

桥梁伸缩缝施工技术对结构耐久性的影响分析

王维军

新疆生产建设兵团交通建设有限公司 新疆 乌鲁木齐 832017

摘要: 桥梁伸缩缝作为连接桥梁上部结构与桥台或相邻梁段的关键构造部件,其主要功能是适应温度变化、混凝土收缩徐变、车辆荷载及地震等因素引起的结构变形,保障行车平顺与结构安全。然而,在实际工程中,伸缩缝往往是桥梁结构中最易发生病害的部位之一,其施工质量直接关系到桥梁整体的耐久性与服役寿命。本文系统分析了桥梁伸缩缝的主要类型及其工作机理,重点探讨了施工过程中关键工艺(如预留槽口精度、锚固系统安装、混凝土浇筑与养护、密封胶施工等)对结构耐久性的影响路径。在此基础上,提出了优化施工工艺、加强过程控制、推广高性能材料与智能监测技术等综合对策。研究表明,科学合理的伸缩缝施工技术是提升桥梁结构长期性能与延长使用寿命的关键环节,应将其纳入全寿命周期设计理念中予以高度重视。

关键词: 桥梁工程; 伸缩缝; 施工技术; 结构耐久性; 锚固系统; 防水密封; 全寿命周期

引言

随着我国交通基础设施建设的快速发展,桥梁工程数量与规模持续增长。在复杂多变的服役环境下,桥梁结构的耐久性问题日益凸显,已成为制约其安全运营与经济性的的重要因素。桥梁伸缩缝虽为局部构造,却承担着传递荷载、释放变形、防止结构损伤等多重功能,其性能优劣直接影响桥梁的整体服役状态。据统计,在已运营桥梁中,超过40%的早期病害与伸缩缝失效密切相关,其中因施工质量问题引发的比例高达60%以上(交通运输部,2022)。这表明,伸缩缝施工技术的科学性与精细化程度,是决定其长期性能乃至桥梁整体耐久性的核心要素。当前,尽管新型伸缩缝装置不断涌现,但施工环节仍存在诸多薄弱点,如预留槽口尺寸偏差大、锚固钢筋定位不准、混凝土密实度不足、密封材料老化开裂等,这些问题不仅削弱了伸缩缝自身的功能,更会诱发主梁端部混凝土开裂、钢筋锈蚀、支座失效等次生损伤,形成“局部失效—整体退化”的恶性循环。因此,深入研究伸缩缝施工技术对结构耐久性的影响机制,具有重要的理论价值与工程意义。本文旨在系统梳理桥梁伸缩缝的类型与功能,剖析施工关键技术要点,建立施工缺陷与耐久性劣化之间的关联模型,并提出针对性优化策略,为提升桥梁伸缩缝施工质量与结构长期性能提供理论支撑与实践指导。

1 桥梁伸缩缝的类型与功能机理

1.1 主要类型

根据变形量与结构形式,桥梁伸缩缝可分为以下几类:(1)对接式伸缩缝:适用于小变形量($<20\text{mm}$),如板式橡胶伸缩缝、U型镀锌铁皮伸缩缝。结构简单、造

价低,但易老化、排水能力差。(2)钢制支承式伸缩缝:包括梳齿板式、模数式(如GQF-C、GQF-Z型)。适用于中等至大变形量(20-800mm),承载能力强,但对施工精度要求高。(3)橡胶组合式伸缩缝:如板式橡胶+型钢组合,兼具弹性与强度,适用于中小跨径桥梁。(4)无缝式伸缩缝:采用高弹性沥青或聚合物改性材料填充,表面连续无缝,行车舒适性好,但仅适用于微小变形($<10\text{mm}$)。

1.2 功能机理

伸缩缝的核心功能包括:一是自由伸缩:允许梁体在温度、收缩徐变等作用下自由伸缩,避免产生附加应力;二是荷载传递:在车辆荷载作用下,将轮载有效传递至下部结构,保证结构受力连续;三是防水密封:阻止雨水、融雪剂、除冰盐等腐蚀性介质渗入梁端及支座区域;四是行车平顺:提供平稳过渡,减少冲击振动,提升行车舒适性与安全性。上述功能的实现高度依赖于施工质量,尤其是锚固系统的可靠性与密封系统的完整性。

2 伸缩缝施工关键技术环节

2.1 预留槽口施工

预留槽口是伸缩缝安装的基础,其几何尺寸与位置精度直接决定后续安装质量。施工中需严格依据设计图纸在梁端精确切割或预留安装空间,槽口的宽度与深度必须控制在允许误差范围内。若槽口过窄,将导致型钢无法顺利就位,或压缩锚固空间,影响钢筋布置;若过宽,则需采用二次浇筑填补,易在新旧混凝土界面形成薄弱层,降低整体性。此外,槽口边缘的混凝土表面应进行凿毛处理,以增强后期回填混凝土与原结构的粘结性能^[1]。值得注意的是,槽底应保持清洁、干燥,不得

