

采用示踪稀释法检测基坑渗漏问题研究

周建, 何英建, 熊世强

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

摘要:硬梁包水电站首部枢纽工程覆盖层深厚,地质条件复杂,各个地层相互影响。鉴于其工程地质条件的特殊性,振冲桩施工会破坏地层而造成基坑渗漏,不仅会影响基坑处的施工安全,也严重影响到整个工程的施工进度。阐述了采用示踪稀释法探测基坑渗漏的过程,依托硬梁包水电站二期基坑内的水位观测孔进行了流速测试,并对探测结果进行了对比分析,判断出渗漏水来源,探明了隐患的具体位置并提出了防渗处理建议,有效保障了基坑工程的施工。

关键词:硬梁包水电站;基坑渗漏;示踪稀释法;检测

中图分类号:TV7;TV52;TV22;TV223;TV551

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2023)05-0047-06

Study on the Leakage Problem of Foundation Pit Using Tracer Dilution Method

ZHOU Jian, HE Yingjian, XIONG Shiqiang

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610213)

Abstract: The headworks of the Yingliangbao Hydropower Station has deep overburden and complex geological conditions and various strata interact with each other. In view of the particularity of engineering geological conditions, the construction of vibrating piles will damage the stratum and cause the foundation pit leakage, which not only affects the construction safety of the foundation pit, but also seriously affects the construction progress of the whole project. This paper adopts the tracer dilution method to detect foundation pit leakage, relies on the second phase foundation pit of Yingliangbao Hydropower Station to carry on the flow rate test with the water level observation hole, and conducts a comparative analysis of the detection results to determine the source of the seepage water leakage, explore the specific location of the hidden danger and put forward the anti-seepage treatment suggestions. It can effectively guarantee the smooth construction of foundation pit.

Key words: Yingliangbao Hydropower Station; Foundation pit leakage; Tracer dilution method; Detection

1 概述

硬梁包水电站位于四川省甘孜藏族自治州泸定县境内的大渡河干流上,其上游为泸定水电站,下游接大岗山水电站。首部枢纽工程分三期施工:一期施工导流明渠,二期施工基坑闸坝,三期施工面板堆石坝。硬梁包工程施工至二期重要的施工阶段时其存在的基坑渗漏问题仍然没有办法解决,而且根据现场施工人员多日对基坑渗流的监测发现:当围堰外的河流流量明显增大时,基坑内的渗流量亦随之增加。除此之外,采取了对基坑内的几个渗漏点进行水流采样、同时亦采集了

大渡河内的水样以及山上泉水的方式进行对比以确认渗漏水的主要来源。如今,随着超深基坑的不断出现,类似硬梁包工程的深厚漂孤卵砾石容易出现大孔隙强渗透,而超规范的振冲碎石桩施工较易击穿土层进而造成局部地层流失形成空洞,同时,超深、大面积防渗体施工难度大、深部不连续接头质量差而容易引发基坑安全事故^[1]。基坑工程的建设目的是形成一个封闭的结构体以便于地下工程的施工。然而,基坑发生渗漏会导致围护体系周围地下水渗漏,导致土体的物理性质发生改变而影响施工安全^[2]。笔者依托四川省硬梁包水电站二期基坑工程分析了二期基坑渗漏点

收稿日期:2023-05-20

的渗水来源,探明了二期基坑渗漏点的渗漏路径和渗漏通道的坐标位置、深度,为其提供了防渗加固建议范围,所取得的经验可为多源信息融合判定防渗体质量体系提供借鉴。

2 硬梁包水电站的基本情况

硬梁包水电站位于四川省甘孜藏族自治州泸定县境内的大渡河干流上,为四川省大渡河干流最新规划 28 级方案中的第 14 级电站,其上游为泸定水电站,下游接大岗山水电站。工程规模为二等大(2)型,采用“混凝土闸和面板堆石坝+左岸引水系统+地下厂房”枢纽的总布置方案。闸址处安装装机容量为 3.6 万 kW 的生态机组以满足 $134.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 的最小生态流量下泄要求。主电站额定引用流量为 $1261.2 \text{ m}^3/\text{s}$,其通过 2 条长约 14.4 km 的引水隧洞在下游花石包地下厂房安装 4 台、单机容量为 27 万 kW 的机组发电。

