

水工建筑物钢筋混凝土裂缝机理及防治探讨

朱宇泽 李 康 张蔚源 关庆圆

淮安市水利勘测设计研究院有限公司 江苏 淮安 223005

摘要：本文探讨了水工建筑物钢筋混凝土裂缝的机理及防治措施，文章首先分类并分析了钢筋混凝土裂缝的基本类型与特征，以及裂缝对结构承载力、渗漏风险、耐久性等方面的影响。接深入阐述了外荷载、温度与收缩、地基变形与约束、钢筋锈蚀膨胀、施工与材料缺陷等导致裂缝形成的主要机理。在此基础上，提出了设计阶段预防措施、材料选择与改进、施工工艺控制、裂缝监测与预警以及裂缝修复与加固技术等防治技术体系。旨在为水工建筑物的设计与施工提供理论依据和技术支持，减少裂缝产生，保障结构安全与耐久性。

关键词：水工建筑物；钢筋混凝土；裂缝机理；防治措施

1 钢筋混凝土裂缝的基本类型与特征

1.1 裂缝的分类

水工建筑物钢筋混凝土裂缝可按产生时间分为施工期裂缝（如塑性收缩裂缝、沉缩裂缝）和运行期裂缝（如温度裂缝、疲劳裂缝）。按成因可分为外荷载裂缝、温度与收缩裂缝、地基变形与约束裂缝、钢筋锈蚀膨胀裂缝及施工与材料缺陷裂缝。其中，施工期裂缝多由浇筑养护不当引发，运行期裂缝则与长期荷载、环境作用相关。

1.2 裂缝的危害性分析

裂缝会导致结构承载力下降，如闸墩贯穿裂缝可使承载能力降低15%以上，裂缝处钢筋应力集中系数可达1.8；同时破坏抗渗性，某灌溉渠道网状裂缝导致渗漏量从 $0.2L/(m \cdot h)$ 增至 $1.5L/(m \cdot h)$ ，3年后碳化深度达50mm；更会加速耐久性劣化，通过裂缝侵入的氯离子、硫酸盐等介质会引发钢筋锈蚀与混凝土劣化，形成恶性循环，显著缩短建筑物寿命^[1]。

2 水工建筑物钢筋混凝土裂缝形成机理

2.1 外荷载作用下的裂缝

外荷载作用是导致水工建筑物钢筋混凝土产生裂缝的重要原因之一，主要包括静荷载和动荷载。静荷载引起的裂缝主要是由于结构承受的永久荷载或可变荷载超过了设计值，或者结构的受力形式不符合设计要求。在静荷载作用下，钢筋混凝土结构内部会产生拉应力、压应力和剪应力等，当拉应力超过混凝土的抗拉强度时，就会出现裂缝。例如，在重力坝的坝体中，由于坝体自重、水压力等静荷载的作用，坝体内部会产生较大的拉应力，当拉应力超过混凝土的抗拉强度时，坝体就会出现竖向或水平向的裂缝。另外，结构的不合理布置也可能导致静荷载分布不均，在局部产生过大的应力，引发

裂缝；动荷载作用下的裂缝主要是由反复变化的荷载引起的，如水锤冲击力、地震荷载、波浪荷载等。动荷载会使结构产生振动和交变应力，在长期的反复作用下，混凝土内部的微裂缝会逐渐扩展和连接，形成宏观裂缝。地震荷载对水工建筑物的影响更为显著，强烈的地震会使结构产生较大的变形和应力，容易在结构的薄弱部位产生裂缝，甚至导致结构的破坏。

