

TB 水电工程碾压混凝土坝成套智能建造 关键技术的应用与实践

谭 峰¹, 吴 俊², 安 辉¹, 吴都督¹, 侯 炼¹, 李 恒¹

(1. 中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004;
2. 华能澜沧江水电股份有限公司托巴水电工程建设管理局, 云南 迪庆 674608)

摘要:针对早期碾压混凝土坝施工中的部分数字建造技术存在技术不先进、应用功能不齐全等问题,依托 TB 水电工程碾压混凝土坝开展成套智能建造关键技术研究,以解决高强度、连续施工条件下碾压质量难保障的难题。围绕大坝建设质量、安全、进度及施工管理等目标,从原材料到施工各环节应用成套智能建造技术,将智能化利器与现场施工紧密结合,减少对人的依赖,实现工程的安全、高效、优质建设。

关键词:智能建造技术;成套技术;碾压混凝土坝;TB 水电工程

中图分类号:TV134.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2024)S1-0111-04

Application and practice of integrated intelligent construction key technologies for roller compacted concrete dam of TB Hydropower Project//TAN Feng¹, WU Jun², AN Hui¹, WU Dudu¹, HOU Lian¹, LI Heng¹ (1. Smohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. Tuoba Hydroelectric Engineering Construction Management Bureau of Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Diqing 674608, China)

Abstract: In response to the issues of early digital construction technologies for roller compacted concrete dams, such as outdated technology and incomplete application functions, a study on the key technologies of integrated intelligent construction was carried out, relying on the roller compacted concrete dam of the TB Hydropower Project. This aims to solve the challenge of ensuring compaction quality under conditions of high intensity and continuous construction. Focusing on the objectives of dam construction quality, safety, progress, and construction management, integrated intelligent construction technologies are applied from raw materials to each construction phase. This closely integrates intelligent tools with on-site construction, reducing reliance on human labor and achieving safe, efficient, and high-quality construction of the project.

Key words: intelligent construction technology; integrated technology; RCC dam; TB Hydropower Project

在当今的新兴坝型中,碾压混凝土重力坝具有节省投资、缩短工期、绿色环保、节能减排等显著优势。大型水电站碾压混凝土施工工程量大,施工内容多,施工强度高,施工难度大,施工质量难以控制,信息量巨大^[1]。早期,碾压混凝土坝受人为控制因素干扰大,管理粗放,水利水电工程项目施工管理涉及的管理对象与内容非常多,要使现场的全部工程要素与流程得到有效管理,必须有完善的施工管理创新机制的支持^[2]。随着时代进步和社会发展,在注重技术创新和施工管理创新的基础上,应运用当前先进的科学技术和管理方法,积极加强施工管理创新,有效应对工程复杂施工条件的变化,实时掌握工程建设主动权,更好地达成建设目标^[3]。现阶段水电工程建设逐步走向高寒、高海拔、高地震烈度

区,施工效能降低、人力耗损增加,数字化、信息化、智能化是实现工程优质、高效、安全建设的必然选择^[4]。国家对智能建造的扶持力度不断加大,智能建造正引领着未来水电工程的建造方式。本文从 TB 水电工程大坝智能建造的角度总结了水电工程智能建造技术的关键技术进展。从鲁地拉^[5]、大华桥^[6]水电站的数字大坝到 TB 水电工程的智慧大坝,水电工程智能建造已逐渐由探索阶段向系统化发展阶段过渡。可以预见,随着理论、技术、方法等研究的不断深入,大坝智能建造标准和体系的不断完善,集成智能建造平台的不断升级和更高效部署,我国水电工程智能建造水平将会达到一个新的高度,实现工程建设全员、全要素、全流程、全过程智能化管理。

1 工程概况

TB 水电工程是澜沧江干流上游河段规划的第四个梯级电站。TB 水电工程属于一等大(1)型工程,挡水建筑物采用碾压混凝土重力坝,坝顶高程 1740 m,坝顶全长 475 m,最大坝高 158 m。TB 水电工程建设过程中运用先进的科学技术提升大坝工程建设的施工和管理水平,实现了工程建设和运行全过程的规范化、标准化、专业化、精细化、智能化管理。

TB 水电工程实现了全过程的智能建造应用,应用了智能拌和、智能碾压、智能温控、智能灌浆等技术,国内高校和科研机构常驻于此,结合工程实际开展科技攻关,在传统智能建造基础上进一步升级创新,极大提升了项目的智能化管理水平。施工现场的各项作业环境数据和人员施工情况可以实时掌控,帮助管理人员进行工程进度、质量、安全控制,从而实现施工全工艺流程的精细化管理与关键作业环节的智能化控制。

