

李然.基于 FEA 的填充墙与隔震器协同抗震系统性能分析[J].地震工程学报,2018,40(5):891-898.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.891

LI Ran.Performance Analysis of the Cooperate Seismic System of the Infill Wall and Vibration Isolator Based on Finite Element Analysis (FEA) [J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(5):891-898.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.891

基于 FEA 的填充墙与隔震器协同抗震系统性能分析

李 然
(成都理工大学工程技术学院,四川 乐山 614000)

摘要: 隔震器与填充墙对建筑抗震性能有很大作用。为了探究填充墙布置形式及填充材料和隔震器协同作用对钢筋混凝土框架结构动力特性及抗震性能的影响,采用等效斜撑理论,对 3 种不同填充墙布置形式与隔震器协同作用的抗震系统方案进行对比分析,研究发现顶层不布置填充墙与隔震器协同抗震系统钢筋混凝土框架结构的抗震性能最佳。在此系统上分析了不同填充材料对钢筋混凝土框架结构抗震性能的影响,结果表明,加气混凝土砌块填充墙的钢筋混凝土框架结构抗震性能最好。

关键词: 填充墙; 铅芯橡胶隔震器; 位移角; 烧结普通砖; 加气混凝土砌块

中图分类号: TU47 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2018)05-0891-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.891

Performance Analysis of the Cooperate Seismic System of the Infill Wall and Vibration Isolator Based on Finite Element Analysis (FEA)

LI Ran
(School of Engineering and Technology, Chengdu University of Technology, Leshan 614000, Sichuan, China)

Abstract: Vibration isolators and infill walls have great effects on the seismic performance of buildings. In order to explore the influence of the infill wall layout and material on the dynamic characteristics and seismic performance of the reinforced concrete (RC) frame structures, an equivalent model based on the equivalent brace theory was adopted to compare and analyze three anti-seismic system schemes of differing filled-wall arrangements with the cooperative work of a vibration isolator. It was found that the seismic performance of the RC frame structure is best with no infill wall on the top floor. On this basis, the effect of different filling materials on the seismic performance of RC frame structure was analyzed. The results showed that the seismic performance of the RC frame with aerated concrete block filled wall is best.

Keywords: infill wall; lead rubber isolator; drift ratio; fired common brick; aerated concrete block

0 引言

地震是一种破坏性极大的灾害,且难以预测,曾使无数人失去自己的亲友和家园,流离失所^[1-3]。钢筋混凝土(RC)框架结构具有良好的抗震性,一直是

我国多层建筑的首选。

通过大量震害研究发现,填充墙与外围框架是协同工作的^[4-6]。Chaker^[7]将空心砖填充墙的 RC 框架结构与无填充墙的 RC 框架结构进行对比试验,研究发现前者的侧移刚度是后者的 7 倍。基础隔离是无源器件中有效的结构减震措施。Robinson^[8]等率先研发出实用型铅芯橡胶支座,并于 1981 年在新西兰 Williamaayton 政府办公大楼进行应用。由于填充墙 RC 框架与铅芯橡胶隔震器的协同作用比较复杂,两者材料和受力机理各不相同,很多面向设计的软件无法直接建模对两者的整体性能进行分析,所以对于带填充墙和铅芯橡胶隔震器的框架结构建筑抗震性能的理论研究和数值模拟就显得尤为重要。对于抗震响应分析,目前研究人员常用的方法是反应谱法与时程分析法^[9-11],杨璐等^[12]采用 ABAQUS 有限元分析软件对多层钢框架结构中的一榀钢框架建立计算模型,通过比较发现反应谱法计算的地震响应比时程分析法大,反应谱法得

到的地震响应偏于安全。

本文对比分析了 3 种不同填充墙布置形式与铅芯橡胶隔震器协同作用的抗震系统方案的性能:模型Ⅰ为底层不布置填充墙带铅芯橡胶隔震器 RC 框架结构;模型Ⅱ为中间层不布置填充墙带铅芯橡胶隔震器 RC 框架结构;模型Ⅲ为顶层不布置填充墙带铅芯橡胶隔震器 RC 框架结构。并在模型Ⅲ上分析了不同填充材料对 RC 框架结构抗震性能的影响。

