

胡瑛,裴利剑,韩春秀.基于BIM的建筑砌体结构抗震性能评估方法研究[J].地震工程学报,2019,41(1):221-226.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.221

HU Ying, PEI Lijian, HAN Chunxiu. A Seismic Performance Evaluation Method for Masonry Structures Based on BIM[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 221-226. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.221

基于BIM的建筑砌体结构抗震性能评估方法研究

胡瑛¹, 裴利剑¹, 韩春秀²

(1. 昆明冶金高等专科学校建工学院, 云南 昆明 650031; 2. 云南民族大学 土木工程系, 云南 昆明 650033)

摘要: 建筑砌体结构抗震性能评估, 对建筑结构安全的稳定性至关重要。本文从四个方面分析建筑砌体结构抗震性能提升的条件, 根据建筑结构的抗震性影响因素, 评估抗震能力。构建建筑砌体结构抗震性能的评估BIM指标体系; 利用BIM模型中的三角模糊数, 定量计算建筑砌体结构抗震性能指标的模糊判断矩阵, 得到建筑砌体结构的三角模糊数值, 分析筑砌体结构抗震性能指标的单排序情况, 结合对建筑砌体结构抗震性能评估体系指标权重系数和单项得分的计算, 实现基于BIM的建筑砌体结构抗震性能评估。结合模拟建筑实例分析, 利用建筑结构倒塌概率测试建筑砌体结构的抗震性能, 并利用评估结果与实际评估结果的拟合度测试提出方法的准确性。实例结果证明, 能够准确的得到抗震性能的评估结果。

关键词: BIM; 建筑砌体结构; 抗震性能; 评估

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)01-0221-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.221

A Seismic Performance Evaluation Method for Masonry Structures Based on BIM

HU Ying¹, PEI Lijian¹, HAN Chunxiu²

(1. College of Engineering and Architecture, Kunming College of Metallurgy, Kunming 650031, Yunnan, China;

2. Department of Civil Engineering, Yunnan University of Nationalities, Kunming 650033, Yunnan, China)

Abstract: To evaluate the seismic performance of masonry structures based on Building Information Modeling (BIM), we (1) analyzed the requirements for seismic performance improvement of masonry structures from four aspects, (2) calculated the seismic capacity with the strength and ductility of such a building structure, and (3) constructed an evaluation index system of seismic performance for masonry structures. On this basis, a fuzzy judgment matrix of the seismic performance indexes of masonry structures was quantitatively calculated using triangular fuzzy numbers, and the single-level sequence of seismic performance indexes was analyzed by calculating the fuzzy comprehensive value of seismic performance. Combined with calculation of the index weight coefficient and the single-item score of the seismic performance evaluation system, a BIM-based

收稿日期: 2018-07-28

基金项目: 国家自然科学基金; 徐变收缩与界面滑移耦合效应下组合梁长期力学性能研究(51708486)

第一作者简介: 胡瑛(1979-), 女, 云南昆明人, 硕士, 副教授, 研究方向: BIM技术, 工程项目管理。E-mail: Ying23_y@163.com。

通信作者: 韩春秀(1976-), 女(瑶族), 硕士, 副教授, 研究方向: 组合结构力学计算及装配式建筑开发与设计。

seismic performance evaluation of masonry structures was ultimately realized. Combined with analysis of a simulated project, the seismic performance of a masonry structure was tested with the collapse probability of the structure, while the accuracy of the proposed method was tested by the fitting degree of evaluated results and actual results. The results showed that the proposed method not only has good seismic performance, it can also accurately obtain the seismic performance evaluation results of masonry structures.