2 智能建造关键技术

2.1 智慧指挥中心

指挥中心是智慧工地在建筑工程项目的中枢和指挥机构^[7]。为实现智能建造系统协调现场生产管理,加大智能建造在工程建设各环节的应用,TB 水电工程在左岸坝顶宽阔场地建设智慧指挥中心。中心内配置企业文化、质量样板室、品质工程建设及智能建造展示屏等内容展示。智慧指挥中心建设并不是简单的大屏等硬件设施的堆砌或者大数据的仪表化展现,而是要通过数字化建模把整个大坝多个维度的数据进行统筹分析,打造态势可感知、运行体征可监测、平时事件可管理、“战时”事件可联动、未来发展可规划、决策分析可支撑的管理体系。即智慧指挥中心建设不是一朝一夕的,而是伴随整个大坝浇筑的一个长期的、演化的发展过程。以“数据融合、技术融合、功能融合”为理念,对大坝建设各专业领域的业务数据、流程、技术进行汇聚、分析等一系列智慧化操作,从而整合分析海量数据,形成多组知识视图,为大坝建设保驾护航。因此,以“中心”为抓手建设,数据汇集“中心”,分析指导前方“作战”,有助于打造新型智慧水利工程建设的示范展厅。

2.2 管理创新机制

TB 水电工程在工程建设中创造性地提出“管理一机制,管控一流程,动态一张图,数字一档案”的创新管理机制,与智能建造系统相匹配,更好地发挥智能建造系统实时、动态、分析、反馈的作用,为工程建设决策提供科学依据。“管理一机制”是指将生

产管理与智能建造系统应用管理统一结合起来,成立智能建造系统应用管理小组和攻关小组,建立相应的考核机制。通过例会制度,促使现场人员紧密结合智能建造系统来管控工程建设,切实发挥智能建造系统的管理效能。“管控一流程”是将大坝施工过程中的各个专业、各个工序分解为无数个管控流程,统一质量标准,将所有工序流程化、标准化、可视化,存入智能建造系统中,可随时随地通过手持终端调阅。“动态一张图”是将工程建设的进度、资源投入、质量等关键要素在工程建设三维图中集中展示,通过数据动态更新,实时展示工程建设情况。“数字一档案”是指将碾压混凝土施工过程中的大量重要参数、质量监控数据、管理数据、现场相关影像资料等以仓为单位建立统一的台账,多源数据通过智能建造系统自动归集、建立单仓档案数据,统一归集到智慧指挥中心留存管理,可作为仓面质量评价、评级及专家检查的辅助资料,实现了数字化档案管理的新模式。加强水利水电施工管理工作是一项事关全局和长远的系统工程,任务艰巨、责任重大、意义深远。应结合现场实况建立管理创新机制,形成建设与管理并重的科学思想,与智能建造系统匹配应用,为工程建设降本增效。

2.3 成套智能技术

2.3.1 基于智能碾压管控技术,实现智能化减人,提升大坝施工质量,助力打造精品工程

全坝应用智能碾压系统,对碾压混凝土的碾压全过程实时监控,依托质量监控系统、智能导引可视化、压实度预测和无人碾压等先进的科学技术对大坝重要参数进行监控。

a. 质量智能监控系统。如何确保碾压机速度、激振力、碾压遍数和压实厚度等全过程达标,是保证大坝施工质量的关键和难点。智能碾压系统通过全球导航卫星系统和北斗卫星等先进技术,对平仓机和碾压机的作业状况进行实时监控,层间覆盖时间控制精度达到分钟级,碾压遍数、轨迹、厚度等定位达到厘米级。

b. 智能导引系统。数字大坝通过管理人员指挥碾压机操作手对漏碾位置进行补碾,漏碾条带无法精准定位,易出现反复碾压。TB 水电工程在传统数字碾压基础上安装智能导引系统,采用 AR 技术将碾压轨迹、碾压数据以图像的形式展现在屏幕上,引导碾压机司机进行自主作业,提高仓面碾压作业的一次合格率。

c. 压实度智能预测系统。核子密度仪存在核辐射,会对检测人员造成一定伤害。传统质量检测以点代面检测,难以实现对压实参数的精准控制。

TB 水电工程在现场开展了压实度智能预测技术研究,结合碾压机遍数、核子密度仪和智能设备监测数据进行大数据分析,建立压实度智能预测模型,实现仓面压实质量的智能预测和实时评价。

d. 智能无人碾压。在高强度碾压作业过程中,操作手易疲劳、作业效率低、碾压条带不平顺、搭接处易漏碾,易出现质量问题。高寒、缺氧等恶劣条件对施工人员工作效率影响较大。经过多次仓外和仓内试验,无人碾压各项功能均已实现,成功应用于TB 水电工程大坝施工中,开创了复杂工况下“碾压机群”作业的先河,为下一步西藏等高海拔地区无人、少人化施工创造了条件。

