

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.04.017

不同内填材料生态复合墙体肋格 单元试验研究

侯莉娜¹, 黄 炜², 卢俊龙³, 田英侠¹, 王海荣¹

(1. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021;

2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710054;

3. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为研究不同内填材料对肋格单元抗震性能影响, 对3个不同内填材料肋格单元及1个空肋格单元进行了1/2比例模型试验, 分析了试件的破坏过程及破坏机理, 探讨了不同材料内填砌块肋格单元承载力、变形及耗能能力等抗震性能。试验结果表明: 填充加气混凝土砌块试件发生了砌块角部压碎破坏, 破坏过程与生态复合墙板的分阶段破坏相对应, 是一种合理的破坏形式; 加气混凝土砌块与秸秆泥坯砌块对肋格承载力提高较大, 但变形能力降低; 填充再生EPS轻骨料混凝土砌块试件, 砌块较早地退出了工作, 对肋格的承载力提高不大; 填充秸秆泥坯砌块肋格单元耗能性能较好。研究结果对于生态复合墙体多道抗震防线的优化设计具有一定的参考意义。

关键词: 生态复合墙体; 肋格单元; 试验研究; 抗震性能

中图分类号: TU375.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)04-0086-05

Experimental Study of Rib-grid Units of Eco-composite Walls with Different Filling Materials

HOU Lina¹, HUANG Wei², LU Junlong³, TIAN Yingxia¹, WANG Hairong¹

(1. School of Civil & Architectural Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: To study the effects of different filling materials on the aseismic performance of the rib-grid unit, a 1:2 ratio model experiment of three specimens with different filling materials and one specimen unfilled was conducted. The failure process and modes of the specimens were analyzed and the bearing performance, deformation capacity and energy dissipation of different rib-grid units were discussed. The results indicate that the rib-grid unit of aerated concrete block with the crushed corners presents a reasonable failure mode, because the failure develops in stages, which is in agreement with that of the eco-composite wall; the aerated concrete block and straw mud block can improve the capacity of rib-grid unit greatly, but reduce the deformability of the unit simultaneously; the regenerated EPS lightweight aggregate concrete block quits working too early to improve the bearing capacity of the specimen; the rib-grid unit of straw mud block has better energy dissipation performance. The results have certain referential value for the optimization of multi-channel aseismic design for eco-composite walls.

Keywords: eco-composite wall; rib-grid unit; experimental study; aseismic performance

生态复合墙板是生态复合墙体的主要组成构件 之一(如图1所示)^[1-4], 由多层多跨钢筋混凝土肋

收稿日期: 2015-03-25

修稿日期: 2015-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378416, 51178385); 陕西省教育厅自然科学基金专项基金(2013JK0986); 西安市建设科技项目(SJW2014027)

作者简介: 侯莉娜(1983—), 女, 陕西榆林人, 讲师, 博士, 主要从事新型建筑结构体系方面的教学和科研工作。

E-mail: houlina-163@163.com

格及内嵌填充砌块构成,其独特的构造形式有利于实现各种填充材料的应用。随着绿色建筑材料的提出与应用,课题组前期对不同内填材料生态复合墙体性能进行试验研究,研究表明,内填材料的抗压强度,弹性模量及其与肋格的连接性能等因素是影响墙体破坏模式及抗震性能的主要因素^[5-7]。肋格单元作为生态复合墙体中第一和第二道抗震防线,对墙体的正常使用功能与抗震耗能性能影响较大。为研究不同内填材料对肋格单元抗震性能影响,对 3 个不同内填材料肋格单元及 1 个空肋格单元进行了 1/2 比例模型试验。分析试件的破坏过程及破坏机理,重点探讨不同填充材料对肋格单元承载力、变形能力及耗能性能的影响。