残留浮浆、油污或碎屑，否则将严重影响锚固效果。因此，预留槽口不仅是物理空间的准备，更是确保伸缩缝与主体结构协同工作的前提。

2.2 锚固系统安装

锚固系统是伸缩缝与桥梁主体结构实现力学连接的核心，其可靠性直接关系到装置的长期稳定性。通常采用预埋钢筋或后植筋方式将型钢牢固固定于梁体。然而在实际施工中，常因模板定位偏差、混凝土浇筑扰动或工人操作不规范，导致预埋筋位置偏移，致使型钢无法准确对位，甚至被迫强行矫正，引入初始应力。此外，锚固钢筋若长度不足、焊接质量不佳（如虚焊、夹渣）或未按要求弯钩，将显著降低其抗拔与抗剪能力。更严重的是，若混凝土保护层厚度控制不当，钢筋过早暴露于潮湿环境中，极易诱发锈蚀，进而削弱锚固效能。因此，锚固系统的施工不仅要求几何精度，更需注重材料连接质量与防腐措施，确保其在全寿命周期内持续有效传递荷载。

2.3 混凝土浇筑与养护

伸缩缝两侧回填混凝土通常采用C50及以上强度等级的高强微膨胀混凝土，以补偿收缩并提高密实度。浇筑前需确保模板支设严密，防止漏浆导致蜂窝麻面；混凝土入模后应充分振捣，尤其在钢筋密集区域，避免出现空洞或离析现象。水灰比的控制尤为关键，过高的水灰比虽利于施工流动性，但会增大硬化后的收缩裂缝风险，为水分侵入提供通道。浇筑完成后，必须实施有效的湿养护措施，保持混凝土表面持续湿润不少于7天，以促进水泥水化反应充分进行，提升早期强度与抗渗性能。若养护不到位，混凝土表面易出现塑性收缩裂缝或干缩裂缝，不仅影响外观，更会削弱锚固区的整体性和耐久性，成为结构劣化的起点。

2.4 密封胶与防水系统施工

对于模数式等带缝伸缩装置，橡胶密封带的安装质量直接决定其防水性能。施工时需确保密封带无扭曲、无划伤，并与型钢卡槽完全嵌合，不得存在脱开或松弛现象。尤其在密封带接头处，必须采用热硫化工艺进行现场连接，以保证密封的连续性与气密性。若仅采用冷粘或机械搭接，接头处极易在温度变化或车辆冲击下开裂，导致雨水沿缝隙渗入梁端。此外，单一密封难以应对极端工况，因此应在伸缩缝下方设置导水槽或铺设防水卷材，形成“防排结合”的复合防水体系^[2]。导水槽应坡向桥外，确保积水及时排出，避免在梁端积聚。只有将密封与排水协同设计、同步施工，才能有效阻断腐蚀介质的侵入路径，保护下部结构免受侵蚀。

2.5 安装标高与平整度控制

伸缩缝顶面标高必须与桥面铺装层严格平齐，一般允许误差控制在 ± 2 毫米以内。若安装过高，车辆通过时会产生明显冲击，加速型钢磨损甚至断裂；若过低，则易形成积水坑，积存雨水、泥沙及腐蚀性物质，不仅加速密封材料老化，还可能堵塞排水通道。同时，纵向与横向平整度不良会引发“跳车”现象，增大动态冲击系数，对伸缩缝本身及相邻梁体产生额外疲劳荷载。因此，在安装过程中需采用精密水准仪或激光找平设备进行实时监测，调整垫片或支撑螺栓，确保整体线形平顺。安装完成后还需进行行车模拟测试，验证其动态响应是否满足舒适性与安全性要求。

3 施工技术对结构耐久性的影响机制

3.1 渗水与钢筋锈蚀

施工缺陷（如密封失效、混凝土裂缝）导致雨水、氯离子等侵蚀介质渗入梁端。氯离子渗透至钢筋表面，破坏钝化膜，引发电化学腐蚀。锈蚀产物体积膨胀（可达原体积2-6倍），导致混凝土保护层开裂、剥落，进一步暴露钢筋，形成正反馈循环。研究表明，伸缩缝区域钢筋锈蚀速率是普通区域的3-5倍。

3.2 混凝土劣化

锚固区混凝土若因振捣不密实或养护不当产生微裂缝，在冻融循环、干湿交替及化学侵蚀作用下，裂缝扩展加速，强度下降。尤其在北方寒冷地区，渗入的水分结冰膨胀，造成混凝土表层剥落（D-cracking），严重削弱结构承载力。

3.3 支承系统失效

伸缩缝下方通常设有支座。若施工时未设置有效排水措施，积水长期浸泡支座，导致橡胶老化、钢板锈蚀，支座功能退化。此外，伸缩缝跳车产生的冲击荷载会传递至支座，加速其疲劳损伤。

