

桥梁伸缩缝损坏诱因及长效养护维修方案研究

李永胜

苍溪县公路养护中心 四川 广元 628499

摘要：桥梁伸缩缝是保障上部结构温度变形与行车平顺性的关键构造，但其长期暴露于自然环境与动态荷载之下，成为桥梁体系中最易损坏的构件之一。本文系统分析了伸缩缝损坏的多维诱因，指出设计选型偏差、材料性能退化、施工安装缺陷、超负荷交通冲击以及环境与支座系统耦合作用是导致早期失效的主要来源。在此基础上，将损坏模式归纳为金属构件疲劳断裂、弹性体材料老化、锚固区混凝土碎裂及防水系统失效四种典型类型，并阐释其内在演化机理。针对上述问题，本文从长效管理视角出发，提出了涵盖预防性养护制度、巡检与检测体系、维修方案分级决策以及施工质量控制四个模块的系统化维修方案，强调“预防为主、精准维修、全寿命管理”的核心理念，以为桥梁养护管理部门提供理论依据与实践参考。

关键词：桥梁伸缩缝；损坏诱因；长效养护；预防性维护；维修方案

引言

桥梁伸缩缝设置于梁端之间或梁端与桥台之间，其主要功能是吸收上部结构因温度变化、混凝土收缩徐变及车辆荷载作用产生的水平位移和竖向转角，同时确保桥面连续、行车舒适并防止雨水下渗。尽管伸缩缝在桥梁造价中所占比例不高，但其运营状态直接关系到行车安全、结构耐久性和养护成本。实际工程中，伸缩缝的使用寿命往往远低于桥梁主体结构，许多桥梁在服役十年左右即出现不同程度的损坏，频繁更换不仅造成显著的经济负担，还严重干扰交通秩序。当前，部分养护单位对伸缩缝的损坏认识停留在“见坏即修”的被动阶段，缺乏对诱因的系统诊断和对维修方案的长期规划，导致重复维修、越修越坏的恶性循环。

1 伸缩缝的主要类型与功能特征

1.1 常用伸缩缝结构形式及其适用条件

当前桥梁工程中常用的伸缩缝可按位移量和结构形式大致分为三类。第一类是模数式伸缩装置，由异型钢型材与橡胶密封带组合而成，依靠橡胶带的弹性变形适应中低等位移量（通常为 20~80mm），广泛应用于中小跨径梁桥。第二类是梳齿板式伸缩缝，通过上下交错的钢齿板滑动来容纳较大位移（80~200mm 以上），具有行车冲击小、耐久性较好的优点，常用于大跨径连续梁桥和钢桥。第三类是橡胶或沥青填充式伸缩缝，适用于位移量较小（小于 20mm）的旧桥改造或次要道路桥梁^[1]。此外，还有无缝式伸缩缝（如弹性体填充式）在特定场景下应用。不同类型的伸缩缝在受力机理、材料

组成和施工要求上存在显著差异，这意味着其损坏诱因和维修策略也各不相同。

1.2 伸缩缝的服役条件与力学响应

伸缩缝在服役期间同时承受多维荷载与环境作用。在力学层面，它不仅要承受车辆轮载的直接冲击和反复碾压，还要顺应梁体由于温度升降产生的周期性伸缩位移，以及由车辆制动、离心力和支座不均匀沉降引起的剪切与扭转。在环境层面，伸缩缝直接暴露于大气中，遭受紫外线辐射、雨水浸蚀、冻融循环以及除冰盐的化学腐蚀。这种“动态荷载+环境侵蚀”的复合作用模式，使得伸缩缝的受力状态远比主体结构复杂和恶劣。更重要的是，伸缩缝一旦局部损坏，其防水层失效后，下渗的氯化物溶液会加速盖梁端头和支座系统的锈蚀，形成“损坏—渗水—锈蚀—约束变化—损坏加剧”的正反馈链条。因此，对伸缩缝的认识不能止步于桥面的一条“缝”，而应将其视为一个与梁体、支座、桥面铺装相互关联的系统构件。

2 伸缩缝损坏的多维诱因系统分析

2.1 设计选型阶段的偏差与不足

设计阶段的决策失误是伸缩缝早期损坏的源头性诱因。其一，位移量计算不准确。部分设计人员对当地历史温差、混凝土收缩徐变终值以及车辆制动引起的弹性变形估计不足，选用伸缩缝的额定位移余量过小，导致在极端温度下伸缩缝被“拉脱”或“顶死”，产生不可恢复的结构性损伤。其二，选型与桥型不匹配。例如，在曲线桥或斜桥中若仍采用直线型普通模数式伸缩缝，

则其无法适应梁端的平面转动和横向错动,导致局部应力集中和过早失效。其三,忽略动态放大效应。车辆高速通过时的冲击系数往往被低估,实际动态位移可能达到静态计算值的 1.3~1.5 倍,若未在设计中留有足够的安全储备,则伸缩缝的关键受力部位(如齿板根部、锚固钢筋)容易产生疲劳开裂。此外,部分设计图纸对细部构造(如排水坡度、锚固区配筋方式)交代不足,也为后续施工和长期性能埋下隐患。

