

# 老挝南俄4水电站水工隧洞软岩变形施工处理措施

黄炜, 苟仕文, 杨建明, 刘建伟, 王阳

(中国水利水电第十工程局有限公司 老挝公司, 四川 成都 610037)

**摘要:**根据南俄4项目施工的实际情况,对碳质板岩类的软岩特性及其变形原因进行了分析,阐述了水工隧洞中碳质板岩在二期开挖支护过程中针对变形采取的施工处理措施,所取得的经验可为后续类似工程提供借鉴和参考。

**关键词:**水工隧洞;碳质板岩;软岩;变形;处理措施;南俄4水电站

中图分类号:TV7;TV52;TV554

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2022)05-0041-03

## Construction Treatment Measures on Deformation of Soft Rock in Hydraulic Tunnel of Laos Nam Ngum 4 Hydropower Station

HUANG Wei, GOU Shiwen, YANG Jianming, LIU Jianwei, WANG Yang

(Laos Sub-company of Sinohydro Bureau 10 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610037)

**Abstract:** Combined with the actual construction situation of Nam Ngum 4 Project, this paper analyzed the soft carbonaceous slate characteristics and the causes of deformation, and elaborately introduced the construction treatment measures for carbonaceous slate deformation in the first stage excavation and support process of hydraulic tunnel, so as to provide reference for subsequent similar projects.

**Key words:** hydraulic tunnel; carbonaceous slate; soft rock; deformation; treatment measure; Laos Nam Ngum 4 Hydropower Station

### 1 概述

南俄4水电站采用一洞三机供水方式,引水系统由一条引水隧洞、调压井、地下压力钢管、钢岔管及三条支管组成。机组引用流量为 $107.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ,引水隧洞长约16.5 km,其中由中国水利水电第十工程局有限公司承建的C3标段为引水隧洞后段(H7+720.00~16+570.00),控制洞室全长9.5 km,隧洞岩性主要以灰岩、砂岩、碳质板岩为主。

目前引水隧洞已全线贯通。在其开挖过程中,通过对监测数据进行分析得知:多处洞段在二期开挖支护完成后产生变形,主要表现为喷混凝土表面开裂和局部脱落、钢支撑扭曲变形、锁脚锚杆位移或拉伸断裂等情况。现场地质编录结合区域地质调查资料显示:所有变形洞室的区域围岩均为碳质板岩。

碳质板岩为软岩-极软岩(室内试验定名为碳质千枚岩),属于石炭系下统第一段(C1-1)灰黑色~黑色、微风化~新鲜的碳质板岩夹极少量碳质灰岩透镜体;岩层产状为 $N70^\circ\sim 80^\circ W, NE\angle 75^\circ$

$\sim 85^\circ$ ,岩体破碎,挤压揉皱现象明显,呈薄层状结构;岩体板理发育,延伸长度超过开挖洞径,板理面起伏光滑,其余结构面随机发育,成组性不强。局部夹杂碳质灰岩透镜体,岩层厚度小于1 cm,薄层状-极薄层状结构,结构面主要表现为板理面,随机节理不发育,节理面起伏粗糙,按照隧洞围岩等级划分为V类围岩。

碳质板岩段洞室开挖揭露掌子面处碳质板岩层间结合差,层面多有镜面及擦痕,手触感光滑,挤压揉皱明显,表现为明显的推覆构造<sup>[1]</sup>。

室内试验结果显示:碳质板岩湿化性耐崩解性指数 $Id_2$ 为68.4%,湿化性耐崩解性指数 $Id_3$ 为51.69%,湿化性耐崩解性指数 $Id_4$ 为35.78%,湿化性耐崩解性指数 $Id_5$ 为20.85%。试验结果表明:碳质板岩遇水易软化崩解,但经五次循环后仍未完全崩解,表明其水理性质较差。阐述了对围岩变形原因进行的分析及采取的施工处理措施。

### 2 变形原因分析

#### 2.1 层间挤压构造

根据现场开挖揭露的围岩判定:该段碳质板岩受区域构造影响,断层、层间挤压小型构造发

育,受层间挤压影响,岩体间分布有软弱夹层且岩体破碎,岩体呈碎裂结构,有千枚化现象,开挖揭露岩体抗风化能力弱,具有受裂隙水浸润影响遇水易软化、强度降低明显的特征。

## 2.2 地下水影响

老挝地处东南亚地区,地下水资源丰富(尤其是雨季),在洞室开挖过程中导致地下渗流场发生改变,且因碳质板岩的物理力学性质表现为遇水易软化,软岩流变(尤其是蠕变导致的大变形)。

