

DOI: 10.7672/sgjs2025180001

隧道仰拱开裂、初支变形及二衬开裂处治研究*

刘 博¹, 杨建军¹, 傅鹤林², 景志泉², 彭泽同²

(1. 中建五局土木公司市政环保分公司, 湖南 长沙 410004;

2. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

[摘要] 为解决公路隧道病害处治难题,以某高速公路隧道为工程实例,采用工程类比法及数值模拟方法,对隧道仰拱开裂、初支变形及二衬开裂原因进行了分析,提出了适合的病害处治技术,并对提出的洞内加固技术进行了细化设计和研究。结果表明:地形偏压造成的不均匀沉降是引起隧道初支变形、仰拱及二衬开裂的重要原因,同时岩质软弱、岩层富水和地质构造发育也是造成隧道初支变形、仰拱及二衬开裂的重要影响因素,三者耦合相互作用造成上覆围岩进一步劣化,加剧了衬砌结构病害的发展程度;隧道洞内加固方案可避免大开大挖,施工简单且造价低,通过合理的洞内加固措施可很好地解决隧道仰拱开裂、初支变形及二衬开裂问题。采用有限元软件建模并计算了洞内加固方案,其计算结果验证了该方案的安全性和可行性。

[关键词] 隧道;仰拱;初期支护;变形;二次衬砌;开裂;数值模拟

[中图分类号] U457+.2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0001-08

Treatment of Inverted Arch Cracking, Initial Support Deformation and Secondary Lining Cracking of Tunnel Inverted Arch

LIU Bo¹, YANG Jianjun¹, FU Helin², JING Zhiqian², PENG Zetong²

(1. Municipal Environmental Protection Branch of CCFED Civil Engineering Co., Ltd., Changsha,

Hunan 410004, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University,

Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: In order to solve the problem of highway tunnel disease treatment, taking a highway tunnel as an engineering example, the causes of inverted arch filling cracking, the initial support deformation and the secondary lining cracking are analyzed by using engineering analogy method and numerical simulation method. The suitable disease treatment technology is proposed, and the proposed tunnel reinforcement technology is detailed designed and studied. The results show that: Uneven settlement caused by terrain bias is an important cause of tunnel initial support deformation, inverted arch filling and secondary lining cracking; Meanwhile, rock weakness, rock strata rich in water and geological structure development are also important influencing factors of tunnel initial support deformation, inverted arch filling and secondary lining cracking. The coupling interaction of which causes further deterioration of overlying surrounding rock and aggravation of lining structure diseases; The tunnel reinforcement scheme can avoid large excavation, and the construction is simple and the cost is low, and the scheme can effectively solve the problems of tunnel inverted arch filling cracking, initial support deformation and secondary lining cracking through reasonable reinforcement measures. The finite element software is used to model and calculate the reinforcement scheme in the tunnel, and the calculation results verify the safety and feasibility of the scheme.

Keywords: tunnels; inverted arch; initial support; deformation; secondary lining; cracking; simulation

* 国家自然科学基金(52478424); 中建五局土木公司科技研发课题(cscec5b-TM-2023-65); 湖南省教育厅重点项目(23A0014)

[作者简介] 刘 博, 工程师, E-mail: 563423538@qq.com

[通信作者] 傅鹤林, 教授, 博士生导师, E-mail: fu. h. l@csu. edu. cn

[收稿日期] 2025-03-30

0 引言

隧道初支变形、仰拱及二衬开裂危及隧道施工和运营安全,是隧道工作者致力于解决的重点难题之一^[1-3],诸多专家学者对此进行了研究,取得了丰富成果^[4-6]。

目前,针对公路隧道初支变形、仰拱及二衬开裂病害的研究方法主要有现场调查测试法^[7]、理论分析法^[8]、试验研究法^[9]、数值模拟法^[10]和工程类比法^[11]等,其中现场调查测试法多用于调查统计隧道病害信息,理论分析法常用于病害致因分析,其他方法则可单独或综合用于隧道病害致因分析和处治技术研究。钟华等^[12]针对浅埋隧道中的初支变形问题,采用 PFC 离散元软件分析了隧道失稳演化机理,得出了采用洞内反压技术可很好地控制围岩变形的结论。吴铭芳等^[13]基于富水软岩隧道仰拱病害问题,采用现场调查法详细统计了隧道病害情况,分析出地下水致使围岩劣化是造成仰拱开裂的重要影响因素,并通过数值模拟分析出隧道锁脚加固对处治隧道仰拱病害有很好的效果。胡涛等^[14]、代树林等^[15]分别采用了有限元分析和模型试验对偏压隧道进行了研究,得出地形偏压对隧道衬砌的裂缝扩展影响显著,且偏压角度越大隧道衬砌越易形成较深裂缝。乔雄等^[16]对二衬开裂处治技术进行调查分析得出,裂缝处治主要集中在病因处治和加固补强两方面,病因处治关键在于治水,加固补强多注重封闭裂缝和加固衬砌。

综上可知,众多专家学者针对隧道初支变形、仰拱及二衬开裂问题已开展了许多研究,但多是将初支变形、仰拱和二衬开裂分开研究,且研究的影响因素较单一、处治措施不够详细具体。因此,本文以某高速公路隧道为工程实例,针对地形偏压、岩层富水、岩质软弱及地质构造发育等复杂影响因素,采用工程类比法、理论分析法、数值模拟法综合分析了隧道初支变形、仰拱及二衬开裂原因,提出详细具体处治方案,并验证了处治方案效果,研究

