

水利工程高面板堆石坝填筑施工组织设计与填筑速率控制

张万军

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i8.7103

[摘要] 为解决水利工程建设中高坝填筑施工工序混乱、速率失衡、沉降超标、面板变形开裂等工程问题,本文系统开展高面板堆石坝填筑施工组织设计优化与填筑速率控制技术研究。结合相关工程实测数据,构建适配砂砾石料特性的分层填筑施工组织体系,推导填筑速率与坝体沉降、压实质量的耦合计算公式;明确不同填筑高程、不同坝料分区的最优施工速率区间,提出精细化、动态化的速率控制策略。研究结果表明:优化后的施工组织方案可实现坝体均衡分层填筑,动态速率控制模式可有效降低坝体不均匀沉降提升填筑压实合格率,可为西部高寒干旱地区高面板堆石坝填筑施工提供技术参考。

[关键词] 高面板堆石坝; 填筑施工; 组织设计; 填筑速率; 沉降控制; 砂砾石料

中图分类号: TV641.4+3 文献标识码: A

Construction Organization Design and Placement Rate Control for High Face Rockfill Dam Filling in Hydraulic Engineering

Wanjun Zhang

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] To address engineering challenges in high dam filling construction, such as disordered construction sequences, imbalanced placement rates, excessive settlement, and panel deformation and cracking, this paper systematically investigates the optimization of construction organization design and placement rate control technology for high face rockfill dam filling. Based on relevant engineering measured data, a layered filling construction organization system adapted to the characteristics of 砂砾石料 (gravelly soil/sand-gravel materials) is established. Coupled calculation formulas between placement rate and dam settlement as well as compaction quality are derived. The optimal construction rate intervals for different filling elevations and different dam material zones are defined, and refined, dynamic rate control strategies are proposed. The results indicate that the optimized construction organization scheme enables balanced layered filling of the dam body, and the dynamic rate control mode effectively reduces uneven settlement while improving the qualification rate of filling compaction. This study can provide technical references for high face rockfill dam filling construction in cold and arid regions of western China.

[Key words] high face rockfill dam; filling construction; organization design; placement rate; settlement control; gravelly soil material

引言

相较于常规坝型,高面板堆石坝坝体高度大、填筑方量大、分层工序复杂。施工组织科学性直接决定工程施工效率与成型质量,而填筑速率作为核心施工参数,与坝体沉降变形、压实密度、面板应力分布存在强耦合关系,速率过快易引发坝体后期沉降超标、面板脱空开裂,速率过慢则会大幅增加施工成本、延误工程工期。

新疆地处我国西北干旱高寒区域,境内水利工程多修建于山区河道,高面板堆石坝普遍采用本地砂砾石料作为填筑主材,

该材料具有级配连续性差、孔隙率偏大、温缩变形显著等特点,区别于常规碎石堆石料填筑特性。同时新疆地区施工周期受气候制约严重,冬季严寒、夏季高温、春秋大风天气频发,有效施工窗口期短,进一步加剧了填筑施工组织与速率控制难度。基于此,本文以高面板堆石坝填筑施工核心技术为研究核心,结合新疆已建、在建高坝工程实测施工数据,优化填筑施工组织架构与分区分层施工流程,建立填筑速率与坝体变形、压实质量的量化关系模型,为新疆区域水利高坝工程标准化施工提供理论与实践支撑。

1 高面板堆石坝填筑施工特性

高面板堆石坝坝体结构主要分为垫层区、过渡区、主堆石区、下游堆石区四大核心分区,各分区坝料级配、压实标准、填筑厚度存在明确差异,施工需遵循“分区填筑、分层碾压、均衡上升、严控变形”的核心原则。相较于中低面板堆石坝,高坝填筑具有填筑高程大、累计沉降量大、结构应力复杂、质量敏感度高的特点,坝体成型后的沉降变形主要集中在施工填筑阶段,填筑施工的均匀性与速率稳定性直接影响后期面板混凝土施工质量及大坝运行寿命。在高坝填筑过程中,主堆石区为坝体承重核心结构,填筑方量占比超70%,是施工组织与速率控制的重点区域;垫层区与过渡区紧邻防渗面板,填筑精度要求极高,需严格控制分层厚度与压实质量,避免局部变形过大引发面板破损。整体施工呈现多工序交叉、多分区同步作业、质量管控精细化的特征,对施工组织的系统性和速率控制的精准性提出了更高要求。

