

# 连续刚构桥箱梁裂缝防治技术研究

苏少波

中交天航(宜宾)交通工程建设有限公司 四川 宜宾 644600

**摘要:**连续刚构桥因无支座、刚接连接、跨越能力强等优势,广泛应用于公路与铁路工程。箱梁作为核心受力构件,其安全性与耐久性直接影响桥梁寿命。然而,箱梁裂缝频发,导致结构刚度与承载力下降,加速钢筋锈蚀与混凝土碳化,增加运维成本。本文结合工程实际,系统分析裂缝分类、特征及成因,从设计、材料、施工、监测维护四方面构建防治体系,通过工程验证方案可行性,提出优化建议,为同类桥梁裂缝防治提供参考,助力提升工程质量与长期运营安全。

**关键词:**连续刚构桥;箱梁裂缝;防治技术;结构耐久性;施工控制

引言:我国交通基础设施快速发展,连续刚构桥因跨越能力强、行车平顺、结构刚度大,成为跨江河、山谷等复杂地形工程的首选。箱梁作为核心承重部件,承受弯、剪、扭复合作用,长期暴露于自然环境,受设计、材料、施工及环境等多因素影响,易产生各类裂缝。裂缝不仅破坏混凝土整体性,加速腐蚀介质侵入与钢筋锈蚀,降低结构耐久性与承载力,更可能引发安全隐患,威胁行车安全。本文结合现有成果与工程实际,系统分析裂缝成因,构建全方位防治技术体系,并通过工程应用验证技术有效性,为裂缝防治提供可行方案。

## 1 连续刚构桥箱梁裂缝成因分析

### 1.1 裂缝分类与特征

连续刚构桥箱梁裂缝可按成因、形态、危害程度分为不同类型,各类裂缝具有鲜明特征。按成因可分为设计型、材料型、施工型和环境型裂缝,其中施工型裂缝在工程中最为常见。按形态可分为横向裂缝、纵向裂缝、斜裂缝和网状裂缝,横向裂缝多分布于箱梁腹板、底板,呈垂直于桥梁轴线方向,宽度多在0.1-0.5mm之间;纵向裂缝主要出现在箱梁顶板、底板纵向部位,多由混凝土收缩或预应力作用不均引发;斜裂缝集中在箱梁腹板与顶板、底板交接处,多因剪切应力过大产生;网状裂缝多为表面细缝,分布零散,主要由混凝土干缩或表面风化导致。按危害程度可分为表面裂缝、深层裂缝和贯穿裂缝,表面裂缝深度不超过5mm,对结构承载力影响较小但易引发锈蚀;深层裂缝深度5-50mm,会削弱截面刚度;贯穿裂缝贯穿箱梁截面,严重影响结构整体性和安全性,需及时处理。

### 1.2 主要成因分析

#### 1.2.1 设计因素

设计不合理是箱梁裂缝的重要源头。一是截面设计

有缺陷,部分箱梁截面薄,腹板等部位刚度不够,施工及运营时荷载作用下应力集中,易引发裂缝。二是预应力体系设计不当,预应力筋布置不合理、张拉应力取值低,或未考虑混凝土收缩徐变等影响,致预应力损失大,抗裂性能差。三是构造设计不完善,刚节点处未加强钢筋,钢筋布置不合理,交接部位应力集中且无抗裂措施,易产生裂缝,支座等设计不合理也会引发附加应力,诱发裂缝<sup>[1]</sup>。

#### 1.2.2 材料因素

材料质量与性能缺陷是核心因素之一。混凝土方面,配合比不合理,水胶比大等会降低其强度等性能,加剧收缩徐变,引发裂缝;原材料质量不合格,如水泥水化热高,会使混凝土内部应力不均,诱发裂缝。预应力材料方面,钢绞线等质量不达标,会导致预应力施加不均、损失大,使箱梁局部受力失衡,引发裂缝。

