

翟凌雨, 杨坤. 基于最小二乘支持向量机算法的高层建筑结构的强震抗毁性估计模型[J]. 地震工程学报, 2019, 41(4): 895-900. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.895

ZHAI Lingyu, YANG Kun. An Invulnerability Estimation Model of High-rise Buildings under Strong Earthquake Based on Least Squares Support Vector Machine Algorithm[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 895-900. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.895

基于最小二乘支持向量机算法的高层建筑结构的强震抗毁性估计模型

翟凌雨¹, 杨 坤²

(1. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东文孚建筑设计有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 采用现有的估计模型对混凝土建筑结构的抗毁性进行估计时, 存在估计精度低、耗时长等问题。为此, 提出一种基于最小二乘支持向量机的强震作用下混凝土高层建筑结构的抗毁性估计模型。该模型采用最小二乘支持向量机对混凝土结构强震损伤程度相关数据的训练样本进行训练, 创建混凝土结构抗毁性估计模型; 为了减少可能存在的模型误差, 采用 KLASSO 调参模型对结构抗毁性估计模型中的参数进行调节和优化, 得出可靠、稳定的强震作用下混凝土高层建筑结构抗毁性估计模型。仿真实验证明, 该模型估计精度相对较高, 可节省估计用时, 为更好地提升建筑行业的安全检测工作效率提供很好的依据。

关键词: 混凝土建筑; 建筑抗毁性; 建筑抗震性; 估计模型

中图分类号: TU973.31

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)04-0895-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.895

An Invulnerability Estimation Model of High-rise Buildings under Strong Earthquake Based on Least Squares Support Vector Machine Algorithm

ZHAI Lingyu¹, YANG Kun²

(1. Shandong University of Science and Technology, School of civil engineering and architecture, Qingdao 266590, Shandong, China;
2. Shandong Wenfu Architectural Design Co., Ltd., Ji'nan 250101, Shandong, China)

Abstract: The existing estimation model as a method to estimate the invulnerability of concrete building structures is characterized by some problems, such as low estimation accuracy and long time consumption. Therefore, for high-rise buildings under strong earthquakes, an invulnerability estimation model based on least squares support vector machine is proposed. The least squares support vector machine is used to train the training samples of concrete structures damaged by strong earthquakes; then, an invulnerability estimation model of concrete structures is established. To reduce the possible model errors, the KLASSO parameter adjustment model is used to

收稿日期: 2018-11-29

基金项目: 山东省高等学校社会科学研究项目(J17RB201); 山东省自然科学基金项目(ZR201709260120)

第一作者简介: 翟凌雨(1997—), 女, 山东淄博人, 研究方向: 建筑构造。E-mail: dgsug8678@163.com。

通信作者: 杨 坤(1971—), 男, 山东鱼台人, 高级工程师, 一级注册建筑师, 一级注册结构师, 研究方向: 建筑结构。

E-mail: zsjyyangkun@163.com。

adjust and optimize the parameters of the invulnerability estimation model. The simulation results show that the model has a high estimation accuracy, and thus, the estimation time can be saved. The study can provide a good basis for improving the safety inspection efficiency of the construction industry.

Keywords: concrete building; invulnerability of building; seismic resistance of building; estimation model

0 引言

随着我国居民生活水平的不断提高和城市化建设的发展,建筑行业越来越受到人们关注,在一定程度上促使高层建筑得到了迅速发展。地壳活动频繁地区经常受到地震灾害的影响,人们的日常生活和生命财产受到巨大威胁。因此在高层建筑混凝土结构设计中做好结构抗毁性设计,对于保证家庭财产和人身安全具有重要意义^[1]。混凝土高层建筑的特点是高宽度比较大、质量和刚度沿竖向分布不均匀。该特点不满足《高层建筑混凝土结构设计规程》中刚重比验算的要求,因此对混凝土建筑进行抗毁性估计是检测混凝土高层建筑质量的首要任务^[2]。目前国内存有的对高层建筑进行抗毁性估计的模型尚不够完善,普遍存在估计精度低、估计过程冗杂、耗时长等问题。在这种情况下,如何准确地对高层混凝土建筑进行抗毁性估计成为焦点课题,受到该领域很多学者的重视,也研究出了很多好的方法^[3]。