2.2 温度与收缩裂缝

温度变化和混凝土收缩是导致水工建筑物钢筋混凝土产生裂缝的常见原因，两者往往相互影响，共同作用。温度裂缝主要是由于混凝土内部与外部的温度差过大，或者结构不同部位之间的温度差异较大引起的。水泥在水化过程中会释放大量的热量，使混凝土内部温度升高，而混凝土表面由于与外界环境接触，温度相对较低，这样就形成了内外温差。设混凝土内部温度为 $T_{内}$ ，表面温度为 $T_{外}$ ，温差 $\Delta T = T_{内} - T_{外}$ 。在温差作用下，混凝土内部会产生膨胀应力，表面会产生收缩应力，当收缩应力超过混凝土的抗拉强度时，就会在混凝土表面产生温度裂缝。对于大体积混凝土结构，如大坝、闸底板等，由于水泥用量大，水化热不易散发，内外温差更大，更容易产生温度裂缝。另外，外界环境温度的剧烈变化也会导致结构产生温度应力，引发裂缝。例如，在寒冷地区的水工建筑物，冬季气温骤降，会使混凝土表面收缩，而内部温度相对较高，产生温度应力，导致表面出现裂缝。收缩裂缝主要包括塑性收缩裂缝、干缩裂缝和自收缩裂缝。塑性收缩裂缝发生在混凝土浇筑后的初凝阶段，此时混凝土还处于塑性状态，由于表面水分蒸发过快，体积收缩，而内部混凝土的约束作用使表面产生拉应力，从而形成裂缝。干缩裂缝则是在混凝土硬化后，由于环境湿度较低，混凝土中的水分不断蒸发，体积收缩受到约束

而产生的裂缝。自收缩裂缝是混凝土在硬化过程中，水泥水化反应消耗水分，导致混凝土内部相对湿度降低，产生自干燥收缩而形成的裂缝。收缩裂缝通常表现为表面的不规则裂缝，有时也会深入混凝土内部^[2]。

2.3 地基变形与约束裂缝

地基变形与约束作用也是导致水工建筑物钢筋混凝土产生裂缝的重要因素。地基不均匀沉降会使水工建筑物产生附加应力，当附加应力超过混凝土的抗拉强度时，就会产生裂缝。由于水工建筑物通常体型较大，基础底面的压力分布不均，或者地基土的性质存在差异，在建筑物自重和外部荷载作用下，地基会发生不均匀沉降。例如，在软土地基上修建的水工建筑物，由于地基土的压缩性较大，容易出现不均匀沉降，导致建筑物的上部结构产生弯曲变形，在结构的薄弱部位，如梁柱交接处、墙身等，产生裂缝；在混凝土浇筑和硬化过程中，结构会由于温度变化和体积收缩而产生变形，如果这种变形受到外部约束（如地基、相邻结构等）或内部约束（如钢筋的约束、混凝土不同部位之间的刚度差异等）的限制，就会产生约束应力，当约束应力超过混凝土的抗拉强度时，就会产生裂缝。

2.4 钢筋锈蚀膨胀裂缝

钢筋锈蚀是导致水工建筑物钢筋混凝土产生膨胀裂缝的主要原因。钢筋在正常情况下会在表面形成一层钝化膜，保护钢筋不被锈蚀。但当混凝土碳化、氯离子侵入等情况发生时，会破坏钢筋表面的钝化膜，使钢筋发生锈蚀。混凝土碳化是指大气中的二氧化碳与混凝土中的水泥水化产物发生反应，降低混凝土的碱性。当碳化深度达到钢筋表面时，钢筋表面的钝化膜被破坏，钢筋开始锈蚀。氯离子具有很强的穿透能力，能够透过混凝土保护层到达钢筋表面，破坏钝化膜，导致钢筋锈蚀。钢筋锈蚀后，生成的铁锈体积会显著膨胀，一般是原钢筋体积的2-4倍，这种膨胀力会挤压周围的混凝土，使混凝土产生裂缝；钢筋锈蚀膨胀裂缝通常沿着钢筋的走向分布，初期表现为细微的裂缝，随着锈蚀程度的加剧，裂缝会逐渐加宽、加长，最终形成沿钢筋的纵向裂缝。这些裂缝会进一步加速钢筋的锈蚀和混凝土的劣化，严重影响结构的性能。

