

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.068



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于数字孪生的装配式钢节点混凝土框架结构 建造技术

张健新^{a,b}, 翟越洋^a, 赵茜娅^a

(河北工业大学 a. 土木与交通学院; b. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘要:与传统现浇框架结构相比,装配式钢节点混凝土框架结构建造速度更快,但框架钢连接节点处存在应力突变,因此,有必要采用基于数字孪生的手段监测该实际工程结构的施工过程,以获得钢节点对结构性能的影响。基于BIM、有限元和传感器等技术搭建了基于数字孪生的新型装配式钢节点混凝土框架结构的智能建造框架,从物理数据收集、虚拟模型建立、模型信息交互3个方面提出基于数字孪生的建筑结构智能建造实现方法。在新型装配式钢节点混凝土框架实际工程建造阶段,采用传感器技术实现工程中关键点数据的实时监测,并将其与BIM和有限元数据进行比较,进一步调整与修正物理模型中的框架结构受力情况,最终实现装配式钢节点混凝土框架数字孪生模型的建立和应用。研究表明,该数字孪生模型能有效对新型装配式钢节点混凝土框架结构进行实时监测,实现基于传感器网络和时空参数分析的危险点预测,有效减少资源消耗,为该结构的应用提供有效数据信息。

关键词:装配式混凝土框架;钢节点;数字孪生;虚拟传感器;智能建造

中图分类号: TU741.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)01-0130-09

Construction technology of prefabricated concrete frame with steel connector based on digital twin

ZHANG Jianxin^{a,b}, ZHAI Yueyang^a, ZHAO Xiya^a

(a. School of Civil and Transportation Engineering; b. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: Compared with the traditional cast-in-place frame structure, the construction of the prefabricated steel joints concrete frame structure is faster, but there is a sudden change of stress at the joints of the new frame steel joints, so it is necessary to adopt the digital twin method to monitor the construction process of the actual engineering structure to obtain the influence of steel joints on the structural performance. Based on building information modeling (BIM), finite element, and sensor technologies, an intelligent building framework of the new type of prefabricated concrete frame structure with a steel connector based on digital twin was established in this study. An intelligent construction method based on digital twin was proposed in terms of physical data collection, virtual model establishment and model information interaction. In the engineering intelligent

收稿日期: 2021-12-31

基金项目: 河北省自然科学基金(E2021202012、E2020202134);天津市自然科学基金(20JCZDJC00370)

作者简介: 张健新(1986-),女,博士,主要从事结构抗震研究, E-mail: zhangjianxin505@126.com。

Received: 2021-12-31

Foundation items: Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2021202012, E2020202134); Natural Science Foundation of Tianjin (No. 20JCZDJC00370)

Author brief: ZHANG Jianxin (1986-), PhD, main research interest: structure seismic, E-mail: zhangjianxin505@126.com.

construction stage, real-time monitoring of data of the new prefabricated concrete frame with steel connector was realized via sensor technology, and sensor data was compared with BIM and finite element data. The frame structure stress in the physical model would be further adjusted and modified. Finally, the digital twin model of the prefabricated concrete frame with a steel connector was established and applied. The results show that the digital dual model can effectively monitor prefabricated concrete frame with steel connectors in real-time, predict the hazard position based on sensor network and spatiotemporal parameter analysis, reduce the resource consumption, and provide sufficient data information for subsequent applications.

Keywords: prefabricated concrete frame; steel connector; digital twins; virtual sensor; intelligent construction

随着建筑行业不断发展,中国出台了一系列政策鼓励传统建筑行业向绿色、智慧、信息化发展。装配式建筑由于其安装过程简单易行、现场工作量少、施工周期短、产生建筑垃圾少等优点,成为了建筑行业发展的关键环节。装配式建筑的发展是中国建筑行业发展的必经之路,符合新型工业化道路的发展方向,是中国大力支持的结构形式之一。在此背景下,学者们提出了新型装配式混凝土结构形式^[1-3],虽然认识到了钢连接装配式节点性能优越,并对其进行了大量的实验研究和理论分析,但研究成果的工程应用相对很少。同时,由于连接技术的改良,梁柱连接包括钢连接段、混凝土连接段、钢混连接段,造成该新型节点连接段刚度值不连续,会导致装配式混凝土框架结构破坏可能出现在钢连接段、混凝土连接段、钢混连接交界处,造成结构破坏位置的不确定性^[4-5]。因此,在该新型结构施工过程中,有必要采用信息技术手段对其进行监测,及时获取最新的信息,并确保信息的完整性和全面性^[6],为新型装配式混凝土建筑结构的应用提供指导。

