

富水软土地区地铁装配叠合整体式 地下车站设计关键技术研究

许俊超

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//高级工程师)

摘要 对地铁装配叠合整体式地下车站整体及各构件在不同工况下的受力性能、结构整体抗震性能进行计算,对关键节点的力学性能、防水关键技术等进行研究,研发出一种适用于富水软土地区地铁的装配叠合整体式地下车站设计方案,并针对其重点和难题提出了有针对性和可操作性的关键技术措施。该方案在无锡至江阴城际轨道交通工程的南门站得以应用,形成了从装配方案体系设计、预制构件设计及产业化生产、施工智能化管理、设备研发应用的全流程关键技术,对于缩短施工工期、节约资源、提升劳动生产效率、促进建筑产业转型升级等具有促进作用。

关键词 地铁;地下车站;装配叠合整体式;富水软土地区;关键技术

中图分类号 U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.024

Research on Key Design Techniques for Fabricated Composite Monolithic Metro Station in Water-rich Soft Soil Area

XU Junchao

Abstract Through research on stress performance, calculation of structure overall seismic performance, key joint mechanical performance, and key waterproof technology of fabricated composite monolithic metro station overall and its components under different working conditions, a design scheme of fabricated composite monolithic metro station suitable for water-rich soft soil area is developed. The key technology and measures with feasibility specially targeting the focus and difficult issues are proposed. The scheme is applied in the South Gate Station of Wuxi-Jiangyin Intercity Rail Transport engineering, full process key technology from the fabrication scheme system design, prefabricated components design and industrial production, construction of intelligent management, equipment research and development application is formed, making advancement on shortening construction period, saving resources, improving production efficiency, promoting architecture industry upgrading.

Key words metro; underground station; fabricated composite monolithic; water-rich soft soil area; key techniques

First-author's address China Railway Siyuan Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

20世纪60年代,法国人首创了预制钢筋混凝土管片装配拱技术,该技术在地铁地下车站施工中得到了广泛应用。20世纪80年代,前苏联联邦国家在明挖法施工的地铁区间隧道、车站主体及附属通道等工程中应用了预制装配技术。20世纪90年代,俄罗斯采用装配式层间楼板单拱结构建成了彼得堡地铁的奥林匹克换乘车站。国内装配式结构发展目前尚处于起步阶段,长春地铁2号线袁家店站是我国首次采用装配式技术建造的地铁地下车站,济南轨道交通R1线演马站是基于临时支护与永久支护相结合建成的装配式车站^[1-2]。

近年来,建筑业亟需进行产业升级,以积极应对劳动力老龄化这一严峻问题。在国家层面,国务院及国家住房和城乡建设部密集发布了鼓励发展装配式建筑的政策、文件,希望尽快推广装配式建筑,并形成装配式建筑产业链。目前,地铁装配式地下车站在长春等地开始试点并取得了一定发展,但在南方富水地区带内支撑基坑的地铁地下车站尚无应用案例,其关键核心技术主要包括如何解决地下装配式结构的防水问题、多道内支撑体系下的结构施工问题及结构的整体受力性能等问题。本文针对富水地区、基坑设置内撑的施工条件,提出地铁新型的装配叠合整体式的地下车站结构体系,以期对地铁装配式地下车站的进一步推广与应用起到促进作用。

1 总体方案介绍

本文提出的富水软土地区地铁装配叠合整体

式地下车站的成套设计方案,是通过理论研究并结合数值模拟、试验研究得到的。该方案突破了各构件新型环扣式节点连接方案、单面预制外墙板叠合结构型式、地铁装配整体式地下车站抗震计算理论及计算方法、地铁装配整体式地下车站智能化虚拟建造等关键技术,最终在无锡至江阴城际轨道交通工程的南门站得以应用。

南门站采用的装配叠合整体式结构横断面如图1所示。通过优化建筑设计方案,为保证结构纵向柱间距达9 m,预制构件按照纵向3 m/块进行拆封,以方便运输,以及在内支撑纵向间距4.5 m时的吊装拼装。该站底板为现浇混凝土,中柱为钢管混凝土柱,外墙、顶板、中板及纵梁等均为预制叠合构件。车站底板与侧墙、中板与侧墙、侧墙与侧墙等均采用新型环扣连接节点予以连接。该工程中,板均采用先张法预应力构件,梁均采用型钢组合结构。通过预应力和型钢抵抗施工荷载,最后浇筑混凝土,形成整体框架结构形式,保证结构受力和结构防水满足性能要求。

