

李小军,曹鑫雨,唐柏赞.2022.水泥聚苯模壳格构式混凝土墙体抗震性能的芯孔尺寸影响试验研究[J].地震研究,45(1):1-7,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0001.

Li X J, Cao X Y, Tang B Z. 2022. Experimental study on the influence of core hole size on the seismic performance of expansive polystyrene granule cement latticed concrete wall[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(1): 1-7, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0001.

水泥聚苯模壳格构式混凝土墙体抗震性能的 芯孔尺寸影响试验研究*

李小军^{1,2}, 曹鑫雨¹, 唐柏赞³

(1. 北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;
3. 华东交通大学 铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 江西 南昌 330013)

摘要:为研究芯孔尺寸对传统型水泥聚苯模壳(EPSC)格构式混凝土墙体抗震性能的影响,对2个传统型EPSC格构式混凝土墙体原型试件进行低周往复荷载试验,2个试件芯孔直径分别为160 mm和120 mm;对比分析了2个试件的破坏特征和承载力、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化等抗震性能。结果表明:芯孔直径大的复合墙体具有更优良的抗震性能;芯孔直径增加,复合墙体的承载力、抗侧刚度和耗能能力均有不同程度的提高。

关键词:芯孔尺寸;水泥聚苯模壳(EPSC);格构式混凝土墙体;拟静力试验;抗震性能

中图分类号: P315.924; TU398 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2022)01-0001-07
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0001

0 引言

水泥聚苯模壳(EPSC)格构式混凝土墙体是一种保温结构一体化免拆模墙体。EPSC是以废弃聚苯颗粒为基础,按一定比例加入外加剂、水泥和水,由工业化生产制作而成。EPSC规格多样,不仅满足实际工程施工需要,也符合国家建筑节能的不同要求。国家大力提倡农村危房改造,推进村镇建筑节能(国务院,2017;宗边,2018;马勃,2021)。EPSC格构式混凝土墙体集保温、承重、耐火、环保等优点于一体(CECS 173:2004),在村镇低层和多层建筑中具有广阔的应用前景。

国内外学者已对格构式混凝土墙体的抗震性能进行了一些研究。如Dusicka和Kay(2011)对

芯孔直径约160 mm,格构梁(水平向构件)、格构柱(竖向构件)间距约400 mm的格构式混凝土墙体进行水平往复荷载试验,探究其失效模式和抗震性能。孙建超等(2002)、王奇等(2004)分别对混凝土墙厚120 mm和150 mm的保温砌模混凝土墙抗震性能进行拟静力试验研究,对此类墙体抗剪承载力计算方法进行探究;张微敬等(2011)调整墙体网格尺寸为400 mm×400 mm,研发了适用于低多层住宅建筑的大网格混凝土剪力墙。曹万林等(2015a, b)、张勇波等(2015)、周中一等(2016)提出了混凝土墙厚为130 mm的异形边框保温模块单排配筋再生混凝土剪力墙体系,并进行了一系列水平往复荷载试验,为该墙体在村镇低多层建筑中的应用提供支撑。曹启坤等(2018)使用ANSYS软件建立了芯孔直径分别为140、160、180和200 mm的格构式墙体结构,

* 收稿日期: 2020-12-04.

基金项目:国家自然科学基金项目(51908216)、江西省主要学科学术和技术带头人培养计划项目(20204BCJL23032)和江西省自然科学基金项目(20202BAB214026)联合资助.

第一作者简介: 李小军(1965-),教授,主要从事地震工程研究. E-mail: beerli@vip.sina.com.

