

Analysis on Seismic Performance of Prefabricated Building Box Formwork Combination

Zeng Changluo, Chen Zhaorong, Cai Zhili, Liao Fei, Yang Tao

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

Email address:

chenzhaorong1987@qq.com (Chen Zhaorong)

To cite this article:

Zeng Changluo, Chen Zhaorong, Cai Zhili, Liao Fei, Yang Tao. Analysis on Seismic Performance of Prefabricated Building Box Formwork Combination. *Science Discovery*. Vol. 11, No. 2, 2023, pp. 41-49. doi: 10.11648/j.sd.20231102.13

Received: February 9, 2023; **Accepted:** March 27, 2023; **Published:** March 31, 2023

Abstract: The outbreak of novel coronavirus pneumonia since the end of 2019 has posed a great challenge to the world's public health security. According to the statistics of COVID-19 epidemic released by the World Health Organization, the global epidemic has accumulated more than 500 million infections and more than 6.2 million deaths. However, if all hospitals at all levels are changed to designated hospitals, it may cause a run on medical resources. Container building has the advantages of simple construction, short construction period, recyclability and cost saving, and can be effectively used in the rapid transformation of talent apartment buildings and general wards into designated hospitals for efficient use. During the COVID-19, Wuhan Huoshen Mountain Hospital and Leishen Mountain Hospital adopted the container structure design, which is similar to Lego, combining containers one by one, giving full play to the advantages of container buildings. However, the current container building code stipulates that container buildings are only applicable to low and multi-storey buildings with six floors or less. In order to improve the seismic performance of container buildings and expand the application scope of container buildings, this paper proposes a box form composite structure based on traditional containers. Through the analysis of mechanical performance parameters, it is concluded that the "strong column and weak beam" yield mechanism of the box form composite structure is good, The initial rigidity of the weak axis is 133% higher than that of the traditional container structure, the yield strength is about 3 times that of the traditional container structure, and the ultimate bearing capacity is 2.5 times higher than that of the traditional container structure.

Keywords: Container Building, Box Mold Combined Structure, Seismic Performance, Strong Column and Weak Beam

关于装配式建筑箱模组合的结构抗震性能分析

曾常洛, 陈兆荣, 蔡志立, 廖飞, 杨涛

中建五局第三建设有限公司, 长沙, 中国

邮箱

chenzhaorong1987@qq.com (陈兆荣)

摘要: 自2019年底爆发的新型冠状病毒肺炎疫情令世界公共卫生安全面临极大挑战, 据世界卫生组织发布的新冠疫情统计数据, 全球疫情累计超5亿例感染, 累计死亡超620万人。但若将各级医院全部改为定点医院, 可能会造成医疗资源挤兑。集装箱建筑具有施工简单, 施工周期短, 可回收利用, 节约成本等优点, 可有效应用于将人才公寓楼以及普通病房快速改建成为定点医院中进行高效使用。在新冠疫情期间, 武汉市的火神山医院与雷神山医院就采用集装箱结构设计, 类似于乐高, 将一个个集装箱拼砌起来, 充分发挥了集装箱建筑的优势。但现行集装箱建筑规范规定集装箱建筑只适用于六层及六层以下的低、多层建筑, 为了提高集装箱建筑的抗震性能, 扩大集装箱建筑的应用范围, 本文在传统集装箱的基础上提出了一种箱模组合结构, 通过力学性能参数分析, 得出箱模组合结构的“强柱弱梁”屈服机制良好, 弱轴初始刚度较传统集装箱结构增大了133%, 屈服力大约是传统集装箱结构的3倍, 极限承载力较传统集装箱结构提高了2.5倍。

关键词：集装箱建筑，箱模组合结构，抗震性能，强柱弱梁

1. 引言

自2019年底爆发的新型冠状病毒肺炎疫情令世界公共卫生安全面临极大挑战，据世界卫生组织发布的新冠疫情统计数据显示，全球疫情累计超5亿例感染，累计死亡超620万人。但如若将各级医院全部改为定点医院，可能会造成医疗资源挤兑[1]。集装箱建筑具有施工简单，施工周期短，可回收利用，节约成本等优点，可有效应用于将人才公寓楼以及普通病房快速改建成为定点医院进行高效使用。在新冠疫情期间，武汉市的火神山医院与雷神山医院就采用集装箱结构设计，类似于乐高，将一个集装箱拼砌起来，充分发挥了集装箱建筑的优势[2-5]。但传统装配式集装箱建筑如外柱式、内柱式、折叠式、薄壳式、开顶式等[6]，在外荷载作用下，集装箱的竖向构件会产生较大的内力，其截面尺寸较小，易出现强度和刚度超出规

范限值的情况。为提高装配式集装箱建筑的安全性，本文提出了一种模块化集装箱的箱模组合结构体系。

2. 箱模组合结构体系

框架结构是由许多梁和柱共同组成的框架来承受房屋全部荷载的结构。本文将此种结构运用进来，外部采用框架柱和框架梁构成，内部采用模块化集装箱，受力等价于外框内箱结构，下文统一以外框内箱结构代替。如图1(a)所示。外框梁的跨度和进深都由集装箱尺寸确定，外框梁柱的设计满足现行设计规范要求。模块化集装箱通过角件与外框梁连接，连接的形式如图1(b)所示。通过该种连接可使每个模块化集装箱的内力先由箱体的柱传递到外框梁上，再传递到外框柱，可避免传统集装箱结构在地震和竖向荷载作用时，出现竖向构件与水平构件的承载力和刚度[7-10]不足的问题，从而提高模块化集装箱建筑的适用性。

