝土仰拱。肖小文等^[7]对隧道仰拱隆起原因进行了调查分析,提出了钢管桩结合中空锚杆注浆加固的治理方案。李尧等^[8]结合监测数据分析了某重载铁路出现隧道底鼓的原因,主要是膨胀岩地区地下水环境发生变化,并针对性地采用了隧底翻修的措施进行治理。杜明庆等^[9]采用室内试验结合数值模拟的方法探究了仰拱底鼓的破坏模式,认为大断面隧道仰拱曲率较小,易出现底鼓现象。王琳等^[10]针对董奉山隧道出现的施工大变形进行了详细分析,提出了“超前帷幕注浆+井点降水”的辅助加固措施,以保证掌子面前方围岩施工环境。孙韶峰等^[11]通过勘探与数值分析相结合手段,对砂泥岩地层中隧道衬砌的开裂原因进行分析,确定高地应力和较低的岩体强度引起的围岩挤压变形是衬砌开裂的主要原因。李登峰等^[12]利用数值模拟软件模拟了隧道地质环境和施工工况,探究了某隧道发生底鼓的原因,发现高地应力和衬砌支护强度不足是导致隧道底鼓发生的主要原因。肖广智等^[13]以工程实际为基础,分析了轨道隆起产生的原因,通过对病害的探查,提出了整治方案。孔恒等^[14]在工程实践的基础上,全面分析了隧底隆起的成因、分类与控制技术途径,总结归纳了隧道仰拱隆起控制的一般原则,并提出了仰拱隆起控制的技术途径。汪洋等^[15]依托十漫高速公路云岭隧道工程,分析了影响隧道仰拱隆起变形因素,提出了隧道底鼓的治理措施。王立川等^[16]依托某隧道工程,通过现场调查、理论分析和数值计算等手段,分析认为引起该隧道仰拱隆起变形的主要原因是极高地应力的作用。马有良^[17]针对运营线路无砟轨道隧道底鼓病害问题,采用了现场调查、探孔验证和地质补勘等手段,深入分析了既有隧道结构的状况和病害原因,并据此选择了最佳的处置方案。

综上所述,目前对隧道仰拱隆起问题的研究取得了诸多成果,但总体而言,在极高地应力水平岩层条件下,通过调整仰拱曲率及匹配相应的支护参数优化,来治理隧道仰拱隆起问题的相关研究还较少。鉴于此,

本文以穿越高地应力水平岩层的某铁路隧道为工程背景,采用现场测试和数值模拟等手段,分析不同仰拱曲率对隧道隆起变形的影响,综合考虑施工便捷性及经济性,提出合理的仰拱曲率及配套支护参数。研究成果可为类似地质条件下的隧道仰拱隆起整治提供技术支撑。

1 依托工程

1.1 工程概况

该铁路隧址区属构造剥蚀高中山地貌单元,地形起伏较大,地面高程 980.0 ~ 2 010.8 m,相对高差 200 ~ 1 000 m,自然坡度 15° ~ 55°不等,最大埋深约 887 m。隧道位于金沙江东岸坡麓地带,大致平行通过活动断裂元谋-绿汁江断裂,隧址区发育竹木山(保安营)向斜及保安营正断层。隧道洞身于 LXD 4K7 + 580 附近保安营正断层发育,断层破碎带影响宽度约 100 ~ 130 m。

隧道埋深大于 400 m 标段的地层以晋宁期花岗闪长岩及三叠系上统宝鼎组(T3bd)砂岩、页岩互层夹炭质页岩、砾岩及煤为主。掌子面围岩呈薄层~中厚层状,位于舒缓向斜,岩层近水平状缓倾。

