

引用本文: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 Fu-bin, XIAO Jian-zhuang, DING Hong-mei, et al. Current Status and Development Trend of Prefabricated Structure Waterproof Technology[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(1): 1-13.

DOI:10.19815/j.jace.2021.05001

装配式混凝土结构防水技术现状及发展趋势

张富宾^{1,2,3},肖建庄²,丁红梅¹,肖绪文²

(1. 北京东方雨虹防水技术股份有限公司 特种功能防水材料国家重点实验室,北京 100123;
2. 同济大学 土木工程学院,上海 200092; 3. 江苏大学 土木工程与力学学院,江苏 镇江 212013)

摘要:通过文献调研回顾了装配式混凝土结构的发展现状,总结了装配式混凝土结构常见渗漏部位及其主要渗漏原因,提出了装配式混凝土结构防水体系构成,阐述了装配式混凝土结构防水材料、设计与施工技术现状和发展趋势,指出了其防水存在的瓶颈问题,探讨了基于受力和抗渗防水共同要求的装配式混凝土结构设计方法与趋势。结果表明:装配式混凝土结构防水体系可分为主体结构防水和拼接缝防水两部分,防水材料分为不定型和定型2类,不定型防水材料以密封胶为代表,定型防水材料以密封垫为代表,目前国内外学者对密封材料的力学性能研究较多,对密封材料及配套材料耐久性和长期老化性能方面的研究较少;防水设计方面,需要进一步考虑地震作用、风荷载、地基不均匀沉降等作用对装配式混凝土结构防水设计的影响;防水施工方面,装配式混凝土结构拼接缝防水的现场验收检查技术手段落后,亟需推广快速、准确、高效的无损检测方法;缺少隐蔽工程密封材料的维护及快速更换技术等方面的研究。

关键词:装配式结构;防水材料;防水设计;防水施工;防水体系

中图分类号:TU375

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)01-0001-13

Current Status and Development Trend of Prefabricated Structure Waterproof Technology

ZHANG Fu-bin^{1,2,3}, XIAO Jian-zhuang², DING Hong-mei¹, XIAO Xu-wen²

(1. State Key Laboratory of Special Functional Waterproof Materials, Beijing Oriental Yuhong Waterproof Technology Co., Ltd., Beijing 100123, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: According to literature research, the development status of prefabricated concrete structure was reviewed, the common leakage parts and main leakage reasons of prefabricated concrete structure were summarized, the composition of waterproof system of prefabricated concrete structure were put forward, the current situation and development trend of waterproof materials, design and construction technology of prefabricated concrete structure were expounded, the bottleneck problems of waterproof were pointed out, and the design method and trend of prefabricated concrete structure based on the common requirements of stress and

收稿日期:2021-05-01

基金项目:中国工程院战略咨询项目(2020-XY-16);中国博士后基金特别资助项目(2021T140031);

中国博士后科学基金项目(2021M690264);特种功能防水材料国家重点实验室开放课题(SKWL-2021KF10)

作者简介:张富宾(1987-),男,山东东明人,副教授,工学博士,E-mail:zhangfubin@ujc.edu.cn.

通信作者:肖建庄(1968-),男,山东沂南人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jzx@tongji.edu.cn.

impermeability were discussed. The results show that the waterproof system of prefabricated concrete structure can be divided into the main structure waterproof and the splicing joint waterproof. The waterproof materials can be divided into non fixed type and fixed type. The non fixed type waterproof material is represented by sealant, and the fixed type waterproof material is represented by gasket. There are many researches on mechanical properties of sealing materials, while few researches on the durability and long-term aging performance of sealing materials and supporting materials. In the aspect of waterproof design, the influence of earthquake, wind load and uneven foundation settlement on the waterproof design of prefabricated concrete structure should be further considered. In terms of waterproof construction, the on-site acceptance inspection technology of prefabricated concrete structure joint waterproof is backward, and it is urgent to promote rapid, accurate and efficient nondestructive testing methods. There is a lack of research on the maintenance and rapid replacement technology of sealing materials for concealed works.

Key words: prefabricated structure; waterproof material; waterproof design; waterproof construction; waterproof system

0 引言

装配式建筑具有施工速度快、节约人力资源和建筑材料、减少建筑垃圾及有害气体排放、质量稳定等优点,近年来得到快速发展^[1-2]。2016年,国务院出台《关于大力发展装配式建筑的指导意见》,要求各地因地制宜积极推进装配式建筑产业的发展,使装配式建筑在新建建筑面积中的占比达到30%^[3]。2020年,中国31个省、自治区、直辖市和新疆生产建设兵团新开工装配式建筑共计 6.3×10^8 m²,较2019年增长50%,约占新建建筑面积的20.5%^[4]。

装配式建筑是指部分或全部构件在工厂预制,然后运输至施工现场,并通过可靠的连接方式拼装组合而成的建筑^[5],按其材料种类不同分为装配式混凝土结构,装配式钢结构和装配式木结构3种。装配式混凝土结构因其具有施工方便、经济性好及绿色环保等特点,近年来在工程结构中得到越来越广泛的应用。据统计,2018年新增混凝土预制构件厂近300家,新增各类预制构件生产线500条以上;2019年新增工厂近200家,中国规模在 3×10^4 m³以上的工厂已超过1000个^[6],2013~2018年,中国预制构件的市场规模从3亿元增长至148亿元,预计到2023年规模将达3053亿元。装配式混凝土结构又分为装配式建筑结构、装配式地下车库、装配式地铁车站、装配式综合管廊和隧道预制管片结构等^[7-13]。

由于装配式结构多采用预制构件拼装而成,构件之间拼装存在大量拼接界面,拼缝的渗水、漏水等

问题经常发生,不但会影响结构的正常使用,严重的还会影响结构的安全^[14-30]。例如:施工期间,流沙涌入建设中的上海地铁四号线区间隧道,造成严重的地面沉降^[28];在寒冷地区,渗漏水会进一步引发各种冻害;地下结构渗水导致内部潮湿,装饰材料变形、发霉、翘曲、空鼓、脱落^[11],同时会使钢筋锈蚀,影响装配式结构的安全和使用寿命^[16]。

因此,开展装配式结构防水技术研究工作迫在眉睫。本文回顾了装配式结构的发展现状,总结了装配式结构常见渗漏部位及渗漏的主要原因;明确了装配式结构防水体系构成;阐述了装配式结构防水材料、设计与施工技术现状与发展趋势;指出了装配式结构防水存在的瓶颈问题,探讨了基于受力和抗渗防水共同要求的装配式结构设计方法与趋势。

1 装配式结构常见渗漏部位及原因分析

按照渗漏部位,装配式结构渗漏水可分为预制构件本身渗漏水 and 拼接缝渗漏水2类。不同渗漏水分类及渗漏原因分析如下:在正常情况下,混凝土预制构件本身能做到结构自防水,但有时由于制作过程中选定的混凝土配合比、水泥用量、入模温度、浇筑顺序、养护时间和条件等环节上出现失误,导致预制构件出现砂眼、气孔、龟缩裂纹、温度应力裂纹;在吊装、运输、拼装过程中的操作不当造成预制构件破坏,甚至出现贯穿性裂缝;螺栓孔、吊装孔等部位未加防水垫(圈)或垫(圈)未压紧;在同步注浆和补压浆结束后,吊装孔无法清理干净,造成注浆孔渗

