

宋良瑞,唐忠茂.点支式玻璃建筑结构地震损伤评估模型研究[J].地震工程学报,2019,41(6):1466-1471.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1466  
SONG Liangrui, TANG Zhongmao. A Seismic Damage Assessment Model for Point-Supported Glass Building Structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1466-1471. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1466

# 点支式玻璃建筑结构地震损伤评估模型研究

宋良瑞<sup>1</sup>, 唐忠茂<sup>2</sup>

(1. 四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000; 2. 四川农业大学, 四川 都江堰 611833)

**摘要:** 地震对建筑结构的损伤轻则影响建筑完整性,重则导致建筑崩塌。近几年,地震损伤评估问题得到地震工程研究领域的高度重视,但对点支式玻璃建筑结构的损伤评估研究较少。为此,构建一种点支式玻璃建筑结构地震损伤评估模型。采用基于HHT变换的结构损伤部位识别方法判断地震中点支式玻璃建筑损伤部位,建立点支式玻璃建筑结构地震损伤评估多元联系数模型,评估点支式玻璃建筑损伤部位的损伤情况。结果表明,该评估模型对某地区点支式玻璃建筑结构地震损伤评估情况与实际结果一致,且该模型可控性较强,评估范围全面,评估效率明显优于其他评估模型,应用价值较高。

**关键词:** 点支式; 玻璃建筑结构; 地震损伤; 评估; 损伤部位; 多元联系

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1466-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1466

## A Seismic Damage Assessment Model for Point-Supported Glass Building Structures

SONG Liangrui<sup>1</sup>, TANG Zhongmao<sup>2</sup>

(1. Sichuan Construction Vocational and Technical College, Deyang 618000, Sichuan, China;

2. Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611833, Sichuan, China)

**Abstract:** An earthquake may affect the integrity of building structures or cause their collapse. Recently, the damage assessment of point-supported glass building structures has been rarely investigated even though seismic damage assessment is highly valued in the field of seismic engineering. Therefore, an earthquake damage assessment model with respect to point-supported glass building structures has been constructed in this study. Further, the structural damage identification method based on the HHT transform was adopted to judge the damage location with respect to the point-supported glass buildings in case of an earthquake, and a multiple connection number model was established for conducting the seismic damage assessment of point-supported glass buildings to evaluate the damage to point-supported glass buildings. The experimental results denoted that the evaluation of the seismic damage of the point-supported glass building structure in a certain area is consistent with the actual results; furthermore, the proposed model

收稿日期: 2019-04-21

基金项目: 四川科学技术基金项目(2018GZ); 建筑结构减震隔震技术在建筑改造和加固中的应用(2016KJ33); 国家自然科学基金项目(61672331)

第一作者简介: 宋良瑞(1982-), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 副教授, 主要研究方向: 建筑结构。E-mail: songruiliangsr@163.com。

exhibits considerable controllability and a comprehensive evaluation scope, and the evaluation efficiency is obviously better than those of the remaining evaluation models.

**Keywords:** point-supported; glass building structure; earthquake damage; assessment; damage location; multiple connection

## 0 引言

点支式玻璃建筑结构地震损伤评估模型可在地震作用下评估点支式玻璃建筑破坏状态的无量纲指数,也是地震后对点支式玻璃建筑提出合理处理方案的关键理论依据。近几年,地震工程研究领域对结构地震破坏的量化模型进行大量研究,提出很多地震损伤评估方法,而此类地震损伤评估方法也存在相应的缺点。例如文献[1]从建筑弹塑性动力角度研究,分析超高层建筑结构的 benchmark 模型在地震影响下破坏情况与损伤情况,但该模型分析过程过于复杂,容易导致分析效率低下;文献[2]通过纤维等效法将建筑结构纤维化,设计生态复合墙板匀质等效弹性模型,但该模型仅能分析生态复合建筑结构,存在一定局限性;文献[3]提出地震损伤整体识别方法,主要通过时频分析与分形维数判断建筑的损伤情况,该方法的评估精度较高,但仅可评估剪切型建筑结构,不能

