

Research on the Development of Modular Container Building

Ke Biaozi¹, Chen Zhaorong^{1,*}, Liao Fei¹, Xu Yong², Wu Congxiao², Li Bo³, Yang Tao¹

¹China Construction Fifth Engineering Bureau the Third Construction Co., Ltd., Changsha, China

²College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, China

³Shenzhen Construction Engineering Quality and Safety Supervision Station, Shenzhen, China

Email address:

chenzhaorong1987@qq.com (Chen Zhaorong)

*Corresponding author

To cite this article:

Ke Biaozi, Chen Zhaorong, Liao Fei, Xu Yong, Wu Congxiao, Li Bo, Yang Tao. Research on the Development of Modular Container Building. *Science Discovery*. Vol. 10, No. 6, 2022, pp. 553-561. doi: 10.11648/j.sd.20221006.36

Received: November 29, 2022; **Accepted:** December 26, 2022; **Published:** December 28, 2022

Abstract: The concept of modular container architecture can be traced back to the 1950s. Today, the development of modular prefabricated building is the trend of the times. In view of the popularization characteristics of the novel coronavirus pneumonia, which is faster, more hidden and more contagious, the medical administration of the National Health Commission pointed out in a press conference on March 22, 2022 that the State Council's joint defense and control mechanism integrated team requires each province to have at least two to three shelter hospitals. This paper studies the modular container hospital and discusses the main application fields of modular container construction. The research status of container construction at home and abroad is summarized. This paper summarizes the factors affecting the seismic performance of container buildings, and discusses the advantages and disadvantages of the existing research on container buildings. If the seismic performance of the container building can be fully studied and there are reliable measures to improve the fire resistance and corrosion resistance of the modular container will be a good target for promotion.

Keywords: Modularization, COVID-19, Container Building, Fire Resistance, Corrosion Resistance

关于模块化集装箱建筑的进展研究

柯标志¹, 陈兆荣^{1*}, 廖飞¹, 许勇², 吴从晓², 李波³, 杨涛¹

¹中建五局第三建设有限公司, 长沙, 中国

²广州大学土木工程学院, 广州, 中国

³深圳市建筑工程质量安全监督总站, 深圳, 中国

邮箱

chenzhaorong1987@qq.com (陈兆荣)

摘要: 模块化集装箱建筑的概念最早可以追溯到上世纪50年代。在大力推广装配式建筑的今天, 模块化建筑的发展是大势所趋, 针对新冠肺炎的传播速度更快、隐匿性更强、传染性更强的普及特点, 国家卫生健康委医政医管局在2022年3月22日的发布会上指出, 国务院联防联控机制综合组要求每个省份至少有两到三家方舱医院。本文在结合模块化集装箱式医院展开了研究, 讨论了模块化集装箱建筑应用的主要领域; 总结了集装箱建筑的国内外研究现状; 总结了集装箱建筑抗震性能影响因素; 探讨了现有研究中集装箱建筑存在的优势与不足。如果能对集装箱建筑的抗震性能研究进行充分的研究并有可靠措施, 提高耐火、耐腐蚀性能的前提下模块化集装箱将是很好的推广对象。

关键词：模块化，新冠肺炎疫情，集装箱建筑，耐火，耐腐蚀性

1. 引言

模块化集装箱建筑的概念最早可以追溯到上世纪50年代。有着“集装箱之父”之称美国人马尔科姆·麦克莱恩（Malcom McLean）于1956年发明了集装箱，从此集装箱改变了全球的货运模式。图1是20英尺国际标准集装箱的部件组成示意图，主要由上侧梁、下侧梁、上端梁、下端梁、角件、角柱、底板、底梁、端门和波纹板组成。



图1 英尺集装箱的组成部件示意图。

自工业革命以来，大气层中二氧化碳的迅速增加，导致了全球变暖，冰川融化等一系列全球性问题，针对此问题集装箱建筑应运而生，它是全世界公认的低碳环保的绿色建筑。当今，全球每年95%的集装箱在中国生产，但由于运输成本的问题，一个空集装箱运回来的成本要比制造一个新的集装箱更高，所以在码头有很多闲置集装箱[1]。每年有大量的废弃集装箱淘汰，若回炉炼钢对环境是一种巨大的负担，将废旧集装箱当做建筑材料是解决这一问题的有效方法。在大力推广装配式建筑的今天，模块化建筑的发展是大势所趋，发展和应用模块化集装箱建筑也是积极响应国家政策。

