

水利隧洞穿越断层破碎带超前支护技术案例分析

张博¹ 刘夕奇²

1. 中国水利水电第七工程局有限公司 四川 成都 610299

2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院 广东 广州 510611

摘要: 本文以环北部湾广东水资源配置工程合江支洞、NJ水电站引水隧洞等典型工程为案例,系统分析水利隧洞穿越断层破碎带时超前支护技术的应用效果与技术特征。通过对比管棚支护、超前小导管注浆、超前深孔帷幕注浆等技术的工程实践数据,结合地质预报、动态调整支护参数及多技术协同应用等关键环节,揭示不同地质条件下超前支护技术的选型原则与实施要点。研究表明,综合地质预报精度、支护参数动态优化及多技术协同应用是保障施工安全的核心要素,相关成果可为类似工程提供技术参考。

关键词: 水利隧洞; 断层破碎带; 超前支护; 管棚支护; 注浆加固

引言

水利隧洞作为水资源调配工程的关键结构,其施工安全直接关系到工程整体效益。在复杂地质条件下,断层破碎带因其岩体破碎、节理裂隙发育、富水性强等特征,成为隧洞建设中的典型不良地质体。据统计,我国水利隧洞施工中因断层破碎带导致的安全事故占比超过40%,其中超前支护技术失效是主要诱因之一。例如,某水电站引水隧洞在穿越断层破碎带时,因超前支护强度不足引发大规模塌方,导致工期延误6个月,直接经济损失超2亿元。此类案例表明,超前支护技术的合理应用是保障隧洞施工安全的核心环节。本文以环北部湾广东水资源配置工程合江支洞、NJ水电站引水隧洞等典型工程为案例,系统分析超前支护技术在断层破碎带中的应用效果,揭示技术选型与地质条件的匹配规律,为同类工程提供技术借鉴。

1 断层破碎带地质特征与施工风险

1.1 断层破碎带地质特征

断层破碎带由地壳运动塑造而成,具有显著且独特的地质特征,主要体现在岩体完整性、富水性以及地应力这三个关键方面。从岩体完整性来看,断层破碎带内岩体破碎严重,完整性差。岩体破碎系数(K_v)是衡量岩体完整程度的重要指标,在断层破碎带中,该系数通常低于0.3。同时,节理裂隙极为发育,密度高达5-15条/m,部分区域岩体呈碎裂状,甚至呈现土夹石状,结构松散,稳定性极差^[1]。富水性方面,断层带内地下水与裂隙的连通性极佳。这种良好的连通性使得地下水能够在断层带内快速流动和聚集,渗透系数可达 10^{-3} - 10^{-1} cm/s。如此高的渗透性,为地下水的储存和运移提供了便利条件,极易形成高压涌水通道,给施工带来巨大隐患。地应力

情况在断层破碎带也十分复杂。由于断层带是地壳运动的集中区域,存在明显的构造应力集中现象,地应力值可达10-30MPa。高应力环境使得岩体内部积聚了大量的能量,一旦施工扰动破坏了岩体的平衡状态,就极易引发岩爆,导致岩石突然破裂飞溅,威胁施工人员和设备安全;或者造成围岩大变形,使支护结构失效,影响工程进度和质量。

1.2 施工风险分析

基于上述地质特征,断层破碎带施工面临着诸多严峻风险,其中塌方、突泥涌水和设备卡机是最为核心的风险类型。塌方是断层带施工中最为常见的灾害。其发生概率与岩体破碎程度紧密相关,在未采取有效支护措施的情况下,极破碎地层($K_v < 0.2$)的塌方概率超过80%,而完整岩体($K_v > 0.7$)的塌方概率不足5%。这充分说明岩体破碎程度是引发塌方的关键因素,在施工过程中必须高度重视对破碎岩体的支护。突泥涌水与地下水活动密切相关。高压地下水携带大量泥沙,在断层破碎带这种富水且渗透性强的地质环境中,极易涌入隧洞^[2]。单次涌水量可达 $300\text{m}^3/\text{h}$ 以上,强大的水流和泥沙冲击力不仅会冲毁施工设备和支护结构,还可能淹没施工区域,造成人员伤亡和工程长期停滞。在采用TBM(隧道掘进机)施工时,设备卡机是典型风险。断层破碎带内岩体破碎、松散,在掘进过程中,破碎岩体容易因挤压而卡住刀盘,导致设备无法正常运转。脱困过程不仅耗时费力,而且脱困成本占工程总造价的5%-10%,严重影响工程经济效益和施工进度。

2 超前支护技术体系与选型原则

2.1 超前支护技术分类

根据作用机理,超前支护技术可分为结构支护类、地层加固类及特殊工法类三大类(表1):