Keywords: BIM; masonry structure; seismic performance; evaluation

0 引言

地震属于较为常见的自然灾害。近年来我国地震灾害频发,造成了人员伤亡和财产损失的现象。抗震设防标准决定了建筑砌体结构抗震性能的好坏,抗震设防标准包括四个阶段,每个阶段的标准都不同,致使建筑砌体结构具有不同的抗震性能。我国现阶段建筑中存在的问题有:建筑结构抗震设防的能力存在不足;出现大量不规则的建筑结构,并且采用的抗震技术没有在地震测试中获得验证;建筑结构的抗震性能会随着使用时间的变化而产生变化^[1-2],降低了抗震性能,需要对存在问题的建筑砌体结构做抗震性能的评估。根据其评估结果对建筑结构实行加固措施,可以降低地震灾害给人们带来的损失以及安全隐患,因此,建筑砌体结构抗震性能评估成为大量研究学者所研究的新课题^[3]。

当前的建筑砌体结构抗震性能评估只是分析了抗震性能指标,当建筑砌体结构复杂,无法用倒塌概率评估时,抗震性能的评估结果与实际评估结果的拟合度较低,不能够准确得到建筑砌体结构抗震性能的评估结果,为了解决上述问题,提出了基于BIM的建筑砌体结构抗震性能评估方法。利用BIM模型评估复杂结构的能力,利用模型中模糊计算的能力,对复杂建筑砌体结构抗震性能进行准确评估,并运用实验,证明了该方法的优越性。

1 基于BIM的建筑砌体结构抗震性能评估方法研究

1.1 建筑砌体结构抗震性能影响因素分析

(1)合理使用建筑砌体结构的预制件布局

建筑砌体结构的预制件布局决定了建筑结构的强度,也决定了钢筋水泥构造的建筑结构,构建的排列对建筑砌体结构抗震抗扭曲起到了决定性作用。建筑中预制件的安装需要以平行或者竖向来布置^[4],进而提升建筑砌体结构的强度,有效面对地震纵波和横波的侵袭,提升了建筑砌体结构的整体抗

震性能。在建造中,需要保证施工的精度^[5]、注重建筑的整体布线以及抗震缝隙。

在建筑砌体结构施工和检验中,抗震部件应多用混凝土。混凝土材料的抗震性能较好,在混凝土结构中加入钢筋,可以提高建筑砌体结构的总体强度。

(2)建筑结构横纵墙面布局

在建筑砌体结构的分布中,纵向和横向墙面承担了建筑的大部分重量。在发生地震时,有横纵墙面的建筑比没有横纵墙面建筑更加牢固,地震会使建筑的承重部位发生改变,需要分析建筑横纵墙面的布局情况。

承重墙结构属于使用范围内的结构,具有高强度的特性。在建筑施工中,需要做到横纵墙面均匀布局,使建筑砌体结构美观、实用并受力均衡^[6-7]。当建筑本身不能满足横纵墙互通时,需要采取对应的措施来提升建筑砌体结构的抗震性能,在建筑横纵墙面的交界处添加钢筋和水泥来相互连接,会出现建筑无法贯通而导致建筑砌体结构出现安全性降低的现象。

(3)建筑墙体面积和材料质量

在构造建筑结构时,需要合理的分析水泥与钢筋结构,使其可以均匀受力,由于建筑墙体由多种材料组成,具有较高的强度,扩大建筑的墙体面积,控制材料和质量可以提升建筑砌体结构的抗震性能。

(4)设置建筑结构的圈梁和构造柱

建筑结构的圈梁对于建筑外墙来说具有重要意义,该部分的连接提升了建筑砌体结构的整体性能^[8-9]。在实际的建筑中,需要重视建筑结构的圈梁,合理的构建能够保证建筑结构墙面抗震性能。在发生地震时,建筑墙体不会出现较多的裂缝,即使出现裂缝时也不会发生进一步恶化,避免了建筑砌体结构的塌方。

