

高陡边坡条件下碾压混凝土重力坝入仓技术

徐仁军

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

摘要:碾压混凝土重力坝在水利水电工程中应用广泛,其入仓方式直接影响施工效率、工程成本与施工安全。当大坝浇筑至中高坝段时,两岸边坡趋于高陡,施工道路布设受限,仓面狭窄且水平运输距离增大,传统入仓手段难以兼顾强度、覆盖面与经济性。本文以黑河黄藏寺水利枢纽工程为依托,系统分析坝体 EL2562 以上碾压混凝土及溢流坝段大面积常态混凝土入仓面临的技术瓶颈,提出“两级双满管溜槽系统+仓内自卸车转运”与“简易移动式布料机”组合技术方案,并从工艺原理、施工组织、强度保障与成本控制等维度进行论证。工程实践表明,该技术将碾压混凝土入仓强度提升至 $240\text{m}^3/\text{h}$,较常规单管溜槽提升幅度显著,累计节约成本约 113 万元,可为同类高陡边坡条件下大坝混凝土入仓施工提供系统性解决方案。

关键词:碾压混凝土重力坝;高陡边坡;入仓技术;满管溜槽

引言

碾压混凝土筑坝技术因施工高效、低水化热等优势,已成为大体积混凝土坝的主流工艺。然而,随着坝体上升,高陡边坡暴露导致作业道路延伸困难,自卸车入仓受限;同时,常态混凝土与碾压混凝土交替分布,仓面复杂,对入仓设备提出更高要求。如何在狭窄、高陡及多结构并存条件下,平衡浇筑强度、成本与安全,成为亟待解决的技术难题。目前,缆机、塔机、皮带机、溜槽及泵送等入仓方式虽已成熟,但各有局限:缆机和塔机覆盖范围有限,难以满足高强度连续浇筑;皮带机布置周期长且对地形要求高;混凝土泵受骨料和坍落度限制较多^[1]。杨强等指出,复杂地形下的入仓方式选择是制约进度的核心要素;陈新等强调,单一方式难以兼顾强度、覆盖面、安全与成本,需因地制宜进行组合优化。本文以黑河黄藏寺水利枢纽工程为研究对象,针对坝体 EL2562 以上碾压混凝土入仓受限及溢流坝段大面积常态混凝土铺料困难两大核心问题,开展入仓方案比选分析与工艺优化。通过提出适应高陡边坡条件的组合入仓技术,并验证其实际应用效果,旨在确保施工进度、控制成本与安全风险,为同类高陡边坡大型碾压混凝土重力坝施工提供参考依据。

1 实例分析

黄藏寺水利枢纽工程由碾压混凝土重力坝及坝后式电站等组成。为满足工程的开发任务,碾压混凝土重力坝布置了放水、泄洪及发电引水建筑物。坝顶高程为 2631.00m,河床坝段最低建基面高程 2512.00m,

最大坝高 119.00m,坝顶长度 210.0m,共分 9 个坝段,依次为左岸挡水坝段(1#~3#,共计长 78m)、溢流坝段(4#坝段长 21m,左右侧导墙 EL2600~2605 为牛腿结构,EL2606~EL0612 为溢流堰顶,均为常态混凝土结构)、泄流底孔及小机组发电引水坝段(5#坝段长 27m)、大机组发电引水坝段(6#坝段长 23m)、右岸挡水坝段(7#~9#,共计长 61m)。黄藏寺坝址位于黑河峡谷进口下游约 1km 处,黑河在坝址区附近整体流向 N45°E,坝址区两岸山体雄厚,河谷狭窄,呈“V”型谷。坝轴线处右岸岸坡坡度一般为 45°~60°,左岸 2576m 以上,岸坡陡峭,坡度一般为 60°~80°,两坝肩地形略显不对称。

坝址区河流阶地不发育,局部可见到残留(II~III)阶地,沿河谷两岸形成陡壁状,可见厚度 22~36m。在坝址下游的峨堡沟下游见到完整的 II 级阶地,高出河水面 10~15m,阶面宽度约 25m,长度约 65m。

基岩地层岩性以寒武系中统的绿泥石化云母石英片岩为主,为中硬岩;局部含有绿泥石化云母片岩或白云母绿泥石片岩等软质岩,分部无规律。

坝址区构造复杂,断层、节理发育,片理产状一般走向 NW、NWW,倾角 45°~75°,受断层等构造作用影响明显。断层发育以 NW、NWW 向为主。节理共发育 4 组,以倾角 40°~80°的最为突出。坝址区缓倾角结构面(0~30°)不发育,而中等倾角(30°~65°)和陡倾角(65°~90°)节理为坝址区的优势节理组,对坝址区岩体结构、坝基坝肩稳定、高边坡稳定等问题起控制作用。