表1:超前支护技术分类

技术类型	代表方法	适用地质条件	支护刚度	施工成本
结构支护类	管棚支护、超前小导管	极破碎地层、富水断层	高	中
地层加固类	深孔帷幕注浆、化学注浆	砂卵石层、断层破碎带	中	高
特殊工法类	机械预切槽、冻结法	浅埋敏感区、高承压水层	极高	极高

2.2 技术选型原则

①地质适应性原则:破碎断层带优先采用管棚+超前小导管组合支护,如NJ水电站引水隧洞F12断层采用 $\Phi 127\text{mm}$ 长管棚(30m)+ $\Phi 42\text{mm}$ 超前小导管(4.5m)联合支护,成功穿越15m宽断层。富水断层带需结合注浆加固,如合江支洞采用水泥-水玻璃双液浆注浆,将渗透系数从 10^{-3}cm/s 降至 10^{-6}cm/s 。②经济性原则:管棚支护单米造价约5000-8000元,适用于洞口段或大断面隧洞;超前小导管单米造价约300-500元,适用于IV、V级围岩的补充支护^[3]。③施工可行性原则:浅埋隧洞(覆土厚度 $< 2D$)需控制地表沉降,如某市政隧洞下穿铁路时采用长管棚(30m)+小导管复合支护,将轨面沉降控制在2mm以内。大断面隧洞(跨度 $> 10\text{m}$)需强化支护刚度,如某地铁车站采用全断面管棚($\Phi 159\text{mm}$)+预应力锚索支护,有效控制围岩变形。

3 典型工程案例

3.1 环北部湾广东水资源配置工程合江支洞

3.1.1 工程概况

合江支洞全长1280m,是环北部湾广东水资源配置工程的关键节点。隧洞穿越F1断层(宽度80m),断层带岩体为碎裂状花岗岩,节理裂隙密集发育,地下水丰富,单轴抗压强度仅0.5-2MPa。施工期间面临塌方、突泥涌

水等风险,需采用综合超前支护技术保障安全。

3.1.2 超前支护方案

本工程采用“TRT地质预报+地表深孔注浆+洞内超前支护”综合技术体系。首先,通过TRT(隧道地震波探测)技术提前160m预测断层位置及规模,结合地质雷达与超前地质钻探,确定断层带影响范围为掌子面前方50m。TRT技术基于地震波反射原理,可有效识别断层、溶洞等不良地质体,其预测精度达85%以上。其次,针对富水断层带,采用地表深孔注浆技术,布置3排注浆孔(孔距2m,孔深40m),注入水泥-水玻璃双液浆。注浆材料采用42.5级普通硅酸盐水泥与水玻璃(模数3.2)按1:0.5比例混合,注浆压力控制在1.0-1.5MPa。注浆后断层带渗透系数从 10^{-3}cm/s 降至 10^{-6}cm/s ,掌子面渗涌水量从27.1L/min降至3L/min,有效控制突泥涌水风险。最后,洞内采用超前支护技术,包括 $\Phi 108\text{mm}$ 长管棚($L = 30\text{m}$,环向间距40cm)与 $\Phi 42\text{mm}$ 超前小导管($L = 4.5\text{m}$,环向间距30cm)联合支护。管棚采用无缝钢管,管壁厚度8mm,管内注入水泥浆,注浆压力1.5MPa;小导管采用热轧无缝钢管,管身钻设 $\Phi 8\text{mm}$ 注浆孔(间距20cm),注浆压力0.8-1.2MPa。支护结构与钢拱架(I20工字钢)形成整体受力体系,有效承受围岩压力。

3.1.3 实施效果

表2:实施效果数据表

指标	施工前	施工后	规范要求
拱顶沉降速率	15mm/d	2mm/d	$\leq 5\text{mm/d}$
周边收敛值	35mm	8mm	$\leq 20\text{mm}$
掌子面渗涌水量	27.1L/min	3L/min	$\leq 10\text{L/min}$
超前支护成本占比	-	12%	传统25%

3.2 NJ水电站引水隧洞

3.2.1 工程概况

NJ水电站引水隧洞全长8.6km,是电站发电系统的关键组成部分。隧洞穿越F12断层(宽度15m),断层带岩体为强风化泥岩夹碎屑,节理裂隙发育,地下水丰富,单轴抗压强度仅0.3-1MPa。施工期间面临塌方、突泥涌水及TBM卡机等风险,需采用高效超前支护技术保障施工安全。

3.2.2 超前支护方案

本工程采用“超前锚杆+超前小导管+管棚支护”组合技术体系。首先,布置 $\Phi 22\text{mm}$ 砂浆锚杆($L = 3.5\text{m}$,环向间距1m)作为超前锚杆,形成组合梁效应,控制表层岩体脱落。锚杆采用早强水泥砂浆锚固,锚固力 $\geq 150\text{kN}$,有效提升岩体整体性。其次,采用 $\Phi 42\text{mm}$ 超前小导管($L = 4.5\text{m}$,环向间距30cm)进行注浆加固,管身钻设 $\Phi 8\text{mm}$ 注浆孔(间距20cm),注入水泥-水玻璃双液浆,注