应用在点支式玻璃建筑结构的评估中。

针对上述分析问题,本文深入研究点支式玻璃建筑抗震问题,构建一种新的点支式玻璃建筑结构地震损伤评估模型,以期可以高精度、高效率的评估在地震环境下点支式玻璃建筑结构地震损伤情况。

## 1 点支式玻璃建筑结构抗震问题研究

点支式玻璃建筑结构是一种新型的组合作建筑形式,在实现对室内外空间分割的同时具有较高的通透性和采光性,且视觉效果美观。目前,点支式玻璃建筑结构已得到广泛应用。可以说,点支式玻璃建筑结构是由玻璃金属材料经加工处理、安装连接等过程所组成的能够承受荷载作用、满足预定功能的工程构筑物,通常包括带孔玻璃板、金属连接构件和基座三部分。

点支式玻璃建筑主要结构如图 1 所示。

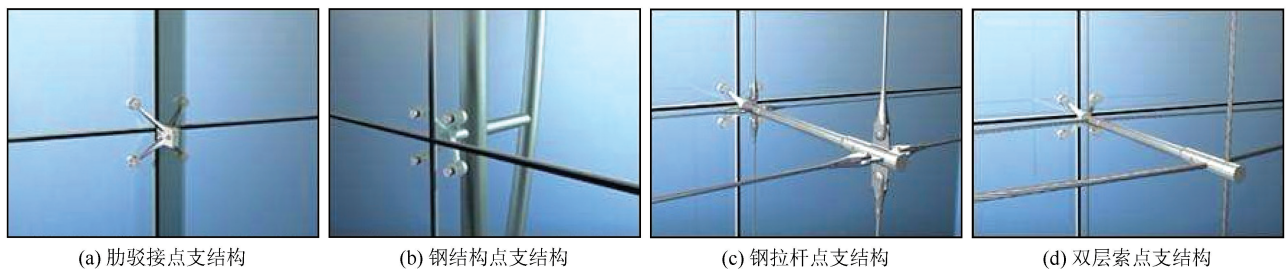


图 1 点支式玻璃建筑主要结构

Fig.1 Main structure of the point-supported glass building

### 1.1 基于 HHT 变换的结构损伤部位识别方法

#### 1.1.1 地震中点支式玻璃建筑结构模态响应分析

通过建筑结构模态分析原理,点支式玻璃建筑结构在地震时的振动响应即为每阶模态响应的和,则有:

$$y_n(t) = \sum_{i=1}^m y_{in}(t) \quad (1)$$

式中: $y_n(t)$  表示点支式玻璃建筑结构实际测量振动信号;点支式玻璃建筑结构模态数设为  $m$ ;第  $i$  阶模态第  $n$  测点位移响应设为  $y_{in}(t)$ 。由于实际测量获取的振动信号里,往往存在噪声信号  $a_p(t)$ ,那么点支式玻璃建筑结构实际测量振动信号是:

$$y_n(t) = \sum_{i=1}^m y_{in}(t) + a_p(t) \quad (2)$$

地震发生时,点支式玻璃建筑结构各个模态响应都存在相对集中的频率,也称窄带振动信号<sup>[4]</sup>。在实际测量振动信号里获取固有模态函数 IMF 最合适的方法即为 EMD 分解法。但是,如果直接通过 EMD 分解振动信号,容易发现模态混合问题<sup>[5]</sup>。为获取地震时点支式玻璃建筑结构模态响应信号,分解时需要导入间歇检测约束,详细流程是:

(1) 通过 Fourier 频谱分析信号  $y(t)$ ,判断点支式玻璃建筑结构测量信号里每阶模态响应的频率区间: $\bar{\omega}_{iL} < \bar{\omega}_i < \bar{\omega}_{iH} (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 。

