

明挖法装配式地下车站的结构性能研究进展*

夏生祥^{1,2} 李 鹏^{1,3} 康鹏程³ 管东芝⁴ 冯帅克⁴

(1. 锡澄中车(无锡)城市轨道交通工程有限公司, 214400, 无锡; 2. 中车智能交通工程技术有限公司, 100071, 北京;

3. 江苏中车城市发展有限公司, 214400, 无锡; 4. 东南大学土木工程学院, 211189, 南京)

摘 要 [目的] 当前,我国装配式地下车站结构体系呈现多样化发展特征,但缺乏系统梳理,故对明挖法装配式地下车站的结构性能研究进展进行梳理。[方法] 针对当前主流的结构形式,系统总结了明挖法装配式地下车站结构体系特点;从预制构件、节点连接和整体结构等3个层面梳理了明挖法装配式地下车站的结构性能研究情况;提出了明挖法装配式地下车站的发展方向。[结果及结论] 明挖法装配式地下车站结构可分为装配整体式和全拼装式两种;装配式地下车站预制构件的研究主要集中于装配式板类构件的承载性能;预制构件的节点连接,关系到装配式地下车站整体结构的承载和抗震性能,是研究的重点;装配式地下车站结构承载和抗震性能主要通过数值分析手段进行研究,较为缺乏整体结构的试验数据;考虑全寿命周期的装配式地下车站受力性能研究将成为重要研究方向。

关键词 地铁; 装配式; 明挖法地下车站; 结构体系; 结构性能

中图分类号 U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.001

Research Progress on Structural Performance of Prefabricated Underground Station with Open-Cut Method

XIA Shengxiang^{1,2}, LI Peng^{1,3}, KANG Pengcheng³, GUAN Dongzhi⁴, FENG Shuaike⁴

(1. Xicheng-CRRC(Wuxi) Urban Railway Transportation Engineering Co., Ltd., 214400, Wuxi, China; 2. CRRC Intelligent Transportation Engineering Technology Co., Ltd., 100071, Beijing, China; 3. Jiangsu CRRC Urban Development Co., Ltd., 214400, Wuxi, China; 4. Southeast University School of Civil Engineering, 211189, Nanjing, China)

Abstract [Objective] At present, the structural system of prefabricated underground stations in China presents diversified development characteristics, but lacks systematic classification. Therefore, the research progress on the structural performance of open-cut prefabricated underground stations is sorted out.

[Method] Aiming at the current mainstream structure forms,

the structural system characteristics of open-cut prefabricated underground stations are systematically summarized. The research on the structural performance of the above stations is organized from prefabricated elements, joint connections and overall structure three levels. The development direction of open-cut prefabricated underground stations is proposed. [Result & Conclusion] The structure of open-cut prefabricated underground stations can be classified into two categories: prefabricated-monolithic type and fully-assembled type. The research on prefabricated components of assembled underground station mainly focuses on the bearing performance of assembled plate components. The joint connection of prefabricated components is related to the bearing and seismic performance of the overall structure for the prefabricated underground station, and therefore is the focus of the research. The bearing and seismic performance of prefabricated underground structures is mainly investigated by numerical methods, and lacks experimental data on the overall structure. Studies on the load bearing performance of the above station considering the whole life cycle will become an important research direction.

Key words subway; prefabricated; open-cut underground station; structural system; structural performance

我国新建地下车站数量多,规模大,普遍采用明挖法现浇混凝土工艺来建造,环节多,污染严重,且难以适应低碳环保的发展要求。装配式地下车站技术具有较高的工业化建造水平,其能降低二氧化碳的排放量,符合“双碳”目标和技术潮流的要求,对城市轨道交通建设具有重要的现实意义。

早期,明挖装配式地下车站在前苏联地区得到发展,一般采用杯口承插式连接体系,白俄罗斯首都明斯克的地铁则创新建造了明挖单拱衬砌装配式地铁站^[1]。文献[2]介绍了前苏联地区装配式明挖车站建造的关键技术。我国装配式地下车站发展迅速,文献[3]介绍了近年来我国实施的装配式

* 国家自然科学基金项目(52278154);江苏省自然科学基金项目(BK20231429);东南大学“至善青年”支持计划项目(2242024RCB0008)

