

水利水电工程中的混凝土裂缝防治技术分析

元 霖

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘 要 近些年,我国水利水电建筑工程建设规模持续扩大,混凝土作为工程核心结构材料,其裂缝问题正不断影响水利水电建筑结构的稳定性。本文系统分析了混凝土裂缝的主要类型及成因,并论述了骑缝灌浆法、钻孔灌浆法、开槽填补法以及粘贴碳纤维布法等混凝土裂缝施工技术,旨在为合理选择裂缝处理技术,有效恢复水利水电工程中的混凝土结构性能,保障水工建筑物长期安全运行提供有益参考。

关键词 水利水电工程;混凝土裂缝;骑缝灌浆法;钻孔灌浆法;开槽填补法

中图分类号:TV544; TU755.7

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.018

0 引言

混凝土裂缝是影响水利水电工程结构安全的常见病害,且长期受温度变化、基础约束、荷载作用等多重因素影响。这就要求在处理混凝土裂缝时,采取针对性施工技术。水利水电工程混凝土裂缝还会在不断发展过程中不断降低整个工程的结构整体性,甚至引发渗漏及安全隐患。因此,应在工程建设运行阶段加强分析裂缝成因分析,并结合材料选择、施工工艺优化及后期养护措施,进行系统化的防治,以提升水利水电工程的安全性。本文系统分析当前水利水电工程混凝土结构的裂缝类型与施工技术,旨在为防治水工混凝土裂缝提供技术参考。

1 水利水电工程中混凝土裂缝种类及原因

1.1 温度应力所致的伸缩裂缝

水利水电工程中的大体积混凝土浇筑后,会由于水泥水化反应释放大量热量,再叠加混凝土材料导热性能较差的特点,容易在混凝土结构内部积聚形成温度达60℃至80℃的高温核心,且在混凝土内外产生明显的温度差,形成温度应力,引发混凝土裂缝^[1]。水利水电工程混凝土中的这种非均匀分布的内外部温度场,会致使混凝土内部受热膨胀产生压应力,表面冷却收缩承受拉应力,从而在表面拉应力超过混凝土抗拉强度时,形成表面裂缝。此类裂缝受温度场特征影响,多发于混凝土的向阳面、薄壁结构或约束较强部位,既会破坏水利水电工程的结构完整性,更会形成通道,为外界侵蚀提供途径,威胁水利水电建筑物的长期安全。

1.2 基础约束所致的深层裂缝

水利水电工程中,施工人员在岩基或老混凝土垫层之上浇筑大体积混凝土时,容易导致混凝土在水泥水化热的升温阶段产生体积膨胀,并由地基刚性边界条件反向约束这种混凝土膨胀变形,对底部混凝土产生明显的压应力。这种情况还会在混凝土进入降温阶段后,收缩混凝土体积,由基础强约束作用限制其回缩,对底部混凝土造成显著拉应力,并在拉应力超过混凝土极限抗拉强度后,从约束界面附近萌生裂缝,向上部扩展延伸,形成贯穿性深层裂缝。此类裂缝具有缝深大、延伸长度广的典型特征,严重破坏水利水电工程结构的抗渗性能,更为绕坝渗流提供通道,甚至会在水压力作用下诱发水利水电工程渗透破坏,危及工程长期运行安全^[2]。

1.3 荷载过载所致的受力裂缝

在水利水电工程的施工期或运行期因荷载作用超过混凝土抗拉强度而产生的结构性损伤便是受力裂缝。这种受力裂缝是由于水压力、土压力、结构自重及温度荷载共同作用于水利水电工程,导致其实际荷载超过设计预期而发生的不利变化。受力裂缝的显著特征是走向垂直于主拉应力方向,且在受拉区表面开口较宽,向内部逐渐尖灭,缝面较为粗糙。出现这种受力裂缝也标志着水利水电工程的混凝土结构进入弹塑性工作阶段,会随时间不断折减构件刚度,改变变形特性,甚至在高水头作用下发展为渗透通道,增大渗流量,严重时威胁建筑物整体稳定。

