doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.03.002

预制装配式分体柱框架抗震性能研究

戈瑞瑞，周本强，胡　杰，贺宇轩，刘方成，宾　佳

（湖南工业大学 土木工程学院，湖南 株洲 412007）

摘　要：已有研究表明分体柱具有较好的延性，能运用于地震多发的房屋结构中。为方便施工，提出预制装配式分体柱框架结构的设想，通过有限元数值模拟，对整体柱框架结构和分体柱框架结构的抗震性能进行对比分析。结果表明：地震作用下装配式分体柱框架结构加速度响应较现浇整体柱框架更易趋于稳定；与整体柱框架相比，装配式分体柱框架位移响应较大；装配式分体柱框架结构的基底剪力均小于整体柱框架结构的；现浇整体柱框架结构的混凝土节点损伤区域与分体柱框架结构相比较大，证明钢套筒对框架结构节点起到保护作用；装配式分体柱框架结构更适用于硬质场地。整体表明装配式分体柱框架结构的延性更强、耗能性能更好，且更加稳定。

关键词：钢筋混凝土（RC）；装配式分体柱；框架结构；抗震性能；数值模拟

中图分类号：TU449　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-9833(2024)03-0009-09

引文格式：戈瑞瑞，周本强，胡　杰，等 . 预制装配式分体柱框架抗震性能研究 [J]. 湖南工业大学学报，2024，38(3)：9-17.

Study on Seismic Performance of the Prefabricated Split Column Frames

GE Ruirui，ZHOU Benqiang，HU Jie，HE Yuxuan，LIU Fangcheng，BIN Jia

（College of Civil Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China）

Abstract：Previous studies have shown that split columns, which are characterized with good ductility, can be used in earthquake-prone building structures. In order to facilitate construction, the idea of prefabricated split column frame structure has thus been proposed, followed by a comparison and an analysis of the seismic performance of the intergal column frame structure and the split column frame structure based on a finite element numerical simulation. The results indicate that the acceleration response of the prefabricated split column frame structure is easier to be stabilized than that of the cast-in-situ integral column frame under seismic action. Compared with integral column frames, there is a larger displacement response for prefabricated split column frames, with the base shear force of the prefabricated split column frame structure smaller than that of the intergal column frame structure. The damage area of concrete joints in cast-in-situ integral column frame structures is larger than that in split column frame structures, indicating a protective role to be played by steel sleeves in the joints of frame structures. The prefabricated split column frame structure is more suitable for hard fields. Overall the prefabricated split column frame structure is characterized with a stronger ductility, a better energy consumption performance and a higher stability.

Keywords：reinforced concrete (RC)；prefabricated split column；frame structure；seismic performance；numerical simulation

收稿日期：2023-03-15

基金项目：湖南省教育厅科研基金资助重点项目（21A0357）；湖南省自然科学基金资助项目（2021JJ40171）

作者简介：戈瑞瑞，女，湖南工业大学硕士生，主要研究方向为新型装配式结构抗震，E-mail：873478162@qq.com

通信作者：刘方成，男，湖南工业大学教授，博士，主要研究方向为土动力特性，土－结构动力相互作用及岩土隔震，E-mail：fcliu@hut.edu.cn

1 研究背景

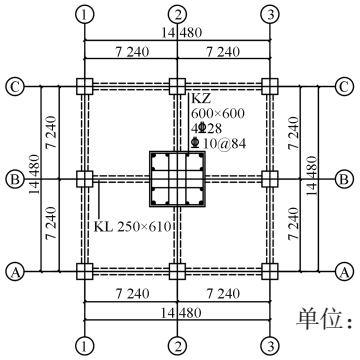
钢筋混凝土（RC）框架结构是应用最为广泛的结构形式。震害调研和模型试验表明，框架柱的延性不足是造成 RC 框架结构震害的重要原因 [1−2]，因此，研究如何提高框架柱的延性对于 RC 抗震框架具有重要意义。

分体柱的概念由郝永昶等 [3] 提出，指通过分隔缝将整体柱的框架柱在柱身范围内分割而成等截面柱束，从而提高柱子的延性及变形能力。李忠献等 [4] 通过试验及有限元分析，得出分体柱轴压比等参数的设计意见，并且证实分体柱应用于框架结构具有可行性。尤鸿珺等 [5] 通过有限元模拟对分体柱在侧向荷载作用下的弹塑性进行分析，研究得出分体柱侧向刚度较整体柱小，但延性明显高于整体柱。毛念华 [6] 通过有限元模拟地铁车站中的框架柱与分体柱，对其进行时程分析，研究得出分体柱可通过降低承载力的方式大大提高柱子的延性。综上所述，相比于现浇 RC 整体柱，现浇 RC 分体柱的延性和变形能力可显著提高，而抗弯抗剪承载能力仅有小幅降低甚至基本不变。

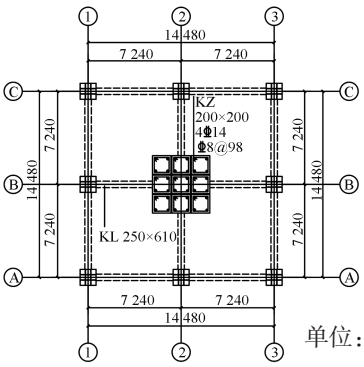
分体柱框架具有优良的抗震潜力，然而，在现浇施工方式下，由于模板支设、钢筋绑扎等方面的困难，其施工难以实现。为了改善传统建筑生产模式消耗过多能源、产生大量建筑废物等不足，装配式建筑将是发展趋势。谷伟等 [7] 提出一种新型梁柱节点形式，研究表明这种新型梁柱节点与现浇柱节点的耗能能力接近，可运用于抗震结构中。Zhang R. J. 等 [8] 对装配式梁柱节点和现浇梁柱节点进行拟静力试验，研究表明了干式连接梁柱节点可将损伤区域集中于钢连接件上，使建筑可恢复性提高。Li Z. H. 等 [9] 提出了一种预制梁柱钢节点，通过循环荷载试验研究其抗震性能，得出这种钢节点较整体节点具有更强的耗能能力。H. H. Ghayeb 等 [10] 提出了一种新型混合预制 RC 梁柱连接形式，在强震下其混合式连接形式有较好的抗震性能。Ding K. W. 等 [11] 提出了一种基于螺栓连接的预制混凝土梁柱节点，结果表明通过螺栓连接的预制节点具有较好的抗震性能，可以提高施工效率，同时也有助于灾后修复。Guan D. Z. 等 [12] 提出使用超高性能混凝土 UHPC（ultra-high performance concrete）壳来增强预制混凝土柱，结果表明这种预制柱可以减少柱脚损伤，提高抗震性能。Yang C. T. 等 [13] 提出了一种干式连接旋转摩擦耗散梁柱节点，研究得出这种连接方式具有构造简单、抗震性能优良的特性。由此可见，干式连接装配式分体柱框架结构具有较好的发展前景，其抗震性能值得深入研究。基于装配式建筑的发展背景，刘方成等 [18] 提出在柱中节点和柱端节点处对分体柱进行错位搭接，通过钢套筒实现柱－柱连接，研究装配式分体柱结构的抗震性能。基于此，本文应用三维数值有限元方法，针对装配式分体柱框架与整体柱框架的地震响应和损伤分布差异展开探讨，以期为后续研究应用提供参考。

