

TB 水电工程大坝施工关键技术

吴都督¹, 张天伟², 罗长青¹, 侯 炼¹, 王亚磊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 TB 水电工程施工管理组织难度大, 施工技术准备工作要求高的问题, 结合 TB 水电工程现场实际情况, 对新时代碾压混凝土快速筑坝技术进行了分析, 对入仓布置、平层连续翻升技术、斜层循环施工技术、快速跨廊道层施工技术、快速跨中孔施工技术, 导墙与碾压混凝土同步上升技术、溢流面分开浇筑等关键技术展开研究与应用, 实现了在低温季节平层一次性“连续上升 18 m”, 在高温季节超过 10 000 m² 的仓面采用 6 m 斜层 10 d 一循环施工等技术突破, 充分发挥了碾压混凝土筑坝技术快速施工的优势。

关键词:大坝施工; 连续上升; 斜层循环; 同步上升; TB 水电工程

中图分类号:TV642.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2024)S1-0045-06

Key technologies for dam construction of TB Hydropower Project//WU Dudu¹, ZHANG Tianwei², LUO Changqing¹, HOU Lian¹, WANG Yalei¹ (1. Sinohydro 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 view of the problems of high difficulty in construction management organization and high requirements for construction technology preparation in the TB Hydropower Station, combined with the actual situation of TB Hydropower Station, an analysis was conducted on the rapid roller-compacted concrete (RCC) dam construction technology in the new era. Research and application were carried out on key technologies such as the layout for material placement, the flat-layer continuous lifting technology, the inclined-layer cyclic construction technology, the rapid construction technology across gallery layers, the rapid construction technology across the middle outlet, the technology of synchronous lifting of the guide wall and the roller-compacted concrete, and the separate pouring of the spillway surface. Technical breakthroughs were achieved, such as the “continuous rise of 18 m at one time” in the flat layer during the low-temperature season and the adoption of the 6-meter inclined-layer construction with a cycle of 10 d for the placement area exceeding 10 000 m² in the high-temperature season, showing the advantages of the rapid construction of the RCC dam construction technology.

Key words: dam construction; continuous rise; inclined-layer cycle; synchronous rise; TB Hydropower Project

长期以来, 碾压混凝土筑坝技术因其筑坝速度快和投资省的特点, 成为研究的热点。国内外在碾压混凝土快速筑坝技术领域取得了丰硕的研究和应用成果。其中, “快速”是碾压混凝土筑坝技术的最大优势。在设计过程中, 应结合碾压混凝土坝的特点, 通过优化大坝体型结构, 尽量减少坝内孔洞, 简化坝体结构, 尽量扩大碾压混凝土的应用范围, 从而最大限度地降低对碾压混凝土快速施工的影响^[1]。在大花水水电站的建设中, 通过提高拌和楼保障率, 采用缓降溜管技术解决了碾压混凝土的垂直运输问题, 运用“三件套模板”实现了模板的快速拆立, 创造了碾压混凝土在 34 d 内连续上升 33.5 m 的施工

记录^[2]。在索风营水电站的施工过程中, 通过精心统筹和科学布局, 保证原材料供应和碾压混凝土生产, 采用 3.1 m×3.0 m 的交替上升大模板和连续翻升的台阶模板, 出机口温度控制在 17℃ 以内, 保持仓面持续喷雾, 埋设冷却水管等温控措施, 确保了碾压混凝土的连续上升作业。在挡水坝段, 按照 12~18 m 的升层标准施工, 在非溢流坝段部位实现了一次浇筑到坝顶, 升层高度达 31.4 m 的记录^[3]。

TB 碾压混凝土重力坝在施工过程中, 将碾压混凝土快速施工技术成果“集于一身”。本文对 TB 水电工程大坝施工关键技术进行了介绍, 该技术结合最新的智能化质量管控手段, 克服了右岸入仓困难、

