

文章编号: 1000-4750(2020)08-0134-14

基于 FEMA P-58 的 RC 框架结构 抗震及减隔震性能评估

杜 轲, 燕 登, 高嘉伟, 孙景江

(中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江, 哈尔滨 150080)

摘 要: 该文采用 FEMA P-58 理论进行 RC 框架结构抗震及减隔震性能评估。设计了一栋典型多层 RC 框架结构, 并在此基础上添加屈曲约束支撑以及隔震支座形成 BRB-框架结构与隔震框架结构, 采用 OpenSees 软件建立了 3 个结构的有限元模型, 选取合适的地震动记录并调幅, 对三个结构进行了非线性结构响应分析。针对多遇地震、基本地震、罕遇地震、极罕遇地震 4 个地震动强度, 使用 FEMA P-58 理论中基于强度的方法, 对三个结构在四个地震强度下进行性能评估, 并针对各性能指标的评估结果进行对比分析。地震损失评估结果显示, 采用隔震框架结构与 BRB-框架结构可以有效降低建筑物在地震作用下的维修成本与维修时间。与普通框架相比, 在罕遇地震作用下隔震结构的维修成本与维修时间可降低 65% 与 58%, BRB-支撑框架结构可降低 47% 与 34%。

关键词: RC 框架结构; 防屈曲支撑; 隔震; 性能评估; FEMA P-58

中图分类号: TU375.4; U352.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.09.0551

SEISMIC PERFORMANCE ASSESSMENT OF RC FRAME STRUCTURES WITH ENERGY DISSIPATION AND ISOLATION DEVICES BASED ON FEMA P-58

DU Ke, YAN Deng, GAO Jia-wei, SUN Jing-jiang

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics,
China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: It introduces the basic method and process of seismic performance assessment of RC frame structures with energy dissipation and isolated devices based on the FEMA P-58 theory. A typical multi-story RC frame structure is designed, based on which buckling restrained braces and isolation bearings are added to form a BRB-frame structure and an isolated frame structure. The finite element models of the three structures are established in OpenSees software. Appropriate seismic records are selected and scaled to analyze the structural responses of the three structures. The intensity-based assessment method in FEMA P-58 is used. The structural response and seismic loss results of the ordinary frame structure, BRB-frame structure and isolated frame structure under four seismic intensities levels (i.e., frequently occurred earthquake, design level earthquake, maximum considered earthquake, very rare level earthquake) are compared. The results of seismic performance assessment show that the use of either an isolated frame structure or an BRB-frame structure can effectively reduce the repair cost and repair time of the building under earthquakes. Compared with the ordinary frame, the repair cost and repair time of the isolated structure under rare earthquakes can be reduced by 65% and 58%, respectively, and those of the

收稿日期: 2019-09-23; 修改日期: 2020-01-15

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2019E098); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费项目(2019C10, 2019B05); 国家自然科学基金项目(51878631)

通讯作者: 杜 轲(1985—), 男, 河南人, 副研究员, 博士, 硕导, 主要从事结构抗震方面研究 (E-mail: duke@iem.ac.cn).

作者简介: 燕 登(1994—), 男, 山西人, 硕士生, 主要从事结构抗震方面研究 (E-mail: yandcqu@foxmail.com);

高嘉伟(1995—), 男, 宁夏人, 硕士生, 主要从事结构抗震方面研究 (E-mail: 1422067452@qq.com);

孙景江(1953—), 男, 山东人, 研究员, 博士, 博导, 主要从事结构抗震方面研究 (E-mail: jingjiangsun@sina.com).

BRB-braced frame structure can be reduced by 47% and 34%, respectively.

Key words: RC frame structures; buckling-restrained brace; base-isolated; seismic performance assessment; FEMA P-58

基于性能的地震工程 PBEE (performance-based earthquake engineering) 的思想自提出后, 全世界地震多发国家 (如美国、日本、中国、新西兰、意大利、土耳其、伊朗等) 都对其开展了研究和实践。20 世纪 90 年代初, 美国 FEMA 和 NSF 开展为期 6 年的“基于性能的抗震设计理论”, 开始了基于性能地震工程初步研究。美国加州工程师协会 (SEAOC) 提出的 Vision 2000^[1] 第一次详细阐述了基于性能的概念和实施框架, 随后 FEMA 273^[2]、FEMA 274^[3]、FEMA 356^[4] 以及 ATC 40^[5] 等规范提出了一系列性能目标以及实现这些目标的设计和分析方法。2004 年, 中国也颁布了《建筑工程抗震性能化设计通则》^[6], 该通则对中国建筑性能目标以及实施方法提出了规范化要求。目前各国采用的抗震规范也都不同程度体现了基于性能设计的思想, 如中国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 采用“小震不坏、中震可修、大震不倒”三水准的设防目标和“两阶段”设计方法, 同时在附录给出了实现抗震性能设计目标的参考方法。上述基于性能的设计和分析方法 (现被称为早期 PBEE) 的共同特点是性能水准和性能估计完全是确定性的, 然而实际工程却充满了不确定性, 如地震动不确定性, 结构不确定性, 破坏不确定性等。文献 [7] 认为, 早期 PBEE 方法在新近地震中暴露出不足的核心问题是在性能评估和设计过程中没有恰当地考虑和处理地震作用及复杂结构非线性行为中的不确定性。文献 [8—9] 进一步指出, 早期 PBEE 还存在以下不足: 1) 计算工程需求参数主要是基于简化的分析方法; 2) 没有体现结构可以保证处于某一性能水准的概率; 3) 缺少易于理解并便于制定决策的性能指标; 4) 并未考虑结构中的非结构构件。为了量化不确定性以及采用更加明确的性能指标, 美国太平洋地震工程研究中心 (PEER) 提出的新一代基于性能地震工程的全概率方法^[10], 并在 2012 年颁布了 FEMA P58 规范^[11], 给出了理论和实施方法。

国外学者采用 FEMA P58 理论针对单体建筑物进行抗震性能评估领域做了大量工作, Aslani 和 Miranda^[12] 提出了基于构件的单体建筑地震损失评

估模型, 对结构中的结构构件与非结构构件建立了易损性函数, 将各构件损失和作为单体建筑的总损失。Ramirez 和 Miranda^[13] 提出了单体建筑损失估计的研究方法, 提出了基于层的损失评估方法, 建立了基于建筑物层的易损性函数。Goulet 等^[14] 利用 PBEE 方法评估了一幢位于加利福尼亚地震区的四层钢筋混凝土办公楼的抗震性能, 将结构响应、倒塌风险、结构和非结构构件损伤以及维修成本、死亡风险以及相关经济成本作为性能指标。在分析中采用了考虑不确定性的地震动选择方案, 结构模型采用了纤维模型和铰模型, 并对比分析了模型不确定性对于评估结果的影响。Hutt 等^[15] 以旧金山某高层建筑为例, 基于现存高层建筑数据库设计了代表性原型建筑, 并进行了设计地震危险性分析以及非线性时程分析, 对结果进行评估与估算, 得出相关经济损失与停工工期, 并给出了一些提高结构可恢复性的策略, 为旧金山高层建筑设计提供了有力的支撑。Shrivastava 等^[16] 利用 PBEE 的思路, 结合结构消防工程相关建筑规范规定, 将基于性能的方法运用于同样属于低概率高风险后果的火灾灾害中, 并给出了完整的理论框架。