2. 模块化集装箱建筑应用的主要领域



图2 绵阳集装箱学校。

灾后应急性建筑。图2是汶川地震后中集集团援建的集装箱学校。从设计到建成，完成26间教室只用了8周，及时的解决了学生的日常学习和生活问题[2]。图3是火神山医院，医院由300多个箱体拼装而成。2020年新冠肺炎疫情在武汉爆发，为了专门收治肺炎患者，参照北京小汤山医院模式，总计投入七千多名工人，花10天建成了火神山医院[3]。医院的快速建成交付，一方面极大地缓解了肺炎患者的收治压力，另一方面降低了新冠肺炎的传播风险，有效地控制了传染源。



图3 火神山医院。

酒店办公类建筑。图4是位于格鲁吉亚雪山上的Quadrum集装箱酒店，由建筑师 Sandro Ramishvili 和 Irakli Eristavi 共同设计而成。集装箱按着金字塔造型拼装，逐级下降，像当地的地形一样，与周边自然风光完美的融合为一体。图5是位于新加坡的Block O艺术工作室，由数十个集装箱组合而成。作为一个艺术创作场所，Block O蕴涵着现代艺术气息，每一个箱体都是独立的个体，艺术家有一个静心创作的空间。



图4 “Quadrum”集装箱酒店。



图5 “Block O”艺术工作室。

教育商业类建筑。图6是位于北京昌平的汇佳中学冰球馆，建筑面积1400m²，用了45个集装箱，场馆分为三层，每层都有不同的功能分区，为冰球馆打造集接待、餐饮、办公、设备仓储等于一体的多功能馆[4]。图7是位于建国大学附近的“COMMON GROUND”，它是韩国第一家大型集装箱商场。使用了200个大型集装箱，总占地面积为5280平方米，是目前世界上规模最大的集装箱商场。



图6 汇佳中学冰球馆。



图7 “COMMON GROUND”集装箱商场。

3. 集装箱建筑的国内外研究现状

集装箱建筑发展至今，应用领域日趋丰富，建筑形式由单一转向多元化，结构形式也更加安全、可靠。国外许多专家学者对集装箱建筑进行了研究。

3.1. 国外研究现状

1983年，美国的John M最早提出集装箱建筑的概念，并申请了专利[5]。专利中详细说明了集装箱建筑由模块化的海运集装箱组成，每个集装箱单元都具有特定的建筑功能，通过设计的卡锁将上下集装箱单元连接起来，卡锁起到了串联箱体和传力的作用。

1989年，PC Clark提出了将废旧集装箱进行改造的理念，将单个或多个集装箱组合在一起固定在基础上，侧板和端板改造成窗和门，顶板上加上吊顶，改造成集装箱房屋[6]。

2000年之后，LOT/EK公司最先开始涉足集装箱建筑领域，并出版了《Mobile: The Art of Portable Architecture》《Portable architecture》等书籍，详细介绍了集装箱建筑的应用领域和建造方式[7]。

2006年，Kotnik J撰写的《Container Architecture》详细介绍了将二手集装箱改造成建筑物的设计过程，并给出了详细的设计图纸和施工细节，其中包括建筑物的平面图、立面图和剖面图[8]。

2008年，Børvik T[9]等在集装箱的波纹板外表面加设了一层铝板，用来抵抗爆炸等冲击荷载，为战争的地区提供一个安全的避难所。

2009年，奥克兰大学建筑学院的十二名研究生针对十二个不同灾害地点，改造了海运集装箱，并运送到当地作为灾难情况下的紧急庇护所。并通过进一步的设计改进，将改造集装箱建筑融入当地环境，为灾难幸存者提供自给自足的能力[10]。

2010年，新西兰的Olivares为了确定集装箱建筑与其他材料建造的传统房屋相比是否节能，选取集装箱结构、混凝土结构和木结构三个实际案例进行了研究，研究表明集装箱建筑能有效地减少能源消耗，降低二氧化碳的排放量[11]。

2011年，Sung-Gul Hong等人提出了一种带有双层蒙皮钢板的模块化建筑体系，并把有限元分析和实验结果进行了对比，研究表明：双层蒙皮钢板体系由于有良好的屈服后刚度，使其拥有良好的延展性，所有的钢板会在主体结构进入屈服之前达到屈服点，拥有良好的耗能能力，以此来保护主体结构。

2012年，Kevin Giriunas和Halil Sezen[12]等人利用有限元分析软件建立了标准集装箱模型，首先对五种不同尺寸的国际标准集装箱进行了分析，对集装箱施加不同大小、不同方向和不同数量的节点荷载，并改变波纹板的数量和开洞形式。

