

桥梁工程混凝土裂缝分析及防治措施

曹 雨

天津市政工程设计研究总院有限公司 天津 300110

摘 要：桥梁工程中，混凝土裂缝问题严重影响结构安全与耐久性。本文详细阐述裂缝按产生时间、原因、形态的分类方式，深入剖析材料、施工、环境、荷载等因素对裂缝产生的影响。针对性地提出材料优化、施工工艺控制、环境适应性设计、荷载管理等防治措施，并介绍表面处理、灌浆处理、嵌缝封堵、结构加固等裂缝处理方法，为桥梁工程混凝土裂缝防治提供全面参考。

关键词：桥梁工程；混凝土裂缝；裂缝分类；裂缝成因；防治措施

引言：桥梁作为交通基础设施的关键部分，其安全性与耐久性至关重要。混凝土作为桥梁主要结构材料，裂缝问题普遍存在且影响重大。裂缝不仅损害桥梁外观，更会降低结构承载能力、影响耐久性，甚至危及行车安全。不同阶段、原因及形态的裂缝，其形成机制与危害程度各异。深入分析桥梁工程混凝土裂缝的分类与成因，探索有效的防治措施及处理方法，对保障桥梁结构安全、延长使用寿命、降低维护成本具有关键意义。

1 桥梁工程混凝土裂缝分类

1.1 按裂缝产生时间分类

桥梁工程中混凝土裂缝按形成阶段可划分为施工期裂缝与运营期裂缝两类。施工期裂缝指混凝土从拌合、浇筑至养护完成阶段产生的裂缝，这一阶段裂缝形成主要与材料性能、施工工艺及环境条件密切相关。例如，混凝土浇筑后早期强度未形成时，若遭遇骤冷骤热环境或养护措施不到位，易在表面形成收缩裂缝；模板支撑体系刚度不足或拆除时机不当，则可能引发结构变形裂缝^[1]。运营期裂缝则指桥梁结构投入使用后，在长期荷载作用、环境侵蚀及材料老化等因素共同影响下逐渐发展的裂缝。这类裂缝往往具有渐进性特征，初期表现为细微裂纹，随时间推移可能扩展为影响结构安全的贯穿性裂缝。运营期裂缝发展速率与桥梁所处环境密切相关，寒冷地区冻融循环作用会加速裂缝扩展，潮湿环境则可能诱发钢筋锈蚀导致裂缝进一步恶化。

1.2 按裂缝产生原因分类

从成因角度可将混凝土裂缝分为材料相关、施工相关、环境相关及荷载相关四类。材料相关裂缝源于原材料性能缺陷或配合比设计不合理，如水泥安定性不合格导致体积膨胀开裂，骨料含泥量超标引发收缩裂缝，外加剂与水泥相容性差造成工作性劣化等。施工相关裂缝与工艺操作直接相关，混凝土振捣不密实会形成蜂窝麻

面，养护温度控制不当易产生温度应力裂缝，大体积混凝土未采取分层浇筑措施可能引发贯穿性裂缝。环境相关裂缝主要受气候条件影响，昼夜温差导致表面与内部收缩不一致形成温度裂缝，干湿交替环境加速混凝土碳化进程降低抗裂性能。荷载相关裂缝则由结构受力状态改变引发，超载车辆通行产生过大应力，预应力损失导致结构次应力增加，以及基础不均匀沉降引发的结构附加应力，均可能造成混凝土开裂。

1.3 按裂缝形态分类

根据裂缝发展深度可划分为表面裂缝、深层裂缝与贯穿裂缝三种形态。表面裂缝通常局限于混凝土表层，深度不超过保护层厚度，多呈网状或龟裂状分布，主要影响结构耐久性。深层裂缝延伸至结构内部但未完全贯通，裂缝宽度随深度增加逐渐减小，这类裂缝会削弱结构截面有效受力面积，降低承载能力。贯穿裂缝完全穿透结构厚度，形成连续破坏面，严重破坏结构整体性，可能导致桥梁局部甚至整体失效。三种形态裂缝可能单独存在，亦可能由表面裂缝逐步发展形成深层裂缝，最终演变为贯穿裂缝，其发展过程与裂缝成因、环境条件及结构受力状态密切相关。

2 桥梁工程混凝土裂缝产生原因分析

2.1 材料因素

混凝土材料性能对裂缝控制具有决定性作用。配合比设计不合理会直接导致抗裂性能下降，水胶比过大将增加收缩变形，砂率偏高易引发离析泌水，矿物掺合料比例失调则可能影响早期强度发展。水泥作为胶凝材料，若选用早强型品种或安定性不合格产品，水化热集中释放与体积安定性不良将分别导致温度裂缝与膨胀裂缝。骨料质量同样关键，含泥量超标会削弱骨料与水泥石界面粘结，针片状含量过高则降低混凝土工作性，粗骨料最大粒径偏大可能引发局部应力集中。外加剂使用

