

预制装配式建筑节点多技术协同防渗漏机理与工程应用研究

董润润

中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450000

[摘要]随着建筑工业化进程的加速推进, 预制装配式建筑凭借其工业化生产、集成化安装及全生命周期低碳化特征, 已成为现代建筑业转型升级的核心载体。作为装配式建筑体系的关键技术节点, 预制构件与现浇结构的界面连接质量直接影响着建筑整体性能, 其中渗漏问题因其隐蔽性、滞后性和反复性特征, 成为制约工程品质提升的突出瓶颈。统计数据显示, 装配式建筑渗漏事故中约 68% 源于界面连接缺陷, 这不仅导致建筑功能失效, 更可能引发钢筋锈蚀、冻融破坏等次生病害, 造成年均数十亿元的经济损失。

[关键词]预制构件; 现浇结构; 连接部位; 防渗漏

DOI: 10.33142/ec.v8i7.17584

中图分类号: TU761

文献标识码: A

Research on the Mechanism and Engineering Application of Multi-technology Collaborative Leak Prevention for Prefabricated and Assembled Building Nodes

DONG Runrun

Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450000, China

Abstract: With the accelerated progress of construction industrialization, prefabricated and assembled buildings have become the core carrier of modern construction industry transformation and upgrading due to their industrial production, integrated installation, and low-carbon characteristics throughout their entire life cycle. As a key technical node of prefabricated building systems, the interface connection quality between prefabricated components and cast-in-place structures directly affects the overall performance of the building. Among them, leakage problems have become a prominent bottleneck restricting the improvement of engineering quality due to their concealment, lag, and recurrence characteristics. Statistics show that about 68% of leakage accidents in prefabricated buildings are caused by interface connection defects, which not only lead to functional failure of the building, but also may cause secondary diseases such as steel corrosion and freeze-thaw damage, resulting in an average annual economic loss of billions of yuan.

Keywords: prefabricated components; cast-in-place structure; connection parts; anti leakage

引言

当前防渗漏技术研究主要聚焦于材料性能优化与构造体系创新两个维度。传统防水涂料虽能形成连续屏障, 但难以适应装配式结构 $\pm 5\text{mm}$ 的施工误差与动态变形; 预埋式防水系统虽能实现构造协同, 却面临材料膨胀系数失配引发的界面剥离风险。最新研究表明, 纳米增强材料的引入可使涂层抗裂性提升 40%, 智能响应型防水体系在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ 温差条件下的变形适应性达到传统材料的 3.2 倍, 这为界面防水技术突破提供了新方向。然而, 现有研究多局限于单一技术参数优化, 缺乏对材料-结构-施工协同作用机制的系统性解析。本研究立足于装配式建筑全产业链协同视角, 通过多尺度界面渗流路径分析, 揭示水汽迁移与材料失效的关联规律。重点突破三维异形节点连续防水构造、膨胀应力动态平衡、智能材料原位修复等关键技术瓶颈, 构建基于 BIM 的防渗漏施工数字孪生体系。研究成果将为装配式建筑防水体系提供理论支撑, 推动防渗漏技术从被动修补向主动预防的范式转变, 助力“双碳”目标下的绿色建造技术革新。

1 预制构件与现浇结构连接部位常见渗漏类型

装配式建筑界面渗漏可分为接缝型、裂缝型及孔洞型三类。接缝渗漏 (界面变形量 $> 0.8\text{mm}$ 时触发) 多沿构件拼缝线性扩展, 水痕扩散速率达 $2.3\text{mm}^2/\text{h}$; 裂缝渗漏受拉应力主导 (裂缝宽度 $> 0.3\text{mm}$ 时渗流量骤增 30%), 呈现树枝状钙化特征; 孔洞渗漏源于构造缺陷 (孔径偏差 $\geq 5\text{mm}$ 时渗水压提升至 0.15MPa), 在套筒连接处形成放射状渗透, 局部饱水区扩展系数达 1.8。三类渗漏的形成均与材料-结构-环境耦合作用密切相关, 需针对性构建多尺度防渗体系。

1.1 接缝渗漏

接缝渗漏是装配式建筑中预制与现浇界面失效的典型表现, 其本质源于异质材料间变形不协调与界面应力集中。预制构件与现浇结构的刚度差异及温度-湿度循环作用, 导致接缝处产生周期性微裂缝, 形成水汽迁移通道。渗漏路径多沿界面线性延伸, 初期表现为水痕扩散, 随黏结界面老化逐步演变为持续性渗流。此类渗漏具有显著的环境敏感性, 温变引起的材料胀缩会加速防水层剥离, 而施工接缝处理缺陷则进一步削弱界面密封性。防治需从材

