

# U 型槽砌块加强肋复合墙体抗震性能试验研究

苗欣蔚<sup>1</sup>, 黄 炜<sup>1</sup>, 张 敏<sup>2</sup>, 罗 斌<sup>1</sup>, 凌 柯<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 河北经贸大学 管理科学与工程学院, 河北 石家庄 050061)

**摘要:** 为了研究基于新材料(淤泥质陶粒发泡混凝土)、新构造形式(U 型槽砌块加强肋)的复合墙体的抗震性能及不同加强肋对墙体的影响, 设计了两幅配筋砌体墙并通过拟静力试验检验了其抗震性能, 结果表明: 陶粒粉煤灰砌块砌体墙具有较好的变形能力和耗能性能; 双加强肋墙体(W-2)在承载力、刚度和耗能等抗震性能指标较单加强肋墙体(W-1)均有不同程度的增强, 但延性略低于单加强肋墙体; 因此, 淤泥质陶粒发泡混凝土配筋砌体墙具有良好的承载力、刚度、延性、耗能等性能, 可满足实际工程需要。

**关键词:** 淤泥质陶粒发泡混凝土; U 型槽砌块; 加强肋复合墙体; 抗震性能

中图分类号: TU317

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)04-0520-06

## Experimental study on seismic behavior of composite walls with reinforcing rib in U-block

MIAO Xinwei<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>2</sup>, LUO Bin<sup>1</sup>, LING Ke<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Management Science and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China)

**Abstract:** In order to study the seismic performance composite walls with new material (Muddy ceramic foam concrete) and new forms (reinforcing ribs in U-block), two specimens of 1/2 ratio of composite walls with reinforcing rib in U-block under cyclic loads are designed in the paper. Results show that the wall went through three stages i. e. elastic stage, elastoplastic stage, destruction phase. The final destruction takes the form of shear destruction, and the failure mechanism is reasonable. Double reinforcing rib composite wall (W-2) is better than the single reinforcing rib composite wall in strengthening capacity, stiffness and energy dissipation of the seismic performance indicators (W-1) in varying degrees of increase, with slightly lower ductility than single reinforcing rib composite wall; but with no collapse phenomenon in the whole course of the experiment. Mucky ceramic foam concrete block composite walls with reinforcing ribs have better seismic performance, which provide basis for application of multilayer composite wall structure of the house.

**Key words:** Muddy ceramic foam concrete; U-block; Composite wall with reinforcing rib; Seismic performance

砌体结构由于其造价低、砌筑快、取材方便等优势被广泛应用各类地区, 在人类历史上有着不可替代的位置<sup>[1-3]</sup>。新型现砌加强肋生态复合墙结构是基于传统生态复合墙结构<sup>[4-5]</sup>与配筋砌体结构<sup>[6]</sup>提出的一种新材料、新形式的结构体系。其中, U 型槽砌块加强肋复合墙体主要由新材料(淤泥制陶粒)混凝土砌块砌筑, 容重与传统材料相比降低约 40%<sup>[7]</sup>; 墙体加强肋部位采用新形式的开槽“U”形砌块(如图 1 所示), 墙体由新配比的陶粒粉煤灰发泡混凝土砌块砌筑, 容重轻且墙体肋梁部位采用开槽空心砌块, 免去了支模的工序, 提

升了施工速度。

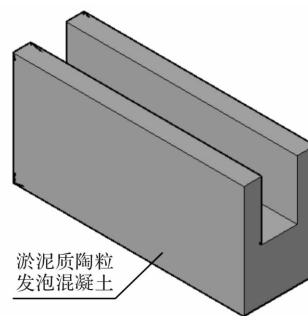


图 1 U 型槽砌块示意图

Fig. 1 Schematic diagram of U-block

收稿日期: 2017-05-01

修改稿日期: 2018-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378416); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAJ16B02-04)

第一作者: 苗欣蔚(1989—), 男, 博士生, 主要从事结构工程抗震及新型结构体系的研究。E-mail: panzer.8002@163.com.