内容对今后类似工程有一定的推广应用价值。

1 工程概况

1.1 工程简介

某隧道为分离式特长隧道,左洞桩号为 Z2K33+235—Z2K37+488,长 4 253m;右洞桩号为 K33+241—K37+493,长 4 252m。隧道左、右平面净距 22.3~30.84m,属于分离式隧道。

1.2 工程及水文地质

该隧道位于国道边,地处长条山脊北东段斜坡地段,山坡坡度 25°~45°,左、右线隧道轴线与地形等高线夹角约 50°,存在偏压。隧道岩层产状 103°∠35°,走向与路线小角度相交,倾向东侧,岩性为中~微风化泥质砂岩与砂质泥岩互层,中夹砂岩和石英砂岩,岩质较软~较坚硬,属较软~较硬岩。洞身段围岩级别为Ⅲ~Ⅴ级,可稳定数日~无自稳能力。地下水以基岩裂隙水为主,围岩微~弱透水,可产生点滴状、线状出水。

根据调查、物探及钻探所揭露情况分析,隧址所在区域地层年代较久远,岩层风化差异较大,可能存在软弱夹层或层间错动带等节理裂隙发育、岩体较破碎且地下水丰富的区域。

1.3 支护设计

隧道支护主要依据地质勘察报告进行设计,在病害区段(Z2K33+395—Z2K33+510)主要采用 S5a 及 S5b 衬砌,衬砌类型如表 1 所示,衬砌参数如表 2 所示。

表 1 衬砌类型
Table 1 Lining types

序号	桩号	长度/ m	围岩 级别	衬砌 类型	超前 措施
1	Z2K33+395—Z2K33+415	20	V	S5b	超前小导管
2	Z2K33+415—Z2K33+500	85	V	S5a	帷幕注浆+超前小导管
3	Z2K33+500—Z2K33+510	10	IV	S5b	超前小导管

1.4 病害区地质

病害区段为褶皱核部地段,受构造影响严重,

表 2 隧道衬砌结构支护设计参数

Table 2 Design parameters of tunnel lining structure support

衬砌 类型	初支				预留变 形量/cm	二衬 (C30 混凝土)/cm	备注
	锚杆	钢筋网	C25 喷射 混凝土/cm	钢拱架/ cm			
S5a	φ25 中空注浆锚杆长 L=3.5m,纵环间距 60cm×100cm	φ8 钢筋网 单层	26	I20a 间距 60	12	拱墙部钢筋混凝土 50, 仰拱钢筋混凝土 50	V 级围岩洞口浅埋段对洞身 稳定性影响较大的构造破 碎带
S5b	φ25 中空注浆锚杆长 L=3.5m,纵环间距 75cm×100cm	φ8 钢筋网 单层	24	I18 间距 75	10	拱墙部钢筋混凝土 45, 仰拱钢筋混凝土 45	V 级围岩洞身浅埋段、深埋软 质岩段和对洞身稳定性影响 较小的局部构造破碎带

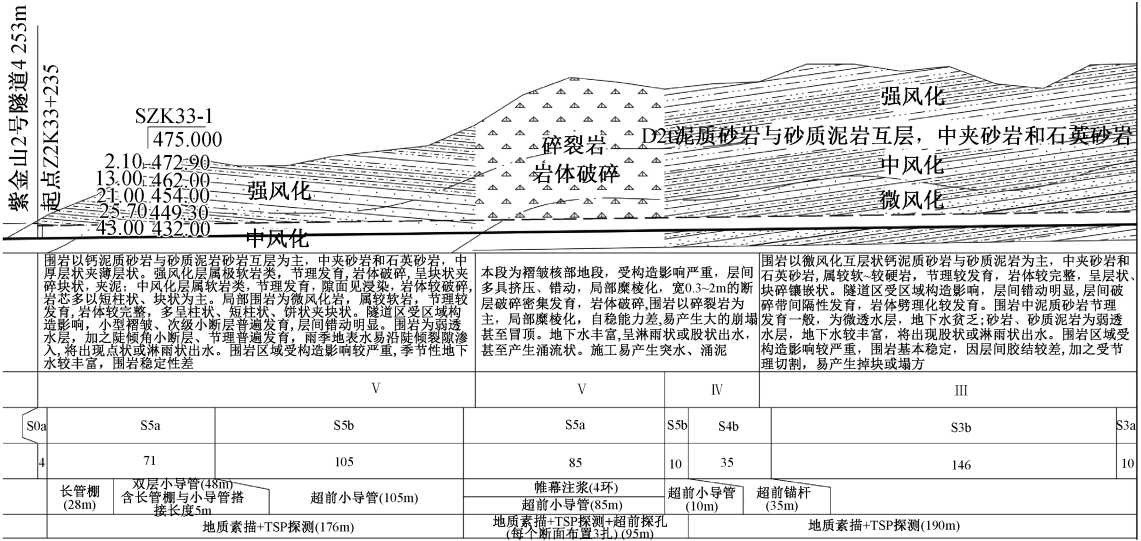


图 1 病害区地质情况

Fig. 1 Geological conditions of the disease area

层间多挤压、错动,局部糜棱化,宽 0.3~2m 断层密集发育,岩体破碎,围岩以碎裂岩为主,局部糜棱化,自稳能力差,易产生大的崩塌甚至冒顶;地下水丰富,呈淋雨状或股状出水,甚至产生涌流状。施工易产生突水、涌泥。病害区地质情况如图 1 所示。

