

全风化断层破碎带隧道施工技术探讨

黄华龙

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ME.2025040021

摘 要： 全风化断层破碎带因地质条件复杂、稳定性差，成为隧道施工中的重难点区域。本文结合工程实践，分析全风化断层破碎带的地质特征及施工风险，从超前地质预报、支护体系优化、开挖工法选择、防排水技术等方面探讨关键施工技术，并通过具体工程案例验证技术应用效果，为类似工程提供参考。

关 键 词： 全风化断层；破碎带；隧道施工；超前预报；支护技术；开挖工法

Discussion on Tunnel Construction Technology in Fully Weathered Fault Fracture Zone

Huang Hualong

Zhejiang Jiaotong Hongtu Transportation Construction Co., LTD., HangZhou, Zhejiang 311305

Abstract： The fully weathered fault zone, due to its complex geological conditions and poor stability, has become a key and difficult area in tunnel construction. This paper, based on engineering practice, analyzes the geological characteristics and construction risks of the fully weathered fault zone. It discusses key construction techniques from aspects such as advanced geological prediction, optimization of support systems, selection of excavation methods, and waterproofing and drainage technologies. The application effects of these techniques are verified through specific engineering cases to provide references for similar projects.

Keywords： fully weathered fault; broken zone; tunnel construction; advance forecast; support technology; excavation method

前言

随着我国交通基础设施建设的快速发展，隧道工程穿越复杂地质区域的情况日益增多，其中全风化断层破碎带是典型的高风险地质段。全风化断层破碎带由断层活动形成，岩体风化程度高、结构松散，多呈碎裂状或土状，且常伴随地下水富集，施工中易出现坍塌、突水突泥、掌子面失稳等问题，严重影响施工安全与进度。例如，某高速公路隧道穿越 F12 全风化断层时，因初期支护强度不足，发生掌子面坍塌，造成工期延误 3 个月，经济损失超千万元。因此，研究全风化断层破碎带的施工技术，对保障隧道施工安全、提高工程质量具有重要现实意义。本文基于多项工程实践，系统探讨该类地质条件下的施工技术路径与应用要点。

一、全风化断层破碎带的地质特征与施工风险

全风化断层破碎带的地质特性直接决定了施工难度与风险类型，准确把握其特征是制定施工方案的前提。

（一）地质特征

岩体结构松散：断层活动导致原岩完整性被破坏，加之长期风化作用，岩体多呈碎块状、粉末状或泥质状态，无明显整体性。如某铁路隧道穿越的全风化花岗岩断层带，岩体风化程度达 V 级，核心区域呈“砂泥互层”状，手捏即碎，天然含水率达 25%~30%。

富水性强且水压不稳定：断层带常作为地下水的运移通道和储水空间，受大气降水、周边水体补给影响，水压和水量波动

大。例如，某水利隧道 F5 断层带施工中，突水流量最高达 80m³/h，水压达 1.2MPa，导致掌子面被淹没。^[1]

力学性能差：全风化岩体抗压强度低，一般小于 5MPa，黏聚力不足 10kPa，内摩擦角多在 15°~20° 之间，易发生变形坍塌。某城市地铁隧道穿越全风化砂岩断层时，初期支护完成后 24 小时内，拱顶沉降量达 120mm，远超规范限值。

（二）主要施工风险

坍塌风险：掌子面岩体松散，开挖后失去约束，易发生突发性坍塌。如某公路隧道 K12+350 段全风化断层施工中，采用台阶法开挖时，上台阶左侧拱腰突然坍塌，形成直径约 5m 的空洞，造成 2 名施工人员受伤。

突水突泥风险：断层带内高压地下水携带泥砂、碎石突然涌

出，破坏施工环境。某水电站引水隧道穿越全风化灰岩断层时，发生突泥事故，涌出量达3000m³，堵塞隧道30余米。

支护结构失效风险：岩体变形量大且持续时间长，易导致初期支护开裂、钢拱架变形，甚至引发二次坍塌。某铁路隧道在全风化断层段施工中，初期支护采用I20钢拱架，因变形过大，30%的钢拱架出现扭曲，不得不进行拆换。

工期延误风险：复杂地质条件下，施工方案需频繁调整，加之处理突发事件，易导致工期滞后。据统计，穿越全风化断层破碎带的隧道，平均工期比原计划延长20%~30%。

二、全风化断层破碎带隧道施工关键技术

针对全风化断层破碎带的地质特征与风险，需从超前预报、支护体系、开挖工法、防排水等方面制定针对性技术措施。这些技术并非孤立存在，而是通过“探测—支护—开挖—防护”的闭环协同，形成动态适配的施工技术体系，实现对复杂地质条件的主动管控。

（一）超前地质预报技术

超前地质预报是规避施工风险的“先行官”，通过探测掌子面前方地质条件，为施工方案调整提供依据。全风化断层破碎带的隐蔽性和多变性要求预报技术必须具备“高精度、多维度、实时化”特征，形成“宏观探测—微观验证—动态反馈”的三级预报体系。