2013年，Eom HS提出可变量度角柱，见图8所示。将长棍贯通穿过上下角件和角柱，延伸入基础下，角件通过螺栓连接固定在基础上。这种设计一方面提高了角柱的抗侧强度，防止角柱因侧向力过大产生扭曲变形；

另一方面极大地提高了整体的抗侧力，防止集装箱因侧向力过大发生倾覆或侧翻。该种集装箱建筑适用于沙漠

或者草原等极端环境中[13]。

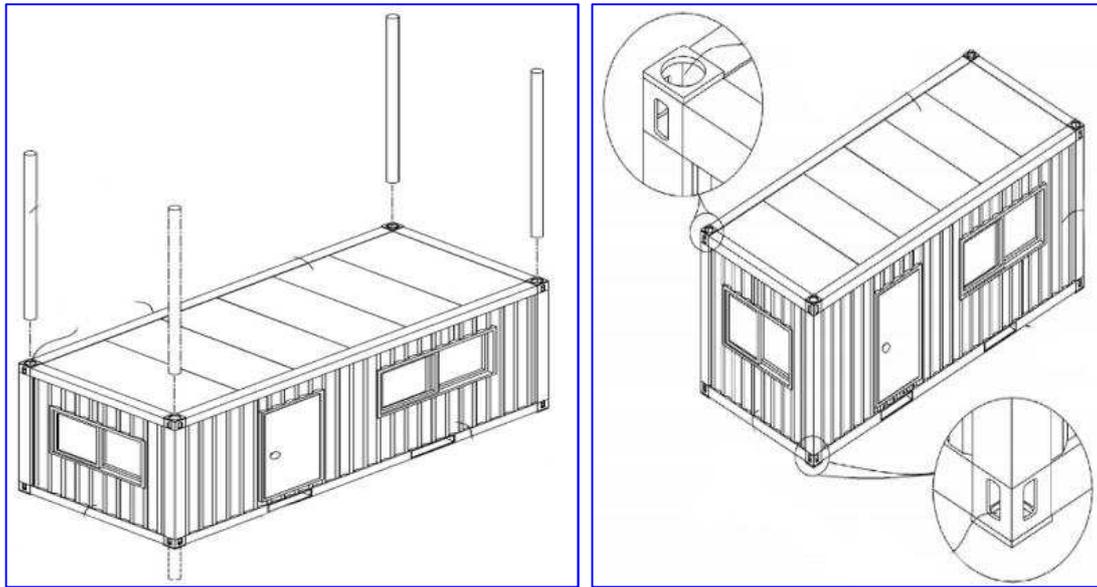


图8 可变量长度角柱设计。

2015年，Dvorak J研究了一栋由废旧集装箱改造成的二层房屋热效应问题，解决了地面、屋顶和箱体的隔热问题，并给出了具体的隔热技术措施和施工图纸[14]。

2020年，Bertolini M等人对废旧集装箱用作建筑材料或者回炉炼钢对环境的影响做了评估，从全球变暖趋势、臭氧消耗趋势、雨水酸化趋势和土壤富营养化趋势四个方面进行了详细的比较，结果表明将废旧海运集装箱用作建筑材料能有效地降低二氧化碳排放，每建造200平方米的房子相当于减少了20至25吨的二氧化碳排放。

3.2. 国内研究现状

国外对集装箱建筑的研究和应用比较早，国内到2000年之后才陆续有专家学者开始进行研究。在政府大力推行装配式建筑的大背景下，最近几年，关于集装箱建筑的应用与研究也越来越多，并推出了关于集装箱建筑的设计规程与规范。

2004年，香港的柏庭卫、胡佩玲等人撰写的《香港集装箱建筑》是国内最早关于集装箱建筑的书籍[15]。2000年之后，香港的经济飞速发展，每年的港口有大量的废旧集装箱，处理和利用这些废旧集装箱就成为了当时的一个难题。

2008年，纪尚志等人对青岛积米崖渔人码头的集装箱建筑进行了探讨，分析了集装箱建筑的优势和带来的经济价值[16]。黄科对欧美地区、东南亚地区、中东地区、非洲地区、拉美地区和国内的集装箱建筑应用情况进行了总结和分析，并对集装箱建筑的未來应用趋势和市場发展前景进行了预估[17]。

2010年，哈尔滨工业大学的查晓雄等人对集装箱模块的简化计算，得出了在建筑理论限定范围内随意搭建的多层集装箱房屋中任意柱子的轴力计算公式和在水平荷载作用下的侧移计算公式。同时基于蒙皮理论分析了

