

基于性能的新型装配式钢节点混凝土 框架结构抗震设计

戎 贤^{1,2}, 郝君临¹, 张健新^{1,2}

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘 要 目的 基于一种新型预制装配式钢筋混凝土梁柱节点试验, 将现浇钢筋混凝土框架结构(RCF)与新型装配式钢节点混凝土框架结构(PCF)进行抗震性能对比分析, 验证 PCF 结构的安全可靠, 从而进行推广应用。方法 运用有限元分析软件 Perform-3D 进行纤维截面建模, 自定义组合截面; 对 RCF 结构以及 PCF 结构进行基于性能的抗震性能分析。结果 该新型装配式钢节点混凝土框架结构的极限承载力和最大位移均大于普通现浇钢筋混凝土框架结构, 延性较好, 能够承担较大剪力, 且整体耗能能力更强, 抗倒塌性能良好。结论 此类新型装配式钢节点满足规范要求, 而且能够提高结构的抗震性能。

关键词 装配式钢节点混凝土框架; 基于性能的抗震分析; Perform-3D; 易损性分析

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Research on Performance-based Seismic Design of New Prefabricated Steel Joint Concrete Frame Structure

RONG Xian^{1,2}, HAO Junlin¹, ZHANG Jianxin^{1,2}

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300401;
2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin, China, 300401)

Abstract: Based on a newly prefabricated concrete joint test, the seismic performance of reinforced concrete frame structure (RCF) and newly prefabricated concrete frame structure (PCF) are compared, to validate the safety and reliability of PCF for wider application. The fiber section modeling and custom composite section definition are performed using the Perform-3D finite element analysis software. Performance-based seismic analysis is conducted for both RCF and PCF. PCF exhibits higher ultimate bearing capacity and maximum displacement compared to RCF, which demonstrates excellent ductility, can withstand larger shear force, and possesses stronger energy dissipation capacity, resulting in superior resistance to collapse. The newly prefabricated

收稿日期: 2023-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208160); 河北省自然科学基金项目(E2020202134, E2021202012);
天津市自然科学基金重点项目(20JCZDJC00370)

作者简介: 戎贤(1965—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事建筑材料、结构抗震等方面研究。

concrete joint meets the requirements of design codes and significantly enhances the seismic performance of the structure.

Key words: prefabricated concrete frame; performance-based seismic design; perform-3D; vulnerability analysis

随着我国建筑业的高质量发展,装配式混凝土框架结构由于具有绿色、高效和产业化等优势,有效提高和保证了建筑工程质量,从而在工程中得到了广泛应用。20 世纪 90 年代,第一个关于装配式混凝土抗弯框架抗震性能的研究由美国国家标准和技术研究所提出^[1],由此学者们开始大量研究并获得了众多研究成果。C. Li 等^[2]针对一种带有可更换耗能连接器的预制混凝土框架进行抗震性能研究,试验结果表明 REDC-PCF 滞回性能优越,可以实现理想的梁铰屈服机制;S. C. Girgin 等^[3]研究了预制框架的响应修正系数,并提出一种用于评估多层预制混凝土结构抗震性能的数值模型;L. Huang 等^[4]对后张自复位预制混凝土框架结构(SCPC)进行了基于性能的抗震设计及非线性时程分析,结果表明,与传统连接相比,该连接形式在承载能力、耗能能力和恢复能力方面均有显著的改善。我国对于装配式混凝土框架结构的研究起步较晚,近几年,国内对于装配式混凝土框架结构的研究通常集中在提出新型装配式节点连接形式^[5-8]或使用新型材料^[9-10]。然而,目前针对装配式混凝土框架结构的研究,较多围绕其节点和构件,对结构层面的研究较少。由于全尺寸低周往复加载试验与振动台试验的高成本和复杂性,或者无法保证有限元模型的准确性及可靠性,装配式混凝土框架结构的整体性能研究受到了限制。此外,虽然大部分装配式混凝土结构在施工现场安装时已经完成了装配,但连接节点仍需要在现场进行混凝土浇筑,这样的施工方式会增加施工的难度,并且延长施工时间,可能对结构的性能产生不利影响。

钢连接技术具有高效性和灵活性,但由

于钢结构自身耐火性和耐腐蚀性较差等因素,也限制了其应用。戎贤等^[11-15]提出了一种新型装配式混凝土框架节点,该新型节点将钢结构梁柱节点连接方式的设计理念应用于混凝土结构中。笔者基于这种新型装配式混凝土框架节点建立了新型装配式钢节点混凝土组合框架结构(PCF)的有限元模型,并采用基于性能的抗震评估方法,进一步分析该节点在结构层面的抗震性能,研究表明,该新型节点在整体结构中表现出较好的抗震性能,特别是在延性及耗能方面,且 PCF 结构相较于 RCF 结构具有更强的抗倒塌能力。