综合物探技术：结合地质雷达、地震波反射法、红外探水等技术，实现多参数联动探测。地质雷达通过电磁波反射特性识别岩体含水率差异，适用于5~10m范围内富水区域探测，其分辨率可达0.5m，如某高速公路隧道采用250MHz天线的地质雷达，清晰识别出掌子面前方5m处的“泥质透镜体”富水区，为注浆范围划定提供精准坐标；地震波反射法则通过纵波速度差异判断岩体完整性，某铁路隧道采用三维地震波探测，将断层破碎带横向宽度从初步勘察的15m修正为20m，避免了因范围低估导致的支护不足。两种技术的组合应用可实现“空间定位+性质判断”的双重目标，某工程数据显示，综合物探的预报准确率比单一技术提高40%。^[2]

超前钻探技术：采用水平钻探验证物探结果，明确岩体性质、含水率及水压。全风化断层带钻探需解决“孔壁坍塌”和“水压突涌”两大难题，某铁路隧道采用“跟管钻进”技术，即钻杆外套Φ108mm套管，钻进至预定深度后保留套管防止塌孔，每循环布设5个扇形钻孔（顶角分别为0°、±10°、±20°），钻探深度达10m，通过岩芯采取率（全风化段岩芯采取率仅30%~40%）和孔内渗水量测定，准确判定掌子面前方6m处存在水压1.2MPa的富水层，随即采取前进式分段注浆，单孔注浆量达8m³，成功将涌水量控制在5m³/h以下。对于高压富水段，还可采用“测压管”技术，在钻孔内埋设带压力表的钢管，实时监测水压变化，某水利隧道通过测压管发现水压2小时内从0.8MPa升至1.5MPa，及时启动应急堵水措施。

（二）支护体系优化技术

全风化断层破碎带的支护需遵循“强支护、早封闭、勤量测”原则，确保围岩与支护结构协同受力。支护体系的设计不仅要满足强度要求，更要具备“可调节性”和“快速施工性”，以适应岩体的动态变形特征。^[3]

初期支护强化：采用“喷射混凝土+钢拱架+锚杆+钢筋网”复合支护体系，提高支护刚度。针对全风化岩体的低强度特性，喷射混凝土需采用“早强型”配合比，某隧道使用C25喷射混凝土（掺加3%速凝剂），2小时强度达5MPa，厚度增至35cm（常规段仅25cm），并采用“分层喷射”工艺（每层厚度不超过10cm），防止因自重脱落；钢拱架选用I22b型（常规段用I18），间距加密至50cm，拱架连接采用“双螺栓+连接板”刚性节点，节点处设置Φ25加劲肋，某铁路隧道通过有限元分析显示，该节点形式可使拱架整体刚度提高25%；锚杆采用Φ25中空注浆锚杆，长度达4.5m（深入稳定岩层不小于1.5m），采用“梅花形”布置（间距80cm×80cm），注浆材料选用水泥—水玻璃双液浆，注浆压力1.5~2MPa，通过锚杆体中空通道将浆液注入岩体，既提高锚杆锚固力（单根锚杆抗拔力达150kN），又能胶结松散岩体。某工程实践表明，该复合支护体系可使围岩变形量减少50%以上。

超前支护技术：在开挖前对掌子面前方围岩进行预加固，常用措施包括管棚、小导管注浆等。对于断层宽度大于10m的区域，采用“大管棚”超前支护，某公路隧道F8断层段（宽度25m）采用Φ108mm热轧无缝钢管（壁厚6mm），长度30m，环向间距40cm，通过“导向墙+水平钻机”施工，管棚插入角1°~2°，每根管棚内设置Φ20钢筋笼增强刚度，管棚注浆采用水泥浆（水灰比1:1），注浆压力2~2.5MPa，形成“刚性棚架”保护开挖面；对于短距离断层段，采用Φ42mm小导管（长度5m），前端制成锥形，管壁钻设Φ8mm注浆孔，按15°外插角打入岩体，注浆材料选用水泥—水玻璃双液浆（凝胶时间控制在30~60s），某铁路隧道通过“管棚+小导管”双层超前支护，使开挖面稳定时间从12小时延长至72小时，为后续支护赢得充足时间。^[4]

（三）开挖工法选择

开挖工法需根据围岩稳定性、断面大小等因素确定，核心是减少对围岩的扰动。全风化断层破碎带的开挖需遵循“短进尺、快循环、强支护”原则，通过“分区分段”开挖控制围岩暴露面积和时间。

CRD工法（交叉中隔壁法）：适用于断面较大、围岩极不稳定的情况，将隧道分为4个小导洞分步开挖，及时封闭成环。某城市地铁区间隧道（断面面积120m²）穿越全风化断层时，采用CRD工法将断面分为左上、右上、左下、右下4个导洞，每个导洞开挖尺寸3m×3.5m，循环进尺严格控制在0.5m，开挖后立即施作初期支护（从喷混凝土到钢拱架安装不超过2小时），各导洞开挖间隔保持3~5m，形成“逐段封闭”的施工节奏。为减少导洞间的相互影响，导洞开挖顺序遵循“先上后下、先左后右”原则，相邻导洞掌子面错开2倍洞径距离。该工法虽工序复杂（单循环需8小时），但能有效控制拱顶沉降，某工程数据显示，CRD工

