

超前管棚支护在隧洞塌方处理中的应用

——以乔音水库2#隧洞为例

蒙廷禄

河池水利电力勘测设计研究院有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i3.6914

[摘要] 针对水利隧洞施工塌方难题,本文以凤山县乔音水库2#隧洞为例,系统分析塌方成因,比选处理方案,阐述超前管棚支护的施工工艺、力学计算及应用机理。研究表明,该技术通过构筑超前承载体系、改良围岩性能、约束变形及阻断地下水渗流,实现从被动到主动支护的转变,能有效解决不良地质段施工问题,为同类水利隧洞工程提供了可靠的技术参考和实践借鉴。

[关键词] 水工隧洞; 超前管棚支护; 塌方处理; 不良地质; 主动支护; 力学性能

中图分类号: TV672+.1 文献标识码: A

Application of Advance Pipe Shield Support in Tunnel Collapse Treatment Taking Qiaoyin Reservoir No.2 Tunnel as an Example

Yanlu Meng

Hechi Water Resources and Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd.

[Abstract] To address the challenge of tunnel collapse in hydraulic engineering, this study takes the No.2 Tunnel of Qiaoyin Reservoir in Fengshan County as a case study. It systematically analyzes the causes of collapse, compares different treatment approaches, and elaborates on the construction techniques, mechanical calculations, and application principles of advanced pipe shield support. The research findings demonstrate that this technology achieves a transition from passive to active support by establishing an advanced load-bearing system, improving surrounding rock properties, constraining deformation, and blocking groundwater seepage. This effectively resolves construction issues in adverse geological sections, providing reliable technical references and practical insights for similar hydraulic tunnel projects.

[Key words] Hydraulic tunnel; Advanced pipe shed support; Collapse treatment; Unfavorable geology; Active support; Mechanical properties

引言

我国水利隧洞建设常遇喀斯特等不良地质,塌方事故频发。超前管棚支护虽已广泛应用,但在复杂条件下的适应性仍有待优化。本文以凤山县乔音水库2#隧洞为例,针对施工塌方问题,分析工程地质条件与塌方成因,比选处理方案,重点阐述超前管棚支护的施工工艺、力学计算及应用机理,通过构筑超前承载体系实现主动支护,有效解决不良地质段施工难题,可为同类工程提供技术参考。

1 工程概况

1.1 工程基本信息

凤山县乔音水库供水工程是承担全县主要供水任务的民生工程,规划2030年最高日需水量达4.8万m³/d。输水线路全长

19.279km,其中2#隧洞作为关键控制性工程,位于松仁大队至县城公路边,全长1227m,洞内平行布置2根DN700钢管。隧洞进口高程548.00m,出口高程538.00m,纵坡0.81%。断面采用城门型设计,宽3.3m、高3.0m(直墙高1.35m,顶拱半径1.65m),净空满足管道安装、检修及施工运输要求。

1.2 地质条件

2#隧洞地处F4断层西北侧,相距约500~800m,受断层影响较小。地层上覆第四系粉质粘土,厚0.3~3.0m,自然稳定性较好;下伏基岩为三叠系砂岩夹页岩,属较软岩,其中页岩遇水易软化。岩层产状与隧洞交角约22°,节理裂隙发育(密度3~5条/m),岩体完整性较差。地下水以基岩裂隙水为主,补给来源为大气降水,施工中偶见渗水但对整体影响轻微。依据规范,隧洞进出

口强风化段围岩类别为IV类(不稳定),弱风化段为III类(基本稳定)。

2 施工过程中的问题及原因分析

2.1 施工过程中发生的问题

2019年5月,2#隧洞采用钻爆法施工,贯通次日清渣时发现0+650~0+705段发生两处坍塌,总长50m。塌方后围岩持续掉块近两个月,塌腔被块体完全封闭,无法直接探明规模。结合拱架变形观测与地质雷达探测推断,塌方高度超12m,最大宽度8m,塌方体约3000m³,临空面约7000m²。该事故导致施工中断,存在二次塌方风险,严重威胁人员设备安全,若不及时妥善处理,将造成更大经济损失并延误工期。