作者简介:元霖(1990-),男,本科,研究方向:水利水电工程。

1.4 材料配比所致的塑性裂缝

在水利水电工程施工中,若浇筑后初凝前的材料配比不当或养护不到位,表面失水过快,都会导致出现塑性裂缝^[3]。这种塑性裂缝一般呈不规则网状或不连续短细纹,表现为沿深度方向缝宽迅速衰减,一般限于表层数厘米范围。这种塑性裂缝多发于水利水电工程中的大面积薄板结构、护坡及溢流面等部位,虽不会直接威胁水利水电工程的结构承载力,但会为释放后期硬化过程中的收缩应力提供缺陷,并在温湿度变化作用下进一步扩展,成为贯穿性裂缝的诱发源。

2 水利水电工程中的混凝土裂缝防治技术

2.1 骑缝灌浆法

骑缝灌浆法是处理水利水电工程中混凝土裂缝的有效施工技术,主要沿工程中的混凝土裂缝走向布置灌浆孔,进而压入具有流动性的灌浆材料,以填充孔隙,恢复结构整体性,主要适用于修复裂缝宽度较大、走向较为规则且缝内无充填物的裂缝。一般情况下,应用骑缝灌浆法多根据裂缝宽度、环境条件及结构受力要求选择环氧树脂、聚氨酯或水泥基浆液等灌浆材料。其中结构强度要求较高的部位多使用黏结强度高、收缩率低的环氧树脂类材料;处理潮湿或有渗水的裂缝则多应用具有遇水膨胀特性的聚氨酯材料;至于填充大宽度裂缝,则更多的是低成本水泥基浆液^[4]。在骑缝灌浆施工过程中,施工人员要先使用裂缝测宽仪、超声波检测仪等设备精准测定混凝土的裂缝走向、宽度、深度及分布范围,以明确灌浆孔布置方案,并清理裂缝表面的浮灰、油污及疏松混凝土,保证后续灌注的封缝材料能够牢固黏结基面。在修复宽度较大且延伸较长的裂缝时,沿裂缝走向每隔 30~50 厘米布置 20~30 毫米孔径的钻孔,且采用清水冲洗钻孔内部,清除孔内岩屑与粉尘,保证灌浆通道畅通。随后,施工人员沿裂缝表面涂刷宽度 5~10 厘米的环氧胶泥,形成封闭带,防止后续灌浆出现浆液外渗现象。在此基础上,施工人员按照由低向高、由一端向另一端依次推进的原则进行灌浆作业,根据裂缝宽度和结构受力状态确定灌浆压力,控制在 0.2~0.5 兆帕范围,且利用专用灌浆泵经注浆管将配制好的浆液压入裂缝,压力平稳缓慢,避免压力突变导致的结构损伤。在整个灌浆过程中,施工人员还要密切观察相邻孔出浆情况,在邻孔出现纯浆液且出浆浓度与注入浆液一致时,关闭邻孔阀门,持续压注直至达到设计压力,稳定 5~10 分钟。若裂缝过宽,施工人员还要采用间歇灌浆方式,在裂缝空间充分填充浆液,且在结束灌浆后,及时清洗灌浆设备,防止浆液固化堵塞设备。

