

装配式车站结构建造技术研究

陈慧¹, 徐颖钧², 刘建友¹, 庄亮东³

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京市 100055; 2. 苏州恒泰站城一体城市发展有限公司, 江苏 苏州 215028;

3. 清华大学 土木工程系, 北京市 100084)

摘要: 城市交通的快速发展带来了大量的高架车站建设需求, 但传统的设计施工方法面临劳动力价格上升与双碳减排战略的双重挑战。为此, 有必要针对装配式高架车站技术的优化展开研究。首先, 提出了一种适用于高架车站的装配式结构形式, 确定关键主体构件的结构形式与节点的连接形式; 其次, 参考实际工程中的结构布置与荷载开展整体模型分析, 验证结构构件与节点连接形式的可行性, 开展针对节点区域的精细化有限元模拟, 通过敏感性分析探讨局部节点对整体指标的影响; 最后, 提出了一套适用于装配式高架车站结构的施工方法。研究表明: 结构关键节点构造经模型计算均能够满足设计要求, 提出的装配式高架车站能够推动装配式建筑技术在轨道交通高架车站领域的发展应用。

关键词: 交通枢纽; 高架车站; 钢-混凝土组合结构; 数值模拟; 装配式结构

中图分类号: U233

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0302-06

Research on Techniques for Construction of Fabricated Station Structures

CHEN Hui¹, XU Yingjun², LIU Jianyou¹, ZHUANG Liangdong³

(1. China Railway Engineering Design Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China; 2. Suzhou Hengtai Station Town Integrated Urban Development Co., Ltd., Suzhou 215028, China; 3. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The rapid development of urban transportation has brought about a significant demand for the construction of elevated stations. However, the traditional design and construction methods are facing a dual challenge of rising labor costs and the dual-carbon emission reduction strategy. Therefore, it is necessary to study the techniques of fabricated elevated station. Firstly, a fabricated structural form suitable for elevated stations is proposed, and the structural forms of key components and the connection forms of the nodes are determined. Secondly, an overall model analysis is conducted by referring the structural layout and load of actual project to validate the feasibility of the structural components and node connections. The refined finite element simulation of the node area is carried out, and the impact of local nodes on the overall performance is discussed through the sensitivity analysis. Finally, a set of construction methods suitable for the structure of fabricated elevated station is proposed. The research results show that the key node construction of structures can meet the design requirements through the model calculation, and the proposed fabricated elevated station can promote the application and development of fabricated construction technology in the field of rail transit elevated stations.

Keywords: transport hub; elevated station; steel-concrete composite structure; numerical simulation; fabricated structure

0 引言

随着国家社会经济的高质量发展, 中国的城市轨道交通行业迎来了新的机遇。据统计, 2011年以

来中国轨道交通的运营里程和客运量逐年增长, 截至2023年日均客运量已突破8 000万人次^[1], 带来了大量城市高架车站的建设需求。

但是高架车站建设也面临劳动力价格与双碳减排要求的双重挑战。近些年, 国务院明确指出要“严格管控高能耗公共建筑建设、实施工程建设全过程绿色建造”^[2]。装配式建筑以其快速施工、节能环保的优势, 成为了应对这些挑战的关键技术。与传统的高架车站结构相比, 装配式高架车站结构主要有现场工期短、构件质量高、环境污染小、工程成本低

收稿日期: 2025-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(20211310035)

作者简介: 陈慧(1984—), 女, 硕士, 正高级工程师, 从事综合枢纽及城市轨道交通结构设计工作。

通信作者: 庄亮东(1994—), 男, 博士, 助理教授, 从事结构工程方向研究工作。电子邮箱: zhuangld12@126.com

等多方面的优势,能够满足新时代高架车站建设场景的客观需求。

事实上,装配式技术已经在轨道交通工程的很多方面得到了应用,如装配式地下结构及具备一定装配式理念的高架车站等。

地下隧道方面,苏联曾于上世纪使用过底板现浇结构预制的明挖法施工方式^[3],日本仙台地下铁道工程^[4]也使用了类似的预制双跨箱型结构形式并实现顶底板、中柱与侧壁的预制装配;泰晤士河河底隧道、深圳地铁华岗区间工程等盾构式隧道中也使用了装配式的地下衬砌^[5]。