1 工程概况及计算模型

1.1 工程概况

某带填充墙与铅芯橡胶隔震器 RC 框架结构基础隔震建筑,层数 9 层,层高 3 m。建筑结构布置如图 1 所示。在每个柱底部设置铅芯橡胶隔震支座,支座数为 28 个,铅芯橡胶隔震支座的参数如表 1 所列。结构主要承重构建的界面尺寸及混凝土强度标号如表 2 所示。钢筋采用 Q345。

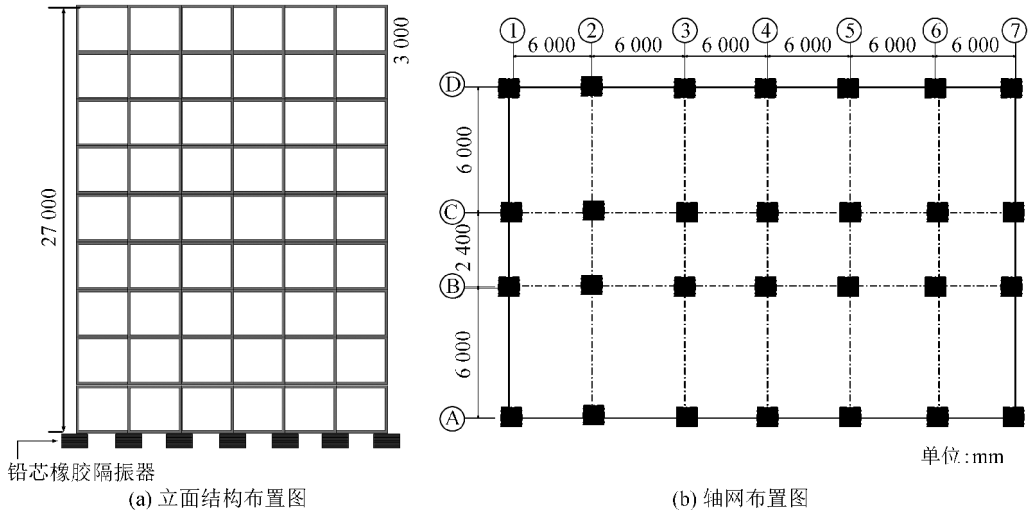


图 1 建筑结构布置图
Fig.1 Layout of building structure

表 1 铅芯橡胶隔震器参数

Table 1 Parameters of lead rubber isolator

型号	剪切弹性模量 /(N·mm ⁻²)	屈服后刚度 /(kN·mm ⁻¹)	屈服力 /kN	等效刚度 /(kN·mm ⁻¹)	等效阻尼比 /%	竖向刚度 /(kN·mm ⁻¹)
LRB1000	0.39	1 910	250	3 456	26.5	6 500

表 2 模型主要参数

Table 2 Main parameters of the model

构件	界面尺寸/m	混凝土	弹性模量/MPa
框架柱	0.6×0.6	C30	3×10 ⁴
主梁	0.27×0.54	C25	2.8×10 ⁴
次梁	0.22×0.44	C25	2.8×10 ⁴
填充墙	0.2(厚)	C25	2×10 ³

本工程抗震设防烈度 7 度,设计地震分组第一组,场地类别为Ⅱ类。

1.2 几何模型

采用 SolidWorks2018 按 1:1 尺寸建立了 3 个计算模型,将其导入 ANSYS^[13-14]中进行计算分析。在分析过程中,时程分析采用完全法瞬态动力学分

