

我国装配式市政隧道发展现状与展望

刘国强* 郭太军 詹素虹

(中恩工程技术有限公司, 广州 510060)

摘要 本文总结了我国装配式建筑技术在市政隧道领域的发展现状,梳理了装配式建筑有关技术标准、规范编制情况,对装配式市政隧道技术的研发、传承、创新及发展脉络进行了分析。结合目前已经实施的工程案例及广州开创大道装配式市政隧道最新研发成果,介绍了装配式市政隧道结构形式选择、标准化设计、结构模块分解、接头形式及性能等一系列关键技术问题的最新研究进展。总结了装配式建筑新材料、新产品、新设备的发展现状及其在解决装配式建筑一些关键技术问题中的成功案例,并以这些实际案例说明了新材料、新产品、新设备在装配式建筑发展中的重要性。最后,总结了装配式市政隧道仍存在的一些问题并给出建议,基于装配式市政隧道的发展现状及趋势,对装配式市政隧道的发展前景进行了展望。

关键词 装配式建筑, 装配式市政隧道, 发展现状, 前景展望

中图分类号: U452 文献标志码: A DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.202601.0020

A Review on the Development of Prefabricated Municipal Tunnels in China: Current Status and Future Trends

LIU Guoqiang* GUO Taijun ZHAN Suhong

(Zoomtech Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510060, China)

Abstract This paper outlines the current development of prefabricated construction technology for municipal tunnels in China. It reviews the establishment of relevant technical standards and specifications, and analyzes the evolution of prefabricated tunnel technology in terms of research, inheritance, and innovation. Drawing on implemented engineering cases and the latest research from the Guangzhou Kaichuang Avenue project, the paper highlights recent advances in key technical areas, including structural form selection, standardized design, module decomposition, as well as joint types and their performance. Furthermore, it summarizes the development of new materials, products, and equipment in prefabricated construction, supported by case studies that demonstrate their critical role in solving key technical challenges. Finally, the paper identifies existing issues in the field, offers corresponding recommendations, and provides a future outlook based on the current landscape and emerging trends of prefabricated municipal tunnels.

Keywords prefabricated building, prefabricated municipal tunnel, development status, future trends

收稿日期: 2024-08-19

基金项目: 广东省住房和城乡建设厅科技创新计划项目; 预制装配式市政隧道模块化产品结构设计、生产和安装成套技术研究 (2021-K19-072033)

* 联系作者: 刘国强, 男, 高级工程师, 一级结构工程师, 一级建造师, 主要从事桥梁、隧道、装配式结构设计与研究。E-mail: 770746590@qq.com

0 引言

随着我国经济社会的快速发展,在人口红利逐渐消失、劳动力短缺、人工成本大幅上升、环保要求不断提高的背景下,建筑工业化转型升级需求日益迫切。装配式建筑、智能建造技术是建筑工业化的主要发展方向,为此近年来国家及各地地方密集出台了一系列关于装配式建筑发展的政策,加强了政策支持及市场化引导,提倡大力推广装配式建筑,缩短建造工期,提升工程质量,减少建筑垃圾、扬尘及噪声污染,同时减少现场工人用量,改善工人劳动环境。此后,全国各省市在房屋建筑、地铁车站、市政隧道、综合管廊、桥梁、涵洞等领域开展了越来越多的相关理论研究、项目实践、学术交流等,取得了不少经验成果。

都亚洲^[1]、王俊等^[2]侧重于房屋建筑领域对我国建筑工业化的发展现状及总体情况进行了分析。杨秀仁^[3-6]对我国装配式地铁车站建造技术的发展现状进行了总结。赵有明等^[7]对装配式铁路隧道进行了研究与展望。傅重龙^[8]、奚成^[9]、陈

鼎基等^[10]、林志等^[11]分别通过厦门疏港路下穿仙岳路隧道、成都一环路磨子桥隧道、上海武宁路隧道、重庆新森大道隧道等市政隧道具体案例介绍了装配式技术在市政隧道中的应用情况。张晨裴等^[12]、陈孝湘等^[13]对我国装配式综合管廊的发展现状及未来趋势进行了研究。周志祥等^[14]、王晟等^[15]对装配式桥梁的应用进行了研究。

装配式技术各个领域中的发展应用具有一定的共通性,其中与装配式市政隧道相似的装配式地铁车站对于装配式市政隧道具有较大的借鉴意义。据统计,截至2024年,国内已有长春、北京、济南、上海、广州、哈尔滨、青岛、深圳和无锡9个城市从不同角度开展了装配式车站建造技术的研究和应用,已实施车站近40座;其中全预制装配式31座,叠合装配式9座,混合型装配式1座。装配式地铁车站全宽一般为20~25 m,高度约15 m,宽度与双孔四车道市政隧道接近,对于装配式市政隧道研究有较大的参考价值。部分装配式地铁车站统计见表1。

表1 装配式地铁车站工程案例

Table 1 Cases of prefabricated subway station engineering projects

项目名称	城市	建设时间	装配式车站数量	装配式车站名称	装配形式
长春地铁2、5、6、7号线	长春	2012	已建8座,在建10座	西湖站、双丰站、兴隆堡站、西环城路站等	全预制装配式
北京地铁6号线	北京	2014	已建1座	金安桥站	叠合装配式
济南地铁R1、R2线	济南	2015	已建3座	任家庄站等	叠合装配式
上海地铁15号线	上海	2018	已建1座	吴中路站	叠合装配式
广州地铁11号线	广州	2018	已建1座	上涌公园站	混合型装配式
哈尔滨地铁3号线	哈尔滨	2019	已建1座	丁香公园站	叠合装配式
无锡地铁5号线	无锡	2021	在建3座	新芳路站等	叠合装配式
青岛地铁6号线	青岛	2021	在建6座	可洛石站、富春江路站等	全预制装配式
深圳地铁3、6、12、13、16号线	深圳	2021	在建2座,待建5座	坪西站、华夏站、沙浦站、市中医院站等	全预制装配式

长春地铁2号线第一批5座全预制装配式地铁车站2012年开始研究,2017年全部建成,其后全国多座全预制装配式地铁车站均在其基础上根据实际建设条件优化、调整(图1),重庆新森大道市政明挖装配隧道也是借鉴了这个技术,该套技术推广较为成功。

除了全预制装配式地铁车站,国内也有采用叠合装配式技术的案例(图2、图3)。无锡至江阴城际轨道交通工程中采用单侧预制叠合外墙板构件代替全预制外墙板,分块预制的单侧墙板经现场拼接连接后,在其外侧浇筑叠合层混凝土,形成

装配式地铁车站结构的外侧墙体系^[16-17]。

总体而言,随着装配式建筑在各个领域的不断尝试和发展,到目前为止,装配式建筑已经取得了一定的技术积累,形成了一定的产业规模,一系列装配式建筑技术标准、规范陆续发布,技术标准、规范体系逐渐完善。随着各种装配式建筑关键技术问题不断被攻克,规模效应逐渐显现,产业链条逐渐完备,以及设计方案不断优化,装配式建筑成本正在逐渐降低。与装配式建筑有关的新材料、新产品、新设备也不断涌现,在解决装配式建筑一些关键性技术问题

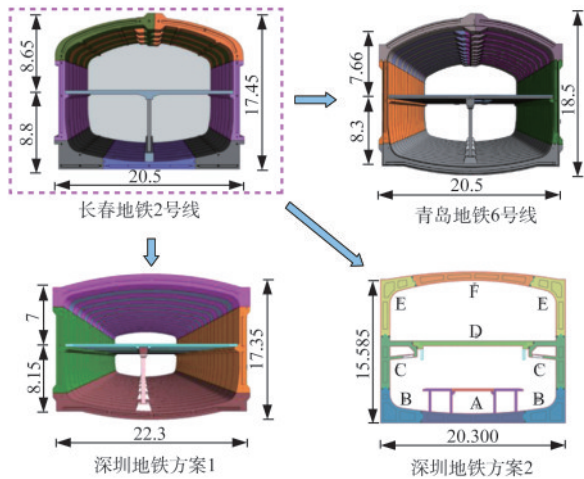


图1 装配式地铁站(单位:m)

Fig.1 Prefabricated subway stations (Unit:m)

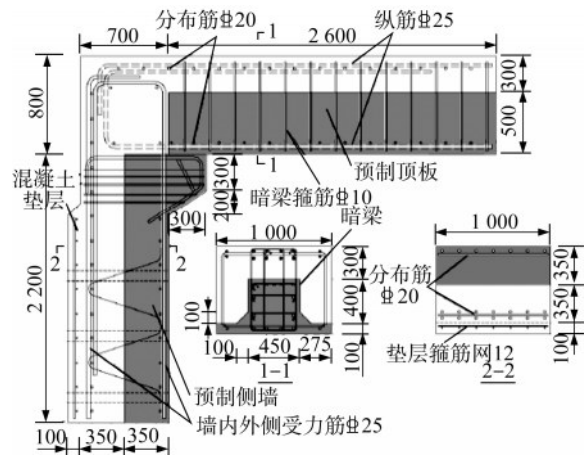


图3 叠合装配式地铁站顶板节点(单位:mm)

Fig.3 Composite assembly type subway station roof node (Unit:mm)

