

半刚接钢框架内填实体 RC 墙结构的地震易损性能评估

孙国华^{1,2}, 李坤明², 胡月华², 黎明²

(1. 苏州科技大学 江苏省结构工程重点实验室, 江苏 苏州 215011; 2. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要: 为评估半刚接钢框架内填实体 RC 墙结构(PSRCW)的地震易损性能及倒塌储备能力, 考虑层数和抗震设防烈度影响合理设计了 4 个 PSRCW 结构基准算例, 采用 Latin 超立方抽样方法考虑型钢、混凝土、钢筋等材料力学性能及内填 RC 墙体厚度几何尺寸的随机性, 拓展为 4 组共计 160 个 PSRCW 算例。通过合理选取 40 条汶川地区实测地震记录, 与每组 40 个 PSRCW 结构样本随机组合, 构成了 4 组 40 个地震-结构样本对, 通过弹性时程分析方法确定了 PSRCW 结构在“弹性极限”“完全运行”“运行”“生命安全”“接近倒塌”“倒塌”状态下的地震易损性能曲线, 并进行了抗震性能评估, 量化了 PSRCW 结构的倒塌储备能力。分析结果表明: PSRCW 结构的倒塌安全储备系数在 3.0~4.3 之间, 具有良好的抗地震倒塌能力。

关键词: 钢框架; 内填墙; 易损性; 倒塌安全储备系数

中图分类号: TU312

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)01-0038-09

Fragility analysis of partially-restrained steel frame with solid RC infill walls

SUN Guohua^{1,2}, LI Kunming², HU Yuehua², LI Ming²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Structure Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China;

2. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: In order to evaluate the fragility and collapse margin ratio of partially-restrained steel frame with solid reinforced concrete infill wall (PSRCW), four benchmark PSRCW structures were designed considering the effects of story number and seismic intensity. Considering the randomness of the mechanical properties of materials such as profile steel, concrete and steel bars and the geometric size of the thickness of RC infill wall, the Latin hypercube sampling method was used to expand to four groups of 160 PSRCW examples. By reasonably selecting 40 measured seismic records in Wenchuan area and randomly combining them with 40 PSRCW structural samples in each group, four groups of 40 earthquake-structure sample pairs were formed. Through the elastic-plastic time history analysis method, the seismic fragility curves of the PSRCW structure under the “elastic limit”, “full operation”, “operation”, “life safety”, “near collapse” and “collapse” states were determined, and the seismic performance evaluation was carried out to quantify the collapse reserve capacity of the PSRCW structure. The analysis results show that the CMR of the PSRCW structure is between 3.0 and 4.3, which has good seismic collapse resistance.

Key words: steel frame; infill wall; fragility curve; collapse margin ratio

为评估结构实际抗倒塌能力与最大容许地震(Maximum Considered Earthquake, MCE)需求之间的关系, 美国应用技术委员会提出了结构倒塌安全储备系数(Collapse Margin Ratio, CMR)^[1], 通过增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)方法确定结构的地震易损性能曲线, 量化其抗地震倒塌储备能力。目前, 部分学者已对 CMR 的影响因素进行了研究, 分析发现结构层数、层高、跨度等因素及地震动的不确定性对结构抗倒塌性能

能有较大影响^[2-3]。Makhdoom 等^[4]分析指出结构平面布置的对称性是影响其抗倒塌能力的又一重要参数, 当前规范并未直接考虑。Zhang 等^[5]基于置信区间法提出了基于倒塌易损性和基于风险可接受的在不同置信水平的 CMR 数学表达式, 该公式适应于中国抗震规范的相关要求。为提高分析效率, Hardyniec 等^[6]采用并行计算原理提出了一种新型高效搜索方法, 用于确定结构的 CMR 系数。建议方法并不需要实施完整的 IDA 分析即可获得

收稿日期: 2022-10-05

修回日期: 2023-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108292); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(17KJA560003); 江苏省“六大人才高峰”项目(JZ-035)

第一作者: 孙国华(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构及组合结构抗震研究。E-mail: sungh-529@163.com

高精度的计算结果。

此外, 部分学者还对不同类型结构的 CMR 进行了评估。陆新征等^[7]指出研究结构体系层次的安全储备对结构抗震设计更有意义, 并以混凝土框架结构为例介绍了采用 CMR 系数评估结构抗倒塌能力的具体方法。施炜等^[8]分析发现按我国相关规范设计的钢筋混凝土框架结构的 CMR 系数与柱轴压比呈线性反比关系, 柱轴压比越高, CMR 值越低。王涛等^[9]的研究也证实了上述结论, 柱轴压比对 7 度区混凝土框架结构抗倒塌能力影响较大, 其抗倒塌能力较弱。李刚等^[10]考虑层数、截面冗余度因素影响设计了 4 个多层钢框架算例, 通过 IDA 方法得到了钢框架算例的 CMR 系数, 并给出了多层钢框架结构在不同地震动强度下的倒塌概率曲线。彭成等^[11]研究了不同超强和延性下钢框架结构的抗倒塌储备能力, 分析发现通过提高结构的超强和延性性能, 可有效增强结构的抗倒塌能力。朱磊等^[12]分析发现当柱翼缘宽厚比小于 12 时, 钢框架结构具有较大的抗倒塌储备能力; 当翼缘宽厚比大于 12 时, 结构抗倒塌储备能力变差。何鹏飞等^[13]对 X 形中心支撑钢框架结构的倒塌储备能力进行了研究, 分析发现此类结构的倒塌储备能力随抗震设防烈度和结构层数的增加呈降低趋势。杨文侠等^[14]分析发现 Y 形偏心支撑钢框架结构的 CMR 随层数的增加呈增大趋势, 在罕遇地震水准下的倒塌概率不超过 10%。单文臣等^[15]基于一致倒塌风险理念设计了钢管混凝土框架-RC 剪力墙结构抗侧力体系, 通过与按双重抗侧力体系理念设计此类结构的地震易损性分析对比发现, 按一致倒塌风险理论设计的此类抗侧力体系在罕遇地震水准下具有较高的倒塌储备能力, 可实现“大震不倒”抗震要求。Liel 等^[16]对宏观的延性结构和非延性结构的抗倒塌性能进行了研究, 量化了结构的 CMR 系数, 分析发现延性结构倒塌前水平变形明显, 具有更优的抗倒塌能力, 其 CMR 值约为非延性结构的 3 倍以上。Farahbakhshstooli 等^[17]采用 FEMA P695 方法对加劲钢板剪力墙结构的抗倒塌能力进行了评估, 分析结果证实了当前适用于非加劲钢板剪力墙的地震反应修正系数(R)、超强系数($R\Omega$)等参数取值对加劲钢板剪力墙结构依然适用。Kassem 等^[18]对 Beirut Arab University 的一栋 6 层钢筋混凝土框架结构通过增设剪力墙及中心钢支撑方式进行了加固, 采用 FEMA P695 方法评估了两种加固方式的抗倒塌能力, 计算获得的 CMR 数值证实剪力墙加固方式更有效。