车站结构建造技术;文献[4]分析了预制装配式技术在地下车站中的应用前景。然而,目前尚缺乏关于明挖装配式地下车站结构性能研究的系统总结,难以厘清该结构体系的发展脉络和发展方向。

装配式地下车站结构体系和性能是设计方法和建造模式的基础,决定了该体系发展的前景。文中通过对结构体系的总结以及对构件、节点和整体性能研究的梳理,归纳了装配式地下车站的结构性能研究现状,填补了上述空白,呈现了最新研究进展主流脉络和方向,为装配式地下车站结构的研究和应用提供参考。

1 受力特点与基本结构形式

1.1 装配式地下车站受力特点

从结构的受力特点和结构设计策略角度看,装配式地下车站结构可分为:装配整体式和全拼装式。前者指装配式地下车站结构的受力机理和力学指标基本与现浇混凝土结构一致,分析和设计方法均基于现浇混凝土连续体结构的基本原理。该类结构的主要受力构件多进行部分预制,形成预制叠合构件;在建造现场采用有效手段实现单根钢筋的相互连接,再浇筑混凝土使离散的构件连接成为一个整体结构。因此,该类结构亦被称为“叠合现浇装配式地下车站”^[3]。全拼装式地下车站,亦称“全预制装配式地下车站”,其主要构件全部为预制,预制构件之间往往采用以螺栓压接为主的干式连接。该类结构的力学性能区别于现浇混凝土结构,其设计方法无须依照现浇混凝土结构。因此,全拼装式地下车站的建造需要开展大量研究,建立独有结构设计方法,技术要求相对较高。

装配式地下车站结构与基坑围护结构之间通过现浇混凝土或者注浆的方式紧密相连,可共同受力;但在设计分析时,多数装配式地下车站结构和基坑围护结构往往作为独立的受力体系进行设计,不考虑二者之间的相互影响。由于预制构件在安装阶段可受力的特点,使得基坑围护结构与车站主体的预制构件可有效结合,进而形成考虑多阶段不同受力特征的“永临结合”结构体系。亦有学者提出利用装配式地下连续墙作为地下车站外墙的“两墙合一”装配式地下车站^[5]。

1.2 装配式地下车站基本结构形式

1.2.1 装配整体式结构形式

我国的装配整体式地下车站结构大致相似,区别在于构件的连接方式和叠合现浇的比例。无锡

地铁集团有限公司牵头研发了基于环扣搭接的全叠合地下车站^[6]。典型装配整体式地下车站结构如图1所示。由图1 a)可知:该体系的底板为现浇混凝土,中柱为外包预制混凝土的圆钢管混凝土柱,纵梁为预制型钢混凝土叠合梁,中板和顶板采用预制预应力板+现浇混凝土面层的形式,侧墙由内侧预制墙板和外侧现浇混凝土形成叠合墙板,预制墙与板采用U形钢筋扣搭连接。文献[7]提出的装配整体式地铁车站结构采用全预制的侧墙、柱,通过灌浆套筒与下部构件连接,其他构件采用搭接或者锚固连接,如图1 b)所示。哈尔滨地铁3号线丁香公园站采取叠合结构+局部整体现浇组合的结构形式^[8],预制板主要起模板作用,现浇量较大。

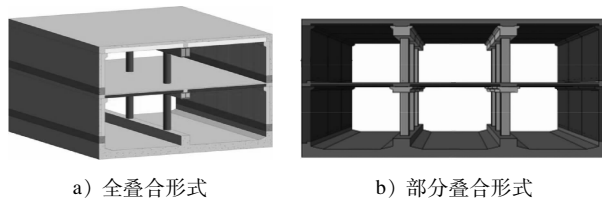


图1 典型装配整体式地下车站结构

Fig. 1 Typical prefabricated-monolithic underground station structure

永临结合装配式地下车站结构如图2所示。广州地铁11号线上涌公园站^[9]利用地下连续墙作为主体结构外墙,其在基坑开挖阶段的内支撑中部段采用预制混凝土构件,两端通过现浇腰梁与连续墙连接;结构成型后,预制内支撑作为预制中板的横梁,该体系可称为“地下连续墙和横撑复用”模式,如图2 a)所示。济南地铁采用了一种以预制立柱与永久结构柱相结合、预制桩与主体结构墙相结合的永临结合装配式地下结构^[10],可称为“预制桩/柱复用”模式,如图2 b)所示。

