

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.060

钢框架-钢板墙和钢管混凝土柱-钢梁框架结构 抗震性能对比分析

何宇晨¹, 杨 溥¹, 冯力强², 李英民¹, 常中仁¹, 牛昌林³

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 甘肃省建设投资(控股)集团有限公司, 兰州 730050;
3. 甘肃建投科技研发有限公司, 兰州 730050)

摘要:为满足建筑工业化的迫切需求,进一步拓展钢框架-钢板墙结构和钢管混凝土柱-钢梁框架结构 2 种典型结构体系在高烈度区的应用,以某高烈度地区保障性住房建设项目为结构方案原型,分别对其进行多遇地震下的反应谱抗震设计,并补充了弹性动力时程分析验算,同时对比分析了罕遇地震下 2 种结构的弹塑性抗震性能。结果表明,钢框架-钢板墙结构体系在地震作用下的侧移模式呈弯曲型,塑性铰主要出现在钢板墙附近的梁端和柱端,而钢管混凝土柱-钢梁框架结构体系侧移模式呈剪切型,塑性铰主要出现在结构中间层的梁端。2 种结构体系均能够满足预期的抗震设计要求,适用于高烈度区的多高层民用建筑。

关键词:钢框架-钢板墙结构;钢管混凝土柱-钢梁框架结构;抗震性能;动力时程分析

中图分类号: TU398.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)10-051-10

Comparative analysis of seismic performance for steel frame- steel plate wall structure and steel frame structure with concrete-filled steel tube columns

HE Yuchen¹, YANG Pu¹, FENG Liqiang², LI Yingmin¹, CHANG Zhongren¹, NIU Changlin³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Gansu Construction Investment (Holdings) Group Co., Ltd., Lanzhou 730050, P. R. China;

3. Gansu Construction Investment Technology Research Co., Ltd., Lanzhou 730050, P. R. China)

Abstract: To address the pressing demands of industrialized construction and to broaden the application of two prominent structural systems, namely, the steel frame-steel plate wall structure and the steel frame structure with concrete-filled steel tube columns, in high-intensity regions, a high-intensity area affordable housing construction project was taken as a prototype. This involved seismic design based on frequent earthquake response spectra and supplemented by elastic dynamic time history analysis. At the same time, a comparative analysis of the elastic-plastic seismic performance of these two structural systems under rare earthquake scenarios was conducted. The results show that the steel frame-steel plate wall structure system exhibits a bending-type lateral deformation

收稿日期: 2021-03-22 网络出版日期: 2021-11-08

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2018jcyjAX0061);住房和城乡建设部研究开发项目(2018-K9-072)。

Supported by Chongqing Natural Science Foundation (cstc2018jcyjAX0061), and R & D Project of Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China (2018-K9-072).

作者简介: 何宇晨(1997—),男,硕士研究生,主要从事防灾减灾研究,(E-mail) 719863772@qq.com。

通信作者: 杨溥,男,博士,教授,(E-mail) yangpu@cqu.edu.cn。

pattern, with plastic hinges predominantly forming at the beam and column ends near the steel plates during earthquakes. Conversely, the steel frame structure with concrete-filled steel tube columns displays a shear-type lateral deformation pattern, with plastic hinges primarily forming at the beam ends on intermediate floors. Furthermore, both structural systems meet the prescribed seismic design requirements, rendering them suitable for application in high-rise civil buildings within high-intensity areas.

Keywords: steel frame-steel plate wall structure; steel frame with concrete-filled steel tube column; seismic performance; dynamic time history analysis

钢结构住宅体系是我国目前及未来推进住宅产业化最理想的住宅体系之一^[1]。在高烈度地区,由于普通钢框架结构的侧向刚度较小,在地震作用下底部的层间位移角往往较大,为保证足够的抗侧能力,梁柱构件截面尺寸均较大,使得在住宅建筑应用时会产生“露梁露柱”等问题^[2]。综合考虑实用性和经济性,通常选择具有多道抗震防线的钢板剪力墙结构或抗侧刚度较大的钢管混凝土柱结构来代替普通钢框架结构。

