

# 深埋长大隧洞穿越活动断裂带关键技术 研究及应用

——以云南滇中引水工程狮子山隧洞为例

欧阳林<sup>1,2</sup>, 张世强<sup>2,3</sup>, 任恒钦<sup>1,2</sup>, 蒋继彬<sup>1,2</sup>, 甲茨拉姆<sup>2,3</sup>, 赵磊<sup>2,3</sup>

(1. 云南省滇中引水工程建设管理局, 650032, 昆明; 2. 云南省滇中引水工程建设管理局大理分局, 671006, 大理;  
3. 云南省滇中引水工程有限公司, 650032, 昆明)

**摘要:**云南滇中引水工程狮子山隧洞全长21.17 km, 隧洞最大埋深694 m, 狮子山隧洞4号支洞下游主洞穿越F<sub>16</sub>程海—宾川活动断裂带。该断裂带为晚更新世以来活动断裂带, 具有围岩软、地应力高、渗水量大、泥质夹层多等工程地质特点。施工过程中, 揭露出该活动断裂带围岩破碎、岩体强度极低、滴水/渗水等现象, 出现了日变形量大、初喷混凝土开裂脱壳、塌方等问题, 结合超前地质预报成果, 综合判断该段具有突涌水B级和极严重挤压变形的风险。施工时通过开挖前的超前探测、超前预固结灌浆、超前支护, 开挖时加大预留变形量、优化开挖工法、加强初期支护、增加临时横撑、加强施工期临时监测等, 以及开挖后及时跟进混凝土二次衬砌和开展永久监测等联合施工技术方案, 成功解决了该断裂带面临的涌水突泥、垂直水平位移变形大、围岩极不稳定等特殊不良地质洞段技术难题, 保障了隧洞顺利穿越F<sub>16</sub>程海—宾川活动断裂带, 其关键技术可为大型引调水工程穿越类似活动断裂带隧洞施工提供参考。

**关键词:**深埋长大隧洞; 活动断裂带; 围岩稳定; 关键施工技术; 云南滇中引水工程

**Research and application of key technologies for deep-buried long tunnels crossing active fault zones——a case study of the Shizishan Tunnel in the Central Yunnan Water Diversion Project//OUYANG Lin, ZHANG Shiqiang, REN Hengqin, JIANG Jibin, JIACI Lamu, ZHAO Lei**

**Abstract:** The Shizishan Tunnel of the Central Yunnan Water Diversion Project has a total length of 21.17 km and a maximum burial depth of 694 m. The downstream main tunnel of its No.4 branch crosses the F<sub>16</sub> Chenghai-Binchuan active fault zone. This fault zone, active since the Late Pleistocene, is characterized by soft surrounding rock, high ground stress, abundant seepage, and multiple clay interlayers. During construction, fractured surrounding rock with extremely low rock mass strength, dripping and seeping water, and other unfavorable conditions were encountered, leading to problems such as large daily deformation, cracking and delamination of initial shotcrete, and collapse. Based on advanced geological forecasting, comprehensive assessments indicated risks of B-level sudden water inrush and extremely severe squeezing deformation. By adopting integrated construction technologies, including pre-excitation advanced exploration, pre-consolidation grouting, and advanced support, as well as increasing reserved deformation allowance, optimizing excavation methods, strengthening initial support, adding temporary struts, implementing drainage and pressure reduction, enhancing temporary monitoring during construction, and promptly following up with secondary concrete lining and permanent monitoring after excavation, the project successfully resolved technical challenges such as sudden water and mud inrush, significant vertical and horizontal displacements, and extremely

收稿日期:2025-04-20 修回日期:2025-06-13

作者简介:欧阳林, 高级工程师, 主要从事大型水利工程建设管理、技术应用相关研究。

通信作者:任恒钦, 高级工程师, 主要从事水利水电工程技术相关工作。E-mail:214838646@qq.com

基金项目:云南省重大科技专项计划项目(202002AF080003、202102AF080001)。

unstable surrounding rock. These key technologies ensured the safe crossing of the  $F_{16}$  Chenghai-Binchuan active fault zone and can provide reference for tunnel construction in large-scale water diversion projects through similar active fault zones.

**Keywords:** deep-buried long tunnel; active fault zone; surrounding rock stability; key construction technology; Central Yunnan Water Diversion Project

中图分类号: TV554 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2025)17-0057-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.17.010

我国活动断裂带分布十分广泛,工程建设中经常遇到与活动断裂带相关的工程地质问题,如活动断裂带突然错动引发地表破裂、地震,以及断裂带缓慢运动造成地表错动及地面沉降等。活动断裂带蠕滑错动会引起隧洞围岩、衬砌等工程的结构安全问题,工程建设期也存在变形、塌方、突泥涌水等问题。穿越断裂带是工程建设运行的重大难题,目前在建的云南滇中引水工程输水线路共穿越活动断裂带16条,包括全新世活动断裂带5条(龙蟠—乔后断裂带、丽江—剑川断裂带、鹤庆—洱源断裂带、曲江断裂带、建水盆地东缘断裂带)和晚更新世活动断裂带11条(挖色—宾居断裂带、程海—宾川断裂带南段、元谋—绿汁江断裂带、汤郎—易门断裂带、普渡河断裂带、一朵云—龙潭山断裂带、玉江断裂带、小关—李浩寨断裂带、马王庄—雨过铺断裂带、乍甸断裂带、个旧断裂带),隧洞穿越活动断裂带难题突出。

本文以狮子山隧洞穿越晚更新世活动断裂 $F_{16}$ 程海—宾川活动断裂带工程为实例,简述工程地质特点、初期支护方案,根据实际地质情况对隧洞穿越活动断裂带施工的关键技术进行研究总结,提出穿越活动断裂带成套开挖支护施工技术。