左岸入仓强度大、高温季节和雨季持续时间长等多项技术难题,充分发挥了碾压混凝土快速筑坝技术的优势,实现了大坝高品质快速连续上升。

1 工程概况

云南 TB 水电工程属一等大(1)型工程,其挡水建筑物为碾压混凝土重力坝,该坝顶高程达到 1 740.00 m,整个大坝由 22 个坝段组成,其中 1~5 号坝段为进水口坝段,6~22 号坝段为挡水坝段。坝顶长为 477.00 m,最大坝高为 158.00 m。大坝施工呈现出以下主要特点:

a. 工期紧张:TB 水电工程大坝的混凝土总量高达 223.7 万 m³,其中最高月施工强度达 23 万 m³,高峰期月平均上升高度为 13.9 m。在 2023 年,大坝 1 年上升高度达 126 m,整个混凝土浇筑工程仅用了 19 个月完成,可见工期非常紧张。

b. 结构复杂:大坝设计中包含了三层廊道,其占压直线工期较长。10~14 号坝段为表孔坝段,其中 10 号坝段设有泄洪中孔,14 号坝段设有生态孔,这些结构将大坝分割成多个部分。常态混凝土的用量达 27.39 万 m³,结构复杂,施工人员多,施工难度较大,都是工程面临的挑战。

c. 右岸入仓困难:大坝右岸的边坡高度达 150 m,坡比为 1:0.2~1:0.3,最宽的马道仅有 5 m。由于早期无法通车,导致右岸通行和入仓布置困难。

d. 温控难度大:TB 水电工程所处海拔为 1 700.0 m,最大昼夜温差高达 21.4℃,最大瞬时辐射可达 1 978.5 W/m²,最高气温达 38.06℃。6—8 月多阵雨和点暴雨,温控工作难度大。

2 快速施工关键技术

2.1 入仓方式的确定

要实现碾压混凝土坝的高品质快速浇筑,确保混凝土高强度入仓是首要条件之一。TB 水电工程大坝碾压混凝土根据入仓方式的不同,共划分为

8 个区。左岸的大仓面施工结合地形状况,主要采用自卸汽车直接入仓的方式,而右岸由于边坡高陡,无法布置道路,主要采用满管和胶带机入仓。其中,左岸布置了 4 条入仓道路和 6 条满管;右岸布置了 2 条入仓道路、4 条胶带机和 5 条满管。如表 1 所示,在大坝混凝土浇筑的不同阶段,各入仓方式均会在接近相应高程前一个月,就准备好下一阶段的入仓手段,满管入仓至少要提前一个月进行调试入仓。

2.2 快速上升模板的确定

为了满足大坝外观的高品质需求,TB 大坝的 upstream 面、downstream 面和分块横缝面均采用全新悬臂连续翻转钢模板。同时,为了降低在快速上升施工过程中频繁的拆模和翻模操作对施工效率的影响,悬臂连续翻转钢模板数量按照 4 层进行配置,以确保满足 12 m 升程的施工需求。

悬臂翻升模板的主要尺寸为 3 m×3 m(高×宽),其后部采用钢桁架进行支撑。在已施工仓面底部的老混凝土面保留 1 层模板,对于升层高度达到或超过 12 m 的仓面,在这层模板上面再架设 3 层模板,总共 4 层模板;对于升层高度小于 12 m 的仓面,在这层模板上面再架设 2 层模板,总共 3 层模板。当碾压混凝土覆盖至仓面 4.5 m 高时开始进行翻模作业,将最下层老混凝土面的模板吊装至仓面内。为避免污染仓面,模板摆放位置铺设了彩条布,并对模板进行清理和涂刷脱模剂,然后将处理好的模板吊装至最上层。吊车位置与浇筑条带方向相反,即当浇筑条带方向从上游向下游时,吊车先在下游进行模板翻升,这样可以在吊车定位后延长翻升模板的时间,提高吊车的利用率。当浇筑到下游附近时,吊车移至上游面翻升模板,如此交替操作,既可以完成模板翻升,又不会影响大坝的连续浇筑。在模板翻升过程中,测量人员进行全过程跟踪校模。模板的面板及其支撑系统必须具备足够的强度和刚度,以承受荷载、满足稳定性要求、防止变形和走样,并且具有良好的密封性,确保不漏浆。为减少模板人员监测产生的误差,项目部联合武汉大学研发了“AI

