

水利工程混凝土裂缝成因及防治措施

魏 力

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 混凝土是水利工程核心建材,其结构完整性关乎工程安全性、耐久性与防渗性。但混凝土裂缝问题普遍且成因复杂,是制约水利工程质量的关键。本文剖析了水利工程混凝土裂缝形成机理,主要分为四类:水化热致温度应力裂缝、材料物理化学变化致收缩裂缝、外部荷载或地基不均匀沉降致结构性裂缝、施工工艺不当致施工期裂缝。针对成因,本文提出贯穿设计、材料、施工及养护全过程的防治策略:设计阶段优化结构分缝分块、合理配置钢筋;材料层面应用低热水泥、优质掺合料和高效减水剂,优化配合比;施工环节采用大体积混凝土温控防裂技术,如预冷骨料、通水冷却等;后期维护采用表面封闭、压力灌浆等修补方法。研究表明,多维度、全生命周期协同控制可有效预防治理裂缝,保障水利工程。

关键词: 水利工程;混凝土裂缝;温度应力;防治措施

引言

水利工程关乎防洪、灌溉等多重功能,混凝土是其构筑主力。但作为非均质脆性复合材料,混凝土在硬化及服役中易受内外部因素影响产生裂缝。这些裂缝影响工程外观,更削弱结构整体性、承载能力与抗渗性。在水利工程里,裂缝危害极大,贯穿结构的裂缝会导致有压水流渗透,造成水资源浪费,甚至引发渗透破坏,危及重要构筑物稳定;还为侵蚀性介质和二氧化碳提供通道,加速钢筋锈蚀与混凝土碳化,缩短工程寿命。工程界对混凝土裂缝的认识已从“杜绝”转为“可控”,完全避免裂缝不现实,但可科学控制。因此,探究水利工程混凝土裂缝成因并制定防治措施意义重大。本文梳理裂缝成因,构建全周期防控技术体系,为提升水利工程建设质量提供参考。

1 混凝土裂缝的主要成因分析

1.1 温度应力裂缝

(1) 水化热积聚:在大体积混凝土浇筑后,内部水泥水化反应剧烈,短时间内产生大量热量。由于混凝土导热性差,热量难以迅速散发,导致内部温度急剧升高(可达50-70℃甚至更高),而表面则因与外界环境接触而散热较快,形成显著的内外温差。(2) 温度应力形成:这种不均匀的温度场使得混凝土内部膨胀而外部收缩,相互约束下便在混凝土内部产生了拉应力。当此拉应力超过混凝土当时的抗拉强度极限时,就会在表面或内部产生裂缝。早期(浇筑后几天内)多表现为表面裂缝,后期(数周至数月)则可能因整体降温收缩受基础约束而产生深层甚至贯穿性裂缝。

1.2 收缩变形裂缝

(1) 塑性收缩裂缝:发生在混凝土终凝前的塑性阶段。此时,若环境温度高、风速大、湿度低,混凝土表面水分蒸发速度远大于内部泌水上升的速度,导致表层急剧失水收缩。而下层混凝土仍处于塑性状态,无法对表层收缩提供足够的约束反力,从而在表面形成不规则的、长短不一的龟裂状裂缝。(2) 干燥收缩裂缝:混凝土硬化后,在干燥环境中,内部吸附水和毛细孔水会不断蒸发散失,引起体积收缩。这种收缩受到内部骨料的约束以及外部结构(如地基、相邻构件)的限制,会在混凝土内部产生拉应力,最终导致开裂。干燥收缩是一个长期过程,可持续数年^[1]。(3) 自生收缩:主要发生在低水胶比的高性能混凝土中。由于水泥水化消耗了拌合水,导致毛细孔负压增大,从而引起混凝土自身体积的减小。虽然绝对值不大,但在早期强度较低时也可能诱发微裂缝。

