

红层软岩地区隧洞开挖与初期支护方法研究

张传航¹, 杨帆¹, 张晓川¹, 郭一萌²

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072;

2. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130021)

摘要: 鉴于红层软岩地区隧洞相关围岩特性随时面临高地应力围岩挤压变形问题, 其施工难度大, 开挖支护方案的确定必须考虑到整个施工过程和工程长期运营的安全稳定性。以亭子口灌区一期工程狮子岩隧洞为例, 结合红层软岩地区粉砂质泥岩特性对不同围岩级别的隧洞开挖与支护方案进行了研究, 结果表明: 施工前有效开展超前地质预报、及早判断地质情况, 可以有效应对突发不良地质状况。在隧洞开挖过程中, 根据超前地质预报, 针对破碎围岩可以及时采取超前支护方式、增加超前小导管或小管棚等措施以加强岩体的稳定性, 再逐步进行后续的系统支护施工。

关键词: 红层软岩; 隧洞开挖; 初期支护; 施工方法; 狮子岩隧洞

中图分类号: [TV91]; TV76; TV52; TV554

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2024)02-0085-04

Study on Tunnel Excavation and Initial Support Method in Red-Bed Soft Rock Areas

ZHANG Chuanhang¹, YANG Fan¹, ZHANG Xiaochuan¹, GUO Yimeng²

(1. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072;

2. China Water Northeastern Investigation, Design and Research Co., Ltd., Changchun Jilin 130021)

Abstract: The tunnel in the red-bed soft rock area is faced with the problem of extrusion deformation of high-stress surrounding rock. The excavation construction is extremely difficult. The excavation support scheme must take into account the safety and stability of the whole construction process and long-term operation. Taking the Shiziyan tunnel of the Tingzikou Irrigation Area Project Pase 1 as an example, combined with the characteristics of silty mudstone in red-bed soft rock area, the excavation and support schemes of soft rock tunnel under different surrounding rock levels are discussed. The results show that effective advance geological prediction before construction and early judgment of geological conditions can effectively deal with sudden geological conditions. In the process of excavation, combined with geological forecast, advanced support is carried out in time for broken surrounding rock, and measures such as advanced small pipe or small pipe sheds can be used to enhance the stability of the rock mass, and then subsequent systematic support construction can be gradually carried out.

Keywords: Red-bed soft rock; Tunnel excavation; Initial support; Construction method; Shiziyan Tunnel

1 概述

随着国家经济的不断发展, 区域水资源有效承载能力不足已逐渐成为突出的问题。水资源是人类生存和社会经济发展的基础, 但由于气候变化、水污染、不合理的水资源利用等因素的影响, 许多地区都面临水资源短缺和不均衡的情况。为了解决上述问题, 国家加大了水利工程建设力度。

随着我国水利工程建设向西部山区的进一步深入, 西部地区的山地与高原纵横使隧洞成为水利工程建设常用的手段。但由于西部地区地质条件复杂, 软岩地层分布广泛导致其地质灾害日趋频繁, 相对于一般隧洞而言, 红层软岩地区的隧洞围岩强度低、自稳性差, 在高地应力和地下水的共同作用下极易产生巨大的围岩压力而造成施工进度拖延及安全隐患, 进而制约工程进展^[1-3]。对于

收稿日期: 2024-01-10

软岩隧洞挖掘来说,确保其周围岩石的稳定性和结构的安全性至关重要,其不仅涉及到工程围岩和支撑结构的短期稳定性,也包括工程的长期稳定性。王才品^[4]在研究中选择了某深埋软岩水工隧洞作为研究对象,提出了一种支护理念,即围岩是隧洞承载和防渗的主体,并提出了一种名为“逐次施加、先柔后刚、多步控制”的动态渐进支护方式,旨在解决围岩显著挤压变形的问题;赵利奎^[5]以滇中红层某软岩隧洞为背景,针对不同围岩级别的软岩隧洞进行了分析与研究,建议在围岩自稳条件较差的洞段采取超前支护措施预先加固围岩,然后采用台阶法分部开挖的方式以保证围岩的稳定。笔者以亭子口灌区一期工程Ⅲ标为例,阐述了对红层软岩地区隧洞开挖与初期支护方法进行的研究。亭子口灌区工程是国务院确定的“150”重大水利工程,是四川省“六横六纵”引水补水生态网络的重要组成部分,其主要功能为灌溉和城乡供水。亭子口灌区工程分两期实施,其中一期工程总投资近155亿元,多年平均供水量为3.96亿 m^3 ,设计灌溉面积为135.94万亩(1亩 \approx 0.0667 hm²),供水人口达245万人。狮子岩隧洞作为亭子口灌区一期工程的控制性工程,全长6 583 m,设计流量为19.3 m^3/s ,隧洞的断面形式为4.4 m \times 4.4 m城门洞型,面积为17.28 m^2 ,为西干渠最长的隧洞。狮子岩隧洞所处围岩主要由中厚层~薄层粉砂质泥岩夹泥质粉砂岩组成,其强度较低,全部为Ⅳ、Ⅴ类软岩,其中Ⅴ类围岩的占比高达58.4%。西2+603.4~西4+676.0及西4+809.0~西6+105.0两段共长3 368.6 m为软岩强变形洞段,占隧洞全长的52%;另外还有长度为1 766 m的软岩中等变形洞段和长度为693 m的软岩弱变形洞段。其中西0+671.0~西6+845.2段长6 174.2 m的岩层具有弱膨胀性,其膨胀力达67.4~134 kPa,占该隧洞总长度的94.5%;不良地质形式多样、占比大、施工安全风险高。