在建筑结构中预埋传感器监测建筑健康状态,防止潜在的结构故障,是施工和维护阶段监测建筑的重要手段。Li等^[7]提出一种用于耙吸式挖泥船施工安全的数字双驱动虚拟传感器结构,基于物理传感器监测施工状态,克服了传感器对难以直接测量或成本高昂的检测目标的限制。同时,通过分析物理传感器和虚拟传感器之间的残差来诊断施工行为,能够准确地对故障情况进行预警。Linares等^[8]采用增强/虚拟现实的先进设备与传感器相结合,在物理现场捕捉图像或视频以进行结构的安全监测、风险预警和远程指导。上述研究虽然利用物理传感器和虚拟传感器相结合的方式监测工程状况,但该模式尚未在实际工程中应用。若对所有节点进行监测,则需要相当数量的传感器,同时监测数据的增加对程序、机器和人力的要求将进一步提高,进一步造成资源消耗。将传感器网络所得数据与虚拟模型相结合能够最大限度地进行建筑施工

过程全面监测,并减少资源消耗。

随着新一代信息技术和“工业4.0”的发展,数字孪生技术在航空航天和制造业得到了广泛应用^[9-10],并逐渐由复杂的飞行器领域向一般工业领域拓展,目前学者们已开始探索其在建筑领域中的应用^[11-13]。刘占省等^[14]提出了一种智能建造框架,证明了数字孪生模型可以实现轮辐式索桁架的智能张拉提升。在土木工程行业,数字孪生可以通过形式化的语言为装配式施工过程建立结构性强、施工过程信息涵盖全面的模型^[15]。数字孪生技术中每个物理部分都能找到相应的虚拟部分,同样,每个虚拟部分都能找到相应的物理部分,在项目中,环境、条件、需求、物理部件、虚拟部件、数据、连接和服务可以灵活地变化^[16]。因此,在新型装配式结构建造工业化进程中,数字孪生技术是一种对装配式建筑进行局部和整体分析的有效方法,与传统的定期检修相比,数字孪生技术能为结构的故障监测提供一种新的方法。上述成果证明了数字孪生技术的可行性,但该研究仅在模拟施工过程中进行试验。对于新型装配式钢节点混凝土框架结构而言,该技术对真实施工过程中时空参数的考虑不足,且缺乏基于实际工程的理论框架。

建筑信息模型(BIM)已被证明是一种智能和参数化的数字孪生建模方法,可支持建筑物全部活动,包括设施的设计、施工、运营和维护^[6],在建筑项目中有广泛的应用。已有研究表明,BIM的使用可以显著减少信息损失,提高日常管理效率。然而大多数现有建筑没有完整的BIM模型。近年来学者采用新的技术手段和方法能够更高效地建立现有建筑构件BIM模型,刘金典等^[17]采用BIM和激光扫描手段提出了装配式体系建造管理与质量控制方法,并基于工程案例验证了该方法的可行性与实用性。Boje等^[18]回顾了建筑信息模型(BIM)和数字孪生的发展,指出数字孪生比BIM需要更多的细节以监控和控制物理实体。利用BIM软件对新型装配式建筑进行孪生建模,虽然一定程度上可以减少人力的投入,但由于其包含条件有限,结果缺乏精度,

尤其是时空精度有待提高^[19]。事实上,在对装配式钢节点混凝土框架结构建造进行监测时,除需要考虑常规建筑包含的参数外,还应关注梁柱节点不同梁段的应力水平,以此来确保监测结果的可靠性。同时,现有数字孪生技术在建筑行业的应用缺乏大规模传感器网络数据采集系统和合适的理论框架^[20]。

学者们采用数字孪生技术研究了传统建造过程中的难点,推动了建造业向智能化的转变,但数字孪生技术在实际新型装配式工程建造中的应用尚有待进一步研究。利用传感器实时监测建造过程中的关键节点时,笔者搭建的技术框架引入了虚拟传感器和传感器网络,能对结构建造过程进行更加精确和全面的监测。同时,基于监测数据分析结构受力时,该框架将时空参数纳入分析范围,可以实现对危险节点的实时预警。笔者在新型装配式钢节点混凝土结构试验研究和理论分析的基础上^[21],在装配式钢节点混凝土框架结构的工程应用过程中,基于BIM、有限元和传感器等技术搭建了基于数字孪生的新型装配式钢节点混凝土框架结构的智能建造框架,以期为该框架的广泛应用提供有效数据信息,并为装配式建筑与智能建造融合发展提供参考。

1 基于数字孪生的建筑结构智能建造框架

数字孪生的建模框架分为物理模型、虚拟模型和模型交互的建立。物理模型是建立数字孪生的基础,它包括物理模型的搭建和数据的收集。数字孪生技术应用的准确性十分依赖于数据源,所以在数据收集阶段应该基于实际的物理系统来提取、描述和验证仿真需求。为了获得更准确的仿真需求,需要获得尽可能多的信息。几何信息通过CAD图纸和3D激光扫描的方法获得。物理传感器是监测施工状态的有效方法,对于非几何数据可以通过在构件预埋传感器的方式获得。

