

基于可持续理念的水电站土石坝防渗技术实施分析

周鑫 陈为多

中水东北勘测设计研究有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i5.7008

[摘要] 本文以水电站土石坝防渗技术为切入点,提出基于可持续理念的创新路径,涵盖防渗材料的绿色化创新、防渗结构的优化设计创新、施工工艺的低碳化改进以及运维体系的智能化升级,旨在为水电站土石坝防渗技术的可持续发展提供全面且深入的理论支持与实践指导。

[关键词] 可持续理念; 水电站土石坝; 防渗技术; 创新路径

中图分类号: TV731 文献标识码: A

Research on Innovation of Seepage Control Technology for Hydropower Earth-Rock Dams Based on Sustainable Concepts

Xin Zhou Weiduo Chen

China Water Northeast Survey and Design Research Co., Ltd.

[Abstract] This paper focuses on seepage control technology for hydropower earth-rock dams, deeply analyzes the current mainstream seepage control technologies and their existing bottlenecks, and systematically reveals technical shortcomings from the perspectives of materials, structure, construction, and operation & maintenance under a sustainable perspective. Further, it proposes innovative paths based on sustainable concepts, covering green innovation in seepage control materials, optimized design innovation in seepage control structures, low-carbon improvement in construction processes, and intelligent upgrades in operation & maintenance systems, aiming to provide comprehensive and in-depth theoretical support and practical guidance for the sustainable development of seepage control technology for hydropower earth-rock dams.

[Key words] Sustainable concept; Hydropower earth-rock dam; Seepage control technology; Innovation path

水电站土石坝属于重要的水利设施范畴,它在防洪、发电以及灌溉等诸多方面均发挥着重要作用。其防渗性能的好坏,会直接牵涉到整个工程能否安全且稳定地运行。就当下社会而言,可持续发展的理念正逐步深入人心,这也使得对水利工程建设的要求变得更高了。传统土石坝所采用的防渗技术,存在着资源消耗量大、环境污染情况严重以及运维成本高等不少问题,故而正面临着以往从未有过的严峻挑战。所以,开展依据可持续理念来推进水电站土石坝防渗技术方面的创新研究工作,有着极为重要的实际意义。如此一来,既能有效化解传统技术所带来的一系列弊端,又能有力推动水利工程朝着绿色、低碳以及可持续的方向不断发展,进而达成经济效益、社会效益以及环境效益的有机融合与统一。

1 水电站土石坝防渗技术及应用特点

1.1 黏土心墙防渗技术

黏土心墙防渗法是传统的主流防渗措施,基本操作步骤为:在坝身中间挖掘一个槽形基坑(槽宽1.5-3.0m左右,深根据坝高决定),逐层铺筑黏土心墙(每层厚20-30cm左右,使用机械压实

达到密实度不低于95%的要求),由于其良好的不透水性能(渗透系数小于等于 1×10^{-7} cm/s)来阻止水流。这种方法施工简便快捷,容易获取,在有较多黏土的地方可以直接开采而不必长途运输节省了大约30%-40%的运费开支;费用低廉,1m³的黏土心墙造价仅为80至120元,适用于中小型低坝(坝高≤30m)或者经济欠发达地区使用^[1]。

实践操作上存在的问题,黏土用量大(10m高大坝需要大约2000-3000m³的黏土);开采时会破坏地表植被(开垦1m³黏土就要损坏0.8~1.2亩的地表植物),容易造成水土流失,在山地地带尤为严重,开挖之后坡面不稳定,需要增加对边坡进行处理措施的成本以及后期生态恢复的压力。

1.2 混凝土防渗墙技术

此方法主要是在大坝基础或者主体浇筑连续的混凝土防渗墙,形成完整的防渗体系。操作要点如下:使用冲击钻或者是回旋钻成槽(槽段长6-8m,宽0.8-1.2m,孔斜率小于等于0.3%);浇筑C25-C30的防渗混凝土(抗渗等级大于等于W8,抗压强度大于等于30MPa),底部嵌入基岩0.5-1.0m保证防渗的完整性。它的技

