

关宏洁, 王群, 田晶, 同高宽比弹塑性隔振建筑结构的抗震性能试验研究[J]. 华南地震, 2019, 39(2): 124–129. [GUAN Hongjie, WANG Qun, TIAN Jing. Experimental Study on Seismic Behavior of Elasto-plastic Vibration Isolated Building Structures with the Same Height-Width Ratio[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(2): 124–129]

同高宽比弹塑性隔振建筑结构的抗震性能试验研究

关宏洁¹, 王 群¹, 田 晶²

(1. 西安欧亚学院 人居环境学院, 西安 710065; 2. 西安市建筑设计研究院有限公司, 西安 710054)

摘要: 研究以某同高宽比弹塑性隔振建筑结构为工程实例, 采用 SAP2000 软件构建了同高宽比弹塑性隔振建筑结构的有限元模型, 并进行了模型材料和相应参数选取; 在此基础上, 利用循环侧推分析隔振建筑结构中各构件的内力及变形情况, 建立隔震建筑结构损失模型, 同时为了提高其抗震性评估精准度, 采用动力弹塑性顶层位移情况反应隔震建筑结构的抗震性能。工程实例分析结果表明, 普通建筑结构主要控制层间位移响应, 无论是在 8 度频发地震作用下还是在 8 度特大地震作用下, 隔震建筑结构的顶部加速度响应均远远小于普通建筑结构, 且仍然处于完全弹性工作状态, 结构构件并未发生破坏, 保证了建筑内部人们的生命财产安全, 同时便于震后快速修复, 相比于普通建筑结构, 同高宽比弹塑性隔振建筑结构的抗震性能更优。

关键词: 同高宽比; 弹塑性; 隔振建筑结构; 抗震性能; 试验

中图分类号: TU234

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)02-0124-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.02.018

Experimental Study on Seismic Behavior of Elasto-plastic Vibration Isolated Building Structures with the Same Height-Width Ratio

GUAN Hongjie¹, WANG Qun¹, TIAN Jing²

(1. School of Human Settlements Environment, Xi'an Eurasian University, Xi'an 710065, China; 2. Xi'an Architectural Design Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Taking an elastic-plastic vibration isolation structure with the same aspect ratio as an engineering example, the finite element model of the structure with the same aspect ratio is constructed by SAP2000 software, and the material and parameters of the model are selected. On this basis, the internal force and deformation of each component in the structure are analyzed by cyclic lateral pushing, and the loss model of the structure is established. Meanwhile, in order to improve the accuracy of seismic performance evaluation, dynamic elastic-plastic top-story displacement is used to reflect the seismic performance of isolated buildings.

收稿日期: 2018-05-30

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(KL-SEER-ME-201203)

作者简介: 关宏洁(1980-), 女, 硕士研究生, 讲师, 主要研究领域为结构工程。

E-mail: guanhongjieyaya@126.com.

The analysis results of engineering examples show that the common building structure mainly controls the inter-story displacement response, the top acceleration response of the isolated building structure is far less than that of the ordinary building structure under 8-degree frequent earthquake or 8-degree extreme earthquake, and it is still in full elastic working state. The structural components are not destroyed, which guarantees the lives of people inside the building. The property is safe and easy to be repaired quickly after earthquake. Compared with the ordinary building structure, the elastic-plastic vibration isolation structure with the same height-width ratio has better seismic performance.

Keywords: Same aspect ratio; Elastic-plastic; Vibration isolation building structure; Seismic performance; Test

0 引言

我国是一个地震高发的国家,在很早之前就开展了对建筑结构的抗震性能研究。自新中国成立以来,我国累计有超过 20 个省份发生过一百次以上的破坏性地震灾害,由于地震灾害发生死亡的人数将近 30 万,超过我国所有灾害总数的一倍还多。由于地震具有破坏性大、波及范围广、次生灾害严重的特点,给建筑结构造成的直接经济损失和间接经济损失不可估量,且难以修复^[1-2]。

