

DOI: 10.7672/sjgs2024170007

装配式混凝土建筑防水技术与措施*

冯大阔^{1,2}, 肖绪文³

(1. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450004; 2. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001;
3. 中国建筑股份有限公司, 北京 100029)

[摘要] 通过大量工程实践和文献调研,深入分析装配式建筑防水的重要性,系统梳理并划分装配式混凝土建筑的防水技术和措施。重点阐述3类常用的防水结构体系和5种构造防水措施,明确装配式混凝土建筑防水工程工作重点。装配式混凝土建筑防水措施分为结构防水、构造防水和材料防水3类,结构防水是基础,构造防水是关键,材料防水最直接。从这3方面入手,选用整体性好的结构体系、合适的防水构造、生产质量好的预制构件,并加强储存运输过程成品保护,强化预制构件安装精度和质量,关注拼缝防水处理和密封材料施工措施,注重技术联合和产品集成应用,以切实增强装配式建筑整体性和防水性能。

[关键词] 装配式;混凝土;防水工程;防水材料;构造

[中图分类号] TU375

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)17-0007-08

Waterproofing Technologies and Measures of Prefabricated Concrete Buildings

FENG Dakuo^{1,2}, XIAO Xuwen³

(1. China Construction Seventh Engineering Division Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450004, China;
2. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;
3. China State Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: According to a large number of engineering practices and literatures, the significance of the waterproof resistance of prefabricated concrete (PC) buildings was addressed in depth, and the waterproofing technologies and measures of PC buildings were systematically analyzed and innovatively classified. Accordingly, 3 types of structural waterproofing measures and 5 kinds of constructional waterproofing measures of PC buildings were described in detail, and the waterproofing focus of PC buildings was further clarified. It is indicated that the waterproofing measures of PC buildings can be classified as structural, constructional and material waterproofing technologies, which are the fundamental, key and directional waterproofing measures, respectively. Therefore, such waterproofing measures as selecting the PC structure system with good integrity, applying proper constructional measures, producing PC parts with good quality, protecting the PC parts during storing and transporting, promoting the installation accuracy and quality of PC parts, enhancing the waterproof treatment of gaps and sealing methods, and intensifying the integration of waterproofing technologies and products should be considered comprehensively and applied integrally to improve the waterproofing resistance.

Keywords: prefabricated; concrete; waterproofing; waterproof material; construction

0 引言

装配式建筑是将工厂生产的预制构件,通过可靠的连接方式装配而成的建筑^[1],具有大幅减少施

工现场作业量、降低劳动强度、节约人力资源、减少建筑垃圾、降低噪声与粉尘、提高施工效率、提升工程质量等优点^[2],是改变建筑业粗放式生产方式、实现高质量发展的重要路径。我国装配式建筑自建国之初就开始推进和实施,先后经历启动发展期(1950—1980年)、低潮期(1980—2008年)、重新启

* 国家自然科学基金面上项目(52079126)

[作者简介] 冯大阔,正高级工程师,教授, E-mail: tpada@qq.com

[收稿日期] 2024-05-06

动期(2008—2018 年)^[3]和积极稳妥期(2018 年至今)4 个发展阶段。近年来,在碳达峰、碳中和战略目标与建筑业转型升级大背景下,国家和地方持续出台相关政策推进装配式建筑,推动产业结构调整 and 转型升级。2016 年,中共中央、国务院《关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见》提出,争取用 10 年左右时间使装配式建筑占新建建筑比例达 30%^[4]。其后相继出台《关于大力发展装配式建筑的指导意见》《关于促进建筑业持续健康发展的意见》《关于推动城乡建设绿色发展的意见》《关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知》等相关政策,持续大力推进装配式建筑^[5-8]。2020 年,住房和城乡建设部等部委联合发布《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》《关于加快新型建筑工业化发展的若干意见》等文件,提出以新型建筑工业化带动建筑业全面转型升级,打造具有国际竞争力的“中国建造”品牌^[9-10]。国务院新闻办公室《关于推动城乡建设绿色发展的意见》发布会指出,“十三五”期间,装配式建筑建成面积累计达 16 亿 m²,年均增长率 54%。其中,2021 年新开工装配式建筑占新建建筑比例达 20.5%^[11]。我国装配式建筑已进入积极稳妥发展阶段,得到积极快速发展。

装配式混凝土建筑将预制混凝土部品部件在工程现场装配组合成建筑整体,部品部件间的节点接缝拼缝易成为渗漏通道。因此,装配式混凝土建筑在防水问题上存在先天缺陷,渗漏是装配式建筑中更常见的质量问题,影响建筑正常使用甚至结构安全^[12-14],是装配式建筑设计和施工中需要重点关注的环节和着重解决的问题。系统分析装配式混凝土建筑潜在渗漏源和防水类别,明确装配式混凝土建筑的主要防水措施和工作重点,对推进装配式建筑发展、建成高质量建筑产品、满足人民日益增长的美好生活需要具有重要意义。

本文基于大量工程实践和文献调研,分析装配式混凝土建筑防水的重要性,系统梳理该类建筑的防水技术和措施,将其分类为结构防水、构造防水和材料防水;重点阐述装配式套筒灌浆、环筋扣合和环扣叠合 3 类常用的结构体系防水和部品部件、竖向拼缝、水平拼缝、外门窗和预留孔洞 5 种构造防水措施;在此基础上明确装配式混凝土建筑防水工程工作重点,以为装配式混凝土建筑防水工程设计与施工提供借鉴参考,提升装配式建筑防水性能,推进新型建筑工业化高质量发展。