1.2 建筑砌体结构抗震性能评估指标体系

建筑砌体结构的抗震能力指标可表示为:

$$I_s = CF \quad (1)$$

其中: I_s 为抗震能力指标; C 表示建筑砌体结构的强度指标; F 表示建筑砌体结构的延性指标。建筑结构的强度指标可以对构件进行分组计算, 建筑结构的延性指标可以分析构件延性对抗震性能的影响。计算建筑砌体结构某一方向第 j 组构件的强度指标, 计算公式如下:

$$C_j = \frac{Q_j}{\sum W'} \quad (2)$$

式中: C_j 表示第 j 组构件的强度指标; Q_j 代表建筑构件的承载力, $Q_j = \tau_j A_j$, 其中, τ_j 、 A_j 分别代表建筑砌体构件的强度标准值和建筑砌体结构有效截面的面积; $\sum W'$ 代表建筑砌体结构计算层上面的总重力。当评估的建筑砌体结构具有多种类型构件时, 需要对其分层计算, 按照变形能力来确定^[10], 并根据建筑结构侧移变形来平衡建筑构件的承载力。

第一层的计算为: 将建筑砌体结构的墙和构造柱分为一组, 不需要考虑结构的延性^[11], 选取建筑砌体结构的延性指标 $F = 0.1$, 建筑砌体结构中构造柱面积可根据墙面积来计算, 则建筑砌体结构的抗震能力指标为:

$$I_s = CF = \frac{\tau_c A_c}{\omega \sum A_f} + \frac{\tau_w A_w}{\omega \sum A_f} = \frac{\tau_w (n A_c + A_w)}{\omega \sum A_f} \quad (3)$$

其中: τ_c 、 τ_w 分别表示建筑砌体结构中构造柱的强度标准值和建筑砌体墙体的强度标准值, 并且 $\tau_w = \xi_n f_{vk}$, 其中, ξ_n 表示建筑砌体抗震强度的影响系数; f_{vk} 表示建筑砌体抗震强度的标准值; ω 表示建筑砌体结构单位面积的重力荷载; A_c 、 A_w 分别表示计算建筑结构中构造柱的面积和计算方向去掉门窗洞的面积, $\sum A_f$ 表示计算建筑砌体结构平面的面积和; n 表示建筑砌体与混凝土剪切的模量比值。建筑砌体结构抗震能力需求指标是指当发生大型地震时, 建筑物不会被破坏。破坏可以分成严重、中等、轻微破坏及倒塌^[12], 破坏程度的不同, 需求指标也存在不同。利用 BIM 相关软件对建筑砌体结构抗震性能评估指标进行分析, 构建建筑的层次模型, 进而构建建筑砌体结构抗震性能的评估指标模型^[13]。基于 BIM 建筑砌体结构抗震性能的评估指标体系如图 1 所示。

1.3 建筑砌体结构抗震性能评估

对于 $k-1$ 层次的建筑砌体结构抗震性能指标来说, 与第 k 层 n'_k 各因素做比较时, 利用三角模糊数定量来表示, 建筑砌体结构抗震性能指标的模糊判断矩阵为:

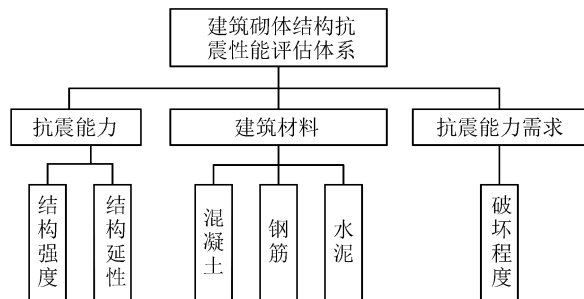


Fig.1 Seismic performance evaluation index system of masonry structures based on BIM

$$A' = (a_{ij'})_{n'_k \times n'_k} \quad (4)$$

式中: $a_{ij'} = (l_{ij'}, m_{ij'}, u_{ij'})$ 代表以 $m_{ij'}$ 为中间值的一个闭区间, 建筑砌体结构抗震性能指标的模糊判断矩阵为正负反矩阵; $a'_{ij'} = (l'_{ij'}, m'_{ij'}, u'_{ij'})$ 表示第 t 个决策对建筑砌体结构第 k 层第 i 个和 j' 因素相比较获得的模糊数, 其中 $i, j' = 1, 2, \dots, n'_k, t = 1, 2, \dots, T$ 。计算建筑砌体结构第 k 层的三角模糊数, 计算公式为:

$$M'_{ij'} = (1/T) \cdot (a^1_{ij'} + a^2_{ij'} + \dots + a^T_{ij'}) \quad (5)$$

根据式(5)能够获得建筑砌体结构的综合判断矩阵。根据下列公式能够求出建筑砌体结构抗震性能的综合模糊程度值:

$$S_i^k = \sum_{j'=1}^{n'_k} M'_{ij'} \cdot \left(\sum_{j'=1}^{n'_k} \sum_{i'=1}^{n'_k} M'_{ij'} \right)^{-1} \quad (6)$$