研究芯孔直径对高层结构加速度、位移响应的影响,拓宽了格构式墙体的芯孔直径限值、适用性以及建筑高度。韩文龙等(2020)采用水平往复荷载试验方式对3片预制空心板剪力墙的抗震性能进行研究,发现该墙体弹塑性变形满足剪力墙罕遇地震作用下的规定。Tang等(2017, 2019)、唐柏赞等(2020)使用芯孔直径为160 mm的EPSC格构式混凝土墙体,进行了EPSC格构式混凝土填充墙-钢筋混凝土框架结构的振动台试验,发现此类墙体做填充墙使用时,整体结构抗震性能良好。李振宝等(2021)通过试验研究预制立群混凝土空心墙板轴心受压性能,发现其受压承载力高达6 000 kN左右。

为拓展EPSC格构式混凝土墙体在村镇建筑中的应用,本文分别对芯孔直径分别为120 mm和160 mm的原型EPSC格构式墙体试件进行低周往复荷载试验,对比分析芯孔直径对EPSC格构式墙体破坏模式及滞回性能、承载力、刚度退化、耗能等抗震性能的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验共设计了2个芯孔直径不同的传统EPSC格构式混凝土墙体原型试件,试件编号分别为W1、W2,墙体试件变化参数为芯孔直径。EPSC单元及其尺寸如图1所示,试件详细尺寸和配筋如图2所示,墙体厚度由墙体骨架(格构梁柱)厚度和具有保温模板功能的EPSC厚度共同构成,如图3所示。如厚度为210 mm的墙体试件W1,其芯孔直径为120 mm、两侧EPSC厚度均为45 mm;厚度为250 mm的墙体试件W2,其芯孔直径为160 mm、两侧EPSC厚度均为45 mm。两试件格构梁(柱)中心间距均为300 mm,试件主要参数见表1。EPSC格构式混凝土墙体所用混凝土设计等级均为C20,试验前室内实测混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 为20.8 MPa(表1)。EPSC材料性能见表2,墙体钢筋均采用HRB335级,钢筋力学性能见表3。

