

抗震规范中隔震装置的地震风险分析

熊 焱¹, 吴 迪^{2,3}, 崔 杰²

(1. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510604;

2. 广州大学 工程抗震研究中心, 广州 510405; 3. 广州番禺区市桥建筑设计院, 广州 511400)

摘 要: 目前关于基础隔震结构抗震性能评价的研究主要针对隔震层以上的上部结构, 对于隔震装置的地震风险分析仍有待完善。以隔震层水平位移与隔震装置尺寸(支座的有效直径)的比值作为结构需求, 借鉴《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)所规定的隔震支座的水平位移限值作为划分标准, 初步建立基础隔震结构中隔震装置的概率地震需求模型, 探索建立该地震风险分析方法。最后, 以灾区已建成的一座七层混凝土框架基础隔震结构建筑作为算例, 通过所提出的模型和方法对其隔震装置进行地震风险分析。

关键词: 基础隔震; 隔震装置; 概率地震需求模型; 结构需求; 地震风险分析

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.13.019

Seismic risk analysis of earthquake-isolation equipments in seismic design codes

XIONG Yan¹, WU Di^{2,3}, CUI Jie²

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510604, China;

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

3. Guangzhou Panyu District Shiqiao Building Design Institute, Guangzhou 511400, China)

Abstract: The evaluation studies of aseismic performance of base-isolated structures mainly focus on upperstructures above earthquake-isolation equipments at present. However, few studies are made on the seismic risk analysis of earthquake-isolation equipments. It needs to be perfected further more. Here, the ratio of horizontal displacement of an isolation equipment to its size (effective diameter of a bearing) was used as the structural demand, and the horizontal displacement limit of an isolation bearing in 2010 Chinese Code for aseismic design of buildings (GB50011-2010) was defined as the dividing standard, the probabilistic seismic demand model (PSDM) for an isolation equipment in a base-isolated structure was primarily built. The probability seismic risk analysis method for the isolation equipment in the base-isolated structure was explored and established. At last, a seven-story base-isolated reinforcement concrete (RC) structure built in a disaster area was taken as an example. The proposed model and method were used to evaluate the probability seismic risk of the isolation equipment in this base-isolated structure.

Key words: base-isolation; earthquake-isolation equipment; probabilistic seismic demand model (PSDM); structural demand; probability seismic risk analysis

近年我国发生过多级和破坏程度较大的地震,例如汶川 Ms 8.0 地震共造成了近 9 万人死亡或失踪^[1]、芦山 Ms 7.0 地震共造成 196 人遇难和 21 人失踪^[2]等。地震发生后灾区广大干部群众对减震防灾有更深层次的认识和理解,对于隔震防灾新技术有更高

的积极性和主动性。周福霖等^[3]认为隔震技术的减震效果明显,概念明确,理论研究和实验研究成果比较完善和丰富,在几次大地震中全世界范围所建成大量橡胶垫隔震房屋、桥梁和地铁等结构都成功经受考验。芦山医院综合楼在芦山地震中表现良好,除部分墙体出现轻微裂缝,主体结构以及附属结构(门、窗、吊顶、装饰等)均未被发现有其他损坏,该楼就是采用了基础隔震技术,经受住了芦山地震的严峻考验,与该楼距离不远的芦山博物馆却遭受了更为严重的地震破坏^[4]。目前,隔震技术已经作为一项推广技术在汶川地震援建项目中得到认可并被广泛推荐,例如汶川县第二小

基金项目: 国家自然科学基金(51108105);住房和城乡建设部科学技术计划项目(K2201219);广州市珠江科技新星专项项目(2012J2200027);番禺区珠江科技新星专项(2013-专15-6.05)

