

## 基于水工混凝土面板裂缝成因及防治分析

任月娟 余刘辉 唐家宏 邓超 肖雨欣

长江三峡技术经济发展有限公司, 北京 101100

**[摘要]**水工混凝土面板为面板堆石坝等水利工程中的主要防渗体, 而面板开裂直接影响工程的安全性和寿命。因此, 本文总结了水工混凝土面板裂缝的种类及其特点, 分析了造成裂缝的原因, 主要包括材料原因、设计原因、施工原因、环境因素以及荷载作用等, 进而提出了相应的预防对策, 如改善材料性能、优化设计、加强施工过程管理、做好后期维护保养等; 同时详细介绍了常见的几种裂缝防治方法, 包括表面封闭法、注浆加固法、结构补强法以及涂装防护法等。

**[关键词]**水工混凝土面板; 裂缝成因; 温度应力; 防治技术

DOI: 10.33142/ect.v4i3.19400

中图分类号: TV431

文献标识码: A

### Analysis of the Causes and Prevention of Cracks in Hydraulic Concrete Panels

REN Yuejuan, YU Liuhui, TANG Jiahong, DENG Chao, XIAO Yuxin

Yangtze Three Gorges Technology & Economy Development Co., Ltd., Beijing, 101100, China

**Abstract:** Hydraulic concrete panels are the main anti-seepage bodies in hydraulic engineering such as concrete face rockfill dams, and panel cracking directly affects the safety and service life of the project. Therefore, this article summarizes the types and characteristics of cracks in hydraulic concrete panels, analyzes the causes of cracks, mainly including material reasons, design reasons, construction reasons, environmental factors, and load effects, and proposes corresponding preventive measures, such as improving material performance, optimizing design, strengthening construction process management, and doing a good job in post maintenance; At the same time, several common crack prevention methods were introduced in detail, including surface sealing method, grouting reinforcement method, structural reinforcement method, and coating protection method.

**Keywords:** hydraulic concrete panel; cause of crack formation; temperature stress; crack prevention technology

### 引言

由于混凝土面板堆石坝具有适用性强、施工快、造价低等特点, 在国内外得到大量应用。而作为坝体防渗层的混凝土面板, 受到水压力、温差及坝体变形等多种因素的影响, 其自身质量的好坏直接影响到整个大坝的安全运营。但是通过对我国已建混凝土面板堆石坝进行调研发现, 几乎所有的混凝土面板都会有不同程度、不同宽度的裂缝存在, 裂缝问题是困扰混凝土面板堆石坝安全稳定运行的重要问题。这些裂缝不仅影响着面板的防渗性能, 而且会造成渗漏、加剧钢筋腐蚀、降低结构强度, 严重时还会造成大坝的整体安全隐患。因此, 对水工混凝土面板裂缝产生的原因进行详细探讨, 以及对其预防及修补措施的研究, 对提高水利枢纽工程使用寿命及安全性具有重大现实意义。

### 1 水工混凝土面板裂缝类型及特征

水工混凝土面板裂缝根据原因、形状以及所处的发展阶段可以分为不同种类。从原因上来说, 可分为荷载裂缝和非荷载裂缝两大类。荷载裂缝主要是由于外荷载造成应力大于混凝土的抗拉能力而导致出现, 如水压力造成的弯裂或剪裂; 而非荷载裂缝有温差引起的温度裂缝、干缩产生的干缩裂缝、塑性收缩形成的塑性收缩裂缝和沉陷造成的沉陷裂缝等, 它们的发生都与混凝土本身的性质有关或者是周围条件的影响所致。从裂缝形式上看, 温度裂缝一般为均匀网格

式, 而干缩裂缝多为龟裂或者无规律放射状, 塑性收缩裂缝两端较细、中间较粗并且纹理连续清晰<sup>[1]</sup>。根据其形成时期可分为施工期裂缝和运行期裂缝: 施工期裂缝主要是由于水化热温差以及初期干缩造成的, 在混凝土面板浇筑之后较短时间内产生; 而运行期裂缝则是由于大坝自身徐变变形、水位变化以及气温季节性变化等造成, 在混凝土面板投入使用之后一段时间内出现。不同类型裂缝通常同时存在于水工混凝土面板上, 表现出复杂分布及发展过程, 在原因探究及处理措施上也应具有全面观点。面板常见裂缝类型见图 1。