虚拟模型是与物理模型——对应的计算机模型,它是应用数字孪生的基础,包括物理模型中每一个构件,而虚拟模型中的每一个元模型都可以在物理模型中找到实体。BIM通常作为建筑数字孪生的数字模型,使用BIM工具创建的模型非常接近真实建筑物,它积累了施工中的规则、技术和方法,建立了一种操纵施工策略的技术。此外,它仍以数字方式组织施工组件并加以记录,以创建全面的时

间表。

研究的技术手段路线如图1所示。以基于CAD和3D扫描的BIM建模技术为辅助,对物理模型进行BIM建模。将BIM模型导入ABAQUS软件,建立有限元模型。ABAQUS模拟数据与传感器网络的实际数据共同构成传感器网络。通过对比同一节点处实际传感器数据与模拟数据,实现BIM模型、ABAQUS模型和传感器网络三者互相修正,从而对建筑结构进行监测和指导。

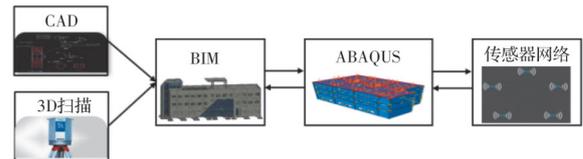


图1 研究技术手段路线图

Fig. 1 Diagram of research technical methods

孪生模型框架如图2所示,模型框架主要包括真实空间的物理模型、数字空间的虚拟模型以及两者之间的信息连接。模型框架建立的具体实施步骤如下:首先,利用项目CAD图纸的初始几何数据实现BIM建模,在此基础上建立有限元分析模型,得到初始虚拟模型;随物理模型同步建立虚拟模型后,利用3D激光扫描获得施工过程中实际建筑的关键几何数据,基于此对虚拟模型进行改进,通过对收集的数据实时更新,对虚拟模型反复修正,得到趋近于物理模型的虚拟模型;最后,在物理实体建造过程中,将物理传感器放置于建筑结构的关键点,以实时监测结构关键点的应变数据,进而对比分析实时监测数据与有限元计算得到的理论数据,从而实现危险点预警,及时对物理模型进行修正,最终完成孪生模型的搭建。该模型框架包含正向和反向两条信息连接方式,由物理实体到虚拟模型的映射建模过程为正向信息连接,由虚拟模型到物理实体的分析决策过程为反向信息连接。

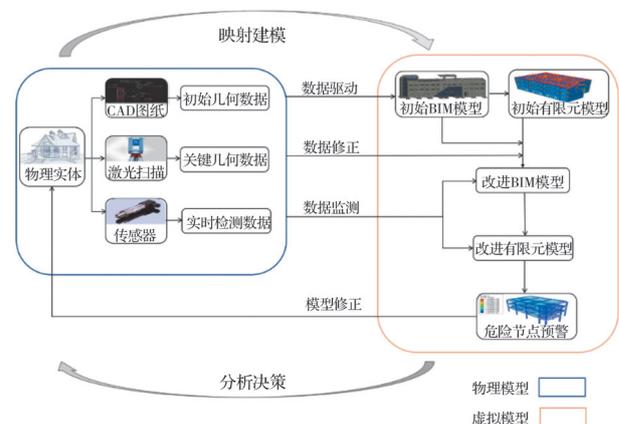


图2 孪生模型框架图

Fig. 2 Framework of the twin model

2 基于数字孪生的建筑结构智能建造实现方法

基于数字孪生的建筑结构智能建造框架搭建方法如图3所示。首先,对物理模型进行数据采集,并以不同格式进行保存,通过第一次采集的初始数据建立虚拟模型。在初始BIM模型和ABAQUS模型建立后,对比分析软件模型数据和采集物理数据,更新虚拟模型数据,建立完备的虚拟模型,然后分析反馈至物理模型并对其进行监测指导。

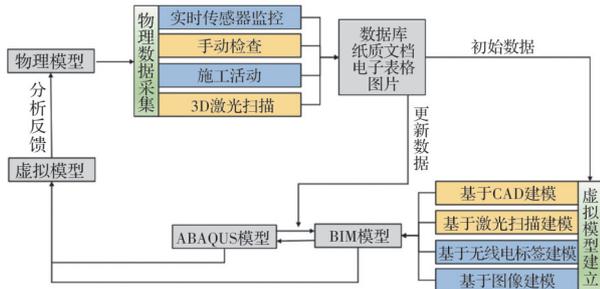


图3 基于数字孪生的建筑结构智能建造框架搭建方法

Fig. 3 Frame building method for intelligent construction of building structure based on digital twin

2.1 物理数据采集

物理数据来自物理实体,获取方式包括实时传感器监控、手动检查、施工活动和3D激光扫描等。不同的数据在整合前通过不同的方式存储,如利用数据库、纸质文档、电子表格和图片等,整合后将会统一存储在孪生模型中。存在于建筑工程中的物理数据包括人员、机器、原料、方法、环境等。随着项目施工进度不断推进,物理数据种类会不断增加,而在项目竣工后,种类达到最大值。