收稿日期: 2014-09-23 修改稿收到日期: 2015-01-20

第一作者 熊焱 女,博士,讲师,1978 年生

通信作者 吴迪 男,博士,副研究员,1978 年生

学、汶川县幼儿园、汶川县疾病预防控制中心等一大批重大民生工程均采用了隔震技术。

在 Cornell 提出的结构概率破坏模型研究基础上, Shome 等^[5-6]和 Ellingwood 等^[7]提出关于概率地震需求分析原理,并以概率地震危险性分析结论为基础,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等,这些研究为地震风险分析的计算方法和基本理论奠定了基础。地震易损性和房屋结构的风险评估主要包括:地震灾害强度、结构响应(结构需求)、性能限值(结构能力)和结构的破坏损伤等级^[8]。在抗震性能评价的研究方面, Ellingwood 等^[7]重点研究了因素变化对概率地震需求分析的影响。已有较多研究者对易损性曲线求解方法进行了研究,包括经验方法^[9-10]、分析方法^[11-13]和试算法^[14]。其中,在我国地震灾区已建房屋结构抗震性能的研究方面, Wu 等^[15-16]对汶川地震发生前后混凝土框架结构抗震性能开展相关研究,分析结果显示依据最新抗震设计规范所设计房屋的抗震性能比汶川地震发生前有较大幅度提高。其中,在基础隔震结构的地震风险分析领域的研究方面,樊剑等^[17]提出针对多维地震情况下隔震结构的概率工程需求分析的基本计算流程和分析过程,基于增量动力分析的条带调整法,采用地震波的加速度最大值作为结构的地震需求,对该结构设定的性能标准进行研究,并确定不同地震水准情况下结构的响应以及结构地震需求参数。党育等^[18]给出结构在各破坏状态下,层间位移角和各项损失的计算方法,他们采用随机分析和动力可靠度计算理论,得到隔震结构在不同地震强度下的条件失效概率;樊剑等^[19]通过不同地震水准情况下的结构响应,以及基础隔震体系所采用的隔震装置位置、尺寸和力学性能指标,提出了计算进场地震作用下在考虑双不确定性因素时隔振结构基底发生碰撞的易损性曲线计算方法,通过计算实例中基底最大位移敏感度分析发现,上部结构的质量和隔振支座的力学参数(如屈服力、屈服后刚度等)对基底最大位移影响较大,但上部结构的刚度对基底最大位移的影响不大。

目前,国内外学者就基础隔震结构中隔震装置的地震风险研究相对较少,主要还是针对隔震体系的上部结构及其与隔震层相互关系开展相关的研究工作。然而,对于基础隔震结构而言,建筑抗震性能化设计不仅需要关注各种水准地震影响下隔震体系上部结构的损坏状态,更为重要的是确保隔震层中隔震装置不发生严重破坏。如果上部结构未发生任何损坏,隔震装置发生屈曲失稳将导致整个隔震结构可能发生整体失稳破坏,所以对于隔震装置的抗震风险分析不仅关系到隔震层的破坏状态,而且影响整个基础隔震结构体

系的隔震性能。因此,有必要根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[20]中关于隔震装置的水平位移限值,建立隔震装置主要性能参数划分标准,对结构地震需求进行深入研究,模拟不同地震动作用下基础隔震结构的响应,通过对基础隔震结构中隔震装置的性能评价方法进行探讨和研究,建立基础隔震结构中隔震装置的概率地震需求模型,提出隔震装置的地震风险分析方法,最后,通过实例的有限元计算模拟,完成基础隔震结构中隔震装置的地震易损性分析。

1 隔震装置的概率地震需求模型研究

在设防地震烈度条件下,结构的地震需求反映结构对地震动的响应,同时地震动造成房屋地震破坏程度可通过结构地震需求限值进行划分,该限值包括:继续使用限值、结构破坏限值和结构倒塌限值。根据美国规范的指导性文件(FEMA 273/356)可将结构划分为三种抗震性能状态:继续使用状态(IO)、结构破坏状态(SD)和倒塌状态(CP)。其中,继续使用状态表示主体结构受到轻微损坏,房屋结构已经开始进入弹塑性阶段,但仍可不需修理继续使用的状态;结构破坏状态是指房屋结构发生严重破坏,但结构还有较大安全富余度的破坏状态;倒塌状态是指房屋结构达到某倒塌破坏的极限,这时某个或部分构件强度发生急剧退化或显著的 $P-\Delta$ 效应引起过大的侧向变形,从而产生较大的附加重力荷载导致结构整体或者局部发生倒塌的状态。