隧道采用复合式衬砌,具体参数如表 1 所示,仰拱半径为 6.4 m,设计断面尺寸如图 1 所示。

表 1 原设计支护参数表

C25 喷射混凝土/cm	钢筋网	锚杆	钢架	二次衬砌/cm
15	A6@25	环向×纵向 1.2m×1.5m	三肢格栅	C30 混凝土 40cm

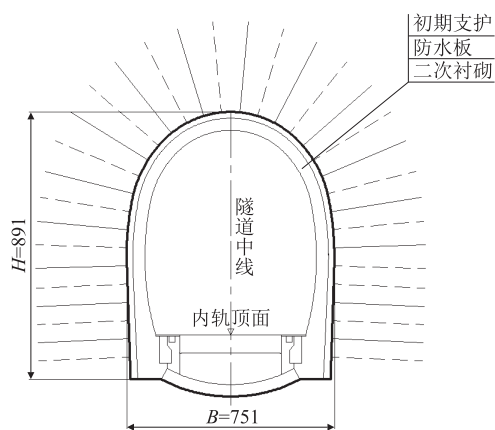


图 1 隧道断面尺寸图(cm)

1.2 仰拱隆起情况

隧道 1 号斜井自 2014 年 6 月 21 日开始施工,底板在 2015 年 7 月开始隆起,并有逐渐严重趋势。其中隆起较严重段底板最大隆起高度约 1 m,且该段边墙

出现开裂,部分地段边墙喷混凝土出现剥落。隧底隆起段岩性以薄层状页岩、炭质页岩为主,偶夹薄~中厚层状粉砂岩,属软质岩。

经现场监测,初步发现 8 段长 293 m 出现仰拱隆起。裂缝沿纵向发育,向下贯通至混凝土填充层。根据混凝土裂纹处钻孔取芯观察,填充层混凝土裂纹基本已成贯通状,呈上宽下窄状,下部多闭合(手电照射可透光)。针对仰拱隆起情况,对仰拱隆起严重段内进行变形监测。通过监测发现,隧道隆起开裂最大的断面位于 LXD4K4+230 处,监测数据如图 2 所示。由图 2 可知,最大隆起高度达 47.82 cm,仰拱左侧隆起高度达 30 cm,仰拱右侧最大隆起高度达 22.8 cm,该断面隆起情况呈持续增长态势,并且在该地段隧道仰拱素混凝土填充层处出现一条明显的纵向贯通裂缝,宽度约为 0.6~1.4 cm。

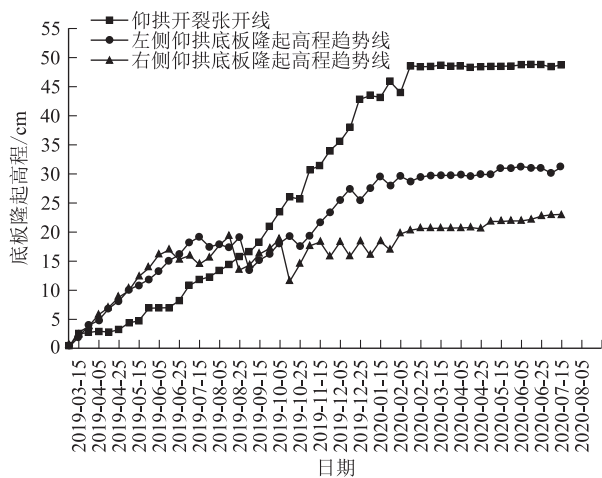


图2 仰拱隆起开裂趋势图

2 结构参数优化分析

2.1 仰拱隆起段地应力测试

在隧道仰拱隆起严重地段,采用应力解除法进行地应力测试工作,测试结果如表 2 所示。

由表 2 可知,仰拱隆起严重段地应力场以水平构造应力为主,最大主应力方向与隧道走向接近 90°,水平应力为 15.24~21.69 MPa,强度应力比 R_c/σ_{\max} 为 2.42~4.30,根据 GB/T 50218-2014《工程岩体分级标准》^[18],可判断该段属于高地应力区和极高地应力区。

2.2 仰拱结构参数优化分析

根据仰拱隆起开裂严重段的实际情况,采用有限元软件 ABAQUS 分析了不同仰拱半径下,隧道结构的受力特征和变形规律;通过对隧道结构受力及仰拱隆起变形的综合分析,确定合理的仰拱曲率,为后期仰拱

