

杨青,冯海英.基于多元模糊的钢筋混凝土结构地震抗损性评估方法研究[J].地震工程学报,2019,41(3):607-612.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.607

YANG Qing,FENG Haiying.Seismic Vulnerability Evaluation Method for Reinforced Concrete Structures Based on Multiple Fuzzy Analysis[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(3):607-612.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.607

基于多元模糊的钢筋混凝土结构 地震抗损性评估方法研究

杨 青¹, 冯海英²

(1. 山西建筑职业技术学院, 山西 晋中 030600; 2. 河北工程大学, 河北 邯郸 056000)

摘要: 评估钢筋混凝土结构抗损性具有重要工程意义,但目前以单因素叠加为基础的评估方法误差较大。为解决此问题,提出基于多元模糊的钢筋混凝土结构地震抗损性评估方法。以 Park-Ang 地震损伤模型为前提,引入正规化累积耗能参数,得到建筑结构层间损伤表达式,加权平均获取震后建筑结构整体损伤值;利用有害层间位移角参数计算震后结构层间位移角;将获取的结构整体损伤值、层间位移角作为多因素论域,进行多元模糊结构抗损性评估,选取模糊损伤评估数学模型与隶属度函数,克服单一因素影响,计算判别因素权重与结构综合损伤指数,根据结构抗损性能判断规则得到建筑结构抗损性所属标准。经实验测试验证:基于多元模糊的钢筋混凝土结构地震抗损性评估方法精确度大于 95%,评估精确性高,是一种有效的钢筋混凝土结构抗损性评估方法。

关键词: 多元模糊;钢筋混凝土;结构;加权平均;层间位移角;抗损性评估

中图分类号: TU311.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)03-0607-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.607

Seismic Vulnerability Evaluation Method for Reinforced Concrete Structures Based on Multiple Fuzzy Analysis

YANG Qing¹, FENG Haiying²

(1. Shanxi Architectural College, Jinzhong 030600, Shanxi, China;

2. Hebei University of Engineering, Handan 056000, Hebei, China)

Abstract: Evaluating the damage resistance of reinforced concrete structures has great engineering significance, but the current evaluation method based on single-factor superposition has a large error factor. To solve this problem, in this paper, we propose a method for evaluating the seismic vulnerability of reinforced concrete structures based on multiple fuzzy analysis. Based on the Park-Ang seismic damage model, we introduce normalized cumulative energy dissipation parameters to obtain the inter-story damage of the building structure, and we obtain the integral damage

收稿日期: 2018-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(51378169)

第一作者简介: 杨 青(1981-),男,山西太原人,硕士,讲师,研究方向: 结构工程。E-mail: 18103519417@163.com。

通信作者: 冯海英(1973-),女,河北临漳人,硕士,副教授,研究方向: 结构工程与建筑施工。E-mail: fenghaiying121@163.com。

values of a post-earthquake building structure via a weighted average. Then, we use the story-drift-ratio parameters to calculate the story drift ratio of the post-earthquake structure. We take the integral damage values of post-earthquake structures and the story drift ratio as the multi-factor domain to perform a multiple fuzzy evaluation of the structural damage resistance. We select the mathematical model and membership function of the fuzzy damage assessment to calculate the weight of each factor and the comprehensive damage index of the structure. The experimental results show that the accuracy of the proposed method based on multiple fuzzy analysis is greater than 95%, which confirms its effectiveness for evaluating the damage resistance of reinforced concrete structures.

Keywords: multiple fuzzy; reinforced concrete; structure; weighted average; story drift ratio; vulnerability assessment

0 引言

不同等级地震对建筑钢筋混凝土结构造成损坏程度存在差异,形成不同等级弹塑性损伤。提高建筑钢筋混凝土结构抗震能力,不但要掌握建筑结构抗震性能,还应了解结构抗损性状况。根据结构抗损性设置建筑结构合理参数,可以有效提高建筑抵抗地震的能力^[1-2],现有建筑钢筋混凝土结构地震抗损性评估方法较多,主要采用基于损伤机制控制的钢筋混凝土结构抗损性评估方法,该方法构建结构损伤机制,明确各部位损伤程度^[3],根据该结果评估钢筋混凝土结构抗损性,但该方法的缺点是未将结构整体损伤值考虑在内,导致评估结果可靠程度较低,不能作为有效评估结果使用^[4];基于构件性能的钢筋混凝土结构抗损性评估方法,以构件损伤性能为主,体现建筑结构整体抗损性效果不佳,与真实结果存在差距^[5]。由于结构损伤具有模糊特性,结构不同部位损伤程度存在差异,导致从不同方面的单一层面考虑结构抗损性结果很难统一^[6],针对以上情况,本文研究地震作用下基于多元模糊的钢筋混凝土结构抗损性评估方法,以4种损伤因素论域为前提,利用模糊数学模型与隶属度函数评估结构整体损伤指数,最后通过抗损性能的多参数综合判断规则,获取钢筋混凝土结构地震抗损性评估结果。

