

文章编号: 1000-4750(2017)Suppl-0227-06

串联隔震结构体系的地震易损性分析

吴 迪^{1,2}, 李健军¹, 谭 平¹, 熊 焱³, 霍维刚²

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广东省桥建筑设计院有限公司, 广州 511400;

3. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘 要: 根据串联隔震建筑结构体系的地震可靠度特征, 推导了串联隔震结构体系的地震可靠度计算公式, 并根据隔震结构的上部结构、隔震层、下部结构的概率地震需求模型, 提出了串联隔震结构的地震易损性计算方法。最后, 以某典型高层框架-核心筒基础隔震结构为算例, 建立了高层隔震结构的有限元模型并进行地震动响应分析, 利用已提出的方法对该隔震结构的地震破坏概率进行分析, 获得了高层隔震结构整体处于严重破坏状态时的地震易损性曲线, 结果表明隔震层的破坏是影响高层隔震结构体系整体地震可靠度的关键因素。

关键词: 串联隔震结构; 易损性; 概率地震需求模型; 破坏概率; 可靠度

中图分类号: TU352.1+2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.04.S047

SEISMIC VULNERABILITY ANALYSIS OF SERIES ISOLATED STRUCTURAL SYSTEMS

WU Di^{1,2}, LI Jian-jun¹, TAN Ping¹, XIONG Yan³, HUO Wei-gang²

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;

2. Guangdong Shiqiao Building Design Institute Limited Company, Guangzhou 511400, China;

3. State Key Laboratory of Subtropical Building Science; South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: According to the seismic reliability characteristics of series isolated building structure systems, the calculation formula for the seismic reliability of series isolated structural systems is derived. In addition, based on the probabilistic seismic demand models of the superstructure, the isolation layer and the substructure of isolated structure, the calculation method of the seismic vulnerability of series isolated structures is put forward. Finally, taking a typical high-rise frame-core wall base-isolated structure as an example, a finite element model of the high-rise isolated structure is built and used to conduct seismic dynamic response analysis. The seismic damage probability of the isolated structure is analyzed by the proposed method, and the seismic vulnerability curves of the high-rise isolated structure are obtained in the state of severe damage. The results show that the failure of the isolation layer is the key factor that affects the integral seismic reliability of high-rise isolated structural systems.

Key words: series isolated structure; vulnerability; probabilistic seismic demand model; failure probability; reliability

隔震技术是结构工程防震减灾的重要技术方法。目前, 我国隔震技术的应用和发展迅速, 如江苏宿迁海关大厦其建筑高度 73.6 m^[1]、2009 年竣工的高 50 m 的宿迁市阳光大厦^[2]、玉溪公租房高层住

收稿日期: 2016-04-09; 修改日期: 2017-02-26

基金项目: 番禺区珠江科技新星专项项目(2015-专15-3.05); 广州市科技计划项目(201707010258); 国家自然科学基金项目(U1334209, 51578517); 广东省教育厅特色创新项目(2016KTSCX101); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015ZM111); 广东省交通厅科技项目(KJ-2014-02-019)

通讯作者: 谭 平(1973), 男, 常德人, 研究员, 博士, 从事减震控制研究(E-mail: 11795234@qq.com)。

作者简介: 吴 迪(1978), 男, 南昌人, 副研究员, 博士, 硕导, 从事结构抗震研究(E-mail: wudiwdzooo@gmail.com);

李健军(1991), 男, 武穴人, 硕士生, 从事结构隔震研究(E-mail: 825070572@qq.com);

熊 焱(1978), 女, 南昌人, 副教授, 博士, 从事结构工程研究(E-mail: xyan@scut.edu.cn);

