

装配式桥梁接缝构造耐久性问题与改进方法探讨

卢忠红

云南交投公建工程养护有限公司 云南 昆明 650228

【摘要】：装配式中小跨径混凝土肋梁桥在我国公路桥梁建设中占据着重要地位，但在桥梁运营过程中接缝位置的开裂、渗水碱蚀及破损失效等现象，成为了装配式中小跨径混凝土肋梁桥当下面临的严重问题。装配式桥梁接缝构造的耐久性直接影响桥梁整体性能与使用寿命。接缝处因材料性能差异、施工工艺缺陷及环境侵蚀作用，易出现界面开裂、渗水及钢筋锈蚀等问题。针对这些问题，相关部门可采取合理化措施来提升其耐久性。本次研究提出了一些创新性的多元化改进方案，如高韧性补偿收缩混凝土、双层钢筋网片铺装层及多层复合防水结构等再与无损检测与健康监测系统结合起来，以更好地实现接缝全生命周期性能管理，为装配式桥梁构建的耐久性设计提供理论方面的依据与重要的技术支持。

【关键词】：装配式桥梁；接缝构造；耐久性；补偿收缩混凝土；智能监测

DOI:10.12417/2811-0536.26.05.027

引言

装配式桥梁有着独特的优势，如施工效率高、环境影响小等，这也是市桥梁工程建设的重要方向。但是，装配式桥梁的接缝构造是预制构件间的连接薄弱性环节，其耐久性问题会长期制约桥梁结构安全。接缝处往往会因混凝土产生的收缩变形不协调等，或界面粘结性能退化、环境侵蚀作用等，导致出现系列病害，让桥梁整体性能不断劣化。文章对接缝构造耐久性的失效机理深入分析，提出系列相应的改进及优化方法，以确保装配式桥梁长期稳定性，对于延长其整体寿命有着深远意义。

1 装配式桥梁接缝构造耐久性失效机理分析

1.1 材料性能差异导致的界面失效

装配式桥梁接缝一般以湿接缝或干接缝等方式来进行，湿接缝以现浇混凝土的形式来实现预制构件的连接。但现浇混凝土与预制构件存在龄期上差异，收缩变形不协调则会让应力集中于界面处。相关实践表明，湿接缝混凝土在硬化过程中，因水化热释放、自收缩作用等，这会与预制构件界面处形成微裂缝，裂缝宽度可达到0.1—0.3mm。这类的裂缝可为水分子、氯离子等的渗透提供通道，会让钢筋锈蚀速率加快。如，某跨河装配式桥梁的湿接缝在服役满5年后，界面处的钢筋锈蚀面积占比达到了12%，这比预制构件本体（3%）有明显降低。导致界面失效的另一诱因则是材料性能不匹配。传统的接缝材料多是使用普通的硅酸盐水泥，其抗渗性、抗裂性、粘结强度等不能更好地满足复杂环境的需求。相关实践表明，普通的混凝土湿接缝在冻融循环50次后，相对动弹性模量则会大幅下降，会降至初始值的75%左右，而高韧性的补

偿收缩混凝土仅下降至90%左右。接缝材料、预制构件等弹性模量差异过于明显时，会让界面处应力出现分布不均现象，也会让裂缝扩展现象加剧。

1.2 施工工艺缺陷引发的质量隐患

装配式桥梁接缝耐久性的直接原因是施工工艺控制不当。湿接缝施工中，要经历多道工序，如钢筋绑扎、立模、浇筑及养护等，这些环节任何一个出现疏漏，则会出现质量方面的缺陷。例如，接缝处混凝土振捣不密实，则会形成一些质量缺陷，如蜂窝、孔洞等，这样会降低结构密实度；养护不足也会让混凝土早期强度发展缓慢，会增加开裂风险。如某市政装配式桥梁施工中，因为湿接缝养护过程中，温度控制不当，低于5℃，则让混凝土28d抗压强度只达到了设计值的82%，桥梁服役3年后，接缝处的渗水率与规范值相比较，则高出了40%。干接缝施工中，则面临着一些挑战，如构造复杂、精度要求高等。传统的铰接缝构造则要利用预制构件间的剪力键来传递荷载，不过，剪力键的尺寸若出现偏差，如±2mm，则会让接触面应力出现分布不均现象，局部应力则集中系数可达2.5。另外，干接缝的密封材料性能若出现退化，如硅酮密封胶老化后弹性恢复率下降至60%，这样也会让接缝的防水性能大幅降低，导致出现渗水问题。

1.3 环境侵蚀作用导致的性能退化

装配式桥梁接缝若长时间暴露于复杂环境下，要受到多重影响，如冻融循环、氯离子侵蚀、碳化作用等。冻融循环会让混凝土内部出现微裂缝扩展，会让结构耐久性降低。实践表明，普通混凝土的湿接缝经过100次的冻融循环后，质量损失率达到3.2%，掺入

