

DOI: 10.7672/sgjs2025210001

装配式混凝土建筑外墙接缝防水技术综述*

张东波,许清风,王卓琳,张永群,冷予冰,陈溪

(上海市建筑科学研究院有限公司上海市工程结构安全重点实验室,上海 200032)

[摘要] 总结装配式混凝土建筑外墙接缝类型及常见缺陷,介绍现有外墙接缝防水构造及相关密封材料,分析外墙接缝产生渗漏水的原因和相关施工质量检测技术,并探讨外墙接缝防水技术发展趋势。实际工程通常采用构造防水和材料防水相结合的方式进行接缝防水,对于不同接缝类型应选取合理的防水形式。应选取高黏结性,强抗位移能力,优异耐候性、可装饰性和耐污染性的密封胶,如改性硅烷聚醚密封胶和改性硅烷聚氨酯密封胶。外墙接缝发生渗漏水的主要原因包括防水构造设计不合理、施工工艺精度不足、防水材料和措施选择不当、缺乏有效的接缝施工质量检测技术等,应发展智能化水平高、检测结果可靠的无损检测技术,并制定相应的技术标准和管理制度,培养专业技术人员进行定期检查和维修,以提高检测效率,降低检测成本。

[关键词] 外墙;装配式;接缝;防水;密封胶;检测

[中图分类号] TU398

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)21-0001-08

Overview of Waterproofing Technology for the External Wall Joint in the Prefabricated Concrete Building

ZHANG Dongbo, XU Qingfeng, WANG Zhuolin, ZHANG Yongqun, LENG Yubing, CHEN Xi

(Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The types and common defects of the external wall joints in the prefabricated concrete buildings are summarized and the existing waterproofing structures and related sealing materials is introduced. This paper analyzes the causes of water leakage in exterior wall joints and related construction quality detection technology, and discusses the development trend of exterior wall joint waterproofing technology. In practical engineering, a combination of structural waterproofing and material waterproofing is commonly used for joint waterproofing. Reasonable waterproofing forms should be selected for different types of joints. Sealants with high adhesion, strong displacement capacity, excellent weather resistance, decorability, and pollution resistance, such as modified silane polyether sealants and modified silane polyurethane sealants, are recommended. The main reasons for water leakage in external wall joints include unreasonable waterproofing structure design, insufficient construction process accuracy, improper selection of waterproofing materials and measures, and lack of effective joint construction quality testing technology. To address these issues it is essential to develop non-destructive testing technology with high intelligence and reliable testing results, and formulate corresponding technical standards and management systems. Meanwhile, professional technical personnel should be trained for regular inspection and maintenance. These measures can enhance testing efficiency and reduce testing costs.

Keywords: external walls; prefabricated; joints; waterproofing; sealant; testing

0 引言

装配式建筑于17世纪初起源于欧洲,其建造方式是预制构件在工厂生产后运输至施工现场进行拼装,其中预制构件包括内外墙板、叠合楼板、框架梁、框架柱、楼梯、阳台、空调板、装饰构件等,涵盖

*国家重点研发计划(2022YFF0609200);上海市自然科学基金(22ZR1453700)

[作者简介] 张东波,博士,高级工程师, E-mail: chinamath@163.com

[通信作者] 许清风,博士,正高级工程师, E-mail: xuqingfeng@sribs.com

[收稿日期] 2025-05-05

了建筑物各部位。与传统现浇建筑相比,装配式建筑实现了标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修和信息化管理,符合当前绿色施工要求,可提高施工效率,减少劳动消耗,已成为建筑业技术升级的必然选择^[1-2]。

装配式建筑按预制构件材料分为预制钢结构、预制木结构和预制混凝土结构,其中预制混凝土结构工艺技术成熟度高、防火性能突出、建筑成本低,在实际工程中的应用最广泛。

装配式混凝土结构体系包括框架结构、剪力墙结构和模块化结构,其中框架结构主要用于需开敞大空间的厂房、仓库、商城、停车场等建筑,剪力墙结构主要用于高层、小高层民居住宅等建筑^[3]。