霍维刚(1986), 男, 西安人, 助理结构工程师, 硕士, 从事结构设计研究(E-mail: devinhowar@gmail.com)。

宅等建筑结构均采用了隔震技术。

在隔震技术的研究方面取得不少研究成果, 已能通过精确有限元模型或简化计算模型给出隔震结构中隔震层的主要设计参数, 这些研究成果为隔震结构体系设计和技术应用提供了理论基础。Weitzmann 等^[3]对单质点等效计算模型的长周期和阻尼比等进行研究, 根据隔震结构的基底剪力研究上部结构的地震响应, 结果表明: 高层隔震结构的高阶振型影响不能忽略。Pourzeynali 和 Zarif^[4]研究认为运用遗传算法结合基础隔震技术, 可以大幅减少结构顶层的水平位移。刘文光等^[5]建立了结构模型和单质点简化模的参数转换关系, 给出了高层隔震结构的隔震层变形、加速度和层间剪力的预测计算式。

在隔震结构体系地震可靠度的研究方面, 王光环^[6]考虑了基础隔震钢筋混凝土框架结构的隔震层和上部结构之间的变形关系, 将上部结构的破坏等级划分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌五个破坏等级, 并且通过计算给出了结构性能水准量化指标限值。任毅^[7]研究了不同抗震设防烈度情况下两组框架的地震非线性动力时程响应, 并进行了易损性分析, 研究表明: 在近场地震动作用下, 隔震上部结构的响应比非隔震结构更显著。刘娟^[8]通过考虑高层隔震结构的隔震层和上部结构之间的关系, 采用宽限法给出了高层隔震结构整体系统在地震作用下对应的各个破坏等级的超越概率的界限区间, 通过分析隔震结构整体系统易损性认为: 隔震结构整体在地震作用下对应于各个破坏等级的超越概率要高于单独考虑上部结构或隔震层所对应的结果。龙晓鸿等^[9]将钢筋屈服强度、钢筋弹性模量和混凝土的抗压强度作为地震的结构需求, 并定义了各构件的损伤指标, 采用拉丁超立方抽样计算得到结构整体的易损性曲线。

根据隔震结构体系的串联特征, 将隔震结构体系的地震可靠度分析转换为求解隔震结构中上部结构、隔震层、下部结构的串联系统的地震可靠性问题, 推导串联隔震结构体系的地震可靠度计算公式, 并提出了串联隔震结构体系的地震易损性计算方法。根据已建成的某 23 层框架-核心筒基础隔震结构为例, 忽略下部结构(基础)对隔震结构地震可靠度的影响, 选取结构第一周期加速度反应谱谱值作为地震动强度参数, 分别建立上部结构和隔震层的概率地震需求模型, 以此计算高层隔震结构体系整体

发生严重破坏时的地震易损性曲线。

1 串联隔震结构体系的地震易损性分析方法

概率地震需求分析是根据概率地震危险性分析方法为基础, 对结构进行地震需求评价、概率地震需求分析、地震概率易损性分析和地震风险分析^[10-11]。在建筑结构抗震性能评估领域, 研究者重点研究了主要因素变化对概率地震需求分析的影响^[12], 易损性曲线求解和分析方法^[13-14], 并利用该方法建立了汶川极震区的典型多层框架混凝土结构的概率地震需求模型, 比较了地震发生前后结构的抗震性能^[15]。

隔震建筑结构不同于抗震结构, 它是由上部结构、隔震层、下部结构组成的串联结构体系。地震造成隔震结构破坏包括: 隔震装置(阻尼器、隔震支座)发生超过极限变形、上部结构的塑化、下部结构塑化等^[16]。假设由 n 个元件 A_i 采用串联方式构成一个系统 A , 每个元件的能正常工作的概率为 $P(A_i)$, 那么这个系统的可靠性 $P(A)$ 可以表示为:

$$P(A) = P(A_1 \cdot A_2 \cdots A_n) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdots P(A_n) \quad (1)$$