地下车站方面,俄罗斯圣彼得堡体育馆站、法国奥贝尔车站、日本JR京叶线京桥站等也属于装配式地下车站^[6]。装配式地下车站已在我国多个城市投入使用,如在济南地铁R1R2线、上海地铁15号线、哈尔滨地铁3号线、无锡地铁5号线中都使用了叠合装配式的施工方法;而长春地铁线、青岛地铁6号线、深圳地铁部分线路则使用的是全预制装配形式,带来了较高的经济与社会效益^[6-7]。

相比之下,装配式的高架车站结构并没有得到广泛应用,只在部分工程案例中存在预制装配式技术的思路与雏形,如上海轨道交通17号线高架车站就是应用装配构件进行围护墙体施工的典型案例^[8]。也有文章对装配式混凝土高架车站主体结构的构件拆分与计算进行了探讨^[9]。

综上所述,当前国内外学者就装配式隧道桥梁进行了大量研究,但是有关在高架车站结构中应用全装配结构的研究工作还较少。本文拟基于前人研究成果,以芜湖单轨车站为例,提出一套完整的高架车站构件与节点形式,分析其性能表现,并进一步探讨关键节点对总体指标的影响,最终总结出一套可行的装配式施工方法。通过这些研究,旨在推动装配式建筑技术在轨道交通高架车站领域的广泛应用,同时为行业提供科学的技术支持和决策依据。

1 新型装配高架车站方案

1.1 工程背景

本研究依托芜湖市某单轨车站,提出并实施了一种新型组合结构装配式高架车站技术方案。整体结构形式为干字独柱型,处于抗震设防烈度六度区。装配式车站剖面形式如图1所示。

该新型高架车站结构形式简单,传力明确,适用

于装配式修建技术。但该结构为保证地面净空采用了独柱的结构形式,因此也对墩柱、盖梁的承载能力以及构件之间节点连接的可靠度提出了要求,需要进行系统性的分析判断。

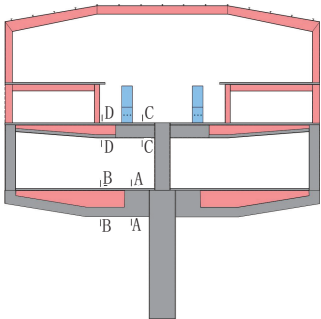


图1 车站剖面形式

1.2 主体构件选型

钢-混凝土组合结构因其独特的受力优势和适应性而广泛应用于各类型结构。组合结构的模块化特性使其非常适合装配式建筑,能够实现现场快速安装,缩短施工周期,减少工程成本。在高架车站的建设中,使用钢-混凝土组合结构可以充分发挥这些优势特点。因此拟采用组合结构作为新型高架车站整体结构形式。

高架车站的主要装配构件有:底部墩柱、盖梁、站厅层与站台层柱、一般梁(包括纵梁与横向次梁等)、楼板。

1.2.1 柱梁构件

高架车站结构墩柱需要承受较大的轴向压力与地震作用下的弯矩,处于双轴压弯的工作状态。常见的组合结构墩柱有圆钢管混凝土柱、方钢管混凝土柱、型钢混凝土柱等类型,如图2所示。型钢混凝土施工过程中需要支模浇筑,不适合应用于装配式结构施工;方钢管混凝土虽然约束作用相对较弱^[10],但成型条件好,质量易于控制,施工难度与施工成本都低于圆钢管混凝土柱^[11],建议选用。

