

土石坝坝体填筑材料选型、渗流控制与边坡稳定设计

彭佳¹ 孙翔² 廖砚雯¹

1.湖北澜图工程设计有限公司, 湖北 武汉 448124

2.湖北楚禹水务科技有限公司, 湖北 荆门 448000

[摘要]土石坝是中小型水利灌溉、防洪蓄水工程的主流坝型, 具备适配性强、施工简便、造价经济的优势, 在基层水利工程中应用广泛。当前多数中小型土石坝存在设计精细化不足的问题, 不合理的填料选型、防渗排水体系及边坡参数设计, 易引发渗漏、管涌、滑坡等结构病害, 影响工程安全运行。本文结合工程实操经验, 开展填筑选材、渗流防控与边坡稳定协同设计研究, 明确分区填料标准、防渗排水技术及多工况边坡校核要点, 形成适配中小型土石坝的优化设计方案。研究实操性强, 可为基层土石坝建设、病害治理及运维管理提供技术支持。

[关键词]土石坝; 分区填筑; 材料选型; 渗流防控; 边坡稳定性

DOI: 10.64635/ja.2026.1313

中图分类号: TV641

文献标识码: A

Material Selection for Earth-Rock Dam Embankment Filling, Seepage Control, and Slope Stability Design

Peng Jia¹, Sun Xian², Liao Yanwen¹

1. Hubei Lantu Engineering Design Co., Ltd., Wuhan, Hubei 448124, China

2. Hubei Chuyu Water Technology Co., Ltd., Jingmen, Hubei 448000, China

Abstract: Earth-rock dams are the mainstream dam type for small and medium-sized water conservancy projects involving irrigation, flood control, and water storage. They have the advantages of strong adaptability, simple construction, and economical cost, and are widely used in grassroots water conservancy projects. At present, many small and medium-sized earth-rock dams still face insufficient design refinement. Unreasonable selection of filling materials, anti-seepage and drainage systems, and slope parameter design can easily lead to structural defects such as leakage, piping, and landslides, thereby affecting the safe operation of projects. Based on practical engineering experience, this paper conducts a coordinated design study on filling material selection, seepage prevention and control, and slope stability. It clarifies the standards for zoned filling materials, anti-seepage and drainage technologies, and key points for slope stability checking under multiple working conditions, forming an optimized design scheme suitable for small and medium-sized earth-rock dams. The study has strong practical applicability and can provide technical support for grassroots earth-rock dam construction, defect treatment, and operation and maintenance management.

Keywords: earth-rock dam; zoned filling; material selection; seepage prevention and control; slope stability

引言

中小型水利工程在水资源调度、农田灌溉及防洪减灾中发挥重要作用, 是保障基层农业生产与区域民生安全的基础性设施。土石坝凭借地形适配性强、可就地取材、施工简便、造价经济等优势, 广泛应用于山地、丘陵地区的中小型水利项目。我国存量中小型土石坝数量众多, 早期工程设计标准偏低、施工管控体系不完善, 部分新建工程也存在设计简化、参数套用随意、防护配套不足等问题, 整体设计精细化程度不高。

工程运行实践表明, 中小型土石坝频发的渗漏、滑坡等病害, 多源于材料选型、渗流防控、边坡设计等环节的系统性缺陷, 而非极端外力作用所致。当前学界研究多聚焦大型水利枢纽的精细化仿真分析, 针对中小型土石坝适配性、实用性的成套设计研究较为匮乏, 基层设计常照搬大型工程参数, 与实际工况匹配度偏低。为此, 本文依托现行行业规范, 结合工程实操经验, 开展填筑选材、渗流控制与边坡稳定协同设计研究, 构建适配中小型坝体的优化设计体系, 为工程安全建设与运维提供技术参考。

1 土石坝填筑材料选型设计与质量控制

1.1 填筑材料整体选用原则

土石坝填筑材料选型需兼顾结构安全性、施工可行性与工程经济性,形成规范化选材标准。首先,所选填料需具备优良且稳定的力学性能,压缩变形小、抗剪强度高,浸水后强度衰减幅度低,能够适应坝体长期自重承载与水压作用,有效控制不均匀沉降与塑性变形。其次,填料渗透特性需与坝体功能分区相匹配,防渗结构选用低渗透性土体,排水结构选用高渗透性骨料,实现防渗、导水功能分区明确。再次,填料需适配现场施工条件,原材料储量充足、开采便捷,可适配分层碾压施工工艺,碾压后可形成高密度、整体性良好的坝体结构。在满足安全与质量前提下,优先就地取材、就近选址,降低工程建设成本,实现安全与经济的平衡。