建筑防水是提升装配式混凝土建筑使用功能的关键因素之一。传统建筑渗漏水薄弱部位包括窗户、砖墙之间的缝隙和厨卫间等,装配式混凝土建筑采用预制构件加节点现浇或套筒灌浆连接,凸窗在车间生产线上进行装配,解决了传统建筑中常见的渗漏水问题。但相较于传统现浇建筑,装配式混凝土建筑外墙存在大量水平、竖向接缝或构件与现浇连接的施工缝。此类缝隙处空间狭窄,施工难度大,易出现密封不当、孔洞、分层等缺陷,且属于隐蔽工程,缺陷不易被发现。受环境因素和材料老化影响,接缝处缺陷易引发渗漏水问题,渗漏水发生后接缝又易成为水渗透的通道,造成装饰材料变形、发霉、翘曲、空鼓、脱落,墙体发潮、开裂、脱落,甚至钢筋锈蚀等,不仅影响结构使用功能,甚至影响结构安全性能^[4-6]。同时,渗漏水难定位、复合保温外墙板不易修复等因素大大增加了装配式混凝土建筑外墙渗漏水治理难度和成本,因此保证外墙接缝处施工质量对于提升装配式建筑使用功能至关重要。

本文以剪力墙结构为例,总结装配式混凝土建筑外墙接缝类型及常见缺陷,介绍现有外墙接缝防水构造及相关密封材料,分析外墙接缝产生渗漏水的原因和相关施工质量检测技术,并探讨外墙接缝防水技术发展趋势,以为装配式混凝土建筑外墙接缝施工质量的提高提供参考。

1 装配式混凝土建筑外墙接缝类型与常见缺陷

1.1 接缝类型

1) 依据方向分类

装配式混凝土建筑外墙接缝按方向可分为水平接缝、竖向接缝、L形竖向接缝和十字接缝,其典型构造如图1所示^[7-8]。装配整体式结构梁端有竖

向接缝,柱端有水平接缝,剪力墙有水平接缝。预制构件接缝处钢筋贯通,通过后浇混凝土、灌浆料或坐浆料连为整体^[3]。竖向接缝常用于预制墙板水平钢筋的连接,通过搭接的方式将2片墙板水平预留钢筋进行连接,使用模板进行封装,浇筑混凝土后形成整体。水平接缝用于预制构件竖向钢筋的连接,施工工艺包括坐浆法和灌浆法。坐浆法将水泥基坐浆料铺设在水平接缝连接面上,将预制构件中每个灌浆套筒或波纹管底部封堵,坐浆料凝固后进行套筒灌浆。灌浆法采用水平接缝连通腔灌浆施工,用坐浆料将竖向预制构件水平接缝四周密封,或分隔成多段分别进行密封,多个套筒在同一连通腔内通过底部接缝相连,封缝坐浆料凝固后通过连通腔进行多套筒同时灌浆。

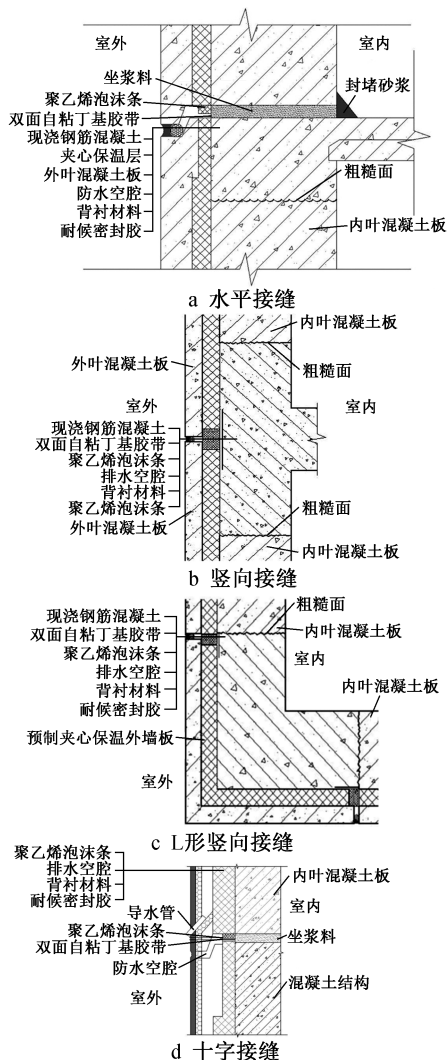


图1 装配式混凝土建筑外墙典型接缝类型

Fig. 1 Typical types of the external wall joints in the prefabricated concrete buildings

底部接缝为水平接缝,指上下层预制构件现场拼装时的预留缝,主要承受水平方向的剪力,传递

竖向荷载,其质量直接关系到整个结构的使用功能和性能。底部接缝通常具有一定高度,《JGJ 1—2014《装配式混凝土结构技术规程》》规定底部接缝高度宜为 20mm^[9]。当底部接缝采用坐浆法施工时,接缝相当于上下层剪力墙之间的现浇带,介质环境相对简单;当底部接缝采用灌浆法施工时,其内部灌浆施工属于隐蔽工程,接缝构造变得复杂。