半刚接钢框架内填实体 RC 墙结构(简称 PSRCW)是一种抗震优良的双重抗侧力体系, 具有多重传力路径, 其地震易损性能与倒塌储备能力的研究颇少, 仅本课题组对半刚接钢框架内填暗竖缝 RC 墙结构进行了地震易损性分析^[19]。本文通过构建 PSRCW 结构的地震易损性曲线, 评估其地震易损性能。基于地震易损性分析方法量化 PSRCW 结构的抗倒塌储备能力, 这对完善 PSRCW 结构的性能抗震设计方法, 推广此类结构的工程应用具有重要理论意义及工程应用价值。

1 PSRCW 结构地震易损性分析方法

1.1 地震易损性分析方法

地震易损性分析是确定结构在给定的地震动强度(如地面峰值加速度, 简称 PGA)下, 结构达到或超过预定损伤水平的条件概率^[20]。因此, 对结构进行地震易损性分析既可用于震前灾害预测, 还可用于结构震后损伤评估, 具体步骤如下:

(1)设计 PSRCW 结构的基本算例;

(2)考虑钢材强度、混凝土强度、内填 RC 墙厚度的随机性, 利用 Latin 超立方抽样方法随机抽取 N 个样本;

(3)根据算例建设地点合理选取 N 条地震记录;

(4)将 PSRCW 结构样本同选取的地震波随机组合, 形成 N 个 PSRCW 结构-地震动样本对;

(5)对 N 个结构-地震动样本进行弹塑性时程分析, 建立结构响应与地震动参数 PGA 之间的关系式;

(6)基于地震易损性计算公式及 PSRCW 结构的性能水平, 建立 PSRCW 结构基于性能的地震易损性曲线, 进行 PSRCW 结构的地震易损性评估。

1.2 地震易损性分析的概率分布函数

通常情况下, 地震易损性分析的条件失效概率可按式(1)计算。

$$P_i = P[D \geq C | IM] \quad (1)$$

式中: IM 为地震动强度指标; D 为 PSRCW 结构的地震需求; C 为 PSRCW 结构的抗震能力; P_i 为 PSRCW 结构的条件失效概率。

一般情况下, 结构地震需求中位值(S_D)和地震动强度指标(IM)应满足式(2)。

$$S_D = aIM^b \quad (2)$$

式中: a 、 b 为模型参数, 可通过对数值分析结果回归确定。

通过对式(2)两边同时取对数可得

$$\ln S_D = a + b \ln(IM) \quad (3)$$

假定 PSRCW 结构的地震易损性符合对数正态分布,式(1)可写为

$$P[D \geq C | IM] = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(c) - \ln(S_D)}{\beta_D}\right) \quad (4)$$

式中: $P[D \geq C | IM]$ 为地震动强度为 IM 时,结构达到预定损伤水平时的概率; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; β_D 为地震需求的对数标准差。

2 PSRCW 结构算例设计

2.1 PSRCW 结构的基准算例

考虑层数和抗震设防烈度的影响共设计了 4 个 PSRCW 结构的基本算例^[21],分别为 5 层 8 度、5 层 9 度、10 层 8 度、10 层 9 度设防的 PSRCW 结构,建造地点为我国四川省。抗震设防烈度分别为 8 度(设计地震加速度为 0.2 g)和 9 度(设计地震加速度为 0.4 g),场地类别为 II 类,设计地震分组为第 1 组。算例的边跨 7.8 m,中跨 5.7 m,平面布置见图 1。混凝土强度等级为 C25,钢材为 Q345B。电梯及楼梯间的框架采用带内填实体 RC 墙的 PSRCW 框架,承担绝大多数水平荷载。算例的层高为 3.3 m,立面布置见图 2。

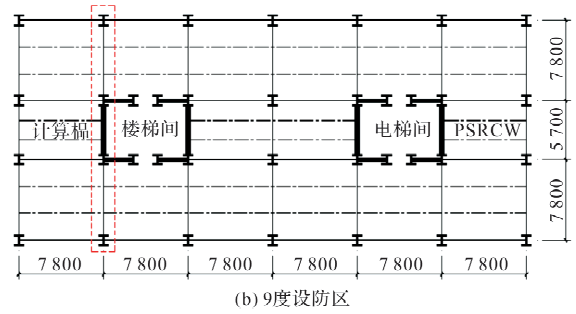
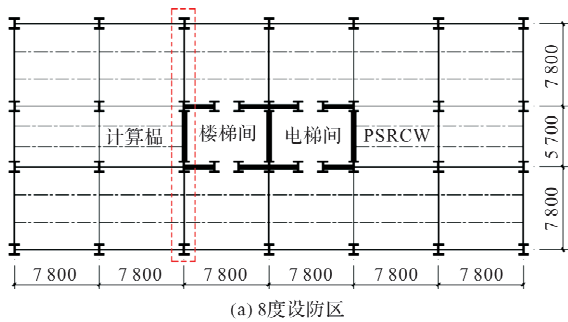