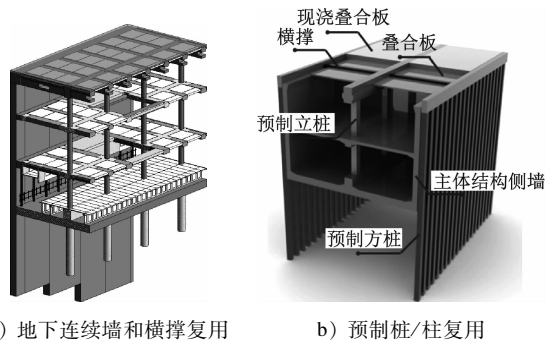


图2 永临结合装配式地下车站结构

Fig. 2 Permanent-temporary integration prefabricated underground station structure

1.2.2 全拼装式结构形式

图 3 为典型全拼装式地下车站结构。全拼装式地下车站形式相对多样。文献[4]提出了全预制装配明挖地铁车站,如图 3 a)所示。该结构体系采用 7 块预制构件拼装成环,两环之间通过凹凸齿块 + 预应力压接进行连接;顶拱构件之间的纵缝采用错缝拼装,其余为通缝拼装;各预制构件均采用“闭腔薄壁构件”,在满足受力条件下,能有效地减轻构件质量。预制构件之间采用“注浆式榫槽接头”,在接头外部设置辅助加力装置。该体系在我国不同地区进行了应用,单环预制构件划分进行了优化^[11],总体上向着预制构件大型化、连接节点少量化方向改进,如图 3 b)所示。

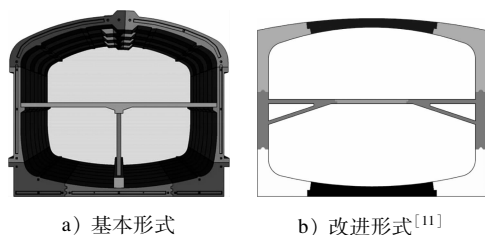


图 3 典型全拼装式地下车站结构

Fig. 3 Typical fully-assembled prefabricated underground station structure

2 构件性能研究

2.1 研究现状

叠合拱壳工艺示意如图 4 所示。上海轨道交通 15 号线吴中路站采用了叠合拱壳工艺,其将预制混凝土拱壳先组成三铰拱底模,然后绑扎钢筋并浇筑混凝土,从而形成无铰叠合的拱壳顶板。该结构在施工状态按照三铰拱进行分析计算,成型后按固支无铰拱进行计算。文献[12]进行了足尺模型静力加载试验,验证了多阶段受力理论模型。

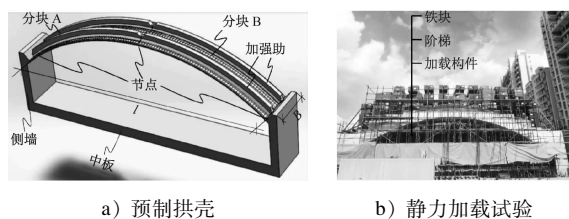


图 4 叠合拱壳工艺示意图^[12]

Fig. 4 Schematic diagram of composite arch shell technology^[12]

图 5 为预制叠合墙和板构件实景图。文献[6]针对全叠合地下车站的顶板进行了静力加载试验,

探究了预制预应力板叠合板的受力特点,如图 5 a)所示。文献[13]对该体系中的出入口侧墙进行了缩尺模型试验加载,验证了预制叠合侧墙开洞处的可靠性,如图 5 b)所示。

