

水利工程中混凝土裂缝成因及预防设计措施探讨

张晶晶

莱阳市沐浴水库管理中心 山东 烟台 265200

摘要：混凝土开裂是水利工程建设与运维阶段较为常见的结构病害，会直接影响水工构筑物的完整性与服役稳定性。本文结合水工混凝土的服役特性，从材料性能、结构设计、环境作用及形变约束多个维度，系统梳理水利工程混凝土产生裂缝的各类诱因，依托各类开裂机理，针对性优化原材料配比、结构构造、配筋体系、环境防护及形变控制等多方面设计方案，形成适配水利复杂工况的抗裂设计体系，可为水利工程混凝土结构抗裂设计与质量管控提供合理参考。

关键词：水利工程；混凝土；裂缝成因；结构设计；抗裂措施

引言：混凝土凭借优良的结构性能，广泛应用于各类水利基础设施建设中，是水工构筑物的核心用材。复杂的水文、地质与气候环境，加之结构设计、材料配置等方面的设计短板，极易让混凝土结构产生不同类型的裂缝病害。裂缝的持续产生与扩展，会破坏结构整体性，降低工程耐久性能，影响水利设施安全稳定运行。因此，深入剖析水工混凝土裂缝的各类形成机制，完善针对性的抗裂设计方案，对提升水利工程结构质量具有重要意义。

1 水利工程混凝土材料自身特性引发的裂缝成因

1.1 胶凝材料性能引发的裂缝诱因

胶凝材料支撑着混凝土的成型与硬化，材料本身性能不稳，就容易让混凝土结构产生裂缝。水泥发生水化反应时会释放大量热能，使混凝土内部温度持续升高。待硬化阶段温度慢慢降低，结构会随之出现收缩，进而产生不均匀的形变应力^[1]。水泥细度过高、内部矿物成分配比失调，都会让水化反应变得更加剧烈。部分胶凝材料安定性不达标，硬化成型后会出现不规则的体积形变，破坏混凝土整体结构的完整状态。这类内部形变产生的应力难以自行消散，会在结构薄弱位置慢慢延展，最终形成表层或贯穿性裂缝。

1.2 骨料级配与材质缺陷产生的裂缝诱因

骨料在混凝土中占比极大，材质优劣和颗粒级配情况，直接影响混凝土结构的整体稳定。粗细骨料配比混乱、颗粒组合不合理，会让混凝土内部出现大量空洞，整体密实度难以达到成型标准。结构内部致密性不足，在受力和形变过程中很容易产生细微裂隙。部分骨料本身质地松散、硬度偏低，自带天然微孔和结构缺陷。这类骨料稳定性较差，承压和抗形变能力薄弱，无法均匀分摊混凝土内部应力。内外作用力会持续集中在结构缺

陷位置，让细微裂隙不断扩张，最终形成明显裂缝，削弱混凝土整体抗裂能力。

1.3 拌合用水及外加剂适配性带来的裂缝诱因

拌合用水的水质状况会直接影响混凝土成型质量。水中杂质、盐分含量过高，会干扰水泥水化反应的正常推进。杂质会与胶凝材料发生化学反应，生成性质不稳定的水化产物，打乱混凝土正常的硬化节奏，改变原有结构特性。外加剂选用品类不当、掺加方式不规范，都会破坏混凝土成型的稳定体系。各类外加剂的作用效果各不相同，选型出错会造成混凝土凝结速度异常，出现快速凝结或是长期缓凝的问题。混凝土硬化后会产生无规律的体积变动，内部应力分布紊乱，逐步滋生各类裂缝。

1.4 混凝土配合比设计不合理的裂缝诱因

配合比设计是把控混凝土性能的核心环节，不合理的参数设计会从源头造成开裂隐患。水胶比数值偏大时，混凝土内部会留存大量游离水分。水分完全蒸发后，结构内部会形成密集的毛细孔隙，整体收缩范围大幅增加，抗裂性能随之降低。砂率取值偏差、各类原料掺配比例不科学，会打乱混凝土原料体系的平衡状态。结构骨架成型均匀性不足，硬化收缩程度存在差异，内部会不断积攒残余应力。当应力累积超出混凝土抗拉承受能力，结构就会出现破损，形成各类结构性裂缝。

2 水利工程结构设计因素诱发的裂缝成因

2.1 结构形体设计不合理产生的裂缝隐患

水利工程混凝土的整体受力形态与变形规律，很大程度上取决于结构形体的设计方案。不少工程构件外形设计繁琐杂乱，截面尺寸存在突然拓宽或收窄的情况。这种截面突变会造成局部应力聚集，让小范围混凝土承受远超常态的拉应力。构件转角、凹凸衔接等关键部位没有做平缓过渡处理，造型设计生硬突兀，混凝土硬化

成型产生变形时,各区域变形程度无法保持统一。不合理的形体构造会打乱应力传导的正常路径,应力无法均匀分散到构件整体当中^[2]。局部区域长期处于高应力状态,一旦超出混凝土本身的抗拉极限,就会滋生稳定且持续扩展的结构裂缝。