另外,由于地震具有较强的随机性和突发性特点,致使地震灾害的预测难度较高,加上地震本身是一个特别复杂的过程,地震过程中的许多参数很难确定,这些不确定因素给建筑结构带来的破坏情况极其复杂,普通建筑结构实际承受的地震力通常会超过设计地震力许多,以致普通建筑结构地震设计失效。并且随着社会经济的发展,以及人们对建筑结构的性能要求日益提高,这对普通建筑结构的抗震性能提出了更大地挑战^[3-4]。普通建筑结构的抗震性能设计思路为:当形变在其弹塑性范围内时主要依靠阻尼耗能,在部分建筑构件进入弹塑性范围后则依靠构件的形变来耗能,对于不同建筑结构在相同烈度地震作用力下,地震力不是固定值,与建筑结构本身的弹塑性密切相关,地震作用力下建筑结构本身的破坏情况也有所差异,因此设计建筑结构抗震性能是要保证起具有足够的安全储备^[5]。特别是在高烈度地震区域,仅仅依靠建筑结构本身的地震承载力和刚度来抵御地震灾害是不现实的,在这一现实背景下,人们开始关注隔震技术的应用,与此同时出现了一种新型建筑结构—同高宽比弹塑性隔振建筑结构,研究针对同高宽比弹塑性隔振建筑结构的抗震性能与普通建筑结构的抗震性能做了一系列对比测试,证明了隔震建筑结构在抵御地震方面的优越性^[6]。

1 同高宽比弹塑性隔振建筑工程概况

某同高宽比弹塑性隔振建筑结构用于北方一二线城市,该建筑设计使用年限为 50 年,可抗 8 级地震,该建筑结构总层数为 22 层,其中有两层为地下室,建筑结构总高度为 84.6 m^[7]。

1.1 同高宽比弹塑性隔振建筑结构有限元模型

(1)该同高宽比弹塑性隔振建筑结构采用现浇混凝土结构,同时利用缩减自由度的刚性楼板模拟该建筑结构楼板,为了提高建筑结构中剪力墙中钢筋对地震波的承载力,剪力墙则利用壳单元模拟。为了降低建筑结构楼板刚度对中梁刚度的放大影响,采用属性修正的方式放大建筑结构中梁,进行建筑结构梁、柱采用梁单元模拟;另外对于建筑结构中的混凝土材料,则选取 Mander 模型模拟结构箍筋的影响以约束混凝土。同时利用 SAP2000 软件中提供的具有丰富弹塑性分析单元的软件来模拟建筑结构中的阻尼器和隔震构件等^[8]。

上述工程属于高层复杂建筑结构,根据抗震规范中的内容可知,分析该类建筑结构的抗震性能时要充分考虑连接非线性以及结构动力时程。

(2)模型材料参数选取

采用 SAP2000 软件中提供的各国建筑结构抗震性材料用于分析同高宽比弹塑性隔振建筑结构的抗震性能。

1.2 同高宽比弹塑性隔振建筑结构的抗震性能评估

基于上述构建的同高宽比弹塑性隔振建筑结构有限元模型,采用循环侧推分析隔振建筑结构中各构件的内力及变形情况,结构中各个结点转角的变化情况以及隔振建筑结构弹塑性较分布特征,总结隔振建筑结构的脆弱部位以及抗震性能的规律^[9]。

(1)循环侧推分析法的应用

假设 D 表示同高宽比弹塑性隔振建筑结构的损失指数; K_{final} 、 $K_{initial}$ 表示隔震建筑结构基层剪力-顶层位移关系曲线的相应切线斜率, 则可得隔震建筑结构损失模型如下:

$$D=1-(K_{final}/K_{initial}) \tag{1}$$

则可得隔震建筑结构中单个构件的刚度损伤建模公式如下:

$$D^i=1-(K_{final}^i/K_{initial}^i) \tag{2}$$

其中, D^i 表示隔震建筑结构构件 i 的刚度损伤指数; K_{final}^i 、 $K_{initial}^i$ 为采用循环侧推分析法计算得到的隔震建筑结构构件 i 的杆端力-位移图中的相应切线斜率。

根据上述计算可以将同高宽比弹塑性隔振建筑结构的刚度损伤程度划分为四个等级, 损伤指数变化区间为 0~1, 其中, 当 $D=0\sim0.15$ 时, 为一级损伤, 表示隔震建筑结构为轻微损伤; 当 $D=0\sim0.15\sim0.30$ 时, 为二级损伤, 表示隔震建筑结构为中等破坏, 但仍旧可以修复; $D=0.30\sim0.80$ 为三级损伤, 表示隔震建筑结构为严重破坏, 修复的可能性极小; 当 $D>0.80$ 时, 为四级损伤, 表示隔震建筑结构倒塌, 不可修复。

循环侧推分析法的对同高宽比弹塑性隔振建筑结构的抗震性能评估较为粗糙, 但是由于隔震建筑结构在地震力作用下的损伤程度对应的损伤知识有较大波动范围, 由此界定的隔震建筑结构抗震性能状况存在的偏差较小。

