

数据中心模块化建造中的 模块运输安全性问题

Safety Issues of Module Transportation in Modular Construction of Data Center Buildings

金 鉴¹, 贺 晓¹, 魏文豪¹, 吴雨杭², 李元齐²(1. 中讯邮电咨询设计院有限公司, 北京 100048; 2. 同济大学, 上海 200092)
Jin Jian¹, He Xiao¹, Wei Wenhao¹, Wu Yuhang², Li Yuanqi²(1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China; 2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

摘 要:

数据中心的模块化建造是行业发展的重要趋势之一。数据中心模块具有较大的设备质量, 返修成本高, 应重点关注其在运输和吊装过程中的安全性问题。对数据中心模块单元在运输和吊装过程中的常见损害及其破损机理进行了初步分析, 进而提出了防损研究的主要问题及相应对策。最后指出对数据中心模块在运输和吊装过程中的防损问题的研究方向。

关键词:

数据中心; 模块化建造; 破损机理; 防损研究; 智能优化

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2022.12.005

文章编号: 1007-3043(2022)12-0023-06

中图分类号: TP308

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Modular construction for data center buildings is an important trend of the industry development. The data center module has large equipment quality and high repair cost, so its safety during transportation and hoisting should be focused. At first, the common damages and damage mechanism of data center module units in the process of transportation and hoisting are preliminarily analyzed, and then the main problems and corresponding countermeasures of anti-damage research are proposed. Finally, the research direction of data center module anti-damage in the process of transportation and hoisting is pointed out.

Keywords:

Data center buildings; Modular construction; Damage mechanism; Anti-damage research; Intelligent optimization

引用格式: 金鉴, 贺晓, 魏文豪, 等. 数据中心模块化建造中的模块运输安全性问题[J]. 邮电设计技术, 2022(12): 23-28.

1 概述

近年, 国家大力促进装配式建筑及其结构体系的发展, 积极推进传统建筑产业的转型升级。模块建筑因其系统高度集成化、产品化、部品与工厂化生产的要求相适配而引起广泛关注, 并在国外已经进行了多年的发展。模块建筑体系, 以单个模块为基本单元, 每个模块单元采用型钢框架或冷弯薄壁型钢龙骨式复合墙体为主要受力构件, 并在工厂进行预制, 形成建筑功能完备的模块单体, 然后将其运输至现场进行

模块连接, 使其成为整体建筑^[1]。另一方面, 数据中心(见图 1)作为 5G、人工智能、云计算等新一代信息技术的重要载体^[2-3], 对于经济数字化具有重要的战略意义; 数据中心是一类平面布置规则且重复的建筑类型, 与模块建筑体系具有高度的适配性。因此, 数

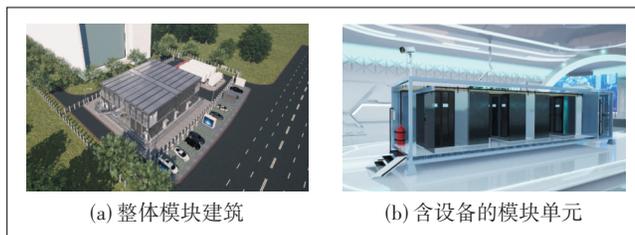


图 1 模块化数据中心建筑^[2]

收稿日期: 2022-11-10

据中心的模块化建造已成为行业发展的重要趋势之一。

1.1 数据中心的模块化建造技术现状

模块单元是钢结构模块建筑体系的重要建筑部品,根据传力路径可分为柱承重模块和墙承重模块2类。为适用低层到高层的建筑需求,由模块拼装成的结构体系可归纳为:纯模块结构体系、模块-钢框架结构体系、模块-筒体结构体系、平台-模块结构体系以及框架-嵌入式模块结构体系等。