20ft、40ft集装箱的单箱抗侧刚度，并利用位移协调和经典力学理论，推导出了单层多跨、多层单跨和多层多跨的集装箱房屋纵向刚度公式。

王化杰[18]等人以一个典型的集装箱建筑方案为基础，对其进行了六种不同结构方案的静力分析和抗震分析，研究了设置横梁立柱、辅助拉杆等构造措施对结构性能的影响。结果表明：该建筑体系对风荷载较为敏感，构件截面主要由风荷载控制，地震荷载不起控制作用。增加局部横梁立柱对结构的抗侧刚度影响不大，而增设辅助拉杆措施能有效的增加结构的抗侧刚度。

许剑武等人对集装箱建筑的抗侧刚度和多层多跨集装箱的传力机理进行了研究，推导出了底层和非底层箱体的抗侧刚度，用有限元分析软件分析了多层多跨集装箱，给出了多层多跨集装箱建筑队的设计准则[19]。左洋[20]等人对单体集装箱的抗侧刚度进行了理论模拟和试验研究，并将理论推导结果、有限元分析结果和试验结果进行了对比，得出了可靠的单体集装箱抗侧刚度值。

王璐璐[21]等人将废旧集装箱房屋的波纹板以单位波形为单位分割成为若干波纹板带进行简化，简化之后，波纹板带的抗弯刚度远小于抗剪刚度，于是将板带的抗剪刚度等效成抗弯刚度，并对抗弯刚度公式进行了修正，把一块波纹板等效成若干个柱子进行分析，得到了波纹侧板的水平刚度。

4. 集装箱建筑抗震性能影响因素

单个集装箱有很好的抗震性能，将单个集装箱拼装成集装箱建筑之后，集装箱建筑整体的抗震性能就由多个因素决定了。主要因素有：集装箱体骨架形式、集装箱体组合方式、节点连接形式等。

4.1. 箱体改造形式

通过给箱体增加竖杆、斜杆和横梁来提高单个箱体抗侧刚度和承载力，见图9所示。给箱体增加的竖杆类似于传统构造柱的作用，由于集装箱纵向跨度大，集装箱

侧梁的长细比很大，在地震作用下极易发生变形进入屈服。增设竖杆之后，增大了箱体的纵向刚度，使箱体有更好的整体性和稳定性。给箱体增加横梁和斜杆可以有效地增大箱体的抗侧刚度，增大箱体的水平承载力，使结构在水平地震作用下有很好的抗震性能。



图9 集装箱体骨架形式。

4.2. 箱体组合形式

图10是集装箱式房屋技术规程中给出的八种基本的箱体组合方式[22]。这八种箱体组合方式中抗震性能较好的是平行对接形式和平行叠加形式，抗震性能较差的是错位叠加形式和正交叠加形式。采用错位叠加形式和正交叠加形式时，上下层箱体之间的接触面积较小，底层

箱体受力面较小，上部荷载会集中分布在下层箱体部分构件上，导致下层箱体构件受力不均匀，容易产生应力集中使部分构件率先进去屈服。错位叠加形式和正交叠加形式还会引起结构的初始偏心，导致上下层箱体之间传力不清晰，使结构整体性较差，降低结构抗震性能。