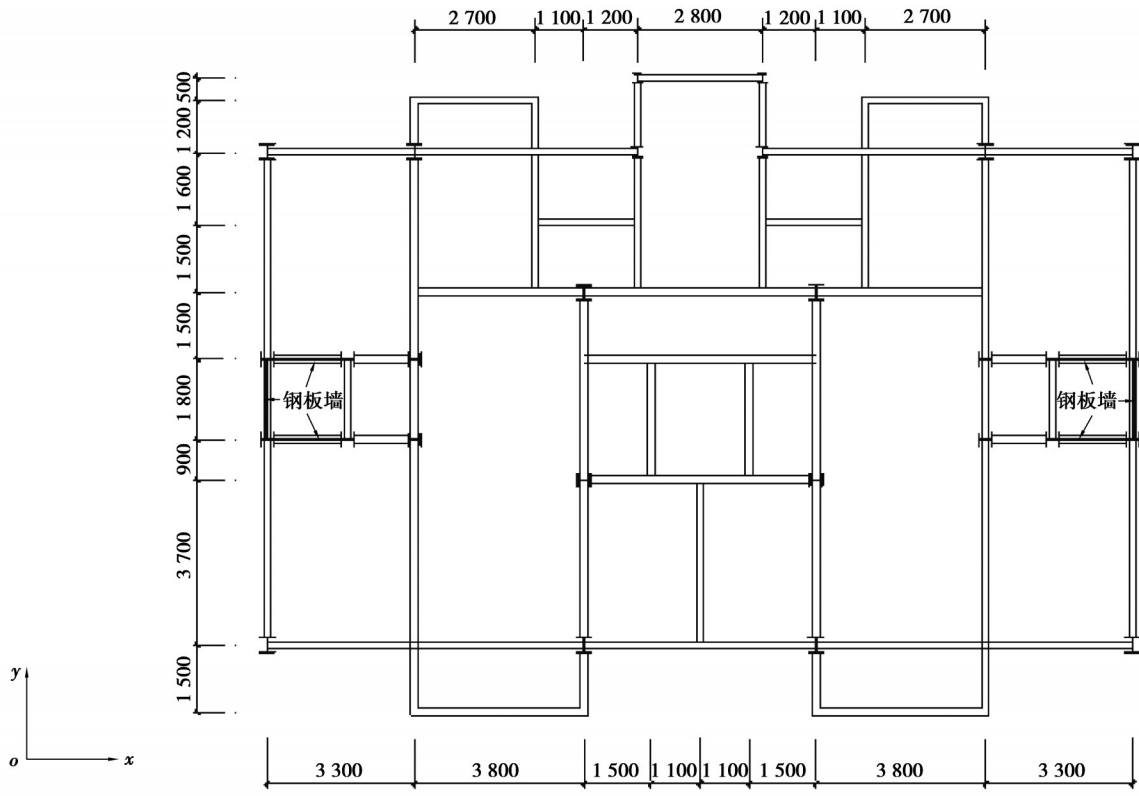
钢板剪力墙结构具有自重轻、承载力高、初始刚度大、易实现工厂化生产和装配化施工等优点^[3]。目前,针对钢板剪力墙国内外学者进行了大量研究^[3-6]。Driver等^[4]进行了4层薄钢板剪力墙刚接边框的拟静力试验研究,结果表明,钢板剪力墙在循环荷载作用下抗震性能稳定,具有较大刚度和良好的延性及耗能能力;聂建国等^[5]以天津国际金融会议酒店工程为背景对钢板剪力墙的抗震性能进行试验,结果表明,钢板剪力墙试件具有良好的承载力、延性和耗能能力,抗震性能优越;Sahebjam等^[6]的研究也表明利用钢板屈曲后强度可以提高结构的承载力和延性。

钢管混凝土结构具有抗震性能好、承载能力高及施工便捷等诸多优点,在实际工程中被广泛应用^[7]。国内外已有的大量研究表明,由于外围钢管对内填混凝土的约束作用,该类结构具有良好的抗震性能,且钢管混凝土柱屈服后仍具有较高的承载力和耗能能力,抗震性能优越^[8-11]。杜国锋等^[8]按1:10缩比设计制作了一榀钢管混凝土柱-H钢梁框架结构模型,并进行了模拟地震振动台试验,结果表明地震作用后结构整体性保持较好,无倒塌破坏趋势,结构抗震性能良好;王志滨等^[9]进行了6根带肋薄壁复式钢管混凝土压弯柱的低周反复加载试验,结果表明,该类组合柱的滞回曲线饱满,具有良好的抗震性能;Han等^[10]对9根钢管混凝土柱进行低周反复加载试验,结果表明,钢管混凝土柱具有良好的耗能能力和延性,且具有良好的抗震性能,适用于高烈度区的实际工程。