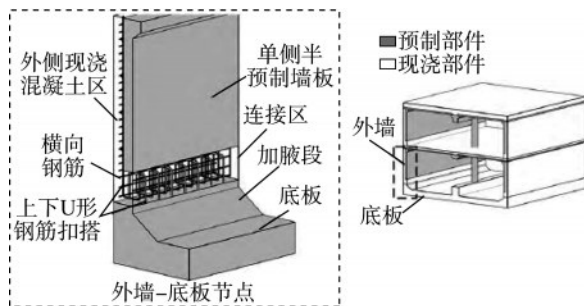


图2 叠合装配式地铁站底板节点

Fig.2 Composite assembly type subway station bottom plate node

1 装配式建筑政策梳理

面对经济社会发展的新形势,自2015年以来,我国密集出台了关于装配式建筑发展的若干政策。在装配式建筑技术标准体系不完善、产业链不健全、规模效应不高、产业工人队伍缺乏、构件标准化不足的发展初期,必须加强政策的支持及市场的引导,方能调动社会的有效资源向装配式建筑领域集聚,进而逐步解决发展初期的各方面问题,最终形成成熟的技术与市场。因此,政策的强度与稳定性,对于装配式建筑发展初期的作用尤为重要,为此,本文对国内装配式建筑的相关政策进行了详细的梳理。截至2024年,国家层面已发布的有关装配式建筑的主要政策见表2。

中发挥着越来越重要的作用。总体来看,装配式建筑已逐渐走出发展初期的各种困境,逐渐呈现出蓬勃发展的态势。

表2 装配式建筑政策梳理

Table 2 Review of policies for prefabricated buildings

发布时间	政策名称	发布单位
2015/11	《建筑产业现代化发展纲要》	中华人民共和国住房和城乡建设部
2016/02	《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》	国务院
2016/07	《国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知》(国发[2016]43号)	国务院
2016/09	《国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见》(国办发[2016]71号)	国务院办公厅
2017/02	《国务院办公厅关于促进建筑业持续健康发展的意见》(国办发[2017]19号)	国务院办公厅
2017/03	《“十三五”装配式建筑行动方案》(建科[2017]77号)	中华人民共和国住房和城乡建设部
2017/03	《装配式建筑示范城市管理办法》(建科[2017]77号)	中华人民共和国住房和城乡建设部
2017/03	《装配式建筑产业基地管理办法》(建科[2017]77号)	中华人民共和国住房和城乡建设部
2017/12	《装配式建筑评价标准》	中华人民共和国住房和城乡建设部
2020/08	《关于加快新型建筑工业化发展的若干意见》(建标规[2020]8号)	中华人民共和国住房和城乡建设部等部门
2021/10	《关于推动城乡建设绿色发展的意见》	国务院办公厅
2022/01	《“十四五”建筑业发展规划》	中华人民共和国住房和城乡建设部
2024/02	《关于推动雄安新区建设绿色发展城市典范的意见》	国家发展和改革委员会
2024/12	《关于进一步扩大政府采购支持绿色建材促进建筑品质提升政策实施范围的通知》	财政部等部门

从表2可见,我国近年来发布的装配式建筑政策数量众多、频率较高,尤其是2016—2017年发布了多个政策文件,显示了装配式建筑发展的紧迫性及国家对发展装配式建筑的决心。从目前装配式建筑发展形势看,政策效果良好,装配式建筑得到了建筑行业中房建、地铁、市政、公路等各个领域的积极响应,发展势头强劲。

2 装配式建筑技术标准及规范体系编制情况

技术标准是工程实施的重要依据,装配式建筑发展初期,由于技术不成熟,相应的技术标准、

规范也较滞后,较大地制约了装配式建筑的发展。

技术标准、规范的编制,是与理论研究、项目实践相辅相成的,随着我国装配式建筑理论研究的全面开展及不断深入,以及各领域工程项目实践经验的总结和积累,国家及各地方陆续发布了一系列装配式建筑标准、规范、图集、指引等,尤其是2021—2024年,正式发布的装配式建筑标准、规范呈井喷式增加,涵盖了设计、施工、质量检验等各个环节,且仍有大量标准、规范正在编制之中,技术标准、规范体系正在快速完善。据统计,装配式建筑相关技术标准、规范众多,对本文所研究的装配式市政隧道有较大参考价值的主要技术标准、规范统计见表3。

表3 装配式建筑技术标准及规范

Table 3 Technical standards for prefabricated buildings

序号	标准名称	标准编号	发布时间	发布单位
1	装配式混凝土结构技术规程	JGJ 1—2014	2014-02-10	中华人民共和国住房和城乡建设部
2	工业化建筑评价标准	GB/T 51129—2015	2015-08-27	中华人民共和国住房和城乡建设部
3	装配式建筑评价标准	GB/T 51129—2017	2017-12-12	中华人民共和国住房和城乡建设部
4	公路工程装配式施工质量验收评定标准	DG/TJ 08-2250—2017	2018-05-01	上海市城乡建设和管理委员会
5	城市桥梁预制拼装桥墩生产、施工与质量验收技术标准	DBJ 51/T120—2019	2019-04-28	四川省住房和城乡建设厅
6	城市桥梁预制拼装桥墩设计标准	DBJ 51/T124—2019	2019-05-20	四川省住房和城乡建设厅
7	装配式市政桥梁工程技术规范	DBJ/T 15-169—2019	2019-09-30	广东省住房和城乡建设厅
8	节段预制装配综合管廊施工及验收标准	TICMEA6—2020	2020-04-01	中国市政工程协会
9	装配式建筑混凝土结构耐久性技术标准	DBJ/T 15-217—2021	2021-02-28	广东省住房和城乡建设厅
10	预制拼装桥梁技术标准	DG/TJ 08-2160—2021	2021-09-15	上海市城乡建设和管理委员会
11	装配式基坑支护技术标准	T/CECS 937—2021	2021-10-29	中国工程建设标准化协会
12	公路装配式混凝土桥梁设计规范	JTG/T 3365-05—2022	2022-02-25	中华人民共和国交通运输部
13	预制装配式城市综合管廊工程技术规程	DB42/T 1889—2022	2022-06-28	湖北省住房和城乡建设厅
14	公路装配式混凝土桥梁施工技术规范	JTG/T 3654—2022	2022-09-13	中华人民共和国交通运输部
15	装配式超高性能混凝土市政桥梁结构技术规程	DBJ/T 15-244—2022	2022-09-23	广东省住房和城乡建设厅
16	装配式混凝土结构钢筋错位连接技术规程	T/CECS 1222—2022	2022-12-12	中国工程建设标准化协会
17	装配式复合土钉墙支护结构技术规程	T/CECS 1329—2023	2023-04-20	中国工程建设标准化协会
18	装配式叠合混凝土结构技术规程	T/CECS 1336—2023	2023-04-28	中国工程建设标准化协会
19	复合键槽连接装配式混凝土剪力墙结构技术规程	T/CECS 1389—2023	2023-08-02	中国工程建设标准化协会
20	公路装配式钢筋混凝土涵洞技术规程	T/CECS G: D66-04—2024	2024-05-22	中国工程建设标准化协会
21	装配式混凝土建筑装配工人能力评价标准	T/CECS 1674—2024	2024-08-10	中国工程建设标准化协会
22	预应力装配式混凝土框架结构技术标准	JGJ/T 502—2024	2024-11-19	中华人民共和国住房和城乡建设部

根据发布时间进行统计,历年技术标准、规范发布数量总体上呈现逐渐增加的趋势,说明装配式技术积累已经达到一定程度,逐渐形成系统性,最终以技术标准、规范形式体现。

3 装配式建筑技术研究现状

3.1 论文发表量

以历年装配式建筑相关论文发表数量作为参

考指标,进行统计分析,反映装配式建筑研究现状及趋势,如图 4 所示(数据来源于知网数据库)。

截至 2024 年,知网收录关于装配式建筑论文总数达到 5.74 万篇,图 4 统计时间从 2000 年开始,2015 年以前装配式建筑的研究相对较少,自 2015 年国家出台装配式建筑相关政策以后,论文数量呈井喷式增长趋势,至 2022 年达到当年 6 464 篇的峰值,2023 年稍有回落,但数量仍处于高位,说明行业内对装配式技术的研究仍保持持续高涨的热情。

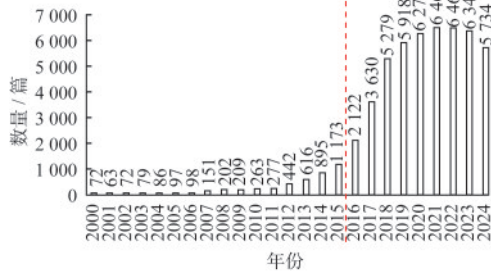


图 4 历年装配式建筑相关论文发表数量

Fig.4 Number of papers related to prefabricated building

3.2 专利授权量

以历年装配式建筑相关专利授权数量作为参考指标,进行统计分析,反映装配式建筑研究现状

及趋势,如图 5 所示(数据来源于知网数据库)。

截至 2024 年,知网查询到关于装配式建筑专利总数达到 12.16 万件,图 5 统计时间从 2000 年开始,2015 年以前装配式建筑的专利相对较少,自 2015 年国家出台装配式建筑相关政策以后,专利数量呈井喷式增长趋势,至 2021 年达到当年 2.1 万件的峰值,2022 年稍有回落,但数量仍处于高位,其趋势与论文数量趋势基本一致,但其增长速度较论文数量更快。

