

建筑抗震环境影响评估方法及 在可恢复功能钢框架中的应用

杜佳俊^{1,2}, 王伟^{1,2}, 张瑞斌^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要:在当前城市化进程加快、老旧建筑功能劣化和气候急剧变化的背景下,建筑韧性与可持续性的重要性日趋凸显。震后建筑功能恢复往往需大量的经济和时间投入,并产生严重的环境影响(如碳排放),然而目前对此仍缺乏科学合理的快速评估手段。因此,文中提出了一种建筑全寿命抗震环境影响改进评估方法,利用投入产出数据库和引入“修复成本比率”假设将现有地震经济损失数据转化为环境影响,考虑了因残余变形导致建筑修复可行性下降的关键因素,通过地震危险性分析、结构分析、损伤分析和损失分析对建筑全寿命抗震环境影响加以量化。基于该方法分别对采用自复位支撑(self-centering braces, SCB)和屈曲约束支撑(buckling-restrained braces, BRB)加固的钢框架建筑进行了全寿命抗震环境影响评估。结果表明:不考虑残余变形所致的修复可行性下降会严重低估地震造成的环境影响,SCB相较于BRB以极小的残余变形在减少建筑抗震环境影响方面展现出显著优势。

关键词:地震工程;自复位结构;全寿命周期评估;碳排放;抗震韧性;可持续性

中图分类号:P315.9

文献标识码:A

Method of building seismic environmental impact assessment and its application to seismic resilience steel frames

DU Jiajun^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, ZHANG Ruibin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the accelerated process of urbanization, the deterioration of aging buildings, and the rapid climate change in current times, the resilience and sustainability of buildings have become increasingly important. Post-earthquake rehabilitation of buildings often requires significant economic and downtime cost, while also causing severe environmental impacts such as carbon emission. However, it is still lack of reasonable and rapid assessment method for evaluating seismic environmental impact. Therefore, this study proposes an improved building life cycle seismic environmental impact assessment method, using the input-output database and the “repair cost-ratio” assumption to convert existing seismic economic loss data into environmental impacts, considering the key factors that reduce the feasibility of building rehabilitation due to residual deformation. It quantifies the life cycle seismic environmental impact of buildings under seismic risk through seismic hazard analysis, structural analysis, damage analysis, and loss analysis. Based on this method, the life-cycle seismic environmental impact assessment of steel frame buildings strengthened by self-centering braces (SCB) and buckling-restrained braces (BRB) was carried out. The results show that if the reduction in rehabilitation feasibility caused by residual deformation is not

收稿日期: 2023-10-17; 修回日期: 2023-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378182, 52078366); “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC3801900)

作者简介: 杜佳俊(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事钢结构可持续性与韧性提升研究。E-mail: jiajundu@tongji.edu.cn

通讯作者: 王伟(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事钢结构可持续性与韧性提升研究。E-mail: weiwang@tongji.edu.cn

considered, the seismic environmental impact will be seriously underestimated. After considering the residual deformation, compared with BRB, the frame strengthened by SCB shows a significant advantage in reducing the impact of the seismic environment with the minimal residual deformation.

Key words: earthquake engineering; self-centering structure; life cycle assessment; carbon emission; seismic resilience; sustainability

0 引言

为应对全球气候变化、实现可持续发展,建筑在寿命周期内的环境影响已逐渐成为建筑设计决策中的重要因素。各国也相继建立针对绿色可持续建筑的评价体系,如美国的能源与环境设计先锋评级体系、德国的可持续建筑评估体系等。然而,现有评价体系更多关注高概率发生事件(如建筑建造、运维阶段),而忽视地震等发生概率小但会产生严重后果的事件。历史经验表明,地震等自然灾害除了造成重大的社会、经济损失外,还会产生严重的环境影响。例如,2011年的东日本大地震发生后,约112万栋建筑受损破坏,仅与建筑修缮相关的碳排放就高达2630万吨,约占日本2010年温室气体排放总量的2.1%^[1]。因此,地震频发区的绿色可持续发展离不开安全可靠的抗灾韧性^[2]。鉴于我国是世界上地震活动强烈和地震灾害严重的国家之一,合理评估地震风险下的建筑抗震环境影响以支持设计决策,对于实现建筑抗震韧性和环境可持续性、稳步实现“双碳”战略目标具有重要意义。

若要合理评估建筑在所处场地及其设计寿命内可能因地震风险而产生的环境影响,即建筑全寿命抗震环境影响,需要结合基于时间的地震损失分析以及全寿命周期环境影响评估(life cycle environmental impact assessment, LCEIA)。相较于基于强度的地震损失分析,基于时间的地震损失分析考虑了建筑寿命周期内可能发生的不同强度的地震事件及其发生概率,在设计决策中更具有指导意义。其通常在第二代基于性能的地震工程(performance-based earthquake engineering, PBEE)^[3]框架中进行,分为地震危险性分析、结构分析、损伤分析和损失分析四部分。研究实践中,美国联邦紧急事务管理署(Federal Emergency Management Agency, FEMA)开发的HAZUS方法^[4]和FEMA P-58方法^[5-6]获得了最广泛的关注和应用。其中,HAZUS方法进行体系层次的评估,虽较于FEMA P-58方法有所简化,但应用简便、分析快速和结果合理,因而在快速评估、对比分析和区域韧性等研究中获得了广泛应用^[7-13]。

为评估震后恢复产生的环境影响,现有研究采用的主要方法有:①将构件级别的修复经济成本作为经济投入-产出生命周期评估(economic input-output life cycle assessment, EIO-LCA)^[14-15]的输入;②利用“修复成本比率”(repair cost-ratios)^[16-17]假设将构件的初始环境影响转换为修复环境影响;③结合详细的修复过程描述和基于过程的LCEIA方法开发特定数据库^[18-19]。这些方法为量化震后修复产生的环境影响提供了有效方案。但是,在现有关于HAZUS和LCEIA结合的研究中,基本仅使用HAZUS方法中的建筑易损性信息来判断损伤状态,然后根据个人开发的数据库或修复描述来计算环境影响,并未充分利用HAZUS数据库中提供的经大量历史经验和专业调查得到的经济损失数据,这导致不同研究的结果存在差异。针对HAZUS的基准经济损失数据开发基准环境影响数据,有助于不同研究之间进行比较,也有助于环境影响评估与经济评估之间的对比。