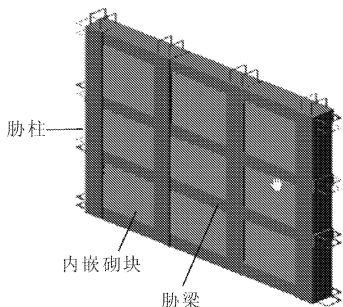


图 1 生态复合墙板

1 试验材料

试验包括 4 个肋格单元试件,其中 F1 为空肋格单元,F2、F3 和 F4 分别填充轻质加气混凝土砌块、秸秆泥坯砌块及再生 EPS 轻骨料混凝土砌块。试件尺寸及配筋如图 2 所示(其中,填充砌体的尺寸统一为:400 mm × 400 mm × 100 mm,肋格截面高 50 mm)。肋格采用 C20 混凝土,材料力学性能试验结果见表 1 ~ 表 3^[8-9]。肋格单元制作步骤为:(1) 预制填充砌块;(2) 绑扎肋格钢筋;(3) 支模板;(4) 放填砌块;(5) 浇筑肋格混凝土。试件 F1 略去第一步及第三步。

表 1 混凝土性能试验结果

强度等级	抗压强度 /MPa	干重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模量 /(10 ⁴ MPa)	泊松比
C20	24.7	25	2.76	0.2

表 2 钢筋性能试验结果

规格	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	弹性模量 /(10 ⁵ MPa)
φ2	621.7	675.4	1.8
φ4	642.5	793.3	2.0

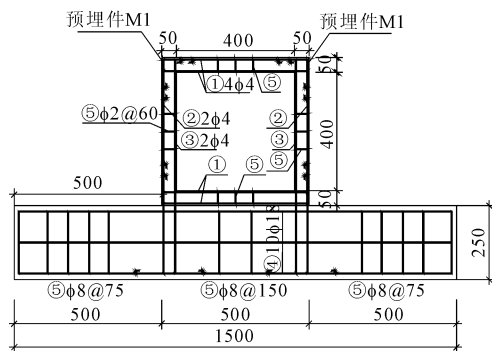


图 2 试件尺寸及配筋图

表 3 内填材料性能试验结果

名称	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	干重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模量 /(10 ³ MPa)
加气混凝土砌块	1.75	0.175	5.8	1.105
秸秆泥坯砌块	1.05	0.126	15.6	0.135
再生 EPS 轻骨料混凝土砌块	0.40	0.048	4.5	0.170

2 试验设备及方法

水平及竖向荷载分别通过安装于反力墙上的液压伺服作动器及千斤顶施加,其中竖向荷载加在分配梁上,经二次分配加载于肋格单元顶部。同时,为观测试验过程中钢筋的应力状态,在肋格单元肋梁跨中及肋柱底部分别布置一些电阻应变片。

竖向荷载分两级施加:第一级 7 kN,第二级 15 kN,加载后持时两分钟。保持竖向荷载不变,采用混合加载方式(力 - 位移),对墙体顶部施加水平荷载,进行低周反复加载。屈服前以荷载控制加载,每级荷载循环一次,待试件屈服后,采用位移控制进行循环加载,分别以 Δ、2Δ、3Δ,递增进行位移循环加载,每级循环三次,直至试件破坏^[10]。

3 试验结果分析

3.1 破坏过程及破坏机理

图 3 为各试件的荷载 - 位移曲线(P - Δ 曲线)图,从图 3 中可以看出,各试件破坏过程均可大致划分为弹性、弹塑性及破坏三个阶段。

3.1.1 试件 F1(空肋格单元)

弹性阶段,试件位移及内力较小,P - Δ 呈线性关系。当水平荷载增加至极限荷载的 30%时,肋格柱上、下端部出现水平细微裂缝,刚度降低,P - Δ 曲线呈现拐点,此时可视为试件弹性与弹塑性阶段的分界点。继续施加荷载,肋格弯曲及轴向变形增大,构件内力提高,直至达到极限承载力状态(极限