## 一、工程概况

云南滇中引水工程是解决滇中地区水资源短缺的特大型引水工程,工程从丽江市石鼓镇金沙江上游取水,工程多年平均年引水量34.03亿 $m^3$ ,渠首流量135  $m^3/s$ ,末端流量20  $m^3/s$ 。工程是以解决城市生活用水和工业用水为主、兼顾农业和生态供水的国家战略工程,工程建成后可有效缓解滇中地区水资源危机。狮子山隧洞位于大理白族自治州宾川县内,为滇中引水工程大理II段控制性工程,隧洞总长21.17 km,最大埋深694 m,属深埋长隧洞,断面尺寸为9.2 m $\times$ 9.2 m,断面形式为标准的马蹄形断面,衬砌厚度为0.4~0.7 m,断裂带位置衬砌厚度为0.8 m。狮子山隧洞4号支洞下游主洞自DLII47+056~DLII47+146段穿越 $F_{16}$ 程海—宾川活动

断裂带。

## 二、活动断裂带基本情况及存在的问题

### 1. 断裂带基本情况

程海—宾川活动断裂带位于扬子陆板块西缘,控制着区域内的主要强震活动。作为一条兼具正断和左旋走滑的复合型Q3晚更新世活动性断裂带,具备左旋—拉张运动性质,走滑运动速率为2.0~3.0 mm/a,垂直运动速率为1.0~1.4 mm/a。断裂带起于丽江永胜县以北,向南经永胜县程海镇、涛源镇,以及大理州宾川县(见图1),止于弥渡盆地西北桥头哨,并被红河断裂带所截,断裂带全长约200 km。该断裂带从大理州毛栗坡村至苏家庄多处出现清楚的山脊、水系、冲沟的左旋走滑位错。

工程初步设计时,预测程海—宾川活动断裂带在狮子山隧洞主洞DLII47+078~DLII47+133(55 m)位置处相交,实际揭露在DLII47+056~DLII47+146(90 m)位置处相交,与高密度电法反演结果表现出较好的一致性。断裂带宽约90 m,断层产状为 $293^\circ\sim 295^\circ\angle 50^\circ\sim 65^\circ$ ,断裂带南段与狮子山隧洞呈大角度相交。断裂带原岩为黑色薄层钙质页岩夹炭质页岩,末端为白云质灰岩。断裂带内呈褶曲构造、挤压镜面、擦痕发育,围岩为极软岩,构造岩以碎裂岩、碎粉岩和糜棱岩为主,胶结差,岩体破碎。

### 2. 穿越活动断裂带存在的技术难题

工程区50年地震烈度为VIII度,存在高地震烈度工程抗震问题;100年最大水平位错为1.7 m(范围值为1.3~1.7 m),垂直位错量0.3 m,影响带宽度约300~500 m。 $F_{16}$ 程海—宾川断裂带主断带以钙质和灰质页岩为主,属于极软岩;局部受构造作用影响存在糜棱岩化特征,软弱挤压泥化夹层发育,泥质填充,岩体破碎呈散体结构,线状流水发育。断裂带上盘残留较高构造应力,开挖时应力释放使围岩出现较大的应力松弛现象,岩体遇水软化,围岩极其不稳定,为V类特殊不良地质段。

施工开挖揭露该段位于 $F_{III-102}$ 与 $F_{16}$ 程海—宾川



图1 程海—宾川活动断裂带卫星影像

活动断裂带构造夹持的破碎带中,存在两组构造挤压泥化条带的四组构造面:①纯泥型的构造挤压泥化条带 $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\angle 65^{\circ}\sim 82^{\circ}$ ,微起伏光滑发育,发育镜面及擦痕;②泥夹岩屑型的构造挤压泥化条带 $40^{\circ}\sim 52^{\circ}\angle 51^{\circ}\sim 63^{\circ}$ ,延伸长度大于10 m,微起伏光滑发育,发育擦痕及挤压镜面现象;③纯泥质充填的页理面产状 $67^{\circ}\sim 85^{\circ}\angle 42^{\circ}\sim 58^{\circ}$ ,延伸长度大于10 m,微张 $0.5\sim 2\text{ mm}$ ,平直光滑发育;④泥质充填的挠曲发育产状 $122^{\circ}\sim 138^{\circ}\angle 22^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ,延伸长度大于10 m,张开宽度 $1\sim 3\text{ mm}$ ,微起伏光滑发育。该段隧洞围岩岩性为钙质页岩、炭质页岩,属极软岩,局部经构造动力作用变质,出现糜棱岩化特征;受构造挤压影响,软弱挤压泥化夹层发育,岩体破碎,呈散体结构,先期应力荷载强,开挖后应力释放,围岩承受的变形松弛荷载较强,顶拱及掌子面发育线状流水,岩体遇水软化严重,围岩极不稳定,为V类围岩不良地质洞段。继续开挖穿越 $F_{16}$ 程海—宾川活动断裂带,根据取芯钻孔揭露,从里程DLII47+056进入 $F_{16}$ 程海—宾川活动断裂带,断层上盘残留较高构造应力,存在穿越活动性断裂抗剪断问题,以及施工涌突水、软岩(含断裂带破碎带)大变形、高外水压力、围岩稳定问题。根据超前地质预报,判定该段存在B级(高风险)突泥涌水风险。

掘进过程中通过超前探、超前灌、超前支护等处理措施,有效避免了突泥涌水事件发生,但遇到长距离连续软岩大变形问题,实测最大变形量达1.5 m,因连续大变形段拆换拱作业导致年开挖进尺仅20余m。