根据 Cornell 等^[22]提出的结构概率地震需求模型,通过地震荷载水平(IM)与结构地震需求(D)参数的云图数据,回归后得到地震荷载作用下结构的概率地震需求模型,其中结构地震需求的估计(\hat{D})如下:

$$\hat{D} = a IM^b \quad (1)$$

式中: a 、 b 为回归参数。一般对于抗震结构而言,结构地震需求通常采用最大层间位移角(θ_{\max})作为结构地震需求,根据弹性或弹塑性层间位移角限值将结构抗震性能按照所设定的不同指标和要求进行划分。

在地震作用下,抗震结构体系通过构件的塑性变形和阻尼消耗地震能量,而基础隔震体系所采用的隔震装置,大都通过增加铅芯橡胶支座等耗能装置以提高隔震体系的阻尼并消耗地震能量,隔震装置中的铅芯等阻尼器或装置提供的屈服耗能状态属于可以恢复的正常使用状态。同样,《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)指出隔震层在罕遇地震下保持稳定,不宜出现不可恢复的变形,因此,我国基础隔震结构的设计规范不存在抗震结构的三种抗震性能状态,而是只有隔震装置屈曲一种破坏状态。根据《建筑抗

震设计规范》式(12.2.6-1)的有关规定,隔震装置对应于罕遇地震水平剪力的水平位移,应符合下列要求:

$$u_i \leq [u_i] \tag{2}$$

式中: u_i 表示罕遇地震作用下,第 i 个隔震支座考虑扭转的水平位移; $[u_i]$ 表示第 i 个隔震支座的水平位移限值; 并规定橡胶隔震支座的水平位移限值不应超过该支座有效直径的 0.55 倍。

根据《建筑抗震设计规范》中隔震装置水平位移的限值,将隔震层水平位移(δ)与隔震装置尺寸(支座的有效直径(d))的比值(δ/d)作为结构地震需求参数,那么隔震结构中隔震装置的隔震能力中值为:

$$\hat{C} = \delta/d = 0.55 \tag{3}$$

由式(3)可将地震作用下隔震结构中隔震装置划分为正常使用状态或屈曲破坏状态。

2 隔震结构实例的计算与分析

根据以上所提出的隔震装置屈曲破坏(失效)的抗震性能标准,以灾区已建成的一座七层混凝土框架基础隔震结构建筑为算例,对其隔震装置进行地震风险分析。该隔震建筑已经于 2012 年在汶川灾区建成并投入使用,此后该建筑历经多次汶川地震余震的考验,未有损伤且基本功能保持完好(见图 1)。



图 1 汶川县城某七层
混凝土框架基础隔震房屋
Fig. 1 Seven-story base-isolated
reinforcement concrete (RC) building
in Wenchuan residential area

该基础隔震结构平面布置的形状为矩形,结构总建筑面积 6 873 m²; 房屋的平面尺寸分别为长 39.2 m,宽 29.4 m。结构的总层数为七层,第一层层高为 4.2 m,二到六层层高 3.9 m。该幢隔震房屋隔震设计按照《建筑抗震设计规范》(GB50011-2008)进行,计算所用的钢筋混凝土柱、梁、楼面板及屋面均采用现浇,构件采用的混凝土标号均为 C30,结构的基础为独立基础; 钢筋混凝土中的受力纵筋采用 HRB335,其中箍筋采用 HRB235,结构的隔震层高度为 1.5 m。

房屋的隔震层共采用隔震橡胶支座 26 个,支座的型号主要包含,铅芯橡胶支座直径分别为 700 mm 和 800 mm、普通橡胶支座直径分别为 800 mm 和 900 mm,其具体参数如表 1 所示。