2.2 虚拟模型建立

虚拟模型用来模拟项目实体的属性、运行状态和演化规律,从而反映项目实体在真实环境中的状态。BIM作为一种参数化的建模方法,该模型包含项目实体的物理几何信息和属性逻辑信息,可以减少从物理模型到虚拟模型中的数据损失,对新型建筑的应用发挥指导作用。

常见BIM模型的建立方法包括基于图像建模、基于激光扫描建模、基于无线电标签建模、基于CAD建模等。基于图像建模是利用图像重叠生成密集场景来进一步生成点云模型或利用图像处理算法提取图片中的几何特征的方法来对物理模型进行还原,该建模方法可以有效构建物理模型的几何信息,但建筑的逻辑信息和拓扑信息无法被很好地表达。基于激光扫描建模是利用3D激光扫描技

术生成物理模型高精度点云的方法还原物理模型,该建模方法建立的虚拟模型精度很高,但容易缺少数据且费用昂贵。基于无线电标签建模是利用对建筑物构件安装标签来定义信息,再使用射频识别技术对构件进行识别操作,同步构建物理模型,该方法经济有效,且可以记录建模过程,但使用过程复杂,大大增加了高技术人才的工作量。基于CAD建模是利用CAD图纸上的几何信息和文本信息建立物理模型的独立构件信息,建立对应的虚拟构件模型,拼装成为完整建筑的虚拟模型,该方法操作简单,信息丰富,但建模精度不足的问题需要解决。此外,ABAQUS可以建立建筑结构的数值分析模拟,它包含着项目不可视的力学数据。

为保证更全面地收集物理模型参数以建立虚拟模型,保证两者实时同步,在物理模型中加入了收集内部参数的传感器,以获得其内部的应力和应变等实际不可视数据,并保证该数据可以实时更新,利用传感器采集到的数据对虚拟模型进行修正。

2.3 模型信息交互

模型信息交互本质上是以循环嵌套的方式实现对孪生模型的修正和对物理模型的监测预警。该循环包括虚拟模型内部小循环和虚拟模型与物理模型之间的大循环。在虚拟模型内部小循环中,初始虚拟模型通过不断地对物理模型数据进行分析对比,自循环改进,提升虚拟模型的精度。在虚拟模型与物理模型之间的大循环中,由物理模型为虚拟模型提供数据,对虚拟模型进行建立和修正。

对物理系统建立的孪生模型为从物理模型中收集到的数据提供了可视化的存储架构。同时还可以了解物理模型的实时状态、行为和组件关系。在建筑领域,经过验证的孪生模型提供了建筑构件数据、人员和施工方法的存储架构,使施工中的问题变得可追溯。得益于孪生模型的高度保真性,在虚拟模型中的结果可以代替物理实验,通过这种方法,可以借助虚拟运行的结果来对物理模型进行优化和预测。装配式建筑施工时,在对物理构件下一步搭建之前,可以先利用虚拟模型进行搭建,确定施工方案的可行性。在施工过程中,虚拟模型和物理模型所得的数据会被记录,构成实际传感器为主、虚拟传感器为辅的传感器数据网络,对比两者所获信息的差异以及其中一个数据在时间维度上的特殊变化,对物理模型的使用情况进行评估,为建造过程提供一种实时有效的监测方式。更进一步地说,物理系统和虚拟系统是同步的,数据是双

向的。利用这个特性,孪生模型可以与机器学习相结合,通过大量数据的学习使计算机可以代替人工决策,提升施工效率。通过多个项目中3D激光扫描、传感器和其他设备收集的数据及对应的项目状态对机器学习模型进行训练,找到输入输出间的非线性关系。这个机器学习模型可以在虚拟模型获得物理模型的实时数据后对其做出分析,识别问题来源,建议决策选项,并采取必要的修正措施。

3 装配式钢节点混凝土框架结构的数字孪生技术应用

装配式钢节点混凝土框架结构示范工程是某省的科研楼项目,该项目采用钢节点连接预制混凝土梁柱装配而成,工程的建造过程如图4所示。基于BIM、有限元和传感器等技术采集数据,建立该实际工程的数字孪生模型。



图4 装配式钢节点混凝土框架结构工程示范

Fig. 4 Engineering of prefabricated concrete frame structure with steel connectors

3.1 物理数据采集

结合已有研究^[22],采用应变计进行施工过程中的应力监测。物理模型搭建期间,在钢节点上安装传感器来收集相关数据。为保障所得数据的精确性和测量的长期性,选用灵敏度、监测范围、环境适用性和监测寿命更具有优势的电阻式应变计对应变进行数据采集。其中,在梁柱构件钢节点表面焊接YBM型工具式表面应变传感器,在梁柱构件钢筋笼上绑扎YNM型混凝土内埋式应变传感器。两种应变传感器可以收集结构内部不可视的应变数据,且其中均带有温度补偿装置,可通过桥路补偿法消除外界环境温度对监测数据的影响。传感器通过导线与数据采集系统连接,该工程使用的数据采集系统主要为WKD3813多功能静态应变计。因施工阶段时间跨度相对很短,不考虑实际结构的老化问题,虚拟模型能真实反映物理模型。