法施工的断层段最大沉降量仅 35mm，远低于台阶法的 120mm。

双侧壁导坑法：通过两侧导洞先行开挖并支护，形成“抗滑墩”效应，再开挖中洞。某水电站隧道（跨度 15m）在全风化砂岩断层段采用该工法，两侧导洞尺寸为 4m×5m（宽×高），导洞开挖后立即施作 30cm 厚初期支护和临时中隔壁（I18 钢拱架+20cm 喷混凝土），左侧导洞超前右侧导洞 5m，中洞开挖滞后侧壁导洞 10m，中洞开挖时保留核心土（高度 2m），分 3 层开挖至设计底高程。该工法的优势在于利用侧壁导洞支护抵抗侧向压力，某监测数据显示，侧壁导洞完成后，中洞开挖引起的水平收敛量减少 70%。对于富水段，侧壁导洞还可作为排水通道，某隧道通过左侧导洞设置集水井，日排水量达 150m³，有效降低了中洞施工的涌水风险。^[5]

（四）防排水技术

全风化断层破碎带的防排水需坚持“堵排结合、以堵为主”，减少地下水对围岩和支护结构的影响。防排水系统需形成“超前堵水—系统排水—结构防水”的三道防线，实现对地下水的“源头控制、过程疏导、最终阻隔”。

超前注浆堵水：通过注浆填充岩体孔隙，形成止水帷幕。根据断层带岩体特性选择注浆材料：对于颗粒较粗的碎块状岩体，采用水泥单液浆（水灰比 1:1~1:1.5），利用水泥颗粒填充孔隙；对于泥质含量高的岩体，采用水泥—水玻璃双液浆（水泥与水玻璃体积比 1:0.5），通过快速凝胶（30~120s）控制浆液扩散范围。某铁路隧道在富水全风化断层段采用“前进式分段注浆”工艺，将 10m 长注浆段分为 3 段，每段注浆完成后扫孔验证，注浆压力逐步升高至 2~3MPa，单孔注浆量达 12m³，注浆后通过压水试验显示，岩体渗透系数从 10⁻³ cm/s 降至 10⁻⁶ cm/s 以下，掌子面涌水量从 50m³/h 减少至 5m³/h。对于特大涌水段，还可采用“冻结

法”，通过管棚循环注入液氮，将围岩冻结成 -10℃ 的冻土帷幕，某隧道采用该技术形成厚度 3m 的冻结壁，成功抵御了 80m³/h 的涌水。

系统排水措施：设置环向、纵向排水盲管及排水沟，将渗水引至隧道中心水沟。环向排水盲管采用 Φ100mm 透水土工布包裹的 PVC 管，每 10m 设置一道，通过预埋在喷射混凝土内的 Φ50mm 支管连接至纵向盲管；纵向排水盲管沿隧道两侧边墙布设，采用 Φ150mm 双壁波纹管（透水率 5×10⁻³ m/s），坡度与隧道坡度一致（不小于 3‰）；中心水沟宽度 50cm、深度 60cm，采用 C20 混凝土浇筑，沟底设置 Φ10mm 钢筋网防止冲刷。某地铁隧道在全风化断层段还设置了“集水井”，每隔 50m 设置一座（深度 1.5m），配备 2 台功率 5.5kW 的潜水泵（一用一备），确保日排水量达 200m³ 时不影响施工。排水系统需定期清理，某工程因泥砂淤积导致排水能力下降 30%，通过高压水枪冲洗和人工清淤恢复了排水功能。^[6]

三、结语

全风化断层破碎带隧道施工是一项系统性工程，需充分认识其地质特征与风险，通过超前地质预报掌握围岩状态，优化支护体系与开挖工法，强化防排水措施，实现“安全、高效、优质”施工。随着技术的不断创新，无人机探测、智能支护、数字化监控等新技术将逐步应用于该领域，为复杂地质条件下的隧道施工提供更有力的技术支撑。未来工程中，应注重结合具体地质情况制定个性化方案，不断积累实践经验，推动全风化断层破碎带隧道施工技术的持续发展。

参考文献

- [1] 丘礼球. 大断面隧道穿越断层破碎带施工方案及支护参数优化 [J]. 福建交通科技, 2021(5): 44-47.
- [2] 张志强, 李术才, 李利平, 等. 基于 GA-BP 神经网络的断层破碎带围岩变形时序预测 [J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 811-818.
- [3] 徐前卫, 朱合华, 袁勇, 等. 断层破碎带对隧道围岩稳定性影响的模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 2): 3516-3524.
- [4] 李志厚, 杨新安, 张治国, 等. 破碎软岩隧道塌方处治技术研究 [J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 116-122.
- [5] 杨成忠, 李凯, 杨旭, 等. 基于地质强度指标 GSI 的隧道塌方预测方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(4): 709-718.
- [6] 薛亚东, 李术才, 李利平, 等. 基于离散元法的断层破碎带隧道塌方过程模拟 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2020, 50(1): 108-115.