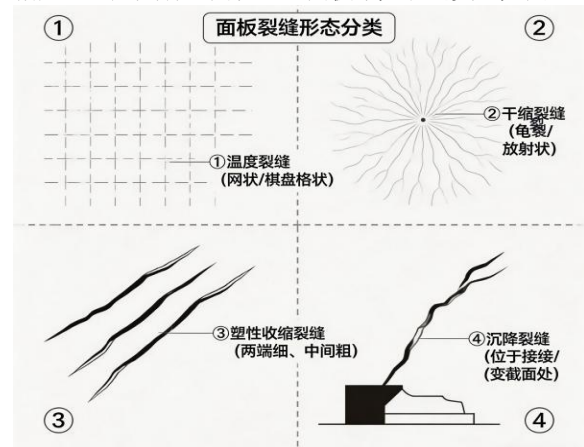


图 1 水工混凝土面板典型裂缝形态分类示意图

## 2 水工混凝土面板裂缝成因分析

### 2.1 材料因素

混凝土本身的物理、化学性质是造成裂缝的根本原因。水泥水化放出大量的热能使得混凝土内部温度很高,而外部散热较快,从而形成内外温差大的温差场,产生拉伸应力,在拉应力大于混凝土初期抗拉强度的情况下就会出现温度裂缝。混凝土的收缩是混凝土从拌制到硬化直至使用的整个过程由于各种因素如化学作用、水分变化以及温度变化所引起的体积缩小。干缩变形对面板影响较大,在温度、干缩所引起的总应力中,干缩应力占较大比重,而且是前期较小、后期逐渐增大的趋势,如收缩总量为100%,15天为15%,3个月为60%,6个月为80%,一年为95%等<sup>[2]</sup>;另外,由于混凝土抗拉强度较低、极限拉伸率较小、弹性模量较高,所以混凝土是一种脆性材料,抵抗开裂的能力较弱。

### 2.2 设计因素

设计对面板裂缝的影响主要表现在结构选型、配筋以及止水布置上。如果面板厚度不够,则会降低其抗弯刚度及抗裂性能;而当配筋率较低或者钢筋位置不当,也不能阻止裂缝的发展。有研究认为增加配筋可抑制面板裂缝产生,另外表面保护也可以减小温度收缩引起的拉应力。同时面板分缝过大、缝间止水不当、趾板与面板接触处应力集中等都会使局部应力提高而造成面板更容易开裂。面板受到限制时,其水平向应力会发生很大改变,在实际工程中要尽量避免强约束。目前,对于面板堆石坝的设计原理,在混凝土面板及堆石体间相互作用方面的理解尚不充分,这亦是造成面板开裂设计控制困难的原因之一。

### 2.3 施工因素

施工质量对面板裂缝产生起着决定性作用,在混凝土施工过程中温控措施不当也是造成裂缝的一个重要原因。面板混凝土较薄,在水化热温升期内时间较短,最高温度峰值出现较早且较低,随后迅速下降,基本符合“越薄散热越快”,但是由于昼夜温差大或者冷击使得早期温度应力仍然很大。养护质量直接影响到混凝土早期强度增长以及收缩变形抑制情况,干缩裂缝一般发生在混凝土停止养护之后,停止养护后15d内发生较多。另外,浇筑工艺控制不当、堆石体碾压质量差造成坝体变形大也会使面板上出现附加应力从而引起裂缝的发生和发展。

### 2.4 环境与荷载因素

环境因素主要是温度变化、湿度变化以及冻融循环等。夹岩水利枢纽工程研究表明,由于内外温差较大、温降造成的干缩变形以及温度应力是造成面板开裂的主要因素,在高寒地区冬季低温使得混凝土有较大温降收缩,在冻融过程中又会使表面出现更多裂缝<sup>[3]</sup>。荷载方面,水库灌浆后水压力对面板产生弯曲变形作用,在某水库面板堆石坝裂缝调查中发现,施工期堆石体变形、运营期间两侧面板

局部应力集中拉应变大、中央堆石体徐变以及上下不同步沉降都是造成面板结构性裂缝原因。某面板堆石坝在施工和蓄水期间也出现面板开裂以及坝基局部渗压过高等问题。坝基不均匀沉降、堆石体蠕变变形以及地震等特殊荷载都可能导致面板受到超出预期外的额外应力而产生或者进一步发展裂缝。