1 基于性能的抗震设计方法

Perform-3D 是一款三维建筑结构非线性分析软件,其提供的纤维截面建模在基于性能的抗震评估中得到了广泛应用^[16-17]。笔者运用 Perform-3D 对现浇钢筋混凝土框架结构(RCF)与新型装配式钢节点混凝土框架结构(PCF)进行 Pushover 分析、弹塑性时程分析以及基于 IDA 方法的地震易损性分析,对比计算两种结构的超强系数及延性系数,得到罕遇地震下的层间最大位移角、楼层最大位移、楼层最大剪力和结构地震能量耗散等重要指标。基于 IDA 方法研究结构在不同地震强度下的抗震性能,计算抗倒塌安全储备系数 CMR,定量评估结构的抗倒塌性能。

2 新型装配式钢节点混凝土框架结构分析模型

2.1 新型装配式钢节点混凝土组合框架节点

该新型装配式混凝土框架节点的具体做

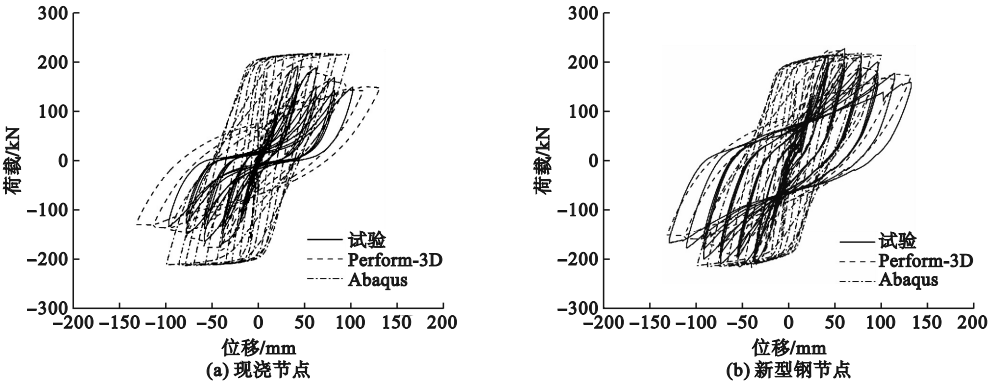


图 5 滞回曲线模拟与试验对比

Fig. 5 Hysteretic curves simulation and experimental comparison

2.3 结构分析模型

从图 1 可以看出,PCF 结构节点处有一部分 H 型钢预埋在钢筋混凝土预制梁端头,还有一部分 H 型钢采用焊接和螺栓连接的方式与预制柱连接成整体,假设预埋 H 型钢长度为 600 mm。RCF 结构及 PCF 结构平、立面尺寸如图 6 所示。

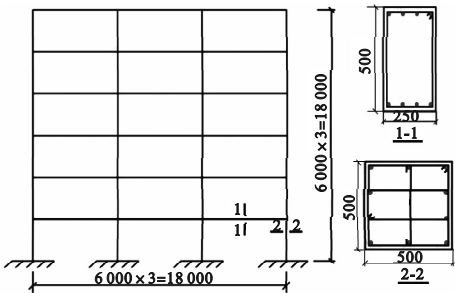


图 6 结构的平立面示意图

Fig. 6 Structural plan and section

两种模型结构的尺寸与材料参数相同,仅节点连接形式不同。模型抗震设防烈度为 7 度,设计基本加速度为 0.1 g,设计地震分组为第一组,场地类别为 II 类,场地特征周期为 0.35 s。模型结构平立面规则对称,共 6 层,结构层高为 3 m,跨长为 6 m。柱截面宽×高为 500 mm×500 mm,梁截面宽×高为 250 mm×500 mm。现浇混凝土板厚为 170 mm,楼面恒荷载和活荷载分别为 5 kPa 和 2 kPa;混凝土强度等级为 C30,所有梁柱截面纵向受力钢筋及箍筋均为 HRB400,型钢采用 Q235 钢材。

2.4 地震动选取

根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中的选波原则,选取两条天然地震波和 1 条人工模拟地震波,其中天然地震记录从 PEER 数据库中选取,包括 FIRE STATION 22791 记录的 HECTOR MINE (T1) 和 USC STATION 90070 记录的 WHITTIER(T2),人工模拟地震波(R)则采用 PBSO 软件生成。图 7 给出了 3 条地震记录的加速度反应谱、平均反应谱及规范设计反应谱。