因此, 根据式(1)可以推出在地震作用下串联隔震结构体系发生破坏的概率 $P_A(D)$ 的计算公式为:

$$P_A(D) = 1 - (1 - P_U(D))(1 - P_I(D))(1 - P_S(D)) \quad (2)$$

式中: $P_U(D)$ 、 $P_I(D)$ 、 $P_S(D)$ 分别表示在地震作用下隔震结构体系的上部结构、隔震层、下部结构发生破坏的概率。

地震的结构需求反映其对地震动的响应, 而结构的地震破坏等级可以通过房屋结构的抗震能力限值确定, 那么地震动造成结构的破坏程度可以通过地震的结构需求和结构能力限值的关系来表示。研究显示地震的结构需求与地震动强度成比例关系, 并且服从一元线性回归模型。因此, 在一定地震荷载水平(IM)下, 结构发生破坏的概率($P[C < D | IM]$)可以表示为结构能力(C)无法满足地震的结构需求(D)的概率^[17-18], 即:

$$P[C < D | IM] = 1 - \Phi \left[\frac{\ln(\hat{C} / \hat{D})}{\sqrt{\beta_{D|SI}^2}} \right] \quad (3)$$

式中: $\Phi[\cdot]$ 表示随机变量的标准正态分布的概率分布函数; \hat{C} 表示结构能力的中位值; \hat{D} 表示地震结构需求的中位值; $\beta_{D|SI}$ 表示在一定地震荷载水平

(IM)下结构需求对其均值的标准差。

将式(3)代入式(1), 可得在一定地震荷载水平(IM)下, 串联隔震结构体系发生破坏的概率($P_A[C < D | SI]$)可表示为:

$$P_A[C < D | IM] = 1 - \left(\Phi \left[\frac{\ln(\hat{C}_U / \hat{D}_U)}{\sqrt{\beta_{D_U|SI}^2}} \right] \cdot \Phi \left[\frac{\ln(\hat{C}_I / \hat{D}_I)}{\sqrt{\beta_{D_I|SI}^2}} \right] \cdot \Phi \left[\frac{\ln(\hat{C}_S / \hat{D}_S)}{\sqrt{\beta_{D_S|SI}^2}} \right] \right) \quad (4)$$

式中, \hat{C}_U 、 \hat{C}_I 、 \hat{C}_S 和 \hat{D}_U 、 \hat{D}_I 、 \hat{D}_S 和 $\beta_{D_U|SI}$ 、 $\beta_{D_I|SI}$ 、 $\beta_{D_S|SI}$ 分别表示隔震结构体系中上部结构、隔震层、下部结构的结构能力的中位值、结构需求的中位值和在一定地震荷载水平条件下结构需求对其均值的标准差。

2 某高层隔震结构的地震易损性分析

以某高层框架-核心筒基础隔震结构为算例, 分析其在地震动作用下的动力响应和地震破坏的概率。该建筑属于钢筋混凝土框架-核心筒结构, 地上主体结构 23 层, 属于 A 级高度的高层建筑。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[19]可知该工程所在地区的地震基本烈度 VIII 度, 设计基本加速度 $0.20 g$, 场地类型为 II 类场地, 设计基本周期 $0.35 s$ 。结构柱采用 C50 混凝土, 梁、板和墙均采用 C40 混凝土, 结构主受力钢筋采用 HRB400 和 HRB335, 箍筋采用 HPB300。该工程共采用了 32 个橡胶支座和 37 个铅芯橡胶支座, 其中直径为 1.3 m 的普通橡胶支座(LNR1300)26 个, 铅芯橡胶支座(LRB1300)25 个; 直径为 1.5 m 的普通橡胶支座(LNR1500)6 个, 铅芯橡胶支座(LRB1500)12 个, 支座剪切变形 100% 时 LNR1300、LRB1300、LNR1500、LRB1500 的等效水平刚度分别为 $2.13 kN/mm$ 、 $3.94 kN/mm$ 、 $2.27 kN/mm$ 、 $4.19 kN/mm$ 。