隆起病害整治提供依据。

表 2 现场地应力测试结果表

测点	深度/m	主应力				R_c/σ_{\max}
		应力	值/MPa	方位角/(°)	倾角/(°)	
1	400	σ_1	16.03	139	2	4.30
		σ_2	8.95	33	82	
		σ_3	8.74	230	8	
2	475	σ_1	17.41	214	6	4.06
		σ_2	13.01	20	84	
		σ_3	12.56	124	1	
3	430	σ_1	17.05	220	5	4.15
		σ_2	8.78	24	85	
		σ_3	8.31	130	2	
4	624	σ_1	20.66	232	7	4.11
		σ_2	16.47	8	81	
		σ_3	14.61	142	7	
5	684	σ_1	21.69	179	1	2.42
		σ_2	15.24	30	88	
		σ_3	12.68	269	1	

2.2.1 模型建立及参数选取

利用 ABAQUS 有限元软件建立数值模型,如图 3 所示,模型尺寸为 50 m×100 m×70 m。初期支护和二次衬砌采用弹性本构,围岩采用 Mohr-Coulomb 本构。边界条件为上表面为自由面,前后左右采用法向约束,底部采用竖向约束。单元类型采用三维实体单元(C3D8)。根据隧道现场施工情况,选取仰拱开裂严重段的围岩和支护结构参数进行数值模拟,荷载值依据地应力实测结果确定。为分析不同的仰拱开挖曲率对支护结构受力和变形的影响,根据工程经验,设置 8 种不同仰拱半径工况,如表 3 所示。围岩设置参数如表 4 所示。

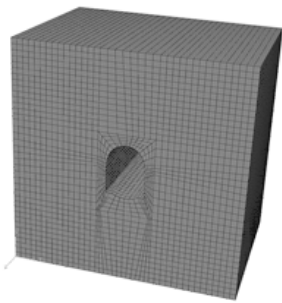


图3 ABAQUS 三维有限元模型图

表 3 仰拱半径各工况设置表

工况	1	2	3	4	5	6	7	8
仰拱半径/m	6.4	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0

表 4 围岩材料参数表

容重 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	黏聚力 C / kPa	摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	泊松比 ν	弹性抗力系数 $k / (\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1})$
24.5	4.0	33	30	0.18	150×10^3

2.2.2 仰拱合理半径确定

工况 1、工况 6 的衬砌结构竖直方向位移,如图 4 所示。由图 4 可知,两者仰拱隆起最大值皆出现在拱

底处,最大竖向位移分别为 56.7 cm 和 5.8 cm。

根据数值模拟结果,得到工况 1 衬砌结构的内力及安全系数,如图 5 所示。

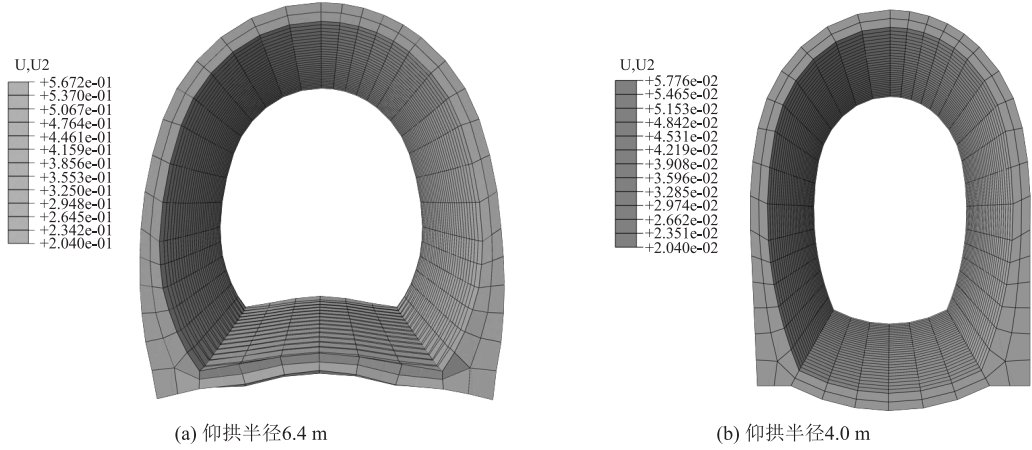


图 4 衬砌结构竖向位移图 (m)