该电站首部枢纽的二期基坑主要用于进水口(最低开挖高程 1 210 m)、生态电站厂房(最低开挖高程 1 194 m)及闸坝(最低开挖高程 1 207 m)等主体建筑物的施工。二期基坑的导流建筑物由主河床上、下游围堰和导流明渠纵向围堰等建筑物组成。其技施图阶段的主河床上、下游围堰及导流明渠纵向围堰的防渗设计情况为:

(1)主河床上游围堰。主河床上游围堰为土石围堰,采用复合土工膜心墙+混凝土防渗墙进行防渗,最大堰高 17 m。主河床上游围堰为 4 级建筑物,挡水标准采用全年 20 a 一遇,相应洪峰流量为 $5510 \text{ m}^3/\text{h}$,对应水位高程 1 233.22 m,堰顶高程 1 235 m,戕堤顶高程 1 228 m。堰体采用 350 g/0.8 mm HDPE/350 g 复合土工膜心墙防渗,底部通过盖帽混凝土与混凝土防渗墙连接,基础采用混凝土防渗墙防渗,墙厚 0.8 m,墙底深入第④层(相对隔水层)4 m,墙底高程为 1 202~1 206 m。防渗墙施工平台高程为 1 228 m,1 228~1 235 m 高程为水上堰体区,堰顶宽度为 10 m,上下游两侧坡比为 1:2,在迎水面防渗墙平台以下高程设有 2.5 m 厚的抛填大块石护坡,迎水面防渗墙平台以上高程设有 1 m 厚的干砌大块石护坡。

(2)导流明渠纵向围堰。导流明渠纵向围堰

全段与导流明渠左边墙(1 m 厚的钢筋混凝土)结合布置,为土石围堰。纵向围堰全段基础采用高喷防渗墙防渗,其有效厚度为 0.8 m,高喷防渗墙嵌入第④层 4 m,墙底高程为 1 208 m。

(3)主河床下游围堰。主河床下游围堰为土石围堰,采用“复合土工膜心墙+混凝土防渗墙”进行防渗,最大堰高 12 m。主河床上游围堰为 4 级建筑物,挡水标准采用全年 20 a 一遇,相应洪峰流量为 $5510 \text{ m}^3/\text{h}$,对应水位高程为 1 226.07 m,堰顶高程为 1 228 m,防渗墙施工平台的高程为 1 221.5 m。堰体采用 350 g/0.8 mm HDPE/350 g 的复合土工膜心墙防渗,底部通过盖帽混凝土与混凝土防渗墙连接,基础采用混凝土防渗墙防渗,墙厚 0.8 m,墙底深入第④层(相对隔水层)4 m,墙底高程为 1 199 m。防渗墙施工平台的高程为 1 221.5 m,1 221.5~1 228 m 高程为水上堰体区,堰顶宽度为 10 m,上下游两侧坡比为 1:2,在迎水面防渗墙平台以下高程设有 2 m 厚的抛填大块石护坡,迎水面防渗墙平台以上高程设有 0.8 m 厚的干砌大块石护坡。

当二期基坑抽排水位高程降至 1 212 m 时,随着左岸边坡、基坑的下挖,左岸下游护岸、尾水渠边坡、生态厂房边坡从坡内向坡外方向出现的股状渗水点增加,渗水高程为 1 214 m 左右且其均为清水,分析认为其是通过第③层(相对隔水层)绕渗或山体渗水。二期基坑渗水位置见图 1。

基坑渗水的部位可能有以下四个来源:

- ①主河床下游围堰堰体内侧渗水;
- ②主河床下游围堰至尾水渠边坡沿线处渗水;
- ③大坝防渗墙左岸下游渗水;
- ④进水口区域渗水。

项目部经研究后主要选择位于主河床下游围堰处的孔 3-7 进行检测。施工技术人员将渗漏出的水与围堰外大渡河内的水送至实验室进行化学成分比较,得出该渗漏水可能为山泉水或为底层土体被击穿破坏后向上的渗水,进而排除了围堰本身防渗体存在缺陷的可能性。