2.2 结构受力体系设计缺陷引发的裂缝问题

稳定的受力体系是混凝土结构安全承载的重要基础。部分结构设计方案考量不够全面,没有充分兼顾构件实际的承载工况,应力传导的整体规划存在明显短板。构件各个区域的受力分配不够均衡,部分区域需要承担过大的荷载压力,其余区域的受力性能却处于闲置状态。长期不均衡的受力状态,会让结构不同部位产生差异化变形。在外部荷载的持续作用下,结构内部会积攒大量集中应力。应力聚集的位置会率先出现细微裂缝,这些裂缝会随着外力持续作用不断延展、扩大。受力体系存在的设计缺陷会持续加剧结构变形问题,让裂缝病害反复发生、难以控制。

2.3 伸缩缝、沉降缝设计布设不当的裂缝诱因

伸缩缝与沉降缝的核心作用,是化解温度变化、地基沉降带来的结构变形影响,规避刚性形变产生的结构损伤。缝隙布设间距过大时,混凝土结构预留的变形空间不足,温度波动和地基沉降引发的形变无法有效释放。缝隙宽度设计不符合构件实际形变需求,结构发生伸缩、沉降变形时,就会出现硬性挤压或强行拉伸的情况。缝隙布设点位缺乏科学规划,没有精准对应结构变形最频繁、最明显的关键截面。形变产生的内部应力无法通过预留缝隙释放,只能依靠混凝土结构自身消化承受。混凝土抗拉性能存在固有局限,应力长期堆积无法消散,最终就会形成贯通性的结构裂缝。

2.4 配筋设计不合理导致的结构裂缝诱因

钢筋能够有效束缚混凝土的变形幅度,大幅提升结构整体的抗拉和抗裂能力。配筋总量不足的情况下,钢筋无法分担足够的拉应力,大部分变形荷载都会直接作用在混凝土基体上。钢筋排布间距过于宽松,对表层混凝土和局部构件的约束效果会大幅弱化,难以抑制细微变形的产生。部分区域钢筋排布过于密集,还会干扰混凝土浇筑施工质量,导致构件内部浇筑不密实,留存细小孔隙缺陷。混凝土保护层厚度设计不规范也会引发问题,保护层过厚会降低表层结构的抗裂水平,保护层过薄则无法有效防护钢筋。各类不合理的配筋设计都会削弱结构抗变形性能,让混凝土内外逐步产生各类裂缝病害。

3 水利工程环境与变形作用引发的裂缝成因

3.1 温度变化作用产生的温度裂缝诱因

水利工程混凝土结构长期暴露在露天环境中,会持续受到外界温度波动的影响。外界昼夜温差大于15℃、季节温差超过30℃时,混凝土表层温度会快速发生变化,内部温度却保持相对稳定。内外温差达到20℃以上时,结构表层和内部会产生不一致的伸缩变形。表层变形会受到内部硬化混凝土的限制,结构内部由此产生拉应力^[3]。日常昼夜温差、四季气温更替,都会反复触发这类温度形变反应。拉应力积累到一定程度,就会超出混凝土自身抗拉极限,在结构表面产生不规则的温度裂缝,裂缝会随温度循环变化逐步加深加宽。

3.2 干湿交替作用引发的收缩裂缝诱因

水工混凝土结构长期接触水体,浸泡、风干的状态反复更迭,形成持续的干湿交替环境。结构处于浸水状态时,内部孔隙会充分吸纳水分,整体体积会出现轻微膨胀。环境转为干燥状态后,孔隙水分快速流失,结构会出现明显的收缩形变。反复的膨胀与收缩会打乱混凝土内部结构的稳定状态。表层材料的干湿变化速度更快,变形幅度远大于结构内部。内外变形差异会持续产生疲劳应力,不断损伤混凝土基体结构。长期循环作用下,结构表层会滋生大量细微收缩裂缝,逐步发展为可见的结构性裂缝。

3.3 地基变形与约束作用诱发的裂缝问题

混凝土结构成型硬化后,会与地基形成稳固的约束关系。地基土体出现不均匀沉降、轻微位移时,会对上部混凝土结构产生拉扯与挤压作用。结构底部受到地基的硬性约束,无法自由开展沉降变形,上部结构的形变趋势会受到明显限制。地基形变产生的作用力会持续传导至混凝土整体,结构内部不断积攒形变应力。地基形变幅度越大,结构受到的约束作用力越强。应力无法正常释放,会在构件薄弱位置集中释放,最终诱发贯穿式或局部结构性裂缝。

3.4 水体侵蚀、风化等环境作用的裂缝诱因

水利工程常年处于复杂户外水环境中,水体侵蚀和自然风化会持续损伤混凝土结构性能。水体中含有的各类腐蚀性介质,会慢慢渗入混凝土内部,和胶凝材料产物发生化学反应。反应会生成体积不稳定的新生物质,破坏混凝土内部密实结构。长期自然风化会造成表层材料老化、酥松,整体强度和抗变形能力持续下降。结构表层防护性能衰退后,内部基体更容易受到外力形变影响。结构整体稳定性持续降低,微小形变即可引发开裂问题,各类环境损伤会逐步转化为永久性结构裂缝。