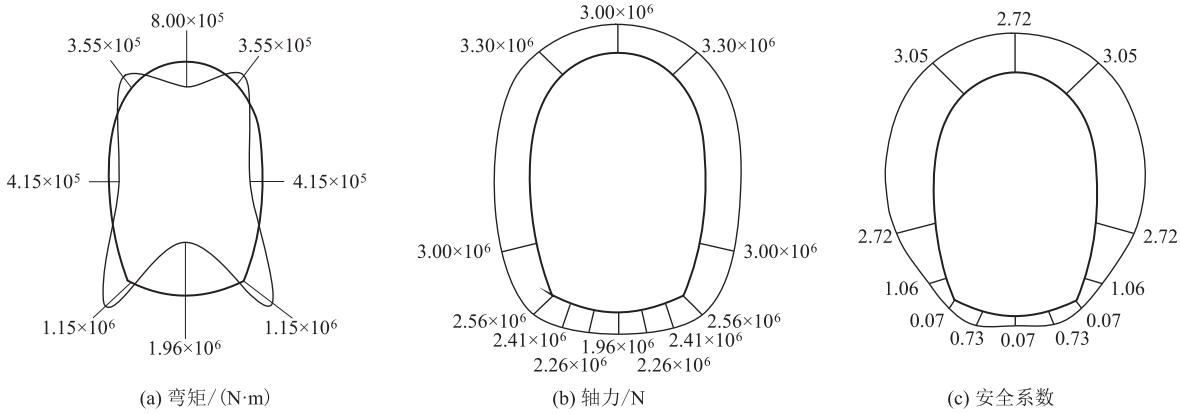


图 5 工况 1 衬砌结构的内力及安全系数图

由图 5 可知,弯矩最大值出现在墙脚和拱底处,墙脚处最大正弯矩为 $1.15 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$,仰拱处最大负弯矩为 $1.96 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。仰拱处的轴力达 $1.96 \times 10^6 \text{ N}$,最小安全系数为 0.07。

由于安全系数偏小,仰拱隆起位移偏大,需继续调整仰拱曲率以改善仰拱隆起位移偏大的情况。各工况下计算结果如表 5 所示,当仰拱半径从 6.4 m 减小到 5.0 m 时,对隧道结构的弯矩、轴力及位移的影响相对较小。半径从 4.5 m 减小到 4.0 m 时,仰拱弯矩减小了 48%,轴力减小了 29%,安全系数增大了 92%,仰拱竖向位移减小了 42%。由此可知,随着仰拱半径的

减小,其竖向位移变形也随之减小,最小安全系数随之增大,但其变化速率逐渐趋缓。

现场仰拱半径为 6.4 m 时,仰拱出现了隆起开裂;表明在此半径下,仰拱所受弯矩较大,导致内侧出现受拉破坏,因此有必要通过减小仰拱半径的方式来减小截面弯矩。理论上,仰拱半径越小,抵抗隆起破坏能力越强,但会增加施工的难度和提高造价;因此,综合考虑支护结构力学特性和施工便捷性,将仰拱半径调整为 4 m。此时,仰拱最大隆起量减小为原来的 0.12 倍,仅为 5.8 cm,安全系数增大到 0.96,仍然偏小,需要优化其他支护参数,以保证仰拱结构的安全。

表5 各工况计算结果表

仰拱半径 /m	仰拱最大弯矩 /(kN·m)	仰拱最大轴力 /kN	仰拱最小安全系数	仰拱竖向 位移/cm
6.4(原设计半径)	1.96	1.95×10^3	0.07	56.7
6.0	1.90	1.96×10^3	0.10	48.8
5.5	1.13	1.20×10^3	0.13	27.0
5.0	0.70	0.80×10^3	0.22	17.6
4.5	0.31	0.35×10^3	0.50	10.0
4.0	0.16	0.25×10^3	0.96	5.8
3.5	0.14	0.21×10^3	1.10	5.0
3.0	0.12	0.20×10^3	1.45	3.4