采用通用有限元程序 OpenSees 建立该高层基础隔震结构的有限元模型(图 1), 隔震支座采用弹塑性缝隙材料(Elastic-Perfectly Plastic Gap Material)和两点连接单元(TwoNodeLink Element)模拟竖向拉压刚度不等特性, 支座采用弹塑性支座单元(ElastomericBearing (Plasticity) Element)模拟水平向非线性特性, 梁和柱均采用弹性梁柱单元(Elastic Beam Column Element)模拟。

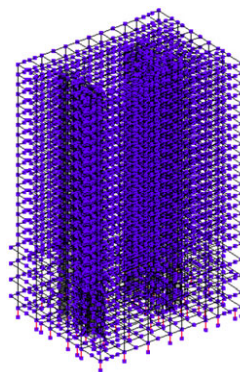


图 1 隔震结构的三维非线性有限元模型

Fig.1 Three-dimensional nonlinear finite element model of an isolated structure

将该计算模型与设计所采用的 Etabs 软件的计算进行对比, 两种计算模型的基本参数比较的情况如表 1 所示。

表 1 模型基本参数比较

Table 1 Comparison of model basic parameters

	周期/s						质量/t
	1	2	3	4	5	6	
OpenSees	4.65	4.44	3.92	1.35	1.26	0.94	82969
Etabs	4.71	4.55	4.15	1.38	1.33	1.02	83058
误差率/(%)	1.27	2.42	5.54	2.17	5.26	7.84	0.11

根据我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[19]中关于地震影响系数的规定, 当隔震结构处于发震断层 10 km 以内时, 输入地震波应考虑近场影响系数, 5 km 以内宜取 1.5。根据结构所完成的地震危险性分析结果, 获得地震烈度 VIII 度及 II 类场地条件下 50 年设计基准期内超越概率(PE)63%、10%、2%的 7 条地震加速度记录, 其中采用天然记录 5 条, 人工合成地震记录 2 条, 采用的地震记录的加速度反应谱及其平均值如图 2 所示。

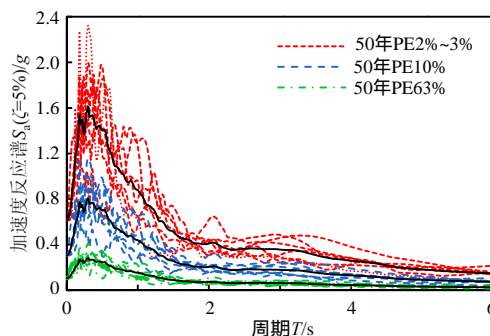


图 2 地震记录的加速度反应谱及其平均值

Fig.2 Acceleration response spectra and its mean values of seismic records

采用以上所选地震记录对高层隔震结构进行有限元动力时程分析,在 7 种罕遇地震工况作用下隔震结构的层间位移和规范规定限值的比较如图 3 所示。由图 3 可知,在罕遇地震下该隔震结构的上部结构各楼层的层间位移平均最大值在两个方向均出现于第 5 层, x 方向各楼层的平均最大值为 23.87 mm, y 方向各楼层的平均最大值为 17.30 mm,均小于《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[19]关于钢筋混凝土框架-核心筒的弹塑性层间位移角限值(1/100)换算的层间位移 52.00 mm,并且小于规范提出的中等破坏所对应的结构竖向构件的最大层间位移角(1/200)换算的层间位移 104.00 mm,说明在罕遇地震作用下该上部结构破坏仅达到轻微损坏。