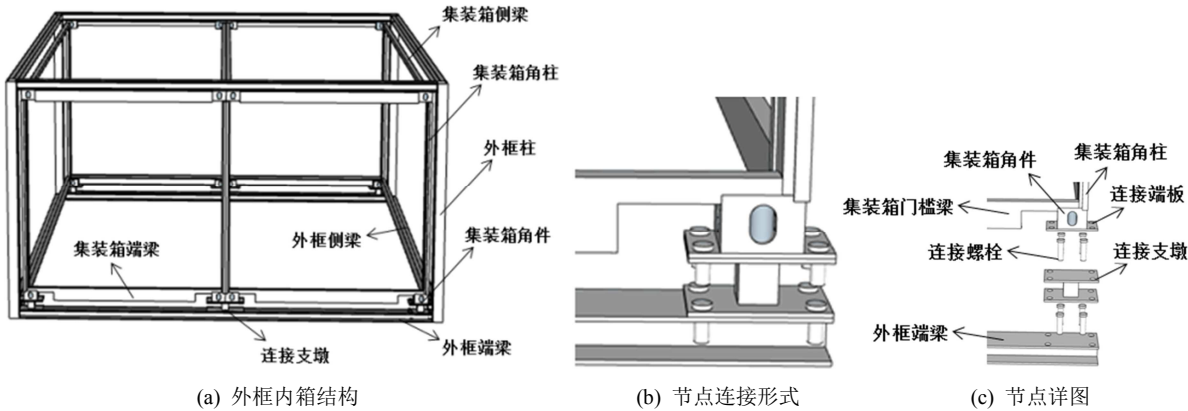


图1 外框内箱结构体系。

3. 模型建立与验证

3.1. 模型概况

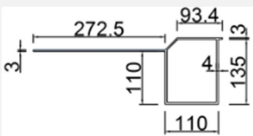
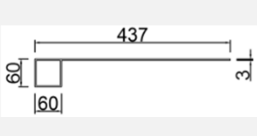
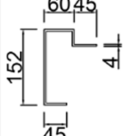


本文重点对两层传统集装箱结构和外框内箱结构进行数值仿真分析，考虑到实际使用，使用四层集装箱作为其上堆载的荷载，建立六层有限元模型。模型中的集装箱采用20ft的国际标准集装箱[11]，六层双跨搭接，传统集装箱结构的宽度约为4.876m，长度约为6.058m，层高约为

2.591m，总高约为15.546m。外框内箱结构的宽度约为5.216m，长度约为6.058m，层高约为2.791m，总高约为16.796m。

20ft集装箱构件包括：角件、前角柱、后角柱、上侧梁、下侧梁、底梁、门楣、上端梁、下端梁、侧壁板、箱顶板、端壁板。各构件的截面尺寸依据现有集装箱建筑规程中提供的具体细部尺寸和截面参数，具体见表1，外框柱采用截面为300*300*10mm的方钢管，外框梁采用截面为150*200*10*10mm的H型钢。

表1 集装箱有限元模型构件表

构件名称	前角柱	后角柱	上侧梁	下侧梁	底梁	角件
截面尺寸 (mm)						

构件名称	门楣	上端梁	下端梁	端板	侧板
截面尺寸 (mm)					

3.2. 材料模型与单元

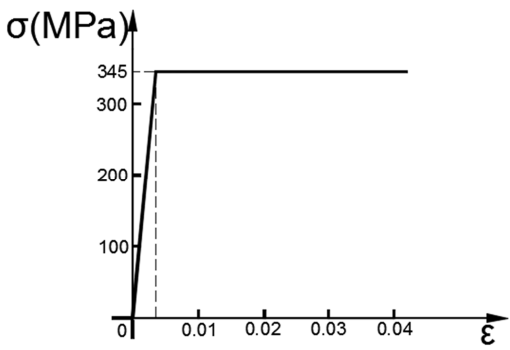


图2 Q345钢材本构模型

集装箱各构件及外框梁、柱均采用Q345钢材。钢材密度为7850kg/mm³。材料的弹性模量为206000N/mm²，泊松比为0.3，屈服强度为345MPa，结构阻尼取0.04。

钢材的本构模型采取理想弹塑性模型，本构模型如图2所示。

有限元模型中的角件采用实体单元，其余构件均采用壳单元，角件的单元网格大小是20mm，其余构件的单元网格大小是140mm。实体单元的单元类型采用C3D8R，壳单元的单元类型采用S4R。

3.3. 边界条件

由于在实际中除门之外的集装箱其他构件之间均是焊接或者是刚接，所以各构件之间的相互作用均设置为刚接。由于集装箱门与箱体的连接形式为铰接，因此在模型建立中没有考虑集装箱门的影响[12]。内部集装箱上、下角件与外框上、下端梁的相互作用设置为刚接。外框内箱主体结构在底部外框柱（传统集装箱结构在底部角件处）设置为刚接。



图3 集装箱门实物图。

4. 加载制度

4.1. 竖向荷载

竖向荷载仅考虑结构自重和楼面荷载。给结构直接施加一个重力荷载，同时根据现行设计规范的要求，给集装箱底梁施加0.04Mpa的均布荷载。

4.2. 水平荷载

在水平方向对两个结构模型进行位移加载，位移加载模式采用单调加载和低周往复加载，加载点位于顶部四个角件和顶部四个外框柱的中心，加载方向分别沿横轴和纵轴单向加载。低周往复的位移加载制度如表2所示，每级循环1圈。

表2 水平加载制度。

模型类别	单调加载	低周往复加载
传统集装箱结构	535mm	32mm, 64mm, 162mm, 320mm, 535mm
层间位移角	1/30	1/500, 1/250, 1/100, 1/50, 1/30
外框内箱结构	595mm	35mm, 70mm, 180mm, 355mm, 595mm
层间位移角	1/30	1/500, 1/250, 1/100, 1/50, 1/30

4.3. 模型验证

对单个20ft的国际标准集装箱进行了水平加载，提取加载点的力和位移，与文献[13-17]的理论分析结果和试验结果进行对比，对比结果见表3和图4。通过对比结果可以看出：抗侧刚度与理论和试验分析结果比较吻合，可验证模型是准确的。