表 1 大坝不同高程入仓方式及时间规划

分区	坝段	高程/m	混凝土入仓方式	混凝土方量/m ³	混凝土浇筑时间
1 区	⑬~⑮	1 582.00~1 613.77	左岸基坑自卸汽车直接入仓	244 809	2022-06-01—2023-01-04
2 区	⑨~⑫	1 582.00~1 635.30	右岸基坑自卸汽车直接入仓	369 668	2022-05-22—2023-01-28
3 区	⑬~⑯	1 613.77~1 641.40	左岸 1 651.00 m 满管入仓	317 594	2023-01-05—2023-03-03
	⑪~⑯	1 641.40~1 651.60	左岸 1 651.00 m 满管入仓	317 594	2023-03-04—2023-04-25
4 区	⑧~⑩	1 635.30~1 669.00	右岸 1 667.00 m 料斗+满管入仓	165 089	2023-01-29—2023-04-15
5 区	⑥~⑨	1 669.00~1 699.00	右岸 1 699.00 m 胶带机+满管入仓	98 273	2023-04-16—2023-08-15
6 区	⑪~⑰	1 651.60~1 699.00	坝后高程 1 682.00 m 道路自卸汽车直接入仓(满管辅助)	444 827	2023-04-26—2023-09-03
7 区	⑥~⑨	1 699.00~1 738.50	右岸 1 740.00 m 满管+胶带机入仓	74 352	2023-08-16—2023-10-23
8 区	⑪~⑰	1 700.35~1 738.50	左岸 1 740.00 m 满管入仓	222 705	2023-09-04—2023-11-13

视觉的连续翻升模板自动测量系统”,并成功申请了两项专利和两项软件著作权。

2.3 低温季节平层连续高升层施工技术

碾压混凝土实现连续高升层快速上升,首先要确保拌和系统及原材料充足,以便能够持续不断地为现场生产提供混凝土。其入仓手段必须保证各高程能够连续衔接,当采用满管、真空溜管、胶带机等方式时,过程中仅进行简单拆卸。原则上,调整入仓手段所占压的时间在单层直线工时上不超过 2 h。在没有大量满管安拆或者道路填筑的情况下,这种方式是可行的。

TB 大坝右岸 6~10 号坝段在跨越中层廊道顶部 1645 m 高程后,坝体结构相对较为简单,且已脱离强约束区。鉴于 10 号坝段 1665 m 高程为中孔底板高程,且中孔为 2023 年度汛前关键线路上的施工项目,故在 3 月份低温季节采用碾压混凝土连续快速上升技术,将 6~10 号坝段一次性从 1645 m 高程采用平层法连续快速上升浇筑至 1663 m 高程,整仓一次上升 18 m,总计 60 层。该仓面上下游宽度为 59.25 m,左右岸宽度为 74 m,最大仓面面积为 5885 m²。仓面主要安排了 6 台碾压压机、4 台平仓机等设备进行施工。

连续上升施工采用薄层平铺法进行浇筑,即每次铺料厚度 35cm,碾压厚度 30 cm。在施工过程中,需要重点控制碾压混凝土的层间结合时间、做好模板清理以及过程中的钢筋绑扎等工作。在悬臂翻升模板拆模前,要在仓面内提前铺设足够面积的彩条布,用于放置已拆卸的模板,防止模板携带的混凝土碎渣污染仓面。将模板清理完成后,把掉落在彩条布上的碎渣收集至集渣斗中,通过缆机将集渣斗吊离仓面。在模板翻升过程中,若需使用吊车进行吊装,吊车支腿底部应采用彩条布进行覆盖铺垫。同一位置的模板翻升吊装需在 2 h 内完成,吊装完成后,在起吊占压区域进行碾压混凝土摊铺前,应铺洒一层净浆。当吊装时间接近 2 h 仍未完成吊装时,需让开工作面,优先进行碾压混凝土施工。在模板翻升过程中,模板吊装施工区域与钢筋绑扎施工区域应错开进行。钢筋和止水在浇筑过程中随着模板上升而持续加高,在混凝土浇筑前需再次涂刷脱模剂。当钢筋施工部位高度较高时,采用臂式高空作业车和移动操作平台辅助完成作业。需要安装的钢筋由缆机和汽车吊运至钢筋待安装区域,由人工协助安装并调整钢筋布置位置,严格按照设计间排距进行钢筋的定位焊接,在定位无误后,根据相关要求对钢筋进行定位焊接工艺施工。同一部位的钢筋不宜过多集中,确保同一占压区的作业时间不超过 2 h。