(2) 通过间歇频率是  $\bar{\omega}_{iH}$  的 EMD 分解方法分析点支式玻璃建筑结构信号  $y(t)$ ,获取频率不小于  $\bar{\omega}_{iH}$  的点支式玻璃建筑结构单分量信号  $b_p (p = 1, 2,$

3, \dots, n)。

(3) 在点支式玻璃建筑结构原信号  $y(t)$  里过滤掉单分量信号  $b_p$ , 则获取的点支式玻璃建筑结构信号是:

$$y_i^*(t) = y(t) - \sum_{p=1}^n b_p \quad (3)$$

式中:点支式玻璃建筑结构测量信号里每阶模态响应的频率小于  $\bar{\omega}_{iH}$  的频率部分设成  $y_i^*(t)$ 。

(4) 将  $y_i^*(t)$  设成点支式玻璃建筑结构分析信号, 通过间歇频率是  $\bar{\omega}_{iL}$  的 EMD 分解方法分解  $y_i^*(t)$ , 获取点支式玻璃建筑结构测量信号里每阶模态响应的第  $i$  阶模态响应<sup>[6-8]</sup>。

(5) 反复操作步骤(2)~步骤(4), 获取点支式玻璃建筑结构测量信号中自高频至低频的所有模态响应<sup>[9]</sup>。

通过上述步骤不仅能够获取点支式玻璃建筑结构每阶模态向量, 还可以过滤所有噪音信号<sup>[10]</sup>。点支式玻璃建筑结构地震损伤分析信号被分解成若干个模态响应、若干 IMF 和余量之和<sup>[11]</sup>。则点支式玻璃建筑结构地震损伤分析信号  $y_n(t)$  为:

$$y_n(t) = \sum_{i=1}^m y_{in}(t) + \sum_{p=1}^n b_p(t) \quad (4)$$

### 1.1.2 利用 HHT 识别结构损伤部位

基于上节研究获取的点支式玻璃建筑结构地震损伤分析信号, 采用 HHT 识别结构损伤部位<sup>[12]</sup>。地震发生时, 点支式玻璃建筑结构损伤存在局部性与集中性, 则点支式玻璃建筑结构损伤一般集中在结构中任意一个局部区间中, 点支式玻璃建筑剩余部位的结构与构件损伤显著小于此部位损伤。例如地震里点支式玻璃建筑物的损坏一般集中在个别楼层。通过损伤部位振动中的特征, 研究

每个部位损伤前后相对振动能量的差异性, 正确识别详细损伤部位。

HHT 谱  $T(\omega, t)$  是:

$$T(\omega, t) = SB \sum_{i=1}^n c_j(t) d^{i \int_0^{\omega} c_j(t) dt} \quad (5)$$

式中:实部设成 SB;  $c_j(t)$  表示瞬时幅值函数, 瞬时相位角函数设成  $d^{i \int_0^{\omega} c_j(t) dt}$ 。HHT 谱用于分析点支式玻璃建筑结构地震损伤分析信号幅值在时-频域里的情况, 所以可以体现振动信号在非同一时刻、非同一频域区间里的能量分布。通过 HHT 谱可了解 HHT 边际谱  $t(\bar{\omega})$  是:

$$t(\bar{\omega}) = \int_0^i T(\omega, t) dt \quad (6)$$

比较点支式玻璃建筑每个结构损伤前后边际谱  $t(\bar{\omega})$  的变动可以判断点支式玻璃建筑结构在地震中的损伤位置<sup>[13]</sup>。

## 1.2 点支式玻璃建筑结构地震损伤评估多元联系数模型

针对获取的点支式玻璃建筑结构损伤位置, 将集对分析原理应用在点支式玻璃建筑结构地震损伤评估中, 即将某个点支式玻璃建筑结构地震损伤评估指标与已有点支式玻璃建筑结构地震损伤评估标准集合建立为一个集对。差异度系数最小值与最大值分别设定为 -1、1。