2 模型建立

以某三层两跨的标准 RC 框架模型为目标，建立常规整体柱 RC 框架和装配式分体柱框架，具体设计参数如图 1 所示，有限元总体模型如图 2 所示。



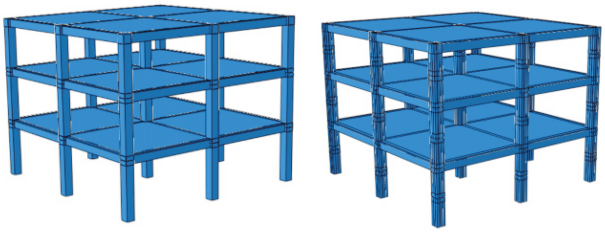
a）装配式整体柱框架



b）装配式分体柱框架

图 1 整体柱框架和分体柱框架平面图

Fig. 1 Plane view of integral and split column frames



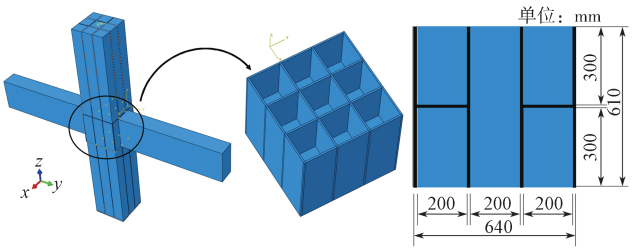
a）整体柱框架 b）分体柱框架

图 2 整体柱框架和分体柱框架总体模型示意图

Fig. 2 Overall model of integral column frame and split column frame

在两个对比模型中，由图 1~2 可知，整体框架柱截面尺寸为 600 mm × 600 mm，分体柱由 3 × 3 个 200 mm × 200 mm 的标准小柱组成，其总净截面尺寸为 600 mm × 600 mm。

RC 框架整体柱和分体柱的设计配筋保证纵筋配筋率和箍筋配筋率相同。分体柱梁柱节点处采用 Q345 钢套筒连接，套筒外围及内隔钢板厚度均为 10 mm，套筒横截面尺寸为 640 mm × 640 mm，总高度为 610 mm，钢套筒的详细尺寸及分体柱框架节点的安装形式如图 3 所示。



a）框架结构节点　　b）连接件的横截面

图 3　分体柱框架节点详图

Fig. 3　Detailed drawing of split column frame nodes

框架梁截面尺寸为 250 mm × 610 mm，为排除干扰因素，暂不考虑梁柱连接对节点受力性能的影响，因此假设梁为匀质刚性梁且与套筒刚性连接。

对以上框架模型在 ABAQUS 有限元软件中进行三维实体建模，其中分体柱与钢套筒的连接形式采用接触连接，摩擦系数取 0.35，法向力设为“罚”。

3　材料特性

混凝土采用 ABAQUS 中内嵌的塑性损伤模型[15]，该模型以混凝土的拉伸开裂和压缩压碎为破坏特征并定义损伤因子。在 ABAQUS 中，相关参数设置如下：应力比 K_C=0.67，膨胀角 ψ=30°，双轴与单轴受压初始屈服应力比值 σ_{b0}/σ_{c0}=1.16，偏心率 e=0.1，黏性系数 v=0.000 1。钢材采用三折线硬化弹塑性模型，其中 Q345 钢套筒的屈服强度为 345 MPa，柱纵向钢筋 HRB400 的屈服强度为 400 MPa，极限强度均为 540 MPa。

材料弹性常数取值见表 1。

表 1　材料属性

Table 1　Material properties

名 称	密度 / (kg·m^{-3})	弹性模量 / MPa	屈服应力 /MPa	泊松比
混凝土	2 400	3.0e4	26.8/2.41(抗压 / 抗拉)	0.2
钢材	7 800	2.06e5	345/400(钢筋 / 钢板)	0.3

4　输入地震波

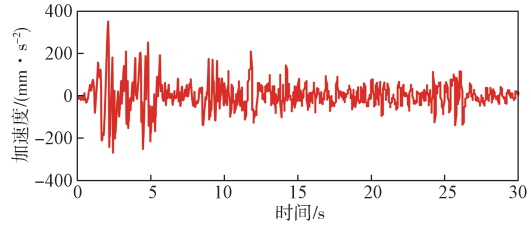
本次模拟试验采用 El Centro 地震波及四川长宁地震波进行地震分析，其特性如表 2 所示。地震波输入模型前，将地震波数据采用“归一化”处理[16]，即对地震波幅值进行调整，换算成不同烈度的地震波数据，并截取加速度波动幅度最强烈的时间区段，两种波的加速度时程和频谱特征曲线如图 4 所示。