新疆区域高坝填筑具备显著地域特殊性。其一,填筑主材以河道砂砾石料为主,就地取材优势显著,但砂砾石料细颗粒含量高、抗冻性较弱、干湿变形明显,相较于内陆碎石料,相同填筑速率下更易出现压实不均、后期沉降偏大问题。其二,新疆气候条件特殊,年度有效施工期集中在4-10月,冬季低温冻土、夏季高温干燥会导致坝料含水率波动剧烈,直接影响碾压压实效果,无法采用常规地区恒定速率施工模式其三,新疆高面板堆石坝多为流域控制性枢纽工程,填筑工期紧张、填筑强度大,大石峡大坝工程高峰期月填筑强度可达115万 m^3 ,日最高填筑强度4.5万 m^3 ,高强度填筑下极易出现工序衔接混乱、速率失控、沉降不均等问题,亟需针对性优化施工组织体系与速率控制标准。

2 高面板堆石坝填筑施工组织设计优化

2.1 施工分区与分层规划优化

遵循“结构适配、工序独立、均衡上升”的原则,结合新疆高坝砂砾石料填筑变形特性,对坝体填筑分区进行精细化划分,严格区分垫层区、过渡区、主堆石区、下游堆石区的施工边界,避免不同性质坝料混填引发的变形差异。针对新疆昼夜温差大、坝料温缩变形显著的特点,优化分层填筑厚度标准,相较于常规碎石坝料,砂砾石料分层填筑厚度适当减小,主堆石区分层厚度控制在35~40cm,过渡区控制在25~30cm,垫层区严格控制在20cm以内,确保分层碾压密实、变形均匀。同时结合新疆工程施工窗口期特点,采用“分区流水、错峰施工”的组织模式,将坝体划分为多个独立施工单元,各单元同步开展测量放线、铺料、洒水、碾压、检测工序,实现工序无缝衔接。严格控制坝体填筑高差,顺水流方向分区高差不大于15m,杜绝局部超高填筑、快速填筑导致的应力集中和不均匀沉降,保障坝体整体均衡上升。

2.2 施工工序流程重构

传统填筑施工工序存在流程繁琐、衔接滞后、质量检测滞后等问题,无法适配新疆高强度填筑需求。本文优化构建“前置预处理-同步施工-即时检测-动态整改”的闭环施工工序体系。前置预处理阶段,针对新疆干燥气候导致的坝料含水率偏低问

题,提前开展坝料洒水预湿处理,将砂砾石料含水率控制在最优含水率 $\pm 2\%$ 范围内,规避高温干燥环境下压实度不足问题。施工阶段采用标准化进退错距碾压工艺,碾压设备匀速作业,碾压搭接宽度不小于1.0m,根据不同分区坝料特性设定差异化碾压遍数,主堆石区碾压8~10遍,过渡区10~12遍,垫层区12~15遍。检测环节采用实时跟进模式,每层填筑碾压完成后立即开展密实度、平整度检测,采用灌水法检测堆石区孔隙率,确保检测数据实时反馈、问题及时整改,杜绝质量隐患累积,全程不涉及运输环节管控,聚焦填筑核心工序。

2.3 施工资源优化配置

结合新疆高坝高强度填筑施工需求,匹配精细化资源配置方案,实现施工效率与质量的协同提升。机械配置方面,根据填筑分区面积和施工强度,分区配备专用平仓机、振动碾压设备,主堆石区采用18.6t自行式振动碾,边缘及细部区域搭配小型碾压设备,避免漏压、欠压。人员配置实行分区专人负责制,每个施工单元配备专职技术员、质检员、安全员,全程管控填筑施工参数与工序质量。同时引入智能施工管控系统,搭建填筑施工全过程信息化管控平台,实时采集碾压速度、碾压遍数、填筑厚度、施工时段等核心参数,实现施工过程可监测、可追溯、可调控,解决新疆野外施工环境复杂、人工管控精度不足的问题,为填筑速率动态调控提供数据支撑。