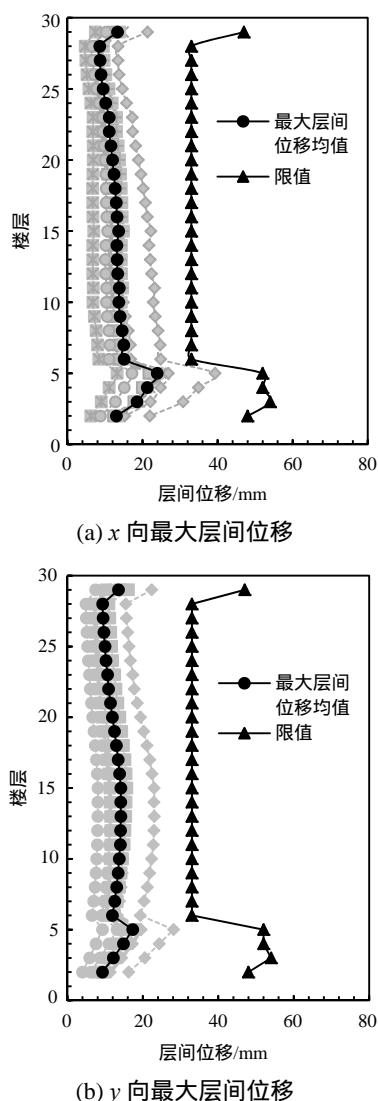


图 3 罕遇地震下上部结构的层间位移

Fig.3 Story drift of superstructure under rare earthquake

在隔震结构的地震结构需求参数的选取方面,根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[19]中关

于支座水平位移限值的有关规定,将隔震层水平位移(δ)与隔震支座有效直径(d)的比值(δ/d)作为隔震层的地震结构需求参数^[20]。上部结构采用最大层间位移角作为地震结构需求参数^[21]。

根据计算不同水准地震动作用下结构的响应,可以获得隔震层和上部结构的地震结构需求,从而建立地震荷载水平或强度与地震的结构需求参数的关系云图,采用统计回归的方法得到地震荷载作用下概率地震需求模型的参数,并分别建立不同地震动水准下隔震层和上部结构的概率地震需求模型如图 4 所示。

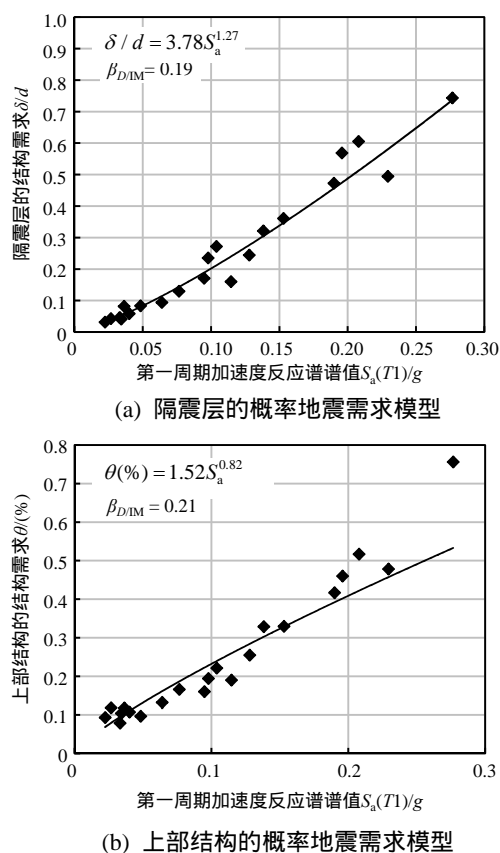


图 4 概率地震需求模型的回归分析

Fig.4 Regression analysis of probabilistic seismic demand model

严重破坏状态是指房屋结构已经进入弹塑性阶段,结构发生严重破坏,但远未达到结构倒塌的状态。隔震层发生严重破坏状态表示隔震装置发生屈服破坏,因此将建筑抗震规范规定的隔震层水平位移与隔震支座有效直径比值的限值 55%作为隔震层的结构能力限值。此外,根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[19]关于混凝土框架-核心筒结构不发生严重破坏所对应的结构竖向构件的最大层间位移角规定,将结构严重破坏状态所对应的结构能力