图 1 PSRCW 算例的平面布置

Fig. 1 Plan of PSRCW structure

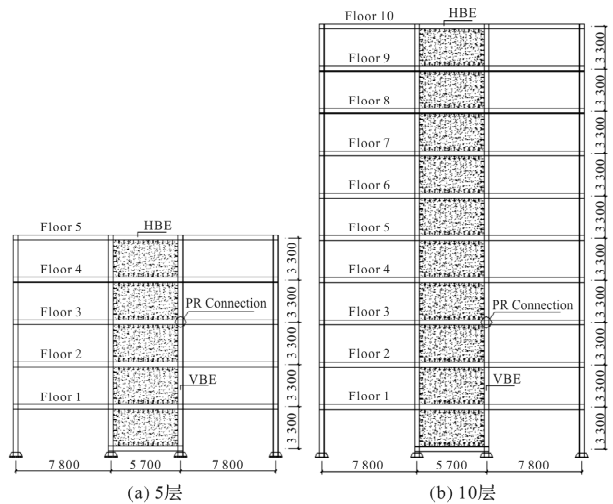


图 2 PSRCW 结构的立面布置

Fig. 2 Elevation of PSRCW structure

随后对 PSRCW 结构进行初步设计和迭代设计,并经能力设计法对带墙榫钢框架梁、柱截面进行校核,最终确定了 4 个 PSRCW 结构基准算例的梁、柱截面及内填 RC 墙厚度,见表 1。

表 1 PSRCW 结构基准算例的构件截面尺寸(mm)

Tab. 1 Component section of PSRCW structures/mm

算例	层数	内填 RC 墙	中间跨带墙	中间跨带墙	边跨	边跨
		厚度	钢柱截面/VBE	钢梁截面/HBE	钢柱截面	钢梁截面
5 层 8 度	1	220	□550×30	H600×220×16×25	H450×450×12×16	H500×200×14×18
	2	200	□500×28	H600×220×16×25	H450×450×12×16	H500×200×14×18
	3	180	□500×22	H550×220×14×22	H400×400×10×14	H500×200×12×16
	4	130	□450×18	H550×220×14×22	H400×400×10×14	H500×200×12×16
	5	100	□400×14	H600×220×16×25	H350×350×8×12	H450×200×12×16
5 层 9 度	1	300	□600×35	H600×300×20×25	H450×450×12×16	H500×200×14×18
	2	280	□600×30	H600×300×20×25	H450×450×12×16	H500×200×14×18
	3	240	□500×30	H600×240×20×25	H400×400×10×14	H500×200×12×16
	4	180	□500×20	H600×240×20×25	H400×400×10×14	H500×200×12×16
	5	100	□400×14	H600×300×20×25	H350×350×8×12	H450×200×12×16
10 层 8 度	1~3	180	□700×30	H600×200×16×22	H500×500×16×20	H500×200×18×22
	4~5	160	□600×25	H550×200×14×22	H500×500×14×18	H500×200×16×20
	6~7	140	□550×20	H500×200×14×20	H450×450×12×16	H500×200×14×18
	8~9	100	□450×16	H450×200×12×18	H400×400×10×14	H500×200×12×16
	10	100	□400×14	H600×200×16×22	H350×350×8×12	H450×200×12×16

续表 1

算例	层数	内填 RC 墙 厚度	中间跨带墙 钢柱截面/VBE	中间跨带墙 钢梁截面/HBE	边跨 钢柱截面	边跨 钢梁截面
10 层 9 度	1~3	250	□700×40	H600×270×20×25	H500×500×16×20	H500×200×18×22
	4~5	220	□600×35	H600×240×20×25	H500×500×14×18	H500×200×16×20
	6~7	170	□500×30	H600×200×16×22	H450×450×12×16	H500×200×14×18
	8~9	120	□450×20	H500×200×12×20	H400×400×10×14	H500×200×12×16
	10	120	□400×16	H600×270×20×25	H350×350×8×12	H450×200×12×16

2.2 PSRCW 结构的扩展算例

综合考虑混凝土抗压强度、不同层数钢柱及钢梁材料的弹性模量、屈服强度及抗拉强度等力学性能, 以及不同层数的内填 RC 墙厚度的变异性, 利用拉丁超立方抽样方法分别对 4 个 PSRCW 结构基本算例的各相关设计参数抽取 40 个样本, 将每种参数的样本点随机耦合组成新的样本对, 即可得到 160 个考虑材料力学性能和内填 RC 墙几何尺寸随机性的 PSRCW 扩展算例. 表 2 给出了相关随机变量的概率分布类型及参数统计数据.

表 2 钢材及混凝土材料的随机变量统计信息 (MPa)

Tab. 2 Statistical information of random variables of steel and concrete/MPa

随机变量	分布类型	名义值	平均值 μ	标准差 σ	变异系数 δ
钢材 f_y	对数正	345	389.90	24.15	0.07
	态分布				
钢材 E	正态分布	206 000	206 000	8 240	0.04
混凝土 f_c	正态分布	16.75	20.87	2.01	0.12
墙厚	均匀分布	-	-	-	0.02

注: 表中墙厚的平均值取名义值, 标准差根据变异系数和名义值联合确定. 考虑到本文表 1 中墙体厚度涉及多种, 因此表 2 中未给出上述数值.

