

基于不同保温形式装配式复合墙抗震性能试验研究

杨增科^{1,2}, 黄 炜², 张 敏²

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:我国城市建筑即将施行 75% 的第四步节能标准, 而围护结构的能耗是建筑节能的主控部品, 本文通过 1 榀标准装配式复合墙体试件和 3 榀不同保温形式(保温砂浆外保温、XPS 夹心保温、发泡水泥外保温)处理的节能装配式复合墙体试件的抗震性能试验, 分析了带有保温功能的装配式复合墙体的受力机理, 通过与普通装配式复合墙进行对比, 重点研究了设有保温层的装配式复合墙体的受力特点和破坏机制, 分析了承载力、强度退化、延性、刚度退化、滞回特性和耗能等抗震性能, 为装配式复合墙结构的建筑、结构保温一体化的工业化推广提供依据。

关键词:装配式复合墙结构; 拟静力试验; 抗震性能分析

中图分类号: TU352.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)01-0051-60

Experimental study on aseismic performance of assembly type composite wall based on different heat preservation forms

YANG Zengke^{1,2}, HUANG Wei², ZHANG Min²

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozhuo 454000, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: 75% energy efficiency standards will soon be implemented in urban buildings in China. The energy consumption of the enclosure structure is the main control part of the building energy efficiency. Through a seismic performance test, the wall specimens of one standard wall specimens and three different insulation forms were compared. The author analyzes the mechanism of four kinds of prefabricated composite wall. This paper focuses on the mechanical characteristics and failure mechanism of thermal insulation composite wall. The seismic behavior of the wall is analyzed, including its bearing capacity, strength degradation, ductility, stiffness degradation, hysteretic behavior and energy dissipation. The analysis, it provides the basis for the industrialization promotion of the insulation and bearing integration of fabricated composite wall structure.

Key words: Prefabricated composite wall structure; Pseudo static test; Seismic performance analysis

住宅建设作为我国的传统产业, 由于长期处于粗放型的生产模式, 属于高能源消耗产业, 工业化程度较低, 劳动生产力水平低下, 结构形式相对单一, 建筑质量较差, 特别是住宅结构的抗震安全性及舒适性亟待提高^[1-2]。以西安建筑科技大学黄炜教授为首的课题组研发了装配式复合墙结构体系——一种耗能减震、生态环保、节能保温、快速建造、经济实用的装配式结构形式, 其墙体力学性能及破坏形态也不同于常规的装配式剪力墙结构, 如图所示^[3-4]。课题组针对墙体和结构两个层级已经做了很多批试验, 但均没有涉及不同保温形式下墙体的工作性能。本文设计 3 种不同保温形式(保温砂浆外保温、XPS 夹心保温、发泡水泥外保温)下装配式复合墙体试件和 1 榀作为

对比的普通装配式复合墙体试件的拟静力试验, 通过试验分析不同保温形式下墙体的破坏特征、承载能力、刚度、变形、延性、耗能等抗震性能指标, 并与标准装配式复合墙体试件的抗震性能

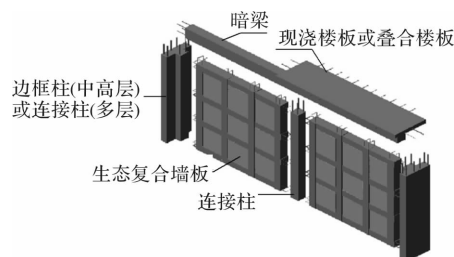


图 1 装配式复合墙结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of assembled composite wall structure

收稿日期: 2016-10-13

修改稿日期: 2017-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578446; 51378416; 51378410)

第一作者: 杨增科(1983—), 女, 博士生, 讲师, 主要从事装配式复合墙结构村镇住宅优化整合设计研究。E-mail: yangzengke2006@sina.com

进行对比,为带保温功能的装配式复合墙体在实际工程中的应用提供依据^[5-6]。

1 试验概况

1.1 试件设计

试件编号为 HECW1、HECW4、HECW5、HECW6,其中试件 HECW1 为普通装配式复合墙,作为本试验的对比试验;试件 HECW4、HECW5、HECW6 为带保温功能的装配式复合