## 3 水工混凝土面板裂缝防治措施

### 3.1 材料优化

材料优化是提高混凝土面板抗裂性重要手段,宜选择中热或低热水泥以减少水化热,使用中热水泥+I级粉煤灰配制而成混凝土不仅满足设计规定,而且其绝热温升值最小,在此基础上添加PVA纤维能够显著提高其抗裂性,使其抗裂等级由II级提高到I级<sup>[4]</sup>。纤维增强是目前较为成熟防裂材料发展方向:钢-PVA混杂纤维加入可以起到阻止混凝土开裂作用,少量添加PVA纤维(0.1%)就可以起到防止开裂效果。更先进的技术为补偿收缩改性玄武岩纤维双掺防裂技术,开发了一种以胶凝材料等量取代新型防裂剂及改性玄武岩纤维双掺混凝土,其具有高延性、高韧性、低收缩、低弹模等特点,可补偿混凝土收缩 $300\times 10^{-6}\sim 600\times 10^{-6}$ ,极限拉伸率提升20%~30%。新型无机VF防裂剂克服了传统的膨胀剂膨胀量、膨胀速率与混凝土收缩不同步的问题,而玄武岩纤维表面改性工艺解决玄武岩纤维易结团以及其弹性模量与混凝土不相容的问题。以上技术已应用于六十多个水利水电工程,如珊溪水库、开化水库等六个工程项目均达到无裂缝面板工程奇迹。

表1 不同防裂材料方案的效果对比

技术方案	关键指标	抗裂效果
普通混凝土	极限拉伸值基数	易开裂
中热水泥+I级粉煤灰+PVA纤维	绝热温升 36.9℃ (28d)	抗裂等级从II级提升至I级
补偿收缩改性玄武岩纤维双掺	补偿收缩在 $300\times 10^{-6}$ 到 $600\times 10^{-6}$ 之间,极限拉伸提高20%~30%	实现面板无裂缝

### 3.2 设计改进

从设计上要尽量降低约束条件、改善应力状态、合理配置钢筋。降低基础对面板的约束有利于控制裂缝。可以优化趾板和面板之间的连接方式以减小局部约束刚度;增加面板配筋率,采用双层双向配筋的方式提高面板整体抗裂性。面板分缝间距应结合温度应力进行分析,防止分缝过大造成温度收缩应力集中。在计算面板温度收缩应力时采用“综合温差”的思想,即把干缩变形转化为等效收缩温度加入到温度应力中去。对于高坝以及寒冷地区的工程,在设计时需充分考虑堆石体徐变对面板的影响,必要时设置相应的调整措施。

### 3.3 施工控制

施工控制主要集中在温度控制、养护以及工艺上。温

度控制上尽量选择低温季节或者晚上进行面板混凝土浇筑,控制入仓温度,必要时可预埋冷却水管以降低内部温差。养护上,面板浇筑后要立即覆盖复合土工膜进行洒水保湿养护,保持一定时间的湿润养护对于防止开裂十分重要。尚义抽水蓄能电站面板施工过程中,“从源头抽检到进场车检再到批量复检”的三级原材料管控体系以及使用碳纤维混凝土配合比设计极大地减少了裂缝的发生。

### 3.4 维护与监测

运行期维护及监测是裂缝防治工作的继续和发展。应制定完善的面板裂缝巡查计划,在日常工作中检查面板上裂缝的位置以及发展情况,特别是要关注高应力区及结构缝附近裂缝的变化。对于已经出现裂缝要进行分类评价,依据裂缝宽度、深度及其是否渗水等因素决定处理顺序。目前,智能检测手段在面板裂缝控制方面越来越受重视<sup>[5]</sup>,开发出一种面板混凝土智能养护监控系统,可以对混凝土面板温湿度进行在线监测并分析,一旦有异常情况发生就会发出警报,有利于裂缝预防以及前期处置。

## 4 裂缝处理与修复技术

### 4.1 表面封闭法

表面封闭法适合宽度较窄非结构性裂缝,主要是封闭裂缝表面、阻止有害介质进入裂缝内部。对于宽度小于0.1mm裂缝,用表面封闭方法,在混凝土表面利用毛细作用,将低黏度裂缝封闭修补材料涂覆在裂缝上,防止有害物质进入。施工前需清除裂缝表面松散颗粒以及油污等杂物后,再涂抹一层环氧树脂基封闭胶或者聚合物水泥基封闭涂料,如果需要还可以在裂缝处贴一层防渗带提高防水性能。

### 4.2 注浆加固法

注浆加固法用于宽度较大的裂缝,特别是对于存在渗水的贯穿性裂缝非常有效的方法,在裂缝内进行化学灌浆充填饱满,表面涂覆层与混凝土良好结合,可以达到良好的止水防水的效果。而选用何种灌浆材料要依据裂缝的情况以及修复的目的来选择:环氧树脂灌浆材料强度较高、粘接力较强适用于结构性裂缝;而聚氨酯类化学灌浆材料由于遇水后会发泡膨胀的特点,更适合用于渗水裂缝的迅速止水。河口村水库溢洪道底板裂缝修复工程施工过程中,选用环氧树脂为材料,针对不同宽度裂缝采取环氧腻子封闭、“V形槽环氧砂浆填充+化学灌浆”等方法进行修补,效果良好,提高了外观质量,排除了事故隐患。

