

水利工程土石坝填筑施工质量控制技术

李明

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要 土石坝是我国水利枢纽工程中应用最广泛的坝型之一, 填筑施工质量直接决定坝体结构稳定性、防渗性能与长期运行安全。本文系统梳理了水利工程土石坝填筑施工全流程的质量控制要点, 从前期准备、关键工序管控两个维度构建了标准化的质量控制技术体系, 分析了填筑施工中常见质量缺陷的形成原因, 归纳了对应的防控与处置对策, 旨在为水利工程土石坝填筑施工的精细化管理提供参考, 助力水利工程高质量建设与安全运行。

关键词 水利工程; 土石坝; 填筑施工; 坝基; 岸坡

中图分类号: TV641

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.18.039

0 引言

随着我国水利基础设施建设的持续推进, 水库、堤防、引水枢纽等工程的建设规模不断扩大, 土石坝凭借就地取材、结构适应性强、工程造价低、施工工艺成熟、抗震性能优良等特点, 成为水利枢纽挡水建筑物的主流选型。填筑施工作为土石坝工程建设的主要环节, 其施工质量的优劣直接影响坝体的抗滑稳定性、防渗性能、沉降变形特性, 甚至关系到整个水利枢纽的运行安全^[1]。

1 土石坝填筑施工前期准备与基础质量管控

1.1 填筑料场勘察与材料性能管控

填筑材料的性能是保障土石坝填筑质量的基础, 需在施工前开展全面的料场勘察与材料性能检验工作。料场勘察阶段, 需全面查明料场的储量、分布范围、材料级配、物理力学指标, 包括含水率、天然密度、压实特性、渗透系数、抗剪强度、塑性指数等关键参数, 确保料场储量满足工程填筑总量要求, 材料性能符合坝体不同分区的设计标准^[2]。

针对坝体不同功能分区, 需执行差异化的材料管控要求: 防渗体土料需严格控制黏粒含量、塑性指数与有机质含量, 确保其防渗性能与压缩特性符合要求; 反滤层、过渡层材料需严格控制颗粒级配, 满足反滤保护准则, 避免出现渗透破坏; 坝壳堆石料、砂砾石料需控制颗粒最大粒径、软弱颗粒含量, 确保其承载能力与排水性能达标。材料进场前需开展批次检验, 严禁不合格材料进入施工现场。

1.2 坝基与岸坡处理质量管控

坝基与岸坡是土石坝的承载基础, 其处理质量直接影响坝体的沉降变形与整体稳定性, 填筑施工前必须完成标准化的基础处理作业。首先需开展清基作业, 全面清除坝基、岸坡范围内的腐殖土、耕作层、树根、杂草、建筑垃圾等杂物, 以及软弱夹层、断层破碎带、强风化岩层等不良地质体, 清基深度需符合设计要求, 确保基础土方的承载力满足填筑标准。

岸坡修整需避免出现反坡、陡坎、尖角, 修整后的岸坡坡度需符合设计要求, 确保坝体与岸坡的结合紧密, 避免出现接触渗漏。针对透水性较强的坝基, 需按设计要求完成帷幕灌浆、固结灌浆等防渗处理作业, 针对软弱坝基需开展换填、加固处理, 处理完成后需开展承载力、渗透性能检测, 验收合格后方可开展填筑作业。

1.3 施工参数试验与施工组织设计

填筑施工前的碾压参数试验是确定施工控制标准的关键环节, 需通过现场碾压试验, 确定适配不同填筑材料的最优施工参数, 为后续填筑施工提供标准化管控依据。碾压试验需模拟现场实际施工工况, 选用工程实际使用的碾压机械与填筑材料, 设置多组对照试验, 明确不同材料对应的铺料厚度、碾压遍数、机械行走速度、最优含水率区间等关键参数, 验证压实后材料的物理力学指标是否满足设计要求。不同填筑材料的常用施工参数参考如表 1 所示。

同时, 需结合工程规模、地质条件、工期要求, 编制专项施工组织设计, 明确填筑施工的分区分划、

作者简介: 李明 (1991-), 男, 本科, 研究方向: 水利水电工程。

表1 土石坝不同填筑材料碾压施工参数参考表

填筑材料类型	推荐铺料厚度 (cm)	碾压遍数 (遍)	机械行走速度 (km/h)	最优含水率区间 (%)
防渗体黏性土	20 ~ 30	6 ~ 8	1 ~ 2	12 ~ 20
砂砾石料	60 ~ 80	4 ~ 6	2 ~ 3	8 ~ 12
堆石料	80 ~ 120	6 ~ 8	2 ~ 3	4 ~ 8
反滤过渡料	30 ~ 40	4 ~ 6	1 ~ 2	6 ~ 10