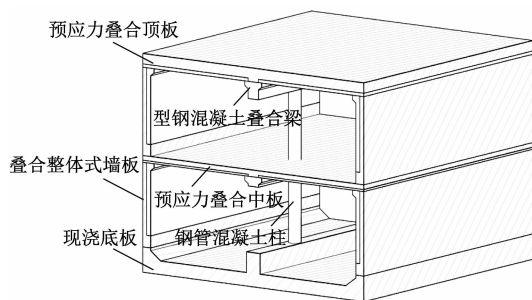


图1 地铁装配叠合整体式地下车站横断面示意图

Fig.1 Diagram of cross section of fabricated composite monolithic metro station

南门站的主要施工工序如下:

- 1) 施工车站围护结构。采用明挖顺作法,边开挖边支撑,开挖到基底后施作底板垫层及防水层。
- 2) 绑扎底板和底纵梁的钢筋,对底板、底纵梁现浇混凝土。完成负二层侧墙防水施工。吊装、拼装负二层的侧墙、柱、中纵梁等预制构件。
- 3) 浇筑负二层侧墙混凝土。安装中纵梁与柱的连接节点,吊装、拼装中板预制构件。
- 4) 浇筑中板叠合层混凝土。此时负二层已形成稳定的结构体系,待现浇混凝土强度达到设计要求后,拆除第二道钢支撑。
- 5) 铺设负一层侧墙防水层。吊装、拼装负一层的侧墙、柱、顶纵梁等预制构件。

6) 浇筑负一层侧墙混凝土,安装顶纵梁与柱的连接节点,架设顶板预制构件。浇筑顶板叠合层混凝土,待现浇混凝土强度达到设计要求后,拆除第一道混凝土支撑。随后实施管线回迁、顶板覆土回填和恢复路面交通。

2 地铁装配叠合整体式地下车站设计的关键技术

2.1 不同工况下车站整体及各构件的受力性能研究

1) 在生产、施工过程中动态调整各构件受力性能设计和计算。主要包括:顶板、中板预制构件断面设计和计算;侧墙预制构件断面设计和计算,顶纵梁、中纵梁预制构件断面设计和计算,运输、吊装方案设计和计算等。

2) 对正常工作状态下的结构及构件进行设计和计算。主要包括:整体结构受力性能计算,顶板、中板预应力叠合构件计算,顶纵梁、中纵梁型钢混凝土叠合构件计算方法,侧墙叠合构件计算等。

3) 试验研究。主要包括预应力叠合板、叠合梁、框架梁柱、中板开大洞及门式框架等构件在施工阶段与正常使用阶段的承载力研究。

2.2 结构整体抗震性能计算研究

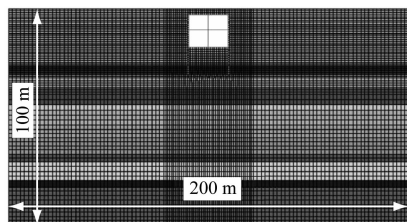
文献[3-4]已对地铁装配式地下车站侧墙底节点抗震性能做了研究。在此基础上,本文针对地铁装配叠合整体式地下车站进行全面分析研究。

图2为地铁装配叠合整体式地下车站的结构整体抗震性能计算的有限网格及其计算结果。该计算主要包括以下方面:

1) 结合地铁装配叠合整体式地下车站结构的计算实例,明确反应位移法的计算方法及其计算过程,完成地铁装配叠合整体式地下车站结构的抗震专项设计与计算,揭示地铁装配叠合整体式地下车站的抗震薄弱环节,验证设计方案的合理性,用以指导车站构件及节点的设计。

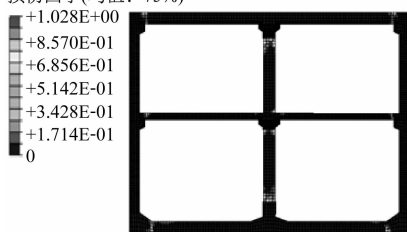
2) 对预制构件与现浇构件的连接、土体和混凝土的材料非线性、结构配筋和输入地震动特性等进行合理模型化,建立土层-装配式地下结构静动力耦合相互作用的整体有限元二维和三维精细分析模型,研究模型的计算方法。

3) 通过建立与地铁装配叠合整体式地下车站结构一致的非装配式地下车站结构有限元分析模型,对比分析装配式车站结构与对应非装配式车站



a) 有限元网格

损伤因子(均值: 75%)



b) 结构断面计算结果截图

图2 地铁装配叠合整体式地下车站的抗震性能计算

Fig. 2 Seismic performance calculation of fabricated composite monolithic metro station

