

复合地质条件下隧道洞身开挖支护技术探讨

谢朝果

中国水利水电第十六工程局有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i9.6563

[摘要] 在复合地质条件下,合理选择隧道洞身开挖支护技术是确保工程安全的关键技术问题。以广东电白抽水蓄能电站3#隧道作为工程背景,此隧道穿越II-V级围岩,地质条件复杂多变,针对不同围岩级别制定了差异化的洞身开挖方法,V级围岩采用环形开挖留核心土的开挖方法,IV级围岩采用正台阶开挖的施工方法,II级与III级围岩采用全断面开挖的作业方法。在支护技术方面,建立了超前支护与系统锚杆、喷射混凝土与钢拱架的组合支护体系,监测数据显示,该技术体系有效控制了围岩变形,隧道开挖过程中周边位移与拱顶下沉均处于安全范围之内。

[关键词] 复合地质条件; 隧道洞身开挖; 支护技术; 围岩分级; 开挖方法

中图分类号: U455 文献标识码: A

Discussion on Tunnel Excavation Support Technology under Composite Geological Conditions

Chaoguo Xie

China Water Resources and Hydropower No.16 Engineering Bureau Co.,Ltd.

[Abstract] Under composite geological conditions, the reasonable selection of tunnel excavation support technology is a key technical issue to ensure project safety. Taking the No. 3 tunnel of the Guangdong Dianbai Pumped Storage Power Station as the engineering background, this tunnel traverses rock masses of grade II-V, with complex and variable geological conditions. Differential excavation methods have been developed for different rock mass grades, with core soil retaining circular excavation for grade V rock, step method excavation for grade IV rock, and full-face excavation for grade II and III rock. In terms of support technology, a combined support system of advanced support with system anchor rods, sprayed concrete, and steel arch frames has been established. Monitoring data shows that this technology system effectively controls the deformation of the surrounding rock, keeping the surrounding displacements and crown settlements within safe limits during the tunnel excavation process.

[Key words] Composite geological conditions; tunnel excavation; support technology; surrounding rock classification; excavation methods.

引言

隧道洞身开挖支护技术在复合地质条件中面临着围岩性质差异大以及支护参数变化频繁等技术方面的难题。不同围岩级别情况下洞身开挖方法的选择会直接影响到施工安全与工程进度,支护结构的合理配置属于控制围岩变形的核心技术方面的要素,复合地质条件要求洞身开挖支护技术具备良好的适应性与灵活性,能根据围岩条件变化及时调整技术方案。广东电白抽水蓄能电站3#隧道全长406m,依次穿越V级、IV级、III级、II级围岩,地质条件的频繁变化对洞身开挖支护技术提出了更高的要求。

1 工程概况

广东电白抽水蓄能电站3#隧道处在茂名市电白区境内,这

条隧道全长达到406m,起止桩号是K8+598~K9+004,采用的是单洞双车道的型式。隧道设计成一字坡结构,进洞点高程为481.77m,出洞点高程是504.06m,平均坡度为5.49%,建筑限界为限宽8.5m且限高4.5m,地质勘察结果表明,隧道穿越复合地质条件,围岩级别分布情况为II级围岩196m、III级围岩65m、IV级围岩35m、V级围岩110m,地层主要由弱风化混合岩与全风化岩体构成。隧道进口段埋深相对较浅,最大埋深大约为12.1m,洞身段最大埋深约100m,围岩稳定性呈现出明显的分段变化特征。隧道工程建设中,开挖与支护是施工安全与质量管控的重要内容^[1],该工程复合地质条件下围岩级别频繁变化对洞身开挖支护技术提出严峻挑战,需要采用差异化的技术方案确保施工安全与工程质量。