1.3 结构性裂缝

(1) 荷载作用裂缝:当水工结构承受的静荷载(如水压力、土压力、自重)或动荷载(如地震力、波浪冲击力)超过其设计承载能力时,会在受拉区或剪切区产生裂缝。例如,梁、板等受弯构件底部的横向裂缝,柱子的纵向劈裂裂缝等。(2) 地基不均匀沉降裂缝:水利工程常建于复杂的地质条件之上。如果地基土质软弱、压缩性差异大,或处理不当,会导致建筑物各部分产生不均匀沉降。这种差异沉降会使上部结构产生附加内力,当其超过混凝土的抗拉强度时,便会在薄弱部位(如沉降缝两侧、结构突变处)开裂。(3) 约束应力裂缝:混凝土结构在温度变化或收缩变形时,若其变形受到外部(如坚硬地基)或内部(如不同龄期混凝土间的

约束)的强力限制,也会产生很大的约束拉应力,导致开裂。

1.4 施工工艺裂缝

(1)施工冷缝:在连续浇筑大体积混凝土时,若层间间隔时间过长,先浇筑的混凝土已初凝,后浇筑的混凝土与其无法形成整体,两者之间便形成了薄弱的结合面,即冷缝。这不仅降低了结构的整体性,也极易成为渗漏通道。(2)模板与支架问题:模板刚度不足、支撑不牢或过早拆模,都可能导致混凝土在未达到足够强度前发生变形或开裂。(3)振捣不当:欠振会导致混凝土内部存在空洞、蜂窝,形成应力集中点;过振则可能造成离析,使砂浆与骨料分离,同样削弱局部强度。(4)养护不足:混凝土早期(特别是前7天)是强度发展的关键期,也是防止塑性收缩和早期干缩的关键期。若未能及时、充分地进行保湿养护,极易产生大量表面微裂缝。

2 混凝土裂缝的综合防治措施

2.1 设计阶段的预防措施

2.1.1 合理分缝分块以释放约束应力

对于体量庞大的水工混凝土结构设计的核心思想在于“化整为零,主动引导”。通过科学地设置永久伸缩缝和临时施工诱导缝,可以将一个巨大的、高约束的整体结构,巧妙地分割成若干个尺寸合理、约束较小的独立单元。永久缝通常根据结构形式、地基条件和温度变化幅度来确定其间距,其位置应避开应力集中区域,并配备可靠的止水系统。临时诱导缝则是在大块体内人为设置的薄弱面,其目的是引导混凝土在预定位置开裂,从而避免在其他关键部位出现无序的、有害的裂缝。

2.1.2 优化结构配筋以控制裂缝发展

在结构的易裂区域,如大面积底板的表面、高耸墙体的顶部、孔洞周边以及截面突变的转角处,应配置足够数量和适当间距的温度-收缩钢筋。这些细而密的钢筋网,其主要功能并非承担主要荷载,而是在混凝土内部形成一个强有力的约束网络^[2]。当微裂缝萌生时,钢筋能够跨越裂缝传递拉力,有效地限制裂缝的进一步张开和延伸,将其宽度控制在规范允许的限值之内(通常为0.2-0.3mm),从而保证结构的耐久性和防水性能。

2.1.3 改善边界约束条件以降低拉应力

混凝土结构设计时应着力于“减少约束,允许变形”。对于建在坚硬岩石地基上的重力坝或闸墩,可以在基础面铺设一层沥青油毡、塑料薄膜或喷涂沥青涂层,形成一个滑动界面。这样,当上部混凝土因温降或干缩而试图缩短时,能够相对自由地在基础上滑动,从而极大地减小了由基础约束产生的底部拉应力。对于分

期浇筑的大型结构,新老混凝土之间的约束也是一个重要问题。可以通过在施工缝处设置键槽、涂刷界面剂或预留插筋等方式,在保证结构整体传力的同时,适度释放部分收缩约束。通过这些精心的细节设计,可以从源头上削弱导致开裂的约束力。