3.4 结构整体性能退化

局部病害会引发连锁反应：伸缩缝失效→梁端受力异常→主梁裂缝扩展→预应力损失→结构刚度下降→振动加剧→更多构件损伤。这一过程显著缩短桥梁使用寿命，增加维修成本。

4 提升伸缩缝施工质量与耐久性的优化对策

4.1 强化施工全过程控制

提升伸缩缝施工质量必须贯穿设计、施工到验收的全过程。设计阶段应组织专项交底，明确伸缩缝型号、安装参数、材料性能及验收标准，避免理解偏差。施工前可引入BIM技术进行三维模拟，预演安装流程，优化预埋件定位方案，减少现场冲突。推行“首件工程认可

制”，通过首个伸缩缝的试安装验证工艺可行性，统一操作标准后再全面铺开。对于锚固钢筋、防水层等隐蔽工程，必须实行100%验收，并留存影像资料，实现质量可追溯。唯有将质量控制关口前移，才能从根本上杜绝系统性施工缺陷。

4.2 推广高性能材料与新工艺

材料创新是提升耐久性的根本途径。在腐蚀环境严酷区域，可采用环氧涂层钢筋或不锈钢筋替代普通钢筋，显著延缓锈蚀。回填混凝土宜选用自密实微膨胀高性能混凝土，其低水胶比、高密实度及微膨胀特性可有效抑制收缩裂缝。同时，可在混凝土表面施加硅烷浸渍处理，形成憎水屏障，大幅降低氯离子渗透率^[3]。在工艺方面，探索装配式伸缩缝技术，将大部分工序转移至工厂预制，现场仅进行拼装与连接，既提高精度，又减少湿作业对工期和质量的影响。新材料与新工艺的集成应用，将推动伸缩缝从“易损件”向“长寿命构件”转变。

4.3 完善防水与排水系统

单一依赖密封胶的防水策略风险较高，必须构建多层次防护体系。除确保密封胶安装质量外，应在伸缩缝正下方设置不锈钢或高分子导水槽，槽体坡度不小于3%，末端引至桥外排水管，实现“快排快走”。梁端混凝土表面可铺设SBS改性沥青防水卷材或喷涂聚脲弹性体，形成第二道防线。此外，日常养护中应定期清理伸缩缝内泥沙、垃圾，防止堵塞排水孔。通过“密封+导排+防护”的立体防水理念，最大限度阻断腐蚀介质侵入路径，保护主体结构安全。

4.4 引入智能监测与预防性养护

传统“坏了再修”的被动养护模式已难以满足现代桥梁管理需求。可在伸缩缝关键部位埋设光纤光栅传感器，实时监测伸缩量、温度变化及渗水信号；利用无人机搭载红外或高清摄像头，定期巡检伸缩缝状态，识别早期病害。基于监测数据，建立健康评估模型，预测剩余寿命，制定科学的预防性养护计划^[4]。例如，当检测到密封带轻微老化但尚未失效时，可及时进行局部修复，避免发展为结构性损伤。智能监测与预防性养护的结合，将显著提升桥梁运维效率与经济性。

4.5 纳入全寿命周期设计理念

伸缩缝的耐久性问题本质上是系统工程问题，需从全寿命周期视角统筹解决。在设计阶段即应考虑其可检性、可换性与维护便利性，优选寿命匹配主梁、维护成本低的方案。施工阶段注重质量责任追溯，建立构件“身份证”制度。运营阶段则依托BIM+GIS平台，整合设计、施工、检测、维修等全链条数据，形成数字孪生模型。通过“设计—施工—运维”一体化管理，实现从“关注初始成本”向“关注全寿命成本”的转变，真正践行可持续基础设施发展理念。

5 结语

桥梁伸缩缝作为结构中的“薄弱环节”，其施工质量对桥梁整体耐久性具有决定性影响。本文研究表明：伸缩缝施工中的关键环节——预留槽口精度、锚固系统可靠性、混凝土密实度、密封完整性及标高控制——共同决定了其长期服役性能；施工缺陷主要通过“渗水—锈蚀—混凝土劣化—支承失效”的路径引发耐久性退化，并可能诱发结构整体性能下降。未来应通过全过程质量控制、新材料新工艺推广、智能监测技术应用及全寿命周期管理等综合手段，系统提升伸缩缝施工水平与结构耐久性。建议行业主管部门修订相关施工规范，强化伸缩缝施工验收标准，并将耐久性指标纳入工程质量评价体系。唯有如此，方能真正实现桥梁工程“百年大计、质量为本”的目标。

参考文献

- [1]陈琼琼.公路桥梁伸缩缝施工工艺质量控制技术[J].时代汽车,2025,(23):193-195.
- [2]陈礼斌.公路桥梁伸缩缝维修更换施工技术分析[J].汽车周刊,2025,(12):109-111.
- [3]张禹.桥梁伸缩缝施工质量缺陷成因与修复措施研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一).浙江交科工程管理有限公司,2025:1730-1733.
- [4]唐婧.道路桥梁伸缩缝施工的质量控制分析[J].中国品牌与防伪,2025,(05):191-193.