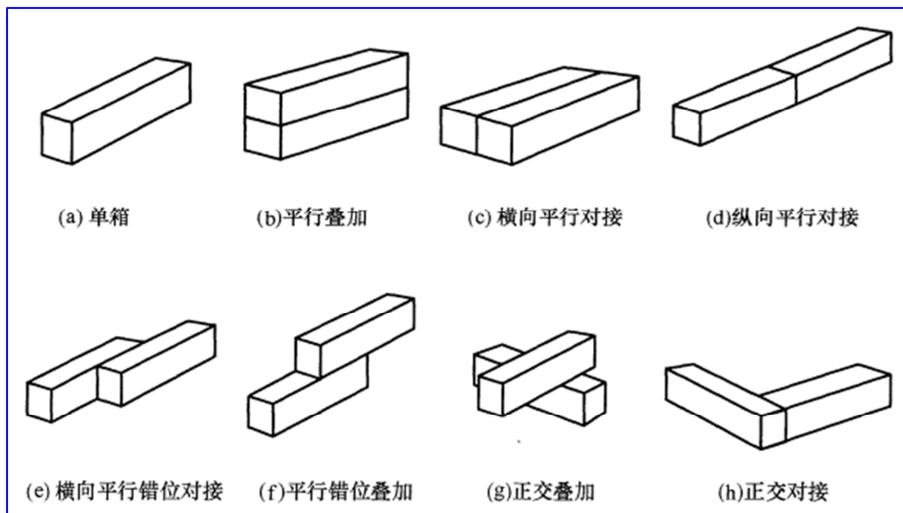
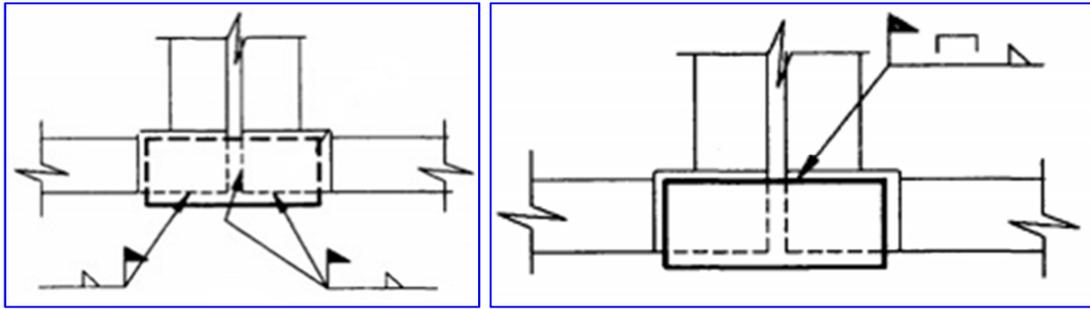


图10 集装箱体组合形式。

4.3. 节点连接形式

节点连接形式也是影响集装箱建筑抗震性能的关键因素之一。连接节点类似于人体的关节部位，采用合理的节点连接形式不仅可以增加结构整体性，而且可以使构件之间传力更清晰，增大结构承载力。现有的节点连接形式主要有：焊接连接、角件连接、螺栓连接和减震连接节点等。

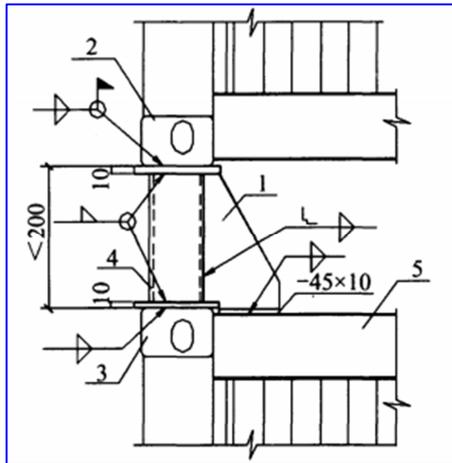
焊接连接。焊接连接是层数低、体量小的集装箱建筑采用较多的一种节点连接形式，图11是焊接连接节点的几种连接形式，主要包括：钢片焊接、直接焊接、短柱垫件焊接、H型钢垫件焊接。焊接连接节点具有构造简单，传力路径短，适用范围广，施工方便的优点。采用该节点的集装箱建筑不易拆卸、移动和回收利用，容易产生应力集中现象，因此该节点不适用于大体积，节点形式复杂且需要拆卸移动的建筑。