该装配式结构工程中选择建筑内相连的角柱、边柱、中柱的代表性关键点替代建筑整体来布置测

点,并选取框架结构中节点受力最大的一层梁柱连接节点作为代表测点,对建筑结构的整体和角柱、边柱、中柱节点区域在施工过程中的工作状态进行研究。传感器位置如图5所示,工程监测方案选取平面图中A、B、1、2四条轴线围成的部分,监测梁柱钢连接节点数量为3,均在框架结构一层,在图中以圆圈标识被监测节点的位置。

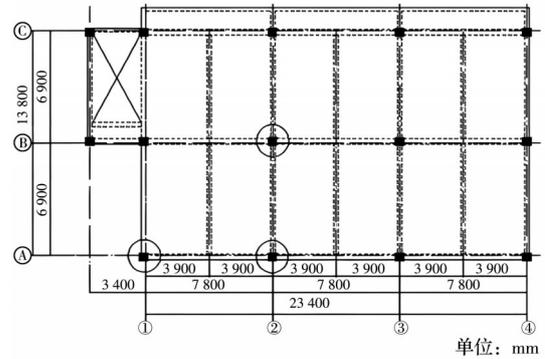


图5 传感器位置图

Fig. 5 Diagram of sensor position

以中柱的梁柱钢连接节点为例,节点中钢连接件关键测点传感器布置如图6和图7所示。为保证传感器收集数据的条理性和可靠性,以不同施工进度进行工况划分,见表1,在每个工况下都进行多次监测。



(a) YBM型应变传感器



(b) YNM型应变传感器

图6 传感器布置图

Fig. 6 Layout of strain sensor

3.2 虚拟模型搭建及数据计算

3.2.1 BIM模型建立

采用BIM软件,把BIM技术与装配式混凝土框架结构建筑相结合,以施工图纸参数为基础提出装

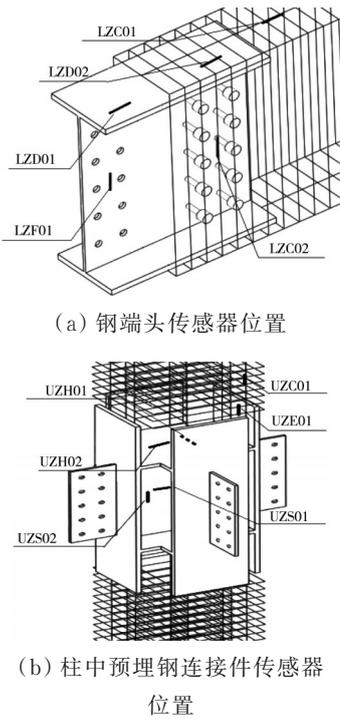


图 7 关键点传感器位置布置图

Fig. 7 Layout of sensor position in key points

表 1 施工工况划分表

Table 1 Construction working condition division table

施工工况编号	工况内容
工况 1	预制柱安装工作
工况 2	建筑第一层梁、板、墙施工安装
工况 3	建筑第二层梁、板、墙施工安装
工况 4	建筑第三层梁、板、墙施工安装
工况 5	建筑填充墙砌筑以及第二层瓷砖铺贴
工况 6	建筑顶层女儿墙、梁柱施工
工况 7	建筑第三层瓷砖铺贴及顶层填充墙砌筑
工况 8	建筑顶层保温面层施工

装配式混凝土预制构件参数化建模程序,将规范要求、设计流程及配筋构造以函数的形式嵌入程序节点中和程序逻辑中,以定位点为纽带,对组成预制构件的各个子图元进行了参数化关联。基于 BIM 的装配式混凝土结构参数化设计方法,将工程图纸包含的参数与 Dynamo 程序开发相结合,实现了基于参数数据驱动的装配式预制构件模型一键生成,使得在参数准确的前提下,可以高效地完成精细化建模及相应构件的工程量统计。

以带钢连接的预制柱建模为例,介绍 BIM 模型的建立方法。首先,在预制柱定位点数据中读取 X、Y、Z 轴坐标值,清除空集后以横向原则进行分组,以柱族名称为关键词进行分类,与输入点口相联结,产生 Dynamo 能够读取的点,生成定位点和定位

曲线,基于此建立预制柱的混凝土模型。然后,将钢连接参数化族导入 Revit 中,以柱横截面中心为原点建立三维坐标系,通过将常规模型拼接的方式对钢连接件进行建模,将定位点之间的几何约束关系转换为 Dynamo 代码块中的函数关系。最后,钢筋以纵筋中的角筋为例,将 4 个角筋的定位点分别与预制柱横截面 A、B、C、D 4 个角点相对应,将角点与角筋的定位点坐标进行参数化关联,通过两点生成定位曲线,将锚固长度转化为与 X 坐标值相关的参数,将锚固区钢筋统一表示为 X 轴正向的曲线,将两曲线融合生成角筋模型。最终建立的装配式科研楼建筑信息模型如图 8 所示。