2.2 钻孔灌浆法

钻孔灌浆法主要应用于处理水利水电工程中的混凝土深层裂缝与贯穿性裂缝,会在裂缝两侧或沿裂缝带布置钻孔,穿透裂缝所在区域,经钻孔在裂缝内部及周边微细孔隙中压入灌浆材料,实现充填封闭裂缝。该技术与骑缝灌浆法区别在于,不依赖裂缝表面开口,而是人工钻孔建立灌浆路径,适用于裂缝面闭合、缝内充填物较多或裂缝走向复杂的工况,尤其适用于修补深层隐蔽裂缝。选择灌浆材料时,施工人员需综合考虑需要修补的裂缝宽度、渗流状态及结构受力要求,常用超细水泥浆液、改性环氧树脂灌浆材料及聚氨酯类化学浆液等灌浆材料进行修补。在施工过程中,施工人员要采用梅花形或方格状布置钻孔,并根据浆液的有效扩散半径明确孔距的具体数值,一般在 1.0~2.0 米范围,且适当加密裂缝发育密集区的钻孔数量。钻孔深度需穿透裂缝,进入下部完整混凝土 0.5~1.0 米。钻孔直径多为 50~75 毫米,便于钻孔冲洗和压水试验操作。钻孔施工需由施工人员选择金刚石钻头或硬质合金钻头钻进,控制钻进过程中的钻压与转速,避免过度扰动孔壁。在此基础上,施工人员还要采用气水混合流冲洗方法,控制冲洗压力在设计灌浆压力的 70%~80%,循环冲洗钻孔,清除孔内的岩屑、泥皮等,直至回水清澈为止。随后,以 3~5 米为分段长度,划分钻孔为若干灌浆段,适当缩短裂缝发育段的分段长度,保证灌浆效果。之后,施工人员要采用孔内循环灌浆或纯压式灌浆方式进行灌浆作业,依照裂缝深度、结构厚度及混凝土强度综合确定灌浆压力,一般为 0.2~0.3 兆帕,可适当提高深层裂缝灌浆压力。同时,按照自上而下分段灌浆或自下而上分段灌浆的顺序进行灌浆,先是灌注深层段,再逐段上升至表层,监测灌浆压力、注入率,只有在注入率逐渐减小、压力稳定上升时,才表明正有效填充裂缝。另外,施工人员还需在灌注完成后,检查灌浆情况,及时补孔复灌尚存在空隙的部位,直至达到设计标准。在水利水电工程裂缝处理中,这种钻孔灌浆法具有适应性强、处理深度大等优点,适用于加固大型水工建筑物的深层裂缝。

2.3 开槽填补法

开槽填补法是一项传统而有效的施工技术,主要用于处理水利水电工程中混凝土表面的裂缝及局部破损。一般由施工人员沿裂缝走向人工开凿出一定深度的槽口,清除缝内杂物,填充具有黏结性、密实性的修补材料,恢复结构表面平整度。该技术尤其适用于

水平缝或缓倾角裂缝,以及缝口破碎、充填物较多的部位,有助于显著提高水利水电工程中的裂缝封闭可靠性。该施工技术多根据不同环境有针对性地选择预拌砂浆、环氧砂、聚合物改性水泥砂浆以及纤维增强砂浆等填充材料。在施工过程中,施工人员会根据前期的勘察结果明确开槽几何参数,通常涉及槽口断面形状为U形或V形,其中U形槽适用于宽度较大裂缝,能够增加填充材料与槽壁的黏结面积,提高受力条件;V形槽则适用于宽度较小裂缝,开槽工作量小,便于填充密实。开槽时,施工人员一般控制槽深在3~6厘米,以完全清除缝口劣化层、露出新鲜混凝土为准。槽宽则为裂缝宽度的5~10倍,最小不小于2厘米^[5]。开槽施工与基面处理时,施工人员还要结合机械切割与人工凿除两种方法,先使用手持切割机或角磨机沿裂缝两侧切割槽口边界线,随后应用电镐或手工钢钎分层凿除槽内混凝土,防止扰动槽壁及槽底基体,减少产生新微细裂纹的可能。在此基础上,施工人员还需凿毛处理槽底,使其形成粗糙面,增加与填补材料的机械咬合力。针对水利水电工程中的潮湿环境,施工人员需在填补前进行干燥处理,必要时安装导流管临时引排渗水,待填充材料初凝后封闭导流孔。具体地,施工人员要按水泥与砂子1:2至1:3的重量比配制预缩砂浆,加入适量水拌和至手握成团、手松即散的干硬状态,堆放预缩30~60分钟,使砂浆体积趋于稳定。之后,分层填筑,充分捣实,控制每层厚度在1~2厘米,且第一层填补材料略高于槽底,使用木槌或捣棒反复插捣密实,排出气泡,使材料充分接触槽底与槽壁,最后一层还要注意表面略高于原混凝土面,保证填补材料平顺衔接两侧原混凝土。填筑完成后,施工人员还要压光或拉毛处理混凝土表面,不得存在错台或凹陷。