2 现场病害情况

2.1 揭露的地层岩性

根据现场揭露的地质信息,左洞病害区段 (Z2K33+395—Z2K33+510) 地层岩性以钙质泥质砂岩与砂质泥岩为主,受构造影响严重,地下水丰富,围岩稳定性差,地质信息与地质勘察报告基本一致。

2.2 初支变形

根据断面测量数据,左洞病害区段 (Z2K33+395—Z2K33+510) 已施作的初支发生较大收敛变形,累计变形量已超过隧道预留变形量的极限值,初支局部出现鼓包、裂缝现象,且测量数据显示隧道低山侧初支变形明显大于高山侧。初支测量断面变形情况如图 2 所示。

2.3 仰拱及二衬开裂

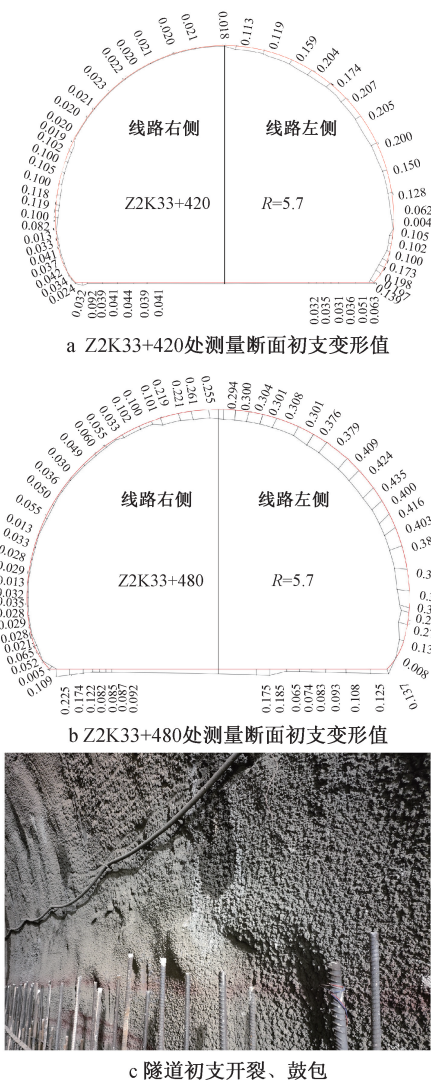
巡查发现隧道左洞病害区段 (Z2K33+395—Z2K33+510) 的仰拱和二衬存在大量正在发展的纵向间断式裂缝。仰拱及二衬纵向裂缝位置如图 3~4 所示,长度及宽度如表 3 所示。

