

穿越地层断裂带隧道大变形监测分析与病害处治措施研究

韩 喆¹, 张旭凯¹, 尚艳亮^{2,3}, SYLAJA Vinod Jayan^{2,3}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 石家庄铁路职业技术学院, 石家庄 050041;
3. 河北省高校桥隧智慧建造应用技术研发中心, 石家庄 050041)

摘 要: 为解决穿越地层断裂带隧道大变形控制问题, 依托穿越地层断裂带隧道工程开展现场长期数据监测, 深入分析了断层隧道破坏机理并提出针对性加固措施。结果表明: 穿越地层断裂带隧道围岩变形显著, 主要表现为初期变形速率大、变形持续时间长、变形破坏不均匀, 支护结构呈现早期变形快、二次衬砌变形持续不收敛等特征, 最终引发围岩大变形等病害。针对病害特点提出采用套拱和超前支护加固、拆除后重新支护并增强支护结构刚度、优化隧道断面结构、严格控制各工序施工步距、调整隧道变形预留量等优化方案, 通过对处治段监测分析表明实施效果良好。研究成果可为穿越地层断裂带隧道施工与安全控制提供借鉴。

关键词: 地层断裂带; 隧道; 大变形; 现场监测; 病害处治措施

中图分类号: U455 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0100-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.015

Research on Large Deformation Monitoring Analysis and Disease Treatment Measures of Tunnels Crossing Stratum Fault Zone

HAN Zhe¹, ZHANG Xukai¹, SHANG Yanliang^{2,3}, SYLAJA Vinod Jayan^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang 050041, China;
3. Province University Bridge and Tunnel Intelligent Construction Application Technology
Research and Development Center, Shijiazhuang 050041, China)

Abstract: To solve the problem of large deformation control of tunnels passing through fault zones in strata, this paper relies on the long-term data monitoring of tunnel projects passing through fault zones in strata, deeply analyzes the failure mechanism of fault tunnels and proposes targeted reinforcement measures. The results show that the deformation of the surrounding rock of the tunnel crossing stratum fault zone is obvious, which is mainly characterized by large initial deformation rate, long deformation duration and uneven deformation and failure. The supporting structure has the characteristics of fast early deformation and continuous non-convergence of secondary lining deformation. Eventually, it led to large deformation of surrounding rocks and other diseases. Based on the characteristics of tunnel diseases, it is proposed to use arch and advance support reinforcement,

项目来源: 河北省教育厅科学研究项目资助 (ZD2022027); 河北省建设科技研究指导性计划项目 (2021-2022)。

作者简介: 韩 喆 (2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 地下工程。

通信作者: 尚艳亮 (1980—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 地铁环境影响分析控制。

收稿日期: 2025-05-27

re-support after demolition, and implement optimization schemes such as enhancing the stiffness of the support structure, optimizing the tunnel section structure, strictly controlling the construction step of each process, and adjusting the tunnel deformation reserve. The monitoring analysis of the disposal section shows that the implementation effect is good. The research results can provide reference for the construction and safety control of tunnels passing through strata fault zones.

Key words: stratum fracture zone; tunnel; great deformation; on-site monitoring; disease control measures

0 引言

随着“一带一路”倡议等国家战略的深入推进,我国西部山区交通基础设施建设面临复杂地质环境的严峻挑战。滇西北地区作为青藏高原东南缘构造活动最强烈的区域之一,该程海断裂带(F3)具有全新世活动特征,其年均右旋走滑速率达 $2.3 \sim 3.1 \text{ mm}$,导致穿越该断裂带的隧道工程普遍遭遇围岩大变形、支护结构失效等重大工程问题^[1-2]。隧道穿越断层破碎带时,受碎裂岩体强度劣化、节理裂隙发育及地下水富集等工程地质特性影响,具有较大概率诱发围岩失稳塌方、突水突泥等工程事故,给施工造成重大损失^[3-4]。国内外学者围绕断裂带隧道变形机理、支护优化及智能监测技术展开了系统性研究。

在变形机理方面,Guo等^[5]采用有限元-离散元法和室内试验相结合的方法,确定了穿越断层带隧道开挖引起的岩体变形影响区域的规律,揭示了断裂带内岩体的破坏机制;Cao等^[6]通过现场调查分析,揭示了高地应力条件下隧道初期支护的变形特征及破坏机理,并提出了加强预支护等施工对策。监测结果表明,该措施有效抑制了隧道挤压破坏的发展;刘晓龙等^[7]依托清泉隧道对含断层偏压隧道洞口段围岩变形进行分析,研究发现,偏压效应下行洞开挖扰动导致围岩应力重分布,且断层破碎带进一步恶化,导致围岩变形严重;杨晓芳等^[8]以某高速公路深埋隧道跨断层破碎带为背景,通过对该断层破碎带内隧道围岩的地质追踪与变形监测数据分析,结果表明深埋隧道穿越断层构造带时,围岩大变形往往表现为“变形速度快、稳定时间长、下沉较位移更突出、双峰型间断累进式”的特征;Wang等^[9]结合五竹岭隧道研究围岩变形特征和应力分布,研究结果显示,断层破碎带会削弱围岩稳定性,坡角与断层宽度均对围岩稳定性产生显著影响。在支护技术优化方面,王永雷等^[10]以云南福宜高速公路阳宗隧道为背景,通过建立数值模型研究

