

基于震害预测的动态震害矩阵方法研究^①

姚新强^{1,2}, 孙柏涛¹, 陈宇坤², 杨绪连², 周强³, 朱宏²

(1.中国地震局工程力学研究所,黑龙江 哈尔滨 150008;

2.天津市地震局,天津 300201;3.南昌大学,江西 南昌 330031)

摘要:基于时间因素(材料内部作用、荷载作用 and 环境影响)和事件因素中的地震因素和抗震加固,通过结构可靠度理论研究和结构材料与构件的试验分析,结合现有的结构动态抗力函数以及不同极限破坏状态和结构抗力之间的对应关系,建立结构的动态易损性。研究事件因素中的拆迁和新建对城市建筑结构数量和类型的影响,以及未来城市不同结构类型的变化特点,给出未来城市的动态震害矩阵;研究群体震害矩阵的异地应用和事件因素中拆迁和新建建筑对震害矩阵的影响,在已有震害预测城市的建筑结构基础资料上,应用模糊数学中可信度方法,形成目标城市的动态震害矩阵,有利于进行结构的抗震设防和地震风险分析。

关键词:动态震害预测;动态易损性;动态震害矩阵

中图分类号:P315.957

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2016)02-0318-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2016.02.0318

Study on Method of Dynamic Earthquake Damage Matrix Based on Seismic Damage Prediction

YAO Xin-qiang^{1,2}, SUN Bai-tao¹, CHEN Yu-kun², YANG Xu-lian², ZHOU Qiang³, ZHU Hong²

(1.Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150008, Heilongjiang, China;

2.Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China; 3.Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China)

Abstract: In this study, based on reliability theory and the experimental analysis of structure and materials, we combine the existing dynamic structure resistance coefficient function and the corresponding relation between different states of limit damage and structural resistance to establish a dynamic structural vulnerability function, based on the time factor (internal effect of materials, loads, and environmental impact) and event factors, including seismic events and seismic reinforcement. By studying the impact of demolition and new construction on the number and type of urban structures, we identify the change characteristics of various future urban structures and develop a dynamic seismic damage matrix for building future cities. Through the offsite application of the group seismic damage matrix and by examining the impacts on the matrix of demolition and construction, we develop a dynamic seismic damage matrix for a target city is formed, based on existing seismic damage predictions for urban structures and the application of reliability methods in vague mathematics. This matrix could facilitate the analysis of earthquake risks and the need for anti-seismic precautions in structures.

Key words: dynamic earthquake damage prediction; dynamic vulnerability; dynamic earthquake damage matrix

0 引言

目前国内外对建筑结构的震害预测方法进行了大量的研究,通过经验分析和理论分析将概率方法、模糊数学、震害

因子和 push over (HAZUS99^[1]) 等方法引入到了震害预测之中,形成了一系列结构易损性和震害矩阵研究方法^[2]。这些成果在震害预测中得到了广泛的应用,形成了丰富的结构

① 收稿日期:2015-07-22

基金项目:中国地震局地震科技星火计划项目(XH15002Y);天津市地震局青年基金项目(20141007);江西省科技支撑计划项目(20141BBG70087)

作者简介:姚新强(1981—),男,在读博士,主要研究方向为工程抗震、灾害学。E-mail:yxqtjj@126.com。

易损性方法和大量的震害矩阵数据^[3]。随着我国城市和农村建设的快速发展,建、构筑物无论在数量上还是在结构类型上都发生了很大的变化,随着结构材料老化、荷载作用、环境的影响、抗震加固、建筑数量变化、地震事件等因素的影响和结构震害矩阵数据异地应用的限制,这些静态的方法和数据无法使用,更无法满足我国经济和社会快速发展的迫切需求。

再重新进行震害预测需要耗费大量的人力和财力,是一种资源浪费,但如果在现有结构易损性和震害矩阵数据库的基础上,综合考虑时间因素(材料内部作用、荷载作用和环境因素)、事件因素(地震发生、抗震加固、拆迁或新建)等动态因素的影响,形成动态的易损性和震害矩阵分析方法,不仅可以形成本地城市的动态震害预测,还可应用模糊数学中的贴适度方法,开展本地形成的动态震害矩阵的异地应用。在达到震害预测目标的条件下,节约大量的人力和财力,满足我国经济和社会快速发展中对震害预测的迫切需要。