3 病害原因分析及处治方案

3.1 病害原因分析

3.1.1 地形偏压

隧道位于国道边,地处长条山脊北东段斜坡地段,由于坡体较陡,隧道穿过时左侧靠近坡底、右侧靠近坡顶,造成隧道左侧浅埋、右侧深埋的埋深状



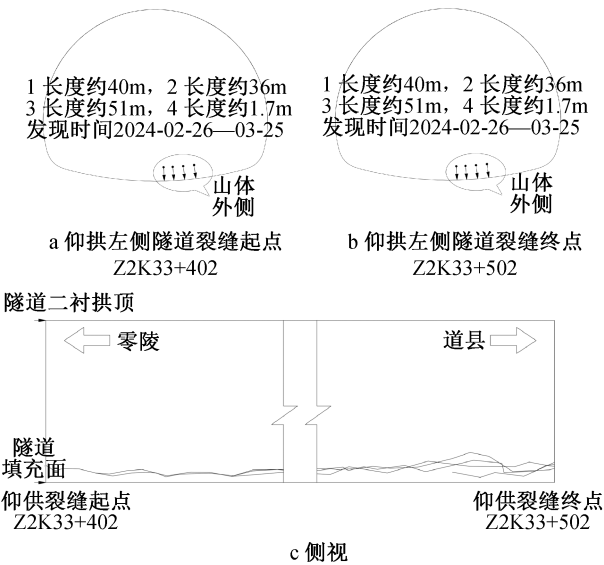


图 3 仰拱拱底纵向裂缝位置

Fig. 3 Location of longitudinal crack in inverted arch bottom

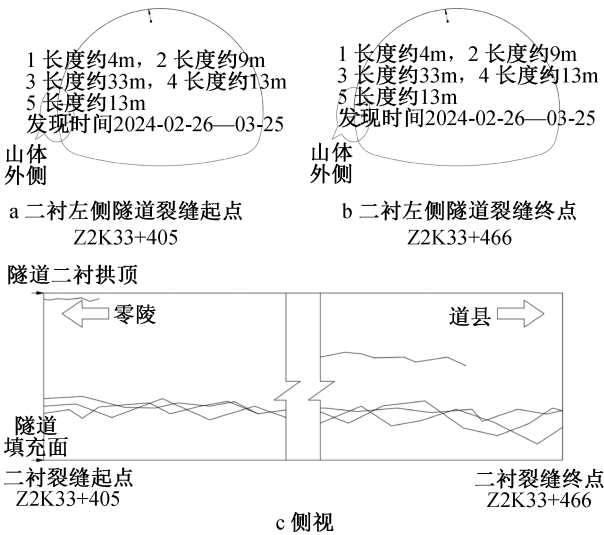


图 4 二衬纵向裂缝位置

Fig. 4 Location of longitudinal crack of secondary lining

表 3 病害情况

Table 3 Disease situation

序号	部位	桩号	位置	裂缝长度/m	方向及数量/条	初次发现起始时间 (2024 年)/ (月-日)	裂缝宽度/m	增加数量 (2024 年)/条	持续扩张时间 (2024 年)/ (月-日)	目前裂缝宽度/cm
1	仰拱	Z2K33+402— Z2K33+442	偏中线 约 1m	约 40.0	纵向多条 间断式	02-26— 03-02	约 0.02	增加 5 (02-27—03-02)	03-15	2.0~3.0
2	仰拱	Z2K33+426— Z2K33+462	偏中线 约 1m	约 36.0	纵向多条 间断式	03-01— 03-06	约 0.02	—	03-15	2.0~3.0
3	仰拱	Z2K33+451— Z2K33+502	偏中线 约 1m	约 51.0	纵向多条 间断式	03-03— 03-12	约 0.02	—	03-20	2.0~3.0
4	二衬	Z2K33+405— Z2K33+409	拱顶中 线区域	约 4.0	纵向间 断式 5	02-26— 03-02	约 0.02	—	03-15	1.0~2.0
5	二衬	Z2K33+416— Z2K33+425	左侧高度约 2m 区域	约 9.0	纵向间 断式 3	02-28— 03-05	约 0.02	增加 3 (03-01—03-05)	03-15	0.5~1.0
6	二衬	Z2K33+413— Z2K33+446	左侧高度约 2m 区域	约 33.0	纵向间 断式 5	02-28— 03-10	约 0.02	—	03-20	0.5~1.0
7	二衬	Z2K33+442— Z2K33+455	右侧高度约 4m 区域	约 13.0	纵向间 断式 3	03-08— 03-15	约 0.02	—	03-25	0.5~1.0
8	二衬	Z2K33+453— Z2K33+466	左侧高度约 2m 区域	约 13.0	纵向数 量不详	03-15— 03-20	约 0.02	—	无	台车未脱模, 不详
9	仰拱	Z2K33+480	偏中线约 1m 区域	约 1.7	贯入深度 约 0.2m	03-25	0.50~1.00	—	无	—

况。隧道左侧埋深较浅,岩土体覆盖层较薄,不能形成稳定的承载结构拱来承受上覆岩土体的自身重力;隧道右侧埋深较深,则可形成稳定的承载结构来承受上覆岩土体重力,因此由于围岩自身承载力不同,造成隧道左侧衬砌结构受荷较大、右侧结构受荷较小。隧道左侧承受较大荷载使得隧道初支左侧变形明显高于右侧。隧道左侧围岩压力大、右侧围岩压力小,两侧承受荷载不均造成隧道衬砌结构的不均匀沉降,不均匀沉降则是造成隧道二衬

和仰拱开裂的重要原因。

3.1.2 岩质软弱

隧道病害区段穿越褶皱核部地段,围岩以钙泥质砂岩与砂质泥岩砂岩互层为主,中夹砂岩和石英砂岩。风化层岩质软弱,节理发育,岩体破碎夹泥,加之地下水影响,围岩强度较低。隧道开挖扰动后软弱围岩难以保持稳定,进而产生了一定的松弛变形^[17],松弛变形在一定范围内导致地层微裂隙张开程度增大,使得附近的地下水沿微裂隙缓慢且不均

匀下渗至隧址区围岩,水理性质差的砂岩、泥岩遇水后加剧了变形,变形作用在支护结构上从而引发衬砌结构较严重的变形和开裂^[18]。

3.1.3 地质构造

隧道病害区段受构造影响严重,层间多挤压、错动,局部糜棱化,宽 0.3~2m 的断层密集发育,岩体破碎,围岩以碎裂岩为主,局部糜棱化,自稳能力差,隧道开挖扰动后,围岩层间挤压错动加剧,围岩形变过程中作用力不断传至衬砌上,衬砌反复受力易变形开裂。

3.1.4 地下水

隧道病害区段地下水丰富,主要以基岩裂隙水为主,地下水是病害区围岩劣化的重要影响因素,地下水沿破碎岩的裂隙间渗透运移,不断侵蚀岩体、扩展裂隙使得岩体进一步破碎,地下水渗透进软弱围岩中,使得部分软岩泥化、膨胀、力学性能下降,造成衬砌结构承受荷载发生变化,变化的荷载会引起衬砌结构的变形和破坏。

3.2 病害处治方案

3.2.1 提出方案

结合隧道病害区的初支变形、仰拱及二衬开裂现状,针对上述造成病害的原因,综合隧道的实际施工情况提出如下病害处治方案。

1)反压回填方案(方案 1)。为解决地形偏压、岩质软弱及地质构造发育问题,提出隧道地表开挖反压回填方案。具体方案为:在 Z2K33+395—Z2K33+510 段地表开挖台阶后反压回填,并在坡底设置挡墙。反压回填范围约为 12 亩(1 亩=666.67m²),反压土方量为 4.0 万 m³,费用约为 700 万元(见图 5)。