### 三、穿越活动断裂带的施工关键技术

#### 1. 设计阶段对活动断裂带进行针对性设计

根据前期勘察资料,设计方案对断裂带的初期支护进行了加强处理。具体措施为:初期支护采用 $V_{H10}$ 支护形式,即开挖前顶拱先行施作 $\Phi 108$ 超前大管棚进行支护, $L=12\text{ m}$ ,管棚间距50 cm、排距9 m,搭接长度3 m(或采用 $\Phi 42$ 超前注浆小导管, $L=4.5\text{ m}$ ,小导管环向间距为30 cm,排距3 m,搭接长度0.6 m);开挖 $12.4\text{ m}\times 12.4\text{ m}$ 马蹄形断面,预留10 cm变形量;采用20号工字钢支撑(间距50 cm),底脚加横撑,纵向采用 $\Phi 25$ 钢筋连接;顶拱、边墙施作 $L=6\text{ m}$ 、 $\Phi 25$ 让压锚杆,锚杆按照 $1.25\text{ m}\times 1.25\text{ m}$ 呈梅花形布置;喷20 cm厚C20粗纤维混凝土;在腰部及底角位置分别打设锁脚锚杆,锚杆直径为 $\Phi 25$ ,锚杆长度为4.5 m,每榀8根;底板在采用20号工字钢支撑成环后再浇筑20 cm厚C20混凝土底板保护层,二次衬砌采用80 cm厚钢筋混凝土。

#### 2. 实施阶段采用的施工技术措施

现场施工中通过开挖前的超前预报探测和超前施工,开挖时加大预留变形量、优化开挖工法、加强初期支护、开展变形监测、增加临时横撑,开挖后及时跟进混凝土二次衬砌和开展永久安全监测等联合施工技术(见图2),提高了极端不良地质洞段的围岩稳定性,避免了突泥涌水的发生,提升了不良地质洞段的施工工效,保障了隧洞安全穿越该活动性断裂带。

##### (1) 开挖前采取的超前处理措施

①开展超前预报探测前方地质状况。实施超前地质预报,探测断裂带的性质、产状、富水情况及其在隧洞中的分布,以及断裂破碎带的规模和物质组成等,并分析其危害程度。

现场超前地质预报在地质调查法基础上,以TRT6000长距离弹性波反射法探测为主,结合地质雷达法或瞬变电磁法探测围岩破碎情况及地下水发育情况,并采用超前地质钻探相互验证。

预报里程为DLII47+012.4~DLII47+115.0,预报情况如下:

DLII47+012.4~DLII47+055段,推测为断裂影响带和破碎带,其中DLII47+012.4~DLII47+025为断裂

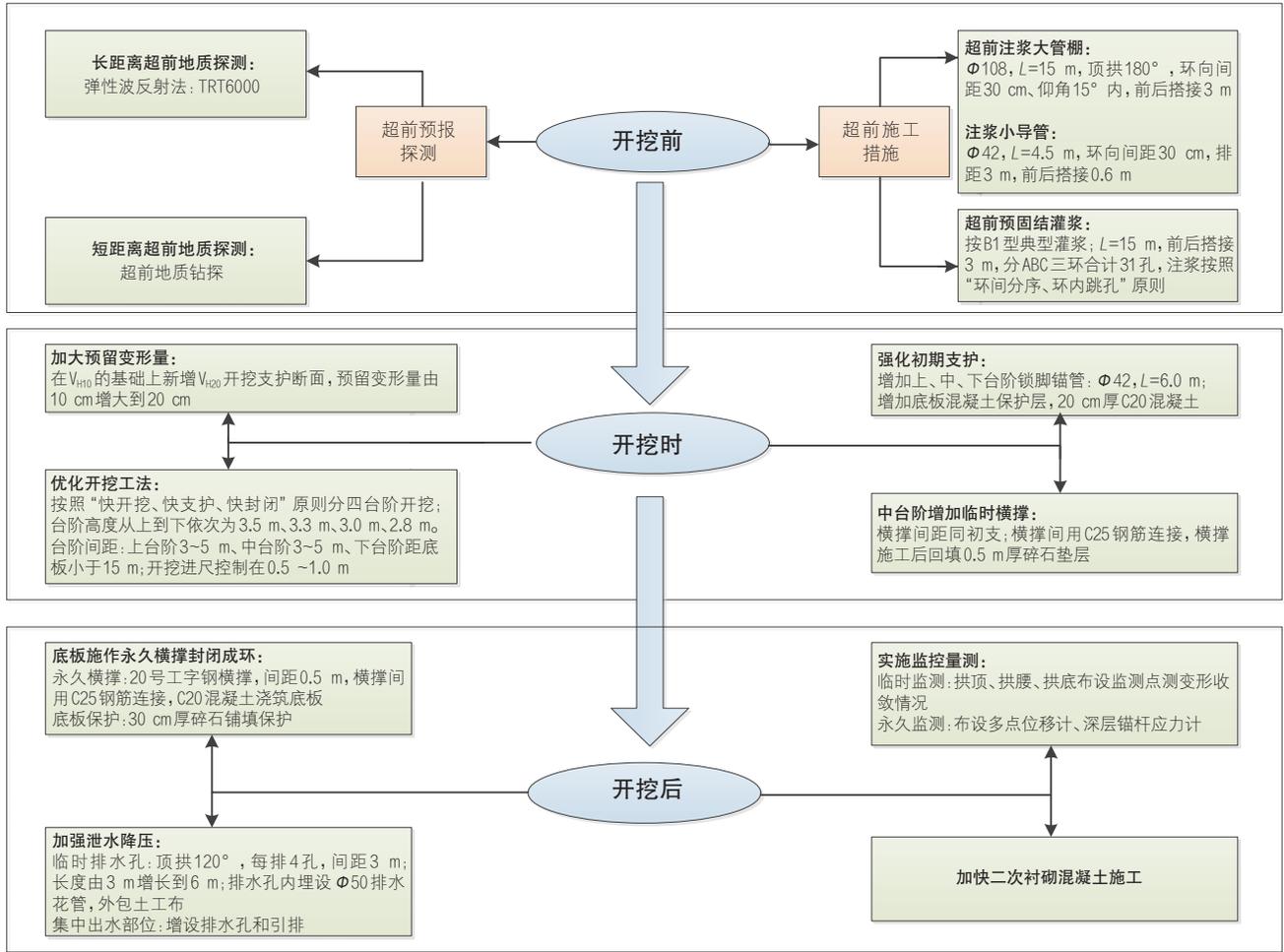


图2 穿越断层影响带施工技术流程

影响带,该段地层岩性为D11钙质页岩,地质条件与掌子面相同;DLII47+025~DLII47+055为破碎带,该段岩性为断裂带角砾岩、断裂带泥,岩体结构破碎,呈散体结构,岩体强度极低,存在严重挤压变形问题,围岩极不稳定,易发生塌方,涌水突泥风险较高。