站厅层采用组合梁,该构件属于悬臂式,同时也是主要的竖向荷载转换构件,将结构的竖向荷载传递到底层独柱之上,需要有较强的承载力与刚度。因此,选择在梁的下侧部分灌注一层混凝土,在提供承载能力的同时避免下翼缘钢板局部屈曲。此外,为加强节点处的抗剪承载力,可在梁端灌满混凝土。钢梁截面可以选用箱形或者槽形,考虑到开口截面抗扭刚度较差,且部分梁内需要满灌混凝土,因此选用箱形钢梁截面(见图2),站台层梁也采用类似截面形式。

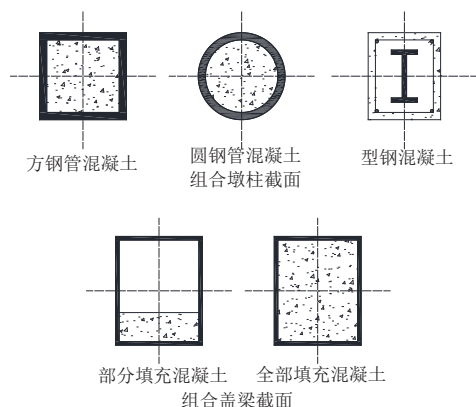


图2 高架车站梁柱构件选型

1.2.2 楼面结构

楼板与梁柱等构件相比,虽然并不承担较大的荷载作用,但占据整体结构的较大体积与材料用量,是提高车站装配率的重要部分。使用预制楼板直接拼接而成的装配式板虽然装配率高、施工周期短,但也存在整体性不佳,影响结构舒适度的问题。装配整体式叠合楼板结合了装配式楼板预制构件、现场拼装与现浇式楼板整体性好的优点。因此本方案拟选用叠合楼板作为站厅层与站台层的楼板构件。

叠合板一般由一层预制板和一层后浇板构成,常用的叠合板形式有压型钢板组合板、钢筋桁架楼承板、桁架钢筋叠合楼板、叠合板组合梁。

压型钢板组合板形式使用压型钢板作为上层混凝土楼板的衬板,并且使用抗剪连接件保证钢板与现浇混凝土板的组合作用。但是这种楼板形式普遍存在栓钉焊接难度大、需要额外进行吊顶处理、工程造价高、防火性能差等问题。压型钢板组合板中的大量混凝土楼板为现浇施工,也不符合装配式建筑预制率高,施工速度快的技术要求。

钢筋桁架楼承板是在镀锌钢板底板上通过焊接或其他形式连接钢筋桁架形成的楼承板,板上可以直接浇筑混凝土。该组合形式较好地解决了压型钢板组合板中底面不平整、双向受力刚度不同的问题^[12],但同样具有需要耗费大量钢材,焊接作业量大的问题。

桁架钢筋叠合楼板指于下层预制叠合板中提前布置好桁架钢筋,其主要作用在于增强预制板的刚度并且方便施工吊装,钢筋用量较高。但实验研究表明桁架钢筋由于存在对混凝土受压截面的削弱作用,会降低施工阶段预制板的承载能力,且钢筋桁架对于预制板的刚度、开裂荷载等其他指标的提升也比较有限,提高板厚的同时取消桁架钢筋在应用中

更具优势^[13]。

叠合板组合梁形式是一种通过剪力连接件将钢梁与楼板相连,并且能够较好地发挥钢-混凝土组合作用的楼板形式。在施工过程中,底层板可以先行预制,并且与钢梁结合作为上层浇筑混凝土的模板,同时承担施工阶段荷载。该楼板形式与压型钢板组合梁、桁架钢筋叠合楼板等形式相比用钢量小、造价更低,且降低了焊接栓钉的难度^[14],能够与抗拔不抗剪连接件等其他技术相结合,进一步提高结构性能^[15]。

综合比较上述方案,楼板选型拟选择叠合板组合梁形式的叠合楼板。

1.3 节点连接方式

采用装配式建造技术,主要目的是为了提高施工效率、减少现场的安装时间、减少临时支撑和模板等施工措施。为了实现以上目的,拟对主体结构中关键节点采用装配式连接形式,即墩柱基础节点与墩柱盖梁节点。