表1 碳质板岩室内密度试验成果表

项目	样品编号									平均值
	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	
密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.5	2.61	2.63	2.65	2.62	2.66	2.64	2.62	2.49	2.602

表2 普氏塌落岩体参数计算成果表

岩性	围岩类别	容重 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	内摩擦角 / $^{\circ}$
碳质板岩	V	26.1	21.8

根据普氏塌落拱的计算结果(图1,表3),现有开挖支护设计参数无法抵抗围岩压力且因软岩岩体流变产生蠕变力,致使腰线及以下部位压力较大,普通锚杆无法提供有效抗力。碳质板岩室内密度试验成果见图1,普氏塌落拱计算结果见表3。

表3 普氏塌落拱结果表计算表

项 目	数据
隧洞开挖半径 $b$ /m	3.85
隧洞开挖高度 $h_0$ /m	7.65
围岩内摩擦角 $\varphi$ / $^{\circ}$	21.8
$b_1$ /m	9.029
岩体牢固系数	0.5
塌落拱矢高 $h$ /m	18.058
围岩容重 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	26.1
顶部围岩压力 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$	329.92
隧洞顶部侧向围岩压力 $e_1$ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	216.049
隧洞底部侧向围岩压力 $e_2$ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$	307.575
隧洞底部围岩压力 $e_3$ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$	670.979

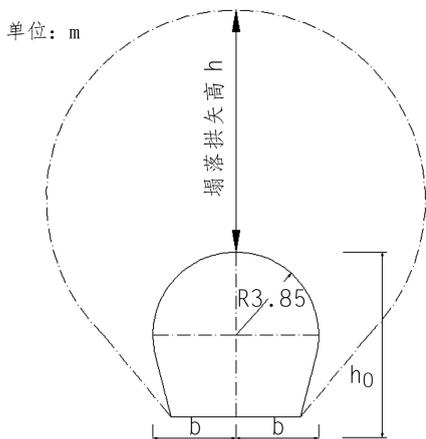


图1 碳质板岩室内密度试验成果示意图

## 3 采取的施工处理措施及取得的成果

### 3.1 增加设计支护强度

鉴于碳质板岩岩体强度低,岩体板理构造发育并出现挤压揉皱现象,具有流变特性,围岩的稳定主要受岩体强度控制。项目部在对普氏塌落拱计算结果进行对比分析后加强了主动防护力<sup>[2]</sup>。主要表现为:

(1)调整钢支撑间距,将原设计方案中的间距1 m 每榀改为0.5 m 每榀;

洞室开挖导致周围岩体内的地下水明显下降至洞室围岩松动圈,造成边墙下部侧压力及底部挤压力增大,致使钢支撑受到挤压出现扭曲变形和洞室底凸现象。监测数据反映变形一直处于不收敛状态且变形量持续增大。

### 2.3 设计方案中的支护强度不足

对于碳质板岩腰线部位的围岩压力采用普氏塌落拱理论进行计算。碳质板岩室内密度试验成果见表1,普氏塌落岩体参数计算成果见表2。

(2)边墙支护锚杆环向间距由1 m 加密至0.75 m;

(3)腰线至起拱线之间布置 $\Phi 25$  mm,  $L = 10$  m 的深孔锚杆,使其穿过塑性圈形成主动受力。

### 3.2 增加洞内排水孔

鉴于碳质板岩受地下水侵蚀易软化,为防止地下水对围岩的软化破坏,在碳质板岩洞段增设了深孔排水孔,从而有利于岩体内地下水的排出。排水孔孔深以2.5~3倍洞径为宜,以将外部地下水排出为目的。

图2中的监测数据反映:施工排水孔前后其变形数据有明显变化。雨季地下水增多,导致该部位变形速率明显加大。在该段施工深孔排水孔后,其变形速率明显趋于稳定状态。H14+193.5收敛点累计变形过程线见图2。