1 动态震害预测研究现状及存在的问题

1.1 研究现状

目前动态易损性分析和动态震害矩阵越来越受到研究者的关注。尹之潜等^[4-5]根据若干年后城市房屋结构类型和数量的变化,提出动态震害矩阵并给出了表达式,但这种动态震害矩阵只考虑了结构类型和数量的变化这种单一因素;金国梁等^[6]根据唐山地震资料,考虑结构老旧程度、建筑长度和建筑层数三个影响因素,用正态分布曲线模拟统计资料,采用模糊数学中的隶属度,提出了老旧房屋的群体震害预测方法;孙柏涛等^[7]根据模糊数学中加权海明距离的定义,采用贴适度计算方式,在已有震害矩阵的基础上开展异地群体震害矩阵研究,给出了基于已有震害矩阵模拟的群体震害预测方法;金学申等^[8]采用一种时变参数系统预测方法——多层递阶预测方法,突出了震害的动态预测理论研究方法。杨伟林^[9]考虑震害预测中的自然界自身周期性变化和新建、改建、拆迁等因素,提出了一种考虑时间因素的地震灾害经济损失预测的数学模型;金晖^[10]通过可靠度的时变衰减理论,考虑地震作用和抗震加固改造对钢筋混凝土框架结构抗力的影响,提出了基于时变特性的钢筋混凝土框架结构动态震害易损性分析方法;常业军等^[11]在考虑地震发生概率及强度和结构抗力随时间变化的基础上,提出了结构震害损失动态预测的确定方法;杨亚弟^[12]等将地理信息系统作为平台的防震减灾计算机管理系统,随着城市的发展变化,对现有的资料和数据不断进行更新,以实现对现有的建、构筑物进行动态的震害预测和损失评估。

1.2 存在的问题

众多学者对动态震害预测进行了初步的研究,对动态震害易损性和动态震害矩阵的研究取得了一定的发展,这是对静态研究方法的一种升级和变革,在目前制定城市抗震防灾规划中起到了很重要的作用,但还存在诸多问题没有解决。各种动态预测方法所用的判据不统一,预测的数学模型也不

统一,导致各种动态预测方法之间无法比较;对于同一种建筑结构,存在多种动态预测方法,且考虑的动态因素不同,没有统一的标准来验证预测方法的可靠性;各种经验分析方法所用的震害资料具有局限性,无论是采用统计数学的方法还是模糊数学的方法^[13],都不可能完全真实地反映将来建筑的真实震害结果。现有的震害预测资料绝大多数以烈度为背景,如果在目前我国抗震设计规范采用地震烈度和地震动参数双轨制的情况下,采用地震动参数代替烈度,则现有的震害预测资料无法使用,动态震害预测方法也不一定适用,这些都大大的阻碍了动态震害预测的研究和发展。

2 研究方法

通过理论推导、实验分析和有限元模拟分析,研究时间因素中的材料内部作用、荷载作用及环境影响和事件因素中的抗震加固及地震事件等动态因素对结构抗力的影响,建立单体结构抗力随时间变化的模型表达式;通过极限抗力参数的概率统计特征,运用可靠度失效概率计算方法,建立单体结构抗力和与破坏状态的对应关系及单体结构动态易损性函数;通过大量单体样本分析,得到群体的动态震害矩阵。研究震害矩阵的异地应用问题,分析目标城市和已做过动态震害预测的城市建筑结构基础资料,提取影响结构震害的特征参数,应用模糊数学中的贴适度方法,建立目标城市群体结构的动态震害矩阵。具体研究方法路线见图1。

2.1 结构动态抗力函数建立方法研究

时间因素主要是研究结构抗力随时间的变化,也就是用结构耐久性随时间的降低来分析结构的安全性和适用性。所包含的研究内容为材料内部作用、荷载作用及环境影响(图2),它们都可以建立起以时间为自变量的函数。材料内部作用包括两方面:一方面是指在自然环境下结构的材料随时间会逐渐老化,材料性能下降、强度降低;另一方面是构件材料中的活性成分与其他成分发生化学反应,使材料成分发生变化并产生膨胀压力等,最终导致结构发生破坏。荷载作用是指直接影响结构安全和使用性能的作用,在结构的设计基准期内任意时点的荷载效应大于结构抗力都会使结构失效;另一种是荷载对结构的疲劳损伤作用,该作用会使结构抗力降低,从而降低结构的可靠度,甚至造成结构破坏。环境作用指的是对结构耐久性的影响,一类为自然环境中的腐蚀介质对结构的作用,另一类为使用环境中的人类环境和工业生产等环境对结构产生的不利作用。通过可靠度理论,考虑结构抗力随时间的衰减,进而考虑时间因素的动态易损性分析。