2.4 粘贴碳纤维布法

粘贴碳纤维布法主要是采用高性能环氧树脂黏结剂,在混凝土结构受拉区或裂缝分布区域粘贴碳纤维复合材料布,以形成新的受力复合层,进而利用碳纤维材料的高抗拉强度分担混凝土结构所承受的拉应力,限制裂缝进一步扩展。该技术适用于补强加固水利水电工程的受力裂缝,尤其适用于修补水工建筑物中梁板结构、闸墩、溢流面及压力管道等需提高承载力的部位。碳纤维布具有轻质高强、耐腐蚀等突出优点,其抗拉强度是普通钢材十倍以上,但重量仅为钢材五分之一,能够良好适应水利工程的潮湿环境,进而有效抑制裂缝发展,改善结构受力性能,延长建筑物服役寿命。在施工过程中,为保证碳纤维布有效黏结混

凝土,施工人员需要使用角磨机或喷砂设备清除裂缝的浮浆、油污及碳化层,露出坚实新鲜的基面,实现基面处理与找平,并采用高压空气吹扫表面粉尘,再使用丙酮或专用清洗剂擦拭脱脂,确保基面干燥洁净。针对水利水电工程中的潮湿环境混凝土表面,施工人员需进行干燥处理,并先采用灌浆法或开槽填补法封闭处理裂缝,再粘贴碳纤维布,避免荷载作用下裂缝继续变形导致撕裂碳纤维布。随后,施工人员裁剪与浸渍碳纤维布,先采用专用剪刀或刀具,按照结构尺寸裁剪碳纤维布,且要求保证搭接长度高于15厘米。浸渍作业中施工人员可采用现场湿贴法或预浸渍法,其中现场湿贴法是在找平层表面涂刷浸渍树脂,然后粘贴碳纤维布于树脂上,利用滚筒滚压保证树脂充分浸润纤维布;预浸渍法则是预先在浸渍树脂中浸泡碳纤维布,待充分浸润纤维后取出粘贴于结构表面。多层粘贴时,施工人员还应当待第一层树脂指触干燥后再涂刷第二层浸渍树脂,层间滚压密实,保证层间结合良好,且在粘贴转角部位时,平滑过渡碳纤维布,避免折角过大弯折损伤纤维。

3 结束语

在水利水电工程中,防治混凝土裂缝不只是一个技术问题,更是对工程耐久性的深层考量。为确保达到有效控制混凝土裂缝的目的,应该以分析混凝土裂缝现象与成因为出发点,深入探究如何控制混凝土裂缝发生,进而提供针对性的应对措施,保障水利工程质量。同时,重视管控施工全过程质量,推动优化防治材料、工艺与管理,以降低源头发生裂缝的概率,全面提升水利水电工程的可持续运行能力。未来,裂缝处理将更趋精准,进而真正筑牢水利工程的稳定根基,使技术服务于工程的长治久安。

参考文献:

- [1] 俞晓东,张旭,曹正.探析水利施工中混凝土裂缝产生的原因及防治措施[J].价值工程,2026,45(09):15-18.
- [2] 陈书杰.探究水利工程施工中控制混凝土裂缝技术[J].中国房地产业,2026(03):190-193.
- [3] 李佳璇.水利建筑施工中大体积混凝土裂缝防治技术分析[J].住宅与房地产,2026(02):122-124.
- [4] 雷延刚.混凝土温控防裂处理技术在水利施工中的应用研究[J].水上安全,2026(01):160-162.
- [5] 沈凯,马飞燕,李军军,等.混凝土裂缝控制施工技术在水利工程中的应用研究[J].水上安全,2026(01):169-171.