### (1) 评估指标体系的构建

根据点支式玻璃建筑结构在地震中的损伤位置信息, 构建位移-能量的多重指标, 判定评估等级标准, 构建点支式玻璃建筑结构地震损伤评估的多元联系数模型。表 1 为点支式玻璃建筑结构地震损伤评估指标体系的标准设定情况。

表 1 点支式玻璃建筑结构地震损伤评估指标体系的标准设定  
Table 1 Standard setting of earthquake damage assessment index system for the point-supported glass building structure

地震损伤 评估指标	损伤 情况	整体损伤 指数	最大层间 位移角	滞回耗能 循环数量	楼层能量 集中指数	
轻震	一级	基本无损	[0, 0.11]	[0, 1/451]	51~31(0~0.5)	1.1~2.074+0.047 n
	二级	轻度	[0.11, 0.31]	[1/451, 1/301]	31~21(0.5~0.7)	2.074+0.047 n~2.855+0.085 n
中震	三级	中度	[0.31, 0.66]	[1/301, 1/151]	21~11(0.7~0.9)	2.855+0.085 n~3.347+0.114 n
	四级	高度	[0.66, 0.86]	[1/151, 1/51]	11~5(0.9~0.93)	3.334 7+0.114 n~3.555+0.133 n
大震	五级	倒塌	[0.86, 1.01]	[1/51, 1/21]	5~1(0.93~1.1)	3.555+0.133~6.1

### (2) 指标权重的确定

综合专家给出的分析观点, 通过比较分析点支式玻璃建筑结构地震损伤评估中每个评估指标的重要性, 获取指标层判断矩阵, 并测试判断矩阵的一致

性, 获取指标权重依次是 0.418 0、0.224 7、0.248 6、0.109 1。

### (3) 模型的构建

每个评估指标的等级设定是“基本完好”、“轻度

损伤”、“中度损伤”、“高度损伤”以及“倒塌”五种级别。基于上述内容设定评估目标空间  $A=[\text{点支式结玻璃建筑结构地震损伤评估指标}]$ , 属性空间  $B=[\text{点支式结玻璃建筑结构评估等级}]$ ,  $n(1 \leq n \leq 5)$  表示一级系统, 最后构建每个指标评估的多元连续数  $R(A \sim B)$ , 分析评估模型分级准则和评估指标间的数量关联性<sup>[14]</sup>。分析流程分为三步:

第一步:点支式玻璃建筑结构地震损伤评估等级的指标中存在多类指标,需变换为成本型指标后分析。

第二步:计算点支式结玻璃建筑结构地震损伤的综合评估多元联系数。根据联系度的大小判断支式结玻璃建筑结构地震损伤等级。多元联系度为:

$$R = x + y_1 d_1 + y_2 d_2 + y_3 d_3 + z_1 e_1 + z_2 e_2 \quad (7)$$

式中:  $x, y_1, y_2, y_3, z_1, z_2 \in [0, 1]$ ,  $x + y_1 + y_2 + y_3 + z_1 + z_2 = 1$ ,  $x$  描述统一度,  $y_1, y_2, y_3$  描述差异度; 其中细化成偏同差异度、中差异度以及偏差异度; 对立度依次设成  $z_1$  和  $z_2$ , 细化偏异对力度以及对力度; 偏同差异度系数、中差异度系数、偏反差异度系数、偏异对立度系数以及对立度系数依次设成  $d_1, d_2, d_3, e_1, e_2$ 。

第三步:点支式玻璃建筑结构地震损伤综合评估等级。

使用均权综合方法计算点支式玻璃建筑结构地震损伤评估的联系数,通过特殊值法判断样本间的差异度系数,根据五级评价标准的同、异、反关系,获取评估等级的联系数,按照联系度的大小即可评估点支式玻璃建筑结构地震损伤等级<sup>[15]</sup>,模型表述如下:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{nk} \quad (8)$$

