

卡拉贝利大坝挤压边墙施工技术的应用研究

王长征 哈德尔·阿布都哈力克 汪飞

新疆维吾尔自治区塔里木河流域库尔干水利枢纽工程建设管理中心

DOI:10.32629/hwr.v9i12.6699

[摘要] 本文以卡拉贝利大坝工程为背景,系统研究了挤压边墙施工技术的应用实践与工程效果。通过理论分析、生产性试验及现场施工验证,探讨了该技术在高原地区面板坝建设中的适用性与创新性。研究表明,挤压边墙技术在保证施工质量、提高效率、降低成本方面具有显著优势,为高原地区面板坝建设提供了关键技术范例。

[关键词] 挤压边墙; 施工技术; 卡拉贝利大坝; 应用研究

中图分类号: TV52 **文献标识码:** A

Research on the Application of Compacted Earthfill for the Side Walls of the Karabelli Dam

Changzheng Wang Hadel Abudukhali Fei Wang

Construction Management Center for the Kuergan Water Control Project, Tarim River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region

[Abstract] This paper takes the Karabelli Dam project as a case study, systematically investigating the application practices and engineering effectiveness of the extruded curb construction technology. Through theoretical analysis, production trials, and on-site construction verification, the suitability and innovativeness of this technology for face rockfill dam construction in alpine regions are explored. The research demonstrates that the extruded curb technology offers significant advantages in ensuring construction quality, improving efficiency, and reducing costs, providing a key technical reference for face rockfill dam construction in alpine regions.

[Key words] Extruded curb; Construction technology; Karabelli Dam; Application research

引言

传统混凝土面板坝施工采用“超填—削坡—斜坡碾压—坡面保护”工艺,常因混凝土强度不足、面板接缝渗漏、坝体填筑不均匀等原因,造成面板开裂、坝体变形和渗漏、结构安全性降低。近年来,随着新建大坝坝高不断增大,对坝体防渗技术提出更高要求。徐泽平提出高混凝土面板坝设计时应综合考虑各分区的协调保护作用,通过上游铺盖、混凝土面板、垫层区和过渡区的联合作用、相互保护,以提高大坝防渗系统的整体可靠性,确保防渗系统的自愈修复能力。

挤压边墙施工技术作为一种新型固坡方法,通过机械挤压形成连续半透水墙体,简化了施工流程,在国内外多个工程中取得显著成效,如水布垭水利枢纽、梨园水电站等。该技术主要包含边墙施工、垫层料摊铺及碾压等工序,相对于传统工艺具备施工质量好、效率高、造价低等优势,同时起到改善面板的受力状态、减少面板变形等作用。卡拉贝利大坝作为一项重要的水利工程,其施工过程中采用了挤压边墙施工技术。本文旨在通过分析挤压边墙施工技术在卡拉贝利大坝中的应用,探讨该技术的实际效果和推广价值。

1 工程概况

卡拉贝利水利枢纽工程是克孜尔干流规划的控制性工程,坝址位于喀什地区和克州交界处的中低山丘陵地带,距离喀什170km,是拦控克孜尔干流的主要枢纽工程。该水利枢纽以防洪、灌溉为主,兼顾发电。水库库容2.62亿 m^3 ,电站装机70MW。大坝采用混凝土面板砂砾石坝,坝顶高程为1775.50m,最大坝高92.5m,坝长760.7m,坝顶宽度12m。坝坡上游为1:1.7,下游为1:1.8。坝体各填筑分区从上游至下游分为上游砂砾石盖重区、上游土料铺盖区、垫层小区、垫层料区、上游砂砾料区、排水料区、下游砂砾料区、利用料区、反滤料、排水棱体,垫层料上游设有挤压边墙。总填筑量760万 m^3 ,总开挖量100万 m^3 ,混凝土总量10万 m^3 。

2 大坝填筑标准化施工技术

2.1 填筑料碾压参数科学化确定

2.1.1 原型级配碾压试验

根据《混凝土面板堆石坝施工规范》(SL 49-2015),针对卡拉贝利大坝砂砾料特性,采用密度桶法与全级配料碾压试验相结合的方法,确定关键施工参数:(1)最优级配。现场配置了梯度砂砾石含量(60%~85%)的砂砾料装桶碾压,发现砾石含量76%