文献[4]提出一种基于全概率理论的混凝土高层建筑结构抗毁性估计模型。该模型首先以 FE-MA P-58 的抗毁性检测方法为基本框架,根据国内高层建筑混凝土结构的规定和规范要求,运用有限元分析方法对某个混凝土结构的强度和易损性进行动力分析,同时采用基于混凝土强度的性能评估方法对建筑结构的抗毁性能进行评估,但是其估计精度还有待提高。文献[5]提出一种基于有限元分析的混凝土高层建筑结构抗毁性估计模型,因高层建筑剪力墙的滞回性能是分析其抗震性能的关键参数,建立有限元模型对混凝土高层建筑结构剪力墙的滞回性能进行模拟,估计其抗毁性能。但是运用该模型对建筑进行抗毁性估计时,在提高估计效率方面还存在些许不足。文献[6]提出一种基于模糊综合评价的混凝土建筑抗毁性估计模型。该模型首先对混凝土建筑的工程资料和技术进行分析,根据分析结果创建由混凝土建筑影响因素构成的估计因子集合,设定该集合的隶属度;通过层次分析集合中每个因素的评估标准,进行集中统计,得出评估决判矩阵,计算该矩阵的权重集,并以此为基础,创建混

凝土建筑抗毁性分级和集中估计指数的相应关系集合;最后得出混凝土建筑的抗毁性估计模型。但是该模型在对混凝土建筑进行抗毁性估计时采用模糊分析法,导致评估结果稍微有些模糊化,可能存在误差。

针对上述问题,提出一种高层建筑结构的强震抗毁性估计模型。采用最小二乘支持向量机方法创建混凝土结构抗毁性估计模型,并采用 KLASSO 调参模型优化所构建的估计模型参数,以减少可能存在的模型误差,获得可靠、稳定的强震作用下混凝土高层建筑结构抗毁性估计模型。实验仿真证明,所提模型的估计准确度较高,整个估计过程简洁、估计用时短,具有一定的可信度,可为建筑行业安全性的检测工作提供帮助。

1 高层建筑结构的强震抗毁性估计模型

1.1 基于最小二乘支持向量机的建筑抗毁性估计模型

混凝土结构的抗毁性会受到地质因素、材料因素和工程因素等多种因素的综合影响,具有易变性机制,该机制表现为非线性动力学机制^[7]。影响混凝土结构抗毁性的因素具有复杂多变性,常规建筑结构抗毁性估计方法难以准确对强震作用下混凝土高层建筑结构进行抗毁性评估。与常规估计方法相比,最小二乘支持向量机评估精度更高,因此采用最小二乘支持向量机方法创建混凝土高层建筑结构抗毁性估计模型。

假设给定混凝土结构强震损伤程度相关数据训练集 $\{x_k, y_k\}_{k=1}^N \subset R^n \times R$, 采用非线性映射 $\varphi(x): R^n \rightarrow R^{n_h}$ 把输入空间映射至高维特征空间,再对高维特征空间内的训练数据进行线性回归,对未知函数采用回归估计,表达式为:

$$y(x) = w\varphi(x) + b \quad (1)$$

式中:权向量 $w \subset R$, 偏置量 $b \subset R$ 。最小二乘支持向量机设定如下优化问题:

$$\min_{w, b, \xi} J(w, \xi) = w^T w / 2 + \gamma \sum_{i=1}^N \xi_i^2 / 2 \quad (2)$$

$$\text{s.t. } y_i = w^T \varphi(x_i) + b + \xi_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中: $J(w, \zeta)$ 为优化目标函数, 可以对模型的复杂度和误差范围进行控制; ξ 为误差变量, ξ_i 为混凝土结构损伤程度检测样本数量为 i 时的误差变量; N 表示混凝土结构损伤程度检测的最大样本数; y_i 为偏差值; γ 为正则参数, 被用于对超出误差的混凝土样本惩罚程度进行控制。