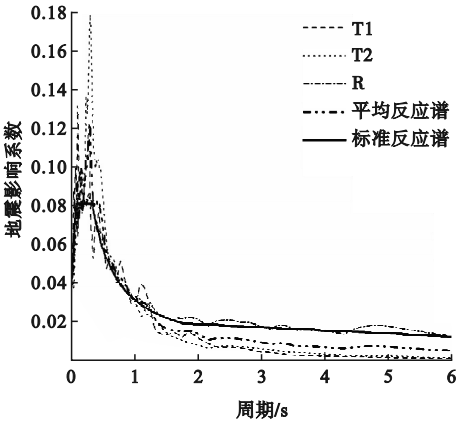


图 7 地震波谱与反应谱对比

Fig. 7 Seismic spectra and response spectra

3 Pushover 分析

Pushover 分析方法是一种以结构的侧向位移作为整体抗震性能的结构抗震性能评估方法。在 Pushover 分析中,不同的侧向力分

布模式可能会产生不同的 Pushover 曲线^[20], 因此笔者运用 Perform-3D 对 RCF 结构和 PCF 结构进行倒三角分布 SPO1 和均匀分布 SPO2 两种侧向力分布模式下的 Y 向分析, 分别得到 RCF 结构和 PCF 结构在 SPO1 和 SPO2 下的 Pushover 曲线(见图 8)。从图中可以看出,在初始弹性阶段,两种侧向力分布模式下的能力曲线较为接近,其初始弹性刚度

相对一致;当进入弹塑性阶段时,两种结构内力均增长缓慢而塑性位移快速发展。在整个推覆过程中,均匀荷载模式的能力曲线一直位于倒三角荷载模式的能力曲线之上,倒三角荷载模式对于结构的抗震性能评估相对保守。此外,由图 8 对比分析可知,在两种侧向力分布模式下,与 RCF 结构相比,PCF 结构的极限承载力与顶点最大位移均显著提高。

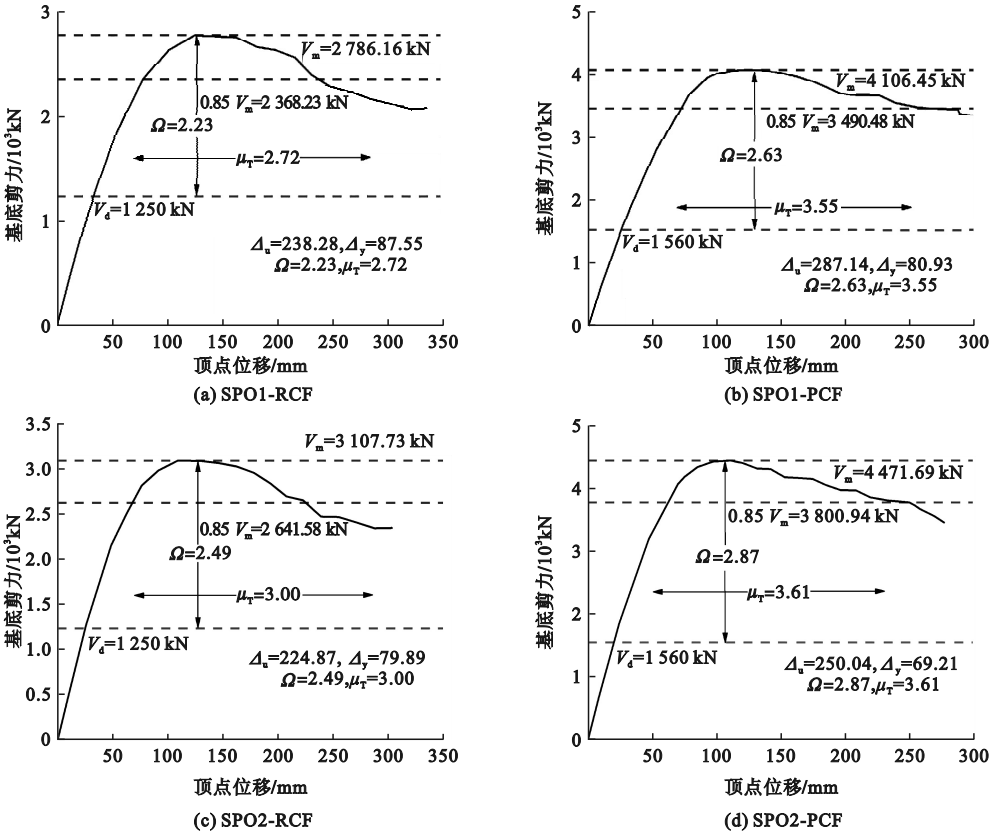


图 8 两种结构的能力曲线

Fig. 8 Capacity curves of two structures

获得 Pushover 曲线后提取出相应的抗震性能参数:最大基底剪力 V_m 、设计基底剪力 V_d 、极限位移 Δ_u 和屈服位移 Δ_y 。屈服位移求解采用 R. Park 方法^[21],即 15% 的抗剪承载力损失所对应的顶点位移值被视为极限位移。实际工程中,结构的设计抗震能力通常小于其实际的抗震能力,用超强系数表示,定义为结构实际的抗震能力与其设计地震力的比值;延性系数可以反映结构塑性变形和耗散能量的能力,定义为极限位移与屈服位