1 装配式建筑防水概述

1.1 防水重要性

建筑物防水是建筑工程施工中非常重要的环节,防水效果直接影响建筑物使用功能、年限和价值,从而影响装配式建筑推进广度和深度。对于装配式混凝土建筑,其防水问题更需要重视并着重解决。

1) 关乎建筑质量和品质

装配式混凝土建筑在施工现场组装预制构件,不可避免地产生连接节点接缝拼缝处理不当问题,从而成为渗漏通道;不同的节点连接和拼接方式会产生不同的接缝拼缝问题和不同程度的密封问题。因此装配式混凝土建筑相较于现浇混凝土建筑,更容易产生渗漏问题,建筑内部可能会出现发霉等状况,造成室内墙体受潮,粉刷饰面层脱落,降低建筑质量和品质。

2) 影响建筑使用功能和性能

装配式建筑若出现渗漏,说明其外围护结构密封性出现漏洞,建筑整体气密性遭到破坏,整个建筑能耗增加,室内温湿度控制更加困难,从而降低室内空间舒适度,影响建筑使用功能和性能,严重的渗漏问题甚至可能丧失建筑使用功能,无法居住。

3) 关系建筑稳定性和安全性^[15]

装配式混凝土建筑如果出现节点裂缝,将不易维修,长时间渗漏会导致连接节点处乃至建筑结构钢筋锈蚀,以及金属框架和构配件腐蚀,亦会降低外围护结构与外墙连接性能,增大外围护结构脱落风险,影响建筑稳定性和安全性。

1.2 防水分类

装配式混凝土建筑与现浇混凝土建筑的主要区别在于部品部件生产方式和组装方式不同。因此,装配式混凝土建筑防水分类,与现浇混凝土建筑既有相通之处,亦有区别之处。

按防水部位分,装配式与现浇混凝土建筑防水分类基本相同,主要包括室内(厨房、卫生间等)、屋顶(刚性防水、卷材防水、涂料防水等)和室外防水(外围护结构拼缝、门窗周边、预留洞口等)。装配式混凝土建筑的室外防水还包括预制构件与预制构件、预制构件与后浇混凝土等连接节点处的防水^[16],关键在于外墙接缝拼缝处的密封防水性能。

按防水措施分,装配式混凝土建筑主要包括结构防水、构造防水和材料防水。结构防水是利用结构本身的整体性和密封性阻断水流,防止渗漏,如减少预制构件连接节点及节点接缝,以增强结构整体性,是装配式混凝土建筑需重点关注的基础防水

形式。构造防水是利用结构构造阻断、引导水流,如内高外低的企口构造,可防止水流渗入室内,是装配式混凝土建筑防水的关键。材料防水是利用防水材料阻断水流渗入,如拼缝注入密封胶,材料防水是接缝拼缝处防水处理的直接措施。材料防水一般和构造防水、结构防水联合使用,因此装配式混凝土建筑防水工程需注重技术和产品集成。

2 装配式建筑结构防水

结构防水是建筑的基础防水措施。由于现浇混凝土结构整体性和密封性均较好,所以其防水措施以构造防水和材料防水为主。需重点关注装配式混凝土建筑的结构防水措施,因为其节点连接性能直接决定结构整体性及建筑密封性和防水性能。本文主要介绍套筒灌浆、环筋扣合和环扣叠合 3 种常用装配式结构体系的整体性和防水性能。

2.1 套筒灌浆结构体系

装配式套筒灌浆结构体系是通过灌浆套筒将预制构件(预制柱、预制梁、预制墙体等)连接为整体的结构形式(见图 1),是我国发展较早、应用较广泛、经验较成熟的装配式结构体系^[17]。套筒灌浆连接节点主要用于竖向钢筋连接,由预制柱间竖向连接逐渐发展为预制墙体竖向连接。将套筒灌浆连接用于装配式混凝土剪力墙结构体系,存在对准就位困难、灌浆质量不易保证、接缝坐浆不密实等问题,直接导致预制墙体水平接缝连接质量不高、密封性不强,易产生结构渗漏问题。通常,预制墙体套筒灌浆连接节点水平坐浆缝宽度宜为 20mm,结合构件生产精度允许有一定偏差($\pm 5\text{mm}$)。然而在实际工程中,预制墙体生产精度不够,墙体下方现浇混凝土标高不好控制,从而导致节点接缝宽度过窄,灌浆料无法很好流动,加之构件定位精度不高、坐浆厚度不够、灌浆料中骨料粒径过大、流动度不足等因素,都可能导致节点接缝处坐浆不密实,密封性不够,造成渗漏问题。因此,在实际施工中,需仔细检验预制构件生产质量,提高预制构件就位精度,控制现浇面标高宁低勿高,严格控制坐浆料质量和厚度,从而提高节点接缝密封性,增强结构整体性和防水性能。

2.2 环筋扣合结构体系

装配式环筋扣合混凝土剪力墙结构体系由端部预留环筋的预制构件(预制内外墙体、叠合楼板和预制楼梯等)在芯梁或芯柱区域进行环筋扣合,穿入栓筋后浇筑混凝土连成整体^[18](见图 2)。该结构体系在预制墙体连接处及其与叠合楼板连接处,预留类似后浇带的形式,通过环筋扣合连接成