表3 模型参数对比。

有限元模型 (KN/mm)	理论结果 (KN/mm)	试验结果 (KN/mm)	与理论结果对比 (%)	与试验结果对比 (%)
56.22	61.09	58.51	8.66	4.07

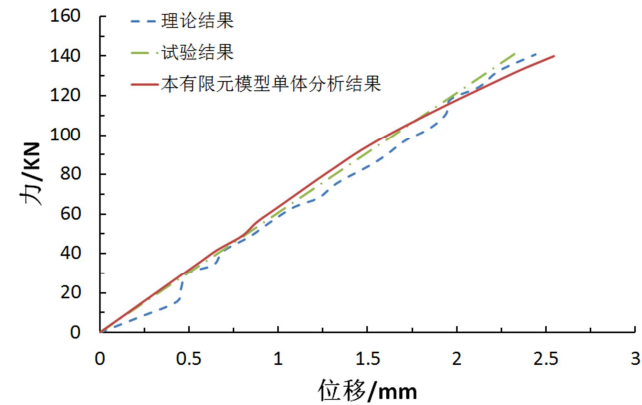


图4 力-位移曲线。

5. 分析结果

5.1. 单调水平加载

对两个模型进行单调水平加载，得到了传统集装箱结构和外框内箱结构强轴和纵轴的mise应力云图，如图5所示。传统集装箱结构的应力主要集中在底层，底层角柱、角件、底侧梁、靠近角柱的波纹板均屈服，底层角柱发生失稳并伴随明显的面外变形，上部的集装箱没有出现较大的应力，均处于弹性阶段。外框内箱结构的应力分布较为均匀，底层外框柱底部达到了屈服强度，上部结构的应力没有到达屈服强度，均处于弹性阶段。从整体看，外框内箱结构的应力分布较传统集装箱结构的应力分布更合理，没有出现明显的薄弱层。

现有《集装箱式房屋技术规程》DBJ/T 15-112-2016规定[18]：集装箱房屋层数不宜超过六层，高度不宜超过24m。限制集装箱房屋建筑高度的主要因素就是多高层集装箱房屋的集装箱角柱承载力不足，在地震作用下很容易由于承载力的不足发生屈曲失稳。鉴于此，对两个模型的角柱进行承载力验算。

底层角柱稳定承载力[19-20]计算：

$$\begin{aligned} K_1 &= 0.135, K_2 = 10 & (1) \\ \mu &= \sqrt{\frac{1.6+4(K_1+K_2)+7.5K_1K_2}{K_1+K_2+7.5K_1K_2}} = 1.61 & (2) \\ N_{cr} &= \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} = 160.78KN & (3) \end{aligned}$$

式中： K_1 为角柱与上端梁的线刚度比， K_2 为角柱与下端梁的线刚度比， μ 为角柱的计算长度系数， E 为构件的弹性模量， I 为构件的截面惯性矩， l 为构件长度， N_{cr} 为构件的临界承载力。

通过提取出角柱压应力，反推出角柱轴力，发现在强轴加载的传统集装箱结构位移达到162mm时，角柱的压应力就达到了屈服强度，角柱开始发生面外失稳。外框内箱结构中集装箱角柱没有达到屈服强度，其极限承载力由外框构件决定，外框梁、柱的截面、尺寸和强度直接影响着主体结构的承载力。