不同开挖进尺和下台阶长度下隧道结构的响应规律,确定最佳施工参数;万飞等^[11]依托关角隧道,对断层破碎带隧道支护结构进行优化设计,提出了增强钢架刚度、设置临时横撑、边墙小导管注浆等一系列优化方案,并通过数值模拟与现场监测结果验证了改进措施的可行性;Huo等^[12]以大白驿隧道断层破碎带引起的大面积变形问题为基础,采用NPR锚索桁架耦合支护,有效控制围岩稳定性和收敛变形大小;Zheng等^[13]提出协同支护系统,包括喷射混凝土、钢拱架和锚杆能显著抵抗岩石位移,极大地提高了围岩的稳定性。在监测技术方面,针对传统方法测量隧道复杂地表结构存在监测点有限、测量周期长、精度低等局限性。Tan等^[14]提出一种利用3D激光扫描监测隧道交叉口的方法对隧道全断面的变形进行监测;陈绍恺等^[15]采用BOTDR分布式光纤感测技术对围岩变形进行监测。

穿越地层断裂带隧道力学响应机理较为复杂,现有研究对断层带隧道病害机理的探索仍显薄弱。以云南东马场1号隧道为工程背景,通过开展现场长期监测获取断裂带隧道大变形时空演化规律,并提供有效的处治措施,可为类似工程提供理论支撑和技术借鉴。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

东马场1号隧道坐落于云南省丽江市永胜县西侧,与程海相邻,为两车道分离式特长隧道。隧道右幅起止点桩号为K70+130~K75+335,全长5 205 m。隧道左幅起止点桩号为ZK70+180~ZK75+278,全长5 098 m,隧道最大埋深约为613 m。隧道位于构造剥蚀断块高中山地貌区域,其中程海断裂带与隧道在K72+164(左幅ZK72+150)位置相交,二者夹角为 41° 。此外,次生的永安压性断层(F5)在K75+600(左幅ZK75+580)处与线路相交,夹角为 70° ,距离隧道出口约270 m。隧道受程海断裂带(F3)影响较大,隧道与断层相对位置关系如图1所示。

岩土力学

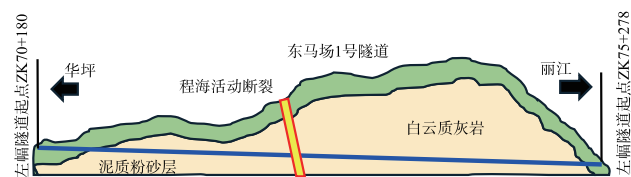


图 1 隧道走向示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the tunnel direction

东马场 1 号隧道原支护方案整体沿用“双初支+长短锚杆+预留 50 cm 补强空间”的设计思路，采用全长黏着摩擦型钢筋锚杆和 SFdbx-3 型衬砌，隧道主要支护参数见表 1。在隧道建设过程中，隧道受到活动断层的影响逐渐增大，支护结构开始出现大变形病害，主要表现为：隧道开挖后，初期支护出现较为严重的变形情况，具体表现为：拱顶区域出现明显下沉并伴有裂缝产生，边墙部位发生显著内移，喷射混凝土层普遍出现挤压裂纹、压碎乃至脱落的现象，而仰拱则有轻微的隆起迹象；同时，钢拱架发生明显的扭曲变形，呈“Z”或“S”形，如图 2 所示。为获得穿越断层隧道变形特征，采取有效的支护加固措施，需针对断层位置开展现场监测分析。

表 1 隧道主要支护设计参数
Table 1 Main support design parameters of tunnel

支护类型	设计参数
锚杆	25 mm 中空注浆锚杆 4 m，51 mm 自进式锚杆，6 m；间距 1.0 m×1.2 m
钢架	60 cm，双钢架（H175/I25b）
二次衬砌	70 cm 钢筋混凝土
预留变形量	50 cm