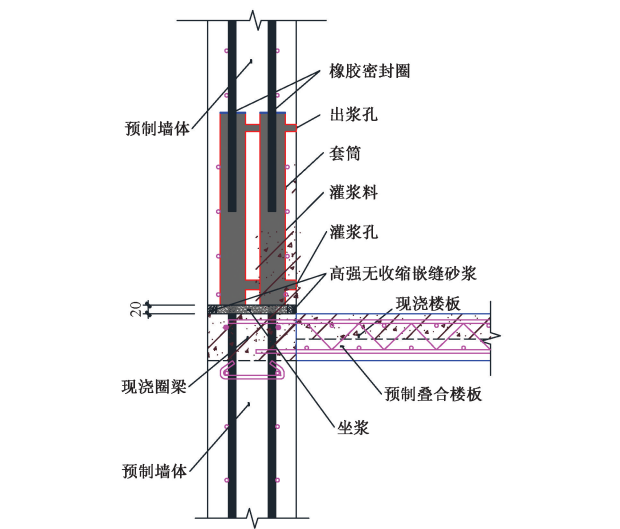


图 1 套筒灌浆剪力墙节点示意
Fig. 1 Shear wall joint of sleeve grouting

为整体。在实际施工过程中,通常将叠合楼板放置在下层预制墙体上,然后将上层预制墙体吊装在下层预制墙体上,通过可调式定位锥调节上层预制墙体的水平位置和垂直度,以及上下预制墙体间的连接高度(一般 ≥ 8 倍钢筋直径且 $\geq 120\text{mm}$)。然后在连接处插入水平栓筋(通常是 4 根及以上),将上下预制墙体节点连接处的混凝土和叠合楼板现浇层浇筑成整体,同时节点连接处上层预制墙体的底面标高低于叠合楼板顶面标高 10mm,增强结构整体性和抗震性能^[19],避免装配式套筒灌浆混凝土剪力墙结构体系节点接缝坐浆不密实、结构密封性不强的问题。

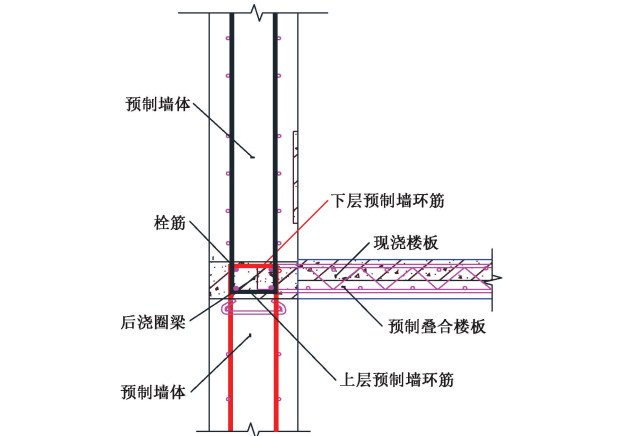


图 2 环筋扣合剪力墙节点示意
Fig. 2 Shear wall joint assembled by annular closed reinforcements

2.3 环扣叠合结构体系

装配式环扣叠合混凝土剪力墙结构体系是在装配式环筋扣合结构体系基础上发展而来的新型

装配式结构体系,将预制叠合墙体、叠合楼板、预制楼梯等部品部件在芯梁或芯柱区域通过预留环筋扣合后浇筑混凝土连接成整体(见图 3)。环扣叠合连接节点包括直伸型、突出型和平口型等,前者环筋伸出高度 120mm 即可,后两者环筋伸出高度需>300mm,同时亦有上层预制叠合墙体底面标高低于叠合楼板顶面标高 10mm 等关键构造。相比装配式环筋扣合结构体系,装配式环扣叠合结构体系的叠合楼板现浇部分可先于上层叠合墙体空腔混凝土浇筑,亦可与上层叠合墙体空腔混凝土同时浇筑。前者易于施工,但由于上层叠合墙体与叠合楼板现浇混凝土部分存在新旧混凝土接缝,故其整体性和防水性能稍弱于装配式环筋扣合混凝土剪力墙结构体系,但要高于装配式套筒灌浆剪力墙结构体系。后者施工方便性稍差,但上下层叠合墙体空腔混凝土与叠合楼板现浇部分一同浇筑、上下贯通、形成整体,其整体性和防水性能比装配式环筋扣合混凝土剪力墙结构体系好,并逐渐应用于城市综合管廊等地下工程中。

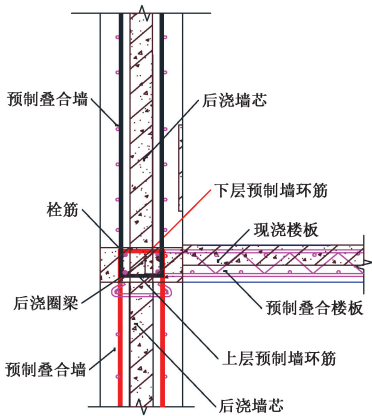


图 3 环扣叠合剪力墙节点示意

Fig. 3 Composite shear wall joint assembled by annular closed reinforcements

3 装配式建筑构造防水

构造防水主要通过一定的结构构造(如企口、导水通道等)增强密封性,阻断水流^[20]。装配式混凝土建筑应从部品部件、竖向拼缝、水平拼缝、外门窗、预留孔洞、叠合板屋面等方面考虑构造防水措施,增强防水性能。其中,叠合板屋面防水构造及措施与传统现浇屋面类似。

3.1 部品部件防水

部品部件防水指采用防水性能好的部品部件(如四页三防预制外墙)或整体集成式部品部件(如整体厨房、整体卫生间、整体阳台和整体飘窗)达到防水的目的。生产精度高、质量好的部品部件是装