运用拉格朗日中值定理对优化问题进行解算:

$$L(w, b, \xi, \alpha_i) = J(w, \zeta) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \{ [w^T \varphi(x_i + b)] + \xi_i - y_i \} \quad (4)$$

式中: α_i 表示拉格朗日乘子。依据优化条件, 则有:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial w} = 0 &\rightarrow w = \sum_{i=1}^l \alpha_i \varphi(x_i); \\ \frac{\partial L}{\partial \xi_i} = 0 &\rightarrow \alpha_i = \gamma \xi_i; \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 &\rightarrow \sum_{i=1}^N \alpha_i = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0 &\rightarrow w^T \varphi(x_i) + b + \xi_i - y_i = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $i = 1, \dots, N$ 。式(5)经过变换可得出:

$$\begin{bmatrix} 0 & Q^T \\ Q & PP^T + \gamma^{-1}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: 线性回归后损伤程度相关数据训练集为 $P = [\varphi(x_1)^T y_1, \dots, \varphi(x_N)^T y_N]$; 高维空间非线性映射 $Q = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$; 最小拉格朗日乘子为 $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_N]^T$ 。

依据 Mercer 所需条件, 针对混凝土结构抗毁性估计的核函数可表示为^[8]:

$$k(x_k, x_h) = \varphi(x)^T \varphi(x) - P \quad (7)$$

则更改式(6)为:

$$\begin{bmatrix} 0 & \cdots & y_1 \\ y_1 & \cdots & y_1 y_1 k(x_1, x_N) \\ y_l & \cdots & y_N y_N k(x_N, x_N) + \gamma^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b \\ \alpha_i \\ \vdots \\ \alpha_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

根据式(8)求出 b 和最小拉格朗日乘子 α 后, 最小二乘支持向量机的回归函数表示为:

$$y(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i k(x_k, x_h) + b \quad (9)$$

最小二乘支持向量机对混凝土建筑抗毁性估计的工作效率和性能主要依据核函数、核参数和正则参数 γ 的选取。综上所述, 满足 Mercer 条件的所

有对称函数都可以称作核函数, 其中每种核函数具有相应的性能。通常最小二乘支持向量机采用的抗毁性估计核函数主要有以下两种:

(1) 径向基 RBF 核函数^[9-10], 其公式为:

$$k(x, t) = \exp(-|y(x) - t|^2 / \sigma^2) \quad (10)$$

(2) 多项式核函数, 其公式为:

$$k(x, t) = (xt + 1)^d \quad (11)$$

RBF 核函数是一种部分核, 特点为内插能力较好, 只会影响和训练集相似的数据特征点。相对来说, 多项式核函数是一种全面核, 特点为无论其与训练集的距离远近, 都会对结果产生影响。当设定好核函数后, RBF 核函数的参数为 σ , 多项式核函数的核参数为 d , 统一标记参数为 t 。该参数值越大, 则收敛速率越快。

对于最小二乘支持向量机中的参数需要达到自适应选取的要求, 将最小二乘支持向量机和遗传算法结合在一起, 创建混凝土建筑的抗毁性估计模型。具体方法如下:

(1) 初始化设定: 设定进化代数、数据规模、核函数名称和核参数, 以及正则参数 γ 的取值范围、交叉几率和变异几率等。

(2) 令随机生成的大概值为父代, 每个个体表示一组最小二乘支持向量机参数。

(3) 把其中单个个体表示的数值代入到最小二乘支持向量机中, 并对训练样本进行训练。每个个体都会得到相应的最小二乘支持向量机模型。最后将混凝土结构强震损伤程度相关数据样本输入到每个模型, 并计算出模型的适应值, 计算公式为:

$$f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y'_i - \hat{y}_i)^2} \quad (12)$$