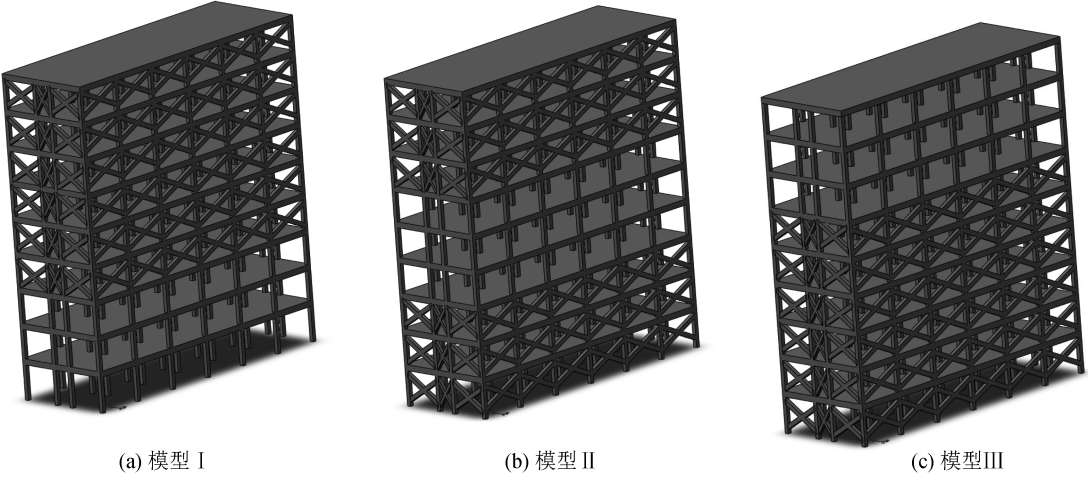


图 2 填充墙与铅芯橡胶隔震器 RC 框架结构等效模型

Fig.2 Equivalent model of RC frame structure with infill wall and lead rubber isolator

析模块,梁、柱单元采用 BEAM4 单元,板单元采用 SHELL63 单元。

1.3 效斜撑模型

Polyakov^[15-16]通过大比例填充墙混凝土框架模型试验研究,提出单个等效斜撑的概念,并在此基础上进行了三层三跨填充墙框架试验,首次提出了对角受压支撑的概念。等效斜撑模型的有效宽 w 为:

$$w = 0.175(\lambda h_{\text{col}})^{-\frac{2}{5}} r_m \tag{1}$$

式中: h_{col} 为框架柱的高度; r_m 为填充墙的对角线长度; λ 为填充墙和框架柱之间的相对刚度参数:

$$\lambda = \sqrt[4]{(E_m t \sin 2\theta) / (4EI h_{\text{inf}})} \tag{2}$$

式中: E 为混凝土的弹性模量; t 为填充墙的厚度; E_m 为填充墙的弹性模量; θ 为填充墙对角线与梁轴线方向的夹角; h_m 为填充墙的高度。

1.4 模态分析方法

通过模态矩阵在模态坐标系下建立线性定常系统振动微分方程组,使方程解耦,从而求出相应的模态参数,以便模态分析。假设系统有 m 个自由度,其自由振动方程如下:

$$[N]\{\ddot{\mathbf{X}}\} + [C]\{\dot{\mathbf{X}}\} + [K]\{\mathbf{X}\} = \{0\} \tag{3}$$

式中: $\{\mathbf{X}\}$ 表示位移; $\{\ddot{\mathbf{X}}\}$ 表示加速度向量; $\{\dot{\mathbf{X}}\}$ 表示速度向量; $[N]$ 表示 m 阶质量矩阵; $[C]$ 表示 m 阶阻尼矩阵; $[K]$ 表示 m 阶刚度矩阵。位移 $\{\mathbf{X}\}$ 可以表示为方程(4),速度向量 $\{\dot{\mathbf{X}}\}$ 和加速度向量 $\{\ddot{\mathbf{X}}\}$ 可由其得出。

$$\{\mathbf{X}\} = \{\psi\} \sin(\omega t + \varphi) \tag{4}$$

由瑞利阻尼得阻尼矩阵 $[C]$,即:

$$[C] = a[N] + b[K] \tag{5}$$

其中: a, b 表示为:

$$\begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} = \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \begin{Bmatrix} \omega_j & -\omega_i \\ -\frac{1}{\omega_j} & \frac{1}{\omega_i} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \tag{6}$$

