

文章编号: 1001-4632 (2026) 02-0175-11

引用格式: 范胜元, 加武荣, 谢江胜, 等. 服役隧道仰拱上抬病害机理分析与整治措施[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(2): 175-185.

Citation: FAN Shengyuan, JIA Wurong, XIE Jiangsheng, et al. Mechanism Analysis and Treatment Measures for Inverted Arch Uplift in In-Service Tunnel [J]. China Railway Science, 2026, 47 (2): 175-185.

服役隧道仰拱上抬病害机理分析与整治措施

范胜元^{1,2,3}, 加武荣^{1,2}, 谢江胜^{1,2}, 田思思^{1,4}, 宋战平^{2,3},
刘博^{1,2}, 李曙光^{1,2}

1. 中铁二十局集团有限公司 博士后工作站, 陕西 西安 710016;
2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055;
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
4. 中铁建科检测有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要: 针对服役隧道仰拱结构隆起和轨道板开裂病害的机理分析和整治问题, 综合采用现场结构病害特征分析和室内试验相结合的研究方法, 探究沪昆铁路某服役隧道仰拱隆起变形和轨道板开裂的病害机理; 基于结构开裂病害特征和病害机理分析, 提出“施作注浆锚管-基岩注浆-拆除并重构仰拱结构”的综合整治措施; 采用该综合整治措施指导背景工程施工, 监测并分析施工过程中基岩-仰拱接触应力演化规律。结果表明: 基岩遇水膨胀变形是引起仰拱等支护结构局部抬升、结构内力增大和不均匀变形、开裂的主要原因; 基岩承载力降低和局部高地应力挤压作用引发的应力集中, 以及仰拱结构刚度和受力不均等因素, 同样加剧了基岩-仰拱结构的非协调性变形、开裂风险; 基岩和重构仰拱间接接触应力呈阶段性发展规律, 整体表现为先缓慢增大后逐渐收敛并趋于稳定; 3个监测断面的基岩-仰拱接触应力均值分别为167.83, 169.51和165.82 kPa, 可确保隧道结构受力稳定和安全。结合病害机理分析采取的整治措施可有效防控服役隧道仰拱隆起和结构开裂, 研究成果为类似工程病害的整治和预防提供了方案设计和工程应用借鉴。

关键词: 服役隧道; 围岩膨胀; 仰拱抬升; 机理分析; 病害整治

中图分类号: U457.2 **文献标识码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.02.15

隧道建设和运营环境日益复杂, 服役隧道结构病害频发, 尤其是围岩变形、仰拱隆起和衬砌开裂等问题, 严重威胁隧道的长期稳定性和列车的运营安全性^[1-3]。围岩和支护结构的稳定对确保隧道服役及列车运营安全至关重要, 服役隧道结构病害的机理分析和快速整治问题亟待解决。近年来, 国内外诸多学者从不同角度对上述问题展开了深入研究, 取得了丰富的成果^[4-6], 以确保服役隧道结构的长期稳定和列车运营安全^[7-9]。

隧道病害机理研究方面, 王景春等^[10]通过分析高铁隧道仰拱结构的动力响应模式, 发现围岩结构时效劣化对仰拱结构受力和变形开裂影响显著,

服役期间应加强隧道仰拱和围岩的检测加固。Lee等^[11]进一步研究了复杂地质环境(渗流水溶蚀、应力挤压)对围岩鼓胀和仰拱隆起的诱发机制, 揭示了地质条件与病害之间的内在联系。黄明利等^[12]基于数值试验和现场测试, 对比分析了围岩-衬砌承载体系的受力、变形特征, 指出支护结构的变形和开裂与围岩黏弹性特性密切相关, 揭示了木寨岭隧道支护结构变形、开裂的潜在原因。张成平等^[13]利用地质雷达和内窥镜探测手段, 研究了盾构隧道渗漏病害的发生机制, 借助数值模拟分析发现渗漏会导致地层变形和管片受力恶化。苏香龙^[14]基于山岳隧道衬砌渗水病害特征和成因分

收稿日期: 2024-11-28; 修订日期: 2026-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178393); 中国博士后科学基金资助项目(2024M763843); 陕西省创新能力支撑计划项目(2020TD-005); 优博基金资助项目(2021XYBPY002)

第一作者: 范胜元(1989—), 男, 山东菏泽人, 工程师, 博士。E-mail: fanshengyuan@xauat.edu.cn

析,提出了综合防排水系统,通过衬砌结构补强、环氧树脂封闭裂缝和安装排水管等措施,有效解决了隧道衬砌渗水问题。刘保国等^[15]探讨了黏弹性围岩条件下围岩-隧道结构相互作用的时效性演化规律,分析了开挖面时空效应对两者相互作用力的时效变形影响;研究结果对服役隧道围岩-支护结构协同作用机理分析及稳定性控制具有重要借鉴意义。考虑支护滞后的影响,吕爱钟等^[16]从理论角度出发,给出了非静水压下复杂洞室围岩-二衬界面不同接触条件下的弹性解析解,丰富了围岩-支护二元体协同作用理论。既有研究从不同角度揭示了服役隧道支护结构变形、开裂的诱因及灾变演化机理,发现外部荷载、地下水等诱发隧道结构变形、开裂的模式和致灾过程具有显著性差异。上述研究为复杂地层条件诱发隧道结构病害的分析提供了参考,但既有研究多从单一因素(如围岩变形、渗水等)出发,缺乏对多因素共同作用下隧道结构病害演化机理的系统分析,多因素共同作用下隧道结构灾变机理仍需进一步研究。

仰拱隆起严重威胁着隧道运营和列车行驶安全^[17-18],针对隧道病害防治方面,高玮等^[19]通过统计和分析大量隧道仰拱病害特征,研究了隧道仰拱隆起成因和破坏演化规律,提出了包括注浆加固、锚杆支护等具体的病害整治措施,为类似工程病害的防治提供了有效借鉴。依托实际工程病害案例,赵进文等^[20]通过数值模拟研究了锚杆支护参数对仰拱竖向变形、受力的控制效果,发现施作锚杆可有效提高支护结构和基岩完整性,从而较好地控制仰拱变形并减小仰拱内力,研究成果丰富了既有隧道仰拱结构病害防治措施。针对衬砌病害,张丽霞^[21]依托大秦铁路和尚坪隧道衬砌病害整治案例,分析验证了套衬技术在衬砌病害整治中的有效性,成果有效地解决了重载铁路隧道衬砌空洞、剥落掉块等病害,为车载扰动下的隧道结构灾害防治提供了借鉴。李贵民等^[22]通过分析哈巴雪山隧道围岩变形引起的衬砌开裂病害特征,提出了弃渣回填反压、全面拆换和加强衬砌支护的综合处置措施,有效解决了隧道结构病害问题并确保了隧道结构的长期稳定。肖小文等^[23]和邹文浩等^[24]结合灾害调查和病因分析,提出的“钢管桩+中空锚杆注浆”+“抬升-注浆-锚固”综合加固方案,有效解决了高地应力引起的服役隧道仰拱、道床变形开裂灾害。既有研究基于隧道结构病害特征和诱因分析,提出了不同病害的针对性防治措施,丰富了隧