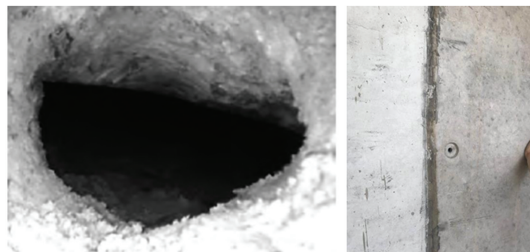
装配式混凝土建筑外墙竖向接缝渗漏水概率较低,渗漏程度较轻;水平接缝、十字接缝渗漏水概率较高,渗漏水发生后对室内墙面的影响较大,有时 1 条水平接缝渗漏水整个墙面都会潮湿。

2) 依据功能分类

装配式混凝土建筑外墙接缝按功能可分为施工缝和安装缝^[10]。施工缝是预制构件与后浇混凝土的结合面,包括预制外墙板侧面与现浇混凝土间的竖向接缝及墙板顶面与现浇混凝土间的水平接缝,防水关键是确保连接部位预制墙板粗糙面成型效果。安装缝指预制外墙板底面与现浇混凝土间的水平接缝及预制构件间的接缝。对于预制外墙板底面与现浇混凝土间的水平接缝,采用高性能灌浆料填充,实现结构材料自防水;对于外挂墙板及预制三明治外墙外叶板的接缝,采用打密封胶结合空腔排水的方式进行防水。

1.2 接缝常见缺陷

装配式混凝土建筑外墙接缝属于隐蔽工程,受施工工艺、施工技术、管理和环境等因素影响,在施工过程中易产生灌浆、坐浆质量缺陷和密封缺陷,对于采用灌浆料或坐浆料施工的接缝,其常见缺陷类型为不密实、开裂^[11-13],如图 2 所示;对于采用密封胶、密封膏等密封材料施工的接缝,其常见缺陷类型包括空鼓、结块、黏结不良、脱胶、发霉和开裂^[14-15],如图 3 所示。另外,外墙接缝被杂物堵塞、相邻墙板错台、缝宽过小或偏差大等也是引起接缝处渗漏水的缺陷形式,如图 4 所示。



a 不密实

b 开裂

图 2 装配式混凝土建筑外墙接缝浆料质量缺陷

Fig. 2 Quality defects of grouting material of the external wall joints in the prefabricated concrete buildings



a 空鼓

b 黏结不良

c 脱胶

d 开裂

图 3 装配式混凝土建筑外墙接缝密封缺陷

Fig. 3 Sealing defects of the external wall joints in the prefabricated concrete buildings



a 杂物堵塞

b 墙板错台

c 缝宽过小

图 4 装配式混凝土建筑外墙接缝其他缺陷

Fig. 4 Other types of defect of the external wall joints in the prefabricated concrete buildings

2 装配式混凝土建筑外墙接缝防水方法、形式与密封材料

2.1 接缝防水方法

在风压、重力、表面张力、毛细作用等因素共同作用下,雨水可能通过预制外墙接缝向室内渗透,因此接缝防水是装配式建筑防水重点。装配式混凝土建筑防水体系按防水部位分为主体结构防水和接缝防水,前者通过结构自防水和附加防水层进行防水,后者采用构造防水与材料防水相结合的形式阻断水的通路^[6],如图5所示。构造防水利用合适的构造形式进行防水,如采用外低内高企口缝、设置截水凹槽和排水空腔构造等,水平接缝常采用外低内高企口缝形式,竖向接缝常采用双直槽缝形式。材料防水是依靠防水材料阻断水的通路,如接缝嵌填耐候密封胶等防水材料、外挂墙板周边设置橡胶气密条等^[7]。防水材料分为防水混凝土、防水砂浆、防水卷材、防水涂料、密封材料、灌浆材料和新型防水材料等,可根据不同防水结构部位选择合适的防水材料。

实际工程中常采用构造防水与材料防水相结合的方式方法进行接缝防水,如在预制墙板上部接缝边缘设置2处企口,企口拼接形成沟槽,沟槽内填充防水密封材料,墙板上部接缝处涂密封胶,以防止墙板上部与梁、柱之间因材料差异变形引起裂缝渗漏水;在墙板上部接缝边缘设置倒角,防水密封材料填入企口拼接形成的凹槽内,阻止水从接缝处流入;墙板上部凹槽内填充防渗透材料,水进入时会形成局部水囊,实现以水防水。