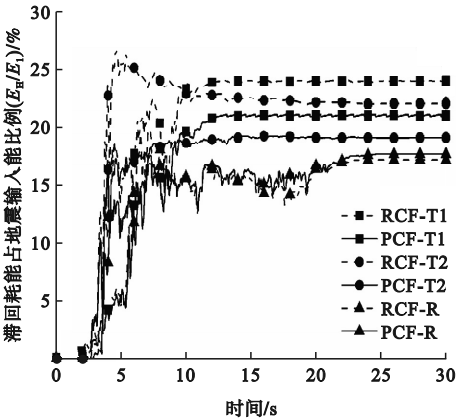
移的比值。

在 SPO1 和 SPO2 作用下,RCF 结构与 PCF 结构的平均超强系数分别为 2.36 和 2.75,表明配置钢端头能够使结构在侧向荷载模式下获得更强的刚度和抗剪承载力。此外,RCF 结构与 PCF 结构的平均延性系数为 2.86 和 3.58,表明 PCF 结构中钢节点处水平-垂直钢板的设置能够有效提高位移延性系数,进而提升结构的抗震性能。

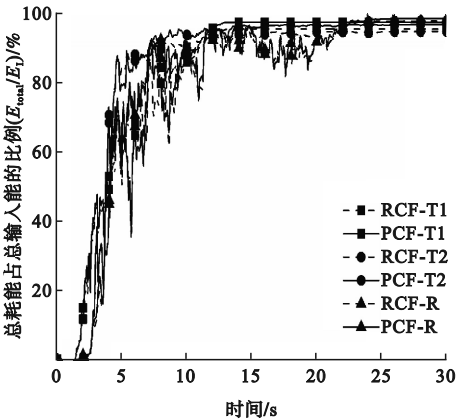
4 弹塑性时程分析

运用 Perform-3D 软件,以选择的 3 条地震波作为地震动输入,并将所选地震波峰值调整到规范要求 7 度罕遇地震的加速度峰值 220 g,对 RCF 结构和 PCF 结构进行弹塑性时程分析,研究两种结构在地震输入下的能量分布。

RCF 结构与 PCF 结构在三种地震波作用下得到的地震能量时程对比结果如图 9 所示。由图 9(a)可知,RCF 结构最大地震输入能为人工波作用下的 $8.259 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}$,PCF 结构最大地震输入能为人工波作用下的 $7.458 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}$,人工波作用下的 RCF 结构最大地震输入能大于 PCF 结构;但在 T1 波和 T2 波的输入下,PCF 结构的最大地震输入能大于 RCF 结构。由图 9(b)可知,在地震初期,RCF 结构与 PCF 结构的滞回耗能数值为 0,阻尼耗能也很小,表明两种结构此时均无塑性变形,结构的地震输入能主要以动能和弹性应变能储存起来;随着地震能量的输入,RCF 结构率先观察到滞回耗能现象,开始出现塑性变形;之后,地震输入能随总耗能的增加而迅速增加;随着地震波的输入,总耗能几乎不再增加,此时总耗能在地震输入能所占比例达到峰值,表明结构的耗能能力达到饱和,地震输入能绝大部分被滞回耗能和阻尼耗能耗散。由图 9(b)和图 9



(b) 滞回耗能占总输入能的比例



(c) 总耗能占总输入能的比例

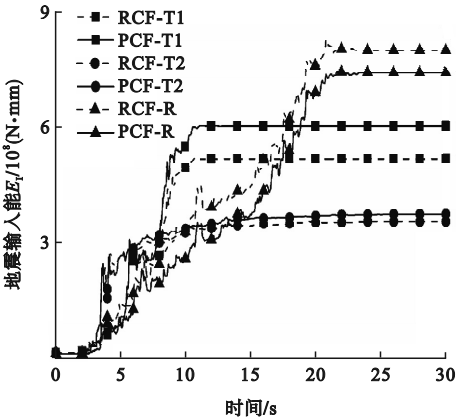
图 9 不同地震波输入下地震能量时程对比

Fig. 9 Comparison of seismic energy time-history under different seismic waves

(c)可知,PCF 结构整体滞回耗能占地震总输入能的比例小于 RCF 结构,总耗能占总输入能的比例却大于 RCF 结构,说明 PCF 结构在罕遇地震作用下,塑性破坏小于 RCF 结构,整体耗能能力较优。