3 高面板堆石坝填筑速率控制策略

3.1 填筑速率核心影响因素分析

结合新疆高坝工程实测数据,影响填筑速率的核心因素主要包括三类:一是坝料特性,新疆本地砂砾石料孔隙率高、压缩性大,填筑速率过快会导致颗粒嵌挤不充分,后期残余沉降增大;二是填筑高程,低高程坝体基础约束强,沉降空间小,可适当提高填筑速率,高高程坝体自重应力大,沉降变形敏感,需降低填筑速率;三是环境因素,新疆高温、大风天气会加速坝料水分流失,低温冻土环境会降低坝料压实性能,需根据环境变化动态调整施工速率。

3.2 填筑速率与沉降变形耦合公式推导

基于堆石坝体沉降变形机理,结合分层总和法原理,构建填筑速率与坝体累计沉降量的耦合关系模型。设坝体分层填筑厚度为 h ,单层填筑施工时长为 t ,则单层填筑速率 $v=h/t$ 。根据新疆砂砾石料填筑变形特性,单层填筑完成后初期沉降量计算公式为:

$$\Delta S_i = k \cdot v^\alpha \cdot \sigma_i^\beta \cdot h$$

式中: ΔS_i 为第 i 层填筑完成后的初期沉降量(mm); k 为新疆砂砾石料沉降修正系数,取值0.82~0.88(基于大石峡、阿尔塔什工程实测数据拟合); v 为单层填筑速率(cm/d); α 为速率影响指数,取值1.12; σ_i 为第 i 层坝体自重应力(kPa); β 为应力影响指数,取值0.95; h 为单层填筑厚度(cm)。

坝体累计沉降量为各分层沉降量之和,计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i = \sum_{i=1}^n k \cdot v^\alpha \cdot \sigma_i^\beta \cdot h$$

结合新疆高坝工程设计规范, 坝体总沉降率需控制在0.6%以内, 通过上述公式可反向推导不同高程、不同应力状态下的最大允许填筑速率, 实现速率与沉降变形的精准匹配。当填筑速率超过计算阈值时, 坝体颗粒固结不充分, 残余沉降量会显著增大, 超出规范允许范围; 速率过低则会导致施工周期延长, 资源利用率下降。

3.3 基于压实质量的速率校核公式

填筑速率直接影响碾压作业时长和坝料压实效果, 为保障填筑压实质量达标, 建立压实度与填筑速率的校核公式。坝料压实度 λ 与填筑速率、碾压遍数的关系为:

$$\lambda = \lambda_0 - \eta \cdot (v - v_0)$$

式中: λ_0 为最优压实度(设计标准值); η 为速率衰减系数, 新疆砂砾石料取值0.003~0.005; v_0 为最优填筑速率(cm/d); v 为实际填筑速率(cm/d)。通过该公式可实时校核施工速率的合理性, 当实际速率偏离最优值时, 压实度会线性衰减, 据此可动态调整填筑速率, 确保每层填筑压实质量满足设计要求, 实现速率控制与质量控制的协同统一。

4 新疆地区高面板堆石坝填筑速率动态控制策略

结合上述量化模型与新疆本土工程施工特性, 摒弃传统单一固定速率控制方式, 构建“分高程、分季节、分分区”的三维动态填筑速率控制体系, 适配新疆高寒干旱、施工窗口期短、砂砾石料变形敏感的工程特点。

4.1 分高程差异化速率控制

根据坝体高程与自重应力变化规律, 结合新疆大石峡工程实测沉降数据, 将坝体分为低、中、高三个高程区间, 制定差异化速率标准。低高程区间(坝高0~50m): 坝体基础约束强, 自重应力小, 沉降变形空间有限, 可采用较高填筑速率, 主堆石区日均填筑厚度控制在80~100cm, 可快速完成基础填筑, 提升施工效率。中高程区间(坝高50~100m): 坝体自重应力逐步增大, 沉降变形敏感性提升, 需适度放缓速率, 日均填筑厚度控制在50~70cm, 严格保障分层固结时间, 避免沉降累积。高高程区间(坝高100m以上): 属于坝体核心变形敏感区, 紧邻面板施工区域, 沉降控制要求极高, 日均填筑厚度严格控制在30~40cm, 预留充足的固结沉降周期, 保障坝体变形稳定, 为后续面板混凝土施工提供良好基础。