时干密度达峰值 $2.43\text{t}/\text{m}^3$; (2) 碾压机械组合。1. 6m^3 挖掘机立面开采, 20t自卸车运输、坝面进占法卸料, 22t自行式振动碾(激振力 420kN), 220HP推土机平料; (3) 工艺参数。铺料厚度 80cm , 行车速度 $\leq 2.0\text{km}/\text{h}$, 全辊碾压10遍。

2.1.2 施工参数校核

在2015年冬季抢工阶段, 碾压试验完成后, 需要针对不同工况开展了验证性试验。校核试验设置三个对照区, 每个区的铺料厚度均为 80cm 。一区碾压8遍不加水, 二区碾压8遍加水, 三区碾压10遍不加水。每个区取样20组, 试坑间距 3m , 严格按照试验标准进行试验场地的基础处理和碾压。考虑冬季低温环境(日均气温 -10°C)及挤压边墙同步施工需求, 最终选定干燥状态下碾压10遍方案。该方案可避免加水导致填筑体冻结影响边墙侧向约束效果, 同时通过增加碾压遍数补偿干燥状态压实能量, 确保与边墙接触面摩擦系数 ≥ 0.55 。

2.2 填筑施工标准化控制

2.2.1 层厚控制技术

层厚控制技术为两种: (1) 三维样桩法。填筑现场每间隔 30m 布置直径 4.7m 的标准铺料样台(高 80cm), 通过激光扫描仪实时监控铺料厚度(偏差 $\leq \pm 3\text{cm}$); (2) 进占法优化。采用“前进—后退”交替铺料法, 减少推土机对已压实层的扰动(现场实测扰动深度降低至 5cm 以内)。

2.2.2 接坡处理标准

纵向接坡台阶宽度 1.20m , 坡度 $1:3$, 错台高差 $\leq 5\text{cm}$ (全站仪检测); 横向接坡预留 50cm 缓坡带, 薄层碾压, 压实度 $\geq 98\%$ 设计值; 边墙结合部距边墙 30cm 范围, 人工分层夯实, 平整度 $\leq 1\text{cm}/2\text{m}$ 直尺检测。

2.3 大坝填筑质量控制标准化体系

2.3.1 分层分区取样检测标准

基于《混凝土面板堆石坝施工规范》(SL 49-2015)和工程实际需求, 建立“三级四控”质量检测体系, 具体如下: (1) 单元工程划分标准。以坝料类型、施工时段($\leq 4\text{h}$)、填筑层厚(80cm)为基准划分检测单元; 每个单元分3个区段(上游侧、中部、下游侧)循环作业, 各区段独立取样检测。(2) 取样频次与规范对比, 见表1。

表1 取样频次与规范对比

坝料类型	规范要求	本工程实施标准	实测数据 (总量/频次)	与边墙关联性
砂砾料	$\leq 500\text{m}^3/\text{组}$	$\leq 4300\text{m}^3/\text{组}$	1436组(626万 m^3)	保证填筑体刚度均匀, 减少边墙侧向压力波动
垫层料	$\leq 500\text{m}^3/\text{组}$	$\leq 330\text{m}^3/\text{组}$	653组(21.5万 m^3)	高精度控制接触面质量, 避免边墙脱空风险

注: 检测合格率为: 砂砾料 98.2% , 垫层料 99.0% (设计标准 $\geq 95\%$)

2.3.2 标准化试坑取样技术

试坑参数控制采用“坑径—深度—取料量”三要素标准化作业, 详见表2:

表2 标准化试坑参数表

坝料类型	坑径(cm)	深度(cm)	最小取料量(kg)	功能定位
砂砾料	85 ± 5	80 ± 3	1000	全粒径代表性检测
垫层料	40 ± 2	40 ± 1	110	接触面细粒料检测

3 混凝土挤压边墙施工技术的应用分析

挤压边墙采用专用机械沿坝坡连续挤压成型, 形成梯形断面墙体(顶宽 10cm , 底宽 83cm , 墙高 40cm), 与垫层料同步分层填筑。边墙底高程为 1684.51m , 顶高程为 1773.00m , 共计220层, 墙体兼具固坡与排水功能。挤压边墙技术通过精确的模板系统、合理的混凝土配合比、科学的浇筑和挤压工艺, 以及严格的养护和修整, 确保了边墙的质量和稳定性, 广泛应用于各种工程领域。