1 基于多元模糊的钢筋混凝土结构地震抗损性评估

1.1 结构整体损伤值计算

采用 Park-Ang 地震损伤模型分析建筑钢筋混凝土结构整体损伤情况^[7-8],以损伤指数形式描述地震损伤模型,如公式(1)所示:

$$DM = \frac{p_m}{p_{cu}} + \varphi \frac{H_{hs}}{O_q p_q \eta_{cu}} \quad (1)$$

或者:

$$DM = \frac{\eta_m}{\eta_{cu}} + \varphi \frac{H_{hs}}{O_q p_q \eta_{cu}} \quad (2)$$

$$\phi = (-0.436 + 0.072\lambda + 0.23n_o + 0.303\rho_t) 0.7^{-100\rho_w} \quad (3)$$

其中:钢筋混凝土结构屈服剪力、屈服位移、极限位移以及极限位移延性系数分别用 O_q 、 p_q 、 p_{cu} 以及 η_{cu} 表示;钢筋混凝土结构反应位移与反应位移延性系数最大值分别用 p_m 、 η_m 表示;结构滞回耗能累计值、耗能因子、纵向钢筋配筋率分别用 H_{hs} 、 φ 以及 ρ_t 描述;结构梯级配筋率、剪跨比和轴压比分别用 ρ_w 、 λ 和 n_o 描述。引入正规化累积耗能参数 φ_h ,描述成式(4):

$$\varphi_h = \frac{1}{\eta_m} \sqrt{\frac{H_{hs}}{O_q p_q}} \quad (4)$$

那么式(1)可描述成以下形式:

$$DM = (1 + \phi \varphi_h^2 \eta_m) \frac{\eta_m}{\eta_{cu}} \quad (5)$$

为方便获取 φ_h 值,深入研究弹塑性地震反应时程,得到 φ_h 简便计算方法如式(6):

$$\varphi_h = 0.6L_t \frac{(\eta - 1)^{0.58}}{\eta} \left(\frac{a_g t_E}{v_g} \right)^{0.30} \quad (6)$$

其中:位移延性系数、地面峰值加速度、峰值速度以及强震动持时分别用 η 、 a_g 、 v_g 以及 t_E 表示;弹性周期同参数 L_t 关系紧密。

双参数线性组合地震损伤以 Park-Ang 地震损伤模型为前提、科学分析损伤指数得到以下公式:

$$DM = (1 - \phi_1) \frac{\eta_m}{\eta_u} + \beta \varphi_h^2 \frac{\eta_m^2}{\eta_u} = (1 - \phi_1 + \beta \varphi_h^2 \eta_m) \frac{\eta_m}{\eta_u} \quad (7)$$

其中,结构滞回耗能、结构变形最大值同线性组合系数 φ_1 存在关联,同时 $\phi_1 \in [0, 1]$ 。

建筑结构在地震作用下产生的层间地震损伤可通过式(7)体现,这种情况下结构层间延性系数最大值与极限延性系数分别用 η_m 、 η_u 表示。那么,利用建筑结构的层间损伤表达式加权平均得到震后建筑结构整体损伤值,如式(8)所示:

$$GDM = \sum_{j=1}^N \frac{(N+1-j)DM_j}{\sum_{k=1}^N (N+1-k)DM_k} DM_j \quad (8)$$