此外,原有HAZUS方法中并未考虑震后残余变形这一指标。对于传统钢结构抗侧体系,如抗弯钢框架或普通支撑钢框架,虽能达到预期性能目标,但震后易产生明显的残余变形。而研究表明残余变形将会导致修复的经济性降低或无法修复以致拆除^[20]。自复位支撑(self-centering braces, SCB)结构作为可恢复功能结构的代表,相较于传统钢结构抗侧体系,具有可有效控制震后残余变形的优势,已有研究较多聚焦于地震经济损失评估^[7,21-22],鲜有关于环境影响的研究。因此在环境影响评估方法中纳入残余变形指标,捕捉此类构件与传统构件在震后功能恢复上的差异,对于认识其在韧性和可持续性驱动的建筑改造中的应用潜力和市场推广前景具有重要意义。

基于上述内容,本研究利用EIO-LCA方法将HAZUS提供的相关经济数据转化为环境影响,结合建筑处于不同损伤状态时的经济损失比率,将HAZUS方法改进为应用简便、科学合理的全寿命抗震环境影响评估方法。评估中将残余层间位移角(residual inter-story drift, RID)作为一项损伤指标,以考虑震后残余变形对

抗震环境影响的贡献。此外,还利用 HAZUS 中的地震致碎片数量估计数据计算了灾后碎片运输相关的环境影响。为演示改进后的方法,分别对采用新型自复位支撑和传统屈曲约束支撑加固后的钢框架建筑进行了抗震环境影响评估。

1 全寿命抗震环境影响评估方法

设计寿命内地震风险相关的环境影响 $EN_s(t, X)$ 可通过地震相关的年期期望环境影响 $EN_s(1, X)$ 乘以设计使用寿命获得。年期期望抗震环境影响 $EN_s(1, X)$ 可通过式(1)和(2)计算:

$$EN_s(1, X) = \int_{EN} P(EN > en) dEN \quad (1)$$

$$P(EN > en) = \int_{\lambda} P(EN > en | E = e) d\lambda(e) \quad (2)$$

式中: $P(EN > en)$ 为年地震相关环境影响曲线,表示每年地震风险相关的环境影响 EN 超过一定数值 en 的概率; $P(EN > en | E = e)$ 为地震强度 $E = e$ 下的环境影响曲线; $d\lambda(e)$ 为该场地年发生强度 $E = e$ 地震的概率。

对于给定建筑结构,实际求解上述积分时,主要可分为4个步骤:地震危险性分析、结构分析、损伤分析和损失分析,如图1所示。

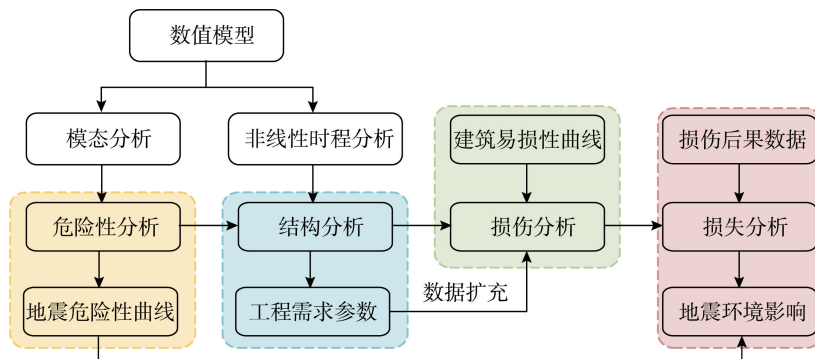


图1 抗震环境影响分析基本流程

Fig.1 Basic process of seismic environmental impact analysis

1) 地震危险性分析。根据建筑物所处的位置、场地条件以及结构基本周期,通过特定的危险性分析程序(如 OpenSHA)或相关机构网站^[23]获取特定地点的地震危险性曲线。该曲线给出了地震危险的年超越概率与地震强度之间的关系。

2) 结构分析。根据地震危险性曲线,选取有意义的地震强度(如谱加速度)范围等值划分为若干区间。在每个区间中点对应的地震强度下,对结构进行非线性动力时程分析获得工程需求参数(engineering demand parameter, EDP),如峰值层间位移角(peak inter-story drift, PID)、峰值层加速度(peak floor acceleration, PFA)、残余层间位移角(RID)等。为保证分析结果合理,通常需要进行大量的非线性时程分析,但因计算成本较高而往往难以实现。为解决该问题,YANG等^[24]提出了一个工程需求矩阵扩充方法并被 FEMA P-58 采用,如式(3)所示:

$$\mathbf{Z}_{gen} = \exp(\mathbf{L}_{cov(\ln Z)} \mathbf{D}_{cov(\ln Z)} \mathbf{U} + \mathbf{M}_{\ln Z}) \quad (3)$$

式中: \mathbf{Z} 为从非线性动力时程分析中获得 EDP 矩阵(行数为考虑的地震动数量,列数为 EDP 参数个数,记为 n); $cov(\ln Z)$ 为 \mathbf{Z} 自然对数矩阵的协方差矩阵,为 $n \times n$ 矩阵; $\mathbf{L}_{cov(\ln Z)}$ 为 $cov(\ln Z)$ 矩阵的特征向量矩阵,为 $n \times n$ 矩阵; $\mathbf{D}_{cov(\ln Z)}$ 为 $cov(\ln Z)$ 矩阵特征值的平方根矩阵,为 $n \times n$ 矩阵; \mathbf{U} 为零均值不相关高斯随机变量的列向量,为 $N_R \times 1$ 矩阵(N_R 为拟扩充的数量); $\mathbf{M}_{\ln Z}$ 为包含 $\ln Z$ 均值的列向量; \mathbf{Z}_{gen} 为生成的工程需求参数矩阵,为 $N_R \times n$ 矩阵。

3) 损伤分析。在 HAZUS 方法中,根据结构的 EDP 结合建筑相关构件的易损性曲线可确定其损伤状态。易损性曲线以对数累积正态分布函数表示,可获得建筑在该 EDP 下各构件(结构构件、非结构构件等)处于不同损伤状态 ds 的条件概率。HAZUS 提供了确定不同类型构件易损性曲线的关键参数,即中位数和对数