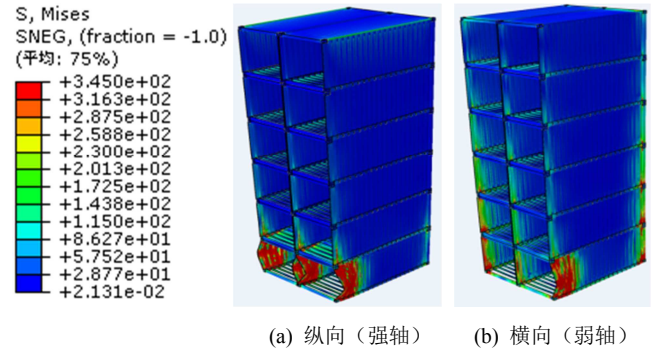


图5 传统集装箱结构在单调水平加载下的mise应力云图。

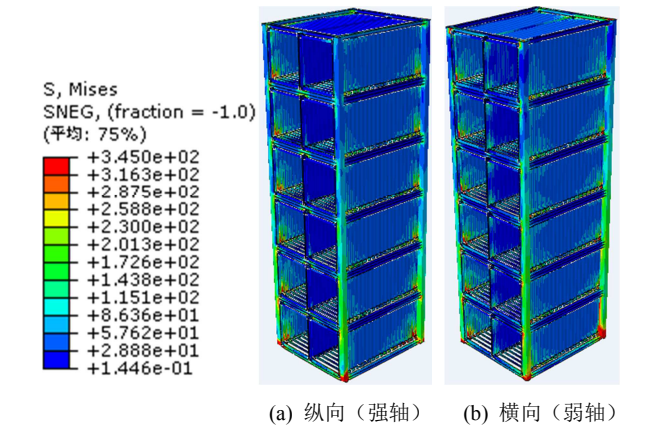


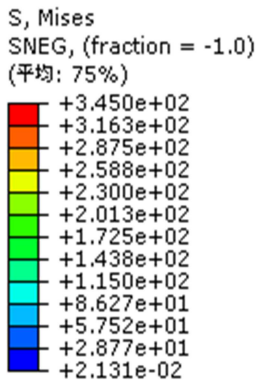
图6 外框内箱结构在单调水平加载下的mise应力云图。

5.2. 低周循环往复加载

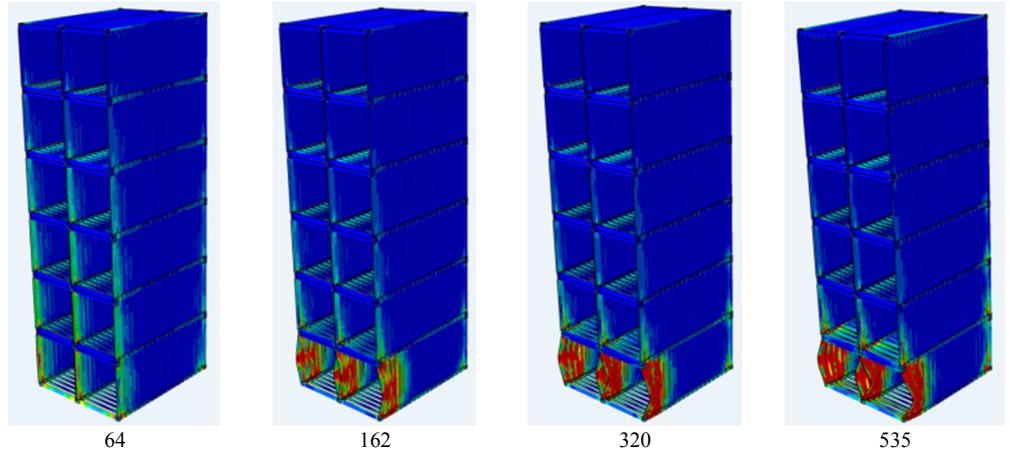
对两个模型进行低周循环往复加载，以模拟其在地震作用下的力学性能，得到了两种模型的mise应力云图，如图7(a)所示。纵向加载的传统集装箱结构在加载位移达到162mm时，底层的角柱和靠近角柱的波纹板开始进入屈服状态，应力达到了屈服应力345Mpa。在加载位移达到

535mm时, 底层角柱、底侧梁、靠近角柱的波纹板发生了明显的面外失稳, 和单调加载的破坏模式基本相同。横向加载的传统集装箱结构在加载位移达到162mm时, 底层波纹板应力达到了屈服强度的60%, 在加载位移达到320mm时, 底层角柱和靠近角柱的波纹板开始进入屈服状态。加载到535mm时, 构件开始发生面外变形, 出现失稳破坏。横向和纵向加载的外框内箱结构在180mm的加载位移时, 构件均处于弹性状态, 最大应力出现在外框柱, 应力约为175MPa。在加载位移达到355mm时, 外框柱底端达到屈服强度345Mpa, 没有发生失稳。表4是两种结构模型的层

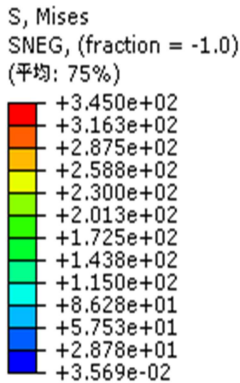
间位移, 可以看出外框内箱结构的集装箱层间位移要小于传统集装箱结构的层间位移, 说明外框结构能有效的减小内部集装箱的层间变形。外框内箱结构的箱体层间位移在每个位移级数下相差不大, 表明外框内箱结构有较好的整体性, 内部集装箱跟着主体结构一起变形。从整体上看, 传统集装箱结构的应力主要集中在底层, 角柱较早就进入屈服, 发生失稳破坏, 进而整体丧失承载力。外框内箱结构的应力分布均匀, 由下至上依次递减, 内部集装箱给外部主体结构提供附加刚度, 使整体结构有更好的变形耗能能力。



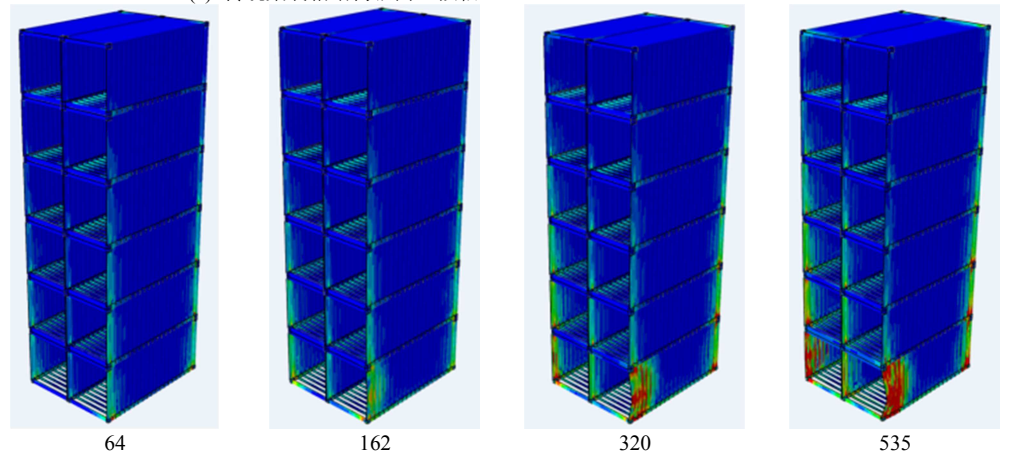
加载位移 (mm)



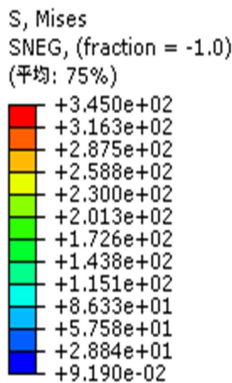
(a) 传统集装箱结构纵向 (强轴)