(2)利用同高宽比弹塑性隔振建筑结构的动力弹塑性顶层位移情况评估其抗震性能

为了使得评估结果更加精准, 依据我国建筑结构抗震设计规范相关规定, 计算同高宽比弹塑性隔振建筑结构顶层的等效位移角 θ , 作为评估整个结构抗震性能的重要指标^[9], Δ_i 假设表示隔震建筑结构顶层位移; H 表示建筑结构总高度; 则可得结构等效位移角 θ 的计算公式如下:

$$\theta=\Delta_i/H \tag{3}$$

2 工程实例分析

参与实验测试的高宽比弹塑性隔振建筑结构支座通常选取橡胶支座, 其物理特性参数如表 1 所示。

选取合适的地震波对于分析同高宽比弹塑性隔振建筑结构的抗震性能具有重要作用。研究选取比较具有代表性的 E1-Centrol(NS, 1040) 波, 具体如图 1 所示。

表 1 隔振建筑结构支座物理特性
Table 1 Physical characteristics of bearings of vibration isolated building structures

参数型号	LRB600	LRB700	LNR700	LNR800
橡胶支座总厚度/mm	120	150	120	170
橡胶支座总高度/mm	195	264	226	292
橡胶支座有效直径/mm	700	800	800	900
屈服力/kN	97.08	140.78	-	-
屈服刚度/(kN/m)	1400	1500	-	-
水平等效刚度/(kN/m)	2257	2434	1670	1856
竖向刚度/(kN/m)	2910	3460	3910	4060
等效阻尼比/%	24	24	-	-

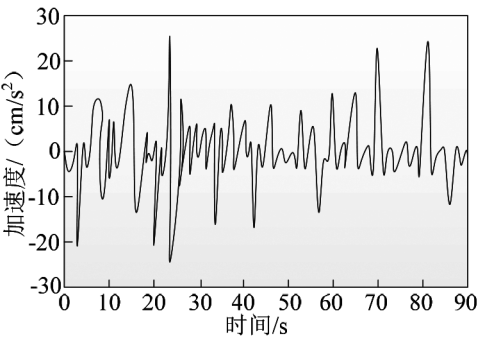


图 1 选取的地震波频谱

Fig.1 Seismic wave spectrum selected

2.1 同高宽比弹塑性隔振建筑结构的动力特性

如表 2 所示给出了高宽比弹塑性隔振建筑结构和普通建筑结构在如图 1 所示地震波作用下的自振周期和振型。根据表 2 的对比结果可以看出, 高宽比弹塑性隔振建筑结构的自振周期远远大于普通结果的自振周期, 说明隔震建筑结构体系在地震波作用下变柔, 地震作用力会相应减弱, 隔震建筑结构振型为水平方向平动, 竖直方向平动和扭转, 隔震建筑结构的质心与刚心具有较好的对称性。

表2 不同建筑结构在地震波作用下的动力特性
Table 2 Dynamic characteristics of different building structures under seismic waves

结构模态	普通建筑结构自振	隔震建筑结构自振
	周期/s	周期/s
1	0.7439	1.9004
2	0.7439	1.9003
3	0.6094	0.8567

2.2 同高宽比弹塑性隔振建筑结构的抗震性能试验

根据我国建筑抗震设计规范的相关规定对同高宽比弹塑性隔振建筑结构施加荷载,如表3所示给出了地震加速度时程最大值。

表3 地震加速度时程最大值
Table 3 Maximum seismic acceleration time-history

地震烈度	8度/(cm/s ²)
频发地震	70
特大地震	400

(1)同高宽比弹塑性隔振建筑结构的加速度响应
选取同高宽比弹塑性隔振建筑结构顶部节点,分别对比其与普通建筑结构顶部在8度频发地震和8度特大地震作用下的加速度时程变化情况,对比结果如图2和图3所示。