标准差。值得注意的是,现有 HAZUS 评估中没有考虑残余变形的影响,这导致其无法捕捉自复位结构残余变形小、功能恢复性好的优点。因此,本研究在计算建筑损伤状态概率时考虑了残余变形的影响,如图 2 所示,其中 $P_{\text{倒塌}}$ 和 $P_{\text{拆除}}$ 分别为建筑物震后倒塌和因残余变形导致拆除的概率; $P(\text{倒塌}|\text{EDP})$ 、 $P(\text{拆除}|\text{EDP})$ 和 $P(ds|\text{EDP})$ 分别为在某一工程需求参数下,建筑物处于倒塌、拆除和损伤状态 ds 的概率。

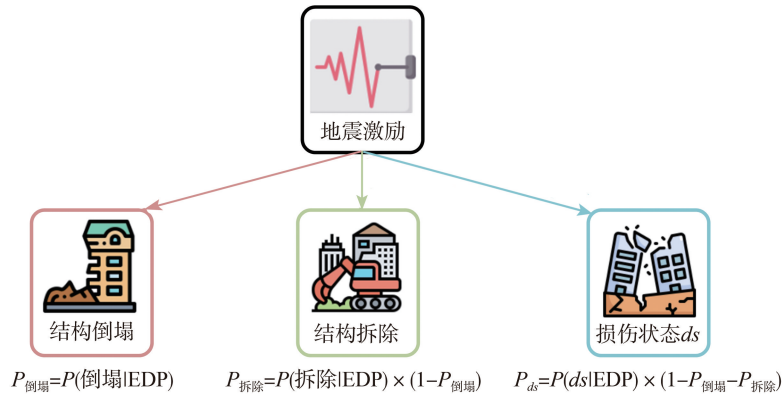


图 2 考虑残余层间位移角的损伤状态概率计算

Fig. 2 Calculation of damage state probability considering RID

4) 损失分析。损失分析中需确定建筑不同损伤状态对应的环境影响。HAZUS 方法基于大量震害调查和专家研究给出了经济损失数据库。为与 HAZUS 的地震经济损失评估结果兼容,本研究利用经济投入-产出环境影响分析数据将 HAZUS 中的建筑重置经济成本折算为重置环境影响。HAZUS 方法还提供了不同类型构件在不同损伤状态下的损失费用比率,即相应修复费用占建筑重置成本的比例。对于某一类型构件而言,不同损伤状态的损失费用比率反映的是该类构件不同损伤程度,而损伤程度与修复所需的能源、材料等成正比,这些因素是环境影响的最主要来源,因此可认为同一类型构件处于不同损伤状态的修复经济费用的相对比例与修复环境影响的相对比例相同,即“修复成本比率”假设^[16-17]。因而只要确定建筑重置环境影响中各类型构件的占比即可确定不同类型构件在不同损伤状态下的环境影响比率。考虑到不同类型构件单位经济成本的环境影响亦存在差异,HAZUS 中提供的经济损失比例数据需根据各类型构件的整体环境影响因子进行调整,从而获得不同类型构件的环境影响占重置环境影响的比例。此外,还利用 HAZUS 中提供的震后可能产生的建筑碎片质量计算了震后运输碎片产生的碳排放。一旦确定每类构件处于不同损伤状态的概率以及相应的环境影响,结合式(1)即可评估建筑物的全寿命抗震环境影响。具体的计算参数和实现方法将在后文中给出。

2 可恢复功能钢框架全寿命抗震环境影响分析

为演示改进后的方法,本节选取了 2 个分别采用自复位支撑和屈曲约束支撑加固的钢框架建筑,以碳排放(即二氧化碳当量 CO_2e)作为环境影响指标,对它们进行了抗震环境影响评估,以对比研究可恢复功能钢框架建筑的抗震减碳效益。

2.1 结构设计与计算

原型框架选自 FEMA P-751^[25] 中的 6 层钢框架 Benchmark 建筑,位于美国华盛顿州西雅图市,场地类别为 C 类。ZHANG 等^[7] 利用 2 种不同的支撑构件对该结构进行了加固升级,分别为自复位支撑(SCB)和屈曲约束支撑(BRB)。改造后的框架平面图和立面图如图 3 所示。该框架东西方向有六跨,柱距 9.14 m,南北方向有五跨,柱距 8.53 m。分析时所有的梁柱连接均假定为铰接,铰接节点变形能力大,地震中不易发生破坏,且能充分发挥支撑的作用,震后残余变形主要由支撑产生,排除了框架的影响,便于 2 种不同类型支撑的对比。为合理考虑结构构件和非结构构件的损伤,将 1.5% 峰值层间位移角作为设计基准地震(design basis earthquake, DBE)下的设计目标,最终的结构设计参数见表 1,具体的设计方法及细节见文献[7]。

利用 OpenSees^[26] 软件建立 2 个结构的数值模型。边界框架构件采用基于位移的非线性梁柱单元以及 Steel01 材料模拟;BRB 采用 Steel02 材料建模以考虑各向同性应变硬化的影响;SCB 采用 ZHANG 等^[27] 开发的修正的 SelfCentering 材料建模,捕捉支撑加载和卸载刚度不同的滞回行为。在结构非线性时程分析中采用

Fatigue 材料描述 BRB 的疲劳破坏,采用 MinMax 材料考虑支撑体系中连接的失效。 $P-\Delta$ 效应通过设置重力柱的方式考虑,并赋予了结构第 1 模态和第 2 模态 5%的瑞雷阻尼,以重点考虑前 2 阶振型对结构反映的贡献。