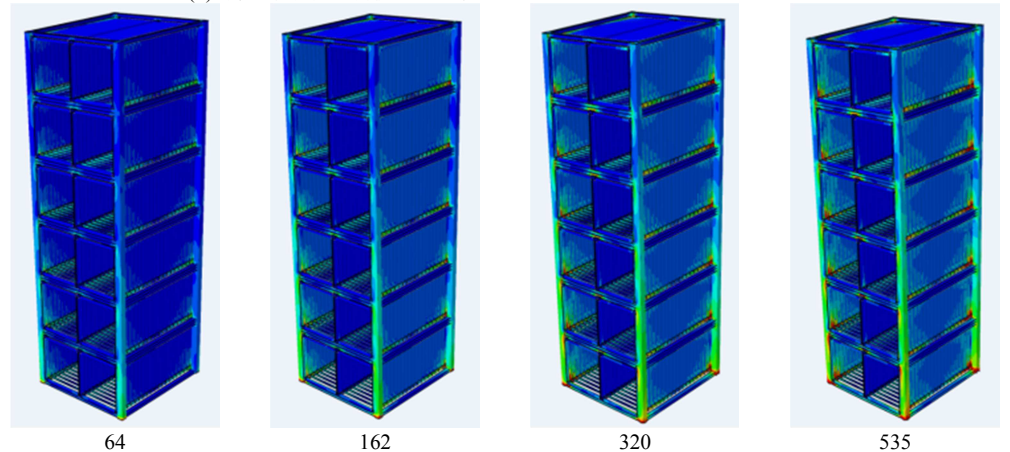
加载位移 (mm)



(b) 传统集装箱结构横向 (弱轴)



加载位移 (mm)



(c) 外框内箱结构纵向 (强轴)

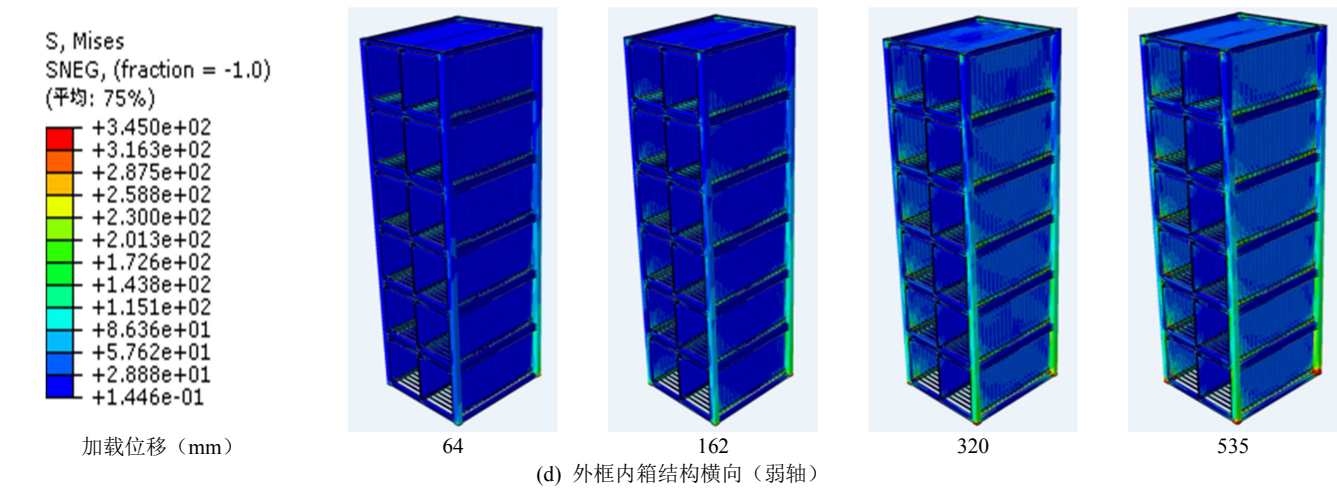


图7 低周循环往复加载下的mise应力云图。

表4 加载位移下的集装箱层间位移。

(a) 传统集装箱结构(mm)

强轴					弱轴				
层数 \ 位移	64	162	320	535	层数 \ 位移	64	162	320	535
1层	7.48	16.28	29.77	47.66	1层	4.8	13.63	28.23	42.85
2层	9.33	28.52	58.85	99.57	2层	8.94	24.60	46.17	75.68

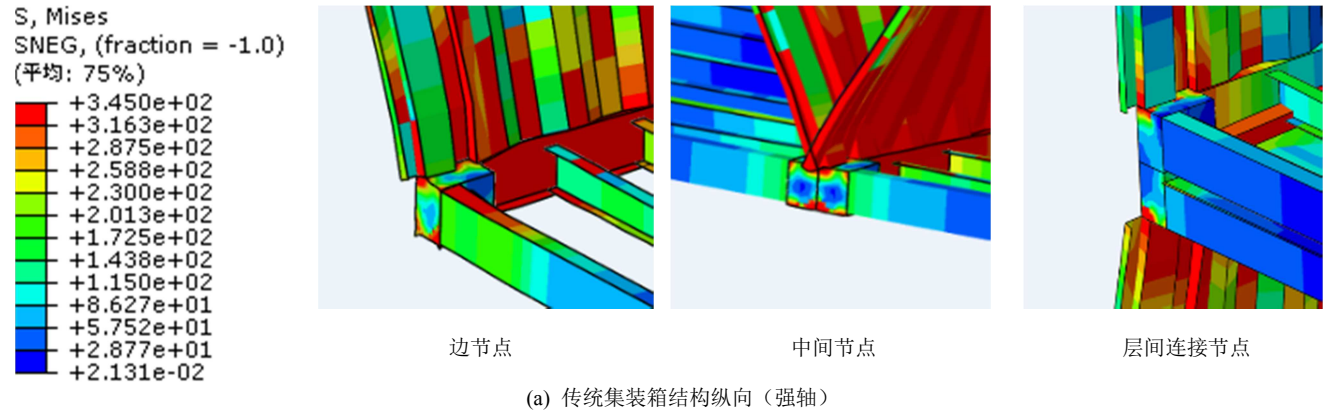
(b) 外框内箱结构(mm)