术优势在实际应用中的表现是:防渗性能良好(渗透系数小于等于 1×10^{-8} cm/s)、寿命长(设计使用寿命大于等于50年),尤其适用于高坝(坝高>30m)和厚覆盖层的大坝地基(覆盖层厚度>20m)。

实践操作上存在的问题,施工技术繁琐,需要有专门的成槽机械(例如冲击钻、泥浆泵等)、持有上岗证书的技术工人,每米防渗墙耗电量在150~200kWh之间,造价较高(单米施工费用800~1200元);施工中排放出来的泥浆(每百米防渗墙产生泥浆约80~100m³),如果不经处理而直接排放,则会对周围环境造成污染,因此还需要另外搭建一套泥浆处理设施(比如沉淀池或者压滤机),这又是一笔开支并且会使工期延长;后期维护困难,如果墙体出现裂缝,则需要用高压灌注的方法进行修复,其修复费用约占初次建造时费用的20%~30%左右,在此情况下很难符合绿色环保的要求^[2]。

1.3 帷幕灌浆防渗技术

此技术的操作要点在于利用高压灌浆(压力为2.0~4.0 MPa),向大坝基础岩石土层裂缝中注入水泥浆液(水灰比1:1~1:2.5),形成一道连续防渗帷幕(帷幕宽度0.8~1.2 m,渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s)的技术措施。适用于大坝地基岩体裂隙发育良好(裂隙宽度大于等于0.5 mm)。优点,精确有效,在大坝地基上根据具体情况选择梅花形布置孔位(间距2.0~3.0 m,排距1.5~2.0 m),可根据情况及时进行灌浆工艺控制调整(例如:浆液比重、灌浆压力等),以满足各种不同的地质情况需求。

实践操作上存在的问题,浆液流失量大,在实际施工中,浆液损失约占总量的30%~40%之间(有的裂隙发育差异大的地方甚至超过一半);环境污染严重,施工时溢出的浆液会污染大坝基础周围的土地以及难以处理废旧浆液等;灌浆效果不好,需要持续监控灌浆的压力、注入的浆液体积等信息,如果监控不到位就会导致帷幕中断或者达不到防渗的要求而后期还需要进行二次灌浆,这样也会加大工程的投资及能耗^[3]。

1.4 土工合成材料防渗技术

此方法施工要点在于铺设土工合成材料构成防渗结构,主要使用的材料及其工艺要求有:土工膜(厚度为0.8~1.2mm,使用HDPE材质,渗透系数小于等于 1×10^{-10} cm/s),在铺装过程中采用热熔焊接的方法进行连接(焊接温度控制在180~220℃之间,焊缝强度不低于母材强度的80%),防止接缝处渗水;膨润土防水毯(厚度4~6mm,膨润土含量大于等于4000g/m²),在铺设时要铺平夯实,以防损坏,紧贴大坝坡面(坡度小于等于1:2.5)。其优点是防渗效果好,操作简单(每天可以铺800~1000m²左右),耗能少(每平方米施工能耗大约在5~8kWh左右),近年来应用越来越广泛。

实践操作上存在的问题,目前常用的材料大多为不可降解型(如HDPE土工膜),工程废渣难以自然降解,堆积在地表时间久会污染土地;部分新兴环保型土工材料(例如可降解土工膜)强度低、抗老化能力弱,在户外暴晒下(紫外线辐射)寿命只有5到8年,远远达不到工程的设计要求(≥ 50 年)。同时这种新材料价格