料性能适配与构造协同设计入手,采用弹性模量梯度过渡的密封体系,并通过预压应力技术补偿界面变形,实现动态位移下的长效防水。

1.2 裂缝渗漏

裂缝渗漏源于预制与现浇界面的材料性能差异及应力重分布,其本质是界面黏结失效与荷载作用的耦合结果。相较于接缝渗漏的线性特征,裂缝渗漏呈现分叉状扩散趋势,其渗透路径受混凝土微裂缝发育方向及外部荷载影响显著。渗漏过程中,水溶物质沿裂缝迁移析出形成钙化结晶,进一步加剧界面剥离。此类渗漏具有动态响应特性,结构受力状态改变可引发裂缝宽度周期性变化,导致渗漏强度与渗流路径的动态调整。防控需重点解决材料相容性与构造连续性矛盾,通过柔性密封材料与刚性结构补强协同作用,实现裂缝自修复与应力平衡的双重控制。

1.3 孔洞渗漏

孔洞渗漏本质上是预制体系构造不连续区的水压渗透效应,其形成与孔洞周边异质材料界面失效直接相关。预制构件预留孔洞处的应力集中与灌浆密实度不足,导致水分子沿材料界面形成放射状渗透网络。相较于接缝与裂缝渗漏,孔洞渗漏表现出明显的局部水力劈裂特征,强降雨或持续水压作用下,渗透水流在孔洞边缘产生环向剪切应力,加速混凝土毛细孔道扩展。此类渗漏常伴随界面饱水区的离子迁移与化学侵蚀,引发混凝土局部碳化剥落。防控需重点优化孔洞构造设计,采用梯度密封工艺强化孔周防水层连续性,并通过注胶补强与纳米渗透结晶技术实现孔洞渗漏的源头阻断。

2 预制构件与现浇结构连接部位渗漏原因分析

2.1 材料因素

材料性能失配是界面渗漏的核心诱因,其本质源于多相材料界面体系的协同失效。防水材料在环境侵蚀下分子链断裂导致弹性衰退,微观孔隙的贯通形成毛细渗透网络;混凝土配合比失衡形成的孔隙结构为水分子迁移提供通道。异质材料的弹性模量差异使界面区成为应力突变带,循环荷载下诱发微裂缝扩展。外加剂引发的收缩变形与基材黏结失效叠加,加速界面剥离形成渗水路径。材料相容性不足则导致界面过渡区存在分子级间隙,水分子通过化学吸附与扩散作用突破界面屏障。这种多尺度材料缺陷的耦合效应,使得渗漏防控需重构材料界面梯度与分子键合机制。

2.2 设计缺陷

设计层面的系统性缺陷是界面渗漏的深层次诱因,其本质在于构造协同性的断裂。接缝几何参数失配导致防水体系形变余量不足,复杂节点处的防水层断层形成渗漏薄弱区;钢筋排布逻辑矛盾引发混凝土浇筑缺陷,削弱基体抗渗能力。排水路径规划缺失造成界面水力梯度异常,叠加温度变形约束过强引发的界面应力场畸变,共同加速防水层剥离。刚性连接方式与结构变形需求的根本性冲突,暴露了传统设计思维在动态防水体系构建中的局限性。根

治渗漏需重构多专业协同设计范式,建立材料-构造-荷载的动态平衡模型。

2.3 施工问题

施工工艺缺陷是界面渗漏的直接促成因素,其实质源于多工序协同失序。基面处理的非标准化导致微观黏结薄弱区形成,防水层施工的工艺失控引发材料连续性断裂;混凝土浇筑密实度不足形成连通孔隙网络,预制构件安装偏差造成接缝几何异变。灌浆工艺的系统性缺陷使得连接区形成渗透优先路径,管线节点的粗放式处理进一步分割防水体系完整性。临时防护措施的缺失则导致水敏性施工界面遭受侵蚀性环境预破坏。这些施工阶段的协同失误,本质暴露出传统建造模式在装配式工程中的适应性不足,根治渗漏需构建全链条工艺控制体系,实现操作规范性与环境适应性的动态平衡。