墙,试件设计详见表 1。

4 榀试件均由三部分组成——地梁、试验墙体和加载梁^[5-8]。地梁截面为 500 mm×300 mm,长 2 400 mm;墙体试件尺寸参照 8 度区、II 类场地和地震分组第一组的 12 层住宅底层剪力墙体,原型层高 3.0 m,楼板厚度 100 mm,其中:暗梁 200 mm×300 mm,墙板高 2 700 mm,墙厚 200 mm,墙长 2 800 mm。试件墙体按照几何相似比例 1/2 进行设计。

表 1 试件设计

Tab. 1 Design of specimen

墙体	水平连接	竖向连接	肋格形式	砌块材料	边缘约束构件配筋	保温形式
HECW-1	马牙槎	焊接	3×3	加气混凝土砌块	6 Φ8	无
HECW-4	马牙槎	焊接	3×3	加气混凝土砌块	6 Φ8	纤维增强 EPS 保温砂浆夹芯保温
HECW-5	马牙槎	焊接	3×3	加气混凝土砌块	6 Φ8	XPS 夹芯保温
HECW-6	马牙槎	焊接	3×3	加气混凝土砌块	6 Φ8	发泡水泥外保温

1.2 试验方法

1.2.1 加载装置

加载装置示意图及试验现场照片如图 2。试验采用 2 000 kN 液压千斤顶施加轴力,千斤顶可随试件水平位移而移动,保持轴力竖直向下;采用 1 000 kN 液压千斤顶施加往复水平力。

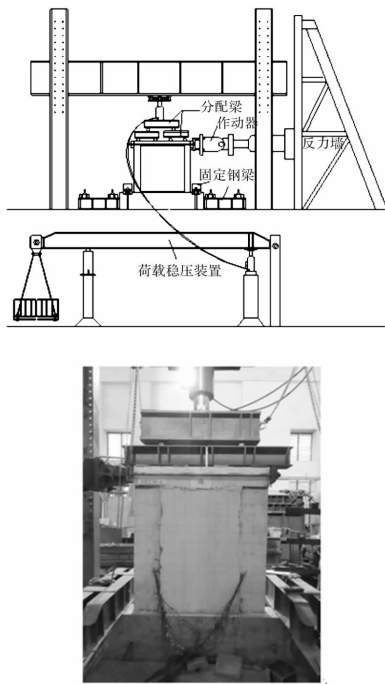


图 2 试验加载装置示意图及现场照片

Fig. 2 Schematic diagram of test loading device and the field photo

1.2.2 加载方案

1)加载方法

(1)竖向加载:以实际工程 12 层住宅底层剪力墙体的压应力计算轴向压力,轴压比控制为 0.3,并换算至试验墙体。模型竖向荷载取值 350kN,一次施加分配于加载梁上,直至竖向荷载稳定。

(2)水平加载:待竖向荷载稳定后,液压作动器借助反力墙对墙体顶部逐级施加水平荷载。

2)加载制度

试件 HECW1、HECW4、HECW5、HECW6 采取低周反复加载,竖载通过千斤顶加在分配梁上,经二次分配后加在肋柱上;竖向稳定后加水平荷载,水平荷载通过反力墙,借助液压作动器对墙体顶部施加,水平荷载每级 10 kN,每级循环一次,试件屈服后,以相同位移循环一次,进入位移控制阶段,每级递增 2 mm,同位移下每级循环 3 次。当水平荷载下降到极限荷载的 85%或试验不能继续承载时,认为试件已破坏,试验停止加载^[8-10]。

1.3 试验现象

以 HECW1 为标准试件,在试验过程中对比分析带保温功能的装配式复合墙,墙体极限状态时裂缝总结得出以下几点结论:

(1)4 榀试件承重结构的破坏形态基本接近,均表现为墙体受弯、剪双重作用破坏,墙板以剪切破坏为主,框架柱呈弯曲破坏,复合墙体受力

均经历了弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。

(2)相比标准试件, 试件 HECW4 的开裂荷载提高了 2.2 倍, 极限荷载提高了 20%, 试件 HECW5 的开裂荷载提高了 1.4 倍, 极限荷载提高了 15%, 试件 HECW6 的开裂荷载提高了 1.8 倍, 极限荷载提高了 15%, 说明外墙保温层能够影响装配式复合墙的承载能力; 试验现象表明, 带保温的装配式复合墙的墙身裂缝宽度均小于装配式复合墙的裂缝宽度, 说明由于蒙皮效应保温层对墙身裂缝开展具有一定程度的抑制作用, 结构层和保温层整体性良好, 能够很好协同工作。