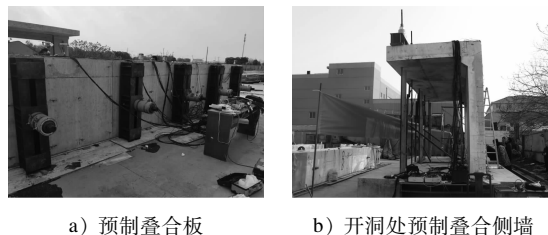


图 5 预制叠合墙和板构件实景图

Fig. 5 Actual view of the prefabricated composite wall and plate components

文献[14]分析了“闭腔薄壁构件”在使用荷载下的结构反应,其结果显示构件可满足结构要求和防水要求。文献[15]提出了一种下部型钢上部叠合混凝土板的预制组合顶板方案,并进行了有限元分析。

2.2 分析总结

地下车站的恒载较大,其梁板构件,特别是顶板,属于重载构件,将该类构件预制化后,需要考虑其跨度范围内巨大弯矩作用:一种方式通过拱形预制构件来减小构件的弯矩作用,其截面受压的特性也有利于预制构件之间的连接;另一种方式则在预制梁或板中设置预应力筋、型钢等,发挥预应力构件和组合构件承载力强的特点。装配式地下车站的梁板构件往往体量较大,而工厂生产具有制造复杂构件的优势,因此,通过静力加载、有限元分析等手段,研发轻量化、高强化的装配式地下车站预制梁板构件技术是重要的发展方向之一。随着新材料的发展,利用新材料制成装配式地下车站预制构件,亦是重要的实现途径之一。

3 连接节点性能研究

3.1 墙板连接性能研究

文献[6]针对环扣搭接连接的墙-底板节点、顶板-墙节点连接进行了低周反复荷载试验,如图 6 所示。由试验结果可知,墙-板连接节点的抗震性能总体而言基本可达到等同现浇的目标。文献[16]研究了灌浆套筒式预制侧墙与底板的连接节点抗震性能,其结果表明,灌浆套筒与预制拼装缝的存在使得预制拼装构件存在刚度强弱交替现象,其耗能

低于现浇对比试件的耗能。

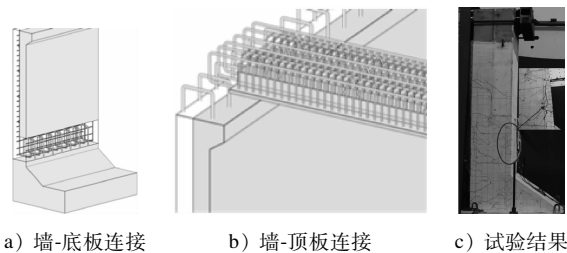


图6 环扣搭接连接节点

Fig. 6 Buckle connection joints

文献[17]研究了轴弯组合的荷载作用下,单榀槽式接头的混凝土裂缝和接缝变形演变规律,其破坏形态主要是保护层处混凝土与钢筋剥离。文献[3]则探讨了接头连接界面的接头抗弯承载力,针对接头抗弯承载能力的组成部分分别进行分析,建立相关计算方法。文献[18]在榀头内外侧增设了CHC(C型钢+H型钢+C型钢)接头,通过试验研究,发现该结构具有刚性接头特征。

3.2 梁柱连接性能研究

文献[6]针对预制中纵梁-柱型钢混凝土连接节点进行了静力加载,采用“工”字型试验模型,测试该节点的静力承载能力,如图7所示。由试验结果可知:破坏形态为受压区靠近柱端位置部分混凝土压碎剥落,连接区受拉侧纵向钢筋屈服,型钢翼缘屈服,弯矩试验峰值远大于顶层梁的弯矩设计值。

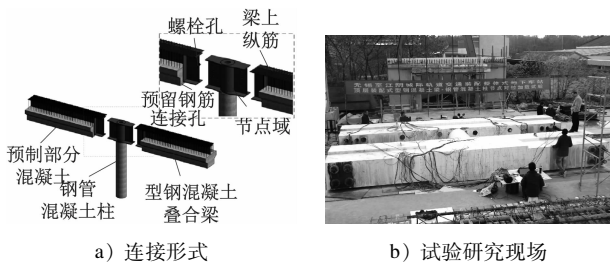


图7 预制中纵梁-柱型钢混凝土连接节点

Fig. 7 Prefabricated middle longitudinal beam-column steel reinforced concrete connection joints