2.2 常见防水形式

1) 开放式线防水形式

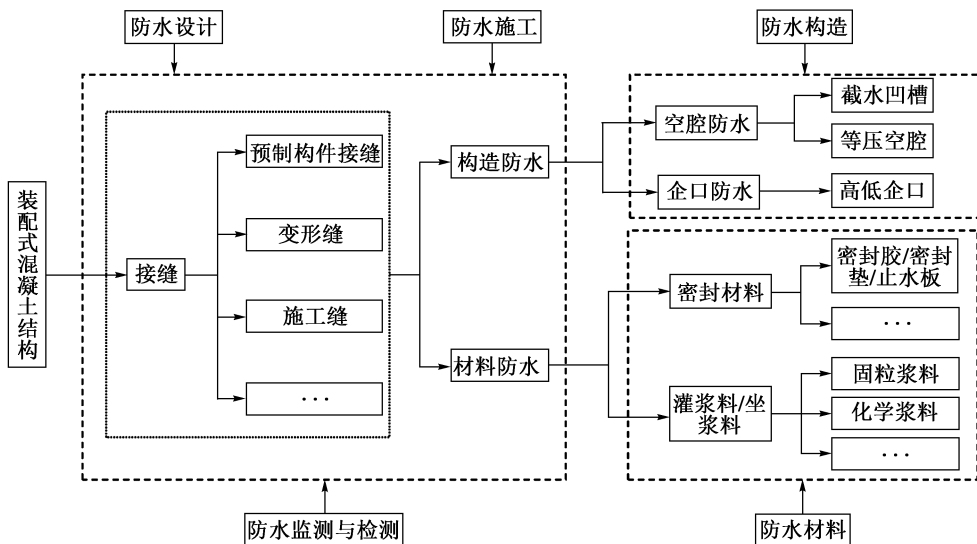


图5 装配式混凝土建筑外墙接缝防水体系

Fig. 5 Waterproof system of the external wall joints in the prefabricated concrete buildings

该形式施工时无须打胶,质量易控制和检验,但所用耐候性橡胶止水条价格较高,预埋橡胶条难以更换^[8]。

2) 封闭式线防水形式

该形式采用内外3道防水、疏堵结合,防水效果好,但施工要求高,所需高性能耐候胶成本高^[8]。

3) 外侧排水空腔及打胶、内侧依靠现浇部分混凝土自防水的防水形式

该形式施工工艺简单,施工速度快,实际应用最广泛,但防水质量难以控制,空腔堵塞时有发生,一旦内侧混凝土发生开裂将直接导致接缝防水失效^[8]。

2.3 接缝密封材料

装配式混凝土建筑外墙接缝防水材料包括密封材料及其配套材料。密封材料分为不定型密封材料和定型密封材料,其中不定型密封材料随密封面形状变化而变形,有一定黏结性,包括密封胶和密封膏等,可填充预制构件接缝^[14-15]。

密封胶是外墙接缝的第一道防水措施,其性能优劣直接影响防水质量。密封胶按组成材料分为单组分和双组分密封胶。外墙受外界环境影响较大,构件接缝常发生变化,因此固化时间短的双组分密封胶更适用于装配式建筑接缝。目前常用的建筑密封胶主要有硅酮密封胶、聚氨酯密封胶、改性硅烷聚醚密封胶、改性硅烷聚氨酯密封胶。常用密封胶性能对比如表1所示^[14-16]。

对于装配式混凝土建筑,外墙接缝密封胶应具有良好的黏结性、较强的抗位移能力与蠕变性、优异的耐候性、良好的可装饰性和耐污染性。通过综合对比,改性硅烷聚醚密封胶和改性硅烷聚氨酯密

密封胶性能优于其他密封胶,是外墙接缝首选密封材料。

表 1 装配式混凝土建筑外墙接缝常用密封胶性能对比
Table 1 Comparison of the performance of commonly used sealants for the external wall joints in the prefabricated concrete buildings

密封胶性能	密封胶种类			
	硅酮密封胶	聚氨酯密封胶	改性硅烷聚醚密封胶	改性硅烷聚氨酯密封胶
抗位移能力	好	好	好	好
黏结性	好	好	很好	很好
耐候性	很好	普通	好	很好
耐污染性	差	好	好	好