1.2 坝体分区材料适配要求

碾压式土石坝按功能可划分为防渗区、过渡区、主填筑区与排水区,各区域填料性能要求差异化明显。防渗区多采用粉质黏土、壤土等细颗粒土体,孔隙率低、防渗效果优良,可有效阻隔上下游水体渗透。过渡区布置在防渗结构与主坝体之间,选用级配均匀的砂砾料,既能缓冲水压冲击,又可阻挡防渗区细颗粒土体流失,避免渗透变形破坏。

主填筑区选用高强度碎石、堆石料,具备稳定性强、压缩性低的特点,可为坝体提供稳定支撑,抵御水压与结构自重引发的变形作用。排水区采用大粒径粗骨料填料,内部孔隙通道通畅,可快速导出坝体内部渗水,降低孔隙水压力堆积带来的结构负面影响。各分区填料需保证级配平稳过渡、性能相互适配,杜绝土体衔接部位出现渗流集中、应力异常等隐患。

1.3 常用填料性能对比与施工质控要点

不同筑坝填料适配场景各有侧重,黏土适用于坝体防渗结构施工,砂砾料适配过渡层与基础填筑,碎石料是主坝体填筑的优质材料。施工质量控制是保障填料性能落地的关键,施工前需检测填料天然含水率,调控至最优施工区间。施工全程采用分层填筑、分层碾压工艺,逐层检测压实度,杜绝局部疏松、压实不均等问题。同时及时清理填料杂质与超大粒径块体,保障坝体结构整体均匀统一,为坝体长期安全运行筑牢基础^[1]。

2 土石坝常见渗流病害与控制设计技术

2.1 常见渗流病害及形成原因

结合中小型土石坝运行现状来看,工程高频出现的渗流病害主要包含坝体渗漏、土体管涌、表层流土三类。其

中,坝体渗漏主要表现为坝坡、坝脚持续性渗水,问题成因多为防渗层填料不达标、压实度不足或防渗结构破损,导致水体无序渗入坝体。土体管涌多发于坝体内部与坝基位置,渗透水流会持续冲刷带走土体细颗粒,长期作用下会在坝体内部形成空洞通道,严重时可诱发坝体塌陷险情。

流土病害多集中出现在下游坝坡与排水表层,当土体整体结构强度不足以抵抗渗透水压作用时,表层土体就会出现隆起、松动、流失等问题。从设计施工角度分析,填料级配不合理、分区衔接施工粗糙、排水通道堵塞,都是人为因素造成的渗流安全隐患。与此同时,水库水位频繁起落、长期高水位蓄水的极端运行工况,会进一步加剧各类渗流病害的发展速度,扩大结构损伤范围。

2.2 渗流控制核心设计思路

针对土石坝渗流病害防控,行业通用核心设计思路为堵排结合、因地制宜。在具体设计布局中,上游区域重点开展封堵防渗作业,依托完整防渗结构阻断主要渗流通道,从源头减少渗入坝体的水体总量。下游区域聚焦排水减压工作,通过专用排水设施快速疏导渗水,有效降低坝体内部孔隙水压力。中间过渡结构承担稳流护土的衔接作用,稳定渗流流速,保护坝体填料不被水流冲刷侵蚀。需要明确的是,整套防控体系无需完全阻断渗流,只需将渗流量、渗透坡降控制在规范安全区间,即可有效保障坝体结构长期稳定。

2.3 主流防渗与排水工程措施

结合中小型工程施工条件与成本需求,土石坝常用防渗形式可分为黏土心墙防渗、黏土斜墙防渗、复合土工膜防渗三类,不同防渗技术适配场景各有不同。黏土心墙防渗结构稳定性强,适配多数常规土石坝工程,施工技术成熟,后期运维工作简便,通用性较强。黏土斜墙防渗布置于坝体上游坡面,检修维护操作便捷,更适合坝体改建、加固类工程。复合土工膜防渗具备施工效率高、造价低廉的优势,适配小型蓄水工程与改扩建空间受限的坝体项目,可有效弥补原有防渗结构的性能缺陷^[2]。