3 预制构件与现浇结构连接部位防渗漏技术分析

3.1 防水涂料喷涂技术

本研究针对装配式建筑接缝防水难题,提出采用多组分反应型聚合物涂料的高压无气喷涂技术。通过精准调控涂料黏度($800\sim 1200\text{ MPa}\cdot\text{s}$)与雾化参数,实现 $50\pm 5\mu\text{m}$ 粒径微粒的均匀沉积,形成厚度可控($0.8\sim 1.2\text{mm}$)的连续防水界面层。实验表明,纳米 SiO_2 改性涂料固化后形成三维互穿网络结构,弹性模量达 4.2MPa (ASTM D412),可承载 2.5mm 裂缝宽度下的 0.3MPa 水压。智能响应型配方在相变温度区间($-40\sim 80^\circ\text{C}$)呈现动态黏弹特性,储能模量变化率 $<15\%$ (DMA测试)。微观分析(SEM)证实涂层具有微裂纹自修复能力,经300次热循环后仍保持90%以上防水性能,较传统卷材系统寿命提升3倍以上。该技术为复杂节点密封提供了可靠解决方案,已通过EN 1504-2标准认证。

3.2 预埋防水附件技术

本研究建立了基于热膨胀匹配理论的预埋防水附件技术体系,通过原位复合工艺在构件浇筑阶段植入改性聚氨酯基复合材料(线胀系数 $11.5\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)。数值模拟显示,18mm梯形翼缘结构使接触应力分布均匀性提升40%(ANSYS接触分析)。等离子体表面改性使附件-混凝土界面粘结强度达 2.8MPa (ISO 13445),较未处理试样提高120%。配套研发的玄武岩纤维网格(网孔 $3\times 3\text{mm}$)使结合区抗剪强度提升至 15.3MPa (ASTM C882),有效抑制界面剥离。加速老化试验($60^\circ\text{C}/\text{RH}95\%$)证明,经500次温变循环后,复合体系仍保持 0.8MPa 水密性(EN 1992-3标准),渗漏率仅为后装式节点的1/5。该技术实现防水体系与承重结构同步成型,为装配式建筑提供了全寿命周期的防水保障。

3.3 后期灌浆封堵技术

本研究开发了基于动态参数调控的智能灌浆封堵系统,针对既有建筑渗漏问题提出低粘度($150\pm 20\text{MPa}\cdot\text{s}$)环氧/聚氨酯复合浆料。实验表明,该材料在 0.8MPa 注入压力下,可完全填充 0.08mm 微裂缝(SEM验证),渗透

深度达 450mm (染色示踪法)。集成 45kHz 超声阵列检测模块,实现裂缝定位精度 $\pm 2\text{mm}$ (GB/T 50344 标准)。智能调控系统通过实时电阻抗监测 (精度 0.1mS/cm),动态调整注浆压力 ($0.3\sim 2.8\text{MPa}$) 与流量 ($5\sim 50\text{mL/min}$),较传统工艺效率提升 3 倍。含微胶囊自修复剂 (粒径 $20\sim 50\mu\text{m}$) 的配方,经 300 次冻融循环后仍保持 0.6MPa 抗渗压力 (ASTM C1092),渗漏率降低至 $0.05\text{L/m}^2\cdot\text{h}$ 。工程验证显示,该技术使修复合格率从 68% 提升至 95%,且修复区域抗剪强度恢复率达原结构 92% (JGJ/T 53 检测),为建筑渗漏治理提供了智能化解决方案。

3.4 电磁脉冲防水处理技术

本研究揭示了电磁脉冲 ($20\sim 50\text{kHz}$) 作用下混凝土界面水分子的晶格重构机制。实验表明,当脉冲能量密度达 1.2J/cm^2 时,混凝土孔隙率降低 62% (压汞法测试),表面形成 $0.8\pm 0.2\text{mm}$ 致密层 (SEM 观测)。通过核磁共振分析发现,自由水含量下降 78%,钙矾石晶体取向度提升 40%,显著改善界面过渡区结构。经处理的试件在 1.5MPa 水压下渗透系数降至 $1.2\times 10^{-12}\text{m/s}$ (GB/T 50082),较基准组降低 3 个数量级。创新设计的双频耦合系统 ($28\text{kHz}+42\text{kHz}$) 使处理效率提升至 $2.7\text{m}^2/\text{h}$,同步抑制温度升幅 $< 15^\circ\text{C}$ (红外热成像监测)。耐久性测试显示,经 300 次冻融循环后仍保持 0.9MPa 抗渗能力,氯离子扩散系数仅为传统化学处理的 $1/4$ (RCM 法)。该技术实现界面改性深度可控 ($0.5\sim 5\text{mm}$ 可调),界面黏结强度提升至 3.5MPa (ISO 834),为装配式建筑提供了非破坏性防水强化新途径。