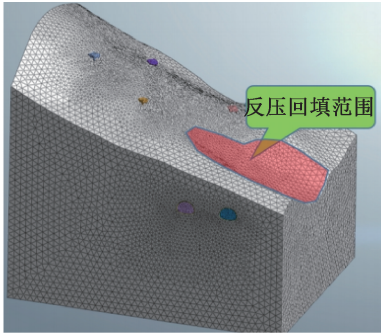


图 5 反压回填方案
Fig. 5 Back pressure backfill scheme

2)隧道洞外加固方案(方案 2)。为缓解地形偏压并一定程度上加固围岩,提出了隧道洞外加固方案。具体方案为:在 Z2K33+395—Z2K33+510 段(钙泥质砂岩与砂质泥岩地段)左洞外侧边坡,增设 1 排 $\phi 1\,000@3\text{m}$ 钻孔灌注桩,桩长 30~40m,总长度

约为 3 000m,需新增征地 4 亩,工期约为 6 个月,总费用约为 1 100 万元(见图 6)。

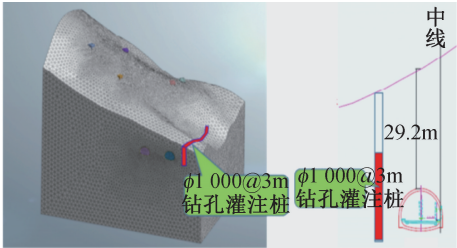


图 6 隧道洞外加固方案
Fig. 6 Reinforcement scheme outside tunnel

3)隧道洞内加固方案(方案 3)。为解决岩质软弱、地质构造发育、围岩富水问题提出洞内加固方案。具体方案为:针对病害区段实施注浆加固措施,增加围岩承载力的同时封堵地下水。针对仰拱开裂段,在拱脚位置增设注浆管进行注浆加固。注浆段长约 120m,增加钢筋 15t,增加注浆管约 2 300m,增加浆液 1 100m³,总费用约为 250 万元(见图 7)。

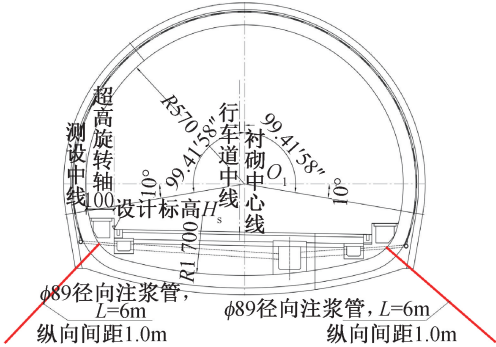


图 7 隧道洞内加固方案(单位:cm)
Fig. 7 Reinforcement scheme inside tunnel(unit:cm)

3.2.2 方案比选

针对上述方案的优缺点进行分析比较,具体病害处治方案比较如表 4 所示。

表 4 病害处治方案比选
Table 4 Comparison and selection of disease treatment schemes

方案	优点	缺点	推荐意见
方案 1	可减小隧道偏压,缓解隧道不均匀沉降	新增用地范围大,施工困难,费用较高(700 万元)	不推荐
方案 2	可减小隧道偏压,缓解隧道不均匀沉降	需新增用地,费用高(1 100 万元),施工难度大,工期长	不推荐
方案 3	可缓解围岩软弱富水状况,施工简单,费用低(250 万元)	—	推荐

根据现有病害状况,结合病害原因、处治方案

优缺点、施工成本及施工难度综合分析后,方案 3 更适合作为本隧道最终的病害处治方案。

3.2.3 洞内加固方案的细化研究

洞内加固方案针对隧道初支变形、仰拱及二衬开裂病害,进行了细化研究和设计,形成处治方案如下。

1) 围岩注浆加固。①对于洞内发生初支变形且尚未施作二衬的区段,采用无缝钢管径向注浆方案加固;②注浆管采用 $\phi 42 \times 3.5$ 热轧无缝钢管,钢管前端呈尖锥状,尾部焊上 $\phi 6$ 加劲箍,管壁四周钻椭圆形压浆孔,注浆浆液采用单液浆;③注浆管角度应根据围岩产状及时调整,始终保持与节理面较大角度交叉,应避免注浆管与节理面平行;④加固方案可根据实际情况适当调整,工程量以实际发生为准。

2) 拱脚加固。①已施作仰拱段在拱脚位置钻孔,增设注浆管+分次注浆;②注浆管采用 $\phi 89 \times 6$ 或 $\phi 76 \times 5$ 热轧无缝钢管,钢管前端呈尖锥状,尾部焊上 $\phi 6$ 加劲箍,管壁四周钻椭圆形压浆孔,注浆浆液采用单液浆;③ $\phi 89$ 钢管采用 $\phi 150$ 钻孔, $\phi 76$ 钢管采用 $\phi 135$ 钻孔,钻孔应避免初支工字钢及横向排水管,钻孔底部可适当扩孔,形成端头锚固体,钻孔完成后先将钢筋笼插入并固定,后将注浆管插入,注浆分 3 次进行,注浆前应先采用水泥砂浆施作厚度 $\geq 50\text{cm}$ 止浆盘,注浆完成后应采用厚度 2cm 垫板将注浆管固定于衬砌或初支工字钢上,垫板宽度应超过钻孔 $\geq 30\text{cm}$;④加固方案可根据实际情况适当调整,工程量以实际发生为准。

