

安全监测与不良地质洞段开挖施工技术

田 斌

四川二滩国际工程咨询有限责任公司 四川 成都 611130

【摘要】：巴拉水电站尾水隧洞为大断面地下洞室，围岩含炭质板岩，自稳性差，为不良地质洞段，施工中极易出现变形和垮塌等问题，对工程和人身安全造成无法弥补的影响。本文对隧洞开挖过程中的安全监测布置和数据分析进行介绍，结合工程实例，通过监测数据的分析对隧洞安全稳定状况进行预警和预判，并相应调整施工方案，确保了洞室施工安全，可为类似工程提供借鉴。

【关键词】：炭质板岩；安全监测；钢筋计；塌方

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.063

1 引言

大断面洞室在水电工程中运用广泛，各工程的地质条件、洞室型式、以及开挖方式均不尽相同，特别是在不良地质洞段，容易在开挖过程中引发变形、塌方等问题，给施工安全带来了严峻的挑战。因此，深入研究不良地质条件下的监测预警预防措施，能够提前掌握围岩的受力和变形情况，对保证工程安全具有重要意义。

本文以巴拉水电站尾水隧洞炭质板岩洞段开挖阶段的监测设计、实施和数据分析为例，研究不良地质洞段的安全监测布置和数据分析，提前进行预警预判，总结施工经验，为不良地质洞段的开挖支护提供技术数据支撑，为安全完成不良地质洞段开挖支护有积极意义。

2 工程概况

巴拉水电站位于四川省马尔康市境内大渡河东源主流脚木足河上，是大渡河干流水电规划“3库28级”自上而下的第2级电站。工程采用混合式开发，开发任务为水力发电并兼顾生态用水，由首部大坝泄洪枢纽、引水系统和发电厂房等组成。

巴拉水电站尾水隧洞长度1739.14m，隧洞除进出口段外，其余洞段开挖断面均为圆形断面，设计开挖断面面积130.6~166.6m²，III类围岩设计断面直径14.0m，IV类围岩设计断面直径12.90m，V类围岩设计断面直径13.4m。隧洞开挖过程中，炭质板岩往往与其他岩性岩体呈互层形式出露。

炭质板岩呈散体结构、强度低，遇水易软化，施工期间极易出现坍塌，安全风险极大，施工期过程中进行了相应的安全监测仪器和设施的布置，通过监测

数据采集，并经过分析后，及时对现场施工方案进行了调整，确保了尾水隧洞的正常开挖和工程安全。

3 炭质板岩洞段施工期安全监测布置

尾水隧洞炭质板岩洞段施工期安全监测主要采取收敛变形监测，结合隧洞开挖方案，收敛变形监测点布置分为两期，一期为上半洞开挖监测布置，二期为下半洞开挖监测布置。在炭质板岩连续出露洞段，监测断面间距按不大于20m进行布置。

4 监测方法和监测频次

尾水隧洞变形监测采用非接触监测方法，监测主要包括顶拱沉降和洞室收敛变形，特殊情况单独布置测点进行监测，监测频次按照距开挖面距离确定，同时根据变形速率进行调整，当出现异常情况或不良地质时，增大监测频次。

表1 地下洞室收敛变形监测频次表

按距开挖面距离确定的收敛监测频次		按位移速度确定的收敛监测频次	
收敛断面距开挖面距离(m)	监测频次	位移速度(mm/d)	监测频次
(0—1)B	2次/d	≥5	2次/d
(1—2)B	1次/d	1~5	1次/d
(2—5)B	1次/(2d~3d)	0.5~1	1次/(2d~3d)
>5B	1次/7d	0.2~0.5	1次/3d
备注：B为洞室开挖断面跨度。			<0.2

5 监测数据整理分析

监测数据整理分析主要采用列表统计与绘图分析两种方式。

作者简介：田斌（1980-），湖北赤壁人，四川二滩国际工程咨询有限责任公司巴拉电站主体工程项目监理部，高级工程师，现从事工程监理工作。

列表统计按照监测断面进行，表中反映监测断面所处的桩号、对应的围岩类别和隧洞埋深，按时间记录各测点之间的变形量，计算出周边位移相对值，并与施工规范允许值进行对比。绘图按照监测断面，以时间为横坐标，以变形量为纵坐标，将历次监测的变形数据绘制成变形监测过程线图，直观反映各监测断面的变形趋势和是否存在突变情况。在监测数据整理过程中，如存在周边位移值超出或接近规范允许值、变形量持续增大或出现突变等异常情况，及时进行分析，研究采取防范措施。

6 尾水隧洞收敛变形监测情况

尾水隧洞炭质板岩洞段开挖采用挖掘机+破碎锤的方式，局部硬岩体的部位采用浅孔小药量爆破，单循环开挖进尺 0.5~1.0m。开挖时采用预留核心土分层开挖，分块、分层高度及开挖循环进尺结合钢支撑的安装需求。开挖完成后，立即喷射 3~5cm 厚混凝土封闭开挖面，随后架设钢拱架，按设计图纸施作挂网钢筋和系统锚杆，并将部分具备条件的系统锚杆与钢支撑焊接，最后进行喷射混凝土施工。