水^[29]。拼装后,预制构件自防水达不到设计要求的抗渗等级,尤其是存在水压力的情况下,会出现渗漏水情况。

拼接缝是装配式结构最常见也是最容易发生渗漏的部位(图1),其发生渗漏的主要原因为拼接缝处止水条粘贴不牢,遇水膨胀止水条过早浸水膨胀,使止水效果降低;拼装过程中挤(压)破止水条或止水条间夹杂异物;预制构件拼接缝缝隙超过允许范围,使得密封材料和预制构件之间应有的压紧力不够,引起渗漏水;预制构件在运输或拼装过程中发生破损,修补后造成渗水等。管片拼装过程中,仰拱部位由于清理不及时,管片缝隙之间有渣土,造成管片之间挤压不密实,从而产生渗水现象^[17]。另外,结构设计方面,拼接缝防水方案设置不合理,未采取多道防水或采用多道设防时,防水层主次不明等;现有规范防水设计时仅考虑防水压力作用,未考虑土压力、地震、风与水压力的综合作用等,均会造成拼接缝不同程度的渗漏。



(a) 装配式结构外墙接缝渗漏



(b) 预制外墙接缝渗漏

图1 装配式结构拼接界面渗漏水情况

Fig. 1 Water Leakage for Splicing Interface of Prefabricated Structure

当装配式建筑外墙采用密封胶连接时,其性能优劣也会影响装配式结构防水性能,如:密封胶选用不当,密封胶与基材黏结性差,密封胶固化过快或者

过慢,以及密封胶施工质量不达标等;施工人员在使用密封胶时往往采取多种密封胶混合使用或者不考虑建筑施工需求而乱用密封胶,导致密封胶发生鼓泡、黏结不良、脱胶、开裂、发霉等情况(图2),严重影响了防水质量^[31]。

2 装配式结构防水体系构成

按承重结构材料不同,装配式结构分为装配式混凝土结构、装配式钢结构和装配式木结构3种。对于装配式钢结构和装配式木结构,其渗漏问题主要与外围护结构有关,因此装配式钢结构和木结构防水情况本文不做讨论,重点讨论装配式混凝土结构渗漏情况。装配式混凝土结构又分为装配整体式混凝土结构和装配式混凝土结构。对于装配整体式混凝土结构,其构件全部或部分在工厂预制,现场节点通过现浇方式连接,其防水做法与传统现浇结构相似,拼接缝处出现渗漏水情况较少。对于装配式混凝土结构,其预制构件之间通过拼接缝连接,同时其外墙围护结构也存在大量的拼接界面,因此除了做好主体结构防水外,拼缝部位的渗水、漏水等问题也需要特别关注。

装配式结构的防水体系按防水部位分为主体结构(预制构件)防水和拼接缝防水(图3),其中后者是装配式建筑防水的重点。对于主体部位防水,其防水组成与传统现浇结构相似,主要通过结构自防水(防水混凝土)和附加防水层(防水砂浆、防水卷材、防水涂料等)防水。对于拼接缝防水,主要采用材料防水与构造防水相结合的形式,材料防水主要指用防水材料阻断水的通路,构造防水是采取合适的构造形式,阻断水的通路,以达到防水的目的^[32]。

3 装配式结构防水的解决路径

装配式结构防水的解决路径主要包括防水材料、防水设计、防水施工和防水检测等几方面。

3.1 装配式结构防水材料

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、灌浆材料和其他新型防水材料等^[32-41]。装配式结构可按防水结构部位不同,选择不同的防水材料^[32]。

3.1.1 主体部位防水材料

装配式结构预制构件防水包括结构自防水和附加防水层防水。结构自防水的防水材料主要为防水混凝土,附加防水层防水材料包括防水砂浆、防水卷材和防水涂料等。盾构隧道、装配式混凝土结构外

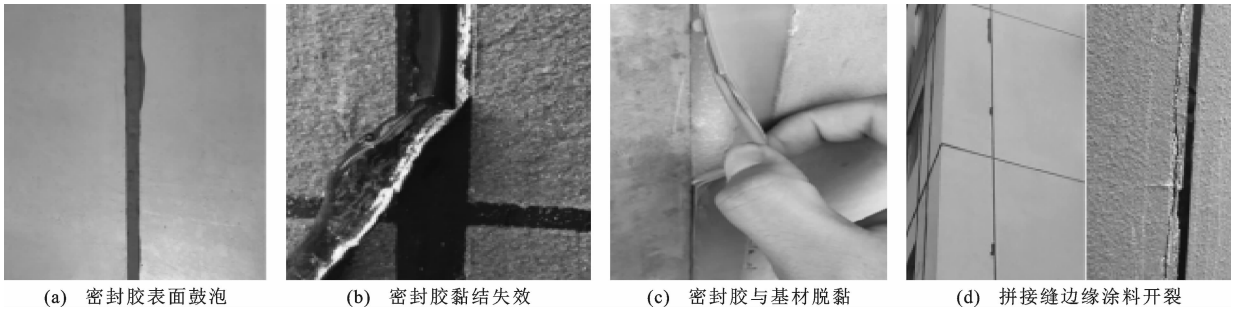


图 2 装配式结构外墙密封胶失效情况

Fig. 2 Sealant Failure for Exterior Wall of Prefabricated Structure

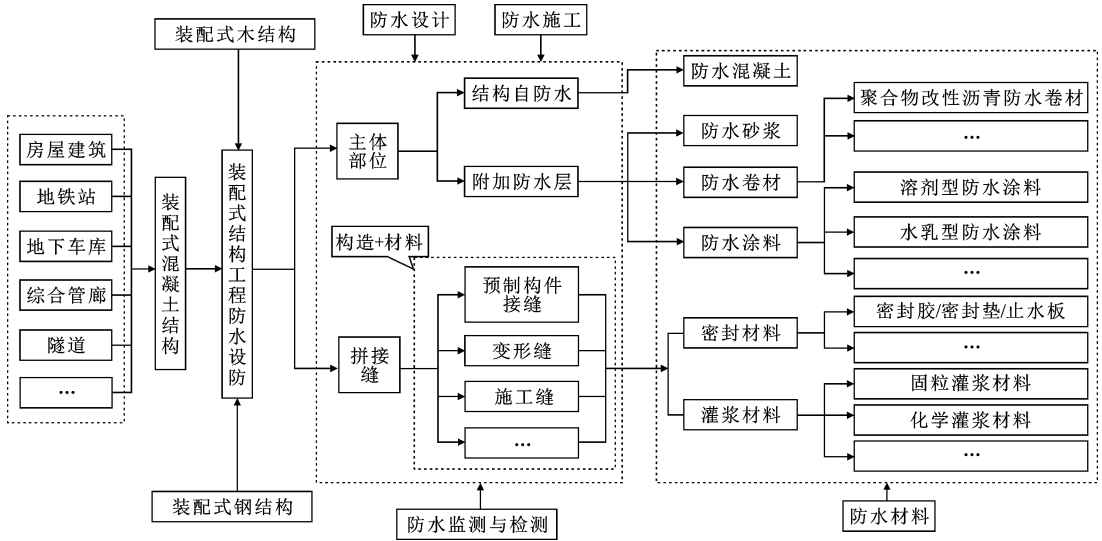


图 3 装配式结构防水体系构成

Fig. 3 Composition of Prefabricated Structure Waterproof System

墙、装配式管廊、预制混凝土大板屋面等结构的混凝土预制构件既是结构构件,又是结构的主要防水部件。这类预制混凝土构件具有很高的强度和刚度,并有很好的抗开裂和抗渗性能。由预制混凝土构件组成的结构具有优异的自防水功能,但混凝土是一种多空介质,水分经由结构体系内的微小孔隙逐渐穿透结构体,在防水缺失处出现潮湿水渍的现象,引起水泥水化浆体发生一系列物理和化学反应,从而影响混凝土结构的耐久性。因此,防水混凝土需要满足一定的抗渗等级^[18-19]。