其中:基于多元模糊的钢筋混凝土结构第 j 层损伤值用 DM_j 表示;结构层数用 N 表示。

1.2 结构层间位移角计算

基于多元模糊的钢筋混凝土结构构件受力发生位移、整体结构变形弯曲得到的位移之和,为建筑结构总层间位移^[9]。结构各参数满足以下关系:

$$\Delta_{ai} = \Delta'_{ai} + \bar{\omega}_{i-1}e_i \quad (9)$$

分析式(9),建筑结构楼层位移差又称层间位移,用 Δ_{ai} 表示;钢筋混凝土结构第 i 层出现弯曲、剪切等变形状况,导致出现层间位移变化,用 Δ'_{ai} 表示;在整体建筑结构弯曲变形影响下,形成的第 $i-1$ 层转角用 $\bar{\omega}_{i-1}$ 描述,第 i 层在第 $i-1$ 层楼盖转动影响下,形成的层间刚体转动位移,用 $\bar{\omega}_{i-1}e_i$ 描述,即无害层间位移。

部分参数满足条件: $\bar{\omega}_i = \Delta_{ai}/e_i$ 。结合式(9)得到式(10):

$$\bar{\omega}_i = \bar{\omega}_i + \bar{\omega}_{i-1} \quad (10)$$

其中:楼层位移差角用 $\bar{\omega}_i$ 表示,又称名义层间位移角;钢筋混凝土结构第 i 层出现弯曲、剪切等变形状况,导致出现有害层间位移角,用 $\bar{\omega}_i$ 表示。

1.3 钢筋混凝土结构地震抗损性评估

将上述得到的结构整体损伤值、层间位移角作为部分因素论域,计算建筑钢筋混凝土结构综合多参数损伤指数,根据结构抗损性能,判断规则得到建筑结构抗损性所属标准^[10],完成钢筋混凝土结构的地震抗损性能评估。

1.3.1 选取模糊损伤评估数学模型与隶属度函数

$F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 表示混凝土结构多元模糊损伤论域, $C = c_1/f_1 + c_2/f_2 + \dots + c_n/f_n$ 表示论域中的模糊子集,其中结构损伤程度等级用 f_i 表示, f_i 对模糊子集 C 的隶属度用 c_i 表示。

定义 $F = \{\text{基本完整, 轻度损伤, 中度损伤, 高度}$

损伤, 倒塌\} 表示 5 种等级损伤论域, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 表示结构模糊损伤向量。因素论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 由 m 个损伤评估因子构成,并且本文评估钢筋混凝土结构地震抗损性能采用的因素论域如下: $X = \left\{ \begin{array}{l} \text{结构整体损伤值, 最大层间位移角} \\ \text{滞回耗能循环次数, 楼层能量集中系数} \end{array} \right\}$ 。

不同评定因素 x_i 影响评定等级,大小量度通过因素模糊向量 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 考虑。模糊损伤向量 C 的评估结果由论域 X 与 F 的模糊关系得到^[11]。

不同评定因素 x_i 与同模糊损伤论域 F 之间模糊关系向量由 x_i 对不同损伤等级 f_i 的隶属度组成,具体表示为 $a_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij}, \dots, a_{im}]$,且满足 $a_{ij} = \theta_{x_j}(x_i)$ 要求,利用单因素 x_i 模糊评定损伤论域 F 获取 a_i 。模糊关系矩阵由 x_i 对 F 的模糊关系向量联合构成,如式(11)所示:

$$A = \left\{ \begin{array}{l} a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (11)$$

总体评定结果 C 通过综合单因素评定结果 a_i 得到,且 $C = Y \times A$,因此得到式(12):

$$[c_1, c_2, \dots, c_n] = [y_1, y_2, \dots, y_m] \cdot \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

地震作用下结构模糊损伤向量即为求解得到的 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$,相对各个评定因素权重系数为 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$,1 是权重系数集合中元素值总和。

将正态型 $\theta(x) = u^{-\left(\frac{d-k}{t}\right)^2}$ 作为隶属度函数,通过以下三种规则得到系数 k 和 t 值:(1)当隶属度为 1 时,评定因素与平均值大小一致;(2)首末因素论域最大值与最小值隶属度函数合理调整后的隶属度为 1;(3)0.5 为中间因素论域的边界值隶属度。

1.3.2 运算判别因素权重与结构综合损伤指数

钢筋混凝土结构地震损伤评估因素论域中,从不同损伤评估因子的准确性与关键性角度出发,采用层次分析法得到 $Y = \{0.41, 0.21, 0.26, 0.16\}$,即结构整体损伤值、最大层间位移角、滞回耗能循环次数以及楼层能量集中系数等权重系数^[12]。结构损伤程度所属损伤等级可以根据上述参数设置的模糊损伤评定子集判断获取^[13]。通过计算结构综合损伤指数,用数值定性描述结构损伤程度更加符合工程

