

土石坝心墙水力劈裂机制研究

郝雪航¹ 林嘉仪² 侯光普³

1 中水北方勘测设计有限责任公司 2 河海大学水利水电学院 3 吉林省水利水电勘测设计研究院

DOI:10.12238/hwr.v9i8.6507

[摘要] 土石坝承担着蓄水、防洪和灌溉等多重功能,心墙作为土石坝的防渗核心,其性能直接关系到坝体的整体安全性和稳定性。在实际运行过程中,土石坝心墙常面临水力劈裂的风险。水力劈裂会导致心墙防渗性能的削弱,引发坝体溃决,造成严重的经济损失和社会影响。为了解土石坝心墙水力劈裂的机理和预防措施,文章首先对水力劈裂的基本定义进行了阐述,分析其在水利工程领域中的特定含义。随后,从物质条件和力学条件两个方面,分析土石坝心墙水力劈裂的发生条件,揭示心墙材料性质、上游水压力、心墙内部应力状态及心墙与坝壳相互作用等因素对水力劈裂发生的影响。在此基础上,重点探讨了土石坝心墙水力劈裂的预防措施。

[关键词] 土石坝; 心墙; 水力劈裂

中图分类号: TV641.1 文献标识码: A

Study on hydraulic fracturing mechanism of earth-rock dam core wall

Xuehang Hao¹ Jiayi Lin² Guangpu Hou³

1 Zhongshui North Survey and Design Research Co., Ltd.

2 Hohai University Water Conservancy and Hydropower College

3 Jilin Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute.

[Abstract] Earth-rock dam bears multiple functions such as water storage, flood control and irrigation. As the impervious core of earth-rock dam, the performance of core wall is directly related to the overall safety and stability of the dam. In the actual operation process, the core wall of earth-rock dam often faces the risk of hydraulic fracturing. Hydraulic fracturing will weaken the anti-seepage performance of the core wall, lead to dam failure, and cause serious economic losses and social impact. In order to understand the mechanism and preventive measures of hydraulic fracturing in the core wall of earth-rock dam, this paper first expounds the basic definition of hydraulic fracturing and analyzes its specific meaning in the field of water conservancy engineering. Then, from two aspects of material conditions and mechanical conditions, the occurrence conditions of hydraulic fracturing in the core wall of earth-rock dam are analyzed, and the effects of the material properties of the core wall, upstream water pressure, internal stress state of the core wall and the interaction between the core wall and the dam shell on the occurrence of hydraulic fracturing are revealed. On this basis, the preventive measures of hydraulic fracturing of earth-rock dam core wall are emphatically discussed.

[Key words] earth-rock dam; Heart wall; Hydraulic fracturing

引言

土石坝作为一种经济实用、适应性强、成本较低的水利工程结构,广泛应用于水库的建设中。随着土石坝高度的增加,其坝体的安全问题也日益凸显,其中,土石坝心墙的水力劈裂问题成为工程界普遍关注并亟待解决的关键问题之一。水力劈裂是指在高水压力下,岩体或土体中引起裂缝发生与扩展的过程。在土石坝中,心墙作为防渗体系的关键部位,承受着巨大的水压。当水压力超过土体的抗拉强度或满足其他特定的力学条件

时,心墙内可能发生水力劈裂,形成渗漏通道,进而威胁到整个坝体的安全稳定^[1]。然而,由于水力劈裂问题的复杂性,以及其发生机理受到多种因素的影响,如土体性质、水压力分布、蓄水速度等,目前对水力劈裂发生机理的解释尚未形成统一的认识。因此,研究土石坝心墙水力劈裂机制,揭示其发生、发展的规律和影响因素,对于预防水力劈裂的发生、保障土石坝的安全运行具有重要意义。