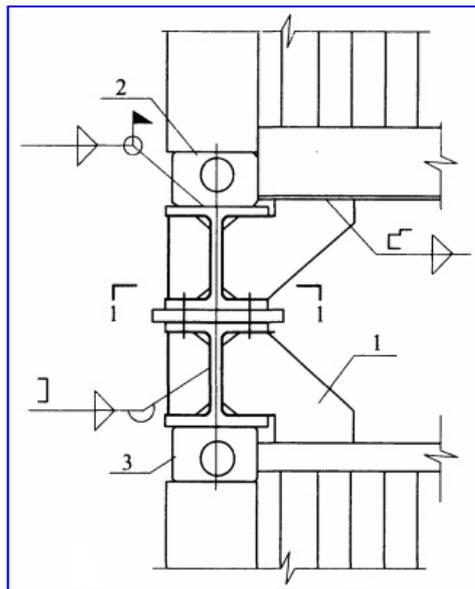
a) 钢片焊接



b) 直接焊接



c) 短柱垫件连接

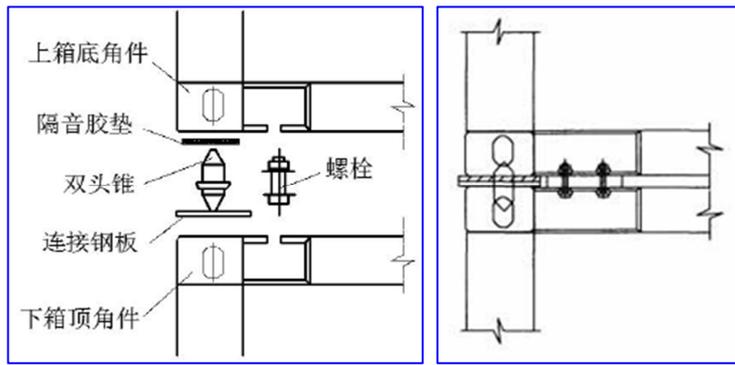


d) H型钢垫件连接

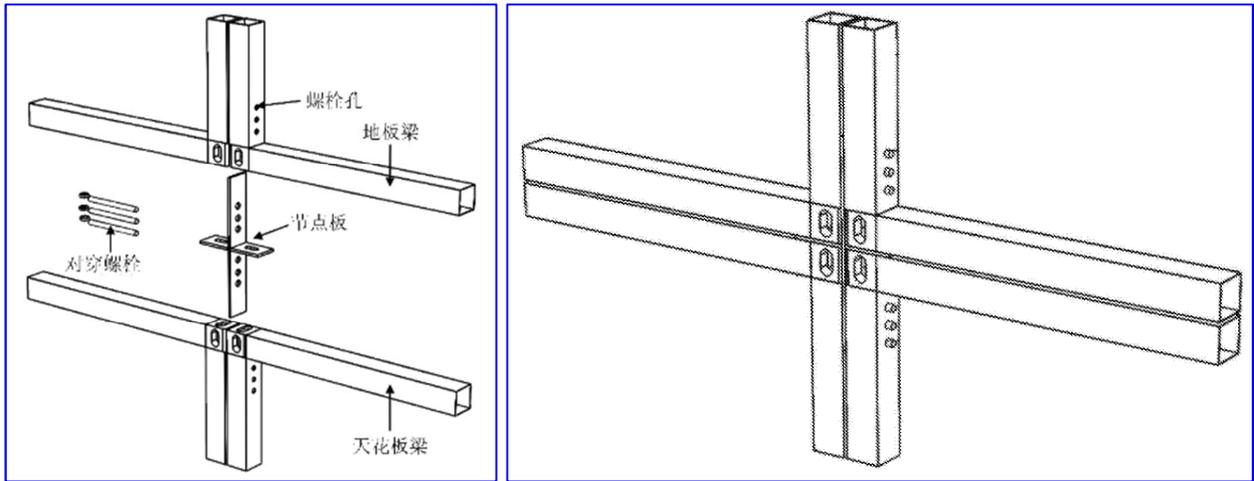
图11 焊接连接节点。

螺栓连接。采用螺栓连接节点实现全装配化，是今后集装箱建筑的发展趋势之一，也符合建筑工业化的要求。高强度螺栓具有良好的抗拉和抗剪性能，采用螺栓连接时，能很好的传递构件内力，增强结构整体性。同时采用螺栓连接能减小节点处的应力集中，降低施工误差带来的不利影响。图12a中是一种双头锥高强度螺栓连

接节点。角件处采用的是双头锥连接件，在插槽部位接上带螺栓孔的连接钢板，通过螺栓连接，此连接节点有较好的水平抗剪性能，但抗拉、抗扭性能较差。图12b是一种对穿式螺栓连接节点。采用在柱脚位置开螺栓孔的形式，通过十字形连接板用螺栓连接。集装箱角柱的截面形式复杂，强弱轴刚度比较大，构件承载力较差。



a) 高强度螺栓连接节点



b) 对穿螺栓连接节点

图12 高强度螺栓连接。

减震连接节点。近几年，自然灾害频发，造成了巨大的人员伤亡和经济损失，在这样的背景下，如何提高集装箱建筑的抗震性能，增强结构承载力也是今后研究的热点之一。图13是一种集装箱建筑装配式减震连接节点。该连接节点引入了传统的减隔震技术，中间的节点连接件采用隔震支座，通过改造隔震支座连接板来实现螺栓连接。集装箱建筑属于轻钢结构，质量较轻，因此