浆压力0.8-1.2MPa。注浆后岩体强度提升30%-50%，内摩擦角增加10°-15°，显著改善岩体物理力学性质。最后，针对极破碎断层带，采用Φ127mm长管棚（L=30m，环向间距40cm）形成“棚架”结构，管内注入水泥浆，注

浆压力1.5MPa。管棚与钢拱架（I20工字钢）形成整体受力结构，有效承受早期围岩压力，为后续开挖提供安全保障。

3.2.3 实施效果

表3: 实施效果数据表

指标	传统方案	本方案
塌方率	30%	0%
掌子面稳定时间	1小时	24小时
超前支护成本	2500元/m	1200元/m
TBM设备利用率	65%	90%+

4 超前支护技术优化方向

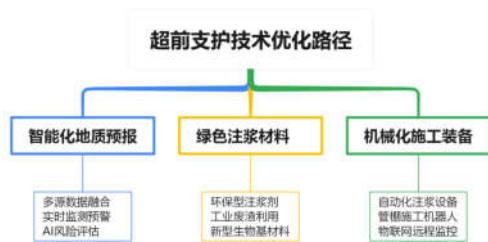


图1: 超前支护技术优化路径

4.1 智能化地质预报技术

智能化地质预报是超前支护技术优化的前提。多源数据融合技术可集成TRT、地质雷达、超前钻探等数据，构建三维地质模型，提高断层带预测精度。例如，某隧洞工程采用“TRT+地质雷达+钻孔电视”综合预报，断层带预测准确率达92%，较单一技术提升20个百分点。实时监测系统则通过布置光纤光栅传感器，实时监测围岩应力、应变及地下水压力，实现灾害预警^[4]。某地铁隧洞采用分布式光纤监测，提前48小时预警塌方风险，为施工争取宝贵时间。未来，人工智能技术将进一步应用于地质预报，通过机器学习算法分析历史数据，实现断层带特征的自动识别与风险评估。

4.2 绿色注浆材料研发

绿色注浆材料是超前支护技术可持续发展的重要方向。环保型注浆剂如聚氨酯类、超细水泥类材料，具有固化快、强度高、无污染等优点，可降低对地下水的影响。例如，某隧洞工程采用聚氨酯注浆，固结体强度达5MPa，且无有毒物质析出，符合环保要求。资源化利用技术则通过工业废渣（如粉煤灰、矿渣）制备注浆材料，降低成本并减少环境污染。某工程采用粉煤灰基注浆材料，单方成本降低40%，固结体强度达3MPa，性能满足工程要求。未来，纳米材料、生物基材料等新型注浆剂将逐步应用于工程实践，推动注浆技术向绿色、高效方向发展。

4.3 机械化施工装备升级

机械化施工装备是超前支护技术效率提升的关键。自动化注浆设备可实现注浆压力、流量、配比的实时控制，提高注浆质量。例如，某工程采用全自动注浆系统，注浆效率提升50%，材料浪费减少30%，施工成本显著降低。管棚施工机器人则通过集成钻孔、安装、注浆等功能，提高施工精度与安全性。某隧洞工程采用管棚机器人，钻孔偏差从15cm降至5cm，施工周期缩短40%，人员劳动强度大幅降低。未来，智能化装备将进一步普及，通过物联网、大数据等技术实现设备远程监控与故障诊断，推动超前支护技术向智能化、无人化方向发展。

5 结语

研究显示，技术适应性是超前支护核心，管棚支护、注浆加固、组合支护分别适用于不同地质条件，合理选择技术组合可提升支护效果、降低施工风险。动态调整是关键，依据地质预报实时调整支护参数能显著增效，如合江支洞优化注浆参数控制了风险。多技术协同是趋势，形成“预测-支护-监测”闭环体系可保障施工安全，NJ水电站引水隧洞的实践便是典范。未来，研究应聚焦智能化地质预报、绿色注浆材料及机械化施工装备等领域，推动超前支护技术向高效、环保、安全方向发展，为水利隧洞建设提供技术支撑。

参考文献

[1]陈宗耀,周嘉豪.大型地下洞群尾水隧洞穿越断层破碎带开挖支护效应研究[J].山西建筑,2025,51(16):164-168+190.
 [2]郑寰宇,熊成,罗崇俊,等.引水隧洞穿越断层破碎带的变形规律与支护优化分析[J].西部交通科技,2025,(04):151-154.
 [3]罗勇.长大隧洞断层破碎带及蚀变岩层开挖支护技术的研究与应用[J].四川水力发电,2024,43(S2):78-81+112.
 [4]陈培,马旭强,龙杰,等.断层破碎带隧洞管棚支护参数设计方法[J].长江科学院院报,2022,39(12):62-67.