表 2　地震波特性

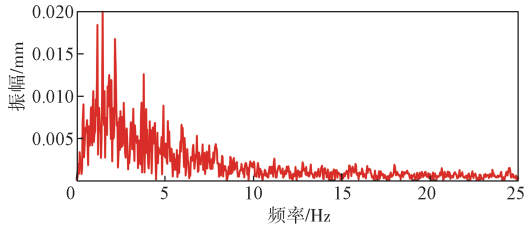
Table 2　Seismic wave characteristics

地震名称	年份	震级	原波持时 /s	时间间隔 /s
El Centro	1940	7.1	50	0.020
四川长宁地震	2019	6.0	40	0.005

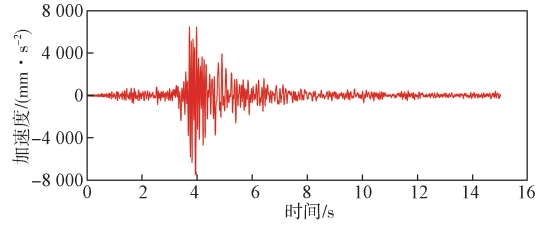
注：在具体计算工况中根据设防烈度所对应的基本加速度进行加速度幅值调整。



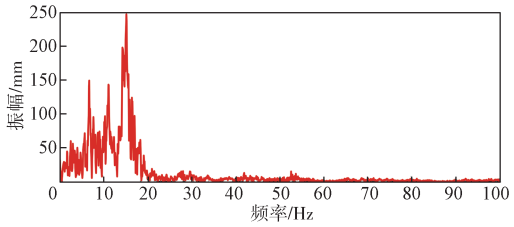
a）El Centro 波加速度时程曲线



b）El Centro 波频谱特性



c）四川长宁波加速度时程曲线



d）四川长宁波频谱特性

图 4　El Centro 波和四川长宁波的加速度时程及频谱特性曲线

Fig. 4　El Centro waves and acceleration time history and spectral characteristics of Changning, Sichuan

5 结果分析

5.1 加速度响应

通过输入不同烈度 El Centro 地震波进行数值模拟，两种框架结构的加速度响应曲线如附图 1 所示。由附图可知：1）随着层数增高，整体柱框架与分体柱框架的加速度响应幅值都有逐渐增大的趋势；2）随着地震波加载时间的推进，两种框架的加速度响应曲线在 0~6 s 区段波动激烈，而整体柱框架在 25~28 s 区段再次出现明显波动，分体柱后期较为稳定；3）在 8、9 度地震波作用下，分体柱框架的加速度峰值大于整体柱框架。总体上，整体柱的加速度响应幅值大部分大于分体柱，在高烈度下会出现分体柱框架的加速度峰值更大的现象。这是由于分体柱有较好的变形能力，地震波在逐步向上层传输的过程中地震能量逐渐被分体柱消耗，因而使加速度响应幅值更趋于稳定。但因分体柱框架结构长细比大，自身具有较好柔性的特点使其不便用于软质场地。

以不同烈度的形式输入四川长宁地震波，两种框架结构的加速度响应曲线如附图 2 所示。由附图可知：1）分体柱框架的加速度在不同地震烈度及不同楼层数上都明显小于整体柱框架的加速度；2）在输入的地震波加速度幅值较大的时间段内，整体柱框架的输出加速度曲线波动也十分明显，而分体柱框架的加速度在此区段内没有发生幅值激增的现象，曲线较为平缓，耗能效果显著。在高频地震波作用下，分体柱框架具有良好延性的特点得到充分体现，抗震能力更强，有效缓解了地震作用，可见分体柱框架更适用于此类地震波频发地区。

5.2 位移响应

5.2.1 位移响应曲线

输入不同烈度的 El Centro 地震波及四川长宁地震波进行数值模拟，两种框架结构的各层位移响应曲线如附图 3~4 所示。由附图可知，随着层数的增加及地震烈度的增大，整体柱框架和分体柱框架的位移响应幅值均有增加，且分体柱增加得更明显。总体上可知，分体柱框架的位移响应幅值明显大于整体柱框架的，其主要原因为将整体柱划分为等尺寸的分体柱，其长细比增大、延性增强、侧向刚度减小，分体柱在水平地震作用下位移幅值较整体柱更大。

5.2.2 位移峰值曲线

图 5、6 给出了两种地震波不同烈度下整体柱框架和分体柱框架各层峰值位移对比曲线。由图 5、6 可清晰得知：1）分体柱框架在各个烈度下的位移峰值均明显高于整体柱框架，是整体柱框架的 2~5 倍；2）随着层数增高，在 El Centro 地震波作用下，分体柱框架的首层峰值位移增长速度较快，2、3 层的位移增长相对首层变缓，整体柱框架的位移增长均较缓，但在四川长宁波作用下整体柱框架出现 3 层位移增长变快的现象，且分体柱框架与整体柱框架的位移相差相对较小。由此可见，在地震作用下分体柱框架的变形能力更强，尤其是首层的位移峰值增长速度相对于其他层更快，即首层发挥了较大的减震耗能作用，并再次印证分体柱框架适用于高频地震波频发地区。

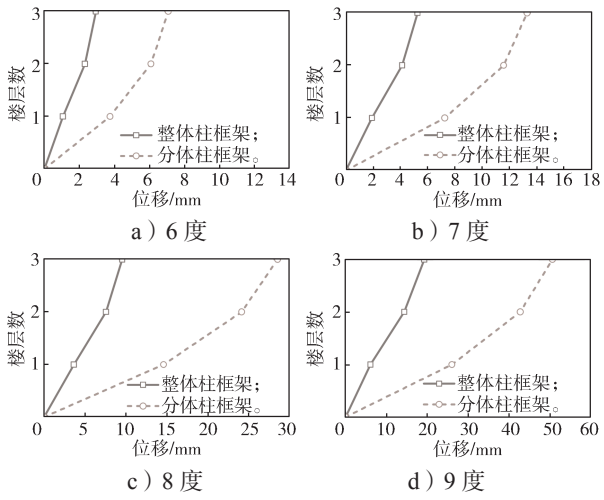


图 5 El Centro 波不同烈度下各层峰值位移对比曲线

Fig. 5 Contrast curves of peak displacement of each layer under different intensities of El Centro waves