3) 裂缝处治。①对于宽度 $> 0.02\text{m}$ 的纵向裂缝,采用双组分聚氨酯胶液的压浆材料进行整治。②首先在裂缝处混凝土表面凿出一条深 5cm、宽 4cm 的沟槽,并用水冲洗干净。③在沟槽内放置 1 条 $\phi 20$ PVC 半管,然后将沟槽用防水环氧砂浆抹平至圬工表面,每 0.5m 设 1 个注浆螺母,槽端用胶泥封口。④当封堵的环氧砂浆强度达到 0.1~0.2MPa 后即可注浆。注浆顺序是水平槽从一端向另一端,垂直槽先下后上,将活接头接在注浆嘴上,开动空气压缩机,打开储浆罐阀门,即将双组分聚氨酯胶液随输液管送到注浆管,通过注浆嘴压入缝内。注浆压力一般为 0.05~0.2MPa,当不再进浆时停止压浆,关闭注浆嘴,防止回流,从相邻注浆嘴继续注浆,直到全部完成。⑤凿槽原则为,除裂缝全长凿槽外,沿裂缝发展方向向两侧各扩展 50cm。⑥对于裂缝宽度达到 0.5cm 且发展深度超过 1/2 衬砌厚度的纵向裂缝,除采取上述措施外,尚应采取纵向

裂缝抗剪抗裂措施。⑦对于宽度 0.2mm 以下的表面裂缝,采用水泥基渗透结晶型防水涂料进行表面封闭处治。

4) 侵限整治。①初支侵入二衬 $\leq 5\text{cm}$ 范围,局部凿除初支表层 3cm 后按原设计图纸施工;②初支侵入二衬 $> 5\text{cm}$ 范围,进行换拱处理;③对于二衬侵限区段,由于设计阶段预留 $\geq 10\text{cm}$ 富余量,因此应核实二衬变形后是否侵入隧道建筑限界,如侵入建筑限界,应进行换拱以确保隧道净空满足要求。

5) 其他处治建议。①初支变形严重,暂未施作二衬的区段可设置钢筋抗裂网片;②受构造影响严重、地下水丰富、围岩稳定性差地段隧道施工建议严格执行“管超前、严注浆、短开挖、强支护、早封闭、勤量测”十八字方针;③钙泥质砂岩与砂质泥岩等地质条件较差的未开挖段可根据监控量测数据参照本处治方案进行加固;④仰拱施工应当在二衬仰拱混凝土强度达到 70% 以后方可进行;⑤建议软弱围岩段采用机械开挖,机械开挖不能实施时,可采取微振动爆破;⑥先行洞和后行洞的开挖均应适当减小进尺,均应严格控制单段最大爆破药量,选用尽量小的最大段装药量,采用低威力、低爆速炸药,选用小直径药卷不耦合装药,以减少爆破振动对地层的危害。

4 病害处治效果检验

4.1 数值模拟分析

4.1.1 模型建立

采用有限元软件 MIDAS GTS/NX 基于上述病害处治方案对隧道进行建模分析,模型边界选取 5 倍洞径范围,模型上表面为自由表面,模拟地表无约束情况,材料参数属性依据隧道真实参数选取。建立隧道三维数值模拟模型,如图 8 所示。

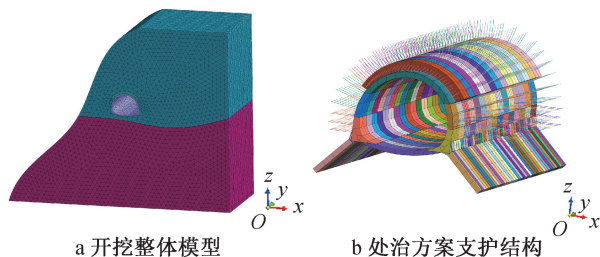


图 8 隧道三维数值模型

Fig. 8 3D numerical model of the tunnel

4.1.2 结果分析

1) 初支变形分析。隧道洞内加固后进行数值模拟,隧道初支受力及变形结果如图 9 所示。初支最大主应力为 3.065MPa,在初支安全范围内。初支最大变形量为 0.6mm,在隧道初支和二衬的预留变

