

断层破碎带隧道施工中围岩失稳特征与支护对策分析

李国庆

云南交投集团云岭建设有限公司云南云岭桥梁智能建造有限公司 云南 昆明 650100

【摘要】：断层破碎带地质条件下，隧道围岩结构破碎、力学性质弱化，施工过程中易出现多种失稳现象。围绕断层破碎带隧道施工特点，对围岩失稳的主要表现形式及其形成机理进行分析，重点探讨在地下水作用、地应力重分布及施工扰动对围岩稳定性的影响规律。在此基础上，结合围岩失稳特征提出针对性的支护对策，从超前加固、初期支护配置及动态控制等方面强化围岩整体稳定性，为断层破碎带隧道施工中的安全控制与支护设计提供参考。

【关键词】：断层破碎带；隧道施工；围岩失稳；支护对策

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.023

引言

断层破碎带常伴随岩体破碎程度高、节理裂隙发育及力学性质弱化等特征，使隧道施工环境呈现出高度不确定性。开挖过程中，应力释放与结构扰动相互叠加，围岩稳定状态迅速发生变化，失稳现象往往具有突发性和连锁性，给施工组织与安全控制带来较大压力。本文以会巧高速项目的韩家湾隧道为依托。不同类型失稳在空间分布和演化过程上存在明显差异，若缺乏系统认识，支护措施易出现针对性不足的问题。围绕围岩失稳特征展开分析，并据此构建合理的支护思路，有助于实现施工过程中的稳定控制与风险降低，为断层破碎带隧道施工提供清晰的技术路径。

1 断层破碎带围岩结构与力学特性分析

断层破碎带内围岩结构具有显著的非均质性和复杂性，受区域构造运动长期影响，岩体原有结构被强烈切割，节理、裂隙及断层泥大量发育，岩块尺度减小，整体性明显削弱。围岩内部常呈现碎裂岩、碎裂夹泥或断层角砾等结构形态，不同部位结构差异较大，空间连续性差，使围岩在受力过程中难以形成有效的自承体系。岩体结构面的组合关系复杂，结构面间填充物强度低、压缩性大，成为控制围岩变形和破坏的关键因素。从力学特性角度分析，断层破碎带围岩普遍表现出强度低、变形模量小及塑性特征明显等特征。围岩在初始地应力条件下已处于临界稳定状态，隧道开挖后应力重新分布，局部应力集中迅速放大岩体原有缺陷的影响。剪切强度参数中黏聚力与内摩擦角显著降低，抗剪能力不足，导致围岩在较小扰动下即产生明显变形。围岩在受压过程中易发生剪胀与挤压破坏，变形具有持续性和不可逆性。

受地下水条件影响，断层破碎带围岩力学性质表现出明显弱化趋势。裂隙与断层构造发育程度高，使地下水在围岩内部形成较为畅通的渗流通道，水体易在破碎带内富集并长期作用于岩体结构。软弱填充物在水作用下发生软化与崩解，颗粒间胶结力明显降低，岩体整体抗压与抗剪性能随之下降。孔隙水压力的持续存在改变了围岩有效应力状态，使结构面间摩擦阻力减小，围岩承载体系稳定性进一步削弱，变形发展呈现加速

特征。水岩相互作用还会促使围岩破坏形式由表层向深部扩展。渗流压力沿裂隙向围岩内部传递，导致局部区域应力重新分配，原有潜在破坏面逐步贯通^[1]。围岩在长期水作用下产生渐进性损伤，破坏范围不断扩大，使失稳具有明显的累积效应。在隧道施工阶段，该类隐蔽性弱化现象易被低估，一旦与开挖扰动叠加，围岩稳定状态迅速恶化。

