

山区隧道工程IV、V级围岩开挖及支护动态设计探索

蒋飞

江苏双宁工程咨询有限公司 江苏 南京 211211

【摘要】：本文以某山区高速公路隧道为工程背景，根据工程施工环境和进度要求，结合地质勘探资料分析该隧道18条断裂带围岩情况，对该隧道断裂带开挖掘进及初支支护施工中出现的問題，结合TGP、地质雷达超前地质预报、监控量测数据和掌子面现场情况分析，采取动态设计原则，对原设计图纸中的开挖及支护设计方案进行动态设计。通过对超前地质预报数据分析，采取对掌子面加强超前支护、优化洞身开挖方式和严格控制各道工序施工进度和衔接，最终快速、高效通过IV、V级围岩构成的断裂带。本文可以作为有类似情况工程项目借鉴。

【关键词】：隧道工程；IV、V级围岩；开挖及支护；动态设计

引言

该隧道左洞8039m，右洞8044m，隧道洞身最大开挖断面184m²，最大开挖宽度19m；隧道最大埋深为623m，送风竖井深266.069m，排风竖井深276.733m。该隧道属于特长隧道，设有6座变压器室（横洞式），22道人行横洞，10道车行横洞，双向六车道，设计速度100km/h，隧道工程造价8.1165亿元。

1 施工中遇到的问题

该隧道共需穿越18条断层破碎带，破碎带最小处宽度约1m，最大处宽度约10m，岩体破碎，发育有微、小型岩溶管道，对隧道洞身开挖安全控制影响较大。基岩构造裂隙水存在基岩的裂隙中，受围岩构造发育状况控制，一般区域导水性弱，但18条构造断裂带附近，围岩破碎，其导水性较好，主要接受地面降水及地下水侧向补给，断裂带水量变化较大。通过勘察钻孔水文资料，经估算本隧道左洞正常突水涌水量34182m³/d、右洞正常突水涌水量33152m³/d，在实际开挖过程中，突发涌水现象多次出现，给反坡开挖安全构成极大威胁。该隧道施工安全风险综合评估总体风险等级为IV级，属极高风险。

该隧道为该高速公路通车重点控制性工程、省重点督办项目工程，建设工期需要大幅压缩。针对特长隧道中18条断裂带IV、V级围岩若按照原设计CD法开挖方式掘进，隧道很难按时贯通。

2 动态设计研究

判定隧道围岩级别的BQ值，不但受现场取样岩石的单轴饱和极限抗压强度、现场岩体完整性系数影响，同时综合评定还受地下水减折系数、岩层面现状减折系数等多因素影响。故针对不同围岩采取何种开挖方式更合理，业内人士意见也不相同，不论CD法、上下台阶法还弧形导坑法，均是

为了减小一次性开挖断面，减少对开挖围岩的扰动，降低围岩应力一次释放量和洞身变形量。针对该隧道断裂带IV、V级围岩虽然较破碎、涌水，但岩质较坚硬，需爆破开挖施工，若采用CD法或上下台阶法施工，在下台阶爆破时均会对上台阶已施工完成的初支产生较大扰动和破坏，甚至造成上台阶拱脚二次应力释放。针对该隧道围岩较坚硬，且有一定自稳性的特点，为谋求施工进度上的突破，省高指在重视超前小导管施作、严格把控注浆效果、尽量缩短一次开挖步距、加强初期支护、及时封闭成环、加密监测频率的“新奥法”开挖原则基础上，成立一个“新艺法”课题组，即对断裂带IV、V级围岩采取全断面开挖工艺的探索。笔者是该课题组成员，常驻现场，作为对现场施工方案落实跟踪，对各工况初步研判、数据收集、统计负责人。

2.1 超前地质预报与监控量测

在施工过程中，重点抓掌子面超前地质预报工作。为准确探测掌子面前方详细地质情况，采用TGP地震波超前预报全覆盖（有效测距150m）、地质雷达（有效测距30m，地质状况判断相对精确）补充加强。根据地震波工作原理，即当地震波遇到岩体中相对大的声阻抗界面时会产生反射波，遇到相对小的声阻抗界面时会产生绕射波的特点，采集隧道围岩中不同界面产生的地震波回波，经过专业软件处理系统分析获取回波的所处断面位置、空间分布等信息，再结合隧道地质勘察资料、系统综合分析，预报隧道前方的地质条件变化情况。

对于地质勘探资料显示的不利地质带和超前地质预报初步判定不良地质段，为防止掌子面前方突然出现大量裂隙水，在掘进进入断裂带前，采用红外线探水仪进行探测；对地质雷达、红外线探水探测数据分析仍存在不确定因素段落时，在掌子面划定区域，采用平孔地质钻机对存在疑问部位进行水平地质超前钻孔取样，并结合开挖进展循环钻孔直

至穿越不确定段落，于直观地指导现场施工。

对已完成开挖、初支洞身段落，及时进行拱顶沉降、周边收敛监控量测，并结合数据变化情况增加频率，监测数据必须真实。各方探测、监测数据电子版当天必须传输给施工、监理、设计、业主，为现场动态设计施工决策提供依据。