2.2 材料与配合比优化

2.2.1 优选低热水泥以削减水化热源

在满足工程强度等级和耐久性要求的前提下,应优先选用发热量低、放热速率平缓的水泥品种。中热硅酸盐水泥和低热矿渣硅酸盐水泥因其熟料矿物组成中C3A和C3S含量较低,能够在保证后期强度的同时,显著降低早期(3d、7d)的水化放热量。对于特大体积的混凝土结构,甚至可以考虑使用专为大坝工程研制的低热硅酸盐水泥。通过从“源头”上削减热量的产生,可以从根本上缓解内外温差过大的问题,为后续的温控措施创造有利条件。

2.2.2 掺加优质矿物掺合料以改善综合性能

粉煤灰和粒化高炉矿渣粉(GGBS)是两种最常用的掺合料。它们不仅能以“滚珠效应”改善混凝土的和易性,更重要的是,它们能替代相当一部分水泥(通常总量可达30%-60%),从而直接减少了总的水化热。同时,它们的火山灰反应或潜在水硬性反应是一个缓慢而持久的过程,有助于细化混凝土的微观孔隙结构,提高其后期密实度和抗渗性。这种致密的结构反过来又能减缓内部水分的散失,抑制干燥收缩^[3]。此外,掺合料的加入还能延缓混凝土的凝结时间,为大体积混凝土的浇筑和散热争取宝贵的时间窗口。

2.2.3 应用高效减水剂以实现低水胶比

降低混凝土的用水量是控制收缩裂缝最直接、最有效的方法。聚羧酸系高性能减水剂的出现,为此提供了强大的技术支持。它能在极低的掺量下,赋予混凝土极高的流动性,使得工程师可以在不牺牲工作性的前提下,将水胶比(W/B)降至0.40甚至更低。低水胶比意味着硬化后混凝土内部可供蒸发的自由水大大减少,从而从根本上抑制了干燥收缩的驱动力。同时,低水胶比也意味着更高的强度和更低的渗透性,这对于水利工程的防渗要求至关重要。可以说,高效减水剂是实现高性能、低收缩、高抗裂混凝土不可或缺的关键组分。

2.3 施工过程中的温控与防裂技术

2.3.1 降低混凝土入仓温度以控制初始温升

可以通过冷水喷淋、鼓风冷却或浸水冷却等方式对堆放在料仓中的粗、细骨料进行预冷。更为有效的方法是在拌合时用片冰或制冷水(4-8℃)替代部分拌合用

水,利用冰的融化潜热来吸收大量的热量。此外,优化施工组织,尽量安排在夜间或清晨气温较低时进行混凝土浇筑,也能有效避免因环境高温而导致的入仓温度过高。这些措施共同作用,可以将混凝土的出机口温度控制在25℃甚至更低,为后续的温控奠定了坚实基础。

2.3.2 实施内部通水冷却以主动调控内部温度

在混凝土浇筑前,按照设计图纸在仓号内预埋蛇形布置的冷却水管网络,通常采用高密度聚乙烯(HDPE)管。混凝土浇筑完毕后,立即开始向管道内通入低温水(可以是经过制冷的河水或深井水)。通过循环流动的冷水,可以持续不断地将混凝土内部积聚的热量带走^[4]。整个通水冷却过程需要根据埋在混凝土内部的温度传感器所反馈的实时数据进行精细化管理。初期通大流量冷水以快速削峰,中期调整流量以控制降温速率(一般不超过1-2℃/d),后期则可能需要通入与环境温度相近的水以防止“倒温差”裂缝。这种“内降外保”的策略,是确保大体积混凝土内部温度场均匀、温差可控的核心技术。