2 复合地质条件下隧道围岩特性分析

2.1 II~V级围岩地质特征

电白抽水蓄能电站3#隧道地质条件有明显分层特征,各级围岩物理力学性质差异十分显著。II级围岩主要分布在洞身中段位置,岩体是弱风化混合岩且岩质坚硬完整,抗压强度大于30MPa且节理裂隙不发育,围岩自身稳定能力强,III级围岩岩体完整性较好,但局部存在软弱夹层,抗压强度处于15-30MPa之间。IV级围岩主要为强风化岩体状况,岩质较软且节理裂隙发育,抗压强度在5-15MPa范围之内,局部稳定性表现比较差。V级围岩集中分布在进出洞口地段,主要由全风化岩体与坡积土构成,呈砂质、砾质粉质黏土状态,强度低,开挖后易发生变形破坏。围岩风化程度与埋深存在密切关系,浅埋段风化作用强烈,深埋段围岩相对完整。岩体结构面发育程度直接影响围岩块体稳定性,节理密度与围岩级别呈正相关关系。

2.2围岩稳定性差异化分析

不同级别围岩的稳定性机制存在本质差异,决定了洞身开挖后的变形特征和支护需求。围岩稳定性系数可用下式表示:

$$K_s = \frac{\sigma_c}{\gamma H + q_0} \quad (1)$$

式中: K_s 为围岩稳定性系数; σ_c 为围岩抗压强度(MPa); γ 为围岩重度(kN/m^3); H 为埋深(m); q_0 为地表荷载(kPa)。该公式体现出围岩强度跟作用荷载的相对关系,稳定性系数越大就说明围岩越稳定,在不同地质条件下隧道洞身开挖的具体方法与实施步骤,需要充分考虑围岩稳定性差异^[2],II级围岩有着良好的自承载能力,而V级围岩开挖之后容易出现坍塌变形,需要及时施作强化支护方面的措施。

2.3地下水对围岩的影响

地下水的活动会明显影响围岩工程特性与稳定状态,尤其是对软弱围岩强度劣化作用相当明显。隧道洞身段地下水主要以裂隙水与孔隙水形式存在,在降雨充沛的5~9月份地下水位会明显上升。地下水对围岩强度的软化效应能够用软化系数来表征:

$$K_{sf} = \frac{\sigma_{cw}}{\sigma_{cd}} \quad (2)$$

式中: K_{sf} 为软化系数; σ_{cw} 为饱和状态下围岩抗压强度(MPa); σ_{cd} 为干燥状态下围岩抗压强度(MPa)。软化系数能反映出地下水对围岩强度的削弱程度,数值越小就表明软化作用越显著,不良地质条件下隧道洞身施工技术要点,涉及开挖工法的选择、开挖进尺的控制、支护结构的设计均需考虑地下水的不利影响^[3],地下水会降低围岩与支护结构的粘结强度,进而增加围岩坍塌的风险。地下水渗流会产生动水压力,改变围岩有效应力分布,还会降低围岩抗剪强度参数,水岩相互作用过程中黏土矿物遇水膨胀,会加剧围岩工程性质恶化程度。

3 隧道洞身开挖支护技术方案设计

3.1分级开挖技术适用性分析

围岩级别差异决定了洞身开挖方法的选择原则,要按照围岩稳定性与地质条件来制定对应开挖工艺。环形开挖留核心土法适用于V级围岩,通过预留核心土来提供临时支撑,从而减少围岩应力释放速度,控制变形发展,正台阶开挖法适用于IV级围岩,采用上下台阶错开的开挖方式,将台阶高度控制在35m范围内,确保围岩稳定。全断面开挖法适用于II III级围岩,围岩自稳能力强,可实现快速掘进。开挖循环进尺根据围岩条件确定,V级围岩,进尺控制在0.5m,IV级围岩进尺为1.0m,II级与III级围岩进尺为2.52m。不良地质条件下隧道洞身施工关键技术强调开挖方法与围岩条件的匹配关系^[4],分级开挖技术能够有效适应复合地质条件下的施工需求。