1.3.1 墩柱基础节点选型

钢管混凝土柱与基础之间的常用连接有埋入式、端承式、外包式三种。

埋入式柱脚是指将钢管混凝土柱埋入基础当中。在使用装配式技术时,应当使用埋入式的施工方法。埋入式柱脚节点的主要做法是安装钢管混凝土柱时将钢管插入到基础预留的杯口中,并在外侧浇灌一定厚度的细石混凝土填实。该节点形式通过钢管与栓钉将柱轴力传递到基础上,利用底板与其周围混凝土抵抗弯矩作用,形成可靠的刚性节点,其承载能力与钢管埋置深度有关。

端承式柱脚又称外露式柱脚,将钢管与底板通过焊接方式连接,底板与基础使用预埋件锚栓固定。该节点形式中,轴力由底板传递给混凝土基础,弯矩产生的拉力由锚栓承担,而柱底剪力由底板和混凝土间的摩擦承担。端承式柱脚类型虽然施工速度快,但是抗震性能不佳,构造措施的用钢量大。

外包式柱脚在端承式柱脚节点的基础上,又在钢管外包覆了一层具有一定高度的钢筋混凝土。该节点形式能够通过外包段箍筋强化柱脚承担弯矩和剪力的能力。实验研究表明:外包式柱脚节点的延性和抗震性能有较好的改善,但是受力机理复杂,且外包混凝土的施工做法并不适用于装配式结构工程^[16]。

综合比较上述三种柱脚节点,本方案拟选用插

入式柱脚节点。目前关于桥梁墩柱的插入式节点已有部分研究,但是主要结构形式均为混凝土墩柱,该节点形式也在郑济高铁、嘉闵高架、北京积水潭桥等相关项目中得到应用。

1.3.2 墩柱盖梁节点选型

墩柱与盖梁连接属于方钢管混凝土与钢梁之间的连接节点问题,常用形式主要有内隔板式、外隔板式、隔板贯通式端板式等。随着组合结构技术的发展,套筒式、悬臂式等越来越多的梁柱节点连接方式也不断被提出。

本方案拟采用的节点连接方式结合了以上节点形式的优点而又与传统的连接方式不同。在传统的连接方式中,节点最终破坏形式以钢梁受拉侧翼缘与钢管柱壁焊接处撕裂破坏为主^[17]。为避免这种破坏形式导致的节点延性差、耗能能力不强的问题,本方案拟放弃“柱连通,梁打断”的做法,采用“柱打断,梁上翼缘拉通”的节点构造形式,并设置加劲肋作为安全储备,如图3所示。

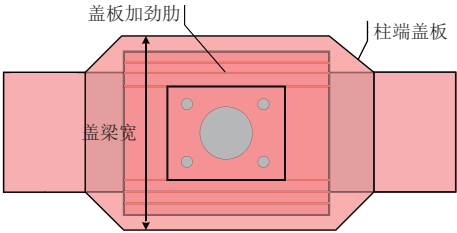


图3 墩柱盖梁节点示意

施工时,应先将下侧墩柱插入节点处计划满灌混凝土的盖梁部分并与之焊接,再将计划部分填充混凝土的盖梁主体部分与节点使用高强螺栓与焊接进行连接,最后插入上层结构柱。

2 结构分析结果

2.1 多尺度计算模型

本节拟建立多尺度有限元计算分析模型,结合实际工程指标分析高架车站的整体指标与节点局部承载能力,验证结构构件与节点连接方式的合理性,为装配式高架车站修建技术提供支撑。

在整体车站结构的尺度上,建立 MIDAS Gen 梁单元计算分析模型,计算车站各部分构件承载能力以及正常使用阶段变形指标,同时输出整体计算过程中的节点区域内力结果用于开展局部精细计算;在关键节点尺度上,建立 ANSYS 实体单元计算分析模型,计算车站两处关键节点位置的承载能力与塑性发展情况。

