

公路桥梁施工中混凝土裂缝的成因及防治措施

潘龙飞

浙江百航建设有限公司 浙江 丽水 323000

摘要: 公路桥梁混凝土裂缝控制是保障结构耐久性与安全性的关键技术难题, 本文系统剖析了裂缝形成的多物理场耦合机制, 根据裂缝成因针对性提出配合比优化、冷却处理、分层浇筑及模板控制等系列技术措施, 旨在为提升桥梁工程全寿命周期性能提供理论支撑与技术路径。

关键词: 混凝土裂缝; 防治措施; 裂缝控制

引言: 现代公路桥梁向大跨径、重载化方向发展, 混凝土裂缝控制已成为制约结构耐久性的核心问题。在复杂环境荷载与施工扰动共同作用下, 裂缝形成机理呈现多尺度、非线性的特征, 传统单一因素控制理论已难以满足工程需求。本文基于材料科学、结构力学与施工技术的跨学科视角, 系统研究裂缝演化规律: 通过建立水化热-收缩-约束耦合模型, 阐明温度应力场与收缩应变场的交互作用机制; 结合数字孪生技术与智能监测手段, 提出动态自适应控制策略。研究突破传统经验式防控的局限, 形成从材料本构优化到施工过程调控的系统解决方案, 对推动桥梁工程高质量建设具有重要理论与实践价值。

1 公路桥梁施工中混凝土裂缝常见类型

公路桥梁混凝土裂缝按力学成因可分为结构性裂缝与非结构性裂缝两大体系, 结构性裂缝源于外部荷载作用下结构力学响应的超限状态, 其典型表现为弯曲裂缝、剪切裂缝与扭转裂缝的复合形态。弯曲裂缝主要分布于受拉区边缘, 沿主筋方向呈垂直状开展, 裂缝宽度随弯矩梯度变化呈现中部宽、两端窄的特征; 剪切裂缝则多发生在剪力墙、墩柱节点区, 以45°斜裂缝形式贯穿截面, 其扩展路径受主压应力迹线与配筋构造的共同影响。非结构性裂缝则由材料体积变形受约束引发, 包括塑性收缩裂缝、干燥收缩裂缝及温度梯度裂缝等, 塑性收缩裂缝多呈现表面网状形态, 深度一般不超过保护层厚度, 其形成与泌水通道受阻导致的毛细管负压剧增直接相关; 干燥收缩裂缝则具有随时间发展的时变特性, 在构件几何中心区域形成贯穿性裂缝且伴随环境湿度波动呈现开闭循环现象。

基于裂缝的动态发展特性, 可将其划分为活性裂缝与惰性裂缝两类, 活性裂缝指具有持续扩展趋势的裂缝

作者简介: 潘龙飞, 1988年03月, 男, 汉族, 安徽黄山人大专工程师, 研究方向: 工程技术

体系, 其驱动力来源于外部荷载的周期性作用或环境参数的时变影响, 典型代表包括疲劳荷载引发的微裂缝扩展群、氯离子侵蚀导致的钢筋锈胀裂缝等, 这类裂缝的扩展速率可通过断裂力学中的应力强度因子进行量化评估。惰性裂缝则指变形能完全释放后进入稳定状态的裂缝, 如一次成型温度裂缝或已完成收缩变形的干燥裂缝, 其中, 活性与惰性状态的界限具有相对性, 当环境湿度骤变或结构承受意外冲击荷载时, 原有惰性裂缝可被重新激活^[1]。