防水卷材要有良好的耐水性和温度稳定性。现阶段中国防水卷材主要有 SBS/APP 改性沥青防水卷材、自黏聚合物改性沥青防水卷材、合成高分子防水卷材等。国家发改委发布的新版《产业结构调整指导目录(2019 年本)》已于 2020 年 1 月 1 日起实施,文中在防水材料方面鼓励桥梁隧道、地下管廊、岛礁设施、海工设施等领域用长寿命防水防腐阻燃复合材,如改性沥青防水卷材、高分子防水卷材、水

性或高固含量防水涂料等新型建筑防水材料^[34]。2019 年,福建省住建厅发布的《福建省绿色建材产品推广应用目录(2019 年)》指出,在防水卷材方面,积极推广超宽幅装配式防水卷材(如 TPO 等)、自黏防水卷材、非固化橡胶沥青防水涂料、水性防水涂料、水泥基渗透结晶型防水涂料等防水材料^[35]。

3.1.2 拼接缝用防水材料

装配式结构拼接缝防水材料包括密封材料及其配套材料。密封材料又分为不定型密封材料和定型密封材料。不定型密封材料指随密封面形状变化而变形,有一定黏结性,用来填充预制构件间隙,起到密封作用的胶黏剂,主要包括密封胶(图 4)和密封胶膏等,常用于装配式外墙拼接缝的密封防水中^[32]。

密封胶作为预制装配式建筑外墙接缝的第一道防水措施,其性能优劣直接影响接缝部位防水质量,因此密封胶的选择和施工运用至关重要。密封胶按组成材料分为单组份和双组份密封胶:单组份密封胶呈膏状,可直接将胶管置于胶枪中,利用胶枪挤出



(a) 密封胶施工



(b) 装配式外墙拼接缝

图 4 装配式结构用密封胶

Fig. 4 Sealant for Prefabricated Structure

使用,并迅速与空气中的水分产生固化反应,一般需要 14~21 d 才能够完全固化;双组份密封胶通常由甲、乙两个组分组成,使用前在现场按一定的比例配制,然后通过机械搅拌混合均匀后使用。相比单组份密封胶,双组份密封胶的固化时间短,一般完全固化需要 3~10 d。单双组份密封胶在形态、固化时间、附着性存在着一些区别。预制装配式建筑外墙受外界环境影响较大,构件接缝经常发生变化,因此固化时间短的双组份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(SR)、聚氨酯密封胶(PU)、改性硅烷聚醚密封胶(MS)、改性硅烷聚氨酯密封胶(SPU)^[36-37]。常用密封胶性能对比如表 1 所示。

表 1 常用密封胶性能对比

Tab. 1 Performance Comparison of Common Sealants

| 密封胶类型 | SR | PU | MS | SPU |
|-------|-------|--------|--------|--------|
| 黏结性 | 良好 | 良好 | 优 | 优 |
| 抗位移性 | 优 | 优 | 优 | 优 |
| 耐候性 | 优 | 良好 | 极优 | 极优 |
| 抗污染性 | 较差 | 良好 | 优 | 优 |
| 应用基材 | 玻璃、金属 | 混凝土、金属 | 混凝土、金属 | 混凝土、金属 |

对于装配式建筑,拼接缝部位密封胶应具有如下性能:①与基层具有良好的黏结性能;②具有较强

的抗位移能力;③具有优异的耐候性能;④具有良好的可装饰性;⑤具有良好的耐污染性。通过综合性能对比,改性硅烷聚醚密封胶和改性硅烷聚氨酯密封胶在混凝土黏结性、抗位移性、可装饰性、耐污染等关键性能指标上相较其他传统建筑密封胶更有优势,可以作为预制装配式建筑外墙接缝的主要密封材料^[36-38]。

常见的定型密封材料包括密封垫、密封条和止水板等。定型密封材料具有良好的弹塑性和强度,不会因构件变形、振动发生脆裂和脱落,在装配式地铁站、地下车库、隧道、综合管廊等拼接缝部位应用最为广泛。密封垫是最常用的定型密封材料^[39],分为弹性橡胶密封垫、遇水膨胀橡胶密封条及复合型弹性橡胶密封垫(图 5)三种。弹性橡胶密封垫早期以氯丁橡胶(CR)为主要材质,后逐渐被三元乙丙橡胶(EPDM)取代。密封垫断面主要采取中孔形、梳型等形式以确保具有良好的压缩性能^[40-41]。

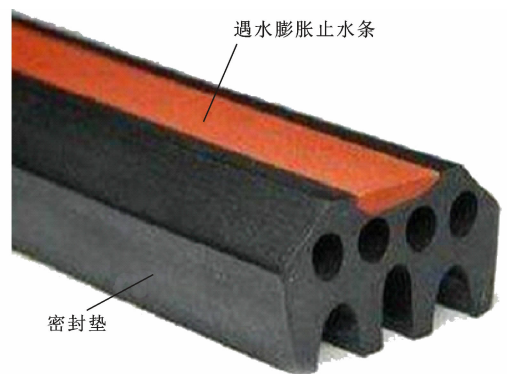


图 5 复合型弹性橡胶垫

Fig. 5 Composite Elastic Rubber Pad

遇水膨胀橡胶是由高吸水性天然树脂、天然橡胶、氯丁橡胶等复合而成,遇水后会产生体积膨胀,从而产生膨胀压应力以达到止水目的。截面形式上通常采取与沟槽尺寸相匹配的矩形或梯形截面。遇水膨胀橡胶密封垫在日本及东亚等地区应用广泛,中国主要将遇水膨胀橡胶作为管片拼接缝防水的辅助材料。复合型弹性橡胶密封垫是以 EPDM 为主体,在密封垫顶部或脚部覆盖或嵌合一层遇水膨胀橡胶的密封形式(图 5)。它主要通过 EPDM 的弹性压缩力止水,在弹性密封垫无法完全止水的情况下,可依靠膨胀遇水橡胶达到止水的目的,因此具有更加可靠的止水性能。

密封垫按其构造形式不同又分为传统弹性橡胶密封垫和锚固式密封垫(图 6、7)。传统密封垫是在模具中浇筑混凝土并预留凹槽,在施工现场将密封

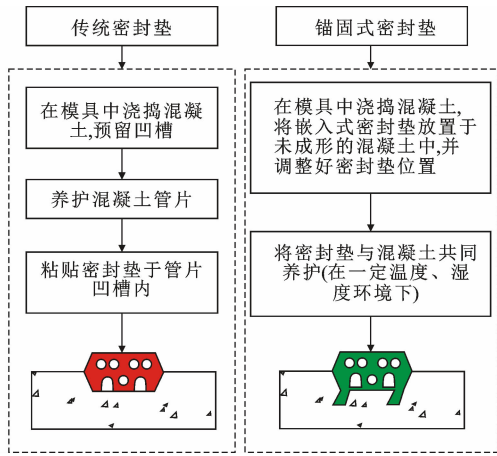


图6 传统密封垫与锚固式密封垫截面形式及施工工艺对比

Fig. 6 Comparison of Section Form and Construction Technology Between Traditional Gasket and

