

方冬慧.多层空心砌块房屋混凝土结构抗震性测试研究[J].地震工程学报,2019,41(5):1193-1198.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1193

FANG Donghui, Seismic Test of the Concrete Structure of Multi-story Hollow Block Buildings[J].China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1193-1198. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1193

多层空心砌块房屋混凝土结构抗震性测试研究

方冬慧

(四川大学 锦城学院, 四川 成都 611731)

摘要: 为了研究多层空心砌块房屋混凝土结构抗震性测试,按照1:5缩尺比例建造空心砌块房屋混凝土结构模型进行抗震性测试实验。根据实际原型参数遵从相似理论的要求选择模型参数,通过电液伺服加载装置和液压千斤顶加载水平、垂直方向荷载,对所建造模型进行动力特性测试、地震反应分析、结构最大地震反应以及位移响应进行了实例分析。结果表明,随着破坏程度加大,模型结构自振频率随之减小,阻尼比随之增大;有芯柱多层空心砌块房屋模型的抗震效果较强;强震状态下,结构动力特性变化较大,破坏层聚集了房屋结构的最大反应;当加速度为125 cm/s时,结构最大位移为2.73 mm,低于规范值,模型结构具有一定延性。

关键词: 空心砌块;混凝土;结构抗震性;地震反应

中图分类号: TU522.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1193-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1193

Seismic Test of the Concrete Structure of Multi-story Hollow Block Buildings

FANG Donghui

(Jincheng College, Sichuan University, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: To study the seismic resistance of the concrete structure of multi-story hollow block houses, seismic tests were carried out on the concrete structure of a model six-story hollow block house, scaled 1:5. Model parameters were selected according to actual prototype parameters and requirements of the similarity theory, and horizontal and vertical loads were applied by an electrohydraulic servo loading device and hydraulic jack. A dynamic characteristic test, seismic response analysis, structural maximum seismic response, and displacement response analysis were carried out. Results showed that, with increasing degree of damage, the natural frequency of the model structure increased while damping ratio decreased. Seismic effect on the multi-story hollow block building model with core column was strong. Under strong earthquakes, dynamic characteristics of the structure changed greatly, and the failure layer displayed the maximum response of the

收稿日期: 2019-03-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11772209)

作者简介: 方冬慧(1984—),女,四川成都人,硕士,讲师,研究方向:建筑结构可靠度设计。E-mail:317753503@qq.com。

building structure. When the acceleration was 125 cm/s, the maximum displacement of the structure was 2.73 mm, lower than the standard value, indicating that the model structure had certain ductility.

Keywords: hollow block; concrete; structural seismic performance; seismic response

0 引言

为了减小地震灾害带给人们生命财产带来的巨大危害,建立结实、稳固、抗震性能强的房屋很有必要^[1]。由于我国对耕地资源保护十分重视,机制黏土砖的使用受到限制,被彻底取代只是时间问题^[2-3]。空心砌块具备节约能源、便于施工等特点,并且建造空心砌块房屋劳动生产率高,土地使用面积小,建筑成本低,所以在新型墙体材料应用过程中,空心砌块是代替黏土砖最合适的材料^[4]。目前我国的房屋大多为多层空心砌块房屋。

为了减小地震灾害带给人们的伤害,进行多层空心砌块房屋混凝土结构抗震性测试研究。测试研究的空心砌块墙体选取一批经过恰当构造方法的单片足尺和缩尺的模型^[5]。并对 1/5 缩尺比例的空心砌块房屋混凝土结构整体体系的抗震性进行实验研

究^[6-7]。实验内容如下:

(1) 测试多层空心砌块房屋混凝土结构在不同破损阶段的动力特性^[8]。

(2) 针对有芯柱和无芯柱的多层空心砌块房屋混凝土结构进行地震反应分析^[9]。

(3) 测试不同输入加速度前提下多层空心砌块房屋混凝土结构的最大地震反应。

(4) 测试不同场地土对多层空心砌块房屋混凝土结构的影响。

1 模型设计

1.1 模型参数选择

模型参数选择是根据将实际原型参数遵从相似理论的要求而确定的。可以让测试模型与实际原型之间存在唯一对应关系,对应的物理量之间为常数比例关系^[10]。模型主要参数值列于表 1。