2 隧道开挖过程中围岩失稳表现形式

隧道开挖进入断层破碎带后，围岩原有应力平衡被迅速打破，失稳现象呈现出多样化和阶段性特征。开挖初期，围岩暴露面完整性不足，节理裂隙迅速张开，围岩自稳能力显著下降，拱顶及侧墙部位易出现松动岩块脱落现象。受重力与结构面控制，掉块多沿裂隙发育方向发生，局部区域可形成空腔，进一步削弱围岩承载体系，对后续支护施加不利影响。开挖断面持续推进后，应力重新分布范围逐步扩大，围岩变形由局部松动向整体失稳转化。断层破碎带内岩体强度低、变形协调性差，拱顶下沉与周边收敛现象明显，围岩塑性区迅速扩展，形成连续变形带。

在断层泥及软弱夹层分布较为集中的区段，围岩结构完整性进一步削弱，失稳形式呈现出更强的复杂性和多样性。软弱夹层力学性质差，抗剪强度低，在围岩应力调整过程中易成为变形集中的主要部位。受剪切应力持续作用，围岩沿弱面发生滑移，侧墙岩体向洞内挤压变形，底板承受附加应力后出现明显隆起，断面几何形态发生改变^[2]。局部区域在应力集中影响下逐渐形成剪切破坏带，破坏带一旦贯通，围岩整体承载能力显著下降，对隧道断面稳定性产生不利影响，同时加剧支护结构受力分布的不均衡性。

地下水条件参与作用时，围岩失稳演化过程明显加快。水体沿裂隙及断层泥层渗入围岩内部，削弱结构面之间的黏结力，使抗剪强度持续衰减，软化范围向周边扩展。围岩变形由原有干态条件下的缓慢积累转变为短时间内快速增长，变形发展呈现突增特征。拱顶渗水区域围岩强度下降明显，易发生片状剥落与局部塌落，围岩整体稳定状态不断削弱。孔隙水压力叠加地应力作用，可能引发围岩沿断层带方向的整体滑移，使

破坏范围呈带状扩展，失稳过程表现出明显的连锁反应。

3 围岩失稳形成机理与影响因素

断层破碎带隧道围岩失稳的形成机理源于地质结构、应力环境与施工扰动的共同作用。该类围岩在天然状态下已长期处于多期构造活动叠加影响之中，岩体内部结构面密集且走向复杂，岩块间接触条件差，力学参数离散性显著。隧道开挖使原有地应力场发生快速调整，围岩卸荷区与应力集中区交替分布，结构面受力状态发生突变，剪切滑移与拉张破坏相互耦合，破坏范围由局部迅速向周边扩展，成为失稳演化的内在基础。

围岩物质组成及结构特征对失稳机理具有决定性影响。断层泥、碎裂岩及弱胶结岩体广泛分布，使围岩抗压强度与抗剪强度显著降低，承载能力不足以抵抗开挖引起的应力重分布。结构面填充物多呈塑性特征，在压缩与剪切作用下易产生蠕变变形，导致围岩长期变形难以收敛。结构面组合方式不利时，围岩内部形成多条潜在滑移通道，失稳过程呈现出逐级扩展的特征。原岩应力状态及其空间分布是影响围岩失稳的重要因素^[3]。高地应力区内，隧道开挖后围岩弹塑性转化过程明显，应力集中效应促使围岩快速进入屈服状态。断层破碎带内应力释放不均，局部区域形成应力集中核，诱发围岩剪切破坏与挤压变形。

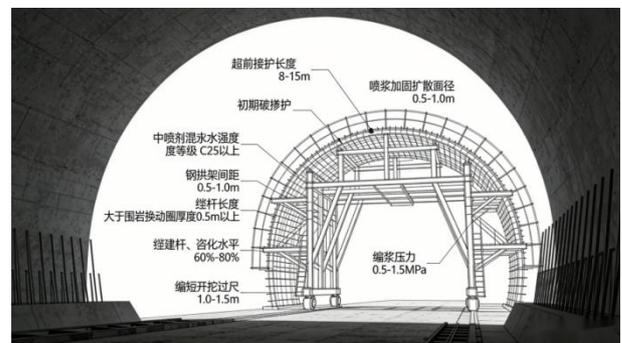
地下水作用在失稳机理中起到放大效应。水体沿裂隙与断层带渗流，削弱结构面间的有效黏结力，降低摩擦阻力，促使岩体强度持续衰减。孔隙水压力改变围岩有效应力状态，加剧围岩变形发展，软弱夹层在水作用下更易发生滑移破坏，失稳范围沿水流通道延伸。施工因素对围岩失稳的触发具有直接影响。开挖方法、进尺控制及支护时机改变了围岩应力释放速率与变形发展节奏。扰动强度过大或支护滞后，易导致围岩在短时间内积累过量变形，破坏原有结构平衡，使失稳由可控状态转化为失控状态。