DLII47+055~DLII47+080段,推测为 $F_{16}$ 影响带夹断裂带破碎带,围岩极不稳定,掌子面顶拱极易发生掉块、塌方失稳破坏,存在滴水/渗水现象,具有涌水突泥的风险。

DLII47+080~DLII47+115段,推测为 $F_{16}$ 破碎带夹影响带,地层岩性为断裂带泥、构造片岩,岩体结构破碎,主要呈包石状,泥化夹层发育。岩体强度低,结构松弛,为特殊不良地质洞段,围岩极不稳定,施工中极易出现坍塌和严重挤压变形,涌水突泥风险高。

考虑到长距离超前地质预报在预报精度上存在一定的局限性,为动态优化设计方案并为施工方案提供技术依据,现场采用超前地质钻探对前方地质情况进

行综合分析验证,情况如下:

根据DLII46+985.5~DLII47+027.5段( $F_{16}$ 程海—宾川活动断裂带及其影响带,已开挖揭露)施作不取芯超前探孔,钻孔数量为3个,分布在顶拱和两侧拱腰以上部位,外插角在 $20^\circ$ 左右。

根据DLII46+985.5~DLII47+035.5、DLII47+028.5~DLII47+058.5段钻芯取样,取芯时DLII47+88.5孔内有水,推断出围岩为钙质页岩、炭质页岩,开挖过程中页岩为薄片状,在水的作用下易发生塌方甚至突泥涌水。钻芯取样结果证实超前探测对后续初期支护参数动态调整具有指导作用。

后续在开挖过程中,超前注浆大管棚及超前预固结灌浆的钻孔均以一定外插角度钻进,对钻孔的记录分析能进一步探明活动断裂带发育情况,为精准探测和及时动态调整设计参数提供了条件。钻孔过程中对钻渣渣样明显变化、钻速骤增、跳钻、卡钻以及钻孔内回水量、水色、水中泥沙含量变化等位置进行重

点记录和分析。

②拱顶施作超前注浆大管棚形成棚护作用。大管棚是被广泛应用于隧道工程的一种预支护技术,主要应用于软弱破碎地层、浅埋地段或地表沉降敏感区域的加固,核心作用是通过超前支护形成“棚架效应”,改善围岩受力状态,确保开挖安全,力学本质是“主动加固”与“被动承载”相结合。大管棚的效能发挥高度依赖设计与施工的精细化程度,需结合具体地质条件动态优化;实施过程中可通过大管棚开花孔的方式注浆,填充钢管及周围裂隙,固结松散岩土体,提高地层自稳性,形成超前支护效应,构筑管群形成“虚拟拱壳”,将上部荷载通过管棚拱壳传导至两端拱脚直至深层稳定地层,减小开挖卸载引起的应力释放。

从DLII47+048.5开始,按照每循环15 m在顶拱180°范围内施作 $\Phi 108$ 超前注浆大管棚,管棚环向间距30 cm,仰角控制在15°以内,单环施作66根;大管棚管身段开花孔(孔口尾端2 m范围内不设孔,作为止浆段),花孔直径15 mm,孔间距0.3 cm,呈梅花形布置。为保证管棚周边一定范围内形成固结体以防止细小、砂状断裂带物质流出,管棚每循环施作15 m,第二循环与第一循环超前注浆大管棚相互搭接3 m;采用 $\Phi 42$ 超前注浆小导管,长4.5 m,小导管环向间距为30 cm,排距3 m,搭接长度0.6 m与大管棚一起进行支护,形成棚架支撑作用。

③掌子面前方进行超前预固结灌浆加固围岩。超前预固结灌浆的核心价值在于通过浆液渗透进入岩体裂隙后固化,形成纵横交错的“固结网络”,将松散岩块重新胶结为整体,主动改良围岩本性,通过“网络骨架→弱面强化→承载环形成”的力学链,实现“治岩于未塌”;本质是通过注浆固结体恢复岩体的连续性,使围岩重新具备承受三维地应力的能力,抑制开挖卸荷引发的应力释放和塑性区扩展。形成的承载环与后续锚杆、

钢拱架等协同工作,优化荷载传递路径(地应力→加固环→支护结构),避免因局部应力集中导致失稳。其效果体现为冒顶控制或沉降抑制,且可通过减少返工与支护成本重塑软弱围岩隧道的建造逻辑。

现场根据地质预报 $F_{16}$ 程海—宾川活动断裂带为突涌水B级风险,为提高超前注浆大管棚成孔率,从DLII47+048.5开始按照超前处理—掘进支护—超前处理—掘进支护的循环工序,以每循环15 m对掌子面前方现场采用全断面超前预固结灌浆措施,对活动断裂带进行超前加固及堵水处理(结合超前注浆大管棚施工,超前大管棚 $L=15$  m,排距12 m,搭接3 m;超前预固结灌浆循环注浆15 m,开挖12 m,预留3 m作为下一循环超前预固结灌浆的止浆岩盘)。超前预固结灌浆孔口布置及角度按照其典型设计B1型施工,灌浆孔布置于起拱线以上范围(见图3)。