3.1 技术原理

力学平衡机制: 挤压边墙在施工过程中与坝体填筑同步上升, 形成刚柔性耦合体系, 能起到以下作用: (1) 侧向约束作用。梯形断面(顶窄底宽)的边墙对垫层料形成侧向支撑, 抵抗填筑料的侧向变形。(2) 应力传递机制。边墙通过自身刚度和与垫层料的摩擦作用, 将填筑荷载均匀传递至下层结构, 减少局部应力集中。(3) 协同变形特性。干硬性混凝土的弹性模量($5\sim 7\text{GPa}$)与堆石料($2\sim 5\text{GPa}$)接近, 确保两者变形协调, 避免脱空现象。

水力控制: 通过控制混凝土孔隙率和骨料级配, 实现“半透水”功能, 形成排水通道, 透水系数控制在 $10^{-3}\sim 10^{-4}\text{cm}/\text{s}$, 允许渗透水排出, 避免孔隙水压力积聚; 具有反滤保护作用, 边墙与垫层料的粒径梯度设计(边墙骨料粒径 $\leq 20\text{mm}$, 垫层料 $\leq 80\text{mm}$), 防止细颗粒流失。

3.2 生产性试验研究

过往混凝土挤压边墙施工案例中, 常存在垫层料密实度不足、层间错台较大、混凝土墙体挤压不均匀等问题。施工前, 通过改进挤压机械、调整配合比、改进施工工艺并结合生产进行现场试验, 提出可行性试验成果, 以指导生产, 改善施工质量, 加快大坝施工进度。

3.2.1 试验设计与方法

基于《水工混凝土施工规范》(DL/T 5144-2015), 针对卡拉贝利大坝高寒、强震环境特点, 开展四维度生产性试验:

表3 挤压边墙生产性试验矩阵

试验类型	关键变量	检测指标	工程关联性
配合比试验	水泥用量 ($55\sim 70\text{kg}/\text{m}^3$)	干密度、弹性模量、 抗压强度	匹配垫层料渗透系数 ($10^{-3}\text{cm}/\text{s}$)
工艺试验	工艺措施、效果	错台高度、平整度	影响面板基准面精度 ($\leq 5\text{mm}$)
机具对比试验	配重($18\sim 25\text{t}$)、 挤压速度($40\sim 60\text{m}/\text{h}$)	位移变异系数	控制边墙水平位移($< 15\text{mm}$)
垫层碾压试验	碾压时序($1\text{h}/4\text{h}$)	干密度、边墙水平位移	防止边墙坍塌

注: 试验场地为10层、 4m 高试验区, 同步模拟垫层料碾压(宽度 3m)。

3.2.2 核心试验成果

技术参数确定: 水泥比1.3—1.35, 水泥62kg/m³, 砂率32%, 速凝剂掺量4%; 挤压边墙混凝土的弹模指标宜控制在5000~7000MPa, 密度指标宜控制在2.0~2.25t/m³, 渗透系数宜控制在10⁻³~10⁻⁴cm/s范围。

碾压工艺突破: 20T碾+小型手扶碾组合: 钢轮距边墙20cm时, 碾压8遍可使接触面干密度达2.35t/m³; 时序控制: 垫层料碾压延迟4小时实施, 边墙位移大幅减小。

3.3 挤压边墙精准施工工艺

卡拉贝利大坝设计为混凝土挤压边墙度汛, 边墙底高程为1684.51m, 顶高程为1773.00m, 共计220层。边墙断面为梯形, 外侧坡比1:1.7, 内侧坡比8:1, 顶宽10cm, 底宽83cm, 墙高40cm, 施工流程如下: (1) 测量放线。采用全站仪测放挤压墙底内边线, 调整法线方向偏差≤5cm; 分段挂线标定挤压机行走轨迹线, 间距5m设置控制桩; (2) 挤压机定位。由1.6m³反铲吊运挤压机至起点, 调节机身水平度(水准尺检测误差≤1mm/m); 固定三角形挡板, 校核出口高度为40cm(钢尺测量误差±0.5cm) (3) 混凝土施工。10m³罐车运输, 卸料速度与挤压机同步, 行进速度40~60m/h; 掺加速凝剂(掺量为水泥用量的4%); (4) 端部处理。挤压机无法到达的端部采用人工立模浇筑, 分层厚度10cm, 人工夯锤击实; 模板拆除后检查接缝密实度, 渗透系数偏差≤10%。