配式建筑防水的前提,采用有砂眼、气孔、裂纹等生产质量不合格或运输、吊装过程中造成破损破坏的部品部件,将大大增加建筑渗漏风险。

1) 四页三防预制外墙^[21](见图 4)

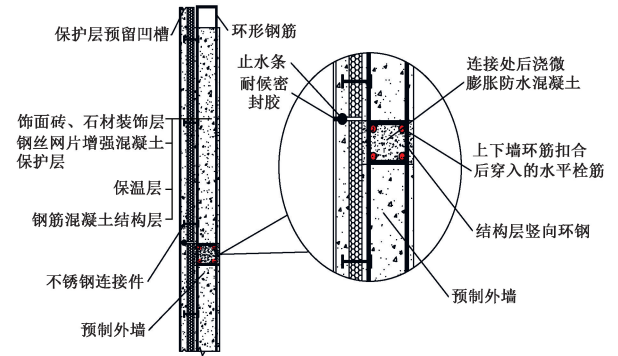


图 4 四页三防预制外墙及防水体系

Fig. 4 Four-layer and three-protection prefabricated exterior PC wall and its waterproofing systems

在四页三防预制外墙中,墙板四周是由墙体内部整体双向钢筋外延形成的环形钢筋。墙板从内到外为结构层、保温层、钢丝网片增强混凝土保护层及装饰层,并由不锈钢连接件连成整体。在节点拼缝处从内到外设置微膨胀防水混凝土、保护层凹槽内嵌止水条和板间拼缝注射耐候密封胶 3 道防水措施。四页三防预制外墙集结构、保温、防水及装饰于一体,节点连接合理、结构受力科学、生产安装简便^[22]、防水效果良好。

2) 整体厨房和整体卫生间

厨房和卫生间是室内渗漏的主要部位,是室内防水需重点关注的地方。在装配式建筑中,可将厨房和卫生间作为整体进行预制,设置好防水构造和措施后整体进行吊装安装(见图 5)。整体厨房和整体卫生间大大减少单片预制安装的节点接缝,有效增强其整体性和密封性,避免室内渗漏问题。



图 5 预制整体卫生间

Fig. 5 Prefabricated integrally toilet

3) 整体阳台和整体飘窗

常规的预制阳台或空调板是由单板通过一定的连接方式与主体结构相连,这些节点接缝带来渗

漏的潜在风险。预制整体阳台或飘窗(见图6)通过一定程序(如分步预制等)将其预制成整体,避免单片预制安装节点接缝,消除接缝处渗漏风险。



图6 预制整体飘窗

Fig. 6 Prefabricated integrally bay window

3.2 竖向拼缝防水

预制构件(主要是非承重外墙)竖向拼缝是装配式建筑可能渗漏的主要部位。在实际工程中,预制外墙竖向拼缝防水通常在拼缝处设置槽口构造^[16](见图7),主要包括3道防水:①第1道防水是拼缝最外侧嵌填的耐候防水密封胶;②第2道防水为拼缝中间构造空腔形成的减压空间,在空腔内每隔一定距离设置导水管,起平衡气压和导水排水的作用;③第3道防水为拼缝内侧预嵌在混凝土中的空心橡胶管止水带,压紧后起阻水作用,同时在橡胶止水带外面涂覆密封胶,以良好的变形性能封堵橡胶止水带相互错动可能产生的细微缝隙。不同形式的拼缝空腔可形成不同的防水构造,如有学者提出预制外墙竖向拼缝凹形空腔防水构造^[23](见图8),阻隔墙a可阻止室外雨水直接漏进室内(路径①),水汽则被引导流入凹形空腔内凝结(路径②)后通过导水管排出。该凹形空腔构造可有效阻止雨水侵入,但实用性不强,生产难度大,运输吊装保护困难,安装精度要求高。

3.3 水平拼缝防水

预制构件(主要是非承重外墙)水平拼缝是装配式建筑可能渗漏的又一主要部位。在实际工程中,预制外墙水平拼缝通常设计为内高外低的企口形状(见图9)^[16](包括与预制外墙连接的现浇楼板边缘亦设计为企口),一般包括3道防水:①第1道防水在拼缝外侧,通过背垫材料、注入防水耐候密封胶起挡水作用;②第2道防水为中间设置的减压空腔构造,使水在重力作用下向外流动,防止其通过毛细作用倒吸进室内,并可将水导出,起疏水作用;③第3道防水为拼缝内侧的空心橡胶管止水带,其预嵌在上下墙体中,通过相互压紧起阻水作用,

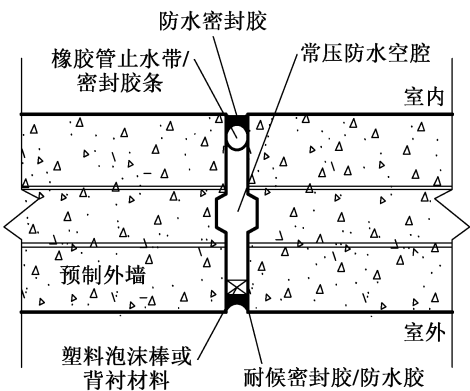


图7 预制外墙竖向拼缝防水构造

Fig. 7 Waterproofing construction of vertical joint for prefabricated exterior walls