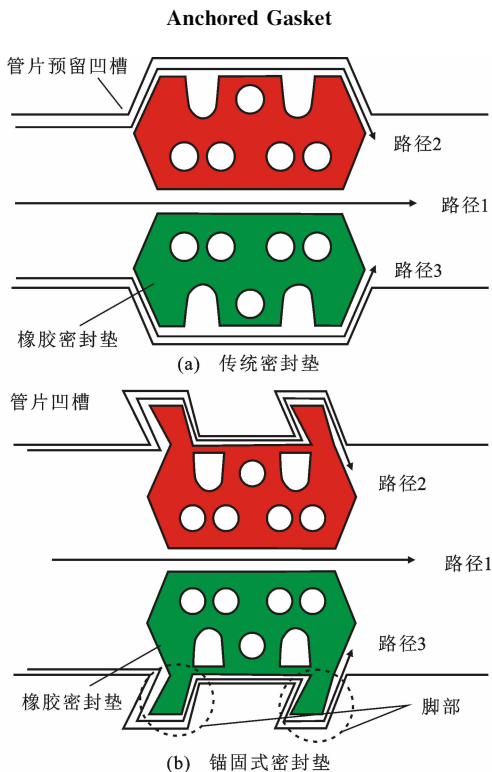


图7 传统密封垫和锚固式密封垫防水机理

Fig. 7 Waterproof Mechanism of Traditional Gasket and Anchored Gasket

垫粘贴在管片凹槽内。国内外诸多学者对其受力性能进行了广泛研究,结果表明密封垫的断面形式对其耐水性能有较大的影响。然而,已有研究对截面的优化大多局限于孔洞形状、大小、开孔率,很少考虑其他部位的影响^[42]。Pau^[43]在试验中发现弹性密封垫与管片沟槽的接触面是可能发生渗漏的位置。传统密封垫施工会增加现场作业时间,在时间较为紧迫的情况下,现场工人的作业精准度得不到

较好的保证。此外如果橡胶条和管片之间的黏结不够紧密,在外部水压的作用下常会发生渗漏现象,并且在凹槽内积水,长期作用下会腐蚀橡胶条。基于此,有学者提出了锚固式密封垫,将密封垫脚部延伸至混凝土内部,以改善其防水能力^[44]。

锚固式密封垫是在模具中浇筑混凝土,将锚固式密封垫放置于未成形的混凝土中,并调整好位置,将密封垫和混凝土共同养护,以实现密封垫与构件工程预制,减少现场施工时间,同时有效保证施工质量^[44]。研究表明,锚固式密封垫弥补了传统防水接头中有水压易从密封垫与管片界面处渗漏的缺陷,但混凝土在结硬过程中的表面伸缩与橡胶条不完全一致,使得橡胶条表面不够平整,有起伏不平的现象,对防水能力存在不良影响。下一步需要深入研究其制备工艺及混凝土收缩对其应力的影响。

3.2 装配式结构防水设计

装配式结构防水设计中主体结构防水设计方法与传统现浇结构相似,预制构件拼接缝防水设计与传统现浇结构有较大不同。目前装配式结构拼接缝防水设计多采用材料防水和构造防水相结合的设计方法^[32,45-46]。

装配式建筑外挂墙板拼接缝防水分为封闭式防水构造、开放式防水构造和压缩式防水构造3种。

封闭式防水构造是以密封胶为第1道防线[图8(a)],其直接与外界环境接触,防止水分渗入。开放式防水构造用挡水板作为第1道防线[图8(b)]。2种防水构造都通过设置空腔作为第2道防线。压缩式防水构造[图8(c)]是将一侧墙板预制成“凸”型,另一侧预制成“凹”型,通过两侧墙板结合时的挤压力,使密封胶完全封堵拼接缝,达到防水密封的效果。这种防水构造施工方便,但后期维护和更换比较困难^[31]。

对于装配式地下工程预制构件拼接缝防水,多采用密封垫作为主要防水材料^[45]。弹性密封垫主要通过橡胶密封材料的变形填补接触界面上的凹凸不平,实现防水密封。

当密封垫受到压力后,对界面产生界面应力 P_0 ;当密封垫受到侧向压力作用时,界面应力将重分布,产生附加应力 P_1 。密封垫整个界面应力 $P = P_0 + P_1$,当作用水压 P_w 与密封材料的界面应力 P 满足公式(1)时,拼接缝不发生渗漏。

$$P_w \leq \alpha P = \alpha(P_0 + P_1) = \alpha(P_0 + \beta P_0) \quad (1)$$

式中: α 、 β 为与密封材料的材质和接触面状态有关的参数。

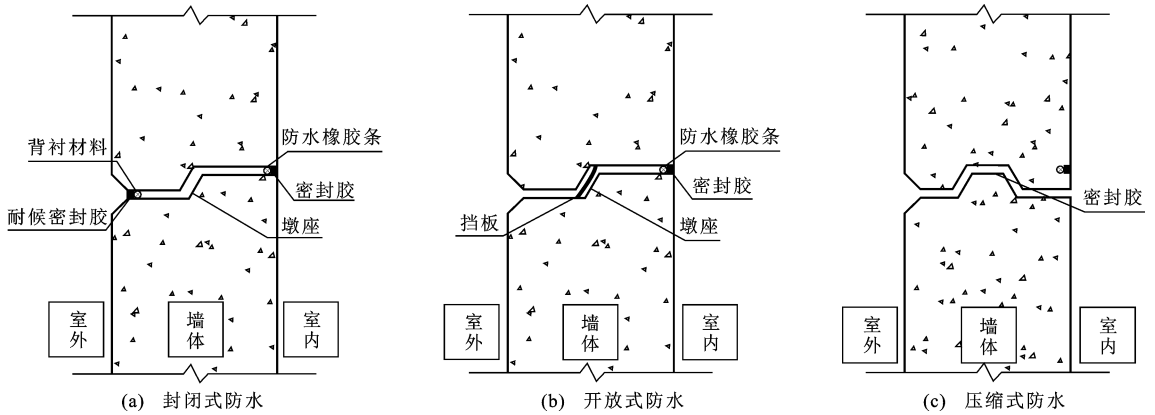


图 8 装配式建筑外墙板横缝连接构造

Fig. 8 Transverse Joint Connection Structure of Prefabricated Building Exterior Wall Panel

装配式结构拼接缝防水设计按密封垫的防水道数可分为单道密封垫防水和双道密封垫防水等形式^[47]。单道密封垫防水是指以单道密封垫作为主要防水材料防水形式[图 9(a)],通常在密封垫之外还会辅以其他措施来加强防水能力。如在密封垫外设置外沿挡水条以阻挡泥沙、注浆浆材等,减轻对密封垫的侵蚀,延长使用寿命。除此之外,还可以在管片内侧设置嵌缝防水。双道密封垫防水是指在管片内外两侧均布置密封垫的防水形式,必要时外侧还会采取挡水条等措施来进一步提高防水能力[图 9(b)]。密封垫的防水道数主要根据工程类型和具体预制构件设计确定。