2.3 PSRCW 结构的有限元模型

为简化, 忽略本文 2.1 部分 PSRCW 结构的空
间作用, 选取图 1 中的横向计算榀, 采用文献[22]
建议的 PSRCW 结构宏观组合板带模型分析其在地
震作用下非线性响应, 基于 OpenSees 程序建立了
160 个 PSRCW 结构扩展算例的有限元模型. 图 3
给出了 5、10 层 PSRCW 结构的宏观有限元模型.

3 PSRCW 结构的地震易损性分析

3.1 地震波的选取

根据 PSRCW 算例的设计地点, 选取了 40 条
2008 年汶川地震的实测记录. 在这 40 条地震波中,
持时控制在 40~130 s 之间, 地面峰值加速度控制
在 0.102~0.723 g 之间. 40 条地震波的平均 β 谱
及规范谱的对比见图 4.

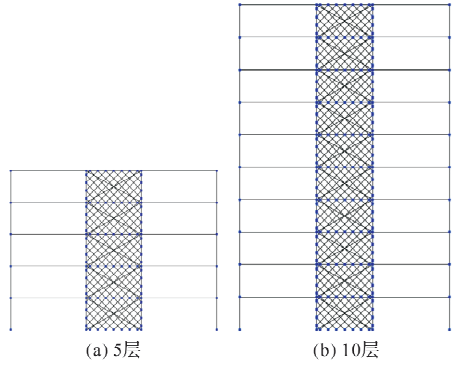


图 3 PSRCW 结构的有限元模型

Fig. 3 FEM of PSRCW structures

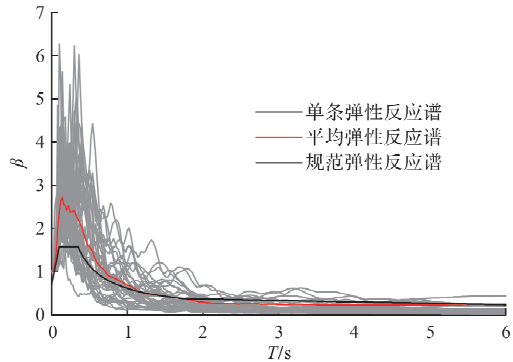
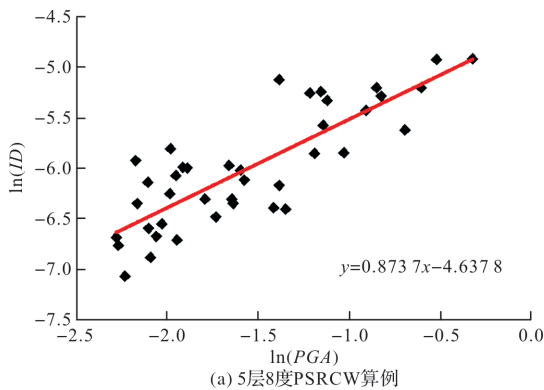


图 4 40 条选择的实测地震记录的 β 谱

Fig. 4 β spectrum of forty selected earthquake waves

3.2 PSRCW 结构的需求概率分析

采用地面峰值加速度 (PGA) 作为地震动参数, 以结构在弹塑性时程分析中出现的最大层间位移角 (ID) 作为结构地震需求响应, 分别建立了 4 组 40 个 PSRCW 结构-地震动样本对的地震需求响应与地震动参数之间的对应关系, 并进行了数学回归, 确定参数 a 、 b 的取值. PSRCW 结构在不同地震动参数下回归分析结果见图 5.



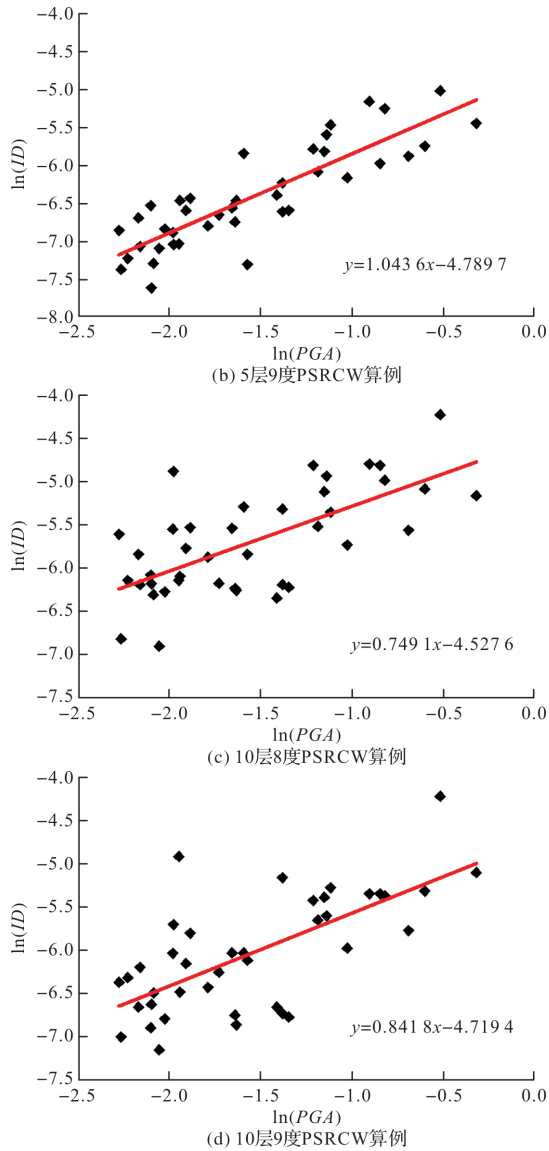


图5 PSRCW 结构的地震需求响应回归分析

Fig. 5 Logarithmic regression analysis of PSRCW structures under earthquake excitation

3.3 PSRCW 结构基于性态的地震易损性曲线

基于损伤指数与结构性态水平之间的对应关系,依据 Park-Ang 损伤模型建立了 PSRCW 在弹性极限(EL)、完全运行(NO)、运行(OP)、生命安全(LS)、接近倒塌(NC)、倒塌(C)状态下以层间位移角表征的性态目标^[23],见表3。