国内研究人员同样在基于性能的地震工程领域展开了诸多工作。施炜等^[17] 基于 IDA 方法的结构抗倒塌易损性分析方法, 定量评价了多层 RC 框架结构的抗倒塌能力和抗倒塌安全储备。姜丽娜等^[18] 将结构抗倒塌能力指标 CMR (倒塌安全储备系数) 与结构在给定地震强度下的经济损失相结合, 建立了基于 CMR 的地震损失模型, 通过对 RC 框架结构分析, 讨论了地震损失评估与结构 CMR 的关系。罗文文等^[19] 从结构损伤程度控制和结构损伤机制选择的角度出发, 对 PBEE 评价方法进行了简化, 考虑安全性与经济性的影响, 提出了 RC 框架及结构损伤合理性评估方法。朱汉波等^[20] 使用 FEMA P-58 的抗震性能评估方法, 采用 PERFORM 3D 进行结构响应分析, 进行了针对于钢筋混凝土框剪结构的抗震性能评估。曾翔等^[21] 使用 MCS 模型进行弹塑性时程分析, 采用 3 幢典型建筑作为算例, 进行了基于强度的地震损失评估, 得出在

基本地震以及罕遇地震作用下, 建筑内隔墙等位移敏感型非结构构件是造成建筑经济损失的主要来源。孙楚津等^[22]分别利用基于 FEMA P-58 方法和中国规范方法对上述地震下的校园建筑进行了经济损失评价, 结果表明由于计算方法差异两种方法结果有所不同。

本文首先介绍了采用 FEMA P-58 理论进行建筑物抗震性能评估的基本方法与基本流程。然后, 设计了一栋典型多层框架结构, 并在此基础上添加屈曲约束支撑以及隔震支座形成 BRB-框架结构与隔震框架结构, 采用基于 OpenSees 软件^[23]建立了 3 个结构的有限元模型, 选取合适的地震动记录并调幅, 对三个结构进行了非线性结构响应分析。针对多遇地震、基本地震、罕遇地震、极罕遇地震 4 个地震动强度, 本文使用 FEMA P-58 理论中基于强度的方法, 给出了进行抗震性能评估及地震损失分析的具体操作流程, 并对比了普通框架结构、BRB-框架结构、隔震框架结构在四个地震动强度下的结构响应情况及地震损失结果。

1 FEMA P-58 理论概述

PBEE 方法主要分为四个步骤: 地震危险性分析、结构响应分析、地震易损性分析和损失评估, 并通过各阶段得到的变量, 即地震动强度指标(intensity measures, IM)、工程需求参数(engineering demand parameters, EDP)、损伤指标(damage measures, DM)、决策变量(decision variables, DV), 将整个评估用全概率理论有机地联系起来。基于全概率理论, PBEE 方法可用三重积分的形式表示为:

$$v(DV) = \iiint G \langle DV|DM \rangle |dG \langle DM|EDP \rangle dG \langle EDP|IM \rangle |d\lambda(IM) \quad (1)$$

基于 FEMA P-58 的抗震性能评估基本流程如下:

1) 建立建筑物性能模型。建筑性能模型是一个有序的数据集合, 包含以下内容建筑物的基本数据: 建筑物尺寸、重建成本、重建时间、人员流动模型, 结构构件信息, 非结构构件信息等。FEMA P-58 中的建筑物性能模型将建筑物中所有易受地震影响构件分为易损性组(fragility groups)和性能组(performance groups)。易损性组是具有

相似施工特点、对地震作用具有相似的敏感程度以及在震后具有类似的损伤状态的构件的集合。性能组是符合特定易损性组, 且具有相同的地震需求参数的建筑构件的集合, 是易损性组的子集。

2) 确定地震风险水准。FEMA P-58 理论中提出了以下三种进行建筑物抗震性能评估的方法: 基于地震强度的评估(intensity-based assessment), 基于地震情境的评估(scenario-based assessment), 以及基于地震危险性的评估(time-based assessment)。

3) 进行结构响应分析。结构响应分析用于分析建筑物对于地震动的响应, 生成用于预测建筑物中结构构件和非结构构件损伤情况的响应需求参数, 关键的响应需求参数包括楼层峰值加速度、楼层峰值速度、层间位移角和残余位移。FEMA P-58 中介绍了两种用于结构响应分析的方法, 分别为非线性时程分析方法和简化分析方法。本文采用非线性时程分析, 在使用非线性时程分析的方法得到需求参数的过程中, 需要考虑不确定性的因素。不确定性主要有三个来源: 1) 建立有限元模型的不确定性; 2) 分析数据记录的不确定性; 3) 地震动的不确定性。

4) 建立建筑物倒塌易损性函数。建筑物倒塌时造成人员伤亡的主要原因, 因此要对倒塌引起的地震伤亡进行评估需要对建筑物的倒塌易损性进行分析。倒塌易损性是结构倒塌的概率与地震动强度的函数。FEMA P-695 中介绍了一种基于 IDA(增量动力分析) 来确定倒塌易损性函数的方法^[24]。还有一种简化分析方法, 该方法运用 Pushover 方法近似计算地层建筑的倒塌易损性函数。Vamvatsikos 和 Cornell^[25]开发了开源的工具软件 SPO2IDA (Static Pushover 2 Incremental Dynamic Analysis), 该工具可将静力分析得到的 Pushover 曲线转化为近似的 IDA 曲线。

5) 计算建筑物性能。进行建筑物的整体抗震性能评估的内容包括模拟需求、倒塌评估、确定损伤、计算损失及伤亡、计算维修成本和维修时间等。在进行性能计算时, 利用 Monte Carlo method, 使用有限组的分析组合出大量的模拟反应状态, 从而提高了分析的精确度, 降低了分析中的不确定性。

评估的基本框架与具体流程如图 1 所示。

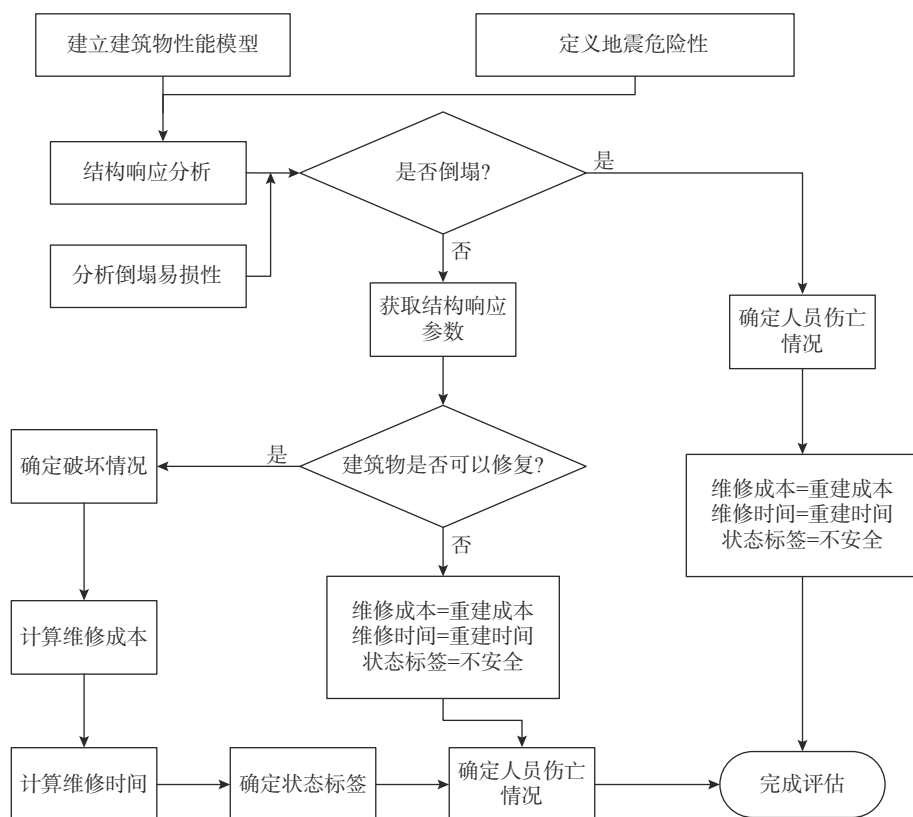


图 1 基于 FEMA P-58 理论进行抗震性能评估的基本流程图

Fig. 1 Flow chart of seismic performance evaluation based on FEMA P-58 theory

2 钢筋混凝土抗震及减隔震框架结构的结构响应分析

设计一栋典型框架结构，并参照相关设计规范，基于相同的场地条件，在该普通框架结构的基础上添加 BRB 屈曲约束支撑与隔震支座，形成 BRB-框架结构与隔震框架结构，探究其在多遇地震、基本地震、罕遇地震、极罕遇地震四个强度等级地震下的结构响应，获得后续用于损失评估的 EDP 数据。