流水作业节拍、施工机械配置、进度计划、质量管控标准与应急预案，完成作业人员的技术交底与安全培训，构建全流程的质量管控责任体系，确保填筑施工有序推进。

2 土石坝填筑施工关键工序的质量控制技术

2.1 铺料作业质量控制技术

铺料作业是填筑施工的第一道工序，其管控重点是铺料厚度、平整度、含水率与分区界限控制。铺料作业需根据碾压试验确定的参数，严格控制铺料厚度，采用定点卸料、网格摊铺的方式，避免出现超厚、欠厚现象，现场需设置厚度标识桩，安排专人全程旁站管控。

针对不同类型的填筑材料，需选用适配的铺料方式：防渗体黏性土料优先采用后退法铺料，避免机械对已压实土层的扰动；堆石料、砂砾石料可采用进占法铺料，提升铺料作业效率。铺料过程中需严格控制土料的含水率，当含水率低于最优含水率下限时，需对料体进行均匀洒水增湿；当含水率高于最优含水率上限时，需进行翻晒、风干处理，确保填筑时含水率处于最优区间内。不同分区填筑料的铺料需明确界限，采用挡板隔离的方式，避免出现混料现象，相邻分区需平起填筑，避免出现过大的高差^[3]。

2.2 压实作业质量控制技术

压实作业是保障填筑体压实度与力学性能的关键工序，需严格按照碾压试验确定的参数开展标准化作业。首先需根据填筑材料的类型，选用适配的碾压机械：防渗体黏性土料优先选用羊足碾、凸块振动碾，提升土体的压实效果与结合性能；堆石料、砂砾石料优先选用重型振动碾，保障粗粒料的压实密度。

碾压作业需遵循“先轻后重、先慢后快、先边后中”的原则，碾压方向需平行于坝轴线，严禁垂直坝轴线碾压。分段碾压作业时，需严格控制搭接宽度，纵向搭接宽度不小于50 cm，横向跨缝搭接宽度不小于100 cm，避免出现漏压、欠压现象。碾压过程中需控制机械行走速度，严禁超速碾压，避免出现弹簧土、剪切破坏等问题。针对坝体边角、岸坡结合部、建筑物周边等

大型碾压机械无法作业的区域，需采用小型振动夯、蛙式打夯机等设备进行补压，确保全断面压实度均匀达标。压实作业完成后，需按规范要求的频次开展现场检测，采用环刀法、灌砂法、灌水法等方法检测压实度、干密度等指标，每100 ~ 200 m²填筑面至少设置1个检测点，特殊部位需加密检测，检测合格后方可开展下一层填筑作业。

2.3 结合面与填筑接缝处理控制技术

结合面与填筑接缝是坝体防渗与结构稳定的薄弱环节，需开展精细化的质量管控，避免出现渗漏、结合不良等问题。针对新老填筑层的水平结合面，上一层填筑前需对已压实的下层表面进行刨毛处理，刨毛深度控制在1 ~ 2 cm，清除表面的松散物料与杂物，均匀洒水湿润，确保上下层结合紧密。

针对坝体分段施工形成的纵向、横向接缝，需采用斜面搭接的方式处理，接坡坡度不陡于1:3，严禁出现垂直接坡，接缝处填筑时需对接坡进行削坡处理，清除松散层，刨毛湿润后分层填筑压实，确保接缝处的压实度符合设计要求。针对坝体与岸坡、混凝土建筑物的结合面，需先清理基础面的杂物与浮渣，涂刷与防渗体土料同配比的黏土泥浆，泥浆厚度控制在3 ~ 5 mm，随后同步进行分层填筑压实，避免出现结合面脱空、缝隙等问题。防渗体与坝壳料之间的反滤层、过渡层需与防渗体平起填筑，严格控制层间界限，避免出现混料、断档现象，保障反滤排水体系的完整性^[4]。

2.4 特殊工况下填筑施工质量控制技术

受水利工程施工周期长、露天作业的特点影响，雨季、冬季等特殊工况下的填筑施工，需制定专项质量控制措施，避免气候因素影响填筑质量。雨季填筑施工时，需提前在填筑区域周边设置完善的排水设施，修筑挡水埂、排水沟，避免雨水汇入填筑面；雨前需快速将已铺填的料体压实完毕，采用防雨布覆盖填筑面，雨后复工前需检测填筑料的含水率，对含水率超标的料体进行翻晒处理，清除弹簧土、泥污区域，验收合格后方可复工，严禁雨天进行填筑作业。

冬季填筑施工时，需禁用含有冻土块、冰雪的填

筑料,严格控制铺料厚度,适当增加碾压遍数,作业面需随铺、随压、随覆盖,避免已填筑土体冻结;当日平均气温低于 0℃时,需停止黏性土料填筑作业,堆石料填筑需采取专项保温措施,确保压实效果。同时,针对高坝填筑施工,需严格控制填筑加载速率,同步开展坝体沉降、位移观测,根据监测数据动态调整填筑进度,避免因加载过快引发坝体不均匀沉降、裂缝等问题。