3 装配式混凝土建筑外墙接缝渗漏水分析

3.1 渗漏水情况

通过调研上海地区装配式混凝土建筑外墙使用功能,发现水平接缝、竖向接缝和窗框等部位是易发生渗漏水的薄弱点^[17],如图 6 所示,接缝处在淋水试验时发生了明显的渗漏水。已有研究与调研结果表明,我国装配式混凝土建筑渗漏水现象时有发生,与发达国家存在差距^[17]。



a 水平接缝

b L形竖向接缝



c 接缝及窗框

图 6 装配式混凝土建筑外墙接缝渗漏水

Fig. 6 Seepage water at the external wall joints in the prefabricated concrete buildings

3.2 渗漏水原因分析

装配式混凝土建筑外墙接缝发生渗漏水的主要原因包括防水构造设计不合理、施工工艺精度不足、防水材料和措施选择不当、缺乏有效的接缝施工质量检测技术等^[6,8]。

1) 防水构造设计不合理

外墙接缝防水构造设计方案未采用多道防水或采用多道防水时防水层主次不明;防水设计时仅考虑防水压力作用,未考虑重力、表面张力、毛细作用、风与水压力等因素的综合作用,导致防水构造设计方案不合理,存在渗漏水风险。

2) 施工工艺精度不足

预制构件在运输、拼装过程中发生破损,安装精度不足,导致渗漏水;预制构件之间接缝施工宽度超过允许范围,密封材料和预制构件间压紧力不足,导致渗漏水;预制构件拼装过程中接缝处杂物、残留物清理不及时,造成接缝处不密实,导致渗漏水;接缝处缝隙过窄,降低密封材料施工质量,导致渗漏水;预制构件拼接面为光滑面,如果未进行粗糙处理,预制构件拼接面与现浇混凝土之间难以有效结合,易形成施工冷缝,存在渗漏水隐患。

3) 防水材料和措施选择不当

密封胶是装配式混凝土建筑外墙防水的第一道防线,市场上密封胶种类繁多,质量参差不齐,如果外墙接缝密封胶选用不当,密封胶固化时间或施工质量不达标时会造成空鼓、黏结不良、脱胶、开裂、发霉等问题,严重影响防水质量。同时,接缝处涂料开裂、止水条/板黏结不牢、未涂刷防水涂料等也可造成接缝渗漏水。

4) 缺乏有效的接缝施工质量检测技术

外墙接缝通常外覆密封材料和装饰材料,属于隐蔽工程,缺陷不易发现,渗漏水难以定位,检测难度大,当前的检测方法主要为超声波法和淋水试验法,均存在一定局限性。

4 装配式混凝土建筑外墙接缝施工质量检测技术

装配式混凝土建筑外墙接缝形式多样,施工难度大,易出现缺陷,有关规范要求对外墙接缝施工质量进行检测^[18-22]。

4.1 超声波法

超声波法适用于装配式混凝土建筑外墙底部接缝质量检测。高润东等^[11]应用直径 10mm、工作频率 250~500kHz 的新型换能器,采用对测法对剪力墙底部接缝中预设的多孔泡沫缺陷进行了检测(钢筋、木块等材料不影响检测结果),并在实际工程中准确识别了底部接缝中的孔洞和不密实缺陷。张富文等^[12]采用 UK1401 型超声检测仪,利用同侧非耦合超声波法,采用直径 3mm 干耦合探头(固定 2 个干耦合探头之间的距离为 150mm)进行声速测量,通过声速变化对剪力墙底部接缝中的缺陷进行了有效识别,该方法适用于狭长接缝的快速质量检

测。石平府等^[13]采用直径17mm、中心频率500kHz的高频小直径换能器,在实验室和工程现场采用对测法对剪力墙和预制柱底部接缝灌浆缺陷进行了检测,通过综合判断声时、声速和波幅,有效识别了底部接缝中的孔洞、多孔泡沫、塑料垫块和PVC管线等缺陷。由于剪力墙底部接缝狭窄,与超声换能器尺寸接近,工程应用时为保证缺陷不被遗漏,可采用平测法或斜测法与对测法相结合的方式,并减小测点间距,提高检测结果的有效性。

超声波法使用的换能器有一定尺寸,仅适用于剪力墙底部接缝质量检测,无法应用于其他类型水平接缝、竖向接缝、L形竖向接缝和十字接缝质量检测,适用范围窄。同时,该方法要求测点处表面平整,且需逐点检测,检测效率低。