道结构病害防治和稳定性控制方案,对后续的研究具有重要的参考和借鉴意义。但现有整治措施多针对特定工程案例,缺乏普适性和系统性,难以满足复杂地质条件和运营环境下的病害防治需求;同时,随着隧道运营安全需求的提高,亟需开发高效、快速的病害整治技术,以缩短整治周期并降低对运营的影响。

既有研究成果为隧道结构病害的机理分析和防治提供了重要的理论依据和实践经验,但随着隧道运营环境日益复杂和安全需求不断提高,多因素共同作用下隧道结构病害演化机理系统性分析和快速整治问题仍亟待解决。

本文依托服役隧道结构病害整治的工程背景,采用病害特征调查分析、室内试验测试和机理分析以及整治措施现场应用和评价的研究思路,开展了多因素共同作用下隧道仰拱隆起和轨道板开裂的诱因和演化机理分析;针对性提出了“基岩注浆+旧仰拱拆除+仰拱重构”的整治措施并指导现场施工;通过实测数据分析验证整治措施的有效性,评估其对隧道长期稳定和运营安全的影响。实现了基于隧道结构病害特征与机理分析,提出针对性的病害整治措施;形成一套适用于类似工程病害预防和治理的技术与方法,为类似隧道结构病害的防治提供了经验借鉴。

1 工程概况及病害问题

1.1 工程概况

2016年12月28日沪昆高铁贵阳至昆明段开通,目标隧道为该区间内线路主要控制性工程。隧道全长5 523 m,埋深在325~345 m之间;隧道横断面设计跨度和高度分别为14.70和11.04 m,为特大断面隧道,隧道结构断面设计如图1所示。图

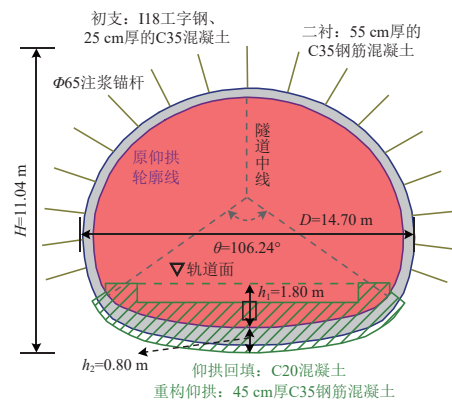


图1 隧道结构断面设计

中： H 为隧道断面高度； h_1 为仰拱填充原设计厚度； h_2 为重构仰拱新增厚度； D 为隧道断面跨度； θ 为重构仰拱范围对应的角度。

隧道主要穿越了云贵高原侵蚀构造中低山区，隧址区地貌具有构造剥蚀、溶蚀槽谷的特点，典型地质构造包括法郎向斜、燕子岩逆断层，断层倾角在 $65^\circ\sim 80^\circ$ 之间，与隧道轴线夹角在 $44^\circ\sim 81^\circ$ 之间；隧址区以碳酸盐岩为主，上覆地层主要有砂岩、白云岩、泥质灰岩和灰质砂岩，具体的地质剖面如图 2 所示。

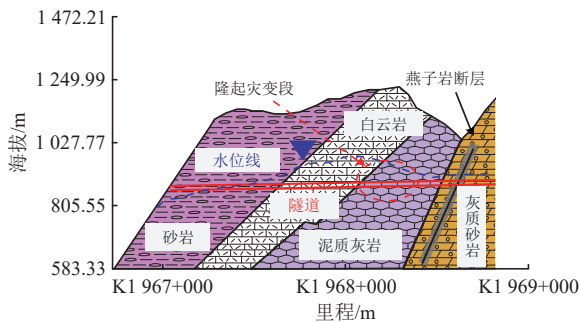
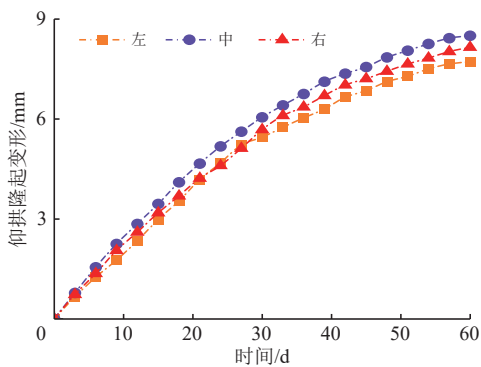


图 2 隧址区地质剖面

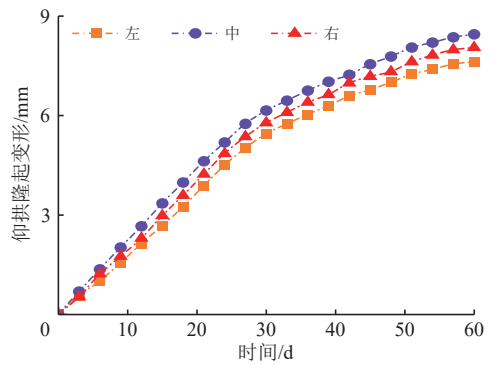
1.2 病害特征

运营过程中在 K1 968+000—K1 968+100 区间内轨道标高于 2017 年 1 月上旬出现异常；高铁工务段安排技术人员于 2017 年 1 月 15 日—2017 年 3 月 15 日对灾变区间仰拱隆起变形及轨道标高进行连续监测，K1 968+052 和 K1 968+060 断面各测点仰拱隆起变形监测结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出：各断面左右侧仰拱隆起变形并非完全一致，且中间部位仰拱隆起明显大于两侧，两监测断面仰拱最大隆起值分别达到 8.50 和 8.42 mm，比各断面左右两侧累计变形均值分别高 6.65% 和 7.28%，与 Zhao 等^[25]基于理论分析得到的仰拱隆起结果相符；监测前期，各测点仰拱的隆起变形增加较快，随时间推移，仰拱的变形速率