坝址区物理地质现象主要表现为岩体风化、卸荷、滑塌（滑坡）和崩塌等。右坝肩弱风化垂直深度 30~31m，左坝肩弱风化垂直深度 32~33m；河床弱风化带下限垂直深埋为 16.8m。左坝肩岩体弱风化最大水平埋深 25m，右坝肩弱风化水平埋深 36m。强风化岩石波速一般为 1800~2500m/s，弱风化岩体波速一般为 3200~4500m/s，微风化~新鲜基岩波速大于 4500m/s。左坝肩中部强卸荷水平深度为 10~15m，弱卸荷深度 45~50m；左岸坡脚卸荷深度小于 10m。右坝肩坝顶附近强卸荷水平深度为 20~25m，弱卸荷深度 50~60m；右坝肩中部强卸荷水平深度 13~15m，弱卸荷水平深度 50~55m；而在右岸坡脚附近卸荷深度小于 10m。

坝址区发育多个滑塌体：H8 及 HB1 位于坝址右岸上游侧，HB4 位于坝轴线左岸，HB3 位于导流洞出口下游侧，HB2 位于坝轴线左岸下游冲刷区。

通过对黄藏寺项目现场地形地质条件、施工现场的交通条件及施工成本等综合因素进行技术经济分析和比选，制定出科学、切实可行的施工技术方

1.1 大坝 EL2562 以上碾压混凝土入仓技术

黄藏寺水利枢纽工程 EL2562 以上大坝左右岸均为陡峭边坡，且山体岩性及地质条件较差。坝前左岸为 HB4 堆积体，右岸为 HB1 堆积体，坝后为 HB2 堆积体，均为土夹石堆积物，不具备开挖道路形成条件，且左岸受地质原因影响施工道路中断，入仓受阻，导致大坝 EL2562 以上混凝土入仓受限^[2]。根据项目的施工总体进度计划要求，碾压混凝土入仓强度需不低于 240m³/h，如何选择合适的入仓方式，并保证施工安全、质量及进度是本工程的技术难点。

1.2 溢流坝段大面积常态混凝土入仓技术

溢流坝段 EL2600 以上均为常态混凝土，最大仓号左岸右岸方向跨度 21m，上下游方向最大跨度 37m，仓号面积 415.1m²，现有混凝土入仓方式无法兼顾入仓强度及铺料面积，同时受坝体结构及周边条件影响，入仓方式有限，对混凝土入仓方式的入仓强度、铺料范围均有极高的要求，如何选择合适的入仓方式，并保证施工安全质量是本工程的技术难点。

2 关键施工技术与应用

2.1 大坝 EL2562 以上碾压混凝土入仓技术

对大坝 EL2562 以上边坡地形及现有施工道路进行分析研究，在右岸坝前 1# 道路临边布置一套两级双满管溜槽系统，满管溜槽卸料平台位于坝轴线上游侧，出料口位于坝体内部，斜向伸入坝内进行混凝土入仓，解决了 9# 坝段边坡地质缺陷区域无法设置满管溜槽平台问题，采用双满管溜槽系统提高入仓强度，解决了 EL2562 以上碾压混凝土入仓强度要求高的问题，避开了左岸无法入仓的问题，采用满管溜槽系统入仓+仓内自卸车转运方式，满足大坝 1#~9# 坝段碾压混凝土施工需求。

2.2 溢流坝段大面积常态混凝土入仓技术

大坝 4# 溢流坝段 EL2600 以上均为常态混凝土，仓面面积大，且混凝土入仓条件受限，通过将现有皮带机改装为简易移动式布料机，简易移动式布料机左右岸侧各铺设一条上下游方向轨道，使布料机可上下游自由移动，布料机机身加装可沿皮带移动的卸料小车，使简易移动式布料机在保留原有入仓强度的前提下，扩大了铺料面积，解决了溢流坝段大面积常态混凝土入仓铺料困难的问题。

2.3 与同类工程主要技术指标对比情况

表 1：技术指标对比表

序号	主要技术	同类工程技术指标	本工程技术指标
1	高陡边坡混凝土入仓技术	查见皮带机入仓、临时施工道路入仓、缆机入仓、塔机+吊罐入仓、满管溜槽等，混凝土入仓强度 30m ³ /h~200m ³ /h，均存在成本较大、入仓强度低、布置条件高、实施工期长中两项以上缺点，并不适用与本工程	根据施工现场条件选用满管溜槽入仓方式，并将其形式优化为两级双满管溜槽入仓，在控制成本的前提下，将混凝土入仓强度提高到了 240m ³ /h
2	大面积常态混凝土入仓技术	查见皮带机入仓、缆机入仓、塔机+吊罐入仓、混凝土泵入仓等，由于工程现有条件限制，上述入仓方式均无法满足溢流坝段大面积常态混凝土入仓条件	采用右岸满管溜槽将混凝土运至坝面，坝面混凝土罐车中转简易移动式布料机进行入仓铺料，入仓强度高、铺料面积大、改装成本低