郭樟根<sup>[8]</sup>对 4 榀构造柱-圈梁体系的混凝土砌块砌体墙试件进行了静力加载试验, 研究表明: 按照普通混凝土砌块承重结构的抗震设计要求, 可以实现再生混凝土砌块承重结构与普通混凝土砌块相同的抗震性能; 文献[9]进行 3 片不同构造形式的 RC-加气混凝土砌块墙的水平低周反复荷载试验, 结果表明: 通过合理构造措施将钢筋混凝土与加气混凝土砌块结合在一起形成的组合承重墙, 具有较好的抗震性能; 熊立红<sup>[10]</sup>通过 5 组试件的低周反复加载试验, 得出了不同纤维片材粘贴方式复合墙片的抗震性能指标, 结果表明: 复合墙片比原墙片具有更高的受剪承载力、延性和耗能能力。

本文通过 2 个墙体试件的抗震性能试验, 研究淤泥质陶粒发泡混凝土砌块砌筑带加强肋复合墙体的受力性能及加强肋数量对墙体抗震性能参数的影响。

1 试验

1.1 试件设计与制作

本次试验共两个试件模型, 均采用淤泥质陶粒发泡混凝土砌块砌筑, 使用陶粒粉煤灰发泡混凝土砌块砌筑, 墙体两侧现浇构造柱, 墙体砌筑完成后顶部现浇顶梁<sup>[12]</sup>, 顶梁兼做加载梁, 其中: W-1 设置一道加强肋, W-2 设置两道加强肋。试件尺寸及配筋详细信息见表 1。

表 1 试件尺寸及配筋  
Tab. 1 Specimen size and reinforcement

试件 编号	加强肋 个数	设计轴 压比	宽×高×厚 /m	截面尺寸/m			外框配筋			加强肋配筋	
				顶梁	连接柱	加强肋	顶梁	构造柱	箍筋	纵筋	箍筋
W-1	$\frac{1}{2}$	0.22	1.4×1.6×0.12	200	120	10	4Φ6	4Φ6	Φ4@100	4Φ4	Φ2@60
W-2											

试件模型由淤泥制陶粒发泡混凝土砌块砌筑而成, 两侧设置构造柱同顶梁用混凝土浇筑。砌块有两种规格: ①为实心砌块; ②为 U 型槽砌块, 墙体砌筑步骤如下图所示。

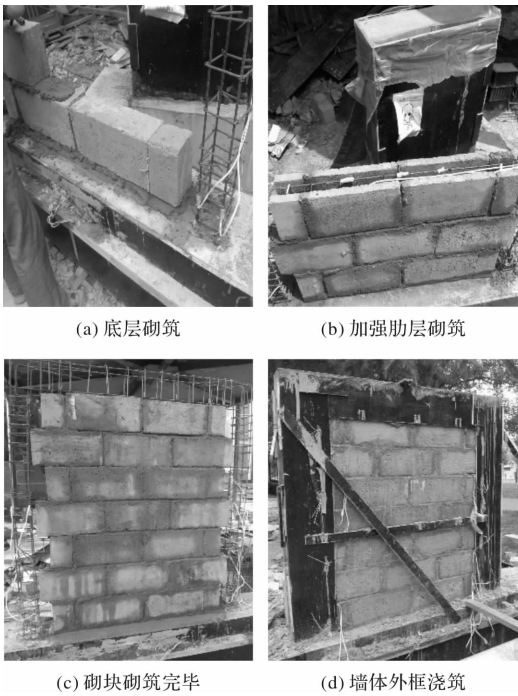


图 2 试件制作  
Fig. 2 Specimen production

1.2 材料的物理、力学性能

试件构造柱、顶梁、加强肋混凝土均试用 C30, 其砌筑砌块采用陶粒粉煤灰发泡混凝土砌

块, 其各种材料基本力学性能指标如下表所示。

表 2 混凝土基本物理、力学性能  
Tab. 2 Basic physical and mechanical properties of concrete

混凝土 强度	容重 /kN·m <sup>-3</sup>	立方体 抗压强 度/MPa	轴心抗 压强度 /MPa	弹性模 量/MPa	泊松比
C30	25.7	29.6	25.2	3.02×10 <sup>4</sup>	0.2

表 3 淤泥制陶粒发泡混凝土砌块基本物理、力学性能  
Tab. 3 Basic physical and mechanical properties of  
muddy ceramic foam concrete blocks

容重/kN·m <sup>-3</sup>	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa
15.29	16.69	10.31