式中: y'_i 表示为混凝土结构抗毁性的实际检测值; $\hat{y}_i$ 表示模型输出量。

(4) 对父代进行选择、交叉和变异等操作得到新的子一代子代群体。

(5) 如果满足停止条件, 则停止计算, 输出最佳的参数。反之, 替换子一代中最差的个体, 将子一代变成父代, 重复进行步骤(3)、(4)。

(6) 利用最终得到最佳参数, 创建混凝土建筑的抗毁性估计模型:

$$\Gamma = [\varphi(x)^T \varphi(x) - P] \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y'_i - \hat{y}_i)^2} \cdot (t+1)^d \quad (13)$$

由此得到初步的混凝土高层建筑抗毁性估计模

型,还需要对模型中的参数进行优化,以实现最终的高层建筑强震下抗毁性评估。

1.2 优化建筑抗毁性估计模型参数

为了减少可能存在的模型误差,采用 KLASSO 调参模型^[11-12]对 1.1 节创建的结构抗毁性估计模型中的参数进行调节和优化,得出可靠、稳定的强震作用下混凝土高层建筑结构抗毁性估计模型。

假设 (X_i, Y_i, Z_i) 是第 $i (1 \leq i \leq n)$ 个混凝土结构抗毁性的实际检测值, M^1 是混凝土结构抗毁性数据集, $Y_i \in M^1$ 是相应变量, $X_i = (X_{i1}, \dots, X_{id}) \in M^d$ 是 d 维估计变量, $Z_i \in [0, 1]$ 是单指示变量,则标准的优化系数模型为:

$$Y_i = X_i^T \lambda(Z_i) + e_i \quad (14)$$

式中: $e_i \in M^1$ 表示随机噪声,满足 $E(e_i | X_i, Z_i) = 0$; 系数向量 $\lambda(\delta) = \{\lambda_1(\delta), \dots, \lambda_d(\delta)\}^t \in M^d$ 是不确定的,为 Z_i 的光滑函数。混凝土结构的抗毁性实际检测值为 $\lambda_0(\delta) = \{\lambda_{01}(\delta), \dots, \lambda_{0d}(\delta)\}^t \in M^d$ 。经常性地假定存在整数 $d_0 \leq d$, 对于任意的 $j \leq d_0$, 存在 $0 < E\{\lambda_{0j}^2(\delta_i)\} < \infty$, 但对于任意的 $j > d_0$, $E\{\lambda_{0j}^2(\delta_i)\} = 0$ 。简单来说,假设前 d_0 个估计变量和响应变量是相关的,其余为不相关。

对于任意的混凝土抗毁性评估指标变量 $Z_i \in [0, 1]$, $\lambda(\delta)$ 可以通过部分加权的最小二乘函数来估计:

$$W_\delta(\lambda) = \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i^t \lambda)^2 K_m(\delta - Z_i) \quad (15)$$

式中: K_m 表示最小二乘加权系数。

对于矩阵 $B_0 = \{\lambda_0(Z_1), \dots, \lambda_0(Z_n)\}^t \in M^{n \times d}$, 通过最小化全局最小二乘函数来估计:

$$W(B') = \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^n \{Y_i - X_i^t \lambda\}^2 K_m(Z_t - Z_i) \quad (16)$$

在对混凝土结构抗毁性估计模型的假设下,矩阵 B_0 最后 $(d - d_0)$ 列都为 0, 则变量选择就和矩阵 B_0 中识别出的稀疏列相同^[13-14]。采用 Group LASSO 方法判断出稀疏列,给出以下的加罚估计:

$$\hat{\lambda}_\tau = \{\hat{\lambda}_\tau(Z_1), \dots, \hat{\lambda}_\tau(Z_n)\}^t = (\hat{b}_{\tau,1}, \dots, \hat{b}_{\tau,d}) = \arg \min_{B' \in M^{n \times d}} W_\tau(B') \quad (17)$$

$$\hat{\lambda}_\tau(\delta) = \{\hat{\lambda}_{\tau,1}(\delta), \dots, \hat{\lambda}_{\tau,d}(\delta)\}^t \in M^d \quad (18)$$

$$\hat{b}_{\tau,j} = \{\hat{\lambda}_{\tau,j}(Z_1), \dots, \hat{\lambda}_{\tau,j}(Z_n)\}^t \in M^d \quad (19)$$

$$W_\tau(B') = \sum_{j=1}^d \tau_j \|b_j\| + \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^n \{Y_i - X_i^t \lambda(Z_t)\}^2 K_m(Z_t - Z_i) \quad (20)$$