(a) K1 968+52 断面



(b) K1 968+60 断面

图 3 灾变期间仰拱隆起变形监测结果

不断减小，表明隆起变形逐渐趋于稳定，满足了仰拱重構施工条件。

监测结束后，灾变区间内上行轨道 K1 968+058.550 处高程较设计值高 12.7 mm，下行轨道 K1 968+059.316 处高程较设计值高 18.2 mm，超过 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》规定的无砟轨道变形控制阈值 (8 mm)，严重威胁列车安全运营^[26]；此外，上行轨道板共产生宽度在 0.1~0.4 mm 之间的贯通裂纹 53 条，且左右侧各有 1 条长 7 m、宽 0.8~1.2 mm 的纵向裂纹；下行轨道板共产生 38 条宽度在 0.1~0.4 mm 之间的贯通裂纹；上、下行轨道呈现明显的非对称开裂特征，推测其原因为非对称列车荷载扰动以及结构刚度和受力分布不均匀；特别是 K1 968+042—K1 968+078 区间内仰拱隆起变形和轨道板开裂现象最严重；此外，轨道板与侧沟间填充层及中心沟侧墙位置均出现裂纹，部分裂缝贯穿至沟底，具体开裂情况如图 4 所示。

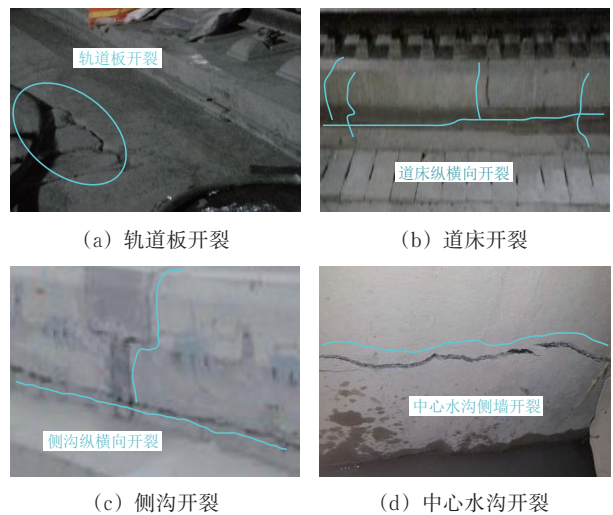


图 4 隧道结构开裂病害

2 病害机理

结合地勘资料和现场病害特征统计结果,对隧道结构病害机理进行分析。勘探揭示地下水位在0.45~0.78 m,但未发现隐伏岩溶,测试水样侵蚀性等级为H2;隧址区岩层走向与线路大角度相交,受断层影响,岩层产状变化较大,岩芯层状倾向角在5°~15°之间。通过现场调查和室内试验分析,发现诱发仰拱抬升、开裂的因素主要包括地下水-岩软化膨胀和溶蚀、高地应力挤压作用以及混凝土施工质量缺陷。

2.1 水-岩物化溶蚀与基岩膨胀作用

在隧道结构开裂段落钻取基岩岩芯,发现地层岩性主要为泥质灰岩,如图5所示。



图5 灾变段基岩岩芯

从图5可以看出:隧道基岩裂隙和地下水渗流通道发育,且局部存在明显的水-岩侵蚀痕迹;地勘资料揭示灾变区间地下渗流水丰富,加剧了岩石的水-岩溶蚀作用;同时,结合隧道结构开裂特征调查分析发现,隧道结构开裂部位未出现渗流水,判断隧道初支-衬砌内未形成渗水通道。

对K1 968+52断面处岩芯进行饱水膨胀和强度测试分析,得到岩石轴、径向膨胀率和单轴抗压强度随饱水率的变化曲线如图6所示。

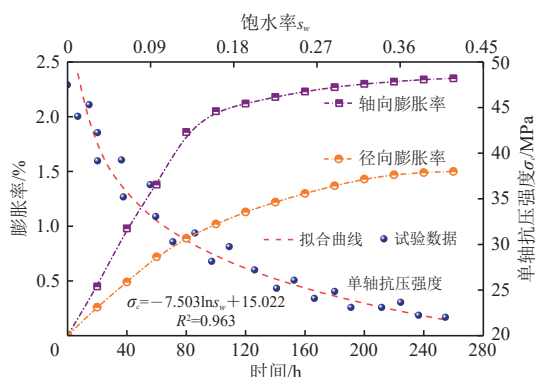


图6 岩石轴、径向膨胀率和单轴抗压强度随饱水率变化曲线

从图6可以看出:基岩吸水后快速膨胀,饱水前60 h内基岩的轴向、径向膨胀率分别达到1.72%和0.75%,膨胀变形特征明显且岩石轴向

膨胀变形明显大于径向变形;随饱水时间持续,岩石累积膨胀变形不断增大,持续饱水超过80 h后,岩石膨胀变形增速减缓并逐渐收敛,饱水结束时岩芯最大轴向、径向膨胀率分别达到2.4%和1.5%;基岩吸水膨胀变形会引起隧道仰拱结构的局部抬升并增大仰拱内力,严重时会造成仰拱的隆起变形与开裂^[27-28];此外,水-岩溶蚀导致基岩强度弱化,饱水率低于0.05时岩石强度变化较小,仅减小4.24 MPa;饱水率达到0.1时,水-岩溶蚀作用下岩石强度快速降低,降幅达到34.47%;饱水率超过0.3后岩石强度逐渐趋于稳定,饱水结束时基岩强度累计降低22.99 MPa。由此可见,水-岩溶蚀作用下基岩承载力降低不利于隧道围岩和支护结构稳定,严重时会导致上部结构的不均匀变形、开裂,威胁隧道服役安全。

此外,通过灾变段地下水的侵蚀性测试分析发现,水样对岩石和混凝土的侵蚀性等级为H2,比勘察和施工期间水样的侵蚀性明显增大。分析因为区间内关岭组二段地层局部夹鸡窝状石膏晶簇,开挖和车载扰动作用下洞周围岩内形成新的地下水渗流通道,渗流水将溶蚀并运移地层中的 SO_4^{2-} ,引起水中酸离子含量增多,增强了地下水的溶蚀性;酸性溶蚀作用进一步加剧岩石承载力不足、增大混凝土结构受力不均、变形开裂的风险^[29-30]。

通过上述分析可知:岩石内部裂隙水通过水-岩物化作用导致基岩遇水膨胀变形,引起仰拱等支护结构局部抬升和不均匀变形是诱发仰拱内力增大、结构开裂的主要原因;此外,酸性溶蚀作用下基岩承载力降低,导致围岩和支护结构受力不均、变形不协调,增加了隧道结构开裂、失稳的风险。