超前预固结灌浆加固范围为起拱线以上、开挖轮廓线5 m范围内,确保拱部围岩形成固结圈,防止线状流水从拱圈部位流出;灌浆孔浆液扩散范围按照100 cm

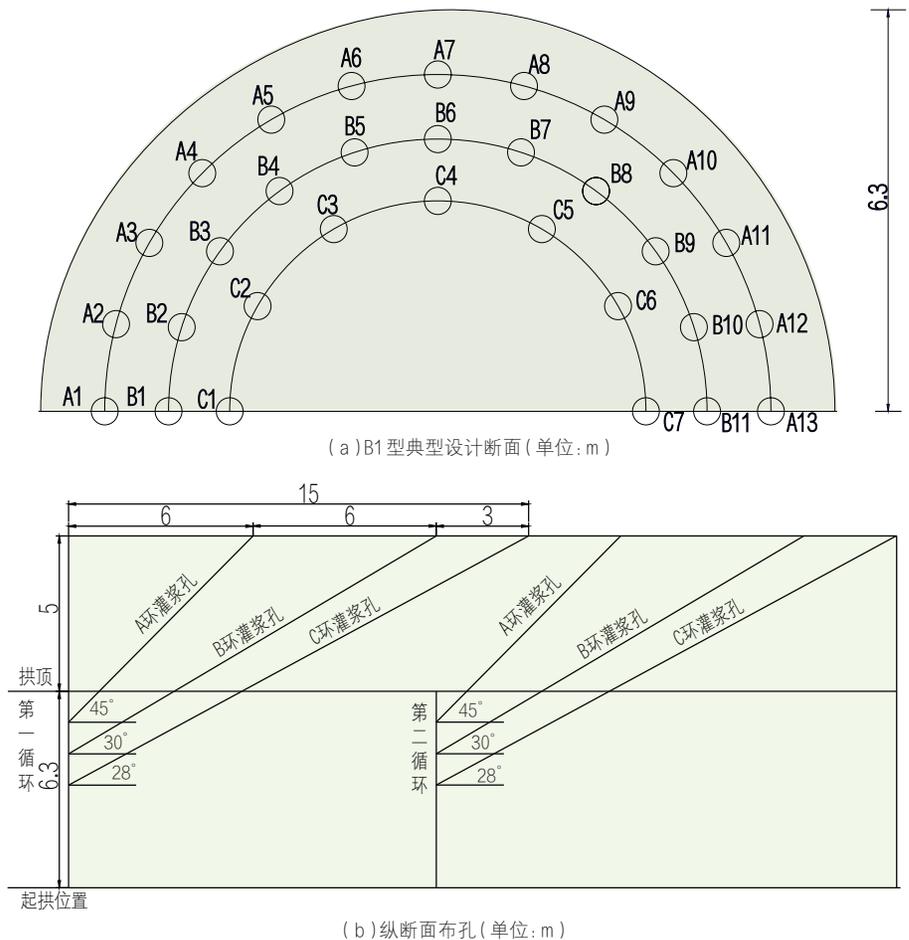


图3 超前预固结灌浆各断面示意

设计,共三环灌浆孔,其中A环13孔、B环11孔、C环7孔,合计31孔;注浆按照“环间分序、环内跳孔”原则进行注浆。施工时先施工A环孔,后施工C环孔,最后对B环孔进行钻孔注浆,钻孔注浆原则按照钻一孔注一孔的顺序进行施工。

(2) 开挖时采取的强化技术措施

①加大预留变形量。活动断裂带原设计采用 $V_{H10}$ 型断面开挖支护形式:开挖 $12.4\text{ m} \times 12.4\text{ m}$ 马蹄形断面,开挖揭露后进行围岩变形收敛监测,发现出现设计预留变形量不满足变形控制要求的情况,及时将预留变形量由 $10\text{ cm}$ 增大到 $20\text{ cm}$ ,采用 $V_{H20}$ 型开挖支护断面,相应将开挖断面尺寸调整为 $12.6\text{ m} \times 12.6\text{ m}$ 。实际开挖过程中应继续结合围岩变形监测分析成果进行动态调整。

②优化开挖工法。现场开挖掘进过程中遵循“应力释放原理”,除采用加强初期支护抵抗变形外,对整个开挖断面进行分台阶(上、中、下、底板四台阶)和分段开挖支护,逐步控制释放应力。现场上、中、下及底板台阶高度分别为 $3.5\text{ m}$ 、 $3.3\text{ m}$ 、 $3.0\text{ m}$ 及 $2.8\text{ m}$ 。各台阶的间距分别为上台阶 $3\sim 5\text{ m}$ 、中台阶 $3\sim 5\text{ m}$ 、下台阶与底板距离小于 $15\text{ m}$ 。每台阶循环开挖进尺控制在 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ 。同时按照“快开挖、快支护、快封闭”施工原则,尽量缩短围岩外露时间。现场每台阶开挖完成后在围岩能够自稳的时间内及时进行初期支护,避免长时间暴露造成掌子面失稳或溜塌。

③强化初期支护。开挖掘进进入断裂带后,根据超前地质预报及施工期监控量测情况,现场采用 $V_{H20}$ 型支护形式开挖支护断面;同时在上、中、下台阶钢支撑底脚部位分别施作4根 $\Phi 42$ 注浆锁脚锚管,长度为 $6\text{ m}$ ;底板部位清基后浇筑 $20\text{ cm}$ 厚C20混凝土保护层。

④增加临时横撑。临时横撑在工程施工中扮演着至关重要的角色,其核心价值在于提供支点、缩短有效长度、形成空间协同体系、限制位移、提高稳定性、优化内力分布等,以确保结构稳定安全,严格控制变形,优化结构受力状态,保障施工顺利进行。