针对如此严重的不良地质情况,总承包部十分重视,经多次研究后采取了有针对性的处理措施。

2 施工中采取的超前地质预报措施

为了确保隧洞施工的安全性和信息化的实现,必须在施工过程中加强对施工地质工作的关注,需要对全隧洞进行超前地质情况的预测预报。

这项工作的开展旨在验证和预测隧洞掌子面开挖前的地质环境,以便迅速调整施工策略,进而确保施工过程和结构的安全。根据“安全至上,预防为主”的原则,总承包部采用了基于地质分析的超前地质预报方式,结合前期勘察得到的数据以及其他类似隧洞建设取得的经验,采取物理探测和超前钻孔、深度炮眼联合应用以及各种物探技术互补的方式,实现了地质预报的定性和定量相结合,具体方式介绍于后。

(1) TRT探测预报:TRT探测预报系统系借助地震波反射实现对地质情况的预报。在进行地质预报过程中,工程技术人员依靠激振器或锤击产生地震波,此时的隧洞岩体会将地震波传播,如果隧洞内出现大节理面、溶洞、破碎带和断层等地震界面时即会反射回来部分地震波,经短时间传递后该反射波回到传感器并被接收和记录,叠加地震波后即会得到一个清晰的三维异常体图像,之后,工程技术人员即可对异常体的走向、大小、形状和里程进行判断,并结合区域地质资料对隧洞周围以及隧洞前方的地质特征和构造位置进行确定。

(2)超前地质钻孔:超前地质钻孔是一种地质勘探方法,其通过使用水平钻机在隧洞掌子面进行水平钻探以获取地质信息并预测隧洞前方的地质情况。采用这种方法的主要目的是验证其他预测手段所发现的潜在不良地质体。在进行超前地质钻孔时,钻孔的位置、深度和数量必须根据施工图预测的地质变化位置以及地质专家的综合分析结果确定。通常情况下,地质钻孔的深度约为20~30 m。

(3)加深炮孔的布置:施打炮孔时需要考虑多种因素,包括钻进速率的波动、冲洗液的颜色与流量的变化、钻进压力、岩粉成分、卡钻位置以及钻进过程中的突进现象。此外,还需测量孔内水的体积和压力,以便更好地了解掌子面前方的地质状况。对于炮孔深度的设置可以根据具体需求确定,通常会在掌子面均匀分布;同时,隧洞每轮开挖一循环的位置应在平面适当错开,钻孔的数量则需根据掌子面前方地质条件的复杂程度确定。

基于上述超前地质预报取得的结果,通过综合分析掌子面周围岩石的性质、构造以及地下水

的情况,用以评估掌子面前方的工程地质和水文地质特性,据此制定出下一步隧洞施工方案。

3 隧洞开挖与初期支护方案的应用

对于该工程这种特殊的地质条件,如何确保开挖后洞室围岩的稳定和开挖质量是施工中的重难点问题。如果不采用合理的开挖与初期支护手段很难保证洞室成型,一旦发生坍塌将很难控制。笔者根据狮子岩隧洞所处的地质条件及工程特性,结合隧洞开挖的断面形式将该隧洞的开挖方案确定为全断面法施工,主要采用钻爆工艺进行洞挖作业并通过“超前支护+钢拱架”联合支护技术以保证围岩开挖的稳定。