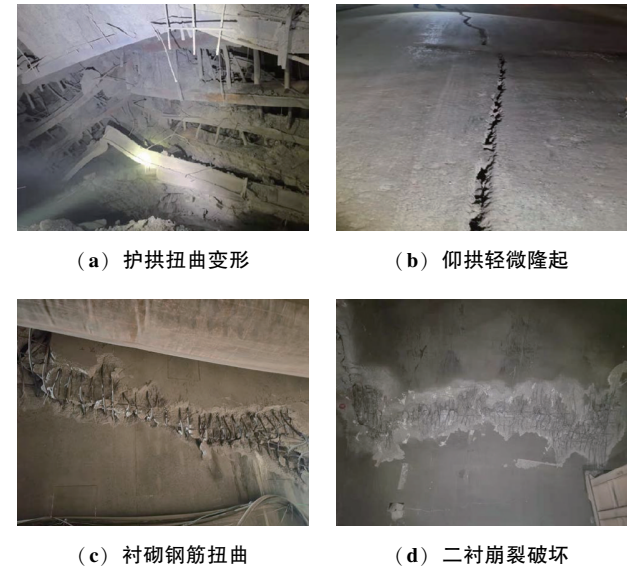


图 2 隧道病害类型
Fig. 2 Tunnel disease types

1.2 测点布置

通过现场调研对隧道沿线的位移监测数据进行统计分析，根据现场施工及围岩地质情况，选择了 5 个典型断面进行内力监测，包括左幅 ZK72+342 仰拱隆起段、ZK71+815 断面、右幅 K71+735 断面、K71+882 断面，以及出口 K72+998 断面。通过分析现场监测数据获得隧道沿轴线方向的整体变形规律以及支护结构的破坏特征，据此评价施工现场支护方案的可行性。隧道监测断面位置如图 3 所示。

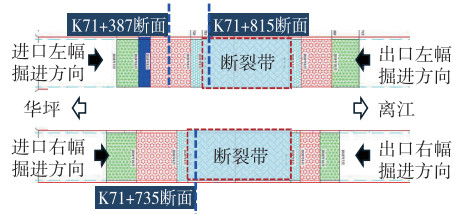


图 3 监测点位布置
Fig. 3 Monitoring point layout

2 隧道变形监测结果分析

2.1 穿越断层隧道沿线大变形特征分析

在穿越断层沿线隧道的拱顶与周边布置变形测点，编号分别为 B~E 和 G1~G3。将沿线隧道变形监测数据进行汇总，如图 4 所示。穿越断层隧道沿线变形分布情况具有如下特征：

隧道变形量较大。隧道大变形区段拱顶沉降均已超过 400 mm，趋于稳定的段落最大累计沉降变形量达到 541.7 mm。大变形段隧道洞壁收敛均大于 300 mm，最大收敛已达到 600.5 mm，远高于一般地段的隧道围岩变形。

变形破坏不均匀。其中隧道靠近山体一侧的变形更为显著。通过对不同断面以及同一断面上各部位的变形量进行分析可以发现，各断面的变形破坏程度存在明显差异。随着隧道洞身逐步靠近程海断层的影响区域，变形破坏的情况逐渐加剧。此外，左右幅的先行洞破坏程度相较于后行洞更为严重。在同一断面中，中上部的拱顶沉降与水平收敛变形通常大于下部。

隧道进出口的变形特征有所不同。进口处的变形以洞壁收敛为主，而出口处则以拱顶沉降为主。此外，进口位置的破坏主要集中在两侧拱腰区域，而出口位置的拱顶及两侧拱腰均发生变形破坏现象。