式中: ξ_i, ξ_j 为阻尼比。

1.5 铅芯橡胶支座

支座的受力变形为非线性,支持力计算如下:

$$F_b = c_b \dot{u}_b + \alpha_b k_b u_b + f_z \tag{7}$$

式中: f_z 是由铅芯引起的恢复力:

$$f_z = (1 - \alpha_b) F_y q z_b \tag{8}$$

$$\alpha_b = \omega_b^2 M_t q / F_y \tag{9}$$

式中: F_y 是隔离器屈服强度, z_b 是无量纲滞回位移,用滞回模型来求解:

$$q \dot{z}_b = -\beta |v_b| |z_b| |\dot{z}_b|^{n-1} - \tau v_b |z_b|^n + A v_b \tag{10}$$

式中: q 是支座位移, β 和 τ 是控制磁滞回线的形状和大小加强系数, n 和 A 是整数常数。

2 结果分析

2.1 填充墙与隔震器协同作用对结构周期的影响

表 3 给出了模型的周期折减系数,表中所列出的结果都在 0.6~0.7,符合规范要求,证明模型是合理的。

图 3 为通过模态分析得到的 3 个模型在前 10 阶振型下的自振周期。从图中可以看出,由模型 I 到模型 III,结构的自振周期逐渐减少,顶部三层不设填充墙的铅芯橡胶隔震系统 RC 框架结构的自振周期最低,而底部三层不设填充墙的铅芯橡胶隔震系

统 RC 框架结构的自振周期最高。这说明随填充墙布置位置的下移,建筑的重心位置也随之下移,使得结构的自振周期下降。

表 3 各模型周期折减系数

Table 3 Period reduction factors of each model			
振型	模型 I /s	模型 II / 模型 I	模型 III /模型 II
1	0.755 25	0.652 4	0.628 9
2	0.740 25	0.637 6	0.614 1
3	0.677 25	0.647 3	0.623 8
4	0.190 25	0.661 7	0.638 2
5	0.162 25	0.631 2	0.607 7
6	0.160 25	0.637 6	0.614 1
7	0.110 25	0.669 8	0.646 3
8	0.101 25	0.679 5	0.656 0
9	0.099 25	0.653 4	0.629 9
10	0.098 25	0.642 8	0.619 3

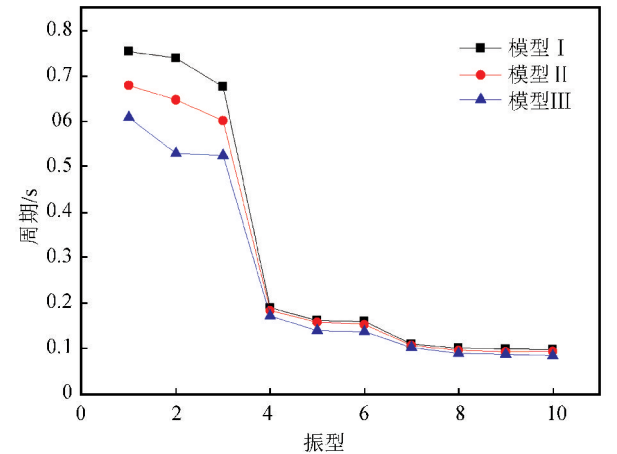


图 3 3 个模型的自振周期

Fig.3 Natural periods of the three models

2.2 填充墙与隔震器协同作用对结构位移的影响

图 4 给出了 3 个模型在反应谱工况下的弹性层间位移角变化情况。从图 4 中可以看出,模型 I、模型 II、模型 III 产生最大位移角的位置分别为 3 层、4 层和 7 层。随着填充墙位置的下移,层间位移角最大值的楼层逐渐变高,这是因为填充墙下移时建筑的重心也随着下移,使得下部基础更加稳定抗震。