结构动态易损性的研究内容主要是考虑动态因素中的时间因素和事件因素中的地震事件及抗震加固影响,研究结构在确定的地震强度作用下发生某种破坏程度的概率或可能性。通过理论推导和试验研究给出事件因素(材料内部作用、荷载作用及环境影响)对结构抗力的影响形成的随时间衰减的函数,再考虑地震事件和抗震加固影响对结构抗力的影响,形成动态的结构抗力表达式,研究不同极限破坏状态

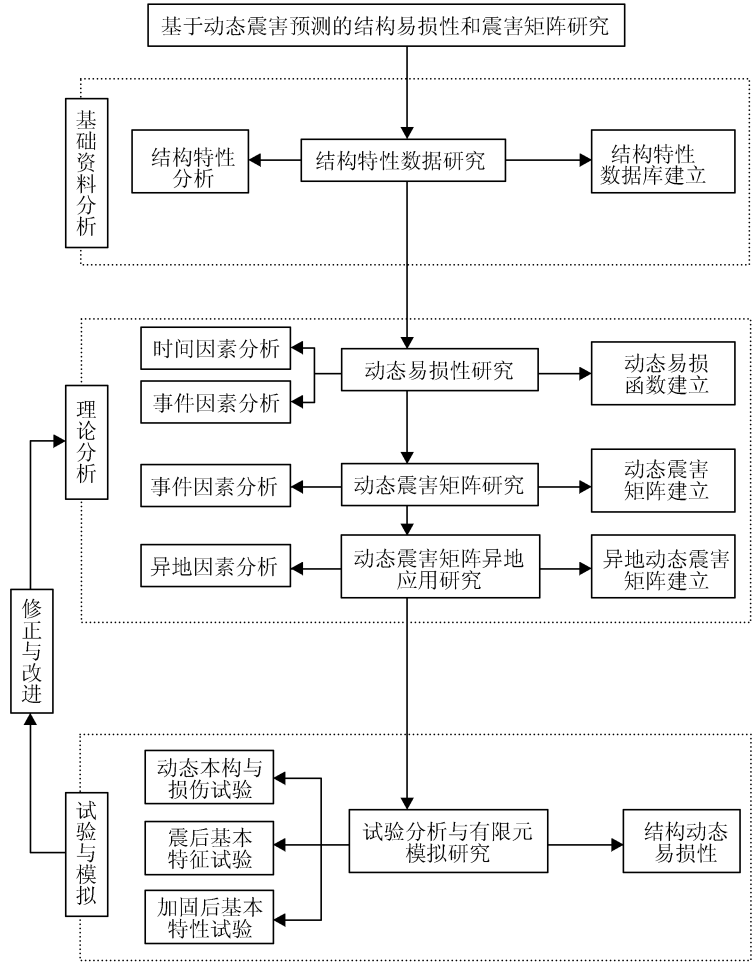


图 1 研究方法路线图
Fig.1 Roadmap of research methods

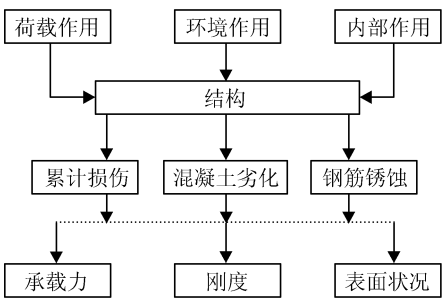


图 2 时间因素对结构抗力影响图

Fig.2 Effect of time factors on the structural resistance

对应的结构抗力对应关系,形成结构的动态易损性。根据目前的静态易损性研究,在刚性结构中采用极限楼层剪力,在柔性结构中采用极限楼层变形和楼层延伸率,定义结构的极限抗力以表示结构的破坏状态,建立静态结构易损性函数,根据形成的动态结构抗力模型,结合结构极限抗力与结构破坏状态之间的关系,建立结构动态易损性函数。