2.4 高温季节斜层循环作业施工技术

从每年 4 月起,TB 坝址区域步入雨季,降雨多为阵雨和点暴雨。5 月开始进入高温季节,云南地区太阳辐射强,2024 年 7 月瞬时最高太阳辐射强度可达 1978.5 W/m²。5—10 月存在降雨时仓面排水困难以及出太阳时仓面覆盖不及时的难题。同时,TB 水电工程碾压混凝土大坝 11~20 号坝段的最大平层仓面面积达 12751 m²,在连续高强度生产制冷混凝土条件下,现场现有的混凝土生产能力在层间覆盖时间上满足不了技术要求,因此,TB 水电工程在高温季节采用斜层碾压施工。通仓大斜层一般采用 6 m 升层,特殊情况下采用 9 m 升层。通仓大斜层循环施工如图 1 所示,以整个大坝左岸(11~21 号)作为一个仓,包括开仓端、连接段和收仓端,开仓端(4 个坝段)备仓完成后即可开仓浇筑,其余坝段在开仓端浇筑时继续进行模板、钢筋、止水等备仓工作,并在过程中进行验仓。收仓端坝段在完成收面作业后仅停歇两天,便可开始下一仓面的备仓工作,同步进行连接段碾压混凝土施工与收仓端的备仓工作,通过这种循环施工的方式,形成了流水作业,使得大坝逐层连续上升。这样不仅实现了高强度的连续施工,缩短了混凝土层间间隔时间,提高了碾压混凝土层间结合质量,温度控制也得到了保障。在特殊环境下,如降雨时也能及时将雨水排出,继续施工,从而加快了施工工期。

TB 大坝采用斜层平推铺筑法进行施工,单仓上升高度主要为 6 m,个别仓面上升高度达 9 m。斜层施工包含平层段和连接段,其中连接段的斜面坡度为 1:12。平层段是指斜面的起始端和末尾收仓部位,这两个区域均需 8~15 m 的施工平台,以满足必要的施工空间需求。斜层碾压的大部分施工工艺与平层碾压相同,但重点需控制斜层碾压时在斜层底部前端形成的三角形尖角。当碾压压机行驶到坡脚位置时,尖角前端的骨料可能会被压碎,从而影响碾压质量。为解决这一问题,车辆入口处的水平方向多铺设一段碾压混凝土,以形成坡脚无高差入仓通道。清除坡脚混凝土时,需将前端压碎的 10 cm 厚骨料混凝土全部采用小挖机铲除,铲除的水平长度为 1.2 m。为减少坡脚碾压混凝土的清除工作量,在不作为入仓路口段铺料时,可缩短坡脚铺料长度,使坡脚处形成 5 cm 高差。在有高差的部位进行碾压时,前端骨料可能会向前挤压,导致骨料处于松散或压碎状态,清除时需将水平方向 0.5 m 长的碾压混凝土清除。因此,采取在斜层底部预铺水平过渡层的办法,即在碾压混凝土斜层坡脚铺设时,首先人工配合小挖机挖除上层斜层碾压的坡角(高 4~5 cm、长