4 基于失稳特征的支护对策与实施要点

针对断层破碎带隧道围岩失稳形式复杂、演化迅速的特点，支护对策需紧密围绕围岩结构特征与变形规律进行系统布置。支护思路强调提前控制围岩松动范围，通过增强围岩整体性与承载能力，减缓应力重分布引起的变形集中。围岩完整性较差区域宜采用超前预支护、同时严格控制开挖掘数、快速封闭成环、使围岩弹塑性变形处于受控状态。尽早封闭掌子面、减少在空气中的暴露时间，先探后支、采用三台阶法或者环形开挖法，超前支护双层小导管进行预注浆、系统锚杆支护长度控制在8~15m范围内、使其穿过松动圈加固围岩，注浆加固扩散半径达到0.5~1.0m，采用注浆压力先小后大、先稀后浓、间歇式注浆的形式、形成承载拱措施来提高拱圈围岩的整体稳定性；同时仰拱与二衬混凝土紧跟其后、控制后掌子面与仰拱及二衬混凝土间的距离。

初期支护在断层破碎带内应突出快速封闭成环和整体受力特征。施工过程中，需严格把控各支护工序的施工质量与时间节点：喷射混凝土应采用湿喷工艺，施工前需对岩面进行清理，去除松动岩块与杂物，喷射时采用分层喷射方式，第一层喷射厚度控制在4~6cm，待初凝后再进行后续喷射，确保混凝土与岩面紧密黏结；钢拱架安装前需进行精准放样，采用机械吊装就位，调整垂直度与间距偏差至规范允许范围后，及时采用连接板与螺栓固定，必要时增设锁脚锚杆加固，防止钢拱架下沉或偏移；系统锚杆施工需保证钻孔深度符合设计要求，钻孔完成后进行清孔处理，注浆时采用压力注浆方式，确保浆液饱满，注浆完成后及时安装锚杆，待浆液达到设计强度后再进行后续工序。喷射混凝土厚度需根据围岩级别适当提高，强度等级宜选用C25以上，以保证早期承载能力。钢拱架与系统锚杆协同工作，可有效限制围岩径向变形，钢拱架间距一般控制在0.5~1.0m范围内，锚杆长度宜大于围岩松动圈厚度0.5m以上，使支护结构深入稳定岩体^[4]。锚杆拉应力水平宜保持在设计值的60%~80%，通过主动加固方式改善围岩受力状态。针对拱顶下沉和周边收敛显著的失稳特征，支护参数需具备较强的适应性。支护结构刚度与柔性应合理匹配，避免因刚度不足导致变形失控，也防止过度刚性引起应力集中。

地下水条件复杂区域需同步考虑防排水措施与支护体系的协调。施工中应遵循“先排水、后支护”的原则，优先实施排水工程：对于浅层渗水，可在拱顶及侧墙设置导水管引流，导水管间距根据渗水量调整，一般控制在1.5~2.0m；对于深层富水区域，需采用超前探水孔探明水源分布，再设置排水孔进行降压排水，排水孔深度应穿透含水层，确保排水效果。围岩加固注浆宜采用水泥基或复合浆材，提高抗水软化能力，注浆压力控制在0.5~1.5MPa范围内，以保证浆液有效充填裂隙而不引起新的扰动。注浆施工需严格按照“先外围、后内部，先上游、后下游”的顺序进行，注浆过程中实时监测注浆压力与浆液注入量，根据监测数据调整注浆参数，避免出现漏浆、串浆现象；注浆完成后需进行效果检测，采用钻孔取芯或声波测试等方式，确保加固后的围岩完整性与强度符合设计要求。排水系统布置应降低孔隙水压力，减小水力作用对围岩强度的不利影响，使支护结构受力状态更加稳定。