限值取为 1/110。

根据以上确定的结构能力限值,可以根据式(3)和式(4)分别计算得到不同地震荷载水平下隔震层、上部结构和串联隔震结构体系发生严重破坏的概率,从而获得隔震层、上部结构和隔震结构体系整体发生严重破坏时的易损性曲线如图 5。根据图 5 可知不同地震水平作用下隔震结构的不同位置和整体发生严重破坏的概率。例如当地震动加速度第一周期反应谱的谱值为 0.3 g 时,该高层结构中隔震层发生严重破坏的概率为 98.33%,上部结构发生严重破坏的概率为 1.16%,隔震结构整体发生严重破坏的概率为 98.35%。

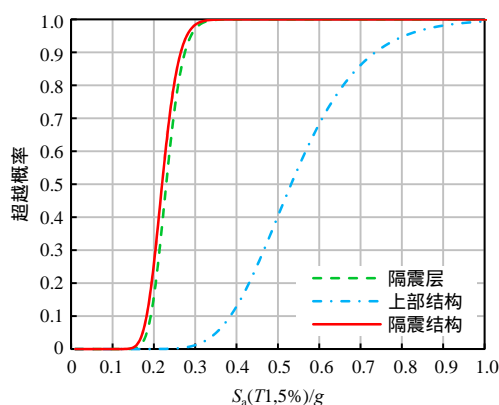


图 5 隔震层和上部结构的地震易损性曲线

Fig.5 Seismic fragility curves of isolation layer and superstructure

通过对图 5 所示隔震层、上部结构和隔震结构整体地震易损性曲线比较可知,上部结构发生严重破坏的概率明显低于隔震层和隔震结构整体,表明对于该隔震结构而言隔震层将先于上部结构发生破坏。同时,该隔震结构整体和隔震层发生严重破坏的概率比较接近,表明该隔震结构整体与隔震层的严重破坏概率基本一致。

3 结论

本文根据隔震结构体系的串联特征,利用隔震结构的上部结构、隔震层、下部结构的概率地震需求模型,计算得到其相应的地震易损性曲线,并依据此计算得到串联隔震结构体系的地震易损性曲线,提出了串联隔震结构体系的易损性分析计算方法,该计算方法可以获得串联隔震结构体系整体的地震可靠度。经过某高层框架-核心筒基础隔震结构的算例研究可以得出如下结论:

(1) 该串联隔震结构体系的易损性分析计算方

法能够简便、有效的获得不同地震水平下隔震结构体系的整体可靠度。

(2) 对于典型高层基础隔震体系的地震响应研究表明,隔震技术对上部结构的减震效果明显,能够有效提高上部结构的抗震性能。

(3) 在不同地震水平作用下,串联隔震结构体系的隔震层可能先于上部结构发生破坏,因此隔震层的破坏是影响隔震结构体系可靠度的关键因素。

参考文献:

- [1] 杜东升,刘伟庆,王曙光,刘鹏飞,冒一峰,杨晓婧. 宿迁海关业务综合楼基础隔震设计[C]// 苏州: 江苏力学学术大会 2008 暨第四届苏港力学及其应用论坛, 2008: 554-559.
Du Dongsheng, Liu Weiqing, Wang Shuguang, Liu Pengfei, Mao Yifeng, Yang Xiaojing. The design of base-isolated structure of Suqian city Customs Business Complex Building [C]// Suzhou: Jiangsu Conference on Mechanics 2008-The Fourth Session of the Soviet Union and its Application, 2008: 554-559. (in Chinese)
- [2] 杜东升,王曙光,刘伟庆,王浩亮. 高层建筑结构非线性地震响应分级及设计方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(5): 550-557.
Du Dongsheng, Wang Shuguang, Liu Weiqing, Wang Haoliang. Research on nonlinear seismic response analysis and design method of high-rise isolated structure [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(5): 550-557. (in Chinese)
- [3] Weitzmann R, Ohsaki M, Nakashima M. Simplified methods for design of base-isolated structures in the long-period high-damping range [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(4): 497-515.
- [4] Pourzeynali S, Zarif M. Multi-objective optimization of seismically isolated high-rise building structures using genetic algorithms [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 311(3): 1141-1160.
- [5] 刘文光,刘阳,杨巧荣,何文福,冯德民. 高层隔震结构单质点模型的地震响应单纯质点法研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(6): 693-698.
Liu Wenguang, Liu Yang, Yang Qiaorong, He Wenfu, Feng Demin. A study on pure mass model method for seismic response of single mass model of high-rise isolated structure [J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(6): 693-698. (in Chinese)
- [6] 王光环. 基于性能的基础隔震钢筋混凝土框架结构的易损性分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
Wang Guanghuan. The performance-based fragility analysis of base-isolated RC frame structure [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013. (in Chinese)