式中:  $k$  表示第  $k$  个点支式玻璃建筑结构地震损伤评估样本。

## 2 模型应用效果评估

为验证上述模型有效性,将上述评估模型应用于某地区点支式玻璃建筑结构地震损伤评估中。从三方面进行评估:整体损伤指数、最大层间位移角和滞回耗能循环系数。结构损伤程度共分为五级:基本完好(一级)、轻微损伤(二级)、中等损伤(三级)、严重损伤(四级)、倒塌(五级)。损伤评估指标各级标准区间如表 2 所列。具体评估结果如表 3 所列。

表 2 各级损伤评估指标标准区间

Table 2 Standard interval for each level of damage assessment index

损伤程度	一级	二级	三级	四级	五级
整体损伤指数	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.7	0.7~0.9	0.9~1
最大层间位移角	0~1/450	1/450~1/300	1/300~1/200	1/200~1/50	1/50~1/10
滞回耗能循环系数	50~31	30~21	20~11	10~5	5~0

表 3 地震损伤评估结果

Table 3 Earthquake damage assessment result

评估次数	整体损伤指数	最大层间位移角/(°)	滞回耗能循环系数	损伤情况	评估等级	损伤评定等级
1	0.29	1/45	25	轻度	二级	二级
2	0.29	1/45	26	轻度	二级	二级
3	0.29	1/45	25	轻度	二级	二级
4	0.29	1/45	25	轻度	二级	二级
5	0.29	1/45	26	轻度	二级	二级
6	0.29	1/45	25	轻度	二级	二级
7	0.29	1/45	25	轻度	二级	二级

分析表 3 可知,评估模型对该地区点支式玻璃建筑结构地震损伤评估等级为二级,且与实际损伤等级相符。说明本文模型对点支式玻璃建筑结构地震损伤评估有效可行。

为了进一步测试本文模型的性能优势,采用所提模型、benchmark 模型以及地震损伤评估模型进行对比。

### (1) 评估全面性分析

选取该地区不同高度点支式玻璃建筑进行地震损伤评估,此类建筑依次是 10 层、15 层、20 层、25 层、30 层、35 层、40 层。采用三种模型对这 7 种不同高度的支式玻璃建筑进行地震损伤评估,测试三种模型的评估全面性并进行对比,对比结果见表 4 所列。

表4 不同高度点支式玻璃建筑结构地震损伤评估结果

Table 4 Seismic damage assessment of point-supported glass building structures with different heights

楼层高度/层	所提模型	Benchmark 模型	地震损伤评估模型
10	86.55%	75.89%	81.23%
15	89.32%	69.77%	86.22%
20	89.00%	78.76%	83.19%
25	91.45%	81.98%	85.23%
30	82.38%	72.76%	81.23%
35	91.73%	67.89%	84.11%
40	87.96%	75.77%	80.22%
均值	88.34%	74.69%	83.06%

分析表4数据可知,采用三种模型对7种不同高度的点支式玻璃建筑进行地震损伤评估时,所提模型的评估全面性均值为88.34%,明显高于另外两种模型的评估全面性。由此可知,所提模型的评估较为全面。

### (2) 模型可控性分析

采用三种模型对10层、15层、20层、25层、30层、35层、40层这7种不同高度的点支式玻璃建筑进行地震损伤评估,测试三种模型的可控性并进行对比,对比结果如图2所示。