1 土石坝心墙水力劈裂的基本定义

水力劈裂,这一术语在水利工程领域中具有特定的含义。它指的是在高水头压力作用下,坝体心墙内部或表面产生裂缝,并随着压力的持续作用或增大,这些裂缝逐渐扩展、贯通,最终导致心墙破坏的现象。心墙作为土石坝的防渗核心,其一旦发生水力劈裂,将严重削弱坝体的防渗性能,甚至可能导致坝体溃决,造成不可估量的损失。土石坝心墙水力劈裂的发生是一个复杂的过程,它涉及多个因素的相互作用。从力学角度来看,水力劈裂是心墙材料在高压水作用下的一种应力状态失衡表现。当上游水压力超过心墙的土压力时,心墙内部的应力状态发生改变,形成拉应力区。当拉应力超过心墙材料的抗拉强度时,就会产生裂缝,进而发展成水力劈裂。

2 土石坝心墙水力劈裂机制的发生条件

2.1 物质条件

2.1.1 心墙材料的低透水性

心墙材料的低透水性是水力劈裂发生的必要条件之一,心墙作为土石坝的防渗层,其材料通常具有较低的渗透性。这种低透水性使得库水在压力作用下难以通过心墙快速渗透排泄,在心墙内部形成较高的水压。当水压达到一定程度时,就会对心墙材料产生劈裂作用^[2]。心墙材料的低透水性与其组成成分、结构特点和施工工艺密切相关。例如,黏土心墙由于其颗粒细小、比表面积大、吸附能力强等特点,具有较低的渗透性。这种低透水性增加了心墙发生水力劈裂的风险。

2.1.2 心墙材料的力学性质

除了低透水性外,心墙材料的力学性质也是影响水力劈裂发生的重要因素。心墙材料应具有一定的抗压、抗拉和抗剪强度,以抵抗水压作用下的应力状态失衡。然而,在实际工程中,由于心墙材料的非均质性、各向异性以及施工过程中的质量控制问题,其力学性质往往难以达到理想状态。当心墙材料的力学性质不足以抵抗水压作用时,就容易发生水力劈裂。

2.2 力学条件

2.2.1 上游水压力与心墙土压力的关系

上游水压力与心墙土压力之间的相对大小是水力劈裂发生的力学条件之一。当上游水压力超过心墙的土压力时,心墙内部就会形成有效应力拉应力区。这种拉应力区的存在使得心墙材料处于受拉状态,当拉应力超过材料的抗拉强度时,就会产生裂缝^[3]。上游水压力的大小与水库的水位、库容以及水文条件等因素有关。而心墙土压力则与心墙材料的重度、厚度以及坝体的整体稳定性等因素有关。在实际工程中,需要通过合理的设计和施工来确保上游水压力与心墙土压力之间的平衡关系,以防止水力劈裂的发生。

2.2.2 心墙内部的应力状态

心墙内部的应力状态也是影响水力劈裂发生的重要因素。在心墙运行过程中,由于上下游水位差、温度变化、地基变形等因素的作用,心墙内部会产生复杂的应力场。当这些应力场的组合作用使得心墙材料处于不利的应力状态时,就容易发生水力劈裂。例如,在心墙的高程变化处或与其他材料的交界处,由于应

力集中现象的存在,容易产生局部的高拉应力区。这些高拉应力区是心墙发生水力劈裂的潜在部位。因此,在设计和施工过程中,需要特别关注这些部位的应力状态,并采取相应的措施来降低拉应力水平。

2.2.3 心墙与坝壳之间的相互作用

心墙与坝壳之间的相互作用也是影响水力劈裂发生的重要因素之一。坝壳作为土石坝的支撑结构,其变形和位移会对心墙产生一定的影响。当心墙与坝壳之间的变形不协调时,就会在心墙内部产生附加应力,从而增加水力劈裂的风险。坝壳材料的性质和状态也会对心墙的水力劈裂产生影响。例如,当坝壳材料具有较高的压缩性或存在软弱夹层时,就容易引起心墙的不均匀沉降和侧向位移,进而产生拉应力区并导致水力劈裂。

3 土石坝心墙水力劈裂机制的预防措施

3.1 加强材料选择与施工质量控制

3.1.1 材料选择

心墙材料应具备低透水性、高抗拉强度和良好的耐久性。低透水性可以有效减少库水渗入心墙内部的可能性,降低水力劈裂的风险。高抗拉强度则可增强心墙抵抗拉应力的能力,使其在高水头压力作用下不易产生裂缝^[4]。在实际工程中,应优先选择黏土、膨润土等具有低透水性和较高抗拉强度的材料作为心墙填料。添加适量的添加剂,如纤维、聚合物等,进一步改善心墙材料的力学性能,提高其抗水力劈裂能力。