50 cm 左右)的混凝土,然后利用高压水枪清洗老混凝土面。将原坡脚处白色土工布迁移至下一层坡脚 3.6 m 位置,在老混凝土面上人工摊铺砂浆,并在砂浆上摊铺 35 cm 厚的碾压混凝土以形成水平垫层,水平垫层的宽度需超出坡脚前缘 30 ~ 50 cm。施工时先完成水平垫层碾压混凝土的碾压,再将上层斜层碾压料铺至水平垫层末端,接着水平垫层再与上层斜面一同沿着垂直水流方向进行碾压。水平垫层端头预留 50 cm,待下层斜面一起碾压。碾压完将端头白色土工布翻起将端头覆盖。在高温季节,需加强裹头部位喷雾保湿,避免裹头失水发白。

在高温雨季,采用斜层碾压施工方法对于大仓面来说尤为有利,它不仅促进了雨季时仓面排水,还缩短了层面覆盖时间。层间间隔时间越短,层面胶结效果就越好,这也就意味着碾压混凝土的质量会更高。TB 大坝的碾压混凝土浇筑采用通仓大斜层循环作业施工工艺(图 1),在 6 m 升层的情况下,最快实现了 2 天完成备仓,8 天完成浇筑的佳绩;单个 6 m 仓收仓 2 天后可继续开仓,实现了循环作业的优异战绩。

2.5 快速跨廊道层施工关键技术

TB 大坝廊道总长接近 2 000 m,其中位于高程 1 586.00 m、1 640.00 m、1 695.00 m 的廊道层为水平廊道,这些水平廊道的总长达到 1 435.5 m,全部为现浇混凝土廊道。大坝廊道层的廊道模板安装后,原本的大仓面被这些廊道分隔成多个上下左右独立的仓面,而且廊道外围还布置了钢筋网,使得各个仓面显得更为细小和狭窄。扣除上游面的拉模筋、止水架等结构后,上游面的碾压机械设备无足够的空间停放。廊道层碾压混凝土施工是本工程中技术难度最高、占直线工期较长的一个关键升层环节。

为了实现廊道的快速备仓,项目管理人员提出了“提前拼装、整体吊装”的施工思路。为了加快廊道备仓速度,廊道模板采用每 12 m/6 m 整体吊装的方式进行施工。具体而言,廊道模板需要按每节 12 m/6 m 长提前在预制场进行组拼,接着采用平板

拖车运至现场,当具备安装条件时,再采用缆机吊运至仓面内。钢筋在吉介土钢筋厂加工完成后运抵施工现场,在大坝两岸马道上提前将钢筋绑扎成网片状,然后待廊道模板安装完成后,钢筋成片整体通过缆机吊装至仓面内进行安装。这种方式将钢筋的备仓工艺提前,缩短了仓面内钢筋绑扎的时间。

为了促进廊道层的快速上升,在横向廊道上预留入仓缺口。在预留入仓缺口的廊道范围的上、下游侧各增设一圈橡胶止水。在廊道缺口的左右两侧码放预制块,并在预制块上摆放钢栈桥,以连通左右两侧仓面。考虑到便捷的进出需求,根据廊道长短和仓面大小,可预留 1~2 个廊道缺口,确保自卸车、碾压机等设备能够顺利穿梭于廊道两侧,单个预留缺口的宽度为 6 m。在进行大仓面碾压混凝土施工时,廊道预留缺口两侧采用预制块堆放缝仓,同时在预制块上架设钢栈桥。在碾压混凝土浇筑过程中,随浇筑进度的推进,逐层加高预制块、抬升钢栈桥,以保证两侧同步上升。钢栈桥长度一般为 6 m,满足自卸车的通行需求。廊道周边常态混凝土或机制变态混凝土与碾压混凝土同步上升。大仓面碾压混凝土同步上升完成后,在准备下一仓面期间,完成预留缺口部位的模板拆除、混凝土面清理、立模、扎钢筋等工作,最后采用缆机配合 9 m³ 卧罐浇筑常态混凝土将缺口补平。按照传统的施工方案,跨廊道层施工需要耗费 1~2 个月,但通过提前拼装廊道台车模板、提前焊接廊道底板钢筋网片,以及采用廊道台车模板和廊道底板钢筋的吊装、预留缺口跨廊道等手段,能够最快在 20 d 内实现跨过中层廊道的施工目标。