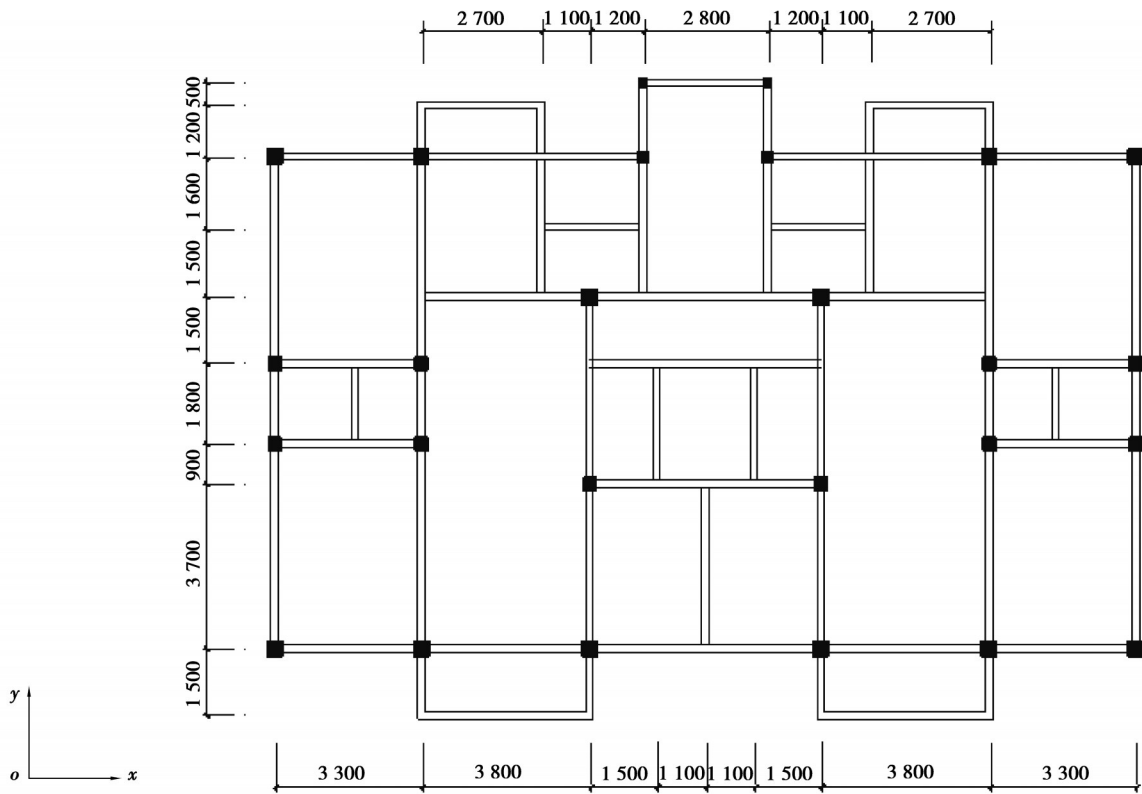
国内外大量的研究表明2种结构均具有良好的抗震性能,为满足建筑工业化的迫切需求,进一步拓展2种结构体系在高烈度区的应用,本研究中基于兰州新区保障性住房建设项目(二期)的建筑设计方案,以钢框架-钢板墙结构和钢管混凝土柱-钢梁框架结构2种典型结构体系为研究对象,采用盈建科建筑结构计算软件进行第一阶段抗震设计。同时,采用动力时程分析方法对结构进行不同地震水准下的地震反应分析,对比了2种结构体系的地震响应规律、塑性发展过程及分布情况,总结了2种结构体系的抗震性能,为这2种典型的装配式结构体系在高烈度地区的推广应用提供参考。

1 工程概况及结构布置方案

钢框架-钢板剪力墙结构和钢管混凝土柱-钢梁框架结构的标准层平面布置如图1所示。采用盈建科软件进行结构建模,结构整体计算模型如图2所示。其中,钢板剪力墙的厚度沿结构高度分布分别为:1~3层为10 mm,4~6层为8 mm,7~10层为6 mm;钢管混凝土柱-钢梁框架结构的4个方钢管混凝土角柱截面尺寸分别为:1~3层450 mm×450 mm×10 mm,4~9层400 mm×400 mm×10 mm,其余部位的框架柱均采用350 mm×350 mm×10 mm。结构主要构件的尺寸及材料见表1。



(a) 钢框架-钢板剪力墙结构



(b) 钢管混凝土柱-钢梁框架结构

图 1 结构标准层平面布置 (单位: mm)

Fig. 1 Standard floor layout of structure (unit: mm)

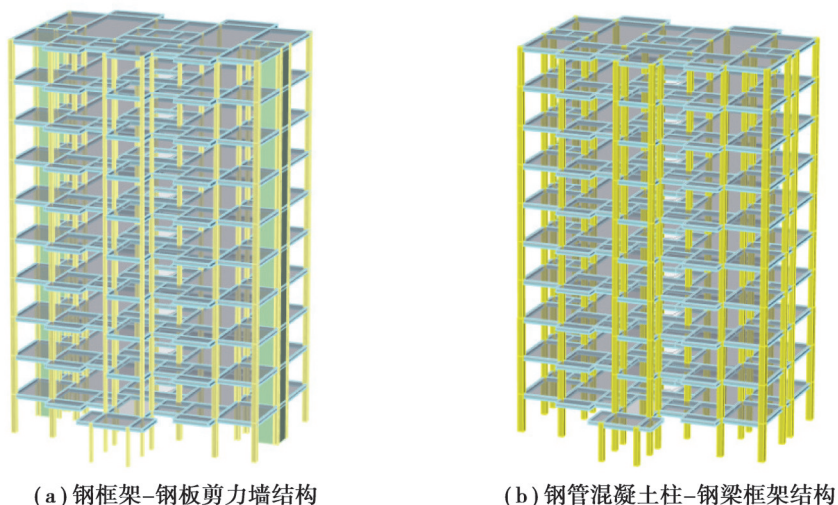


图2 结构计算模型

Fig. 2 Calculation model of structure

表1 结构主要构件尺寸及材料

Table 1 Dimensions and materials of main components of structures

结构体系	构件	截面尺寸(单位: mm)	材料
钢框架-钢板剪力墙结构	H型钢柱	H200×100×8×8; HW200×200×8×12; HW350×350×12×19; HW300×300×10×15; HW250×250×9×14	Q345B
	钢梁	HN350×175×7×11; H300×150×6×9; HN250×125×6×9; H200×100×6×8	Q345B
	钢板墙	2 800×6; 2 800×8; 2 800×10	Q345B
	楼板	顶层 120, 其余各层 110	C30
钢管混凝土柱-钢梁框架结构	方钢管混凝土柱	350×350×10; 400×400×10; 450×450×10	混凝土: C40 钢: Q345B
	钢梁	HN200×100×6×8; HN250×125×6×9; H250×125×10×10; HN350×175×7×11	Q345B
	楼板	顶层 120, 其余各层 110	C30