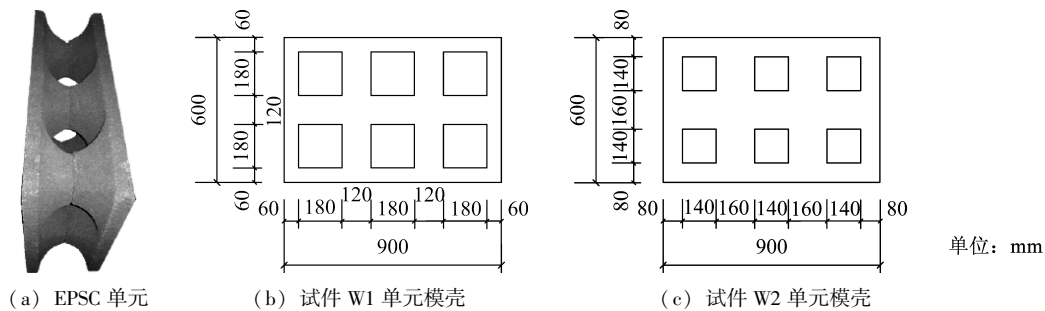


图1 EPSC单元及试件尺寸

Fig. 1 EPSC module and the sizes of specimens

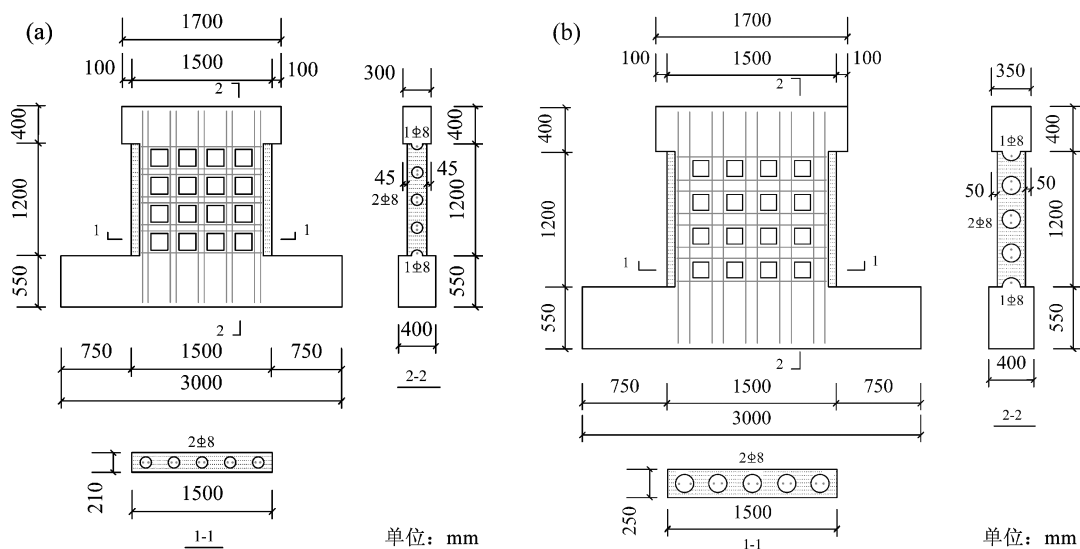


图2 试件W1(a)、W2(b)尺寸及配筋

Fig. 2 Size and reinforcement of wall specimens W1 (a) and W2 (b)

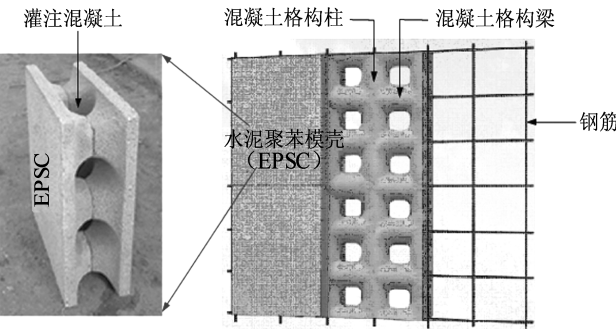


图 3 墙体试件组成

Fig. 3 The structure of the wall specimen

表 1 试件主要参数

Tab. 1 The main parameters of the specimens

试件 编号	尺寸 (高×宽×厚) / mm	芯孔 直径/ mm	格 构 梁、柱 配 筋	格构梁、混凝土立方 柱配筋 体抗压强度 率 (%) f_{cu}/MPa
W1	1 200×1 500×210	120	HRB335	0.890 20.8
W2	1 200×1 500×250	160		0.500

表 2 EPSC 材料性能

Tab. 2 Properties of EPSC

表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	抗压强度/ MPa	劈裂抗拉 强度/MPa	耐火极限/ h
≤ 380	≤ 0.08	≥ 0.40	≥ 0.10	≥ 3

表 3 钢筋力学性能

Tab. 3 Properties of steel reinforcements

钢筋 类别	屈服强度 f_y / MPa	抗拉强度 f_u / MPa	弹性模量 E / GPa	伸长率 Δ / (%)
HRB335	410	570	201	21.6

1.2 加载装置

试验加载装置如图 4 所示，主要包括加载钢架、千斤顶、油压控制系统等水平向加载装置和竖向加载装置。水平向加载装置用以模拟地震作用，水平荷载通过作动器施加到加载梁横截面形心处。竖向加载装置用以模拟结构上部荷载，通过 1 个液压千斤顶将竖向荷载垂直施加到试件加载梁顶的分配梁上，并在试验过程中保持轴压比 0.1 不变。通过高强地锚螺栓将试件基础梁与试验装置基础相连，防止试件在加载过程中剪切滑移。在基础梁上布置水平向位移计用以监测加载过程中基础梁滑移。