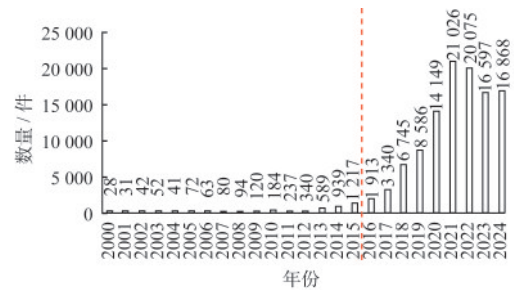


图 5 历年装配式建筑相关专利授权数量

Fig.5 Number of patents related to prefabricated building

4 装配式市政隧道发展现状

2024 年已实施或即将实施的装配式市政隧道工程案例共 5 个,见表 4。

表 4 装配式市政隧道工程案例

Table 4 Cases of prefabricated municipal tunnel engineering projects

项目名称	城市	建设时间	等级	车道数	隧道长度	装配长度	装配占比
疏港路隧道	厦门	2012—2013 年	主干道	双四	全长 1 280 m,暗埋段 895 m	单孔 279 m,双孔 260 m	40%
一环路隧道	成都	2016—2019 年	主干道	双四~五	全长 1 180 m,暗埋段 920 m	五车道双孔 131 m	11%
武宁路隧道	上海	2021—2022 年	主干道	双四~六	全长 2 840 m,暗埋段 2 490 m	四车道双孔 45 m	1.5%
新森大道隧道	重庆	2023—2024 年	主干道	双八	全长 790 m,暗埋段 790 m	四车道单孔 390 m	49%
开创大道隧道	广州	2025 年待建	主干道	单三	全长 627 m,暗埋段 235 m	三车道单孔 627 m	100%

(1) 厦门疏港路下穿仙岳路隧道^[8]预制段均为暗埋段,分为单孔两车道、双孔四车道两种断面形式(图 6),与一般现浇隧道一样采用平板式结构,单孔断面纵向节段长度为 3 m,双孔断面纵向节段长度为 2 m,均分为上下两个预制块,吊重为 89.5 t、105 t,上下拼采用拼接缝钢板焊接+环氧胶粘,纵向拼接采用临时预应力+永久预应力+环氧胶粘,隧道大节段处采用 2 m 宽后浇带以设置中埋式止水带。运输采用平板车,吊装采用 350 t 履带吊、120 t 及 240 t 龙门吊,基坑为外拉锚结构形式,对吊装过程有利,但由于市政隧道周边一般管线较多,且外拉锚结构基坑结构形式对软土地区

不太适用,因此适用范围受到较大限制。

(2) 成都一环路磨子桥隧道^[9]预制段均为暗埋段,长度为 130.6 m,全段位于平纵直线上,采用双孔两车道+三车道断面形式(图 7),与一般现浇隧道一样采用平板式结构,由于断面宽度较大,为减少吊重,纵向节段长度为 1.5 m,分为上下两个预制块,最大吊重为 122.5 t。该案例装配式技术与厦门疏港路隧道大致相似,同时对部分细部构造进行了改进,如隧道大节段处改用 0.4 m 宽后浇槽以设置中埋式止水带,上下拼缝构造也有所不同。

(3) 上海武宁路隧道^[10]预制段均为暗埋段,

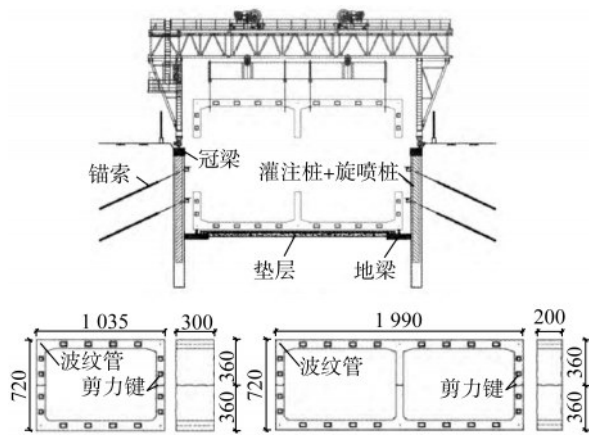


图6 厦门疏港路装配式市政隧道(单位:mm)

Fig.6 Xiamen Shugang Road prefabricated municipal tunnel (Unit:mm)

该项目进行了预制装配式及装配整体式两种形式的试验段尝试。预制装配式试验段(图8)为双孔

四车道,试验段长45 m,顶板采用肋板式结构,侧墙及底板采用平板式结构,纵向节段长度为2 m,分为上下两个预制块,最大吊重为140 t。该案例装配式技术同样与厦门疏港路隧道大致相似,同时也进行了一些改进,如顶板采用了肋板式结构,开始体现出轻量化设计的理念,没有一味沿用传统现浇隧道平板式结构形式,相邻环上下拼缝进行了0.7 m的错缝,上下拼缝采用了凹凸榫+斜螺栓等。

上海武宁路隧道还进行了装配整体式的试验段尝试(图9),为单孔两车道断面形式,底板采用预制钢筋笼,侧墙采用贴壁式单面叠合板,顶板采用钢筋桁架型单面叠合板。该项目研发团队还进行了暗埋段双孔装配整体式、敞开段侧墙全预制的拓展研究,但尚未应用于工程实践中。

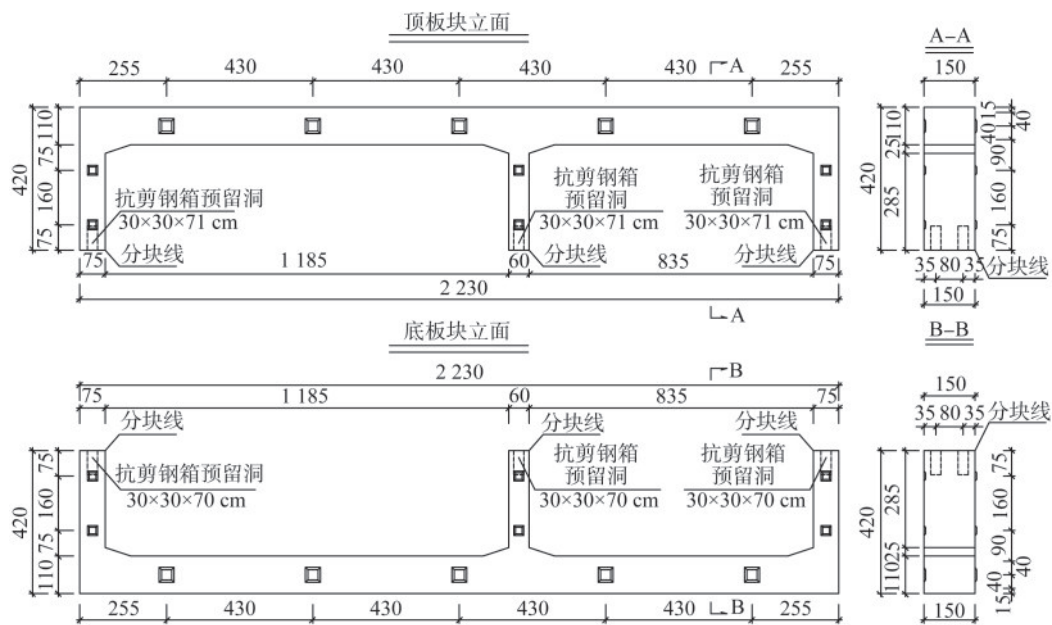


图7 成都一环路装配式市政隧道(单位:cm)

Fig.7 Chengdu First Ring Road prefabricated municipal tunnel (Unit:cm)

(4) 重庆新森大道隧道^[11]预制段均为暗埋段,长度为445 m,平纵均有曲线,双孔四车道+四车道拱形矿山法隧道断面形式(图10),左右

线结构独立,断面分为左右侧墙块及底板块共3块,纵向节段长度为2 m。为了达到轻量化的目的,左右侧墙块为空腔薄壁结构形式,采用预制



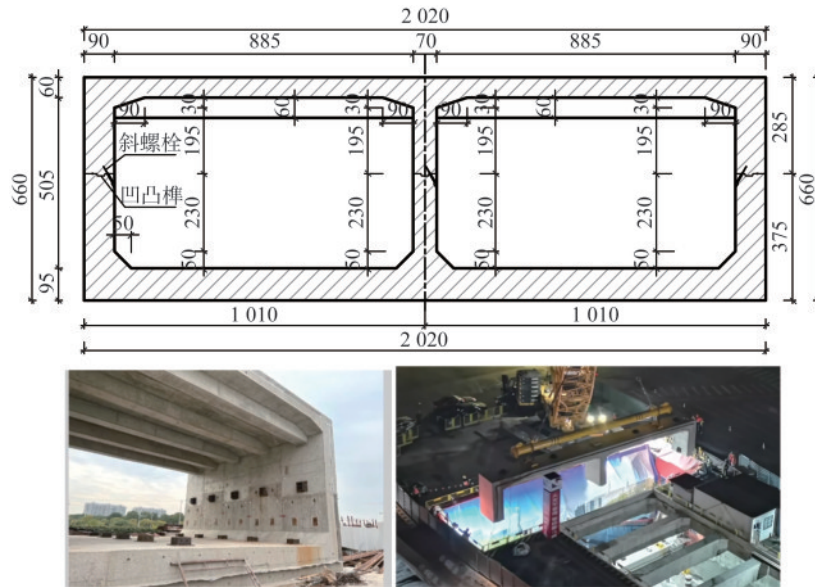


图8 上海武宁路装配式市政隧道(单位:cm)

Fig.8 Shanghai Wuning Road prefabricated municipal tunnel (Unit:cm)

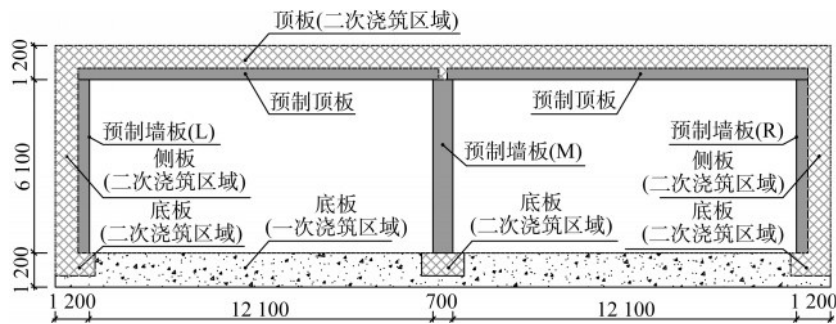


图9 装配整体式方案研究(单位:cm)