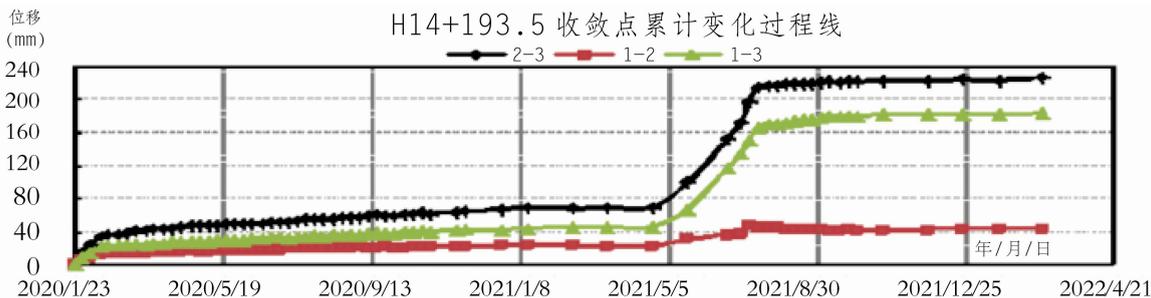


图 2 H14+193.5 收敛点累计变形过程线图

### 3.3 增加检测监测点及监测频率

在引水隧洞内的碳质板岩段每隔 10 m 布设一处监测断面,监测断面在拱顶、两侧拱腰共布设了 3 个监测点(图 3)。收敛监测点线路布置情况见图 3。当有渗水及围岩条件极差时,加密监测断面间距至 5 m<sup>[3]</sup>。在初支完成后于 4 h 内布置监测点,于 12 h 内读取初始读数(至少每天进行一次)。根据变形情况增大监测频率并对量测数据进行分析,判断围岩的变形情况是否处于正常状态,从而为施工安全和支护参数的确定提供科学的依据。

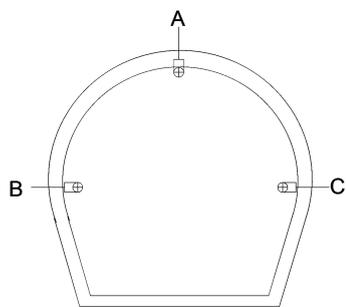


图 3 收敛监测点线路布置图

施工过程中,及时对钢支撑布置监测测点并尽早收集变形段初支变形的初始数据,在该过程中加大监测频率,按照监控量测位移管理等级采取相应的处理措施,将监测数据成果及时反馈至项目部。监控量测数据位移管理等级见表 4。

表 4 监控量测数据位移管理等级表

管理等级	管理位移 /mm	施工状态
Ⅲ	$U < (U_0/3)$	可正常施工
Ⅱ	$(U_0/3) \leq U \leq (2U_0/3)$	应加强支护
Ⅰ	$U > (2U_0/3)$	应采取特殊措施

注: $U_0$  为设计位移极限值,即预留变形量。

根据监控量测位移管理等级,当初支累计位

移变形量小于设计极限位移值的 1/3 时,为三级管理状态,可以正常施工;当初支累计位移变形量大于设计极限位移值的 1/3、小于设计极限位移值的 2/3 时,进入二级管理状态,及时增设锁脚锚管或护拱对初期支护进行加固;若仍然出现变形无法控制的情况(当初支累计位移变形量大于设计极限位移值的 2/3 时),进入一级管理状态,应立即采取特殊处理措施:立即停止断面施工,对掌子面进行封闭,对超限变形部位进行径向注浆加固,同时立即上报、制定出进一步强化处理的措施。

### 3.4 底板仰拱及时跟进

每开挖完成 12 m,立即跟进底部仰拱支护和底板混凝土浇筑。结合前期施工过程中已完成的仰拱底部出现的开裂、底凸现象,采取的主要应对措施为:

(1)底部仰拱增设钢管桩  $\Phi 48$  mm,  $L=6$  m,梅花型布置,同时注入 0.5 : 1~1 : 1 的水泥浆液用于加固两侧墙脚,控制灌浆压力不超过 0.5 MPa,以防止结构底部的收敛变形。在钢管管身设置花孔,孔径 6 mm,间距 30 cm,梅花型布置,下倾角度为  $60^\circ \sim 70^\circ$ 。

(2)对渗水段及变形速率较大的洞段,采取仰拱基底深层钢管注浆的方式进行加固处理,仰拱中部设置钢管  $\Phi 50$  mm  $\times$  4 mm,  $L=9$  m,间排距为 2 m  $\times$  2 m,梅花型布置,注入水泥浆液(0.5 : 1~1 : 1)。

(3)为确保底板混凝土与基岩面紧密结合,底板采用 C30 微膨胀混凝土进行施工。混凝土浇筑形成可靠的仰弧,用以加强浇筑成型后的底部拱形支撑效应<sup>[4]</sup>。

### 3.5 预留变形空间

(下转第 53 页)

所取得的经验具有一定的借鉴参考价值。

为了最大程度地防止钻孔偏斜、降低成孔的施工难度,施工过程中应做好以下几点:①钻孔前做好场地平整、钻机就位和技术资料准备等工作;②钻进过程中做好钻机防振防斜、冲程控制和孔内情况观测等;③钻进过程中,如发现钻头摆动不正常、钢绳偏离桩孔中心位置、冲击钻头磨损不均匀及偏磨严重等情况时,应采取相应的措施解决问题后方可继续施工。

#### 参考文献:

- [1] 鄢泰宁. 岩土钻掘工程学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2001.
- [2] 杨坤光,袁晏明. 地质学基础[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2016.
- [3] 姚爱国,马明,吴翔,段隆臣. 岩土工程钻进原理[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2000.