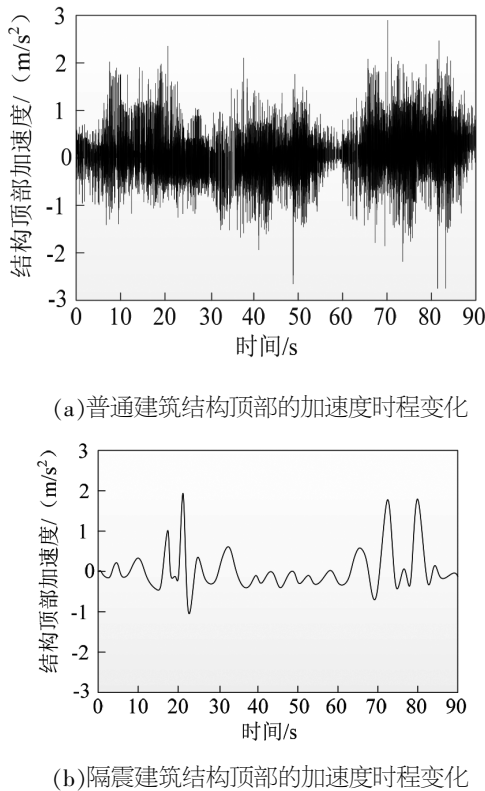


图2 不同建筑结构在频发地震作用下的加速度响应
Fig.2 Acceleration response of different building structures under frequent earthquakes

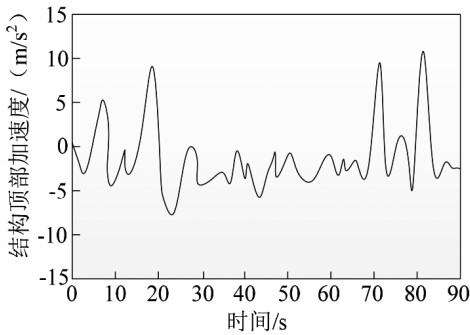
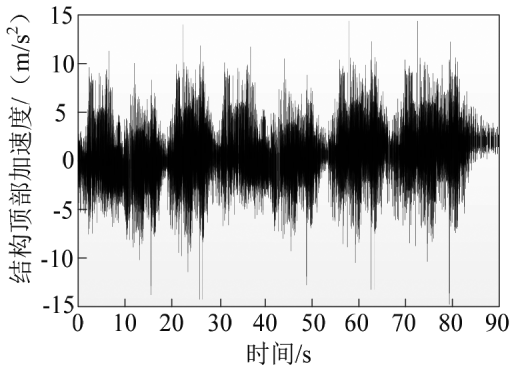


图3 不同建筑结构在特大地震作用下的加速度响应
Fig.3 Acceleration response of different building structures under severe earthquake

观察图2和图3的实验结果可以得到以下结论:

①8度频发地震作用下,同高宽比弹塑性隔振建筑结构的加速度时程变化远远低于普通建筑结构,加速度响应最大值与原始地震波峰出现位置基本一致,且加速度时程曲线与地震原始波形比较相近;

②8度特大地震作用下,隔振建筑结构的加速度响应也是远远小于普通建筑结构,降低幅度与8度频发地震情况相近;

③由于隔震建筑结构中存在橡胶隔震支座使得整体结构加速度响应明显改善,说明隔震建筑结构在地震作用下给人们带来的震动感会明显削弱,同时当地震发生时,隔震建筑结构也会延长人们逃生的时间。

(2)建筑结构位移响应

如图4和图5所示分别给出了普通建筑结构和隔震建筑结构在8度频发地震和8度特大地震作用下顶部位移时程变化情况。

根据图4和图5可以得到以下结论:

①无论是在8度频发地震作用下还是在8度特大地震作用下,同高宽比弹塑性隔振建筑结构

的位移响应变化均远远大于普通建筑结构,位移响应最大值与原始地震波形极为相似,而同高宽比弹塑性隔振建筑结构的位移响应最大值与原始地震波形相差较大。

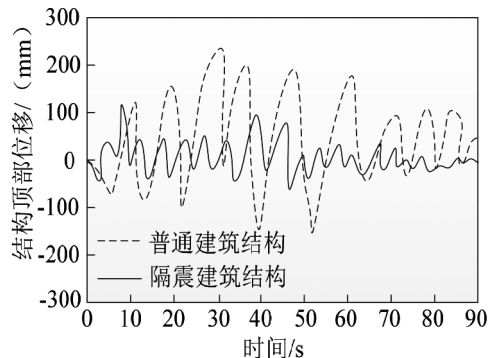


图 4 8 度频发地震作用下顶部位移时程变化情况
Fig.4 Time-history variation of top position under 8-degree frequent earthquakes