5 基于 IDA 方法的地震易损性分析

地震易损性分析可以基于 IDA 方法获得结构在不同强度地震作用下发生各种不同破坏状态的概率,该方法在基于性能的抗震评估中得到了普遍应用。笔者分别选用 PGA 和 θ_{max} 分别作为 IM 和 DM 指标进行 IDA 分析,并采用抗倒塌安全储备系数 CMR 对结构的抗倒塌性能进行定量评估。



(a) 地震输入能时程

5.1 地震波选取

合理的地震易损性分析需要大量的强震记录,一般选取 10~20 条地震波记录就能满足一定的精度要求^[22-23]。首次取 PGA 为

0.2 g,以 0.2 g 为增量在 0.2 g~1 g 取值,在 Perform-3D 中对 RCF 结构与 PCF 结构进行地震易损性分析。地震波具体参数见表 2。

表 2 地震动记录

Table 2 Ground motion records

序号	事件	年份	台站信息	震级	持续时长/s	间隔时间/s	PGA/g
GM1	Kobe, Japan	1995	Nishi-Akashi	6.9	40.95	0.01	0.51
GM2	Kobe, Japan	1995	Shin-Osaka	6.9	40.95	0.01	0.24
GM3	Kocaeli, Turkey	1999	Arcelik	7.5	30	0.005	0.22
GM4	Kocaeli, Turkey	1999	Duzce	7.5	27.18	0.005	0.31
GM5	Chi-Chi-Taiwan	1999	CHY101	7.6	90	0.005	0.44
GM6	Chi-Chi-Taiwan	1999	TCU067	7.6	90	0.005	0.5
GM7	Friuli, Italy	1976	Tolmezzo	6.5	36.34	0.005	0.35
GM8	Duzce, Turkey	1999	Bolu	7.1	55.89	0.01	0.73
GM9	Hector Mine	1999	Hector	7.1	45.3	0.01	0.27
GM10	San Fernando	1971	LA-Hollywood Stor FF	6.6	27.99	0.01	0.21
GM11	Superstition Hills	1987	El Centro Imp. Co. Cent	6.5	40	0.005	0.36
GM12	Superstition Hills	1987	Poe Road(temp)	6.5	22.29	0.01	0.45
GM13	Imperial Valley	1979	Delta	6.5	99.91	0.01	0.24
GM14	Imperial Valley	1979	El Centro Array #11	6.5	39.03	0.005	0.36
GM15	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #3	6.9	39.94	0.005	0.56
GM16	Loma Prieta	1989	Capitola	6.9	39.95	0.005	0.53
GM17	Cape Mendocino	1992	Rio Dell Overpass-FF	7	35.98	0.02	0.39
GM18	Landers	1992	Yermo Fire Station	7.3	43.98	0.02	0.24
GM19	Northridge	1994	Beverly Hills-14145 Mulhol	6.7	29.98	0.01	0.42
GM20	Northridge	1994	Canyon Country-W Lost Cany	6.7	19.98	0.01	0.41

5.2 增量动力分析

根据地震易损性分析步骤,对 RCF 结构和 PCF 结构进行多级强度水平下的非线性

时程分析,并得到了两种结构的 IDA 曲线如图 10 所示。

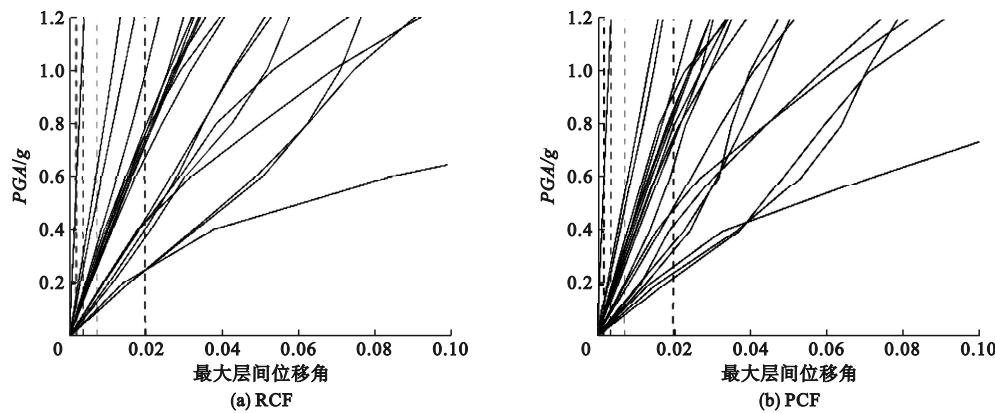


图 10 IDA 分析下结构最大层间位移角

Fig. 10 Maximum inter-story displacement angle of structure under IDA analysis

从图中可以看出,RCF 结构与 PCF 结构 IDA 曲线分布相似,先快速增加,然后逐渐趋于平缓。当 $PGA = 0.2\text{ g}$ 时,RCF 结构的平均最大层间位移角比 PCF 低 0.015 6,这表明采用钢节点连接可以增强结构罕遇地震下的层间位移。当 PGA 为 $0.2\text{ g} \sim 0.8\text{ g}$ 时,RCF 结构与 PCF 结构的最大层间位移角大致相同。随着 PGA 的增加,RCF 结构与 PCF 结构的层间位移角平均值逐渐增大。当 $PGA = 1.2\text{ g}$ 时,PCF 结构的平均最大层间位移角比 RCF 结构高 0.118 3,表明随着地震强度的增加,PCF 结构表现出了良好的变形能力。