2.2 超前支护

隧道断裂带围岩较破碎，自稳相对较差，为减小隧道变形，在洞身开挖前对掌子面拱顶围岩进行注浆加固处理，以提高拱部围岩的自稳能力。对原设计的中空注浆锚杆改为Φ50×5mm超前注浆小导管，长度为5m，环向间距为0.5m，小导管纵向间距为2.8m，并对变形较大处适当加密，注浆压力0.5~1.0MPa，达到压力后持续15min；对渗水较大段落，加注水玻璃、水泥双液浆进行堵水。

2.3 开挖、控制爆破

严格按照新奥法开挖原则，步步为营，对断裂带IV级、V级围岩地段谨慎组织开挖施工。开挖进尺控制，IV级围岩每循环一次开挖进尺控制在2.1m左右；V级围岩每循环一次开挖进尺控制在1.4m左右，同时结合掌子面围岩实际情况、监测数据确定进尺量。采用光面爆破方案，弱爆破，加密周边眼眼，减小其间距，及时调整最小抵抗线及相对距，减少装药量，减小因爆破对周边围岩的扰动。

IV级围岩全断面开挖爆破参数为：光面孔之间间距取值40cm，小抵抗线取值55cm，光爆密集系数为0.73。计划每循环进尺2.1m，炮眼利用率取值0.95，则炮眼深度为： $L=L1/\mu=2.1/0.93\approx 2.3m$ ，现场炮眼深度实际取值2.3m，掏槽眼及底眼的深度为： L 掏、底= $2.3+0.2=2.5m$ ，辅助眼及周边眼深度为： L 辅、周= $2.3m$ 。

本方案爆破采用两排楔形掏槽，掏槽眼与开挖掌子面的夹角取值为65°，上下两对掏槽眼间距取值为60cm，同一平面两掏槽炮眼眼底距离30cm。掏槽眼长度 l 掏 $2=L$ 掏/ $\sin 65=2.5/0.906=2.75m$ ，炮眼共计271个眼（其中掏槽眼12个、周边眼74个、底板眼25个、内圈眼38个、辅助眼122个），各部位装药量见下表1：

表1 IV级围岩全断面开挖爆破各类参数表

部位	段号	炮孔名称	炮孔深度(m)	孔数(个)	单孔装药量(Kg)	段装药量(Kg)	附注
全断面	1	掏槽眼	2.75	6	1.45	8.71	主要指标： 炮眼个数：271个 断面积：147.52m ²
	3	掏槽眼	2.75	6	1.06	6.36	
	5	辅助眼	2.3	10	0.99	9.90	
	7	辅助眼	2.3	16	0.77	12.32	

	9	辅助眼	2.3	22	0.66	14.52	进尺： 2.1m 单位耗药量： 0.560Kg/m ³ 比钻眼数： 1.84个/m ²
	11	辅助眼	2.3	36	0.70	25.2	
	13	辅助眼	2.3	28	0.72	20.16	
	13	内圈眼	2.3	38	0.55	20.90	
	15	辅助眼	2.3	10	0.77	7.70	
	15	周边眼	2.3	74	0.30	22.2	
	17	底板眼	2.5	25	1.01	25.25	
合计				271		173.22	

V级围岩全断面开挖爆破参数为：光面孔之间间距取值35cm，取小抵抗线取50cm，光爆密集系数为0.7。计划每循环进尺1.4m，炮眼利用率取值0.95，则炮眼深度为： $L=L1/\mu=1.4/0.95\approx 1.5m$ ，现场炮眼深度实际取值1.5m，掏槽眼及底眼的深度为： L 掏、底= $1.5+0.2=1.7m$ ，辅助眼及周边眼深度为： L 辅、周= $1.5m$ 。

本方案爆破采用两排楔形掏槽，掏槽眼与开挖掌子面的夹角取值为65°，上下两对掏槽眼间距取值为60cm，同一平面两掏槽炮眼眼底距离30cm。掏槽眼长度 l 掏 $2=L$ 掏/ $\sin 65=1.7/0.906=1.88m$ 。炮眼共计293个眼（其中掏槽眼12个、周边眼86个、底板眼26个、内圈眼41个、辅助眼128个）。各部位装药量见下表2：

表2 V级围岩全断面开挖爆破各类参数表

部位	段号	炮孔名称	炮孔深度(m)	孔数(个)	单孔装药量(Kg)	段装药量(Kg)	附注
全断面	1	掏槽眼	1.88	6	0.99	5.96	主要指标： 炮眼个数：293个 断面积：156.64m ² 进尺： 1.4m 单位耗药量： 0.534Kg/m ³ 比钻眼数： 1.87个/m ²
	3	掏槽眼	1.88	6	0.72	4.33	
	5	辅助眼	1.5	10	0.65	6.50	
	7	辅助眼	1.5	18	0.50	9.00	
	9	辅助眼	1.5	22	0.43	9.46	
	11	辅助眼	1.5	40	0.43	17.20	
	13	辅助眼	1.5	28	0.43	14.04	
	13	内圈眼	1.5	41	0.36	14.76	
	15	辅助眼	1.5	10	0.53	5.30	
	15	周边眼	1.5	86	0.15	12.9	
	17	底板眼	1.7	26	0.69	17.82	
合计				293		117.27	