建筑标准^[14-15]。加权平均评定子集不同隶属度,得到结构综合损伤指数,如式(13):

$$GFD = \sum_{i=1}^5 c_i^k D_{y_i} \setminus \sum_{i=1}^5 c_i^k \quad (13)$$

其中:第*i*级损伤评定子集隶属度用*c_i*表示;结构整体损伤指数性能在*i*级损伤得到的中值为*D_{y_i}*

钢筋混凝土结构地震抗损性能判断规则如表1所列。根据上述方法得到钢筋混凝土结构地震损伤指数,根据表1获取损伤等级对应的结构抗损性等级,实现基于多元模糊建筑钢筋混凝土结构抗损性评估。

表1 地震作用下钢筋混凝土结构抗损性能判断规则

Table 1 Rules for judging the damage resistance of reinforced concrete structures under seismic action

地震作用水平	结构损伤指数	结构抗损性等级
小震	0~0.25	优秀
	0.26~0.5	良好
	0.51~0.75	合格
	0.76~1.0	不合格
中震	0~0.25	优秀
	0.26~0.5	良好
	0.51~0.75	合格
	0.76~1.0	合格
大震	0~0.25	优秀
	0.26~0.5	优秀
	0.51~0.75	良好
	0.76~1.0	合格

2 实验分析

以某钢筋混凝土结构建筑工程为例,在仿真实验平台中进行模拟实验,输入地震动模拟地震状态,采用本文评估方法研究钢筋混凝土结构在地震作用下的抗损性能。该钢筋混凝土结构建筑工程在8度区II类场地,包含5层楼,0.3g是地震加速度;3.55 m、4.15 m分别是2~5层层高、1层层高,580 mm×580 mm、480 mm×480 mm分别为1~3层、4~5层柱截面面积,配筋率达到2.1%;C30为楼板混凝土等级,厚度可达100 mm。同时采用CANNY软件进行时程分析,该软件分析结果为结构抗损性评估实际情况。

2.1 有效性分析

采用不同方法评估地震作用下建筑钢筋混凝土结构抗损性过程中,得到结构整体损伤系数用图1描述。

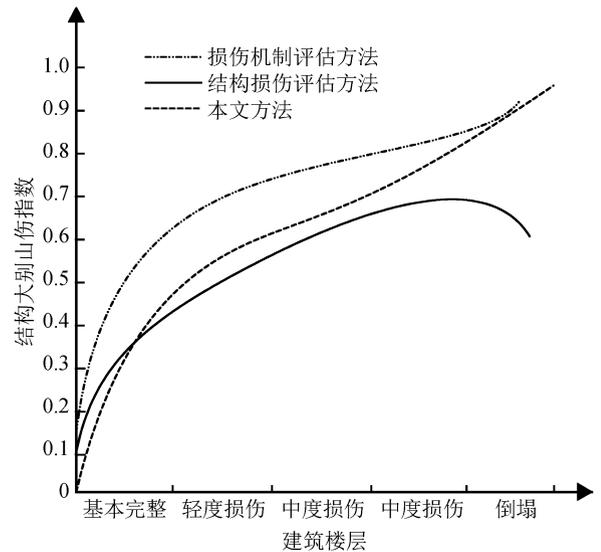


图1 震后建筑结构整体损伤指数

Fig.1 Overall damage index of building structure after earthquake

结合图1结果与表1进行分析发现,本文评估方法的震后建筑钢筋混凝土结构抗损性与表1判断规则相一致,证明所提评估方法的精确度较高,具有一定的可行性与有效性。

分别计算实验建筑工程梁铰机制结构、柱铰机制结构的抗损性能,如表2所列。

表2 不同结构抗损性评估结果

Table 2 Results of damage resistance assessment for different structures

结构名称	楼层	抗损性等级	CANNY 分析结果
梁铰机制结构	1	合格	合格
	2	合格	合格
	3	良好	良好
	4	良好	良好
	5	良好	良好
柱铰机制结构	1	合格	合格
	2	合格	合格
	3	良好	良好
	4	良好	良好
	5	良好	良好

从表2能够看出,采用本文方法可计算得到该实验工程在地震作用下结构抗损性,梁铰机制结构、柱铰机制结构前两层抗损性合格,其余为良好。该结果同采用CANNY软件进行时程分析结果吻合,说明采用本文方法评估得到的建筑混凝土结构抗损性结果准确、可靠,验证了本文方法的有效性。