对于数据中心的模块单元,各企业都力图使其覆盖所有的建筑功能,即实现设备机房的模块化、楼梯走廊等辅助单元的模块化、建筑屋面体系的模块化^[2-3]。但是,由于国内厂商众多,且没有统一的规范指导数据中心模块化建筑的设计,各模块化的功能单元种类繁多,缺乏可参考的合理模数,有悖于模块建筑标准化、模数化和系列化的原则,过多种类的模块单元使得数据中心项目的建造效率大为降低,也不利于数据中心模块化建造的推广。尽可能实现模块单元的标准化,是实现数据中心模块化建造的关键。

目前的模块化数据中心建筑多为3层及以下的低层建筑^[4-7],多层模块化数据中心的推广将缓解用地紧张的局面。但是,由于单个数据中心模块荷载较大,多层纯模块结构体系数据中心的抗侧力体系难以达到抗震设计规范的要求;此外,缺乏模块单元之间传力简洁、安装方便、承载性能良好的连接构造^[8-16],也是阻碍数据中心模块建筑向多层建筑体系发展的原因之一。对于模块建筑的连接设计,陈志华等^[13]提出的一种自锁榫卯式连接节点,利用上部模块的重力作用将上下模块锁住,从而使节点达到抗弯、剪的性能要求。邓恩峰等^[15]提出一种箱式模块间的铸头-十字板连接节点,柱插入焊接在十字形节点板上的铸头中,并通过螺栓将相邻模块框架梁连接。在进一步的研发中,可将上述节点形式应用于数据中心模块建筑。

在数据中心的设计阶段,已采用BIM对机柜、桥架、管路等设备进行空间精准定位,提前识别干涉位置,优化设计结果,减少因方案设计不完善造成的现场施工返工^[2]。随着计算机网络技术应用的广泛展开以及建筑信息化模型的高速发展,建筑一体化管理平台已成为提高工程管理水平,降低成本,加快工期,提高工程质量的^{最优方案}。此外,国外已经涉及了模块建筑的智能设计以及全过程管理。Sharafi等^[17]提出将

多层模块建筑采用三维矩阵的形式进行描述,并综合考虑建造、建筑及结构等方面的因素,最终求解出该矩阵的最优解作为模块建筑的智能设计方案。Hsu等^[18]建立了涵盖模块生产、储存、组装3个方面物流过程的数学优化模型,案例研究表明该模型有效地为模块建造中的物流优化提供支撑。Hsu等^[19]进一步研究了模块建造中供应链的风险规避问题,考虑了不确定性因素的影响,并通过一个实际案例体现出该模型的可操作性。Zhai等^[20]为了充分实现BIM技术在模块建造中的精确信息收集、按时信息交互、自动决策支持,将物联网技术与BIM相结合,提出IBIMP管理平台。将一体化管理平台应用于数据中心的模块化建造已成为行业发展的必然趋势。