高架车站结构整体的计算模型如图4所示。构件尺寸参考实际工程结构,钢管混凝土墩柱尺寸为 2 000 mm×1 600 mm,矩形钢管的管壁厚度为 40 mm;底部承台外尺寸为 6 400 mm×4 000 mm,上部伸出 3 000 mm 可用于进行节点的局部增强包覆;钢管混凝土盖梁根部尺寸高 2 000 mm,宽 1 300 mm,盖梁钢管侧壁 30 mm,上下翼缘分别为 35 mm 和 20 mm。

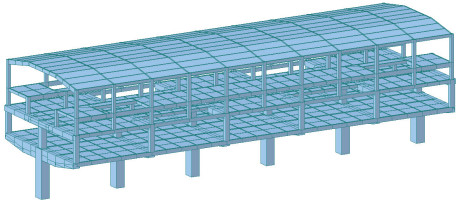


图4 高架车站整体计算模型

参照《地铁设计规范》(GB 50157—2013)^[18]、《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)^[19]等相关行业规范,结合工程实际情况,对结构进行包括恒荷载、活荷载、附加力、特殊荷载与其他荷载在内的荷载布置,并进行分析运算。结构主要构件均满足承载与正常使用要求。

在关键节点实体单元计算模型中,混凝土结构采用 SOLID 单元,钢管与隔板结构采用 SHELL 单元,考虑结构塑性发展,材性参数如表1、表2所列。

表1 钢材材料性质

弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)	塑性类型	强度设计 值/MPa
206	0.3	7 850	双折线模型	355

表2 混凝土材料性质

弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
38	0.167	2 360

关键节点实体模型的边界条件为底部固接。关键节点实体计算模型的荷载确定方法为:选取整体计算模型地震工况下的最不利荷载组合包络,得到墩柱底部的截面内力施加于墩柱基础节点模型,得到梁柱端部的内力值作为模型荷载施加在墩柱盖梁节点对应截面。

2.2 墩柱基础节点

节点区处于复杂应力状态,如图5所示,在地震最不利工况组合荷载作用下,节点模型钢结构部分所受米塞斯最大应力为 120 MPa,集中于钢管混凝土柱底部与墩座接触位置。钢管混凝土柱壁板应力主要处于 70 MPa 左右,节点区没有出现塑性开展;混凝土部分最大应力达到 38 MPa,该应力主要受应力集中的影响。节点域没有进入塑性阶段。

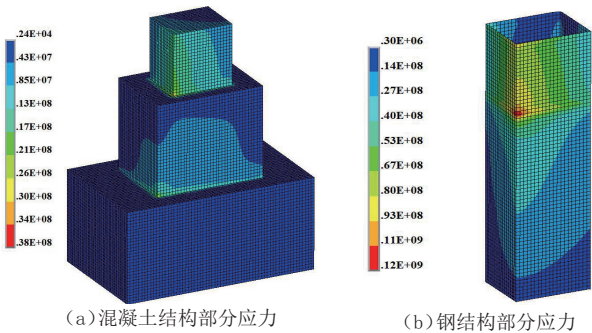


图5 墩柱基础节点应力发展

2.3 墩柱盖梁节点

在地震最不利工况组合的荷载作用下,墩柱盖梁节点模型钢结构部分所受米塞斯最大应力为196 MPa,集中于组合梁负弯矩区的下翼缘。组合梁腹板 Mises 应力主要处于120 MPa左右,节点区没有出现塑性开展。混凝土部分最大应力达到48 MPa,该应力主要受部分填充混凝土压应力集中的影响;混凝土整体应力在10 MPa左右。节点域在大部分情况下为弹性工作状态,没有进入塑性阶段,如图6所示。