采用建筑结构可靠度时变理论方法,通过理论推导、有限元模拟和试验,在刚性结构中采用极限楼层剪力,在柔性结构中采用极限楼层变形和楼层延伸率,给出结构抗力在结

构材料、荷载作用和环境作用下随时间变化的衰减函数模型,考虑地震作用对抗力的影响,采用地震作用修正系数的方法研究地震动引起结构抗力随时间变化的衰减规律^[11]:

$$R(t) = R_0 f(t) \tag{1}$$

其中: R_0 为结构在 $t = 0$ 时的抗力; $f(t)$ 为随时间变化的影响结构抗力的确定性函数。

时间因素中所考虑的因素主要有材料内部作用、荷载作用和环境作用,根据这三个影响因素确定函数 $f(t)$,即 $f(t) = f[k_m(t), k_l(t), k_e(t)]$,所以结构抗力基于时变的具体公式^[11] 为:

$$R(t) = R_0 f[k_m(t), k_l(t), k_e(t)] \tag{2}$$

其中: $k_m(t)$ 为结构材料内部作用影响确定的抗力; $k_l(t)$ 为荷载作用影响确定的抗力; $k_e(t)$ 为环境作用影响确定的抗力。

结构材料内部作用影响确定的抗力,目前主要有两种:一种是钢筋混凝土,一种是砖砌体。

钢筋混凝土框架的主要抗力为结构的层间屈服剪力 V 。由材料的影响因素确定的抗力^[11] 为:

$$k_{mr}(t) = V(t) = 0.8A_s f_{y0} h \Psi_y(t) + 0.1bh^2 f_{c0} \Psi_c(t) \tag{3}$$

其中: b 、 h 分别为矩形界面的宽度和高度; f_{y0} 为混凝土抗压标准强度; A_s 为受拉钢筋的截面面积; f_{c0} 为钢筋抗拉标准强度; $\Psi_c(t)$ 为混凝土抗力变化系数,取 $1 \sim 8.0 \times 10^{-7} t^3$; $\Psi_y(t)$ 为钢筋抗力变化系数,取 $1 \sim 2.2 \times 10^{-6} t^3$ 。

对于砖砌体结构的主要抗力为结构的墙体抗剪强度 τ 。由材料的影响因素确定的抗力^[1] 为:

$$k_{mr}(t) = \tau(t) = 0.14(n-s+1) + 0.14f_{m0}\Psi_m(t) + 0.5 \quad (4)$$

其中: n 为楼层总数; s 为计算楼层序号; f_{m0} 为砌体标准强度; $\Psi_m(t)$ 为砂浆抗力变化系数。

荷载作用直接影响着结构的安全和使用性能。荷载分为永久荷载和可变荷载。根据我国编制的结构可靠度设计统一标准,采用校准法时只考虑永久荷载与一种可变荷载的组合,即为基本组合。在此基础上,考虑多个可变荷载称为可变荷载效应的概率组合^[11]。

$$k_l(t) = -\frac{1}{\partial_T} \ln \left[\frac{1}{t} \int_0^t \exp(-\partial_T R(t)) dt \right] \quad (5)$$

其中: ∂_T 为概率分布函数中的参数; $t \leq T$, T 为设计周期。

环境作用影响主要为大气环境下的碳化等,受海风影响较大的地区还有可能受到氯蚀等。全国南北方、东西部差异较大,还应根据具体环境情况专门研究,先给出环境作用中碳化的影响。

对于钢筋混凝土框架结构^[11]:

$$k_{ec}(t) = f_{c0}c_c(t) \quad (6)$$

$$k_{ey}(t) = f_{y0}c_y(t) \quad (7)$$

式中: $c_c(t)$ 为混凝土碳化影响系数; $c_y(t)$ 为钢筋碳化影响系数。

对于砌体结构^[11]:

$$k_{em}(t) = f_{m0}c_m(t) \quad (8)$$

式中: $c_m(t)$ 为砌体碳化影响系数。

可以把碳化环境影响对材料强度的作用引入到材料抗力表达式中,建立起以时间作为自变量的结构抗力函数表达式。结构的抗力不但和上述时间因素有关,还和偶然的地震、抗震加固等事件因素有关,采用确定性方法研究地震和抗震加固对结构抗力的影响,可以采用震害指数法,引入地震动参数,在基于时间变量的结构抗力函数表达式的基础上建立地震动参数对结构抗力的影响^[11]。