针对数据中心的模块化建造技术现状,需要进一步深入研究的重点如图2所示。

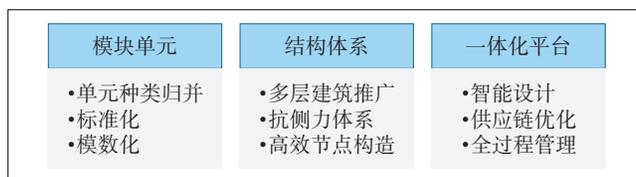


图2 数据中心的模块化建造技术研究重点

1.2 模块运输和吊装的损伤问题研究现状

在数据中心的模块化建造实现中,因其单个模块具有设备荷载大、单元规格长、集成化程度高的特点,还应考虑其在运输和吊装过程中的安全性问题。实际上,对模块单元运输过程中的损害进行调研后发现,纸面石膏板作为模块单元的外墙板,其在运输过程中的开裂是建筑模块常见的破损模式^[21]。针对模块在运输过程中受到的动力荷载,Godbole^[22]建立了包括路面、车辆、模块单元的整体数学分析模型,提出其动力荷载的主要影响因素为模块单元的堆叠高度、质心位置、挂车悬架放置方式以及振动部分的阻尼数量,基于此进行了相应的参数分析。另一方面,Bai^[23]则针对运输荷载进行了实测研究,考察对象为采用三轴半挂平板车以及船用拖车运输的3种模块单元,测量结果以功率谱密度的形式呈现;Bai^[21]在后续的研究中,利用上述实测运输荷载作为输入评估了模块单元非结构构件在运输过程种的损伤状况,该研究利用模块的有限元模型进行频域上的随机振动分析,并结合非结构构件试验获取的疲劳材性,评价其损伤程度;然而,上述损伤分析仅在单次实测荷载试验作为输入的条件下进行,无法定量考虑多种路面的情况。

此外,由于数据中心模块质量较大,在模块单元形成整体建筑的安装过程中,单元的防损问题需要引起重视。在模块吊装过程中,跌落和碰撞产生的冲击荷载将对模块单元中的易碎构件产生影响,甚至导致其破损。Godbole 等^[24]对模块单元跌落的冲击荷载进行了理论、模拟及试验研究,结果表明冲击过程可以简化理论模型,即 Hunt & Crossley (H & C)模型;通过建立运动方程,可获得冲击荷载的解析解;该模型同样表明,对于数据中心这类质量较大的模块单元,其冲击荷载也会相应增大。

1.3 解决模块的运输和吊装损伤问题的意义

保证数据中心模块在运输和吊装过程中的完好性,有利于节省建筑建造总体工程造价、减少材料浪费、提升建造效率和质量安全水平,是实现数据中心模块化、标准化、工厂化、装配化和信息化发展的重要环节之一。因此,对于数据中心模块在运输和吊装中的安全性问题应进行深入分析。

2 模块单元的运输和吊装损害分析

2.1 运输过程中引起损害的原因及其破坏机理

模块建造的整体流程可分为:模块工程制造、模块运输至现场、模块现场拼装。对于完成度高的单体模块,在运输过程中的动力荷载或将造成其非结构构件的严重破损,这是导致模块建造成本增加的主要原因之一。路面不平度^[25]作为运输模块单元车辆上动力荷载产生的根本原因,根据 ISO 8608-1995 标准,其竖向高程被简化为理想的功率谱密度形式,并分为 A~H 8 个等级。

纸面石膏板作为模块单元的外墙板,其在运输过程中的开裂是建筑模块常见的破损模式。此处以纸面石膏板为例说明其在运输中动力荷载下的破坏机理。

在 A~E 等级道路下内纸面石膏板的最大应力如图 3 所示。可以看到,结构的最大应力均位于石膏板开洞一侧的边缘,该位置即是纸面石膏板最易于发生破损的位置。此外,在 E 等级道路下,纸面石膏板的最大应力为 2.39 MPa,超过材料的极限抗拉强度 2.1 MPa,说明在该工况下,结构已经发生了强度破坏。