2.1 普通框架结构

该结构每层建筑面积为 466.56 m^2 ，总建筑面

积为 2332.8 m^2 ，每层层高均为 3.3 m 。楼面、屋面恒荷载取 4.0 kN/m^2 ，活荷载标准值取 2.0 kN/m^2 ，填充墙、隔墙荷载标准值取 8.0 kN/m^2 。混凝土强度 C30，板厚 100 mm ，纵筋采用 HRB400，箍筋采用 HPB300。抗震设防烈度 7 度，设计基本地震加速度值为 $0.1g$ ，场地类别为 II 类，丙类结构，设计地震分组为第 2 组。结构布置图如图 2 所示。采用 PKPM 软件，根据 GB 50011—2010 进行结构抗震设计，截面尺寸与配筋如图 3 所示。多遇地震下的最大层间位移角为 $1/558$ ，底层柱最大轴压比 0.66 ，结构第一振型基本周期 0.776 s ，均满足 GB 50011—2010 设计要求。结构规则对称，后续分析仅以一榀框架代替整体结构。

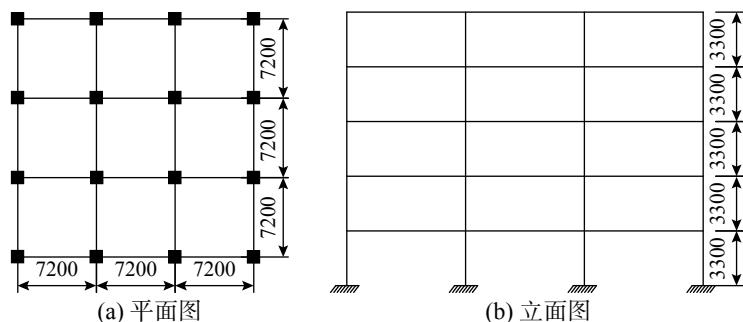


图 2 结构布置图

Fig. 2 Structural layout

如下参数来建立隔震支座的恢复力模型： k_{init} (隔震支座屈服前水平刚度)、 α_1 (线性部分的屈服刚度比)、 α_2 (非线性部分的屈服刚度比)、 F_y (屈服力)、 μ (非线性部分硬化指数)。

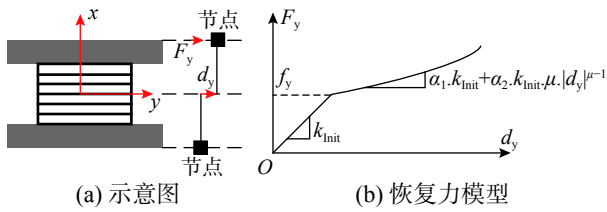


图 6 隔震支座单元
Fig. 6 Isolation bearing element

根据本文表 2 中所选用 LRB400 隔震支座的力学性能参数，隔震支座屈服前水平刚度 k_{init} 取 8450 kN/m， α_1 根据屈服前后的刚度比取 0.076，屈服力 F_y 取 28 kN， α_2 取 0， μ 取 1 表示不考虑非线性硬化部分。在分析中也不考虑温度对屈服强度的影响以及支座附加阻尼的影响。

2.5 地震动选取与调幅

本文以 GB 50011—2010 中规定的设计反应谱为目标谱，从 PEER NGA-west2 地震动数据库中，在结构主要周期段匹配目标反应谱，筛选出一系列地震动，并与 FEMA P695 中推荐的地震动记录作交叉筛选，最终确定 11 条地震动记录用于后续的分析使用，这些地震动记录的信息如表 3 所示。

表 3 选用地震动记录信息
Table 3 Information of selected ground motion records

编号	台站/记录时间/地震名称	PGA/g	NPTS	dt
EQ1	Imperial Valley-06, 10/15/1979, Delta	0.367	10015	0.010
EQ2	Superstition Hills-02, 11/24/1987, El Centro Imperial Valley	0.357	11999	0.005
EQ3	Superstition Hills-02, 11/24/1987, Poe Road	0.475	2230	0.010
EQ4	Loma Prieta, 10/18/1989, Capitola	0.458	7999	0.005
EQ5	Northridge-01, 1/17/1994, Canyon Country	0.534	1999	0.010
EQ6	Landers, 6/28/1992, Coolwater	0.275	7180	0.004
EQ7	Northridge-01, 1/17/1994, Beverly Hills	0.434	2999	0.010
EQ8	Kobe Japan, 1/16/1995, Shin-Osaka	0.217	4096	0.010
EQ9	Kocaeli Turkey, 8/17/1999, Duzce	0.216	5437	0.005
EQ10	Chi-Chi Taiwan, 9/20/1999, CHY101	0.333	18000	0.005
EQ11	Duzce Turkey, 11/12/1999, Bolu	0.739	5590	0.010

描述地震动强度指标 (IM) 的指标有很多，常见的有峰值地面加速度 (PGA)、谱加速度 $S_a(T_1)$ 等。其中 $S_a(T_1)$ ，其含义是与结构弹性基本周期对

应的有阻尼的谱加速度值，该指标是国内外研究中使用较为广泛的地震动强度指标，简单实用，与传统的 PGA 指标相比可以大大降低结构地震响应分析的离散性，适用于中短周期结构^[29]。本文选择以 $S_a(T_1)$ 作为强度指标以及地震动调幅参考参数。将选取的 11 条地震动记录使用单点调幅法^[30]调幅至这四个强度水平，结果及调幅系数如表 4 与图 7 所示。

表 4 地震动调幅系数
Table 4 Scaling factors of ground motions

编号	$S_a(T_1)/g$	多遇地震	基本地震	罕遇地震	极罕遇地震
EQ1	0.517	0.089	0.267	0.563	0.861
EQ2	0.589	0.078	0.234	0.494	0.756
EQ3	0.403	0.114	0.342	0.722	1.104
EQ4	0.711	0.065	0.194	0.409	0.626
EQ5	0.568	0.081	0.243	0.512	0.783
EQ6	0.410	0.112	0.336	0.710	1.085
EQ7	1.020	0.045	0.135	0.285	0.436
EQ8	0.508	0.090	0.271	0.573	0.876
EQ9	0.474	0.097	0.291	0.614	0.939
EQ10	0.599	0.077	0.230	0.486	0.743
EQ11	0.906	0.051	0.152	0.321	0.491

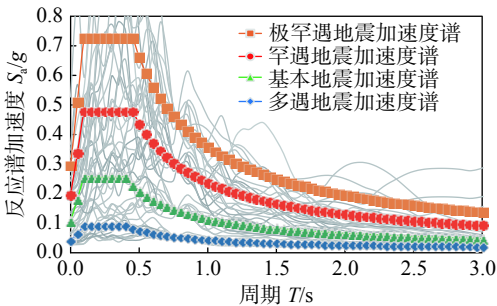


图 7 四个强度等级的加速度反应谱调幅结果
Fig. 7 Scaling results of acceleration response spectra under four intensity levels

2.6 层间位移角分析结果

对于框架结构，梁、柱、梁柱节点结构构件都是属于层间位移角敏感型部件，因此最大层间位移角是最佳的结构损伤判别指标。框架模型、BRB-框架模型、隔震模型经过 4 个强度等级各 11 条地震动弹塑性时程分析，峰值层间位移角均值结果如图 8 所示。在四个强度等级的地震作用下，普通框架结构的最大层间位移角都达到了这三个模型的最大值，在罕遇地震等级下，最大层间位移角接近 0.58%，但仍然满足 GB 50010—2010