需严格遵循相容性原则，减水剂掺量不足难以改善和易性，过量则可能造成离析分层；引气剂引入的气泡尺寸与分布若未有效控制，反而会成为裂缝萌生点。

2.2 施工因素

施工工艺偏差是裂缝产生的直接诱因。搅拌环节时间不足导致混合不均，运输过程颠簸引发离析，浇筑时落差过大造成骨料分离，均会形成局部薄弱区^[2]。振捣操作需把握适度原则，欠振使气泡无法排出形成孔隙，过振则导致粗骨料下沉、水泥浆上浮，造成上下层收缩差异。养护制度执行不力会显著加剧收缩变形，表面失水过快与内部湿度梯度过大易引发龟裂，冬季保温措施缺失则可能因冻胀产生微裂纹。模板体系安装偏差导致结构变形，拆除时机过早引发应力重分布，施工缝留设位置不当或处理粗糙造成界面结合不良，均会成为裂缝扩展通道。

2.3 环境因素

温度变化引发的热胀冷缩是环境因素中最常见的致裂原因，桥梁混凝土结构体积较大，环境温度骤升骤降时，表面与内部温差形成温度梯度，产生的温度应力超过混凝土抗拉强度就会形成裂缝。湿度变化会引发混凝土干缩，环境湿度持续偏低时，混凝土内部毛细孔水分不断蒸发，体积收缩受到约束后产生拉应力，逐步发展为可见裂缝。冻融循环作用对寒冷地区桥梁影响显著，混凝土内部孔隙水结冰后体积膨胀，融化后体积收缩，反复循环会破坏内部微观结构，导致裂缝不断扩展。侵蚀性介质会破坏混凝土耐久性，沿海地区氯离子、工业区硫酸盐等介质渗透到混凝土内部，分解水泥水化物，引发结构微观损伤，加速裂缝萌生与扩展。

2.4 荷载因素

静荷载作用下的应力集中会导致局部混凝土受力过载，桥梁结构设计中截面突变、配筋不合理等部位，静荷载作用时会形成应力集中区域，长期作用下会逐步出现裂缝。动荷载反复作用会使混凝土产生疲劳损伤，车辆通行、波浪冲击等动荷载长期反复作用，会消耗混凝土力学性能，导致内部微裂缝不断累积扩展，最终形成宏观裂缝。荷载分布不均会使混凝土结构受力失衡，实际使用中荷载布置偏离设计要求，部分区域承受荷载过大，超出混凝土承载能力，进而引发裂缝。

3 桥梁工程混凝土裂缝防治措施

3.1 材料层面防治

混凝土材料性能优化需贯穿配合比设计、原料筛选及外加剂选用全流程。配合比设计应遵循低水胶比原则，通过掺入适量矿物掺合料改善胶凝材料体系颗粒级

配，降低水泥用量以减少水化热释放。骨料选择需严格把控级配曲线，确保骨料级配合理，同时严格控制含水量与泥块含量，避免杂质影响混凝土性能^[3]。外加剂选用应建立相容性试验制度，确保外加剂与胶凝材料适配，根据混凝土性能需求合理选用减水剂、引气剂、膨胀剂等，保障外加剂发挥预期效果。

3.2 施工层面防治

施工工艺控制需建立标准化作业体系。搅拌环节应采用强制式搅拌机，搅拌时间较普通混凝土延长30-60秒以确保掺合料充分水化。运输过程需保持罐体低速旋转防止离析，浇筑时采用分层振捣工艺，每层厚度不超过振捣棒有效作用长度的1.25倍。振捣操作应遵循“快插慢拔”原则，插入点间距控制在300-400mm，振捣时间以混凝土表面泛浆且无明显气泡逸出为准。养护方案需根据环境条件动态调整，常温养护采用土工布覆盖保湿，冬季施工增设电热毯或蒸汽养护装置，养护周期不少于14天。模板安装需保证垂直度偏差不超过3mm，拆除时间通过同条件养护试件强度检测确定，施工缝处理应凿除浮浆至露出粗骨料，二次浇筑前铺筑20-30mm厚同配比水泥砂浆。

3.3 环境层面防治

环境适应性设计需构建多维度防护体系。温度控制通过埋设冷却水管、采用低热水泥及预冷骨料等措施降低入模温度，夏季施工宜将混凝土入模温度控制在28℃以内。湿度管理采用喷雾养护或覆盖塑料薄膜保持表面湿润，相对湿度低于60%时启动加湿系统。冻融防护需提高混凝土抗冻等级，引气量控制在4%-6%范围，结构表面增设防水层阻断水分渗透通道。防腐处理根据介质类型选择防护方案，氯盐环境采用环氧涂层钢筋或不锈钢钢筋，硫酸盐环境掺入抗硫酸盐水泥或硅灰，碳化环境通过增加保护层厚度延缓钢筋锈蚀进程。