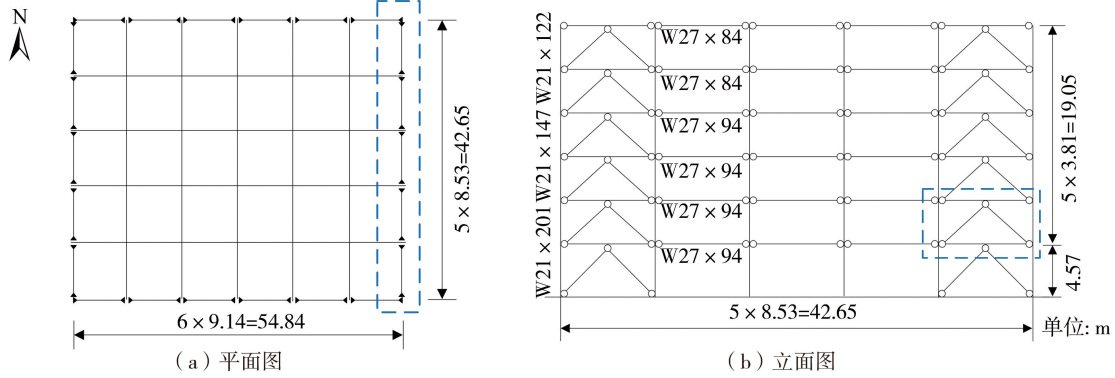


图 3 改造后的钢框架结构

Fig. 3 Retrofitted steel frame structure

表 1 结构关键设计参数

Table 1 Structural key design parameters

框架结构类型	结构关键设计参数		支撑设计荷载 F_y/kN					
	结构基本周期 T/s	设计基底剪力 V_y/kN	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层
自复位支撑框架 SCBF	0.99	2 397.6	878.5	796.9	783.4	761.2	725.2	660.1
屈曲约束支撑框架 BRBF	1.18	1 671.7	612.5	542.9	509.8	458.5	383.7	271.3

采用 SAC 项目^[28]中为西雅图地区开发的 20 条设计基准地震动,对结构进行非线性时程分析,以验证结构设计合理性,并用于对比分析,分析得到的自复位支撑框架(SCBF)和屈曲约束支撑框架(BRBF)的响应均值如图 4 所示。结果表明,2 个结构的峰值层间位移角响应近似,均满足预设设计目标,具有可比性。在表现出近似峰值层间位移角的情况下,SCBF 与 BRBF 相比,SCBF 表现出更大的峰值楼层加速度,但几乎没有残余层间位移角。

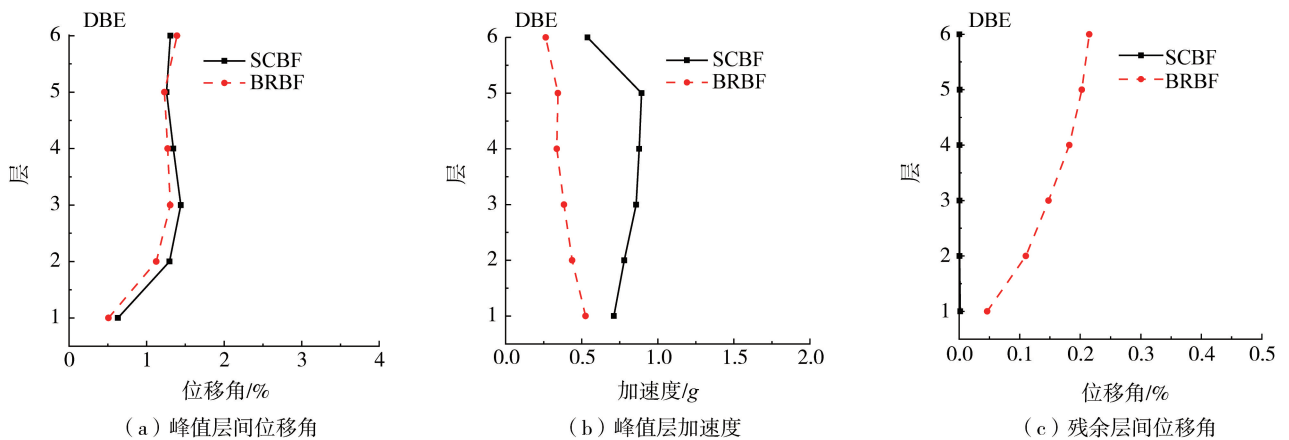


图 4 SCBF 和 BRBF 的地震响应

Fig. 4 Earthquake response of SCBF and BRBF

2.2 全寿命抗震环境影响评估

2.2.1 地震危险性分析

根据美国地质调查局网站提供的工具^[23]获得了西雅图地区的一系列地震危险性曲线,并从中线性插值得到本文所研究结构自振周期对应的曲线,其量化了该场地超过地震强度指标(谱加速度)的年超越概率,如图 5 所示。根据 FEMA P-58,结构需考虑的最小和最大谱加速度分别为 0.05 g 和 0.85 g ,并按 FEMA 建议等间隔划分为 8 个区间。相应的地震强度水准和年发生概率如表 2 所示。

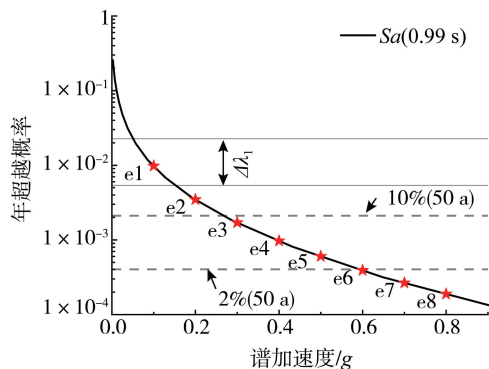


图 5 SCBF 对应的危险性曲线

Fig. 5 Risk curves of SCBF

表 2 危险性分析结果

Table 2 Results of risk analysis

地震强度	谱加速度/g	年发生概率 $\Delta\lambda$ / %	
		SCBF	BRBF
e1	0.1	1.770	1.520
e2	0.2	0.311	0.264
e3	0.3	0.112	0.095
e4	0.4	0.054	0.045
e5	0.5	0.027	0.022
e6	0.6	0.017	0.014
e7	0.7	0.009	0.007
e8	0.8	0.006	0.005

2.2.2 结构分析

对危险性分析中确定的不同地震强度开展结构非线性时程分析,获取工程需求参数 EDP。为判断构件损伤状态及修复可行性,EDP 包括峰值层间位移角 PID、峰值层加速度 PFA、残余层间位移角 RID。分析中采用与第 2.1 节相同的 20 条地震动记录,为准确捕捉结构残余变形,在每个地震动的末尾增加 30 s 的零加速度时程。对地震动进行调幅,使得地震动对应建筑物基本周期的谱加速度等于相应的地震强度水准。