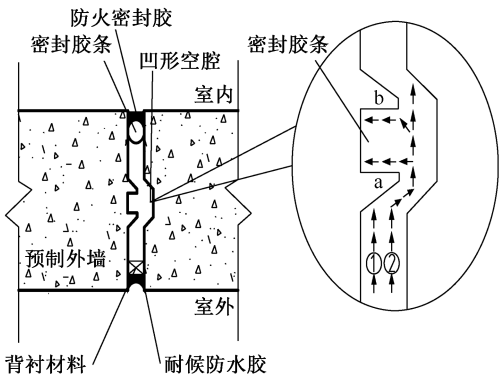


图8 预制外墙竖向拼缝凹形空腔防水构造

Fig. 8 Waterproofing construction of vertical joint with concave cavity for prefabricated exterior walls

实现防水效果。在预制墙板间的节点拼缝处,除预嵌相互压紧的橡胶止水带外,亦可局部贴贴高分子咬合型拼缝带,增强防水效果。

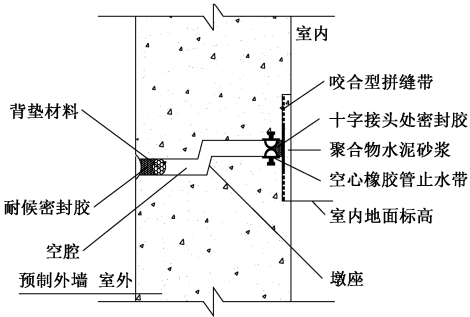


图9 预制外墙水平拼缝防水构造

Fig. 9 Waterproofing construction of horizontal joint for prefabricated exterior walls

预制外墙水平拼缝偶尔采用开放式防水构造^[24](见图10),其最外侧防水采用企口预防和导水,无须在预制墙体外侧嵌填密封胶,施工更加简便,但构造复杂,对部品部件生产和保护要求较高,在多雨地区的防水效果不理想。

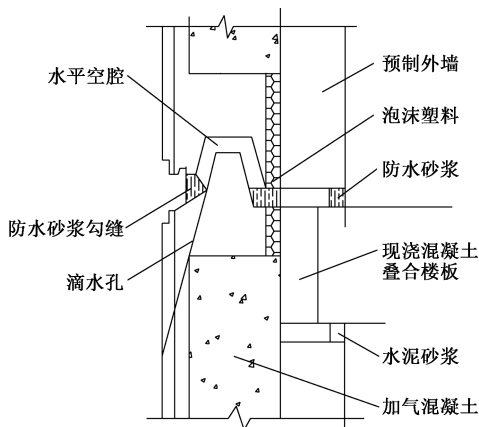


图 10 预制外墙水平拼缝开放式防水构造
Fig. 10 Open waterproofing construction of horizontal joint for prefabricated exterior walls

3.4 外门窗防水

装配式混凝土建筑外墙外门窗防水设计以排水为前提、防水为基础、密封为关键,以多道设防、共同作用为原则^[25]。与传统现浇混凝土建筑外门窗副框后装相比,装配式混凝土建筑预制构件(主要是外墙)与外门窗(主要是外窗)的生产安装主要有 3 种形式。

1) 先装法

门窗与外墙在工厂内一体集成预制,在现场一起吊装安装,不再单独安装门窗,该门窗与外墙连接整体性好、密封性强、防水性能好,但由于门窗需与外墙一起运输吊装,所以生产、存储、运输和吊装阶段成品保护困难、成本较高。

2) 预装法

门窗副框与外墙在工厂内一起预制,在工程现场将外墙吊装安装后再安装门窗,该门窗与外墙连接整体性好、密封性强、防水性能好,且在存储、运输和吊装等环节对成品保护要求比先装法低,施工较方便。先装法和预装法的共同缺点是门窗副框与外墙连接处由于材料性能差异大,易产生裂缝,且门窗副框不易更换。

3) 后装法

外墙在工厂预制,同时可集成门窗预埋件,在工程现场将外墙吊装安装后再安装门窗及副框。后装法门窗安装及更换容易实现,但会破坏预制外墙。后装法与传统现浇混凝土建筑门窗安装基本一样,防水构造也较类似,如将外窗台设置排水坡度和滴水线槽,外窗台高度低于内窗台,门窗上楣外口设置滴水线,门窗框与副框间填充发泡胶等。这些防水构造措施在先装法和预装法中也需考虑和设置。

3.5 预留孔洞防水

预制外墙一般需要为排水、燃气等管道预留洞口,同时存在施工阶段由施工机械和安全防护设施留下的临时洞口。这些孔洞如不及时修补或修补不密实,会因砂浆干缩而形成裂缝或毛细孔,形成流水通道导致渗漏。对于预留孔洞,外墙预制时一般埋放套管,同时亦可根据功能由内向外向下倾斜(见图 11)。

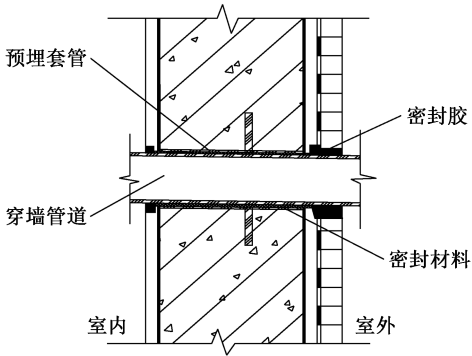


图 11 预制外墙预留孔洞防水构造
Fig. 11 Waterproofing construction of reserved hole for prefabricated exterior wall

