

某引水隧洞超硬岩对施工效率的影响研究

向家菠^{1, 2}, 罗飞^{1, 2}

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010;
2. 长江三峡勘测研究院有限公司 (武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要 为研究某引水隧洞超硬岩对施工效率的影响, 相关人员对超硬岩问题开展了专项勘察。通过建立超硬岩评价及其对施工效率影响程度的分级标准, 并对隧洞穿越各地层岩组岩石饱和单轴抗压强度 (R_b) 和岩石磨耗指数 (CAI) 进行测试和统计, 结合输水隧洞具体洞段围岩完整性, 分析表明: 隧洞穿越花岗岩和辉绿岩局部洞段围岩超硬岩对施工效率影响严重; 穿越片麻岩洞段中, 晒家冲组 (Ar_3S^{gn})、黄凉河组第一段 (Pt_1h^1) 和第三段 (Pt_1h^3) 片麻岩围岩超硬岩对施工效率影响严重; 穿越黄凉河组第二段 (Pt_1h^2) 和力耳坪组 (Pt_1l) 片麻岩围岩超硬岩对施工效率影响较严重; 穿越沉积岩洞段围岩超硬岩对施工效率影响较严重, 部分影响严重。

关键词 超硬岩; 钻爆施工; TBM 施工; 岩石磨耗指数
中图分类号: U45 **文献标识码**: A

文章编号: 2097-3365(2024)02-0121-03

超硬岩是指当岩石强度和磨耗性达到一定量值时, 对隧洞掘进施工效率可能构成一定程度影响的岩体。在钻爆法施工中, 对炮眼施工和爆破效果构成影响; 在 TBM 施工中, 对 TBM 掘进速率构成影响, 同时增大滚刀损耗^[1-3]。工程实践及试验表明, 对于完整性好的岩体, 当岩石强度或磨耗性很高时, 往往会造成开挖掘进困难、施工刀具及钻具的磨损量大, 严重影响掘进效率且大幅增加工程成本^[4-5]。

某大型引调水工程引水隧洞穿越地层岩性复杂、岩质多样, 根据试验成果, 在岩体较完整~完整的地层中存在岩石强度高和磨耗性大的超硬岩。因而在勘察阶段针对超硬岩问题开展了专项勘察, 其成果可为类似工程提供借鉴。

1 工程及地质概况

某大型引调水工程输水隧洞长约 194.19km。工程输水线路区处于中国地势第二阶梯东缘向第三阶梯过渡地带。线路区以中山为主, 地势总体呈“中部高、南北低”“西高、东低”的特征。其中岩浆岩、变质岩、沉积岩三大岩类均有分布, 以沉积岩类分布范围广, 且其碳酸盐岩与碎屑岩总体相间分布, 变质岩类分布范围其次; 岩浆岩类分布范围相对最少。

2 超硬岩评价标准及测试

岩石的磨耗性可以通过岩石磨耗试验确定的岩石磨耗指数 (CAI) 判定, 参照相关规范规程, 类比国内 TBM 掘进工程经验^[6], 确定岩石磨耗指数和对 TBM 刀具磨损影响程度标准见表 1。

表 1 CAI 与岩石磨耗性分级标准

岩石磨耗性分级	CAI
极低磨耗性	0.3~0.5
低磨耗性	0.5~1.0
中等磨耗性	1.0~2.0
高磨耗性	2.0~4.0
极高磨耗性	4.0~6.0
石英岩级	6.0~7.0

采用 TBM 施工时, 岩石饱和单轴抗压强度 (R_b) 为 150MPa 和 200MPa, 可作为超硬岩强度分类阈值; 岩石磨耗性与 TBM 刀具磨损程度关系密切, 相关研究表明, Cerchar 磨耗指数 (CAI) 为 4.0~5.0 时对 TBM 掘进状态有明显影响, 可取 CAI=4.0 作为超硬岩对于磨耗性的分类阈值^[7]。超硬岩分类评价标准见表 2。

表 2 超硬岩对不同施工工法影响分级标准

施工工法 影响程度	TBM 施工	钻爆法施工
	较严重	$150\text{MPa} \leq R_b < 200\text{MPa}$ 或 $CAI \geq 4.0$
严重	$R_b \geq 200\text{MPa}$	$R_b \geq 200\text{MPa}$