3.4 荷载层面防治

荷载管理需建立全生命周期控制机制。结构设计阶段通过有限元分析优化截面形式，避免出现突变截面引发应力集中，预应力筋布置应考虑摩擦损失补偿。荷载控制需设置限载标识并配备动态称重系统，运营期定期开展荷载试验验证结构承载能力。监测体系构建应集成应变计、位移计及温度传感器，数据采集频率不低于1次/小时，当应力幅值超过设计值80%时启动预警机制，通过交通管制或临时支撑等措施调整荷载分布状态。

4 裂缝处理方法

4.1 表面处理法

表面处理法适用于宽度小于0.2mm的微细裂缝修复，

通过封闭裂缝表面阻断水分与有害介质侵入通道^[4]。具体操作包含裂缝清理、底层涂刷及面层封闭三道工序,裂缝清理需采用高压空气或钢丝刷清除表面浮尘与松散颗粒,确保基层坚实平整。底层涂刷选用渗透性强的环氧树脂或丙烯酸酯类材料,涂刷厚度控制在0.1-0.2mm,通过毛细作用渗入裂缝内部形成粘结层。面层封闭材料根据使用环境选择,潮湿环境采用憎水性聚合物水泥砂浆,干燥环境使用弹性防水涂料,涂层厚度需满足抗碳化与耐候性要求。处理完成后应进行48小时保湿养护,避免因失水过快导致涂层开裂。

4.2 灌浆处理法

灌浆处理法针对宽度0.2-0.5mm的活动性裂缝,通过压力灌注化学浆液实现裂缝充填与结构补强。浆液选型需综合考量裂缝宽度、环境条件及结构受力状态,环氧树脂类浆液具有高强度特性,适用于静载作用下的结构修复;聚氨酯类浆液弹性模量可调,能有效适应动荷载作用;水泥基浆液成本较低,但需严格控制水灰比防止收缩。灌浆工艺包含埋设灌浆嘴、裂缝封闭、压力灌注及封口处理四个环节,灌浆嘴间距根据裂缝走向确定,垂直裂缝按300-500mm间距布置,水平裂缝适当加密。压力控制需遵循"低压慢注"原则,初始压力控制在0.1-0.2MPa,待浆液充分渗透后逐步升压至0.3-0.5MPa,持压时间不少于10分钟确保充填密实。

4.3 嵌缝封堵法

嵌缝封堵法适用于宽度大于0.5mm的贯通性裂缝,通过在裂缝表面开凿V形槽并填充密封材料实现永久封堵。开槽作业需使用角磨机或云石机,槽口宽度控制在10-20mm,深度为宽度的一半,槽壁应打磨平整并清除浮尘。填充材料根据使用部位选择,结构表面采用聚合物改性沥青或硅酮密封胶,具有良好耐候性与弹性恢复能力;水下部位选用水下环氧砂浆,需通过流变仪检测触变性满足施工要求。填充施工应分层进行,每层厚度不超过10mm,采用专用压胶枪或抹刀压实抹平,表面处理应与周边混凝土保持一致,必要时进行拉毛或压纹处理

增强粘结力。

4.4 结构加固法

结构加固法针对裂缝导致承载能力显著下降的结构,通过增大截面、粘贴碳纤维布或增设体外预应力等措施恢复结构功能。增大截面加固需根据计算确定加固层厚度,新旧混凝土界面应凿毛处理并涂刷界面剂,纵向受力钢筋通过植筋技术与原结构可靠连接^[5]。碳纤维布加固需控制粘贴层数不超过4层,单层厚度0.167mm,粘贴方向应与主应力方向一致,采用低压环氧树脂浸渍并使用滚筒压实排除气泡。体外预应力加固通过增设钢绞线并施加预应力,有效抵消部分恒载应力,需设置转向块与锚固装置确保应力传递路径清晰,预应力损失值应通过现场试验确定并予以补偿。

结束语

桥梁工程混凝土裂缝的防治是一项复杂且系统的工程,涉及材料、施工、环境、荷载等多个方面。通过合理分类裂缝,深入剖析其产生原因,从材料、施工、环境、荷载等层面采取针对性防治措施,并运用科学有效的裂缝处理方法,可有效控制裂缝的产生与发展,保障桥梁结构的安全性与耐久性。在实际工程中,需综合考虑各种因素,制定合理的防治方案,确保桥梁工程的质量与安全。

参考文献

- [1]陈国权.市政桥梁施工混凝土裂缝成因与防治措施[J].工程技术研究,2025,10(20):143-145.
- [2]项俊瑞.桥梁工程施工中大体积混凝土施工技术及其裂缝防治[J].水泥,2026(1):141-143.
- [3]李中慧.市政桥梁施工混凝土裂缝及其防治措施分析[J].建材发展导向(下),2022,20(5):178-180.
- [4]雷洋.桥梁工程施工中混凝土裂缝成因及应对措施研究[J].建筑与装饰,2025(21):115-117.
- [5]刘汉.市政桥梁混凝土裂缝成因及防治措施研究[J].运输经理世界,2025(35):128-130.