表 1 隔震支座选型及数量
Tab. 1 Type selection and number of isolation bearing

型号	有效直径/ mm	高度/ mm	数量/个
LRB - G4 - D700 - C140 - Tr140	700	265	8
LRB - G4 - D800 - C160 - Tr144	800	275	7
LNR - G4 - D800 - C40 - Tr144	800	275	6
LNR - G4 - D900 - C45 - Tr144	900	281	5

注: LRB - G4 - D700 - C140 - Tr140 表示带铅、橡胶材料剪切模量为 G4(即 $G = 0.392 \text{ MPa}$)、直径 700 mm、铅芯直径 140 mm、橡胶层总厚度 140 mm 的隔震橡胶支座; LRB - G4 - D800 - C160 - Tr144 表示带铅、橡胶材料剪切模量为 G4、直径 800 mm、铅芯直径 160 mm、橡胶层总厚度 144 mm 的隔震橡胶支座; LNR - G4 - D800 - C40 - Tr144、橡胶材料剪切模量为 G4、直径 800 mm、中孔直径 40 mm、橡胶层总厚度 144 mm 的隔震橡胶支座。LNR - G4 - D900 - C45 - Tr144、橡胶材料剪切模量为 G4、直径 900 mm、中孔直径 45 mm、橡胶层总厚度 144 mm 的隔震橡胶支座。

由我国现行的抗震规范可知,该结构所在地区的设防烈度为Ⅶ度,所处场地属于Ⅱ类,场地特征周期为 0.45 s。为了进行隔震结构的非线性时程分析需选择合理的地震波,根据美国太平洋地震工程研究中心(PEER) NGA Database 地震动数据库的地震资料,选择地震记录的范围设定为:矩震级(M_w) 4~9,震源距 $0 \leq r \leq 200 \text{ km}$,场地 30 m 土壤深度的剪切波速为 $140 \sim 500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,震中距包括远场、中场和近场。按照 50 年设计基准期超越概率 2%~3%、10% 和 63% 三种不同的地震动水准相对应的地震影响系数曲线,计算得到三种不同地震水准下的目标概率一致反应谱(UHRS),采用 Abrahamson(1992)和 Hancock 等(2006)提出的小波算法,按照目标反应谱所选择的地震波进行修正,该修正过程预设的最大误差为 10%; 图 2 列出了 50 年设计基准期超越概率 2%~3%、10% 和 63% 情况下,采用地震动的加速度反应谱以及各个水准的平均值。

根据该算例中结构设计所提供的尺寸参数和材料属性,采用 SeismoStruct 通用有限元程序,建立平面框架结构模型。该模型采用基于位移的(刚度方法)纤维梁柱单元,每个梁柱构件沿长度方向被划分成 4 部分,其中箍筋约束混凝土的核心区采用约束混凝土 Mander 模型,钢筋采用 Menegotto-Pinto steel 模型,忽略结构中填充墙对结构的影响。模型中的普通橡胶支座和铅芯橡胶支座分别采用对称线性(Symmetric linear)模型和双线性(Bilinear kinematic)模型进行模拟,模型中的初始刚度(Initial stiffness)、屈服力(Yield force)和屈服后硬化率(Post-yield hardening ratio)等单元参数全部根据表 1 中两类直径尺寸橡胶支座对应的设计参数经计算确定。

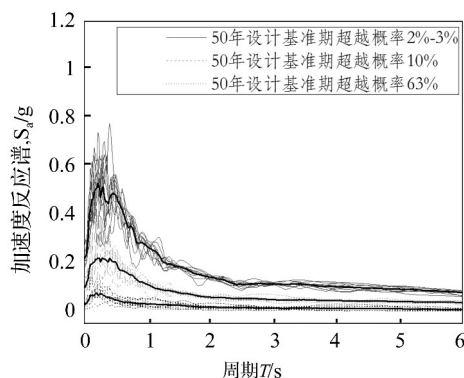


图2 50年设计基准期超越概率2%~3%、10%和63%下的地震动加速度反应谱和平均值

Fig. 2 Individual and median earthquake response spectra at hazard levels of 2%~3%, 10% and 63% PE in 50-year earthquake