2 结构抗震设计

2.1 设计基本参数

结构的设计使用年限为 50 a, 结构安全等级为二级, 标准设防类(丙类), 抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度为 0.20g, 场地类别为 II 类, 设计地震分组为第 3 组, 场地特征周期 T_g 为 0.45 s, 基本风压为 0.3 kN/m², 风荷载体型系数取 1.3, 主要地震动参数见表 2。

表2 地震动参数

Table 2 Seismic parameters

地震水准	T_g/s	A_{max}/gal	α_{max}	ζ
多遇地震	0.45	70	0.16	0.04
设防地震	0.45	200	0.45	0.04
罕遇地震	0.50	400	0.90	0.05

注: A_{max} 为动力时程分析所用地震加速度时程的最大值; α_{max} 为水平地震影响系数最大值; ζ 为阻尼比。

2.2 抗震性能目标

建筑抗震设防类别为标准设防类, 按 8 度进行抗震验算和抗震措施的选取。对于钢框架-钢板墙结构, 根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[12] 8 度区, 高度小于等于 50 m 的钢结构房屋, 抗震等级为三级;

对于钢管混凝土柱-钢梁框架结构,根据《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)^[13]8度区,高度大于24 m的钢管混凝土框架结构,抗震等级为一级。综合考虑抗震设防类别、设防烈度、场地条件、结构体系等因素,要求结构达到“小震不坏,中震可修,大震不倒”的“三水准”抗震设防目标。

2.3 反应谱分析

结构采用盈建科软件进行整体计算,分析时采用考虑扭转耦联振动影响的振型反应谱法,2种结构的计算结果见表3。

表3 2种结构整体计算结果对比
Table 3 Comparison of the overall calculation results of the two structures

结构类型	前3阶自振周期				最大层间位移角/rad	
	T_1/s	T_2/s	T_3/s	T_1/T_2	X向地震	Y向地震
钢框架-钢板墙结构	1.706	1.682	1.268	0.74	1/376	1/396
钢管混凝土柱-钢梁框架结构	1.687	1.570	1.352	0.80	1/418	1/462

结构类型	最大层间位移比		最小剪重比/%		刚重比		最小抗剪承载力比	
	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向
钢框架-钢板墙结构	1.02	1.00	5.38	5.48	3.41	3.52	0.98	0.98
钢管混凝土柱-钢梁框架结构	1.05	1.00	4.61	4.90	16.81	18.83	1.00	1.00

注: T_1 为结构扭转为主的第一自振周期。

在具有偶然偏心的规定水平力作用下,2种结构的X和Y向楼层水平位移和层间位移的最大值与平均值的比值都小于1.2,根据《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2015)^[14]的规定,2种结构均不属于扭转不规则类型;钢框架-钢板墙结构前2阶平动振型对应的周期比钢管混凝土柱-钢梁框架结构略大,2种结构的扭转与平动周期比小于0.9,结构抗扭刚度良好。

在多遇地震作用下,钢框架-钢板剪力墙结构和钢管混凝土柱-钢梁框架结构的最大层间位移角分别满足《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2015)^[14]规定的1/250和《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)^[13]规定的1/300限值要求,且钢框架-钢板墙结构的层间位移角大于钢管混凝土柱-钢梁框架结构;2种结构的X、Y向最小剪重比均能满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[12]和《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2015)^[14]的3.20%限值要求。

结构的其余弹性分析指标(如,刚度比、抗剪强度比等)均能满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[12]和《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2015)^[14]的相关要求。

3 结构抗震性能分析

采用SAP2000有限元软件建立了结构的非线性分析模型。其中,楼板用膜单元模拟,且采用刚性楼板假定;梁和柱用框架单元模拟,梁端塑性铰采用自动弯矩铰(M3铰),柱端塑性铰采用自动P-M-M铰;钢板剪力墙用可考虑材料非线性的分层壳单元模拟^[15-16]。

根据8度抗震设防、II类场地及设计地震分组为第三组的要求,选用2组天然地震波和1组人造波,对结构进行动力时程分析。其中,天然地震波采用“双频段”选波方法^[17]进行选择,选用的3组地震波信息如表4所示。根据表2所示的地震峰值加速度进行调幅后按照三向地震动比例为1:0.85:0.65输入进行时程分析。同时,对所选用的3组地震波进行验算,满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[12]中“多组时程曲线的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符”的要求,即所选的每组地震波计算所得结构底部剪力不小于振型分解反应谱法计算结果的65%,3组地震波计算所得结构底部剪力的平均值不小于振型分解反应谱法计算结果的80%。