2.2 塌方原因分析

从地质条件和气候因素来看,该塌方是内在缺陷与外部诱发共同作用的结果。地质上,2#隧洞穿越砂岩夹页岩地层,岩体本身属于中硬岩夹软岩,加之洞线与岩层走向交角仅22°,节理裂隙密集发育,导致局部围岩类别降至稳定性差的IV类。更为不利的是,塌方段分布有亲水性的粉砂质泥岩夹层,在裸露状态下遇水极易软化、泥化,显著降低岩体抗剪强度。气候方面,施工期正值雨季,2019年4~6月累计降雨量超800mm,大量雨水沿发育的节理裂隙渗入围岩,不仅弱化了岩体力学参数,还产生了裂隙水压力,增大了岩体自重,最终打破了洞身原有的应力平衡状态。

从施工爆破扰动和支护时机来看,人为因素直接诱发了围岩失稳。爆破作业监测显示,振动峰值速度达12cm/s,超过该段岩体8cm/s的承受阈值,导致原有裂隙进一步扩张、岩体松动加剧。而本段围岩本身破碎、稳定性差,爆破后未能及时跟进衬砌支护,致使围岩应力持续释放、变形无法有效约束。在应力重分布过程中,岩体从初期的局部掉块逐渐发展为大规模塌方,最终形成累计长度50m、塌方高度超过12m的严重事故,造成施工中断和安全风险。

3 隧洞塌方段处理方案研究

3.1 处理方案

针对2#隧洞塌方段,提出三种处理方案进行技术经济比选。方案一为清除塌方体后衬砌,采用机械配合人工清理约3000m³渣体,每2m进行一次锚喷临时支护,最后施作30cm厚C30钢筋混凝土衬砌。该方案技术成熟、工艺简单,但清渣量大、施工周期长达6个月,围岩暴露时间长,二次塌方风险高,估算投资210万元。

方案二采用超前管棚支护衬砌,无需大规模清渣。首先布设7根Φ42注浆管,对洞周1.5m范围进行固结注浆;再沿拱部155°范围打设23根Φ42超前管棚(仰角10°、间距10~20cm),随后采用短进尺开挖(每循环≤1.0m),辅以16#B槽钢临时支护,每5m施作一次20cm厚C20二次衬砌。该方案施工周期仅3个月,保留塌方体共同承载降低了安全风险,估算投资150万元,较方案一节省60万元,但对施工工艺和注浆质量控制要求较高。

方案三为变更调整洞线,避开塌方段重新选线1350m(较

原线增加123m),新洞线围岩以III类为主,稳定性好。施工流程与方案二相同,投资估算同为150万元。该方案能从根本上规避原有塌方风险,后期运营安全性高,但涉及重新勘察设计及审批,流程繁琐,周期长达8个月,且新洞线可能面临未知地质风险。综合比选,方案二在工期、投资和安全可控性方面优势明显。

3.2 方案选择

综合对比以上三种处理方案的技术可行性、安全风险、施工周期及投资成本,各方案对比情况如下表所示:

方案	技术可行性	安全风险	施工周期	投资成本	核心优势
清除塌方体+衬砌	高	高	6个月	210万元	技术成熟、工艺简单
超前管棚支护衬砌	较高	低	3个月	150万元	安全可控、周期短、投资省
变更调整隧洞洞线	较高	低	8个月	150万元	避开原有风险、运营安全

从对比结果可以看出,超前管棚支护衬砌方案(方案二)具有显著的综合优势:一是投资节约,相比方案一节省60万元,经济效益明显;二是安全可靠,洞顶保留8~10m原有塌方体,可有效消减二次塌方对隧洞衬砌的冲击,保障隧洞稳定,施工过程中安全风险低;三是施工周期短,仅需3个月即可完成处理工作,能快速恢复工程进度,避免工期延误造成额外损失;四是适应性强,针对该工程的地质条件,超前管棚支护能有效改良围岩性能,实现主动支护,从根本上解决塌方问题。