式中: $\tau = (\tau_1, \dots, \tau_d)^t \in M^d$ 是调节参数; $\hat{b}_j$ 是 B' 的第 j 列; $\|\cdot\|$ 表示常见的欧几里德范数。运用部分二阶相似方法可得出上述调节的解。

上述方法涉及到调节参数选用问题,采用交叉验证模型选用 m , 然后对其进行简化得出 $\tau_j = \frac{\tau_0}{n^{-1/2} \|\hat{\lambda}_j\|}$, 由此运用 BIC 标准选取 τ_0 ^[15]。

将数据可信性需求加入交叉验证中,得出可靠、稳定的强震作用下混凝土高层建筑结构抗毁性估计模型:

$$\frac{\tau_0}{n^{-1/2}} = W_\tau(B') \cdot \Gamma \quad (21)$$

根据式(12),可实现强震作用下混凝土高层建筑结构的抗毁性估计研究。

2 仿真实验证明

为验证本文混凝土高层建筑结构抗毁性估计模型的有效性,需要进行实验分析。实验平台为 Windows7 系统,内存为 8 GB,主频为 3.5 GHz,采用 SAP2000 V14 进行仿真实验。实验对象为某市高层建筑的混凝土结构柱,设置地震动加速度峰值为 $0.3g$ 。该结构的抗毁性随地震动强度增加的走势如图 1 所示。

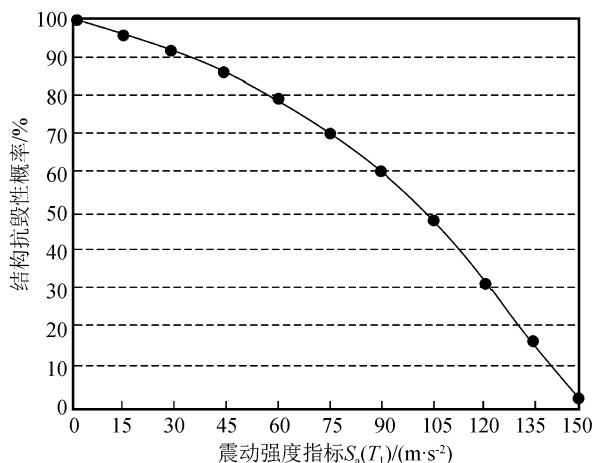


图 1 某市混凝土结构的抗毁性

Fig.1 Invulnerability of a concrete structure in a certain city

为了验证提出的抗毁性估计模型的有效性,分别采用文献[4]模型和文献[5]模型与所提模型对实验选取的高层建筑的混凝土结构柱进行抗毁性估计,并将估计结果与实际结果进行对比,对比结果如图 2 所示。

分析图 2 可知:文献[4]模型估计的抗毁性概率值最高,与实验的混凝土结构抗毁性概率实测值存

在一定差距,估计结果存在误差;文献[5]模型的估计结果较混凝土结构抗毁性概率实际值偏低,存在一定误差;而所提模型是针对地震强度和混凝土结构特性提出的抗毁性估计模型,其计算结果曲线与实际抗毁性概率曲线的拟合度较高,说明所提模型给出的混凝土结构抗毁性估计结果相对较为可信。