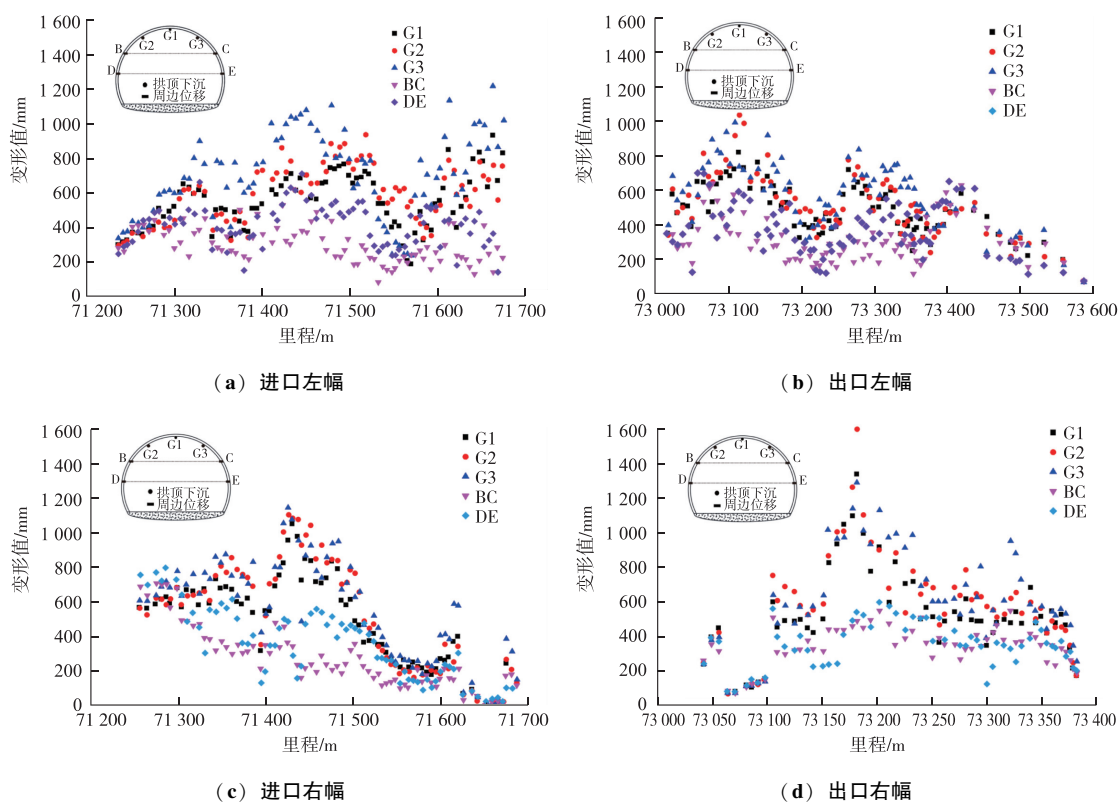


图4 穿越断层隧道沿线变形分布

Fig. 4 Deformation along the tunnel crossing fault

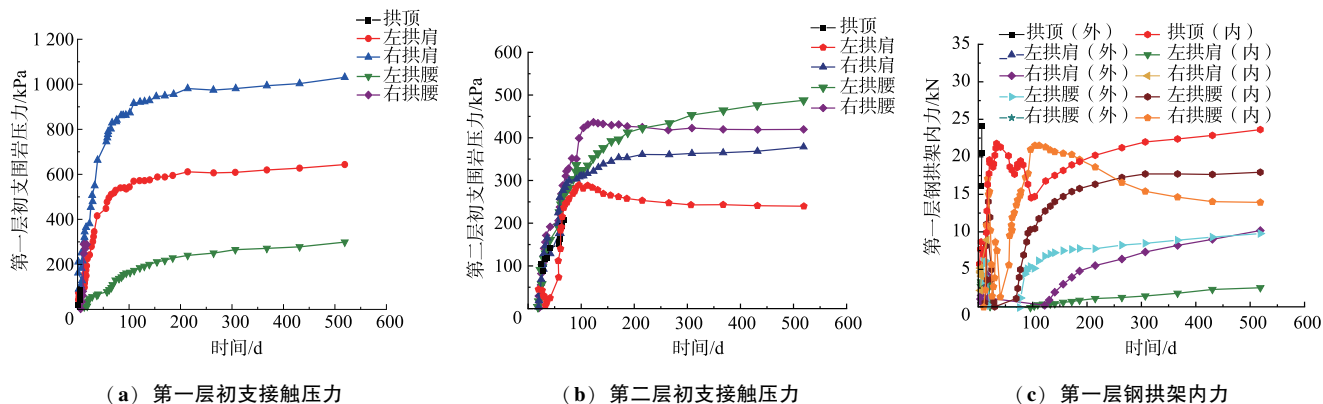
基于现场调研结果与数据统计分析可以看出,隧道变形总体呈现出越靠近活动断裂带围岩变形越大;其次隧道变形破坏不均匀,存在明显偏压现象。此外可以看出隧道进口位置的变形主要集中在拱腰处,而出口处的拱顶和拱腰部位均发生变形破坏。隧道拱顶沉降位移大于周边收敛,且中上部的水平收敛变形普遍大于中下部,左右幅隧道先行洞变形破坏情况比后行洞严重。

2.2 穿越断层隧道沿线支护结构受力特征分析

由于在隧道施工阶段布设的监测断面数量庞大,本次遴选出两个典型监测断面(如 ZK71+815 段及 K71+735 出口段)进行精细化对比研究,以揭示不同地质条件下病害发展规律。

2.2.1 ZK71+815 断面支护响应分析

ZK71+815 断面支护监测数据结果如图 5 所示。



岩土力学

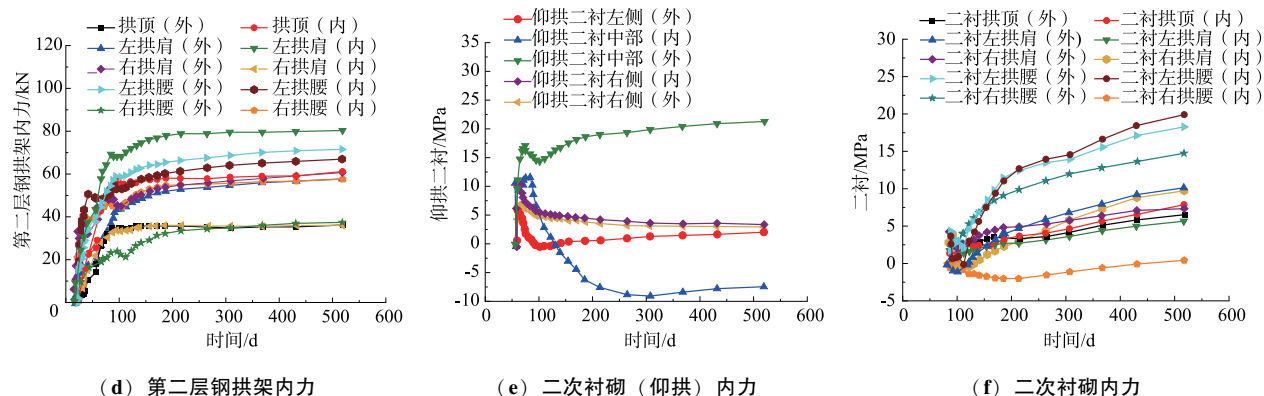


图 5 典型断面 (ZK71+815) 支护体系力学响应

Fig. 5 Mechanical response of supporting system of typical section (ZK71 + 815)