(3)仰拱隆起段其他支护参数优化

仰拱隆起开裂段半径调整为4 m时,安全系数仅为0.96;为保证隧道施工及运营安全,需对其原支护参数进行调整优化,提高结构的安全性。调整后的结构支护具体参数如表6所示。

表6 支护参数表

喷设混凝土 /cm	钢筋网	锚杆	钢拱架	二次衬砌 /cm	主筋
18	φ8@20	环向×纵向 1.2 m×0.6 m	I 20b	C35 混凝土 55	φ22@15

在数值计算中模拟钢拱架时,可采用等效刚度法^[19]将钢拱架与喷射混凝土视为整体进行分析,二者合并后的弹性模量表达为:

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

式中: E ——合并后的弹性模量(MPa);
 E_c ——喷射混凝土的弹性模量(MPa);
 A_s ——单位长度的钢拱架截面积(m^2);
 E_s ——钢拱架的弹性模量(MPa);
 A_c ——单位长度的喷射混凝土截面积(m^2)。

基于调整后的支护参数,通过数值计算获得结构的竖向位移云图,如图6所示。由图6可知,仰拱隆起量仅为2.83 cm,满足了变形要求;结构最小安全系数为2.8,说明调整后的参数能满足结构安全性要求。

3 仰拱整治工艺及结构安全性

3.1 仰拱隆起整治

对已出现的仰拱开裂段落,需要将边墙、仰拱拆除,调整仰拱曲率,按新仰拱曲率重新施做支护结构,需拆除部位如图7所示。

底鼓结构拆换前,需在隧道两侧的水沟盖板顶面下方施做拱墙锁脚锚杆以稳固上部结构,其中锚杆采

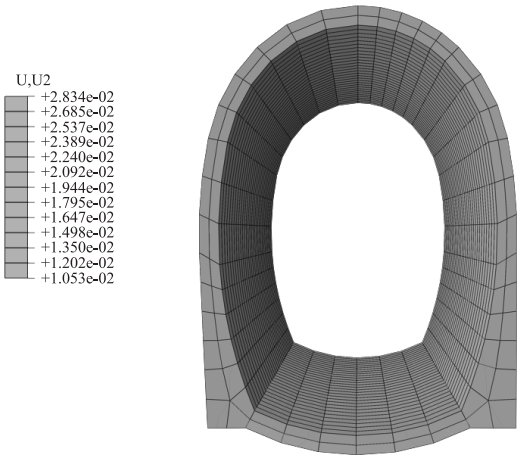


图6 参数优化后结构竖向位移图(m)

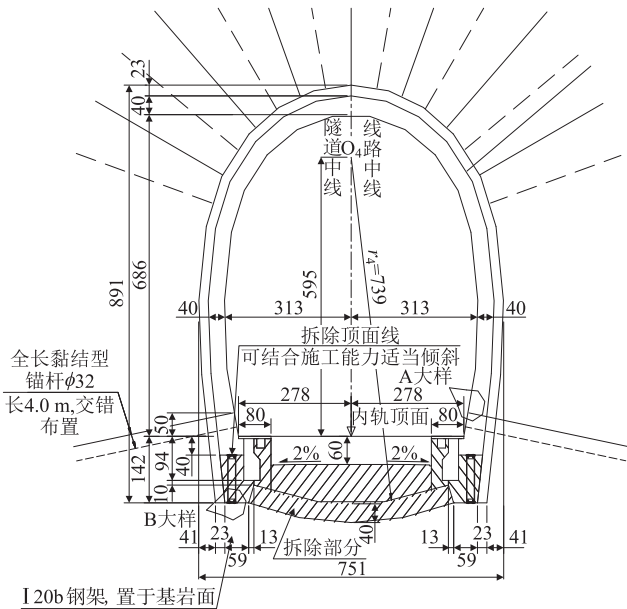


图7 仰拱需拆换部位图(cm)