结构在层间位移角、结构加速度、结构内力和地震损伤等参数的差异,揭示了装配式车站与对应非装配式车站结构抗震性能上的差异。

4) 考虑预制肋板与现浇板直接的连接方式,以及预制构件在纵向上环与环之间的连接,建立土层-装配式地下结构静动力耦合相互作用的三维有限元分析模型,并与二维分析模型的计算结果进行对比,以研究车站结构整体抗震性能。

5) 建立土层-装配式地下结构静动力耦合相互作用的三维有限元整体分析模型,分析不同强度地震作用、不同频谱特性地震作用、中板扶梯大开孔等工况对地铁装配叠合整体式地下车站结构整体抗震性能的影响。

6) 总结地铁装配叠合整体式地下车站结构的整体抗震性能研究结果,提出提高地铁装配整体式地下车站结构整体抗震性能的建议与措施。

2.3 关键节点的力学性能研究

图3为地铁装配叠合整体式地下车站结构关键节点的计算模型及现场试验图片。对关键节点的力学性能进行研究,其主要内容包括:

1) 关键节点设计方案。对 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范(2015年版)》、JGJ 1—2014《装配式混凝土结构技术规程》等已有的连接节点设计方案进行调研,确定侧墙底节点与侧墙顶节点的连接型式,确定顶层梁柱连接节点的型式并进行设计、计算,对本项目的节点设计方案与规范已有



a) 节点计算模型



b) 现场试验

图3 节点计算模型及现场试验

Fig. 3 Node calculation model and field test

的节点设计方案进行比较分析。

2) 关键节点力学性能试验。主要包括:低周反复加载作用下侧墙底、顶节点的抗震性能及承载力,侧墙底节点的位置对侧墙抗震性能与承载力的影响,侧墙顶节点内钢筋的锚固方式对侧墙抗震性能与承载力的影响,顶层纵梁柱连接节点的静力学性能等。

3) 关键节点力学性能数值模拟。节点核心区采用三维实体单元,对侧墙剩余部位采用 SHELL 单元。主要对三维实体单元与 SHELL 单元的连接方式进行研究。数值模拟侧墙顶、底节点、梁柱节点及所有相关构件的承载力,并与试验得到的骨架曲线进行对比分析,研究其破坏形态。

2.4 防水关键技术研究

针对地铁地下车站的特点,本文主要针对两个方面进行车站防水的研究:一是混凝土结构自防水,包括预制构件和现浇混凝土抗裂防渗技术;二是装配整体式车站防水方案研究,研究内容包括装配式车站外包防水、细部构造等。

2.4.1 预制构件和现浇混凝土抗裂防渗技术

预制构件和现浇混凝土抗裂防渗技术主要研究各个构件开裂的原因及其应对措施。由配比试验研究可知:混凝土底板开裂的原因主要为凝结前的塑性收缩、硬化温度收缩和自收缩等因素;侧墙开裂的原因主要为现浇混凝土的温度收缩和自收缩,因受先浇筑的底板、预制板约束,导致在混凝土早期收缩应力超过抗拉强度;顶板开裂的原因主要为凝结前的塑性沉降开裂及塑性收缩开裂,以及硬

化后混凝土自收缩、温降收缩、干燥收缩受下部预制构件约束。结合试验结论,为了控制混凝土因水化热引起的温度上升及收缩,提升强约束条件下的抗裂性,南门站在施工时,其底板、中板的混凝土均采用高性能混凝土,顶板采用低收缩、高抗裂混凝土。

2.4.2 装配式车站外包防水方案

1) 顶板防水方案。经过测试,C30P8 型号的抗渗混凝土在没有裂缝、接缝的情况下,在 100 m 水头压力下其最大渗透深度不会超过 1 cm。顶板的渗漏部位主要集中在混凝土收缩裂缝及施工缝处。缝隙处有微量的振动,并产生小幅的延伸、伸缩等变形,外包防水层不能适应其变形,因而从裂缝端头或边界渗漏至防水层局部脱开处。日本科学家小林清提出了“零延伸”的解决方案,即将一些粘结力特别强和自身强度非常好的环氧涂膜抹涂在裂缝上,裂缝变形时能够很容易观察到涂膜断裂,外部水没法窜流至局部脱粘层下,从而可以确保防水性能。综合上述因素后,南门站在施工时顶板采用了外包防水涂膜。