体系共有 3 个部分:第 1 层防水就在预置构件上,构件生产采用的是抗渗混凝土,这些构件在工厂预制化生产,并且通过增级养护,这样生产的构件里面微裂纹很少,保证构件的防水性;第 2 个防水措施是在构件接缝处,构件接缝处有 2 条橡胶密封胶条,这是复合型的防水材料,构件和构件接在一起之后,还会通过注浆孔注放环氧树脂,将构件连接处的空隙填满。拼装完成后,还要在顶板上做 1 层复合的防水材料,采用非弹性固化沥青,通过这样 3 道防水措施来完成车站的防水防渗。作为装配式拼装车站,各预置构件拼装完成后,施工方还采取了 3 道措施进行防水,通过这些防水措施,该车站预计能使用 100 年^[48]。

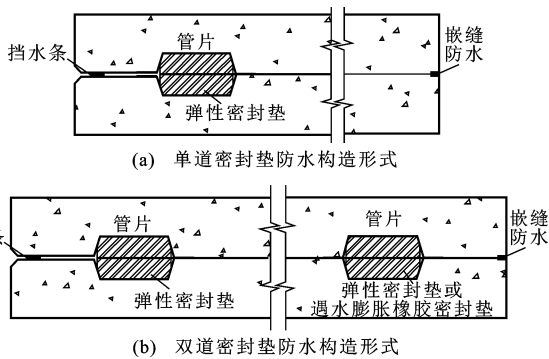


图 9 密封垫防水构造形式

Fig. 9 Waterproof Structure of Gasket

国内外在铁路、公路等仅外侧受水压的装配式隧道结构中,大多采用单道密封垫防水。对于抗渗等级要求较高、受水压较大的有压管廊及涵洞,一般考虑设置双道或多道密封垫防水。南京长江隧道外侧采用三元乙丙橡胶密封垫,内侧采用嵌缝槽的 2 道防水构造。港珠澳大桥沉管隧道拼接缝采用可膨胀橡胶密封条和 OMEGA 止水带组成的复合防水系统。中国首座装配式地铁站长春袁家店车站防水

3.3 装配式结构防水施工

装配式结构卷材防水、涂料防水施工与传统现浇结构防水施工方法相似。密封材料施工与传统现浇结构施工工艺有所不同。装配式建筑外墙板接缝通常采用密封胶进行密封,其功能是实现预制外墙板接缝的永久性密封,同时承担防水、抗变形作用和建筑外观效果。现场施工工艺是否规范直接影响装配式建筑防水密封质量,其施工工艺一般包括接缝处理、填充背衬材料、粘贴美纹纸、涂刷底涂、施胶、压实刮平、撕除美纹纸和清洁养护等步骤^[38]。

地铁、管廊等管片拼接缝施工主要包括弹性橡胶密封垫施工和辅助材料施工,辅助材料包括橡胶密封垫和胶黏剂。施工过程中胶黏剂应搅拌均匀,并在粘贴作业过程中经常搅拌,第 1 遍涂刷后待胶黏剂表干(不粘手),再涂第 2 遍,待溶剂挥发至用手轻触稍有黏性而不粘手时,将密封垫粘贴在凹槽内。环缝密封垫表面复合 1 层遇水膨胀橡胶片,应避免与水接触,以免遇水膨胀橡胶过早产生膨胀,导致防

水性能下降。封顶块楔入时,两侧纵缝密封垫由于受到摩擦力作用容易被拉长并挤出。在拼装封顶块前,其两侧纵缝密封垫表面应涂润滑剂。目前对于装配式结构密封材料施工尚没有形成完善的工法。传统密封材料施工主要在施工现场完成,机械化程度较低,施工质量难以保证。对于锚固式密封垫,可以在工厂生产预制构件时,与主体结构一体成型,在保证施工质量的同时,显著提高施工效率。

3.4 装配式结构防水检测技术

常用的装配式结构防水检测技术包括直接检测法和无损检测法。直接检测法包括目测法、钻孔量测法、现场蓄水/淋水试验法等。无损检测法包括超声波检测法、红外热成像技术、电磁波检测法、三维激光扫描技术和基于深度学习的检测方法等^[49-57]。

对于装配式结构而言,目前的检测方法仍以直接检测法为主,但该方法对于装配式建筑而言,效率较低。无损检测方法成本和技术要求较高,但其效率和准确度较高,目前在中国逐步开始得到推广应用。比较有代表性的无损检测方法是三维激光扫描技术和基于深度学习的检测方法^[49]。

当采用高精度仪器且距离适当时,三维激光扫描技术可以达到传统全站仪、水准仪的精度,具有交互性好、便于建模、检测迅速、多点测定等优点^[53]。瑞士 AMBERG 公司、德国 SPACETEC 公司等采用三维激光扫描关键技术开发出隧道快速扫描检测系统,能对运营隧道进行全方位扫描,具有快速、高精度等优点,根据扫描结果可分析出渗漏水发生位置与面积大小。黄永杰等^[52]经现场试验,开发出盾构隧道渗漏水自动检测系统,可实现隧道管片渗漏水信息准确采集、识别和分析。Xue 等^[57]提出一种基于全景图像 CNN 的隧道病害自动识别方法,该方法采用卷积神经网络对病害进行自动检测分类识别,神经网络模型评估结果与人工评估结果具有一致性,表明神经网络模型在对渗漏水等级评价中具有较好的适用性。

4 装配式结构防水存在的瓶颈

目前,中国装配式结构防水研究大多集中于设计及施工方面,在防水材料、检测及后期维护等方面仍存在诸多问题,主要的瓶颈如下:

(1)对装配式结构用密封材料的力学性能研究较多,对密封材料及配套材料耐久性和长期老化性能的研究较少,缺乏针对装配式结构的密封材料耐久性及老化试验方法。

(2)目前装配式结构拼接缝防水的现场验收检查工作仍处于人为观察、测量的初级阶段,存在很大的不确定性,结果可靠度低,亟需推广快速、准确、高效的无损检测方法。

(3)装配式结构拼接缝密封材料运营期间受到管片挤压应力和地下水、霉菌等的作用,发生热氧及应力蠕变松弛老化现象,导致其物理力学性能的衰退和密封材料失效,需要更换,对于装配式结构后期维护期间,密封材料(尤其是装配式地铁站、隧道、综合管廊等地下结构中拼接缝用密封材料)的维护更换技术等方面的研究几乎为空白。

(4)装配式结构在遭遇地震、风、水等荷载作用时,拼接缝易瞬间产生极大的张开量与错台量,加之其所承受的高水压,易导致密封垫防水性能失效,目前的设计方法未能考虑上述因素对装配式拼接缝防水性能的影响。

5 基于受力和抗渗防水共同要求的装配式结构设计方法与趋势探讨

目前的装配式结构防水主要从材料和构造角度去设计,而在实际使用过程中,其会受到温度、风、地震、水压力和土压力等共同作用,使得防水材料处于应力与水的耦合作用下,降低了防水材料的使用寿命。因此,探讨基于受力和抗渗防水共同要求的装配式结构设计方法是十分有必要的^[58-61]。