形量内,可保证初支变形不侵入二衬范围,保证隧道建筑限界不被侵入。

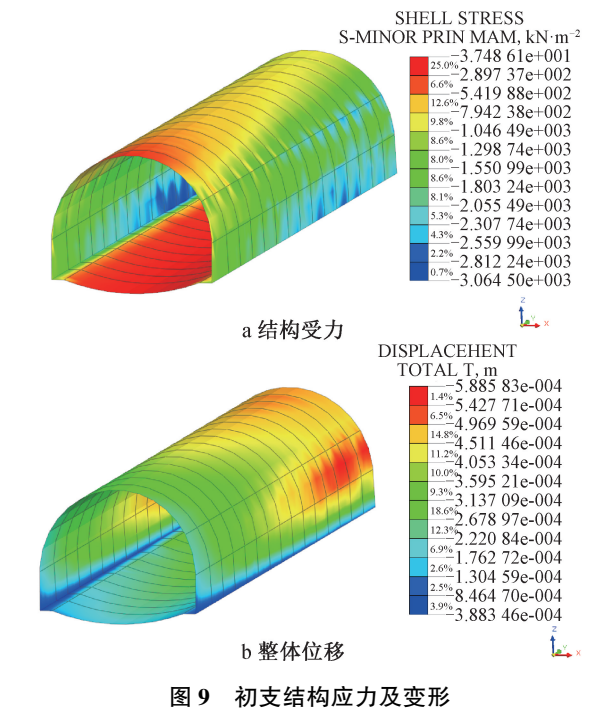


Fig. 9 Stress and deformation of initial support structure

2)二衬及仰拱开裂分析。采用洞内加固整治方案后,隧道的二衬及仰拱受力与变形如图 10 所示。二衬及仰拱的最大主应力为 0. 146MPa,远小于二衬及仰拱的极限承载力。由二衬及仰拱的变形较小可知,隧道的二衬和仰拱未产生较大裂缝,证明洞内加固方案的注浆加固及拱脚加固可行有效。

4.2 工程实施验证

4.2.1 已发病害处治效果检测

病害处治后,经检测初支变形已得到控制,变形较大处经换拱处治后,隧道的建筑限界和净空已能得到保证。洞内加固后,仰拱和二衬裂缝不再发展。经裂缝修补处治后,隧道衬砌结构已能满足承载要求,保证隧道运营安全。

4.2.2 采用洞内加固方案后新施工段病害监测

采用方案 3 后新施工段病害监测显示,未出现初支变形、仰拱及二衬开裂病害,证明方案 3 可行有效。

5 结语

本文结合实际工程案例,研究了隧道初支变形、仰拱及二衬开裂原因,提出了相应病害的处治方案。在对隧道洞内加固方案进行细化研究设计后,用数值模拟验证了洞内加固方案的处治效果。研究结论如下。

1)引起隧道初支变形、仰拱及二衬开裂的原因

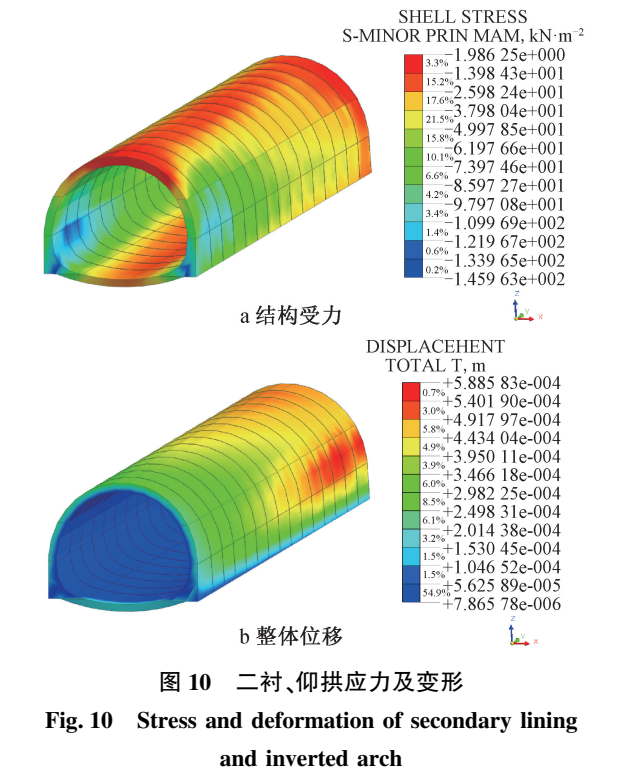


Fig. 10 Stress and deformation of secondary lining and inverted arch

是地形偏压、岩质软弱、围岩富水和地质构造发育。地形偏压使隧道左、右两侧承受荷载不均,而不均匀荷载造成的不均匀沉降是引起隧道初支变形、仰拱及二衬开裂的重要原因。岩质软弱、岩层富水和地质构造发育三者耦合相互作用,造成隧道周围岩土体的进一步劣化,也是造成隧道初支变形、仰拱及二衬开裂的重要影响因素,劣化的围岩状况引起了衬砌结构病害的加剧。

2)对比反压回填方案、洞外加固方案和洞内加固方案,分析得出洞内加固方案可避免大开大挖,减少对偏压山体的重复扰动,减小施工难度,保障施工安全。经细化研究设计的洞内加固方案,在降低成本的同时,可很好地解决隧道初支变形、仰拱及二衬开裂问题。

3)采用有限元软件 MIDAS GTS/NX 建立了洞内加固方案的三维数值模型,其计算结果验证了该方案的安全性和可行性,对今后类似工程有一定的推广应用价值。

参考文献:

[1] 梁裔举,高山,陈璐. 岩溶地区浅埋隧道变形分析及处治[J]. 交通科学与工程,2023,39(2):49-54.
LIANG Y J,GAO S,CHEN L. Research on deformation analysis and treatment technology of shallow buried tunnels in karst areas [J]. Journal of transport science and engineering,2023,39(2):49-54.
[2] 陈鑫磊,余楚海,张学民,等. 考虑多层施工缝界面效应的富水高铁隧道底鼓变形机制[J]. 铁道科学与工程学报,2025,