获得了初始需求矩阵后,利用式(3)进行需求矩阵扩充,在每个地震强度水准下生成 10 000 组工程需求参数。此外,生成过程考虑了建模的不确定性 β_m 对 EDP 分布的影响。 β_m 主要与 2 个因素有关,即施工质量 β_c 和非线性分析模型质量 β_q 。根据 FEMA P-58 的建议,在平均施工质量保证、平均分析模型质量的条件下,建模不确定的 2 个来源均取为 0.25。因此,可根据式(4)确定 β_m 取为 0.35,其 β_m 计算公式为

$$\beta_m = \sqrt{\beta_c^2 + \beta_q^2} \tag{4}$$

2.2.3 损伤分析

在 HAZUS 中,建筑可分为 3 种构件类型,即结构构件、位移敏感型非结构构件和加速度敏感型非结构构件,以及 5 种损伤状态,即无需修复、轻度损伤、中度损伤、重度损伤和完全损伤。利用从结构分析中得到的工程需求参数分布,结合不同类型构件的易损性曲线可以得到其所处的损伤状态。易损性曲线通常以对数累积正态分布的形式表示,其中有 2 个关键参数,即 EDP 中位数 $Z_{ds,med}$ 和对数标准差 $\beta_{ds,std}$,其表达式为

$$P(DS \geq ds | Z) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds,std}} \ln \left(\frac{Z}{Z_{ds,med}} \right) \right] \tag{5}$$

由此可获得给定 EDP 值 Z 时不同损伤状态 ds 发生的条件概率。

所考虑建筑结构类型为中等层数支撑钢框架(HAZUS 中的编号为 S2M),则各类型构件的易损性曲线可从 HAZUS 中获得,如表 3 和图 6 所示。根据 HAZUS,在完全损伤状态下建筑物的倒塌概率为 5%。而关于残余变形对结构拆除的影响,根据已有研究^[20],结构拆除的概率也遵循对数正态分布,相应的中位数和对数标准差分别取为 0.5%和 0.3。

表 3 易损性曲线参数

Table 3 Vulnerability curves parameters

构件类型	EDP	各损伤状态对应的 EDP 中位数				对数标准差
		轻度	中度	重度	完全	
结 构	IDR/%	0.33	0.67	2.0	5.33	0.4
位移敏感型非结构	IDR/%	0.40	0.80	2.5	5.00	0.5
加速度敏感型非结构	PFA/%	0.30	0.60	1.2	2.40	0.6

值得注意的是,HAZUS 采用的是基于建筑整体的分析。因此,结构各楼层峰值层间位移角的平均值作为位移角相关构件的 EDP,各楼层峰值加速度的平均值作为加速度相关构件的 EDP,残余层间位移角的最大值作为建筑拆除的 EDP。峰值层间位移角和峰值加速度采用平均值是为了避免过度高估或低估建筑整体的损伤程度,残余层间位移角则与构件层次分析方法(如 FEMA P-58)保持一致,采用最大值,来表征建筑

整体的可修复性。需要指出,自复位支撑体系虽备受关注,但目前工程应用较少,缺乏相关数据,因而统一采用了 HAZUS 中 S2M 对应的易损性曲线。为更准确地估计不同结构类型的地震后果,今后有必要对这类新型消能减震体系进行构件层次和结构层次的易损性研究。

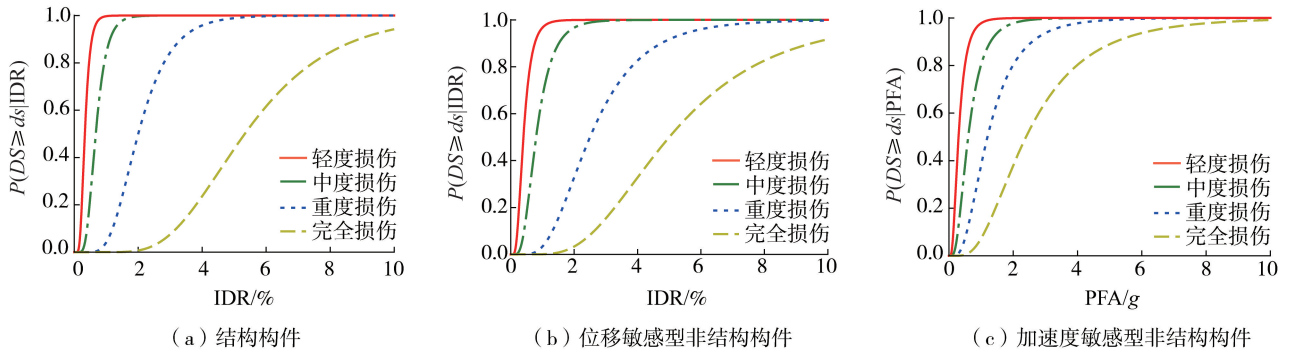


图 6 易损性曲线

Fig. 6 Vulnerability curves

2.2.4 损失分析

将上一步获得的建筑损伤状态信息转化为相应的地震损失后果。地震损失类别可分为:结构构件修复环境影响(EN_{STR})、位移敏感型非结构构件修复环境影响(EN_{NSD})、加速度敏感型非结构构件修复环境影响(EN_{NSA})、室内陈设物品修复环境影响(EN_{CON})、震后建筑碎片运输环境影响(EN_{DEB})。

建筑的震后修复环境影响可按照建筑重置环境影响的百分比进行计算,如式(6)~式(8)所示:

$$EN_{STR} = EN_{BRC} \times \sum_{ds=2}^7 (P_{ds(STR)} \times ENS_{ds}) \quad (6)$$

$$EN_{NSD} = EN_{BRC} \times \sum_{ds=2}^7 (P_{ds(NSD)} \times END_{ds}) \quad (7)$$

$$EN_{NSA} = EN_{BRC} \times \sum_{ds=2}^7 (P_{ds(NSA)} \times ENA_{ds}) \quad (8)$$

式中: EN_{BRC} 为建筑重置环境影响; $P_{ds(STR)}$ 、 $P_{ds(NSD)}$ 、 $P_{ds(NSA)}$ 分别为结构构件、位移敏感型非结构构件和加速度敏感型非结构构件处于损伤状态 ds 的概率; ENS_{ds} 、 END_{ds} 、 ENA_{ds} 则分别代表这三类构件的修复环境影响占建筑重置环境影响的比率。

室内陈设物品被定义为家具、计算机等不属于结构的设备,但不包括照明、天花板和机电设备等非结构构件。这些陈设物品在地震中的损伤通常与峰值加速度相关,因而室内陈设物品的修复环境影响(EN_{CON})可由对加速度敏感的非结构构件的损伤指标来估计,如式(9)所示:

$$EN_{CON} = EN_{CRV} \times \sum_{ds=2}^7 (P_{ds(NSA)} \times ENC_{ds}) \quad (9)$$