通过对 PGA 和最大层间位移角取对数,分别建立相应的坐标系,得到最终拟合结果如图 11 所示。对上述数据进行回归分析,得出 RCF 结构和 PCF 结构在不同地震强度下的地震需求线性回归方程。

RCF 结构:
$$\ln \theta_{\max} = -3.014\ 3 + 1.062\ 1 \ln PGA. \quad (1)$$

PCF 结构:
$$\ln \theta_{\max} = -3.144\ 2 + 1.032\ 2 \ln PGA. \quad (2)$$

RCF 结构和 PCF 结构的拟合系数 R^2 分别为 0.971 5 和 0.936 2,表明两种结构的线性回归模型拟合程度较好。

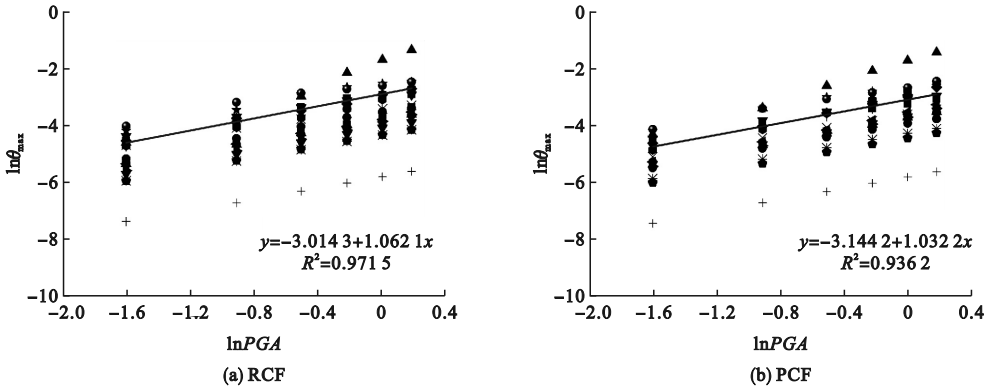


图 11 框架结构地震需求回归分析曲线

Fig. 11 Regression analysis curves of seismic demand for frame structures

5.3 易损性曲线

地震易损性分析可以通过 IDA 分析获得易损性曲线来预测结构在不同等级地震作用下发生各级破坏的概率。结构抗力的极限状态取层间位移角为 $1/550$ 、 $1/275$ 、 $1/135$ 和 $1/50$ 作为结构抗震能力的界限值,分别表示正常使用 LS_1 、修复后使用 LS_2 、生命安全 LS_3 和预防倒塌 LS_4 ,取值见表 3。

表 3 各破坏等级对应的层间位移角限值

Table 3 Limit values of inter-story displacement angle corresponding to each failure level	
破坏等级	位移角限值 θ
正常使用(LS_1)	$1/550 < \theta \leq 1/275$
修复后使用(LS_2)	$1/275 < \theta \leq 1/135$
生命安全(LS_3)	$1/135 < \theta \leq 1/50$
倒塌(LS_4)	$\theta > 1/50$

RCF 结构与 PCF 结构在最大层间位移角下的易损性曲线见图 12。从图中可以看出,RCF 结构的易损性高于 PCF 结构。两种结构在 LS_1 和 LS_2 状态下的易损性曲线几乎重合,说明新型装配式钢节点在 LS_1 和 LS_2 状态下对结构损伤几乎没有影响;随着结构地震动强度的增加,PCF 结构的易损性优势逐渐显现,在 LS_3 状态下,PCF 结构的易损性程度略小于 RCF 结构,超越概率分别为 95.86% 和 96.64%;在最终的 LS_4 状态下,PCF 结构较 RCF 结构显示出较大优势,超越概率分别为 79.21% 和 88.42%。这表明采用新型装配式钢节点能够有效地减轻地震作用下结构的损伤,提升整体结构抵御强震的破坏概率,尤其在最终的结构倒塌极限状态阶段效果明显。