$$R_e(t) = c_e R(t) \quad (8)$$

式中: c_e 为地震影响抗力下降系数。

目前较为效的抗震加固方式有增设圈梁、构造柱方式,隔震方式,减震方式,以及增强部分构件抗震能力的加固措施。抗震加固对结构抗力的提高和原有结构抗力及采取的抗震加固方式都有很大关系,建立抗震加固对结构抗力的影响函数^[11]:

$$R_s(t) = c_s R_e(t) \quad (10)$$

式中: c_s 为抗震加固对抗力的提高系数。

2.2 动态震害矩阵方法研究

结构动态矩阵的研究内容主要是通过单体结构的动态

易损性分析,考虑事件因素分析未来建筑结构数量和类型的变化,研究未来城市不同结构类型的变化特点及其对应的数量变化趋势,并给出相应的函数,最终给出建筑群体的动态震害矩阵;研究已有城市动态震害矩阵在目标城市应用问题,对比分析两个城市的建筑结构基础资料,应用模糊数学中可信度方法形成目标城市的动态震害矩阵。

综合时间因素和事件因素中的地震作用、抗震加固建立结构抗力函数,可以对单体建筑结构抗力进行计算,然后按照结构抗力和震害指数的关系,通过震害指数和震害等级的对应关系及对大量样本的分析,建立群体结构的动态震害矩阵,从而对某个城市或者某类建筑结构进行动态震害预测分析。

2.3 异地动态震害矩阵方法研究

震害矩阵异地应用主要是利用已有城市的震害预测来研究其他城市的震害预测。根据已有建筑物震害预测结果,分析影响建筑物抗震能力的主要因素,按照普查资料统计出的建筑物各影响因素的建筑面积比例给出模拟震害矩阵与已知矩阵的贴进度,然后进行加权平均,最后建立其他地域建筑物群体的震害矩阵。主要是在考虑已有震害矩阵的基础上,基于普查资料,分析建筑物各特征元素对震害矩阵的不同,根据计算的贴进度建立待求群体的动态震害矩阵^[8]。

$$A(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i A_i(t) \quad (11)$$

式中: $A(t)$ 为待求动态震害矩阵; α_i 为待求动态震害矩阵与第 i 个已有动态震害矩阵的贴进度; $A_i(t)$ 为第 i 个已有动态震害矩阵。

关于贴进度主要是借用模糊数学中加权海明距离的定义,各种元素对动态震害矩阵影响的权重不同,可以根据年代、层数、屋顶结构类型、墙体厚度等建筑结构要素进行权重比较。已有的动态震害矩阵越多,贴进度越高,得到的待求动态震害矩阵越真实,可信度也越高。

2.4 可信度的检验方法

可信度的检验分为两种情况,一种是对通过动态结构抗力计算结构的易损性得出结构动态震害矩阵可信度的检验;一种是对通过已有震害矩阵得出待求震害矩阵的可信度检验。对于这两种可信度的检验,可以利用发生实际地震后的震害调查资料和建筑老化程度调查资料进行检验。尹之潜^[4]对我国 20 世纪 90 年代以前建造的砖结构房屋进行了抽样,经过对 1 000 多个样本的统计检验,得出这类建筑的抗力服从对数正态分布。利用抽样分别求出抗力的均值和方差,建立其置信度区间,对求得的动态震害矩阵进行均值和方差处理,进行可信度的检验。

3 结论

近 30 多年来我国在上百个城市进行了震害预测工作,花费了大量的人力和财力,形成了大量的静态城市震害预测数据,然而随着城市的快速发展,这些数据资料已经不能反映当前城市的震害预测结果。在不需要花费大量人力和财力的情况下,可以通过普查的基础资料,建立结构的动态震害矩阵,也可从已有的建筑结构震害预测为基准,通过建筑

结构动态易损性分析方法和动态震害矩阵,对未来任意时间点的建筑结构易损性和群体震害矩阵进行预测,还可以用模糊数学中贴近度方法开展动态震害矩阵异地应用,形成目标城市的动态震害矩阵,进行震害预测,以适应城市快速发展、抗震防灾能力不断提高的需求。这是城市地震对策的基础工作之一,是风险评估及经济效益的重要依据,也是确定抗震设防标准、震后应急决策和编制城市防震减灾规划的基础^[15]。同时也可为我国国民经济和社会安全、健康发展提供重要保障。

参考文献(References)