现有工程实践证明:采用示踪稀释法可以测定地层中地下水的渗透流速。示踪稀释法依靠的



图 1 二期基坑渗水位置示意图

相关主要探测理论和技术已得到大量的研究和应用,具有原理清晰、数据直观、精度高、结果全面、经济性好、信息安全等特点,是进行地下水渗流调查的有力方法^[3~6]。

3 应用示踪稀释法检测防渗墙的质量

3.1 示踪稀释法的概念

示踪稀释法^[7]是在钻孔中的水中投放一定的示踪剂,且该示踪剂的浓度随着水流的流动变化,通过一定的时间间隔测量示踪剂浓度的变化。示踪稀释法由于其投放的示踪剂和所观测到的浓度变化均在同一孔中进行,通常称其为单孔稀释法。该方法较为简单,操作简便且能够在较短的时间内通过仪器测试出其电导率,从而能够更好地对渗水处进行防渗测试以减少损失。该方法具有原理清晰、数据直观、精度高、结果全面、经济性好、信息安全等特点,故示踪稀释法已成为工程项目中常用的检测及监测防渗墙功能的实用方法。

3.2 示踪稀释法的原理

示踪稀释法利用稀释定理(流速越大,食盐稀释的越快,电导率下降的越快)计算出渗透流速,并可通过不同观测孔测得的流速判断基坑渗漏水的来源。由于滤水管中的水柱已被少量示踪剂标记,而标记地下水的浓度被流过滤管的水带走而降低(稀释),故示踪剂浓度稀释的速度与地下水的渗透流速有关,根据这种关系(稀释原理)即可以求出渗透流速。

3.3 示踪稀释法测量实施前的准备工作

采用示踪稀释法测量的顺序为自上而下。从地下水水位水面线以下开始测量,测量点的密度为 1 m,1 个测点上的测量时间为 1 min,测量完成后将数据记录后再进行下一个点的测量,直到测量至孔底,然后根据孔深进行示踪剂的投放,投放完成后立刻测量相应的数据,然后间隔 10 min, 20 min, 30 min, 60 min 分别测得其相应的数据后再进行下一个孔的测量。测孔布置及施工要求主要包括以下内容:

(1)测孔布置。① 平面布孔要求:在容易发生管涌渗漏的拐角处和正对槽段接缝位置的迎水面一侧尽量贴近止水接缝处布置钻孔;② 竖向布孔要求:测量孔的垂直钻孔深度与地连墙的设计深度一致,测量并分析其地连墙止水结构的质量优劣与渗漏量的对应关系。

(2)施工要求。① 测孔施工的要求与水文地质成孔的要求基本一致;② 成孔的内径为 70 mm,管材选用壁厚 5 mm 的 PVC 塑料管;③ 钻孔的倾斜不得大于 3°,孔内不得发生堵孔和卡孔;④ 花管深度为地下水位以下至测孔底部,测孔深度同地下连续墙深度,测孔底部需采取必要的封堵措施;⑤ 成孔后洗孔至出清水,孔内不得有沉淀物并确保其达到设计深度;⑥ 所有测孔的孔口采用孔盖拧紧进行保护。

3.4 示踪稀释法的检测标准

示踪稀释法利用稀释定理可以测量出各个测孔的电导率,从而计算出流速。采用该方法检测

系以流速判定防渗墙的质量:(1) $v \leq 2 \times 10^{-4}$ cm/s,防渗墙质量完好;(2) 2×10^{-4} cm/s $\leq v \leq 5 \times 10^{-4}$ cm/s 防渗墙质量存在轻微缺陷,后期开挖时需加强观测;(3) $v \geq 5 \times 10^{-4}$ cm/s,防渗墙质量存在明显缺陷,需要进行加固。

示踪剂浓度的递减可用式(1)表示:

$$C = C_0 e^{-Bt} \quad (1)$$

式中 C_0 为时间 $t=0$ 时示踪剂的浓度; C 为时间 t 时示踪剂的浓度; B 为系数。

在该假设条件下, B 为常数,即 $B = \frac{Q}{V}$ (2)

式中 Q 为单位时间流经井的水量,即 $Q = 2r_1 h v_w$; V 为井内稀释水柱的体积。因此:

$$B = \frac{2r_1 h v_w}{\pi r_1^2 h} = \frac{2v_w}{\pi r_1} \quad (3)$$

式中 r_1 为滤水管内半径; h 为稀释水柱高度; v_w 为流经井水的流速。

因 $v_w = \alpha v_f$, 其式中的 α 为因滤水管在含水

层中的存在引起的流场畸变的校正系数; v_f 为渗透速度,即含水层中的达西渗透速度,因此:

$$B = \frac{2\alpha v_f}{\pi r_1} \quad (4)$$

示踪剂的浓度比可用测得的计数率之比表示,即:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{N}{N_0} \quad (5)$$