一般所采用的隔震支座尺寸较小，导致施工操作空间有限，不利于现场施工。该连接节点的开螺栓孔套件构造形式复杂，需要较高的加工精度，同时对施工工艺要求也较高，还需要进一步的设计优化，简化节点连接构造。隔震支座具有良好的抗压性能，但抗剪、抗拉性能较差，结构水平位移过大容易引起支座破坏，将隔震支座应用到集装箱建筑中还需要进行更深入的理论和试验研究。

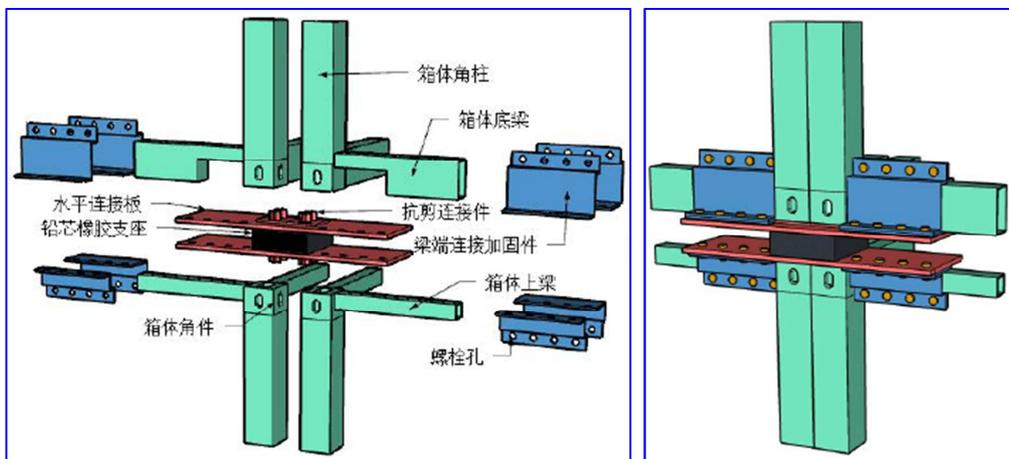


图13 装配式集装箱建筑减震连接节点。

5. 现有研究中集装箱建筑存在的优势与不足

5.1. 集装箱建筑的优点

- (1) 安全性强, 牢固耐用。集装箱作为一种货运载体, 全部由钢质组成, 抗变形能力比较好, 抗震性能比较好。
- (2) 符合模数化、标准化要求, 适应工业建筑发展要求。1970年, 国际标准化组织 (ISO) 确定了集装箱的全球统一标准, 统一了集装箱的尺寸。因此, 集装箱作为建筑基本模块时, 标准化程度高, 可实现全装配式。
- (3) 施工方式简单, 施工周期短, 施工速度快, 可实现全机械化施工, 施工人数少, 可节约人工成本。
- (4) 灵活性强, 移动方便。首先集装箱作为运输工具, 在运送上极为方便、简单。其次集装箱建筑没有场地条件的限制, 可以在任何地方进行快速建造或拆卸。
- (5) 节能减材, 低碳环保。集装箱可在工厂内完成加工改造, 在施工现场只需简单的拼装即可, 不会产生建筑垃圾, 减少了环境污染和噪音, 是现在国际公认的环保建筑材料。
- (6) 环境适应性强。配合着一些特殊材料, 可适应防腐蚀、耐高温、耐低温等极端恶劣环境。
- (7) 可回收利用, 成本低。集装箱建筑的箱体大部分是二次利用, 属于材料回收, 可当作可持续资源利用。同时集装箱属于现成的建筑材料, 无需经过复杂的加工, 可直接投入使用。
- (8) 空间开放强, 可自由调整。集装箱建筑的空间开放性强, 建筑结构与功能可按照使用者本身的要求进行自由调整和使用。

5.2. 现有研究中存在的不足

- (1) 对于多层集装箱建筑的抗震性能研究不充分。在地震作用下, 箱体之间容易发生错动和碰撞, 引起主要结构构件的损坏, 导致整体结构的倒塌。现有技术规程中也规定了应用于八度区以上的地区, 需要采用特殊的构造措施以满足抗震设计要求。
- (2) 节点连接形式有限。现有研究中, 对集装箱建筑连接节点的研究不多。大体量的集装箱建筑对连接节点的设计要求很高, 节点设计的质量直接影响着集装箱建筑的传力性能和抗震性能。
- (3) 现行结构设计软件对集装箱建筑不适用。由于集装箱构件种类多, 构件截面形式复杂, 现行结构设计软件 (如PKPM、YJK) 中并没有对应的构件截面, 不利于建模。目前采用的方法大多是将构件截面转化成常规截面形式, 这种简化方法的准确性有待验证。
- (4) 耐火、耐腐蚀性能不好。集装箱建筑属于轻钢结构, 大体量的集装箱建筑的防火设计要求高, 应