纤维的补偿收缩混凝土的质量损失率则只是 0.8%。氯离子侵蚀过程中,会损坏钢筋表面钝化膜,导致出现电化学腐蚀现象。如某沿海装配式桥梁接缝处的氯离子含量达到了 0.8% (混凝土的质量分数),远远超出了临界值 (0.05%),导致钢筋截面的损失率达到了 20%。碳化作用会让混凝土的碱性环境大幅降低,会减弱对钢筋的保护作用。相关实践表明,普通混凝土湿接处在 CO_2 浓度 0.03% 的环境中,碳化深度每年会增加 2—3mm,而掺入粉煤灰的混凝土碳化速率会降低 40%。另外,出现一些恶劣天气影响,如酸雨、盐雾等现象,会带来化学侵蚀,会让混凝土表面剥落现象进一步加速,让桥梁结构的承载能力大幅降低。

2 装配式桥梁接缝构造耐久性改进的意义分析

装配式桥梁接缝构造耐久性的改进,对于装配式桥梁的整体结构安全有着重要作用。接缝是桥梁不同构件间的连接部位,其性能会对桥梁的承载能力与稳定性造成直接影响。若接缝构造耐久性不足,会导致一些有害物质侵入,会引发系列问题,如钢筋锈蚀、混凝土劣化等,会让桥梁结构的强度等削弱,对行车安全造成威胁。因此,对于桥梁接缝构造设计进行改进,引入高性能密封材料与先进连接技术等,可对外界侵蚀介质进行有效阻隔,进一步延长桥梁使用寿命,让桥梁结构长期处于更安全、更可靠的状态。同时,耐久性改进还降低桥梁的全生命周期成本。传统接缝构造在长期应用中,常会因为存在耐久性不足现象,而需频繁维修或更换,这样会带来大量人力物力的浪费现象,还会对桥梁正常运营造成不利影响。耐久性优化的接缝构造,可让桥梁维修次数与维护成本有效减少,显著提升桥梁工程的经济效益。另外,改进接缝构造的耐久性还与当今的绿色可持续发展理念高度契合,可大幅降低资源消耗与废弃物的产生,推动桥梁工程面容向更环保、更高效的新方向,对于促进交通基础设施的可持续工有着深远影响。

3 装配式桥梁接缝构造耐久性改进方法

3.1 材料体系优化:高韧性补偿收缩混凝土

针对湿接缝材料性能不足问题,研发高韧性补偿收缩混凝土是关键。该材料通过掺入膨胀剂(如钙矾石型膨胀剂)及纤维(如聚丙烯纤维),实现收缩补偿与裂缝控制双重功能。试验表明,掺入 8% 膨胀剂及 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 聚丙烯纤维的混凝土,28d 限制膨胀率达 0.03%,较普通混凝土提高 60%;劈裂抗拉强度达 4.2MPa,较普通混凝土提升 25%。此外,该材料抗渗等级达 P12,可有效阻隔水分子及氯离子渗透。为进

一步提升材料性能,可引入纳米材料(如纳米 SiO_2)及橡胶颗粒。纳米 SiO_2 通过填充混凝土孔隙,降低孔隙率(从 18% 降至 12%),提高抗渗性;橡胶颗粒通过弹性变形吸收能量,降低裂缝扩展速率。某工程应用显示,掺入 5% 纳米 SiO_2 及 10% 橡胶颗粒的混凝土,湿接缝服役 5 年后渗水率较普通混凝土降低 70%,钢筋锈蚀面积占比仅 2%。

3.2 构造设计改进:双层钢筋网片铺装层

传统的铰接缝构造会因为存在剪力键尺寸偏差、接触力应力集中等现象,会让界面出现失效现象。改进方案可采取双层钢筋网片铺装层,以提高铺装层刚度来增强横向联系。此构造在铺装层内可设计上下两层 $\Phi 12\text{mm}$ 钢筋网,间距为 100mm,这样可形成三维受力体系。试验表明,双层钢筋网片铺装层可让接缝处的横向刚度提升 40%,裂缝宽度减小 50%。针对干接缝密封性能不足的问题,则可引入“粗糙面+界面剂”复合构造。预制构件接触面可引入凿毛处理,粗糙度 3—4mm,并涂刷环氧树脂等高分子聚合物界面。此构造可以机械咬合、化学粘结等双重作用,可提升界面粘结强度。黏结劈裂抗拉试验表示,粗糙面+界面剂构造的 7d 粘结强度可达到 2.8MPa,与光面构造相比是提升了 120%;28d 粘结强度则稳定在 3.5MPa,可更好地满足桥梁长期的服役需求。