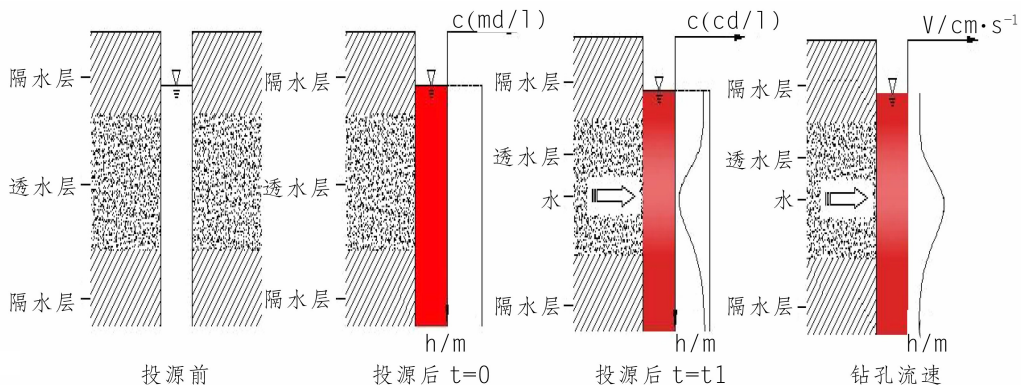
式中 N_0 为当 $t=0$ 时示踪剂的计数率; N 为 t 时刻时示踪剂的计数率。将式(2)、(3)代入式(1),两边取自然对数,得:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\frac{2\alpha v_f t}{\pi r_1} \quad (6)$$

即:

$$v_f = \frac{\pi r_1}{2\alpha t} \ln \frac{N_0}{N} \quad (7)$$

示踪稀释法测定地下水流速的原理见图2。



注: C 为示踪剂浓度计数,无量纲。

图2 示踪稀释法测定地下水流速的原理示意图

4 现场试验

笔者利用硬梁包水电站二期基坑内已有的水位观测孔进行了流速测试。将不同深度的流速进行统计,通过分析后发现其主要的流速变化位于何处,进而从不同的观测孔中不同深度的流速分布以及不同位置的流速差异判断渗漏水的来源。

因地下水的渗流相对于河道流速相差甚远,大多为 m/d 数量级,故无法利用机械或波形测量方式,如涡轮、光纤、超声多普勒等方法进行地下水的流速测试。因此,最终利用自制的、可测试电

导率的仪器将其投放至指定的深度测出每个深度的电导率;对已打孔的位置进行电导率的测试,所采用的测试方法为目前渗流测试唯一可行的地下水渗透流速测试方法:示踪稀释法。

示踪稀释法测试:首先在钻孔的水中投放一定的示踪剂(为环保需要,本次试验投源用的示踪剂为食盐),通过一定时间间隔测量示踪剂的浓度变化(食盐浓度的变化与电导率在测试数据区域内的线性相关,故采用电导率代替),若整个防渗体较为完整,则其渗流量较小,其电导率明显较高;而流速大的深度位置其电导率下降快,故可

以利用流速与电导率的关系并利用稀释定理计算出钻孔中各个位置的渗透流速。

笔者在现场多个孔中选择孔 3-7 为例进行阐述。孔 3-7 的钻孔深度为 30 m, 孔口高程为 1 214. 943 m, 对该孔实施了电导率监测。

投源前, 先测一次钻孔中的本底数据作为参考, 投源后根据电导率的变化间隔一定的时间观测钻孔中各层位的电导率。孔 3-7 电导率变化曲线见图 3。通过图 3 并根据单孔稀释公式求得的孔 3-7 中各深度处的水平流速见图 4。