文献[16]对于横、纵两个方向的预制混凝土梁柱节点进行了低周反复荷载试验,如图8所示。由试验结果可知:该类型连接节点抗震性能基本与现浇结构相当;预制中柱连接的研究结果表明,预制中柱连接的抗震性能与轴压比相关,破坏时塑性铰上移至套筒上方。

3.3 其他连接性能研究

在“地下连续墙和横撑复用”结构中,支撑-腰

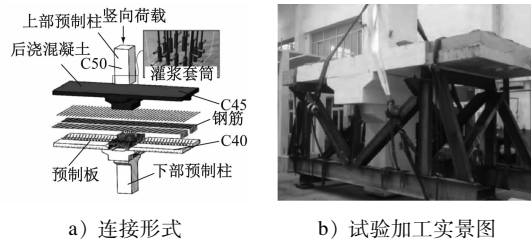


图8 预制混凝土梁柱连接节点

Fig. 8 Prefabricated concrete beam-column connection joints

梁-地下连续墙的连接节点可通过钢板焊接或接驳器实现连接,如图9所示。文献[19]对其进行了系统研究,结果表明:钢板连接节点可提供更高的承载力和延性,具有更好的施工容差度;该节点最终得到了应用。针对“预制桩/柱复用”结构,文献[10]分析了不同连接形式的墙-桩整体的力学性能;文献[20]对基坑预制桩-墙复合围护结构进行了计算,结果表明:预制桩-墙叠合结构,可适当减薄主体内墙厚度或减少配筋,在满足承载力性能的前提下达到节能环保的目的。

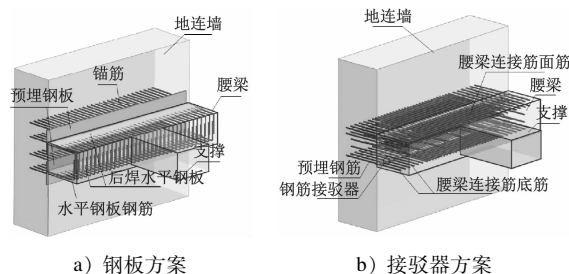


图9 支撑-腰梁-地下连续墙的连接节点

Fig. 9 Connection joints of support-waist beam-diaphragm wall

3.4 分析总结

装配式地下车站结构的连接节点关系到整体结构的性能,是研究重点之一。其主要分为两种:一种是基于钢筋连接技术的连接节点,通过搭接、对接、焊接等方式实现钢筋之间的一一连接,辅助以水泥浆料或现浇混凝土实现整体连接;另一种是基于槽槽构造的压接节点及其相关的改进型式,通过预制构件之间直接的“硬接触”实现连接。

前者连接形式整体性相对较强,大量的抗震性能试验结果表明:只要构造合理,该形式连接可实现等同现浇结构的性能,并可作为刚性节点来设计。这种连接形式的研究目标和突破点在于保证连接性能,并简化构造,便于施工。后者连接形式则多被认为是半刚性节点,具有独特的受力性能,

关于该连接形式的研究多集中于其单向静力承载性能和受力机理,建立简化计算模型。关于该形式连接节点的抗震性能研究较少,需要进一步研究补充。

4 结构整体性能研究

4.1 数值分析研究

文献[21]基于深圳地铁宝安中心站,对明挖装配式车站结构进行优化设计,研究了施工过程力学特性。文献[22]对拱形装配式大跨无柱车站进行分析。文献[23]建立了土-地下连续墙-装配式地下车站结构非线性整体有限元模型,如图10所示,对全叠合地下车站在土体中的抗震性能进行了整体分析。

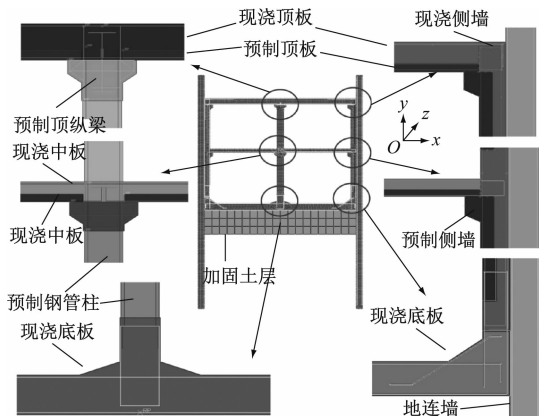


图10 全叠合装配式地下车站有限元模型^[23]