根据定理有如下计算公式:

$$V(S_i^k \geq S_{j'}^k) \quad (7)$$

可得:

$$P_{ih}^k(A_i^k) = \min V(S_i^k \geq S_{j'}^k) \quad (8)$$

式(8)表示建筑砌体结构第 k 层中抗震性能指标对 $k-1$ 层的单排序, A_i^k 代表第 k 层中的第 i 个性能指标。由式(8)的 $P_{ih}^k(A_i^k)$ 经过归一化得到:

$$P_h^k = (P_{1h}^k, P_{2h}^k, \dots, P_{n'_h}^k)^T \quad (9)$$

式(9)表示第 k 层建筑砌体结构抗震性能指标对 $k-1$ 层 h 元素的单排序。当 $h = 1, 2, \dots, n'_{k-1}$ 时, $n'_k \times n'_{k-1}$ 阶矩阵表达式为:

$$P^k = (P_{1h}^k, P_{2h}^k, \dots, P_{n'_h}^k)^T = \begin{bmatrix} P_{11}^k & P_{12}^k & \dots & P_{1n'_{k-1}}^k \\ P_{21}^k & P_{22}^k & \dots & P_{2n'_{k-1}}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n'_k1}^k & P_{n'_k2}^k & \dots & P_{n'_kn'_{k-1}}^k \end{bmatrix} \quad (10)$$

若第 $k-1$ 层建筑砌体结构对总目标的权重向量为 $W^{k-1} = (W_1^{k-1}, W_2^{k-1}, \dots, W_{n'_{k-1}}^{k-1})^T$, 则有抗震性

能指标对总目标的合成排序 W^k 。综合权重系数是用来分析指标因素在建筑砌体结构抗震性能评估指标体系中的重要程度。对建筑砌体结构抗震性能评估时,需要对抗震性能指标单相评估,可以通过计分来评估^[14-15]。建筑砌体结构抗震性能的计分包括:优、良、中、合格和不合格五种。抗震性能指标通过评估后,才可以进入建筑砌体结构抗震性能的最终综合评估,求出抗震评估要素权重 B 和单项分值 V 之后,可以求得建筑砌体结构抗震性能的综合得分,表达式为:

$$G = \sum_{i=1}^{n'} B_{j'} V_{j'} \tag{11}$$

式中: $B_{j'}$ 、 $V_{j'}$ 分别代表第 j' 个建筑砌体结构抗震性能评估体系指标的权重系数和单项得分。结合上述分析,实现了对基于 BIM 建筑砌体结构抗震性能的评估,表达式如下:

$$E = (G + P^k) \cdot P_h^k + |S_i^k| |M_{ij'}^k| \tag{12}$$

2 实验分析

为验证基于 BIM 的建筑砌体结构抗震性能评估方法的有效性,进行仿真实验。选取倒塌率、不同方法的评估结果与实际评估结果之间的拟合度作为实验指标,对传统方法和所提方法进行对比分析。仿真实验在 Intel 四核 2.8 GHz CPU,8 GB 内存,操作系统为 Windows8 的硬件环境下进行,通过 QuestMobile 平台来实现实验数据的提取与分析。

实验以虚拟 BIM 模型中某建筑工程为例,假设在模型中该建筑层数为 20,建筑面积约 3.6 万 m^2 ,建筑高度为 86.5 m。通过虚拟 QuestMobile 平台设置该建筑砌体结构的倒塌概率,以测试得到的数据与设置的真实数据对比,来测试抗震性能的好坏。设置的结果为 37%,测试结果如图 2、图 3 所示。