中 2% 的限制要求。隔震结构与 BRB-框架结构相对于普通框架结构, 都展示出了良好的抗震性能, 层间位移角降低了 40%~60%, 并且隔震结构

相较于 BRB-框架结构与普通框架结构, 上部结构层间位移角始终保持较低水平, 表明隔震层起到良好的耗能作用。

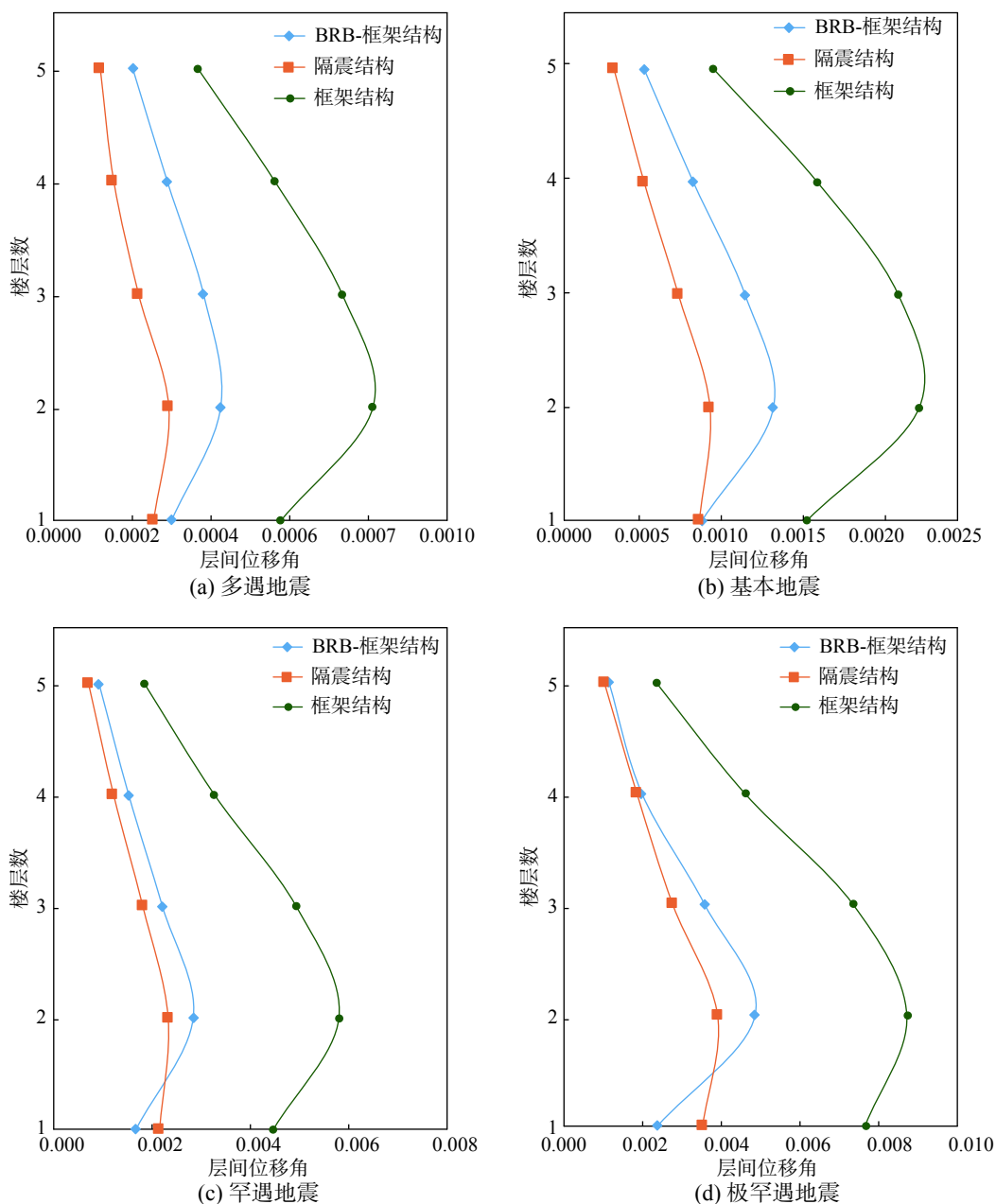


图 8 最大层间位移角对比结果

Fig. 8 Comparison results of maximum inter-story drift ratio

2.7 峰值楼层加速度分析结果

峰值楼层加速度均值结果如图 9 所示。在四个地震动强度下, BRB-框架结构相较于普通框架结构, 楼层加速度响应更大。罕遇地震作用下, 在结构顶层, 普通框架结构的加速度响应为 0.48 g , 而 BRB-框架结构的加速度响应为 0.61 g , 达到了 25% 的增幅。这是由于普通框架结构的基本周期

为 0.776 s , BRB-框架结构的刚度更大, 结构的基本周期降低至 0.454 s 。

而隔震结构在四个强度等级的地震作用下, 峰值楼层加速度均值均为最低, 在罕遇地震作用下, 结构顶层的加速度响应为 0.26 g , 相较于普通框架结构降低了 45%。由于隔震支座的添加, 结构的基本周期延长至 1.392 s , 结构的地震加速度

响应将大大降低。

3 钢筋混凝土抗震及减隔震框架结构的地震损失评估

本节将依据 FEMA P-58 抗震性能评估理论, 采用理论中基于强度的评估方法, 针对算例进行损失评估, 评估指标包括人员伤亡、维修成本、维修时间。并根据分析结果对比普通框架结构、BRB-支撑框架结构、隔震结构的抗震性能优劣。

进行抗震性能评估的基本流程如下: 在 PACT 软件中建立建筑物的性能模型, 内容包括建立目标

建筑物的人口流动模型、以及设置构件易损性分组; 录入 2.6 小节与 2.7 小节中结构响应分析得到的地震需求参数数据; 使用 PACT 软件进行性能计算。

3.1 建筑物的性能模型

根据中国建设工程造价信息网提供的统计数据, 2018 年上半年多层框架结构的建安成本为 1118 元/m^2 , 因此估算本文算例建筑物的重建成本为 $466.56 \times 5 \times 1118 = 260.81$ (万元), 根据 2019 年 3 月美元汇率, 重建成本为 38.8 万美元 (不含建筑内其他财产以及非结构构件费用)。根据《全国统一建