室内陈设物品的类型复杂,其环境影响由各类家具设备等的种类和数量决定,缺乏统计数据,故采用和 HAZUS 相同的假设,即室内陈设物品的环境影响等同于建筑重置环境影响。

由式(6)~式(8)可知,建筑重置环境影响和各类型构件修复环境影响比率是抗震环境影响计算的关键。本案例采用美国环境扩展投入-产出(United States environmentally extended input-output, USEEIO)数据库中的建筑产业影响数据^[29]将 HAZUS 提供的经济数据转化为环境影响。该数据库融合了美国 389 个产业部门之间的经济交易数据和环境数据。其中,商业建筑行业的每美元对应的环境影响(f_{EN})为 0.414 kg CO₂e (这里的美元参考年为 2013 年)。根据 HAZUS 的清单技术手册(inventory technical manual),其经济重置成本(C_{BRC})计算源自美国全真造价数据库 RSMears^[30] 2022 版数据。根据 RSMears 提供的历史成本指数,按照式(10)将 2022 年经济成本折算到 2013 年,然后根据式(11)计算对应的建筑重置环境影响。

$$C_{BRCin2013} = \frac{h_{2013}}{h_{2022}} \times C_{BRCin2022} \quad (10)$$

$$EN_{BRC} = f_{EN} \times C_{BRCin2013} \quad (11)$$

式中: h_{2013} 为 2013 年的历史成本指数,其值为 201.2; h_{2022} 为 2022 年的历史成本指数,其值为 276; $C_{BRCin2022}$ 为每平方米 2 200.2 美元。最终计算得到的 EN_{BRC} 为每平方米 664.2 kg CO₂e。

HAZUS 中给出了各个类型构件在完全损伤状态或倒塌时的修复成本占重置成本比值。对于结构构件、位移敏感型和加速度敏感型非结构构件,该比值分别为 19.2%、32.9%、47.9%。由于不同类型构件所处具体产业分类不同,单位经济成本的环境影响并不相同,碳排放因子存在差异,比如混凝土制品相关产业的经济价格相较于电梯等机械制造业较低,但环境影响相对较高。因此经济比例需要根据碳排放因子进行调整以获得各构件占总环境影响的比例。根据 HAZUS 经济数据的同源数据库 RSMMeans 的估算工具,统计 6 层钢结构的各类型构件中主要构件所占的常见比例,再结合 USEEIO 中合适的产业碳排因子加权以获得不同类型构件的整体因子,见表 4。根据获得的整体因子,调整经济成本比例后,在完全损伤状态时,各类型构件修复环境影响所占比例为 19.4%、42.5%、38.1%。

表 4 不同类型构件整体因子计算

Table 4 Calculation of overall factors for different types of components

构件类型	构件名称	价格比例/%	NAICS 编码	排放因子	整体因子
结构	支撑钢框架	100.0	332310	0.585	0.585
	位移敏感型				
	内墙	13.1	332310	0.585	0.749
	外窗	13.2	332320	0.567	
	外墙	67.3	327390	0.823	
	外门	5.1	313200	0.710	
	饰面	1.3	332320	0.567	
加速度敏感型	HVAC	30.0	333415	0.658	
	电梯	27.1	335999	0.249	
	吊顶	12.2	327100	0.780	
	立管	1.5	326120	0.677	
	照明	21.1	335120	0.344	
	通信	8.1	334290	0.239	

注:NAICS 编码为北美产业分类体系编码。

对于不同类型构件,根据“修复成本比率”假设,其修复环境影响比率等于 HAZUS 中的修复经济成本比率。根据 HAZUS 提供的不同损伤状态下不同类型构件的损失比率,结合前述获得的完全损伤状态下的各构件类型影响占比,可获得各类型构件不同损伤状态下的修复环境影响占重置环境影响的比率,见表 5。

表 5 修复环境影响占重置环境影响比例

Table 5 Proportion of rehabilitation environmental impact to replacement environmental impact %

构件类型	损伤状态			
	轻度损伤	中度损伤	重度损伤	完全损伤/拆除/倒塌
ENS_{ds}	0.4	1.9	9.7	19.4
END_{ds}	0.9	4.3	21.2	42.5
ENA_{ds}	0.7	3.8	11.5	38.1
CD_{ds}	1.0	5.0	25.0	50.0

地震产生碎片数量方面的相关研究很少,HAZUS 根据经验方法提供了震后碎片数量的估计,即不同损伤状态下单位建筑面积可能产生的砖石、混凝土和钢碎片等的数量,具体可参见 HAZUS 技术手册。根据上述数据可进一步估算震后可能因运输碎片至填埋场所需要的碳排放,计算公式如式(12):

$$EN_{DEB} = \sum_{k=1}^K d_e \times n_k \times ECI_k \times EF_{fuel,k} \quad (12)$$

式中: K 为所用运输车的类型数量; d_e 为运输碎片到场所需要的等效运输距离; n_k 为第 k 类车辆的数量; ECI_k 为油耗指标,表示单位运输距离的燃油使用量; $EF_{fuel,k}$ 为碳排放因子,表示单位油耗的碳排放。本文假设场地和填埋场或处理场的平均距离为 40 km。往返行程包括现场装载,也包括卸载后返回现场。由于后者负载较少,车辆油耗减少,因此假设卸货返回的距离为两地距离的 $2/3$ ^[31],则一次运输往返的等效距离为 67 km。假设只采用一类 8 t 柴油卡车,油耗指标为 0.285 L/km,柴油碳排放系数取为 2.64 kg CO₂e/L^[32]。

根据上述信息和公式,首先可以求出建筑物在各地震强度水准下的抗震环境影响值。然后,根据式(1)和式(2)可以计算出年期望环境影响。

3 分析结果与讨论

当建筑寿命 t 为 50 a 时, SCBF 和 BRBF 的建筑全寿命环境影响值 $EN_s(t, X)$, 如图 7 所示。在考虑残余变形的情况下, SCBF 的 $EN_s(t, X)$ 约为 250 t, 而 BRBF 约为 380 t, 这展现了自复位结构在减少地震环境影响方面的显著优势。无论是否考虑残余变形, SCBF 的 $EN_s(t, X)$ 几乎相同, 这归功于其出色的自复位能力使结构的震后残余变形几乎可以忽略。而 BRBF 的 $EN_s(t, X)$ 则与残余变形密切相关。本案例中考虑残余变形的 BRBF 环境影响约为不考虑的 2.3 倍。因此, 当结构在震后产生明显残余变形时, 因面临可修复性降低而产生的环境影响显著, 意味着该因素在全寿命抗震环境影响评估中不应被忽略。值得注意的是, 由于 SCBF 具有更大的加速度响应, 且加速度敏感型构件及室内陈设物品所占比例较高, 在不考虑残余变形的情况下, 导致 SCBF 的环境影响高于 BRBF。