分析图 2 可知,6 次迭代中,建筑砌体结构的倒塌概率整体在 40% 以下,第 2 次和第 4 次迭代时,建筑砌体结构发生的倒塌概率为 20%。从图 3 中可以看出,6 次迭代中,建筑砌体结构的倒塌概率整体在 50%~100% 之间,第 1 次迭代时建筑砌体结构发生的倒塌概率为 60%,第 8 次迭代时建筑砌体结构发生的倒塌概率为 80%。对比可知,提出方法中,与真实的 37% 概率相比,说明提出方法的抗震性能分析更接近真实结果。

按照上文规则,进行多次试验,测试建筑砌体结构抗震性能评估结果与实际评估结果的拟合度。测试结果如图 4 所示。

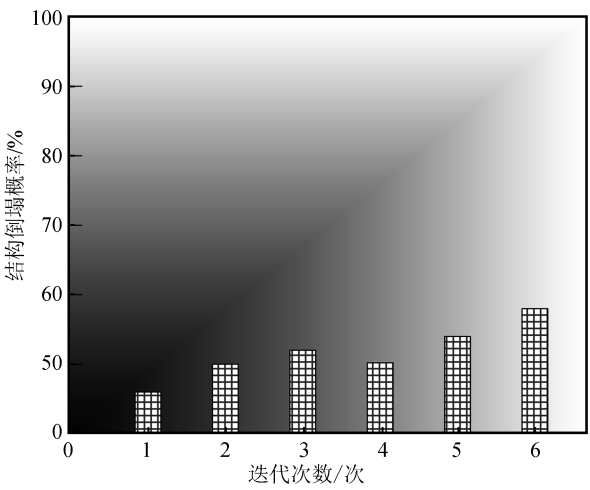


图 2 BIM 方法的建筑砌体结构抗震性能测试结果
Fig.2 Seismic performance test results of the masonry structures using the proposed method

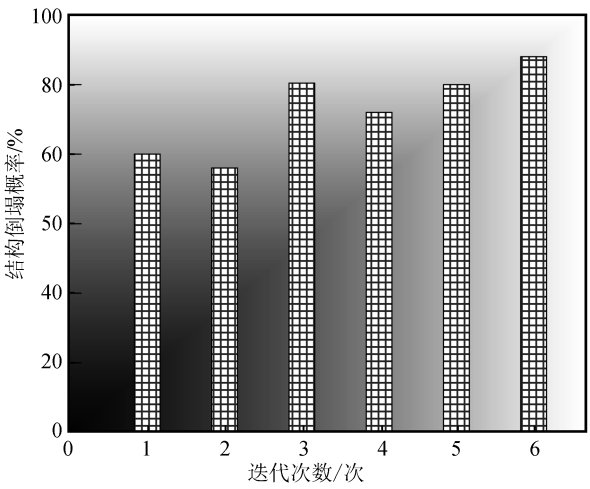


图 3 抗震设防烈度方法对建筑砌体结构抗震性能测试结果
Fig.3 Test results of seismic performance of the masonry structures using the seismic fortification intensity method

分析图 4(a)可知,12 次迭代中,得到的抗震性能评估结果与实际评估结果的拟合度在 70%~90% 之间,并且评估结果的最高拟合度为 90%。分析图 4(b)可知,12 次迭代中,建筑砌体结构抗震性能评估结果与实际评估结果的拟合度在 0%~70% 之间,评估结果的最高拟合度在 60% 以上,最低拟合度在 50% 以下,对比可知,本文提出方法的建筑砌体结构抗震性能评估结果与实际评估结果的拟合度较高,能够准确的得到抗震性能的评估结果,验证了本文提出方法的准确性。