从图 4 中还可以看出,3 个模型的层间位移角都发生了一次或两次的突变。模型 I 位移角突变发生一次,位置是在 3 层与 4 层之间;模型 II 位移角突变发生两次,分别在 3 层与 4 层之间,6 层与 7 层之间;模型 III 位移角突变发生一次,位置在 6 层与 7 层之间。这种突变正是因为填充墙填充位置的不均匀引起建筑竖直方向上的刚度不连续使得结构薄弱楼层凸显而造成的。以模型 II 为例,其发生两次位移角突变的位置正是有填充墙楼层跟无填充墙楼层之

间,填充墙的从有到无使其刚度发生变化,从而引起了位移角的突变。

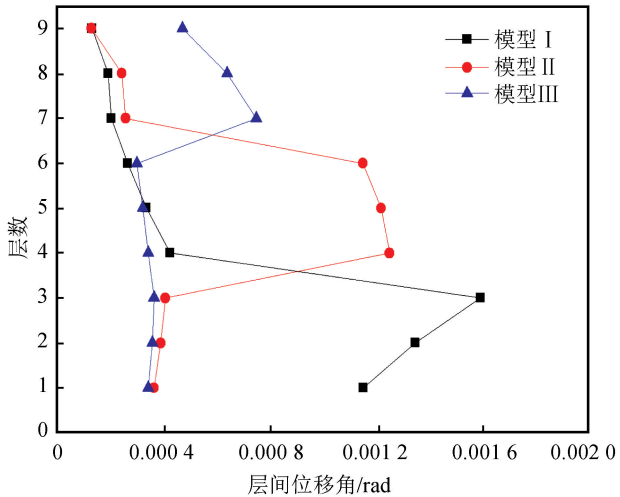


图 4 3 个模型在反应谱工况下弹性层间位移角

Fig.4 Elastic story drift ratios of the three models under response spectrum condition

通过比较 3 个模型的位移角,可以看出采用模型 I 布置填充墙的方式最为不利,因为其最大位移角发生在建筑物的底层,最大位移角显著高于其他两种模型,在持续地震的作用下,模型 I 建筑最容易发生破坏,甚至倒塌。

2.3 隔震器地震响应剪力分析

本文中采用的两种地震波分别为:1940 年美国记录的 EI-Cenrto 波与 1952 年美国记录的 Taft 波。表 4 给出了隔震器在两种地震波下的 3 种加速度峰值时的最大剪力。从表 4 中可以看出每个模型中的隔震器的最大剪切力都随着加速度峰值的增加而增加。在相同地震波及加速度峰值下,模型 I 到模型 III,隔震器最大剪力有逐渐减小的趋势。模型 III 的系统布置方式的抗震性能要优于其他两个模型。

表 4 隔震器在两种地震波下的最大剪力

Table 4 Maximum shear force of the isolator under two seismic waves

模型	加速度峰值 /gal	隔震器最大剪力/kN	
		EI-Centro 波	Taft 波
I	110	335.427	291.145
	420	657.628	549.267
	610	763.362	673.381
II	110	302.147	263.212
	420	611.289	509.475
	610	704.532	613.529
III	110	263.221	204.372
	420	548.692	468.513
	610	647.365	573.621

2.4 不同填充墙材料对抗震性能的影响

通过上述的研究可见模型Ⅲ的抗震性能最佳。下面在模型Ⅲ的基础上分析不同填充墙材料对建筑抗震性能的影响。

选用烧结普通砖和蒸压粉煤灰加气混凝土砌块两种填充墙材料来研究模型Ⅲ的弹性层间位移角变化情况。由图 5 可以看出采用烧结普通砖为填充墙与隔震器协同抗震系统 RC 框架结构的每层角位移量相对蒸压粉煤灰加气混凝土砌块为填充墙的 RC 框架结构的角位移量向右移动,即位移角增大。而且烧结普通砖为填充墙与隔震器协同抗震系统 RC 框架结构在第七层处结构刚度突变更加明显。虽然其位移角仍在规定的范围内,但是其抗震效果远不如采用蒸压粉煤灰加气混凝土砌块的填充墙与隔震器协同抗震系统 RC 框架结构建筑。