表 1 模型主要参数值

Table 1 Main parameter values of the model

物理量	几何尺寸 l	质量 m	密度 ρ	应力 σ	强度 R	时间 t	加速度 μ	应变 ϵ	弹性模量 E	位移 u
相似系数	C_l	C_m	C_ρ	C_σ	C_R	C_t	C_μ	C_ϵ	C_E	C_u
相似关系	C_l	C_m	C_m/C_l^3	C_σ	C_R	$C_t \sqrt{C_p/C_E}$	C_μ/C_l^2	C_σ/C_E	C_E	$C_l \cdot C_E$
相似系数取值	5	23.88	0.382	1	1	2.55	0.684	1	1	5

1.2 模型概述

原型房屋的标准单元层高:2.75 m,内纵墙和横墙的空心砌块墙厚度为 195 mm,外墙为空心砌块墙加气混凝土保温层,厚度分别为 195 mm、105 mm。计算单位取 3 个开间,墙体材料强度平均值列于表 2。将原型房屋的标准单元视为原型,采用相似关系将其换算成模型^[11],模型与原型设计参数的数值列于表 3。

表 2 墙体材料强度平均值

Table 2 Average strength of wall materials

墙体材料/MPa	测试数量	强度平均值/MPa	
砌块	f_1	4	6.41
砂浆	f_2	5	8.83
砌体	f	9	5.99
	f_v	9	0.27
混凝土	f_{cu}	5	18.76
钢筋	σ_s	1	355

表 3 模型与原型设计参数的数值

Table 3 Design parameters for the model and prototype

物理量	空心砌块强度	一层砂浆强度	二层砂浆强度	三层砂浆强度	四层砂浆强度	五层砂浆强度	砂浆强度	8 级地震力标准值 F_{EX}	8 级地震力设计值 F_E	总重量 /t
相似系数	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	15	15	22.66
原型值	MU10	M10	M10	M10	M8	M6	M6	775.39 kN	1 008.39 kN	583.15
模型设计值	MU10	M10	M10	M10	M8	M6	M6	47.42 kN	62.00 kN	23.47
模型实测值/MPa	4.1	5.6	8.2	4.7	8.7	1.3	1.1			22.31

1.3 加载设置

通过电液伺服加载装置加载水平荷载,液压千斤顶加载垂直荷载^[12],测试时,首先加载垂直荷载,之后逐级加载水平荷载。在测试正式开始之间,需要对模型、测试装置、仪器等测试设备进行相关检查^[13],通过加载 45 kN 的水平力进行检查^[14-15],检查完成后将压力卸载到 0。正式加载时,墙体开裂前后分别选择按照力和位移进行控制。控制位移是墙体开裂时刻的位移,以控制位移为基础加载以倍数向上递增,每级位移往返 3 次,直至水平方向荷载为极限荷载的 80%后停止加载。具体的加载装置如下图 1 所示。