现场施工过程中,当开挖至中台阶后出现日变形量超过 $4\text{ cm}$ 、总变形量接近 $10\text{ cm}$ 、初期支护喷射混凝土开裂脱壳等情况,现场立即采用间隔扣槽的施工方法增加20号工字钢临时横撑进行应急处置。临时横撑间距与初期支护相同,横撑间通过 $\Phi 25$ 钢筋连接,连接钢筋间距为 $0.5\text{ m}$ ,横撑施工完成后回填 $0.5\text{ m}$ 厚的碎石垫层,确保可正常行车。

(3) 开挖后采取的加固技术措施

①施作永久横撑封闭成环。考虑活动断裂带垂直位移、水平位移较大,大埋深地应力较大等因素,隧洞在施工期存在极严重挤压变形风险,在该段隧洞底板设置了20号工字钢永久横撑,间距 $0.5\text{ m}$ ,横撑间采用 $\Phi 25$ 钢筋连接,连接钢筋间距为 $10\text{ cm}$ ,永久横撑施工完成后采用C20混凝土进行底板垫层浇筑,确保初期支护封闭成环。永久横撑在底板开挖支护完成后及时施工,为避免行车碾压对永久横撑造成扰动破坏,在上重车之前用 $30\text{ cm}$ 厚碎石进行铺填,碎石上方回填 $50\text{ cm}$ 厚的碎渣。

②加强泄水降压。该活动断裂带为中等透水,突泥涌水风险等级较高,为避免地下水因排水不畅形成高承压水,该段临时排水孔在原设计 $L=3\text{ m}$ 的基础上增加至 $6\text{ m}$ ,为保证排水孔不被淤堵,排水孔钻设完成后于孔内埋设 $\Phi 50$ 排水花管,外包土工布。排水孔于拱部 $120^\circ$ 范围设置,每排4孔,排距 $3\text{ m}$ 。施工过程中在集中出水部位及时增设排水孔并进行引排。

③实施监控量测。一是开展施工期临时监控量测。随着开挖支护的进一步揭露,活动断层将对相邻已开挖未衬砌洞段的稳定性产生一定影响。因此穿越活动断层施工期间至二次衬砌施工前,对活动断层及影响带收敛变形等加强监测,在隧洞拱顶、拱腰及拱底布设 $1\sim 3$ 个监测点;根据现场分台阶开挖揭露情况及监测需要,现场临时确定监测部位、监测数量及监测内容。已开挖洞段从DLII46+048.5开始按照 $5\text{ m}$ 一个监测断面进行布置(见图4)。

二是实施永久安全监测。为长期监测该洞段的情况,并为后续运行提供相应的数据支撑,在

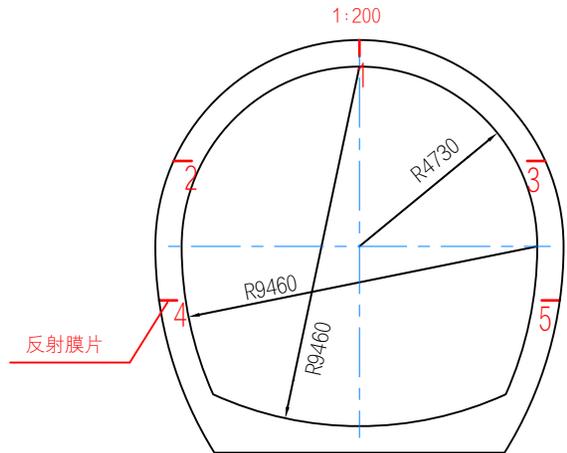


图4 监测断面点位布置示意(单位:cm)

DLII46+910、DLII46+978位置布置两个永久监测断面。两个断面都布置了多点位移计和深层锚杆应力计等,其中DLII46+978断面还增设了渗流渗压计。各监测断面的监测布置情况如下:

DLII46+910断面在左右拱腰及拱顶各安装埋设1套多点位移计,测点编号为MWZ1、MWZ2、MWZ3;在拱腰、拱肩及拱顶各安装埋设1组锚杆应力计,测点编号为MGZ1、MGZ2、MGZ3、MGZ4、MGZ5。

DLII46+978断面在拱腰及拱顶各安装埋设1套多点位移计,测点编号为MW23、MW24、MW25;在拱腰、拱肩及拱顶各安装埋设1组锚杆应力计,测点编号为MG38、MG39、MG40、MG41、MG42;在拱腰及拱顶各安装埋设1支渗压计,测点编号为E33、E34、E35。

④加快二次衬砌混凝土施工。施工质量和施工组织效率是施工安全的重要保证,活动断裂带对初期支护、二次衬砌在施工质量、施工组织上提出了刚性要求,因此初期支护完成后须尽快完成该段二次衬砌施工。在二次衬砌施工过程中,先通过仰拱栈桥施工底板和小边墙,后通过混凝土台车进行成环浇筑;浇筑完成后及时做好混凝土养护和拆模后的底板保护。

## 四、实施效果

### 1. 施工期临时监测情况

施工期临时监测按照“开挖支护后7天内每天观测2次、7天后15天内每天观测1次、掌子面距离观测断面大于2倍洞径后每2天观测1次、变形稳定后每周1次”进行监测,直至进行二次衬砌时停止观测;在监测数据异常时增加观测频次,掘进作业期间安排专人对掌子面及附近30m范围内进行巡查,发现异常声响、喷射混凝土脱落开裂、渗水变大、水流变浑浊等情况时,及时预警并启动相关应急预案。DLII47+048.5~DLII47+148.5段围岩布置有20个监控量测断面,布置了拱顶沉降点和2条水平收敛监测线。

根据施工期的临时监测,实测收敛变形最大值为501.0mm,月收敛变形量为132.3mm,平均收敛速率为4.41mm/d;出现收敛变化较大的时段主要受下台阶开挖影响,其余时段各收敛测点变化较小。