进一步地,根据纸面石膏板的应力时程进行疲劳分析,获得其疲劳寿命,如图 4 所示。结果表明,在 A、

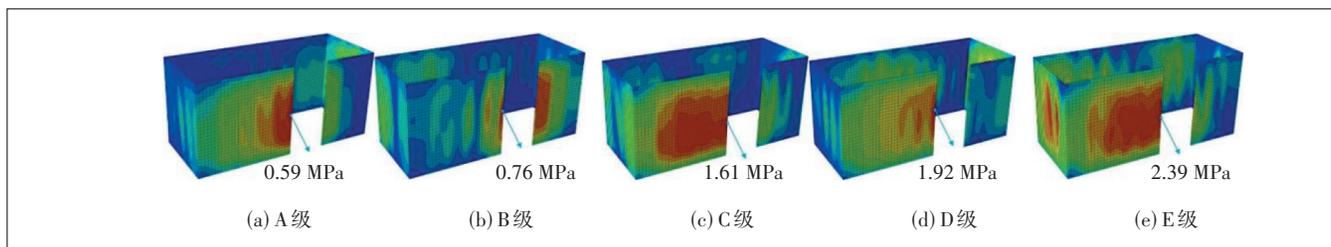


图3 A~E等级道路下内纸面石膏板的最大应力

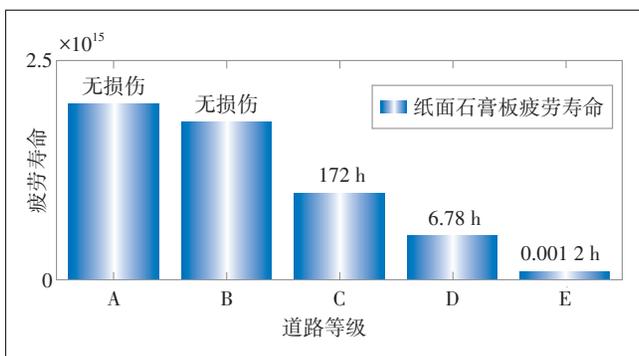


图4 A~E等级道路下纸面石膏板的疲劳寿命

B 等级道路下,纸面石膏板材无损伤发生,由图 3 (a)和图 3 (b)可知,材料的最大应力均小于 1.1 MPa(弹性极限);在 C 等级道路下,纸面石膏板材的疲劳寿命为 172 h,大于一般的运输时长,该道路等级下发生破损

的可能性较低;在 D、E 等级道路下发生破损的可能性较高,其中,D 等级道路下的疲劳寿命为 6.78 h,E 等级道路下材料的最大应力已大于 2.1 MPa(极限强度),破损模式为强度破坏。

实际上,A、B 等级道路均属于城市道路;C 等级道路属于乡镇道路;D、E 等级道路则属于路面状况糟糕的乡村道路,且为运输过程中应该避免的路段。图 4 给出了 A~E 等级道路下纸面石膏板的疲劳寿命。