按照每个浇筑坯层 200~400 m² 检测一个点,每一浇筑层不少于 3 个点的标准进行检测,大坝共包含 3.78 万个检测点,压实度检测合格率为 100%。检测结果如表 1 所示。

大坝浇筑 59 仓碾压混凝土,共 1502 层,碾压遍数覆盖率达到 98% 以上,层间铺料厚度为 31.73~37.94 cm,层间覆盖时间为 60.79~358.22 min,满足碾压混凝土施工技术要求。

基于智能碾压技术,实现持续高强度施工,取得了月最大上升 15.0 m、连续 5 个月平均每月上升 13.9 m、年最大上升 126 m 的优异成绩。在智能压实度的保障下,现场压实度按照规范上限 500 m²/点检测,后期广泛推广后可逐步取代核子密度仪检测;无人碾压划定范围应用效果良好,可推广至市政道路及高海拔地区水电工程建设,为少人化、无人化施工提供思路。

2.3.2 科技助力,运用智能温控技术实现精细化通水,避免温度裂缝产生

针对 TB 水电工程施工强度高、昼夜温差大等温控管理痛点,开展智能温控研究,建立混凝土拌和、运输、浇筑、碾压、养护等全流程一体化智能温控

平台。云南地区太阳辐射强、蒸发快,碾压混凝土施工过程中,对混凝土保鲜性要求较高。智能喷雾系统结合现场实际温度、湿度自动进行混凝土喷雾及养护,保证了混凝土施工质量和养护要求。通过建立全坝、全过程、实时温控仿真云计算平台,实现 7~10 d 完成一次大坝整体温控性态仿真计算,对大坝应力情况进行全面分析。基于智能通水系统为每个浇筑块选择最优的控温策略和通水调控时机、流量、开度等参数,使混凝土内部温度保持在规范区间,全面提升大坝混凝土温控水平。

TB 水电工程创新应用了碾压混凝土坝施工全过程的智能温控技术,提出了总体架构和各项关键技术,首次建立全坝、全过程实时仿真云监控技术和平台,实现实时仿真和数据融合分析,将一次温度和应力跟踪仿真的时间控制在半个月以内;实现基于通用场景(TSTM)试验的混凝土真实温度过程下的参数和应力量测,并建立温度应力仿真实验技术结合跟踪仿真分析的温控标准和措施优化方法,优化温控标准和措施。进一步通过打造反馈仿真云平台等实现同智能温控的耦合调控,最终实现大坝混凝土从原材料拌和、生产、运输、浇筑、冷却通水到保温养护的全过程智能动态反馈控制,克服了气候特殊、工期紧、工程量大、防裂难度大等难题,保证了碾压混凝土连续翻升过程温度可控。共埋设温度计 980 支,铺设冷却水管 3728 套,整体温度满足要求,如表 2 所示,目前未产生温度裂缝。智能通水系统保证各管路个性化通水,节约人力 90% 以上。

2.3.3 运用智能灌浆透明化地下施工质量,铸造水电工程“地下堡垒”,提升灌浆管理水平

现有灌浆技术难以建立智能灌浆策略进行可视化分析,项目部在现场采用智能灌浆技术,实现了自动分析岩石裂隙情况、灌浆压力自动控制、灌前可灌

表 1 压实度检测成果

序号	检测部位 强度等级	检测部位 级配	检测点个数	设计压实度/%	实测最大 压实度/%	实测最小 压实度/%	实测平均 压实度/%	合格率/%
1	C ₉₀ 20W10F150	二	5531	≥ 98% (内部)、 ≥ 98.5% (外部)	102.5	98.4	99.5	100.0
2	C ₉₀ 20W8F100	三	29296		102.9	98.0	99.4	100.0
3	C ₉₀ 15W6F100	三	3009		101.4	98.1	99.2	100.0

表 2 碾压混凝土内部温度监测成果

内部温度检测							中期通水					
允许最高 温度/(℃)	温度 计数量	最高 温度/(℃)	合格 组数	合格 率/%	超温率(不大 于 5℃)/%	超温率(大 于 5℃)/%	检测标准/ ℃	最高温度/ ℃	平均温度/ ℃	温度 计数量	合格 组数	合格 率/%
28	139	33.6	126	90.6	5.7	3.7	22	23.9	19.8	139	130	93.5
29	83	34.7	75	90.4	6.3	3.3	22	21.7	19.1	83	83	100.0
30	95	35.8	86	90.5	7.1	2.4	22	22.6	18.9	26	25	96.2
31	21	35.3	20	95.2	4.8	0.0	22	22.0	18.5	21	21	100.0
34	121	37.1	115	95.0	5.0	0.0	22	22.9	19.2	68	66	97.1
36	128	38.0	123	96.1	3.9	0.0	22	21.1	18.8	99	99	100.0