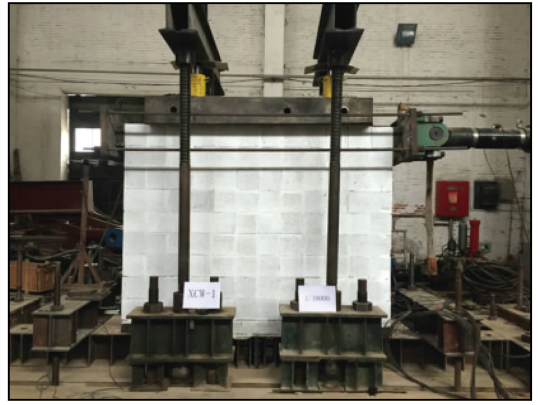


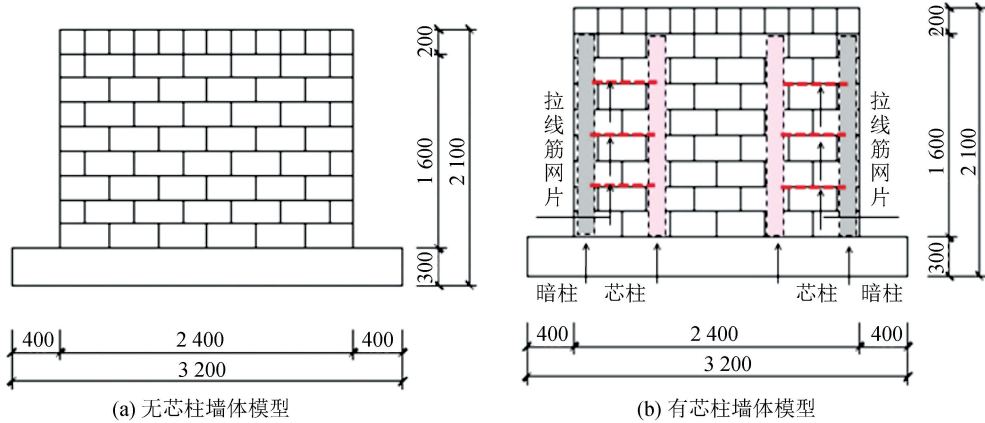
图 1 加载装置

Fig.1 Loading device

1.4 模型制作

将按照 1 : 5 比例制作的混凝土空心砌块作为模型房屋用的砌块,模型设计强度为 MU10;砂浆采用混合砂浆,设计强度分别为 M10、M8、M5;芯柱混

凝土采用卵石混凝土,设计强度为 C16,芯柱混凝土的骨料最大粒径需小于 5 mm,钢筋选取 8 # 和 14 # 铅丝。



(a) 无芯柱墙体模型

(b) 有芯柱墙体模型

图 2 墙体模型(单位:mm)

Fig.2 Wall model (Unit:mm)

2 实例分析

2.1 地震反应分析

为进行多层空心砌块房屋混凝土结构的抗震性测试,对模型进行地震反应分析,选择 G3 人工波作为输入地震波,输入间隔为 0.015 s,共计 25 s,多层

空心砌块房屋混凝土模型的地震反应分析计算结果列于表 4,最终裂缝情况如图 3 所示。

结合图 3 和表 4 数据可知,有芯柱的多层空心砌块房屋模型的抗震能力要强于无芯柱的房屋模型。当输入地震波的加速度峰值为 125 cm/s² 时,有芯柱房屋模型存在 1 层的墙体出现开裂现象,无

表 4 模型地震反应分析计算结果

Table 4 Seismic response analysis results of the model

房屋情况 层数	输入加速度峰值 125 cm/s ²						输入加速度峰值 250 cm/s ²						
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
有芯柱	层间位移/mm	0.91	0.91	0.87	0.82	0.71	0.53	1.94	2.16	2.31	2.21	1.85	1.16
	楼层位移/mm	0.91	1.82	2.71	3.53	4.25	4.79	1.94	4.11	6.42	8.63	10.49	11.66
	加速度反应/(cm·s ⁻²)	50.91	92.82	123.92	158.74	186.44	210.15	105.33	190.74	245.54	300.76	321.65	362.44
	进入刚度段/级	1	1	1	2	1	1	1	2	2	3	2	1
无芯柱	层间位移/mm	1.01	1.02	1.02	1.04	0.94	0.73	2.07	2.14	2.36	2.54	2.44	1.75
	楼层位移/mm	1.01	2.04	3.07	4.12	5.03	5.77	2.07	4.18	6.55	9.11	11.51	13.27
	加速度反应/(cm·s ⁻²)	50.64	97.72	158.79	172.63	209.24	242.91	94.52	185.55	249.54	274.56	316.11	370.51
	进入刚度段/级	1	2	2	2	2	1	2	3	3	3	2	1