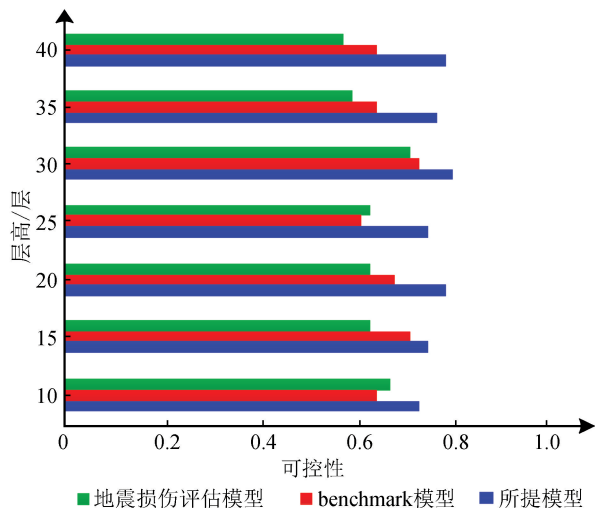


图2 三种模型评估可控性对比结果

Fig.2 Comparison between assessment controllability of three models

分析图2可知,所提模型的可控性均在70%以上,最高可达到80%,benchmark模型和地震损伤评估模型的可控性相对较低,模型易出现崩溃,导致评估过程易出现故障,影响评估工作的进展。由此可知,本文模型的操作性较好。

### (3) 评估效率

评估效率是评估模型的核心性能评估指标,采

用三种模型10层、15层、20层、25层、30层、35层、40层这7种不同高度的点支式玻璃建筑进行地震损伤评估,统计三种模型的评估耗时情况,结果如图3所示。

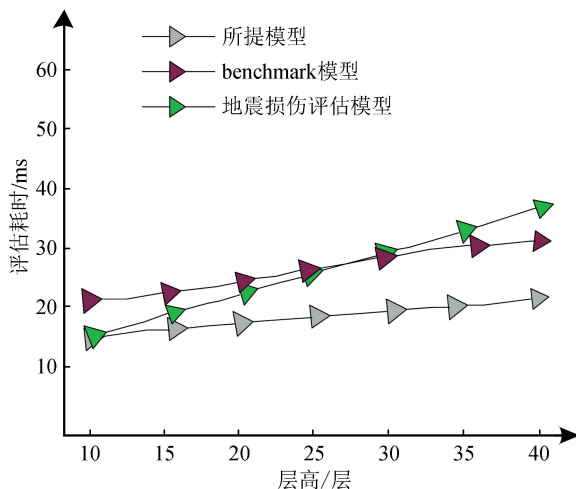


图3 三种模型评估耗时对比结果

Fig.3 Time-consuming comparison of three models

分析图3数据可知,所提模型对10层、15层、20层、25层、30层、35层、40层这7种不同高度的点支式玻璃建筑结构地震损伤评估时,耗时在14~18 ms范围内,benchmark模型的最高评估耗时为28 ms,地震损伤评估模型的最高评估耗时为35 ms。经对比可知,所提模型的评估耗时最短,具有较高的评估效率。

## 3 结论

如何判断地震作用下建筑结构的损伤程度,是地震工程研究领域急需解决的难题。针对点支式玻璃建筑结构设计一种新的点支式玻璃建筑结构地震损伤评估模型,通过本文模型的实验测试以及与benchmark模型、地震损伤评估模型的对比,获取以下几点结论:

(1) 本文模型采用基于HHT变换的结构损伤部位识别方法,判断地震中点支式玻璃建筑损伤部位,可达到“因材施教”高精度评估;

(2) 通过实验验证,本文模型可有效评估点支式玻璃建筑结构地震损伤情况。采用本文模型、benchmark模型、地震损伤评估模型对7种不同高度的点支式玻璃建筑进行地震损伤评估时,本文模型的评估全面性均值为88.34%、可控性保持在70%以上,且评估耗时在14~18 ms范围内,评估性能显著,可为地震损伤评估相关问题提供可靠