2) 侧墙防水方案。南门站的围护结构采用地下连续墙,车站衬侧墙与地下连续墙为复合结构,外包柔性防水层将地下连续墙和车站衬侧墙分隔开。预制墙板构件兼做永久模板,与现浇混凝土侧墙形成叠合结构。对于这样的复合结构,需要在地下连续墙上预先铺设具有反粘性能的防水层,与后面现浇的侧墙混凝土形成“皮肤式反粘”的外包防水结构。综合相关因素后,南门站在施工时,侧墙采用自粘防水卷材。

2.4.3 装配式车站细部构造防水方案

2.4.3.1 预制构件拼缝处防水方案

预制构件与外侧现浇混凝土形成装配叠合整体式结构,其结构形式等同“现浇”。侧墙环向拼缝处的防水方案如图 4~5 所示。

除了预制构件与现浇混凝土拼缝处需要进行防水处理外,预制构件之间形成的缝隙也需要实施防水处理。其防水措施主要有两个:一是通过采取预制构件之间预埋充气胶条措施,解决施工期间现浇混凝土浇筑引起的漏浆问题,同时在一定程度上防止使用期间出现的结构渗漏水问题;二是在预制结构拼缝之间增设嵌入式压缩密封条,以解决结构渗漏水的问题。

2.4.3.2 装配段施工缝防水方案

1) 水平施工缝(详见图 6)。对于车站墙体(设

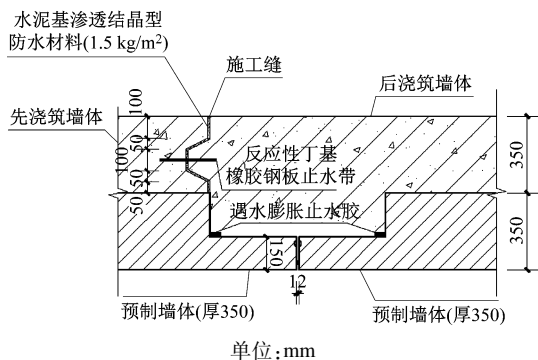


图 4 侧墙环向拼缝处的防水构造

Fig. 4 Waterproof construction of circumferential joint of side wall

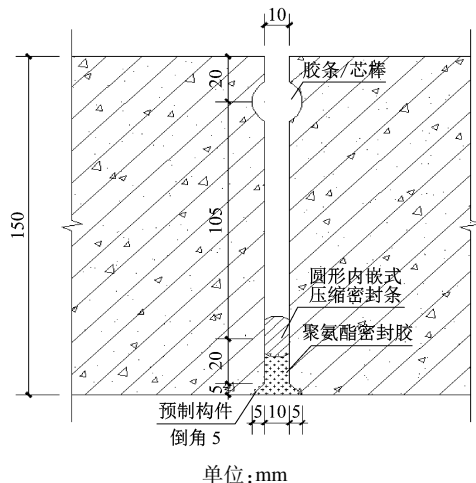


图 5 侧墙环向拼缝处的防水大样

Fig. 5 Side wall circumferential joint waterproof sample

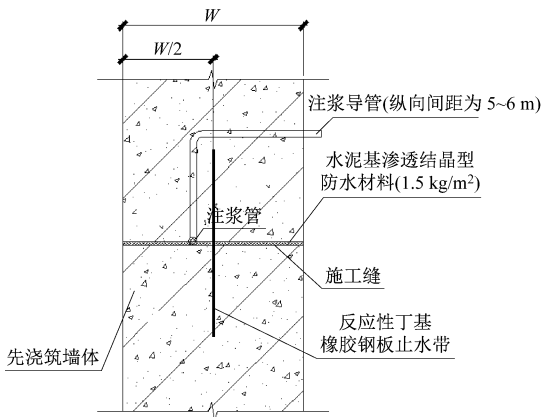


图 6 水平施工缝节点大样

Fig. 6 Detail drawing of horizontal construction joints

厚度为 W) 与底板、中板连接的“湿节点”,采用环箍的施工方法;现浇墙体无法预埋橡胶钢板止水带,可采用遇水膨胀止水条、单组分聚氨酯遇水膨胀止水胶等遇水膨胀材料,并可根据实际情况单道、复合或者多道使用。

2) 环向施工缝。如图7所示,在车站2个墙体钢筋笼之间采用后插钢筋笼的施工工艺;现浇混凝土墙体无法预埋橡胶钢板止水带,可采用丙烯酸树脂遇水膨胀止水条+单组分聚氨酯遇水膨胀密封胶。

