

装配式混凝土建筑预制构件接缝防水施工工艺优化与长期耐久性评估

李全利

融通地产（山东）有限责任公司，山东 济南 250000

DOI:10.61369/UAID.2025020042

摘 要： 本文聚焦装配式混凝土建筑预制构件接缝防水施工工艺优化与长期耐久性评估，分析了接缝防水机理与失效模式，阐述了防水基本原理、典型构造形式及特点，剖析了密封材料老化开裂、止水带破损等失效原因。从人、机、料、法、环五维分析，探讨了接缝防水施工工艺的关键影响因素，并结合 BIM 与数值模拟技术进行预优化，提出了精细化施工工艺优化方案，涉及基层处理、材料施工精度控制等方面。经过分析构建了接缝防水系统长期耐久性评估体系，包括耐久性评估指标体系、加速老化试验方法设计以及基于性能退化的寿命预测模型，为装配式建筑接缝防水的设计、施工、维护提供了全面的技术支持与决策依据。

关 键 词： 装配式混凝土建筑；预制构件；接缝防水；施工工艺优化

Optimization of Waterproof Construction Technology and Long-term Durability Evaluation for Prefabricated Concrete Building Joints

Li Quanli

Rongtong Real Estate (Shandong) Co., Ltd., Jinan, Shandong 250000

Abstract： This paper focuses on the optimization of waterproof construction technology and long-term durability evaluation for prefabricated concrete building joints. It analyzes the waterproof mechanism and failure modes of the joints, elaborates on the basic principles of waterproofing, typical structural forms, and characteristics, and examines the causes of failure such as aging and cracking of sealing materials and damage to waterstops. Through a five-dimensional analysis of manpower, machinery, materials, methods, and environment, the key influencing factors of the waterproof construction technology for joints are explored. Pre-optimization is carried out by combining BIM and numerical simulation techniques, and a refined construction technology optimization scheme is proposed, involving aspects such as base layer treatment and precision control of material construction. After analysis, a long-term durability evaluation system for joint waterproofing systems is established, including a durability evaluation index system, design of accelerated aging test methods, and a performance degradation-based life prediction model. This provides comprehensive technical support and decision-making basis for the design, construction, and maintenance of waterproof joints in prefabricated buildings.

Keywords： prefabricated concrete buildings; prefabricated components; joint waterproofing; construction technology optimization

引言

在实际工程中，预制构件接缝因构造复杂、施工难度大以及受环境因素影响显著等特点，成为防水失效的高发区域。接缝防水失效不仅会影响建筑的正常使用功能，还可能引发结构耐久性下降、室内环境恶化等一系列问题，给建筑安全带来潜在隐患。在此背景下，如何通过优化预制构件接缝防水施工工艺，提升接缝防水的可靠性与稳定性，成为当前装配式混凝土建筑发展中亟待解决的关键课题。深入研究接缝防水机理、分析影响施工质量的关键因素，并针对性地提出施工工艺优化方案，对于推动装配式混凝土建筑的可持续发展具有重要的理论与实践意义。基于此，本文聚焦装配式混凝土建筑预制构件接缝防水施工工艺优化与长期耐久性评估展开研究。

一、预制构件接缝防水机理与失效模式分析

（一）接缝防水基本原理

目前，我国装配式混凝土建筑采用的结构体系主要有 PCF 体系（内浇外挂）、PC 体系（预制剪力墙）和 PC+PCF 混合体系。无论采用哪类结构技术，其预制外墙接缝可归纳施工缝和安装缝两大类^[1]。预制构件接缝防水的核心是通过阻断渗透路径，结合疏导与密封，实现对流体的有效阻隔。其主要基于三大原理，材料密封原理，采用具备弹性、粘结性和耐候性的密封材料填充接缝，与构件表面紧密结合形成连续密封层，可适应构件位移，保持密封稳定性；压力平衡原理，通过设置排水通道和减压空腔，平衡接缝内外水压，减少渗透动力，避免水压积聚突破防线；多重防线协同原理，采用“密封材料 + 止水带 + 排水构造”等复合体系，各防线协同作用、相互补充，提升防水可靠性。