5.1 主体结构抗渗设计方法探讨

对于装配式混凝土结构主体防水部位,现有规范以抗渗等级为控制指标,不能很好地考虑外荷载对结构渗漏水的影响。实际上在拉、压、弯和剪作用下,预制构件孔隙率及裂缝间隙会发生变化。研究表明,对于受轴向压力的混凝土构件,当轴向压力小于 30% 的极限压力时,混凝土内部原生裂纹在载荷作用下趋于闭合,混凝土渗透性降低。对于受弯构件,混凝土受拉区的渗透性与拉应力呈正比,特别是混凝土开裂后,渗透性会急剧增大。国内外学者开展了一些荷载作用对混凝土渗透性的影响研究,但用于指导实际工程应用的设计方法较少^[58]。

5.2 装配式结构拼接缝抗渗设计方法探讨

在进行抗震设计时,装配式结构外挂墙板与主体结构一般采用柔性连接,但这种设计理念没有很好地考虑墙体移动对拼接缝防水的影响。《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1—2014)规定,拼接缝宽度应满足主体结构的层间位移、密封材料的变形能力、施工误差、温差引起的变形要求,且不应小于

15 mm,但规范未能给出 15 mm 的具体依据^[5]。

在地震作用下,预制构件拼接缝易瞬时产生极大的张开量与错台量,加之其所承受的高水压,易导致密封垫失效。因此,在密封垫设计时应考虑地震作用下防水性能的安全问题。在使用期间,密封垫还受压应力和地下水的复合作用,会发生应力蠕变老化现象,导致其物理力学性能衰退,密封垫之间或密封垫与嵌垫之间的接触应力小于水压力,出现漏水现象,这些情况都将降低装配式结构的使用寿命^[59-60]。因此,在防水设计时合理考虑受力和防水的共同作用是十分有必要的。《城市综合管廊工程技术规范》(GB 50838—2015)中规定预制拼装综合管廊拼接防水弹性密封垫的界面应力不应低于 1.5 MPa^[6]。该数据为试验总结得出,并没有明确指出适用的胶条种类和依据。

5.3 考虑抗渗防水与荷载共同作用的极限状态设计方法探讨

装配式结构的界面不仅要根据承载力和正常使用极限状态进行设计,还要进行基于防水性能的极限状态验算。对于某一固定密封垫胶条,在某一压力作用下其变形量是定值,与该压缩量对应的防水胶条承载力也是一定的。文献[47]、[61]给出了装配式干连接受弯构件满足防水能力极限状态设计方法,即

$$\theta_{\max} = \min\{\theta_{\max1}, \theta_{\max2}\} \quad (2)$$

式中: $\theta_{\max1}$ 为满足胶条防水能力的最大转角; $\theta_{\max2}$ 为满足胶条受压不破坏的最大转角。

根据拼缝抗弯刚度计算模型,可计算出受弯构件满足防水能力极限状态下的抗弯承载力 M_{uw} ,即

$$M_{uw} = K(\theta)\theta_{\max} \quad (3)$$

通过计算承载力设计值下的接缝转角 θ_u ,如果 $\theta_u > \theta_{\max}$,则不必进行防水承载力的设计,因为防水承载力低于极限状态承载力。目前该设计方法只局限于受弯构件,对于其他受力形式构件,并没有相关的防水能力极限状态设计方法。

6 结 语

(1)装配式结构按渗漏水部位可分为不同种类,渗漏原因包括水文条件、设计因素、材料因素和施工因素等;装配式结构防水体系按防水部位分为主体结构防水和拼接缝防水,其中拼接缝防水是装配式建筑防水的重点,防水形式主要采用材料防水与构造防水相结合的形式。

(2)装配式结构防水材料分为不定型和定型防

水材料,不定型密封材料以密封胶为代表,定型密封材料以密封垫为代表,锚固式密封垫具有防水性能好、施工速度快等优点,未来会得到广泛应用。

(3)开展高性能、长寿命、自修复、节能环保和可再生的防水材料研发;加强锚固式密封垫防水机理研究及其配套材料的开发,开展其耐久性、可靠性联合攻关,建立防水系统耐久性评价标准。

(4)加强装配式结构后期维护期间密封材料(尤其是装配式地铁站、隧道、综合管廊等地下结构中拼接缝用密封材料)的维护更换技术研究;提高装配式结构无损检测技术的可靠性、智能化水平,降低检测成本。

(5)进一步提高装配式结构防水设计的科学性、合理性,研究地震作用、风荷载、地基不均匀沉降等对装配式结构防水设计的影响,提出考虑受力和抗渗防水共同要求的装配式结构设计方法,并考虑建立增加防水性能指标的极限状态设计方法。

参考文献:

References:

- [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 Jun, ZHAO Ji-da, HU Zong-yu. Review and Thinking on Development of Building Industrialization in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (5):1-8.
- [2] 林海侠,毕鑫磊,王 新.工业化装配式屋面系统在雄安设计中心的应用[J].中国建筑防水,2019(3):13-16.
LIN Hai-xia, BI Xin-lei, WANG Xin. Application of Industrial Fabricated Roof System in Xiong'an Design Center[J]. China Building Waterproofing, 2019(3): 13-16.
- [3] 国务院办公厅.国务院办公厅印发《关于大力发展装配式建筑的指导意见》[EB/OL].(2016-09-30)[2021-04-20]. http://www.xinhuanet.com/politics/2016-09/30/c_1119656301.htm.
General Office of the State Council. Issued by the General Office of the State Council *Guiding Opinions on Vigorously Developing Prefabricated Buildings* [EB/OL]. (2016-09-30)[2021-04-20]. http://www.xinhuanet.com/politics/2016-09/30/c_1119656301.htm.
- [4] 住建部.2020年全国新开工装配式建筑面积达6.3亿平方米,较2019年增长50%[EB/OL].(2021-03-14)[2021-04-20]. <https://finance.people.com.cn/2021/0314/c1004-32050935.html>.