3.2复合支护结构体系设计

复合支护结构体系是由初期支护跟二次衬砌组合而成,能形成多重防护机制来应对不同围岩条件,初期支护包含系统锚杆与钢筋网、喷射混凝土及钢拱架等构件,各部件相互协调作用为围岩稳定提供保障。支护荷载分担情况可用下式来表示:

$$P_{total} = P_{anchor} + P_{shotcrete} + P_{steel} \quad (3)$$

式中: P_{total} 为总支护荷载(kN/m^2); P_{anchor} 为锚杆承载力(kN/m^2); $P_{shotcrete}$ 为喷射混凝土承载力(kN/m^2); P_{steel} 为钢拱架承载力(kN/m^2)。该公式体现出复合支护结构各组成部分荷载分担机制,通过合理配置各支护构件来实现结构整体稳定。图1展示了复合支护结构体系具体的构成形式,V级围岩采用I18钢拱架配合 $\phi 22$ 砂浆锚杆与20cm厚喷射混凝土,II级围岩仅需 $\phi 22$ 锚杆配合8cm厚喷射混凝土,支护强度会随围岩条件进行动态调整。

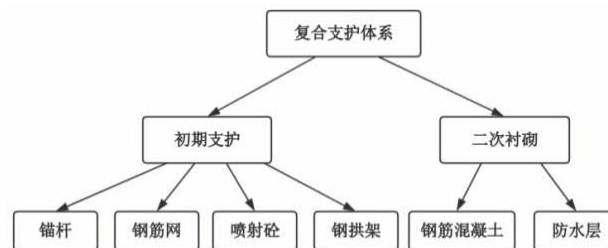


图1 复合支护结构体系

3.3超前支护技术选择

超前支护技术在软弱围岩洞身开挖时起到预加固作用,通过提前改善围岩力学性能来确保开挖安全。管棚支护适用于洞口段V级围岩,采用 $\phi 89$ 钢管且长度在12~30m,外插角是 $1^\circ \sim 3^\circ$ 并在拱顶 150° 范围内布置,超前小导管适用于洞身段软弱围岩,采用 $\phi 42$ 钢管且长度为4.5m,间距是 $40 \times 50\text{cm}$,通过注浆加固围岩。道路隧道工程为了提高其强度,通常采用超前支护施工技术完成^[5],超前支护可通过预应力作用提高围岩整体强度与稳定性,超前支护参数需根据围岩地质条件、埋深与地下水情况综合确定,要在保证支护效果的前提下优化施工效率及成本控制。

3.4 支护参数动态优化

支护参数的动态调整属于复合地质条件下隧道施工的关键技术,应依据围岩变化与施工监测反馈及时优化设计。锚杆长度与间距要按照围岩级别确定, V级围岩锚杆长度为3.5m、间距是100×75cm, II级围岩锚杆长度为3.0m、间距是150×150cm,喷射混凝土厚度需按围岩稳定性进行配置,厚度范围在8~25cm,强度等级全部为C25。支护时机的控制极为重要,开挖后应在围岩应力调整完成前及时施作支护,防止围岩过度变形,钢拱架间距要根据围岩条件作出相应调整, V级围岩间距为75cm, IV级围岩间距为100cm,凭借密度变化来适应不同的支护需求。支护参数的优化要结合施工监测相关数据,根据围岩变形特征与支护结构受力状态开展动态调整。

4 支护效果监测与工程应用评价

4.1 现场监测方案实施

现场监测方案运用多参数综合监测体系,凭借周边位移与拱顶下沉、地表沉降及拱脚下沉这四项必测内容。全面掌握围岩变形规律与支护结构受力状态,监测断面布置依据围岩级别确定间距, V级围岩监测断面间距是5~10m, IV级围岩间距为10~20m, II级与III级围岩间距在20~50m,监测频率随开挖面距离进行动态调整。周边位移监测采用收敛计来测量,于隧道断面设置水平与倾斜测线,拱顶下沉监测使用精密水准仪,测点布设在可避免爆破破坏的安全位置,地表沉降监测在浅埋段设置观测桩,重点关注洞口段地表变形特征。