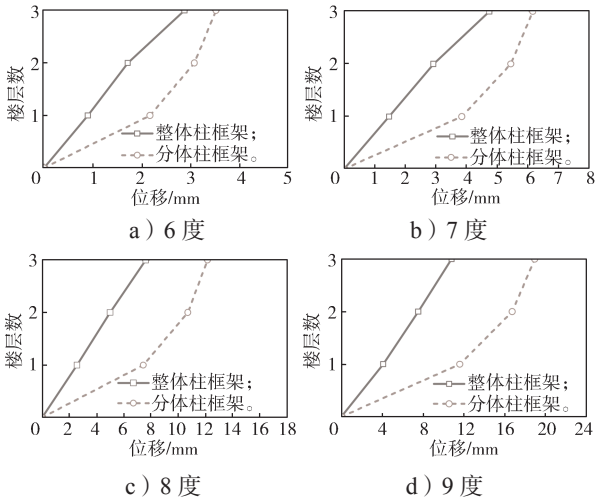


图 6 四川长宁波不同烈度下各层峰值位移对比曲线

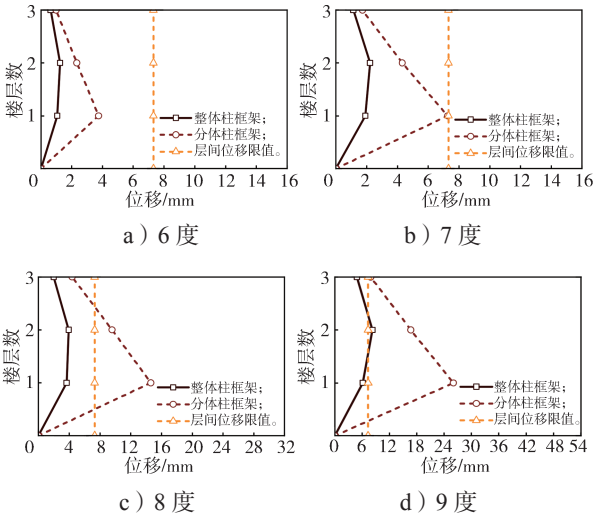
Fig. 6 Comparison curves of peak displacement of each layer under different intensities in waves of Changning, Sichuan

5.3 层间位移曲线

通过峰值位移曲线可得出整体柱框架和分体柱框架在不同烈度下的层间位移，根据规范要求，混凝土框架结构层间位移角最大限值比例为 1/550，计算得到框架结构的层间位移限值。

进一步分析两种框架结构的位移变化差异，结果

如图 7~8 所示。由图可知：1）在 El Centro 波作用下分体柱框架层间位移均大于整体柱框架的层间位移，而四川长宁波作用下分体柱框架第三层的层间位移小于整体柱框架；2）分体柱框架首层层间位移均增长迅速，2、3 层层间位移呈明显下降趋势，整体柱框架 1、2 层位移呈增长趋势；3）整体柱框架只在 9 度下有略微超过规范限值的现象，但分体柱框架的层间位移在高烈度地震作用下明显超过限值。

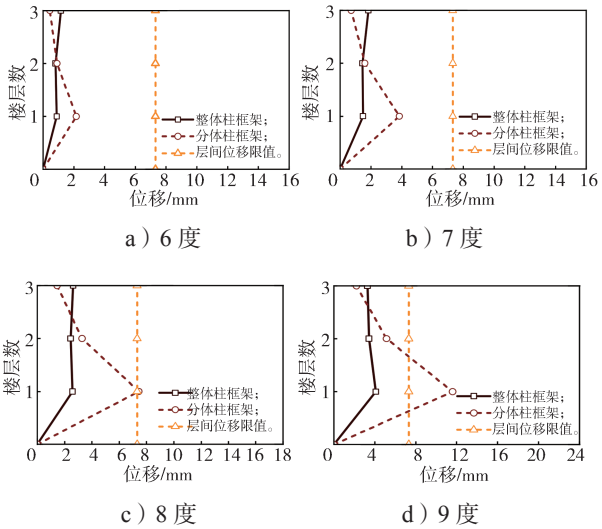


a）6 度　　b）7 度

c）8 度　　d）9 度

图 7　El Centro 波不同烈度下各层层间位移对比曲线

Fig. 7　Comparison curves of inter-story displacement under different intensities of El Centro waves



a）6 度　　b）7 度

c）8 度　　d）9 度

图 8　四川长宁波不同烈度下各层层间位移对比曲线

Fig. 8　Comparison curves of inter-story displacement at different intensities in waves of Changning, Sichuan

由此可见，整体柱因其刚度较大，在对抗地震反应时位移受地震波影响较分体柱小，分体柱框架虽然延性好，但同时也会带来位移过大的问题，且较为明显的是地震作用对分体柱的首层位移影响明显。因此有必要在后期加入带有耗能作用的层间支撑，以实现在耗能的同时达到层间位移满足使用要求的目的。

5.4　基底剪力曲线

图 9 为整体柱框架模型和分体柱框架模型在不同烈度下的基底剪力。

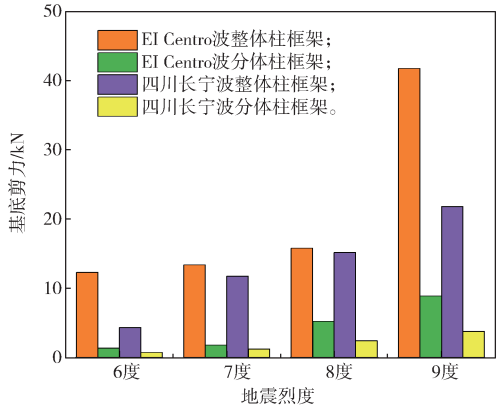


图 9　两种地震波在不同烈度下的基底剪力

Fig. 9　Base shear force of two seismic waves under different intensities

由图 9 可分析两种框架模型的基底承载力影响情况，进一步对比得出两种框架结构的差异，可知：1）无论是在 El Centro 地震波还是四川长宁地震波作用下，整体柱框架的基底剪力都比分体柱框架的基底剪力要大；2）地震波烈度越大，整体柱框架与分体柱框架的基底剪力差值越大，El Centro 地震波作用下的两种框架结构差值大多更为明显，且在 9 度地震波作用下整体柱框架的基底剪力增长较大；3）El Centro 地震波作用下的框架基底剪力普遍大于长宁地震波作用下的框架基底剪力。这些结果表明，分体柱较好的延性及耗能能力可以有效缓和地震作用的影响，减小结构的基底剪力，达到减震效果。