2.2 吊装过程中引起损害的原因及其破坏机理

在模块吊装过程中,跌落和碰撞产生的冲击荷载是导致模块单元易碎构件及设备破损的主要原因。

模块单元的跌落过程可以简化为如图 5 (a)所示的理论模型。并由此可计算出模块单元所受到的冲击荷载,如图 5 (b)所示。由于冲击荷载短时间内产生

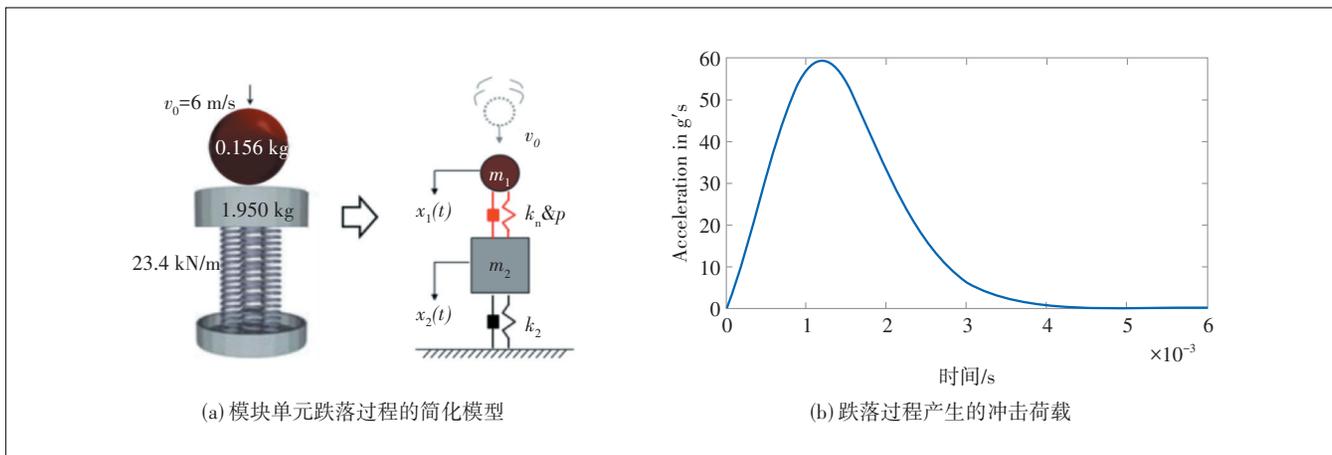


图5 模块单元的跌落过程模拟

的巨大加速度,模块单元中的易碎构件或设备将首先发生破坏。以安装在模块单元上不同厚度的普通浮法退火玻璃为例,各厚度玻璃发生破坏的时间如图6所示。

综上所述,数据中心模块单元在运输过程发生损伤的原因为路面不平度引起的持时较长的动力荷载,构件破坏机理为低等级道路下的疲劳损伤或高等级道路下的强度破坏;模块单元在安装过程中,易碎的构件或设备可能由于跌落和碰撞产生的冲击荷载而