2.6 快速跨中孔施工组合技术

2.6.1 预制牛腿免拆模板技术

在常规施工中,牛腿通常采用外撑钢模板,其立模过程需耗时 7~10 d。待混凝土强度达到 100% 后,还需拆除模板,这一过程不仅施工工期较长,而且悬挑作业存在难度和安全隐患。相比之下,采用

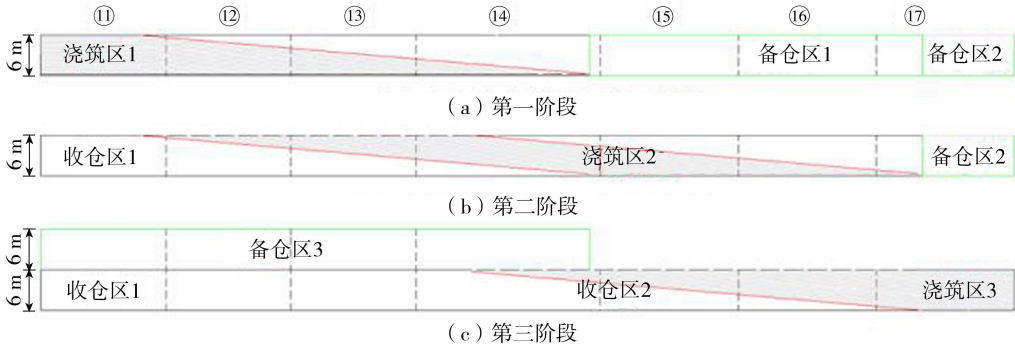


图 1 通仓大斜层循环作业中 6 m 升层碾压混凝土剖视图

预制牛腿模板,可以提前完成牛腿模板的预制工作,正式吊装只需1d即可完成。预制混凝土板通过预埋的型钢骨架与埋件进行焊接固定,这种连接方式能够充分满足浇筑混凝土时的承重要求。同时,该预制模板在后期可直接作为混凝土外露面,无需再进行拆模处理,提高了施工效率和安全性。

2.6.2 钢衬快速安装技术

鉴于中孔坝段设有弧形闸门,其结构复杂,致使施工进度缓慢,无法与大坝整体同步上升,为避免影响右岸碾压仓面的浇筑进度,中孔从钢衬层开始实行分缝处理,并采用台阶法进行浇筑,将上、下游结构复杂的区段独立出来进行施工,随后再同步上升,以满足度汛的需求。待相应坝段浇筑至钢衬安装高程时,便可开始钢衬安装施工。钢衬安装工期紧,工作量集中,因此在确保安装质量和安全的前提下,需尽可能地缩短安装工期,采取两个工作面同时进行施工。为确保两端门槽施工顺利进行,钢衬孔升段的始装节设置于孔升段的两端。两端同时进行始装节的安装,利用预先敷设好的型钢支承导轨和千斤顶进行精准调整,在初步验收合格后,采用型钢对钢衬两侧进行加固。随后,按顺序从两个工作面分别向中间逐步推进安装进程,逐条完成安装缝的焊接作业,待整体验收合格后交付混凝土施工。

2.6.3 中孔分块施工技术

由于中孔结构的上游喇叭口段和工作弧门段结构复杂,钢衬周边结构相对简单,但钢衬安装占压直线工期,施工过程中将中孔划分为上、中、下游三段。在钢衬安装期间,同步加速上游喇叭口备仓施工,将下游闸室段过于复杂的结构与大坝主体结构分离开来,以确保上游混凝土快速连续上升,从而追赶上右岸已开展施工的碾压仓面浇筑进度,最终在廊道层备仓时与碾压混凝土并仓浇筑。这一施工思路使得金属结构施工不再占用直线工期,通过“错位施工”的方式减少了施工过程中的相互干扰,并显著提升了施工速度。