表 4 钢筋力学性能  
Tab. 4 Mechanical properties of steel bars

钢筋 规格	直径 /mm	屈服强 度/MPa	极限强 度/MPa	弹性模 量/MPa	伸长率
A2	2	374.6	407.3	1.95×10 <sup>5</sup>	1.2%
A4	4	672.6	793.2	2.1×10 <sup>5</sup>	1.2%
C6	6	550.5	623.2	2.1×10 <sup>5</sup>	2.9%

1.3 试验方法与加载制度

竖向恒载 120 kN, 先进性预加载待检查测量装置正常后正式加载, 通过分配量均匀分布于墙顶部圈梁, 水平向通过作动器施加低周反复荷载; 屈服前采用力控制, 以 10 kN 为增量, 每级循环一次, 屈服后改用位移控制, 以 3 mm 为增量, 每

级循环 3 次, 直至承载力降为峰值荷载的 0.85 倍, 视为墙体破坏, 试验结束。

#### 1.4 测点布置

主要测试内容为: 各层水平侧移, 连接柱、

加强肋的钢筋应变。钢筋测点及墙体位移测点布置如图 3 所示。

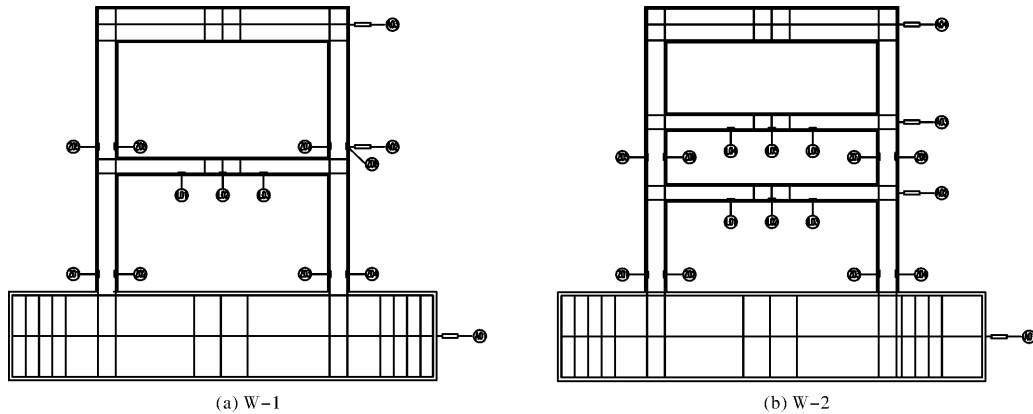


图 3 试件测点布置

Fig. 3 Layout of test points

## 2 试验结果

### 2.1 墙体破坏形态

表 5 试件破坏过程及破坏形态

Tab. 5 Failure process and form of specimen

试件编号	破坏形态			破坏模式
	弹性阶段	弹塑性阶段	破坏阶段	
W-1	在水平荷载达到极限荷载百分之六十之前, 试件表现为弹性, 肋梁无裂缝; 水平荷载达到极限荷载 0.7 倍时, 砌体和砂浆层开裂。	水平力增大, 砌块中出现大量裂缝, 并延伸至肋梁。当水平力达到极限荷载的九成左右时, 多条裂缝已经贯通, 墙体的水平位移增大速度变快, 呈现塑性变形。	位移大幅度增长, 卸载后的残余变形较大。墙体中的斜裂缝已在部分加强肋中贯通, 延伸至框柱, 并逐步形成沿对角线方向贯通整个墙体的弥散斜裂缝, 各层砌块出现大量的破碎、剥落现象, 大量灰缝破裂, 并逐个退出工作。	剪切型破坏
W-2	在水平荷载达到极限荷载百分之六十之前, 表现为弹性, 加强肋梁中没有出现裂缝; 当水平荷载达到极限荷载的 0.7 倍左右时, 砌体和砂浆层开裂。	水平力增大, 裂缝增加并不断延伸, 由砌块延伸至肋梁, 柱底出现水平裂缝; 当水平荷载达到极限荷载的 0.9 倍时, 试件中多条裂缝贯通, 墙体的受力性能表现为一定的弹性。	达到峰值荷载后, 墙体中的斜裂缝在部分加强肋中贯通, 延伸至框柱, 并逐步形成沿对角线方向贯通整个墙体的弥散斜裂缝, 各层砌块出现大量的破碎、剥落现象, 大量灰缝破裂, 并逐个退出工作。构造柱受拉区钢筋屈服, 受压区混凝土压碎。	剪切型破坏