4.2 密封胶外观质量检测法

装配式混凝土建筑外墙接缝密封胶外观质量检测项目包括气泡、结块、析出物、开裂、脱落、表面平整度、注胶宽度、注胶厚度等,可用观察或尺量的方法进行检测^[23],但存在较大的不确定性,检查结果可靠度低^[14],且无法识别密封胶内部缺陷。

4.3 拉拔试验法

黏结性是密封材料与基层黏结程度的表征,是保证装配式混凝土建筑外墙接缝密封防水性能的关键^[15]。仲小亮等^[15]参考JGJ/T 110—2017《建筑工程饰面砖粘结强度检验标准》中的现场拉拔试验法对密封胶黏结性进行检测,验证了拉拔力大小可反映密封材料与基层黏结性,可对密封胶黏结性进行评估,但该方法为破损检测,检测后需及时修复。

4.4 淋水试验法

装配式混凝土建筑外墙渗漏检测主要通过淋水试验结合目视观察的方法进行,淋水重点是墙板十字接缝处、墙板与现浇结构连接处及窗框等接缝部位^[10,24]。淋水结束后,检查外墙外部打胶部位是否有脱胶现象,排水管是否排水顺畅,外墙内侧是否有水印、水迹等渗漏点。淋水试验结果直观,但时效性差,不能完全模拟建筑使用过程中遭受的长期风雨环境,且费时耗力,成本高,更适用于整体防水性能检测。

4.5 其他方法

除上述装配式混凝土建筑外墙接缝质量检测技术外,赵建华等^[25]采用微波测湿技术对蒸压轻质混凝土墙板接缝周边含水率进行测量,通过含水率大小判断外墙接缝是否存在渗漏隐患,并进行了工程应用。还有学者采用红外热成像技术检测外墙接缝及其周边温度分布^[26-28],通过温差判断接缝是

否存在渗漏点。

5 装配式混凝土建筑外墙接缝防水技术发展趋势探讨

装配式混凝土建筑外墙接缝是整个结构的防水薄弱点,受设计、施工、材料、检测和后期维护等多个环节的综合影响。某个环节出现问题可能造成外墙渗漏水,因此未来装配式混凝土建筑外墙接缝防水技术发展应确保每个环节的防水质量。

1)进行装配式混凝土建筑外墙接缝防水设计时,综合考虑受力与防水的共同作用^[6],并考虑墙板移动对接缝防水性能的影响,确保接缝宽度满足主体结构层间位移、密封材料变形能力和施工误差、温差引起的变形要求,且应 $\geq 15\text{mm}$ ^[9]。

2)加强装配式混凝土建筑外墙接缝密封材料耐久性评估方法和原位维修更换技术研究。密封材料长期受水压力、温度变化、风荷载、霉菌等外界环境因素的影响^[29],其物理性能易发生严重退化导致失效,亟需开展密封材料及配套材料耐久性和长期老化性研究,建立密封材料耐久性评估方法,并发展密封材料原位维修更换技术,及时更换老化的密封材料。

3)目前我国装配式混凝土建筑外墙接缝防水质量现场检测和验收工作仍处于人为观察、测量的初级阶段,结果可靠度低,常用的超声波法和淋水试验法又各自存在技术局限性,亟需发展快速、准确、高效的无损检测技术。

4)装配式混凝土建筑外墙接缝防水应制定相应的技术标准和管理制度,培养专业技术人员进行定期检查和维修,及时消除既有建筑在役期间的外墙接缝渗漏水隐患。

6 结语

装配式混凝土建筑在我国建筑工业化的背景下得到了大力推广应用,但受设计、施工、材料、检测和后期维护等多个因素的综合影响,外墙接缝渗漏水问题时有发生,对于提升装配式混凝土建筑使用功能带来挑战。

1)装配式混凝土建筑外墙接缝类型多,施工工艺复杂,缺陷形式多样,造成外墙接缝防水是整个结构防水的薄弱点。

2)外墙接缝防水体系包括构造防水和材料防水,实际工程通常采用二者相结合的方式接缝防水,对于不同接缝类型应选取合理的防水形式。

3)密封胶是外墙接缝防水的第一道防线,应选取高黏结性,强抗位移能力,优异耐候性、可装饰性和耐污染性的密封胶,改性硅烷聚醚密封胶和改性

硅烷聚氨酯密封胶性能较好,可用于外墙接缝防水。

4) 超声波法、拉拔试验法和淋水试验法是外墙接缝质量检测中常用的技术手段,由于各自的技术局限性,目前无法满足实际工程中快速、准确、高效检测需求,应发展智能化水平高、检测结果可靠的无损检测技术,提高检测效率,降低检测成本。