性分析和灌后成果展示,实现灌浆工程的“阳光智能化”作业。根据大坝混凝土取芯压水检查长度1351 m 查看,芯样质量整体较好,外观光滑、致密,骨料分布较均匀。

2.3.4 基于智慧物料、智能拌和系统对施工原材料进行管控,实现保质保量生产

大坝结构复杂,钢筋用量大,翻样任务重,材料浪费严重,人工加工慢。智慧物料系统对钢筋厂进行全流程的任务监控,系统可以随时看到钢筋的库存、加工明细、配送明细、出库明细等,钢筋实现自动加工,降低了钢筋损耗,提高了生产效率。

针对拌和系统产量要求高、工艺复杂、运行环境差等管理难题,运用智能拌和系统,实现了操作人员工厂化办公,车辆自动识别,灰罐自动监测,骨料含水率、混凝土温度、生产数据实时自动监测、采集、传输等功能,提高了工作效率和混凝土生产强度。在智能拌和系统的远程控制下,4 座 HL270-2S4000L 强制式拌和楼实现了月最高产量 23 万 m³,连续 5 个月产量高于 20 万 m³。

3 结 语

智能建造技术对传统水电行业来说是一项重要革新,其成功推广应用将大幅提升建设施工项目的实时监管、分析、预测能力。在成套智能建造技术的保障下 TB 水电工程大坝实现快速上升,仅 19 个月完成碾压混凝土浇筑,实现保质保量生产,同时取出碾压混凝土世界最长芯样 26.5 m,芯样质量整体较好,混凝土层间结合较好。TB 水电工程智能建造技术的成功应用,能够为其他类似项目的智能化建设提供有益参考,进一步推动水电行业的数字化转型和高质量发展,具有较好的推广应用价值。

参考文献:

[1] 郑爱武,肖海斌,迟福东,等.高碾压混凝土坝建设管理

(上接第 100 页)

参考文献:

[1] 杨婧.维西县少数民族非物质文化遗产保护的问题及对策研究[D].桂林:广西师范大学,2023.
[2] 卢影.傣族滇西北两地传统民居营造文化对比研究[D].昆明:云南艺术学院,2022.
[3] 罗欣.德昌傣族舞蹈艺术研究[D].成都:四川师范大学,2020.
[4] 张佳.傣族女性服饰图案的传承与时尚重塑[D].北京:北京服装学院,2021.

数字化及质量智能监控系统的研发与实践[C]//创新时代的水库大坝安全和生态保护:中国大坝工程学会 2017 学术年会论文集.郑州:黄河水利出版社,2017: 313-333.

[2] 李鸿鸣.水利水电施工管理的创新策略分析[J].黑龙江水利科技,2020,48(12):210-212. (LI Hongming. Analysis of innovative strategies for water conservancy and hydropower construction management [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology,48(12):210-212. (in Chinese))
[3] 樊启祥,陆佑楣,周绍武,等.金沙江水电工程智能建造技术体系研究与实践[J].水利学报,2019,50(3):294-304. (FAN Qixiang, LU Youmei, ZHOU Shaowu, et al. Research and practice of intelligent construction technology system of Jinsha River hydropower projects [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(3):294-304. (in Chinese))
[4] 王睿佳.水利水电工程应走好数字化智能化道路[N].中国电力报,2023-06-16(3).
[5] 赵银超,夏国文.数字大坝系统在鲁地拉水电站大坝碾压混凝土施工中的应用[C]//高坝建设与运行管理的技术进展:中国大坝协会 2014 学术年会论文集.郑州:黄河水利出版社,2014:798-809.
[6] 潘斌.华能澜沧江公司大华桥水电站工程 创新驱动 助力“双碳”[J].中国电力企业管理,2021(12):28-29. (PAN Bin. Dahuajiao Hydropower Station Project of Huaneng Lancangjiang Company:innovation-driven to help “double carbon” [J]. China Electric Power Enterprise Management,2021(12):28-29. (in Chinese))
[7] 吴璇,张涛.数字指挥中心在智慧工地建设中的应用探索[J].安装,2021(10):17-19. (WU Xuan, ZHANG Tao. Exploration of the application of digital command center in the construction of smart construction site [J]. Installation,2021(10):17-19. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-23 编辑:俞云利)

[5] 卢影.傣族滇西北两地传统民居营造文化对比研究[D].昆明:云南艺术学院,2022.
[6] 陈世钧.地域性装饰艺术在建筑装饰设计领域中的实践[J].鞋类工艺与设计,2023,3(5):120-122. (CHEN Shijun. The practice of regional decorative art in the field of architectural decoration design [J]. Shoes Technology and Design,2023,3(5):120-122. (in Chinese))
[7] 段雪芬.建构视野下混凝土材料在当代文化建筑中的表现策略研究[D].西安:长安大学,2023.

(收稿日期:2024-09-20 编辑:熊水斌)