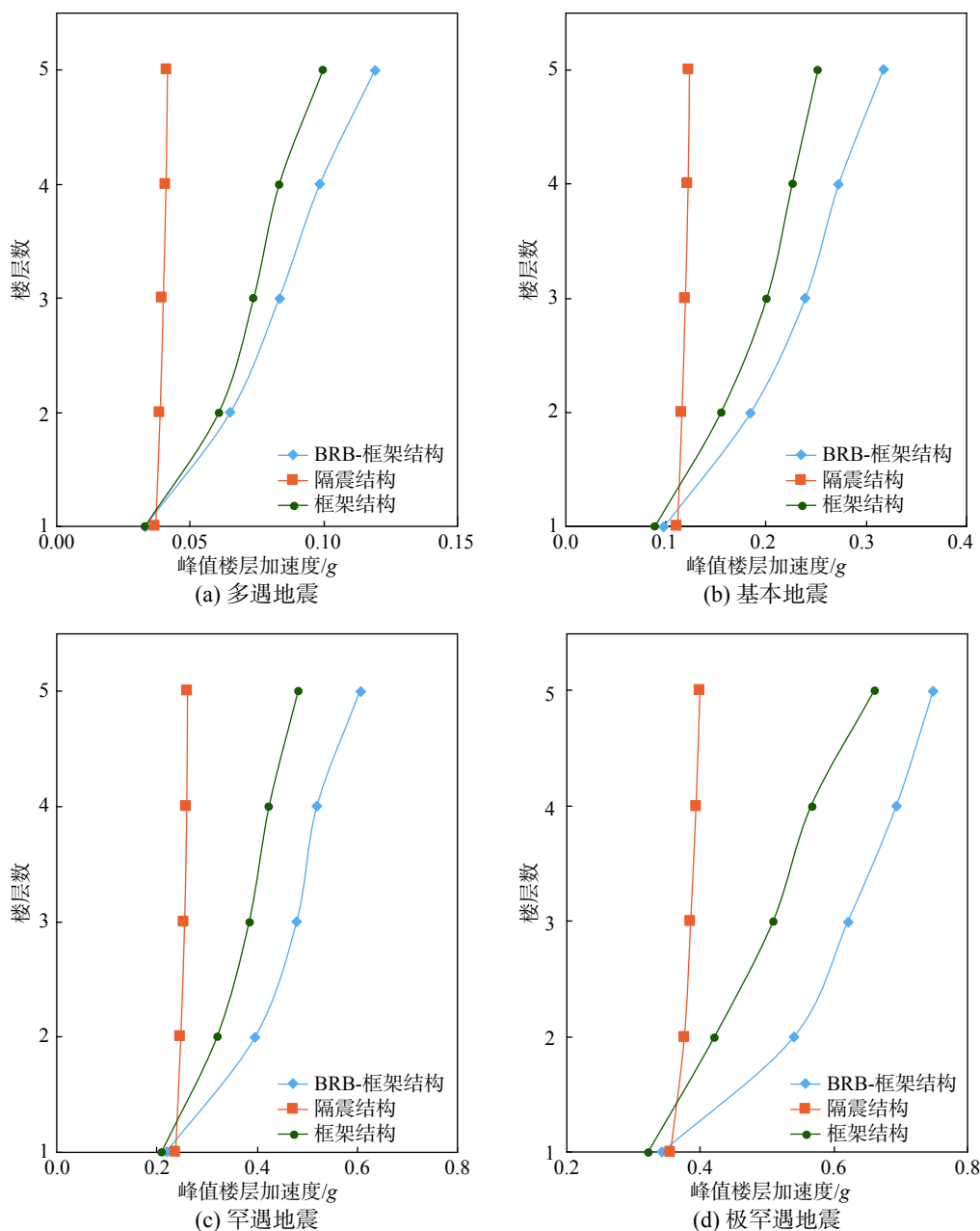


图9 峰值楼层加速度对比结果

Fig. 9 Comparison results of peak floor acceleration

筑安装工程工期定额》计算重建工期,考虑装修工程与安装工程的穿插施工,建筑物的重建工期为 380 d。

人员流动模型主要由建筑物的用途决定,因此选用 FEMA P-58 中提供的商务办公楼人口流动模型。在 FEMA P-58 中提供的人员流动模型中,商务办公室的峰值人口水平为 4 人/1000 sf,根据中国《办公建筑设计规范》(JGJ 67—2016)中规定:普通办公用房每人使用面积不得小于 4 m^2 ,根据建筑学中 1.65 的折算系数,人均建筑面积约 7 m^2 。换算为 PACT 中使用的英制单位,得到本文算例的峰值人口水平为 13 人/1000 sf,即 14 人/100 m^2 ,离差为 0.2。

依据算例的结构设计图,对照 FEMA P-58 易损性组数据库,确定了本文算例对应的主要结构构件的性能组分类,并使用规范的数量评估工具(normative quantity estimation tool),输入建筑物的类别面积等基本数据,确定非结构构件的性能组分类以及这些性能组的标准数量。

3.2 维修成本评估结果

三个结构在四个地震动强度下的维修成本评估结果如图 10~图 12 所示。其中左图为维修成本的正态分布曲线,右图为 $P=50\%$ 点对应的具体损失值中,各性能组的分布占比。

对比框架结构、BRB-框架结构、隔震结构的维修成本与维修费用构成情况,在本文的四个强度等级地震作用下,结构的主要损失均来自于非结构构件。综合来看,隔震结构的维修成本最低,普通框架结构的维修成本最高,BRB-支撑框架介于两者之间。这表明 BRB 屈曲约束支撑与隔震支座的添加,大大降低了结构的地震损失。在多遇地震作用下,隔震结构的维修费用几乎可以忽略不计,BRB-框架结构的维修费用相比普通框架结构降低 77%;基本地震作用下,隔震结构与 BRB-框架结构的维修费用相比普通框架结构降低 89%与 51%,罕遇地震作用下降低 58%与 34%,极罕遇地震作用下降低 62%与 54%。

值得注意的是,BRB-框架结构虽然地震损失比普通框架结构低,但分析结果显示,相较于普通框架结构,BRB-框架结构中的加速度敏感型构件维修费用反而大幅提升,这是由于 BRB-框架结构

刚度增大,因此楼层加速度响应比普通框架更大。

3.3 维修时间评估结果

三种结构维修时间评估结果见表 5,在多遇地震作用下,普通框架结构的维修时间为 1.3 d;在基本地震作用下,维修时间为 18 d;在罕遇地震作用下,维修时间为 63 d;在极罕遇地震作用下维修时间为 104 d。维修时间评估结果与维修成本的评估结果基本对应,对于建筑内轻质石膏隔墙的维修占据了绝大多数的维修时间。

在多遇地震作用下,BRB-框架结构的维修时间为 0.35 d;在基本地震作用下,维修时间为 16 d;在罕遇地震作用下,维修时间为 33 d;在极罕遇地震作用下维修时间为 49 d。在多遇地震与基本地震作用下,位于结构屋面的空调机组的维修时间最长。在罕遇地震与及罕遇地震作用作用下,加速度敏感型构件(吊顶、独立照明吊灯、曳引电梯等)的时间占比明显上升。

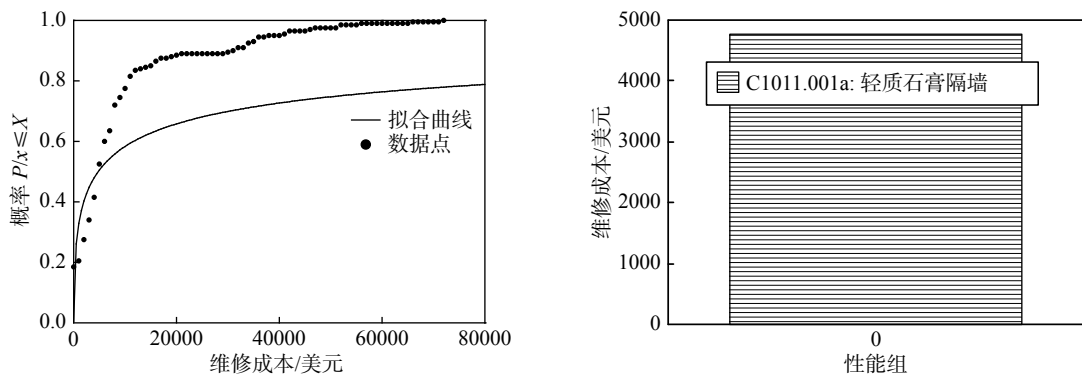
在多遇地震作用下,隔震框架结构的维修时间为 0.2 d;在基本地震作用下,维修时间为 4 d;在罕遇地震作用下,维修时间为 22 d;在极罕遇地震作用下维修时间为 40 d。

根据以上分析结果,隔震结构与 BRB-框架结构相比于普通框架结构,维修时间大幅降低。隔震结构与 BRB-框架结构在多遇地震作用下分别降低 84%与 73%,在基本地震作用下降低 11%与 77%,在罕遇地震作用下降低 65%与 47%,在极罕遇地震作用下降低 61%与 52%。由此可见,BRB-框架结构与隔震结构均达到了预期的抗震效果,而隔震结构的表现最为优异。