表4 所选地震波信息

Table 4 Selected seismic wave data

编号	地震名称	震级	台站	持时/s	步长/s	方向	峰值加速度/g
RSN746	Loma Prieta	6.9	Bear Valley #5_ Callens Ranch	29.61	0.005 0	X	0.059 8
						Y	0.054 6
						Z	0.038 8
RSN816	Georgia_USSR	6.2	Ambralauri	30.61	0.007 8	X	0.014 9
						Y	0.015 9
						Z	0.006 4
人造波				40.00	0.010 0	X	0.220 0
						Y	0.220 0
						Z	0.220 0

3.1 多遇地震下弹性动力时程分析

钢框架-钢板墙结构与钢管混凝土柱-钢梁框架结构在多遇地震作用下的各楼层最大层间位移角如图3所示。钢框架-钢板墙结构在结构上部(7~9层)的层间位移角较大,而钢管混凝土柱-钢梁框架结构在结构下部(2~4层)的层间位移角较大;并且钢管混凝土柱-钢梁框架结构最大层间位移角以及最大位移均明显小于钢框架-钢板墙结构,可见钢管混凝土柱-钢梁框架结构的整体刚度大于钢框架-钢板墙结构。

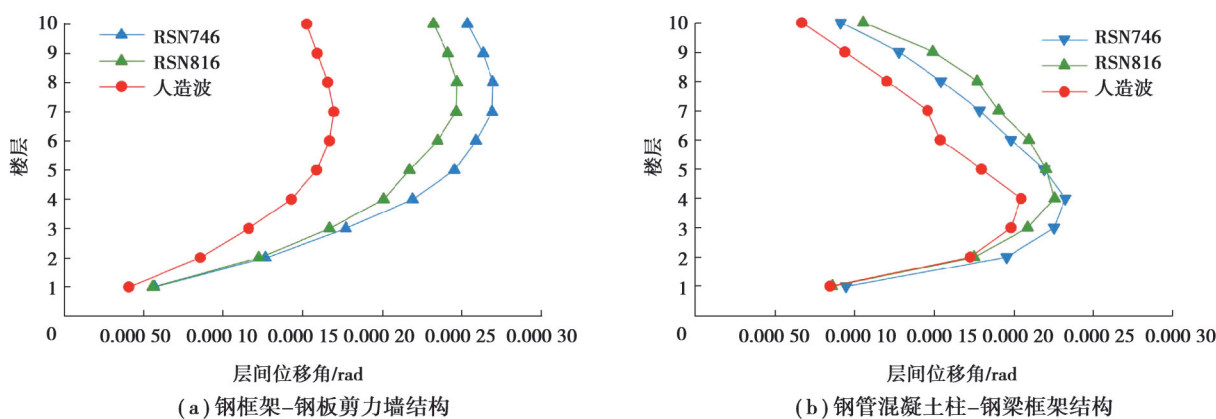


图3 多遇地震下各楼层最大层间位移角分布

Fig. 3 Distribution of maximum inter-story drift angle of the structure under frequent earthquakes

2种结构在多遇地震作用下的各楼层最大位移分布如图4所示。钢框架-钢板墙结构整体变形表现为弯曲线,而钢管混凝土柱-钢梁框架结构为剪切型。

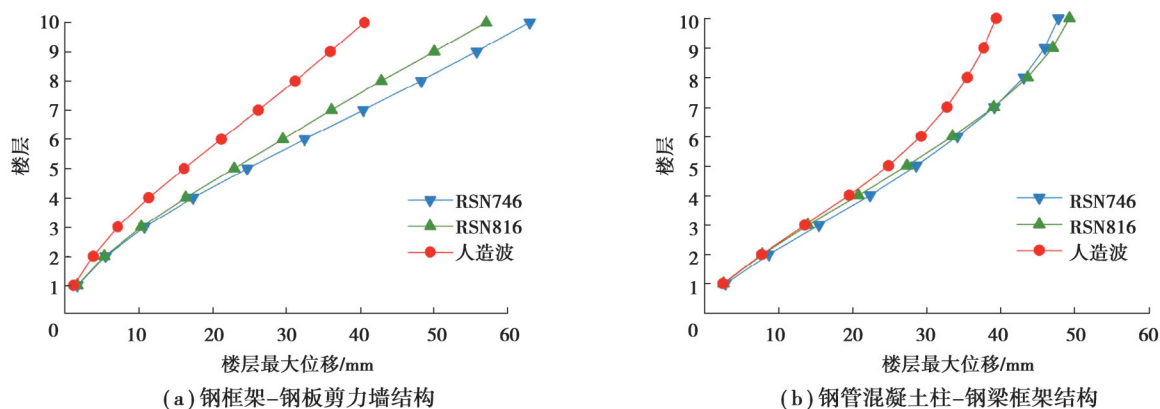


图4 多遇地震下各楼层最大位移分布

Fig. 4 Distribution of maximum displacement of the structure under frequent earthquakes

2 种结构在多遇地震作用下的各楼层最大剪力分布如图 5 所示。2 种结构的层间剪力值相差不大,且各层分布较均匀;综合层间位移和剪力分布可以看出,2 种结构的质量和刚度沿楼层分布都较均匀,且在多遇地震下都能满足“小震不坏”的要求。

