

# 含漂砂卵砾石深厚覆盖层复合地基处理施工 关键技术的研究与应用

林晓旭, 夏维学

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

**摘要:**以硬梁包水电站为依托,针对深厚覆盖层地质条件复杂多变且含巨漂砂卵砾石地层条件,阐述了通过对防渗墙及地下连续墙采用精准施工技术、发泡泥浆护壁工艺、超常规振冲碎石桩填料自动化精确测量、反滤层精准布设施工工艺、振冲桩承载力快速简便检测方法、超深防渗墙防渗单元质量智能融合与辨识关键技术、智能化精确计量超常规振冲碎石桩填料等基础加固和防渗处理方法开展的研究与应用,有效地解决了泥浆漏失和护壁稳定性问题以及超常规碎石桩施工中遇到的技术难题,实现了对超深防渗墙质量的分析和定量评价,降低了防渗体出现隐患的风险,可对差异沉降进行有效管控,对项目施工进度和质量起到了促进作用,所取得的经验可供类似工程参考。

**关键词:**硬梁包水电站;漂砂卵砾石;深厚覆盖层;复合地基处理;超深防渗墙;超常规振冲碎石桩

**中图分类号:**TV7;TV52;TV641.4;TV523

**文献标志码:**B

**文章编号:**1001-2184(2024)增 2-0117-04

## Research and Application of Key Technologies in the Construction of Composite Foundation with Deep Overburden of Bleached Sand and Gravel

LIN Xiaoxu, XIA Weixue

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

**Abstract:** Based on the Yingliangbao Hydropower Project, this paper summarizes the complex and varied geological conditions of deep overburden and the formation with giant bleach sand. Through the precise construction technology of cut-off wall and underground diaphragm wall; foam mud wall protection technology; automatic and accurate measurement of super-standard vibro-crushed stone pile packing; accurate layout construction technology of reverse filter layer; quick and easy detection method of bearing capacity of vibro-crushed stone pile; intelligent integration and identification key technology of quality of ultra-deep cut-off wall impermeable unit; intelligent and accurate measurement of ultra-conventional vibro-crushed stone pile packing and other foundation reinforcement; research and application of intelligent and precise measurement of unconventional vibro-compacted stone pile filling and other foundation reinforcement and anti-seepage treatment methods, the problems of mud leakage and wall protection stability as well as the technical problems in the construction of ultra-conventional vibro-crushed stone pile have been effectively solved, realizing the quality analysis of ultra-deep anti-seepage wall and the quantitative evaluation of the seepage joint of the cut-off wall, reducing the occurrence of hidden dangers of anti-seepage body and effectively controlling the differential settlement risk, and promoting the construction progress and quality of the project, which can be used as reference for similar projects.

**Keywords:** Yingliangbao Hydropower Project; Bleached sand gravel; Deep overburden; Composite foundation treatment; Ultra-deep cut-off wall; Ultra-conventional vibro-crushed stone pile

### 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,为四川省大渡河干流最新规划 28 级方案中的第 14 级电站,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”的枢纽总布置方案。闸址处安装有装机容量为 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。

收稿日期:2024-03-03

主电站额定引用流量为  $1\ 261.2\ \text{m}^3/\text{s}$ ,通过2条长约14.4 km的引水隧洞将水引入其下游电站。

由前期地质调查结果得知:工程区域地质构造背景较为复杂,区域性得妥断裂从大渡河右岸距离闸址约1.0 km处通过。受得妥断裂的影响和控制,坝(闸)区次级小断层、小破碎带等软弱结构面发育。勘探钻孔揭示河床覆盖层的最大厚度为129.7 m,分布有两层连续性较好的堰塞沉积细粒土层,以此为界,其余为粗粒土层。由老到新、从下至上大致可分为5层:①、③、⑤层总体为含漂砂卵石粗粒土层;②、④层为堰塞沉积细粒土层。不同地层交错分布且覆盖层深厚,该工程布置的悬挂式防渗墙存在较大的绕渗风险。同时,工程所采用的防渗措施穿越多个地层,而不同地层交界处存在渗透流土破坏风险,从而给硬梁包水电站坝基的防渗处理带来极大挑战。该电站首部结构防渗系统由悬挂式防渗墙和帷幕灌浆组成,在河床覆盖层中设置了一道最大深度为73 m的悬挂式防渗墙与最大深度为120 m的帷幕灌浆(两岸坝肩)组成整体防渗体系。但由于砂卵石孔隙较大,在进行地连墙、防渗墙施工时,钻孔和开挖成槽过程中存在漏浆量较大、孔(槽)壁容易塌落等现象,进而对钻进成孔和开挖成槽质量造成了不利影响。