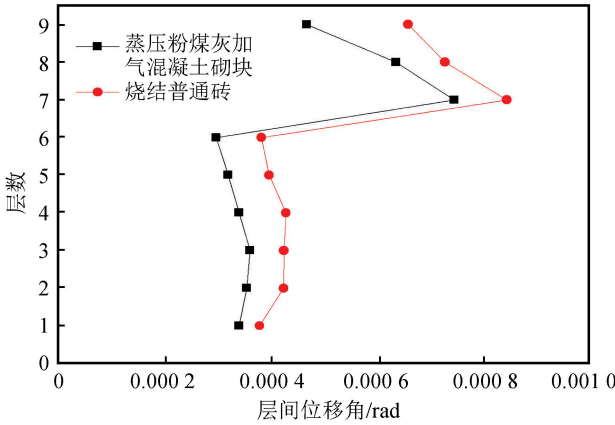


图 5 两种材质填充墙模型下的弹性层间位移角
Fig.5 Elastic story drift ratio of model III with infill wall of two different materials

3 结论

隔震器与填充墙对建筑抗震性能有很大作用。对两者协同作用对建筑物抗震性能的影响的研究很有意义,根据数值研究结果可得出以下结论:

(1) 对比 3 种不同布置填充墙的铅芯橡胶隔震系统 RC 框架结构,顶层不布置填充墙的铅芯橡胶隔震系统 RC 框架结构模型的自振周期比其他两种模型低,底部层间位移角最小,并且在相同地震波及加速度峰值下,其隔震器最大剪力小于其他两种模型。因此顶层不布置填充墙的铅芯橡胶隔震系统 RC 框架结构的抗震性能要优于其他两个模型。

(2) 对比烧结普通砖和蒸压粉煤灰加气混凝土砌块两种填充墙材料,在相同工况下后者的角位移

情况要好于前者,所以加气混凝土砌块填充墙的 RC 框架结构抗震性能最好。

参考文献(References)

[1] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,2006.
HU Yuxian. Earthquake Engineering[M]. Beijing: Seismological Press,2006.

[2] 周福霖.工程结构减震控制[M].北京:地震出版社,1997.
ZHOU Fulin. Vibration Control of Engineering Structures[M]. Beijing: Seismological Press,1997.

[3] 王彬彬.汶川地震四川灾区产业重建研究[D].成都:四川大学,2009.
WANG Binbin. Wenchuan Earthquake Industrial Reconstruction in Sichuan Disaster Area[D]. Chengdu: Sichuan University,2009.

[4] 李碧雄.地震中砌体填充墙和 RC 框架梁柱协同作用机理[J].建筑结构,2015,45(4):97-101.
LI Bixiong. Synergistic Mechanism of Masonry Infill Wall and RC Frame Beam during Earthquake[J]. Building Structure, 2015,45(4):97-101.

[5] 柳炳康,沈小璞.工程结构抗震设计[M].武汉:武汉理工大学出版社,2010.
LIU Bingkang, SHEN Xiaopu. Aseismic Design of Engineering Structures [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press,2010.

[6] 程绍革,史铁花,戴国莹.现有建筑抗震加固的基本规定[J].建筑结构,2011,41(2):128-131.
CHENG Shaoji, SHI Tiehua, DAI Guoying. Basic Provisions for Seismic Retrofitting of Existing Buildings[J]. Building Structure,2011,41(2):128-131.

[7] CHAKER Amar A, CHERIFATI A. Influence of Masonry Infill Panels on the Vibration and Stiffness Characteristics of R/C Frame Buildings[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,1999,12(3):1061-1065.

[8] SKINNER R L, ROBINSON W H, MCVENY Cx H. 工程隔震概论[M].北京:地震出版社,1996.
SKINNER R L, ROBINSON W H, MCVENY Cx H. Introduction to Engineering Seismic Isolation[M]. Beijing: Seismological Press,1996.