#### 1.2.3 施工因素

施工过程中的操作不规范是引发箱梁裂缝最直接的因素,涉及模板支架、混凝土施工、预应力张拉等多个环节。模板支架施工中,支架刚度、稳定性不足,未进行充分预压,或模板拼接不严、脱模过早,会导致箱梁浇筑过程中发生变形、沉降,引发表面裂缝和结构裂缝;混凝土施工中,搅拌、运输、浇筑工艺不规范,浇筑分层过厚、振捣不密实,会导致混凝土内部存在蜂窝、空洞等缺陷,降低结构整体性;养护不及时、养护方式不当,保湿不足、温差过大,会引发混凝土干缩裂缝和温度裂缝;预应力张拉中,张拉时机不当、张拉顺序错误、张拉应力控制不准,会导致箱梁受力不均,诱发裂缝,施工缝处理不当也会形成裂缝隐患。

#### 1.2.4 环境因素

自然环境因素长期作用会加速箱梁裂缝的产生与扩

展,主要包括温度变化、湿度变化和腐蚀性介质侵蚀。温度变化方面,昼夜温差、季节温差导致箱梁混凝土热胀冷缩,当温度应力超过混凝土抗拉强度时,会引发温度裂缝,尤其在夏季高温浇筑或冬季低温施工时,裂缝发生率显著提升;湿度变化方面,环境湿度交替变化会导致混凝土反复干缩、湿胀,长期作用下会产生干缩裂缝,表面细缝逐步发展为深层裂缝;腐蚀性介质侵蚀方面,雨水、冰雪、盐雾、工业废气等介质侵入混凝土内部,会腐蚀钢筋、破坏混凝土结构,导致混凝土开裂,同时冻融循环作用会加剧混凝土剥落、开裂,进一步降低结构抗裂性能和耐久性。

## 2 连续刚构桥箱梁裂缝防治技术体系

### 2.1 设计阶段防治措施

设计阶段是裂缝防治的源头,需从截面优化、预应力体系完善、构造改进等方面采取针对性措施,提升箱梁抗裂性能。截面设计中,结合桥梁跨度、荷载需求,合理确定箱梁截面尺寸,增加腹板、顶板、底板厚度,提升结构刚度,避免应力集中;优化截面形式,采用单箱单室或单箱多室合理布置,减少局部应力集中部位。预应力体系设计中,合理布置预应力筋,优化张拉顺序和张拉应力,充分考虑混凝土收缩徐变、温度变化的影响,预留预应力损失补偿空间,确保预应力施加均匀;优化预应力管道设计,采用高强度波纹管,确保管道畅通,为后续压浆密实提供保障<sup>[2]</sup>。构造设计中,刚节点处增设加强钢筋,采用圆弧过渡,缓解应力集中;合理布置普通钢筋,控制配筋率和配筋间距,提升混凝土抗裂能力;优化支座、伸缩缝设计,减少附加应力,同时预留裂缝监测接口,便于后续运维监测。

### 2.2 材料选择与改进

材料选择与改进是提升箱梁抗裂性能的核心,需严格控制原材料质量,优化混凝土配合比,提升材料综合性能。混凝土材料方面,严格筛选水泥、骨料、外加剂等原材料,选用低水化热、高强度水泥,优质洁净骨料,含泥量控制在规范允许范围内;选用高效减水剂、缓凝剂、膨胀剂等高性能外加剂,优化混凝土配合比,降低水胶比,掺入优质掺合料,改善混凝土工作性能,减少收缩徐变,提升抗裂性和耐久性。预应力材料方面,选用高强度、耐腐蚀钢绞线和优质锚具、波纹管,严格检验材料质量,确保符合规范要求;对钢绞线进行防腐处理,采用镀锌或防腐涂层,延长使用寿命;改进压浆材料,采用高性能水泥浆或专用压浆剂,提升压浆密实度,防止预应力筋锈蚀,间接提升箱梁抗裂性能。