鉴于该工程基础加固和防渗工程措施类别多、施工量大,涵盖帷幕灌浆、混凝土防渗墙、高喷防渗墙、地连墙、振冲碎石桩等多种处理方式,施工技术难度大,加之工期紧张,因此,如何保证造孔、成槽施工质量成为该工程施工的关键。另外,由于硬梁包水电站振冲桩的最大处理深度达32.2 m,平均桩径为1.3 m,最大置换率为38.3%,从生产性试验检测种类和数量上均超过相关标准要求,在处理深度上亦超过检测试验规程,没有成熟的同类施工经验可供参考。

## 2 施工中存在的问题及采取的应对措施

### 2.1 含漂砂卵石深厚覆盖层防渗墙及地下连续墙精准施工技术

鉴于该项目覆盖层埋深大(最大达126.5 m)、漂卵石含量高、粒径差异大、空隙架空、土层密度低、地层岩土层结构不均、钻劈成槽工艺时间长、槽壁不稳,应用现有的泥浆护壁技术存在底层漏浆量大、孔壁坍塌、成槽无保障等风险。为了

解决上述问题,此次研究采用了发泡泥浆护壁技术,通过应用密度小、失水量少且具有高黏度强携岩屑能力的发泡泥浆护壁技术,按照基浆→发泡→泵送→清渣→浇筑施工工艺流程进行施工,可以减少漏浆与钻进阻力、便于钢筋笼下放,进而提高施工效率。

### 2.2 深厚覆盖层水下混凝土浇筑充填信息化监控技术在施工中的应用

超深防渗墙(地连墙)槽段混凝土浇筑存在易堵管、夹泥浆、填筑均匀度不可控、质量问题不易发现等缺陷,在施工过程中采用测锤由人工检测记录和推算。由于对施工中混凝土浇筑的密实与均匀性效果不清楚,需要根据现场施工情况进行事后判断。研究通过采用将检测料筒吊装至浇筑导管→介质标定→数据采集(成像结果、电阻率值)→实时记录并分析混凝土填筑均匀性→及时在线补充缺陷的信息化监控系统应用流程,运用ERT系统通过量测物体表面电位对物质内部电阻率进行重建。ERT系统满足麦克斯韦方程组理论,对于逆问题求解使用LBP算法,该算法具有成像速度快、实时性高等特点,适合工程实时检测,有利于对施工质量进行控制。

### 2.3 超常规振冲碎石桩填料自动化精确测量方法研究

该项目采用的振冲碎石桩施工具有冲桩深(35 m)、振动强(振动器200 kW)、成孔不规则、施工超常规等特点。而现有的施工技术缺少精确高效的适用方法,因此,如何对填筑量进行准确计量,如何快速自动计量每铲充填料的体积,如何对振冲质量进行评价成为施工中有待解决的难题。研究采用将激光雷达和数字相机安装在装卸车顶部,通过GPS位置转换及数据采集融合图像和点云信息进行数据滤波处理并进行体积计算,由试验研究得出精度达90%以上的结论。该自动化精确测量方法能够瞬息成像、适应性好、几何与物理信息兼得,具有低成本、小型化、在线检测、实时分析、全视场、高精度、高效率等优点,有利于对施工质量进行控制。

### 2.4 含漂砂卵石深厚覆盖层反滤层精准布设施工工艺研究

含漂砂卵石深厚覆盖层在高强振冲情况下存在塌孔风险,其分界部位的成孔实际性状决定

了反滤填料量与成桩位置,导致实际成桩效果受控难;其粉细砂层振冲液化易流土坍塌,成孔困难,而施工工艺又要求成型密实、段长合格、反滤段结构完整、反滤制桩位置准确。但常规采用的“反滤包振冲挤密”施工方法存在振冲力大、反滤结构层易松散、不易成形、无法形成有效滤塞段等问题。对此,研究采用“分段吊挂‘香肠式’反滤层管袋填充法”,通过设计滤布袋尺寸、设置‘香肠型’充填砂石料、缠绕振冲头吊挂后剪脱、精选机织或编织 PP 土工布的方式以保证其耐久性、耐腐蚀性,使反滤有保障,性价比高;将振冲器端部香肠型反滤包缠绕后精确下放至指定位置、振冲形成反滤结构层;现场进行的开挖揭露试验对比发现“香肠型反滤管袋”较“反滤包”反滤效果更好。