因此,经过综合论证,推荐凤山县乔音水库供水工程2#隧洞塌方段采用超前管棚支护衬砌方案。

4 塌方处理施工方案

4.1 超前管棚临时支护

超前管棚临时支护是塌方处理的核心环节,施工流程包括工作面封闭、超前钢拱架+锚筋支护、超前小导管灌浆、超前管棚施工及洞内开挖与初喷。首先喷射5~10cm厚C20混凝土封闭工作面,并搭设钢管脚手架平台进行测量放样。随后在掌子面前方提前5m架立16#B槽钢拱架(间距20~30cm),配合Φ22锁脚锚筋(长2m)形成联合支护体系。超前小导管采用Φ42×6mm无缝钢管(长3~6m),环向间距100cm、外仰角10~15°,注浆压力0.5~1Mpa,注浆材料为水泥砂浆(水灰比1:1:1)。超前管棚沿拱部155°范围布置,采用Φ42无缝钢管(间距10~20cm、仰角10°),安装后进行二次固结灌浆,管棚端部与钢拱架焊接形成整体棚架体系。洞内开挖采用人工配合机械短进尺作业(每循环≤1.0m),每进尺50cm立即安装钢拱架,每前进5m喷射10cm厚C20混凝土进行初期支护,有效约束围岩变形。

4.2 二次衬砌

钢拱架喷射混凝土完成后,按每5米一段对隧洞进行二次衬砌,衬砌参照全断面衬砌隧洞大样图(B型)施工。二次衬砌采用C20喷射混凝土,衬砌厚度为20cm,采用分层喷射工艺,每次喷射厚度为5cm,分4次完成,最终达到设计厚度。

喷射过程中,控制喷射机工作压力在0.4~0.6MPa之间,喷射距离保持在1.5~2.0m,喷射角度与受喷面垂直,确保混凝土

密实度。二次衬砌与初期支护紧密结合,形成联合支护体系,共同承担围岩压力,确保隧洞长期稳定运行。

5 管棚支护分析计算

5.1 支护作用分析

超前管棚支护体系由超前锚杆、钢拱架、小导管、管棚及喷射混凝土组成,各部分协同作用实现对围岩的有效支护。在洞口段,设置超前锚杆及混凝土套拱后,能够有效“栓住”拱部倒三角形悬石,减少洞顶回填混凝土用量,同时便于提前进洞施工、缩短周期。混凝土套拱不仅支撑第一环超前锚杆,还充当安全防护帽;施工期间防止山顶浮石滚落伤人,运营期间避免杂物下滑堵塞渠道,实现“用小钱、办大事”的经济与安全效益。即便洞口围岩条件较好,仅设置第一环超前锚杆及套拱,也能保护洞口成型完好,为超欠挖控制提供有利条件。

在洞内破碎段,超前锚杆和管棚能有效锚定不稳定岩石,防止掉块和塌方。通过注浆作用,将松散破碎岩体胶结成整体,提高围岩强度和稳定性,使围岩从“荷载体”转变为“承载体”,实现主动支护效果。

5.2 超前锚杆承载力计算及结果分析

为验证超前锚杆支护效果,依据《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB50086-2001)进行承载力计算。计算采用公式 $n(\pi d^2/4)R_g \geq \gamma Vg$,式中锚杆根数 $n=13$ 根,直径 $d=2.2\text{cm}$,设计抗拉强度 $R_g=31000\text{N/cm}^2$,危岩容重 $\gamma=2800\text{kg/m}^3$,重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$ 。代入计算得超前锚杆可支撑危岩体积 $V \approx 55.8\text{m}^3$,折合 55.8t /延米的塌方体重量。按塌方体宽度 7.0m 计算,可支撑塌方体厚度约 8m 。

计算结果表明,本工程塌方段保留的塌方体厚度为 $8 \sim 10\text{m}$,略大于锚杆单独支撑厚度,但结合超前管棚、钢拱架、喷射混凝土等联合支护体系的协同作用,能够有效承担塌方体重量,确保隧洞稳定。该计算验证了超前锚杆支护的安全性和可靠性,只要及时进行喷射混凝土保护、防止围岩应力过度变形,超前锚杆不仅能锚固小块不稳定岩石,还能有效防范较大规模塌方发生,为施工安全提供有力保障。

6 超前管棚应用机理

隧洞超前管棚支护技术是应对松散破碎、软弱富水、高地应力等不良地质隧洞施工的关键超前预支护手段,其核心机理是通过“超前支护+围岩改良+变形约束+隔水防渗”的协同作用,实现掌子面及隧洞周边岩体的提前稳定,为后续开挖作业创造安全可控的施工条件。

6.1 超前承载与围岩稳定

管棚施工需在隧洞开挖轮廓线外侧,以一定的外插角沿隧洞纵向钻孔,植入大直径钢管并形成连续的棚架结构。钢管本身具备优异的抗拉、抗压及抗弯刚度,能够在开挖作业前就构筑起一道纵向承载拱,直接承担掌子面前方围岩的松动压力、坍塌荷载以及浅埋隧洞的地表附加荷载。