尾水隧洞炭质板岩洞段在初期支护施作完成后，即布置收敛变形监测点开始进行监测，所有监测断面初期均采用 1 次/d 的频次实施监测，在连续监测一周未发现异常后逐步调整监测频次。

尾水隧洞完成初期支护的洞段，监测数据波动不大，变形量无持续增大的趋势，实测的周边位移相对值均远小于规范参考值，表明完成初期支护的洞段稳定性好。

7 尾水隧洞塌方洞段监测仪器布置

尾水隧洞 2#支洞控制段上游面开挖至（尾隧）0+950m，开挖揭露的围岩呈薄层炭质板岩，掌子面发育缓倾角裂隙（2 条）和陡倾角裂隙（1 条），岩体破碎，自稳性差，在顶拱 120°范围采用超前支护（小导管直径 48mm，壁厚 4mm，L=4.5m，环距 0.3m，排距 2m），采用挖掘机+破碎锤进行洞室短进尺开挖，钢支撑及锚喷联合支护及时支护跟进。在（尾隧）0+949~0+948.8m 桩号段开挖支护完成后，在准备进行下一循环施工时，掌子面前方出现塌方，塌方延伸至（尾隧）0+944.10m，塌方范围位于右侧顶拱 60~100°，塌方渣体呈松散、碎裂结构，岩石强风化，完整性差。

在采取反压花岗岩渣料、实施超前管棚和型钢拱架支护后，仍出现塌方和滑渣。后续在缩小超前大管棚和超前小导管间距，并增大超前管棚和超前小导管

预固结灌浆压力、增加超前排水孔等多种措施后，按照强支撑、短进尺，预留核心土分层^[4]开挖的方案完成上半洞的开挖支护。

针对该炭质板岩垮塌洞段，在上半洞开挖成洞后，采取“先衬砌上半洞、再开挖下半洞”的施工方法，同时在（尾隧）0+946 处增设监测断面，在衬砌混凝土中分别埋设渗压计和钢筋计，监测仪器布置在顶拱以及两侧边墙中心线处，以进一步掌握该段的渗透水压力和衬砌结构的钢筋应力。

8 尾水隧洞塌方洞段下半洞开挖与监测数据分析

炭质板岩塌方段上半洞在采取了超前管棚、超前小导管并进行灌浆处理后，以挖掘机和破碎锤为主，局部硬岩体采用浅孔小药量爆破的，开挖进尺控制在 0.5m~1.0m，开挖后及时封闭掌子面，安装钢支撑并实施锚喷支护，分区分层完成塌方洞段的开挖，随后及时进行钢筋混凝土衬砌施工。

2024 年 2 月 4 日，通过对监测仪器的数据采集和整理，发现（尾隧）0+946 桩号监测断面处钢筋应力 Rwsdc-4（顶拱中心内侧钢筋）、Rwsdc-9（顶拱偏左 25°内侧钢筋）测值出现异常波动，其中 Rwsdc-4 钢筋计 2024 年 1 月 27 日测值为 -42.79Mpa，2024 年 2 月 3 日测值为 -82.02 Mpa，压应力增大 39.23Mpa；Rwsdc-9 钢筋计 2024 年 1 月 27 日测值为 -42.79Mpa，2024 年 2 月 3 日测值为 -85.55 Mpa，压应力增大 42.76Mpa，钢筋计应力历时变化过程线见图 1。该两支钢筋计应力测值呈突变状况，反映围岩内部应力出现较大变化，经与现场施工情况进行对比分析，该部位正在进行下半洞降底开挖，施工主要采用挖掘机和破碎锤，在施工作业过程中，没有采取爆破作业，可排除受爆破影响形成的测值波动。