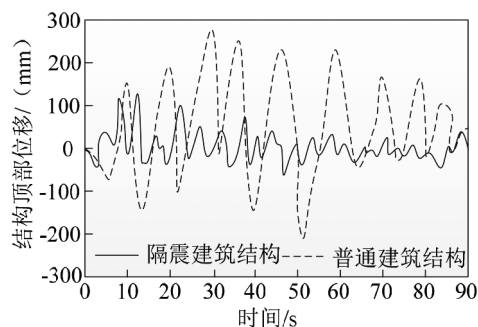


图 5 8 度特大地震作用下顶部位移时程变化情况
Fig.5 Time-history variation of top position under 8-degree earthquake

②由于隔震结构中的存在橡胶支座,在面临地震作用时整体结构刚度变小,体系更加柔软。

(3)层间位移响应

如图 6 和图 7 所示给出了 8 度频发地震和 8 度特大地震作用下同高宽比弹塑性隔振建筑结构与普通建筑结构的层间位移时程变化情况。

分析图 6 和图 7 的实验结果可知,建筑结构层间位移时程变化情况与原始地震波形变化曲线类似,但无论是在 8 度频发地震作用下还是在 8 度特大地震作用下,虽然同高宽比弹塑性隔振建筑结构的顶部位移均显著高于普通建筑结构,但同高宽比弹塑性隔振建筑结构的层间位移却均小于普通建筑结构,这说明由于隔震建筑中存在橡胶隔震支座,结构具有足够的安全储备,抗震性能更优。

(4)建筑结构顶点位移—基底剪力时程变化

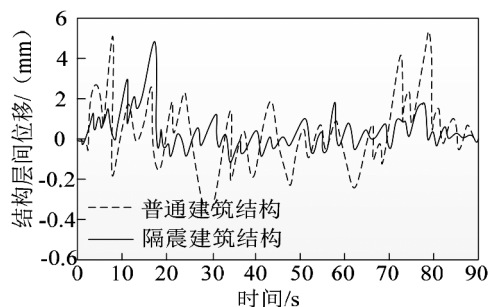


图 6 8 度频发地震作用下不同结构的层间位移变化
Fig.6 Inter-story displacement changes of different structures under 8-degree frequent earthquakes

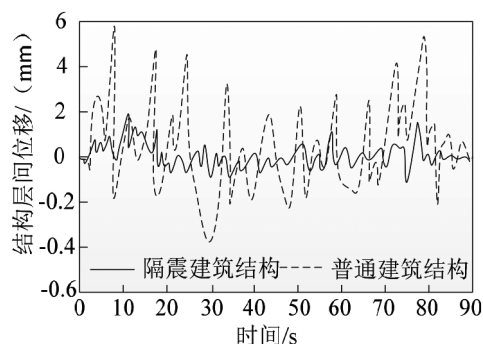


图 7 8 度特大地震作用下不同结构的层间位移变化
Fig.7 Inter-story displacement changes of different structures under 8-degree earthquake

如图 8 和图 9 所示分别给出了 8 度频发地震和 8 度特大地震作用下同高宽比弹塑性隔振建筑结构与普通建筑结构的顶点位移—基底剪力时程变化情况。

分析图 8 和图 9 可以得到以下结论:

① 无论是在 8 度频发地震作用下还是在 8 度特大地震作用下,普通建筑结构已经进入塑性阶段,安全性能大大降低,但隔震结构的顶部却仍然处于绝对弹性阶段,这说明同高宽比弹塑性隔振建筑不仅能够确保在强烈地震波作用下一些重要构件、内部重要设备设施的正常使用,而且能够保证建筑内部人们的生命财产安全。

② 由于同高宽比弹塑性隔振建筑无论是在 8 度频发地震作用下还是在 8 度特大地震作用下都处于弹性工作状态,设计其顶部结构时的抗震要求相比于普通建筑结构略微宽松。

③ 在强烈地震灾害发生后由大量建筑结构需要修复以保证震后人们有一个安全、可靠的居住环境,普通建筑结构的震后修复工作耗时较长,修复难度较大;同高宽比弹塑性隔振建筑只需要在震后检查隔震支座是否发生损伤,并根据其损伤程度决定是否更换即可很快地恢复