2.2 高地应力挤压作用

通过室内加载测试,获得了自然状态下基岩的单轴抗压强度为27.60~46.50 MPa,岩石饱水单轴抗压强度为20.56~21.34 MPa(低于30 MPa),结合《工程岩体分级标准》和既有研究判断灾变段基岩为软质围岩^[31];同时,灾变区间隧道埋深为325~345 m,水平地应力在4.13~8.69 MPa之间;结合室内加载试验结果知基岩的强度应力比为2.37~5.16,部分围岩承受着高地应力挤压作用^[32-33];在围岩水化膨胀变形的基础上,高地应力挤压作用加剧了仰拱结构抬升隆起的风险。此外,地勘资料揭示隧道岩层倾向角在5°~15°之间,高地应力挤压作用易引起仰拱结构局部位置的应力集中,同样增加了基岩-仰拱结构应力分布不均和

非协调性变形、开裂风险，该结果与现场仰拱隆起变形及支护结构的非对称开裂特征相一致。

2.3 仰拱混凝土施工质量缺陷

通过灾变段仰拱钻孔取芯分析发现，局部仰拱混凝土浇筑厚度比设计值少 0.08~0.16 m，导致仰拱结构整体刚度减小；1#钻孔中混凝土发育有多条水平裂缝，在 1.25 m 深度处仰拱填充层存在施工缝、部分区域混凝土存在离析现象，导致仰拱结构受力不均；2#钻孔中（深度为 0.35~1.30 m）衍生多条竖向贯通裂缝，这主要是由基岩膨胀变形导致仰拱结构不均匀抬升变形引起的剪切裂缝；部分缝隙壁附有少量泥沙和流水痕迹，这是由于防排水措施未能发挥作用引起的；3#钻孔中（深度为 1.00~1.90 m）钻芯混凝土密实度差，同时受服役期间列车荷载的往复扰动作用，加剧了仰拱结构受荷时效变形及上、下行轨道板的非对称变形、开裂风险，与现场工程病害特征相符。

综合上述分析可知，水-岩物化作用引发的基岩膨胀变形是导致围岩膨胀、仰拱等支护结构局部抬升、结构内力增大和非均匀变形、开裂的主要内因；同时，基岩承载力降低和局部高地应力挤压作用引起的仰拱结构应力集中，以及施工质量缺陷引起的仰拱结构刚度和受力不均匀等因素，大大加剧了基岩-仰拱结构非协调性变形、开裂的风险。多种不利因素协同作用，共同诱发了隧道结构变形、开裂病害的发生，威胁着隧道结构服役稳定和列车运行安全。

3 病害整治措施及应用评价

3.1 病害整治措施

结合隧道病害特征和病因分析，提出的病害针对性整治措施如下。

(1) 进行基岩注浆，以改善地下水渗流引起的基岩水-岩溶蚀损伤与膨胀变形；

(2) 施作注浆锚管，提高围岩结构的整体性和承载力，以控制基岩隆起和仰拱抬升变形；

(3) 加大仰拱曲率和厚度后重筑仰拱结构，以提高仰拱结构的整体刚度与抗变形能力。

为确保隧道病害快速整治和列车正常运营，现场采取全幅、分段跳槽的方法进行病害整治；主要施工过程为：基岩注浆→轨道板剪切、凿除→过渡枕木、钢垫梁施工→仰拱、填充层的破除和重筑施

工→道床、轨道板施作→钢轨梁精调、通车，现场具体施工过程如图 7 所示。考虑施工质量缺陷对隧道结构病害发生的加剧作用，整治措施实施过程中应严格遵守设计方案，规范施工流程以确保工程结构的施工质量。

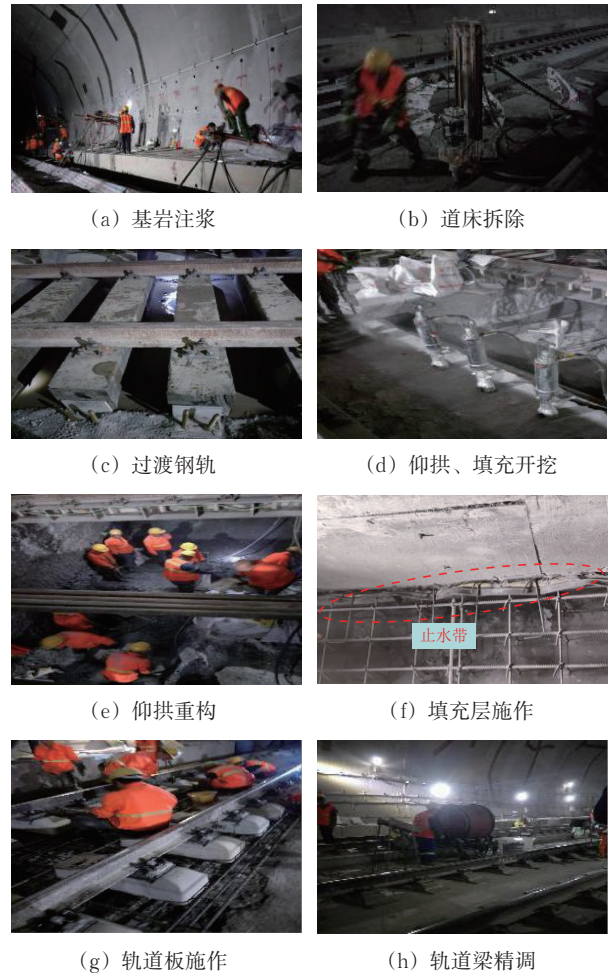


图 7 仰拱隆起病害整治施工过程

3.2 整治措施应用及评价

3.2.1 病害整治过程

按照拟定整治措施，在灾变区间内等间距选取 36 处横断面，通过各断面对称布置的 6 根 7 m 长的 $\phi 75$ 注浆锚管对基岩进行注浆加固，各断面注浆锚管布置示意图如图 8 所示。

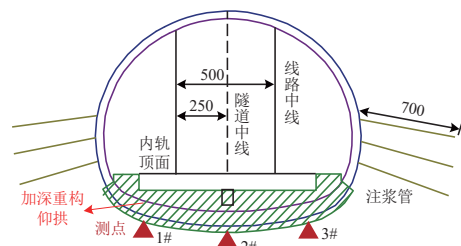


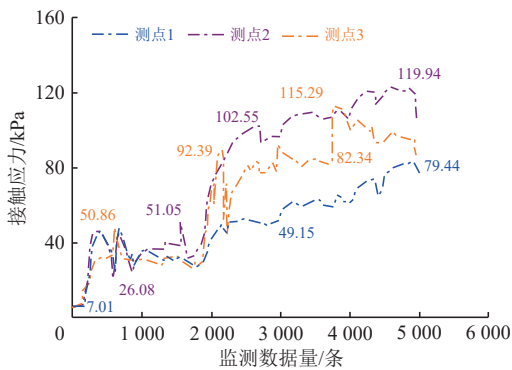
图 8 注浆锚管环向布置示意图 (单位: cm)