(3)不同保温形式的保温面层裂缝开展情况不同, 保温砂浆保温面层裂缝开展均匀, 有大量的交叉斜裂缝, 破坏时, 耐碱网格布撕裂, 整个面层有整体脱落的趋势; 夹心保温面层沿 45 度的斜对角线上出现交叉斜裂缝, 破坏时, 裂缝宽度达 5 mm; 发泡水泥保温面层有少量的细小裂缝产生, 破坏时, 整个面层与基体的裂缝宽度达 4 mm。

2 抗震性能分析

2.1 滞回曲线

4 榀试件的滞回曲线如图 3 所示。从 4 榀试件的滞回曲线对比分析可以得出以下特征:

(1)加载的初始阶段, 试件整体好, 滞回曲线基本上是线性的, 刚度值基本一致。随着荷载的增大, 滞回曲线逐渐呈现梭形, 滞回环的面积逐渐增加, 有一定的残余变形, 随着荷载的增加, 滞回曲线拱起, 呈现“捏拢”。在弹塑性阶段, 滞回环逐渐拱起, 随着位移控制的增加, 滞回曲线逐渐向反“S”形过渡, 各个墙体的滞回曲线表现的“捏拢”现象各有不同, 试件 HECW4 和 HECW5 更为明显的反映抗剪应力的作用及锚固滑移。

(2)试件在达到极限荷载后, 四片墙体的承载力均下降较快, 但到一定程度后, 趋于稳定, 位移增长巨大, 表现出良好的延性; 此后以大位移循环时, 由于砌块和混凝土的剥落、钢筋的屈服, 刚度衰减较快, 滑移现象已非常突出, 卸载刚度的退化较快, 滞回环中部的捏缩现象越来越明显。

(3)试件 HECW6 的滞回曲线与试件 HECW1 的相比略显饱满, 可见经过发泡水泥处理的外保温装配式复合墙其耗能能力较 HECW1 提高, 发泡水泥面层可以起到提高抗剪、延缓开裂、提升构件整体耗能能力的作用。

(4)试件 HECW4 和 HECW5 滞回曲线与试件

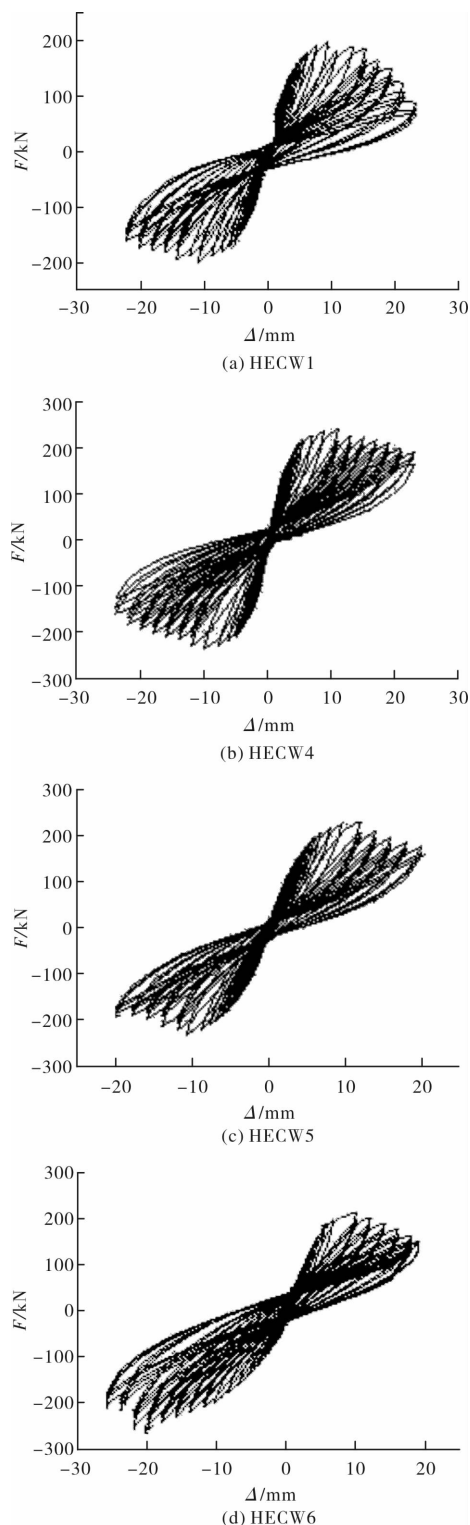


图 3 试验墙体滞回曲线

Fig. 3 Hysteresis curve of test wall

HECW1 相比滞回曲线的饱满程度明显下降, 说明试件 HECW4 和 HECW5 的耗能能力有所下降。

2.2 骨架曲线

4 榀墙体的骨架曲线如图 4 所示。从 4 榀试件的骨架曲线对比分析可以得出以下特征:

(1)在低周反复荷载作用下, 图示骨架曲线上具有明显的开裂点、屈服点、最大荷载点和极限

位移点,墙体的受力经历了弹性、弹塑性和极限三个破坏阶段。

(2)4 榀试件的骨架曲线整体形状接近,水平承载力达到峰值荷载后,试件 HECW4-HECW6 和试件 HECW1 相比有比较平缓的下降段,水平承载力均下降不大,最后试验结束均为试件严重破坏,位移角接近 1/60 不能继续加载而结束;

(3)在试件开裂前骨架曲线基本上呈直线段上升,达到极限荷载后下降比较缓慢,说明试件均具有较好的变形和耗能能力。

通过对比可看出,保温承重一体化复合墙体的极限承载力与普通装配式复合墙体相比提高了许多,特别是试件 HECW4 提高了 20%,与普通装配式复合墙相比,达到极限荷载后其骨架曲线下降相对比较平缓。

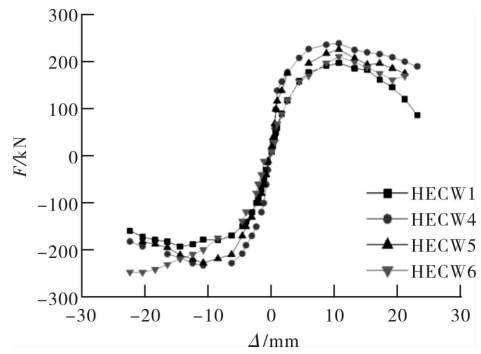


图 4 试件骨架曲线对比

Fig. 4 Comparison of the skeleton curves of the specimens

2.3 特征荷载及特征位移

4 榀墙体的开裂点、屈服点、峰值荷载点和极限荷载点的特征荷载及相应特征位移^[12-13]如表 2 所示。

表 2 特征荷载及特征位移

Tab. 2 Characteristic load and characteristic displacement

墙体编号		HECW1	HECW4	HECW5	HECW6
开裂点	开裂荷载/kN	74.5	110.3	85.7	96.6
	开裂位移/mm	1.89	1.65	1.34	2.10
屈服点	屈服荷载/kN	160.42	194.95	178.51	172.35
	屈服位移/mm	4.68	4.13	3.45	3.0
峰值点	峰值荷载/kN	199.52	233.7	236.1	235.66
	位移/mm	10.99	11.3	9.35	9.5
极限点	极限荷载/kN	169.59	198.6	200.7	200.3
	极限位移/mm	17	19	15	17.5

HECW4、HECW5、HECW6 试件的各阶段标志性荷载较 HECW-1 均有所提高,其中 HECW4 开裂荷载增幅达 48.1%,屈服荷载增幅为 21.2%,峰值荷载增幅为 19.1%,极限荷载增幅为 19.5%;HECW5 开裂荷载增幅达 15.1%,屈服荷载增幅为 11.2%,峰值荷载增幅为 18.6%,极限荷载增幅为 18.3%;HECW6 开裂荷载增幅为 29.7%,屈服荷载增幅为 7.5%,但峰值荷载增幅为 18.1%,极限荷载增幅为 18.3%。结果表明,本文所采用的保温砂浆外保温、夹心保温、发泡水泥外保温做法,对墙板的极限荷载影响不大,但能够延迟墙体开裂和提高墙体防抗倒塌能力。

2.4 位移延性和相对变形值

相对变形值^[13-14]定义为 Δ/H ,其中 Δ 是墙体顶端的侧向位移, H 为混凝土墙体的高度,当位移角接近 1/60 时,试件虽然没有完全破坏,但是平面外有出现失稳现象,为安全考虑,判定试验结束。延性系数和相对变形值如表 3。