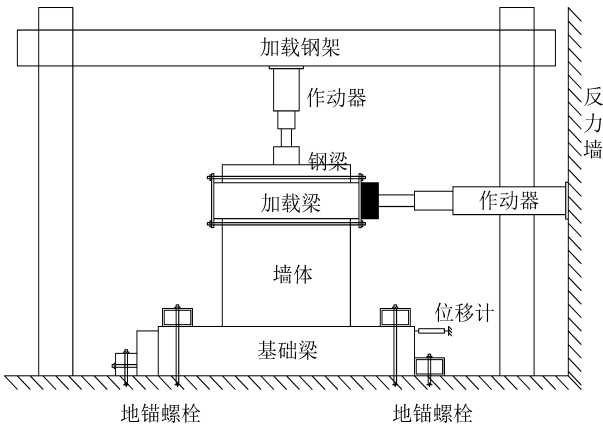


图 4 试验加载装置

Fig. 4 Loading device for the test

1.3 加载制度

试验采用拟静力试验方法，保持竖向荷载恒定，水平往复荷载作用于加载梁一端。按照《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015) 的建议，水平荷载采用力 - 位移混合控制加载。试件屈服前采用荷载控制方式进行加载，以 10 kN 为级差，每级荷载循环 1 次；试件屈服后，采用位移控制方式进行加载，加载步距为屈服荷载的倍数。水平荷载降至试件峰值荷载的 85% 或试件无法安全加载时，停止加载。

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏形态与裂缝分布

试件 W1 加载至 30 kN 时，墙体中下部首先出现水平向短裂缝；加载至 50 kN 时可听到墙体有“沙沙”声。随加载进行，墙体角部出现斜裂缝并向墙体中间延伸，交叉裂缝数量增加，裂缝位置由墙体中下部逐渐向墙体中上部移动。当位移 δ 达到 10.18 mm ($\theta = 0.727\%$) 时，墙面沿墙体对角方向突然形成多条斜裂缝，墙体上中下部均有分布。当位移 δ 达到 11.17 mm ($\theta = 0.798\%$) 时，边柱根部小块 EPSC 因受挤压边缘破碎。试件最终破坏形态如图 5a 所示，表现出剪切型破坏特征。

试件 W2 加载至 40 kN 时，墙体中下部首先出现水平向裂缝，裂缝出现时间较试件 W1 的延后，说明芯孔直径增加，可延缓墙面裂缝的出现；加载至 70 kN 时才听到墙体有“沙沙”声，说明芯孔直径增加，可延缓 EPSC 损伤发展。随加载的进

行, 试件 W2 墙面裂缝发展与 W1 的具有一致性规律, 由墙体中下部向中上部发展, 且斜裂缝逐渐增加。当位移 δ 达到 11.04 mm ($\theta = 0.789\%$) 时, 墙面中部有数条斜裂缝产生, 已有裂缝宽度增加, 墙体侧面根部有小块 EPSC 因受挤压边缘破碎。试件最终破坏形态如图 5b 所示, 同样表现为剪切型破坏特征。

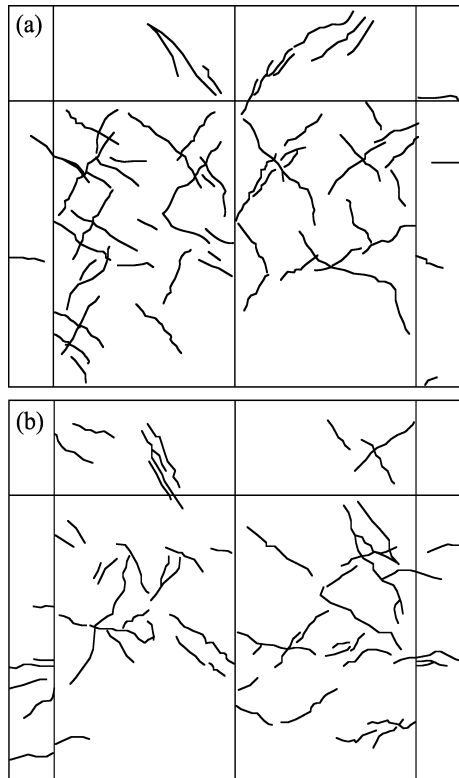


图 5 试件 W1 (a)、W2 (b) 的破坏形态

Fig. 5 Failure mode of the specimens
W1 (a) and W2 (b)

2.2 滞回曲线

试件 W1、W2 加载点处水平荷载 - 位移 ($F - \delta$) 滞回曲线如图 6 所示, 2 个试件滞回曲线对称性良好。2 个试件开裂前荷载 - 位移曲线均基本为直线, 加载和卸载曲线基本重合。随水平荷载增加, 墙面裂缝延伸, 钢筋屈服, 试件滞回环面积逐渐增加。随加载不断进行, 裂缝充分开展, 墙面形成数个“X”型裂缝, 试件刚度退化明显, 滞回环残余变形增加, 滞回曲线“捏拢”现象在加载后期逐渐严重。试件 W2 较 W1 芯孔直径增加, 裂缝出现延缓且墙体 EPSC 损伤进程延缓。