为研究该输水隧洞穿越超硬岩对施工效率的影响, 对超硬岩问题开展了专项勘察, 共完成岩石单轴抗压强度试验 207 组、岩石磨耗性试验 355 组。

3 岩石测试结果及分析

根据输水隧洞沿线可能含超硬岩岩组宏观定性判定结果,可能存在超硬岩问题的地层岩组岩石饱和单轴抗压强度(R_b)和岩石磨耗指数(CAI)统计结果见表3。

在超硬岩岩组定量评价的基础上,结合输水隧洞具体洞段围岩完整性,分析超硬岩问题的分布与占比,对输水隧洞中超硬岩对施工效率影响进行综合评价(表3)。

3.1 岩浆岩

内口单元($\gamma\pi_2^3$)中超硬岩占比约43%,该单元超

表3 超硬岩分布地层岩石强度及磨耗性统计表

岩类	地层代号	代表岩性	岩石饱和单轴抗压强度		CAI			对施工效率影响评价		
			$150 \leq R_b < 200\text{MPa}$ 占比(%)	$R_b \geq 200\text{MPa}$ 占比(%)	CAI 值范围	CAI 平均值	磨耗性评价	TBM	钻爆法	
变质岩	Ar_2D^{sn} 、 Ar_3S^{sn}	英云斜长片麻岩	14	21	2.42~4.62	3.27	高~极高磨耗性	严重	严重	
	Pt_1h^1	英云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩以及角闪(片)岩类	24	32	1.56~3.79	2.84	中等~高磨耗性	严重	严重	
	Pt_1h^2	斜长角闪(片)岩、黑云斜长片麻岩、榴线英岩类	33	20	1.59~4.71	3.14	中等~极高磨耗性	较严重	较严重	
	Pt_1h^3	花岗片麻岩	33	50	3.54~4.44	4.04	高~极高磨耗性	严重	严重	
	Pt_1l	角闪斜长片麻岩、斜长角闪(片)岩	51	—	1.06~3.33	2.3	中等~高磨耗性	较严重	较严重	
岩浆岩	$\gamma\pi_2^3$	花岗岩	19	24	1.45~4.11	2.94	中等~极高磨耗性	严重	严重	
	$\beta\mu$	辉绿岩脉	35	52	0.82~4.29	2.87	低~极高磨耗性	严重	严重	
	Z_2d	白云岩夹页岩	15	54	0.72~1.84	1.46	低~中等磨耗性	严重	严重	
	Z_2dn^1	白云岩	20	10	2.1	2.1	高磨耗性	较严重	较严重	
	Z_2dn^2	白云岩	33	33	3.99	3.99	高磨耗性	较严重	较严重	
	Z_2dn^3	含硅质白云岩	22	19	1.58~3.3	2.46	中等~高磨耗性	较严重	较严重	
	\in_1s^2	白云岩	—	50	2.09	2.09	高磨耗性	严重	严重	
	碳酸盐岩	\in_1t	泥质条带白云岩	44	56	0.46~1.43	0.9	极低~中等磨耗性	严重	严重
		$\in sh$	厚层白云岩	25	25	0.93~3.74	1.92	低~高磨耗性	较严重	较严重
		\in_2qn^2	白云岩、含硅质白云岩	30	13	0.94~3.64	2.01	低~高磨耗性	较严重	较严重
\in_2qn^4		白云岩夹泥质白云岩	22	22	1.79	1.79	中等磨耗性	较严重	较严重	
\in_3sn		含硅质白云岩	19	26	0.72~2.30	3.35	低~高磨耗性	严重	严重	
P_1m	含硅质条带灰岩	100	—	0.41~2.21	0.76	低~高磨耗性	较严重	较严重		

硬岩以 $R_b \geq 200\text{MPa}$ 居多, 隧洞围岩超硬岩对 TBM 及钻爆法施工影响严重, 部分较严重。辉绿岩脉 ($\beta\mu$) 随机分布, 岩脉洞段隧洞围岩完整性为完整~较完整的占比约 55%, 岩脉中超硬岩占比约 87%, 因而岩脉洞段隧洞围岩超硬岩占比约 50%。岩脉中超硬岩以 $R_b \geq 200\text{MPa}$ 居多, 隧洞围岩超硬岩对 TBM 及钻爆法施工影响严重。

3.2 变质岩

晒家冲组 ($\text{Ar}3\text{Sgn}$) 地层岩石中超硬岩占比约 35%, 地层内超硬岩以 $R_b \geq 200\text{MPa}$ 居多, 隧洞围岩超硬岩对 TBM 及钻爆法施工影响严重, 部分较严重。黄凉河组第一段 (Pt_1h^1) 地层中超硬岩占比约 56%, 地层内超硬岩以 $R_b \geq 200\text{MPa}$ 居多, 隧洞围岩超硬岩对 TBM 及钻爆法施工影响严重, 部分较严重。黄凉河组第二段 (Pt_1h^2) 地层中超硬岩占比约 53%, 地层内超硬岩以 $150\text{MPa} \leq R_b < 200\text{MPa}$ 居多, 隧洞围岩超硬岩对 TBM 及钻爆法施工影响较严重, 部分严重。黄凉河组第三段 (Pt_1h^3) 片麻岩段隧洞围岩完整性为完整~较完整的占比约 55%, 地层内超硬岩以 $R_b \geq 200\text{MPa}$ 居多, 隧洞围岩超硬岩对 TBM 及钻爆法施工影响严重, 部分较严重。力耳坪组 (Pt_1l) 地层中超硬岩占比约 51%, 地层内超硬岩以 $150\text{MPa} \leq R_b < 200\text{MPa}$ 居多, 隧洞围岩超硬岩对 TBM 及钻爆法施工影响较严重。