用φ32 mm长4 m的精轧螺纹钢筋。
左右侧边墙采用机械破碎跳槽开挖,每次跳槽长度不大于4 m。跳槽开挖后,采用纵向间距1 m/榀I 20 b型钢支顶边墙底临空面。
开挖仰拱调整至合理曲率后清理隧底虚渣,将新旧混凝土结合处凿毛并采用高压水冲洗干净;铺设边墙、仰拱闭孔型泡沫塑料垫层、防水板,保证搭接长度不小于15 cm;边墙底部植入纵向间距25 cm的φ22 mm钢筋作为边墙与仰拱的接茬;相邻段仰拱填充层底部植入长1 m的φ22 mm钢筋,并穿过接缝50 cm作为搭接;采用钻孔植筋的方式,植筋埋入既有二次衬砌长度不少于500 mm,以保证新旧混凝土之间连接良好;安装型钢钢架,利用纵向连接筋将各榀钢架连接牢靠,分层浇筑仰拱和仰拱填充层。

3.2 仰拱结构安全性评价

布设土压力计12个,具体布置如图8所示。隧道DK 6+900断面围岩初期支护压力监测数据如图9所示。

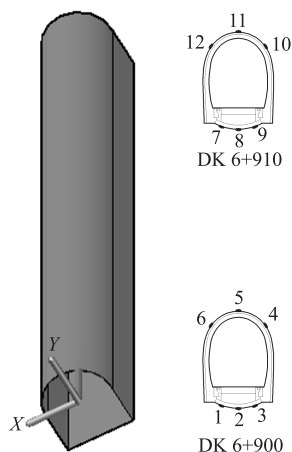


图8 围岩初期支护接触压力测点布置图

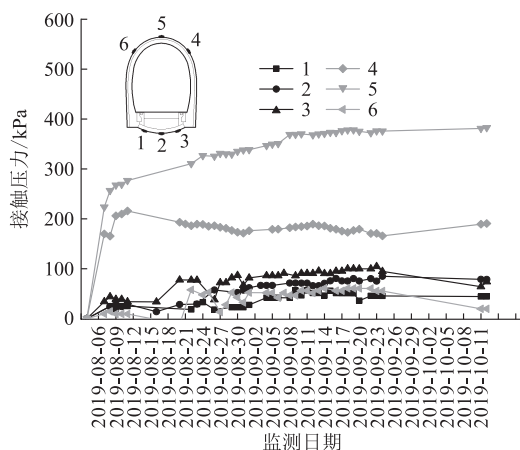


图9 DK 6+900断面土压力计监测数据图

由图9可知,右侧拱腰和拱顶位置的围岩初期支护接触压力相对于其他位置较大,拱顶处最大值达382 kPa,右侧拱腰处达216 kPa,左侧拱腰和仰拱左侧的围岩初期支护压力值最小,最小值分别为10 kPa和18 kPa。该断面其余测点位置的围岩初期支护压力值基本保持在100 kPa以内并趋于稳定,隧道结构的受力情况明显得到改善。

隧道DK 6+910断面围岩初期支护压力变化情况如图10所示。土压力计安装2个月后,该断面的围岩初支接触压力持续增加。土压力计安装之后15 d左右,各测点的围岩初支接触压力增加变缓,且在25 d后基本趋于稳定。围岩初期支护压力最大的位置是在拱顶处,其次是仰拱底部和左侧拱肩位置。拱顶处的围岩初期支护接触压力最大值达416 kPa,拱底最大值