针对左幅进口泥岩段落的监测结果表明,在施工后约 150 d 内,初期支护第一层和第二层的围岩压力值及钢架结构内力均呈现渐进式稳定趋势。其中右拱肩区域表现出显著的应力集中现象,峰值压力达到 1.05 MPa,对应的钢拱架内力值为 80 kN (折算应力

为 20 MPa)。值得关注的是,二次衬砌与仰拱的围岩压力仍保持持续增长态势,尚未趋于稳定,监测数据显示二次衬砌已承受高达 20 MPa 的应力水平。

2.2.2 K71+735 断面支护响应分析

K71+735 断面支护响应监测结果如图 6 所示。

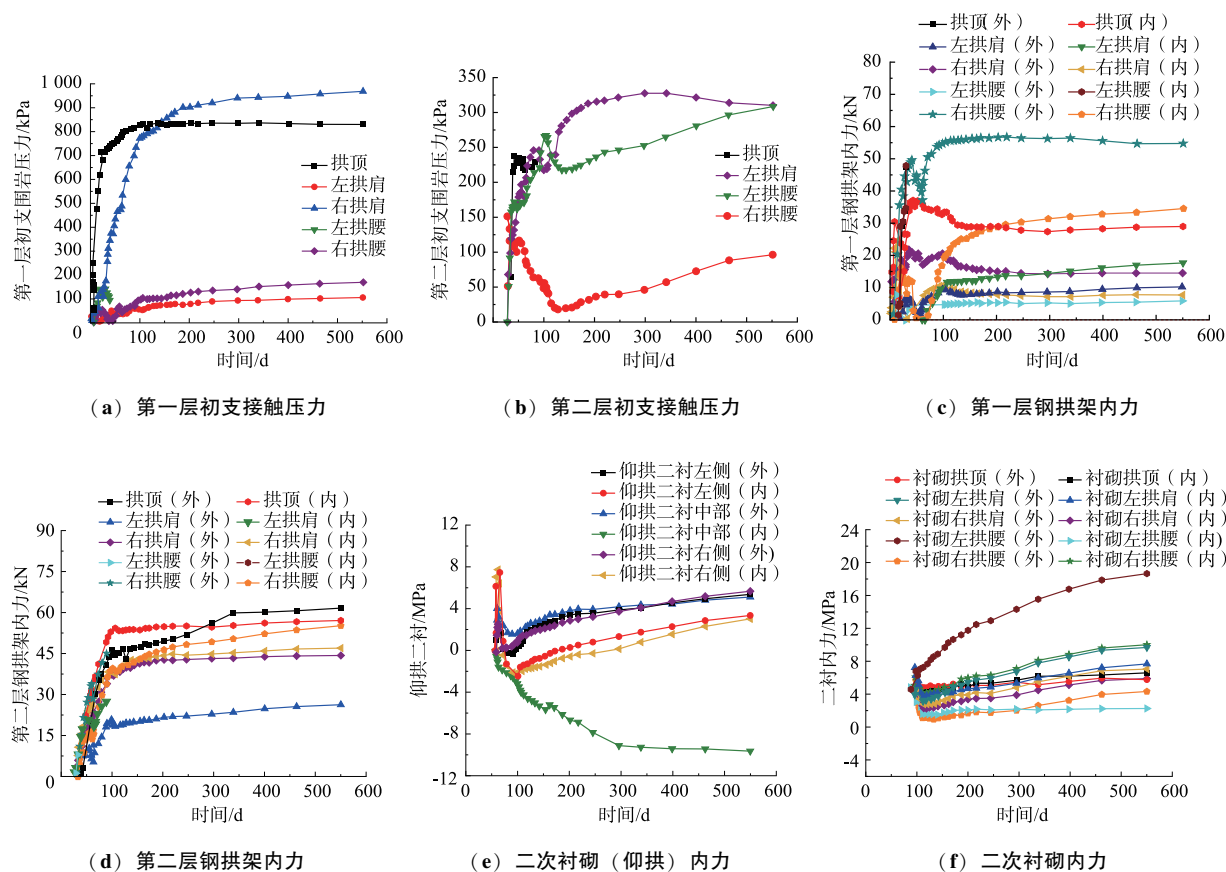


图 6 典型断面 (K71+735) 支护体系力学响应

Fig. 6 Mechanical response of supporting system of typical section (K71+735)