Fig.9 Research on integrated assembly scheme (Unit:cm)

吊装工艺,最大吊重为64.5 t,底板块则为现浇工艺。该案例装配式技术与上述三个装配式市政隧

道技术有所不同,而是与装配式地铁车站技术基本相似。

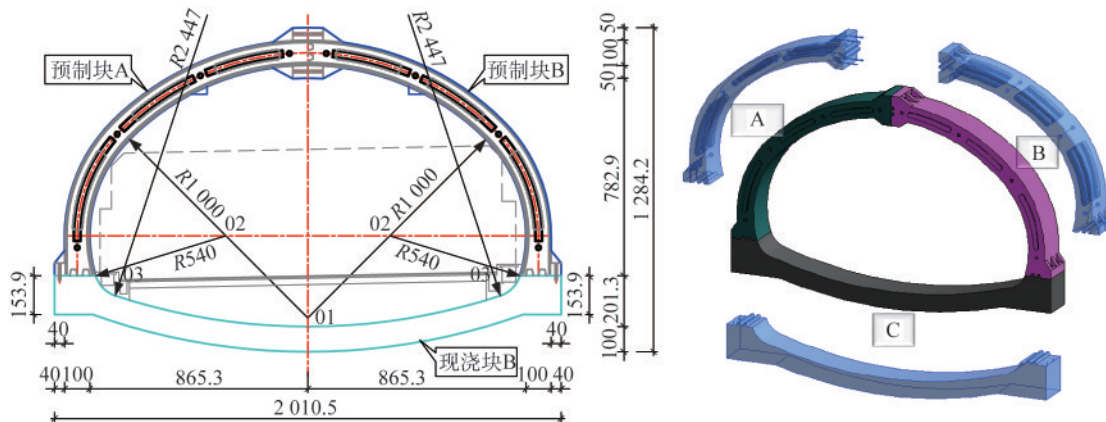


图10 重庆新森大道装配式市政隧道(单位:cm)

Fig.10 Chongqing Xinsen Avenue prefabricated municipal tunnel (Unit:cm)

(5) 广州开创大道装配式市政隧道(图 11)对暗埋段、敞开段均采用装配式施工,实现全隧道预制拼装。该隧道长度为216.81 m(敞开段)+234.87

m(暗埋段)+175.35 m(敞开段)=627.03 m,平纵均有曲线。隧道断面为单孔三车道矩形断面,全隧道均采用肋板式结构以减轻自重,便于运输吊装。

由于肋板式结构截面有所削弱,为满足受力需要,对受力较大的暗埋段顶板及敞开段侧墙配置预应力,该预应力在工厂预制时已施工完毕,现场无张拉及灌浆作业。由于采用了肋板式结构轻量化设计,纵向节段长度达3.0 m,暗埋段分上、中、下三段预制(4个预制块),敞开段分上、下两段预制(3个预制块),最大吊重约85 t。环向拼接采用预留核心混凝土后浇槽内钢筋互锚并浇筑UHPC,构件表层主筋10 cm范围预留为后浇槽,主筋伸

出外露,端部安装锚固板,核心混凝土为预制,拼装完成后上下主筋在后浇槽内交错搭接,后浇槽以UHPC浇注,而预制核心混凝土之间则通过高强砂浆连接,从而整个拼接缝连为整体。环形拼接缝采用预留环形后浇带现浇接头设计,环形后浇带宽度为0.3 m,两节段拼接后钢筋于后浇带内交错搭接,浇筑UHPC后实现纵向拼接及钢筋锚固。隧道平纵线型通过环形后浇带进行调节。

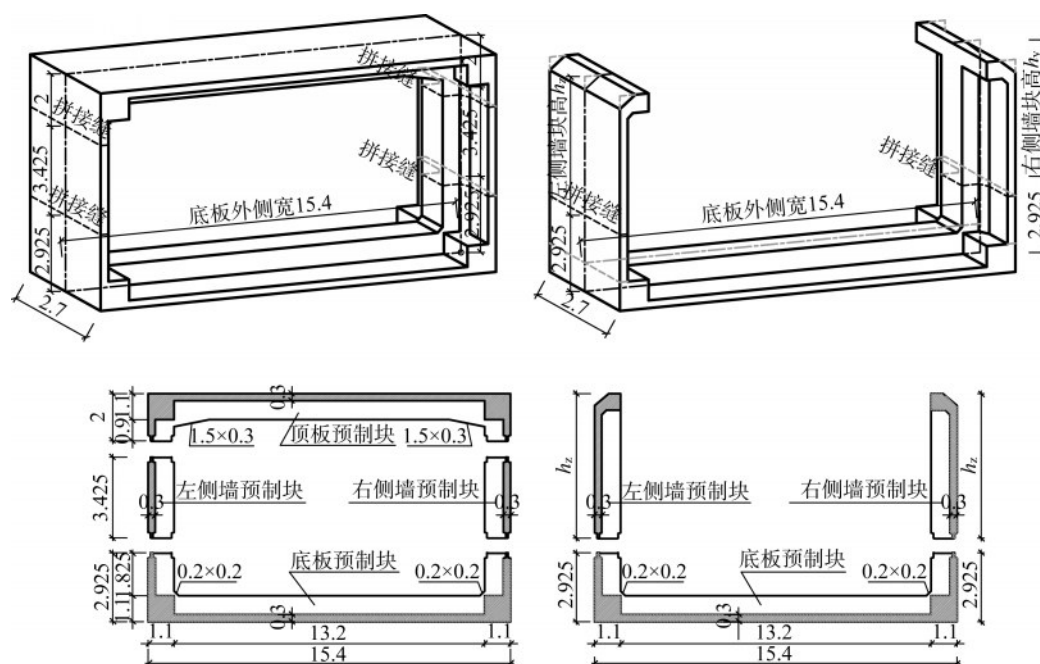


图11 广州开创大道装配式市政隧道(单位:m)

Fig.11 Guangzhou Kaichuang Avenue prefabricated municipal tunnel (Unit:m)

5 装配式技术应用总结及发展脉络分析

装配式市政隧道与装配式地铁车站结构形式、断面尺寸、吊装重量等方面较为相似,且均为对防水有较高要求的结构物。装配式综合管廊与装配式涵洞断面形式、尺寸等方面接近,且二者的防水要求相对而言没有市政隧道与地铁车站高。装配式房屋建筑(地下室除外)与装配式桥梁由于均为地上结构,其更侧重于结构受力性能及抗震性能,且均对防水性能基本没有要求,但二者又有所区别,预制件尺寸及重量方面,房屋建筑工程一般较小,而桥梁预制件一般较大。

从已有案例装配式技术的发展脉络及传承关系来看,对装配式市政隧道具有较大参考性的主

要是装配式地铁车站,综合目前已实施的装配式地铁车站及市政隧道案例,其技术主要有4类:

(1) 第1类以2012年开始实施的长春地铁2号线装配式地铁车站为代表,其为拱形顶底板、直立侧墙断面形式,平板式普通钢筋混凝土结构,采用干拼法,环向拼接采用注浆式榫槽接头,纵向拼接采用接力式钢棒,逐环张拉,逐环锁紧。该套技术首先在长春地铁中应用实践,其后发展到青岛、深圳等地铁车站中。青岛基本沿用了长春装配式地铁车站技术,如结构分块、接头构造等基本相同,且基坑形式均为外拉锚结构形式。深圳在长春装配式地铁车站之上有所发展,一是结构形式开始尝试以轻质混凝土为内模的空心式结构,体现出轻量化设计意图;二是构件分块数量有所变化;三是由于珠三角地区为软土地区,基本不采

用外拉锚基坑结构形式,因而出现了内支撑形式的装配式地铁车站。该套技术除了在地铁车站中应用以外,还被重庆新森大道市政隧道所采用。主要原因是该项目隧道中有一段需采用矿山法隧道结构形式穿越山体,而装配式隧道段需大量回填整平以做城市开发,故装配式明挖段也采用了与矿山法段相同的拱形截面形式,与一般市政隧道的矩形断面有所不同,故该项目采用了地铁车站装配式技术。其断面形式虽与地铁车站的拱形断面更为接近,但也有不同,采用了分两侧墙及底板共三块,两侧墙块为预制拼装,底板为现浇。

(2) 第 2 类以 2014 年开始实施的厦门疏港路下穿仙岳路装配式市政隧道为代表,其为单孔或双孔矩形断面形式,平板式普通钢筋混凝土结构,采用干拼法,环向拼接采用拼接缝侧面预埋钢板焊接+拼接面环氧粘胶,纵向拼接采用体外临时预应力+体内永久预应力+拼接面环氧粘胶,每环拼装后与前一环张拉体外临时预应力,每一长隧道节段拼接完成后张拉通长体内永久预应力,之后拆除临时预应力。其后成都一环路磨子桥装配式隧道试验段、上海武宁路装配式隧道试验段均基本沿用了该套技术,但同时又有所改进发展。值得一提的是,该套技术在广州地铁车辆段装配式隧道中同样有所采用,装配式综合管廊与该套技术也有颇多相似之处。

(3) 第 3 类以 2021 年开始实施的上海武宁路装配整体式市政隧道为代表,其底板采用预制钢筋笼,侧墙及顶板采用预制单面叠合板。装配整体式技术在地铁车站、综合管廊、房屋建筑等中均有应用案例,该技术的优点是预制构件重量更轻,易于运输、吊装,缺点是施工现场仍保留了大量的钢筋绑扎及混凝土浇筑作业。