4.2 围岩变形控制效果分析

围岩变形控制效果通过对比分析各监测断面的变形数据,判断支护技术的有效性 with 适用性。表1呈现出不同围岩级别下的变形控制指标,能够看出围岩变形量随支护强度增加呈递减态势, V级围岩在复合支护的作用下,周边位移收敛被控制在15~25mm的范围内,拱顶下沉量控制在10~20mm的范围内,这些数值均处于安全允许的范围内。变形速率作为评价围岩稳定性的重要指标,稳定围岩的变形速率小于0.2mm/d, IV级围岩经过台阶开挖并及时支护后,变形速率维持在0.5~1.0mm/d的水平,支护时机对变形控制至关重要,开挖后及时施作初期支护能够有效限制围岩过度变形。

表1 不同围岩级别变形控制效果统计

围岩级别	周边位移(mm)	拱顶下沉(mm)	变形速率(mm/d)	控制状态
II级	5~8	3~5	<0.2	良好
III级	8~12	5~8	0.2~0.5	良好
IV级	12~18	8~15	0.5~1.0	稳定
V级	15~25	10~20	1.0~2.0	可控

4.3 支护技术适用性评价

支护技术适用性评价是从施工安全性、经济合理性与技术可操作性三个维度出发,建立起综合评价体系以指导类似工程应用。表2总结了不同围岩条件下支护技术的关键参数以及应用效果,环形开挖留核心土法在 V级围岩中展现出良好的适用性,变形控制效果显著且施工安全可靠,正台阶开挖法适合IV级围岩条件,借助分步开挖以及及时支护,实现了围岩稳定与施工效率的平衡。全断面开挖法在 II级与III级围岩里发挥出快速掘进优势,支护配置相对简化,使得经济效益明显,复合支护结构体系在各级围岩中都显示出良好的适应性,锚杆与喷射混凝土及钢拱架的组合配置能够有效承担围岩荷载。

表2 支护技术参数与应用效果统计

围岩级别	开挖进尺(m)	锚杆间距(cm)	钢拱架间距(cm)	喷射厚度(cm)	施工效率(m/月)	成本指数
II级	2.52	150×150	-	8	125	1.0
III级	2.52	120×120	-	12	125	1.2
IV级	1.0	120×120	100	20	30	1.8
V级	0.5	100×75	75	20	30	2.5

5 结语

复合地质条件下的隧道洞身开挖支护技术依据围岩特性变化进行动态调整与优化配置。广东电白抽水蓄能电站3#隧道洞身开挖支护实践显示,采用分级开挖方法与组合支护技术能有效应对地质条件复杂变化,洞身开挖过程中环形开挖留核心土法在软弱围岩中起到了良好稳定作用,正台阶开挖法在中等稳定围岩中实现了高效施工的目标,全断面开挖法在稳定围岩中保证了快速掘进的进度。超前支护与系统支护有机结合形成了完整防护体系,有效控制洞身围岩变形发展,为类似复合地质条件下的隧道洞身开挖支护工程提供了成功范例。

[参考文献]

- [1]丁秋柏.公路隧道洞身开挖及支护施工技术分析[J].四川水泥,2025,(02):257-259.
- [2]唐浩.复杂地质条件下隧道工程洞身开挖方法及重点技术分析[J].交通科技与管理,2024,5(17):107-109.
- [3]韩丛.不良地质条件下隧道洞身开挖施工关键技术[J].工程建设与设计,2024,(02):108-110.
- [4]王帅.不良地质条件下隧道洞身开挖施工关键技术[J].工程机械与维修,2023,(01):84-86.
- [5]张翠华.道路隧道工程中的超前支护施工技术分析[J].建筑技术开发,2020,47(05):65-66.

作者简介:

谢朝果(1987--),男,汉族,河南南阳人,研究生,中级工程师,任职于中国水利水电第十六工程局有限公司,研究方向:水利工程。