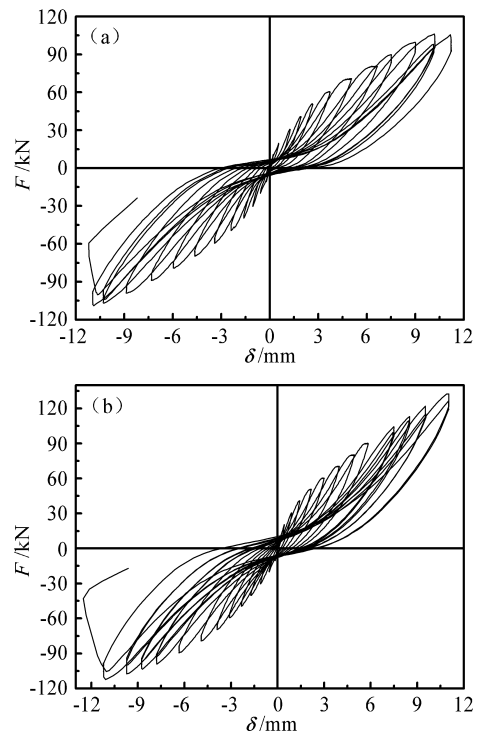


图 6 试件 W1 (a)、W2 (b) 的滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis curves of the specimens
W1 (a) and W2 (b)

2.3 骨架曲线

试件加载点处水平荷载 - 位移 ($F - \delta$) 骨架曲线如图 7 所示。加载初期, 试件 W2 的初始刚度高于 W1, 表明芯孔直径增加可提高复合墙体的初始刚度。随着荷载增加, 各试件墙面出现裂缝, 试件刚度逐渐退化, 2 个试件的骨架曲线逐渐分开。在相同位移作用下, 试件 W2 的骨架曲线位于 W1 骨架曲线上侧, 表明芯孔直径增加对试件刚度退化起到延缓作用并提高了复合墙体的承载力。

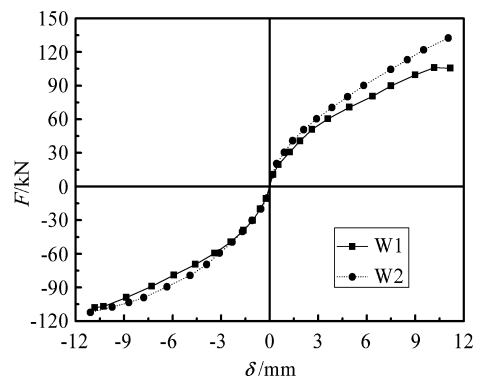


图 7 各试件骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves of the specimens

本文采用能量法（Guo，2014）计算试件屈服荷载 F_y 。2个试件骨架曲线上各特征点荷载值见表4。其中，相对值为某一阶段下各试件特征点荷载值与试件W1特征点荷载值的比值。与试件W1相比，W2各特征点荷载值均有不同程度的提高：试

件W2的相对值在开裂荷载阶段为1.331，在屈服荷载阶段为1.135，在破坏荷载阶段为1.143。以上表明配筋不变的情况下，芯孔直径增加可以抑制EPSC格构式混凝土墙体的开裂，延缓此类复合墙体损伤破坏发展。

表4 试件开裂、屈服、破坏阶段荷载值

Tab. 4 Test results of specimens of the cracking load, yield load, failure load

试件	开裂荷载		屈服荷载			破坏荷载		
	F_{cr}/kN	F_{cr} 相对值	F_y/kN	F_y 均值/ kN	F_y 相对值	F_u/kN	F_u 均值/ kN	F_u 相对值
W1	+30.70	1.000	+71.17 -72.01	71.59	1.000	+106.11 -108.00	107.06	1.000
W2	+40.85	1.331	+84.50 -78.00	81.25	1.135	+132.46 -112.30	122.38	1.143