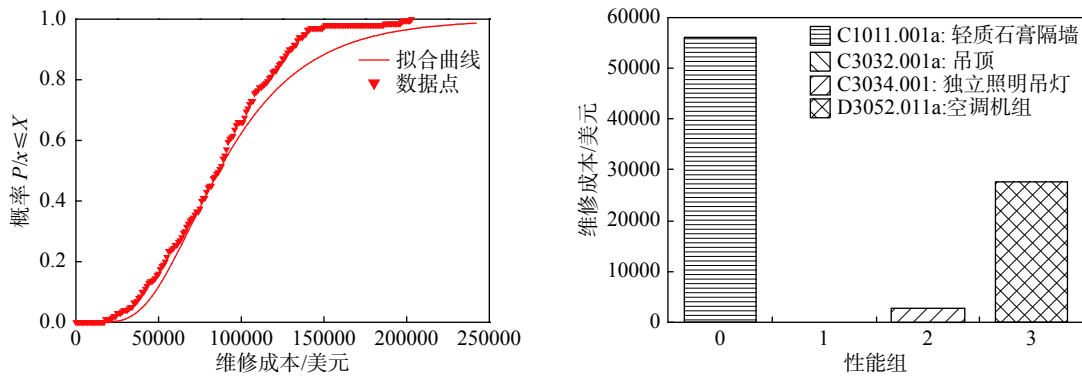
3.4 人员伤亡评估结果

三种结构人员伤亡评估结果见表 5,在多遇地震与基本地震作用下,各结构的人员伤亡情况几乎可以忽略不计,本小节仅取罕遇地震与极罕遇地震两个强度等级地震的分析结果。在罕遇地震作用下,普通框架结构、BRB-支撑框架结构、隔震结构的死亡人数均值分别为 0.9、1.4、0.22,受伤人数均值为 2.1、2.8、0.7;在极罕遇地震作用下,死亡人数分别为 2.2、1.9、1.2,受伤人数分别为 3、3.2、1.4。

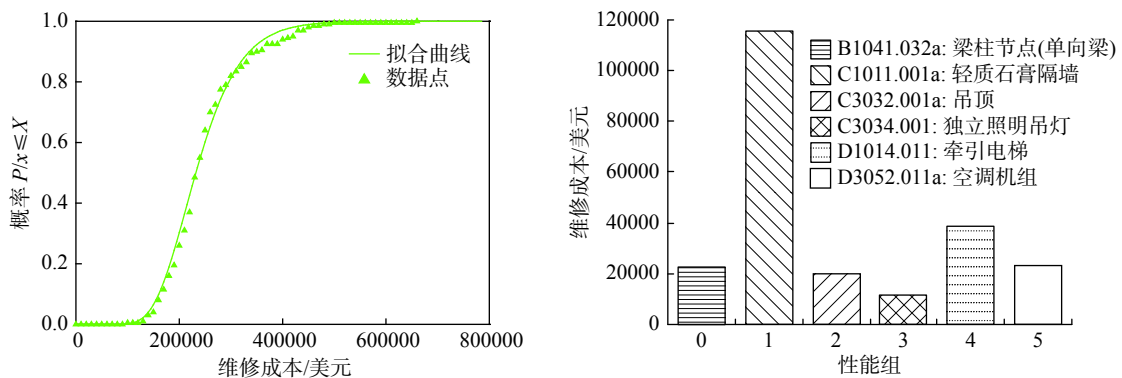
由以上数据可知,隔震结构的人员伤亡数量最少,在罕遇地震作用下死亡人数与受伤人数分