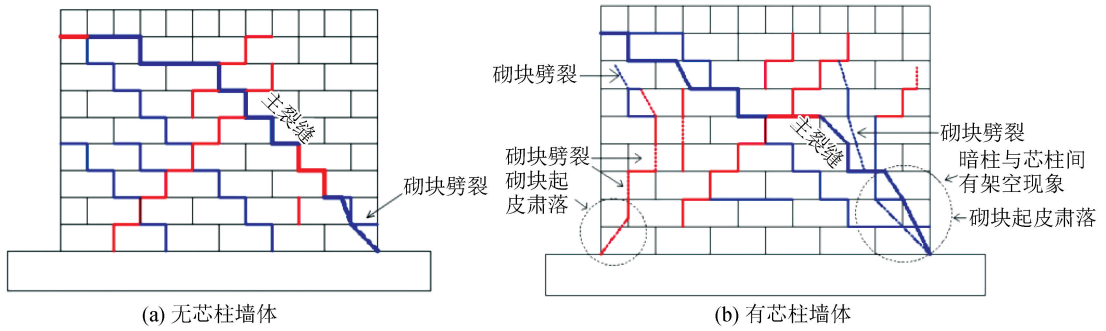


图3 墙体的最终裂缝分布

Fig.3 Final crack distribution of wall

芯柱房屋模型存在4层的墙体出现开裂现象,刚度段均为2级,震后采取适当加固措施,可以继续使用。当输入地震波的加速度峰值为 250 cm/s^2 时,无芯柱房屋模型有3层已经进入第3刚度段,破坏情况较为严重,而有芯柱房屋模型仅有1层进入第3刚度段,产生这种差异的原因在于有芯柱房屋模型的芯柱具有约束作用可以增加墙体耗能能力,因而有芯柱多层空心砌块房屋模型的抗

震效果较强。

2.2 动力特性测试

以有芯柱房屋墙体为例。将空心砌块房屋混凝土结构模型分成3个阶段,分别为开裂前、初始开裂和达到极限强度,判断房屋模型在不同地震动状态下的自身动力特性,选择环境脉动法、敲击测量法和张拉释放法测量房屋模型各阶段的动力特性,结果如表5所示。

表5 三个阶段的动力特性测量结果

Table 5 Measurement results of dynamic characteristics in three stages

所处状态		实测自振频率/Hz	阻尼比 ξ	计算自振频率/Hz
开裂前	环境脉动法	7.271	-	6.591
	敲击测量法	7.110	-	
	张拉释放法	7.031	0.013	
	共振	-	-	
初始开裂	环境脉动法	6.732	-	6.031~4.510
	敲击测量法	6.535	-	
	张拉释放法	6.358	0.024	
	共振	4.014	-	
达到极限强度后	环境脉动法	5.674	-	3.445
	敲击测量法	5.522	-	
	张拉释放法	5.034	0.029	
	共振	3.084	-	

通过分析表5数据可知,随着破坏程度的加大也就是施加在多层空心砌块房屋混凝土结构模型的振幅增加,模型的自振频率随之减小,模型自身的阻尼比有所增大。结果表明多层空心砌块房屋混凝土结构模型具备较好的动力特性。

2.3 结构最大地震反应

以有芯柱房屋墙体为例。由于多层空心砌块房屋混凝土结构模型在沿高度方向上的质量分布以及刚度变化都较为匀称,所以该模型的最大层间剪力和位移反应都在底层产生。模型的加速度反应峰值示例图如图4所示。

由图4可以看出,当输入加速度分别为 50 cm/s^2 、 100 cm/s^2 时,多层空心砌块房屋混凝土结构模型

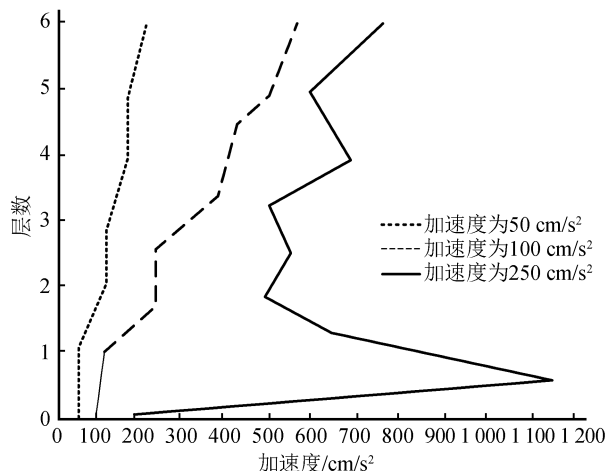


图4 最大绝对加速度的分布

Fig.4 Distribution of maximum absolute acceleration

各楼层的波动不大,模型结构处于弹性状态;但当输入加速度为 200 cm/s 时,此时处于强震状态,模型结构遭到严重破坏,刚度急剧降低,阻尼增大,模型结构动力特性产生较大变化,破坏层聚集了房屋混凝土结构的最大反应。