### 4.3 结构补强法

对于严重影响结构承载能力的裂缝,单纯用灌浆进行封堵不能满足要求,还需对结构进行加强处理。一般有粘贴碳纤维布(CFRP)、粘贴钢板以及增加预应力锚索等方法。碳纤维布加固具有质量轻、强度高、施工方便、耐腐蚀等特点,适用于面板受拉区域的抗弯加强。如果面板出现开裂或者破坏的情况,则可采取局部剔除重新浇筑或

者增加混凝土叠合层的方法进行修补。JLBLK水电站大坝位于高纬度寒冷地区,是一座百米级全断面堆石面板坝,现场存在较多面板挤压破损以及开裂现象,在参考国内外类似工程基础上进行了相应的处理。

### 4.4 防护涂层应用

防护涂层技术用于裂缝修补后整体防护以及提高其耐久性,在裂缝修补之后,在面板上涂刷聚合物水泥基防水涂料或者聚脲弹性体涂层可以形成一层完整防水保护膜,防止紫外线老化、化学腐蚀以及冻融破坏,减缓混凝土劣化程度。验收后对整个面板涂刷聚合物水泥基防水涂料,可增强修复效果<sup>[6]</sup>。而在寒冷地区的面板工程中,防护涂层还要有较好的低温柔韧性及抗冻融循环性能。

表2 典型裂缝修复技术的适用条件与效果对比

修复技术	适用裂缝宽度	主要材料	修复效果
表面封闭法	<0.2mm	环氧封闭胶、聚合物涂料	封闭表面,阻隔有害物质
化学注浆法	0.2~2.0mm	环氧树脂、聚氨酯	充填密实,止水防渗
结构补强法	>2.0mm或结构性裂缝	碳纤维布、钢板、新混凝土	恢复结构承载力
防护涂层	裂缝修复后的整体防护	聚合物水泥涂料、聚脲涂层	提升耐久性,抵御环境侵蚀

## 5 结束语

水工混凝土面板裂缝是由于多种原因造成的,包括材料自身特性、设计理念、施工方法以及使用条件等多种因素相互影响而产生的问题,是一个贯穿整个工程建设过程中的长期任务。本文总结了面板裂缝的特点及其产生原因,介绍了从材料改善、设计优化、施工管理到后期检查维护的一系列预防措施,以及对裂缝进行修补的办法如表面封闭、注浆加固、结构加强和涂装保护等方法。今后要加强对混凝土面板与堆石体协同变形机理的研究,在此基础上提出更准确的裂缝预报方法,开展智能化全寿命周期监测,使面板裂缝治理由“亡羊补牢”变为“未雨绸缪”,更好地保障水工混凝土面板安全可靠。

### [参考文献]

- [1]杨林.某水库面板堆石坝临时度汛坝体稳定分析[J].水电与新能源,2025,39(8):33-37.
- [2]叶国林,宋祯,濮琦,等.超低热硅酸盐水泥(ULHC)的研制及水化放热行为研究[J].混凝土与水泥制品,2025(12):24-28.
- [3]胡锦方,马刚,杨启贵,等.水位变幅对抽水蓄能面板堆石坝应力变形的影响[J].水力发电学报,2025,44(12):84-99.
- [4]李正发,刘钊,包仪军,等.陶粒预湿处理方式对陶粒泡沫混凝土物理力学性能的影响[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2025,57(5):682-688.

[5]李桂宝.纤维在堆石坝面板水工混凝土中的应用分析[J].黑龙江水利科技,2023,51(4):118-121.

[6]赵泽锦,肖家发,周斌,等.膨胀剂对面板坝混凝土减缩抗裂性能的影响[J].水电能源科学,2022,40(2):101-104.

作者简介:任月娟(1993—),女,汉族,山西省吕梁市兴县人,硕士,工程师,长江三峡技术经济发展有限公司,研究方向:水工混凝土;余刘辉(1985—),男,汉族,湖北省荆州市人,硕士,高级工程师,长江三峡技术经济

发展有限公司,研究方向:水工金属结构与机电设备;唐家宏(2000—),男,汉族,安徽省铜陵市枞阳县人,硕士,助理工程师,长江三峡技术经济发展有限公司,研究方向:水工混凝土;邓超(1996—),男,汉族,江西省抚州市临川区人,硕士,工程师,长江三峡技术经济发展有限公司,研究方向:水工混凝土;肖雨欣(1998—),女,汉族,湖北省宜昌市人,硕士,工程师,长江三峡技术经济发展有限公司,研究方向:水工混凝土。