W-1 与 W-2 最终的破坏形态如图 4 所示。

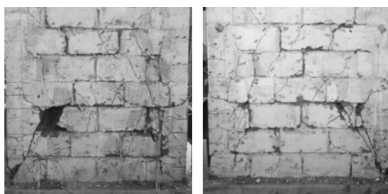


图 4 墙体破坏照片

Fig. 4 Wall damage

### 2.2 构造柱钢筋应变分析

为便于分析钢筋应变变化趋势, 本文取同一个方向水平荷载作用下的钢筋应变进行分析。

试件构造柱表现为连接柱一侧钢筋受拉, 另一侧钢筋受压, 大致对称分布; 在达到墙体开裂荷载前, 连接柱钢筋应力应变曲线随荷载的增减大致呈线性变化; 随着水平荷载的提升, 构造柱内钢筋从屈服直至达到极限拉应变。

### 2.3 加强肋钢筋应变分析

由图5所示,试件开裂前,加强肋处钢筋应变很小;荷载继续增大,当达到墙体开裂荷载后,裂缝延伸至加强肋内,钢筋应变增长明显;后期由位移控制时随着每一级位移增大,肋梁钢筋被拉断。

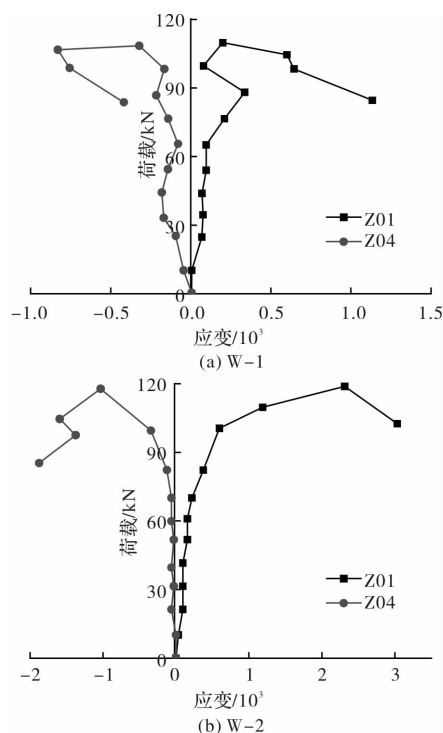


图5 构造柱钢筋应变图

Fig. 5 Strain diagram of steel bar in structure column

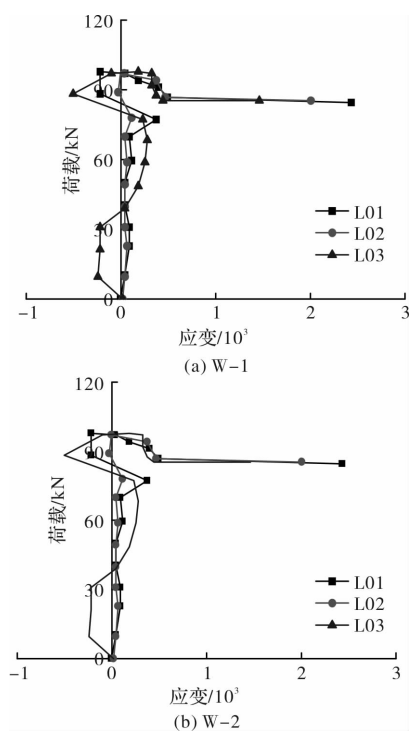


图6 加强肋钢筋应变图

Fig. 6 Strengthening the strain diagram of ribbed steel bar

## 3 墙体抗震性能对比分析

### 3.1 滞回曲线

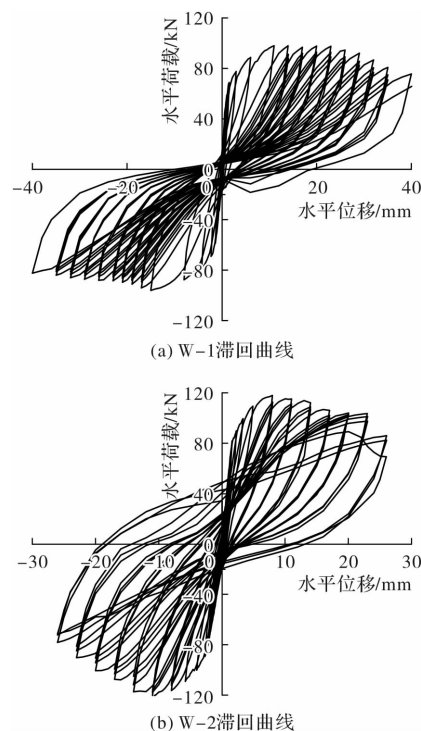


图7 W-1和W-2滞回曲线

Fig. 7 W-1 and W-2 hysteretic curves

由图7可以看出:

(1)试件有明显的捏拢现象由砌体的滑移引起,试件为剪切变形。(2)试件开裂前,滞回曲线基本呈直线变化,刚度退化和残余变形现象不明显;屈服前,整体刚度变化小,耗能较小;W-2滞回曲线显示出较明显的弓形,滞回环较为饱满,墙体耗能能力较W-1明显提高。(3)W-2的滞回曲线更饱满,其耗能性能更佳,是由于设置了两道水平配筋,增加了水平向钢筋传递墙体所受的剪力,分担了砌体及灰缝的剪应力,表明了设置双肋梁的墙体受力性能优于单肋梁;W-2的峰值荷载较W-1提升了17%。(4)W-2较W-1饱满,由此可见,不同加强肋设置对复合墙体抗震性能的影响较为明显,双加强肋墙体的抗震性能较W-1有明显提高。

### 3.2 骨架曲线

W-1和W-2骨架曲线趋势相似,均经历了弹性、弹塑性和破坏阶段;试件屈服后骨架曲线表现平缓,表现了墙体承载力的下降较慢;W-2的极限荷载较W-1提高约17.5%,证明试件设置双加强肋相比单加强肋对墙体承载力有较大的增强。

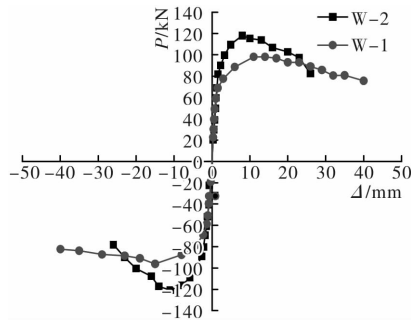


图 8 试件 W-1 与 W-2 骨架曲线对比

Fig. 8 Comparison of W-1 with W-2 skeleton curves

表 6 试验结果

Tab. 6 Test results

试件 编号	开裂荷载		屈服荷载		极限荷载		破坏荷载		延性	极限屈服位移角
	$V_k/\text{kN}$	$\Delta_k/\text{mm}$	$V_y/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$V_w/\text{kN}$	$\Delta_w/\text{mm}$	$V_u/\text{mm}$	$\Delta_u/\text{mm}$	$\mu=\Delta_u/\Delta_y$	$\theta=\Delta_u/h$
W-1	58.7	1.17	72.42	2.70	98.11	14.1	82.5	23.2	8.7	1/70
W-2	50.8	1.12	99.61	3.29	117.8	8.12	101.5	17.1	5.1	1/95

### 3.4 变形曲线

在竖向荷载和水平荷载共同作用下，墙体侧向变形曲线如图 9 所示。

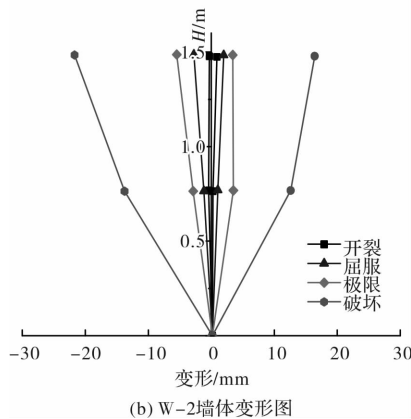
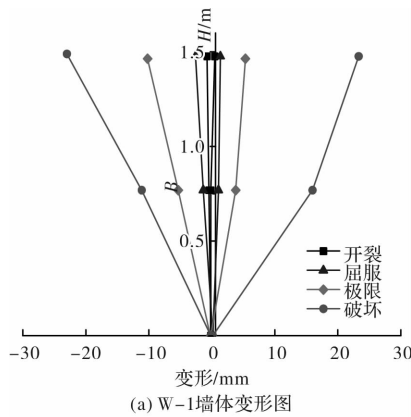