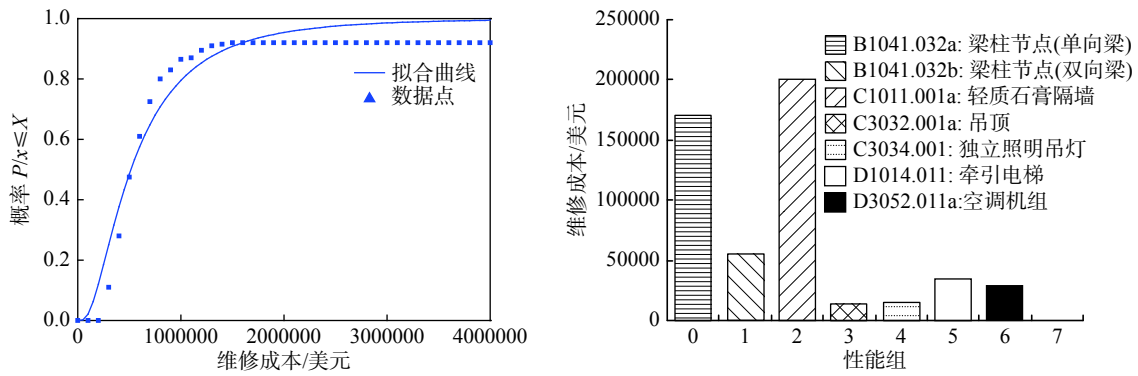
(a) 多遇地震下维修成本情况与损失组成



(b) 基本地震下维修成本情况与损失组成



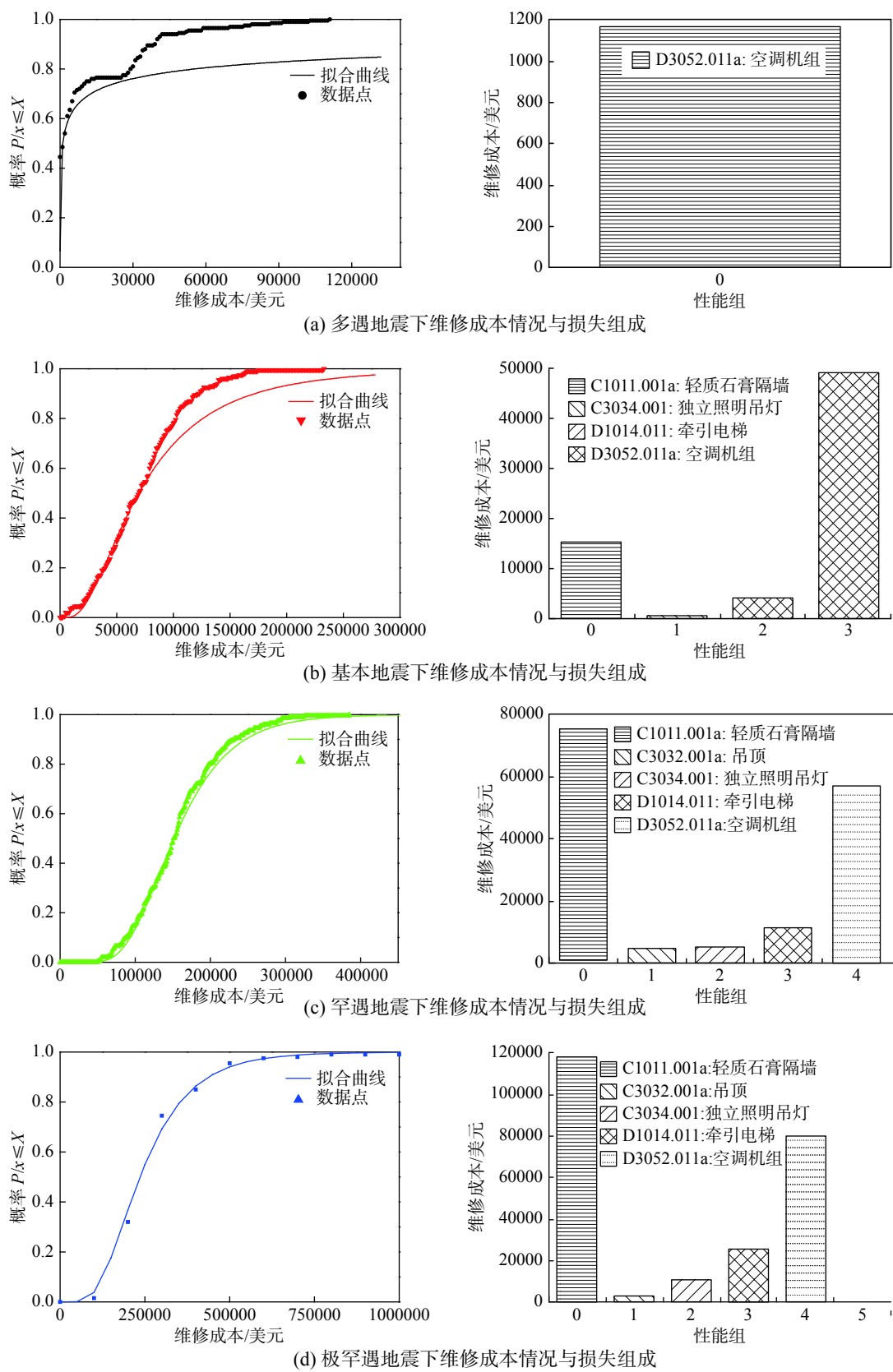
(c) 罕遇地震下维修成本情况与损失组成

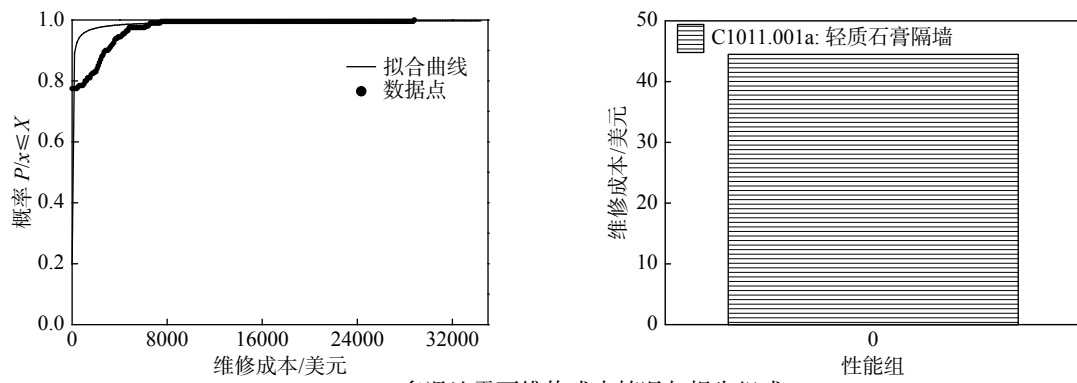


(d) 极罕遇地震下维修成本情况与损失组成

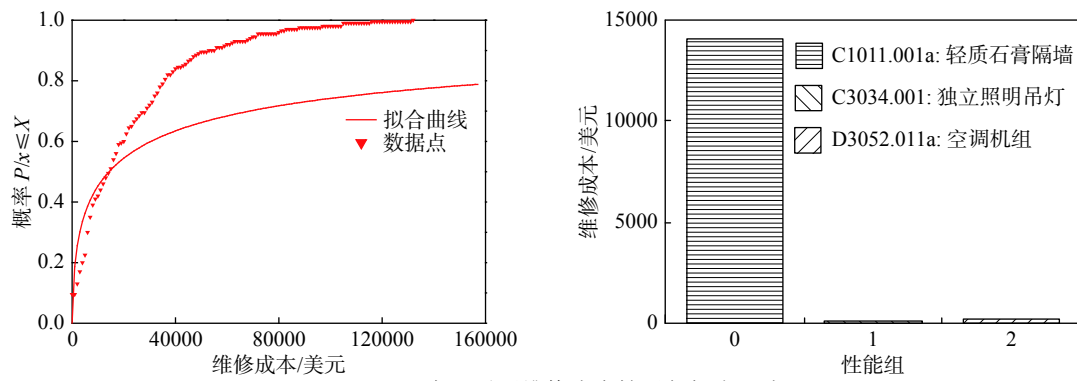
图 10 普通框架结构的维修成本结果

Fig. 10 Repair costs of ordinary frame

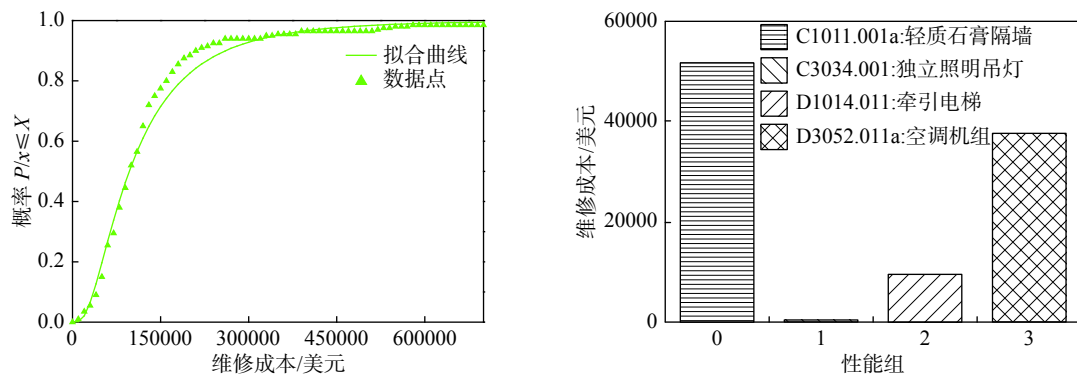




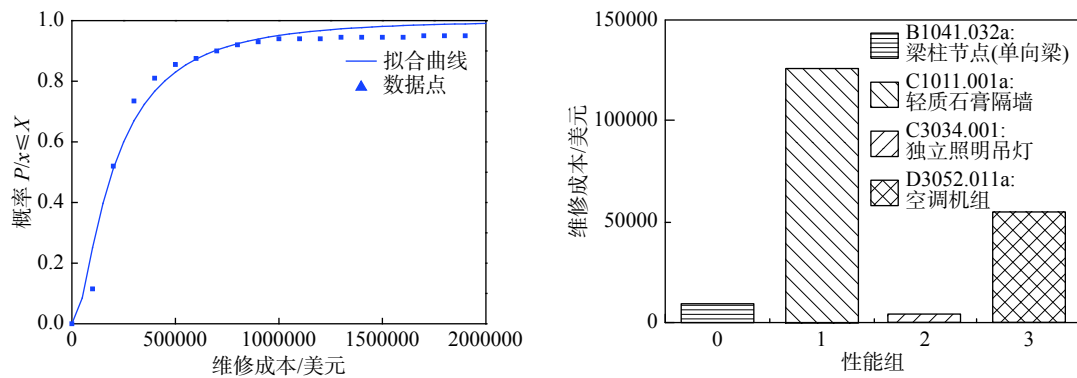
(a) 多遇地震下维修成本情况与损失组成



(b) 基本地震下维修成本情况与损失组成



(c) 罕遇地震下维修成本情况与损失组成



(d) 极罕遇地震下维修成本情况与损失组成

图 12 隔震结构的维修成本结果

Fig. 12 Repair costs of isolated frame structure

表 5 损失评估结果汇总
Table 5 Summary of loss assessment results

结构形式	多遇地震			基本地震			罕遇地震			极罕遇地震		
	普通	BRB	隔震	普通	BRB	隔震	普通	BRB	隔震	普通	BRB	隔震
维修成本/万美元	0.48	0.11	0.003	14.19	6.95	1.42	23.21	15.18	9.67	51.5	23.53	19.43
维修时间/d	1.3	0.35	0.2	18	16	4	63	33	22	104	49	40
死亡人数/人	—	—	—	—	—	—	0.9	1.4	0.22	2.2	1.9	1.2
受伤人数/人	—	—	—	—	—	—	2.1	2.8	0.7	3	3.2	1.4