### 2.3 施工控制技术

施工阶段是裂缝防治的关键环节,需从模板支架、混凝土施工、预应力张拉等方面加强控制,规范施工操作。模板支架施工中,选用刚度、稳定性符合要求的材料,进行承载力和沉降验算,施工前进行充分预压,消除支架非弹性变形;加强模板拼接质量控制,避免漏浆,合理控制脱模时间,确保混凝土强度达到规范要求后再脱模。混凝土施工中,规范搅拌、运输、浇筑工艺,控制浇筑分层厚度和振捣密实度,避免出现蜂窝、麻面等缺陷;浇筑完成后及时覆盖保湿,优化养护方案,控制养护温度和湿度,延长养护时间,减少干缩裂缝和温度裂缝;规范施工缝处理,清理施工缝表面浮浆和杂物,涂刷界面剂,确保施工缝结合紧密。预应力张拉中,严格按照设计要求控制张拉时机、张拉顺序和张拉应力,做好预应力损失监测与补偿;张拉前检验预应力筋和锚具质量,张拉过程中实时监测箱梁变形,避免受力不均,确保张拉质量符合规范要求。

### 2.4 监测与维护技术

建立完善的监测与维护体系,可及时发现裂缝隐患,防止裂缝扩展,保障箱梁结构安全。监测技术方面,结合传统检测与智能化检测手段,在箱梁关键部位布设监测点,实时监测混凝土应力、应变、温度变化,以及裂缝的产生、发展情况;采用无人机巡检、图像识别、光纤传感等技术,实现裂缝宽度、长度、深度的实时监测,设置预警阈值,当裂缝发展达到预警标准时,及时发出预警信号。维护技术方面,定期对箱梁进行全面排查,对发现的表面裂缝及时采用封闭胶、环氧砂浆修补;对深层裂缝和贯穿裂缝,采用压力灌浆、环氧注浆等技术进行修复,必要时采用碳纤维布、预应力加固等措施增强结构承载力;定期对箱梁进行保洁、防腐处理,避免腐蚀性介质侵蚀,加强支座、伸缩缝维护,确保其正常运行,减少附加应力引发的裂缝<sup>[1]</sup>。

## 3 裂缝防治技术的工程应用与验证

### 3.1 工程背景

该连续刚构桥全长860m,主跨为3跨连续刚构,箱梁采用单箱单室截面,顶板宽度12m,底板宽度6m,腹板厚度0.8-1.2m,采用悬臂浇筑施工工艺,运营年限已达5年。该桥梁地处亚热带季风气候区,夏季高温多雨、冬季温和湿润,昼夜温差较大,且所在区域交通量较大,重载车辆较多。运营过程中,桥梁养护人员发现箱梁腹板、底板出现多处横向、纵向裂缝,部分裂缝宽度超过0.3mm,深度达到15mm,属于深层裂缝,若不及时处理,会进一步发展为贯穿裂缝,影响桥梁结构安全。经初步排查,裂缝主要由施工阶段养护不当、预应力张拉

控制不准,以及运营阶段环境因素和重载作用引发,需采用针对性防治技术进行处理。

### 3.2 防治方案实施

#### 3.2.1 设计优化

结合该桥梁箱梁裂缝成因,对原有设计进行针对性优化。针对应力集中引发的裂缝,在箱梁腹板与顶板、底板交接处增设加强钢筋,采用圆弧过渡,缓解应力集中;优化预应力筋布置,在裂缝集中区域增加预应力筋数量,调整张拉应力,补偿预应力损失,提升箱梁抗裂性能。针对环境因素引发的裂缝,优化箱梁表面防腐设计,采用高性能防腐涂层,增强混凝土抗腐蚀能力;在箱梁腹板增设排水孔,及时排出雨水,减少雨水侵蚀;优化支座设计,更换老化支座,减少附加应力,避免裂缝进一步扩展。设计优化过程中,结合桥梁实际运营荷载和环境条件,通过数值模拟验证优化方案的可行性,确保优化后箱梁抗裂性能满足规范要求。