4.2 分季节动态速率调控

针对新疆四季气候差异显著、有效施工期集中的特点, 实行季节性速率调控。春、秋季(4~5月、9~10月)气候温和、湿度适宜, 是最优施工窗口期, 坝料含水率稳定, 压实效果好, 可采用标准填筑速率, 按分区设计强度均衡施工。夏季(6~8月)高温干燥、蒸发量大, 坝料水分流失快, 需适当降低10%~15%填筑速率, 增加洒水养护频次, 保障坝料最优含水率, 确保压实质量达标。冬季(11~次年3月)气温低于0℃, 坝料易冻结, 颗粒固结性能变差, 严禁高强度填筑, 仅在正午高温时段开展小规模填筑作业, 填筑速率降低30%以上, 极端低温天气全面停止填筑施工, 避免出现冻胀变形、压实度不足等质量问题。

4.3 分分区精准速率管控

根据坝体不同分区的功能重要性, 实行分级速率管控。主堆石区填筑方量大、结构稳定性要求高, 采用匀速填筑模式, 速率波动幅度不超过±10%, 保障坝体整体沉降均匀; 过渡区、垫层区紧邻防渗面板, 属于精密填筑区域, 严格采用低速均衡填筑模式, 速率较主堆石区降低20%~30%, 杜绝快速填筑导致的局部变形超标; 下游堆石区约束条件相对宽松, 可在质量达标前提下适度提升填筑速率, 平衡整体施工进度。

4.4 速率动态预警与调整机制

依托智能施工管控平台, 建立填筑速率实时预警机制, 实时监测填筑厚度、施工时长、沉降变形、压实度等参数, 对照量化模型阈值自动判别速率合理性。当出现填筑速率过快、沉降增速超标、压实度不足等问题时, 系统自动预警, 立即放缓施工速率, 延长碾压固结时间; 当施工进度滞后且质量指标稳定时, 可在计算阈值范围内适度提升速率, 实现质量与进度的动态平衡。结合新疆阿尔塔什工程应用实践, 该动态控制模式可将坝体沉降率控制在0.36%以内, 远低于规范0.6%的限值, 填筑质量合格率提升至98%以上。

5 结束语

本文针对新疆高寒干旱环境、砂砾石料填筑特性下高面板堆石坝施工难题, 系统开展填筑施工组织设计优化与填筑速率控制研究, 构建了适配新疆本土工况的精细化施工组织体系和动态速率量化控制模型, 得出以下主要结论:

(1) 新疆高面板堆石坝采用本地砂砾石料填筑, 具有变形敏感、含水率易受气候影响、高强度填筑下易沉降超标的特性, 区别于常规碎石堆石坝, 需采用专项施工组织与速率控制方案, 不可套用通用施工标准。(2) 优化后的分区分层流水施工组织体系, 可有效适配新疆高坝高强度填筑需求, 规范施工工序流程, 提升施工质量与效率, 解决了传统粗放式施工带来的质量隐患与进度滞后问题。(3) 建立的填筑速率与沉降变形、压实质量耦合量化公式, 可精准量化不同工况下的最优填筑速率, 基于该公式构建的三维动态速率控制体系, 可有效控制坝体不均匀沉降, 保障填筑施工质量达标。

后续研究可结合智能监测、大数据分析技术, 进一步优化填筑速率实时调控算法, 实现施工参数的全自动、智能化调控, 进一步提升新疆高面板堆石坝施工的精细化、标准化水平, 为西部高寒干旱地区高坝工程建设提供更完善的技术支撑。

[参考文献]

- [1]刘丹丹.复杂地质条件下高面板堆石坝工程质量控制措施阐述[J].中小企业管理与科技,2021,(6)174-175.
- [2]岳华文.高地下水位条件下基础填筑施工中的管理优化[J].中国高新科技,2025,(2):155-157.
- [3]石继忠,刘丹,梅世昂,等.智能碾压系统在堆石坝填筑质量提升中的应用分析[J].中国水运,2025,(9)52-55.

作者简介:

张万军(1984--),男,汉族,甘肃武威人,本科,高级工程师,研究方向为水利水电工程施工组织设计。