2.2 材料老化与疲劳性能退化

材料本身的老化和疲劳是伸缩缝性能自然衰变的内在因素。对于橡胶密封带和弹性体填充材料,其高分子链在紫外线照射和臭氧作用下发生断裂和交联,导致弹性降低、表面龟裂和硬度增加,最终丧失密封防水能力。对于钢制构件(如梳齿板、型钢和锚固螺栓),在车轮荷载的循环作用下,构件表面应力集中部位逐渐萌生微裂纹,并在长期疲劳荷载下扩展,最终发生脆断或韧性断裂。特别是焊接接头和螺纹根部,因几何突变引起的应力集中系数较高,成为疲劳失效的优先起裂点^[2]。此外,锚固区混凝土的碳化反应和碱骨料反应会降低其与型钢的粘结锚固性能,使锚固螺栓在反复拔出力作用下逐步松动甚至拔出。这些材料退化过程具有隐蔽性和累积性,在损坏显现之前往往已经历了长时间的潜伏期。

2.3 施工安装环节的质量缺陷

常见质量缺陷包括:预埋锚固钢筋定位偏差过大,导致安装时无法对正,被迫弯折或割除后补焊,削弱了锚固强度;槽区混凝土浇筑不密实,振捣不到位,形成空洞或蜂窝,降低了局部承载能力;型钢对接焊缝未按设计坡口焊接或焊后未做应力释放处理,残留焊接应力与运营应力叠加,加速焊缝开裂;安装标高控制不严,伸缩缝与两侧桥面铺装存在高差,使车辆通过时产生额外冲击荷载。尤其值得重视的是,许多施工单位在伸缩缝安装后未达到设计强度即开放交通,早期荷载作用导致混凝土与型钢之间出现微裂缝,为日后渗水和腐蚀提供了通道。施工缺陷往往是多种诱因同时叠加,其后果在运营初期尚不明显,但在累积荷载作用下会迅速暴露。

2.4 交通荷载与环境因素的耦合作用

超载车辆和重载交通的日益增多是伸缩缝损坏加剧的外部驱动力。超载车辆通过时,轮载产生的竖向力可超过设计荷载的 2 倍以上,直接导致锚固区混凝土出现压碎或剪切破坏,同时传递至伸缩缝构件上的水平剪切

力急剧增大,加速了钢构件的疲劳累积。在重载交通密集的车道上,伸缩缝的实际荷载作用频次远超设计预期,其疲劳寿命相应缩短。环境因素方面,冬季撒布的除冰盐渗入伸缩缝内部,氯离子对钢构件产生电化学腐蚀,锈蚀产物体积膨胀进一步撑裂周围混凝土;在寒冷地区,渗入缝隙的水分反复冻融,产生冻胀压力,加剧了混凝土剥落和橡胶开裂。交通荷载与环境侵蚀并非独立作用,而是相互促进——荷载产生的裂缝为腐蚀介质提供侵入通道,而腐蚀又弱化了构件的有效截面,使其更易于在后续荷载下断裂。

2.5 支座与下部结构变形的间接影响

伸缩缝的损坏有时并非源于自身,而是支座系统或下部结构异常变形的间接反映。当支座发生过大剪切变形、老化失效或锚固螺栓断裂时,梁体的自由伸缩受到约束,原本应由支座吸收的位移和转角被强制转移至伸缩缝处,使其受力超出了设计范围。同样,桥墩不均匀沉降或桥台背墙的倾斜也会改变梁端转角,使伸缩缝的竖向和水平变位模式与设计假定不符,产生附加弯矩或扭矩。遗憾的是,不少养护人员在发现伸缩缝损坏时仅关注缝体本身,却忽略了对支座和下部结构的同步检查,导致更换新缝后不久,在相同的“病根”作用下再次损坏。因此,伸缩缝的损坏分析必须置于全桥结构体系之中,方能找到真正的原因。

3 伸缩缝损坏的典型模式与演化机理

3.1 金属构件的疲劳断裂与磨损

金属疲劳断裂多发生在梳齿板的根部、型钢的焊缝以及锚固螺栓的螺纹段。其典型宏观特征为断口平直、呈贝纹线扩展痕迹,最终断裂区为韧窝或解理形貌。演化过程一般分为三个阶段:初期在应力集中点形成微裂纹;中期裂纹在循环荷载下稳定扩展,构件有效截面逐步减小;后期剩余截面不足以承受峰值荷载时发生瞬断。磨损则常见于梳齿板滑动面,由于齿板间相互摩擦且长期缺乏润滑,金属表面逐渐出现犁沟和剥落坑,间隙增大后行车振动加剧,形成噪声和二次冲击。

3.2 弹性体材料的老化与密封失效

橡胶密封带的老化表现为表面泛白、裂纹密布和弹性回复率下降。密封失效的演化路径是:老化龟裂为细微渗水提供通道;反复拉伸收缩使裂纹扩展为贯穿性裂缝;防水功能丧失后,雨水携带泥沙和腐蚀介质下渗至梁端和支座。一旦密封带从型钢嵌槽中脱出,即宣告其完全失效。