### 2. 永久安全监测情况

永久安全监测主要对围岩变形、锚杆、钢筋计、应力计等进行监测,然后分析围岩变形情况和结构受力情况。观测频次按“衬砌完成后1周内1天2次、1周后15天内1天1次、掌子面距离观测断面大于2倍洞径后每2天观

测1次、变形稳定后每周1次”进行监测。当监测数据出现异常时增加观测频次。作业期间存在异常情况时及时预警。截至2025年3月20日两个监测断面实测结果如下:

①围岩内部变形监测情况。两个监测断面多点位移计当前值介于-0.4(MWZ1左拱腰10m)~33.8mm(MW23左拱腰孔口)之间;受底板开挖(2021年3月31日开挖)影响狮子山4号支洞DLII46+910围岩变形均有不同程度增大,支护后围岩变形未见有急剧增大趋势,近期围岩变形量测值均较小;月变化量介于0~0.4mm(MWZ3右拱腰10m)之间;围岩位移变化量较小,围岩变形趋于稳定,未见异常情况。

②锚杆应力监测情况。监测断面锚杆应力介于-400.9(MGZ2左拱肩2m)~269.7MPa(MGZ5右拱腰4m)之间,锚杆应力月变化量介于-1.3(MGZ2左拱肩4m)~1.1MPa(MG39左拱腰4m)之间;锚杆在永久监测设备安装1个月内应变变化速率和变化量均较大,后续监测变化较小,趋于稳定。数据显示锚杆应力出现负值以及从正值到负值变化的现象,初步分析认为可能由以下原因造成:一是锚杆在设计深度范围内与围岩一同形成“承载拱”,当开挖形成的围岩松动圈较大时,深部不稳定岩体向临空面变形,压力传递到锚杆,导致锚杆受压出现负值;二是开挖形成松动圈后,围岩整体向临空面变形,但岩体本身存在裂隙、结构面(如岩层面、节理面等),导致局部范围内岩体变形同时存在相对拉伸和相对压缩的情况,同一根锚杆上不同测点对应拉伸或压缩状态时会出现负值;三是隧洞在活动断裂带的影响下不均匀受力,使得锚杆应力变化,应力由正值变为负值。

③钢结构应变监测情况。DLII46+978监测断面钢板应变计月变化量介于-64(GB21右边墙)~48 $\mu\epsilon$ (GB20拱顶)之间,钢板应变计月变化量介于-8(GB19左边墙)~33 $\mu\epsilon$ (GB20拱顶)之间。拱架在永久监测设备安装1个月内应变变化量较大,后续监测变化值变化较小,GB6右边墙监测点在回填灌浆时出现应力异常情况;其余监测点和监测时段未出现异常。

④钢筋应力监测情况。监测断面钢筋应力介于-20.1(R36底板)~31.6MPa(RZ4右边墙)之间,钢筋应力月变化量介于-5.4(R24右边墙)~2.2MPa(R23RZ3右拱肩)之间。在永久监测设备安装1~2个月内持续增长,后续监测有缓慢减小趋势,总体变化较小,未见异常情况。狮子山隧洞钢筋计特征值统计表详见表1,钢筋典型应力-时间过程曲线见图5。

表1 狮子山隧洞钢筋计特征值统计

测点编号	埋设位置	初值日期	应力 (MPa)						月变化量 (MPa)
			最大值	出现日期	最小值	出现日期	监测值	出现日期	
RZ1 左拱肩	DL II 46+910	2021/10/13	32.8	2025/2/17	-4.8	2023/7/25	2.7	2025/2/17	0.8
RZ2 拱顶		2021/10/13	45.4	2025/2/17	-2.2	2021/10/13	12.5	2025/2/17	0.5
RZ3 右拱肩		2021/10/13	33.8	2025/2/17	-7.3	2024/8/9	-1.8	2025/2/17	2.2
RZ4 右边墙		2021/6/7	53.9	2025/2/17	0	2021/6/7	31.6	2025/2/17	-5.4
RZ5 底板横向		2021/6/7	34.2	2025/2/17	-12.5	2024/10/18	-8.6	2025/2/17	1.5
RZ6 左边墙		2021/6/7	30.5	2025/2/17	0	2021/6/7	17.8	2025/2/17	-0.2
R33 左拱肩	DL II 46+978	2022/5/29	8.1	2023/1/16	-5.9	2023/7/24	4.6	2025/2/17	2.1
R34 拱顶		2022/5/29	10.9	2022/11/28	-8	2024/10/25	-4.8	2025/2/17	1.5
R35 右拱肩		2022/5/29	10.1	2022/6/28	-1.2	2023/7/24	8.4	2025/2/17	2
R36 底板		2021/6/22	2	2021/7/4	-23.2	2025/1/10	-20.1	2025/2/17	1.2



图5 狮子山隧洞DLII46+910监测断面钢筋典型应力-时间过程曲线

⑤混凝土应变监测情况。DLII46+978监测断面应变计混凝土应变值介于-364(S140底板)~177  $\mu\epsilon$  (S235垂直左拱肩)之间,混凝土应变月变化量介于-39(S135左拱肩)~55  $\mu\epsilon$  (S235水平左拱肩)之间。混凝土在永久监测设备安装后应变持续减小,且总应变量较小,未见异常情况。

### 3. 监测效果评价

综合施工期临时监测和已埋设的永久安全监测设施的数据表明:施工期间加强初期支护措施后,监测数据较原监测数据变化较小,通过加强初期支护确保了施工的安全;永久安全监测显示岩体内部变形、钢筋应力变化、混凝土内部温度、压应力等数值均变化较小。根据监测情况和围岩变形规律、衬砌结构受力变化分析可知,围岩变形、钢拱架、混凝土存在监测前期(1~2个月内)监测数据变化较快,说明前期存在围岩变形、结构受力不均;后期监测显示监测项目的变化速率和变化量均较小,说明后期围岩变形、隧洞结构受力基本趋于稳定。