(4) 第 4 类为 2021 年开始研发的广州开创大道装配式市政隧道,其为单孔或双孔矩形断面形式,肋板式预应力混凝土结构,采用 UHPC 湿拼法,环向拼接采用预留核心混凝土后浇槽内钢筋互锚并浇筑 UHPC,纵向拼接采用预留环形后浇带内钢筋互锚并浇筑 UHPC。该项目在对已有装配式技术总结分析基础之上,基于实现常规市政隧道暗埋段、敞开段全隧道装配式施工的目标,同时为了解决内支撑基坑体系下,有平纵曲线及较大纵坡坡度,敞开段抗拔桩连接等系列技术问题及成本控制问题,研发出的一套有别于前三类的

装配式市政隧道技术。该套技术最大的特点是采用了轻量化肋板式结构形式及 UHPC 湿拼法,研发团队认为由于常规市政隧道有暗埋段、敞开段,并有平纵曲线等问题,要实现全隧道预制,并能推广到其他项目中,采用湿拼法更优。湿拼法对构件预制精度及现场拼装精度要求相比干拼法低,可调节性更强,更符合当前工厂构件预制技术水平及现场工人施工技术水平等实际情况,经测算该项目成本基本控制到与一般现浇隧道持平。

6 装配式市政隧道关键技术问题研究

6.1 结构形式选择

装配式市政隧道断面尺寸一般较大。以双向四车道或双向六车道居多,其断面宽度一般为 20~30 m,高度一般为 7.5~8.5 m,也有少数单孔二车道、三车道隧道,其断面宽度一般为 10~16 m,高度一般为 7.5~8.5 m。典型平板式市政隧道断面形式及有关参数见表 5。

表 5 市政隧道常规断面参数

Table 5 Conventional section parameters of municipal tunnels

断面	断面总重/(t·m ⁻¹)	分块后最大单块重量/t				
		纵长 1.0 m	纵长 1.5 m	纵长 2.0 m	纵长 2.5 m	纵长 3.0 m
单二	79.0	32.4	48.6	64.8	81.1	97.3
单三	120.4	49.8	74.6	99.5	124.4	149.3
双四	142.2	60.7	91.0	121.4	151.7	182.1
双六	215.0	93.3	139.9	186.5	233.2	279.8

注:取典型断面尺寸,分块后单块最大重量一般为顶板或底板块。

由于目前国内装配式市政隧道案例仍较少,且受传统市政隧道结构形式影响,早期厦门疏港路下穿仙岳路隧道、成都一环路磨子桥隧道两个工程案例试验段均为与现浇隧道相同的平板式结构,传统平板式结构当隧道断面尺寸较大时,重量较大,不利于运输、吊装,对成本控制也不利,不符合装配式建筑轻量化、标准化设计理念。2021 年上海武宁路隧道顶板采用了肋板式结构,开始考虑轻量化设计问题,重庆新森大道市政隧道及深圳装配式地铁车站采用了薄壁空腔结构形式,并创新地采用了轻质混凝土作为内模实现空心化,对于预制构件轻量化设计有很大的参考价值。

2021年开始研发的广州开创大道装配式市政隧道在总结已有工程案例结构形式基础之上,对全隧道采用肋板式结构,并引入预应力技术解决结构受力问题,经对比轻量化效果明显,较一般平板式结构自重减少42%,极大地方便了结构运输、吊装,同样是一种值得参考的轻量化结构形式。不同隧道结构形式如图12所示。

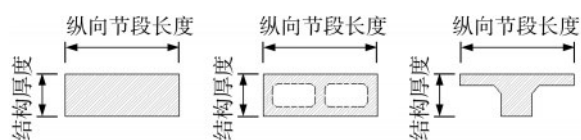


图12 市政隧道结构形式

Fig.12 Structural form of municipal tunnel

6.2 标准化设计

标准化设计是装配式建筑核心理念之一,包括项目级、地区级、行业级等层面的标准化。项目级标准化设计需在总体方案设计、细部构造设计等方面充分体现。地区级、行业级的标准化需要政府主管部门或行业协会等单位统筹协调,以技术标准、规范或指引的形式体现。由于目前装配式市政隧道尚处于技术研发阶段,未能形成统一成熟的成套技术,故标准化设计程度仍然较低。

广州开创大道装配式市政隧道研发之初就以暗埋段、敞开段全隧道实现装配式施工为目标,在设计阶段充分考虑了标准化问题,詹素虹等^[18]对装配式市政隧道结构的轻量化、标准化设计进行了研究。该项目采用湿拼法,通过环形后浇带拟合平纵曲线,可尽量统一预制构件类型,减少预制构件种类,提高标准化水平。

6.3 结构模块分解研究

装配式市政隧道结构模块分解需综合考虑结构受力,分块后预制件重量、尺寸、标准化程度,以便于运输、吊装、拼接。从运输、吊装角度来说,分块后预制件重量越轻、尺寸越小越方便,但从结构受力及地下工程防水角度,则需要尽量少分块,二者相互矛盾,因此要取得一个平衡。

目前矩形截面装配式市政隧道纵向分段长度一般单孔两车道为3 m、双孔四车道为2 m、双孔五车道为1.5 m,尚没有双向六车道及以上矩形整体式断面采用装配式技术的先例。重庆新森大道

单孔为四车道,但其左右线结构分离,因此其纵向节段长度为2 m。上下分块一般分为两段,目前已实施的三座矩形截面装配式市政隧道均如此。

广州开创大道装配式市政隧道采用了肋板式结构轻量化设计,该项目单孔三车道纵向节段长度可做到3 m,最大吊重84.4 t,低于厦门单孔两车道按3 m纵向节段长度最大吊重89.5 t。考虑到运输限高问题,为了运输不受限制,该项目采用分上中下三段的方式,结构计算满足要求,可大幅提高装配式隧道通用性。由于桥梁中预制小箱梁在工程中广泛使用,且其尺寸、重量与装配式市政隧道有很大相似之处,对于运输、吊装有较大参考意义,故对肋板式隧道、平板式隧道、小箱梁桥梁的尺寸、重量进行对比,见表6、图13。

表6 预制构件外形尺寸

Table 6 External dimensions of prefabricated components

车道数/跨度	肋板式隧道	平板式隧道	小箱梁桥梁
二车道/20 m	11.4×3.2×2	11.4×3.2×2	20×3.1×1.2
三车道/25 m	15.4×3.2×2	15.4×3.2×2	25×3.1×1.4
四车道/30 m	23.0×3.2×2	23.0×3.2×2	30×3.1×1.6
五车道/35 m	26.0×3.2×2	26.0×3.2×2	35×3.1×1.8
六车道/40 m	29.5×3.2×2	29.5×3.2×2	40×3.1×2

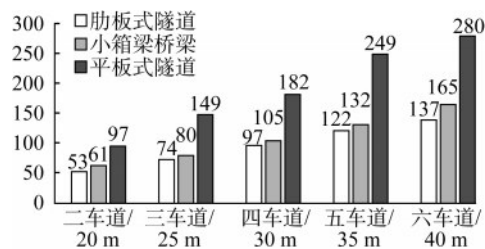


图13 预制构件重量

Fig.13 Weight of prefabricated components

可见,采用肋板式结构分块后,预制构件外形尺寸及重量均不超过桥梁中普遍使用的预制小箱梁,而采用平板式结构由于吊重较大,为减少吊重需减小纵向节段划分,致使纵向拼缝数量增加,对防水不利。

6.4 接头形式及性能研究

预制构件接头是装配式建筑重点研究方向,杨秀仁等^[19-21]对注浆式榫槽接头力学性能进行了试验研究,郭太军等^[22]对装配式隧道UHPC连接节点钢筋锚固性能进行了试验研究,崔涛等^[23]对

城市铁路明挖隧道装配式衬砌接头性能进行了研究。目前大断面装配式地下建筑接头形式总体分为干拼、湿拼两大类,其中以干拼居多,见表 7、图 14。

表 7 接头形式及代表案例

Table 7 Joint forms and representative cases

接头种类		代表案例
干拼	注浆式榫槽接头	装配式地铁车站 重庆新森大道市政隧道
	凹凸榫+斜螺杆	上海武宁路隧道
	平接头+抗剪钢箱	成都一环路隧道
湿拼	预留核心混凝土后浇槽	广州开创大道隧道

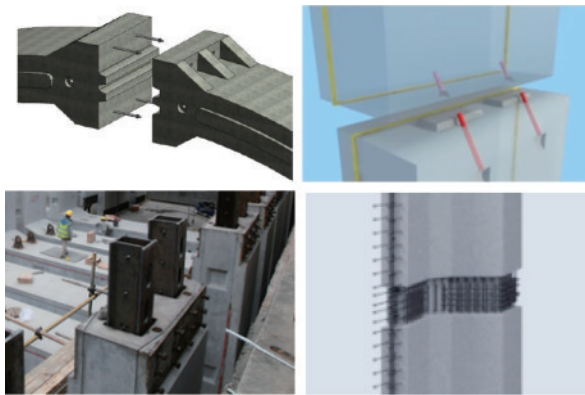


图 14 接头形式
Fig.14 Joint forms

6.5 防水技术研究

防水设计同样是装配式地下建筑的重点关注点,同时也是与装配式地上建筑的主要区别。黄明利等^[24]对明挖法地下装配式结构接缝防水技术进行了研究。目前案例中对于干拼法装配式隧道,拼接缝防水主要采取设置迎水面密封垫、背水面密封垫、缝内设置遇水膨胀止水条等措施,并对拼接缝注浆。湿拼法装配式隧道则通过后浇 UHPC、埋设止水钢板等措施,使浇筑后无缝,因此 UHPC 浇筑后可更好地保证防水效果。拼缝防水构造如图 15 所示。