需要说明的是, 相对于初始建造, 生命周期抗震碳排放相对较小, 这是因为考虑了地震的发生概率。但若上升到城市尺度, 对于如东日本大地震中的百万栋房屋或其他百万栋房屋量级的城市来说, 地震风险造成的建筑修复的年期期望碳排放当量或达到千万吨。因此, 地震风险造成的环境影响不容忽视。

不同地震动强度下产生的环境影响期望值如图 8 所示。与预期相同, 结构的环境影响期望值随着地震强度的增大而增加, 且 BRBF 的环境影响随着地震强度增大的增速更快。为进一步揭示建筑在各地震动强度下的 $EN_s(1, X)$ 对总 $EN_s(1, X)$ 的贡献, 在图 8 的基础上, 考虑不同地震强度的年发生概率, 如图 9 所示。对于 SCBF 来说, 不同地震强度水准下的 $EN_s(1, X)$ 对总 $EN_s(1, X)$ 的贡献随着地震强度的增大而减少, 这主要是因为高强度地震的发生概率较低。而对于 BRBF, 贡献最高的 $EN_s(1, X)$ 并未出现在最小的强度 e1 而是在 e2, 这主要是因为此时 BRBF 开始出现明显的残余变形。

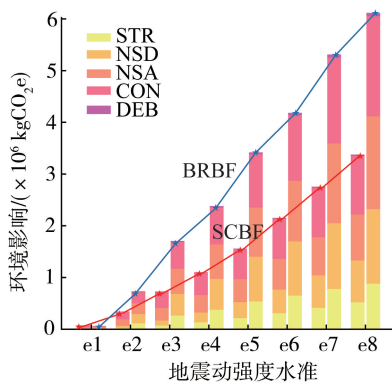


图 8 各地震动强度下的期望环境影响 (考虑残余变形)

Fig. 8 Expected environmental impact under various earthquake intensities (residual deformation is considered)

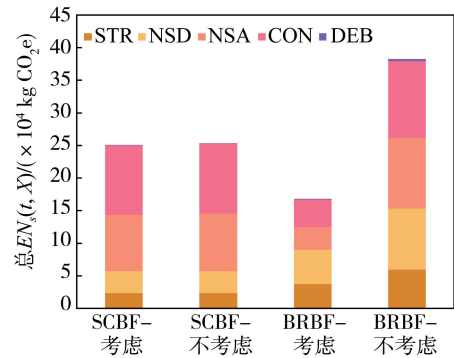


图 7 RID 对建筑全寿命环境影响 $EN_s(t, X)$ 的影响

Fig. 7 Impact of RID on the life-cycle environmental impact $EN_s(t, X)$ of buildings

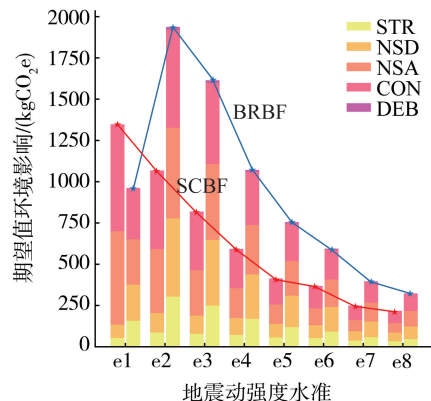


图 9 $EN_s(1, X)$ 分解到不同地震动强度 (考虑残余变形)

Fig. 9 $EN_s(1, X)$ decomposed into different earthquake intensities (residual deformation is considered)

相对于其他组分, 因地震碎片运输产生的环境影响往往较小, 但在城市尺度的模拟中, 面对巨大的建筑存量, 这一因素的影响不容忽视。此外, 碎片还涉及到处理、回收和焚烧等众多过程, 其环境影响仍有待进一步研究。

自复位结构相较于传统结构, 由于其震后几乎无残余变形的特点, 在减少地震造成经济损失及环境影响上都表现出较大优势。不过, 由于不同类型构件的碳排放因子有所差异, 导致建筑中各类构件的经济损失分布和环境影响分布并不相同。因此, 同一韧性增强措施在减少环境影响和经济损失上的效果是不同的, 在新的视角下, 对各类韧性增强措施进行探索也是未来的研究方向。此外, 在节能减排及城市化进程加快的多重

背景下,妥善权衡建筑前置影响与后序潜在地震风险相关影响,从而在全生命周期视角下考量韧性建筑设计,亦具有重要意义。

4 结论

本文基于下一代性能化设计思想,围绕建筑“低碳、韧性”目标,利用环境投入产出数据库将 HAZUS 提供的经济损失数据转化为环境影响,提出了一种改进的全寿命周期抗震环境影响评估方法,并通过分别采用新型自复位支撑和传统防屈曲支撑加固的钢框架建筑的分析,演示说明改进后的方法。主要结论如下:

1) 基于改进后的抗震环境影响评估方法,可分析震后修复建筑各类构件的环境影响情况,合理快速地评估不同建筑的全寿命周期抗震环境影响。

2) 为捕捉传统结构与新型震后功能可恢复结构之间的差异,防止低估传统抗侧结构的抗震环境影响,应当将残余变形作为重要指标以正确评估建筑损伤状态。

3) 自复位结构相较于传统结构,具有震后残余变形小的特点,因此在减少建筑抗震环境影响方面展现出显著优势。

4) 控制自复位结构的加速度响应或对加速度敏感型构件/室内陈设物品进行抗震加固连接,有利于进一步减少自复位结构的抗震环境影响。

参考文献:

- [1] PAN C, WANG H B, HUANG S P, et al. The great East Japan earthquake and tsunami aftermath: Preliminary assessment of carbon footprint of housing reconstruction[M]//KONTAR Y A, SANTIAGO-FANDIÑO V, TAKAHASHI T, et al. Advances in natural and technological hazards research. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013: 435-450.
- [2] 薄景山, 王玉婷, 薄涛, 等. 城市和建筑抗震韧性研究的进展与展望[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(2): 13-21.
BO Jingshan, WANG Yuting, BO Tao, et al. Progress and prospect of research on seismic resilience of cities and buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(2): 13-21. (in Chinese)
- [3] GÜNAY S, MOSALAM K M. PEER performance-based earthquake engineering methodology, revisited[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2013, 17(6): 829-858.
- [4] KIRCHER C A, WHITMAN R V, HOLMES W T. HAZUS earthquake loss estimation methods[J]. Natural Hazards Review, 2006, 7(2): 45-59.
- [5] FEMA. Seismic performance assessment of buildings[R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2018.
- [6] 吴继伟, 梁兴文, 朱汉波. FEMA P-58 新一代建筑抗震性能评估方法[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(3): 37-43.
WU Jiwei, LIANG Xingwen, ZHU Hanbo. FEMA P-58-next-generation performance assessment of buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(3): 37-43. (in Chinese)
- [7] ZHANG R B, WANG W, ALAM M S. Seismic evaluation of friction spring-based self-centering braced frames based on life-cycle cost[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2022, 51(14): 3393-3415.
- [8] 程庆乐, 曾翔, 熊琛, 等. 区域建筑震害模拟方法分析对比[J]. 工程力学, 2017, 34(增刊1): 105-110, 128.
CHENG Qingle, ZENG Xiang, XIONG Chen, et al. Comparison of seismic damage simulation methods for different regional buildings[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(S1): 105-110, 128. (in Chinese)
- [9] 韩博, 熊琛, 许镇, 等. 城市区域建筑物震害预测剪切层模型及其参数确定方法[J]. 工程力学, 2014, 31(增刊1): 73-78, 85.
HAN Bo, XIONG Chen, XU Zhen, et al. A multi-story concentrated-mass shear model for urban regional seismic damage prediction and associated parameter determination[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(S1): 73-78, 85. (in Chinese)
- [10] 于晓辉, 吕大刚. HAZUS 相容的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J]. 工程力学, 2016, 33(3): 152-160.
YU Xiaohui, LV Dagang. HAZUS-compatible seismic fragility analysis for rc frame structures[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(3): 152-160. (in Chinese)
- [11] SIMONEN K, MERRIFIELD S, ALMUFTI I, et al. Integrating environmental impacts as another measure of earthquake performance for tall buildings in high seismic zones[C]//Structures Congress 2015. Portland, Oregon. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2015: 933-144.
- [12] 王雪雅, 郭小东, 王志涛, 等. 基于目标-能力差距分析的建筑物抗震韧性评估方法[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(3): 35-45.
WANG Xueya, GUO Xiaodong, WANG Zhitao, et al. Seismic resilience assessment of buildings based on goal-capability gap analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(3): 35-45. (in Chinese)
- [13] 余世舟, 慕安冬. 浅谈地震损失评估方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(3): 144-151.
YU Shizhou, MU Andong. Preliminary discussion on the earthquake loss assessment method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(3): 144-151. (in Chinese)

- [14] COMBER M V, POLAND C, SINCLAIR M. Environmental impact seismic assessment: Application of performance-based earthquake engineering methodologies to optimize environmental performance [C]// CARRATO J, BURNS J. Structures Congress 2012. Chicago: American Society of Civil Engineers, 2012: 910–921.
- [15] PADGETT J, LI Y. Risk-based assessment of sustainability and hazard resistance of structural design[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(2): 04014208.
- [16] FEESE C, LI Y, BULLEIT W M. Assessment of seismic damage of buildings and related environmental impacts[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(4): 04014106.
- [17] WEI H H, SKIBNIEWSKI M J, SHOHET I M, et al. Lifecycle environmental performance of natural-hazard mitigation for buildings[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(3): 04015042.
- [18] MENNA C, ASPRONE D, JALAYER F, et al. Assessment of ecological sustainability of a building subjected to potential seismic events during its lifetime[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 18(2): 504–515.
- [19] GENCTURK B, HOSSAIN K, LAHOURPOUR S. Life cycle sustainability assessment of RC buildings in seismic regions[J]. Engineering Structures, 2016, 110: 347–362.
- [20] MCCORMICK J, ABURANO H, IKENAGA M, et al. Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements[C]// Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing: International Association for Earthquake Engineering, 2008.
- [21] FANG C, PING Y W, ZHENG Y, et al. Probabilistic economic seismic loss estimation of steel braced frames incorporating emerging self-centering technologies[J]. Engineering Structures, 2021, 241: 112486.
- [22] HU S L, WANG W, QU B. Seismic economic losses in mid-rise steel buildings with conventional and emerging lateral force resisting systems[J]. Engineering Structures, 2020, 204: 110021.
- [23] USGS. Unified hazard tool[EB/OL]. [2023–10–01]. <https://earthquake.usgs.gov/hazards/interactive>.
- [24] YANG T Y, MOEHLE J, STOJADINOVIC B, et al. Seismic performance evaluation of facilities: Methodology and implementation[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(10): 1146–1154.
- [25] FEMA. P-751; NEHRP recommended provisions: Design examples[R]. Washington DC.: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [26] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. OpenSees command language manual[J]. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 2006, 264(1): 137–158.
- [27] ZHANG R B, WANG W, FANG C. Evaluation of a full-scale friction spring-based self-centering damper considering cumulative seismic demand[J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(3): 04021281.
- [28] SOMERVILLE P, SMITH N, PUNYAMURTHULA S, et al. SAC/BD-97/04: Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project [R]. Washington DC.: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [29] US Environmental Protection Agency. US Environmentally-extended input-output technical content[DB/OL]. [2023–10–01]. <https://www.epa.gov/land-research/us-environmentally-extended-input-output-useio-technical-content>.
- [30] GORDIAN COMPANY. RSMMeans data[DB/OL]. [2023–10–01]. <https://www.rsmmeans.com>.
- [31] ZHANG X C, WANG F L. Life-cycle assessment and control measures for carbon emissions of typical buildings in China[J]. Building and Environment, 2015, 86: 89–97.
- [32] GAN V J L, CHENG J C P, LO I M C, et al. Developing a CO₂-e accounting method for quantification and analysis of embodied carbon in high-rise buildings[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141: 825–836.