表 3 延性系数和相对变形值

Tab. 3 Ductility coefficient and relative deformation value

墙体编号	HECW1	HECW4	HECW5	HECW6
延性系数 $\mu=\Delta_u/\Delta_y$	3.63	4.60	3.12	3.78
Δ_{cr}/H	1/715	1/906	1/675	1/643
相对变形值	Δ_y/H	1/288	1/327	1/391
	Δ_u/H	1/123	1/120	1/144
	Δ_{max}/H	1/79	1/71	1/90

(1)延性系数从大到小分别是 HECW4、HECW6、HECW1、HECW5,保温砂浆外保温墙体 HECW4 的延性最优,夹心保温 HECW5 的延性系数较 HECW1 略低因此保温形式对墙体延性产生影响。

(2)开裂时,HECW4 的相对变形值近似 1/900,其余 3 榀墙体的相对变形值在 1/755~1/600 之间,试件在后期以较大位移循环加载过程中,填充砌

块出现表皮大面积剥落、灰缝大量破坏, 当加强肋钢筋屈服时, 仍能继续承担大部分竖向荷载, 直到加载结束时, 4 榀墙体均未出现整体倒塌现象, 可见试件墙体具有较好的弹塑性变形能力以及良好的抗倒塌能力。

2.5 刚度退化

4 榀墙体的平均刚度退化曲线如图 5 所示, 图中的横坐标为混凝土墙体的顶点平均位移, 纵坐标为平均刚度^[13-15]。

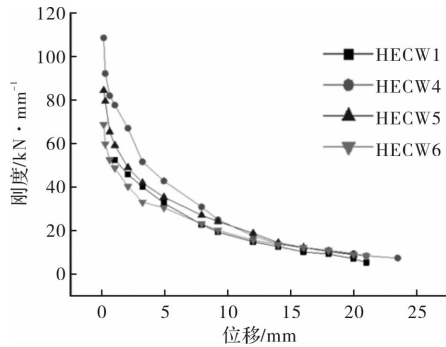


图 5 试件刚度退化图

Fig. 5 Stiffness degradation of specimen

对比退化曲线图可知:

(1)与 HECW1(标准墙体)相比, HECW4(保温砂浆)、HECW5(夹心保温)、HECW6(发泡水泥)的初始刚度分别为标准墙体初始刚度的 2.06 倍、1.6 倍、1.3 倍, 由此可见墙体的初始刚度与保温材料的性能、保温构造形式都相关。

(2)与 HECW1 相比, HECW4(保温砂浆)、HECW5(夹心保温)、HECW6(发泡水泥)的刚度衰减曲线相差不大, 总体趋势是开始刚度衰减很快, 后来随着位移的增大逐步减缓, 最后趋于平缓。

2.6 耗能能力

4 榀墙体的等效粘滞阻尼系数见表 4。可以看出:

(1)在开裂阶段, 由于 4 榀墙体处于弹性工作状态, 力和位移之间基本呈线性变化, 滞回环包围的面积很小, 普通装配式复合墙体等效粘滞阻尼系数略微大于带保温的装配式复合墙体。

(2)从开裂阶段到峰值阶段, 由于构件损伤的累积, 等效粘滞阻尼系数均有不同程度的增大, 耗能能力也逐渐上升, 带保温的装配式复合墙有更强的耗能能力, 尤其是发泡水泥处理的外墙保温; 但从峰值阶段到破坏阶段, 带保温的装配式等效粘滞阻尼系数有减小的趋势, 耗能能力减弱, XPS 夹心保温尤为明显。

表 4 延性系数和相对变形值

Tab. 4 Ductility coefficient and relative deformation value

控制阶段	HECW1	HECW4	HECW5	HECW6
开裂	3.12	2.88	2.92	2.98
屈服	4.38	4.14	4.13	4.08
峰值	6.93	7.76	7.58	7.82
破坏	7.38	5.97	4.79	6.12

3 结语

通过对 3 榀保温承重一体化复合墙体(纤维增强 EPS 保温砂浆夹芯保温、XPS 夹芯保温、发泡水泥外保温)与 1 榀普通装配式复合墙体进行 1/2 比例模型同尺寸拟静力试验, 研究保温承重一体化复合墙体的受力特点及破坏机制, 对比不同保温材料的保温承重一体化复合墙体的承载力、滞回特性、延性、刚度退化和耗能等抗震性能指标, 试验结果表明: 4 榀墙体在破坏阶段具有较强的抗倒塌性, 破坏形式均为弯剪型破坏, 保温承重一体化复合墙体有更强的耗能能力, 尤其是纤维增强 EPS 保温砂浆夹芯保温复合墙体, 其标志性荷载值明显高于其他墙体, 夹芯保温层对墙身裂缝开展具有一定程度的抑制作用, 内叶墙板与保温层系统能够相互作用, 整体性能良好。

参考文献 References

[1] 张泽平, 李珠, 董彦莉. 建筑工程保温节能墙体的发展现状与展望. 工程力学[J]. 2007(2):121-128.
ZHANG Zeping, LI Zhu, DONG Yanli. The development status and prospect of thermal insulation wall of building engineering. Engineering mechanics[J]. 2007 (2):121-128.