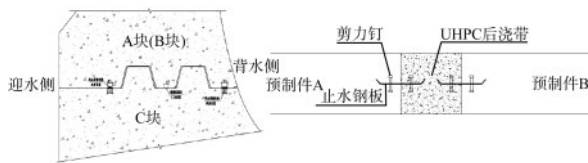


图 15 拼缝防水构造

Fig.15 Joint waterproof structure

6.6 平、纵曲线线型拟合技术研究

市政隧道一般均有平纵曲线,且一般敞开段纵坡较陡,坡度一般为 4%~5%。早期工程案例所选取的试验段一般尽量避开平纵曲线段,因而该问题不突出,随着装配式市政隧道的推广,尤其是想要暗埋段、敞开段全隧道实现装配式施工,平纵曲线的拟合问题不可避免。平纵曲线拟合有“楔形构件+等宽缝”“等宽构件+楔形缝”两种方式^[5]。不论是装配式地铁车站还是装配式市政隧道,已有的工程案例均采用干拼法,对于干拼法,一般均采用“楔形构件+等宽缝”方式,如采用“等宽构件+楔形缝”方式,最大缝宽应满足接缝防水性能的要求,而最小缝宽为施工所能实现的最小缝宽值,对于干拼法该方式只能用于隧道宽度很小或曲线半径很大的情况。广州开创大道装配式市政隧道由于采用了湿拼法,其对内外缝宽调整的适应性要大得多,对于一般市政隧道均可采用“等宽构件+楔形缝”方式。位于曲线半径变化段或缓和曲线段的隧道,采用“楔形构件+等宽缝”大量增加了预制构件的种类,尤其是对同时存在平纵曲线的隧道,预制构件呈三维楔形形状,不仅种类繁多,且精度控制较为困难。而采用湿拼法的隧道,则基本上可以按照“等宽构件+楔形缝”处理,预制构件种类大为减少,标准化程度大大提高,这也是该项目经过详细研究及对比分析后采用湿拼法的重要原因之一,湿拼法在平纵曲线拟合方面具有很大的优势。

6.7 抗浮技术研究

市政隧道敞开段一般需设置抗拔桩,需解决抗拔桩与装配式隧道主体结构连接问题。由于目前已有工程案例装配式试验段均为暗埋段,且覆土均满足抗浮要求,故还未涉及抗浮问题。广州开创大道装配式市政隧道拟暗埋段、敞开段全隧道采用装配式技术,对于埋深较大敞开段不可避免地需要设置抗拔桩以满足抗浮。由于该项目采用湿拼法,故抗拔桩设置于湿拼缝处,对抗拔桩处后浇槽进行加宽,主体结构预制构件拼装后浇筑后浇槽实现抗拔桩与主体结构连接,如图 16 所示。

6.8 装配式地下建筑基坑技术研究

装配式地下建筑与地上建筑一个重要不同点

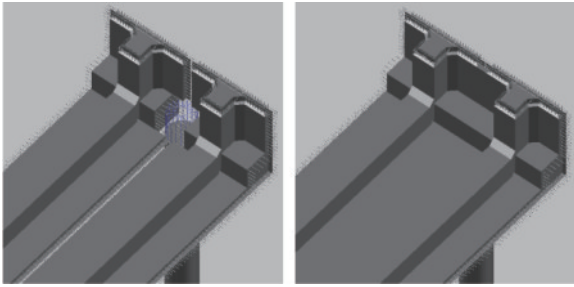


图 16 抗拔桩连接构造

Fig.16 Connection structure of uplift pile

是装配式地下建筑需考虑预制构件吊装、拼接与基坑支护构件之间的关系。早期案例(如长春装配式地铁车站、青岛装配式地铁车站、厦门疏港路下穿仙岳路隧道、成都一环路磨子桥等)基坑均为外拉锚结构形式,由于城市隧道场地周边管线及建筑物众多,且外拉锚结构形式在南方软土地区较少采用,故外拉锚结构形式适用性有限。2021年开始实施的深圳装配式地铁车站、上海武宁路隧道,开始采用内支撑基坑形式,广州开创大道装配式市政隧道是在内支撑基坑体系下,全隧道预制装配式施工的首座市政隧道,也采取了各种措施,解决了预制隧道主体结构与内支撑间的冲突问题。该项目中,由于装配式隧道主体结构预制节段纵向间距为3 m(含2.7 m 预制件及0.3 m 后浇带),为与隧道结构吊装作业相协调,基坑支撑间距按9 m 布置,与结构纵向分段长度呈模数关系,第一、二道支撑竖向对齐,因基坑宽度较窄,均采用一字撑,尽量减少对吊装作业的干扰,如图17所示。

7 新材料、新产品、新设备的发展及在装配式建筑中的应用现状

近年来,随着装配式建筑的不断发展,多种新材料、新产品、新设备被越来越多地应用于装配式

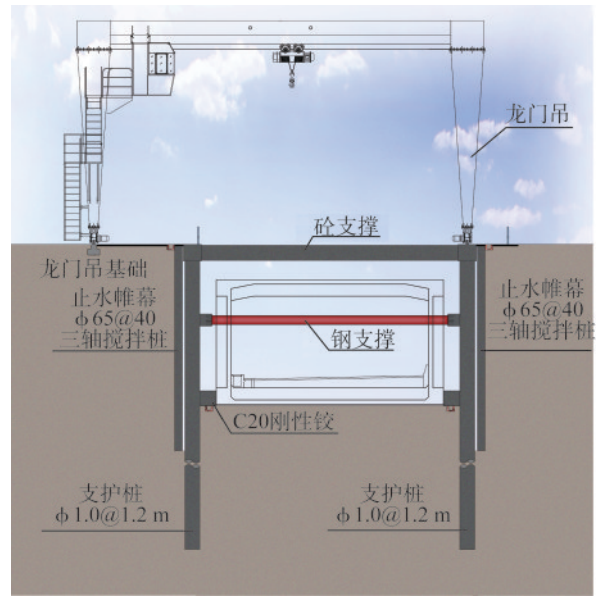


图 17 内支撑基坑装配式市政隧道

Fig.17 Prefabricated municipal tunnel with internal support

建筑之中,解决了很多常规方法难以解决的技术难题。新材料、新产品、新设备的发展,对装配式技术的发展起到了强大的推动作用。

7.1 UHPC 在装配式建筑中的应用

UHPC 广泛应用于装配式预制构件连接接头,并被编入部分装配式建筑规范^[25]。广州开创大道装配式市政隧道利用 UHPC 自密实性高的特点,将 UHPC 应用于地下工程,有效解决了地下工程拼接接头防水问题及受力问题。同时,该项目利用 UHPC 强度高,因而对钢筋锚固长度要求较普通混凝土大幅减少的特点,结合钢筋端部设置螺栓机械锚头,解决了装配式建筑湿拼技术中狭小后浇槽内普通钢筋锚固长度不足的问题,充分发挥了普通钢筋作用,提高了结构安全性、可靠性,是应用新材料、新产品成功解决装配式建筑关键技术问题的典型案例,如图 18 所示。

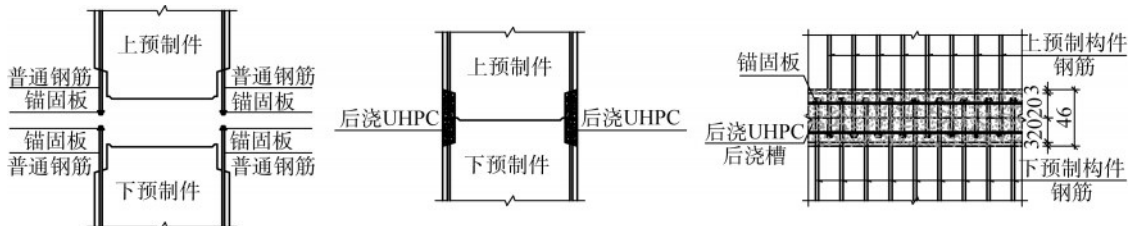


图 18 UHPC 湿拼接头

Fig.18 UHPC wet splice joint

7.2 灌浆套筒在装配式建筑中的应用

灌浆套筒(图 19)广泛应用于装配式桥墩连接,该种连接可充分发挥普通钢筋作用,但其安装精度要求较高,灌浆质量检测较为困难,且难以保证防水要求,在地下工程中应用受到限制。

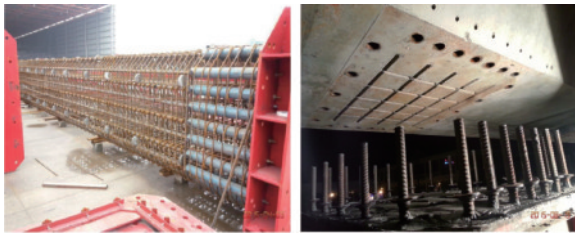


图 19 灌浆套筒用于装配式桥墩连接

Fig.19 Grouting sleeves for prefabricated pier connections

7.3 新型自锚式锚具在装配式建筑中的应用

部分装配式建筑由于构件拼装后张拉设备

安装、工人站位等受到限制致使张拉困难甚至无法张拉,对于该问题目前出现了一种新型自锚式锚具,如图 20 所示,是解决该类问题的较好办法。

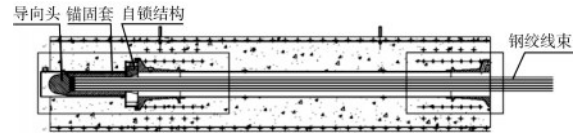


图 20 自锚式锚具

Fig.20 Self anchored anchorage

广州开创大道装配式市政隧道敞开段侧墙预应力穿过水平拼接缝,需现场张拉。考虑到张拉预应力时侧墙底部已着地,故侧墙底部采用自锚式锚具,出厂前由钢绞线、锚固套、导向头组成的索体已组装为一个整体,现场只需将索体自侧墙顶张拉端往下穿束,索体通过底部自锚式锚具后会自动锁住锚头,其后张拉即可,操作简便,如图 21 所示。