- 22(1):443-455.
- CHEN X L, YU C H, ZHANG X M, et al. Floor heave deformation mechanism of water-rich high-speed railway tunnel considering multi-layered construction joint interface effect [J]. Journal of railway science and engineering, 2025, 22(1):443-455.
- [3] 沈才华, 苗森, 鲍希琰, 等. 隧道衬砌裂缝病害量化评价改进乘积标度法[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(2):62-73.
- SHEN C H, MIAO M, BAO X Y, et al. Improved product scale method for quantitative evaluation of tunnel lining crack diseases [J]. Journal of Chongqing University, 2025, 48(2):62-73.
- [4] 李洪建, 林志, 满银. 裂缝对衬砌结构承载力影响与评价方法研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2):27-32.
- LI H J, LIN Z, MAN Y. Study on the bearing capacity and the evaluation method of the cracked lining structure [J]. Journal of transport science and engineering, 2019, 35(2):27-32.
- [5] 许阳. 大断面隧道仰拱底鼓破坏模式探析[J]. 工程建设与设计, 2024(3):74-76.
- XU Y. Discussion on the failure mode of inverted arch bottom heave in large cross-section tunnels [J]. Construction & design for engineering, 2024(3):74-76.
- [6] 张姐, 刘昶, 刘辉. 软弱围岩浅埋偏压连拱隧道施工方案优化研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(4):88-97, 104.
- ZHANG N, LIU C, LIU H. Study on construction scheme optimization of shallow buried eccentric pressure multi-arch tunnel in weak surrounding rock [J]. Journal of transport science and engineering, 2023, 39(4):88-97, 104.
- [7] 赵阳川. 某铁路隧道衬砌裂缝对结构安全的影响分析[J]. 工程建设与设计, 2022(17):97-101.
- ZHAO Y C. Analysis of the impact of a railway tunnel lining cracks on structural safety [J]. Construction & design for engineering, 2022(17):97-101.
- [8] 蔡涛. 复杂地质条件下隧道仰拱开裂病害分析与治理研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(12):141-145.
- CAI T. Analysis and treatment of tunnel inverted arch cracking under complex geological conditions [J]. Railway construction technology, 2020(12):141-145.
- [9] 刘恒显, 梁庆国, 丁冬冬. 黄土隧道仰拱结构受力特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S1):77-83.
- LIU H X, LIANG Q G, DING D D. Experimental study on invert arch structure mechanical behavior of loess tunnels [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2018, 14(S1):77-83.
- [10] 丁冬冬, 梁庆国, 徐善常, 等. 软化泥岩对隧道仰拱的受力特性影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(10):2001-2008.
- DING D D, LIANG Q G, XU S C, et al. Test study on the mechanical characteristics of tunnel invert on softening mudstone section [J]. Journal of railway science and engineering, 2016, 13(10):2001-2008.
- [11] 王萌伟, 潘屹, 李涛, 等. 大法郎隧道大变形处治方案研究[J]. 公路, 2022, 67(5):264-266.
- WANG M W, PAN Y, LI T, et al. Study on treatment scheme of large deformation in Dafalang Tunnel [J]. Highway, 2022, 67(5):264-266.
- [12] 钟华, 梁崇辉, 陈璐, 等. 浅埋大跨度隧道大变形演化特征与防治方法[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(2):71-78.
- ZHONG H, LIANG C H, CHEN L, et al. Characteristics of large deformation and prevention methods for shallow buried large span tunnels [J]. Journal of transport science and engineering, 2024, 40(2):71-78.
- [13] 吴铭芳, 春军伟. 富水软岩隧道仰拱病害的综合处治与设计反思[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(6):233-243.
- WU M F, CHUN J W. Comprehensive treatment scheme and design suggestions on inverted arch defects in water-rich soft rock tunnels [J]. Modern tunnelling technology, 2021, 58(6):233-243.
- [14] 胡涛, 杨洪. 偏压隧道洞口段衬砌多裂缝扩展有限元分析[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(4):46-54.
- HU T, YANG H. Multi-crack propagation analysis of tunnel portal lining under eccentric pressure by the extended finite element method [J]. Safety and environmental engineering, 2022, 29(4):46-54.
- [15] 代树林, 杨有源, 辛毓龙, 等. 地形偏压对公路隧道偏压程度影响模型试验研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7):2901-2906.
- DAI S L, YANG Y Y, XIN Y L, et al. Model experimental investigation on the effect of terrain bias on highway tunnel bias degree [J]. Science technology and engineering, 2022, 22(7):2901-2906.
- [16] 乔雄, 杨鑫. 黄土隧道二次衬砌开裂原因及防治措施现状与发展[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(10):1657-1676.
- QIAO X, YANG X. Current situation and development of causes of secondary lining crack in loess tunnel and countermeasures [J]. Tunnel construction, 2023, 43(10):1657-1676.
- [17] 邹昌磊. 穿越断层破碎带隧道台阶法施工初支变形特征及控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- ZOU C L. Study on deformation characteristics and control technology of initial support in step method construction of tunnel crossing fault fracture zone [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [18] 崔建航. 极软弱围岩隧道支护结构开裂机理及防治技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2023.
- CUI J H. Study on cracking mechanism and prevention technology of tunnel supporting structure in extremely weak surrounding rock [D]. Wuhan: Wuhan University, 2023.