3 填筑施工常见质量缺陷与防控处置技术

3.1 填筑体压实度不达标问题与处置

压实度不达标是土石坝填筑施工中最常见的质量缺陷,主要表现为填筑体干密度、压实度低于设计标准,局部出现漏压、欠压、弹簧土等问题。其主要成因包括:填筑料含水率偏离最优区间过大,铺料厚度超出试验确定的标准,碾压遍数不足、机械行走速度过快,碾压机械选型与填筑材料不匹配,边角部位未进行有效补压,填筑料级配不良、含有大量软弱颗粒等。

针对该问题,首要防控措施是严格执行碾压试验确定的施工参数,加强铺料、碾压全过程的旁站管控,每批次填筑料进场前均开展性能检验,含水率不合格的料体严禁铺填,对于级配不良的填筑料,需提前进行筛分处理,剔除超径颗粒与软弱颗粒,确保材料级配符合设计要求。针对已出现的压实度不达标区域,需根据缺陷程度采取差异化处置措施:轻微欠压区域,采用补充碾压的方式处理,补压后重新检测;压实度严重不达标、出现弹簧土的区域,需全部挖除,更换合格的填筑料,按标准重新分层填筑压实,重新检测合格后方可进行后续作业。

3.2 坝体渗漏与渗透变形问题防控

坝体渗漏与渗透变形是影响土石坝运行安全的主要隐患,主要表现为坝体散浸、集中渗漏、管涌、流土等问题,多发生在防渗体、坝基与岸坡结合部、混凝土建筑物接触带等部位。其主要成因包括:防渗体土料防渗性能不达标,填筑层结合不良、出现裂缝,反滤层级配不符合要求、出现混料断档,坝基与岸坡处理不到位,结合面处理不规范等。

防控措施需从源头管控,严格控制防渗体土料的性能指标,加强填筑层结合面、接缝的精细化处理,严格执行反滤层施工的级配控制标准,确保反滤排水体系完整有效。针对已出现的渗漏问题,需根据渗漏类型与严重程度采取处置措施:轻微散浸可采用上游坝坡增设防渗铺盖、下游坝坡增设排水贴坡的方式处理;集中渗漏、渗透变形问题,需采用劈裂灌浆、帷幕灌浆的方式封堵渗漏通道,严重时需开挖回填处理,

同时完善反滤保护措施,避免渗透破坏进一步发展。

3.3 填筑体不均匀沉降与裂缝处置

填筑体不均匀沉降易引发坝体裂缝、坝坡失稳、防渗体系破坏等问题,主要分为表面干缩裂缝、深层结构性裂缝两类。其主要成因包括:坝基处理不到位、存在软弱夹层,填筑材料不均匀、压实度差异大,分区填筑高差过大、加载速率过快,含水率控制不当、土体干缩变形,岸坡处理不规范、坝体受力不均匀等。

防控措施需加强坝基处理与填筑材料的均匀性管控,严格执行平起填筑的施工要求,控制填筑加载速率,同步开展沉降位移监测,根据监测数据动态调整施工进度^[5]。针对裂缝问题的处置,需根据裂缝类型、深度、宽度采取差异化措施:宽度小于 5 mm、深度小于 1 m 的表面干缩裂缝,可采用开挖清理后回填黏性土夯实、表面封闭的方式处理;宽度大于 5 mm、深度大于 1 m 的深层结构性裂缝,需查明裂缝延伸范围,采用开挖回填、灌浆加固的方式处理,处置完成后需开展专项检测,确保坝体结构完整性达标。

4 结束语

本文系统梳理了水利工程土石坝填筑施工全流程的质量控制技术体系,明确了前期料场管控、基础处理、参数试验的基础管控要求,细化了铺料、压实、结合面处理、特殊工况施工等关键工序的质量控制要点,归纳了填筑施工中常见质量缺陷的形成原因与标准化处置对策。当前,水利工程建设正向高坝、大库容、复杂地质条件的方向发展,对土石坝填筑施工的质量与安全管控提出了更高要求,现有技术体系在精细化管控、智能化应用等方面仍有优化空间。未来研究可聚焦智能化填筑装备研发、全过程动态监测管控技术应用、特殊地质条件下填筑材料改性、绿色低碳施工技术等方面,完善质量控制标准体系,提升土石坝工程的建设质量与长期运行安全保障能力。

参考文献:

- [1] 奚启林. 水利工程土石坝施工技术 & 质量控制研究 [J]. 水上安全, 2025(13):142-144.
- [2] 李万银. 水利工程土石坝坝体施工技术探析 [J]. 全面腐蚀控制, 2024,38(12):112-114,131.
- [3] 王梦竹. 土石坝填筑施工技术在小型水库施工中的应用 [J]. 珠江水运, 2023(05):77-79.
- [4] 弓少君. 水利工程土石坝坝体施工填筑质量变形监测方法研究 [J]. 山西水利科技, 2022(01):45-48.
- [5] 张雄德. 水利工程中面板堆石坝坝体填筑施工技术探析 [J]. 黑龙江水利科技, 2022,50(01):168-169,177.