通过分析右幅进口泥岩断面, 第一层初支和第二层初支的围岩压力和钢拱架内力约在 150 d 后逐渐趋于稳定, 围岩压力最大约 0.95 MPa, 钢拱架内力约 60 kN (折算应力为 15 MPa)。二衬和仰拱处的围岩压力仍在持续增加, 二次衬砌的最大应力达到 17 MPa。仰拱开挖后, 两层初支之间的围岩压力降低, 第一层钢架的受力向第二层钢架转移且第一层初支未封闭成环, 此时仰拱处于薄弱环节。

2.3 断层带隧道大变形致灾机理分析

根据隧道监测变形及病害特征分析, 初步判断程海大断裂带引起的地质构造应力是导致隧道出现不稳定、无规律变形、破坏及拱顶下沉开裂的主要原因。现场隧道的地质状况以及支护结构变形破坏情况表明, 程海活动断裂带的实际影响范围已超出 2 km。断层核心区的最大埋深约 613 m, 岩体极其破碎, 处于高地应力状态。板岩段在高地应力作用下极易发生挤压性大变形, 具有变形量大、变形速率高、持续时间长、难以稳定等特点, 表现出明显的流变特性。因此, 衬砌裂损的主要原因是特殊复杂的高地应力环境。由于活动断裂带地层应力大, 早期支护结构变形快且无规律, 二衬施作完成后, 变形仍未停止。仰拱隆起主要是由于基底失稳破坏。二衬施工前, 初支没有完全稳定, 二衬施工后, 初支继续变形, 使仰拱两侧受挤压, 最终导致仰拱隆起。综上所述, 东马场 1 号隧道的大变形现象是由高地应力、软弱围岩、断层破碎带等综合因素共同作用的结果。

3 隧道支护加固措施与实施效果

3.1 断层带隧道支护加固措施

根据现场监测围岩、初支和二衬应力的实测数据, 对隧道原有支护设计进行了变更。鉴于原二次衬砌已经开裂, 基本丧失承载能力, 根据现场监控测量数据, 并结合以往隧道大变形施工经验, 需拆除并重新施作。针对断层带隧道衬砌开裂段, 具体措施包括: 在拆除原有的二次衬砌和初期支护前, 应先设置套拱并实施超前支护以加强加固效果。在拆除原有衬砌后, 重新进行支护作业, 并同步采取以下优化措施, 如增强支护结构刚度、改进隧道断面设计、严格把控各工序的施工步距、以及合理调

整隧道变形的预留量。

3.1.1 套拱加固

为保障施工安全性, 在开裂段设置内侧套拱, 以进行安全防护和临时加固。具体措施是使用 I18 型钢, 按照 1 榀/m 的间距在拱墙内侧架设临时套拱, 并通过 $\phi 22$ 钢筋对钢架间进行纵向连接。为避免裂损区域在扩拆过程中向两侧进一步扩展, 在保留区端头与扩拆段相邻处设置不少于 3 榀的 I20b 型钢架作为锁口, 其间距控制在 0.5 m。同时, 通过直径 22 mm 的钢筋对钢架进行纵向连接, 并喷射 C30 混凝土填充。

3.1.2 超前加固

二次衬砌拆除前, 在拱墙顶部 120° 范围内设置双层小导管, 第一层 $\phi 76 \times 6$ 中管棚, 钢花管长 9 m, 环向间距 40 cm, 上仰角 5°~12°, 第二层 $\phi 42 \times 4$ 小导管, 钢花管长 4.5 m, 环向间距 40 cm, 上仰角 20°~30°。注浆材料采用普通水泥单液浆, 水灰比为 1:1, 注浆过程采用定压控制方式, 初始注浆压力范围为 0.5~1.0 MPa, 终压为 1.5 MPa。当注浆压力达到设计终压后继续注浆 10 min 以上, 若单孔进浆量小于 20 L/min, 检查孔涌水量小于 0.2 L/min, 则停止单孔注浆。所有注浆孔均已符合单孔结束条件, 且无漏浆现象时, 需进一步验证注浆效果。具体要求为: 注浆段内的总涌水量不超过 $5 \text{ m}^3 / (\text{m} \cdot \text{d})$, 随后进行压水试验, 在 1.0 MPa 的压力条件下, 进水量应小于 $2 \text{ L} / (\text{m} \cdot \text{min})$, 方可结束循环注浆。

3.1.3 扩拆与施工步距控制

通过扩大开挖范围并加深仰拱, 隧道断面趋于圆形, 有助于合理分散衬砌周边不均匀荷载及侧向挤压, 减少结构受到的剪切力。扩拆施工期间, 应严格控制第一层支护、第二层支护、中上台阶长锚杆、仰拱以及二次衬砌等工序的施工步距, 防止因围岩变形导致支护结构失效。具体要求为: 上台阶步距不得超过 5 m, 中台阶步距控制在 7 m 以内, 仰拱至下台阶步距需维持在 15~20 m 范围内。

