

预应力连续梁桥施工裂缝成因及防控措施分析

马鑫灏

湖北楚维工程咨询监理有限责任公司 湖北 荆门 448000

【摘要】：预应力连续梁桥结构受力复杂、施工工序繁多，施工阶段易产生各类裂缝病害，直接影响桥梁结构完整性、承载性能与服役寿命。桥梁施工裂缝的产生并非单一因素导致，而是材料性能、施工工艺、结构受力、环境条件等多类因素共同作用的结果。本文聚焦预应力连续梁桥施工全过程，系统梳理各类裂缝的诱发诱因，剖析不同因素引发裂缝的作用机理，结合桥梁施工技术规范与工程实操特点，针对性制定科学可行的裂缝防控技术措施，有效规避施工裂缝病害，保障预应力连续梁桥施工质量与结构安全，为同类桥梁施工质量管控提供技术参考。

【关键词】：预应力连续梁桥；施工裂缝；成因分析；防控措施

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.024

引言

预应力连续梁桥凭借刚度大、变形小、行车平顺性佳、跨越能力强等优势，广泛应用于公路、铁路交通基础设施建设中。桥梁施工阶段的结构质量是保障后期运营安全的核心基础，裂缝作为预应力连续梁桥施工阶段最常见的质量病害，会破坏混凝土结构整体性，降低预应力张拉效果，加剧结构钢筋锈蚀，逐步引发结构变形、承载力下降等系列问题。施工裂缝的常态化出现，制约着预应力连续梁桥施工品质提升，也对桥梁长期服役稳定性造成潜在威胁。深入探究桥梁施工裂缝的形成机制，精准把控施工全过程的裂缝防控要点，是提升预应力连续梁桥施工质量、强化结构耐久性的核心关键。

1 预应力连续梁桥施工裂缝常见类型及表现特征

1.1 混凝土表面细微裂缝形态特征

预应力连续梁桥混凝土表面细微裂缝多出现于梁体顶板、底板及腹板表层位置，是施工阶段发生率最高的裂缝类型。此类裂缝整体宽度较小、深度较浅，多呈不规则网状、发丝状分布，无固定延伸规律。混凝土浇筑完成后的初凝与终凝阶段，表层水分散失速度较快，内部胶体收缩速率与表层存在差异，极易形成表层细微裂缝。梁体露天施工环境下，温度、湿度的小幅波动也会加剧表层混凝土收缩变形，促使细微裂缝产生。这类裂缝初期不会直接影响结构承载能力，但会破坏混凝土表层防护体系，为外界水汽、腐蚀性介质渗入结构内部提供通道，长期发展会逐步扩大加深，诱发深层次结构病害。

1.2 结构纵向与横向裂缝分布特点

梁体纵向裂缝多平行于桥梁轴线分布，主要集中在箱梁腹板、底板区域，裂缝延伸长度较大，宽度相对均匀，多在预应力张拉、梁体模板拆除后逐步显现。这类裂缝的形成与梁体纵向受力不均、混凝土纵向收缩受限存在紧密关联。横向裂缝垂直于桥梁轴线分布，常见于梁体跨中、支座附近等关键受力部位，多为贯通性或半贯通性裂缝，对结构受力性能影响更为显著^[1]。横向裂缝的出现多源于混凝土浇筑沉降不均、支座受力

偏移、阶段性荷载分布失衡等问题，裂缝会直接切断梁体横向受力体系，破坏结构整体受力均衡性。

1.3 结构性深层裂缝危害表现

结构性深层裂缝贯穿混凝土表层延伸至结构内部，部分裂缝可直达预应力筋布设区域，属于危害性极强的施工病害。此类裂缝多产生于梁体受力关键截面，延伸路径规整、裂缝宽度较大，会直接改变梁体原有受力状态，削弱结构整体刚度与承载能力。施工过程中预应力张拉参数把控不当、梁体临时支撑体系布设不合理、阶段性施工荷载超标等问题，均会引发深层结构性裂缝。裂缝出现后会造预应力应力分布紊乱，加剧结构局部应力集中，若未及时处置，会在后期施工及运营过程中持续扩张，严重威胁桥梁结构整体稳定性。