为398 kPa。

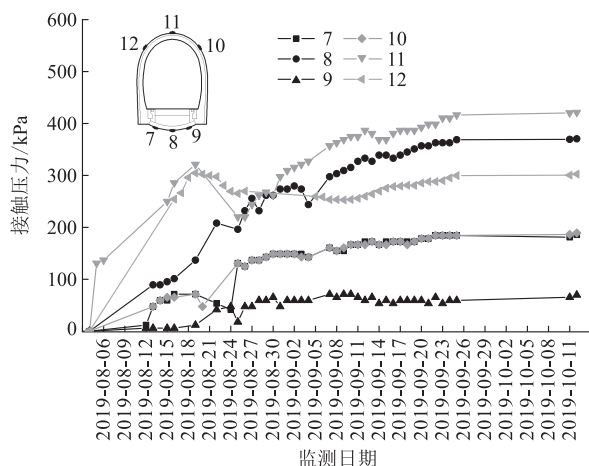


图10 DK 6+910断面土压力计监测数据图

隧道仰拱曲率调整及支护参数优化后,结合后期现场监测数据反馈显示,围岩初期支护接触压力整体偏小,表明参数调整后的隧道受力处于安全状态,故优化方案合理有效。

4 结论

(1)隧道仰拱隆起开裂段地应力场以水平构造应力为主,方向与隧道走向呈 90° ,数值在15.24~21.69 MPa之间,强度应力比为4.06~4.30,为高地应力地层,揭示了隧道仰拱隆起的主要原因是高地应力作用。

(2)仰拱竖向变形量及最大内力都随曲率半径的减小而同步降低,且变化速率均呈先增后减的趋势;结合施工便捷性及经济性,确定了合理的仰拱半径(4 m)及配套的结构参数,此时最小安全系数为2.8,满足安全性要求。

(3)提出了仰拱隆起病害现场整治施工工艺,基于现场监测数据反馈,应用优化后的支护参数能有效改善支护结构受力和控制仰拱隆起变形,该优化方案合理有效,可为类似工程支护结构参数确定及病害处理提供借鉴。

参考文献:

- [1] 崔光耀,韩驰,王明胜,等.高地应力软岩隧道大变形机制及控制技术综述[J].高速铁路技术,2023,14(4):13-18.
CUI Guangyao, HAN Chi, WANG Mingsheng, et al. Review of Mechanism of Large Deformation in Soft Rock Tunnels with High Geostress and Its Control Techniques [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 13-18.
- [2] 万正,张学民,冯涵,等.富水煤系地层隧道仰拱隆起原因分析及控制研究[J].现代隧道技术,2021,58(3):216-222.
WAN Zheng, ZHANG Xuemin, FENG Han, et al. On the Causes