2.2 评估精确度分析

为突出本文方法评估地震作用下建筑钢筋混凝土结构抗损性优势,采用基于损伤机制控制的钢筋

混凝土结构损伤评估方法、基于性能的钢筋混凝土结构损伤评估方法展开对比测试。采用三种方法分别评估实验建筑工程每层结构抗损性,与 CANNY 软件计算得到的真实结果对比,计算三种方法评估精确度,如图 2 所示。

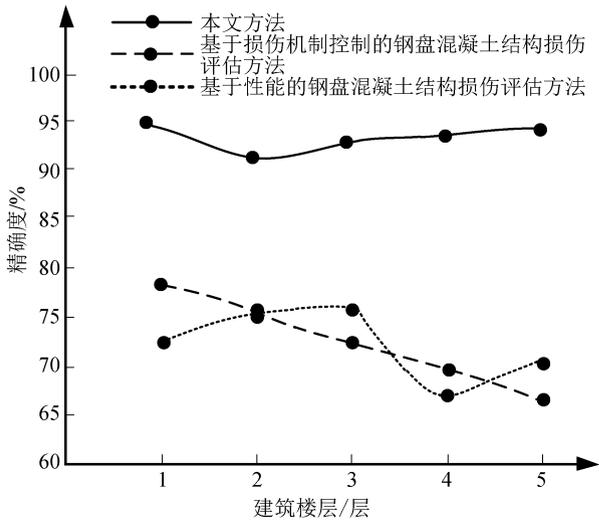


图 2 不同方法评估精确度对比

Fig.2 Comparison between evaluation accuracy of different methods

由图 2 描述的震后钢筋混凝土结构抗损性评估精确度结果能够看出,基于损伤机制控制的钢筋混凝土结构损伤评估方法在 5 层楼的评估精确度由最初的 78% 不断降低至 62%;基于性能的钢筋混凝土结构损伤评估方法精确度波动情况显著,最大精确度为 75.5%,最小值为 67%;本文方法评估地震作用下建筑钢筋混凝土结构抗损性精确度始终高于 95%,无显著波动,稳定性好。综合三种方法精确度值可知,本文方法评估地震作用下建筑钢筋混凝土结构抗损性准确度高、稳定性强。

3 结论

本文针对现有地震作用下建筑钢筋混凝土结构抗损性评估方法存在的问题、以获取精确结构抗损性评估结果为目的,提出基于多元模糊的钢筋混凝土结构地震抗损性评估方法。本文评估思路如下:首先,计算震后建筑结构整体损伤值与震后结构层间位移角;其次,构建合理的建筑结构模糊损伤评估数学模型与隶属度函数,将震后建筑结构整体损伤值与震后结构层间位移角作为部分抗损性因素论域,结合该论域与地震作用下建筑钢筋混凝土结构的多元模糊损伤论域得到模糊损伤向量评估结果;

最后,采用层次分析法计算结构整体损伤值、最大层间位移角、滞回耗能循环次数以及楼层能量集中系数等抗损性模糊向量权重系数,为通过数值定性描述结构损伤程度、加权平均评定子集不同隶属度的幂得到结构综合损伤指数。基于该结果依据结构抗损性能判断规则获取地震作用下建筑钢筋混凝土结构抗损性评估结果。

实验结果表明,本文方法评估结果准确、可靠,地震作用下建筑钢筋混凝土结构抗损性精确度在 95% 以上,相比同类方法具有较高的优势,为提高建筑钢筋混凝土结构抗震性、优化建筑设计提供有效的数据基础,具有较高的现实应用价值。

鉴于论文篇幅所限,完成时间有限,有关详细的技术环节在此不做更多详述,有兴趣的读者可与作者联系讨论。作者水平有限,文中遗漏之处及错误难免,恳请读者给予批评指正。

参考文献(References)