2 预应力连续梁桥施工裂缝产生的材料类成因

2.1 混凝土原材料性能不达标

混凝土是预应力连续梁桥的核心施工材料，原材料品质直接决定混凝土成型质量与抗裂性能。水泥、砂石、外加剂等原材料性能不符合施工规范要求，会大幅提升裂缝产生概率。水泥稳定性较差、水化热数值过高，会导致混凝土浇筑后内部升温剧烈，降温过程中产生显著收缩应力，引发温度收缩裂缝。砂石骨料含泥量、杂质含量超标，骨料级配不合理，会降低混凝土密实度与抗拉强度，弱化结构抗裂能力。外加剂选型不当、掺配比例失衡，会影响混凝土凝结速度与和易性，造成混凝土成型后收缩变形不均匀，诱发各类施工裂缝。

2.2 混凝土配合比设计不合理

混凝土配合比设计缺乏科学性、针对性，是引发施工裂缝的重要人为因素。部分施工配比设计未结合桥梁施工环境、结构受力特点进行优化，存在水胶比偏大、水泥用量过高、骨料占比不足等问题^[2]。水胶比过大会导致混凝土内部自由水含量过高，水分蒸发后会形成大量孔隙，加剧混凝土干缩变形。过量的水泥会增大混凝土水化热释放总量，扩大结构内外温差，产生温差应力裂缝。掺合料配比不当会改变混凝土硬化速

度与力学性能，造成混凝土强度增长不均衡，结构局部抗裂性能不足，在施工变形作用下产生裂缝病害。

2.3 材料养护适配性存在偏差

混凝土成型后的材料养护工作，是保障结构强度、规避收缩裂缝的关键环节。养护时机把控不当、养护方式不符合规范、养护周期不足等问题，都会影响混凝土硬化成型效果。混凝土浇筑后未及时开展保湿养护，表层水分快速蒸发，内部水分迁移缓慢，形成内外干湿差异，引发不均匀干缩裂缝。高温、大风等特殊施工环境下，未采取针对性的保温、保湿养护措施，会加剧混凝土表层变形。低温环境中养护防护不到位，混凝土易出现冻胀变形，破坏内部结构整体性，形成不可逆的结构性裂缝。

3 预应力连续梁桥施工裂缝产生的工艺类成因

3.1 混凝土浇筑振捣工艺不规范

混凝土浇筑与振捣施工的操作规范性，直接影响梁体混凝土密实度与结构均匀性。浇筑过程中下料速度过快、浇筑分层厚度不合理，会导致混凝土骨料沉降、浆液上浮，出现离析现象，造成结构局部密实度不足。振捣作业存在漏振、欠振、过振等问题，会进一步加剧结构缺陷。漏振、欠振区域混凝土存在空隙、蜂窝、麻面，结构整体性受损，抗拉强度大幅下降；过振会造成混凝土骨料下沉、浆液集中于表层，表层混凝土收缩变形量增大，极易形成大面积细微裂缝与局部结构性裂缝。

3.2 预应力张拉施工把控不足

预应力张拉是连续梁桥施工的核心工序，张拉施工管控疏漏会直接引发受力型裂缝。预应力张拉时机过早，混凝土强度未达到设计标准，结构抗拉、抗压性能不足，张拉应力会造成梁体局部变形开裂。张拉应力控制精度不足、张拉速率不均衡、持荷时间不符合规范，会导致梁体预应力分布不均匀，局部应力集中超出混凝土抗拉极限，诱发裂缝^[3]。预应力孔道布设偏差、压浆不密实，会造成预应力筋受力不均，梁体长期处于异常受力状态，施工阶段及后续成型阶段易产生持续性裂缝。