在K1 968+042, K1 968+054和K1 968+066断面处共使用6台钻机在衬砌两侧向大里程方向钻孔,纵、环向间距均为1 m;现场提前对钻孔点进行标识,钻孔过程中控制孔角偏差不超过3%,孔位和孔深偏差均低于5 cm,钻孔后采用高压风进行吹洗清孔。注浆钢管前端50 cm范围内布置8 mm出浆孔,管壁外侧均匀设置焊疤以增加锚固力;安装注浆管至设计深度,封堵孔口并预留排气孔,采用挤压式注浆机将水灰比为0.38的水泥浆液压入锚管。根据TB 10121—2017《铁路隧道注浆技术规范》要求,注浆过程中严格控制流量,并控制注浆压力为1 MPa,以防止注浆管爆裂;同时监控相邻衬砌与轨道结构的稳定性,采用注浆压力-变形联动控制,如变形超限立刻停止注浆;孔口溢浆后维持注浆压力稳定5 min后停止注浆并封堵注浆孔。

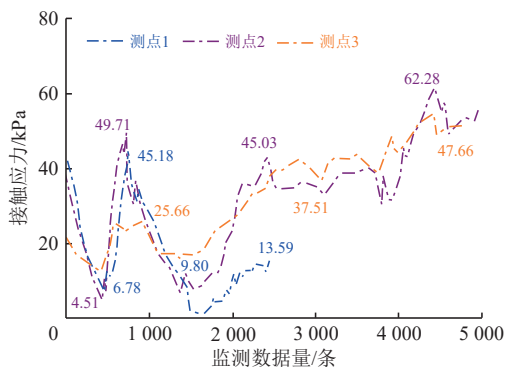
3.2.2 基岩-仰拱接触应力

根据图8所示测点,在K1 968+052, K1 968+060和K1 968+068这3个断面布置测量元器件监测隧道基岩-仰拱接触应力和仰拱隆起变形。基岩-仰拱接触应力随时间的变化结果如图9所示。

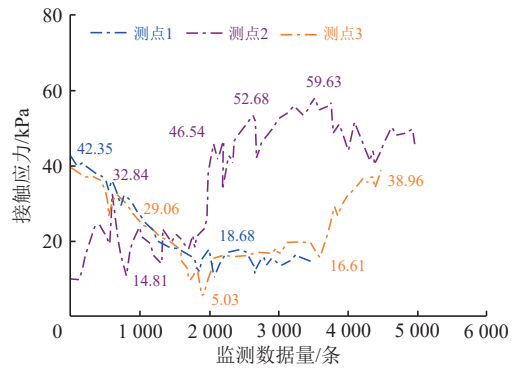
从图9可以看出:受不同工序施工(混凝土浇筑、填充层施作、轨道板安装等)扰动影响,动态荷载通过接触应力传递至基岩并完成应力重分布;



(a) K1 968+052断面



(b) K1 968+060断面



(c) K1 968+068断面

图9 典型断面基岩-仰拱接触应力变化曲线

随监测时间持续,基岩-仰拱接触应力呈现波动式上升发展趋势,符合Terzaghi提出的压力模型理论^[34];施工扰动初期,仰拱混凝土未完全硬化,应力传递不连续导致读数波动;随仰拱结构刚度和荷载传递作用增强,两者间的接触应力不断增大;仰拱填充施工扰动作用下,K1 968+052断面2#和3#测点应力突增并超过100 kPa,表明仰拱硬化成形且与基岩接触密实,能够及时地承受并传递荷载;K1 968+060和K1 968+068断面各测点接触应力同样表现为波动式升高,分析原因为填充层混凝土浇筑时自重荷载引起压力盒读数突增;两断面的最大瞬时应力分别达到45.03和46.54 kPa,满足仰拱结构受力安全需求;受上部结构继续施工(道床浇筑、轨道板安装等)及临时结构拆除扰动的影 响,不同测点间的接触应力交替升高且整体仍呈现波动式上升趋势,分析原因为混凝土强度硬化与围岩变形共同作用调整了荷载重分配,后期围岩变形被抑制且混凝土结构硬化起主导作用,导致接触应力的累计增大。后续施工中K1 968+060和K1 968+068断面1#测点被破坏,但已有监测数据同样反映出了基岩-仰拱接触应力的波动式变化特征,与既有研究得出的“荷载传递-围岩应力重分布”响应理论相一致^[35]。

此外,3个断面各测点接触应力均为压应力,且均表现为中线测点(2#测点)处基岩-仰拱接触应力最大,分别为119.94、62.28和59.63 kPa,保证了仰拱结构受力处于安全状态;分析原因为仰拱具有弹性地基梁受力特征,中线处弯矩最大、导致基岩反力(接触应力)相应增大,符合“弹性地基梁”模型理论^[36];两边测点接触应力较小且应力值相近,表明加深重沟后仰拱结构刚度分布均匀,受力合理。

3.2.3 仰拱隆起变形

根据图8所示测点安装仰拱竖向变形监测装置,得到隧道仰拱隆起变形随时间的变化结果如图10所示。

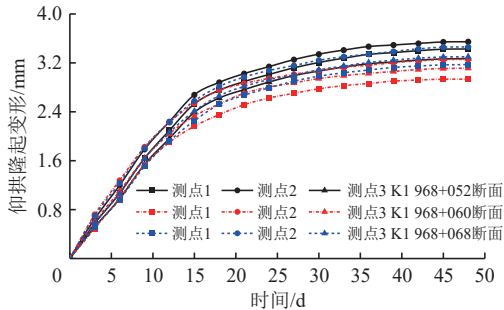


图10 典型断面仰拱隆起变形实测结果

从图10可以看出:不同断面隧道仰拱隆起变形时程曲线具有相似的发展趋势,均经历了“先快速变形,后逐渐收敛”的变化过程;伴随仰拱结构刚度与荷载传递作用的增强,接触应力突变时仰拱隆起变形加快,仰拱隆起的“快速变形-收敛”过程与基岩-仰拱接触应力的波动式上升相对应;待仰拱混凝土强度硬化和结构刚度达到设计值后,接触应力调整重分布趋于均匀与稳定,仰拱隆起变形进入收敛阶段,印证了“基岩-仰拱”二元体结构内部“荷载传递-应力重分布-变形响应”的协同承载、变形机制;结合“弹性地基梁”理论分析,仰拱中线位置弯矩及基岩反力(接触应力)最大,导致其隆起变形同步增大,两侧变形较小且基本呈对称分布特征,该结果与Luo等对润子岔2#隧道结构变形分布规律的监测结果相一致^[37];此外,基岩注浆加固提高了围岩整体性及其承载力,同时也限制了仰拱的整体隆起变形;3个断面处仰拱最大隆起变形(中线位置)分别达到3.55,3.26和3.46 mm,最大隆起值仅为警戒值的35.5%,表明采取围岩注浆加固和重构仰拱措施明显改善了隧道围岩与支护结构的稳定状态,能够确保隧道结构安全。