的理论依据。

## 参考文献(References)

- [1] 吕西林,姜淳,蒋欢军.超高层建筑结构 benchmark 模型的地震损伤分析[J].建筑结构学报,2016,37(9):1-7.  
LÜ Xilin,JIANG Chun,JIANG Huanjun.Seismic Damage Analysis of a Benchmark Model for Mega-tall Buildings[J].Journal of Building Structures,2016,37(9):1-7.
- [2] 张奇,李凯,张荫,等.生态复合墙结构地震损伤模型研究[J].工程抗震与加固改造,2016,38(4):121-125.  
ZHANG Qi,LI Kai,ZHANG Yin,et al.Research on Seismic Damage Model of Ecological Composite Wall Structure[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2016,38(4):121-125.
- [3] 陶冬旺,李惠.剪切型建筑结构地震损伤整体识别方法[J].中国科技论文,2016,11(13):1507-1510.  
TAO Dongwang,LI Hui.Holistic Estimation Method of Structural Seismic Damage for Shear-type Buildings[J].China Sciencepaper,2016,11(13):1507-1510.
- [4] 裴强,郭少霞,崔迪.STFT 变换在高层框架结构地震损伤程度识别中的应用[J].地震研究,2017,40(2):264-270.  
PEI Qiang,GUO Shaoxia,CUI Di .Application of STFT in High-rise Frame Structural Damage Degree Detection under Earthquake[J].Journal of Seismological Research,2017,40(2):264-270.
- [5] 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.
- [6] XIONG C,LU X Z,LIN X C,et al.Parameter Determination and Damage Assessment for THA-Based Regional Seismic Damage Prediction of Multi-Story Buildings [J]. Journal of Earthquake Engineering,2017,21(3):461-485.
- [7] 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.
- [8] XIAO S J,XU L H,LU X.Nonlinear Damage Model for Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Frame Members and Structures[J].Acta Mechanica Sinica,2018,34(5):949-962.
- [9] 杜娅妮.横向地震波冲击下建筑结构稳定性变化分析[J].华南地震,2019,39(1):104-109.  
DU Yani.Stability Analysis of Building Structures Subjected to Transverse Seismic Waves[J].South China Journal of Seismology,2019,39(1):104-109.
- [10] EL ZAREEF M A.Seismic Damage Assessment of Multi-story Lightweight Concrete Frame Buildings Reinforced with Glass-fiber Rods [J]. Bulletin of Earthquake Engineering,2017,15(4):1451-1470.
- [11] 何浩祥,陈奎,王小兵.梁端填充低屈服点钢材的梁柱连接减震性能试验与损伤分析[J].建筑结构学报,2017,38(5):1-10.  
HE Haoxiang,CHEN Kui,WANG Xiaobing.,Experimental Research and Damage Analysis on Vibration Absorption Performance of Filled Steel Connection[J].Journal of Building Structures,2017,38(5):1-10.
- [12] 单德山,周筱航,杨景超,等.结合地震易损性分析的桥梁地震损伤识别[J].振动与冲击,2017,36(16):195-201.  
SHAN Deshan,ZHOU Xiaohang,YANG Jingchao,et al. Bridge Seismic Damage Identification Based on Seismic Fragility Analysis[J].Journal of Vibration and Shock,2017,36(16):195-201.
- [13] 马东辉,王雷明,王威,等.建筑结构地震连续倒塌影响距离仿真模拟研究[J].四川建筑科学研究,2016,42(6):110-115.  
MA Donghui,WANG Leiming,WANG Wei,et al.Simulation Study on the Influence of Seismic Continuous Collapse of Building Structure[J].Sichuan Building Science,2016,42(6):110-115.
- [14] 高大峰,杨勇,邓红仙,等.基于能量耗散的多层木结构古建筑的地震破坏评估[J].地震研究,2016,39(2):340-350,176.  
GAO Dafeng,YANG Yong,DENG Hongxian,et al.Earthquake Damage Assessment of Ancient Architectue with Multi-layer Wooden Structures Based on Energy Dissipation [J].Journal of Seismological Research,2016,39(2):340-350,176.
- [15] 李楠,汪班桥,门玉明,等.压力型锚杆支护滑坡的地震动响应特性研究[J].地质力学学报,2018,24(4):490-497.  
LI Nan,WANG Banqiao,MEN Yuming,et al.Study on Dynamic Response of Landslide Supported by Pressure-type Anchor under Earthquake[J].Journal of Geomechanics,2018,24(4):490-497.