图 9 墙体变形图

Fig. 9 Wall deformation

由图 9 可知：

W-1 墙体与 W-2 墙体侧向变形基本关于 Y 对称；墙板破坏时，W-1 墙体顶部位移达到 23 mm，

### 3.3 特征荷载及特征位移

由表 6 可得：

(1) W-2 墙体的开裂荷载外各个阶段荷载值均大于 W-1；

(2) 双加强肋的布置能更好的限制砌块裂缝开展，增强墙体的承载力；

(3) 单加强肋试件的剪切滑移现象明显，极限屈服位移角大于双加强肋试件。

极限转角达到 1/70，W-2 墙体顶部位移达到 17 mm，极限转角达到 1/95；两棉墙体在试验后期未出现倒塌现象。

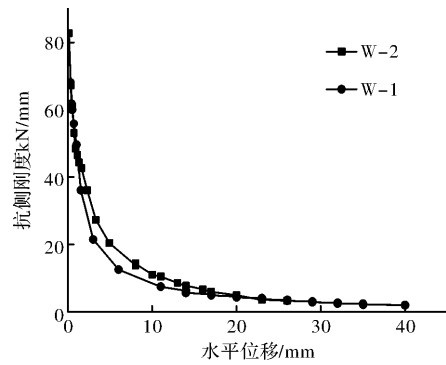


图 10 试件刚度退化图

Fig. 10 Stiffness degradation of specimen

### 3.5 刚度退化

由图 10 可以看出，二者的刚度退化曲线较接近，试验初期单肋梁墙体退化速率略快于双肋梁墙体，证明其初始刚度低于双肋梁墙体，可见肋梁的增加明显提升了墙体刚度<sup>[16]</sup>。

### 3.6 耗能能力

由表 7 可以看出，在整个加载过程中，墙体的等效粘滞阻尼系数不断增大，反映了构件损伤的累积；墙体 W-2 耗能能力较 W-1 强。

表 7 W-1 与 W-2 墙体的等效粘滞阻尼系数

Tab. 7 Equivalent viscous damping coefficient

of W-1 and W-2 wall					%
墙体编号	开裂荷载	屈服荷载	极限荷载	破坏荷载	
W-1	8.1	9.5	10.8	12.8	
W-2	8.3	9.7	11.8	14.2	

## 4 结论

(1)在低周反复荷载作用下,两榀淤泥质陶粒发泡混凝土砌块加强肋复合墙体较明显地经历了弹性、弹塑性和破坏三个阶段,试件破坏形式为剪切型破坏,属于合理的破坏机制。

(2)肋梁能够对砌块形成有效约束,限制砌块的裂缝延伸和发展;双肋梁墙体在承载力、刚度和耗能等抗震性能指标较设置单肋梁墙体均有不同程度的提高,而延性略低于单肋梁复合墙体;两试件在整个试验过程中均未出现倒塌现象,即设置肋梁复合墙体具有较好抗倒塌能力。

(3)试件W-2的各项抗震性能指标较W-1均有不同程度的提升,而延性略低于单加强肋复合墙体;两试件在整个试验过程中均未出现倒塌现象,即设置加强肋复合墙体具有较好抗倒塌能力。

(4)设置加强肋的淤泥质陶粒发泡混凝土砌块复合墙体具有较好的抗震性能,为今后复合墙的工程应用及进一步研究提供了试验数据与参考。

U型槽砌块加强肋复合墙体是基于传统生态复合墙结构与配筋砌体结构提出的一种新材料、新形式的结构体系,本文对两榀标准尺寸的墙体进行了抗震性能的初步探讨,有一些其他影响因素并未考虑,如高宽比变化、墙体开门洞窗洞等。在下一步研究中,将逐步完善不同影响参数墙体的受力性能试验,给出墙体受剪承载力一般公式。