3.2.4 讨论

注浆通过填充基岩裂隙封堵地下水渗流路径,抑制水-岩溶蚀劣化的同时增强了基岩裂隙接触面摩擦力,以提高围岩弹性模量和承载能力;加大仰拱曲率和厚度后重构仰拱结构,能够有效提高仰拱结构整体刚度并改善仰拱结构底部荷载分布,将基岩-仰拱接触应力峰值控制在安全范围内,同时抑制了基岩-仰拱结构的整体隆起变形。与“锚固+

仰拱加固”案例相比^[37],本研究采取“基岩注浆+加深重构仰拱”整治措施后,基岩-仰拱接触应力分布更均匀(两侧差值 $<10\%$);加大仰拱曲率和厚度,对基岩与仰拱竖向变形的抑制效果更加明显,变形收敛更快。

“围岩-仰拱”二元体结构内部“荷载传递-应力重分布-变形响应”的协同作用机制得到验证,在病害整治措施实施过程中应严格控制施工速度(如填充层采取分层浇筑),以避免结构受力与变形超过安全限值。此外,背景工程中在钢垫梁拆除后应力重分布未引起仰拱变形反弹,验证了重筑仰拱的承载、变形可靠性;本结果也可借助Hoek-Brown准则,通过“应力-变形双控”模型对隧道结构的长期稳定性做进一步评估分析。

4 结论

(1) 吸水溶蚀和酸离子腐蚀将引起岩石膨胀变形,这是诱发隧道仰拱隆起变形的主要原因;同时,基岩承载力降低、局部高地应力挤压和车载扰动共同作用引起岩石非均匀变形,增大了仰拱等支护结构的受力不均和开裂风险。此外,混凝土施工质量缺陷同样会影响结构的服役性能,威胁着隧道结构稳定与行车安全。

(2) 锚管施作和注浆加固措施不仅有效改善了渗流水对基岩的溶蚀劣化作用,同样提高了围岩的整体性和受力稳定性,有效抑制了基岩膨胀变形和仰拱结构隆起抬升;加深重构后仰拱曲率和厚度增加,提高了仰拱结构的整体刚度与抗变形能力,确保了隧道支护结构的稳定性。

(3) “围岩-仰拱”二元体结构内部“荷载传递-应力重分布-变形响应”的协同作用机制得到验证;受仰拱结构刚度分布和传力路径的影响,中线位置仰拱受力最大,两侧应力均衡且量值较小,证明加深仰拱整体刚度及受力合理,能够有效发挥支护作用;基岩-仰拱最大接触应力为119.94 kPa,结构受力处于安全状态,确保了隧道结构的稳定和行车安全。

(4) 通过服役隧道结构病害特征与病因分析,制定的锚管注浆加固基岩与加深重构仰拱等整治措施,能够有效控制隧道围岩变形和仰拱结构的受力稳定,保证了隧道结构的运营安全。本文研究方法和成果对类似工程病害防治的理论分析与工程应用具有良好的借鉴与参考意义。