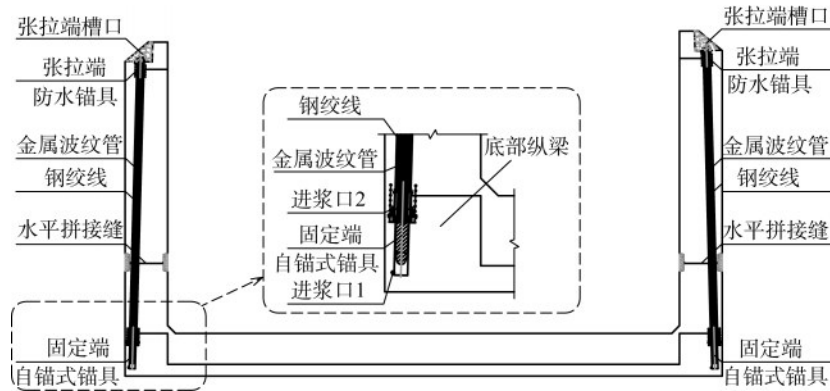


图 21 自锚式锚具的应用

Fig.21 Application of self anchored anchorage

7.4 新型防水锚具在装配式建筑中的应用

长期以来,地下工程中较少采用预应力,主要原因是担心预应力在地下环境中的耐久性问题。对于装配式地下建筑,采用预应力后可以很好地实现结构的轻量化,但需采取一定的措施确保其耐久性,防水锚具可以较好地解决该类问题。

目前防水锚具有防水密封锚固体系、电隔离锚固体系等类产品,广州开创大道装配式市政隧道采用了新型防水锚具,确保预应力耐久性,如图 22 所示。

7.5 适用小型产品在装配式建筑中的应用

装配式建筑中还可应用一些小型产品(图 23),

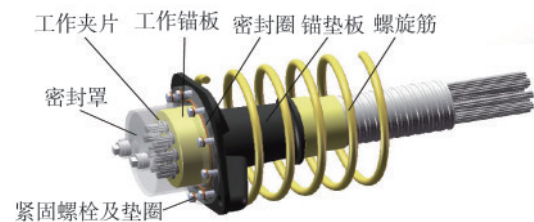
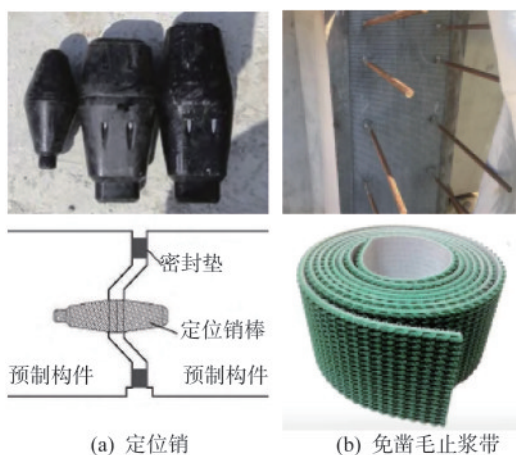


图 22 防水锚具

Fig.22 Waterproof anchorage

如应用定位销方便预制构件安装定位^[6],应用免凿毛止浆带方便预制构件湿拼界面凿毛。广州开创大道装配式市政隧道存在 UHPC 后浇界面,由于 UHPC 后期凿毛困难,应用该产品方便操作且可以保证凿毛效果,确保拼缝连接力学及防水性能。



(a) 定位销 (b) 免凿毛止浆带

图23 其他实用小型产品

Fig.23 Other practical small products

7.6 新设备在装配式建筑中的应用

为适应装配式建筑机械化、工业化施工需要,大量新型设备同样快速发展并被应用于施工中,如预制构件翻转机械、预制构件拼装台车等,如图24所示。



图24 新型预制构件翻转、吊装设备

Fig.24 Prefabricated component flipping and lifting equipment

8 装配式市政隧道存在的主要问题及建议

8.1 技术标准、规范体系仍有待完善

虽然我国目前已发布了一系列装配式建筑技术标准、规范,但相对于一般工程项目,其系统性、可操作性仍有较大差距,尤其是施工现场质量检验验收方面,现场监理监督依据较为缺乏。一般装配式建筑采用了较多新材料、新技术、新产品等,检验验收依据要么缺乏,要么极其分散,致使可操作性较低。针对该问题,一方面要加快规范编制进度,另一方面是从具体项目来说,可由装配式技术研发单位牵头,施工单位作为主体编制项目级施工方案、质量检验标准,并经建设各方确认

作为项目级检验验收依据。如重庆新森大道装配式隧道,由于明挖装配式公路隧道暂无可用验收标准,该项目参考长春、青岛、深圳装配式地铁站验收标准,并借鉴相关国家、行业规范标准,编制了《新森大道(凤湖路至高龙大道)道路工程装配式公路隧道施工质量验收标准》,这是一个值得借鉴的做法,对于装配式建筑发展过程中具体项目的应用,具有较好的参考价值。

8.2 标准化程度仍有待提高

目前装配式市政隧道仍处于发展初期,标准化程度仍较低,不利于装配式市政隧道发展。为此,对于经验证成熟可行的装配式技术,建议由有关政府部门或行业协会牵头编制技术指引,统一行业做法,提高预制构件标准化程度。如2023年4月,广州市黄埔区启动了《黄埔区装配式市政设施技术指引》编制工作,该指引包括装配式桥梁及装配式隧道等章节内容,由行业内承担装配式桥梁、隧道技术研发的设计单位进行编制,对装配式建筑的发展起到积极的作用。

8.3 成本控制问题亟待解决

建造成本偏高是目前国内推广装配式建筑的主要不利因素,成本控制是装配式建筑长远发展需重点考虑的问题,业内也越来越形成共识,均在对如何控制成本进行尝试。基于这一认识,广州开创大道装配式市政隧道在设计阶段就把成本控制作为装配式技术研发设计的重要目标。该项目采用肋板式结构形式,大幅节省了混凝土用量,减小了结构自重,受力上通过配置预应力加以保证,实现了装配式建筑轻量化的理念。由于混凝土、普通钢筋用量大幅减少,虽然增加了预应力钢筋用量,但经过测算材料费仍节省了较大比例,且由于重量减少,运输、吊装成本也大幅降低,最终其造价估算已基本与一般现浇隧道持平,成本控制效果良好,其每节段装配式方案与现浇方案工程量及造价对比见表8。

8.4 产业化程度、规模化效应仍不高

虽然我国近年来装配式建筑已有不少应用,且数量呈现较快增长的趋势,但目前装配式建筑占比仍较低,规模仍较小,尚未形成完善的产业链。

表 8 广州开创大道隧道预制与现浇方案造价对比
Table 8 Cost comparison between prefabrication and cast-in-place

项目	单位	每 3m 节段造价对比(暗埋段)							预制-现浇	百分比
		现浇方案			预制方案					
		工程量	单价/元	合价/万元	工程量	单价/元	合价/万元			
混凝土	m ³	124.7	1 733.51	21.62	72.4	2 371.54	17.17	-4.447		
UHPC	m ³				4.9	13 634.07	6.73	6.728		
普通钢筋	kg	25 563.5	8.09	20.67	16 808.0	8.09	13.59	-7.079		
预应力钢筋	kg				477.7	12.30	0.59	0.588		
波纹管	m				30.2	89.06	0.27	0.269		
锚具	套				4.0	2 000.00	0.80	0.800		
钢板止水带	m	12	101.43	0.12	101.6	101.43	1.03	0.909		
底板肋间回填石屑	m ³				19.5	331.70	0.65	0.647		
合计				42.41			40.82	-1.586	-3.7%	

注:混凝土为综合单价,包括了预制构件模板、运输、吊装等,由于预制场地与项目规模有关,本表不含预制场地建设费用。

装配式建筑依赖于建设、设计、施工、运营等全力配合,依赖于工厂生产、物流运输、现场装配等全产业链的完备,只有打通了项目实施的各个环节,装配式施工技术才能在实践中落地,而只有其达到一定的规模效应,才能体现出其各方面的优势,反过来为各方所接受。

8.5 新材料、新产品、新设备的研发及其应用有待加强

在装配式建筑领域,个别特殊部位采用新材料、新产品往往能达到意想不到的效果,解决一些关键性技术难题,而装配式建筑的运输、吊装、拼接对各种设备的依赖极大,有时直接制约了方案的可行性,因此新材料、新产品、新设备的开发应用意义重大。同时,装配式建筑研发人员需要持续关注新材料、新产品、新设备的研发应用最新动态,并将其合理应用于工程实践当中,二者形成良性循环、相互促进。

8.6 装配式建筑专业化产业工人队伍仍然缺乏

一直以来建筑行业仍以现浇工艺占主导地位,现浇工艺已经形成了成熟的产业工人队伍,但装配式工艺对建筑工人的操作技能要求有所不同,目前熟练掌握装配式工艺相应技能的产业工人十分缺乏,致使经常出现研发、设计考虑清楚,方案在施工现场因工人技术水平不足而无法落地或达不到设计意图,尤其在工期紧张的情况下,施工质量难以保证,甚至留下安全隐患。因此装配式建筑专业化产业工人队伍的培育十分重要。