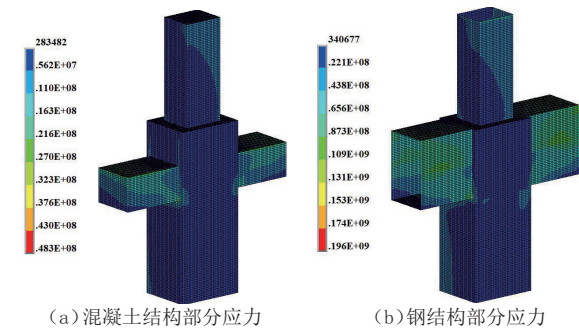


图6 墩柱盖梁节点应力发展

3 节点刚度讨论

由于装配式节点会存在接缝、结合面等较为薄弱的部位,在节点刚度上会有所折减,为探讨装配式节点半刚性性质对结构的影响,将模型中节点部位的截面进行缩进,模拟该区域刚度的降低,并对缩进比例参数进行敏感性分析。

将墩柱底部柱脚节点30 cm区域内的截面分别按照80%、60%、40%、20%的比例进行缩进,将对应缩进比例定义为节点折减率,得到对应的位移计算结果如图7所示。

同样将墩柱-盖梁节点30 cm区域内的截面分别按照0.8、0.6、0.4、0.2的尺寸比例进行缩进,得到对应的位移计算结果如图8所示。

由此可见,如果节点处的半刚性性质较为显著,会导致位移变形增大,影响装配式车站结构的正常

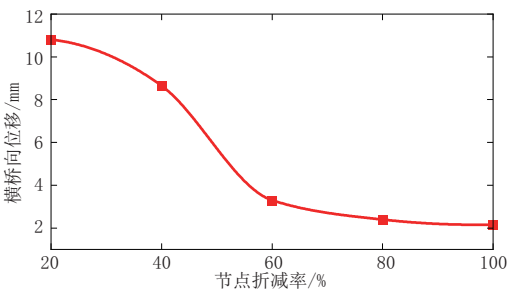


图7 墩柱基础节点半刚性敏感性分析

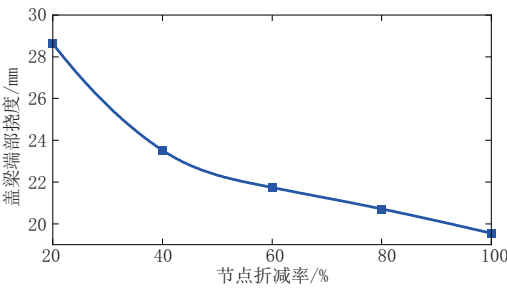


图8 墩柱盖梁节点半刚性敏感性分析

使用。因此,在进行节点施工的过程中,应当保证定位准确,粘结牢固,混凝土振捣密实,避免装配式节点整体性不足影响结构正常性能。

4 装配式施工方法

按照以上构件与连接设计方案,可采用多阶段高架车站装配式施工方法,如图9所示。

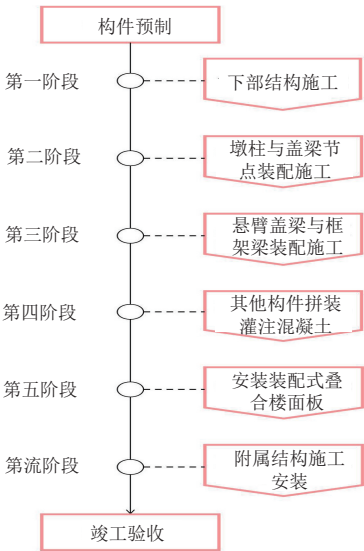


图9 高架车站装配式施工方法

其具体流程如下。

(1)下部结构施工:首先需要根据当地具体工程地质情况选取桩基形式并进行桩基与混凝土承台的浇筑施工,施工时需要注意预留钢管柱插入式节点杯口;然后,吊装方钢管,将其插入承台杯口中,并进行混凝土浇筑。