- [1] Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS99-Technical Manual[R]. Washington D C; Federal Emergency Management Agency, National Institute of Building Sciences, 1999.
- [2] 陶正如, 陶夏新. 基于地震动参数的建筑物震害预测[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 4(2): 88-94.
TAO Zheng-ru, TAO Xia-xin. Motion Parameter Based Building Vulnerability Evaluation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 4(2): 88-94. (in Chinese)
- [3] 傅征祥, 李革平. 地震生命损失研究[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
FU Zheng-xiang, LI Ge-ping. Study on the Casualties of Earthquake[M]. Beijing: Seismological Press, 1993. (in Chinese)
- [4] 尹之潜. 地震灾害及损失预测方法[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
YIN Zhi-qian. Earthquake Disaster and Loss Prediction Method [M]. Beijing: Seismological Press, 1996. (in Chinese)
- [5] 尹之潜, 杨淑文. 地震损失分析与设防标准[M]. 北京: 地震出版社, 2004.
YIN Zhi-qian, YANG Shu-wen. Earthquake Damage Analysis and Security Standards[M]. Beijing: Seismological Press, 2004. (in Chinese)
- [6] 金国梁, 齐洪波, 郭纲平. 老旧民房地震破坏预测的方法[J]. 工程抗震, 1985(2): 17-25.
JIN Guo-liang, QI Hong-bo, GUO Gang-ping. Earthquake Damage Prediction Method of Old Houses[J]. Earthquake Resistant Engineering, 1985, (2): 17-25. (in Chinese)
- [7] 孙柏涛, 胡少卿. 基于已有震害矩阵模拟的群体震害预测方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(6): 102-108.
SUN Bai-tao, HU Shao-qing. Earthquake Damage Prediction Method Based on Existing Earthquake Damage Matrix Groups [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(6): 102-108. (in Chinese)
- [8] 金学申, 刘允清, 刘志辉. 震害的动态预测[J]. 灾害学, 1997, 12(1): 19-22.
JIN Xue-shen, LIU Yun-qing, LIU Zhi-hui. Dynamic Prediction for Earthquake Disasters[J]. Journal of Catastrophology, 1997, 12(1): 19-22. (in Chinese)
- [9] 杨伟林. 震害经济损失动态预测模型研究[J]. 地震学刊, 1996(4): 13-21.
YANG Wei-lin. Research on Dynamic Prediction Model of Economic Loss in Earthquake Damage[J]. Journal of Seismology, 1996(4): 13-21. (in Chinese)
- [10] 金晖. 基于时变特性的动态震害预测方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2004.
JIN Hui. Dynamic Earthquake Damage Prediction Method Based on Time-varying Characteristics [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [11] 常业军, 纪良仲, 吴明友. 建筑结构地震灾害损失的动态预测方法[J]. 建筑科学, 2003(2): 49-51.
CHANG Ye-jun, JI Liang-zhong, WU Ming-you. Method of Dynamic Prediction for Earthquake Damage to Building Structure[J]. Building Science, 2003(2): 49-51. (in Chinese)
- [12] 杨亚弟, 李桂荣, 杜景林. 防震减灾计算机管理系统的结构分析动态化研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(2): 56-62.
YANG Ya-di, LI Gui-rong, DU jing-lin. Study of Dynamic Analysis of Structures in Computerization System Management of Seismic Damage Prevention and Loss Reduction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(2): 56-62. (in Chinese)
- [13] 杨玉成, 杨柳, 高云学, 等. 现有多层砖房震害预测的方法及其可靠度[J]. 地震工程与工程振动, 1982, 2(3): 75-86.
YANG Yu-cheng, YANG Liu, GAO Yun-xue, et al. Method of Damage Prediction for Existing Multi-story Brick Buildings and Its Reliability[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1982, 2(3): 75-86. (in Chinese)
- [14] 刘静伟, 王振明, 谢富仁, 等. 大华北地区地震灾害与风险评估[J]. 地震工程学报, 2014, 36(1): 134-143.
LIU Jing-wei, WANG Zhen-ming, XIE Fu-ren, et al. Seismic Hazard and Risk Assessments in North China Based on the Historical Intensity Observations[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(1): 134-143. (in Chinese)
- [15] 马玉宏, 赵桂峰. 地震灾害风险分析及管理[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 25-28.
MA Yu-hong, ZHAO Gui-feng. Earthquake Risk Analysis and Its Management [M]. Beijing: Science Press, 2008: 25-28. (in Chinese)