2 裂缝成因分析

2.1 地基沉降

公路桥梁地基沉降诱发的混凝土裂缝形成机理涉及岩土力学与结构力学的耦合作用, 首要成因可归结于地基持力层物理力学特性的空间异质性, 当桥梁基础穿越不同地质单元时, 各区域土体压缩模量、泊松比及渗透系数等参数的显著差异将导致基础体系产生不均匀沉降, 这种差异沉降在超静定结构体系中会引发次生应力集中现象, 特别是在连续梁桥墩台过渡段或大跨径刚构桥合龙段, 结构整体刚度与地基柔度之间的力学平衡被打破, 导致混凝土构件承受超出设计容许值的拉-剪复合应力; 次生诱因源于施工期间动态荷载的传递效应, 在支架预压阶段或上部结构逐跨推进过程中, 临时施工荷载的瞬态作用会诱发地基土体产生塑性变形, 这种非弹性变形累积将改变地基初始应力场分布, 当变形速率超过混凝土早期徐变补偿能力时, 将在梁体跨中区域或墩柱根部形成贯穿性裂缝。另一关键机制在于地下水位波动引发的有效应力重分布, 在河流冲积平原或软土地区, 孔隙水压力的季节性变化会显著改变地基土体的固结特性, 当桥基处于非完全固结状态时, 施工期快速加载将加速主固结沉降过程, 而次固结蠕变效应则会在运营阶段持续产生附加沉降, 这种时间依存性沉降在预应力混凝土结构中尤为危险, 因其可能抵消预应力筋建立

的压缩储备,导致结构在服役期内出现延迟性弯曲裂缝,尤其值得注意的是,桩基础穿越可液化砂层时地震动引发的超孔隙水压力积聚可能瞬时降低桩土界面摩阻力,造成基础体系整体性沉降突变,这种动力响应型沉降对薄壁高墩结构的完整性构成严重威胁^[2]。

2.2 混凝土收缩变形

混凝土收缩变形导致的裂缝形成本质上是材料体积稳定性与约束条件相互作用的结果,其中自主收缩与干燥收缩的耦合效应构成主要驱动因素,自主收缩源于水泥水化过程中C-S-H凝胶形成导致的化学减缩,这种在绝湿条件下发生的微观结构致密化过程,使混凝土在初凝阶段即产生内部自平衡拉应力,当配合比设计未充分考虑矿物掺合料的火山灰效应时,高细度胶凝材料加速水化进程,导致收缩变形速率超出骨料嵌锁作用提供的约束能力;干燥收缩则受环境湿度场梯度支配,表层混凝土水分蒸发形成毛细管负压,引发收缩应变沿构件截面深度方向呈非线性分布,这种湿度-应变梯度在配筋密集区域产生显著的约束应力,最终在保护层厚度不足处形成表面龟裂。而约束条件对收缩裂缝的形态发展具有决定性影响,外部约束主要来自相邻结构单元或模板系统的机械限制,例如现浇箱梁腹板与翼缘交接处的几何突变部位,由于双向收缩受到横向预应力筋和纵向分布钢筋的复合约束,易在角隅区形成45°斜裂缝;内部约束则源于混凝土材料自身的非均匀性,骨料与浆体热膨胀系数的差异导致界面过渡区(ITZ)形成微裂缝源,在收缩应力作用下这些缺陷逐渐扩展连通,与此同时,补偿收缩技术中膨胀剂的掺入虽能建立化学预压应力,但若养护制度不能确保膨胀能的有效释放,反而会在约束解除后引发反向收缩裂缝,这种现象在超长结构后浇带闭合施工中需特别防范。

2.3 水泥水化热

水泥水化热引发的温度应力场重构是导致大体积混凝土结构开裂的核心诱因之一,其作用机制可归结为热力学耦合场作用下材料本构关系的非线性演变,对于截面尺寸超过1.5米的墩台或承台结构,中心区域因散热路径受阻而形成热积聚效应,当芯部温度峰值与表层温差超过25℃时,混凝土热膨胀系数的各向异性将引发三维约束应力,这种温度应力在结构硬化初期尤为显著,此时混凝土弹性模量急速增长而抗拉强度发展滞后,材料断裂韧度尚未完全形成,极易在几何突变部位(如倒角区域或预埋件周边)产生放射状温度裂缝。水化热致裂的次生效应对应于材料热学参数的演化特性,混凝土表观比热容与导热系数随水化度提升呈指数衰减规律,这

种时变特性导致传统热传导模型的预测精度显著降低,当采用高强混凝土时,低水胶比加剧了自干燥效应与温度收缩的协同作用,使得毛细孔溶液蒸汽压的变化速率与水化放热进程产生相位差,这种非同步演化在微观尺度上引发骨料-浆体界面区的应力奇异性,特别需要指出的是,大掺量矿物掺合料(如粉煤灰、矿渣)虽能降低绝热温升幅度,但会改变水化放热曲线的形态参数(如温升速率、温峰出现时间),若未通过等效龄期法修正养护制度,可能造成温度控制关键节点的误判,对于预应力混凝土箱梁结构,锚固端附近的集中放热还会干扰预应力筋与混凝土的粘结滑移本构关系,导致应力重分布引发的边缘劈裂裂缝。