Fig. 10 Finite element model for fully composite prefabricated underground station^[23]

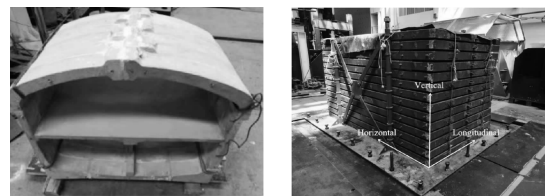
针对基于套筒连接的装配式地下车站结构,文献[24]基于试验规律建立了节点的等效力学分析模型,然后建立整体结构数值分析模型,进行抗震分析。文献[25]通过更新混凝土和钢筋材料模型来考虑预制拼装节点的影响,建立结构-土层模型来分析装配式车站的抗震性能。文献[26]验证了该形式装配式地下车站的地震破坏机理与现浇结构几乎一样。

针对基于榫槽接头的全预制地下车站结构,文献[27]提出了多次迭代分析方法。文献[28]进行了预制模型和现浇模型的三维动力响应对比研究。文献[29]考虑了水平-竖向耦合地震波,进行了三维动力响应研究。文献[30]则分析了场地类别对该类型地下车站抗震性能的影响。

4.2 试验研究

文献[31]采用细石混凝土、镀层钢丝,制造了

全预制装配式地下车站结构的缩尺模型和对应的现浇结构模型,开展了地震台试验,详细对比了一阶自振频率、阻尼比、宏观现象、模型土响应、模型结构响应和地震损伤机理等。装配式地下车站地震台试验实景图^[31]如图11所示。其结果显示:与现浇结构相比,预制结构的自振频率和阻尼比几乎一样,并且能够更大程度地吸收和消耗地震能量;预制结构的表面沉降和结构损伤更大,在极限地震作用下,其结构会变成“三铰拱”结构,不易发生整体坍塌。



a) 缩尺模型

b) 加载装置

图11 装配式地下车站地震台试验实景图^[31]

Fig. 11 Actual view of seismic station test for prefabricated underground station^[31]

4.3 分析总结

装配式地下车站整体结构性能的研究多集中于抗震性能。装配整体式地下车站的抗震性能基本可等同现浇结构的性能,而结构的损伤则会向连接拼缝处相对集中,因此,对于连接处的构造处理显得尤为重要。全拼装式地下车站受到半刚性接头影响,其抗震性能具有独特性,总体表现为地震力相对于现浇结构变小,但相应的变形略有增加,由于高强筋的存在,其节点连接的抗倒塌性能较强。目前关于装配式车站结构性能的研究多采用数值分析开展,由于研究投入和技术难度等原因,仅有少量学者开展了装配式地下车站结构的地震台试验研究。因此,仍需要开展关于整体结构的试验研究,积累试验数据,这对于充分掌握装配式地下车站的整体抗震性能和进一步推动技术发展具有重要意义。

5 结语

在“双碳”目标的背景下,装配式地下车站代表着城市轨道交通地下车站建设发展的方向,具有广阔的前景。本文系统总结了当前装配式地下车站的结构受力特点和类型,以及预制构件、连接节点和整体性能的研究现状,主要结论如下:

1) 从受力特点和结构设计策略角度,总结了当前我国装配式地下车站结构体系的主要类型,可分为装配整体式和全拼装式两种。前者受力机理和力学指标基本与现浇混凝土结构一致,后者无须参照现浇地下车站的力学性能和结构组成,形式多样。

2) 预制构件的研究主要集中于装配式板类构件的承载性能,特别是预制叠合顶板承受荷载大,往往采用足尺加载的方式研究静力承载性能,研发轻量化、高强化的装配式地下车站预制梁板构件技术是重要的发展方向之一。

3) 预制构件连接节点是装配式地下车站结构性能研究的重点之一,可分为基于钢筋连接技术的连接节点形式和基于榫槽构造的压接节点形式,前者应保证力学性能并简化构造,后者则应加强抗震性能研究。