参 考 文 献

- [1] 张徐,赵春发,翟婉明.循环荷载频率对高速铁路有砟道床累积变形行为的影响[J].中国铁道科学,2017,38(1):1-8.
(ZHANG Xu, ZHAO Chunfa, ZHAI Wanming. Influence of Cyclic Loading Frequency on Accumulated Deformation Behavior of High-Speed Railway Ballast Bed [J]. China Railway Science, 2017, 38 (1): 1-8. in Chinese)
- [2] FAN S Y, SONG Z P, ZHANG Y W, et al. Case Study of the Effect of Rainfall Infiltration on a Tunnel Underlying the Roadbed Slope with Weak Inter-Layer [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24 (5): 1607-1619.
- [3] 宋慧来,赵一馨,刘钰,等.有砟与无砟轨道系统隧道底拱变形传递规律[J].中国铁道科学,2024,45(2):123-133.
(SONG Huilai, ZHAO Yixin, LIU Yu, et al. Deformation Transmission Law of Tunnel Bottom Heave of Ballasted and Ballastless Track System [J]. China Railway Science, 2024, 45 (2): 123-133. in Chinese)
- [4] 侯茂锐.基于多因素耦合作用的高速铁路钢轨廓形偏差限值研究[J].中国铁道科学,2023,44(6):125-135.
(HOU Maorui. Research on Limit Value of Rail Profile Deviation of High-Speed Railway Based on Multi-Factor Coupling Effect [J]. China Railway Science, 2023, 44 (6): 125-135. in Chinese)
- [5] FAN S Y, SONG Z P, LI X, et al. Investigation into the Large Deformation Mechanism and Control Technology of Variable Cross-Section Tunnel in Layered Mudstone Stratum [J]. Buildings, 2023, 13 (1): 110.
- [6] 李谷,张志超,祖宏林,等.高速铁路典型轨道病害下轮轨力响应特性试验研究[J].中国铁道科学,2019,40(6):30-36.
(LI Gu, ZHANG Zhichao, ZU Honglin, et al. Experimental Study on Wheel-Rail Force Response Characteristics under Typical Track Defects of High-Speed Railway [J]. China Railway Science, 2019, 40 (6): 30-36. in Chinese)
- [7] 徐怀仁.泥质石灰岩地层高速铁路隧道底鼓原因分析[J].隧道建设:中英文,2023,43(6):1075-1088.
(XU Huairan. Causes for Floor Heave of High-Speed Railway Tunnels in Argillaceous Limestone Strata [J]. Tunnel Construction, 2023, 43 (6): 1075-1088. in Chinese)
- [8] 段炼,李永恒,伍江航,等.HTG隧道衬砌病害调查及成因机理分析[J].现代隧道技术,2022,59(增1):727-734.
(DUAN Lian, LI Yongheng, WU Jianghang, et al. Investigation and Cause Analysis of HTG Tunnel Lining Defects [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59 (Supplement 1): 727-734. in Chinese)
- [9] 邓逆涛,陈锋,张千里,等.含黄铁矿填料的高速铁路路基上拱特性与机理[J].中国铁道科学,2024,45(4):12-21.
(DENG Nitao, CHEN Feng, ZHANG Qianli, et al. Characteristics and Mechanisms of Heave of High-Speed Railway Subgrade Containing Pyrite Filler [J]. China Railway Science, 2024, 45 (4): 12-21. in Chinese)
- [10] 王景春,常子红,王大鹏,等.围岩和衬砌劣化作用下隧道底部结构动力响应[J].铁道建筑,2023,63(6):109-112.
(WANG Jingchun, CHANG Zihong, WANG Dapeng, et al. Dynamic Response of Tunnel Bottom under Deterioration of Surrounding Rock and Lining [J]. Railway Engineering, 2023, 63 (6): 109-112. in Chinese)
- [11] LEE C H, WANG T T. Invert Anomalies in Operational Rock Tunnels: Appearance, Causes, and Countermeasures [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30 (3): 04015048.
- [12] 黄明利,赵建明,谭忠盛,等.兰渝铁路木寨岭隧道岭脊段衬砌-围岩结构体系变形受力特征分析[J].现代隧道技术,2016,53(6):89-99,107.
(HUANG Mingli, ZHAO Jianming, TAN Zhongsheng, et al. Analysis of the Deformation and Mechanical Characteristics of the Surrounding Rock-Lining Structure of the Muzhailing Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53 (6): 89-99, 107. in Chinese)
- [13] 张成平,王李斌,唐海栋,等.北京地铁盾构隧道渗漏病害成因及对管片结构的影响研究[J].隧道建设:中英文,2024,44(增1):456-466.
(ZHANG Chengping, WANG Libin, TANG Haidong, et al. Study on Causes of Leakage in Beijing Metro Shield Tunnel and Its Influence on Segment Structure [J]. Tunnel Construction, 2024, 44 (Supplement 1): 456-466. in Chinese)
- [14] 苏香龙.山岳隧道衬砌开裂渗水成因分析与治理对策[J].福建交通科技,2021(11):31-35,53.
(SU Xianglong. Cause Analysis and Treatment Countermeasures of Cracking and Seepage in Mountain Tunnel Lining [J]. Fujian Transportation Technology, 2021 (11): 31-35, 53. in Chinese)
- [15] 刘保国,杜学东.圆形洞室围岩与结构相互作用的黏弹性解析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(4):561-564.
(LIU Baoguo, DU Xuedong. Visco-Elastical Analysis on Interaction Between Supporting Structure and Surrounding Rocks of Circle Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (4): 561-564. in Chinese)
- [16] 吕爱钟,陈虹宇,覃媛,等.光滑接触条件下隧洞支护断面形状优化[J].岩石力学与工程学报,2014,33(8):1563-1571.

- (LÜ Aizhong, CHEN Hongyu, TAN Yuan, et al. Shape Optimization of Tunnel Support Section under Contact Condition of Pure Slip [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (8): 1563-1571. in Chinese)
- [17] 晏兆晋,高翠香,徐晓迪,等.基于车辆响应的高速铁路周期性轨道短波病害时频特性分析[J].中国铁道科学,2020,41(1):10-17.
(YAN Zhaojin, GAO Cuixiang, XU Xiaodi, et al. Time-Frequency Characteristics Analysis of Periodic Short Wave Disease of Track for High-Speed Railway Based on Vehicle Response [J]. China Railway Science, 2020, 41 (1): 10-17. in Chinese)
- [18] 刘景宇,张千里,郭浏卉,等.高速铁路地基泥岩膨胀变形计算方法及应用研究[J].中国铁道科学,2023,44(1):50-57.
(LIU Jingyu, ZHANG Qianli, GUO Lihui, et al. Calculation Method and Application Study of Swelling Deformation of Foundation Mudstone for High-Speed Railway [J]. China Railway Science, 2023, 44 (1): 50-57. in Chinese)
- [19] 高玮,安平,黄俊,等.我国运营期隧道病害管理系统研究现状及展望[J].现代隧道技术,2025,62(1):10-19.
(GAO Wei, AN Ping, HUANG Jun, et al. Current Research Status and Prospects of Defect Management Systems for Operational Tunnels in China [J]. Modern Tunnelling Technology, 2025, 62 (1): 10-19. in Chinese)
- [20] 赵进文,刘占博,王俊杰,等.锚杆支护对砂泥岩地层铁路隧道仰拱变形及受力的影响[J].铁道建筑,2024,64(7):106-110.
(ZHAO Jinwen, LIU Zhanbo, WANG Junjie, et al. Influence of Bolt Support on Inverted Arch Deformation and Stress of Railway Tunnel in Sand-Mudstone Stratum [J]. Railway Engineering, 2024, 64 (7): 106-110. in Chinese)
- [21] 张丽霞.重载铁路隧道衬砌病害套衬整治关键技术及应用[J].铁道建筑,2024,64(6):114-118.
(ZHANG Lixia. Key Technologies and Application of Heavy Haul Railway Tunnel Lining Reinforcement for Disease Treatment [J]. Railway Engineering, 2024, 64 (6): 114-118. in Chinese)
- [22] 李贵民,郭永发,丁文云.丽香铁路玄武岩大变形隧道衬砌开裂处理[J].中国铁路,2022(12):106-113.
(LI Guimin, GUO Yongfa, DING Wenyun. Lining Cracking Treatment of Basalt Tunnel with Large Deformation in Lijiang-Shangrila Railway [J]. China Railway, 2022 (12): 106-113. in Chinese)
- [23] 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. in Chinese)
- [24] 邹文浩,马伟斌,杜晓燕,等.既有隧道整体道床下沉的“抬-注-锚”复合整治技术研究[J].铁道建筑,2016(1):20-24.
(ZOU Wenhao, MA Weibin, DU Xiaoyan, et al. Research on Composite Technologies - Lifting, Grouting and Anchorage - for Treating Subsidence of Monolithic Concrete Bed in Existing Railway Tunnel [J]. Railway Engineering, 2016 (1): 20-24. in Chinese)
- [25] ZHAO D P, FAN H B, JIA L L. Characteristics and Mitigation Measures of Floor Heave in Operational High-Speed Railway Tunnels [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25 (4): 1479-1490.
- [26] 樊浩博,陈宏文,赵东平,等.在役岩溶隧道衬砌水压分布及预警控制标准研究[J].岩土力学,2024,45(7):2153-2166.
(FAN Haobo, CHEN Hongwen, ZHAO Dongping, et al. Study on Lining Water Pressure Distribution and Early Warning Control Standard of In-Service Karst Tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45 (7): 2153-2166. in Chinese)
- [27] 程建军,王瑞,祁延录,等.无砟轨道涵洞过渡段路基膨胀引起的轨道上拱响应[J].中国铁道科学,2020,41(6):10-19.
(CHENG Jianjun, WANG Rui, QI Yanlu, et al. Response of Track Arching Caused by Subgrade Expansion in Culvert Transition Section of Ballastless Track [J]. China Railway Science, 2020, 41 (6): 10-19. in Chinese)
- [28] 丁秀丽,赵化蒙,黄书岭.基于吸湿-膨胀分析模型的岩石膨胀变形演化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(增2):3005-3013.
(DING Xiuli, ZHAO Huameng, HAUNG Shuling. Study on Swelling Characteristics of Mudstones Considering Adsorption-Expansion Analysis Model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40 (Supplement 2): 3005-3013. in Chinese)
- [29] 霍润科,王龙飞,李曙光,等.受酸腐蚀砂岩的损伤特性和分析模型[J].土木与环境工程学报:中英文,2022,44(1):1-9.
(HUO Runke, WANG Longfei, LI Shuguang, et al. Characteristics and Analytical Model of Acid-Corroded Sandstone [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44 (1): 1-9. in Chinese)