[2] 刘革. 高效耐久保温复合墙的结构与节能一体化技术与性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
LIU ge. The structure and energy efficiency of high efficiency and durable insulation composite wall [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[3] 密肋壁板轻型框架结构课题组. 密肋壁板轻型框架结构理论与应用研究[R]. 西安: 西安建筑科技大学, 2000.
Light frame structure study group. Research on the theory and application of light frame structure of dense rib board [R]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2000.

[4] 杨增科, 黄伟. 夹心保温复合墙结构施工过程的研究[J]. 地球科学与工程. 2015, 8(6), 1209-1214.
YANG Zengke, HUANG Wei. Research on construc-

- tion process of eco-composite wall structure[J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2015,8(6):1209-1214.
- [5] 黄炜. 密肋复合墙体在拟动力试验下的抗震性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007, 26(3):49-56.
- HUANG Wei. A study on the seismic performance of the composite wall in the proposed dynamic test [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2007,26(3):49-56.
- [6] 姚谦峰,黄炜,田洁. 密肋复合墙体受力机理及抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004,25(6):67-74.
- YAO Qianfeng, HUANG Hui, TIAN Jie. The study on the stress mechanism and aseismic performance of the composite wall of the laminates [J]. Journal of Architectural Structure, 2004,25(6):67-74.
- [7] 张程华,黄炜. 基于复合材料力学的生态复合墙体研究[J]. 工程力学, 2012(8):249-254.
- ZHANG Chenghua, HUANG Wei. Research on ecological composite wall based on composite material mechanics [J]. Engineering mechanics. 2012 (8): 249-254.
- [8] 黄炜. 密肋复合墙体抗震性能及设计理论研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2005, 37(1): 29-35.
- HUANG Wei. Research on the seismic performance and design of the composite wall of dense rib wall [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2005,37(1):29-35
- [9] 王正权,龚延风. EPS保温砂浆配比试验分析[J]. 建筑材料学报, 2005,8(2):90-94.
- WANG Zhengquan, GONG Yanfeng. Analysis of the ratio test of EPS insulation mortar [J]. Journal of architectural materials, 2005,8(2):90-94.
- [10] 黄炜. 低周往复荷载作用下生态复合墙体抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013,33(3):155-162.
- HUANG wei. Research on seismic performance of ecological composite wall under low cycle load. [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2013,33(3):155-162.
- [11] 黄炜. 不同内填材料的生态复合墙结构地震反应分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 33(3):155-162.
- HUANG Wei. Analysis of seismic response of different internal filling materials in ecological composite wall structures [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2013,33(3):155-162.
- [12] 田玉滨,唐岱新. 配筋砌块砌体剪力墙连梁抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2002,23(4):42-47.
- TIAN Yubin. Tangdai new. Experimental study on seismic performance of reinforced masonry shear wall with reinforced masonry [J]. Journal of architectural structure, 2002,23(4):42-47.
- [13] 杨增科,黄炜. 单轴压缩本构模型研究聚丙烯纤维再生砖[J]. 罗马尼亚材料学报, 2016,31(4):299-305.
- YANG Zengke, HUANG Wei. Research on uniaxial compression constitutive model of polypropylene fiber recycled brick[J], Revisnade la Facultad de Ingenieria, 2016,31(4):299-305.
- [14] 黄炜,张敏. 基于可拓识别法的生态复合墙体破坏模式判别[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015,1(1):20-27.
- HUANG Hui, Zhang min. Based on extension recognition method, ecological composite wall failure mode discrimination [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015,1(1): 20-27.
- [15] 过镇海,张秀琴,张达成. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1982(2):1-12.
- GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin, ZHANG Dacheng. Experimental study on the full stress-strain curves of concrete [J]. Journal of architectural structure, 1982 (2): 1-12.

(编辑 桂智刚)