表3 PSRCW 结构的性态水平及量化指标限值

Tab. 3 Performance level and limit value of PSRCW structures

性态水平	EL	NO	OP	LS	NC	C
损伤指数 D_{MPA}	0	0.08	0.18	0.36	0.60	1.00
层间位移角 θ	1/290	1/205	1/160	1/120	1/90	1/65

将表3确定的 PSRCW 在不同性态水平下的层

间位移角限值代入公式(4),即可得到各组模型以地面峰值加速度(PGA)表征地震强度的 PSRCW 结构地震易损性曲线,见图6。

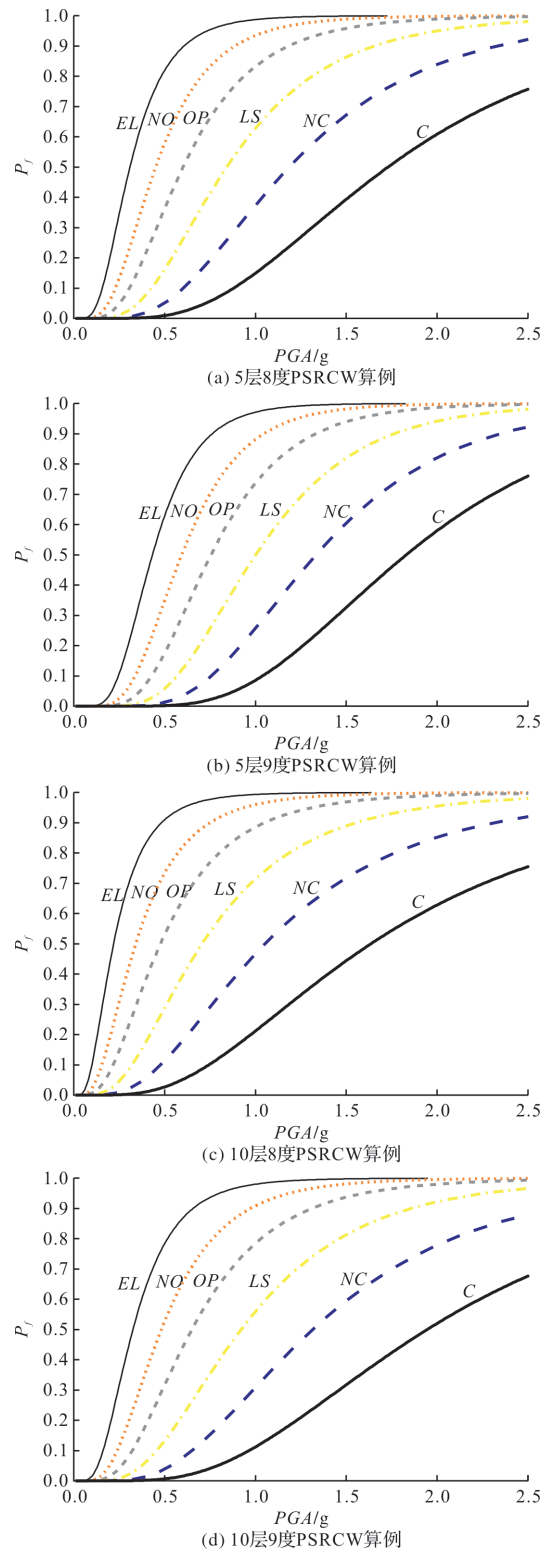


图6 PSRCW 结构地震易损性曲线

Fig. 6 Fragility curves of PSRCW structures

表4给出了 PSRCW 结构在多遇、设防及罕遇地震水平下对应不同结构性态水平的超越概率。

表 4 PSRCW 结构在不同地震水平下的超越概率 (%)

Tab. 4 Exceedance probability of PSRCW at the different earthquake level/%

算例	地震水平	EL	NO	OP	LS	NC	C
5 层 8 度	多遇 0.07g	0.24	0.02	0	0	0	0
	设防 0.20 g	17.81	5.05	1.44	0.24	0.03	0
	罕遇 0.40 g	68.75	40.95	21.94	7.91	1.97	0.27
5 层 9 度	多遇 0.14g	0.53	0.05	0.01	0	0	0
	设防 0.40 g	42.91	18.51	7.47	1.88	0.32	0.03
	罕遇 0.62 g	79.21	53.83	32.7	13.9	4.13	0.71
10 层 8 度	多遇 0.07g	3.16	0.50	0.09	0.01	0	0
	设防 0.20 g	44.00	19.25	7.87	2.01	0.35	0.03
	罕遇 0.40 g	83.54	60.18	38.7	17.8	5.77	1.10
10 层 9 度	多遇 0.14g	6.15	1.19	0.25	0.03	0	0
	设防 0.40 g	64.62	36.60	18.8	6.36	1.48	0.19
	罕遇 0.62 g	88.01	67.65	46.5	23.4	8.47	1.83

由图 6 及表 4 可知, PSRCW 结构在多遇地震水平下, 结构损伤达到“完全运行”、“运行”“生命安全”状态时, 各组模型最大超越概率分别为 1.19%、0.25%、0.03%, 结构不会出现损伤. 在设防地震水平下, 各组模型在“生命安全”和“接近倒塌”状态时的最大超越概率分别为 6.36% 和 1.48%, 这说明结构在设防地震水平下会出现一定程度的损伤, 但总体上超越概率并不大, 符合我国抗震设计规范所规定的“中震可修”设防目标. 在罕遇地震水平下, PSRCW 结构达到“接近倒塌”状态的最大超越概率为 8.47%, 这说明结构遭遇罕遇地震时, 仍可能发生较为严重的破坏. PSRCW 结构达到“倒塌”状态的超越概率仅为 1.83%, 小于美国 FEMA695 建议限值 10% 的要求, 这说明 PSRCW 结构具有较好的抗倒塌能力.