9 结 语

与装配式房屋建筑等不同,装配式市政隧道多是在已通车的道路交叉路口施工,多位于繁华街区,车流量大,人流量多。采用传统现浇施工工法,现浇隧道需于基坑开挖后方可实施,隧道结构现浇施工依赖于基坑开挖提供工作面,且后续钢筋绑扎、模板架设、混凝土浇筑、养护等工序多、速度慢,受现场环境、气候条件制约大,与基坑支护间相互干扰多,致使施工周期普遍较长,造成道路长期围蔽,对本就压力较大的城市交通影响巨大,广大市民深受其苦。而采用装配式施工工法,工厂隧道结构构件预制,可与现场管线迁改、基坑开挖等同步进行,可大幅提高施工速度,尽量减少道路围蔽时间,减少对城市交通的影响,就该点而言,相比于装配式房屋建筑等,装配式市政隧道具有更大的社会效益。

由于装配式施工工法可以大幅降低隧道施工对城市交通、环境的影响,提高隧道施工质量,降低施工期间事故发生概率,节约成本,减少环境污染,节约能源,在达到一定的规模时,其投资建设成本甚至可低于传统现浇施工隧道,具有很大的推广价值,其在市政隧道中的应用前景十分广阔。从各项指标来看,近年来我国装配式建筑均呈现出快速发展的态势,已逐渐进入发展快车道,在行业共同努力下,我国建筑工业化水平将不断提高,期望早日迈上一个新的台阶。

参 考 文 献

- [1] 都亚洲.我国建筑工业化发展现状及未来对策思考[J].公路,2021,66(8):284-288.
DU Yazhou. Current status and future countermeasures of China's construction industrialization development [J]. Highway, 2021, 66(8): 284-288. (in Chinese)
- [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 Jun, ZHAO Jida, HU Zongyu. Review and thinking on development of building industrialization in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 1-8. (in Chinese)
- [3] 杨秀仁.我国预制装配式地铁车站建造技术发展现状与展望[J].隧道建设(中英文),2021,41(11):1849-1870.
YANG Xiuren. Development status of and outlook for construction technology for prefabricated metro stations in China [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1849-1870. (in Chinese)
- [4] 杨秀仁.明挖地铁车站预制装配结构理论与实践[D].北京:北京交通大学,2020.
YANG Xiuren. Theory and application of prefabricated open-cut metro station structure [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [5] 杨秀仁.明挖预制装配式隧道结构拼装设计方法及关键技术[J].都市轨道交通,2023,36(2):2-13.
YANG Xiuren. Design method and key technology for assembling open-excavated prefabricated tunnel structures [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(2): 2-13. (in Chinese)
- [6] 杨秀仁.明挖预制装配式隧道结构拼装精度控制标准研究与制定[J].都市轨道交通,2023,36(2):14-25.
YANG Xiuren. Research and formulation of control standard for accurate assembly of open-excavated prefabricated tunnel structures [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(2): 14-25. (in Chinese)
- [7] 赵有明,王志伟,王子洪.铁路隧道预制装配式建造技术研究与展望[J].中国铁路,2020(12):51-60.
ZHAO Youming, WANG Zhiwei, WANG Zihong. Research and prospect on prefabricated structure of railway tunnel [J]. China Railway, 2020(12): 51-60. (in Chinese)
- [8] 傅重龙.城市地下道路明挖预制拼装工艺研究与实践[J].工程建设与设计,2019(4):130-132.
FU Chonglong. Study and practice on excavation prefabricated assembly process of urban underground road [J]. Construction & Design for Project, 2019(4): 130-132. (in Chinese)
- [9] 奚成.成都市磨子桥装配式隧道分块拼装技术研究[J].铁道建筑技术,2019(12):81-85.
XI Cheng. Research on prefabricated components assembly technology for Moziqiao tunnel in Chengdu [J]. Railway Construction Technology, 2019(12): 81-85. (in Chinese)
- [10] 陈鼎基,张银屏,胡哲斌.全装配式预制拼装技术在软土地区城市明挖地下道路隧道中的应用研究[J].城市道桥与防洪,2018(9):51-53.
CHEN Naiji, ZHANG Yinping, HU Zhebin. Study on application of full assembly prefabrication technology in excavation of urban underground road tunnel in soft soil region [J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2018(9): 51-53. (in Chinese)
- [11] 林志,冯万林,陈相,等.超大断面装配式明挖隧道结构及施工方法研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(7):1167-1176.
LIN Zhi, FENG Wanlin, CHEN Xiang, et al. Prefabricated structure of super-large cross-section open-cut tunnel and its construction method [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(7): 1167-1176. (in Chinese)
- [12] 张晨裴,熊珍,郑恒.浅谈预制拼装综合管廊的发展与展望[C]//2017中国建筑施工学术年会论文集.成都:建筑机械化杂志社,2018:150-154.
ZHANG Chenpei, XIONG Zhen, ZHENG Heng. Development and prospect of prefabricated assembly integrated pipe gallery [C]//Proceedings of the China Construction Academic Annual Conference 2017. Chengdu: Construction Mechanization Magazine, 2018: 150-154. (in Chinese)
- [13] 陈孝湘,贺雷,黄晓予,等.装配式明挖电力管廊标准段拼接方式选型研究[J].建筑结构,2019,49(S2):574-577.
CHEN Xiaoxiang, HE Lei, HUANG Xiaoyu, et al. Study on the connection selection of the precast HV cable tunnel which berried on the open-cast segment structure [J]. Building Structure, 2019, 49(S2): 574-577. (in Chinese)
- [14] 周志祥,钟世祥,张江涛,等.桥梁装配式技术发展工业化制造探讨[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(10):29-40.

- ZHOU Zhixiang, ZHONG Shixiang, ZHANG Jiangtao, et al. Discussion on the development of bridge prefabricated technology and industrial manufacturing [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(10): 29-40. (in Chinese)
- [15] 王晟, 桂晓明, 宁平华, 等. 全装配式桥梁在国内的发展与建设经验 [J]. 公路与汽运, 2019(3): 151-154.
- WANG Sheng, GUI Xiaoming, NING Pinghua, et al. Development and construction experience of fully assembled bridges in China [J]. Highways & Automotive Applications, 2019(3): 151-154. (in Chinese)
- [16] 冯帅克, 郭正兴, 刘毅, 等. 装配式地铁车站侧墙-顶板节点抗震性能试验研究 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(4): 610-617.
- FENG Shuaike, GUO Zhengxing, LIU Yi, et al. Experimental study on seismic behaviors of joints between sidewalls and roof slabs for precast subway stations [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(4): 610-617. (in Chinese)
- [17] 冯帅克, 郭正兴, 刘毅, 等. 装配式地铁车站外墙-底板节点抗震性能研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(1): 259-268.
- FENG Shuaike, GUO Zhengxing, LIU Yi, et al. Study on seismic behaviors of joints between sidewalls and floors for precast subway stations [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(1): 259-268. (in Chinese)
- [18] 詹素虹, 郭太军, 刘国强. 装配式市政隧道结构轻量化、标准化设计研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2024(5): 273-278, 28-29.
- ZHAN Suhong, GUO Taijun, LIU Guoqiang. Research on lightweight and standardized design of prefabricated municipal tunnel structure [J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2024(5): 273-278, 28-29. (in Chinese)
- [19] 杨秀仁, 林放, 黄美群. 地铁车站预制装配式结构注浆式单榫长接头抗弯承载性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 111-118, 128.
- YANG Xiuren, LIN Fang, HUANG Meiqun. Research on flexural bearing capability of long grouted single mortise-tenon joints for prefabricated metro station structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 111-118, 128. (in Chinese)
- [20] 杨秀仁, 林放, 黄美群. 地铁车站预制装配式结构注浆式单榫接头抗弯刚度试验研究 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(3): 38-43.
- YANG Xiuren, LIN Fang, HUANG Meiqun. Experimental research on flexural rigidity of grouted single mortise-tenon joints for prefabricated metro station structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(3): 38-43. (in Chinese)
- [21] 杨秀仁, 黄美群, 林放. 地铁车站预制装配式结构注浆式榫槽接头弯曲抵抗作用特性研究 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(2): 33-40.
- YANG Xiuren, HUANG Meiqun, LIN Fang. Research on bending resistance characteristics of grouted mortise-tenon joints for prefabricated metro station structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(2): 33-40. (in Chinese)
- [22] 郭太军, 刘凯华, 姜海波, 等. 装配式隧道 UHPC 连接节点钢筋锚固性能试验研究 [J]. 公路交通科技, 2025, 42(5): 184-194.
- GUO Taijun, LIU Kaihua, JIANG Haibo, et al. Experimental study on UHPC connection joints steel bar anchorage performance for prefabricated tunnels [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42(5): 184-194. (in Chinese)
- [23] 崔涛, 张继清, 刘瑜, 等. 城市铁路明挖隧道装配式衬砌接头性能研究 [J]. 铁道建筑, 2019, 59(4): 76-78.
- CUI Tao, ZHANG Jiqing, LIU Yu, et al. Research on joint property of prefabricated lining of open cut tunnel in urban railway [J]. Railway Engineering, 2019, 59(4): 76-78. (in Chinese)
- [24] 黄明利, 杨泽, 谭忠盛, 等. 明挖法地下装配式结构接缝防水技术探讨 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(6): 131-139.
- HUANG Mingli, YANG Ze, TAN Zhongsheng, et al. Waterproofing technology for underground fabricated structure joints based on the open cut method [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(6): 131-139. (in Chinese)
- [25] 装配式超高性能混凝土市政桥梁结构技术规程: DBJ/T 15-244—2022 [S]. 北京: 中国城市出版社, 2022.
- Technical specification for prefabricated ultra-high performance concrete municipal bridge structures: DBJ/T 15-244—2022 [S]. Beijing: China City Press, 2022. (in Chinese)