（二）典型接缝防水构造形式及特点

预制构件接缝的防水构造形式多样，根据构件类型、受力情况和使用环境的不同，常见的有嵌缝密封型构造、止水带型构造和组合防水型构造等^[2]。嵌缝密封型构造是在接缝预留凹槽嵌入密封材料形成密封层，特点是构造简单、施工便捷，适用于变形量小的接缝（如预制墙板水平及垂直接缝），密封材料需具备良好的抗拉伸、压缩性能和耐老化性。止水带型构造用橡胶、塑料等弹性止水带预埋于接缝两侧构件，借自身弹性变形保持与构件紧密接触，适用于变形量大的接缝（如预制桥梁伸缩缝、地下构件接缝），防水可靠且耐久性好^[3]。组合防水型构造结合多种防水措施形成多重防线（如止水带 + 密封材料 + 排水通道），综合各措施优点，适用于防水要求高的场合（如屋面、卫生间预制构件接缝），可靠性高且适应变形能力强。

（三）接缝防水系统失效模式及原因分析

密封材料老化开裂是失效模式中较为常见的一种，因长期暴露于自然环境，材料会变硬、变脆、失弹进而开裂，原因包括材料质量差、耐老化性弱，施工时粘结不牢有缺陷，接缝位移超材料允许范围^[4]。止水带破损或位移也会导致防水失效，安装时过度拉伸、挤压、划伤会造成破损；构件变形或沉降时，止水带与构件连接不牢会位移出现缝隙；止水带自身质量不合格也影响防水。排水系统堵塞使水无法排出，积聚后突破防水防线会导致失效，原因是施工时杂物未清理，使用中灰尘、泥沙等长期积累。构件位移过大破坏防水系统致使失效，因预制构件受多种因素产生位移超系统适应范围，源于设计估算不足、材料允许变形量小或施工安装精度不够。

二、接缝防水施工工艺关键影响因素与优化方案

（一）关键施工工艺影响因素分析

影响接缝防水施工质量的因素众多，可从人、机、料、法、环五个维度进行系统分析。人员方面，施工人员专业技能与责任心是核心，未经培训易出现操作问题，质量意识薄弱会忽视基层缺陷。机械方面，性能与调试状态有影响，如打胶枪压力不稳致

密封胶填充不均，切割工具精度不足使止水带尺寸偏差。材料方面，自身特性及现场状态关键，密封胶受温度影响大，止水带存放运输变形会影响密封效果，材料兼容性也需注意^[5]。方法方面，合理性是工艺核心，基层处理方式不当、密封胶填充顺序错误、流程衔接不畅都会影响质量。环境方面，影响不可控，温湿度、大风、雨水等都会对施工材料和过程产生不利影响。

（二）基于 BIM 与数值模拟的施工工艺预优化

随着建筑信息化技术的发展，BIM 与数值模拟技术为接缝防水施工工艺的预优化提供了高效手段，可在施工前规避潜在风险^[6]。BIM 技术通过构建三维模型，实现了接缝防水施工的可视化模拟。在模型中，可精确标注构件接缝的尺寸、角度、材料参数等信息，施工人员能直观了解各环节的空间关系，减少因二维图纸理解偏差导致的失误。同时 BIM 的碰撞检测功能能发现防水构件与其他专业的冲突，在施工前优化布局，减少交叉作业对防水施工的干扰。数值模拟技术则通过建立力学模型，预测施工过程中可能出现的问题。此外，数值模拟还能对极端环境下的施工效果进行预测，如模拟高温环境下密封胶的固化速率，调整施工时段或采取降温措施，保证材料性能达标^[7]。通过 BIM 与数值模拟的结合，施工团队可在虚拟环境中完成工艺方案的验证与优化，减少现场试错成本，提高施工的精准度和效率。