3.4 层数对 PSRCW 结构地震易损性的影响

图 7 给出了抗震设防烈度为 8 度(0.2 g)和 9 度(0.4 g)时 5 层和 10 层 PSRCW 结构在性态水平为“完全运行($D_{MPA}=0.08$)”、“生命安全($D_{MPA}=0.36$)”和“倒塌($D_{MPA}=1.00$)”时的地震易损性曲线对比.

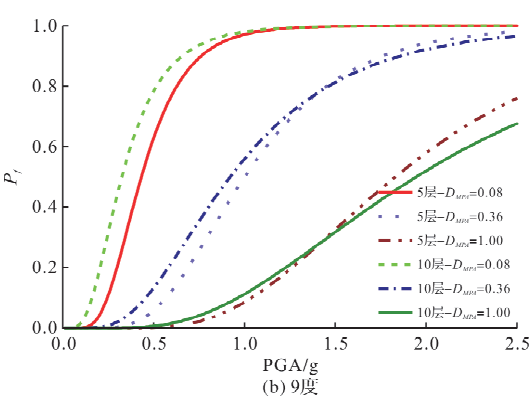
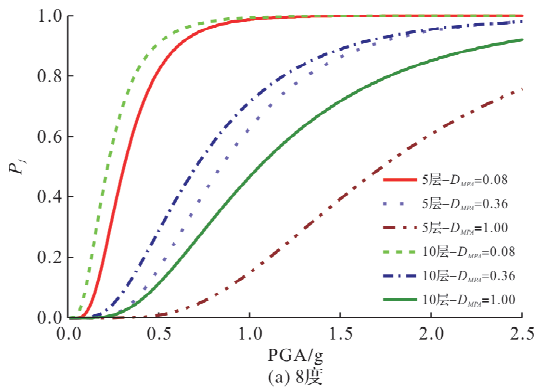


图 7 层数对 PSRCW 结构地震易损性曲线的影响

Fig. 7 Effect of story number on the fragility curves of PSRCW structures

由图 7 可知, 层数对 PSRCW 结构的地震易损性曲线有一定影响, 10 层 PSRCW 结构达到各性态水平的超越概率比 5 层 PSRCW 结构超越概率高. 随着层数的增加, 水平荷载逐渐起控制作用, 安全储备能力逐渐降低, PSRCW 结构遭受强烈地震时更易出现严重损伤和破坏, 导致结构不安全.

3.5 烈度对 PSRCW 结构地震易损性的影响

图 8 给出了 5 层和 10 层 PSRCW 结构在不同抗震设防烈度下性态水平为“完全运行($D_{MPA}=0.08$)”、“生命安全($D_{MPA}=0.36$)”和“倒塌($D_{MPA}=1.00$)”时的地震易损性曲线对比.

由图 8 可知, 抗震设防烈度对 PSRCW 结构的地震易损性曲线有显著影响. 无论是 5 层 PSRCW 结构还是 10 层 PSRCW 结构, 9 度抗震设防烈度下 PSRCW 结构在达到三种性态水平的超越概率始终高于 8 度抗震设防的 PSRCW 结构. 这说明抗震设防烈度越高, 地震导致 PSRCW 的安全储备能力越低, 致使 PSRCW 结构损伤越严重, 更易达到其性

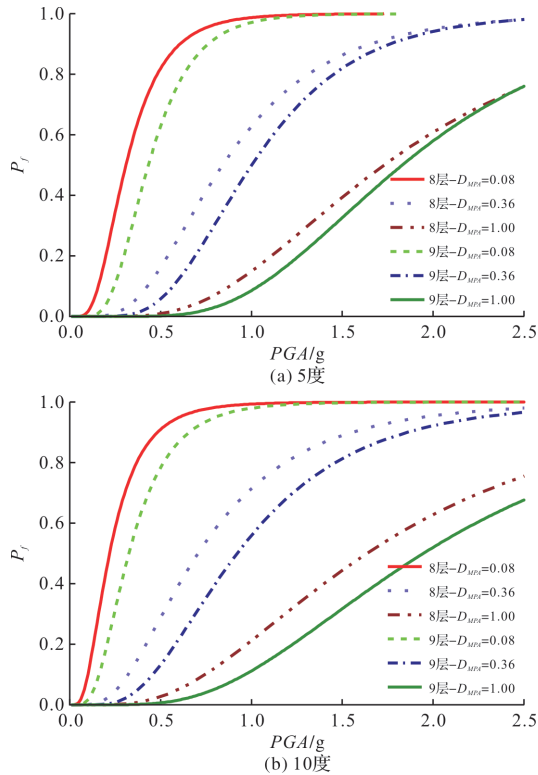


图8 烈度对 PSRCW 结构地震易损性曲线的影响

Fig. 8 Effect of seismic intensity on the fragility curves of PSRCW structures

态水平, 出现破坏。

4 PSRCW 结构的 CMR

4.1 CMR 的定义及计算方法

CMR 反映了结构实际抗倒塌能力的安全储备, 可通过对 PSRCW 结构分析的地震易损性曲线确定 (图 9)。

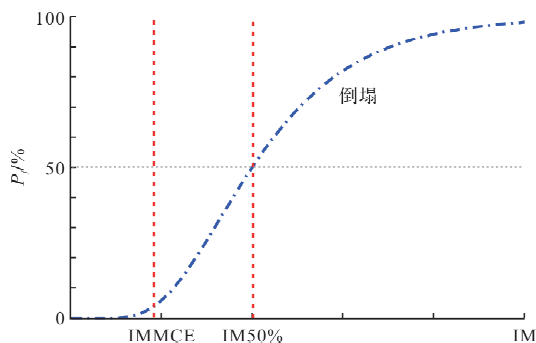


图9 CMR 计算示意

Fig. 9 Diagram of CMR

结构的 CMR 可按地震倒塌易损性曲线的失效概率为 50% 所对应的地震动强度 $IM_{50\%}$ 与结构在罕遇地震水准下的地震动强度 $IM_{\text{罕遇}}$ 之比确定, 具体可按式(5)计算。