3.1.4 隧道预留变形量调整

扩拆施工前, 应对围岩的变形状况与地质条件进行分段统计分析, 并结合开裂段前期变形监测数据及围岩特性, 合理调整隧道开挖时的预留变形量。即在后续施工阶段, 将预留变形量严格控制在 50 cm

岩土力学

以内,同时预留 50 cm 的内部空间以满足补强需求。

3.2 实施效果分析

3.2.1 处置段隧道支护响应分析

选取部分处置段隧道监测分析支护措施实施效果,其中 ZK71+387 段隧道双层初期支护体系力学响应的实测数据如图 7 所示。

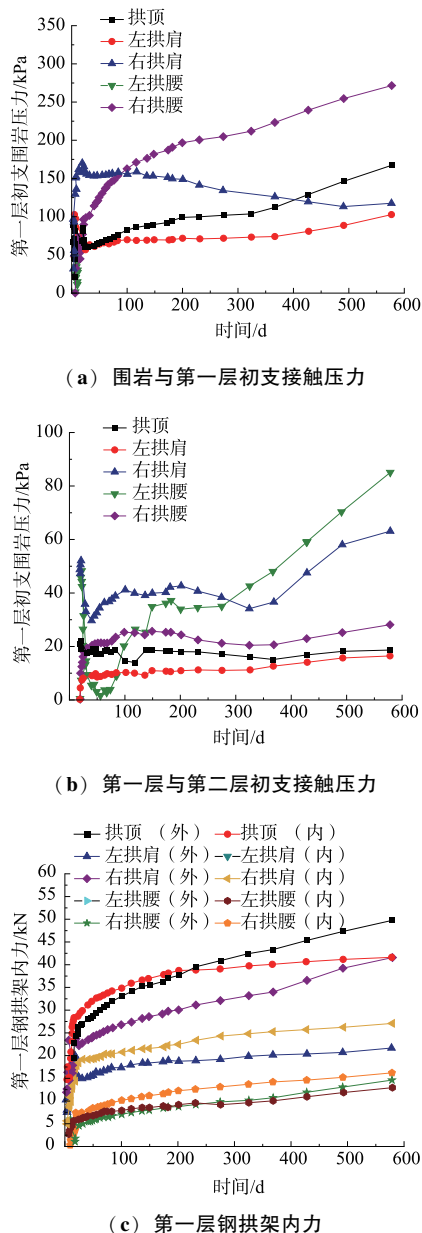


图 7 典型断面 (ZK71+387) 支护体系力学响应

Fig. 7 Mechanical response of supporting system of typical section (ZK71+387)

监测结果表明:隧道病害处治段采用双层初支后,围岩压力和钢拱架内力均相对较小,分别为

275 kPa 和 50 kN,第一层初支受力明显大于第二层初支。由于二衬未及时施作,300 d 后内力仍在缓慢持续增加,总体而言,采用双层初支后隧道变形基本可控,结构趋于稳定。

3.2.2 处置段隧道变形监测分析

ZK72+536 段隧道变形力学响应的实测数据如图 8 所示。通过对破坏段落的置换处治,初期支护变形得到明显控制,仰拱闭合后变形速率明显降低。仅按照 SFdbx-2 型衬砌置换上部结构、仰拱未处治的 K72+536 断面,平均变形速率为 2.1~2.3 mm/d,虽未达到规范要求施作二衬的条件,但现阶段已基本处于稳定。

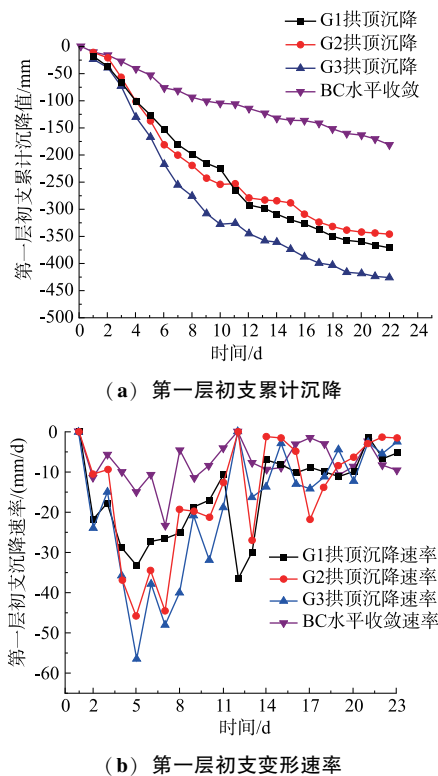


图 8 典型断面 (ZK72+536) 支护体系力学响应

Fig. 8 Mechanical response of supporting system of typical section (ZK72+536)

4 结论

通过现场监测与工程实践相结合分析了东马场 1 号隧道穿越程海断裂带时的大变形特征及支护结构力学响应规律,提出了针对断层破碎带隧道大变形病害的处置措施,得出主要结论如下:

(下转第 168 页)

研究与应用

济南: 山东建筑大学, 2023.