3 结论

建筑砌体结构抗震性能的评估是建筑领域发

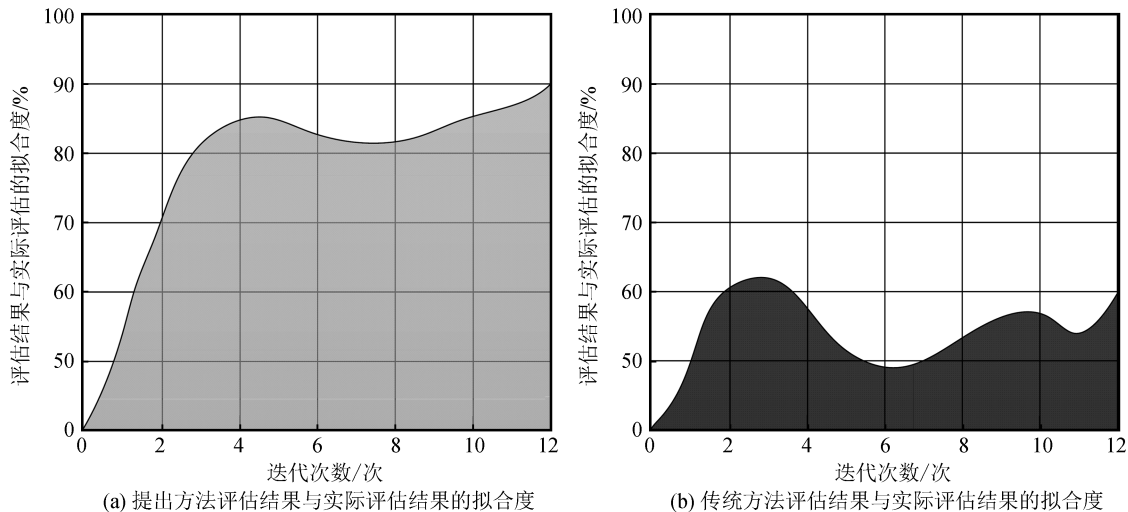


图 4 抗震性能评估结果与实际评估结果的拟合度

Fig.4 Fitting degree of seismic performance evaluation results and actual evaluation results

展和建设中的重要研究话题,加强结构的抗震性能,建筑砌体结构抗震性能的评估就变得十分重要。在使用基于 BIM 的建筑砌体结构抗震性能评估方法后,通过工程实例模拟来分析建筑砌体结构的抗震性能和评估结果与实际评估结果的拟合度的实验中,实验结果证明了提出方法具有较好的抗震性能,并且能够准确的得到抗震性能的评估结果。本文取得如下成果:

(1) 构建了全新的建筑抗震评价体系,该体系能够评估复杂建筑的抗震情况。

(2) 利用模糊数学原理对单一评估方法进行了补充,并且充分利用了 BIM 的优势。

(3) 实验证明,该方法评估结果较好,有利于实际的应用。

但是,本文的方法仅仅是完成高精度墨迹,还缺少广泛的应用基础,并且对于一些老旧建筑,其前期参数的复杂程度也限制了方法的效率。这也是本文需要下一步具体解决的问题。

参考文献(References)

- [1] 舒林,谭继可.基于 Perform-3D 的某高层建筑结构抗震性能评估[J].四川建筑科学研究,2016,42(4):88-92.
SHU Lin, TAN Jike. Seismic Performance Assessment of a High-rise Building Structure Based on Perform-3D[J]. Sichuan Building Science, 2016, 42(4): 88-92.
- [2] 王彬楠,卢文胜,徐章雄,等.单向阻尼器对某高层建筑结构抗震性能影响分析[J].结构工程师,2017,33(2):19-25.
WANG Binnan, LU Wensheng, XU Zhangxiong, et al. Analysis of One-way Damper Influence on Seismic Resistant Behavior of a

High-rise Building[J]. Structural Engineers, 2017, 33(2): 19-25.