3.1.2 施工质量控制

施工质量控制是预防水力劈裂的重要环节,施工过程中的不均匀沉降、压实度不足、分层厚度过大等问题都可能会令到心墙内部产生应力集中,进而引发水力劈裂。因此,在施工过程中应严格控制各项施工参数,保障心墙的施工质量。具体来说,应加强对心墙填料的压实控制,要让压实度满足设计要求。合理控制分层厚度,避免分层过厚导致压实不均匀。加强对施工过程的监督和管理,施工人员要按照规范进行操作,避免出现违规作业行为。加强材料选择与施工质量控制,提高心墙材料的力学性能和施工质量,降低水力劈裂的风险。

3.2 优化设计参数

3.2.1 心墙厚度

心墙厚度过薄,容易令其在水头压力作用下易于产生裂缝;而心墙厚度过厚,则会增加施工难度和成本。因此,在设计过程中,综合考虑多种因素,确定心墙的厚度。首先,要充分考虑水库的水位变化范围,这是决定心墙所受水头压力大小的关键因素。水位变化越大,心墙所受的水头压力也越大,因此需要相应增加心墙的厚度以增强其抗压能力。其次,库容和水文条件也是影响心墙厚度设计的重要因素。库容大小决定了水库蓄水后心墙所承受的静水压力,而水文条件则影响了水库水位的波动情况,这些都会对心墙的厚度设计提出要求。接着,不同材料的抗压、抗拉强度以及弹性模量等力学指标各异,因此需要根据所选材料的特性来合理设计心墙的厚度。最后,施工质量的优劣直接影响到心墙的实际防渗效果和抗水力劈裂能力,因此在设计时需要

充分考虑施工质量控制水平,心墙在厚度设计上既满足防渗要求,又具备足够的抗水力劈裂能力。

3.2.2 心墙倾角

心墙倾角过大或过小都可能使其在水头压力作用下产生不利的应力状态,进而引发水力劈裂^[5]。因此,在设计过程中要合理设置心墙的倾角,使其与坝体的整体结构相协调,增强抗水力劈裂能力。具体来说,心墙倾角的设置应充分考虑坝体所在地的地形、地质条件以及心墙所采用材料的力学性质等多方面因素。

首先,要对坝体所在地的地形进行详尽的勘察和分析,了解地形的起伏变化、坡度大小等情况,为心墙倾角的设置提供基础数据。其次,要对地质条件进行深入研究,包括岩土层的分布、性质、厚度以及地下水位等,这些因素都会对心墙的应力分布产生影响。

在此基础上,结合心墙材料的力学性质,如抗压强度、抗拉强度、弹性模量等,通过科学的计算和模拟,确定出最合理的心墙倾角。在设置过程中,还应充分考虑心墙与坝体其他部分的连接方式,以及心墙内部的排水设施布置,以进一步优化心墙内部的应力分布,降低水力劈裂的风险。

3.2.3 坎壳与心墙之间的弹性模量比

当坎壳与心墙之间的弹性模量比过大时,令心墙在水头压力作用下产生过大的变形和应力集中,引发水力劈裂。因此,在设计阶段,应对坎壳和心墙所用的材料进行详细的力学性能测试,包括弹性模量、抗压强度、抗拉强度等。选择具有合适弹性模量比的材料组合,心墙材料具有足够的柔韧性和强度,以抵抗水力劈裂,根据工程经验和理论计算,设定一个合理的坎壳与心墙弹性模量比范围。这个范围应考虑到心墙在水头压力下的变形和应力分布情况。通过数值模拟和实验验证,确定最优的弹性模量比。