荷载为 5.3 kN)。随着外荷载的持续增加,试件承载能力逐渐降低,肋格柱柱角部混凝土局部压碎脱落,试件达到其极限位移 24.50 mm 时,试件破坏。

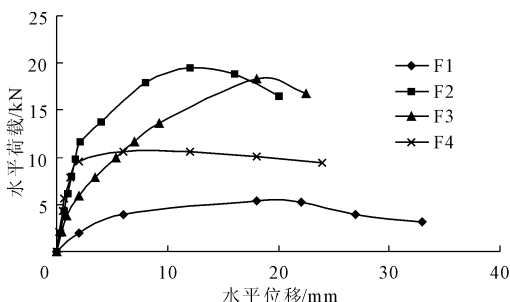
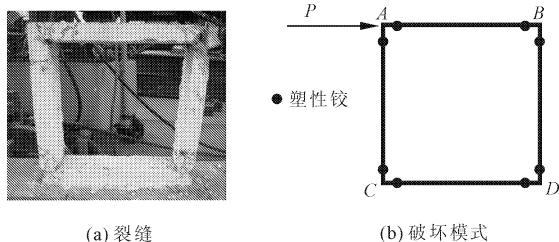


图 3 荷载 - 位移曲线对比

试件 F1 破坏现象类似钢筋混凝土框架结构的破坏,主要是由于肋格柱局部弯曲破坏导致。F1 的破坏模式如图 4 所示。



(a) 裂缝

(b) 破坏模式

图 4 试件 F1 极限状态裂缝及破坏模式

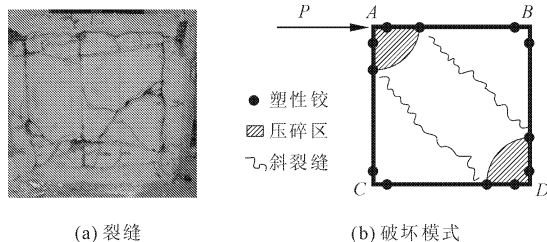
3.1.2 试件 F2

填充了内填砌块的肋格单元结构由于肋格与填充砌块的相互作用,其受力及破坏形态均不同于空肋格单元。在加载过程中,肋格除承受水平及竖向集中外荷载作用,还承受填充砌体的分布荷载作用^[11]。

从 $P-\Delta$ 曲线可以看出:加载初期, $P-\Delta$ 曲线为线性变化,试件可认为处于完全弹性状态。加载至极限荷载的 51% ~ 72% 时,位于砌体斜对角线处出现第一条裂缝。本次试验中,由于试件 F2 中内填砌块是由两块加气混凝土砌块竖向拼接而成,故拼接缝在某种程度上改变了裂缝的出现及发展,初始裂缝约位于各自的斜对角线处,试件进入到弹塑性阶段。进一步施加水平荷载,构件外侧出现弯曲受拉裂缝。随之构件刚度下降。继续施加荷载,肋格内力持续增大,其外侧出现的多条新裂缝与不断扩展、加深的已有裂缝最终形成塑性铰进行耗能。砌块在不断增大的荷载作用下被压碎,肋格外侧达到其极限弯曲承载能力,当加载至荷载 19.5 kN (荷载峰值),位移 11.98 mm 时,试件承载力开始呈下降趋势,砌体压碎区扩大。随后试件进入破坏阶段,在试

件位移达到 19.87 mm 时,承载力降低约为极限荷载的 85%,试件最终破坏。

综上所述,试件 F2 中填充砌块强度适中,与外肋格粘结性能较好,砌块区域首先出现破坏,而后肋梁肋柱屈服,塑性铰充分转动,其属于砌块角部压碎破坏,如图 5 所示。该破坏过程分阶段进行,首先砌块出现破坏,而后肋梁肋柱屈服,并最终形成塑性铰,其与生态复合墙体的破坏模式一致,因此可认为是一种合理的破坏形式^[11-12]。