2.5 施工与材料缺陷裂缝

施工操作失误和材料缺陷是引起水工建筑钢筋混凝土裂缝的关键。混凝土配合比不当，特别是水泥过量导致水化热高、收缩大，易产生温度与收缩裂缝；水灰比失衡则降低强度和耐久性，减弱抗裂能力。浇筑振捣不当，如顺序混乱引发冷缝，振捣不足致密实度低、易

现缺陷，振捣过度则骨料下沉、砂浆上浮，引发分层裂缝。养护缺失亦不可忽视，不及时或不足导致干缩裂缝，方式不当亦影响强度与抗裂性。材料方面，劣质水泥，如安定性差，致体积膨胀不均，引发裂缝；骨料级配不佳、含泥量高，影响和易性与强度，增加裂缝风险；外加剂选用不当或过量，亦可能诱发裂缝。

3 水工建筑物钢筋混凝土裂缝防治技术体系

3.1 设计阶段防治措施

在设计阶段，预防钢筋混凝土裂缝的关键在于合理的结构设计与材料选用。设计师需充分考虑水工建筑物的使用环境、荷载特性及地基条件，进行精确的结构计算与分析。采用合理的结构布置与尺寸设计，可以有效分散荷载，降低结构内部的应力集中；通过合理的配筋设计，如增加钢筋的直径、数量或采用预应力技术，可以增强混凝土的抗拉性能，从而减少裂缝的产生。设计中还应考虑温度应力和收缩应力的影响，采取适当的构造措施，如设置伸缩缝、沉降缝等，以缓解这些应力对结构的影响^[3]。

3.2 材料选择与改进

材料的选择与改进是防治钢筋混凝土裂缝的重要一环。高性能混凝土的使用可以显著提高混凝土的抗拉强度、耐久性和抗裂性。通过优化混凝土的配合比，如降低水灰比、增加粉煤灰或矿渣等掺合料，可以减少混凝土的收缩和徐变，从而降低裂缝的风险。另外，选用高质量的钢筋，如高强度、低松弛的预应力钢筋，以及采取防锈、防腐蚀措施，可以延长钢筋的使用寿命，减少因钢筋锈蚀而引起的裂缝。在特殊环境下，如高水位、高盐碱地区，还需考虑使用抗渗、抗腐蚀性能更好的特种混凝土和钢筋。

3.3 施工工艺控制

施工工艺的严格控制是确保钢筋混凝土结构质量、减少裂缝产生的关键环节。在施工过程中，应确保混凝土的拌制、运输、浇筑和振捣等工序符合规范要求。采用低温水拌制、合理控制浇筑速度、加强振捣等措施，可以改善混凝土的工作性能和密实度，减少混凝土内部的孔隙和微裂缝。此外，浇筑后的养护工作也至关重要，通过保持适宜的湿度和温度，可以促进混凝土的水化反应，减少收缩裂缝的产生，对于大体积混凝土或复杂结构，还应采取分段浇筑、跳仓施工等措施，以缓解温度应力和收缩应力对结构的影响。

3.4 裂缝监测与预警

裂缝监测与预警系统是水工建筑物安全管理的重要组成部分，通过建立完善的裂缝监测网络，采用先进的

监测技术和设备，如裂缝测宽仪、应变计、温度传感器等，可以实时监测裂缝的宽度、长度、深度以及结构内部的应力状态。结合数据分析与预警模型，可以及时发现裂缝的发展趋势和潜在风险，为采取修复和加固措施提供科学依据。监测数据还可以用于评估裂缝防治措施的效果，为后续的设计和施工提供参考^[4]。