4) 装配式地下车站在土体中的承载和抗震性能基本可以达到抗震要求,相关的研究主要采用数值分析手段开展,而装配式地下车站抗震性能的试验研究开展较少,相关试验结果数据较为缺乏,需大力开展相关试验研究,为进一步的推广使用奠定研究基础。

5) 当前装配式地下车站结构性能的研究多集中在结构建造成型后的受力性能,考虑制造、安装、成型、服役等全寿命周期过程的受力状态和性能研究不足。因此,全寿命周期的装配式地下车站受力性能研究将成为重要研究方向。随着工程材料的发展,采用新材料的装配式地下车站结构亦将是重要的发展方向之一。

参考文献

- [1] 李太惠. 明斯克地铁单拱车站设计施工经验[J]. 地铁与轻轨, 1995, 8(2): 44.
LI Taihui. Design and construction experience of minsk metro single arch station [J]. Urban Rapid Rail Transit, 1995, 8(2): 44.
- [2] YURKEVICH P. Developments in segmental concrete linings for subway tunnels in Belarus [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1995, 10(3): 353.
- [3] 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.
- [4] 同振宇, 谭永庆. 预制装配式技术在地下车站中的应用及前景分析[J]. 工程技术研究, 2022, 7(6): 15.
- TONG Zhenyu, TAN Yongqing. Application and prospect analysis of prefabricated assembly technology in underground stations [J]. Engineering and Technological Research, 2022, 7(6): 15.
- [5] 朱旻, 孙晓辉, 陈湘生, 等. 地铁地下车站绿色高效智能建造的思考[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(12): 2037.
ZHU Min, SUN Xiaohui, CHEN Xiangsheng, et al. Green, efficient, and intelligent construction of underground metro station [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(12): 2037.
- [6] 郭正兴, 冯帅克, 郭润泽, 等. 无锡至江阴城际轨道交通装配整体式地下站关键节点与基本构件受力性能试验报告[R]. 南京: 东南大学, 2020.
GUO Zhengxing, FENG Shuaike, GUO Runze, et al. Wuxi-Jianning intercity rail transit assembly integral underground station key nodes and basic component stress performance test report [R]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [7] 杜修力, 刘洪涛, 路德春, 等. 装配整体式地铁车站侧墙底节点抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 38.
DU Xiuli, LIU Hongtao, LU Dechun, et al. Study on seismic performance of sidewall joints in assembled monolithic subway station [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 38.
- [8] 周仁君. 叠合装配式建造技术在地铁站中的施工应用研究[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(22): 9.
ZHOU Renjun. Study on construction application of superimposed assembly construction technology in subway station [J]. Building Technology Development, 2020, 47(22): 9.
- [9] LIU T, LU J, WANG D, et al. Experimental investigation of the mechanical behaviour of wall-beam-strut joints for prefabricated underground construction [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2021, 15(1): 2.
- [10] XIU C H, LI H, WANG W X, et al. Study on the force and deformation characteristics of prefabricated pile-wall compound structure and its application in foundation pit engineering [C] // GeoShanghai International Conference. Singapore: Springer, 2018: 503.
- [11] 张建芳, 张继清. 新型预制装配式地铁车站结构及造价指标研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(8): 96.
ZHANG Jianfang, ZHANG Jiqing. Research on the new type of subway station prefabricated structure and cost index [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(8): 96.
- [12] ZHANG J L, LIU X, ZHAO J B, et al. Application of a combined precast and in-situ-cast construction method for large-span underground vaults [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 111: 103795.
- [13] 潘清, 费金新, 徐军林, 等. 装配整体式地下车站侧墙开洞结构力学性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(12): 77.
PAN Qing, FEI Jinxin, XU Junlin, et al. Mechanical performance analysis of side wall opening structure in assembled monolithic underground station [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(12): 77.