2.4 初期支护

针对断裂带地质情况，及时支护至关重要，以减少围岩岩面长时间暴露、应力释放作用下而增加变形量，初支采用与围岩变形压力相适应、刚度相对钢架。现场施工中，IV级

围岩段落初期支护采用 I20 工字钢架, 间距 80cm; 径向系统锚杆支护采用 $\Phi 22\text{mm}$ 砂浆锚杆, 长度为 3.5m, 梅花形布置, 间距 $1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$, 拱脚处设置两根 3.5m 的砂浆锚杆锚固, 运用新型设备湿喷机进行 C20 喷射混凝土施工, 喷射厚度为 20cm; V 级围岩段落初期支护采用 I22b 工字钢架, 间距 70cm; 径向支护采用 $\Phi 50 \times 5\text{mm}$ 小导管, 长度为 5m, 梅花形布置, 间距 $1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$, 拱脚处设置两根 5m 的小导管锚固, 运用新型设备湿喷机进行 C25 喷射混凝土施工, 喷射厚度为 30cm。结合实际地质情况及时调整开挖断面, 保证预留变形量满足工后沉降要求。为及时封闭围岩, 缩小每道工序衔接时间, 施工材料均提前备置, 做到初喷、径向锚杆施作、钢拱架安装、复喷等, 各道工序交替进行, 做到无缝连接 (图 1)。



2.5 堵水、排水

对隧道断裂带开挖, 围岩裂隙发达易导致地下水流失, 容易引起地表水源变化, 最终引起环境变化而影响该处居民生产生活, 故需采取“以堵为主”的防水措施。由于断裂带地下水发育, 施工时经常产生突水涌水等危及施工生产安全隐患事件, 对围岩破碎发育的断裂带地段采取“以堵为主, 堵排结合”的治理原则, 通过注射水玻璃、水泥双液浆堵水加固围岩, 防止突水涌水, 以保证施工安全。

该隧道裂隙水压力较大, 必须采取堵排结合措施, 先进行引排、泄压, 再对出水部位采用 $\Phi 50 \times 5\text{mm}$ 、长 5m 的小导管注浆双液浆, 进行帷幕注浆封堵。钻注浆顺序为: 先无

水孔, 后有水孔; 先周边, 后中心。水泥浆与水玻璃比例为 1:0.9, 在施工过程中需结合裂隙出水量、水的压力随时调整双液浆配合比, 以保证双液浆注浆效果。注浆小导管间距为 $1.0 \times 1.0\text{m}$, 梅花形布置, 注浆压力控制在 0.5~1.5MPa 之间, 注浆过程中, 随时检查浆液扩散半径, 并结合现场状况随时调整间距或补充加密。

2.6 二衬衬砌

该类岩质断裂带初支完成后, 前期隧道拱顶沉降、周边收敛还存在一定变形量, 随即逐步减小, 趋于平稳。为保证二衬净空和现场施工安全, 该段落二次衬砌应及时施作, 同时二次衬砌的防水板施工质量应重点控制。在防水板挂设前, 采用激光断面仪复核开挖断面尺寸, 清除侵限部分, 对低洼处进行复喷; 对初支面进行全面检查, 切除残留锚杆头、注浆管。由于后续洞身开挖爆破施工、地质处置施工可能对已完成初支施工的断裂带地下水系产生影响, 在二次衬砌施工前应加强防水处理。在铺设二衬防水板前, 该段每延米环向安装一环 MF12 塑料盲沟 (或直径 50mm 的双壁打孔波纹管) 均与隧道两侧直径 100mm 的纵向排水管相连接, 底部用直径 100mm 横向 PVC 排水管每延米一道排入两侧水沟, 并保证排水管的畅通; 加强对防水板焊缝气密性质量抽查, 控制防水板挂设的松弛度。衬砌混凝土应连续、对称浇筑, 分层振捣密实。

3 结束语

针对现场实际的工程地质和水文地质条件, 本项目充分发挥超前地质预报作用, 合理进行资源调配; 参建各方资源、数据共享、及时沟通并完成动态设计, 各道工序衔接紧凑, 三车道开挖支护平均进尺: V 级围岩 2.9m/d、IV 级围岩 3.5m/d、III 级围岩 7.2m/d、II 级围岩 8m/d。达到了在安全管理受控、工程质量合格前提下施工进度取得较大成果, 该隧道荣获“2020-2021 年度第一批国家优质工程奖”。随着科技的发展, 在采用先进的仪器设备, 做好隧道地质超前预报和信息收集, 及时了解隧道围岩变化, 配置先进施工机器设备, 遵循“短进尺、强支护、弱爆破、勤量测”的隧道开挖支护原则不变, 客观分析施工中各工况, 一些常规工法是可以适当改变的。

参考文献:

- [1] JTGD70-2004, 公路隧道设计规范
- [2] GB50218-94, 工程岩体分级标准
- [3] JTG F60-2009, 公路隧道施工技术规范
- [4] JTG/T F60-2009, 公路隧道施工技术细则