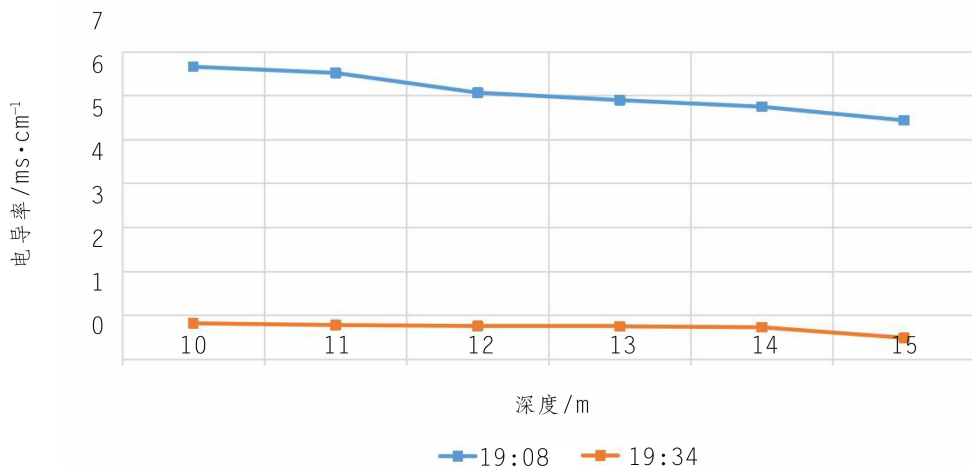


图 3 孔 3-7 电导率变化曲线图

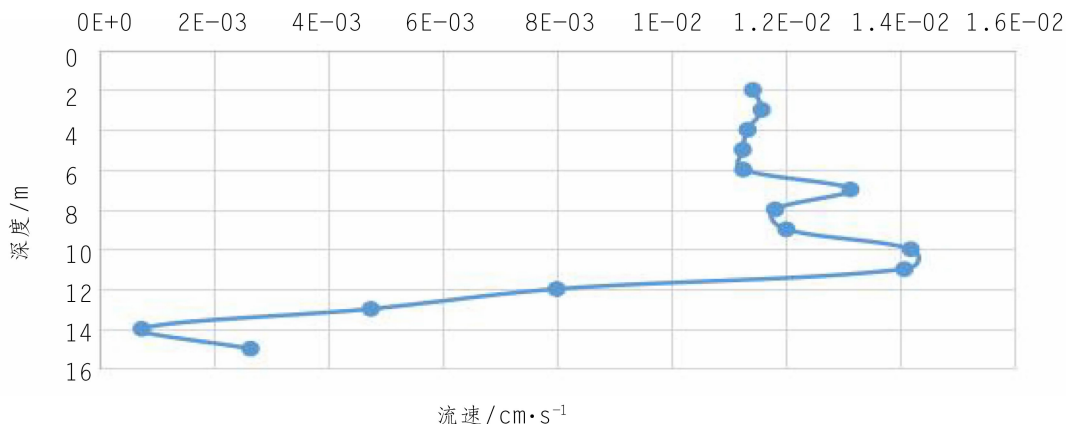


图 4 孔 3-7 中各深度处的水平流速图

从图 4 中可以看出: 孔 3-7 在 10 m、11 m 处流速偏大, 在该处存在较明显的流速变化。其原因是在该深度为进行地基处理及振冲碎石桩施工造成其下方的承压水向上排出, 故该处的流速较大。经多次重复测量, 发现钻孔中的垂向流明显, 下方承压水被钻孔揭露向上补给, 在浅层排泄流出。

5 结 语

笔者以示踪稀释法在孔 3-7 中的应用为例, 对硬梁包水电站基坑存在的渗漏隐患以及渗漏部

位、深度等进行了深入研究与分析得到以下结论: 向观测孔中投入食盐后测出了较高的电导率, 过了一段时间后其电导率降低, 表明观测孔中具有一定的流速; 孔深 10、11 m 处流速偏大, 电导率下降幅度大, 说明基坑周边防护存在渗漏缺陷, 需要进行相关的加固防渗处理措施。

参考文献:

- [1] 蔡克俭, 殷亚斌, 廖智, 等. 基于电阻率成像技术的基坑渗漏探测方法[J]. 物探化探计算技术, 2017, 39(6): 736-741.
- [2] 王浩, 李程, 袁梓瑞. 建筑基坑渗漏原因分析及处理措施研

究[J]. 土工基础, 2022, 36(1): 21-24.

- [3] 李奇涛, 田野, 董海洲, 等. 基于示踪连通试验和流速测试的地下连续墙渗漏研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022, 19(3): 44-48.
- [4] Nikolai Fahrmeier, Nadine Goeppert, Nico Goldscheider. Comparative application and optimization of different single-borehole dilution test techniques[J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29(1): 199-211.
- [5] Prodeo Yao Agbotui, Landis Jared West, Simon Henry Bottrell. Characterisation of fractured carbonate aquifers using ambient borehole dilution tests[J]. Journal of Hydrology, 2020, 589(3): 1-14.
- [6] L. Piccinini, P. Fabbri, M. Pola. Point dilution tests to

calculate groundwater velocity: an example in a porous aquifer in northeast Italy[J]. Hydrological Sciences Journal/ Journal Des Sciences Hydrologiques, 2016, 61(8): 1512-1523.