- [30] 付宏渊,龙彪,史振宁,等.酸腐蚀下粉砂质泥岩力学特性及细观机理研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(5):1441-1451.
(FU Hongyuan, LONG Biao, SHI Zhenning, et al. Study on the Mechanical Properties and Meso-Mechanism of Silty Mudstone under Acid Corrosion [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18 (5): 1441-1451. in Chinese)
- [31] 郭新新,汪波,王振宇,等.考虑蠕变特性的高应力软岩隧道变形预测方法与实践[J].岩土工程学报,2023,45(3):652-660.
(GUO Xinxin, WANG Bo, WANG Zhenyu, et al. Methods and Practices for Deformation Prediction in High-Stress Soft Rock Tunnels Considering Creep Characteristics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45 (3): 652-660. in Chinese)
- [32] 李帆.高地应力条件下高边墙洞室劈裂破坏机制分析方法与工程应用研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(8):2080.
(LI Fan. Study on Splitting Failure Mechanism and Engineering Application of High Sidewall Cavern under High In-Situ Stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43 (8): 2080. in Chinese)
- [33] FAN S Y, SONG Z P, WANG H Z, et al. Influence of the Combined Action of Water and Axial Pressure on the Microscopic Damage and Mechanical Properties of Limestone [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 228: 212027.
- [34] 王将,袁大军,金大龙,等.基于非线性型滑动面假设的盾构隧道松动土压力计算模型研究[J].铁道学报,2021,43(6):165-172.
(WANG Jiang, YUAN Dajun, JIN Dalong, et al. Research on Calculation Model for Loosening Earth Pressure of Shield Tunnel Based on Assumption of Non-Liner Sliding Surface [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43 (6): 165-172. in Chinese)
- [35] 刘洪涛,程文聪,韩子俊,等.矩形巷道围岩应力分布及塑性区演化规律分析[J].采矿与安全工程学报,2025,42(5):998-1007.
(LIU Hongtao, CHENG Wencong, HAN Zijun, et al. Analysis on Stress Distribution and Plastic Zone Evolution in Surrounding Rock of Rectangular Tunnels [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42 (5): 998-1007. in Chinese)
- [36] 马亚丽娜,舒恒,崔庆龙,等.基于弹性地基梁理论的跨活断层隧道围岩-衬砌体系破坏机制研究[J].公路工程,2022,47(1):63-73.
(MA Yalina, SHU Heng, CUI Qinglong, et al. Study on the Failure Mechanism of Surrounding Rock-Lining System of a Cross Active Fault Tunnel Based on Elastic Foundation Beam Theory [J]. Highway Engineering, 2022, 47 (1): 63-73. in Chinese)
- [37] LUO Y B, CHEN J X, SHI Z, et al. Mechanical Characteristics of Primary Support of Large Span Loess Highway Tunnel: a Case Study in Shaanxi Province, Loess Plateau, NW China Primary [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 104: 103532.

Mechanism Analysis and Treatment Measures for Inverted Arch Uplift in In-Service Tunnel

FAN Shengyuan^{1, 2, 3}, JIA Wurong^{1, 2}, XIE Jiangsheng^{1, 2}, TIAN Sisi^{1, 4},
SONG Zhanping^{2, 3}, LIU Bo^{1, 2}, LI Shuguang^{1, 2}

(1. Postdoctoral Workstation, China Railway 20th Bureau Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710016, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an Shaanxi 710055, China;

3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China;

4. China Railway Jianke Testing Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710016, China)

Abstract: To address the mechanism analysis and treatment of inverted arch uplift and track slab cracking in an

in-service tunnel, a combined approach of field structural disease characteristic analysis and laboratory tests was adopted to explore the disease mechanism of inverted arch uplift deformation and track slab cracking in an in-service tunnel of the Shanghai-Kunming Railway. According to the analysis of structural cracking characteristics and disease mechanism, integrated treatment measures of “grouting anchor pipe installation - bedrock grouting and removal - reconstruction of inverted arch structure” was proposed. These measures were adopted to guide the construction of the background project, and the evolution laws of the contact stress between the bedrock and the inverted arch was monitored and analyzed during the construction process. The results indicated that: the expansion deformation of bedrock upon water exposure was the main cause of local uplift of the inverted arch and other supporting structures, leading to increased internal forces, uneven deformation, and cracking; factors such as bedrock bearing capacity reduction, stress concentration induced by local high in-situ stress, and uneven stiffness and stress distribution in the invert arch structure further exacerbated the risk of non-coordinated deformation and cracking in the bedrock-invert arch system; the contact stress between the bedrock and the reconstructed inverted arch showed a phased evolution pattern, initially increasing slowly and then gradually converging to stability. The average contact stresses at three monitoring sections were 167.83, 169.51 and 165.82 kPa, respectively, which ensured the stability and safety of the tunnel structure. The treatment measures in combination with the disease mechanism analysis effectively prevented and controlled inverted arch uplift and structural cracking in the in-service tunnel. The research results provide a design scheme and engineering application reference for the treatment and prevention of similar engineering diseases.

Key words: In-service tunnel; Surrounding rock expansion; Inverted arch removal; Mechanism analysis; Disease treatment

(责任编辑 张 琪)