- Ministry of Housing and Urban Rural Development. In 2020, the Newly Started Assembly Building Area in China Will Reach 630 Million Square Meters, an Increase of 50% Compared with 2019[EB/OL]. (2021-03-14)[2021-04-20]. <https://finance.people.com.cn/2010/0314/c1004-32050935.html>.
- [5] 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.
Technical Specification for Precast Concrete Structures:JGJ 1—2014[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2014.
- [6] 城市综合管廊工程技术规范:GB 50838—2015[S]. 北京:中国计划出版社,2015.
Technical Code for Urban Utility Tunnel Engineering:GB 50838—2015 [S]. Beijing: China Planning Press,2015.
- [7] 邹家丽,郑焕奇. 信息管理系统在建筑预制构件生产中的应用[J]. 广东土木与建筑,2019,26(11):70-73.
ZOU Jia-li,ZHENG Huan-qi. Application of Information Management System in Prefabricated Component Production of Buildings[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering,2019,26(11):70-73.
- [8] 刘盈. 装配式建筑外墙防水构造型式介绍及设计控制要点[J]. 粘接,2019,40(7):99-101.
LIU Ying. Introduction of Waterproof Structure Type and Key Points of Design Control for Outer Wall of Prefabricated Building[J]. Adhesion,2019,40(7):99-101.
- [9] 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 Jun-min,CANG Yan-fei,YUE Zhi-fang, et al. Research on the Application of Prefabricated Building Exterior Wall Waterproof Technology[J]. New Building Materials,2020,47(9):59-62.
- [10] 史娥. 在役公路隧道堵漏材料试验及渗漏水治理技术研究[D]. 西安:长安大学,2018.
SHI E. Leakage Test and Leaking Water in the Existing Highway Tunnel Research on Management Technology[D]. Xi'an:Chang'an University,2018.
- [11] 匡亚川,宋哲轩,刘胤虎,等. 新型装配式双舱综合管廊力学性能试验[J/OL]. 吉林大学学报(工学版),2021:1-9[2021-07-30]. <http://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20200818>.
KUANG Ya-chuan, SONG Zhe-xuan, LIU Yin-hu, et al. Experimental on Mechanical Properties of New Type Assembled Double-cabin Utility Tunnel [J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2021:1-9[2021-07-30]. <http://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20200818>.
- [12] 秦祎文,杨桃,郭昊天,等. 装配式地铁车站地震响应数值分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2020,33(4):80-87.
QIN Yi-wen, YANG tao, GUO Hao-tian, et al. Numerical Analysis of Seismic Response of Fabricated Subway Station [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2020, 33(4):80-87.
- [13] 谢宏明,何川,封坤,等. 地震作用下盾构隧道环缝单向振动防水性能试验[J]. 西南交通大学学报,2020,55(4):713-718.
XIE Hong-ming, HE Chuan, FENG Kun, et al. Unidirectional Vibration Waterproof Test of Ring Joint of Shield Tunnel Under the Action of Earthquake [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(4):713-718.
- [14] 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 Yong. Brief Review on Waterproofing Techniques of Precast Concrete Structure [J]. China Building Waterproofing, 2015(13):1-5,14.
- [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 Xing, XIAO Xu-wen, XU Hong-tao, et al. Development Status and Countermeasures of Waterproof Engineering in China [J]. Construction Technology, 2021, 50(3):5-8.
- [16] 曹征富. 地下建筑工程渗漏及治理技术综述[J]. 中国建筑防水,2017(6):26-33.
CAO Zheng-fu. Reviews on Seepage and Treatment of Underground Architectural Engineering Technology [J]. China Building Waterproofing, 2017(6):26-33.
- [17] 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 Bing. Comprehensively Analyze and Tackle of Exterior Wall Leakage of a Prefabricated Building [J]. China Building Waterproofing, 2019(12):19-22.
- [18] 胡骏. 论刚性防水[J]. 中国建筑防水,2020(7):1-7,13.
HU Jun. Discussion on Rigid Waterproofing [J]. China Building Waterproofing, 2020(7):1-7,13.
- [19] 胡骏,瞿培华. 地下工程防水与结构同寿命的技术路线[J]. 中国建筑防水,2019(9):1-5,8.
HU Jun, QU Pei-hua. Technical Route of Same Lifetime of Underground Waterproofing and Structure [J]. China Building Waterproofing, 2019(9):1-5,8.

- [20] 龚晓南,郭盼盼.隧道及地下工程渗漏水诱发原因与防治对策[J].中国公路学报,2021,34(7):1-30.
GONG Xiao-nan, GUO Pan-pan. Causes and Prevention and Mitigation Methods for Water Leakage in Tunnels and Underground Structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7): 1-30.
- [21] GONG C J, DING W Q, XIE D W. Parametric Investigation on the Sealant Behavior of Tunnel Segmental Joints Under Water Pressurization[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 97: 103231.
- [22] 郭斐.浅析隧道水害的成因及防治措施[J].价值工程,2018,37(34):183-185.
GUO Fei. Analysis on the Causes of Water Disaster in Tunnels and Prevention Measures [J]. Value Engineering, 2018, 37(34): 183-185.
- [23] 董林伟.装配式地铁车站与暗挖区间防水性能试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
DONG Lin-wei. Study on Waterproof Performance Test of Fabricated Subway Station and Subsurface Excavation Section [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [24] 孙海英.地铁防水施工技术研究——以石家庄地铁三号线为例[D].石家庄:石家庄铁道大学,2018.
SUN Hai-ying. The Research of Waterproof Technology About the Subway's Construction — Shijiazhuang Metro in the 3rd Line [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2018.
- [25] 叶琳昌.某广场大型地下室渗漏水原因分析与思考——从工程事故中汲取智慧和力量[J].工程质量,2012,30(12):7-13.
YE Lin-chang. Reason Analysis and Reflection of Water Leakage in a Large Basement — Gain Wisdom and Power from the Engineering Accident [J]. Construction Quality, 2012, 30(12): 7-13.
- [26] 姚亚东,王俊锋,王道春,等.地下室防水工程渗漏原因与防治措施分析[J].工程技术研究,2020,5(19):149-150.
YAO Ya-dong, WANG Jun-feng, WANG Dao-chun, et al. Analysis of Leakage Causes and Prevention Measures of Basement Waterproof Engineering [J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(19): 149-150.
- [27] 董飞,房倩,张顶立,等.北京地铁运营隧道病害状态分析[J].土木工程学报,2017,50(6):104-113.
DONG Fei, FANG Qian, ZHANG Ding-li, et al. Analysis on Defects of Operational Metro Tunnels in Beijing [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 104-113.
- [28] 刘洋,陈晓,陆大晋.装配式预制板结构屋面防水技术探讨[J].中国建筑防水,2016(11):22-24.
LIU Yang, CHEN Xiao, LU Da-jin. Discussion on Waterproofing Technology of Fabricated Precast Slab Roof [J]. China Building Waterproofing, 2016(11): 22-24.
- [29] 马亚航.隧道开挖引起的地层变形及其对地下管线的影响分析[D].长沙:湖南大学,2011.
MA Ya-hang. Effects of Tunneling on Ground Movements and Underground [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [30] 徐玉滢.地下装配式地铁车站综合防水技术研究[D].济南:山东科技大学,2019.
XU Yu-ying. Research on Comprehensive Waterproofing Technology of Underground Prefabricated Metro Station [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2019.
- [31] 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(增):1012-1016.
LIU Ying, ZHENG Miao, WANG Ni. Research on the Influence of Construction Technology on Quality of Waterproof Sealing for Prefabricated Building [J]. Construction Technology, 2020, 49(S): 1012-1016.
- [32] 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 Chang-tai. Study on Waterproofing Technology for Pre-fabricated Concrete Building External Wall Joints [J]. China Building Waterproofing, 2018(16): 25-27.
- [33] 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 Jun. Some Basic Principles for Design and Material Selection of Waterproofing Project [J]. China Building Waterproofing, 2014(22): 15-22.
- [34] 国家发改委.发展改革委修订发布《产业结构调整指导目录(2019年本)》[EB/OL].(2019-11-06)[2021-07-30]. http://gov.cn/xinwen/2019-11/06/content_5449193.htm.
National Development and Reform Commission. Revised and Released by the Development and Reform Commission's Directory of *Guidance on Industrial Structure Adjustment (2019)* [EB/OL]. (2019-11-06) [2021-07-30]. http://gov.cn/xinwen/2019-11/06/content_5449193.htm.
- [35] 福建省住房和城乡建设厅.关于印发《福建省绿色建材产品推广应用目录(2019年)》的通知[EB/OL].(2019-12-31)[2021-07-30]. http://zjt.fujian.gov.cn/xxgk/zfxxgkzl/xxgkml/dfxfghzghfwj/jskj_3794/