注： F_{cr} ， F_y ， F_u 分别表示试件开裂荷载、屈服荷载、破坏荷载；“+”表示水平作动器推力方向；“-”表示水平作动器拉力方向。

2.4 刚度退化

本文以试件平均割线刚度随加载点位移变化曲线表征试件在水平往复荷载作用下的刚度退化规律。试件平均割线刚度-加载点位移（ $K-\delta$ ）曲线如图8a所示。由图可知：加载初期，试件W2初始刚度大于W1，是其1.39倍，表明芯孔直径由120 mm增加到160 mm，可明显提高此类复合墙体的初始刚度。随试件水平位移增加，墙体裂缝产生、延伸，墙体出现损伤，各试件刚度退化明显并最终趋于稳定。试件W2比W1具有更高的割线刚度。试验结果表明，芯孔直径增加，可使试件刚度退化减缓，使复合墙体的损伤破坏延缓。

2.5 耗能能力

以累积滞回耗能为标准，对比分析各试件耗能能力。试件累积滞回耗能-加载点位移（ $E-\delta$ ）曲线如图8b所示，试件破坏前一级荷载作用下各试件累积耗能值列于表5。由图8b和表5可知：①相同位移作用下，试件W2的累积滞回耗能大于W1；②试件W2的累积滞回耗能在W1的1.14倍，表明增加芯孔直径可提高复合墙体的耗能能力。

表5 各试件累计滞回耗能能力比较

Tab. 5 Comparison of cumulative energy dissipation of the specimens

试件编号	累积耗能 $E/(\text{kN} \cdot \text{mm})$	相对值
W1	7 923	1.000
W2	9 030	1.140

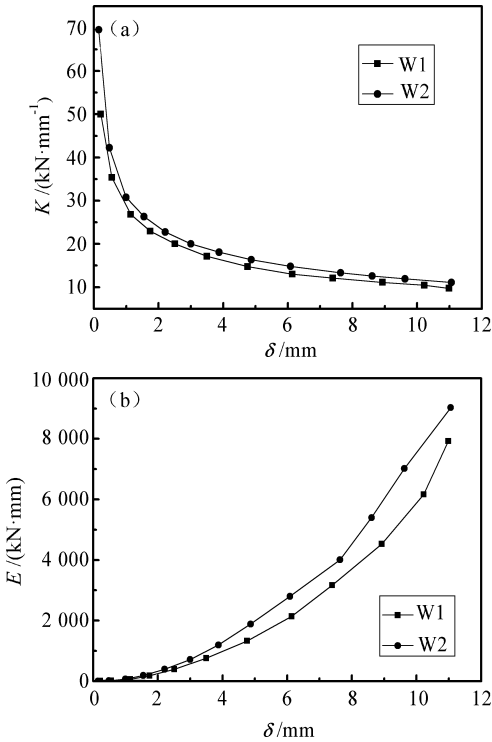


图8 各试件刚度退化曲线（a）和累积耗能（b）

Fig.8 Stiffness degradation curves (a) and accumulated energy dissipation (b) of the specimens

3 结论

为拓展EPSC格构式混凝土墙体在村镇建筑中的应用，本文开展了芯孔直径分别为160 mm和120 mm的2个传统型EPSC格构式混凝土墙体原

型试件的抗震性能试验,基于试验现象和数据分析,得到了以下结论:

(1) 不同芯孔直径的试件裂缝发展和损伤破坏规律基本一致,均表现为剪切型破坏特征。芯孔直径增加,EPSC 格构式混凝土损伤破坏进程延缓。

(2) 配筋不变,芯孔直径增加,EPSC 格构式混凝土墙体的承载力、初始刚度、耗能能力均有不同程度的提高。由于芯孔直径增加导致试验模型配筋率的降低,对墙体抗震性能将存在一定的影响,这一问题有待进一步研究。由本文分析可以推测,如果保持相同配筋率,芯孔直径增加会进一步提高墙体的抗震性能。