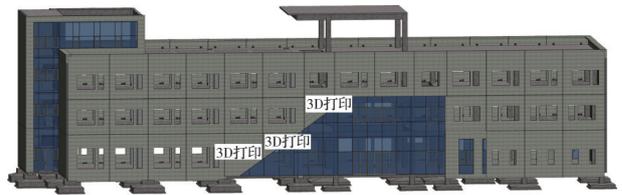


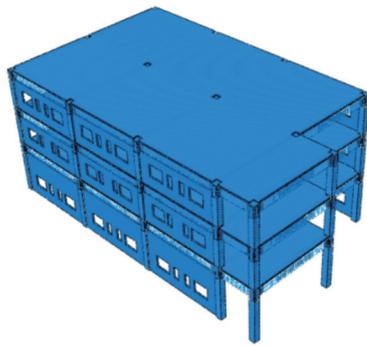
图 8 装配式混凝土框架科研楼建筑信息模型图
Fig. 8 Building information model of prefabricated concrete frame building

3.2.2 ABAQUS 模型建立

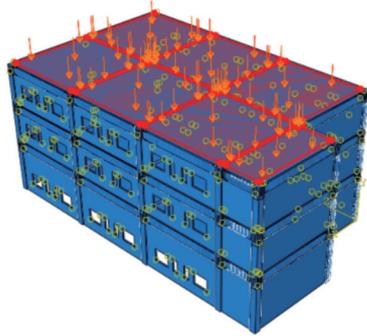
采用 ABAQUS 对物理模型进行有限元分析,建模过程包括使用材性数据对各构件进行属性赋予、网格划分、定义边界条件和荷载施加等过程。部分属性选取如下:混凝土为 C30,选用塑性损伤本构模型,钢构件为 Q345,钢筋为 HRB400,钢连接件和钢筋考虑选用强化的双折线本构,混凝土和钢连接件采用八节点减缩积分实体单元 C3D8R 模拟,钢筋采用桁架单元 T3D2 模拟。在荷载模块下对模型的柱底位置创建固定约束,梁端 H 型钢上下翼缘与柱方钢管连接采用 Tie 约束指令定义,以模拟现实中的焊缝连接。梁端 H 型钢腹板与柱外伸连接板之间的约束设置为螺栓荷载和钢板之间的面与面接触的罚摩擦,而面与面接触的法向作用定义为硬接触,用于模拟建筑物实际的边界条件。对于荷载施加过程,采用与实际施工工序相符的分段施工荷载施加的方法,而不采用一次性将全部施工荷载施加到模型中去,这是由于施工模拟不是模型受力线性叠加的简单问题,需要综合考虑不同工况下模型的变形,这些都会对后续结构受力产生影响。部分工况 ABAQUS 模型和应力云图分别如图 9 和 10 所示。

3.3 模型应用及数据分析

基于装配式科研楼项目,在施工过程中应用数字孪生模型技术,应用框架如图 11 所示。

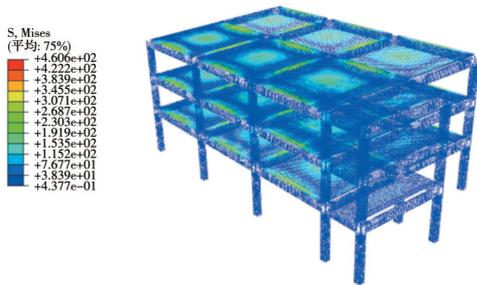


(a) 工况 4

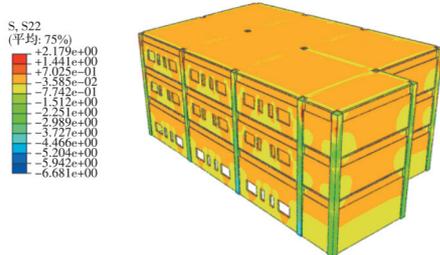


(b) 工况 8

图 9 工况 4 和工况 8 下的模型图
Fig. 9 Modeling in conditions 4 and 8



(a) 工况 4



(b) 工况 8

图 10 工况 4 和工况 8 下的应力云图
Fig. 10 Stress cloud map in conditions 4 and 8

装配式钢节点混凝土框架结构科研楼的节点是整个建筑的易损部位,需要重点监控,但由于存在多个连接节点,若全部安装传感器对节点进行监控,耗资巨大。同时传感器还存在故障的风险,可能导致测量数据不准确或失去测量数据,造成安全隐患。基于上述问题,考虑对装配式钢节点混凝土