#### 3.2.2 材料升级

针对该桥梁材料方面存在的问题,进行材料升级改造,提升箱梁抗裂性能和耐久性。混凝土修复材料选用高强度、高抗裂、耐腐蚀的环氧砂浆和聚合物混凝土,配合高性能膨胀剂,减少修复后裂缝的再次产生;压浆材料选用专用高性能压浆剂,提升预应力管道压浆密实度,防止预应力筋锈蚀。对新增预应力筋和锚具进行升级,选用高强度、耐腐蚀钢绞线和优质锚具,对钢绞线进行镀锌防腐处理;对箱梁表面采用渗透型防腐涂料,增强混凝土抗腐蚀能力,抵御环境介质侵蚀。材料升级过程中,严格检验材料质量,每批次材料均进行性能试验,确保材料性能符合设计和规范要求,为裂缝防治提供可靠的材料保障。

#### 3.2.3 施工控制

施工控制严格按照优化后的设计方案和材料要求,规范施工操作,确保防治施工质量。裂缝修复施工中,先对裂缝进行清理、凿除,去除表面松散混凝土和杂物,采用高压水枪冲洗干净、晾干;表面裂缝采用封闭胶涂抹封闭,深层裂缝采用压力灌浆技术进行修复,注浆压力控制在0.3-0.5MPa,确保注浆密实。预应力张拉施工中,严格控制张拉时机、张拉顺序和张拉应力,实时监测箱梁变形和应力变化,做好预应力损失监测与补偿,避免张拉过程中引发新的裂缝。施工过程中,加强混凝土养护,采用保湿养护方式,控制养护温度和湿

度,延长养护时间;加强施工质量检验,每道工序完成后均进行验收,验收合格后方可进入下一道工序,确保施工质量符合规范要求<sup>[4]</sup>。

#### 3.2.4 施工过程质量管控

为保障防治方案落地见效,同步建立全流程施工质量管控体系,贯穿施工准备、过程实施、竣工验收全阶段。施工准备阶段,组织技术人员开展专项交底,明确各工序施工要点、质量标准和安全要求,对施工人员进行专业培训,提升操作熟练度;对施工机械设备进行全面检修、校准,确保压浆机、张拉设备、监测仪器等运行正常。施工过程中,设立专项质量检查小组,实行“三检制”(自检、互检、交接检),重点检查裂缝清理质量、注浆密实度、预应力张拉参数、材料配比等关键环节,对发现的问题立即整改,严禁不合格工序进入下一环节。同时,做好施工全过程记录,详细记录裂缝修复参数、材料使用情况、张拉数据、养护记录等,形成完整的施工档案,为后续效果验证和运维提供依据。施工期间,合理规划施工工期,避开夏季高温时段浇筑和冬季低温施工,减少环境因素对施工质量的影响,确保防治施工稳步推进。

### 结束语

连续刚构桥箱梁裂缝防治是涵盖设计、材料、施工及监测维护的系统工程,裂缝由多因素耦合引发。本文系统梳理裂缝分类、特征及四大成因,构建“设计优化-材料升级-施工控制-监测维护”全链条防治体系,明确各环节关键措施,并通过工程应用验证其可行性。未来,随着桥梁向大跨度、轻量化发展,需加速新型抗裂材料与智能化防治技术研发,完善技术体系,为同类工程提供精准参考,助力我国连续刚构桥质量持续提升。

### 参考文献

- [1]胡秋宝.连续刚构桥箱梁裂缝控制措施研究[J].交通世界,2023(19):130-132.
- [2]孙高洋.预应力混凝土连续刚构桥箱梁裂缝成因及防治对策[J].交通世界,2023(11):160-162.
- [3]范一娜,杜程.大跨径连续刚构桥箱梁施工裂缝控制措施[J].山东交通科技,2022,(02):65-67.
- [4]贾卫中,蔡金标,王天羽,等.杭州湾跨海铁路大桥引桥80m预制混凝土箱梁水化热分析及裂缝控制研究[J].桥梁建设,2025,55(3):1-10.