强轴					弱轴				
层数 \ 位移	70	180	355	595	层数 \ 位移	70	180	355	595
1层	7.19	21.49	46.76	86.16	1层	8.28	23.51	50.63	93.34
2层	8.69	22.92	47.32	84.87	2层	10.30	25.32	50.69	89.27

5.3. 节点分析

分别选取两种模型在低周往复加载下的节点mises应力云图，分析节点的应力分布情况，如图8所示。从分析结果可以看出，传统集装箱结构节点部位的底端横梁、底侧梁、角柱和靠近角柱的波纹板均达到了材料的屈服强度，角件处出现明显的应力集中现象，波纹板发生面外鼓曲，角柱产生面外失稳。传统集装箱结构的应力主要集中在角柱上，导致柱先于梁进入屈服状态，出现“强梁弱柱”的情

况。外框内箱结构连接节点在外框梁上的应力要大于外框柱上的应力，梁会先于柱进入屈服状态，出现塑性铰，实现“强柱弱梁”的要求。在加载位移为162mm时，传统集装箱结构构件的最大应力达到了345Mpa，外框内箱结构构件的最大应力大约是屈服应力的50%，传统集装箱结构节点区应力比外框内箱结构节点区应力要大，这是由于外框内箱结构每一层的集装箱荷载直接传递到外框梁上，不再向下一层的集装箱传递，从而就会减小下部集装箱构件内力，实现了“强节点”的要求。