3.1 超前支护

(1)超前小导管。对于 V 类围岩洞段采用超前小导管方式进行超前支护。施工时在管壁打设溢浆孔,孔径为 6 mm,间距 75 mm,溢浆孔呈梅花型布置。超前小导管沿顶拱 150°范围内设置,端部搭接于型钢拱架腹部导向孔,纵向排距为 2.0 m,环向间距为 30 cm,以 5°~15°外插角打入围岩。超前小导管与线路中线方向平行,钢管顶入的长度应不小于设计长度,其搭接长度不小于 2.0 m,采用直径 50 mm 的钻头成孔。每环小导管施工完成后进行注浆,注浆采用水泥浆单液,注浆压力为 0.3~0.8 MPa,水泥浆的水灰比为 0.5:1~0.8:1,在可注浆范围内应尽量稠密。施工时,灌浆顺序为拱脚向拱部逐管注浆。当注浆压力达到设计压力、同时孔内不再吸浆时持续灌注 5~10 min,结束灌浆。注浆结束后将管口封堵,以防止浆液倒流出管外。

(2)小管棚施工。在隧洞进、出口设置小管棚,将其布置于隧洞进口顶部,与洞口开挖边缘相距 0.3 m。小管棚的环向间距为 0.3 m,排中心距为 0.3 m,小管棚外倾角为 2°。对于其余 V 类围岩部位布置小管棚,管棚的插入方向根据施工掘进方向确定,小管棚与洞顶线的夹角为 5°~15°且以交角尽可能大为原则。小管棚采用直径 42 mm,单根长度为 4.0 m 的钢管,进场后对管棚进行现场加工,小管棚每隔 500 mm 钻梅花形散浆眼,孔径为 6~8 mm,在导管尾部留不钻孔的止浆段;小管棚的纵向搭接长度不小于 2.0 m。成孔安管后、注浆前先进行压水试验,注浆液选择水泥浆,水灰比为 1:1,注浆压力为 0.3~0.5

MPa。在施工过程中,应根据设计参数和围岩(土)情况进行相应的调整以达到预期的效果。注浆的作业顺序采取流水作业,成孔一根,注浆一根。

3.2 洞身开挖

隧洞的开挖应根据不同的围岩分类和监测成果以“短进尺、弱爆破”为原则使用光面爆破技术。光面爆破是控制洞室开挖规格的重要手段,光面爆破的质量好坏将直接决定洞室开挖规格的优劣。同时,为保证开挖后洞室围岩的稳定,要求 IV 类围岩排炮循环的进尺宜为 1.0~2.0 m, V 类围岩的循环进尺为 0.5~1.0 m,每排炮开挖结束后,对稳定性差的局部岩体及时进行随机锚喷支护和系统支护;对于围岩好的洞段则采用系统锚杆、挂网及喷混凝土等措施,其可滞后开挖作业施工。对不良地质洞段的顶拱层采用超前支护方式。

对于隧洞进出口段与断层破碎带,其进尺应取低值,采用短进尺、小药量爆破,以避免影响隧洞围岩及山体边坡的稳定。隧洞开挖过程中,若遇到不良地质体,应减少其对围岩的扰动,采取先护后挖、密闭支撑、边挖边封闭的施工原则,必要时采取预加固等措施。应对洞室掌子面前方的成洞条件、地下水条件进行超前预判,采取有效的措施确保施工安全和顺利施工。施工采用短进尺开挖,其循环进尺为 0.5~1.0 m,直到跨越不良地质段为止。

3.3 洞身支护施工

隧洞的洞身支护对隧洞的施工及运行安全起着重要的作用。考虑到隧洞围岩地质条件,特别是地下水储存、补给与排泄条件、钢筋混凝土衬砌回填的灌浆压力、围岩固结灌浆的压力等因素并参考类似工程经验,该工程的围岩支护设计情况为:

对于 IV 类围岩洞段,其初期支护采用挂网喷锚,在其开挖断面(边墙和顶拱)范围喷 C20 混凝土,厚 15 cm,并挂 $\Phi 6.5$ 钢筋网@20 cm;同时在其顶拱设置 $\Phi 22$ (3 级)钢筋、边墙设置 $\Phi 20$ 系统锚杆, L 为 2.5~3.0 m,间排距为 1.0~1.25 m,底板设置 C15 混凝土垫层,厚 18 cm。对于 IV 类围岩洞段的二期支护,采用 $\Phi 25$ 混凝土全断面衬砌,其厚度根据洞径的不同设置为 0.3~0.4 m。根据地勘报告,部分深埋隧洞随着开挖后的应力

调整有产生塑性变形的可能;对于极高应力及部分高应力洞段的Ⅳ类围岩,在其进行初期支护时,为确保隧洞施工安全,防止围岩变形量过大,增设了 $\Phi 22$ 钢筋格栅拱架@1.0 m。