（三）精细化施工工艺优化方案

基于对关键工序和影响因素的分析，结合技术预优化结果，可从多方面制定精细化施工工艺优化方案。针对基层处理工艺优化，需根据不同构件材质制定专项处理标准。混凝土基层采用高压水枪冲洗 + 机械打磨的组合方式，确保表面粗糙度达到设计要求；金属构件接缝则需进行除锈处理，可采用喷砂工艺去除氧化层，再涂刷专用底漆增强粘结力。同时引入基层含水率检测设备，严格控制含水率 $\leq 8\%$ ，避免因湿度超标导致密封胶起泡^[8]。在防水材料施工精度控制方面，对于密封胶施工，采用“定位模板 + 自动化打胶”技术，根据接缝尺寸定制可拆卸模板，保证打胶边界整齐。同时使用带有压力反馈功能的自动打胶机，实时调节出胶量，确保胶层饱满度 $\geq 95\%$ 。止水带安装时，采用激光定位仪校准中心线，偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内，接头处采用热熔焊接工艺，焊接温度根据材料类型精确设定，并使用专用量具检查焊缝强度^[9]。环境适应性工艺调整上，建立施工环境监测机制，在现场布置温湿度传感器，实时传输数据至控制系统。当温度低于 5°C 时，对密封胶进行预热处理，并延长固化养护时间；湿度高于 85% 时，采用除湿机降低基层湿度，或选用潮湿环境专用密封胶。大风天气施工时，搭建临时防护棚，避免灰尘污染基层，同时增加基层清理频次。质量检验流程强化方面，引入无损检测技术。建立“工序交接卡”制度，上一道工序经检验合格并签字确认后，方可进入下一道工序，实现质量责任可追溯。

三、接缝防水系统长期耐久性评估体系构建

（一）耐久性评估指标体系建立

耐久性评估指标体系的建立需要综合考虑防水系统在长期使

用过程中可能受到的各种影响因素,以及其自身性能的退化表现,从而形成多维度、可量化的评价指标^[10]。材料性能方面,密封材料的弹性模量等物理力学性能变化是关键,能反映老化程度;止水带的硬度变化、耐老化性能也需评估。界面粘结性能上,粘结强度和破坏形式是重要指标,粘结强度过低有渗漏隐患,界面破坏占比过高说明存在问题。防水功能有效性中,水密性是核心指标,系统的变形适应能力也需评估。环境适应性指标包括耐候性、耐腐蚀性等,不同使用环境的建筑需增加针对性评估指标。

(二) 加速老化试验方法设计

加速老化试验是通过模拟自然环境中的老化因素,并强化其作用强度或缩短作用时间,在短期内预测防水系统长期耐久性的有效手段。设计科学合理的加速老化试验方法,需要结合实际使用环境和材料特性,选择合适的老化因素和试验参数。针对不同的老化因素,可设计多种专项加速老化试验。紫外线老化试验主要模拟阳光中的紫外线对防水材料的破坏作用,将试样置于紫外线老化箱中,控制紫外线强度、温度和冷凝周期,定期检测材料的外观和性能变化。热空气老化试验则用于评估高温环境对材料的影响,将试样放入恒温箱中,根据材料使用环境设定温度,持续一定时间,测试老化后的拉伸性能等指标。水老化试验可模拟雨水、地下水的长期作用,包括浸水试验和冻融循环试验。浸水试验将试样完全浸泡在蒸馏水中,控制水温,定期观察试样是否出现溶胀、开裂,并测试其粘结强度变化。冻融循环试验则更贴合寒冷地区的环境,将试样在-20℃冷冻4h后,再在20℃水中融化4h为一个循环,经过一定循环次数后,评估材料的性能退化程度。对于组合型防水系统,还需设计复合老化试验,即同时施加多种老化因素,如紫外线+水+温度循环的协同作用,更真实地模拟实际使用环境。在试验过程中,需合理确定加速倍数,通过对比自然老化与加速老化的性能退化规律,确保加速老化试验结果的有效性和准确性。