(3) 复合墙体的初始抗侧刚度和承载力主要由芯孔内的钢筋混凝土骨架承担;复合墙体的耗能由 EPSC 和芯孔内钢筋混凝土骨架共同完成。

参考文献:

- 曹启坤,包宇洋,沈燕梅. 2018. 芯孔尺寸对高层格构式混凝土墙结构抗震性能影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 37(1): 70-74.
- 曹万林,程娟,张勇波,等. 2015a. 保温模块单排配筋再生混凝土低矮剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 36(1): 51-58.
- 曹万林,马恒,张建伟,等. 2015b. 不同构造 EPS 模块再生混凝土剪力墙抗剪性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 35(4): 78-84.
- 国务院. 2017. “十三五”节能减排综合工作方案[J]. 中国建材, (3): 42-53.
- 韩文龙,钱稼茹,张微敬,等. 2020. 预制空心板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 41(2): 32-41.
- 李振宝,许良雨,李艳娜,等. 2021. 预制立群混凝土空心墙板轴心受压性能试验研究[J]. 建筑结构, 51(S1): 1124-1131.
- 马勃. 2021. 住建部发布《关于加强县城绿色低碳建设的通知(征求意见稿)》[J]. 中国房地产, (12): 7.
- 孙建超,钱稼茹,方鄂华,等. 2002. 小剪跨比保温砌模混凝土墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 23(2): 19-26.
- 唐柏赞,熊立红,李小军,等. 2020. 足尺水泥聚苯模壳格构式混凝土填充墙钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 41(9): 13-23.
- 王奇,钱稼茹,马宝民,等. 2004. 保温砌模混凝土网格墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 25(4): 15-25.
- 张微敬,杜轶男,康洪震,等. 2011. 大网格混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 32(5): 116-124.
- 张勇波,曹万林,周中一,等. 2015. 保温模块单排配筋再生混凝土中高剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 36(9): 29-36.
- 周中一,曹万林,张勇波. 2016. L 形边框单排配筋保温模块矮剪力墙抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 49(12): 35-44.
- 宗边. 2018. 住房城乡建设部发布技术导则 划出农村危房改造安全底线[J]. 工程建设标准化, (5): 37.
- Dusicka P, Kay T. 2011. In-plane lateral cyclic behavior of insulated concrete form grid walls[J]. Journal of Structural Engineering, 137(10): 1075-1084.
- Guo Z H. 2014. Principles of reinforced concrete[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 415.
- Tang B, Chen S, Li X, et al. 2019. Seismic performance of RC frames with EPSC latticed concrete infill walls[J]. Engineering Structures, 197: 109437.
- Tang B, Li X, Chen S, et al. 2017. Shaking table test of a RC frame with EPSC latticed concrete infill wall[J]. Shock and Vibration, (3): 1-18.
- JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].
- CECS 173: 2004, 水泥聚苯模壳格构式混凝土墙体住宅技术规程[S].

Experimental Study on the Influence of Core Hole Size on the Seismic Performance of Expansive Polystyrene Granule Cement Latticed Concrete Wall

LI Xiaojun^{1,2}, CAO Xinyu¹, TANG Baizan³

(1. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

(3. Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract

In order to study the influence of the core-hole size on the seismic performance of the traditional expansive polystyrene granule cement (EPSC) latticed concrete walls, two traditional EPSC latticed concrete walls are subjected to lateral cyclic loading. The core-hole diameters of the specimens are 160 mm and 120 mm respectively. By the test, the failure mode and bearing capacity, hysteresis curve, skeleton curve, stiffness degradation and other seismic performance of each specimen were compared. The results show that the composite wall with a large core-hole diameter has better seismic performance; as the core-hole diameter increases, the bearing capacity, lateral stiffness and energy dissipation capacity of the composite wall improve to some degree.

Keywords: core – hole size; expansive polystyrene granule cement (EPSC); latticed concrete wall; pseudo-static test; seismic performance