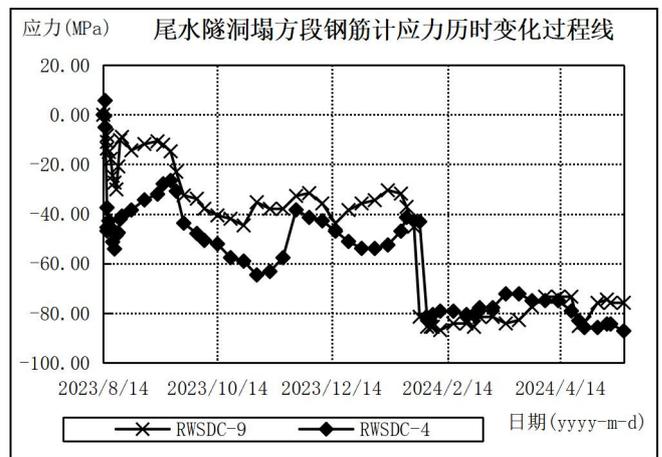


图 1 尾水隧洞塌方段钢筋计应力历时变化过程线
尾水隧洞（尾隧）0+938-0+950 段上半洞开挖过

程中,通过超前管棚、超前小导管已实施预固结灌浆,但该炭质板岩洞段固结灌浆扩散范围有限,预固结灌浆范围以外的岩体受渗水作用下软化,在降底开挖过程中,底板对已开挖洞室的约束减小,上半洞已衬砌钢筋混凝土在自身重力及上部围岩的应力作用下,存在下坠趋势,因而导致钢筋应力整体呈受压状态。经过分析,现场采取的直接开挖下半洞对已完成混凝土衬砌洞段的安全稳定造成不利影响,导致部分钢筋应力的突变达到约40Mpa,继续进行开挖可能导致应力变化进一步加大,当达到一定程度时可能会导致洞室整体失稳,因此施工现场立即停止开挖,并改用石渣料对已开挖下半洞进行回填反压,增大底板对已开挖洞段的约束,同时重新研究下半洞的开挖施工方案。

9 安全监测与开挖施工技术方案的调整

通过监测数据的分析,现场直接进行下半洞开挖的方案存在较大风险,2024年2月3日采用石渣料对已开挖下半洞进行回填反压后,监测数据基本趋于稳定,同时也反映出该不良地质洞段尚不具备直接开挖的条件,需进行加固处理后方可进行开挖作业。结合监测数据情况,(尾隧)0+938-0+950桩号段下半洞的开挖施工方案作相应的调整:(1)采用直径48mm,壁厚4mm,L=4.5m注浆小导管替代原布置的系统锚杆,通过小导管进行压力灌浆,对该洞段上下游端头及未开挖的下半洞进行固结灌浆,灌浆压力按2Mpa控制。(2)下半洞采用挖掘机+破碎锤的开挖方式,开挖范围主要为两侧边墙,底拱暂不进行开挖,开挖尺寸比设计断面超出约50cm,左右两侧不得同时进行开挖,按照上半洞衬砌段长度,每个单仓浇筑长度范围分为3段进行左右侧单幅开挖,每段开挖长度2.0m。(3)每开挖完成2m及时进行安装钢支撑和钢筋网,并进行喷混凝土施工,再对超挖部分立模进行C30混凝土浇筑,混凝土中适量掺加早强剂。(4)对应上半洞衬砌长度,在上半洞衬砌结构2/3区域(长度方向)立于基岩面上时,对下半洞已开挖部分立即进行永久结构钢筋混凝土衬砌施工,在混凝土至少达到1天强度后,再进行下一段的开挖和支护作业。(5)开挖方案调整后,实施过程中密切关注钢筋应力计的测值情

参考文献:

- [1] 《水电水利工程施工安全监测技术规范》(DL/T5308-2013).
- [2] 张永兴.王桂林.胡居义.岩石洞室地基稳定性分析方法与实践.科学出版社.2022.06.
- [3] 宋勇军.雷胜友.干燥与饱水状态下炭质板岩变形特性分析.西安建筑科技大学学报.2016.01.

况,发现异常立即采取措施。(6)底拱在两侧边墙全部开挖支护完成后,再进开挖和混凝土浇筑施工。

10 施工技术应用成果

巴拉水电站尾水隧洞已全面完建并充水发电,安全监测在洞室开挖过程中起到预警和安全保障作用,特别是在不良地质洞段,监测数据可以体现施工方案的适应性,在尾水隧洞的炭质板岩塌方段的处理过程中,能够及时有效的反馈衬砌混凝土中钢筋的应力变化情况,根据监测数据对方案调整后,监测数据波动较小,并顺利完成相应的开挖支护施工,主要施工技术应用成果如下:(1)按照围岩类别、围岩性质、隧洞埋设进行变形监测断面布置,能够掌握地下洞室在施工过程中的安全稳定状态,为后续的施工作业提供基础支撑。(2)对不良地质洞段,须结合地质条件增设不同的监测仪器,对可能发生的破坏形式作全面监测,可有效实现预警和防范。(3)及时准确的进行数据监测,对监测数据的发展趋势进行预判,监测数据出现突变时须立即采取相应措施进行控制。(4)监测数据需结合具体施工状态和现场具体条件进行分析,以便针对性的采取措施。(5)安全监测可反映已开挖洞段的安全稳定状况,但对于未开挖洞段,仍难以实施监测,因而在地下洞室开挖支护过程中,超前地质预报仍是需关注的重点,只有在提前掌握地质情况,才可以针对性的采取工程措施,确保工程安全。

11 结语

巴拉水电站尾水隧洞开挖过程中,对不同围岩类别洞段分别布设了监测断面,常规洞段主要以变形监测为主,对炭质板岩塌方洞段则增设了应力监测和渗流监测。在炭质板岩塌方洞段下半洞开挖过程中,监测数据直接反映了开挖洞段的稳定情况,并根据监测数据及时对施工方案进行了优化调整,避免了已开挖洞室二次坍塌等异常情况的出现,确保了施工安全和工程的顺利推进。安全监测在巴拉水电站尾水隧洞炭质板岩塌方洞段开挖过程中发挥了重要作用,对保证洞室开挖施工安全、预防洞室坍塌提供了参考案例,对类似工程特别是地下不良地质工程的施工方面具有借鉴意义。