5.5　框架柱结构损伤

在水平地震作用下，混凝土先出现受拉损伤，通过受拉损伤因子的数值表示模型的损伤程度，从 0 至 1 代表无损伤至完全损伤 [17]，结果见表 3~4。表 3 给出了 El Centro 地震波作用下整体柱和分体柱的结构损伤云图。由表 3 可知：1）在烈度为 6 度时，整体柱损伤破坏区域主要集中在柱顶及梁柱节点区，分体柱无损伤；2）在烈度为 7 度时，整体柱损伤破坏区域主要集中在中心柱的所有梁柱节点处且破坏明显，分体柱开始在梁柱节点区出现损伤；3）在烈度为 8 度时，整体柱大部分梁柱节点区以及柱底部发生破坏，分体柱节点破坏加深，在水平地震施加方向的边列柱底部出现破坏；4）在烈度为 9 度时，整体柱和分体柱的损伤面积均有扩大，整体柱的梁柱节点破坏十分明显，分体柱的梁柱节点破坏加剧且底层柱的破坏明显。

表 3 EI Centro 地震波不同烈度作用下柱体框架结构损伤云图

Table 3 Damage nephogram of column frame structures under different intensities of El Centro seismic waves

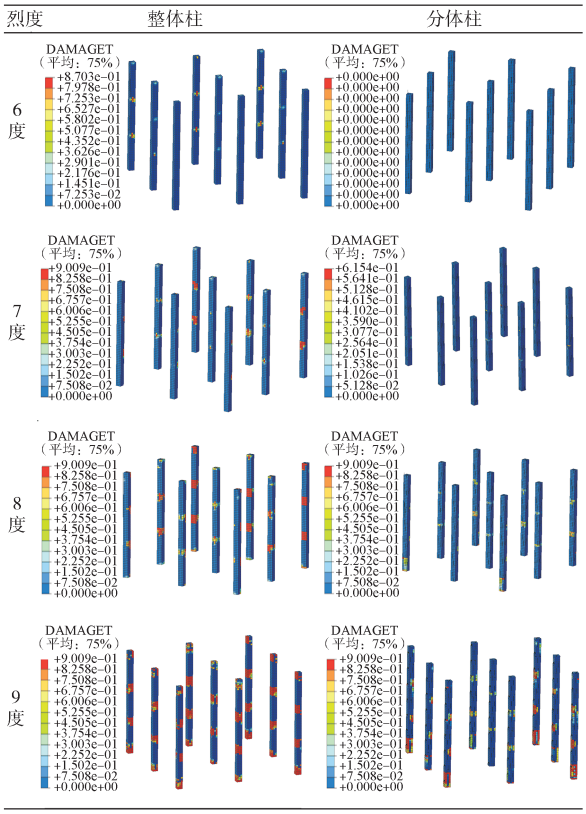


表 4 四川长宁地震波不同烈度作用下柱体框架结构损伤云图

Table 4 Structure damage nephogramof column frame structures under different intensities of earthquake waves in Changning Sichuan

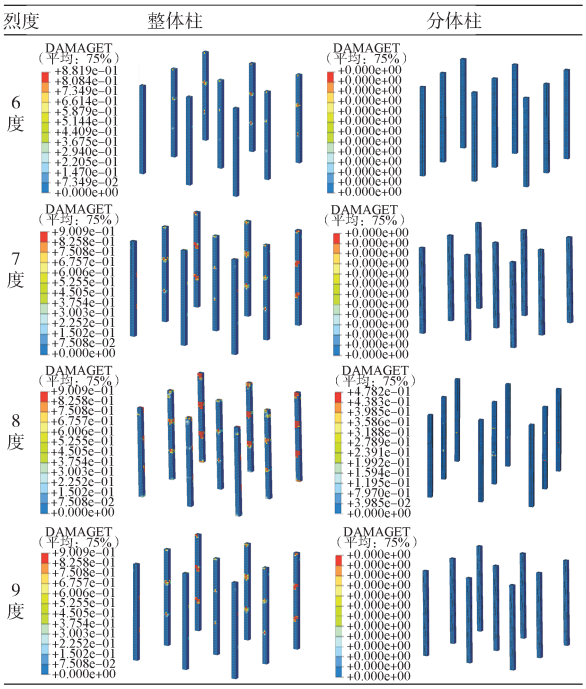


表 4 给出了四川长宁地震波作用下整体柱和分体柱的结构损伤云图。由表 4 可知：1）在烈度为 6 度时，整体柱依旧在梁柱节点区域开始出现破坏，分体柱无损伤；2）在烈度为 7 度时，整体柱在梁柱节点区破坏加剧，分体柱依旧无损伤；3）在烈度为 8 度时，整体柱框架除梁柱节点区出现明显损伤外，首层柱底也出现损伤，分体柱框架梁柱节点区开始出现损伤；4）在烈度为 9 度时，整体柱框架柱底损伤加剧，且梁柱节点区域破坏明显，分体柱框架依旧只在节点区出现损伤。

总体而言，整体柱的损伤面积较分体柱要大，尤其是梁柱节点区域的损伤程度差异明显。结果表明钢套筒对框架结构节点区域有约束保护作用，增强了节点部位的刚度，改善分体柱刚度较低的问题，提升整体结构的稳定性。

6 结论

通过以上分析可得如下结论：1）装配式分体柱框架结构的加速度响应大部分小于现浇整体柱框架结构，且在四川长宁地震波作用下两者的加速度差异更加明显，突出装配式分体柱框架结构具有良好延性的优势，但分体柱框架在 9 度 El Centro 地震波作用下出现加速度峰值超过整体柱框架的现象，说明装配式分体柱框架结构更适用于硬质场地，后续通过选用不同场地类别的地震波来对分体柱框架结构适用场地进行深入分析。2）装配式分体柱框架因刚度较小，其位移响应均大于现浇整体柱框架。分体柱框架结构的层间位移出现超限现象，且装配式分体柱框架首层位移较大，关于减小该结构首层位移的方法有待后续研究。3）装配式分体柱框架基底剪力均小于整体柱框架，且地震烈度越大，两种框架结构的基底剪力差距越明显，可见装配式分体柱框架结构的耗能能力更强。4）随着地震波烈度增大，两者的混凝土损伤面积均增大，在相同烈度下，装配式分体柱框架结构的损伤面积小于现浇整体柱框架。且现浇整体柱框架结构的节点损伤区域较多，装配式分体柱框架钢套筒内的节点部位损伤不明显，证明钢套筒能对框架结构节点起到保护作用。

参考文献：

[1] 清华大学土木工程结构专家组，西南交通大学土木工程结构专家组，北京交通大学土木工程结构专家组，等 . 汶川地震建筑震害分析 [J]. 建筑结构学报，2008，29(4)：1-9.