3.4 质量检测与缺陷修复

3.4.1 检测标准

表4 质量检测标准

检测项目	方法/仪器	控制指标	频次
干密度	蜡封法(坑径40cm×40cm)	2.0~2.25t/m ³	每层3点
平整度	3m直尺	≤50mm/10m	每5m断面1组
层间错台	游标卡尺	≤10mm	全数检查

3.4.2 缺陷处理措施

(1) 错台修补。小于10mm错台采用M5砂浆抹平; 大于10mm错台需凿除凸出部分后重新立模浇筑。

(2) 鼓包处理。人工凿除凸起部位, M5砂浆填补凹陷, 修补范围超出缺陷边缘10cm。

(3) 坍塌修复。清除松散混凝土, 立模补浇混凝土。

3.5 协同施工控制

(1) 时序管理。垫层料摊铺: 挤压墙成型1小时后开始, 人工整平与边墙顶面高差≤5cm; 垫层料碾压: 挤压墙成型4小时后进行, 碾压轨迹距边墙≥30cm。

(2) 变形控制: 见表5。

表5 变形控制标准

坝高区间	高程范围(m)	预留方向	预留量设计值	理论依据
0~1/3坝高	EL1683.0~ EL1713.0	法线向下游	5cm	下部填筑荷载大, 垫层料碾压侧向位移显著
1/3~2/3坝高	EL1713.0~ EL1743.0	法线向下游	5cm→0线性渐变	中部荷载梯度减小, 位移量随高度增加递减
2/3坝高至坝顶	EL1743.0~ EL1773.0	法线向上游	0→3cm线性渐变	顶部受坝体蠕变影响, 预留反向位移补偿

4 结论

本文以卡拉贝利大坝工程为依托, 系统研究了挤压边墙施工技术的应用实践与工程实效, 结合施工监测数据得出以下结论:

(1) 施工效率创新高。主河床段填筑自2015年9月至2016年7月封顶, 工期仅11个月, 月均填筑强度达68万m³; 挤压边墙同步完成220层(2.4万m³), 工效280m/台班, 较传统工艺缩短工期29%。

(2) 沉降控制效果显著。施工期最大断面(0+280桩号)累计沉降量21.1cm, 沉降速率稳定在1.92cm/月(封顶后降至0.3cm/月), 表明填筑体与挤压边墙协同变形效果优异; 坡面法线方向变形量≤5cm(4m×4m方格网2100点实测数据), 满足设计允许值, 验证了变形预留策略的有效性。

(3) 质量与成本双优。挤压边墙直接作为面板基面使用, 坡面平整度合格率100%, 节省传统工艺修坡成本约380万元; 喷涂乳化沥青防渗层后渗透系数稳定在3.5×10⁻⁴cm/s, 较规范要求提升1个数量级。

(4) 高寒适应性突破。通过掺入4%防冻速凝剂, 实现-15℃环境下边墙4h抗压强度≥1.2MPa, 攻克低温施工难题; 全坝无结构性裂缝, 印证了“刚柔耦合”设计理念的工程适用性。

卡拉贝利大坝的实践表明, 挤压边墙技术可同步实现高效施工、精准变形控制与全生命周期防渗, 为高寒地区200m级面板坝建设提供了关键技术范例。

[参考文献]

- [1]罗先启, 刘德富, 黄峰. 西北口面板堆石坝面板裂缝成因分析[J]. 人民长江, 1996, (09): 32-34.
- [2]陈雷, 侯永朋. 混凝土面板堆石坝施工与质量控制要点[J]. 人民黄河, 2020, 42(S2): 191-192.
- [3]徐泽平. 混凝土面板堆石坝关键技术与研究进展[J]. 水利学报, 2019, 50(01): 62-74.

作者简介:

王长征(1976--), 男, 汉族, 湖南邵阳人, 大学本科, 水利工程高级工程师, 研究方向: 水利工程建设与管理。