(三) 基于性能退化的寿命预测模型

基于性能退化的寿命预测模型是通过监测防水系统在老化过程中的性能指标变化规律,建立数学模型来预测其剩余使用寿命

,为维护决策提供科学依据。该模型的构建需要经历数据采集、退化规律分析、模型参数估计和模型验证等步骤。数据采集主要来自加速老化试验和现场长期监测,在加速老化试验中,按照设定的时间间隔对试样的关键性能指标进行检测,记录性能数据随老化时间的变化。现场监测则针对已投入使用的建筑,定期检查接缝防水系统的外观和性能,收集实际使用环境下的性能退化数据,这些数据能为模型的修正提供重要支持。退化规律分析是确定性能指标随时间的变化趋势。通过对采集的数据进行统计分析,发现多数防水材料的性能退化呈现出一定的规律性,如线性退化、指数退化或对数退化。常用的模型包括Weibull分布模型、退化轨迹模型等,Weibull分布模型可用于描述防水系统失效时间的分布规律,通过对性能退化数据的分析,确定模型的形状参数和尺度参数,从而计算出不同可靠度下的寿命。退化轨迹模型则直接基于性能退化曲线,建立性能指标与老化时间的函数关系,当性能指标下降到某一临界值时,对应的时间即为防水系统的寿命。模型参数估计可采用最小二乘法、极大似然估计等方法,根据试验数据求解模型中的未知参数,使模型能准确拟合性能退化曲线。模型验证则通过对比预测结果与实际观测数据,评估模型的预测精度,若误差较大,需对模型进行修正和优化,确保预测结果的可靠性。

四、关键词

本文围绕装配式混凝土建筑预制构件接缝防水施工工艺优化与长期耐久性评估展开了系统研究。通过对防水机理、失效模式的剖析,明确了接缝防水的核心要点与薄弱环节;借助对施工工艺影响因素的分析及BIM、数值模拟等技术的应用,提出了精细化的施工工艺优化方案,为提升施工质量提供了切实可行的路径;构建的长期耐久性评估体系,包括评估指标、加速老化试验及寿命预测模型,为接缝防水系统的长期性能把控提供了科学工具。这些研究成果不仅丰富了装配式混凝土建筑接缝防水的理论体系,更为工程实践中的设计、施工与维护决策提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 黄频,肖阿林,郭健.装配式混凝土建筑预制外墙接缝防水设计与施工技术探讨[J].中外建筑,2019,(06):282-283.DOI:10.19940/j.cnki.1008-0422.2019.06.092.
- [2] 吴思杉,田泽辉,王礼建,等.装配式混凝土建筑预制外墙接缝防水技术研究[J].四川建筑,2021,41(S1):141-143.
- [3] 蔡泽勇,钟才根.基于构件信息流的装配式混凝土建筑项目工程监理的方式[J].建设监理,2018,(04):54-58.DOI:10.15968/j.cnki.jsjl.2018.04.017.
- [4] 李长太.装配式混凝土建筑预制外墙接缝防水技术研究[J].中国建筑防水,2018,(16):25-27.DOI:10.15901/j.cnki.1007-497x.2018.16.008.
- [5] 朱卫如,燕冰.装配式建筑用改性硅酮密封胶特点与应用要求[J].中国建筑防水,2018,(2):19-23.DOI:10.15901/j.cnki.1007-497x.2018.02.005.
- [6] 宋松树,杨根文,陈超建等.浅谈装配式建筑外墙节点防水[C].//湖南省土木建筑学会施工专业学术委员会2017年学术年会论文集.2017:197-200.
- [7] 王雪辉.预制装配式建筑外墙防水密封现状及存在的问题[J].中小企业管理与科技,2018,(32):187-188.
- [8] 朱卫如.装配式建筑密封防水系统[J].混凝土世界,2019,(2):36-43.DOI:10.3969/j.issn.1674-7011.2019.02.007.
- [9] 朱卫如.装配式建筑及装饰混凝土密封防水系统[C].//第二届中国国际装饰混凝土技术与应用大会论文集.2017:113-120.
- [10] 曹辉.装配式建筑混凝土结构工程施工技术要点分析[J].中国水泥,2024,(11):112-114.DOI:10.3969/j.issn.1671-8321.2024.11.032.