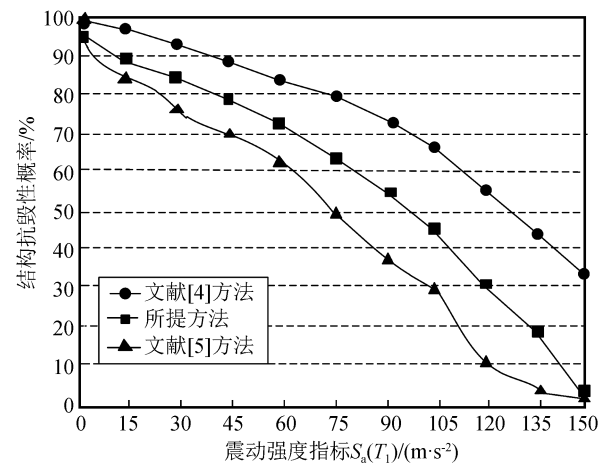


图 2 三种模型抗毁性估计结果

Fig.2 Estimation results of invulnerability of three models

为了进一步验证所提模型的时效性,对实验选取的混凝土建筑,分别采用文献[4]模型、文献[5]模型、文献[6]模型和所提模型进行四组混凝土抗毁性估计运行时间对比实验,对比结果列于表 1。

表 1 四种模型的运行时间

实验	运行时间/s			
	文献[4]模型	文献[5]模型	文献[6]模型	所提模型
A	54.690	58.940	69.410	52.580
B	56.810	57.620	68.540	50.160
C	58.640	59.190	52.670	51.270
D	47.370	49.870	35.160	39.840

分析表 1 可知:实验中,文献[5]模型通过分析剪力墙的滞回性能,进而对混凝土建筑进行抗毁性评估,整体过程相对来说较为冗杂,运行过程需要较多时间,后两组实验中文献[5]模型所需时间最多;文献[4]模型对混凝土结构刚度和强度进行估计计算,过程较为简洁,估计所用时间相对来说较短;文献[6]模型在前两组实验中所需时间最多,后两组实验所需时间较少;所提模型在四组实验中所用时间最短,主要在于其对混凝土结构采用自由地震功率,并采用遗传算法优化最小二乘支持向量机,建立了结构抗毁性估计模型,再利用 KLASSO 模型对结构抗毁性估计模型参数进行优化,使其更稳定,在有效提高了混凝土高层建筑结构抗毁性估计精度的同

时,还缩短了运算时间。

3 结语

针对混凝土高层建筑,提出一种强震作用下的结构抗毁性估计模型。该模型以最小二乘支持向量机和遗传算法相结合为基础,利用 KLASSO 调参模型对其参数进行优化,最终得到较为稳定的混凝土建筑结构的抗毁性估计模型。实验结果表明,所提模型抗毁性估计结果与试验结构抗毁性结果的拟合度较高,且运算效率较高,这主要是由于在对强震作用下混凝土高层建筑结构的抗毁性评估过程中,完善了对抗毁性模型的参数优化问题,降低了模型误差,使所构建模型具有较强的适应性,能够对国内混凝土建筑结构的静力弹塑性进行分析并给出更合适、更精确的估计结果。但由于作者水平有限,仍需要进一步对所提出的抗毁性估计模型进行研究和改进。

参考文献(References)

[1] 顾群,张咪,张玉明,等.±800 kV 换流站高端阀厅钢-钢筋混凝土抗震墙混合结构抗震性能分析[J].中国电力,2016,49(8):36-40.

GU Qun,ZHANG Mi,ZHANG Yuming, et al. Seismic Performance Analysis of Steel-Reinforced Concrete Combined Shearwall Structure of High Voltage Side Valve Hall in ±800 kV Converter Station[J].Electric Power,2016,49 (8):36-40.

[2] 史华.基于复杂网络的建筑物强震下抗毁性估计模型[J].地震工程学报,2017,39(6):1024-1028.

SHI Hua.Invulnerability Estimation Model of Buildings with Complex Networks under Strong Earthquakes[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(6):1024-1028.

[3] 伏焕昌,吴从晓,张玉凤,等.预制装配式混凝土框架结构金属消能减震连接体系抗震性能分析研究[J].工程抗震与加固改造,2016,38(1):89-97.