3.3 模板与支架施工工艺缺陷

模板与支架体系的施工质量，对梁体成型形态与结构应力状态影响显著。模板安装平整度不足、拼接缝隙过大、加固不牢固，会造成混凝土浇筑过程中出现漏浆、模板变形，导致梁体结构尺寸偏差、表层凹凸不平，成型后收缩变形不均产生裂缝。支架体系搭设间距不合理、支撑刚度不足、基础沉降不均匀，会使梁体混凝土浇筑及硬化过程中出现不均匀沉降，结构内部产生附加剪切应力与拉应力。模板拆除时机过早、拆除顺序混乱，会破坏混凝土结构成型稳定性，引发梁体变形开裂。

4 预应力连续梁桥施工裂缝综合防控技术措施

4.1 优化施工原材料与配比管控

从源头把控混凝土抗裂性能，强化各类施工原材料的质量检验与筛选工作，严格遵循桥梁施工技术标准选用水泥、骨料、外加剂等材料。优先选用水化热低、稳定性佳的水泥品种，严控砂石骨料的含泥量、杂质含量，优化骨料级配组合，保障骨料质地均匀、强度达标^[4]。结合施工现场温度、湿度环境及结构受力需求，针对性优化混凝土配合比，合理控制水胶比与水泥用量，科学掺加粉煤灰、矿粉等掺合料，降低混凝土水化热，提升混凝土和易性与密实度。进场原材料需完成全方位检测，不合格材料严禁投入施工，从材料层面规避裂缝诱因。

4.2 规范现场施工操作流程

标准化管控混凝土浇筑、振捣、养护全流程施工操作，制定精细化施工管控标准。混凝土浇筑采用分层、分段匀速下料模式，严控分层浇筑厚度，保障下料均匀稳定，规避混凝土离析问题。振捣作业遵循快插慢拔的操作原则，精准把控振捣点位与振捣时长，消除漏振、欠振、过振隐患，保障混凝土整体密实均匀。严格规范预应力张拉施工流程，依据混凝土实测强度确定张拉时机，精准控制张拉应力、张拉速率与持荷时间，保证预应力受力均匀。规范模板支架搭设、加固与拆除流程，严控支架基础沉降与模板变形，保障梁体成型结构稳定。

4.3 强化施工全过程质量监测管控

建立覆盖预应力连续梁桥施工全周期的质量监测体系，实时把控结构施工状态。施工过程中对梁体混凝土温度、湿度、沉降变形、应力分布进行动态监测，及时掌握混凝土硬化过程中的变形规律，针对温差过大、沉降异常等隐患提前干预。对预应力张拉、孔道压浆、模板支架受力等关键工序开展专项监测，及时修正施工偏差。安排专人开展常态化现场巡查，及时发现初期细微裂缝及各类施工隐患，同步落实整改处置，避免小范围病害持续扩大，通过全过程动态管控降低裂缝发生率。如图1所示：