- 20200107-5175918. htm.
- Fujian Housing and Urban—Rural Development Department, Notice on the Issuance of *Promotion and Application Catalogue of Green Building Materials in Fujian Province (2019)* [EB/OL]. (2019-12-31) [2021-07-30]. http://zjt.fujian.gov.cn/xxgk/zfxxgkzl/xxgkml/dfxfghzghfxwj/jskj_3794/20200107-5175918.htm.
- [36] 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 Jian-yue, CHEN Bao-gui, DUAN Lin-li. Application of Sealing Material in Building Waterproofing Engineering [J]. *New Building Materials*, 2011, 38(12):39-41.
- [37] 朱志远. 建筑密封胶及其新标准[J]. 中国建筑防水,2010(6):16-19.
ZHU Zhi-yuan. Building Sealant and Its New Standards[J]. *China Building Waterproofing*, 2010(6):16-19.
- [38] 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(增):1025-1028.
ZHONG Qiang, ZHANG Kai, LI Wen-jun. Waterproof Technology of Precast Outer Wall Joint of Internal Pouring and External Hanging Prefabricated Building[J]. *Construction Technology*, 2020, 49(S):1025-1028.
- [39] SHI C H, CAO C Y, LEI M F, et al. Time-dependent Performance and Constitutive Model of EPDM Rubber Gasket Used for Tunnel Segment Joints[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 50:490-498.
- [40] LI X, ZHOU S H, DI H G, et al. Evaluation and Experimental Study on the Sealant Behaviour of Double Gaskets for Shield Tunnel Lining[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 75:81-89.
- [41] GONG C J, DING W Q, SOGA K C, et al. Failure Mechanism of Joint Waterproofing in Precast Segmental Tunnel Linings [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 84:334-352.
- [42] 张金伟,罗富荣,童丽红,等. 地铁矿山法隧道装配式二次衬砌结构设计初步研究[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(5):822-830.
ZHANG Jin-wei, LUO Fu-rong, TONG Li-hong, et al. Study on Prefabricated Lining Structure Design of a Metro Tunnel Constructed by Mining Method [J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(5):822-830.
- [43] PAUL S. Sealability Tests of Gaskets Between Precast Concrete Tunnel Lining Segments[D]. Urbana-Champaign: University of Illinois Urbana-Champaign, 1978.
- [44] 张子新,谷冠思,黄昕,等. 盾构隧道管片接头嵌入式密封垫防水性能探究[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(9):1402-1411.
ZHANG Zi-xin, GU Guan-si, HUANG Xin, et al. Experimental Study on Waterproof Performance of Embedded Sealing Gasket of Segment Joint for a Shield Tunnel[J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(9):1402-1411.
- [45] 姚润樾. 预制拼装综合管廊管片接缝橡胶密封垫的长期性能与截面优化研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
YAO Run-yue. Research on the Long-term Performance and Sectional Optimization of Rubber Gasket of Utility Tunnel's Lining Joint[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [46] 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 Xia, ZHONG Xiao-liang. Current Situation and Existing Problems of Waterproofing and Sealing for Prefabricated Building External Walls[J]. *China Building Waterproofing*, 2016(12):16-18.
- [47] 陈孝凯. 城市地下预制拼装结构物界面防水设计方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
CHEN Xiao-kai. Study on Design Method of Interface Waterproofing for Urban Underground Precast and Assembled Structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [48] 赵春刚. 全国首个装配式地铁站长春袁家店车站基本完工 [J/OL]. (2016-06-15) [2021-12-08]. https://www.sohu.com/a/83297974_386696.
ZHAO Chun-gang. Changchun Yuanjiadian Station, the First Prefabricated Subway Station in China, Has Been Basically Completed [J/OL]. (2016-06-15) [2021-12-08]. https://www.sohu.com/a/83297974_386696.
- [49] 唐璇,张忠宇,陈喜坤,等. 水下盾构隧道结构健康监测运营现状及展望[J]. 现代交通技术,2020,17(4):33-38.
TANG Xuan, ZHANG Zhong-yu, CHEN Xi-kun, et al. Current Status and Prospects of Underwater Shield Tunnel Structural Health Monitoring System [J]. *Modern Transportation Technology*, 2020, 17(4):33-38.
- [50] 程姝菲,黄宏伟. 盾构隧道长期渗漏水检测新方法[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(3):733-738.

- CHENG Shu-fei, HUANG Hong-wei. Monitoring Methods of Long-term Water Seepage in Shield Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 733-738.
- [51] 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 Hai-tao, HUANG Hong-wei, XUE Ya-dong. 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.
- [52] 黄永杰, 柳 献, 袁 勇, 等. 盾构隧道渗漏水的自动检测技术[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(1): 73-78.
- HUANG Yong-jie, LIU Xian, YUAN Yong, et al. Auto Inspection Technology for Detecting Leakage in a Shield Tunnel[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(1): 73-78.
- [53] 吴贤国, 刘鹏程, 王 雷, 等. 基于三维激光扫描地铁运营隧道渗漏水监测及预警[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(1): 1-7, 15.
- WU Xian-guo, LIU Peng-cheng, WANG Lei, et al. Monitoring and Warning of Seepage in Subway Operation Tunnel Based on 3D Laser Scanning[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37(1): 1-7, 15.
- [54] XIONG L J, ZHANG D L, ZHANG Y. Water Leakage Image Recognition of Shield Tunnel via Learning Deep Feature Representation[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2020, 71: 102708.
- [55] GAO C L, ZHOU Z Q, YANG W M. Model Test and Numerical Simulation Research of Water Leakage in Operating Tunnels Passing Through Intersecting Faults[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 94: 103134.
- [56] 黄宏伟, 李庆桐. 基于深度学习的盾构隧道渗漏水病害图像识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2861-2871.
- HUANG Hong-wei, LI Qing-tong. Image Recognition for Water Leakage in Shield Tunnel Based on Deep Learning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2861-2871.
- [57] XUE Y D, CAI X Y, SHADABFAR M, et al. Deep Learning-based Automatic Recognition of Water Leakage Area in Shield Tunnel Lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 104: 103524.
- [58] QIAN C, HUANG B, WANG Y, et al. Water Seepage Flow in Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 491-496.
- [59] 张稳军, 丁 超, 张成平, 等. 不同错台量对复合型密封垫影响及长期防水预测[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(3): 337-345.
- ZHANG Wen-jun, DING Chao, ZHANG Cheng-ping, et al. Influence of Different Dislocation Amount on Composite Sealing Gasket and Long-term Waterproofing Performance Prediction [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(3): 337-345.
- [60] 李 拼, 谢宏明, 何 川, 等. 基于有效接触应力的大张开量盾构隧道密封垫防水性能分析[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(12): 1993-1999.
- LI Pin, XIE Hong-ming, HE Chuan, et al. Waterproof Performance Analysis of Water Sealing Gasket of Large Open Shield Tunnel Based on Effective Contact Stress[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(12): 1993-1999.
- [61] 夏鑫磊. 地下装配式干式连接墙体设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- XIA Xin-lei. Study on Design Method of Underground Assembly Dry Connection Wall[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.