别降低了 76% 与 67%；在极罕遇地震作用下降低了 45% 与 54%。而 BRB-框架结构的人员伤亡情况反与普通框架结构情况相仿，在罕遇地震作用下甚至人员伤亡数量最多，死亡人数与受伤人数分别增加了 55% 与 33%。

4 结论

本文依据 FEMA P-58 抗震性能评估理论，选择基于强度的评估方法，对比了普通框架结构、BRB-框架结构、隔震框架结构在四个地震动强度下的结构响应情况及地震性能评估结果，得出以下结论：

(1) FEMA P-58 抗震性能评估方法选取了使非工程人员也易于理解的性能指标；采用了全概率的思想，考虑了地震损失评估中的不确定性因素；利用蒙特卡罗方法，提高了分析的精确度，降低了分析中的不确定性；采用性能组为单位进行性能评估，使性能评估具体到建筑物中的结构构件与非结构构件。

(2) 结构响应分析结果显示，与普通框架结构相比，BRB-框架结构与隔震结构在各个强度等级的地震下层间位移角均降低了 40%~60%；隔震结构的顶层楼层加速度降低了 45%，而 BRB-框架结构顶层的楼层加速度增大了 25%。

(3) 地震损失评估结果显示，采用隔震框架结构与 BRB-框架结构可以有效降低建筑物在地震作用下的维修成本与维修时间。与普通框架相比，在罕遇地震作用下隔震结构的维修成本与维修时间可降低 65% 与 58%，BRB-支撑框架结构可降低 47% 与 34%。

参考文献：

[1] SEAOC Vision 2000, Conceptual framework for performance based seismic design [S]. Sacramento: Structural Engineers Association of California, 1995.

[2] FEMA 273, NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings [S]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency, 1997.

[3] FEMA 274, NEHRP commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings [S]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency, 1997.

[4] FEMA 356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [S]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2000.

[5] ATC-40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings [S]. Redwood City, CA, 1996.

[6] CECS160, 建筑工程抗震性态设计通则 [S]. 北京: 中国计算出版社, 2004.
CECS160, General rule for performance-based seismic design of buildings [S]. Beijing: China Computing Press, 2004. (in Chinese)

[7] Wen Y K. Reliability and performance based design [C]// Proceedings of the 8 ASCE specialty conference on probabilistic mechanics and structural reliability. Notre Dame, 2000.

[8] Deierlein G G. Overview of a comprehensive framework for earthquake performance assessment [C]// Proceedings of the international workshop on performance-based seismic design concepts and implementation. Bled, Slovenia, 2004.

[9] Mochle J P, Deierlein, G G. A framework methodology for performance-based earthquake engineering [C]// Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, 2004: 679.

[10] Fajfar P, Krawinkler H. Performance-based seismic design concepts and implementation [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2004.

[11] FEMA P-58, Seismic Performance Assessment of Buildings [S]. Redwood City, CA, 2012.

[12] Aslani H, Miranda E. Probability-based seismic response analysis [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(8): 1151 — 1163.

[13] Ramirez C. and Miranda E. Building-specific loss estimation methods & tools for simplified performance-based earthquake engineering [R]. John A. Blume Earthquake Engineering Research Center, Stanford University, Report No. 171, Stanford, 2009.

[14] Goulet C A, Haselton C B, Mitrani-Reiser J, et al.

- Evaluation of the seismic performance of a code - conforming reinforced concrete frame building —From seismic hazard to collapse safety and economic losses [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 36(13): 1973 — 1997.
- [15] Hutt C M, Almufti I, Willford M, and Deierlein G. Seismic loss and downtime assessment of existing tall steel-framed buildings and strategies for increased resilience [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(8): C4015005.
- [16] Shrivastava M, Abu A K, et al. Severity measures and stripe analysis for probabilistic structural fire engineering [J]. *Fire Technology*, 2019, 55: 1147.
- [17] 施炜, 叶列平, 陆新征, 唐代远. 不同抗震设防RC框架结构抗倒塌能力的研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(3): 41 — 48.
- Shi Wei, Ye Lieping, Lu Xinzheng, Tang Daiyuan. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(3): 41 — 48. (in Chinese)
- [18] 姜丽娜, 何政. 不同CMR的RC框架结构地震损失分析[J]. *工程力学*, 2014, 31(12): 155 — 163.
- Xian Lina, He Zheng. Earthquake loss analysis of RC frame structures with different collapse margin ratios [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(12): 155 — 163. (in Chinese)
- [19] 罗文文, 李英民, 韩军. 基于全概率PBEE方法的RC框架结构地震损失分析[J]. *工程力学*, 2016, 33(9): 186 — 194.
- Luo Wenwen, Li Yingmin, Han Jun. Earthquake loss estimation for RC frames based on PEER-PBEE methodology [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(9): 186 — 194. (in Chinese)
- [20] 朱汉波, 梁兴文, 党英杰. 框架-剪力墙结构基于地震强度的新一代抗震性能评估方法研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(10): 140 — 148.
- Zhu Hanbo, Liang Xingwen, Dang Yingjie. The new generation of seismic performance evaluation for frame shear wall structure based on intensity [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(10): 140 — 148. (in Chinese)
- [21] 曾翔, 刘诗璇, 许镇, 等. 基于FEMA-P58方法的校园建筑地震经济损失预测案例分析[J]. *工程力学*, 2016, 33(增刊 1): 113 — 118.
- Zeng Xiang, Liu Shixuan, Xu Zhen, Lu Xinzheng. Earthquake loss prediction for campus buildings based on FEMA-P58 method: A case study [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(Suppl 1): 113 — 118. (in Chinese)
- [22] 孙楚津, 程庆乐, 曾翔, 许镇, 陆新征. 不同地震下的校园建筑震害与经济损失对比[J]. *工程力学*, 2019, 36(增刊 1): 111 — 117, 130.
- Sun Chujin, Cheng Qingle, Zeng Xiang, Xu Zhen, Lu Xinzheng. Comparison of seismic damage and economic loss of campus buildings under different earthquakes [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(Suppl 1): 111 — 117, 130. (in Chinese)
- [23] Mazzoni S, McKenna F, Michael H. Scott, et al. Open system for earthquake engineering simulation user command-language manual [CP]. <http://opensees.berkeley.edu>, 2006.
- [24] Zareian F, Lignos D G, Krawinkler H. Evaluation of seismic collapse performance of steel special moment resisting frames using FEMA P695 (ATC-63) methodology [C]// *Proceedings of the 2010 Structures Congress*, ASCE, 2010.
- [25] Vamvatsikos D, Cornell C A. Direct estimation of the seismic demand and capacity of oscillators with multi linear static pushovers through IDA [C]// *The 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, 2006.
- [26] 王冬梅. 带铅芯橡胶隔震支座基础的框架结构隔震性能分析 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- Wang Dongmei. The analysis of vibration isolation performance with LRB base isolated frame structure [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [27] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress - strain model for confined concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1988, 114(8): 1804 — 1826.
- [28] Shinozuka M, Chaudhuri S R, Mishra S K. Shape-memory-alloy supplemented lead rubber bearing (SMA-LRB) for seismic isolation [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2015, 41: 34 — 45.
- [29] 叶列平, 马千里, 缪志伟. 结构抗震分析用地震动强度指标的研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(4): 9 — 14.
- Ye Lieping, Ma Qianli, Miao Zhiwei. Study on earthquake intensities for seismic analysis of structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2009, 29(4): 9 — 14. (in Chinese)
- [30] 吕大刚, 刘亭亭, 李思雨, 等. 目标谱与调幅方法对地震动选择的影响分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2018, 38(4): 21 — 28.
- Lv Dagang, Liu Tingting, Li Siyu, et al. Investigation of effects of target spectrum and amplitude scaling methods on selection of ground motions [J]. *Earthquake engineering and engineering dynamics*, 2018, 38(4): 21 — 28. (in Chinese)