- [7] 胡琳君. 稀释法明渠自动测流系统的研究[D]. 太原理工大学, 2021.

作者简介:

周建(1990-), 男, 重庆合川人, 项目副总工程师, 工程师, 从事水利水电工程施工技术与管理工

作; 何英建(1994-), 男, 重庆荣昌人, 项目工程部主任, 助理工程师, 学士, 从事水利水电工程施工技术与管理工

作; 熊世强(1997-), 男, 四川资阳人, 助理工程师, 学士, 从事水利水电工程施工技术与管理工

(责任编辑: 李燕辉)

(上接第 26 页)

应不断地向循环水中添加黏土或膨润土进行补充, 同时及时通过仪器测定泥水比重。

(5) 纠偏操作。顶进过程中的纠偏是保证顶管质量的关键, 亦是保证顶管作业顺利进行的保障, 若操作不当可能会造成顶力骤升、管接口破损等质量问题, 严重时可能会造成管道无法顶进或施工的管道不满足要求, 甚至引发严重的安全、质量事故和重大经济损失, 尤其是在砂层中顶进, 管道极易因泥水过度冲刷而造成顶管机机头下沉、偏位。因此, 对于顶进过程的纠偏就显得尤为重要, 必须做到动态纠偏, 这也是保证顶管施工质量的重要措施之一。

5 结语

顶管施工作为一种常用的地下管线施工方法, 尤其是在下穿结构物等设施时, 具有对上部结构物无影响或者影响较小的特点, 同时其具有施工快速、不影响地面结构、经济、高效的优点。在

针对高速公路、铁路等重要设施施工管线时, 因其具有的特殊性和重要性, 对施工扰动要求特别高, 同时又不得影响其正常使用的功能, 因此, 选用顶管法施工是最科学的施工方案。在施工过程中, 通过加强施工管理、改进工艺工装、采用精细化作业等方式将其对高速公路的影响降低至最小。该方案的实施对于类似的下穿重要结构的顶管施工方法具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 建筑地基基础工程施工质量验收标准, GB50202-2018[S].
- [2] 顶管技术规程, DBJ/T15-106-2015[S].
- [3] 给水排水工程顶管技术规程, CSCS246-2008[S].
- [4] 地下工程防水技术规范, GB50108-2008[S].
- [5] 混凝土和钢筋混凝土排水管, GB/T11836-2009[S].

作者简介:

谢旭智(1988-), 男, 四川射洪人, 项目常务副经理, 工程师, 学士, 从事建设工程施工技术、科研项目与质量管理工作。

(责任编辑: 李燕辉)

由水电七局一分局承担的硬梁包水电站闸坝混凝土浇筑到顶

自 2022 年 9 月 26 日转序浇筑二期工程混凝土以来, 硬梁包水电站项目部科学组织、精心安排, 全面推进工程建设, 2023 年 5 月 26 日提前完成了进水口闸门安装节点目标, 为硬梁包水电站防洪度汛提供了有力保障, 为实现首部三期分流目标奠定了坚实的基础。2023 年 6 月, 在承办甘孜州清洁能源发展大会及协供其他标段骨料的情况下, 混凝土浇筑单月突破 6 万立方米, 最高单班浇筑达到 1 500 立方米, 圆满完成了首部枢纽 6 月份的混凝土浇筑目标。这一目标的实现鼓舞了全体建设者的斗志和士气, 为工程实现三期分流提供了强有力的保障。

(水电七局 供稿)

叶巴滩水电站大坝工程圆满实现 2023 年上半年施工目标

水电七局一分局叶巴滩项目于 2023 年 2 月 28 日, 圆满实现了大坝混凝土转序以来首个冬季连续施工目标。尤其是 2023 年 3 月以来, 通过科学组织、精心安排, 快速掀起攻坚浪潮, 单班浇筑高峰达 1 766 立方米, 大坝混凝土浇筑实现“三连跳”, 3 月份混凝土浇筑量为 5 万立方米, 4 月份为 6 万立方米, 5 月和 6 月份均达 7 万立方米, 圆满完成了大坝工程上半年的施工目标, 这一目标的实现, 进一步鼓舞了全体建设者的斗志和士气, 为实现全年目标奠定了坚实的基础。

(水电七局 供稿)