- [11] 王红亚, 滕佳颖. 吉林省建筑业碳排放测算及 LMDI 影响因素分析 [J]. 北方建筑, 2025, 10 (3): 23-28.
- [12] 张娜. 安徽省建筑业碳排放影响因素分析及预测研究 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2023.
- [13] 牛波, 段佳妮, 赛云秀, 等. 基于 LMDI 及 STIRPAT 模型的陕西省建筑业碳排放影响因素及情景预测研究 [J]. 节能, 2025, 44 (9): 109-113.

- [14] 张伟健, 季柳金, 杨恒亮, 等. STIRPAT 模型在探究江苏省建筑业碳排放影响因素中的应用 [J]. 绿色建造与智能建筑, 2026 (1): 11-14.
- [15] 邯郸市统计局, 国家统计局邯郸调查队. 邯郸统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2002-2022.
- [16] 张舒言, 陈国杰, 康洵, 等. 广东地区校园公共建筑墙体各因素对运行阶段碳排放量的敏感性分析 [J]. 南华大学学报 (自然科学版), 2025, 39 (5): 56-66.

(上接第 106 页)

(1) 断层带影响区隧道变形具有显著时空差异性特征。监测数据显示: 围岩变形呈现加速-缓变-再加速的三阶段演化规律, 最大拱顶沉降达 541.7 mm, 水平收敛突破 600.5 mm, 变形持续时间较长; 变形空间分布表现为距断层带越近变形量越大, 且呈现明显的非对称性。

(2) 断层带隧道支护体系荷载传递呈现动态重分布特性。双层初期支护系统承担了主要的围岩荷载, 其中第二层支护钢架内力峰值达 20 MPa, 既有支护体系存在结构性安全隐患。仰拱区域围岩压力持续发展至 1.6 MPa, 是导致断层带隧道支护失效的关键因素。

(3) 针对断层带隧道提出了支护加固措施, 采用套拱加固、超前加固及断面优化等改进方案, 通过对处置段变形监测判断隧道变形基本处于稳定阶段, 验证了改进加固措施的有效性。

参 考 文 献

- [1] 李智超, 吴中海, 卢海峰, 等. 程海断裂带期纳—宾川段晚新生代活动特征及其对川滇块体挤出的构造指示 [J]. 地质学报, 2025, 99 (9): 2908-2927.
- [2] 黄小龙, 吴中海, 刘锋, 等. 滇西北程海断裂带主要古地震滑坡及其分布特征的构造解释 [J]. 地学前缘, 2021, 28 (2): 125-139.
- [3] 唐锐, 李世琦, 王俊, 等. 富水断裂带隧道涌水突泥灾害机制及处治技术研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (4): 1264-1272, 1290.
- [4] 李辉. 客运专线铁路大断面隧道断层涌水、涌泥处治技术研究 [J]. 铁道标准设计, 2017, 61 (7): 131-136.
- [5] Guo Xiaoxiong, Wang Ning, Xu Xueliang, et al. Analysis of extent of

deformation range and failure characteristics of rocks surrounding a tunnel crossing fault zone based on FDEM [J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022: 9643584.

- [6] Cao Chengyong, Shi Chenghua, Lei Mingfeng, et al. Squeezing failure of tunnels: a case study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 77: 188-203.
- [7] 刘晓龙, 孙闯, 王慧, 等. 含断层偏压隧道围岩变形机理及支护方案优化 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36 (1): 108-118.
- [8] 杨晓芳, 李玉倩, 吴金刚. 某高速深埋隧道断层构造带围岩变形破坏分析与防控 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (6): 103-110, 118.
- [9] Wang Yingchao, Jing Hongwen, Su Haijian, et al. Effect of a fault fracture zone on the stability of tunnel-surrounding rock [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17 (6): 04016135.
- [10] 王永雷, 石宣, 张文接, 等. 穿越断层隧道留核心土开挖支护参数优化分析 [J]. 公路与汽运, 2024, 40 (6): 132-138.
- [11] 万飞, 谭忠盛, 马栋. 关角隧道 F2-1 断层破碎带支护结构优化设计 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (3): 531-538.
- [12] Huo Shusen, Tao Zhigang, He Manchao, et al. Deformation mechanism and NPR anchor cable truss coupling support in tunnel through fault fracture zone [J]. Journal of Mountain Science, 2025, 22 (1): 354-374.
- [13] Zheng Chengcheng, He Peng, Wang Gang, et al. Study on the instability of surrounding rock and optimization of support systems in fault-crossing tunnels [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2025, 84 (2): 71.
- [14] Tan Dongmei, Tao Yu, Ji Baifeng, et al. Full-section deformation monitoring of high-altitude fault tunnels based on three-dimensional laser scanning technology [J]. Sensors, 2024, 24 (8): 2499.
- [15] 陈绍恺, 蔡海兵, 姚方兴, 等. 断层破碎带隧道围岩变形监测技术及应用 [J]. 低温建筑技术, 2025, 47 (1): 105-109.