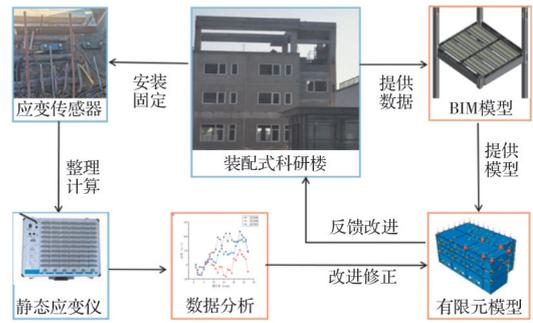


图 11 应用框架图

Fig. 11 Framework diagram of the application

框架科研楼建立数字孪生模型,对其关键节点进行监测,实现对节点真实状态的监测、诊断、预警分析。

在装配式科研楼的部分钢节点上安装应力传感器,传感器通过导线与数据采集系统连接,将传感器采集的信号转换为数字信号。根据装配式科研楼的图纸数据建立 BIM 模型,生成施工图并进行碰撞检测以确保模型的准确性,建立的模型可直接导入 ABAQUS 软件,进行结构计算和设计。通过计算机将数字信号转变为表格和图像进行数据分析,通过同一位置实际传感器与有限元的虚拟传感器的差值进行分析,改进有限元模型。在所有安装传感器的节点数值校正完毕后得到完备的孪生虚拟模型。

通过选择性安装实际传感器对钢节点数据进行校准,校准后的虚拟模型可以对未安装实际传感器的钢节点进行应力检测和监控。虚拟模型监测数据和实际传感器测试数据共同构成了整个装配式钢节点混凝土框架科研楼的节点应力数据网。当节点应力数据网中因实际传感器损坏造成数据缺失时,可用虚拟模型中的应力数据替换。

当装配式钢节点混凝土框架科研楼发生节点损坏时,可能会影响整个建筑的安全。因此,有必要对所有节点进行长期监控并提出预警。在科研楼的建造过程中,记录传感器测量的应力值 X_{ij} (i 为空间标号, j 为时间标号) 与孪生虚拟模型计算值 Y_{ij} (i 为空间标号, j 为时间标号), 通过统计分析获得数据的分布和残差。对角标一致的 X_{ij} 和 Y_{ij} 进行对比,若两者误差超越残差,可认为该处应力数据网出现漏洞,发生漏洞的节点被认定为危险节点,对 i 角标相同的 X_{i1} 、 X_{i2} 、 X_{i3} ... 进行对比,若某两相邻值出现较大突变,可认为该空间处节点出现危险。此时系统会发出危险预警,反馈给物理模型,以便对物理模型进行修正。

为验证所建立孪生模型的仿真性能,对施工过

程中所有节点的应力真实值和校准后的模拟值进行对比。某典型节点在不同工况下真实值与校准后模拟值对比如图 12 所示。

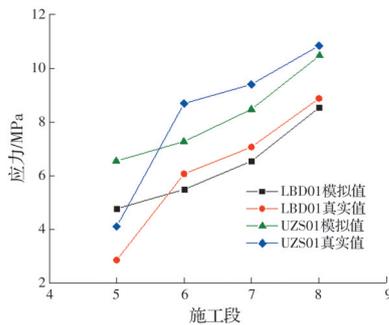


图 12 不同工况下真实值与模拟值对比图

Fig. 12 Comparison of actual value and numerical value under different conditions

对传感器真实测量和有限元模拟得到的不同工况下应力数据进行观察可以发现,随着施工的持续,节点的最大应力不断增加,最大值发生在建筑顶层保温层铺设完成时。这说明在施工过程中,建筑材料应力值不断增加,危险性也随之增加。为最大限度保证建筑施工时的安全,有必要对建筑进行数字孪生模型的建立和分析。

通过对比不同工况下传感器数据和有限元模拟数据可以发现,模拟值和真实值差值绝对值的最大值为 3 MPa,且随着施工的进行,模拟值和真实值之间的差距逐渐缩小至 1 MPa,这说明该数字孪生模型对节点的真实环境和状态有较好的表达。

4 结论

1) 基于数字孪生提出了建筑结构智能建造框架,并从物理数据采集、虚拟模型建立和模型信息交互 3 个方面阐述了该数字孪生框架的具体实现过程,但受限于软硬件开发程序的限制,该数字孪生模型仅在施工校准和监测预测方面可以发挥作用。

2) 采用传感器技术实现了新型装配式框架结构钢连接节点物理模型的应力数据实时监测,并将其与 BIM 和有限元虚拟模型对节点处应力状态仿真数据进行比较,基于不断更新的建造数据和积累的历史数据,能够实时调控和反馈施工过程中的信息,通过新型装配式钢节点混凝土框架结构实际工程应用验证了基于数字孪生模型的实现方法。

3) 以新型装配式钢节点混凝土框架结构实际工程为例,基于 BIM、有限元和传感器等采集数据,建立了该工程的数字孪生模型,结果表明该数字孪生模型能真实地反映建造过程中的实时受力状态。但受限于参数联合技术,使人员和机械等数据不能发挥全部作用,后续可以考虑通过物联网调动更多的参数,实现全项目的智能化识别和管理。