2.4 场地土影响

以有芯柱房屋墙体为例。多层空心砌块房屋混

凝土结构的反应不但与混凝土结构自身动力特性反应相关,还与所处的地质环境紧密相关。当多层空心砌块房屋混凝土结构模型结构的自振周期与所处地质环境的场地土的卓越周期接近时,模型结构反应急剧增大。表 6、7 为输入不同地震波作用下,地震加速度相同,多层空心砌块房屋混凝土结构模型的横向和纵向的加速度反应峰值。

表 6 输入不同地震波作用下模型横向加速度反应峰值

Table 6 Peak values of lateral acceleration response of the model under different input seismic waves

场地类型	输入地震波	横向加速度 50 cm/s ²					
		1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层
类型 1	大庆	33.1	41.7	45.9	45.4	49.4	52.7
类型 2	呼家楼	43.5	60.2	77.5	94.6	109.2	121.1
类型 3	长岛	41.2	45.9	61.7	74.3	93.8	105.1
类型 4	墨西哥	38.6	43.3	48.2	52.2	55.6	58.4

表 7 输入不同地震波作用下模型纵向加速度反应峰值

Table 7 Peak longitudinal acceleration response of the model under different input seismic waves

场地类型	输入地震波	纵向加速度 50 cm/s ²					
		1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层
类型 1	大庆	44.2	46.3	50.2	46.3	52.8	52.7
类型 2	呼家楼	44.5	65.5	88.4	108.5	124.5	135.1
类型 3	长岛	40.5	53.6	63.4	76.8	87.5	95.4
类型 4	墨西哥	44.7	53.8	61.7	67.4	74.8	80.8

分析表 6、表 7 数据可知,在类型 2 的场地中,输入呼家楼地震波作用下,模型房屋的结构反应最大,说明空心砌块房屋模型的自振周期与类型 2 的场地土的卓越周期相近。

2.5 位移响应

以有芯柱房屋墙体为例。为测量多层空心砌块房屋混凝土结构模型的位移响应,通过位移传感器

测量模型底层的相对位移,位移传感器布设位置为模型一层的東西两侧圈梁处,并固定在台面的钢支座顶部。位移传感器参数:量程为 ±10 cm;灵敏度为 25.0 mm/V;分辨率为 0.1 mm;有效计算范围为 800 mm。模型的加速度峰值变化曲线见图 5,多层空心砌块房屋混凝土结构模型底层正、背立面的相对位移峰值数据见表 8。