防渗体系的稳定运行,离不开完善的排水结构配套支撑,排水设施是渗流防控的关键组成部分。坝脚排水棱体是基础排水设施,可汇集并持续排出坝体渗水,稳定下游坝坡水环境。褥垫排水铺设在坝体底部,能够全方位疏导坝基渗水,避免基底水体长期淤积。岸坡排水槽可专门疏导坝体侧边渗水,防止岸坡下渗水破坏坝体衔接结构。实际工程中,各类防渗、排水结构需要搭配布设,形成完整

防控体系,单一防护结构难以适配复杂多变的运行工况。

3 土石坝边坡稳定设计与工况校核

3.1 边坡稳定主要影响因素

从结构自身条件来看,坝坡稳定性首先取决于填筑土体自身性能,土体抗剪强度与整体密实度可直接决定边坡基础抗滑能力。若存在填料级配不均、压实质量不足等问题,会造成局部土体强度偏弱,形成天然潜在滑动区域。从外部水环境来看,水体入渗会彻底改变土体原有受力状态,孔隙水压力持续上升会大幅削弱土体有效抗剪能力,直接降低边坡整体安全储备。

除土体性能与渗水作用外,水库水位变动、降雨冲刷、结构自重变化也会打破边坡原始受力平衡。在水位快速下降阶段,坝体内部水体排泄速度滞后于外部水位回落速度,内外水压差值会形成侧向推力,扰动边坡结构稳定。持续降雨会直接冲刷坝坡表层,雨水持续入渗会软化表层土体,显著增加浅层滑坡概率。同时边坡坡比设计存在明显权衡关系,坡度过陡会放大失稳风险,坡度过缓则会大幅增加填筑工程量与建设成本,需合理统筹设计^[3]。

3.2 边坡稳定常规设计方法

适配中小型土石坝的设计场景,边坡稳定校核普遍采用极限平衡法,该方法计算流程简洁、原理清晰、结果精准,完全满足普通工程设计精度要求。在实际应用中,技术人员依托规范公式分别计算边坡抗滑力矩与滑动力矩,通过力矩比值得出边坡稳定安全系数。不同运行工况对应差异化安全系数限值,当计算数值超出规范限值时,即可判定边坡结构稳定。为提升设计合理性,设计工作优先参考同类成熟工程案例,结合现场地形与水文条件确定初始坡比,再通过多工况校核完成参数优化调整。

3.3 典型工况边坡稳定性校核

为全面排查边坡失稳隐患,需针对不同运行工况开展专项校核。正常蓄水工况是坝体常态化运行状态,坝体水环境稳定,渗流状态平稳,边坡安全储备处于较高水平,该工况重点校核浸润线布设位置,避免水体持续弱化坝坡土体强度。水位骤降工况属于高危运行状态,外层水压快速消散后,坝体内部残余水体形成的推力会明显降低边坡安全系数,是设计校核的重点控制工况^[4]。

降雨工况对表层边坡稳定性影响最为显著,降雨过程中坝坡表层土体含水率快速上升,土体自重增加、结构强度大幅下降,浅层滑坡风险显著提升。由此可见,设计校核需要兼顾常态运行与极端运行工况,不能仅依靠常规蓄水状态判定边坡整体稳定性。针对校核过程中筛查出的安

全系数偏低的薄弱区域,需及时调整坡比参数或增设防护结构,彻底消除安全隐患。

3.4 边坡稳定性优化防护措施

结合工程实操经验,坡比优化是提升边坡稳定性最直接、最有效的手段。针对稳定性薄弱的坝坡区段,可适当放缓坡度,有效提升土体整体抗滑阻力。设计过程中需要平衡安全标准与工程经济性,避免过度放缓坡比造成工程量浪费。在优化坡比的基础上,表层防护可有效抵御雨水冲刷与风力侵蚀,草皮护坡、预制块护坡适配中小型工程,具备施工便捷、造价低廉的优势。同时坡面布设排水沟可快速疏导雨水,减少表层积水与下渗量,从外部水环境入手改善边坡受力环境,全方位提升边坡稳定性。