(a) 裂缝

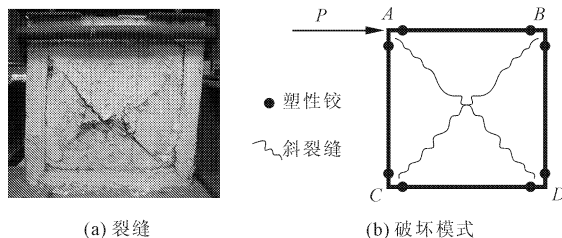
(b) 破坏模式

图 5 试件 F2 极限状态裂缝及破坏模式图

3.1.3 试件 F3

初始加载阶段,试件位移较小,肋格及填充砌块的变形及构件内力(弯矩及轴力)均较小。荷载达到极限荷载的 51% ~ 61% 之前,试件处于弹性工作阶段。继续增加水平荷载,由于秸秆泥坯砌块与肋格单元粘结性能不好,砌块与外框四面交界处出现裂缝,将砌块与肋格分离,致构件发生内力重分布,肋格所受荷载增加,砌块所受荷载减小,造成肋格四个节点几乎同时开裂,构件进入到弹塑性阶段。继续加载,砌块出现对角斜裂缝。同时,肋格节点处仍有新裂缝出现,已有裂缝加深。随着荷载的增大,砌块中部主要对角交叉斜裂缝不断变宽,构件整体刚度下降。当外荷载达到峰值,砌体出现剥落现象,肋格节点形成塑性铰。随后,肋格承载能力下降,砌体裂缝扩大,并出现严重剥落现象。

由上可知,试件 F3 中秸秆泥坯砌块与肋格粘结性能较差,致使肋格先于砌块开裂,最终作为压杆的受力中央区域砌块被挤压碎、脱落。属于砌块对角压碎破坏,如图 6 所示^[11-12]。



(a) 裂缝

(b) 破坏模式

图 6 试件 F3 极限状态裂缝及破坏模式图

3.1.4 试件 F4

与其他试件相同,加载初期,试件处于弹性状态, $P-\Delta$ 曲线呈线性。当荷载加至约为极限荷载的 56%~75%时,试件出现裂缝。由于 EPS 轻骨料混凝土砌块与外肋格粘结性能相对较好,继续加载,二者交界处并未出现裂缝。而是在砌体两个方向出现了近似平行的四条斜裂缝。此时, $P-\Delta$ 曲线呈现拐点,该点可视为试件弹性与弹塑性阶段的分界点。继续加载,填充块中裂缝不断发展、延伸,引起砌块与肋格的内力重分布,肋格变形和内力增加,其四个节点先后开裂。荷载进一步增加,砌块中的裂缝逐渐贯通成环状,肋格中的裂缝也发展迅速。试件整体刚度随之降低,最终表现为 $P-\Delta$ 曲线呈水平状,此时荷载约为极限荷载的 90%~95%,此为弹塑性工作阶段。随着荷载的进一步增加,肋格四角逐渐形成塑性铰,受压区砌体有压碎现象,但整体破坏不明显,此时,荷载达到峰值 10.62 kN。继续加载,肋格承载能力明显下降,试件进入到破坏阶段,当位移达 24.00 mm,荷载为 9.39 kN(极限荷载的 85%),试件破坏。

综上所述,试件 F4 中再生 EPS 轻骨料混凝土砌

块强度较低,弹性变形性能好,沿肋格周边形成环状裂缝,破坏时,砌块破坏较轻,肋格单元出现多处塑性铰。试件最终因肋格柱角部局部压碎而破坏,属于肋格梁柱节点局部受压破坏,如图 7 所示^[11-12]。

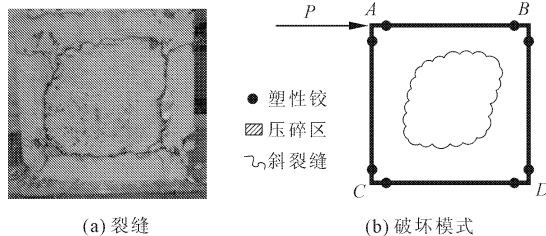


图 7 试件 F4 极限状态裂缝及破坏模式图

3.2 承载力及变形

试件 F1~试件 F4 承载力及变形结果见表 4,由表 4 可知,试件 F2、F3 及 F4 在试验各阶段承载力均远高于空肋格试件 F1,其中,极限承载能力分别提高 3.64、3.43、1.98 倍。这是因为空肋格试件承载能力主要由肋格根部截面的弯曲性能控制。当填充砌体后,砌块与肋格之间存在相互作用,砌体压杆成为抵抗外荷载的主要承力构件^[13-14]。