2.4 温度变化

环境温度变化对混凝土结构的损伤机制体现为热应变与约束条件的动态博弈过程,日周期温度波动引发的疲劳效应是表面网状裂缝的主要成因,其物理本质可追溯至材料线膨胀系数与热扩散率的匹配特性,当结构表面受太阳辐射产生瞬时温升时,表层混凝土膨胀受到内部低温区的刚性约束,形成双向受拉的平面应力状态,这种循环热应力作用下,混凝土的疲劳损伤阈值随应力幅值比呈指数下降趋势,尤其在含盐雾侵蚀的沿海环境中,氯离子渗透会显著降低材料疲劳寿命。季节温差引发的整体温度荷载则对超静定桥梁结构的受力体系产生系统性影响,年温度变化幅度 ΔT 引起的轴向变形受到桥墩水平抗推刚度的约束,在连续梁桥中转化为桥墩弯矩与梁体轴力的组合作用,当伸缩缝装置失效或支座摩阻力异常增大时,这种温度次内力可能达到设计值的2-3倍,导致盖梁节点区出现八字形剪切裂缝,更为复杂的是日照辐射引起的非线性温度场分布,箱梁顶底板之间的垂直温差会形成截面自平衡弯矩,这种附加弯矩与车辆荷载弯矩的同向叠加可能使跨中下缘拉应力超过抗裂安全储备,在钢-混组合梁中,钢材与混凝土导热性能的显著差异会加剧界面滑移效应,导致结合部出现脱空与剥离裂缝^[3]。

3 混凝土裂缝优化控制措施

3.1 混凝土配合比优化

混凝土配合比的科学设计是调控材料体积稳定性的核心策略,其关键在于构建胶凝材料体系与骨料骨架的协同作用机制,首先需通过多元胶凝体系优化水化热释放特征,采用复合掺合料技术将粉煤灰、矿渣微粉与硅灰按特定比例复配,利用火山灰效应与微集料效应实现水化进程的梯度控制,高活性矿物掺合料的纳米填充作用可细化孔隙结构,降低毛细管张力引发的收缩势能,

而低水胶比(0.35-0.40)设计通过减少自由水含量抑制塑性收缩风险,同时可引入聚羧酸减水剂的分子结构设计理念,通过调整侧链长度与吸附基团密度实现新拌混凝土流变参数(屈服应力、塑性粘度)的精准调控,确保在低水胶比条件下仍具有优异的泵送性与匀质性。骨料级配优化是另一技术重点,需基于堆积密度最大理论构建连续级配曲线,采用二级配粗骨料(5-10mm与10-20mm)以4:6质量比复配,可使空隙率降至28%以下,进而减少浆体填充需求,细骨料模数控制在2.6-2.9区间,并通过石粉含量调控改善浆体-骨料界面过渡区的力学性能,其中需要注意将骨料热膨胀系数与水泥浆体的匹配性纳入设计考量,以此显著降低温度变形差异引发的界面应力^[4]。

3.2 冷却处理措施

大体积混凝土温控体系的核心在于建立多维散热路径网络,其中预冷骨料技术是降低初始浇筑温度的有效手段,采用液氮喷淋与风冷联合工艺可将粗骨料温度稳定控制在 $5\pm 2^{\circ}\text{C}$,同时通过制冷机组对拌合水进行二级冷却,使混凝土出机口温度不超过 18°C ,当前更先进的方案是埋设智能冷却水管系统,基于非稳态传热模型优化水管间距与水流速,采用PID控制系统动态调节水温梯度,确保芯部与表层温差 $\leq 20^{\circ}\text{C}$ 。温度场实时监测与反馈控制构成完整温控链条,在结构内部布设分布式光纤测温系统,以 $0.5\text{m}\times 0.5\text{m}$ 网格密度构建三维温度场数字孪生模型,通过有限元反演分析预测温度应力演化趋势,当监测到危险温差阈值时自动触发喷雾养护系统与冷却水流量调节阀,对于异形结构需采用各向异性导热调控技术,在应力集中区域嵌入高导热碳纤维网格,建立局部快速散热通道,在极端气候条件下可结合气象预报数据实施动态温控,通过热流密度边界条件修正有限元模型,提前48小时优化冷却策略。