破损,破坏机理为持时短、强度大的冲击荷载引起的断裂。

3 模块单元运输和吊装过程防损研究

3.1 运输过程中防损的主要问题及对策

由2.1节的分析可知,对于道路运输中的数据中心模块,防损的关键是减小模块单元受到的动力荷载和加强模块单元在动力荷载下的结构承载力。

为了减小模块单元的动力荷载,首先应考虑避免

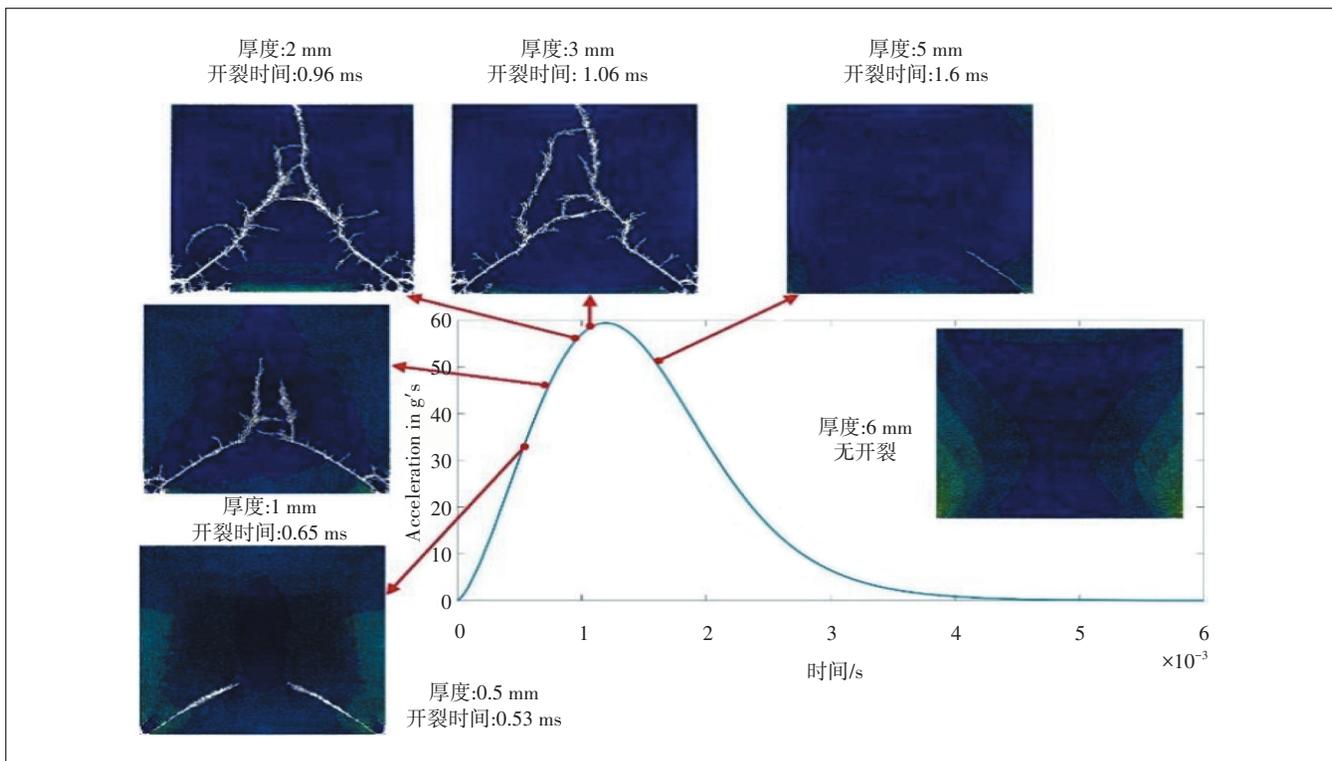


图6 不同厚度玻璃在冲击荷载下的开裂情况

运输车辆行驶于路面状况糟糕的乡村道路(D、E等级), 确保行驶路线为城市道路(A、B等级)及路面状况良好的乡镇道路(C等级)。其次, Ferdous^[26]指出, 采用具有减振器的地面运输装备, 可有效减少因地面不平度产生的振动激励对建筑典型部品引起的损伤。此外, 在设备隔振领域, 隔振技术的应用同样可以达到减小模块单元受到的动力荷载的效果。

对于加强模块单元在动力荷载下的结构承载力, 《轻钢龙骨式复合墙体》(JG/T 544-2018)^[27]中对于二维墙板在运输过程中的防损保护规定如下: 包装箱应牢固, 避免产品在运输过程中损坏、产品在运输过程中应轻装卸、防冲击、防变形等; 《钢结构模块建筑技术规程》(T/CECS 507-2018)^[28]则规定: 模块单元的宽度及高度宜符合大件运输的限值规定, 在运输过程应固定牢固, 设置垫木防止运输过程中造成损坏, 必要时, 应进行运输过程中强度和刚度验算, 采取专门的防振措施。

相关标准的防损技术及措施如表1所示。

表1 相关标准的防损技术及措施

规范	条款
工业化建筑评价标准 ^[29]	运输方案: 时间/次序/路线/固定要求/堆放支垫/保护措施 质量保证措施: 大型预制构件运输和存放措施具体、明确
装配式混凝土建筑技术标准 ^[30]	应具备运输方案 对运输工况进行验算
装配式钢结构建筑技术标准 ^[31]	装卸时保证车体平衡 采取固定措施防止构件移动、倾倒、变形 对构件边角部设置保护衬垫
装配式木结构建筑技术标准 ^[32]	运输堆放时, 支承位置按计算确定 保证组件含水率、设保护层包装 板材纵向平行堆放、顶部压重 预制木桁架放置要求 木结构墙体采用直立插放架运输
轻钢龙骨式复合墙体 ^[27]	包装箱应牢固固定 运输过程中应轻装卸、防冲击、防变形等
钢结构模块建筑技术规程 ^[28]	牢固固定, 设置垫木防损 进行运输过程中强度和刚度验算, 设置防振措施

3.2 吊装过程中防损的主要问题及对策

对于数据中心模块单元吊装过程中的防损, 应避免模块单元在吊装时发生跌落和碰撞, 相应的对策总结如下。

a) 使用合理的吊装工具。模块安装应合理选择起重吊装设备, 当选用非定型产品作为起重设备时, 应编制专项吊装施工方案, 并通过施工单位技术负责人审核通过后, 方可组织实施; 根据模块形状、尺寸及