3.3 碳酸岩

灯影组第三段 (Z_2dn^3) 地层内超硬岩以 $150\text{MPa} \leq R_b < 200\text{MPa}$ 居多, 隧洞围岩超硬岩对 TBM 及钻爆法施工影响较严重, 部分严重。天河板组 ($\in_1\text{t}$) 白云岩地层以薄至中厚层为主, 该地层隧洞围岩超硬岩零星分布, 局部可能存在少量超硬岩问题。石龙洞组 ($\in_1\text{sh}$)、覃家庙第二段 ($\in_2\text{qn}^2$) 地层中超硬岩占比约 43%~50%, 隧洞围岩超硬岩对 TBM 及钻爆法施工影响较严重, 部分严重。经地质测绘与勘探分析, 三游洞组 ($\in_3\text{sn}$) 白云岩地层隧洞围岩超硬岩零星分布, 局部可能存在少量超硬岩问题。茅口组 (P_1m) 地层内超硬岩以 $150\text{MPa} \leq R_b < 200\text{MPa}$ 居多, 隧洞围岩超硬岩对 TBM 及钻爆法施工影响较严重。

4 结论

为研究某引调水工程输水隧洞穿越超硬岩对施工效率的影响, 对超硬岩问题开展了专项勘察及测试分析, 结果表明:

1. 隧洞穿越内口单元 ($\gamma\pi_2^3$) 花岗岩局部洞段围岩超硬岩占比约 25%, 超硬岩以 $R_b \geq 200\text{MPa}$ 居多, 对施工效率影响严重; 穿越辉绿岩脉 ($\beta\mu$) 洞段围岩超硬岩占比约 50%, 超硬岩以 $R_b \geq 200\text{MPa}$ 居多, 对施工效率影响严重。

2. 隧洞穿越晒家冲组 (Ar_3Sgn) 片麻岩洞段围岩超硬岩占比约 20%, 超硬岩以 $R_b \geq 200\text{MPa}$ 居多, 对施工效率影响严重; 穿越黄凉河组第一段 (Pt_1h^1) 隧洞围岩超硬岩占比约 30%, 超硬岩以 $R_b \geq 200\text{MPa}$ 居多, 对施工效率影响严重; 穿越黄凉河组第二段 (Pt_1h^2) 片麻岩洞段围岩超硬岩占比约 30%, 超硬岩以 $150\text{MPa} \leq R_b < 200\text{MPa}$ 居多, 对施工效率影响较严重; 穿越黄凉河组第三段 (Pt_1h^3) 隧洞围岩超硬岩占比约 55%, 超硬岩以 $R_b \geq 200\text{MPa}$ 居多, 对施工效率影响严重; 穿越力耳坪组 (Pt_1l) 隧洞围岩超硬岩占比约 30%, 超硬岩以 $150\text{MPa} \leq R_b < 200\text{MPa}$ 居多, 对施工效率影响较严重。

3. 隧洞穿越灯影组第三段 (Z_2dn^3) 硅质白云岩围岩超硬岩占比约 30%, 超硬岩以 $150\text{MPa} \leq R_b < 200\text{MPa}$ 居多, 对施工效率影响较严重; 穿越石龙洞组 ($\in_1\text{sh}$)、覃家庙第二段 ($\in_2\text{qn}^2$) 白云岩隧洞围岩超硬岩占比约 20%, 超硬岩 $150\text{MPa} \leq R_b < 200\text{MPa}$ 和 $R_b \geq 200\text{MPa}$ 基本相当, 对施工效率影响较严重; 穿越茅口组 (P_1m) 灰岩隧洞围岩超硬岩占比约 75%~90%, 超硬岩以 $150\text{MPa} \leq R_b < 200\text{MPa}$ 居多, 对施工效率影响较严重。

参考文献:

- [1] 张恒辉, 吴炜. TBM 刀具岩石磨蚀性 CAI 值调整系数的应用 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42(02): 231-236.
- [2] 李金霖. 隧洞高磨蚀性硬岩地段 TBM 法施工刀具消耗分析 [J]. 陕西水利, 2018(05): 127-130.
- [3] 龚秋明, 许弘毅, 李立民. 岩石磨蚀性指数分级讨论 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(03): 748-758.
- [4] 王玉杰, 曹瑞琅, 王胜乐, 等. TBM 施工超硬岩分类指标和确定方法研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2020, 40(S2): 38-44.
- [5] 王希宝, 袁松, 蒋长伟. 高地应力硬岩隧道内轮廓形式优化分析 [J]. 路基工程, 2023(05): 142-148.
- [6] 同 [3].
- [7] 同 [4].