- [3] 薛建阳,吴占景,隋龔,等.传统风格建筑钢结构双梁-柱中节点抗震性能试验研究及有限元分析[J].工程力学,2016,33(5):97-105.
XUE Jianyang, WU Zhanjing, SUI Yan, et al. Experimental Study and Finite Element Analysis of Seismic Behavior of Double-beam-Column Joints in Traditional-style Steel Structures[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 97-105.
- [4] 郭宏超,孙立建,刘云贺,等.柔性钢框架外挂再生混凝土墙结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(2):63-73.
GUO Hongchao, SUN Lijian, LIU Yunhe, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Flexible Steel Frame with Recycled Concrete External Wall[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2): 63-73.
- [5] 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.
- [6] 吴晓龙,李宏男,马荣全,等.设置金属阻尼器的预制装配式剪力墙结构抗震性能分析[J].地震工程与工程振动,2016,36(5):46-54.
WU Xiaolong, LI Hongnan, MA Rongquan, et al. Seismic Performance Analysis of Prefabricated Shear Wall Structure with Metal Damper[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(5): 46-54.
- [7] 朱保华,韩丽婷.建筑用玻化微珠保温混凝土剪力墙抗震结构设计[J].地震工程学报,2018,40(5):96-101.
ZHU Baohua, HAN Liting. Seismic Design of Glass Bead Thermal Insulation Concrete Shear Wall for Buildings[J]. China

- Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 96-101.
- [8] 徐略勤, 刘津成, 刘营, 等. 独塔宽幅斜拉桥基于能力需求比的抗震性能评估[J]. 桥梁建设, 2016, 46(4): 11-16.
- XU Lüeqin, LIU Jincheng, LIU Ying, et al. Seismic Performance Assessment of Cable-stayed Bridge with Single Pylon and Wide Deck Based on Capacity Demand Ratio Method[J]. Bridge Construction, 2016, 46(4): 11-16.
- [9] 艾在军, 刘柱, 路国运. 框架-核心筒超限结构的抗震性能评估[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(1): 21-29.
- AI Zaijun, LIU Zhu, LU Guoyun. Evaluation of Seismic Performances of Super High-rise Frame-Core Wall Structure[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(1): 21-29.
- [10] 王力, 李子奇, 冯莉, 等. 基于增量动力分析方法的非对称独塔斜拉桥 H 形桥塔抗震性能评估[J]. 铁道建筑, 2017, 57(8): 4-6.
- WANG Li, LI Ziqi, FENG Li, et al. Assessment on Seismic Performance of H-shaped Pylon Based on IDA for Cable-stayed Bridge with Asymmetric Single Pylon[J]. Railway Engineering, 2017, 57(8): 4-6.
- [11] 于天洋, 郭恩栋, 李倩. 中国大陆城镇供水管网区域差异及抗震性能评估[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(2): 108-114.
- YU Tianyang, GUO Endong, LI Qian. Regional Differences and Seismic Performance Evaluation of Urban Water Supply Pipeline Network in Mainland China[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(2): 108-114.
- [12] 刘强, 周瑞忠, 王妙芳. 基于能量判据的结构抗震性能实用评估分析方法[J]. 建筑科学, 2016, 32(11): 14-18.
- LIU Qiang, ZHOU Ruizhong, WANG Miaofang. Seismic Performance Evaluation Method of Structure Based on Energy Criterion[J]. Building Science, 2016, 32(11): 14-18.
- [13] 庄一舟, 王胜智, 樊争辉, 等. 扩孔微型桩抗震性能试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 510-515.
- ZHUANG Yizhou, WANG Shengzhi, FAN Zhenghui, et al. Experimental Investigation on Seismic Performance of Micro-pile with Predrilled Oversize hole[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 510-515.
- [14] 翟长海, 王晓敏, 孔璟常, 等. 砌体填充墙 RC 框架结构抗震性能研究现状及展望[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6): 1-13.
- ZHAI Changhai, WANG Xiaomin, KONG Jingchang, et al. Present Situation and Prospect of Research on Seismic Performance of Masonry Infilled Wall RC Frame Structure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(6): 1-13.
- [15] 高祥, 李幅昌, 王纪元, 等. 基于节点性能的屈曲约束支撑混凝土框架抗震性能分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(3): 7-11.
- GAO Xiang, LI Guochang, WANG Jiyuan, et al. Aseismic Performance of Buckling Restrained Brace Concrete Frame Based on the Performance of the Brace Joint[J]. Industrial Construction, 2017, 47(3): 7-11.