- [1] 姚振静,段艳丽,范业彤,等.短周期地震计回转摆敏感元件优化设计与仿真[J].科学技术与工程,2018,18(31):23-29.
YAO Zhenjing, DUAN Yanli, FAN Yetong, et al. Optimum Design and Simulation of Gyroscopic Pendulum Sensitive Element of Short Period Seismometer[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(31): 23-29.
- [2] 马怀发,张坤,王立涛,等.混凝土坝抗震安全评价指标和方法研究[J].水利水电技术,2017,48(5):110-119.
MA Huaifa, ZHANG Kun, WANG Litao, et al. A Preliminary Study on Performance-Based Seismic Safety Evaluation Index of Concrete Dams[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 110-119.
- [3] 于晓辉,吕大刚.基于易损性的钢筋混凝土框架结构抗震性能裕度评估[J].建筑结构学报,2016,37(9):53-60.
YU Xiaohui, LU Dagang. Fragility-based assessment of seismic performance margin for RC frame structures[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(9): 53-60.
- [4] 王艳云,叶献国,蒋庆,等.基于性能的钢筋混凝土框架结构震后损失评估[J].工程抗震与加固改造,2016,38(5):16-20.
WANG Yanyun, YE Xianguo, JIANG Qing, et al. Performance-based Seismic Loss Assessment in RC Structure[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(5): 16-20.
- [5] AHMAD S, KHAN S A, PILAKOUTAS K, et al. Empirical Vulnerability Assessment of the Non-Engineered Reinforced Concrete Structures Using the Kashmir Earthquake Damage Data[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13(9): 2611-2628.
- [6] 吴鹏.特高压电抗器局部放电试验方法探索[J].江苏电机工

- 程,2016,35(4):20-23.
WU Peng, Partial Discharge Testing Scheme for Extra High Voltage Shunt Reactor [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(4): 20-23.
- [7] 程艳秋, 商效瑀, 郑山锁, 等. 考虑结构与地震动双重不确定性的混凝土框架建筑地震易损性研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(1): 68-72, 112.
CHENG Yanqiu, SHANG Xiaoyu, ZHENG Shansuo, et al. Seismic Vulnerability Analysis of Rc Buildings Considering Double Uncertainty of Structure and Ground Motion [J]. Industrial Construction, 2017, 47(1): 68-72, 112.
- [8] 梁岩, 罗小勇, 陈代海, 等. 锈蚀钢筋混凝土构件基于地震损伤的恢复力模型研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5): 199-206.
LIANG Yan, LUO Xiaoyong, CHEN Daihai, et al. Restoring Force Model of Corroded Reinforced Concrete Members Undergoing Seismic Damage [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(5): 199-206.
- [9] SALEEMUDDIN M Z M, SANGLE K K. Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Structure Using Non-Linear Static Analyses [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(4): 1319-1330.
- [10] 陈星, 黄强兵, 刘妮娜, 等. 基于多元模糊邻近地裂缝带地铁隧道工程场地地表沉降研究[J]. 地质力学学报, 2018, 24(5): 132-140.
CHEN Xing, HUANG Qiangbing, LIU Nina, et al. Study on Ground Settlement of Engineering Site of Metro Tunnel Adjacent to Ground Fissure Zone under the Action of Earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(5): 132-140.
- [11] 赵桂峰, 何双, 马玉宏, 等. 基于钢筋坑蚀效应的近海隔震桥梁易损性分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(8): 67-76.
ZHAO Guifeng, HE Shuang, MA Yuhong, et al. Fragility Analysis of Offshore Isolated Bridge Based on Steel Pitting Corrosion Effect [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(8): 67-76.
- [12] 占昌宝, 罗川, 丁振坤, 等. 高层建筑抗震性能预测仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(8): 397-402.
ZHAN Changbao, LUO Chuan, DING Zhenkun, et al. Research on Seismic Performance Prediction of High-rise Buildings [J]. Computer Simulation, 2016, 33(8): 397-402.
- [13] 蒋欢军, 刘小娟, 薄俊晶. 钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J]. 结构工程师, 2015, 31(3): 114-121.
JIANG Huanjun, LIU Xiaojuan, BO Junjing. Seismic Fragility Analysis of RC Moment-Resisting Frames [J]. Structural Engineers, 2015, 31(3): 114-121.
- [14] 田飞, 李慧民, 万婷婷, 等. 钢筋混凝土框架结构抗震加固方法应用研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(2): 126-130.
TIAN Fei, LI Hui-min, WAN Tingting, et al. Application and Research of the Seismic Strengthening Method for Reinforced Concrete Structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(2): 126-130.
- [15] 魏利军, 王向阳, 罗艾民, 等. 基于 Probit-Bayes 方法的储罐地震易损性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 3(11): 19-23.
WEI Lijun, WANG Xiangyang, LUO Aimin, et al. Investigation on Seismic Vulnerability of Storage Tanks Based on Probit-Bayes Method [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 3(11): 19-23.