用于特殊环境的集装箱建筑需要对箱体改造以适应环境要求。

6. 研究结论

针对新冠肺炎的传播速度更快、隐匿性更强、传染性更强的普及特点, 国家卫生健康委医政医管局在2022年3月22日的发布会上指出, 国务院联防联控机制综合组要求每个省份至少有两到三家方舱医院, 本文在结合模块化集装箱式医院展开了研究。

- (1) 讨论了模块化集装箱建筑应用的主要领域, 有灾后应急性建筑、酒店办公类建筑、教育商业类建筑。
- (2) 总结了集装箱建筑的国内外研究现状。
- (3) 总结了集装箱建筑抗震性能影响因素, 主要有集装箱体改造、集装箱体组合方式、节点连接形式。
- (4) 现有研究中集装箱建筑存在的优势与不足, 提出展望: 如果能对集装箱建筑的抗震性能研究进行充分的研究并有可靠措施, 提高耐火、耐腐蚀性能的前提下模块化集装箱将是很好的推广对象。

致谢

中建集团科研项目《防疫医疗建筑及配套快速建造技术集成》(cscec5b-2020-11)。

参考文献

- [1] 崔立勇. 废旧集装箱: 不进钢厂变身住房 [N]. 中国经济导报, 2009-12-26 (2).
- [2] 佚名. 马士基捐建亚洲首座集装箱中学 [J]. 集装箱化 (11期): 10-10.
- [3] 萧素芳. 英雄城市聚英雄——火神山医院建设纪实 [J]. 建筑, 2020.
- [4] 叶景荣. 钢结构模块建筑梁柱节点抗震性能研究 [D]. 2019.
- [5] John M. DiMartino. Modular container building system: US 1986.
- [6] Clark P C. Method for converting one or more steel shipping containers into a habitable building at a building site and the product thereof [J]. 1989.
- [7] Kronenburg R. Portable architecture [M]. Routledge, 2003.
- [8] Dillashaw C. Shipping Container Homes: "For Beginners" [M]. North Charleston: Create Space Independent Publishing Platform, 2015.
- [9] Børvik T, Hanssen A G, Dey S, et al. on the Ballistic and Blast Load Response of a 20ft ISO Container protected with Aluminium Panels Filled with a Local Mass-Phase I: Design of Protective System [J]. Engineering Structures, 2008, 30 (6): 1605-1620.

- [10] Lee, Ja Yeun, Potangaroa, Regan. Architecture for humanity: Shipping containers as Swiss Army knife [J]. Ja Yeun Lee & Regan Potangaroa, 2010.
- [11] Marcia Mattson. UNF Students Building New Homes From Old Containers [J].
- [12] Hong S G, Cho B H, Chung K S, et al. Behavior of framed modular building system with double skin steel panels [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67 (6): 936-946.
- [13] Kevin Giriunas, Halil Sezen, Rebecca B. Dupaix: Evaluation, modeling, and analysis of shipping container building structures. In: Engineering Structures Volume 43, October 2012, Pages 48-57.
- [14] Eom H S. Container house having structural stability [P].
- [15] 柏庭卫, 顾大庆, 胡佩玲. 香港集装箱建筑 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [16] 纪尚志, 孙维琛, 刘渊博. 集装箱建筑的应用与探索——从青岛积米崖渔人码头概念规划说起 [J]. 青岛理工大学学报, 2009, 29 (01): 35-39.
- [17] 黄科. 集装箱房屋市场方兴未艾 [J]. 集装箱化, 2009, 20 (02): 28-31.
- [18] 王化杰, 李洋, 雷炎祥, 白樵, 范峰, 钱宏亮. 装配式集装箱结构体系优化及节点性能 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49 (06): 117-123.
- [19] 许剑武, 秦卫红, 赵晶晶, 张同庆, 解鹏. 集装箱模块化建筑的抗侧刚度和设计原则 [J]. 建筑结构, 2020, 50 (07): 86-92
- [20] 左洋. 集装箱结构抗侧刚度理论模拟和试验研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2016.
- [21] 王璐璐. 基于建筑和结构安全统一的废旧集装箱改造房构造的研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- [22] 广东省标准, DBJ/T 15-112-2016, 集装箱式房屋技术规程 [S]. 广东省住房和城乡建设厅, 2016. 3.

作者简介

陈兆荣, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事复杂建筑结构分析及工程建设工作。