2.6.4 事故闸门门槽一期直埋技术

传统的施工方式是预留二期槽和底坎的进入孔,必须等底坎安装完成且混凝土强度达标后,才能在狭窄空间内安装两侧侧轨,这不仅对闸门门槽的安装精度和质量产生不利影响,而且施工进度缓慢。只有在门轨二期混凝土浇筑完成后,才能进行闸门安装。而采用一期直埋方法,从底坎启动,在底坎下部预先制作钢支撑用于固定底坎,底坎部位的混凝土和中孔底板混凝土同步浇筑。待混凝土强度达标

后,便可进行上部云车安装,事故闸门的侧轨和埋件一次性固定在云车上,同时云车充当了门槽两侧混凝土的模板,使得侧轨部位的混凝土与中孔部位的混凝土能够同时上升浇筑。

2.7 溢流面同步上升施工技术

2.7.1 导墙与碾压混凝土同步上升

将导墙与碾压混凝土分开浇筑的传统方法,往往导致后期大体积常态混凝土入仓困难,且需要增加施工缝处理措施。这种分台阶浇筑的方法破坏了坝体结构的整体性。若导墙常态混凝土与碾压混凝土同步上升浇筑,便能有效避免后期混凝土浇筑时面临的仓面狭小、振捣困难、仓面清理困难以及入仓手段匮乏等不利情形,从而有利于保证混凝土的浇筑质量。同步浇筑使得导墙常态混凝土与碾压混凝土结合紧密,不存在二期结合面,从而避免了常态混凝土大面积、大体积浇筑可能引起的温度应力裂缝及干缩裂缝问题。

2.7.2 溢流面分部位与碾压混凝土同步上升

溢流面处于高速水流区,其表层抗冲耐磨混凝土与坝体混凝土的结合至关重要。根据设计蓝图,由于表孔呈现非标准断面形式,致使溢流面呈现曲线与直线交替的复杂结构。传统的预留台阶浇筑方法,需采用台阶模板,并在分缝部位布置插筋,这就要求提前进行插筋预埋和模板开孔,以及先浇块混凝土施工时的凿毛作业,这些额外施工步骤不仅增加了施工内容,也导致溢流面施工进度缓慢。在标准断面范围采用大模板和碾压混凝土同步上升的施工技术,通过设置专门的支撑架固定模板,确保了浇筑速度。同时采用减蒸剂解决了抗冲耐磨混凝土和碾压混凝土浇筑时间差异较大的问题,确保了异种混凝土结合的质量。而在非标准段范围,因采用定制滑膜难度较大,故采用溢流面预留台阶的方式将常态混凝土脱开浇筑。

3 智能建造技术创新

TB 水电工程运用独立自主研发的互联网+**BIM**+**GIS**+大数据技术,构建了**BIM**数字工程平台。该平台将安全管理、质量管理、进度管理、成本管理等与有用料管理相互关联,并与**OA**办公系统实现了高效融合。这一创新举措使得项目参与各方能够达成高效的运转状态以及实时的管控效果,极大提升了项目的智能化管理水平。该平台主要实现了以下功能和技术创新:

a. 拌和系统与钢筋厂工厂化: TB 水电工程的智能拌和系统紧密结合现场实际工况,充分运用传感、控制和网络等先进技术以及自动化管理理念,开

发了一套混凝土生产自动化系统。该系统实现了分散系统的自动化控制、远程数据的采集,以及集中监控和集中决策。操作人员可在工厂化环境中办公,系统具备车辆自动识别和灰罐自动监测功能。骨料含水率、混凝土温度、生产数据均能实时自动监测、采集并传输,提高了工作效率和混凝土生产强度。智慧物料系统能够单独对钢筋厂进行全流程的任务监控,借助该系统,用户可以实时查看钢筋的库存状况、加工明细、配送信息以及出库记录等。此外,智慧物料系统还支持线上审批流程,可实现钢筋的自动加工,显著提升了生产效率。