(2)墩柱与盖梁节点装配施工:为保证连接节点

处的施工质量,该部分的牛腿连接节点与工程进行预制,完成后运输至施工现场,与主体结构采用高强螺栓进行装配式拼接固定。

(3)悬臂盖梁与框架梁的装配式施工:其中悬臂盖梁与主体采用高强螺栓拼接的形式,同时悬臂盖梁与其他梁柱构件连接的节点位置均在工厂预留了牛腿,以便于现场构件的拼接。

(4)拼装其他装配式梁柱构件,在构件内部灌注混凝土:在该阶段,框架柱和框架梁均已经完成拼接,现场采用高强螺栓连接次要的梁柱构件,此时统一浇筑钢管混凝土柱与盖梁内部混凝土。

(5)安装装配式混凝土叠合楼面板:为了保证施工速度的同时减少支撑数量与施工影响,首先在纵向钢梁之间铺设一层预制混凝土楼板,然后在板顶现浇混凝土,使整个楼板形成整体。

(6)其他附属结构与辅助结构的施工安装:具体包括雨棚、外围护结构、内部水暖机电的安装等,各施工阶段的实际效果如图10所示。



图10 施工阶段效果示意

5 结 语

本文研究装配式高架车站修建技术,开展组合结构车站构件与节点综合形式比选,得出以下主要结论。

(1)在结构型式方面,钢-混凝土组合结构具有良好的刚度和承载能力,适用于高架车站的装配式施工;方钢管混凝土柱与部分填充混凝土盖梁是装

配式高架车站的关键构件,叠合板组合梁是适用于装配式高架车站的楼板形式。

(2)在关键节点方面,提出适用于装配式干字形车站的节点连接方案,开展对多尺度模型的分析,进行针对节点局部承载能力的验算;同时,针对装配式节点的半刚性性质进行敏感性分析,说明节点关键位置的整体影响。

(3)在装配式施工方面,提出该类型车站结构的一般施工流程,明确该施工流程的可行性与参考效果,形成完整的施工方法。

本文结合芜湖干字形车站结构系统分析了该类型车站的构件与节点连接,最终总结出一套合理的装配式高架车站建造方法。

未来,有关本课题的深入研究,建议从两个方面展开:一是优化装配式节点构造,开展足尺模型试验验证;二是开展车站结构运营阶段长期监测,探究装配式高架车站的应用效果。

参考文献:

- [1] 侯秀芳,冯晨,燕汉民,等.2023年中国内地城市轨道交通运营线路概况[J].都市轨道交通,2024,37(1):10-16.
- [2] 国务院.中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL].(2021-09-22)[2025-01-27].https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635518.htm.
- [3] 刘惠敏.地下铁道明挖区间装配式衬砌力学特性研究[D].成都:西南交通大学,2004.
- [4] 姚怡文,蒋理华,范益群.地下空间结构预制拼装技术综述[J].城市道桥与防洪,2012(9):286-292;344.
- [5] 黄昌富.盾构隧道通用装配式管片衬砌结构计算分析[J].岩土工程学报,2003(3):322-325.
- [6] 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.
- [7] Yang X, Shi Z, Lin F. Influence of Geometrical Parameters on Performance of Grouted Mortise and Tenon Joints for Application in Prefabricated Underground Structures[J]. Advances in Civil Engineering, 2019: 3747982.1-3747982.14.
- [8] 黄圣翔.城市轨道交通高架车站外围护体系装配式设计策略研究[D].重庆:重庆大学,2022.
- [9] 黄长木.建桥结合装配式高架车站关键技术研究[J].城市道桥与防洪,2018(10):82-86;13.
- [10] 韩林海.钢管混凝土结构的特点及发展[J].工业建筑,1998(10):1-5;29.
- [11] 李小伟,赵均海,朱铁栋,等.方钢管混凝土轴压短柱的力学性能[J].中国公路学报,2006(4):77-81.
- [12] 司纪伟,张东健,刘金鑫,等.钢结构住宅中常用楼板体系及优缺点分析[J].建筑技术,2018,49(增刊1):249-252.
- [13] 聂建国,姜越鑫,聂鑫,等.叠合板中桁架钢筋对预制板受力性能的影响[J].建筑结构学报,2021,42(1):151-158.

(下转第314页)