## 2.5 超常规振冲碎石桩桩基承载力现场高效试验

鉴于振冲桩承载力检测复杂、检测时间长、自动化程度低,因此,如何快速、简便地检测振冲桩的承载力缺少适合的处理方法,现有的静载桩基检测技术存在堆载量大、需要人工读数、危险性高、设备复杂、检测准备时间长、成本高并需要增加现场管理难度等缺点。对此,研究采用“便携装配式自动化检测设备”,通过设置“反力架+传力板+拉力协调装置+承台+钢筋或钢绞线+勾型抗拔件+自动化加载和测量装置”以达到快速自动检测的目的,其具有无需堆载、安全性高、自动化检测、长时间检测等优点,该设备简单、可人工施工、适合复杂的现场施工条件、成本低廉、可循环利用。

## 2.6 超深防渗墙防渗单元质量智能融合与辨识关键技术研究

对于深厚覆盖层漂孤卵砂石含量高、粒径差异大、空隙多而造成强渗透、局部易流失形成空洞、超深大面积防渗体施工难度大、深部不连续接头质量差的实际情况,通常采用的超声波 CT、大地电导率瞬变电磁仪、探地雷达等物探仪器大多瞄准的是结构缺陷,现有的防渗检测技术存在井下电视受清晰度影响无法同时直接判断透水情况;注水、压水试验操作困难、代价高、连续性差;取芯无法判断该断裂是缺陷还是取样造成的;超过 30 m 深度所取得的效果无法得到保证等实际问题。研究采用“人工示踪法”辨识所实施的防渗

措施质量的好坏。“人工示踪法”的原理是通过在防渗墙前后的钻孔中投放示踪剂,根据示踪剂在钻孔中稀释、与流速的快慢揭示防渗墙质量的好坏,人工示踪法的探测结果非常直观,清晰。对于检测精度方面,“人工示踪法”可以给出缺陷的位置与深度,对深度位置反映准确,而 ECR 渗漏水检测法对深部渗漏检测的准确性不甚灵敏。另外,人工示踪法在检测成本方面比 ECR 渗漏水检测法减少约 20%~25%。

## 2.7 超深组合防渗体多掺量整体质量评价关键技术研究

施工期二期基坑抽排水位的高程已降至 1 212.00 m。随着左岸边坡、基坑下挖,左岸下游护岸、尾水渠边坡、生态电站厂房边坡从坡内向坡外方向出现股状渗水点增加的情况,渗水高程为 1 214.00 m 左右且其均为清水。分析认为是通过第三层绕渗或山体渗水。经渗漏检测发现基坑渗水的地方分别是:主河床下游围堰堰体内侧;主河床下游围堰至尾水渠边坡沿线处、大坝防渗墙左岸下游以及进水口区域渗水。

研究通过现场调查探明了二期基坑渗漏点的渗水来源。采用水头分析并通过第三地层、第四地层和混合水位的水位等高线图和流向矢量图对基坑的渗水来源进行分析。对观测孔进行了流速测试,通过对不同观测孔不同深度的流速分布情况以及不同位置的流速差异,判断渗漏水的来源并计算了入渗流量;研究进行了垂向流测试,分析了下部地层的承压水上涌情况。

通过现场试验,利用等水位线法、示踪法、垂向流法进行了分析和总结得出以下结论:施工场地防渗体周边的水平流速均小于  $10^{-4}$  cm/s 数量级,表明防渗体防渗效果良好;上游围堰缺口处存在较大的渗透流速,其流速最大值为  $2 \times 10^{-2}$  cm/s,表明江水通过上游山体与围堰交汇处的缺口流入施工场地。经估算,其流量最大值可达  $108 \text{ m}^3/\text{h}$ ;施工场地地下伏第三地层的承压水通过钻孔向上层补给,向上的垂向流速为  $0.1 \sim 0.5$  m/s,最终确定施工场地基坑涌水的主要原因为上游缺口处的渗漏以及第三地层承压水上涌。