建筑结构的正常使用,从这一层面来说同高宽比弹塑性隔振建筑结构的抗震性能远远优于普通建筑结构。

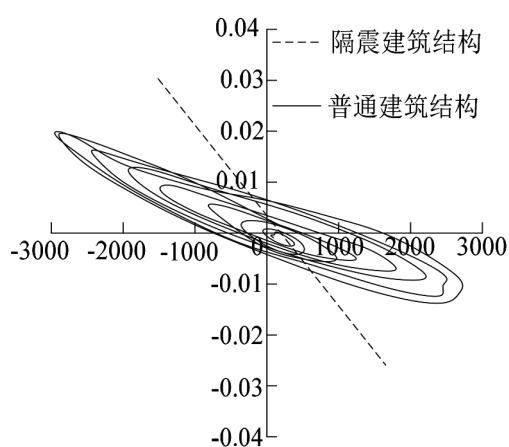


图8 频发地震下不同结构的顶点位移-基底剪力
Fig.8 Vertex displacement-base shear of different structures under frequent earthquakes

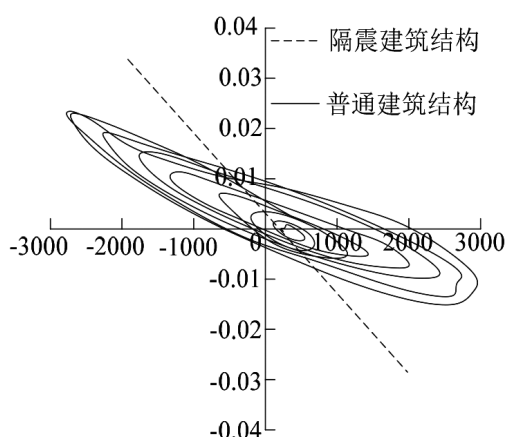


图9 特大地震下不同结构的顶点位移-基底剪力
Fig.9 Vertex displacement-base shear of different structures under extreme earthquake

3 结语

研究以构建好的同高宽比弹塑性隔振建筑结构有限元模型为测试对象,与普通建筑结构在8度频发地震作用力下和8度特大地震作用力下的抗震性能做了对比测试,得到了以下结论:

(1)无论是在8度频发地震作用下还是在8度特大地震作用下,同高宽比弹塑性隔振建筑结构的加速度响应均远远小于普通建筑结构,且加速度响应降低效率相差较小;

(2)无论是在8度频发地震作用下还是在8度特大地震作用下,同高宽比弹塑性隔振建筑结构

的位移响应均远远大于普通建筑结构,这是由于结构中存在隔震橡胶支座,削减了建筑结构刚度,在面临地震作用时整体结构刚度变小,体系更加柔软;但同高宽比弹塑性隔振建筑结构的层间位移却均小于普通建筑结构,这说明由于隔震建筑结构中存在橡胶隔震支座,结构具有足够的安全储备,抗震性能更优。

(3)由于同高宽比弹塑性隔振建筑结构无论是在8度频发地震作用下还是在8度特大地震作用下都处于弹性工作状态,能够较好地保证建筑内部人们的生命财产安全,同时也为震后修复提供了极大的便利。

参考文献:

- [1] 华建兵,吴韬,蒋敏,等. 大震下村镇建筑砌体结构的抗震性能数值分析[J]. 地震工程学报,2017,39(1):52-57.
- [2] 丁声荣,霍艳华. 混凝土结构建筑物抗震加固强度测试仿真[J]. 计算机仿真,2017,34(8):429-432.
- [3] 同霄,彭建兵,乔建伟,等. 不同倾角地裂缝作用下房屋建筑物破坏过程的数值分析[J]. 灾害学,2016,31(2):37-41.
- [4] 张敏强,刘保东,李玉忠,等. 农村典型砌体结构房屋安全及抗震检测与鉴定[J]. 工程抗震与加固改造,2016,38(3):124-129.
- [5] 杨子胜,李新明,杨毅辉,等. MIDAS/Building 双塔大跨度连体建筑抗震设计[J]. 中国测试,2016,42(6):80-84.
- [6] 冯燕军. 纤维混凝土可更换式墙板填充钢框架结构抗震性能试验研究[J]. 工业建筑,2016,46(8):140-144.
- [7] 武强,杨谦,李捷斌,等. 夹心墙圈梁及构造柱抗震性能研究[J]. 建筑技术,2017,48(8):841-843.
- [8] 华建兵,吴韬,蒋敏,等. 大震下村镇建筑砌体结构的抗震性能数值分析[J]. 地震工程学报,2017,39(1):52-57.
- [9] 赵桂峰,马玉宏,崔秀丽. 钢筋混凝土框架填充墙隔震建筑抗震性能影响因素分析[J]. 地震工程与工程振动,2017,01(1):91-100.
- [10] 薛建阳,翟磊,高卫欣,等. 仿古建筑矩形与圆形钢管柱连接抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(2):81-91.