表 4 肋格单元承载力及变形对比

试件编号	内填材料	承载力 V/kN				变形 Δ/mm				试验破坏延性 μ	极限屈服位移角 θ
		开裂	屈服	极限	极限屈服	开裂	屈服	极限	极限屈服		
F1	无	2.00	4.40	5.36	4.56	1.99	10.12	18.00	24.50	1.78	1/20
F2	轻质加气混凝土	4.28	15.80	19.50	16.57	0.70	5.96	11.98	19.87	2.00	1/25
F3	秸秆泥坯	2.06	15.14	18.37	15.62	3.50	12.01	18.00	23.30	1.50	1/21
F4	再生 EPS 轻骨料混凝土	3.68	9.60	10.62	9.39	2.00	2.07	6.02	24.00	2.90	1/21

注:试件破坏延性 $\mu =$ 极限屈服变形 Δ /屈服变形 Δ

对比填充不同材料砌块的试件各阶段承载力可知:试件承载力从大到小依次为:F2、F3 及 F4,说明在相同的条件下,增加填充砌块抗压强度能够增加肋格单元的承载力。

除开裂荷载外,试件 F2 与 F3 其余各阶段承载力相差不大,说明加气混凝土砌块与秸秆泥坯砌块均能起到斜压杆作用,与肋格共同承担水平荷载。试件 F2 与 F4 开裂荷载相同,这是因为二者均属于轻质混凝土系列,与肋格粘结性能较好,开裂均发生在砌块中。但 F4 试件后期承载力较低,主要因为内填再生 EPS 骨料混凝土的弹性模量较小,弹性变形大,一旦开裂后,两侧的砌块收缩较快,从而裂缝增长变宽,砌块较早地退出了工作,造成砌块的斜压杆作用不明显,后期对于肋格的承载力提高不大。

由图 2 和表 4 可看出,与空肋格结构相比,填充砌块肋格单元变形能力降低很多。其中,内填再生

EPS 轻骨料混凝土砌块肋格单元的变形能力较好,内填秸秆泥坯砌块肋格单元的延性最差,主要原因为秸秆泥坯砌块的脆性和不均匀性导致变形能力差。

3.3 耗能性能

等效黏滞阻尼系数是判断结构耗能能力大小的一个重要标志,阻尼系数越大,则试件的耗能能力越好^[10]。表 5 为肋格单元 F1F4 在不同阶段的等效黏滞阻尼系数。

空肋格试件 F1 的等效黏滞阻尼系数前期相对较大,主要是因为试件不存在填充砌块对肋格变形的约束;总体来看,填充砌块的肋格试件耗能能力均优于试件 F1,主要是因为一方面,试件通过肋格中形成的钢筋混凝土塑性铰进行耗能,另一方面,试件中还存在如填充砌块的开裂、变形耗能、裂缝间摩擦耗能及砌块与肋格间摩擦等耗能机制进行耗能^[15]。

表 5 肋格单元等效粘滞阻尼系数

单位: %

试件编号	内填材料	h_e			
		开裂	屈服	极限	破坏
F1	无	12.3773	14.8332	12.5323	8.4573
F2	轻质加气混凝土	6.7908	15.6526	16.8175	10.6254
F3	秸秆泥坯	7.4109	18.1044	17.8857	10.9038
F4	再生 EPS 轻骨料混凝土	7.3006	11.6604	16.2107	13.6806

试件 F2 和试件 F4 在达到极限荷载之前,肋格单元等效粘滞阻尼系数增大,试件 F2 前期增长快,试件 F4 后期增长快,说明轻质加气混凝土砌块比再生 EPS 轻骨料混凝土砌块耗能能力好。试件 F3 所耗散能量在各阶段均较高,说明试件中除肋格充分发挥的其塑性耗能能力,砌块中通过植物纤维开裂摩擦、植物纤维拉结等也充分发挥了其滞回耗能性能。