昂贵(每平方米的可降解土工膜的价格约为30~50元,是普通HDPE土工膜价格的两到三倍),严重限制它的大规模应用。

2 基于可持续理念的水电站土石坝防渗技术实施路径

2.1 防渗材料的绿色化创新

2.1.1 天然材料改性创新。依据绿色材料科学相关理论,针对天然黏土、膨润土这类传统防渗材料展开改性方面的处理操作。比如在黏土里掺杂生物炭、纳米材料等物质,生物炭自身具备多孔结构以及较高的比表面积,如此一来便能对黏土的压实性能还有抗渗性能起到改善作用,同时也能减少黏土的使用量,进而降低对自然资源的依赖程度^[4]。

2.1.2 新型环保材料研发。研发具备可降解特性、能够实现再生且能耗较低的新型防渗材料,这无疑属于绿色化创新极为关键的一个发展方向。生物基聚合物防渗膜把可再生的生物质当作原料来使用,其自身有着不错的防渗性能以及可降解方面的属性,等它废弃之后是可以自然而然地完成降解过程的,绝不会引发环境污染方面的问题。生态型灌浆材料是以水泥还有膨润土作为基础原材料,在此基础上再掺入环保型的添加剂,如此一来便能让浆液的污染性得以减少。

2.1.3 材料回收利用体系构建。建立起防渗材料的回收利用机制,针对废弃的防渗材料展开分类回收、相关处理以及后续的再利用操作。就好比废弃的土工膜,其能够经过回收破碎流程,进而加工成为再生土工材料,最终应用于低等级的防渗工程项目当中;而废弃的混凝土防渗墙同样可以实施破碎回收,把它当作坝体回填材料来使用,如此一来便能够达成资源的循环利用目的。

2.2 防渗结构的优化设计

2.2.1 复合防渗结构设计。摒弃了以往那种单一的防渗结构模式,转而采用“多层复合、协同防渗”的全新结构形式^[5]。例如设计“黏土改性心墙+土工膜+帷幕灌浆”所构成的复合防渗结构,其中黏土改性心墙充当起主要的防渗屏障,土工膜则作为辅助的防渗层,帷幕灌浆的作用是阻断坝基的渗流,这三者相互协同发挥作用。

2.2.2 结构协同优化设计。综合考量坝体以及坝基所处的地质条件,同时兼顾二者在受力方面的特性,对防渗结构加以优化,使其和坝体、坝基之间的协同性得以提升。具体而言,用柔性防渗结构来取代传统的刚性防渗结构,柔性防渗结构具备较好的适应性,可以很好地适应坝体出现的沉降变形情况,如此一来便能有效避免结构发生开裂现象。

2.2.3 全生命周期优化设计。引入全生命周期管理理论,于设计阶段全面考量防渗结构在施工、运维以及废弃整个过程中的情况。选用耐久性良好且运维方便的材料和结构,以此降低后期维修的频次与相关成本。设计能够拆卸且可以回收的模块化防渗结构,方便后续开展维护工作以及实现回收利用。依据智能化监测方面的需求,留出监测接口,给后期智能化运维创造相应条件。

2.3 施工工艺的低碳化改进

2.3.1 低碳施工技术推广。大力推广装配式施工技术,把防渗结构的各个构件在工厂预先制作好,等到施工时再运到现场进行拼装,如此一来便能够大幅度减少现场施工过程中所消耗的能量以及污染物的排放量,同时还能让施工效率和施工质量得以提升,并且能够在很大程度上减少材料方面的浪费情况。比如装配式混凝土防渗墙构件还有装配式土工膜铺设模块等,这些都能够有效地减少现场浇筑以及开挖操作时所消耗的能量,还能减少泥浆的排放^[6]。

2.3.2 施工污染控制。优化施工工艺,降低施工过程中的污染物排放量。针对混凝土防渗墙施工当中的泥浆展开回收处理工作,实现循环利用,防止泥浆污染周边的水体以及土壤。对于帷幕灌浆施工里面的浆液实施精准把控,削减浆液的浪费情况与泄漏问题。在施工进程中采取防尘、降噪方面的举措,减小对周边环境还有居民生活所产生的影响。