3.3 防水体系升级:多层复合防水结构

装配式桥梁保持长期耐久性的核心环节则为接缝防水。传统的单层防水涂料往往会出现老化、开裂等现象,会导致失效。改进方案中,可引入“水基渗透防水剂+防水抗疲劳沥青混合料+密封胶”的多层复合防水结构。水基渗透防水剂则可渗入混凝土内部,形成不溶性的结晶体,对于水分子渗透进一步阻隔;防水抗疲劳沥青混合料会将级配(关键筛孔 1.18mm、0.075mm 控制)优化;还可以沥青成膜特性等,让孔隙率(至 1.5—2%)降低,让密水性能提升;如某跨海大桥工程应用中,多层复合防水结构让接缝处的渗水率下降至 $0.02\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,这与单层防水涂料相比,则降低了 90%;粘结强度则提升至 2.5MPa,与传统构造相比,提升了 60%。另外,此结构抗疲劳性能很优异,经过 100 万次的车辆荷载作用后,渗水率只增加了 $0.005\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,很好地满足了该桥梁的长期使用需求。

3.4 施工工艺控制:精细化作业与智能监测

施工工艺控制是保障接缝耐久性的基础。湿接缝施工需严格遵循“清洁—振捣—养护”三阶段控制:接缝面清洁采用高压水枪冲洗(压力 $\geq 0.5\text{MPa}$),确保无

杂物；混凝土浇筑采用分层振捣（每层厚度 $\leq 300\text{mm}$ ），振捣棒插入下层混凝土 50mm ，避免漏振；养护采用蒸汽养护（温度 $40\text{—}50\text{°C}$ ，湿度 $\geq 90\%$ ）或喷涂养护剂，确保混凝土早期强度发展。干接缝施工则需引入BIM技术进行精确定位。通过三维模型模拟接缝装配过程，优化构件尺寸偏差（控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内），减少现场调整时间。同时，采用智能吊装设备（如激光定位系统）实现构件精准对接，降低安装误差。为实时监控接缝性能，可部署无线传感器网络（WSN）。该系统集成应变计、温度传感器及湿度传感器，可实时采集接缝处应力、温度及湿度数据，并通过物联网平台传输至监控中心。当应力超过阈值（如 15MPa ）或湿度超过临界值（如 80% ）时，系统自动触发预警，指导维护人员及时处理。某市政桥梁工程应用显示，WSN系统可使接缝病害发现时间缩短 70% ，维护成本降低 40% 。

3.5 接缝健康监测与全生命周期管理：动态评估与预防性维护

装配式桥梁的耐久性管理，要从以往的被动维修转向主动防控方向，积极构建全生命周期监测体系，以实现动态评估。一是建立依据大数据的接缝性能退化模型，对关键予以整合，如材料性能参数（如混凝土收缩率、钢筋锈蚀速率）、环境作用数据（温度、湿度、氯离子浓度）及荷载历史信息等，以实现对接

缝的剩余寿命精准预测。如，某项目对5年环境与荷载数据实时采集，再依据有限元分析，发现湿接缝在氯盐环境下10年的锈蚀风险区域，主要集中于接缝边缘 20cm 范围内，这也为靶向维护提供了依据。二是开发便携式检测设备以实现快速诊断。引入超声波无损检测技术，对接缝内部空鼓、裂缝等缺陷精准评估，检测精度可达 0.1mm ；再将其与电化学阻抗谱法结合起来，对钢筋锈蚀实时监测，锈蚀速率测量误差则小于 5% 。三是构建预防性维护决策系统。基于监测数据对维护策略动态调整：当裂缝宽度超过 0.15mm 时，则会自动触发灌缝胶修补指令；当钢筋锈蚀面积占比达到 3% 时，则会启动阴极保护或局部修补流程。同时还可利用该系统对桥梁进行差异化维护，或以数字化平台记录维护历史，以为后续项目实施提供数据支撑。

4 结语

总之，装配式桥梁接缝构造耐久性受材料性能、构造设计、施工工艺及环境侵蚀等多重因素影响。相关部门可通过优化材料体系、改进构造设计、升级防水体系及强化施工工艺控制等，可显著提升接缝耐久性。未来研究需进一步探索新型材料（如自修复混凝土）及数字化技术（如数字孪生）在接缝耐久性设计中的应用，推动装配式桥梁技术向高效、智能、可持续方向发展。

参考文献：

- [1] 吴庆迎.装配式PC桥梁横向接缝抗剪性能研究[J].工程与建设,2024,38(05):107-111.
- [2] 刘恒亨.城市桥梁预制装配式桥墩的接缝构造研究[J].中国储运,2024,(02):162-163.
- [3] 夏强.装配式桥梁湿接缝混凝土变形及界面性能研究[J].混凝土与水泥制品,2020,(11):10-14.
- [4] 姚志立.装配式UHPC桥梁湿接缝模型试验及受弯性能研究[J].公路工程,2020,45(03):105-110.