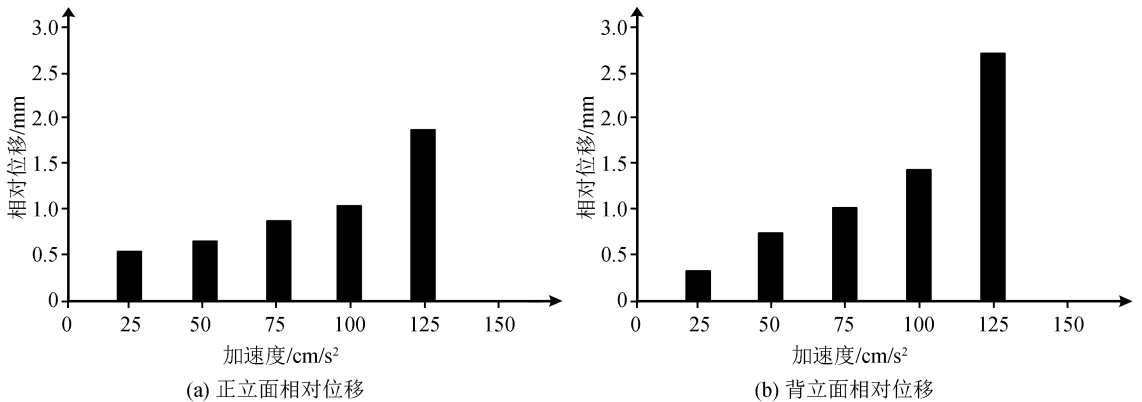


图 5 模型正、背立面位移

Fig.5 Displacement of the front and back elevations of the model

分析图 2 和表 8 数据可知,模型正立面最大位移为 1.72 mm,模型背立面最大位移为 2.73 mm,模

型最大位移数值小于《砌体结构设计规范》中的规范值,说明模型的砌体结构具有一定延性。

表8 模型相对位移数据

Table 8 Relative displacement data of the model

加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	25	50	75	100	125
正立面	0.41	0.48	0.83	1.04	1.72
模型位移峰值/mm	0.29	0.57	0.85	1.20	2.12
背立面	0.17	0.66	0.86	1.36	2.73

3 结论

通过对多层空心砌块房屋混凝土结构抗震性测试研究可以得出:

(1) 在不同破坏程度下,多层空心砌块房屋混凝土结构的动力特性较好,随着房屋破坏程度增加,多层空心砌块房屋混凝土结构自身阻尼比有所增加

(2) 有芯柱的空心砌块房屋混凝土结构抗震效果要优于无芯柱结构,芯柱具有约束作用可以增加墙体耗能能力。

(3) 当发生强震时,结构动力特性产生较大变化,破坏层聚集了房屋结构的最大反应,致使房屋严重受损。

(4) 通过位移响应实验验证多层空心砌块房屋具有一定的延性。

参考文献(References)

- [1] 黄强,李东彬,邵弘,等.轻钢混混凝土结构多层足尺模型抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(4):10-17.
HUANG Qiang, LI Dongbin, SHAO Hong, et al. Seismic Capacity Evaluation of Lightweight Steel and Lightweight Concrete Structure Based on Quasi-static Cyclic Test of A Multi-story Full Scale Model[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(4): 10-17.
- [2] 张亚英,赵春荣,崔炜.多层砖混建筑的轻钢结构夹层设计和抗震计算模式对比研究[J].工程抗震与加固改造,2017,39(4):136-140.
ZHANG Yaying, ZHAO Chunrong, CUI Wei. Comparative Study on Adding Storey Design and Seismic Calculation Modes of Light-weight Steel Structure in Multi-storey Brick-concrete Building[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(4): 136-140.
- [3] 陈伟,王婷,岳星宇,等.框架柱约束横孔混凝土空心砌块夹心墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(2):72-78.
CHEN Wei, WANG Ting, YUE Xingyu, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Concrete Hollow Block Sandwich Wall Confined with Frame Column[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(2): 72-78.
- [4] 周晓洁,宋林杰,陈培奇,等.采用内置式构造方案的空心砌块墙体抗震性能试验[J].地震工程与工程振动,2018,38(2):210-219.
ZHOU Xiaojie, SONG Linjie, CHEN Peiqi, et al. Seismic Performance Test of Hollow Block Walls with Built-in Construc-

tional Details[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 38(2): 210-219.