Civil and Structural Groups of Tsinghua University，Xinan Jiaotong University，and Beijing Jiaotong University，et al. Analysis on Seismic Damage of Buildings in the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures，2008，29(4)：1−9.

[2] 骆　欢，杜　轲，孙景江，等 . 地震作用下钢筋混凝土框架结构倒塌全过程振动台试验研究 [J]. 建筑结构学报，2017，38(12)：49−56.
LUO Huan，DU Ke，SUN Jingjiang，et al. Shaking Table Test on Complete Collapse Process of RC Frame Structure Subjected to Earthquake[J]. Journal of Building Structures，2017，38(12)：49−56.

[3] 郝永昶，胡庆昌，徐云扉，等 . 应用分体柱改善短柱 (高轴压比) 抗震性能的试验研究 [J]. 建筑结构学报，1998，19(6)：2−11.
HAO Yongchang，HU Qingchang，XU Yunfei，et al. Use of Separated Columns to Improve the Seismic Behavior of Short Reinforced Concrete Columns[J]. Journal of Building Structures，1998，19(6)：2−11.

[4] 李忠献，郝永昶，周　兵，等 . 钢筋混凝土分体柱框架抗震性能的模型试验研究 [J]. 建筑结构学报，2003，24(6)：1−10，31.
LI Zhongxian，HAO Yongchang，ZHOU Bing，et al. Model Experimental Study on Seismic Behavior of Reinforced Concrete Frame with Split Columns[J]. Journal of Building Structures，2003，24(6)：1−10，31.

[5] 尤鸿珺，黄东升，周爱萍，等 . 钢筋混凝土分体柱在侧向荷载作用下的弹塑性分析 [J]. 四川建筑科学研究，2011，37(4)：46−48.
YOU Hongjun，HUANG Dongsheng，ZHOU Aiping，et al. Elastic-Plastic Analyse of Reinforced Concrete Split Columns Under Lateral Force[J]. Sichuan Building Science，2011，37(4)：46−48.

[6] 毛念华 . 采用分体柱的地铁地下车站地震反应仿真分析 [J]. 城市轨道交通研究，2020，23(10)：58−61，66.
MAO Nianhua. Seismic Response Simulation Analysis of Metro Station with Split Column Structure[J]. Urban Mass Transit，2020，23(10)：58−61，66.

[7] 谷　伟，张馨心，李忠培，等 . 装配式框架结构新型梁柱节点抗震性能试验 [J]. 工业建筑，2019，49(5)：57−61.
GU Wei，ZHANG Xinxin，LI Zhongpei，et al. Experimental Research on Seismic Behavior of New Column-to-Beam Joints for Prefabricated Concrete Frame[J]. Industrial Construction，2019，49(5)：57−61.

[8] ZHANG R J，ZHANG Y，LI A Q，et al. Experimental Study on a New Type of Precast Beam-Column Joint[J]. Journal of Building Engineering，2022，51：104252.

[9] LI Z H，QI Y H，TENG J. Experimental Investigation of Prefabricated Beam-to-Column Steel Joints for Precast Concrete Structures Under Cyclic Loading[J]. Engineering Structures，2020，209：110217.

[10] 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.

[11] DING K W，YE Y，MA W. Seismic Performance of Precast Concrete Beam-Column Joint Based on the Bolt Connection[J]. Engineering Structures，2021，232：111884.

[12] GUAN D Z，XU R N，YANG S，et al. Development and Seismic Behavior of a Novel UHPC-Shell Strengthened Prefabricated Concrete Column[J]. Journal of Building Engineering，2022，46：103672.

[13] YANG C T，LI A Q，XIE L L. Development of Design Method for Precast Concrete Frame with Dry-Connected Rotational Friction Dissipative Beam-to-Column Joints[J]. Journal of Building Engineering，2022，45：103563.

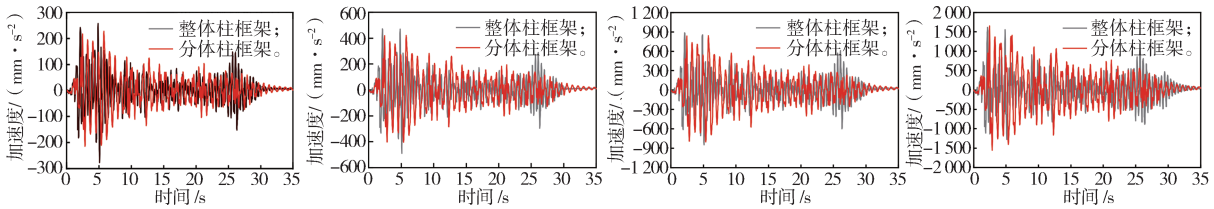
[14] 刘方成，胡　杰，王松山 . 轴压比对 RC 分体柱抗侧刚度及耗能性能的影响研究 [J]. 建筑结构，2021，51(增刊 2)：968−973.
LIU Fangcheng，HU Jie，WANG Songshan. Influence of Axial Compression Ratio on Lateral Stiffness and Energy Dissipation Performance of RC Split Columns[J]. Building Structure，2021，51(S2)：968−973.

[15] LEE J，FENVES G L. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures[J]. Journal of Engineering Mechanics，1998，124(8)：892−900.

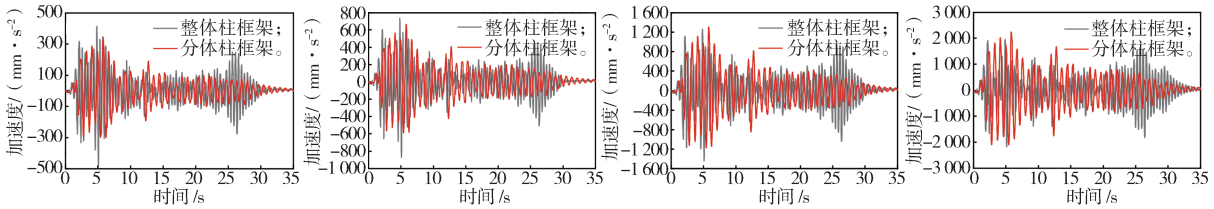
[16] 何子涵，代旷宇，吕大刚，等 . 基于耐震时程法的锈蚀 RC 框架结构抗地震倒塌能力评估 [J]. 地震工程与工程振动，2022，42(6)：129−135.
HE Zihan，DAI Kuangyu，LǓ Dagang，et al. Seismic Collapse Capacity Assessment of Corroded RC Frames Using the Endurance Time Method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics，2022，42(6)：129−135.