参考文献

- [1] 张健新,丁传林,戎贤,等. 装配式高强钢筋钢纤维混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 157-164.
ZHANG J X, DING C L, RONG X, et al. Experimental research on seismic behavior of the prefabricated frame joints with high strength reinforcement and steel fiber concrete [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(2): 157-164. (in Chinese)
- [2] KETIYOT R, HANSAPINYO C. Seismic performance of interior precast concrete beam-column connections with T-section steel inserts under cyclic loading [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 17(2): 355-369.
- [3] GHAYEB H H, ABDUL RAZAK H, RAMLI SULONG N H. Seismic performance of innovative hybrid precast reinforced concrete beam-to-column connections [J]. Engineering Structures, 2020, 202: 109886.
- [4] ZHANG J X, DING C L, RONG X, et al. Development and experimental investigation of hybrid precast concrete beam-column joints [J]. Engineering Structures, 2020, 219: 110922.
- [5] ZHANG J X, DING C L, RONG X, et al. Experimental seismic study of precast hybrid SFC/RC beam-column connections with different connection details [J]. Engineering Structures, 2020, 208: 110295.
- [6] LU Q C, CHEN L, LI S, et al. Semi-automatic geometric digital twinning for existing buildings based on images and CAD drawings [J]. Automation in Construction, 2020, 115: 103183.
- [7] LI M C, LU Q R, BAI S, et al. Digital twin-driven virtual sensor approach for safe construction operations of trailing suction hopper dredger [J]. Automation in Construction, 2021, 132: 103961.
- [8] LINARES D A, ANUMBA C, ROOFIGARI-ESFAHAN N. Overview of supporting technologies for cyber-physical systems implementation in the AEC industry [C]//Computing in Civil Engineering 2019. Atlanta, Georgia. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2019: 495-504.
- [9] MANDOLLA C, PETRUZZELLI A M, PERCOCO G, et al. Building a digital twin for additive manufacturing through the exploitation of blockchain: A case analysis of the aircraft industry [J]. Computers in Industry, 2019, 109: 134-152.
- [10] CHEN Z Y, HUANG L Z. Digital twins for information-sharing in remanufacturing supply chain: A review [J]. Energy, 2021, 220: 119712.
- [11] YU G, WANG Y, MAO Z Y, et al. A digital twin-

- based decision analysis framework for operation and maintenance of tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 116: 104125.
- [12] LIN K Q, XU Y L, LU X Z, et al. Digital twin-based collapse fragility assessment of a long-span cable-stayed bridge under strong earthquakes [J]. *Automation in Construction*, 2021, 123: 103547.
- [13] ZHAO L, ZHANG H, WANG Q, et al. Digital-twin-based evaluation of nearly zero-energy building for existing buildings based on scan-to-BIM [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 6638897.
- [14] 刘占省, 刘子圣, 孙佳佳, 等. 基于数字孪生的智能建造方法及模型试验[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(6): 26-36.
- LIU Z S, LIU Z S, SUN J J, et al. Intelligent construction methods and model experiments based on digital twins [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(6): 26-36. (in Chinese)
- [15] 刘占省, 邢泽众, 黄春, 等. 装配式建筑施工过程数字孪生建模方法[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(7): 213-222.
- LIU Z S, XING Z Z, HUANG C, et al. Digital twin modeling method for construction process of assembled building [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(7): 213-222. (in Chinese)
- [16] JIANG F, MA L, BROYD T, et al. Digital twin and its implementations in the civil engineering sector [J]. *Automation in Construction*, 2021, 130: 103838
- [17] 刘金典, 张其林, 张金辉. 基于建筑信息模型和激光扫描的装配式建造管理与质量控制[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(1): 33-41.
- LIU J D, ZHANG Q L, ZHANG J H. Construction management and quality control of prefabricated building based on BIM and 3D laser scanning [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(1): 33-41. (in Chinese)
- [18] BOJE C, GUERRIERO A, KUBICKI S, et al. Towards a semantic construction digital twin: Directions for future research [J]. *Automation in Construction*, 2020, 114: 103179.
- [19] NWODO M N, ANUMBA C J. A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach [J]. *Building and Environment*, 2019, 162: 106290.
- [20] ZHAO J F, FENG H B, CHEN Q, et al. Developing a conceptual framework for the application of digital twin technologies to revamp building operation and maintenance processes [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 49: 104028.
- [21] RONG X, ZHANG X W, ZHANG J X. Seismic behavior of innovation steel-embedded precast concrete beam-to-column joints [J]. *Structures*, 2021, 34: 4952-4964.
- [22] 陈志华, 牛犇, 张智升. 天津图书馆钢结构关键节点应力监测分析[J]. *工业建筑*, 2015, 45(2): 154-158.
- CHEN Z H, NIU B, ZHANG Z S. Analysis of stress monitoring results of key joints in steel structure of Tianjin Library [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(2): 154-158. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)