4 基于裂缝成因的混凝土工程预防设计措施

4.1 优化混凝土原材料与配合比的设计措施

原材料质量把控与配合比优化是抑制混凝土开裂的基础设计手段。结合水利工程水环境特性,筛选水化热较低、安定性稳定的胶凝材料,从源头削弱温度形变带来的开裂隐患^[4]。优先选用质地坚硬、级配连续的骨料,减少内部孔隙缺陷,提升混凝土基体密实度与整体稳定性。根据工程服役环境调整拌合水质标准,杜绝杂质与有害盐分影响硬化质量。配合比设计摒弃固定参数模式,结合构件受力特点与环境条件优化水胶比、砂率等核心参数。合理调控各类掺料比例,改善混凝土收缩性能,增强基体自身的抗裂基础能力。

4.2 完善水利结构整体与细部构造设计措施

合理的结构构造设计可以有效分散应力,减少形变集中引发的裂缝问题。简化复杂构件的外形设计,平缓处理截面突变位置,弱化局部应力聚集现象。针对构件转角、凹凸衔接等薄弱部位做过渡优化设计,保证结构形变均匀有序。结合水利工程承载特点规划整体结构布局,理顺应力传导路径,让外力与形变应力均匀分布于构件整体。细化各类细部构造设计,补齐结构形体的设计短板,规避形体缺陷引发的形变损伤,提升结构整体的形变适配能力。

4.3 优化结构缝与配筋体系的专项设计措施

结构缝与配筋设计是防控结构性裂缝的关键专项手段。依据工程所在地温度变化、地基沉降特性,科学设定伸缩缝、沉降缝的布设间距与缝隙宽度。精准定位结构形变活跃区域布置缝体结构,充分释放混凝土形变应力,减少刚性约束带来的开裂风险。配筋设计结合构件抗拉需求合理规划配筋总量与排布密度,杜绝配筋不足或排布过密的问题。规范混凝土保护层设计厚度,平衡钢筋防护效果与表层结构抗裂性能。通过精细化配筋设计,强化钢筋对混凝土形变的约束作用,稳固结构受力体系。

4.4 适配复杂水环境的抗裂防护设计措施

针对水利工程特殊的水环境工况,针对性开展抗裂防护设计。选用耐侵蚀、抗风化的防护材料,对混凝土表层进行防护构造设计,阻隔水体腐蚀性介质渗入结构内部。优化表层防护结构的构造形式,延缓混凝土材料

老化酥松的速度,长期维持结构基体的完整状态。结合干湿交替的环境特征强化表层抗渗、抗裂设计,降低反复形变对结构的疲劳损伤,提升混凝土适配复杂水环境的耐久与抗裂性能^[5]。

4.5 优化温度、变形约束的防控设计措施

温度变化与地基约束是诱发水工混凝土裂缝的重要外部因素,针对性的防控设计可以有效消解形变隐患。大体积混凝土构件需要配置完善的温控设计方案,通过调整材料体系、优化结构分层形式,缓解内外温差产生的形变应力。结合地基土质特性优化结构约束方式,弱化地基不均匀沉降对上部结构产生的拉扯、挤压作用。结构设计预留合理的变形空间,降低刚性约束对混凝土自由形变的限制。通过科学的温控手段与约束优化方式,逐步消散结构内部残余应力,减少温变、地基形变等因素带来的结构性裂缝,保障混凝土结构长期稳定服役。

结束语

水利工程混凝土裂缝的形成是材料、设计、环境等多重因素共同作用的结果,各类诱因相互交织,共同引发结构形变开裂问题。通过梳理不同维度的裂缝产生机理,从材料配比、结构构造、配筋布设、环境保护、形变调控等多个层面优化设计方案,能够有效规避水工混凝土开裂隐患。系统化的抗裂设计优化,可有效改善混凝土结构服役状态,强化水利工程结构的整体性与耐久性,保障水工设施长期稳定运行。

参考文献

- [1]池付伟.水工涵闸混凝土结构裂缝成因及预防措施浅析[J].陕西水利,2021(10):268,280.
- [2]朱楠楠,韩雪凝.渠道混凝土衬砌施工中裂缝成因分析及全过程预防控制技术研究[J].水泥,2026(3):139-142.
- [3]苏理河.水利工程混凝土裂缝成因及防治措施探析[J].河南建材,2021(10):102-103.
- [4]陈文锐.水工涵闸混凝土结构裂缝成因及预防措施[J].建筑工程技术与设计,2021(34):1134-1135.
- [5]胡志明,周予扬,马艳君,等.水利施工中混凝土裂缝的防治技术分析[J].建筑工程与设计,2025,4(5):144-146.