[17] 张永杰，陈　力，谢普初，等 . ABAQUS 混凝土损伤塑性模型中损伤因子的率相关性及实现方法 [J]. 爆炸与冲击，2022，42(10)：39−49.
ZHANG Yongjie，CHEN Li，XIE Puchu，et al. Rate Correlation of the ABAQUS Damage Parameter in the Concrete Damage Plasticity Model and Its Realization Method[J]. Explosion and Shock Waves，2022，42(10)：39−49.

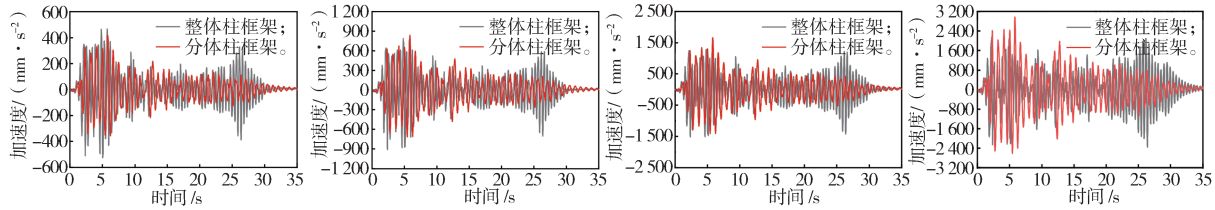
(责任编辑：姜利民)



a）6 度 1 层　b）7 度 1 层　c）8 度 1 层　d）9 度 1 层



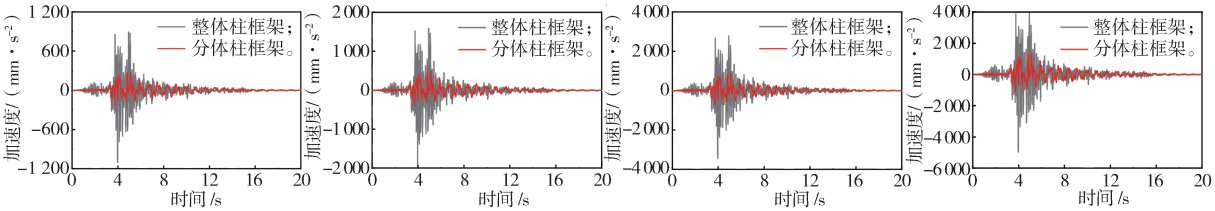
e）6 度 2 层　f）7 度 2 层　g）8 度 2 层　h）9 度 2 层



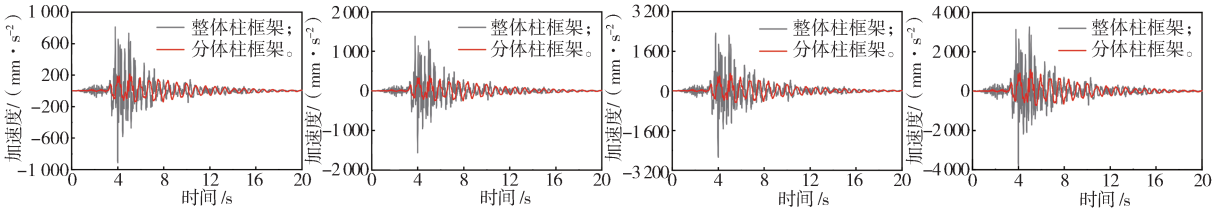
i）6 度 3 层　j）7 度 3 层　k）8 度 3 层　l）9 度 3 层

附图 1　El centro 波不同烈度下框架结构的加速度响应图

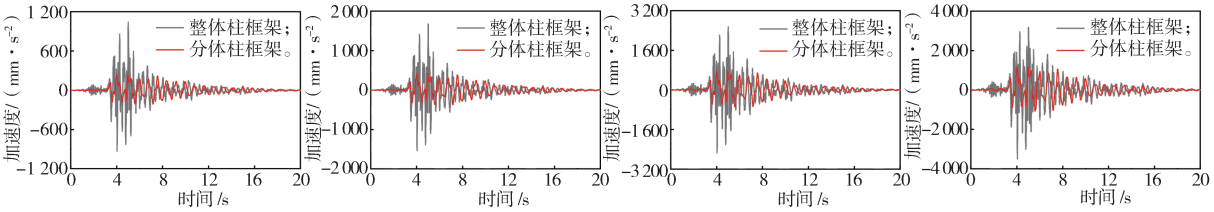
Appendix Fig. 1　Acceleration response diagram of frame structures under different intensities of El centro waves