- [14] YANG X, HAN Y. Closed cavity thin-wall components design for prefabricated underground subway structures [C] // Geo-Risk 2017. Denver, Colorado. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2017: 194.
- [15] 邬泽, 吴春冬, 蒋小锐. 采用型钢混凝土组合结构的新型地铁装配式车站结构研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(17): 119.
- WU Ze, WU Chundong, JIANG Xiaorui. Research on new subway prefabricated station structure using steel reinforced concrete composite structure [J]. Engineering and Technological Research, 2021, 6(17): 119.
- [16] 刘洪涛. 装配整体式地铁车站节点试验研究及整体抗震性能分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- LIU Hongtao. Experimental study and overall seismic performance analysis of assembled integral subway station joints[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
- [17] 李兆平, 王臣, 苏会峰, 等. 装配式地铁车站结构接头混凝土裂缝及接缝变形规律试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊1): 409.
- LI Zhaoping, WANG Chen, SU Huifeng, et al. Experimental study on concrete cracks and joint deformation law of assembled subway station structure joint[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 409.
- [18] 叶亮, 丁先立, 项宝, 等. 装配式地下车站CHC型钢-混凝土组合接头受弯性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(4): 120.
- YE Liang, DING Xianli, XIANG Bao, et al. Bending performance of CHC steel-concrete combined joint in underground prefabricated metro station [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(4): 120.
- [19] LIU T, LU J, WANG D, et al. 3D nonlinear finite element modelling of mechanical behavior of a new wall-beam-strut joint for prefabricated underground construction and validation against experimental testing[J]. Structures, 2021, 33: 3202.
- [20] 路林海, 王国富, 王婉婷, 等. 地铁车站基坑预制桩-墙结构设计及受力分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(10): 93.
- LU Linhai, WANG Guofu, WANG Wanting, et al. Research on the structure design and mechanics analysis of the precast pile-retaining wall for metro station[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(10): 93.
- [21] 刘建洪. 明挖装配式地铁车站结构设计优化及施工过程力学特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- LIU Jianhong. Study on the design optimization of the fabricated structure of the subway station constructed by open-cut method and the mechanical behaviour of construction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [22] 孙菲. 装配式无柱地铁车站的力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2021.
- SUN Fei. Research on mechanical performance of assembled columnless metro station[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2021.
- [23] 郭建刚, 王永伟, 庄海洋, 等. 部分预制装配式地铁地下车站结构整体抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(5): 215.
- GUO Jiangang, WANG Yongwei, ZHUANG Haiyang, et al. Seismic performance of an underground subway station with some sectional prefabricated members [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(5): 215.
- [24] 张喻捷. 套筒连接装配式地铁车站结构三维抗震性能评价方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- ZHANG Yujie. Research on evaluation methodology of three dimensional seismic performance of fabricated subway station structure connected by sleeve [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [25] LIU H, XU C, DU X. Seismic response analysis of assembled monolithic subway station in the transverse direction [J]. Engineering Structures, 2020, 219: 110970.
- [26] CHEN J, XU C, EL NAGGAR H M, et al. Study on seismic performance and index limits quantification for prefabricated subway station structures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 162: 107460.
- [27] 杨秀仁, 黄美群. 明挖装配式隧道结构整体作用效应计算方法分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(3): 372.
- YANG Xiuren, HUANG Meiqun. Calculation and analysis method of overall action effect of open-cut prefabricated tunnel structures [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(3): 372.
- [28] DING P, TAO L, YANG X, et al. Three-dimensional dynamic response analysis of a single-ring structure in a prefabricated subway station [J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 45: 271.
- [29] 杨桃. 单拱大跨槽槽注浆预制装配式地铁车站地震三维动力响应研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- YANG Tao. Research on seismic three-dimensional dynamic response of single-arch and long-span mortise-groove grouting prefabricated metro station [D]. Xi'an: Changan University, 2020.
- [30] 陶连金, 曹乾坤, 石城, 等. 场地类别对装配式地铁车站结构地震响应的影响[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(3): 378.
- TAO Lianjin, CAO Qiankun, SHI Cheng, et al. Seismic responses of prefabricated metro stations built at different sites [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(3): 378.
- [31] TAO L, DING P, SHI C, et al. Shaking table test on seismic response characteristics of prefabricated subway station structure [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 91: 102994.

· 收稿日期:2023-03-25 修回日期:2023-08-21 出版日期:2024-10-10
 Received:2023-03-25 Revised:2023-08-21 Published:2024-10-10
 · 第一作者:夏生祥,高级工程师,1052581808@qq.com
 通信作者:管东芝,副教授,gdzh.js@163.com
 · ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
 © Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license