[9] 兰麒,胡雯婷.等效静力法和谱分析法在设备抗震分析中的应用[J].核动力工程,2014,35(增刊1):145-148.
LAN Qi, HU Wenting. The Equivalent Static Method and Spectrum Analysis Method in the Application of the Seismic Hazard Analysis [J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35 (Suppl):145-148.

[10] ZHOU X Y, GU M, LI G. Grouping Response Method for Equivalent Static Wind Loads Based on a Modified LRC Method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012,11(1):107-119.

[11] DONG Y S, ZHAI Q G. Equivalent Circuit Method for Static

and Dynamic Analysis of Magnetoelectric Laminated Composites[J].Chinese Science Bulletin,2008,53(14):2113-2123.

[12] 杨璐,陈虹,岳永志,等.反应谱法与时程分析法抗震分析对比[J].沈阳工业大学学报,2016,38(3):331-336.

YANG Lu, CHEN Hong, YUE Yongzhi, et al. Comparative Analysis of Seismic Response between Response Spectrum and Time History Analysis[J].Journal of Shenyang University of Technology,2016,38(3):331-336.

[13] 李冰洋,刘永华,刘中宪.基于 ANSYS 自定义单元的半刚性梁柱节点抗震滞回性能模拟分析[J].世界地震工程,2018,34(1):98-104.

LI Bingyang, LIU Yonghua, LIU Zhongxian. Simulation and Analysis of Seismic Hysteretic Behavior of Semi-rigid Beam Column Joints Based on ANSYS Custom Unit [J]. World Earthquake Engineering,2018,34(1):98-104.

[14] 贾正飞.基于 ANSYS 的某高层建筑力学性能分析[D].青岛:青岛理工大学,2018.

JIA Zhengfei. Analysis of Mechanical Properties of a High-rise Building Based on ANSYS[D].Qingdao:Qingdao Technological University,2018.

[15] POLYAKOV S V. On the Interactions between Masonry Filler Walls and Enclosing Frame When Loaded in the Plane of the Wall[J].Translations in Earthquake Engineering Research Institute,1956,32(2):1-25.

[16] POLYAKOV S V. On the Interactions between Masonry Filler Walls and Enclosing Frame When Loaded in the Plane of the Wall[J]. Translations in Earthquake Engineering, Moscow:Earthquake Engineering Research Institute,1960:1-25.

(上接第 882 页)

LIU Bowen, XU Kai, LIU Chang, et al. Seismic Elastic-plastic Analysis and Performance-based Evaluation with Perform-3D [M].Beijing:China Architecture and Building Press,2014.

[8] 混凝土结构设计规范:GB50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

Code for Design of Concrete Structures:GB50011-2010[S].Beijing:China Architecture Industry Press,2010.

[9] Ozaki M.Improved Response Factor Method for Seismic Fragility of Reactor Building[M].Nuclear Engineering and Design, 1998,185:277-291.

[10] YANG Hee Joe, SUNG Gook Cho. Seismic Fragility Analysis of Nuclear Power Plant Structures Based on the Recorded Earthquake Data in Korea[C]//Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology Prague, Czech Republic, 2003.

[11] 杜永峰,包超,宋翔,等.结构抗连续倒塌鲁棒性简化分析方法研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(2):170-175.

DU Yongfeng, BAO Chao, SONG Xiang, et al. A Simplified Method of Structural Robustness to Resist Progressive Collapse[J].Xi'an Univ of Arch Tech (Natural Science Edition), 2015,47(2):170-175.

[12] 郑山锁,田进,韩言召,等.考虑锈蚀的钢结构地震易损性分析[J].地震工程学报,2014,36(1):1-6.

ZHENG Shansuo, TIAN Jin, HAN Yanzhao, et al. Seismic Fragility Analysis of Steel Structure Considering Steel Corrosion[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(1):1-6.