根据以上非线性有限元动力模型计算分析可得, 该隔震结构的第一自振周期为 2.3 s, 通过沿单方向输入所选择设防烈度 30 条地震波, 对该基础隔震结构非线性的进行响应分析, 得到地震动水准下所选择的 10 次地震动结构响应中结构楼层位移最大值见图 3。由图 3 可知, 50 年设计基准期超越概率 2%~3% 地震动水准下, 该隔震结构楼层位移的最大值符合隔震结构地震响应的一般规律, 该结构的最大层间位移全部都发生在隔震层, 说明基础隔震结构主要通过隔震层隔离地震动传递的能量, 将部分能量转化为隔震层的变形, 并由隔震支座的阻尼耗能单元(铅芯橡胶支座)消耗地震能量。

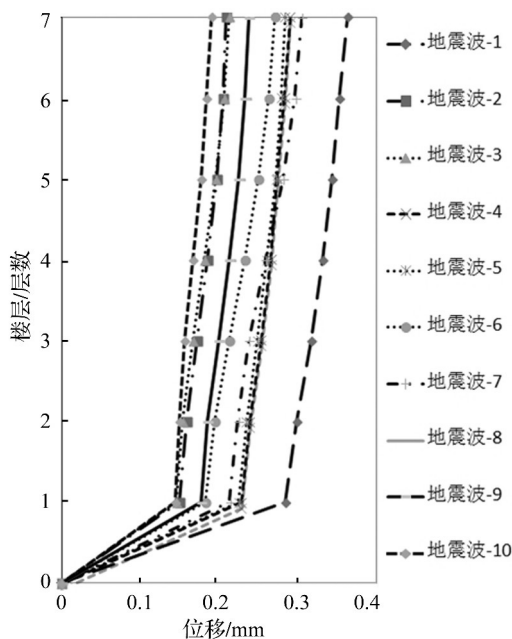


图3 50年设计基准期超越概率2%~3%水准下楼层位移最大值

Fig. 3 Storey maximum displacement of structure at 2%~3% PE in 50-year UHRS

根据图 3 可知, 50 年设计基准期超越概率 2%~3% 地震动水准下地震波 -1 作用下, 该隔震结构发生最大位移响应, 此时对应隔震装置的水平剪力与位移的关系曲线可见图 4。

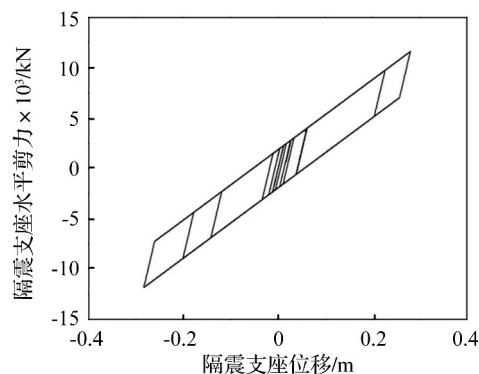


图4 隔震装置水平剪力与位移关系曲线

Fig. 4 Relation curve between horizontal seismic shear force and displacement on isolation equipment

如图 4 所示, 隔震支座最大水平位移达到 0.28 m, 隔震装置的水平位移满足我国抗震规范对于隔震支座水平位移的限值, 通过水平剪力与位移关系曲线说明隔震装置在地震作用下进入了弹塑性状态, 并已发挥较好的耗能隔震作用。