4 结 论

通过 1/2 比例生态复合墙体肋格单元试验,研究空肋格单元和不同填充材料砌块肋格单元的破坏形态、承载力、变形性能与耗能性能,得出以下结论:

(1) 试件破坏均经历了弹性、弹塑性及破坏三个阶段。填充砌块的肋格单元在外荷载作用下,砌块与肋格相互作用,共同工作。填充加气混凝土砌块试件 F2,填充砌块强度适中,与外肋格粘结性能较好,发生砌块角部压碎破坏。该破坏过程分阶段进行,首先砌块出现破坏,而后肋梁肋柱屈服,并最终形成塑性铰,其与生态复合墙体的破坏模式一致,因此可认为是一种合理的破坏形式;

(2) 提高填充砌块抗压强度能够增加肋格单元的承载力。试件 F2、F3 中,加气混凝土砌块与秸秆泥坯砌块均能起到斜压杆作用,与肋格共同承担水平荷载,肋格各阶段承载力均较高。试件 F3 中,再生 EPS 骨料混凝土砌块开裂后,弹性变形大,较早退出工作,后期承载力提高不大;

(3) 填充砌块肋格单元变形能力较空框格降低很多,其中,内填再生 EPS 轻骨料混凝土砌块肋格单元的变形能力较好,内填秸秆泥坯砌块肋格单元的延性最差,主要是由于秸秆泥坯砌块的脆性和不均匀性导致;

(4) 填充砌块丰富了空肋格单元的耗能机制,填充轻质加气混凝土砌块肋格比再生 EPS 轻骨料混凝土砌块肋格耗能能力好。填充秸秆泥坯试件 F3 中砌块通过植物纤维开裂摩擦、植物纤维拉结等

发挥了其滞回耗能性能,耗能性能最好。

参考文献:

- [1] 姚谦峰,陈平,张荫.密肋壁板轻框结构节能住宅体系研究[J].工业建筑,2003,33(1):1-5.
- [2] 黄炜.密肋复合墙体抗震性能及设计理论研究[D].西安:西安建筑科技大学,2004.
- [3] 田英侠.密肋复合墙板受力性能试验研究与理论分析[D].西安:西安建筑科技大学,2004.
- [4] 成晓峰,姚谦峰,黄炜,等.不同框格形式密肋复合墙体抗震性能对比分析[J].水泥与建筑工程学报,2010,8(2):16-19.
- [5] 陈国新.内填不同材料生态复合墙体基于统一强度理论的非线性损伤分析[D].西安:西安建筑科技大学,2010.
- [6] 陈国新,黄炜,张荫,等.内填不同材料填充砌块生态复合墙体抗震性能对比[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(11):4491-4500.
- [7] 姚谦峰,侯莉娜,黄炜,等.不同填充材料复合墙体破坏模式研究[J].建筑结构学报,2009(S2):7-12.
- [8] 喻磊.密肋复合墙板框格单元的受力机理及弹塑性损伤模型研究[D].西安:西安建筑科技大学,2006.
- [9] 黄炜,陈俊英,刘婕妤.生态复合墙体框格单元破坏模式研究[J].工业建筑,2014,44(3):68-73.
- [10] 姚谦峰,陈平.土木工程结构试验[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [11] Dhanasekar M, Page A W. Influence of brick masonry infill properties on the behaviour of infilled frames[J]. Proc., Instn. Civ. Engrs., London, Part, 1986,81(4):593-605.
- [12] Crisafulli F, Carr A, Park R. Analytical Modeling of In-filled Frame Structures - A General Review[J]. Bulletin of the New Zealand Society, 2000,33(1):30-47.
- [13] Ghosh A K, Amde A M. Finite element analysis of infilled frames[J]. American Society of Civil Engineers, 2014,128(7):881-889.
- [14] Smith S B. Behavior of Square Infilled Frames[J]. American Society of Civil Engineers, 2014,92(1):381-402.
- [15] 刘建新.填充墙框架结构的一种新的计算模型[J].工程抗震,1994,1:1-7.