3.3 锚固区混凝土的碎裂与界面脱粘

锚固区混凝土破坏通常发生在伸缩缝两侧的后浇带

区域,表现为边角碎裂、坑槽和型钢周边剥离。其演化机制为:初始微裂缝在荷载压缩下逐渐贯通;水分渗入裂缝后,冻胀或钢筋锈胀进一步加大裂缝宽度;最终混凝土破碎成块,锚固螺栓外露或拔出,伸缩缝整体丧失与梁体的连接。

3.4 防水层损坏与次生水损害链

防水层位于伸缩缝下方的收水槽中,其损坏往往被忽视。当防水层破裂后,下渗水沿梁体端头流淌,既腐蚀钢构件,又使支座长期处于湿润状态,加速支座橡胶老化。水损害链的终端是盖梁顶部混凝土的盐胀剥落和支座锚栓锈断,维修代价远高于单独更换防水层。

4 长效养护与维修方案的系统化设计

4.1 建立预防性养护制度与巡检体系

长效养护的基石是制度化的预防性管理。养护单位应制定伸缩缝专项养护规程,明确日常巡查、定期检查和特殊检查的频次与内容。日常巡查每周至少一次,重点观察缝内有无异物嵌入、橡胶带是否脱出、桥面有无渗水痕迹;定期检查每半年一次,对关键受力部位进行近距离目视检查,辅以锤击检测和卡尺测量间隙变化;特殊检查在极端高温/低温天气或重震后立即开展^[3]。巡检记录应数字化归档,构建每道伸缩缝的“健康档案”,便于趋势分析和预警。

4.2 基于损伤等级的维修方案分级决策

维修方案不应千篇一律,而应根据损伤类型、严重程度和发展速度进行分级决策。可划分为三级:一级为日常维护,包括清理缝内杂物、疏通排水孔、涂刷防锈漆和更换老化橡胶密封条,适用于轻微病害;二级为局部修理,针对锚固区混凝土局部碎裂或钢构件局部变形,进行凿除修复或补焊加固,适用于中等损伤;三级为整体更换,适用于结构严重破坏、位移能力丧失或多次维修无效的情况。分级决策的核心在于“适时”——过早更换造成浪费,过晚更换则可能影响主梁安全。决策依据应结合定期检查数据和历年维修记录综合判定。

4.3 材料升级与更换工艺的质量控制要点

对于达到更换条件的伸缩缝,应从材料和工艺两方面进行质量控制。材料选型上,推荐采用高阻尼橡胶密封带和耐候型钢型材,前者具有更好的抗老化性能和密封性,后者在腐蚀环境下可减少涂装维护。新缝安装时

应严格执行以下要点:槽区旧混凝土彻底凿除并清理基底,保证新老混凝土结合面粗糙干净;锚固筋按设计位置准确焊接或植筋,严禁随意弯折原预埋筋;混凝土采用早强、微膨胀、高韧性材料,浇筑后充分振捣并保湿养护至设计强度;安装标高应与两侧桥面齐平,高差控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内^[4]。更换完成后应对新缝进行加载试验,验证其平整度与位移功能。

4.4 施工期间的交通组织与养护周期管理

施工期间的交通组织对维修质量有重要影响。应尽可能选择交通量较小时段(如夜间或周末)进行快速维修,采用快凝混凝土或预制装配式伸缩缝以缩短封闭时间。若必须白天施工,应设置合理的交通导流方案,避免车辆绕行造成更大范围的拥堵。养护周期管理方面,应建立全寿命成本核算意识,将伸缩缝的初始购置费、安装费、日常维护费、维修费和更换费纳入统一的经济评价体系,以“最低年均成本”而非“最低首次采购成本”为选型和维修决策的依据,从而抑制低价低质产品的进入。

5 结语

桥梁伸缩缝损坏是设计、材料、施工等多因素耦合作用的结果,其失效根源涉及全桥系统的力流传递与变形协调。本文从系统角度梳理了诱因路径及损坏演化机理,提出以“预防性巡检—分级决策—精准维修—质量管控”为核心的长效养护方案。核心观点强调,伸缩缝养护应摒弃零散应急抢险模式,转而成为基于数据分析与全寿命管理的系统性工程。随着智能传感和无损检测技术的发展,状态评估将迈向实时监测与预警,为精细化、智能化管理提供支撑。管理部门需摒弃“重主体、轻附属”观念,加大技术支持与资金保障力度,从而提升桥梁整体服役寿命与运营安全。

参考文献

- [1] 刘玉攀,陈文荣.公路桥梁伸缩缝疲劳寿命评估方法研究[J].桥梁建设,2022,52(3):76-83.
- [2] 周建庭,杨俊.考虑环境腐蚀的桥梁伸缩缝耐久性设计优化[J].中国公路学报,2023,36(5):112-121.
- [3] 张劲泉,李鹏飞.在役桥梁伸缩缝病害成因分析与养护策略[J].公路交通科技,2021,38(8):58-66.
- [4] 王春生,赵磊.模数式伸缩装置橡胶带老化性能及更换周期研究[J].建筑材料学报,2022,25(2):345-352.