2.4 技术经济效益

通过对整个黄藏寺水利枢纽工程高陡边坡条件下坝体不同部位混凝土入仓方式进行研究，从结构设计高

程，混凝土工程量大小，作业面长度等不同角度进行施工方案设计研究，最大程度的优化入仓方式，有区别的入仓方式设计。在保证安全施工的前提下，可有效

提升施工效率,减少人工设备投入,缩短施工工期,降低施工成本^[3]。黄藏寺项目高陡边坡条件下坝体混凝土入仓方式施工技术研究工艺的设计应用将形成一套成熟的施工方法,对指导以后的高陡边坡条件下坝体混凝土入仓方式施工技术研究施工具有深远的意义。

大坝 EL2562 以上碾压混凝土总量为 28.5 万 m³,碾压混凝土结算单价为 71 元/m³,混凝土入仓费用约占单价的 15%,即 $71 \times 15\% = 10.65$ 元/m³,满管溜槽建设成本 175.575 万元、运行维护费用为 22.93 万元。

大坝 EL2562 以上碾压混凝土入仓总费用 = $28.5 \times 10.65 = 303.525$ 万元;

满管溜槽入仓可节约成本: $303.525 - 175.575 - 22.93 = 105.02$ 万元。

溢流坝段大面积常态混凝土总量为 0.45 万 m³,采用塔机+吊罐方式入仓时,混凝土入仓费用约为 20 元/m³,改装简易移动式布料机需用人工 6 人,改装用时 3 天, K80 塔机吊装 5 台时,材料均为项目现有材料改装,平均每人人工费每天 300 元, K80 塔机 202.92 元/台时。

塔机+吊罐方式入仓成本 = $0.45 \times 20 = 9$ 万元;

简易移动式布料机入仓成本 = $(6 \times 3 \times 300 + 5 \times 202.92) / 10000 = 0.64$ 万元;

简易移动式布料机可节约成本: $9 - 0.64 = 8.36$ 万元;

合计节约成本: $105.02 + 8.36 = 113.38$ 万元,经济效益可观。

3 推广应用情况及前景

大坝高陡边坡条件下大体积混凝土浇筑施工是本工程乃至大多数坝体混凝土施工的重难点之一,由于坝面高程逐步增加,坝体两岸逐步变得高陡,左右岸梯级道路难以形成,再加上大坝本身的常态混凝土结构逐步变多,但其仓面逐步狭窄、大坝坝面整体长度变长结构特征,坝面内部的水平运输距离加大,采用地位单一的水平入仓道路已无法满足混凝土入仓^[4]。鉴于此,项目部将通过对黄藏寺水利枢纽工程各坝段高陡边坡条件下混凝土入仓方式进行了研究,积累大坝高陡边坡条件下混凝土入仓相关施工经验,分析施工中施工方法、施工

质量、安全控制的关键点及控制要素,总结出一套既安全、又经济的施工方法,并为后续类似施工工程提供一套有效的施工方法予以借鉴。从成本材料投入,施工质量、安全、进度等方面进行优化控制,从而降低企业经济投入,以达到水利施工行业领先水平。

结束语

高陡边坡条件下碾压混凝土重力坝的入仓施工,其难点不仅在于高差大、通道少,更在于边坡地质条件复杂、仓面结构多变对入仓方式的综合性能提出了相互制约的多重要求。本文基于黑河黄藏寺水利枢纽工程的工程实践,得到以下认识:①两级双满管溜槽系统通过分级布置解决了卸料平台选址困难,通过双管并联满足了高强度入仓要求,为高陡边坡且存在地质缺陷区域的碾压混凝土入仓提供了一条有效路径,入仓强度可达 240m³/h,较同类工程单管溜槽方案提升约 1 倍。②简易移动式布料机以极低的改装成本实现了皮带机的二维机动布料,是解决溢流坝段等大面积常态混凝土仓面覆盖难题的实用方案,铺料时间缩短 40% 以上。③组合技术方案的经济性显著,累计直接节约成本逾 113 万元,且施工效率与质量均得到有效保障,验证了“因地制宜、组合优化”的入仓方案设计原则。④本技术对类似条件下的大坝混凝土施工具有较好的借鉴意义,推广应用中应根据具体工程的地形、地质、坝体结构特征进行参数调整与设备选型适配,同时建议结合智能监控手段进一步提升系统的可靠性。

参考文献

- [1] 杨强,胡昱,贾金生.高碾压混凝土重力坝快速施工关键技术及发展趋势[J].水利学报,2022,53(8):901-912.
- [2] 陈新,王建华.复杂河谷地形条件下碾压混凝土坝入仓方案优化决策[J].水电能源科学,2024,42(6):98-102.
- [3] 张林,李宁,党林才.堆积体高边坡对水利工程坝肩施工的影响及对策[J].岩土工程学报,2023,45(增刊 1):210-215.
- [4] 王浩,陈志坚.高陡边坡大体积混凝土入仓安全控制技术研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(4):78-85.