5 支护效果控制与围岩稳定性综合评价

断层破碎带隧道支护效果控制需建立在对围岩变形与受力状态持续掌握的基础上,通过定量指标对支护体系工作性能进行综合评价。围岩稳定性判定重点关注变形发展趋势、变形速率及支护结构受力响应三方面内容。拱顶沉降和周边收敛作为反映围岩整体变形的关键指标,其变化幅度和增长速率能够直接体现支护约束效果。在支护发挥作用后,围岩变形速率应呈现明显衰减特征,累计变形逐步趋于稳定,表明围岩—支护体系进入协调受力阶段。

围岩稳定性评价过程中,时间效应具有重要意义。断层破碎带围岩常表现出显著的延时变形特征,短期内变形趋缓并不代表长期稳定。通过对监测数据进行阶段性分析,可识别围岩变形由快速发展向缓慢增长的转变节点,为支护效果判断提供依据。若在较长时间内变形速率维持在较低水平,支护结构内力变化趋于平稳,说明支护体系已有效承担围岩荷载,实现稳定控制。支护结构自身工作状态是综合评价的重要组成部分^[5]。喷射混凝土应力分布与裂缝发展情况反映其承载与变形协调能力,钢拱架轴力和弯矩变化揭示支护受力合理性。锚杆内力衰减规律能够体现锚固段与围岩之间的协同作用效果。

参考文献:

- [1] 朱辉,严松宏,何宁澄,等.断层破碎带铁路隧道近接下穿地铁隧道施工稳定性分析[J].铁道建筑,2025,65(11):125-130.
- [2] 叶四桥,孙明军,曾彬.断层走向对穿越断层破碎带水平层状围岩隧道施工稳定性影响研究[J].中国煤炭地质,2025,37(08):41-48.
- [3] 肖时辉,曹雄,李伟鹏,等.断层破碎带围岩工程特性及隧道施工影响研究[J].地下空间与工程学报,2025,21(03):1038-1049.
- [4] 王鹏硕.断层破碎带 TBM 隧道施工关键技术研究[D].石家庄铁道大学,2025.
- [5] 王松.深埋隧道穿越富水断层破碎带围岩失稳力学判据及稳定性研究[D].辽宁工程技术大学,2023.

围岩稳定性综合评价还需结合围岩破坏范围变化进行判断。通过开挖面及围岩表观状况观察,可判断松动圈扩展趋势是否得到有效控制。围岩剥落、掉块现象明显减少,断面轮廓保持稳定,说明支护对围岩结构具有良好的约束作用。对比不同施工阶段的围岩状态,有助于评估支护措施对失稳演化的抑制能力。在复杂地质条件下,支护效果控制强调动态调整机制。依据监测与评价结果,对支护厚度、加固范围及施工参数进行适应性修正,使支护体系始终与围岩稳定需求相协调。通过多指标综合分析,围岩稳定性评价由单一变形控制转向整体受力与变形协调控制,为断层破碎带隧道施工安全提供可靠保障。

6 结语

断层破碎带隧道施工中,围岩结构破碎、力学性质弱化与施工扰动相互叠加,失稳问题呈现出多类型、全过程发展的特征。围绕围岩失稳表现与形成机理展开分析,并将其作为支护方案制定的重要依据,有助于实现围岩变形的有效约束与支护结构受力的合理分配。通过支护参数优化、施工工序协调及监控量测反馈控制,围岩与支护体系逐步形成稳定协同关系,为复杂地质条件下隧道施工安全提供可靠技术支撑。