5) 装配式混凝土建筑外墙防水性能不是单一的结构防水或材料防水问题,而是建筑质量控制的系统性问题。外墙接缝要达到最佳的防水效果,有赖于科学设计、合理选材、专业施工和有效运维。

参考文献:

- [1] 王俊,赵基达,胡宗羽. 我国建筑工业化发展现状与思考[J]. 土木工程学报,2016,49(5):1-8.
WANG J, ZHAO J D, HU Z Y. Review and thinking on development of building industrialization in China[J]. China civil engineering journal, 2016, 49(5):1-8.
- [2] 王广明,刘美霞. 装配式混凝土建筑综合效益实证分析研究[J]. 建筑结构,2017,47(10):32-38.
WANG G M, LIU M X. Empirical analysis and research of comprehensive benefits of prefabricated concrete buildings[J]. Building structure, 2017, 47(10):32-38.
- [3] 吴刚,潘金龙. 装配式建筑[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
WU G, PAN J L. Fabricated building[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [4] ORLOWSKI K, SHANAKA K, MENDIS P. Manufacturing, modeling, implementation and evaluation of a weatherproof seal for prefabricated construction[J]. Buildings, 2018, 8(9):120.
- [5] 朱卫如. 装配式建筑密封防水系统[J]. 混凝土世界, 2019(2):36-43.
ZHU W R. Sealing and waterproofing system used in prefabricated buildings[J]. China concrete, 2019(2):36-43.
- [6] 张富宾,肖建庄,丁红梅,等. 装配式混凝土结构防水技术现状及发展趋势[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(1):1-13.
ZHANG F B, XIAO J Z, DING H M, et al. Current status and development trend of prefabricated structure waterproof technology[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2022, 39(1):1-13.
- [7] ORLOWSKI K, SHANAKA K, MENDIS P. Design and development of weatherproof seals for prefabricated construction: A methodological approach[J]. Buildings, 2018, 8(9):117.
- [8] 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.
LI C T. Study on waterproofing technology for pre-fabricated concrete building external wall joints[J]. China building waterproofing, 2018(16):25-27.
- [9] 中国建筑标准设计研究院, 中国建筑科学研究院. 装配式混凝土结构技术规程:JGJ 1—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
China Institute of Building Standard Design & Research, China Academy of Building Research. Technical specification for precast concrete structures:JGJ 1—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [10] 黄颀,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(6):282-283.
HUANG P, XIAO A L, GUO J. Waterproofing design and construction technology of prefabricated exterior wall joints in assembled concrete buildings[J]. Chinese & overseas architecture, 2019(6):282-283.
- [11] 高润东,李向民,童寿兴,等. 基于改进超声法的预制剪力墙底部接缝灌浆缺陷检测技术研究[J]. 施工技术, 2017, 46(17):15-19.
GAO R D, LI X M, TONG S X, et al. Research on detection technology of grouting defects in bottom joint of precast shear wall based on modified ultrasonic method[J]. Construction technology, 2017, 46(17):15-19.
- [12] 张富文,高润东,李向民. 同侧非耦合超声法检测预制剪力墙底部接缝灌浆缺陷试验研究[J]. 施工技术, 2019, 48(9):9-11, 19.
ZHANG F W, GAO R D, LI X M. Experimental study on the same side uncoupled ultrasonic method for testing grouting defect in bottom joint of precast shear wall[J]. Construction technology, 2019, 48(9):9-11, 19.
- [13] 石平府,顾盛,张军,等. 预制构件底部接缝灌浆质量高频小直径超声检测法研究[J]. 工程质量, 2019, 37(10):29-35.
SHI P F, GU S, ZHANG J, et al. Research on high-frequency small-diameter ultrasonic detection method for grouting quality of bottom joints of prefabricated components[J]. Construction quality, 2019, 37(10):29-35.
- [14] 杨霞,仲小亮. 预制装配式建筑外墙防水密封现状及存在的问题[J]. 中国建筑防水, 2016(12):16-18.
YANG X, ZHONG X L. Current situation and existing problems of waterproofing and sealing for prefabricated building external walls[J]. China building waterproofing, 2016(12):16-18.
- [15] 仲小亮,杨霞. 预制装配式建筑外墙板嵌缝质量现场检测技术研究[J]. 中国建筑防水, 2017(10):11-13.
ZHONG X L, YANG X. Study on field test technology of caulking quality of preconstruction building facade panel[J]. China building waterproofing, 2017(10):11-13.
- [16] ZHANG Q Z. Present situation and problems analysis of waterproof and seal of prefabricated building exterior wall[J]. Frontiers research of architecture and engineering, 2018, 1(1):8-11.
- [17] 范一飞. 上海地区工业化住宅装配式外墙体系防水设计研究[J]. 住宅科技, 2013, 33(11):18-25.
FAN Y F. Research on the waterproof design of prefabricated external wall system of industrialized housing in Shanghai[J]. Housing science, 2013, 33(11):18-25.
- [18] 上海市建筑科学研究院(集团)有限公司,上海市建筑建材业市场管理总站,上海市建设工程安全质量监督总站,等. 装配式整体式混凝土建筑检测技术标准: DG/TJ 08-2252—2018[S]. 上海:同济大学出版社, 2018.
Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai Building Materials Industry Market Management