将不同地震动输入所得到的隔震体系中隔震层的水平位移(δ)响应, 与隔震装置尺寸之比(δ/d)作为隔震装置的地震需求参数, 根据设防烈度的地震动加速度反应谱值与对应隔震装置的地震需求参数, 计算得到结构地震需求的关系“云图”, 如图 5 所示, 对该云图进行统计回归, 可推导隔震结构中隔震装置的概率地震需求模型方程为:

$$\delta/d = 4.96 S_a^{1.40} \quad (3)$$

其中: S_a 表示隔震结构第一周期所对应的地震动加速度反应谱谱值。

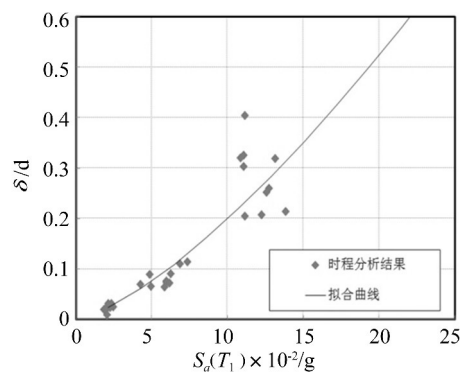


图5 概率地震需求模型的回归分析

Fig. 5 Seismic demand regression analysis

由图 5 中的地震需求参数结果显示, 在设防烈度地震作用下隔震结构中隔震装置的水平位移均符合规范要求, 即隔震装置的水平位移与隔震装置尺寸(支座的有效直径)之比均不超过隔震装置的抗震能力中值 0.55。

在不同地震动水准条件下,目标达到极限状态的概率就是结构地震需求易损性^[25]。根据大量不同结构类型设计参数和计算模型的研究结果^[26-27],分析表明,采用不同灾害值对数的正态分布建模并计算分析是合理的,因此按照正态累计分布函数的定义,在不同破坏等级条件下,结构的地震需求易损性曲线可定义为:

$$P_{c|IM} = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(\hat{C}) - \ln(a \cdot IM^b)}{\sqrt{\beta_{D|IM}^2}}\right) \quad (4)$$

式中: $\Phi[\cdot]$ 表示正态分布概率积分函数, $\beta_{D|IM}$ 表示在一定地震荷载水平条件下,结构地震需求对其均值的标准差。根据不同地震动水准下地震需求参数的回归分析,得到该隔震结构隔震装置整体的概率地震需求模型,按照正态累计分布函数的定义,经过分析获得了基础隔震结构中隔震装置屈曲失稳状态的地震需求易损性曲线如图 6。

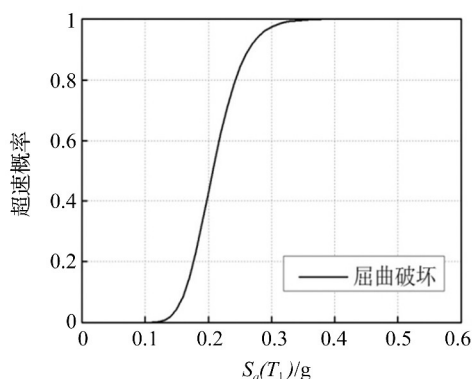


图 6 隔震结构中隔震装置的地震需求易损性曲线

Fig. 6 Seismic fragility curves of isolation equipment of a base-isolated structure

由图 6 分析可知,当该隔震结构第一自振周期处的加速度反应谱值为 0.21 g 时,隔震装置发生屈曲破坏概率达到 50%;当为 0.24 g 时,屈曲破坏概率达到 80%,当为 0.62 g 时,屈曲破坏概率达到 100%。以上数据分析说明,输入地震动在结构第一自振周期处的加速度反应谱值对基础隔震结构中隔震装置的破坏有显著的影响。

3 结 论

根据地震需求分析理论,采用我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)中关于橡胶支座隔震层水平位移限值条文设定隔震装置的隔震装置的抗震能力限值,以隔震层水平位移与隔震装置尺寸的比值作为隔震结构中隔震装置的地震需求参数,并由其抗震能力限值分析认为基础隔震结构的设计规范不存在抗震结构的三种抗震性能状态,只有隔震装置屈曲一种破坏状态。建立隔震装置的概率地震需求模型,并以此建