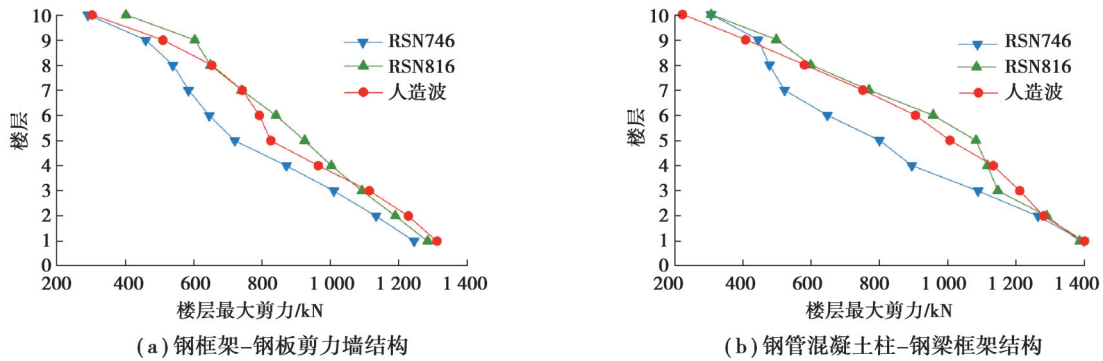
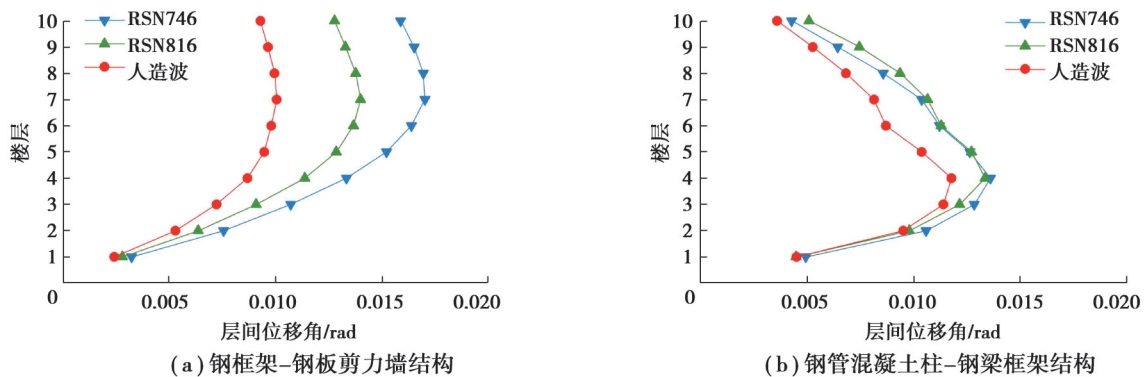


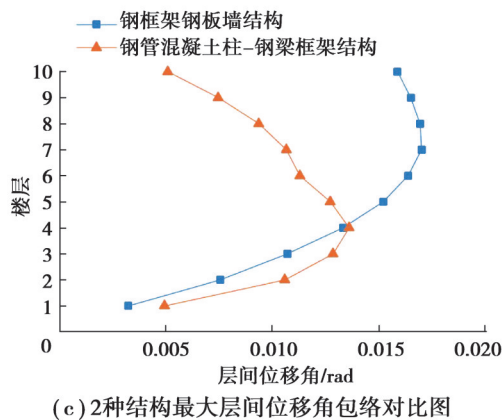
图 5 多遇地震下各楼层最大剪力分布
Fig. 5 Distribution of maximum shear force of the structure under frequent earthquakes

3.2 罕遇地震下弹性动力时程分析

钢框架-钢板墙结构与钢管混凝土柱-钢梁框架结构在罕遇地震作用下的各楼层最大层间位移角如图 6 所示。从图中可以看出,钢框架-钢板墙结构第 7 层的层间位移角最大,而钢管混凝土柱-钢梁框架结构第 4 层的层间位移角最大;钢框架-钢板墙结构在结构上部(5 层以上)的位移变形大于钢管混凝土柱-钢梁框架结构,而在结构下部(5 层以下),钢框架-钢板墙结构的位移变形比钢管混凝土柱-钢梁框架结构的位移变形小。此外,钢框架-钢板墙结构在不同地震波输入下响应相差较大,其中,在 RSN746 波作用下变形最明显,而钢管混凝土柱-钢梁框架结构在 3 组不同地震波作用下变形相差不大;钢框架-钢板墙结构的层间位移角没有因钢板墙厚度沿高度变化而发生突变,变化较均匀,而钢管混凝土柱-钢梁框架结构由于钢管混凝土柱截面变化导致结构的层间位移角在第 4 层发生了突变。



(a) 钢框架-钢板剪力墙结构 (b) 钢管混凝土柱-钢梁框架结构



(c) 2种结构最大层间位移角包络对比图

图 6 罕遇地震下各楼层最大层间位移角分布

Fig. 6 Distribution of maximum inter-story drift angle of the structure under rare earthquakes