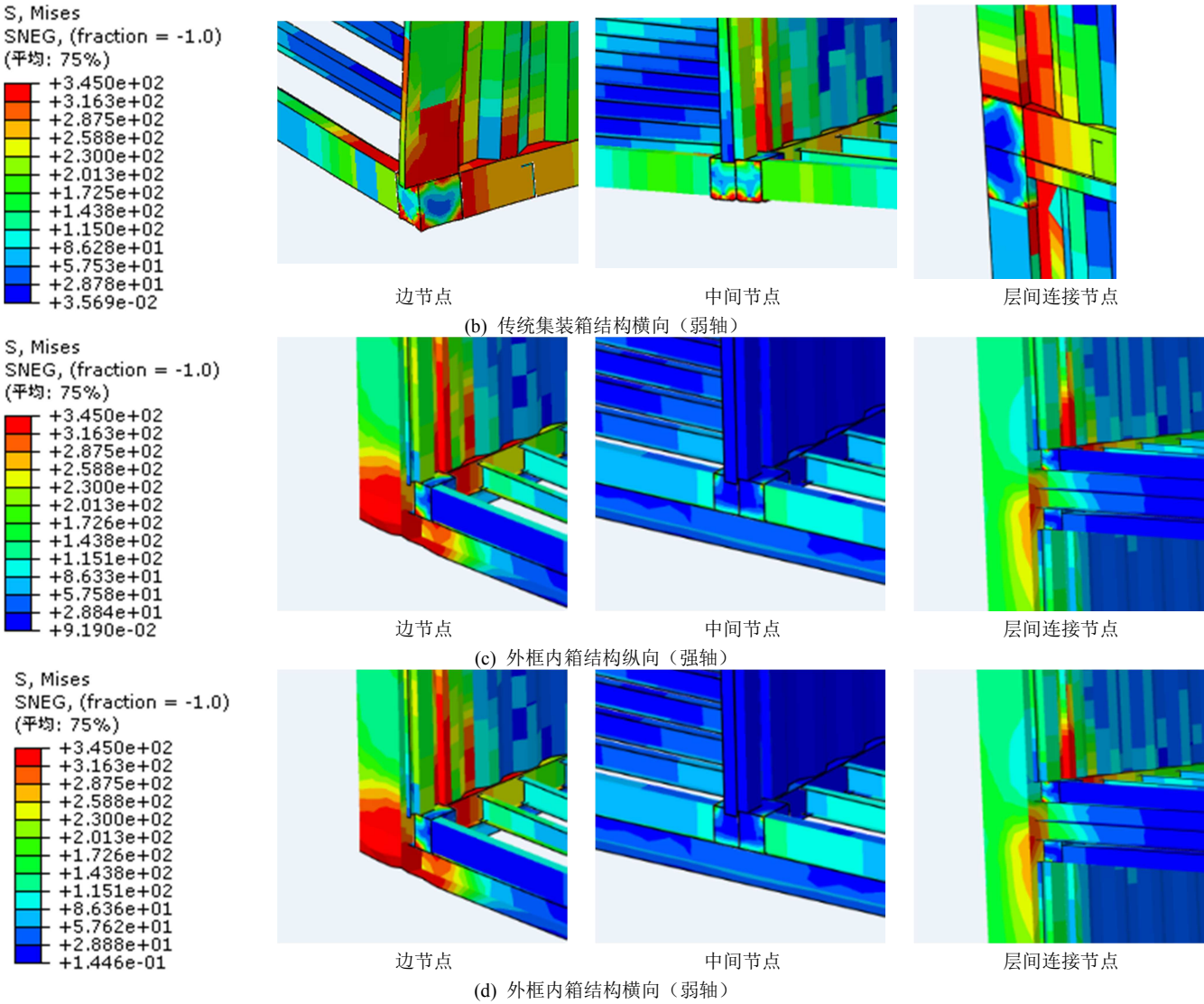


图8 低周循环往复加载下的节点mise应力云图。

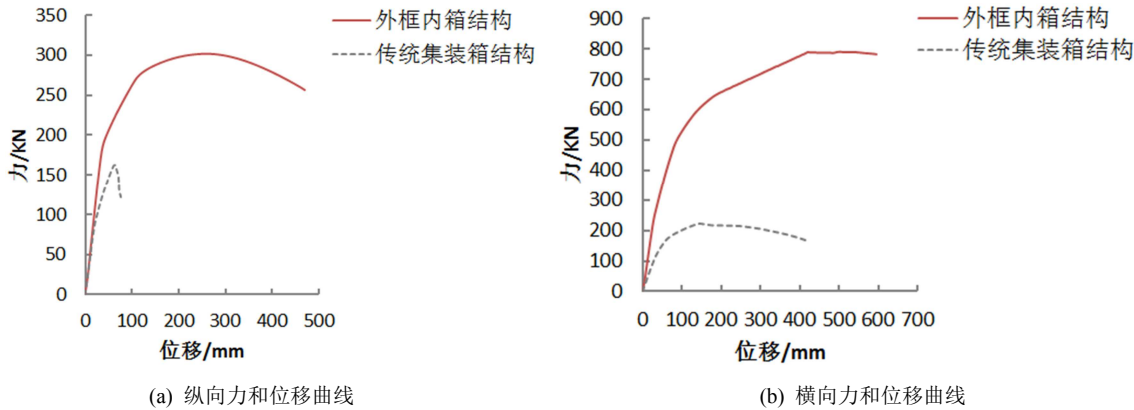


图9 单调加载的力和位移曲线。

5.4. 力学性能参数分析

单调加载下，结构的力和位移曲线，如图9所示。纵向单调加载的传统集装箱结构和外框内箱结构的屈服前刚度基本一致，在位移到达61mm时，传统集装箱结构进入屈服

阶段。在位移到达72mm时，承载力下降到极限承载力的85%。而外框内箱结构在位移加载至240mm时，结构开始进入屈服阶段，在位移达到470mm时，结构的水平承载力下降到极限承载力的85%。横向单调加载的传统集装箱结构的屈服前刚度明显小于外框内箱结构的屈服前刚度，在位移为140mm时，

传统集装箱结构进入屈服阶段。外框内箱结构在位移为420mm时，水平承载力达到峰值787kN。两种模型的横向水平承载力在达到峰值之后，结构没有出现明显的刚度退化现象。从力和位移曲线看出，传统集装箱结构的极限承载力不高，这主要是由于集装箱角柱的强弱轴刚度比相差较大，角柱在受外荷载作用时，容易沿弱轴方向发生失稳破坏，导致整体结构丧失承载力。而外框内箱结构通过合理设计，不会出现上述问题，保证结构具有足够的延性。

对两种结构进行低周循环往复加载，得到两种结构的滞回曲线，如图10所示。传统集装箱结构的滞回环包络面积很小，反映出传统集装箱结构在地震作用下的耗能能力有限，传统集装箱结构的底层角柱在外荷载作用下发生失稳的脆性破坏，导致结构主体直接丧失承载力。外框内箱结构的滞回曲线饱满，滞回曲线包络面积较大，这说明外框内箱结构具有良好的耗能能力。

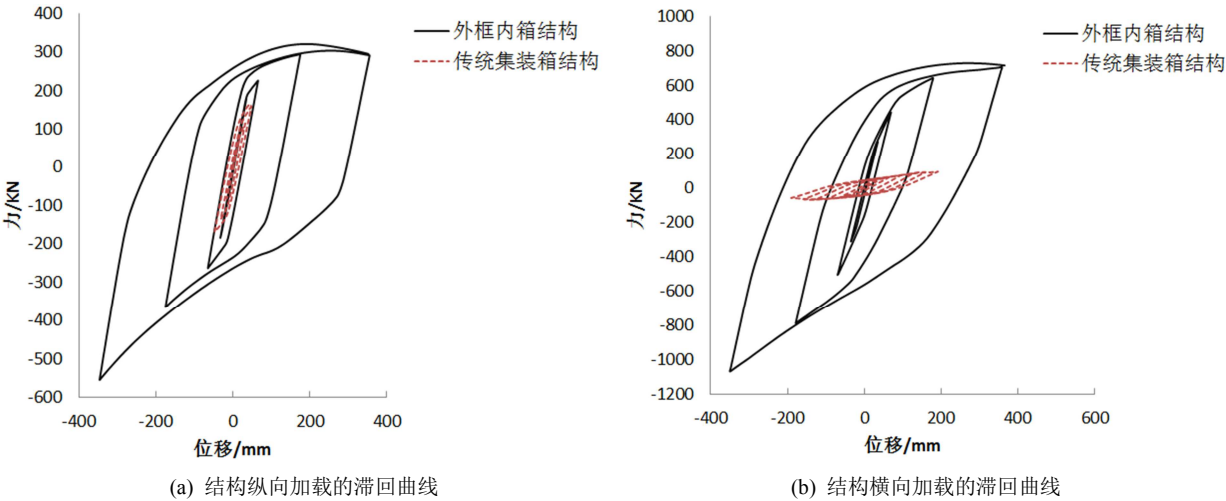


图10 结构滞回曲线。

骨架曲线反映出了结构在各个不同受力阶段的结构特性，通过结构的滞回曲线得出了两种结构的骨架曲线，如图11所示。通过骨架曲线得到结构的性能参数，如表5所示。通过等效弹塑性屈服法得到结构的屈服位移，外框内箱结构的初始刚度、屈服力、屈服位移以及极限承载力均要好于传统集装箱结构，外框内箱结构的弱轴初始刚度

较传统集装箱结构增大了133%，屈服力大约是传统集装箱结构的3倍，极限承载力较传统集装箱结构提高了2.5倍。传统集装箱结构与外框内箱结构强轴的初始刚度相差不多，但外框内箱结构的屈服力和极限承载力大约是传统集装箱结构的2倍。对比可以看出外框内箱结构有更好的安全储备系数和结构承载能力。