b. 开仓与浇筑信息化:通过线上平台编制并审批仓面设计,要料单与配料单也实现在线审批,做好浇筑前必要的技术准备工作,及时指导现场浇筑作业。这一流程在工程施工中发挥了至关重要的作用,不仅规范了施工作业流程,确保了工程质量,还加快了施工进度。根据现场仓面浇筑的实际情况,无论是常规施工场景还是特殊情况应对,均可运用现场手持 PDA 设备进行实时记录和传输,确保了过程数据的真实性和完整性,实现高效运转与实时管控目标。在此过程中,能够生成碾压厚度图形报告以及层间覆盖时间图形报告,从而有效控制铺料厚度和层间结合的质量。

c. 平仓与碾压作业智能化:每台平仓机配备了 GNSS 系统,实现了自动计算摊铺时间和厚度,对摊铺作业过程进行精确管控,从而达到了摊铺厚度和平整度的智能化控制。实时动态监测碾压混凝土坝施工机械的运行轨迹、速度、振动状态、碾压遍数以及施工层信息等数据,并当数据值未达到预设参数标准时,系统将自动发出警报提示指令。基于碾压过程的监控参数,结合碾压机的振动特性,建立了碾压混凝土压实度智能预测模型,构建了可以直接表征碾压混凝土压实质量的指标体系,进而实现仓面压实质量的智能预测。基于增强现实(AR)技术的坝面碾压质量,采用智能导引系统,将碾压数据以图像的形式呈现在碾压机驾驶室内,指导碾压机司机进行自主作业。全过程由值班人员协同管控,通过对讲机与现场实时沟通反馈,确保需补碾部位得到精准定位和及时处理,全面提升施工过程的反馈效率,提高仓面碾压作业的一次达标合格率。每层碾压施工完成后,监控系统能输出每层图形分析报告,主要包含碾压轨迹图、碾压遍数图形报告、压实度预测值报告等,为保障碾压混凝土坝的高质量施工提供基础支撑。

d. 复杂工况下碾压机群作业无人化:在“数字

大坝”碾压施工质量实时监控的基础上,针对复杂施工条件下的碾压混凝土坝,开展了无人驾驶技术的研究。在 TB 项目中,经过仓外和仓内多次试验,无人碾压设备的各项功能均已得到验证并成功应用于碾压混凝土大坝施工中。这一技术的应用不仅确保了碾压施工的高品质和高效性,而且开创了复杂工况下“碾压机群”自动化作业的先河,为后续西藏等高海拔地区无人、少人化施工创造了有利条件。

4 结 语

经过工期调整,TB 大坝混凝土施工强度由原本的 15.6 万 $\text{m}^3/\text{月}$ 提升至 23 万 $\text{m}^3/\text{月}$,施工面临连续高强度生产、夏季高温,太阳辐射强以及雨季施工效率降低等挑战。TB 大坝工程在建设过程中紧紧依托智能建造平台,通过持续的技术创新与工艺提升,取得了以下成就:月最大上升高度达 15.0 m,连续 5 个月平均上升高度为 13.9 m,年最大上升高度达 126 m,并成功取出世界最长碾压混凝土芯样。该芯样整体质量优良,混凝土层间结合紧密,透水性检查结果满足技术要求。智能建造数据显示大坝温度控制得当,热升层全部达标,压实度全部合格,所有关键参数均满足设计要求。

参考文献:

[1] 田育功. 碾压混凝土快速筑坝技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[2] 田福文. 大花水电站碾压混凝土拱坝快速施工技术[J]. 湖北水力发电,2008(6):37-39. (TIAN Fuwen. Quick construction technique for roller compacted concrete arch dam of Dahuashui Hydropower Station[J]. Hubei Water Power,2008(6):37-39. (in Chinese))

[3] 姚国虎. 索风营水电站碾压混凝土重力坝连续上升施工技术[J]. 湖南水利水电,2011(1):11-13. (YAO Guohu. Construction technology of continuous rise of RCC gravity dam of Suofengying Hydropower Station[J]. Hunan Hydro & Power, 2011(1):11-13. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-10 编辑:雷燕)