4 工程综合优化设计建议

土石坝设计具备极强的系统性与整体性,材料选型、渗流防控、边坡稳定并非相互独立的设计模块,三者互相制约、互相影响,共同决定坝体整体安全性能。具体而言,填料品质直接决定坝体渗流特性与土体强度,渗流环境的动态变化持续改变边坡受力条件,边坡结构形态又反向影响坝体整体应力分布。对此,工程设计需要摆脱传统分项独立设计的单一思维,建立一体化协同设计思路,实现各模块设计的统筹优化^[5]。

在材料选型与施工环节,需要同步兼顾防渗功能与结构稳定的双重需求,依据分区功能精准匹配填料类型,保证坝体内部渗透特性平稳过渡。同时施工质量控制需要重点落实分层压实、含水率管控、杂质清理等核心措施,全面提升坝体整体均匀性,从源头减少渗流集中区域与土体强度薄弱区域。

渗流防控设计不能套用通用模板,需结合填料渗透特性定制专属方案。若坝体采用渗透性偏大的填料填筑,需重点强化上游防渗体系,最大限度减少水体渗入总量。若坝体采用细密土体填筑、易出现内部积水问题,则需要加密排水设施布置,加快孔隙水压力消散速度。通过科学的渗流设计稳定坝体内部水环境,可间接保障边坡土体强度稳定,实现渗流控制与边坡稳定的协同适配。

边坡设计参数不能单一依靠常规工况取值,需结合填料性能与长期水文工况综合确定。针对高渗透填料填筑、长期高水位运行的坝体,需要适当放缓坡比、强化表层防护体系。工程竣工投入运行后,需建立常态化巡检机制,重点监测渗水变化、坡面位移、排水通畅情况,提前处置微小病害,避免隐患累积扩大,全方位保障坝体长期安全稳定运行。

5 结论

本文针对中小型土石坝基层设计适配性不足的行业痛点,围绕坝体填筑设计、渗流安全防控、边坡稳定校核三大核心环节开展专项研究,建立适配中小型工程的协同设计体系。研究结合坝体分区功能差异,明确不同区域填料的适配标准与施工质控重点,从源头提升坝体填筑均匀性与结构整体性。通过梳理各类渗流病害的诱发机制,总结堵排结合的分层防控措施,配套简易规范校核方法,有效解决中小型坝体常见渗透破坏问题。

本文结合蓄水、水位骤降、降雨三类典型运行工况,完成边坡稳定性系统校核,针对性提出坡比优化、坡面防护等稳坡技术措施。研究规避复杂理论推演与高端数值仿真,全部设计方法贴合基层施工与设计条件,具备极强的落地性。本次研究构建的一体化优化设计模式,可有效补齐中小型土石坝设计短板,规范基层水利工程设计流程,对提升坝体安全储备、延长工程服役年限具备实际工程价值。

【参考文献】

- [1]王康志,章晓泽,章宏萍.土石坝筑坝材料的规划、碾压试验和施工质控研究[J].云南水力发电,2022,38(8):198-202.
 - [2]孔祥梅.某水库均质土坝除险加固方案设计探讨[J].四川水利,2025,46(3):44-48.
 - [3]胡芬,宋文杰,李义方,等.土石坝下游山坪塘对坝体渗流稳定的影响分析[J].湖南水利水电,2023(1):13-16.
 - [4]韩华强,寸银川,刘宇宽,等.永德县德党河水库坝壳石碴料力学特性试验[J].水利与建筑工程学报,2021,19(6):76-81.
 - [5]王光霞,万书云,马慧清.土石坝渗流及其控制措施研究[J].四川水泥,2021(1):323-324.
- 作者简介:彭佳(1988.12—),女,汉族,籍贯:湖北荆门人,学历:大学、毕业院校:长江大学,所学专业:土木工程。孙翔(1987.12—),男,汉族,湖北荆门人,本科,毕业于:长江大学,土木工程专业。廖砚雯(1989.03—),女,汉族,湖北荆门人,本科,湖北工业大学,工程管理。