- and the Control Measures of the Tunnel Inverted Arch Heaving in Water-rich Coal Measure Strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(3): 216–222.
- [3] 高震, 马伟斌, 吴旭, 等. 考虑围岩强度劣化的隧道仰拱隆起变形分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 342–347.
- GAO Zhen, MA Weibin, WU Xu, et al. Deformation Analysis of Tunnel Inverted Arch Uplift Considering the Deterioration of Surrounding Rock Strength[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 342–347.
- [4] 刘勇, 伏坤, 王珣, 等. 某铁路隧道隆起病害整治及自动监测成果分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(6): 112–116, 125.
- LIU Yong, FU Kun, WANG Xun, et al. Renovation of the Uplift of a Railway Tunnel Invert and Analysis of Automatic Monitoring Results[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(6): 112–116, 125.
- [5] 陈洋宏, 万晓燕, 刘志强. 高地应力缓倾软硬互层岩体中隧道底鼓影响因素模拟分析[J]. 铁道建筑, 2020, 60(2): 65–69.
- CHEN Yanghong, WAN Xiaoyan, LIU Zhiqiang. Simulation Analysis of Influencing Factors of Tunnel Floor Heave in the Gently Inclined Soft Hard Interbedded Rock under High Geostress[J]. Railway Engineering, 2020, 60(2): 65–69.
- [6] 陈贵红, 巩安. 紫坪铺隧道隧底隆起处治探讨[J]. 公路, 2014, 59(1): 228–232.
- CHEN Guihong, GONG An. Discussion on Treatment of Zipingpu Tunnel Uplift[J]. Highway, 2014, 59(1): 228–232.
- [7] 肖小文, 王立川, 阳军生, 等. 高地应力区缓倾互层岩体无砟轨道隧道底部隆起的成因分析及整治方案[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(1): 78–84.
- XIAO Xiaowen, WANG Lichuan, YANG Junsheng, et al. Cause Analysis and Treatment Scheme for Bottom Heave of Ballastless Track Tunnel in Nearly Horizontally Interbedded Rock Mass with High Geostress[J]. China Railway Science, 2016, 37(1): 78–84.
- [8] 李尧, 付兵先, 张千里, 等. 既有重载铁路隧道底鼓原因及处置措施[J]. 铁道建筑, 2016, 56(12): 53–56.
- LI Yao, FU Bingxian, ZHANG Qianli, et al. Base Heaving Cause and Its Treatment Measures for Existing Heavy Haul Railway Tunnel[J]. Railway Engineering, 2016, 56(12): 53–56.
- [9] 杜明庆, 张顶立, 王旭春, 等. 大断面隧道仰拱底鼓破坏模式[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 292–301, 358.
- DU Mingqing, ZHANG Dingli, WANG Xuchun, et al. Failure Modes of Floor Heave in Large Section Tunnel Invert[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 292–301, 358.
- [10] 王琳, 杨林, 袁青, 等. 浅埋富水隧道施工大变形原因分析与应对措施[J]. 人民长江, 2022, 53(5): 162–167.
- WANG Lin, YANG Lin, YUAN Qing, et al. Cause Analysis and Countermeasures of Large Deformation Induced by Shallow-buried Tunnel Construction under Water-rich Condition[J]. Yangtze River, 2022, 53(5): 162–167.
- [11] 孙韶峰, 袁竹, 赵万强. 高地应力区砂泥岩地层隧道开裂原因分析及处理原则[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(4): 170–175.
- SUN Shaofeng, YUAN Zhu, ZHAO Wanqiang. Cause Analysis and Treatment Principles for Tunnel Lining Cracking in Sandy Mudstone with High Geostress[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(4): 170–175.
- [12] 李登峰, 谢锦鸿. 隧道底鼓的变形研究及处治措施[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 86–90.
- LI Dengfeng, XIE Jinhong. Deformation Study and Treatment Measures of Tunnel Floor Heaves[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 86–90.
- [13] 肖广智, 薛斌. 向莆铁路隧道道床积水、轨道隆起病害整治技术[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 200–204.
- XIAO Guangzhi, XUE Bin. Treatment of Bed Waterlogging and Track Heaving in Tunnels on the Xiangtang-Putian Railway[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 200–204.
- [14] 孔恒, 王梦恕, 张德华. 隧道底板隆起的成因、分类与控制[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(1): 30–33.
- KONG Heng, WANG Mengshu, ZHANG Dehua. Causation and Classification of Tunnel Floor Heave and Its Control[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(1): 30–33.
- [15] 汪洋, 唐雄俊, 谭显坤, 等. 云岭隧道底鼓机理分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2530–2534.
- WANG Yang, TANG Xiongjun, TAN Xiankun, et al. Mechanism Analysis of Floor Heave in Yunling Tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2530–2534.
- [16] 王立川, 肖小文, 林辉. 某铁路隧道底部结构隆起病害成因分析及治理对策探讨[J]. 隧道建设, 2014, 34(9): 823–836.
- WANG Lichuan, XIAO Xiaowen, LIN Hui. Analysis on Causes for and Renovation of Floor Structure of a High-speed Railway Tunnel Located in Slightly-dipping Interbedded Rock Mass[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(9): 823–836.
- [17] 马有良. 复杂地应力环境下隧道底鼓处治技术研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(3): 68–72, 80.
- MA Youliang. Study on Treatment Techniques for Tunnel Floor Heave in Complex Crustal Stress Environments[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(3): 68–72, 80.
- [18] GB/T 50218–2014 工程岩体分级标准[S].
- GB/T 50218–2014 Standard for Engineering Classification of Rock Mass[S].
- [19] JTG 3370.1–2018 公路隧道设计规范 第一册 土建工程[S].
- JTG 3370.1–2018 Specifications for Design of Highway Tunnels Volume 1 Civil Engineering[S].