对于Ⅴ类围岩洞段,其初期支护采用钢拱架支撑、挂网喷锚,在开挖断面(边墙和顶拱)范围喷C20混凝土,厚18 cm,并挂 $\Phi 6.5$ 钢筋网@20 cm,同时在顶拱设置 $\Phi 22$ 钢筋、边墙设置 $\Phi 22$ 系统锚杆, L 为2~3 m,间排距为0.75~1.0 m;钢拱架采用I14型或I16型@0.5~1 m,锚杆与拱架相连,在其底板设置C15混凝土垫层,厚20 cm。根据地勘报告,部分深埋隧洞随着开挖后应力的调整有产生塑性变形的可能;对于具有极高应力及部分高应力洞段的Ⅴ类围岩,在实施初期支护时,为确保隧洞施工的安全,防止围岩变形量过大,增设了 $\Phi 22$ 钢筋格栅拱架@1.0 m。对于地质条件极差的洞段,应考虑在其顶拱 150° 范围内增加超前锚杆支护的方案, $\Phi 25$ 超前锚杆的环向间距为30 cm,长4.5 m,搭接长度为2.0 m,仰角为 $5^\circ\sim 15^\circ$ 。对于覆盖层洞段,应考虑在其顶拱 150° 范围内采用管棚超前支护方案,采用 $\Phi 42$ 超前注浆小导管进行支护,其环向间距为30 cm,管长4.5 m,壁厚3.5 mm,搭接长度为2.0 m,仰角为 $5^\circ\sim 15^\circ$ 。对于Ⅴ类围岩洞段,其二期支护采用 $\Phi 25$ 混凝土全断面衬砌,其厚度根据洞径的不同设计为0.3~0.5 m。

4 结 语

红层软岩洞段的开挖与支护施工是该工程施工中的重难点,其中厚层的粉砂质泥岩夹泥质粉砂岩岩体破碎、强度低,性软,产生轻微扰动后即

有发生较大规模塌方的可能。因此,为了确保施工安全和施工的正常进行,在地下工程施工之前有效开展超前地质预报、及早判断前方地质情况以应对突发不良地质情况及时决策是决定施工成败的关键。在施工过程中,一定要结合超前地质预报获得的信息针对Ⅴ类破碎围岩及时采取超前支护、增加超前小导管或小管棚等措施。对于施工过程中遭遇到的破碎岩体,在其开挖完成后必须尽快对岩面采取封闭措施以加强岩体的稳定性,然后逐步进行后续的系统支护施工。

参考文献:

- [1] 李磊,谭忠盛,郭小龙,等.挤压陡倾千枚岩地层小净距隧道大变形研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(2):276-286.
- [2] 沙鹏,伍法权,李响,等.深埋隧道结构型围岩变形机理及控制研究[J].现代隧道技术,2018,55(3):112-120,159.
- [3] 张传庆,张洋,周辉,等.深埋软岩隧洞围岩变形控制方法[J].现代隧道技术,2018,55(2):28-35.
- [4] 王才品,周勇,魏桦,等.深埋软岩水工隧洞开挖支护设计及工程对策[J].大坝与安全,2021,35(3):32-38.
- [5] 赵利奎,李晓丽,冯立红,等.滇中红层深埋软岩隧洞支护措施研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(增刊2):737-743,761.

作者简介:

- 张传航(1997-),男,山东济宁人,助理工程师,硕士,从事水利水电工程项目管理工作;
- 杨帆(1994-),男,四川南充人,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工安全管理工作;
- 张晓川(1984-),男,宁夏固原人,工程师,学士,从事水利工程建设技术与管理工作;
- 郭一萌(1995-),女,吉林长春人,助理工程师,学士,从事水利水电工程监理工作。

(编辑:李燕辉)

(上接第80页)

参考文献:

- [1] 谢三鸿,尤岭,李世平.南水北调中线工程矩形渡槽设计与施工方案研究[J].人民长江,2010,41(16):32-35.
- [2] 彭彦彬,张彦光.谷拉河大桥混凝土薄壁空心墩爬模施工技术[J].国防交通工程与技术,2005,3(3):52-54.
- [3] 郑云.变截面空心薄壁墩模板支架翻模法施工技术探究[J].黑龙江交通科技,2020,43(9):166-168.
- [4] 王桂军.变截面空心薄壁墩模板设计[J].城市道桥与防洪,2012,29(5):160-163.
- [5] 李轲.变截面圆端空心桥墩可调内模板设计与施工研究

[J].铁道建筑技术,2013,51(增刊2):49-51.

作者简介:

- 高文举(1991-),男,贵州威宁人,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作;
- 王海源(1991-),男,云南红河人,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作;
- 武毓(1992-),男,甘肃白银人,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作;
- 高正鹏(1997-),男,云南保山人,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(编辑:李燕辉)