2种结构在罕遇地震作用下的塑性铰发展结果的统计数据如表5所示。可见,2种结构在地震波作用下出现塑性铰的位置大部分为梁端,符合“强柱弱梁”的抗震设计理念。同时,钢框架-钢板墙结构在不同地震波作用下出现塑性铰的时刻均早于钢管混凝土柱-钢梁框架结构。

表5 2种结构塑性铰结果统计

Table 5 Statistics of plastic hinge results for the two structures

结构形式	地震波	首次出铰时间/s	梁铰数量 (占比/%)	柱铰数量 (占比/%)
钢框架-钢板墙结构	RSN746	9.0	55(78.57)	15(21.43)
	RSN816	8.8	33(82.50)	7(17.50)
	人造波	7.8	26(86.67)	4(13.33)
钢管混凝土柱-钢梁框架结构	RSN746	9.3	119(97.54)	3(2.46)
	RSN816	10.2	118(100)	0(0)
	人造波	7.9	65(98.48)	1(1.52)

图7和图8分别展示了在RSN746地震波作用下2种结构的塑性铰发展规律,图中不同颜色的圆点表示不同塑性程度的塑性铰,即由紫色至红色表示塑性程度越来越大。由图可知,钢框架-钢板墙结构在地震波作用下,靠近剪力墙的底层框架柱脚首先出现塑性铰,随后,在钢板剪力墙附近的梁端逐渐出现塑性铰,随着地震波持续作用,结构进入屈服的构件数量越来越多,其他部位的梁端也开始出现塑性铰;钢管混凝土柱-钢梁框架结构在地震波作用下,塑性铰首先在结构第2、3层的四周边梁的端部出现,随着地震波持续作用,塑性铰开始在结构中楼层的中间梁梁端以及底层的柱脚出现。此外,钢框架-钢板墙结构塑性铰主要出现在剪力墙周围的柱和框架梁的端部,且在整个结构不同高度均有塑性铰分布;而钢管混凝土柱-钢梁框架结构的塑性铰则大部分集中在结构的中下部分,在结构的上部没有出现塑性铰。

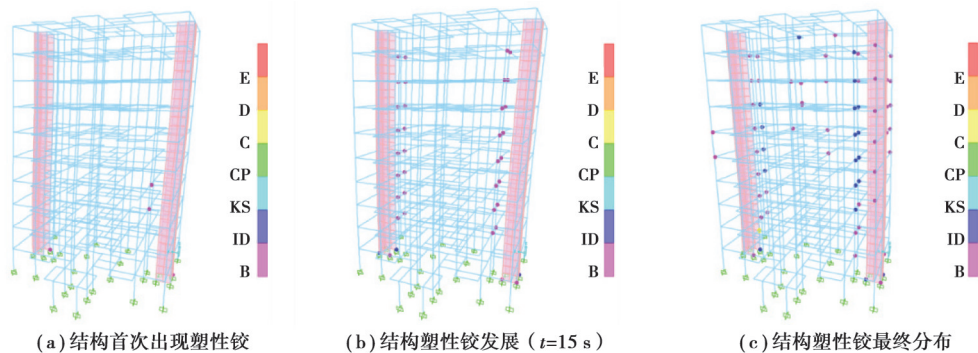


图7 钢框架-钢板墙结构各阶段塑性铰分布

Fig. 7 Distribution of plastic hinges in each stage of the steel frame-steel wall structure

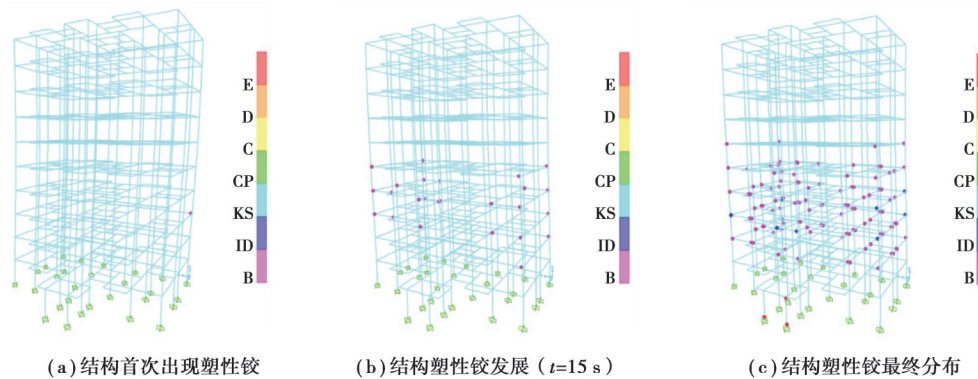


图8 钢管混凝土柱-钢梁框架结构各阶段塑性铰分布

Fig. 8 Distribution of plastic hinges in each stage of the steel frame structure with concrete-filled steel tube columns