$$CMR = \frac{IM_{50\%}}{IM_{\text{罕遇}}} \quad (5)$$

4.2 PSRW 结构的倒塌储备能力

由 PSRCW 结构的地震易损性曲线可确定超越概率为 50% 时所对应的地震动强度 $IM_{50\%}$, 根据式(5)计算 PSRCW 结构的 CMR 值。图 10 给出了 PSRCW 结构 $IM_{50\%}$ 的确定过程。PSRCW 结构 CMR 的计算结果见表 5。

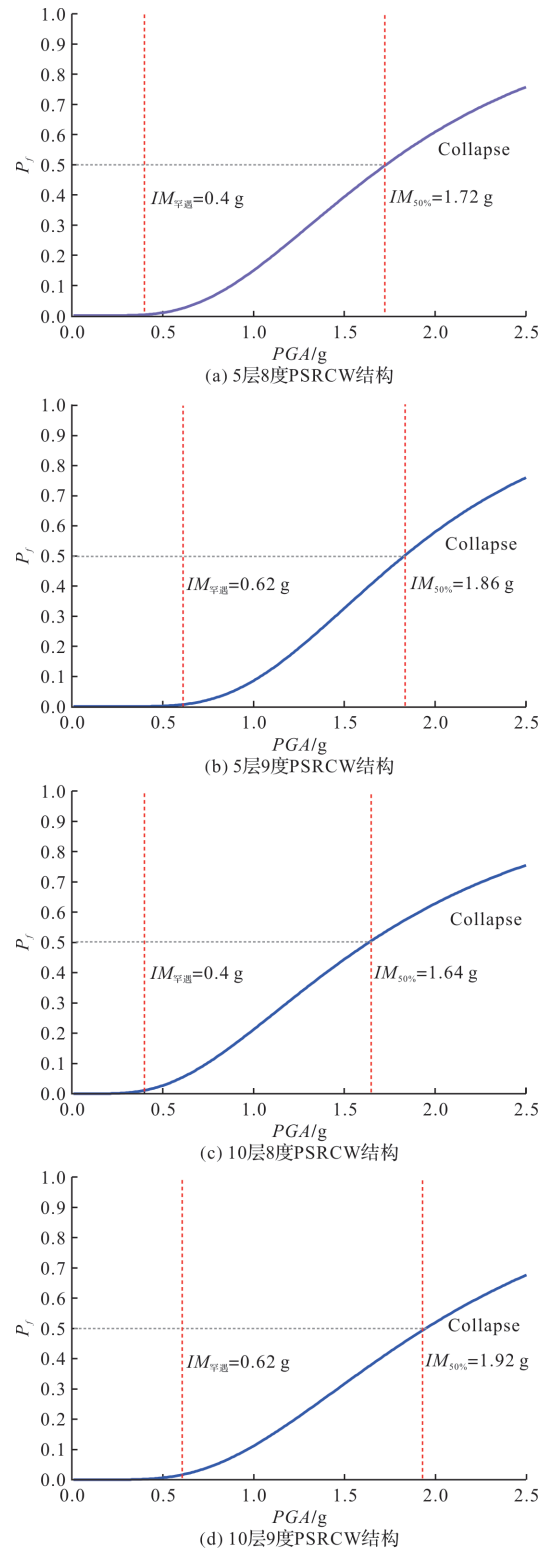


图10 PSRCW 结构的倒塌安全储备系数

Fig. 10 CMR values of PSRCW structures

表 5 PSRCW 结构的 CMR 值
Tab. 5 CMR values of PSRCW structures

算例	5 层 8 度	5 层 9 度	10 层 8 度	10 层 9 度
CMR	4.3	3.0	4.1	3.1

由图 10 和表 5 可知，PSRCW 结构的 CMR 取值在 3.0~4.3 之间。随着抗震设防烈度的增加，PSRCW 结构的 CMR 值呈降低趋势。这充分说明 PSRCW 结构是一种具有良好冗余度的新型组合结构，在地震作用下形成的多重传力路径，使得 PSRCW 结构获得了较为理想的抗倒塌能力。

5 结论

(1)考虑层数、抗震设防烈度、材料性能和构件几何尺寸的变异性，构建了 PSRCW 结构在“弹性极限(EL)”“完全运行(NO)”“运行(OP)”“生命安全(LS)”“接近倒塌(NC)”“倒塌(C)”性态水平的地震易损性曲线；

(2)层数对 PSRCW 结构的地震易损性能有一定影响，随着结构层数的增加，PSRCW 结构达到各性态水平的超越概率增大，PSRCW 结构的安全储备能力降低；

(3)抗震设防烈度对 PSRCW 结构的地震易损性曲线有显著影响。随着抗震设防烈度的增高，PSRCW 结构达到各性态水平的超越概率增加，导致 PSRCW 的安全储备能力降低；

(4)PSRCW 结构在罕遇地震水准下达到“倒塌(C)”状态时超越概率为 1.83%，小于 FEMA P695 规定的 10%限值；

(5)经过合理设计的 PSRCW 结构的 CMR 取值一般在 3.0~4.3 之间，PSRCW 结构具有良好的抗倒塌能力。

本文虽已对 PSRCW 结构的地震易损性能及倒塌储备能力进行了初步研究，但因其影响因素众多，关于内填墙体类型、内填墙体的变形能力、周边框架的贡献、梁柱连接节点类型、设计方法的超强储备等因素影响仍有待进一步研究。

参考文献 References

[1] Applied Technology Council. Quantification of building seismic performance factors; FEMA P695 [S]. Redwood City, CA: Applied Technology Council, 2009: 1-15.