## 参考文献 References

- [1] 张冰. 粉煤灰陶粒混凝土基本性能及相关耐久性能研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012.  
ZHANG Bin. Study on basic performance and related durability of fly ash ceramsite concrete[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2012.
- [2] KELLY J M, MARSHON M R. Stability and post-buckling behavior in nonbolted elastomeric isolator[J]. Seismic Isolation and Protective Systems, 2010, 1(1): 41-54.
- [3] KELLY J M, MARSHON M R. Stability and post-buckling behavior in nonbolted elastomeric isolator[J]. Seismic Isolation and Protective Systems, 2010, 1(1): 41-54.
- [4] SHING P B, SCHULLER M, HOSKERE V S. In-plane resistance of reinforced masonry shear wall[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1990, 116(3): 619-640.
- [5] SHING P B, SCHULLER M, HOSKERE V S, et al. Flexural and shear response of reinforced masonry wall[J]. ACI Journal, 1990, 87(6): 646-656.
- [6] 侯丽娜, 黄炜, 田英侠. 竖向荷载下的生态复合墙体内力计算及影响因素分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(9): 76-80.  
HOU Lina, HUANG Wei, TIAN Yinxia. Calculation of internal force and influence factors analysis of eco-composite wall under vertical loading[J]. Industrial Construction, 2015, 45(9): 76-80.
- [7] 姚雪燕. 城市生活垃圾陶粒化试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
YAO Xueyan. Experimental study on ceramization of municipal solid waste[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [8] 郭樟根. 预应力混凝土空心砌块砌体抗裂、抗震性能试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2002.  
GUO Zhanggeng. Experimental study on anti-cracking and antiseismic performance of prestressed concrete hollow block masonry[D]. Nanjing: Nanjing Tech. University, 2002.
- [9] 熊立红, 张敏政. 设置芯柱-构造柱混凝土砌块墙体抗震剪切承载力计算[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 82-87.  
XIONG Lihong, ZHANG Minzheng. Evaluation of seismic shear strength of concrete-block walls with core columns/constructional columns[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2004, 24(2): 82-87.
- [10] 熊立红, 阳超. 砌体结构的抗震研究现状[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 1(3): 111-119.  
XIONG Lihong, YANG Chao. An overview of research on seismic behavior of masonry structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 1(3): 111-119.
- [11] 吕伟荣, 胡益民, 李远. 节能型砌体组合墙片的抗震性能分析[J]. 地震研究, 2015, 37(2): 293-297.  
LV Weirong, HU Yiming, LI Yuan. Seismic performance analysis of energy-saving masonry composite wall[J]. Journal of Seismological Research, 2015, 37(2): 293-297.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌体基本力学性能试验方法标准: GB/T50129-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P. R. China. Standard for test method of basic mechanics properties of masonry: GB/T50129-2011[S].

- ture Industry Press, 1998.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层民用建筑钢结构技术规程:JGJ99-2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P. R. China. Technical specification for steel structure of tall building:JGJ99-2015[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2015.
- [10] 傅学怡. 实用高层建筑结构设计[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社, 2010: 440-475.
- FU Xueyi. Applied structural design of tall building [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010: 440-475.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P. R. China. Code for seismic design of buildings: GB50011-2010[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010.
- [12] 孙爱伏, 欧进萍. 高层钢结构抗震 Pushover 分析的侧向力分布模式及其影响[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(4): 88-93.
- SUN Aifu, OU Jinping. Lateral action patterns and their effects on Pushover seismic analysis of steel tall buildings[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(4): 88-93.
- [13] 缪志伟, 马千里, 叶列平, 等. Pushover 方法的准确性和适用性研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(1): 55-60.
- MIAO Zhiwei, MA Qianli, YE Lieping, et al. Study on the accuracy and applicability of the Pushover Analysis [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(1): 55-60.
- [14] 陈建兴, 姜文伟, 穆为. Pushover 分析在性能化抗震设计中的应用[J]. 结构工程师, 2008, 24(3): 81-86.
- CHEN Jianxing, JIANG Wenwei, MU Wei. Application of pushover Analysis in performance based seismic design[J]. Structural Engineers, 2008, 24(3): 81-86.
- [15] ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings [R]. Applied Technology Council, Red Wood City, California, 1996.
- (编辑 桂智刚)

---

(上接第 525 页)

- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB50010-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P. R. China. Code for design of concrete structures: GB50010-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌体结构设计规范:GB50003-2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P. R. China. Masonry structure design specification: GB50003-2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [15] 苗欣蔚. 新型现砌加强肋生态复合墙体抗震性能试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
- MIAO Xinwei. Studies on the seismic performance of the new now building stiffening rib ecological composite wall [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2015.
- [16] 陈海燕. 现砌加强肋生态复合墙体抗震性能及受剪承载力研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2011.
- CHEN Haiyan. Study on seismic behavior and shear capacity of existing reinforced concrete composite walls [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. and Tech., 2015.
- (编辑 桂智刚)