- Station, Shanghai Construction Safety and Quality Supervision Station, et al. Technical standard for inspection of monolithic precast concrete building; DG/TJ 08-2252—2018 [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.
- [19] 南京市建筑安装工程质量监督站. 装配整体式混凝土结构检测技术规程; DB32/T 3754—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- Nanjing Construction Quality Supervision Station. Technical standard for inspection of monolithic precast concrete structure; DB32/T 3754—2020 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.
- [20] 广东省建设工程质量安全检测总站有限公司, 广州市建筑科学研究院有限公司, 广州建设工程质量安全检测中心有限公司. 装配式混凝土结构检测技术标准; DBJ/T 15-199—2020 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- Guangdong Construction Engineering Quality and Safety Testing Station Co., Ltd., Guangzhou Academy of Building Research Co., Ltd., Guangzhou Construction Engineering Quality and Safety Inspection Center Co., Ltd. Technical standard for inspection of prefabricated concrete structure; DBJ/T 15-199—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.
- [21] 浙江省建筑设计研究院, 浙江大学. 装配式混凝土结构检测技术规程; DBJ33/T 1270—2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Zhejiang University. Technical specification for inspection of precast concrete structures; DBJ33/T 1270—2022[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [22] 中国建筑科学研究院有限公司. 装配式混凝土结构检测标准; T/CECS 1189—2022 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- China Academy of Building Research. Standard for inspection of prefabricated concrete structure; T/CECS 1189—2022 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [23] 梁益定. 装配式混凝土住宅建筑检测技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
- LIANG Y D. Research on inspection technology of prefabricated concrete residential constructions [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018.
- [24] 张正, 曹永杰, 陈裕钧, 等. 预制外墙板水平拼缝防水施工方法在装配式结构的应用研究[J]. 广州建筑, 2022, 50(2): 58-62.
- ZHANG Z, CAO Y J, CHEN Y J, et al. Study on the horizontal seam of prefabricated exterior wall in assembled structure [J]. Guangzhou architecture, 2022, 50(2): 58-62.
- [25] 赵建华, 杨放, 曹旷, 等. 微波测湿技术在 ALC 外墙板渗漏检测中的应用实例[J]. 江苏建筑, 2020(4): 84-86.
- ZHAO J H, YANG F, CAO K, et al. Application of microwave technology in leak detection of ALC wall panel [J]. Jiangsu construction, 2020(4): 84-86.
- [26] 豆海涛, 黄宏伟, 薛亚东. 隧道衬砌渗漏水红外辐射特征影响因素试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2426-2434.
- DOU H T, HUANG H W, XUE Y D. Experimental study of factors affecting thermal infrared radiation characteristics of tunnel lining water leakage [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011, 30(12): 2426-2434.
- [27] 王玉磊, 汤雷, 钱思蓉. 基于无人机和红外热成像技术的小型水库坝体早期非稳定渗漏检测系统[J]. 无损检测, 2020, 42(12): 61-65.
- WANG Y L, TANG L, QIAN S R. Early unsteady leakage detection system of small reservoir dam based on UAV and infrared thermal image [J]. Nondestructive testing, 2020, 42(12): 61-65.
- [28] 邓焯, 关洪军, 秦雷, 等. 红外热像法在地下工程防水质量和渗漏检测中的应用[J]. 中国建筑防水, 2014(5): 33-36, 48.
- DENG Y, GUAN H J, QIN L, et al. Application of infrared thermography in the waterproof and leakage detection of underground buildings [J]. China building waterproofing, 2014(5): 33-36, 48.
- [29] QIAN J Q, GU Y. Research on anti leakage construction of building engineering exterior wall based on improved attribute recognition model [J]. Case studies in construction materials, 2022, 17: e01410.