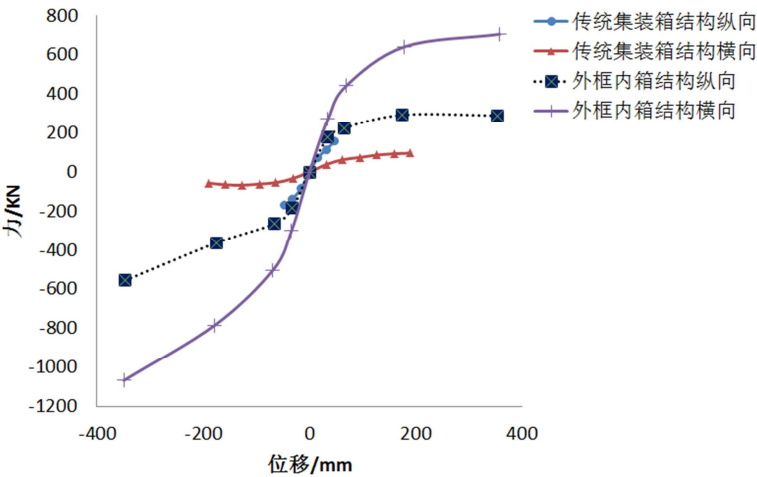


图11 两种结构的骨架曲线。

表5 结构性能参数。

结构	初始刚度 (kN/mm)	屈服力 (kN)	屈服位移 (mm)	极限承载力 (kN)	破坏承载力 (kN)	延性系数
传统集装箱结构（强轴）	4.54	110.23	30.26	162.24	137.91	2.58
传统集装箱结构（弱轴）	3.51	168.33	60.44	221.81	188.54	5.96
外框内箱结构（强轴）	5.13	206.31	50.82	301.23	256.05	9.25
外框内箱结构（弱轴）	8.19	506.48	90.17	788.85	670.52	6.60

6. 结论

本文传统集装箱的基础上提出了一种外框内箱结构,通过力学性能参数分析,对传统集装箱结构和外框内箱结构进行了单调水平加载和低周循环往复加载,主要结论如下:

- (1) 由于集装箱角柱的强弱轴刚度比相差较大,角柱在受外荷载作用时,容易沿弱轴方向发生失稳破坏,导致整体结构丧失承载力。传统集装箱结构的极限承载力不高而外框内箱结构通过合理设计,不会出现上述问题,保证结构具有足够的延性。
- (2) 在模拟地震作用下的低周循环往复加载过程中,传统集装箱结构的滞回环包络面积很小,反映出传统集装箱结构在地震作用下的耗能能力有限。而外框内箱结构的滞回曲线饱满,滞回曲线包络面积较大,具有良好的耗能能力。
- (3) 外框内箱结构的弱轴初始刚度较传统集装箱结构增大了133%,屈服力大约是传统集装箱结构的3倍,极限承载力较传统集装箱结构提高了2.5倍,具有更好的安全储备系数和结构承载能力。

致谢

本文为中建集团科研项目《防疫医疗建筑及配套快速建造技术集成》(cscec5b-2020-11)的阶段性成果之一,感谢中建集团对本课题的大力支持。

参考文献

- [1] 陶依依,李晓静,阮雯洁,高卫奇,王弘毅,黄欣,陈文萍,项晓刚,谢青,陈海涛.由集装箱改建“三区通道”快速搭建简易传染病收治方舱医院或定点医院的实践经验[J].内科理论与实践,2022,17(02):149-152. DOI: 10.16138/j.1673-6087.2022.02.013.
- [2] 许华辉,杨海涛,卢皓,赵嘉琳,谢鸿.火神山、雷神山项目装配式建筑快速施工质量管理[J].云南水力发电,2021,37(04):213-216.
- [3] 孔德睿,曾庆林,段世玺,包艳诗.装配式施工在应急救援领域的创新研究——以火神山为例[J].中小企业管理与科技(上旬刊),2021(01):142-143.
- [4] 蒲健.装配式建筑施工环节探索[J].低碳世界,2020,10(08):134-135.
- [5] 张义,王远航,韩阳,等.呼吸类临时传染病医院钢结构装配式建筑体系及关键技术[J].施工技术,2020,49(12):111-113.
- [6] 张汝婷.集装箱建筑案例分析[D].西安建筑科技大学,2017.
- [7] 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. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.07.013.
- [8] 李英磊,马荣奎,李元齐.集装箱模块化组合房屋单体纵向抗侧刚度及承载力数值分析[J].建筑钢结构进展,2014,16(01):28-33+41. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2014.01.009.
- [9] 查晓雄,钟建伟.节点对集装箱房性能影响的[C]//2011全国钢结构学术年会论文集.北京,2011.
- [10] 李宏江,叶见曙,万水.波形钢腹板剪切屈曲分析及其几何参数设计[C]//第十一届全国结构工程学术会议论文集第II卷.长沙,2002.
- [11] 郭雪婷.集装箱改造建筑设计研究[D].南京工业大学,2013.
- [12] Giriunas K, Sezen H, Dupaux R B. Evaluation, modeling, and analysis of shipping container building structures[J]. Engineering Structures, 2012, 43 (none).
- [13] 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.
- [14] 查晓雄,左洋,刘乐,等.地震作用下集装箱结构力学性能的分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2015(7):92-99.
- [15] 刘乐.常高温水平荷载作用下集装箱轻钢结构力学性能研究[D].哈尔滨工业大学建筑与土木工程硕士学位论文,2013.
- [16] 尹静,查晓雄.箱式集成房折叠单元刚性试验及有限元分析[J].工业建筑,2010(S1):446-448.
- [17] 查晓雄,王璐璐,左洋.集装箱房屋模块化研究I:竖向荷载作用下[C]//第五届全国钢结构工程技术交流会.中国广东珠海,2014:321-324.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 刘建飞.扩展集装箱式活动房静力试验与有限元分析[D].天津大学,2007.

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。