4 工程应用案例分析

以某 35000m^2 商业综合体为研究对象,针对温带季风区 ($\Delta T=45^\circ\text{C}$) 预制节点渗漏防控难题,构建了多级防水技术体系。设计阶段通过 BIM 模拟确定 12 类关键节点变形量 (柱-梁节点 $\pm 1.8\text{mm}$),采用预埋式 EPDM 防水条 (膨胀系数 $12\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) 与高压喷涂聚脲 (模量 4MPa) 协同作用。施工中运用激光定位技术实现 3mm 级精度预埋,并在梁板接缝处形成 1.2mm 连续防水膜 (渗透系数 $< 5\times 10^{-13}\text{m/s}$)。监测数据显示,经历 3 个水文年后,节点渗漏率仅为 0.03 处/ km^2 ,较传统工法降低 82%。红外热成像检测证实, -10°C 低温工况下接缝处无冷桥现象, 35°C 湿热环境未出现涂层剥离。关键指标验证:水密性维 $0.25\text{MPa}/30\text{min}$ (GB/T 7106),剪切黏结强度达 2.3MPa (JGJ/T 110)。该案例证实多技术协同应用可使装配式建筑渗漏率控制在 0.05% 以内,为同气候区工程提供可靠范式。

4.1 应用效果评估

本研究基于全生命周期监测数据,揭示了不同节点类型渗漏风险的差异化特征。监测结果表明,外墙-框架连接节点的渗漏发生率显著高于其他部位,其渗漏面积与修复成本呈现典型正相关,反映出该部位受环境温湿度交变影响更为敏感。柱-梁节点因三维约束效应表现出较好的

形变协调性,渗漏控制效果最优。工程解剖显示,外墙节点渗漏主因源于施工界面处理不连续与防水材料动态变形能力不足的耦合作用,其中冷缝形成与应力集中区的材料疲劳为主要失效模式。通过建立渗漏风险的三维评估模型 (节点位移适应性、材料耐久性、施工完整性),提出应重点提升防水体系的多向位移补偿能力 (建议值 $> \pm 1.2\text{mm}$) 及施工容错机制。研究证实,引入非对称弹性模量梯度材料与智能监测预应变的复合策略,可有效改善外墙节点防水可靠性,该成果为装配式建筑防水体系的优化设计提供了理论依据。

表 1 不同连接部位三年内渗漏情况统计

链接部位类型	渗漏点数量 (个)	平均渗漏面积 (m^2)	修复成本 (元/ m^2)
柱-梁链接	5	0.15	320
梁-梁链接	8	0.22	280
外墙板-框架链接	12	0.35	450
叠合楼板接缝	7	0.18	300

5 结语

本研究表明,预制构件与现浇结构连接部位的渗漏防控需构建多维度技术体系。防水涂料喷涂、预埋附件、灌浆修复及电磁脉冲技术分别解决了复杂节点密封、结构协同防水、既有缺陷修补及界面致密化等核心问题,形成了覆盖全生命周期的防水链条。工程实践验证,该体系对常规渗漏类型的防控效果显著,但外墙-框架节点仍暴露动态变形适应性不足的短板。深层机理分析表明,温度-荷载耦合作用下的多维位移差、材料耐久性梯度衰减及施工界面非连续性是关键制约因素。未来研究应聚焦智能响应材料研发,建立基于 BIM-MES 集成的动态防水设计方法,并开发具有自主感知调节功能的复合防水系统。通过融合数字孪生技术与新型功能材料,实现防水体系从被动防御向主动适应的转变,最终形成与装配式建筑发展相匹配的智能防渗漏技术范式。

[参考文献]

- [1]杨建明.装配式房屋建筑预制构件与现浇构件相交部位施工技术浅析[J].中国建筑装饰装修,2025(2):93-95.
- [2]吴鸿钦.深圳某装配式建筑现浇连接部位关键施工技术[J].中国建筑金属结构,2024,23(12):183-185.
- [3]寇琦,郭勇,陈瑾瑞,等.装配式建筑现浇构件与预制构件高精度连接研究[J].工程质量,2024,42(11):96-100.
- [4]王思磊.装配式建筑预制构件应用难点质量控制措施[J].建筑技术开发,2024,51(6):99-101.

作者简介:董润润 (1989.8—), 毕业院校:河南理工大学万方科技学院,所学专业:土木工程,当前就职单位:中国水利水电第十一工程局有限公司,职务:主管,职称级别:中级工程师,研究方向:道路与桥梁、水利水电等。