## 五、结论

本文依托滇中引水工程狮子山隧洞4号支洞下游主洞段穿越 $F_{16}$ 程海—宾川活动断裂带开挖支护方案的工程实践,对穿越活动断裂带遇到不良地质问题时所采用的开挖支护处置关键技术进行了阐述分析,形成了相关结论。

①应用综合超前地质预报技术可有效探测前方地质情况,隧洞实际开挖揭露情况与设计单位初步设计中的地质描述基本一致。

②通过实施超前探测、超前预固结灌浆、超前支护等处理和开挖时加大预留变形量、优化开挖工法、强化初期支护、增加临时横撑,以及掘进后施作永久横撑、加强泄水降压、实施监控量测、及时跟进二次衬砌混凝土等措施,有效降低了施工风险,目前隧洞已成功穿越 $F_{16}$ 程海—宾川活动断裂带。

③经该工程实践,提出了穿越活动断裂带开挖前、开挖时、开挖后采用的成套开挖支护施工技术,可为后续隧洞穿越活动断裂带提供参考。

### 参考文献:

[1] 薛少强,张传庆,肖成志,等.输水隧洞赋存活断层蠕滑位移模式研究[J].人民长江,2019,50(11):149-155.  
 [2] 吴中海.活断层的术语、研究进展及问题思考[J].地球科学与环境学报,2018,40(6):706-726.  
 [3] 曹瀚天,朱良毅,杨发友,等.基于改进P&O的最大功

- 率点追踪算法[J].价值工程,2020,39(29):190-191.
- [4] 刘慧.丽香铁路变形隧道初期支护加固措施研究[J].建筑机械,2022(3):50-52.
- [5] 周云,房艳国,王家祥,等.滇中引水工程穿过活动断裂防震抗震思路研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(S1):7-11.
- [6] 吴滔.大埋深引水隧洞穿越断裂带围岩变形规律及稳定性评价研究[D].济南:山东大学,2023.
- [7] 赵坤,陈卫忠,赵武胜,等.逆断层错动作用下隧道衬砌铰接设计参数研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(S1):3411-3421.
- [8] 欧阳林,胡军,蒋继彬,等.LED灯带在隧洞施工中应用的研究[J].水利技术监督,2023(3):269-273+281.
- [9] 瞿霜菊,黄辉,曹正浩.云南省滇中引水工程规划研究[J].人民长江,2013,44(10):80-83.
- [10] 张学军,胡军,张泽甫,等.深埋特长隧洞TBM施工超前地质预报关键技术研究[J].铁道勘察,2023,49(3):48-55.
- [11] 胡长明,傅庭鹏,刘俊峰.隧洞穿越断层综合超前地质预报方法研究[J].施工技术(中英文),2025,54(4):74-81.
- [12] 李智超,吴中海,卢海峰,等.程海断裂带期纳—宾川段晚新生代活动特征及其对川滇块体挤出的构造指示[J/OL].地质学报,1-20[2025-05-19].<https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024403>.
- [13] 王晋南,皇甫岗.程海断裂尾端侧向迁移与地震的相关性[J].地震研究,1992(2):180-185.
- [14] 杜泽,王品,官琦.程海断裂带金沙江段滑坡群的发现[J].科学技术与工程,2012,12(33):8815-8821+8825.
- [15] 秦德先,燕永锋,林幼斌,等.程海断裂带玄武岩及其成矿[J].有色金属矿产与勘查,1999(6):373-377.
- [16] 李鹏伟.绳索取芯技术在活动性断裂带中的应用研究[J].中国水能及电气化,2022(10):16-21.
- [17] 罗中权,张学良,王丽娟.滇中引水工程大理Ⅱ段隧洞断面监测成果分析评价[J].云南水力发电,2022,38(6):57-61.
- [18] 郝俊锁,尹黔,李勇,等.隧洞穿越高应力压密散体施工对策及其适应性分析[J].长江科学院院报,2022,39(12):141-146+153.
- [19] 邵珠山,张鹏举,张喆,等.隧道施工超前地质预报研究进展[J].长江科学院院报,2022,39(1):70-77+85.
- [20] 李勇.狮子山隧洞穿越F<sub>16</sub>活动断裂带结构防震抗震关键技术[J].中国水能及电气化,2021(11):7-13.
- [21] 王祥.四洞并进小净距超宽隧道群施工技术研究[J].交通科技与管理,2023,4(23):85-88.
- [22] 欧阳林,宋贵林,彭金明,等.深埋长隧洞超前地质预报技术应用及预警机制探究[J].水利规划与设计,2024(12):91-97+119.
- [23] 王波,王江,王资平,等.超前地质预报与监控量测在隧道中的综合应用[J].建筑安全,2020,35(2):7-9.
- [24] 巩军辉.断层破碎带暗挖通道超前大管棚施工技术[J].施工技术(中英文),2024,53(7):46-49.
- [25] 张鑫.长管棚施工技术在输水隧洞下穿既有高速公路工程中的应用[J].四川水泥,2024(10):172-174.
- [26] 刘松富.不良地质洞段加固超前预灌浆技术[C]//地基与基础工程技术创新与发展(2017)——第14次全国水利水电地基与基础工程学术研讨会论文集.北京:中国水利水电出版社,2017:249-253.
- [27] 王月华,孙鹏志,韩志远.岩石隧洞工程的预灌浆与后灌浆[J].水利水电技术,2006(4):32-34.
- [28] 刘春丽.超前预注浆在隧道施工中的应用[J].北方交通,2007(12):82-85.
- [29] 游龙飞,殷怀连.隧道工程超前灌浆加固技术[J].铁道标准设计,2007(S1):154-157.

责任编辑 李卢祎