3.3 监测与预警

3.3.1 监测坝体变形

为了及时发现潜在的劈裂风险,应对坝体进行变形监测。定期测量坝体的水平位移、垂直位移等指标,掌握坝体的变形情况,发现异常变形并采取措施进行处理。在具体实施过程中,首先应选择先进的监测技术和设备,如GPS定位系统、全站仪、水准仪等,这些设备具有高精度、高稳定性等特点,能够准确测量坝体的微小变形监测工作应定期进行,根据坝体的实际情况和监测需求,确定合适的监测频率。在每次监测后,都要对监测数据进行整理和分析,建立监测数据分析和处理系统,进行监测数据的实时处理和可视化展示。这样,直观地掌握坝体的变形情况,发现异常变形或趋势性变化。一旦发现监测数据出现异常,如水平位移或垂直位移超出预定范围,或者出现加速变形的趋势,应立即发出预警信号,并启动应急预案。组织专业人员进行现场勘查和分析,查找异常变形的原因,评估其对坝体安全的影响,并采取相应的处理措施。最后,加强对监测人员的培训和管理,提高其专业技能和责任意识,定期对监测设备和系统进行维护和校准,确保其处于良好状态,为坝体的变形监测提供有力保障。

3.3.2 监测应力分布

除了对坝体变形进行持续监测外,对心墙内部的应力分布进行细致且实时的监测也是确保大坝安全稳定运行的关键环节。为了实现这一目标,我们需要在心墙的施工和运行过程中,精心埋设应力计等一系列先进的监测设备。这些设备如同大坝的“神经末梢”,能够实时、精确地捕捉并传输心墙内部的应力状态数据,使我们能够全面掌握心墙在不同工况下的应力分布情况。在监测过程中,我们应密切关注应力计的数据变化,特别是当出现心墙内部应力异常,如存在高拉应力区时,这往往预示着心墙可能面临水力劈裂等潜在风险。高拉应力区可能导致心墙材料的破坏,影响大坝的整体稳定性。因此,一旦发现心墙内部存在高拉应力区,迅速响应,采取措施进行调整和处理。包括调整心墙的施工方案,如优化材料配比、增加结构配筋等,以增强心墙的抗裂性能;或者采取工程措施,如进行局部加固、注浆封堵等,以消除应力集中区,降低拉应力水平。

3.3.3 预警系统建设

为了进一步提高监测与预警的效率和准确性,应建立完善的预警系统。预警系统应包括监测数据采集、数据传输、数据分析、预警信息发布等功能模块。通过预警系统的建设,进一步建立完善的应急响应机制,明确应急响应的流程、责任人和时间节点,确保在收到预警信息后能够迅速启动应急响应程序。

4 结束语

土石坝心墙水力劈裂对坝体的防渗性能和整体稳定性构成严重威胁,文章详细阐述了土石坝心墙水力劈裂的基本定义、发生条件以及预防措施。从物质条件和力学条件两方面分析了水力劈裂的发生机理,指出了心墙材料的低透水性、力学性质,以及上游水压力、心墙土压力、心墙内部应力状态和心墙与坎壳相互作用等因素对水力劈裂的影响。为了有效预防水力劈裂,提出了加强材料选择与施工质量控制、优化设计参数以及监测与预警等一系列措施。在未来的土石坝设计与施工中,应注重心墙材料的选择与施工质量的把控,优化设计参数,如确定心墙厚度、倾角以及坎壳与心墙之间的弹性模量比,进一步优化心墙内部的应力分布,降低水力劈裂的风险。

参考文献

- [1] 赵生财.高土石坝心墙砾石土料掺配施工技术[J].科学技术创新,2024,(01):183-186.
- [2] 郭晨.土石坝心墙不均匀孔压分布规律分析[J].水利科技与经济,2023,29(12):12-16.
- [3] 付才才.土石坝心墙孔压及其分布特征形成机理研究[J].水利科技与经济,2023,29(06):78-82.
- [4] 丁飞.某土石坝心墙防渗料的掺砾改性研究[D].西北农林科技大学,2023.
- [5] 韩朝军,杨家修,湛正刚,等.复杂地形条件下土石坝心墙安全关键问题探讨[J].水力发电,2020,46(03):49-55.

作者简介:

郝雪航(1991--),男,汉族,天津市河西区人,硕士研究生,工程师,水利水电工程。