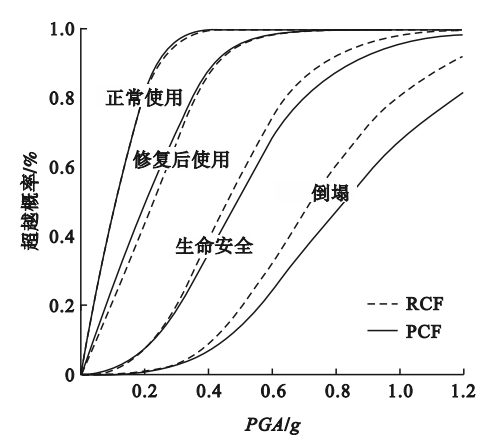


图 12 基于 IDA 分析的结构最大层间位移角分布

Fig. 12 Distribution of maximum inter-story displacement angle of structure based on IDA analysis

5.4 抗倒塌储备系数

抗倒塌安全储备系数可以作为抗倒塌能力的量化指标,定义如下:

CMR = \frac{IM_{CT}}{IM_{MT}}. (3)

式中:IM_{CT}为中值倒塌强度,定义为倒塌概率50%下地震易损性曲线上的PGA取值;IM_{MT}为最大考虑地震的地震动强度,在我国可采用罕遇地震时的PGA。

抗倒塌安全储备系数越大,表明结构的抗倒塌能力越好,结构抗倒塌安全储备系数见表4。从表中可以看出,PCF结构抗倒塌安全储备系数大于RCF结构,表明新型钢节点可以显著提高结构的抗倒塌能力,具有更好的抗震性能。

表 4 结构抗倒塌安全储备系数
Table 4 Safety reserve coefficient of structural collapse resistance

结构形式	IM _{CT} /g	IM _{MT} /g	CMR
RCF 结构	0.718 1	0.224 4	3.200 2
PCF 结构	0.817 7	0.230 0	3.555 2

6 结 论

(1)由 Pushover 对比分析可知,倒三角分布模式对结构抗震性能的评估相对保守。此外,与普通现浇结构相比,新型装配式钢节

点混凝土框架结构整体刚度较大,并且具有更高的承载能力与变形能力。

(2)由7度罕遇地震作用下非线性对比分析可知,新型装配式钢节点混凝土框架结构层间变形趋于均匀,与普通现浇结构相比具有较小的层间变形,延性较好,且能够承担更大的剪力。

(3)由不同地震波输入下地震能量时程对比分析可知,与普通现浇结构相比,新型装配式钢节点混凝土框架结构累积塑性损伤较小,整体耗能显著,且楼层滞回耗能占总滞回耗能比值较为均匀,没有发生能量集中现象,能够较好避免薄弱层失效。

(4)由基于 IDA 方法的结构易损性分析可知,普通现浇结构与新型装配式钢节点混凝土框架结构的最大层间位移角增幅均出现先增大后减小再增大的趋势;弹性阶段,两种结构的结构损伤几乎相似,但随地震强度增大,新型装配式钢节点混凝土框架结构能够有效减轻地震作用下结构损伤,提高结构抗倒塌概率。

参考文献

[1] CHEOK G S, LEW H S. Performance of precast concrete beam-to-column connections subject to cyclic loading [J]. PCI journal, 1991, 36(3): 56-67.

[2] LI C, WU J, ZHANG J, et al. Experimental study on seismic performance of precast concrete frame with replaceable energy-dissipating connectors [J]. Engineering structures, 2021, 231: 111719.

[3] GIRGIN S C, MISIR İ S, KAHRAMAN S. Seismic performance factors for precast buildings with hybrid beam-column connections [J]. Procedia engineering, 2017, 199: 3540-3545.

[4] HUANG L, CLAYTON P M, ZHOU Z. Seismic design and performance of self-centering precast concrete frames with variable friction dampers [J]. Engineering structures, 2021, 245: 112863.

[5] 熊峰,钟亚超,冉明明,等.螺栓连接装配式混凝土墙板结构水平缝的抗震性能研究[J].建筑结构,2022,52(23):35-45.

(XIONG Feng, ZHONG Yachao, RAN Mingming, et al. Bolt-connected precast RC wall panel structural seismic performance of horizontal joint [J]. Building structure, 2022, 52(23): 35-45.)