现场施工前,外墙构造层可设置临时孔洞模具,并在根部周边留置凹槽。在预埋套管中安装固定排水或燃气等管道后,预埋套管和穿墙管道间的缝隙用密封材料(聚合物水泥砂浆、聚氨酯发泡胶等)塞填密实,防止水从预埋套管和穿墙管道间的缝隙渗漏进室内。同时,先在预埋套管与墙身间的凹槽上涂刷基层处理剂,再填塞密封胶^[16]。临时施工孔洞采取补浇混凝土或砌筑砌块等措施进行封堵处理。

4 装配式建筑材料防水

材料防水是利用防水材料阻断水流渗入室内的防水措施。装配式混凝土建筑防水材料主要包括防水卷材、防水涂料和密封材料^[20,26-28],前两者的材料需求、使用部位和施工工艺与传统现浇混凝土结构类似,密封材料选用和施工与现浇混凝土结构有所不同^[29-30]。装配式混凝土建筑存在很多构件拼缝,一般采用密封胶等不定型密封材料进行封堵,起防水和外观美化效果。密封材料是装配式混凝土建筑外墙防水的首道防线,材料防水通常结合构造防水措施,起联合防水的作用。装配式混凝土建筑外墙暴露在外部环境中,受外界环境影响大,拼缝经常发生变形和变化,一般使用固化时间较短的双组分密封胶进行拼缝密封。同时,密封胶与基层(如混凝土等)要有良好的黏结性能、较强的柔性和抗变形能力及较好的耐候性、耐久性和耐污性能,有时甚至需要一定的可装饰性。因此,装配式

混凝土建筑拼缝常用密封材料包括硅酮密封胶、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等^[31],尤其是后两者应用居多。

装配式混凝土建筑材料防水效果受材料性能、施工环境、施工工艺^[32]和施工质量等因素影响。密封材料选用不合适或施工工艺不当,会出现密封胶脱粘、开裂、老化变硬等问题,致使首道防水失效,进而出现渗漏、脱皮、发霉、保温层失效等状况。目前,装配式混凝土建筑密封胶防水施工存在材料选用混乱、基础施工不规范、材料耐久性不足、现场质量检测不够等问题。因此,在选好密封材料的基础上,还要注重施工工序和工艺。密封材料施工前需检查外墙拼缝是否符合施工要求,应修补缺口,避免拼缝过宽、过窄和错台,并清理拼缝周围残留物。按照基层清理→施工隔离材料→粘贴美纹纸→涂刷底涂→注胶施工→修饰收尾等工序有序进行密封材料施工,并检测防水效果,以保证密封材料的施工质量、黏结性、耐久性和防水性能,把好装配式建筑防水第一道关口。

5 结语

1)装配式混凝土建筑防水分类与现浇混凝土建筑既有相通之处,亦有区别之处。装配式混凝土建筑防水措施分为结构防水、构造防水和材料防水,结构体系是基础,部品部件是前提,构造防水是关键,连接拼缝是重点,技术集成是惯例。

2)结构防水利用其整体性和密封性阻断水流,防止渗漏,是需重点关注的基础防水形式。装配式套筒灌浆结构体系接缝处坐浆不密实,导致结构密封性不够,造成渗漏。装配式环筋扣合结构体系能够避免节点接缝坐浆,提高结构密封性。装配式环扣叠合结构体系上下层叠合墙体空腔混凝土与叠合楼板混凝土一同浇筑,整体性强、防水性能好。

3)构造防水通过结构构造措施增强建筑整体性、密封性和防水性能。装配式建筑构造主要包括采用四页三防预制外墙、整体厨房、整体卫生间、整体阳台、整体飘窗等整体性强、防水性能好的部品部件,在竖向和水平拼缝处分别设置3道防水的槽口构造和内高外低的企口构造等进行防水。

4)材料防水主要是利用防水材料阻断水流渗入室内,一般与构造防水措施联合使用。装配式建筑存在大量拼缝,一般采用密封胶等不定型密封材料进行封堵,起防水和外观美化效果。应选用黏结性、柔性、耐候性、耐久性和耐污性好的密封胶,并注重施工工序和工艺,真正发挥其首道防水作用。

5)应从装配式混凝土建筑结构防水、部品部件

防水、构造防水和材料防水等方面入手,选用整体性好的结构体系,采用合适的防水构造,生产精度高、质量好的预制构件,加强预制构件储存运输过程成品保护,强化预制构件安装精度和质量,关注拼缝防水处理和密封材料施工,注重技术联合和产品集成应用,增强装配式建筑的整体性和防水性能。

参考文献:

[1] 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 structure: JGJ 1—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[2] 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.

[3] 肖绪文, 冯大阔. 基于绿色建造的施工现场装配化思考 [J]. 施工技术, 2016, 45(4): 1-4.
XIAO X W, FENG D K. Study on site assembly based on green construction [J]. Construction technology, 2016, 45(4): 1-4.

[4] 关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见 [EB/OL]. (2016-02-06) [2024-07-13]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5051277.htm.
Some opinions on further strengthening the management of urban planning and construction [EB/OL]. (2016-02-06) [2024-07-13]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5051277.htm.

[5] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见 [EB/OL]. (2016-09-30) [2024-07-13]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-09/30/content_5114118.htm.
General Office of the State Council. Guiding opinions of the General Office of the State Council on vigorously developing fabricated buildings [EB/OL]. (2016-09-30) [2024-07-13]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-09/30/content_5114118.htm.

[6] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于促进建筑业持续健康发展的意见 [EB/OL]. (2017-02-24) [2024-07-13]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-02/24/content_5170625.htm.
General Office of the State Council. Opinions of the General Office of the State Council on promoting the sustainable and healthy development of the construction industry [EB/OL]. (2017-02-24) [2024-07-13]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-02/24/content_5170625.htm.