立屈曲破坏(失效)的地震易损性曲线,获得隔震装置的地震风险状态。其后,通过已经建成的某典型基础隔震建筑为算例,建立该实际基础隔震建筑中隔震装置的概率地震需求模型,回归统计得到其地震易损性曲线,由该算例的计算结果显示,在不同地震动水准条件下,该基础隔震建筑中的隔震装置均未达到结构地震需求的限值,表明隔震结构中隔震装置未出现屈曲破坏(失效)情况,该隔震建筑中隔震装置的设计满足抗震设计规范的基本要求。同时,研究结果显示输入地震动在结构第一自振周期处的加速度反应谱值是影响此类基础隔震结构中隔震装置屈曲破坏(失效)的关键因素。

参 考 文 献

- [1] 张勇,冯万鹏,许力生,等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(10): 1186-1194.
- [2] 中国地震局. 四川省芦山“4.20”7.0 级强烈地震已造成 196 人死亡[EB/OL]. [2013-04-24], 2013. <http://www.ccea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/100345/20130424151225623554842/index.html>.
- [3] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- [4] 徐超,陈波,李小军,等. 芦山 MS7.0 地震建筑结构震害特征[J]. 地震学报, 2013, 35(5): 749-758.
XU Chao, CHEN Bo, LI Xiao-jun, et al. Seismic performance characteristics and damage of buildings in Lushan Ms 7.0 earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(5): 749-758.
- [5] Shome N, Comer C, Bazzurro P, et al. Earthquakes, records, and nonlinear responses[J]. Earthquake Spectra, 1998, 14(3): 467-500.
- [6] Shome N. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures[D]. PhD Dissertation, Stanford University, 1999.
- [7] Ellingwood B R. Earthquake risk assessment of building structures[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 74: 251-262.
- [8] Wen Y K, Ellingwood B R, Bracci J. Vulnerability function framework for consequence-based engineering. Project DS-4 Rep., Mid-America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Ill. [EB/OL]. (2004-04-28) [2006-07-31]. <http://mae.cee.illinois.edu/publications/reports/Report04-04.pdf>.
- [9] Rossetto T, Elnashai A. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data[J]. Engineering Structures, 2003, 25(10): 1241-1263.
- [10] Shinozuka M, Feng Q, Lee J, et al. Statistical analysis of fragility curves[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(12): 1224-1231.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] Hwang H, Liu J B. Seismic fragility analysis of reinforced concrete bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(6): 47–51.
- [14] ATC. Earthquake damage evaluation data for california [R]. Redwood City, California: Applied Technology Council, ATC-13, 1985.
- [15] Wu D, Tesfamariam S, Stiemer S F. Seismic fragility assessment of RC frame structure designed according to modern Chinese code for seismic design of buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 11(3): 331–342.
- [16] Wu D, Tesfamariam S, Stiemer S F, et al. Comparison of seismic performance of RC frame building before and after wenchuan earthquake in sichuan province [J]. J. Perform. Constr. Facil. (ASCE), 2013. 10. 1061/ASCECF. 1943–5509. 0000466.
- [17] 樊剑, 施力. 双向地震动作用下隔震结构概率地震需求分析[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3): 230–234.
FAN Jiang, SHI Li. Probabilistic seismic demand analysis (PSDA) of base isolation structures subjected to two-direction horizontal ground motions [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(3): 230–234.
- [18] 党育, 李涌涛. 基于全寿命费用的隔震结构抗震性能分析[J]. 工程力学, 2014, 33(6): 244–250.
DANG Yu, LI Yong-tao. Seismic performance analysis of isolated buildings based on life-cycle cost [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 33(6): 244–250.
- [19] 樊剑, 龙晓鸿, 赵军. 近场地震下隔震结构基底发生碰撞
- 的鲁棒易损性曲线计算[J]. 工程力学, 2014, 31(1): 166–172.
- FAN Jian, LONG Xiao-hong, ZHAO Jun. Calculation on robust fragility curves of base-isolated structure under near-fault earthquake considering pounding [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(1): 166–172.
- [20] 中国建筑科学研究院. GB50011–2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [21] Federal Emergency Management Agency (FEMA), FEMA 273/356, NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings [S]. Washington, D. C., USA, 1997.
- [22] Cornell A C, Jalayer F, Hamburger R O. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526–532.
- [23] Abrahamson N A. Non-stationary spectral matching [J]. Seismological Research Letters, 1992, 63(1): 30–30.
- [24] Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson N A, et al. An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2006, 10(1): 67–89.
- [25] Casciati F, Faravelli L. Fragility analysis of complex structural systems [M]. UK: Research Studies Press, Wiley, 1991.
- [26] Ellingwood B. Validation studies of seismic PRAs [J]. Nuclear Engineering and Design, 1990, 123(2): 189–196.
- [27] Singhal A, Kiremidjian A S. Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(12): 1459–1467.