## 2.8 土层地下水对地基施工变形协同影响的模型分析研究

工程区河床覆盖层勘探钻孔的结果揭示:河

床覆盖层的最大厚度为129.7 m,分布有两层连续性较好的堰塞沉积细粒土层,以此为界,其余为粗粒土层,由老到新、从下至上大致可分为5层。现场深厚覆盖层超常规振冲成桩工艺施工难度较大,存在冲桩深、振动强、成孔不规则、超常规设计施工效果评价困难等问题,因此,在施工过程中对地层产生的影响评价也受制于缺少完整性的依据,且因采用超常规振冲成桩工艺所取得的施工经验亦较少,很容易在振冲碎石桩施工过程中产生较大的孔隙水压力且孔隙水压力消散较慢,易造成振冲桩桩头偏移,严重影响到振冲桩的承载力大小,妨碍施工进度。如果处置不当,将会影响到整个桩群的使用,进而导致施工事故的发生。

研究根据振冲桩的施工过程,运用有限元软件ABAQUS,在二维条件下分析了振冲碎石桩对地层中孔隙水压力的影响。从整个有限元计算模拟情况看,孔隙水压力的峰值随着深度变化到达的时间越慢且其峰值越小,对于整个振冲桩施工来说几乎没有影响,且冲击产生的土体位移为厘米级别,符合工程实际情况。

## 2.9 毗邻基础施工隐患预控管理模式

研究通过在重要结构施工工艺和交叉部位埋设总沉降观测砧标、分层沉降管、测斜管等典型观测监控设备对变形监测数据进行预处理、多测点变形联合分析预测、多测点变形联合预警指标拟定等手段,实现了风险源辨识、数据查询、数据分析等管理功能,提高了项目施工管理水平。

## 2.10 深厚覆盖层地基施工组织管理信息化系统的应用

研究通过无人机三维建模、原料和混凝土运输道路标定、运输车辆数字化改造、车辆信息实时显示、车辆路径规划等手段,实现了人机物料统计、基坑变形检测预警、运载情况监测、进度查询、施工区预警、物料调配、效果统计、实时要素反馈等功能,提高了信息化管理水平。

## 3 研究成果

(1)研发出“发泡泥浆”并将其应用于防渗墙及地下连续墙的护壁成型;发明了“一种防渗墙泡沫泥浆制备”,提出了“一种振冲桩反滤层施工方法”,有效地提高了反滤层防渗墙和地下连续墙的施工质量和施工效率。

(2)研究出一种基于图像特征和三维点云技术的散料体积测量方法,为超常规振冲桩的施工质量检测提供了支持,提高了现场振冲桩充填密实性评价的可靠性。

(3)研发出“一种适用于振冲碎石桩的监测辅助装置”,提出了含漂砂卵石层振冲碎石桩装配式承载力检测方法,有效地提高了桩基承载力检测的智能化水平,相比传统振冲桩静载试验,该方法安全性高,操作简单,自动化程度高。

(4)提出了使用人工示踪剂的方法,通过示踪试验获取防渗墙接头处的地下流场参数,从而可以精确地对防渗体接头位置的防渗质量进行评价,提高了超深组合防渗体质量评价的效率。

(5)通过使用有限元模型,精确模拟了振冲桩对地层产生的应力,采用java作为开发语言进行开发,采用B/S结构进行架构,此项研发基于硬梁包水电站闸基施工现场的可视化施工管理平台,提高了地基施工工艺信息化管理水平。

## 4 结语

笔者通过对所依托工程进行技术研究并将研究成果应用于该工程,在地基处理较为复杂的情况下缩短了整体工期2个月,并减少了因施工工艺交叉造成的不必要损失,亦减少了项目管理费用,同时降低了施工安全风险,提高了工作效率,加强了现场管理能力,保证了施工质量,降低了工程后期的维护费用。研究中提出的桩基承载力现场高效试验以及基于摄影和图像测量填料体积的方法不仅提高了现场的施工效率,同时亦提高了整体施工的智能化程度,为今后的水利工程智能化施工提供了思路、积累了经验。

### 参考文献:

- [1] 建筑地基基础设计规范:GB 50007-2011[S].
- [2] 混凝土结构设计规范:GB 50010-2010[S].
- [3] 建筑地基处理技术规范:DBJ 15-38-2005[S].
- [4] 建筑桩基检测技术规范:JGJ 06-2014[S].
- [5] 全周明.大型桩基承载力检测技术的应用分析[J].能源技术与管理,2020,45(3):150-153.

### 作者简介:

林晓旭(1986-),女,四川资中人,副高级工程师,从事市政、水电、铁路工程施工技术与管理工

作;

夏维学(1972-),男,四川仁寿人,正高级工程师,从事市政、水电、铁路工程施工技术与管理工

作。

(编辑:李燕辉)