- [4] 陈优天. 岩溶特别发育地区钻孔灌注桩施工技术研究[J]. 江西建材, 2016, 36(12):146-147.
- [5] 潘荣联. 基于斜面岩钻孔灌注桩施工工艺对比应用[J]. 华东公路, 2016, 39(5):34-36.
- [6] 陆祖安, 龙立民. 岩溶地层大口径钻孔的防斜治斜实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2002, 46(1):30-31.

#### 作者简介:

- 杨小军(1991-),男,贵州遵义人,工程师,从事建设工程施工技术与管理工作;
- 龙波(1970-),男,重庆秀山人,高级工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工作;
- 王勇(1990-),男,河南安阳人,工程师,从事建设工程施工技术与管理工作;
- 赵志勇(1982-),男,四川成都人,工程师,从事建设工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

(上接第 43 页)

软岩的开挖施工按照“先放后抗”的理念适当加大预留变形量。在变形初期,支护结构在保证安全、不出现坍塌的前提下具有一定的柔性,能适应一定的变形,适当的变形释放了部分围岩应力,之后,由于支护结构具有足够的刚度与强度,在围岩应力得到一定程度的释放后,能在 5~7 个月左右的时间内抵抗剩余的围岩应力。在南俄 4 工程碳质板岩段开挖过程中,根据《水工建筑物地下开挖工程施工规范》(SL378—2018)<sup>[5]</sup>及现场施工监测数据,在保证永久衬砌结构设计尺寸的前提下,边墙及顶拱的预留变形量为 20 cm。

#### 4 结 语

软岩隧洞施工遵照“短进尺、少扰动、强支护、早封闭成环、勤量测”<sup>[6]</sup>的原则,采取综合治理措施,即加强超前支护、初期支护措施,增加对洞身围岩的注浆以加固改良围岩强度,有效抑制洞身围岩的大变形。同时,增加衬砌厚度,加大衬砌钢筋的型号,加强二次衬砌用以抵抗围岩残余变形能力,保证隧洞的施工安全和后期运营安全。

前期隧洞围岩等级为Ⅳ级、Ⅴ级(非软岩)时,采用的监测方法为传统方法:沉降为高程测量,收敛为相对水平位移,监控数据初始值从点位布置开始记录。但因点位布置存在间隔期,导致点位布置前初支已发生沉降收敛的数据未计入累计变形值,不能提供与设计断面进行对

比的数据,导致施工人员不能及时掌握初支断面到侵限的剩余空间。针对软岩大变形段采用传统监控量测方法存在的漏洞,项目部采用坐标法监测,动态测量,采用初始量测与设计断面对比的方法修正初始值,将累计变形值与设计断面进行比较,进而为现场施工提供指导。

#### 参考文献:

- [1] 水利水电工程施工组织设计规范,SL303-2004[S].
- [2] 李新,杨兴国,等. 复杂地质条件下引水隧洞围岩稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报. 2010, 20(6):113-116.
- [3] 张朝亮. 碳质板岩富水段极软弱围岩变形控制施工技术[J]. 中国建筑科学. 2015, 31(1):237-240.
- [4] 杨静安,张锦堂,等. 功果桥导流隧洞围岩稳定与支护结构分析[J]. 水利水电技术. 2009, 40(2):27-30.
- [5] 水工建筑物地下工程开挖施工规范,SL378-2016[S].
- [6] 杨新房. 碳质板岩隧道变形加固方案及施工工艺探讨[J]. 交通建设与管理. 2015, 52(2):255-258.

#### 作者简介:

- 黄炜(1985-),男,湖北宜昌人,工程师,从事建设工程施工技术与管理工作;
- 苟仕文(1968-),男,四川都江堰人,高级工程师,从事建设工程施工技术与管理工作;
- 杨建明(1985-),男,四川遂宁人,工程师,从事建设工程施工技术与管理工作;
- 刘建伟(1994-),男,山东烟台人,助理工程师,从事建设工程施工技术与管理工作;
- 王阳(1992-),男,四川成都人,经济师,从事建设工程施工技术与工程管理工作。

(责任编辑:李燕辉)