(上接第70页)

- [5] He X F, Niyogi P. Locality preserving projections [A]. Neural Information Processing Systems 16 [C]. Vancouver. MIT Press, 2004: 153–160.
- [6] 王健, 冯健, 韩志艳. 基于流形学习的局部保持 PCA 算法在故障检测中的应用[J]. 控制与决策, 2013, 28(5): 684.
WANG Jian, FENG Jian, HAN Zhi-yan. Locally preserving PCA method based on manifold learning and its application in fault detection [J]. Control and Decision, 2013, 28(5): 684.
- [7] Zhang Z H, Zhu X Z, Zhao J M, et al. Image retrieval based on PCA-LPP [A]. 2011 10th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science [C]. Wuxi, Jiangsu, China, 2011: 230–233.
- [8] 李锋, 汤宝平, 宋涛, 等. 归一 Laplacian 矩阵有监督最优局部保持映射故障辨识[J]. 机械工程学报, 2013, 49(13): 100–106.
LI Feng, TANG Bao-ping, SONG Tao, et al. Fault identification method based on normalized laplacian-based supervised optimal locality preserving projection [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13): 100–106.
- [9] Yang B, Chen S C. Sample-dependent graph construction with application to dimensionality reduction [J]. Neurocomputing, 2010, 74(5): 301–314.
- [10] 袁睿, 程雷, 朱然刚, 等. 一种新的基于 MMC 和 LSE 的监督流形学习算法[J]. 自动化学报, 2013, 39(12): 2076–2079.
YUAN Min, CHENG Lei, ZHU Ran-gang, et al. A new supervised manifold learning algorithm based on MMC and LSE [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(12): 2076–2079.
- [11] 宋涛, 汤宝平, 李锋. 基于流形学习和 K-最近邻分类器的旋转机械故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2013, 32(5): 149–153.
SONG Tao, TANG Bao-ping, LI Feng. Fault diagnosis method for rotating machinery based on manifold learning and K-nearest neighbor classifier [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(5): 149–153.
- [12] Manish M, Henry, Joe Q S, et al. Multivariate process monitoring and fault diagnosis by multi-scale PCA [J]. Computers and Chemical Engineering, 2002, 26(9): 1281–1293.
- [13] 张赞, 李本威. 基于最大方差展开的非线性信号降噪方法及其在故障诊断中的应用[J]. 中国科学, 2010, 40(8): 940–945.
ZHANG Bin, LI Ben-wei. Noise reduction method for nonlinear signal based on maximum variance unfolding and its application to fault diagnosis [J]. Sci China Tech Sci, 2010, 40(8): 940–945.
- [14] 李城梁, 王仲生, 姜洪开, 等. 自适应 Hessian LLE 在机械故障特征提取中的应用[J]. 振动工程学报, 2013, 26(5): 758–763.
LI Cheng-liang, WANG Zhong-sheng, JIANG Hong-kai, et al. Adaptive Hessian LLE in mechanical fault feature extraction [J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(5): 758–763.