- [5] 王星星,叶继红.多层强边柱冷成型钢结构体系抗震性能分析[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):16-23.
WANG Xingxing, YE Jihong. Seismic Analysis on Mid-rise Cold-Formed Steel Structure with Reinforced end studs[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 16-23.
- [6] 黄宝栋,程绍革,韩森.我国既有多层砌体房屋抗震能力分析[J].工程抗震与加固改造,2016,38(5):114-120.
HUANG Baodong, CHENG Shaoge, HAN Miao. Seismic Capacity Analysis of Existing Multi-story Masonry Buildings in China[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(5): 114-120.
- [7] 李伯维,张耀庭.基于Pushover的多层钢筋混凝土框架结构与抗震性能分析[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.
- [8] 郭光玲,张科强,刘喜平.陕南村镇房屋抗震性能调查研究[J].震灾防御技术,2018,13(1):195-205.
GUO Guangling, ZHANG Keqiang, LIU Xiping. Investigation on Seismic Performance of Buildings in Rural Areas of Southern Shaanxi Province[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(1): 195-205.
- [9] 程志辉,周富威.既有多层建筑结构在局部增加荷载改造时的抗震计算问题[J].工程抗震与加固改造,2017,39(4):131-135.
CHENG Zhihui, ZHOU Fuwei. Seismic Calculation Problems of Existing Multi-story Buildings Subjected to Local Increasing Loads[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(4): 131-135.
- [10] 张纪刚,刘菲菲,刘康利.新型铝合金管混凝土组合海洋平台抗震性能分析[J].结构工程师,2018,34(增刊1):37-41.
ZHANG Jigang, LIU Feifei, LIU Kangli. The Seismic Analysis of Novel Aluminum Offshore Platform[J]. Structural Engineers, 2018, 34(Supp1): 37-41.
- [11] 刘璐,黄小坤,田春雨,等.配置大直径大间距HRB500高强钢筋的装配整体式钢筋混凝土框架节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(5):247-254.
LIU Lu, HUANG Xiaokun, TIAN Chunyu, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Precast RC Frame Joints with HRB500 High Strength Rebars of Large Diameter and Spacing[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 247-254.
- [12] 王振波,顾超,解子林.施工缝对RC框架结构抗震性能影响的试验研究[J].科学技术与工程,2016,16(35):135-138.
WANG Zhenbo, GU Chao, XIE Zilin. Study on the Seismic Performance of Frame Structure with Construction Joint[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(35): 135-138.
- [13] 伊波松,杨勇,刘如月,等.防屈曲中心支撑加固钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究[J].工业建筑,2016,46(4):8-11.

49(5):747-753.

- [11] 周国良, 李小军, 刘必灯, 等. 大刚度法在结构动力分析中的应用、误差分析与改进[J]. 工程力学, 2011, 28(8): 30-36, 44.
ZHOU Guoliang, LI Xiaojun, LIU Bideng, et al. Error Analysis and Improvements of Large Spring/stiffness Method for Structural Dynamic Response Analysis[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(8): 30-36, 44.
- [12] SOYLUK K, SICACIK E A. Soil-Structure Interaction Analysis of Cable-Stayed Bridges for Spatially Varying Ground Motion Components[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 35: 80-90.
- [13] BOZORGNIA Y, CAMPBELL K W. Vertical Ground Motion Model for PGA, PGV, and Linear Response Spectra Using the NGA-West2 Database[J]. Earthquake Spectra, 2016, 32(2): 979-1004.
- [14] 罗超, 楼梦麟, 桂国庆, 等. 大跨度结构多点地震反应计算方法
的比较[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 8-15.
LUO Chao, LOU Menglin, GUI Guoqing, et al. Comparison for Calculation Methods of Long-Span Structure under Multi-Support Seismic Excitation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(1): 8-15.
- [15] 范立础, 王君杰, 陈玮. 非一致地震激励下大跨度斜拉桥的响应特征[J]. 计算力学学报, 2001, 18(3): 358-363.
FAN Lichu, WANG Junjie, CHEN Wei. Response Characteristics of Long-span Cable-stayed Bridges Under Non-uniform Seismic Action[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, 2001, 18(3): 358-363.
- [16] BI K M, HAO H, CHOUW N. Influence of Ground Motion Spatial Variation, Site Condition and SSI on the Required Separation Distances of Bridge Structures to Avoid Seismic Pounding[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40(9): 1027-1043.

(上接第 1198 页)

- YI Bosong, YANG Yong, LIU Ruyue, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Concrete Frame Reinforced with Concentric Buckling-restrained Braces [J]. Industrial Construction, 2016, 46(4): 8-11.
- [14] 陈彬. 计及用户分布式电源的合作博弈智能用电技术[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 29-34.
CHEN Bin. Cooperative Game-based Energy Consumption Technology Considering Household Distributed Generators [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2017, 36(5): 29-34.
- [15] 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.
DING Shengrong, HUO Yanhua. Strength Test and Simulation of Seismic Strengthening of Concrete Structures[J]. Computer Simulation, 2017, 34(8): 429-432.