- [7] 任毅. 基于概率的隔震与非隔震框架结构抗震性能评估与比较[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
Ren Yi. Probabilistic assessment and comparison of seismic performance of fixed-base and base-isolated frameworks [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [8] 刘娟. 高层隔震建筑基于性能的抗震设防及地震易损性分析[D]. 广州: 广州大学, 2014.
Liu Juan. Performance-based seismic design and seismic vulnerability for isolated high-rise buildings [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2014. (in Chinese)
- [9] 龙晓鸿, 杨斌斌, 樊剑, 李俊, 陈蓓蕾. 基于响应面法的隔震连续梁桥地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(2): 172-179.
Long Xiaohong, Yang Binbin, Fan Jian, Li Jun, Chen Beilei. Seismic fragility analysis of isolated continuous girder bridge using response surface method [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(2): 172-179. (in Chinese)
- [10] Shome N, Cornell C A, Bazzurro P, et al. Earthquakes, records, and nonlinear responses [J]. Earthquake Spectra, 1998, 14(3): 469-500.
- [11] Shome N. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures [D]. Stanford: Stanford University, 1999.
- [12] Ellingwood B R. Earthquake risk assessment of building structures [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 74(3): 251-262.
- [13] Rossetto T, Elnashai A. A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures [J]. Engineering Structures, 2005, 27(3): 397-409.
- [14] 吕大刚, 于晓辉, 潘峰, 王光远. 基于改进云图法的结构概率地震需求分析[J]. 世界地震工程, 2010, 26(1): 7-15.
Lü Dagang, Yu Xiaohui, Pan Feng, Wang Guangyuan. Probabilistic seismic demand analysis of structures based on an improved cloud method [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(1): 7-15. (in Chinese)
- [15] Wu D, Tesfamariam S, Stiemer S F, Cui J. Comparison of seismic performance of RC frame building before and after Wenchuan Earthquake in Sichuan Province [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE), 2015, 29(1): 04014038.
- [16] Architectural Institute of Japan. Recommendation for the design of base isolated buildings [M]. Translated by Liu Wenguang. Beijing: Earthquake Press, 2006: 6.
- [17] Ellingwood B R, Celik O C, Kinali K. Fragility assessment of building structural systems in Mid America [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(13): 1935-1952.
- [18] Singhal A, Kiremidjian A S. Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage [J]. Journal of Structural Engineering (ASCE), 1996, 122(12): 1459-1467.
- [19] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese)
- [20] 熊焱, 吴迪, 崔杰. 抗震规范中隔震装置的地震风险分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(13): 109-114.
Xiong Yan, Wu Di, Cui Jie. Seismic risk analysis of earthquake-isolation equipments in seismic design codes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(13): 109-114. (in Chinese)
- [21] 叶列平, 马千里, 缪志伟. 钢筋混凝土框架结构强柱弱梁设计方法的研究[J]. 工程力学, 2010, 27(12): 102-113.
Ye Lieping, Ma Qianli, Miao Zhiwei. Study on weak beam-strong column design method of RC frame structures [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(12): 102-113. (in Chinese)