4 结 论

对比了高烈度区钢框架-钢板墙结构和钢管混凝土柱-钢梁框架结构在不同地震水准下的响应规律、塑性分布及发展过程,主要结论如下。

1)无论是钢框架-钢板墙结构还是钢管混凝土柱-钢梁框架结构,均能够满足预期的抗震性能要求,适用于高烈度区的多高层民用建筑。

2)在多遇地震作用下,钢框架-钢板墙结构在结构上部(7~9层)的层间位移角较大,而钢管混凝土柱-钢梁框架结构在结构下部(2~4层)的层间位移角较大。钢框架-钢板墙结构整体变形表现为弯曲型,而钢管混凝土柱-钢梁框架结构为剪切型。

3)在罕遇地震作用下,钢框架-钢板墙结构第7层的层间位移角最大,塑性铰集中于钢板墙附近,而钢管混凝土柱-钢梁框架结构第4层的层间位移角最大,塑性铰集中于中部楼层。

4)钢框架-钢板墙结构在地震作用下钢板墙附近的梁端和柱端是塑性铰较集中的部位,而钢管混凝土柱-钢梁框架结构在地震作用下塑性铰集中于中间层,在设计时需重点关注。

5)钢框架-钢板墙结构在地震作用下楼层侧向位移及塑性铰沿高度分布较均匀,而钢管混凝土柱-钢梁框架结构在地震作用下中下部楼层的侧向位移较明显且塑性铰较集中。

参考文献

- [1] 周绪红,王宇航.我国钢结构住宅产业化发展的现状、问题与对策[J].土木工程学报,2019,52(1):1-7.
Zhou X H, Wang Y H. Status, problems and countermeasures of industrialization development of steel structural residence in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(1): 1-7.(in Chinese)
- [2] 余玉洁,赵凤涛,郭凤琪.钢管混凝土柱-横肋波纹板剪力墙抗侧性能分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(12):1243-1253.
Yu Y J, Zhao F T, Guo F Q. Analysis of lateral resisting behavior of horizontally corrugated steel plate shear wall with concrete-filled steel tube frame[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(12): 1243-1253.(in Chinese)
- [3] Bhowmick A K, Grondin G Y, Driver R G. Nonlinear seismic analysis of perforated steel plate shear walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 94: 103-113.
- [4] Driver R G, Kulak G L, Kennedy D J L, et al. Cyclic test of four-story steel plate shear wall[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(2): 112-120.
- [5] 聂建国,朱力,樊健生,等.钢板剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(1):61-69.
Nie J G, Zhu L, Fan J S, et al. Experimental research on seismic behavior of steel plate shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 61-69.
- [6] Sahebjam A, Showkati H. Experimental study on the cyclic behavior of perforated CFRP strengthened steel shear walls[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2016, 16(3): 365-379.
- [7] 韩林海,杨有福.现代钢管混凝土结构技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
Han L H, Yang Y F. Modern concrete filled steel tube structure technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.(in Chinese)
- [8] 杜国锋,许成祥,江楚雄.钢管混凝土框架结构模拟地震振动台试验[J].重庆大学学报,2008,31(2):228-231.
Du G F, Xu C X, Jiang C X. Earthquake simulation shaking table test of concrete-filled steel tube frame structure[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(2): 228-231.(in Chinese)
- [9] 王志滨,吴泓均,庄金平,等.带肋薄壁复式钢管混凝土柱的抗震性能研究[J].建筑结构学报,2020,41(11):41-50.
Wang Z B, Wu H J, Zhuang J P, et al. Seismic behaviour of concrete-filled thin-walled double-tubular columns with longitudinal stiffeners[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(11): 41-50.(in Chinese)
- [10] Han L H, Liao F Y, Tao Z, et al. Performance of concrete filled steel tube reinforced concrete columns subjected to cyclic bending[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(8/9): 1607-1616.

- [11] 赵均海,樊军超,高伟琪. 钢管混凝土柱-钢梁延伸式端板连接节点初始转动刚度计算模型[J]. 建筑结构学报,2021,42(2): 103-111.
Zhao J H, Fan J C, Gao W Q. Calculation model for initial rotational stiffness of steel beam to concrete-filled steel tube column joints with extended end-plate[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(2): 103-111.(in Chinese)
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土结构技术规范:GB 50936—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for concrete filled steel tubular structures: GB 50936—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层民用建筑钢结构技术规程:JGJ 99—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for steel structure of tall building: JGJ 99—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [15] 北京金土木软件技术有限公司,中国建筑标准设计研究院. SAP2000 中文版使用指南[M].2版.北京:人民交通出版社,2012.
Beijing Civil King Software Technology Co., Ltd., China Institute of Building Standard Design and Research. SAP2000 Chinese user guide[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2012.(in Chinese)
- [16] 武秀莹,苏志彬. SAP2000 V14 非线性分层壳单元[C].CUC'2010 金土木结构软件全国用户大会.北京:北京金土木软件技术有限公司,2010.
Wu X Y, Su Z B. SAP2000 V14 nonlinear multilayer shell elements [C]. 2010 National Conference of Users of Civil King Software. Beijing: Beijing Civil King Software Technology Co., Ltd., 2010.(in Chinese)
- [17] 杨溥,李英民,赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J]. 土木工程学报,2000,33(6):33-37.
Yang P, Li Y M, Lai M. A new method for selecting inputting waves for time-history analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 33-37.(in Chinese)

(编辑 罗 敏)