[7] 国务院办公厅. 关于推动城乡建设绿色发展的意见 [EB/OL]. (2021-10-21) [2024-07-13]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/21/content_5644083.htm.
General Office of the State Council. Opinions on promoting green development of urban and rural construction [EB/OL]. (2021-10-21) [2024-07-13]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/21/content_5644083.htm.

- 21/content_5644083.htm.
- [8] 国务院. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. (2021-10-24) [2024-07-13]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649731.htm.
The State Council. Circular issued by the State Council on the action plan for carbon peak by 2030 [EB/OL]. (2021-10-24) [2024-07-13]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649731.htm.
- [9] 住房和城乡建设部. 关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见 [EB/OL]. (2020-07-28) [2024-07-12]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-07/28/content_5530762.htm.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Guiding opinions on promoting the coordinated development of intelligent construction and building industrialization [EB/OL]. (2020-07-28) [2024-07-12]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-07/28/content_5530762.htm.
- [10] 住房和城乡建设部. 关于加快新型建筑工业化发展的若干意见 [EB/OL]. (2020-09-04) [2024-07-12]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-09/04/content_5540357.htm.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Some opinions on accelerating the new building industrialization [EB/OL]. (2020-09-04) [2024-07-12]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-09/04/content_5540357.htm.
- [11] 国务院新闻办公室. 国务院新闻办发布会介绍《关于推动城乡建设绿色发展的意见》有关情况 [EB/OL]. (2021-10-27) [2024-07-12]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/27/content_5647094.htm.
Information Office of the State Council. The press conference held by the Information Office of the State Council on *About Promoting Green Development of Urban and Rural Construction* [EB/OL]. (2021-10-27) [2024-07-12]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/27/content_5647094.htm.
- [12] 张勇. 装配式混凝土建筑防水技术概述[J]. 中国建筑防水, 2015(13): 1-5, 14.
ZHANG Y. Brief review on waterproofing techniques of precast concrete structure [J]. China building waterproofing, 2015(13): 1-5, 14.
- [13] 燕冰. 某装配式外墙渗漏综合分析治理[J]. 中国建筑防水, 2019(12): 19-22.
YAN B. Comprehensively analyze and tackle of exterior wall leakage of a prefabricated building [J]. China building waterproofing, 2019(12): 19-22.
- [14] 刘洋, 陈晓, 陆大晋. 装配式预制板结构外面防水技术探讨[J]. 中国建筑防水, 2016(11): 22-24.
LIU Y, CHEN X, LU D J. Discussion on waterproofing technology of fabricated precast slab roof [J]. China building waterproofing, 2016(11): 22-24.
- [15] 刘星, 肖绪文, 徐洪涛, 等. 我国防水工程发展现状对策与分析[J]. 施工技术, 2021, 50(3): 5-8.
LIU X, XIAO X W, XU H T, et al. Development status and countermeasures of waterproof engineering in China [J]. Construction technology, 2021, 50(3): 5-8.
- [16] 邓凯, 朱国梁. 某装配式建筑外墙防水设计及节点构造处理[J]. 中国建筑防水, 2016(24): 15-17.
DENG K, ZHU G L. Waterproofing design and details treatment for external wall of a prefabricated building [J]. China building waterproofing, 2016(24): 15-17.
- [17] 夏晓天. 装配整体式剪力墙结构套筒连接技术与应用研究[D]. 绍兴: 绍兴文理学院, 2020.
XIA X T. Research on sleeve connection technology and application of assembled integral shear wall structure [D]. Shaoxing: Shaoxing University, 2020.
- [18] 中国建筑第七工程局有限公司, 中建七局(上海)有限公司. 装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙结构技术标准: JGJ/T 430—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
China Construction Seventh Engineering Division Co., Ltd., China Construction Seventh Engineering Division (Shanghai) Co., Ltd. Technical standard for precast reinforced concrete shear wall structure assembled by anchoring closed loop reinforcement: JGJ/T 430—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [19] 周健. 装配式环筋扣合连接性能及剪力墙结构抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
ZHOU J. Research on mechanical performance of ring connection and seismic performance of shear wall structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [20] 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 prefabricated concrete building external wall joints [J]. China building waterproofing, 2018(16): 25-27.
- [21] 焦安亮, 冯大阔, 宋闻辉, 等. 环筋扣合“四页三防”预制外墙研究与应用[J]. 施工技术, 2018, 47(4): 29-31, 46.
JIAO A L, FENG D K, SONG W H, et al. A four-layer and three-protection exterior PC wall with annular closed reinforcements and its application [J]. Construction technology, 2018, 47(4): 29-31, 46.
- [22] 焦安亮, 方胜利, 冯大阔, 等. 环筋扣合锚接混凝土构件高精度生产技术研究[J]. 施工技术, 2018, 47(8): 91-92, 121.
JIAO A L, FANG S L, FENG D K, et al. Research on high precision production technology of reinforced concrete members with ring reinforcement [J]. Construction technology, 2018, 47(8): 91-92, 121.
- [23] 寇俊敏, 苍雁飞, 岳志芳, 等. 预制装配式建筑外墙防水技术应用研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(9): 59-62.
KOU J M, CANG Y F, YUE Z F, et al. Research on application of prefabricated building exterior wall waterproof technology [J]. New building materials, 2020, 47(9): 59-62.
- [24] 凌涛. 装配式建筑防水密封技术探讨[J]. 中国建筑防水, 2016(5): 30-33, 41.
LING T. Discussion on waterproofing sealing technology of prefabricated buildings [J]. China building waterproofing, 2016(5): 30-33, 41.

subway station construction site based on dynamic site layout planning[J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17(7): 1865-1873.