a）6 度 1 层　b）7 度 1 层　c）8 度 1 层　d）9 度 1 层



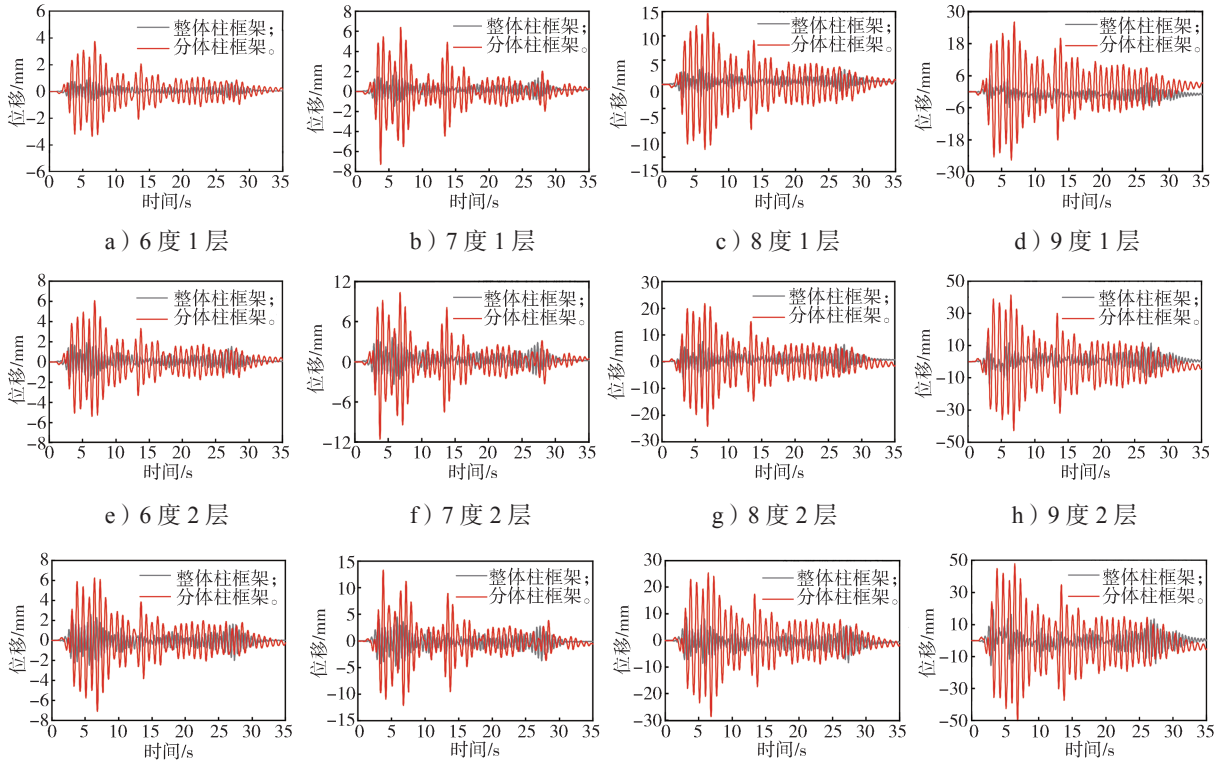
e）6 度 2 层　f）7 度 2 层　g）8 度 2 层　h）9 度 2 层



i）6 度 3 层　j）7 度 3 层　k）8 度 3 层　l）9 度 3 层

附图 2　四川长宁波不同烈度下框架结构的加速度响应图

Appendix Fig. 2　Acceleration response diagrams of frame structures under different intensities in waves of Changning, Sichuan



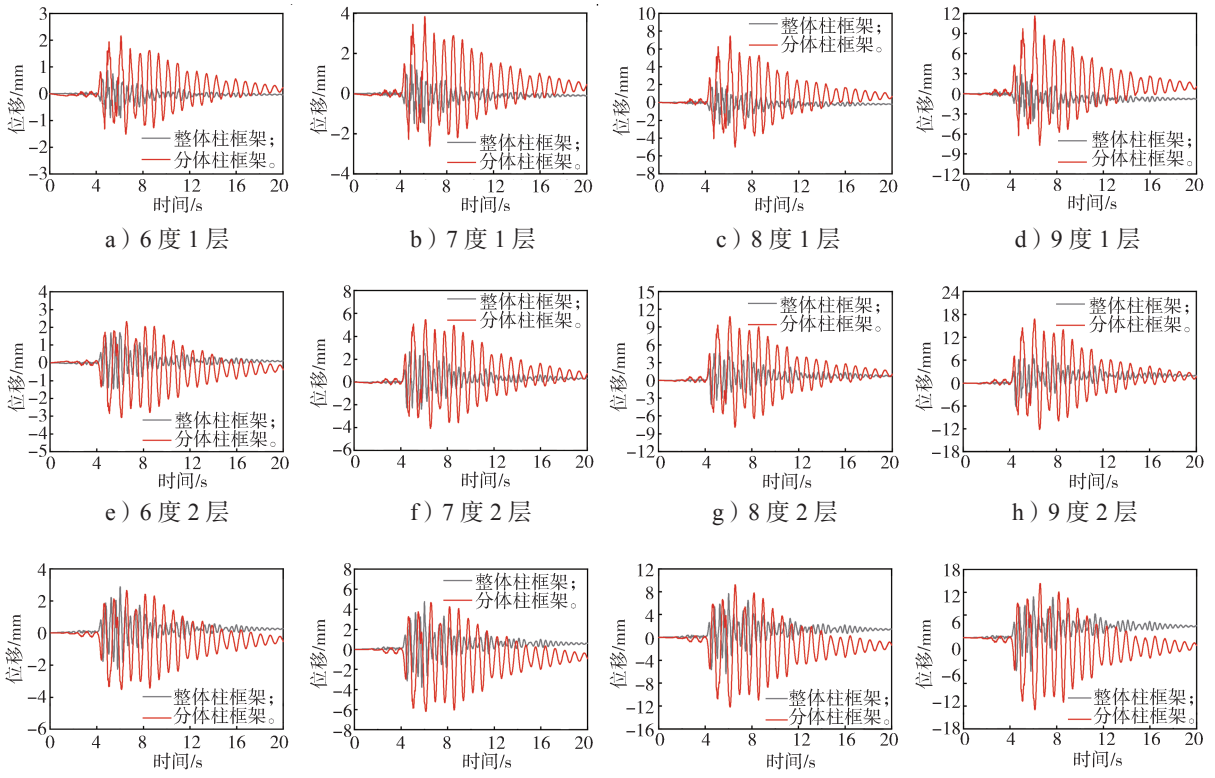
a）6 度 1 层　b）7 度 1 层　c）8 度 1 层　d）9 度 1 层

e）6 度 2 层　f）7 度 2 层　g）8 度 2 层　h）9 度 2 层

i）6 度 3 层　j）7 度 3 层　k）8 度 3 层　l）9 度 3 层

附图 3　El centro 波不同烈度下框架结构的位移响应图

Appendix Fig. 3　Displacement response diagram of frame structures under different intensities of El centro waves



a）6 度 1 层　b）7 度 1 层　c）8 度 1 层　d）9 度 1 层

e）6 度 2 层　f）7 度 2 层　g）8 度 2 层　h）9 度 2 层

i）6 度 3 层　j）7 度 3 层　k）8 度 3 层　l）9 度 3 层

附图 4　四川长宁波不同烈度下框架结构的位移响应图

Appendix Fig. 4　Displacement response diagram of frame structures under different intensities in waves of Changning, Sichuan