这一承载结构可有效抵消围岩初始应力释放产生的挤压作用,避免掌子面出现挤出变形、溜塌甚至大规模塌方等风险。尤

其是在围岩自稳时间极短的不良地质段,超前管棚能够快速形成支护体系,为施工人员和设备提供安全防护,确保开挖作业顺利进行。

6.2 围岩加固与性能改良

钢管植入围岩后,通过管体预设的注浆孔进行高压注浆作业,注浆材料多选用水泥浆、水泥砂浆或化学浆液。浆液在压力作用下,会渗透到围岩的裂隙、孔隙及空洞中,填充岩体的薄弱区域,将原本松散破碎的岩块胶结成一个整体,形成强度高、完整性好的浆体-围岩复合体。

这种改良作用显著提升了围岩的黏聚力、内摩擦角等关键力学参数,大幅增强围岩自身的自稳能力。使原本需依赖外部支护的软弱围岩,转变为具备一定承载能力的支护结构组成部分,实现“主动支护”的效果,从根本上改善了围岩的稳定性。

6.3 变形约束与沉降控制

管棚的整体刚度可有效限制围岩的变形发展。隧洞开挖过程中,围岩会因应力重分布产生径向收敛和纵向位移,若不及时约束,这种变形会持续发展,导致隧洞净空侵限、地表沉降超限等问题。

管棚结构能够通过自身的刚度抵抗这种变形趋势,阻断裂隙的扩展延伸,约束围岩的径向收敛和纵向位移,防止围岩变形持续发展。对于浅埋隧洞而言,管棚还可有效传递围岩压力至隧洞两侧的稳定岩体,减少地表沉降量,保护周边建筑物、道路及管线的安全,降低工程施工对周边环境的影响。

6.4 隔水防渗

在富水地层中,地下水是影响隧洞施工安全的重要因素,易引发涌水、突水等灾害。管棚注浆后形成的浆体结石体可构成一道连续的隔水防渗帷幕,注浆浆液填充岩体裂隙的同时,会阻断地下水的渗流通道,降低地下水向隧洞开挖空间的渗流量。

这一作用不仅可以避免出现涌水、突水等灾害,改善洞内施工环境,确保施工人员和设备安全,还能减少地下水流失对周边水文地质环境的影响,实现工程施工与生态环境保护的协调发展。

综上所述,隧洞超前管棚技术通过多方面的协同作用,实现了不良地质隧洞施工的安全化、高效化,是复杂地质条件下隧洞工程不可或缺的关键技术。

7 结论与展望

本研究以凤山县乔音水库2#隧洞为例,系统研究了超前管棚支护技术在不良地质塌方处理中的应用。结论表明:该技术通过在开挖轮廓线外侧植入钢管形成刚性棚架结构,能有效承受围岩松动荷载,避免大规模掉块和塌方;同时无需大规模清渣,施工周期短、投资成本低,经济效益和安全效益显著。通过高压注浆将松散岩体胶结成整体,实现了从“被动支护”向“主动支护”的转变,提前改善围岩稳定性,将风险隐患消除在萌芽状态。该技术具备承载能力强、围岩改良效果好、变形约束能力突出及隔水防渗等多重优势,适用于松散破碎、软弱富水、高地应力

等不良地质条件。力学计算验证表明,本工程采用的支护体系安全可靠。

展望未来,应结合具体地质条件优化支护参数设计,建立精准设计模型;加强施工过程自动化监测,实时调整参数确保安全;开展支护结构长期性能研究,分析耐久性与稳定性;探索与超前小导管、锚杆锚索等技术的协同应用模式,进一步提升支护效果,拓展应用范围。

[参考文献]

[1]杨新安.超前管棚支护在软弱破碎围岩隧道中的应用

[J].铁道建筑技术,2023,(05):123-126.

[2]张磊.浅埋隧道超前大管棚施工技术研究[J].工程建设与设计,2022,(18):167-169.

[3]刘建国.复杂地质条件下隧洞超前管棚支护技术应用[J].水利水电技术,2021,52(S1):189-192.

作者简介:

蒙廷禄(1983--),男,汉族,广西北流人,本科,高级工程师,主要从事水利水电工程咨询、规划及勘察设计研究。