[60] 王廷魁,郑娇. 基于 BIM 的施工现场动态布置方案评选[J]. 施工技术,2014,43(3):72-76.

WANG T K, ZHENG J. Dynamic construction site layout scheme selection based on BIM[J]. Construction technology, 2014, 43(3): 72-76.

[61] 宁欣. 基于施工场地布置的工程项目价值优化研究[J]. 建筑经济,2010(2):57-60.

NING X. Research on value optimization of engineering projects based on construction site layout [J]. Construction economy, 2010(2): 57-60.

[62] XU J P, ZHAO S W, LI Z M, et al. Bilevel construction site layout optimization based on hazardous-material transportation [J]. Journal of infrastructure systems, 2016, 22(3): 04016014.

[63] ABUNEMEH M, EL MEOUCHE R, HIJAZE I, et al. Optimal construction site layout based on risk spatial variability [J]. Automation in construction, 2016, 70: 167-177.

[64] HONG W K, LEE G, LEE S, et al. Algorithms for in-situ production layout of composite precast concrete members [J]. Automation in construction, 2014, 41: 50-59.

[65] NING X, QI J Y, WU C L, et al. A tri-objective ant colony optimization based model for planning safe construction site layout [J]. Automation in construction, 2018, 89: 1-12.

[66] RAZAVI ALAVI S R, ABOURIZK S. Site layout and construction plan optimization using an integrated genetic algorithm simulation framework[J]. Journal of computing in civil engineering, 2017, 31(4): 04017011.

[67] 杨彬,杨春贺,肖建庄,等. 基于 BIM 的装配式建筑施工现场布置及优化技术[J]. 建筑结构,2019,49(S1):921-925.

YANG B, YANG C H, XIAO J Z, et al. Layout and optimization technology of prefabricated building construction site based on BIM[J]. Building structure, 2019, 49(S1): 921-925.

[68] XU J P, LIU Q R, LEI X. A fuzzy multi-objective model and application for the discrete dynamic temporary facilities location planning problem [J]. Journal of civil engineering and management, 2016, 22(3): 357-372.

[69] 邹爱华,刘亮,吴自中,等. 应用 BIM 技术动态管理标准化施工现场[J]. 建筑技术,2016,47(8):716-718.

ZOU A H, LIU L, WU Z Z, et al. BIM technique for dynamic management of standardized construction site [J]. Architecture technology, 2016, 47(8): 716-718.

[70] LIEN L C, CHENG M Y. A hybrid swarm intelligence based particle-bee algorithm for construction site layout optimization [J]. Expert systems with applications, 2012, 39(10): 9642.

[71] KUMAR S S, CHENG J C P. A BIM-based automated site layout planning framework for congested construction sites [J]. Automation in construction, 2015, 59: 24-37.

[72] AL HAWARNEH A, BENDAK S, GHANIM F. Dynamic facilities planning model for large scale construction projects[J]. Automation in construction, 2019, 98: 72-89.

[73] ABOTALEB I, NASSAR K, HOSNY O. Layout optimization of construction site facilities with dynamic freeform geometric representations [J]. Automation in construction, 2016, 66: 15-28.

(上接第 14 页)

[25] 袁慎明. 预制混凝土外墙外窗防水技术[J]. 中国建筑防水, 2020(3): 34-36.

YUAN S M. Waterproofing technology for exterior window of precast concrete building [J]. China building waterproofing, 2020(3): 34-36.

[26] 胡骏. 防水工程设计与选材的一些基本原则[J]. 中国建筑防水, 2014(22): 15-22.

HU J. Some basic principles for design and material selection of waterproofing projects [J]. China building waterproofing, 2014(22): 15-22.

[27] 徐建月,陈宝贵,段林丽. 密封材料在建筑防水工程中的应用[J]. 新型建筑材料, 2011, 38(12): 39-41.

XU J Y, CHEN B G, DUAN L L. Application of sealing material in building waterproofing engineering [J]. New building materials, 2011, 38(12): 39-41.

[28] 钟强,张凯,李文俊. 内浇外挂装配式建筑预制外墙接缝防水技术[J]. 施工技术, 2020, 49(S1): 1025-1028.

ZHONG Q, ZHANG K, LI W J. Waterproof technology of precast outer wall joint of internal pouring and external hanging prefabricated building [J]. Construction technology, 2020, 49(S1): 1025-1028.

[29] 张富宾,肖建庄,丁红梅,等. 装配式混凝土结构防水技术现状与发展趋势[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.

[30] 陈建军,陈洋庆,龙飞. 装配式建筑外墙接缝防水密封胶相关标准解析[J]. 中国胶粘剂, 2019, 28(11): 57-62.

CHEN J J, CHEN Y Q, LONG F. Review of relevant standards of waterproof sealant for exterior wall joint of prefabricated building[J]. China adhesives, 2019, 28(11): 57-62.

[31] 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.

[32] 刘盈,郑苗,王霓. 施工工艺对装配式建筑防水密封质量的影响研究[J]. 施工技术, 2020, 49(S2): 1012-1016.

LIU Y, ZHENG M, WANG N. Research on influence of construction technology on quality of waterproof sealing for prefabricated building [J]. Construction technology, 2020, 49(S2): 1012-1016.