2.3.3 资源高效利用。在施工期间,强化对材料、水资源以及能源方面的管理举措,以此来提升资源的利用效率。要对材料的堆放以及使用情况做出合理规划,从而减少材料出现损耗的情况。运用节水施工的相关技术,降低施工过程中的用水消耗量,并且对施工废水加以回收处理,实现循环再利用的目的。采用节能设备以及清洁能源,减少施工环节的能耗,进而降低碳排放的程度。

2.4 运维体系的智能化升级

2.4.1 智能化监测系统构建在防渗结构当中嵌入传感器以及监测设备,并且和物联网技术相结合,以此来构建起一个能够实现全覆盖且实时化运作的智能化监测系统。该系统可对渗流速度、渗流量、渗透压力还有结构变形等一系列参数展开实时监测,从而达成对防渗系统运行状态的动态监测效果。借助大数据技术对所获取的监测数据加以分析与处理,进而建立起渗流风险预警模型,以此实现对隐患的精准预警,为运维决策给予科学方面的依据,改变以往那种传统的“被动维修”模式,最终实现“主动防控”的目标。

2.4.2 精准化维护技术应用对监测所发现的各类隐患,运用精准且环保的维护技术来应对。对于防渗层出现的局部渗漏情况,采取高压喷射灌浆以及化学灌浆这类精准修复技术,如此一来,既能降低修复材料的使用量,又能缩小施工的范围。针对可降解材料发生的老化损坏状况,采用模块化更换技术,这样方便后续对材料进行回收利用。积极推广自修复技术,借助自修复材

料自身所具备的特性,达成防渗结构能够自主修复的目的,进而降低人工维护方面的成本。

2.4.3 全生命周期运维管理构建防渗系统的全生命周期运维管理平台,将设计环节、施工环节、监测环节以及维护环节等贯穿整个生命周期的数据加以整合,达成对运维过程予以系统化且规范化的管理目标。借助该平台针对防渗系统的运行实际状态展开长期的跟踪活动并开展相应评估工作,以此来对维护方案作出优化调整,合理地安排维护所涉及的时间以及所需资源,进而促使运维成本得以降低。与此把材料在使用过程中、维护期间以及回收阶段的相关情况都记录下来,实现对资源实施全生命周期的管理操作,从而进一步提升运维工作的可持续性程度。

3 结束语

依据可持续理念来对水电站土石坝防渗技术加以创新,这可算是处理传统防渗技术所存在问题的关键办法。具体而言,借助于针对防渗材料展开的绿色化方面的创新举措、针对防渗结构实施的优化设计方面的创新做法、对施工工艺做出的低碳化改进操作,还有对运维体系进行的智能化升级行动,如此一来,便可以切实有效地提高土石坝的防渗性能,同时也能减少资源的耗费以及对环境造成的污染,进而达成水利工程的可持续发展目标。

[参考文献]

- [1] 欧阳浩. 土石坝沥青混凝土防渗心墙的施工技术及质量控制[J]. 标准生活, 2025, (07): 117-119.
- [2] 胡德春. 高水头条件下高土石坝坝内超深混凝土防渗墙施工关键技术研究[J]. 水利建设与管理, 2025, 45(04): 42-47.
- [3] 严维. 水电站土石围堰防渗工程高喷注浆技术研究[J]. 水利技术监督, 2023, (6): 233-236.
- [4] 杨超. 基于相对熵组合赋权的土石坝除险加固防渗方案比选研究[D]. 西安理工大学, 2021.
- [5] 袁蕾蕾. 土石坝防渗加固方案多目标决策研究[D]. 长沙理工大学, 2018.
- [6] 邹敏, 杨宏伟, 徐杨, 等. 浅析深厚覆盖层坝基上土石坝渗流控制技术[J]. 甘肃水利水电技术, 2018, 54(05): 34-37.

作者简介:

周鑫(1994-), 男, 汉族, 辽宁省大连市人, 本科, 工程师, 水利工程施工组织设计。