重量要求选择合适的吊具, 吊装过程, 吊索水平夹角不宜大于60°, 不应小于45°; 对于尺寸较大或形状复杂的模块, 应选择设有分配梁或分配桁架的吊具, 并应保证起重设备主钩位置、吊具及模块单元重心在竖直方向上重合。

b) 优化吊点位置。模块应设计吊点供起吊设备对其进行移动。吊点的数量及位置由保护易碎构件的容许挠度值来控制, 比较典型的点位设于模块的两端; 对于依靠模块自身结构不能满足吊装工况受力的情况, 考虑布置临时结构, 吊装完成后此临时结构还能用于数据中心其他部位。

c) 安装的容许偏差。模块结构安装的允许偏差应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205)^[33]的有关规定。

4 存在的问题及研究建议

本文对数据中心模块单元在运输和吊装过程中的常见损害及其破损机理进行了分析, 基于上述分析提出了防损研究的主要问题及相应对策。就目前的研究现状而言, 仍需要对引发模块单元在运输和吊装过程中破损的原因, 即路面不平度引起的动力荷载和跌落与碰撞产生的冲击荷载进行深入研究。

此外, 针对数据中心模块运输过程中防损对策的进一步研究给出如下建议。

a) 运输线路的智能优化。合理的运输路线规划是防止数据中心模块在运输过程中损伤的最有效途径, 使用智能优化算法, 可使运输路线规避路面状况糟糕的乡村道路, 主要集中于路面状况良好的城市道路。

b) 运输时的临时支撑设置。综合考虑应用减、隔振技术, 设计数据中心模块在运输时的临时支撑, 减小模块单元产生的动力响应。

对数据中心模块吊装过程中防损对策的进一步研究给出如下建议。

a) 安装结合节点连接。在建筑模块的吊装及安放过程中, 结合构造简洁、连接方便的节点设计, 使建筑模块平稳地固定到相应位置, 避免跌落与碰撞的发生。

b) 布置临时结构缓冲跌落与碰撞。在数据中心模块上设计临时结构防止其吊装时的破坏; 在模块需要安放的位置也可设置临时支撑缓冲由于跌落与碰撞产生的冲击荷载。

参考文献:

- [1] 李元齐,吴雨杭.冷弯型钢轻钢集成体系建筑工业化建造技术发展现状与展望[J].四川建筑科学研究,2021,47(3):1-19.
- [2] 彭永辉,孙岩飞,梁新,等.新一代预制模块化数据中心特点及应用[J].中国通信业,2021(S1):41-49.
- [3] 宋彦峰,田书涛,许俊.数据中心建设标准在实际案例中的应用和深化[J].邮电设计技术,2018(2):89-92.
- [4] 王汉青,蔡筱婵.某模块化数据中心机房热工环境的模拟研究[J].建筑热能通风空调,2021,40(6):76-79,46.
- [5] 宋茜云,景利学.模块化是民用建筑数据中心建设的未来[J].智能建筑,2021(4):69-71.
- [6] 杜博文.模块化数据中心在智慧高速中的应用研究[J].智慧城市,2021,7(15):129-130.
- [7] 汪平.数据中心模块化之构建思路[J].电信快报,2021,(8):10-12.
- [8] DENG E F, YAN J B, DING Y, et al. Analytical and numerical studies on steel columns with novel connections in modular construction [J]. International Journal of Steel Structures, 2017, 17 (4) : 1613-1626.
- [9] XU B, XIA J W, CHANG H F, et al. A comprehensive experimental-numerical investigation on the bending response of laminated double channel beams in modular buildings [J]. Engineering Structures, 2019(200):109737.
- [10] XU B, XIA J W, CHANG H F, et al. Flexural behaviour of pairs of laminated unequal channel beams with different interfacial connections in corner-supported modular steel buildings [J]. Thin-Walled Structures, 2020(154):106792.
- [11] FENG R Q, SHEN L, YUN Q. Seismic performance of multi-story modular box buildings [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020(168):106002.
- [12] CHEN Z H, LIU Y, ZHONG X, et al. Rotational stiffness of inter-module connection in mid-rise modular steel buildings [J]. Engineering Structures, 2019(196):109273.
- [13] CHEN Z H, LIU J D, YU Y J. Experimental study on interior connections in modular steel buildings [J]. Engineering Structures, 2017 (147):625-638.
- [14] CHEN Z H, LI H X, CHEN A Y, et al. Research on pretensioned modular frame test and simulations [J]. Engineering Structures, 2017 (151):774-787.
- [15] DENG E F, ZONG L, DING Y, et al. Seismic behavior and design of cruciform bolted module-to-module connection with various reinforcing details [J]. Thin-Walled Structures, 2018(133):106-119.
- [16] DAI X M, ZONG L, DING Y, et al. Experimental study on seismic behavior of a novel plug-in self-lock joint for modular steel construction [J]. Engineering Structures, 2019(181):143-164.
- [17] SHARAFI P, SAMALI B, RONAGH H, et al. Automated spatial design of multi-story modular buildings using a unified matrix method [J]. Automation in Construction, 2017(82):31-42.
- [18] HSU P Y, ANGELOUDIS P, AURISICCHIO M. Optimal logistics planning for modular construction using two-stage stochastic programming [J]. Automation in Construction, 2018(94):47-61.
- [19] HSU P Y, AURISICCHIO M, ANGELOUDIS P. Risk-averse supply chain for modular construction projects [J]. Automation in Construction, 2019(106):102898.
- [20] ZHAI Y, CHEN K, ZHOU J X, et al. An Internet of things-enabled BIM platform for modular integrated construction: a case study in Hong Kong [J]. Advanced Engineering Informatics, 2019 (42) : 100997.
- [21] INNELLA F, BAI Y, ZHU Z H. Mechanical performance of building modules during road transportation [J]. Engineering Structures, 2020(223):111185.
- [22] GODBOLE S, LAM N, MAFAS M, et al. Dynamic loading on a prefabricated modular unit of a building during road transportation [J]. Journal of Building Engineering, 2018(18):260-269.
- [23] INNELLA F, BAI Y, ZHU Z H. Acceleration responses of building modules during road transportation [J]. Engineering Structures, 2020(210):110398.
- [24] GODBOLE S, LAM N, MAFAS M M M, et al. Pounding of a modular building unit during road transportation [J]. Journal of Building Engineering, 2021(36):102120.
- [25] 鲍家定,伍建伟,王瀚超,等.基于IFFT法的路面不平整度时域模拟方法[J].现代电子技术,2016,39(20):8-11.
- [26] FERDOUS W, BAI Y, NGO T D, et al. New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings - a state-of-the-art review [J]. Engineering Structures, 2019(183):883-893.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部.轻钢龙骨式复合墙体:JG/T 544-2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [28] 中国工程建设标准化协会.钢结构模块建筑技术规程:T/CECS 507-2018[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工业化建筑评价标准:GB/T 51129-2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部.装配式混凝土建筑技术标准:GB/T 51231-2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部.装配式钢结构建筑技术标准:GB/T 51232-2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部.装配式木结构建筑技术标准:GB/T 51233-2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [33] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构工程施工质量验收标准:GB 50205-2020[S].北京:中国计划出版社,2020.

作者简介:

金鉴,毕业于郑州大学,助理工程师,学士,主要从事模块化数据中心产品研发等工作;贺晓,中讯邮电建筑工程设计院总工程师,教授级高级工程师,硕士,主要从事数据中心研究咨询设计实践工作;魏文豪,毕业于北京工业大学,高级工程师,硕士,主要从事数据中心、通信局房的规划、咨询、设计及标准制定、新技术研究工作;吴雨杭,毕业于天津大学,硕士,主要从事模块建筑结构设计理论研究;李元齐,毕业于同济大学,教授,博士生导师,博士,主要从事模块建筑结构设计理论研究、冷弯型钢结构设计理论研究等工作。