3.3 分层浇筑

分层浇筑工艺的本质是通过时空维度解耦温度应力场与收缩应力场的耦合效应,首层厚度控制需基于热传导方程与混凝土凝结特性综合确定,对于C50及以上高强混凝土,单层浇筑厚度宜控制在1.2-1.5m,并确保下层混凝土终凝前完成上层浇筑,以利用未完全硬化的徐变特性释放部分约束应力;层间间隔时间应通过绝热温升试验与热力学仿真确定,通常维持6-8小时使下层混凝土完成30%-40%水化度,此时弹性模量既能提供必要支撑刚度,又可保留足够的应力松弛能力。浇筑顺序的拓扑优化是另一关键技术,箱型截面可考虑采用"先腹板后顶板"的异步浇筑策略,利用腹板混凝土的早期收缩补偿顶板

后期收缩差异,在墩柱结构中实施螺旋上升浇筑法,通过连续旋转浇筑面消除冷缝形成的几何弱面;对于大跨径梁体,采用分段跳跃式浇筑工艺,以20-30m为单位设置施工缝,待各段完成70%收缩变形后再进行湿接缝连接,需特别关注层间结合面的抗剪性能强化,采用高压水冲毛处理形成3-5mm有效粗糙度,并喷洒界面活性剂增强新旧混凝土的化学粘结力^[5]。

3.4 公路桥梁模板支架质量控制

模板支架体系的刚度演化特性直接影响混凝土早期应力分布,可采用贝雷架与盘扣式支架组合体系,通过预压试验精准测定弹性模量时变曲线,结合施工荷载动态分布特征建立刚度退化模型,在曲线梁段及变截面区域,植入液压伺服调平装置,基于全站仪实时监测数据与BIM模型对比分析,实现支架立杆三维坐标的毫米级动态修正。模板系统的热力耦合变形是诱发表面裂缝的核心诱因,可采用高模量复合材料模板并设置双向预拱度,通过有限元反演分析确定最优预拱值,以抵消徐变收缩与温度应变的叠加效应,接缝界面应用纳米硅渗透结晶技术强化新旧混凝土结合面,通过高压水射流形成微米级粗糙度,同步喷洒两性性高分子界面剂,其疏水基团定向排列可降低毛细管张力30%以上,对于大悬臂结构,可采用热流道温控模板系统,通过PID算法调节循环介质温度,使拆模时混凝土内外温差梯度 $\leq 12^{\circ}\text{C}$,有效抑制温度应力引发的表面龟裂。

结束语:本文全面解析了公路桥梁混凝土裂缝的形成机理与演化规律,建立了涵盖材料设计、施工控制与结构优化的完整防控体系,研究证实,裂缝产生本质上是力学响应与体积变形失衡的表现,需通过胶凝体系梯度调控、散热路径优化及时空浇筑解耦等技术创新实现多场协同控制,未来研究应进一步融合人工智能与物联网技术,发展裂缝行为的实时预测与自愈合调控方法,为智能桥梁建造提供新的技术范式。

参考文献

- [1]郭伟彤. 高速公路桥梁施工中混凝土裂缝的防治措施[J]. 四川建材, 2024, 50(10): 190-192.
- [2]徐明昊,刘素雅. 道路桥梁施工中混凝土裂缝成因与防治措施[J]. 运输经理世界, 2023, (18): 126-128.
- [3]赵光华. 公路桥梁混凝土质量通病成因及防治措施[J]. 运输经理世界, 2020, (16): 131-132.
- [4]葛强,刘洋. 公路桥梁施工中混凝土裂缝成因与防治措施[J]. 运输经理世界, 2021, (22): 15-17.
- [5]任立奇. 桥梁施工中混凝土裂缝成因及防治措施[J]. 交通世界, 2021, (17): 129-130.