[2] IBARRA L F, KRAWINKLER H. Global collapse of frame structures under seismic excitations[R]. CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2005.

[3] HASELTON C B, LIEL A B, DEIERLEIN G G, et

al. Seismic collapse safety of reinforced concrete buildings. I: Assessment of ductile moment frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 137(4): 481-491.

[4] MAKHDOOM O, AZIMINEJAD A, ZARFAM P, et al. Effect of the asymmetry level on collapse margin of torsionally stiff single-story buildings based on FEMA P695 methodology [J]. Structures, 2022, 37: 1042-1052.

[5] ZHANG Y T, HE Z. Acceptable values of collapse margin ratio with different confidence levels [J]. Structural Safety, 2020, 84: 101938.

[6] HARDYNEC A, CHARNEY F. A new efficient method for determining the collapse margin ratio using parallel computing [J]. Computers and Structures, 2015, 148: 14-25.

[7] 陆新征, 叶列平. 基于 IDA 分析的结构抗地震倒塌能力研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(1): 13-18.

LU Xinzhen, YE Lieping. Study on the seismic collapse resistance of structural system [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(1): 13-18.

[8] 施伟, 叶列平, 陆新征, 等. 不同抗震设防 RC 框架结构抗倒塌能力研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 41-48.

SHI Wei, YE Lieping, LU Xinzhen, et al. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 41-48.

[9] 王涛. 混凝土框架结构在强震作用下的抗倒塌能力研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.

WANG Tao. Study on collapse resistance of RC frame structures under strong ground motions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

[10] 李刚. 多层钢框架倒塌储备能力分析[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2011.

LI Gang. Analysis on the seismic collapse margin of multi-story steel frames[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2011.

[11] 彭成, 何若全, 冯进. 基于不同超强和延性下钢框架的抗倒塌储备系数[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2012, 25(2): 36-41.

PENG Cheng, HE Ruquan, FENG Jin. Collapse margin ratios of steel frames based on different over-strength and ductility[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2012, 25(2): 36-41.

[12] 朱磊, 何若全, 冯进. 柱翼缘宽厚比对钢框架倒塌储

- 备能力的影响[J]. 钢结构, 2013, 28(8): 10-14.
- ZHU Lei, HE Ruoquan, FENG Jin. Influence of the column flange width-thickness ratio on seismic collapse margin of steel frames[J]. Steel Construction, 2013, 28(8): 10-14.
- [13] 何鹏飞, 赵宝成. X形中心支撑钢框架倒塌储备能力研究[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2014, 27(2): 67-71.
- HE Pengfei, ZHAO Baocheng. A study on the seismic collapse margin capacity of X-concentrically braced steel frames[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2014, 27(2): 67-71.
- [14] 杨文侠, 孙国华, 顾强, 等. Y形偏心支撑钢框架结构的抗倒塌性能评估[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(6): 829-839.
- YANG Wenxia, SUN Guohua, GU Qiang, et al. Collapse-resisting evaluation of Y-eccentric braced steel frames under severe earthquake[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(6): 829-839.
- [15] 单文臣, 周绪红, 林旭川, 等. CFT框架-RC剪力墙结构基于一致倒塌风险的抗震设计研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(8): 26-34.
- SHAN Wenchen, ZHOU Xuhong, LIN Xuchuan, et al. Research on uniform collapse risk-based seismic design of CFT frame-RC shear wall structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(8): 26-34.
- [16] LIEL A B, HASELTON C B, DEIERLEIN G G. Seismic collapse safety of reinforced concrete buildings. II: Comparative assessment of nonductile and ductile moment frames[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 137(4): 492-502.
- [17] FARAHBAKHSHTOOL A, BHOWMICK A K. Seismic collapse assessment of stiffened steel plate shear walls using FEMA P695 methodology[J]. Engineering Structures, 2019, 200: 109714.
- [18] KASSEM M M, NAZRI F M, FARSANGI E N. On the quantification of collapse margin of a retrofitted university building in Beirut using a probabilistic approach[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2020, 23: 373-381.
- [19] 孙国华, 顾强, 方有珍, 等. 半刚接钢框架内填暗竖缝RC墙结构基于性态的地震易损性分析[J]. 振动工程学报, 2016, 29(3): 410-419.
- SUN Guohua, GU Qiang, FANG Youzhen, et al. Performance-based seismic fragility analysis of partially-restrained steel frame with concealed vertical slit RC infill walls [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(3): 410-419.
- [20] 童申家, 黄勇, 李红涛, 等. 除冰盐环境下在役RC桥墩时效地震易损性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(3): 315-320.
- TONG Shenjia, HUANG Yong, LI Hongtao, et al. Study on aging seismic vulnerability of in-service RC bridge piers in deicing salt environment[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(3): 315-320.
- [21] 李坤明. 半刚接钢框架内填RC墙结构的性态指标及地震易损性分析[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2016.
- LI Kunming. Performance index and seismic fragility analysis of partially-restrained steel frame with RC infill wall structural system[J]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2016.
- [22] SUN G H, YANG C S, GU Q, et al. An effective simplified model of composite compression struts for partially-restrained steel frame with reinforced concrete infill wall[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 17(2): 403-415.
- [23] 李坤明, 陆承铎, 孙国华. 半刚接钢框架内填RC墙结构的性态指标[J]. 建筑结构, 2019, 49(2): 118-122.
- LI Kunming, LU Chengdu, SUN Guohua. Performance objective of partially-restrained steel frame with RC infill wall[J]. Building Structure, 2019, 49(2): 118-122.

(编辑 郑晓龙 沈 波)