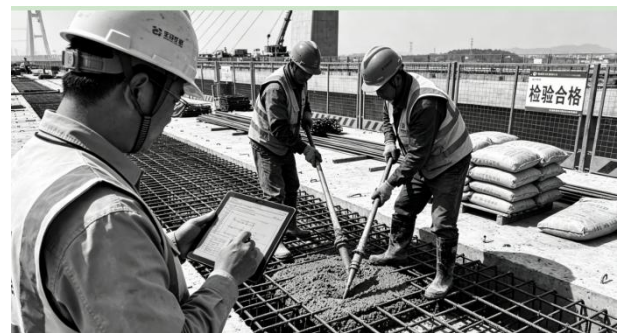


图1 原材料管控与施工巡检

5 预应力连续梁桥施工裂缝修复及质量提升策略

5.1 细微表层裂缝封闭修复处理

针对预应力连续梁桥混凝土表层出现的细微裂缝与发丝状裂缝,工程中普遍采用专业化表层封闭修复工艺开展规范化处置作业。正式修复施工前,需借助高压吹风、毛刷清扫及精细打磨等方式,彻底清除裂缝表层附着的浮尘、污垢、杂物及松散脱落的混凝土碎屑,确保裂缝周边施工区域整体洁净、干燥无积水,为后续修复材料粘结固化创造优质施工条件。结合桥梁结构施工环境与裂缝实际状态,选用适配性强的环氧封闭涂料、聚合物水泥基防护材料,采用多层均匀涂刷的施工方式覆盖裂缝表层,充分填充表层细小空隙,封闭混凝土外露孔隙^[5]。全程严控涂层均匀度与完整性,规避漏涂、起皮、厚薄不均等施工缺陷,成型后的防护层可有效阻隔水汽、腐蚀性介质侵入结构内部,稳固混凝土表层结构形态,遏制细微裂缝持续延展扩张,全面恢复并强化混凝土表层防护能力。

5.2 中度贯穿裂缝灌浆加固处置

预应力连续梁桥梁体出现的宽度、深度适中的中度贯穿性裂缝,会破坏混凝土结构整体性,需采用压力灌浆加固工艺进行专项修复施工。施工前期需依托现场勘查判定裂缝具体走向、延伸深度与展开宽度,依据裂缝分布规律精准定位并布设灌浆孔与排气孔,合理把控孔洞间距与钻孔深度。同时对裂缝内部进行彻底清理,疏通内部积水、粉尘与松散杂质,保障裂缝内部通道通畅,为浆液渗透填充提供基础。选用高强度、粘结性与耐久性优异的专用灌浆材料,借助专业压力灌浆设备,以匀速稳压的方式将浆液注入裂缝内部,依托浆液良好的渗透粘结性能填满裂缝全部空隙,粘合松散的混凝土结构。浆液完

全固化后可与原始混凝土结构融为一体,有效恢复梁体结构整体性与原始受力性能,消除裂缝引发的结构安全隐患,适配箱梁腹板、底板等关键受力部位的裂缝修复施工。

5.3 深层结构性裂缝补强优化

危害性较高的深层结构性裂缝会直接损害桥梁受力体系,需采用多工艺结合的综合补强优化技术开展系统性处置。施工前依托专业结构检测技术完成全面勘查,精准判定深层裂缝的延伸范围、破损程度,以及其对梁体承载力、整体刚度和应力分布的不良影响,结合桥梁设计标准制定针对性、个性化专项补强施工方案。修复作业以深度灌浆填充为基础,彻底封堵结构内部裂缝通道,同时搭配粘贴钢板、增设预应力补强筋、外包加厚混凝土等多重加固工艺,全方位提升受损区域的结构强度与承载性能。修复施工完成后,对梁体整体受力状态进行全面复核校准,科学优化后续施工荷载布设方式与预应力张拉受力体系,有效消解裂缝遗留的局部应力集中问题,稳步提升桥梁结构整体稳定性、刚度与长期服役耐久性。

6 结语

本文系统研究预应力连续梁桥施工裂缝的相关问题,梳理了不同类型施工裂缝的病害特征,从材料性能、施工工艺、现场管控等方面剖析裂缝产生的核心诱因。结合工程施工实际情况,落实原材料管控、标准化施工、全过程监测等防控手段,搭配分层级的裂缝修复补强技术,能够有效改善桥梁施工裂缝病害。相关防控与修复方式可有效保障梁体结构完整性,提升桥梁施工质量与耐久性能,为同类预应力连续梁桥施工质量控制提供可靠的技术参考。

参考文献:

- [1] 周学甫,杨斌.大跨度预应力混凝土连续梁桥施工控制[J].工程技术研究,2025,10(19):169-171.
- [2] 刘海林.基于改进灰色神经网络的预应力混凝土连续梁桥施工预拱度预测研究[J].中国公路,2025,(11):100-101.
- [3] 曾飞.高铁预应力混凝土连续梁桥施工监控研究[D].武汉工程大学,2025.
- [4] 安丰涛.预应力混凝土变截面连续梁桥施工技术[J].科学技术创新,2025,(8):122-125.
- [5] 肖旭.参数敏感性分析在预应力混凝土连续梁桥施工监控中的应用[J].西部交通科技,2025,(2):167-170+174.