FU Huanchang,WU Congxiao,ZHANG Yufeng, et al. Seismic Performance Study on Connection System of Prefabricated Concrete Structure with Metallic Damper[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2016,38(1):89-97.

[4] 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. New Generation of Seismic Performance Evaluation Method for Frame-Shear Wall Structures Based on Seismic Intensity[J].Journal of Vibration and Shock,2017,36(10):140-148.

[5] 余少乐,杨联萍,张其林,等.叠合板式剪力墙滞回性能的有限元分析[J].工业建筑,2016,46(12):43-51.

YU Shaole,YANG Lianping,ZHANG Qilin, et al. Finite Element Analysis of Hysteretic Behavior of Superimposed Slab

- Shear Wall[J].Industrial Construction,2016,46(12):43-51.
- [6] 施有志,阮建凑,李秀芳.软土地基建筑稳定性模糊综合评价方法研究[J].数学的实践与认识,2014,44(23):103-109.
- SHI Youzhi, RUAN Jiancou, LI Xiufang. Research on Fuzzy Comprehensive Assessment Method to Stability of Soft Soil Foundation Construction[J].Mathematics in Practice and Theory,2014,44(23):103-109.
- [7] 刘科元,李海滨.地震引起建筑结构损伤可靠性预测仿真[J].计算机仿真,2017,34(1):423-426.
- LIU Keyuan, LI Haibin. Prediction and Simulation of Damage Reliability of Building Structure Caused by Earthquake[J].Computer Simulation,2017,34(1):423-426.
- [8] 李伯维,张耀庭.基于 Pushover 的多层钢筋混凝土框架结构设计 with 抗震性能分析[J].建筑技术,2016,47(5):392-395.
- LI Bowei, ZHANG Yaoting. Design and Seismic Performance Analysis of Multi Story Reinforced Concrete Frame Structure Based on Pushover Analysis [J]. Architecture Technology, 2016,47(5):392-395.
- [9] 丁柱,张立翔.强地震作用下混凝土重力坝响应特性分析[J].水利水电技术,2016,47(10):1-5,39.
- DING Zhu, ZHANG Lixiang. Analysis on Response Characteristics of Gravity Dam under Strong Earthquake Effect[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(10):1-5,39.
- [10] 程麦理,李青宁,苗如松.强震作用下超高桥墩动力稳定性理论研究[J].地震工程学报,2016,38(3):360-365.
- CHENG Maili, LI Qingning, MIAO Rusong. Theoretical Study on the Dynamic Stability of Super-high Bridge Piers under Strong Earthquakes[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(3):360-365.
- [11] 明小娜,周洋,卢永坤,等.滇西北地区房屋建筑特征和抗震能力评价[J].地震研究,2017,40(4):646-654.
- MING Xiaona, ZHOU Yang, LU Yongkun, et al. Evaluation of Building Features and Seismic Capacity in Northwest Yunnan [J].Journal of Seismological Research,2017,40(4):646-654.
- [12] 王新妮,吴海波.钢筋混凝土建筑在连续震动下的壁板结构破坏程度分析[J].地震工程学报,2017,39(6):1018-1023.
- WANG Xinni, WU Haibo. Damage Analysis of Panel Structures in Reinforced Concrete Buildings Subjected to Continuous Vibration [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017,39(6):1018-1023.
- [13] 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,2017,13(11):17-21.
- 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,2017,13(11):17-21.
- [14] 许立强.混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估[J].地震工程学报,2018,40(1):14-19,47.
- XU Liqiang. Evaluation of Earthquake Damage and Anti-dstruction Ability of Concrete High-rise Building Structures [J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):14-19,47.
- [15] 申彤,闫维明,周大兴,等.超高层建筑施工塔吊的动力特性和地震响应规律[J].科学技术与工程,2017,17(27):255-262.
- SHEN Tong, YAN Weiming, ZHOU Daxing, et al. Seismic Response and Dynamic Characteristics of Cranes on High-rise Buildings[J].Science Technology and Engineering,2017,17(27):255-262.