- [6] 王寅,朱江杰.基于LINGO的装配式混凝土框架结构预制方案优化研究[J].建筑经济,2021,42(2):71-75.
(WANG Yin,ZHU Jiangjie. Research on the optimization of prefabricated schemes of assembled concrete frame structure based on LINGO[J]. Construction economy, 2021, 42(2):71-75.)
- [7] 王宇,王立志,李峥,等.低周反复荷载下新型装配式梁柱节点力学性能分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(2):245-253.
(WANG Yu,WANG Lizhi,LI Zheng,et al. Mechanical property analysis of new prefabricated beam-column joints under low-cyclic loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(2):245-253.)
- [8] 朱云青,吴京,童超,等.带可更换耗能钢棒的装配式混凝土单侧屈服梁柱节点抗震性能试验研究[J].工程力学,2022,39(7):13.
(ZHU Qingyun,WU Jing,TONG Chao,et al. Experimental study on hysteretic performance of single-side yielding precast concrete beam-column connection with replaceable energy dissipation bars [J]. Engineering mechanics, 2022,39(7):13.)
- [9] 钱辉,祝运运,张羊羊,等.功能自恢复预制装配式梁柱节点抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2022,56(1):57-65.
(QIAN Hui,ZHU Yunyun,ZHANG Yangyang,et al. Experimental study on seismic behavior of earthquake resilient prefabricated beam-column joints [J]. China civil engineering journal,2022,56(1):57-65.)
- [10] 吕相蓉,李秀领,郭强,等.纤维增强水泥基复合材料装配式节点抗震性能研究[J].建筑科学,2021,37(9):80-89.
(Lü Xiangrong,LI Xiuling,GUO Qiang,et al. Research on seismic performance of fiber-reinforced cementitious composites fabricated joints [J]. Building science, 2021, 37(9):80-89.)
- [11] 戎贤,卜凡,张健新,等.装配式预制钢筋混凝土梁柱节点抗震性能研究[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(6):502-508.
(RONG Xian,BU Fan,ZHANG Jianxin,et al. Seismic behavior of precast reinforced concrete beam-column joints [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2021, 54(6):502-508.)
- [12] 戎贤,杨洪渭,张健新,等.钢节点板连接的装配式混凝土梁柱中节点抗震性能试验研究[J].建筑科学,2020,36(1):77-82.
(RONG Xian,YANG Hongwei,ZHANG Jianxin,et al. Experimental study on seismic behavior of fabricated concrete beam-column joints connected by steel plate connector [J]. Building science,2020,36(1):77-82.)
- [13] 杨洪渭,戎贤,张健新.装配式钢筋混凝土框架节点抗震性能试验研究[J].世界地震工程,2019,35(4):68-73.
(YANG Hongwei,RONG Xian,ZHANG Jianxin. Experimental research on seismic behavior of prefabricated concrete frame joint [J]. World earthquake engineering, 2019, 35(4):68-73.)
- [14] 戎贤,杨洪渭,张健新.装配式高强钢筋混凝土框架节点滞回性能试验研究[J].建筑结构,2020,50(3):77-80.
(RONG Xian,YANG Hongwei,ZHANG Jianxin. Experimental research on hysteretic behavior of fabricated reinforced concrete frame joints with high-strength steel bars [J]. Building structure, 2020,50(3):77-80.)
- [15] 戎贤,杨洪渭,张健新.装配式钢纤维混凝土梁柱中节点滞回性能试验研究[J].工业建筑,2020,50(6):67-70.
(RONG Xian,YANG Hongwei,ZHANG Jianxin. Experimental research on hysteretic properties of interior beam-column joints for prefabricated concrete frames cast by steel fiber concrete [J]. Industrial construction, 2020, 50(6):67-70.)
- [16] CHEN Xuwei,HAN Xiaolei,LUO Fan,et al. Fiber element based elastic-plastic analysis procedure and engineering application [J]. Procedia engineering, 2011, 14(12):1807-1815.
- [17] CHENG Yu,DONG Yaorong,BAI Guoliang,et al. IDA-based seismic fragility of high-rise frame-core tube structure subjected to multi-dimensional long-period ground motions [J]. Journal of building engineering, 2021, 43:102917.
- [18] 崔济东,沈雪龙. PERFORM-3D 原理与实例[M].北京:中国建筑工业出版社,2017.
(CUI Jidong,SHEN Xuelong. PERFORM-3D theory and tutorials [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2017.)
- [19] MANDER J, PRIESTLEY M. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of structural engineering, 1988, 114(8):1804-1826.
- [20] 齐麟,黄兆纬. Perform-3D 在建筑结构非线性分析与性能评估中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
(QI Lin,HUANG Zhaowei. Application of Perform-3D in nonlinear analysis and performance evaluation of the structure [M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2015.)
- [21] Applied Technology Council. Quantification of building seismic performance factors [M]. California: US Department of Homeland Security,FEMA,2009.
- [22] 河北省住房和城乡建设厅. 装配式钢节点混凝土框架结构设计标准:DB13(J)/T 8336—2020[S].北京:中国建材工业出版社,2020.
(Department of Housing and Urban Rural Development of Hebei Province. Design specification for precast concrete frame structure assembled by steel joints:DB13(J)/T 8336—2020 [S] Beijing: China Building Materials Press,2020.)
- [23] SCHOTANUS M I J, FRANCHIN P, LUPOI A, et al. Seismic fragility analysis of 3D structures [J]. Structural safety, 2004, 26(4):421-441.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)