3.5 裂缝修复与加固技术

当水工建筑物出现裂缝时，及时采取修复和加固措施至关重要。修复技术主要包括表面封闭、注浆填充、粘贴碳纤维布或钢板加固等。根据裂缝的类型、宽度和深度，选择合适的修复方法，可以有效封闭裂缝，防止水分和有害物质的侵入，提高结构的耐久性。对于严重影响结构安全的裂缝，还需采取加固措施，如增加截面尺寸、增设支撑或预应力系统等，以增强结构的承载力和稳定性。在修复和加固过程中，应注重施工质量和安全管理，确保修复效果达到设计要求。

4 工程案例分析

4.1 案例概况

某中型水闸工程在建成并投入运行5年后，出现了较为严重的质量问题。在闸墩及底板部位出现了数量较多的裂缝。其中，闸墩上的裂缝大多呈现竖向分布，部分裂缝已经贯穿整个闸墩，裂缝宽度处于0.2-0.5mm之间；底板上的裂缝则多为不规则的网状形态，而且部分裂缝还伴有渗漏现象，对水闸的正常运行和结构安全构成了潜在威胁。

4.2 实际问题分析

经过专业的检测分析，发现闸墩裂缝产生的主要原因在于外荷载作用。该水闸在设计阶段，未能充分考虑到下游水位变化会对闸墩产生附加弯矩这一关键因素。在实际运行过程中，闸墩所承受的实际荷载远远超过了设计时的预期值，导致闸墩内部产生的拉应力超过了混凝土的抗拉强度，进而引发了裂缝的出现；而底板裂缝的产生则主要源于温度与收缩作用，在施工阶段，没有采取有效的温控措施，混凝土在硬化过程中水化热集中释放，使得混凝土内部与外部形成了较大的温差。同时，后期的养护工作也严重不到位，混凝土在干燥收缩

过程中产生了干缩裂缝。而且随着裂缝的不断发展，渗漏情况日益加剧，水中的氯离子得以侵入混凝土内部，已经开始对底板中的钢筋产生锈蚀影响，进一步削弱了结构的耐久性。

4.3 解决措施

针对闸墩裂缝问题，首先对裂缝进行注浆封闭处理，选用环氧树脂浆液填充裂缝，有效阻止了渗漏和侵蚀介质的侵入。随后，对闸墩进行加固处理，在闸墩外侧粘贴碳纤维布，增强了闸墩的承载能力，改善了其受力状态，使闸墩能够更好地承受实际荷载。对于底板裂缝，先对裂缝表面进行清理，采用表面封闭法处理浅层裂缝，对于较深的裂缝则进行压力注浆。同时，为控制温度应力的影响，在底板增设温度应力释放缝，并加强后期养护工作，保持混凝土表面湿润，减少干缩影响。另外，对底板钢筋进行防腐处理，涂刷阻锈剂，防止钢筋锈蚀进一步发展。经过上述一系列处理措施后，对水闸进行了持续6个月的监测，结果显示裂缝未再扩展，渗漏现象得到有效控制，结构性能恢复正常。

结束语

综上所述，水工建筑物钢筋混凝土裂缝的防治是一个系统工程，需要从设计、材料、施工、监测到修复加固等多个环节综合考虑。通过科学的设计、优质的材料、精细的施工、严密的监测以及及时的修复加固措施，可以有效减少裂缝的产生与发展，延长水工建筑物的使用寿命，确保其安全运行。未来，随着科技的进步和材料的发展，钢筋混凝土裂缝的防治技术将更加完善，为水工建筑物的建设与维护提供更加有力的保障。

参考文献

- [1] 杨学军.钢筋混凝土建筑框架结构施工及其质量控制[J].质量与市场,2023(14):169-171.
- [2] 阙兆辉.钢筋混凝土建筑框架结构施工质量控制对策[J].江苏建材,2022(6):120-121.
- [3] 李兴卫.钢筋混凝土结构检测及混凝土质量通病原因分析与措施[J].建筑技术开发,2022,49(15):153-156.
- [4] 黄跃辉.建筑钢筋混凝土结构检测鉴定研究[J].中国建筑装饰装修,2022(13):103-105.