2.3.3 强化表面保温与保湿养护以平衡内外温差

在混凝土初凝后,必须立即在其表面覆盖保温材料,如专用的保温被、草帘或泡沫塑料板。保温层的厚度需根据当时的环境温度和预计的内外温差进行计算确定,其目标是将内外温差严格控制在25℃以内。与此同时,保湿养护同等重要。终凝后,应立即开始洒水养护,或覆盖吸水性强的土工布、麻袋片并保持其始终处于湿润状态。充足的水分不仅能防止塑性收缩和早期干缩裂缝的产生,还能保证水泥水化反应的持续进行,促进强度的正常发展。这一系列看似简单的覆盖和洒水工作,实则是连接材料潜能与结构性能的最后一道、也是最关键的桥梁。

2.4 裂缝的检测与修补技术

2.4.1 裂缝的精准检测与科学评估

首先,需要通过目视检查和裂缝宽度观测仪,记录裂缝的位置、走向、长度和表面宽度。但对于水利工程而言,裂缝的深度和内部形态更为关键。此时,超声波平测法或钻孔取芯法便派上了用场。超声波法通过分析声波在混凝土中穿越裂缝时的传播时间、波幅衰减等参数,可以无损地推断裂缝的深度。钻孔取芯则能提供最直观、最可靠的证据,可以直接观察裂缝在芯样中的贯穿情况,并可用于实验室分析。在获取了完整的裂缝信息后,还需结合结构受力状态、环境条件等因素,科学

评估该裂缝是属于无害的表面微裂,还是会影响结构安全或防渗功能的有害裂缝,从而为选择合适的修补方案提供依据。

2.4.2 表面封闭与压力灌浆等修补方法

对于宽度小于0.2mm、深度较浅且稳定的表面微裂缝,通常采用表面封闭法。这种方法操作简便,成本低廉。常用材料包括环氧树脂胶液、聚合物改性水泥基渗透结晶型涂料或专用的柔性裂缝封闭胶。施工时,先将裂缝表面清理干净,然后用刮刀或刷子将修补材料均匀地涂覆在裂缝区域,形成一层连续、致密的保护膜,以阻止水分和侵蚀性介质的侵入,恢复混凝土表面的完整性和耐久性。而对于宽度较大、深度较深、有渗漏水现象或影响结构整体性的裂缝,则必须采用更为彻底的压力灌浆法。该方法首先在裂缝两侧钻斜孔,埋入注浆嘴,并对裂缝表面进行封缝处理。然后,利用高压注浆泵,将低粘度、高渗透性的化学浆液(如环氧树脂用于补强,聚氨酯用于堵漏)或超细水泥浆液压入裂缝深处。浆液在压力作用下能充分填充裂缝的各个角落,并与混凝土壁面牢固粘结,从而达到恢复结构整体性、提高承载力和彻底止水的多重目的。

3 结语

水利工程混凝土裂缝由材料特性、环境、力学及施工等因素交织导致,防治是涉及设计、材料、施工、运维的系统工程。本文深入剖析裂缝成因,提出“设计优化先导、材料改良基础、施工温控核心、后期修补保障”的全链条防治策略。实践表明,工程全生命周期坚持精细化管理与科学决策,将防裂意识贯穿各环节,才能有效控制裂缝,发挥混凝土性能优势。未来,随着智能温控、自感知/自修复混凝土等新技术研发应用,水利工程混凝土结构抗裂性与长期服役安全性将进一步提升,为水安全和经济社会发展筑牢根基。

参考文献

- [1]常旭东,何鑫,孙西文.水利工程混凝土裂缝成因机理及控制措施[J].水泥,2025,(09):116-119.
- [2]贺关清.水利工程中混凝土裂缝产生原因及防治措施研究[J].现代工程科技,2025,4(13):157-160.
- [3]闫娜娜.水利工程中混凝土裂缝产生的原因及防治措施[J].中国水泥,2025,(05):76-78.
- [4]侯荣丽.水利工程混凝土裂缝产生原因及防治措施研究[J].水上安全,2025,(03):22-24.