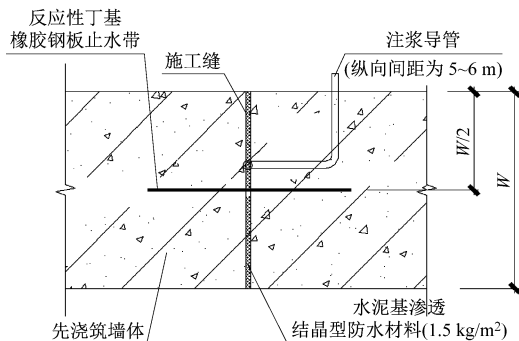


图7 环向施工缝节点大样

Fig. 7 Detail drawing of circumferential construction joint

3 结语

与当前国内外同类研究、同类技术相比,本文在地铁明挖装配整体式地下车站设计的多个方面的关键技术均有所创新:

1) 提出了一种适用于富含水地层带内支撑的明挖法施工装配叠合整体式地下车站的设计方案,有效解决了地铁装配式地下车站推广使用受限的问题。

2) 提出了采用单面预制外墙板的叠合结构型式,实现地铁地下车站预制装配及整体现浇的良好结合,提升了地铁地下车站装配叠合整体式建造技术。

3) 创造性地提出了地铁装配叠合整体式地下车站各构件新型环扣式节点的连接方案,解决了各预制构件之间有效连接问题。

4) 开展了地铁装配叠合整体式地下车站“半预制+半现浇叠合”结构的抗震计算理论及计算方法研究,填补了国内外在该方面的技术空白。

5) 提出了地铁装配叠合整体式地下车站整体及各构件在不同工况下受力性能研究计算的理论

及具体计算方法,填补了国内外在该方面理论研究及设计计算的空白。

地铁装配叠合整体式地下车站设计方案在南门站的应用,形成了从装配方案体系设计、预制构件设计及产业化生产、施工智能化管理、设备研发应用的全套技术方案。该方案可在南方广大富水区域的地铁地下车站设计及施工中推广使用,以减少对城市环境的污染。此外,该方案可缩短工期,减少施工对城市交通的不利影响,有效提高施工的机械化与自动化程度,降低人力成本,还有利于节约资源能源、提升劳动生产效率、促进建筑业与信息化工业的深度融合,促进建筑产业的转型升级。

参考文献

- [1] 杨秀仁,黄美群,林放. 地铁地下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(2):33.
YANG Xiuren, HUANG Meiqun, LIN Fang. Research on bending resistance characteristics of grouted mortise-tenon joints for prefabricated metro station structures[J]. Journal of Civil Engineering, 2020(2):33.
- [2] 王德超,王国富,乔南,等. 预制装配式结构在地下工程中的应用及前景分析[J]. 中国科技论文, 2018(1):115.
WANG Dechao, WANG Guofu, QIAO Nan, et al. The application and prospect analysis of prefabricated construction in underground engineering[J]. China Science Paper, 2018(1):115.
- [3] 杜修力,刘洪涛,路德春,等. 装配整体式地铁地下车站侧墙底节点抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2017(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(4):38.
- [4] 杜修力,刘洪涛,许成顺,等. 不同轴压比作用下装配整体式地铁地下车站拼装柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018(11):11.
DU Xiuli, LIU Hongtao, XU Chenshun, et al. Experimental study on seismic performance of precast column in assembled monolithic subway station under different axial compression ratio[J]. Journal of Building Structure, 2018(11):11.

(收稿日期:2021-07-13)

(上接第114页)

- [4] 樊磊. 基于LTE技术的高铁无线通信覆盖分析[J]. 信息通信, 2014(3):177.
FAN Lei. High-speed railway wireless communication coverage analysis based on LTE technology[J]. Information & Communications, 2014(3):177.
- [5] 代光发,陈少平. 时变瑞利信道中存在频偏的OFDM系统性能分析[J]. 中南民族大学学报, 2008(2):63.
DAI Guangfa, CHEN Shaoping. Performance evaluation of OFDM

systems with residual carrier frequency offset over time-varying rayleigh channels[J]. Journal of South-Central Minzu University (Natural Science Edition), 2008(2):63.

- [6] 汪丁鼎,景建新,肖清华. LTE FDD/EPC网络规划设计与优化[M]. 北京:人民邮电出版社, 2020:58.
WANG Dingding, JING Jianxin, XIAO Qinghua. LTE FDD/EPC network planning, design and optimization[M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2020:58.

(收稿日期:2022-01-13)