

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.02.024

高宽比对生态复合墙体破坏模式的影响

侯莉娜¹, 卢俊龙², 黄 炜³, 田英侠¹

(1. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048;
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:生态复合墙体是生态复合墙结构的主要受力构件,其破坏模式不单一。高宽比是影响墙体破坏模式的重要因素之一。在不同高宽比生态复合墙体试验研究的基础上,介绍了墙体破坏机理及破坏模式,对比分析了不同高宽比墙体破坏模式及原因,建立非线性有限元模型,对不同高宽比墙体破坏模式进行分析。结果表明:生态复合墙体破坏模式本质上由复合墙板及边框柱的相对强弱决定,对于填充加气混凝土砌块生态复合墙体,当墙体高宽比 < 1.5 时,墙体发生合理的剪切型破坏;对于填充秸秆泥坯砖生态复合墙体,当墙体高宽比 < 1.7 时,墙体发生剪切型破坏。研究结果对于生态复合墙体的抗震优化设计具有一定的参考意义。

关键词:生态复合墙体;试验研究;高宽比;破坏模式

中图分类号: TU227

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)02-0116-05

Influence of Aspect Ratio on Failure Patterns of Eco-composite Walls

HOU Li-na¹, LU Jun-long², HUANG Wei³, TIAN Ying-xia¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;
3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: As the main bearing member of the eco-composite wall structure, the eco-composite wall has various failure patterns. Aspect ratio is one of the most important parameters which affects on failure patterns of the walls. Based on the test results of the eco-composite walls with various aspect ratios, the main failure processes and patterns of the walls were introduced. Contrast analysis on the reason of the walls' failure patterns with different aspect ratios was conducted. A nonlinear finite element model was set up to study the influence of different aspect ratios on failure patterns of eco-composite walls. Results indicate that the failure patterns of the eco-composite walls are essentially determined by the relative strength of the eco-composite slabs and the side-frame columns. For the eco-composite walls with air-entraining concrete blocks, when the aspect ratio < 1.5 , shear failure which is the reasonable failure mechanism occurs; For the walls with straw mud blocks, when < 1.7 , shear failure occurs. These findings will provide certain reference for optimal a seismic design of eco-composite wall structures.

Keywords: eco-composite walls; test research; aspect ratio; failure patterns

生态复合墙结构是一种新型装配式结构体系^[1],生态复合墙体是该结构的主要受力构件,墙体由砌块、肋格及隐形框架三部分构件组成。在荷载作用下,各构件互相作用、协同工作。荷载作用下,

结构主要表现为剪切型,弯曲型及弯剪型等破坏模式^[1-5](如图1所示)。其中剪切型为墙体合理破坏模式,该破坏使得墙体中各构件能够在小震、中震及大震作用下依次发挥主要作用,具有多道抗震防线。

收稿日期:2014-11-07

修稿日期:2014-12-07

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,博士,讲师,主要从事新型建筑结构体系方面的教学与科研工作。

E-mail: houlina - 163@163.com

前期试验研究^[2]表明高宽比是影响墙体破坏模式的重要因素之一。本文拟结合研究结果,分析不同高宽比生态复合墙体破坏机理及模式,建立数值扩展分析模型,对不同高宽比墙体破坏模式进行分析,得到不同破坏模式发生时对应高宽比取值范围,并给出设计合理取值,以为不同高宽比生态复合墙体的抗震优化设计提供参考。

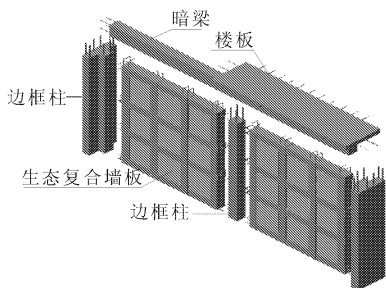
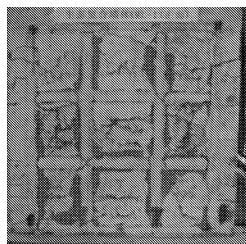


图 1 生态复合墙体

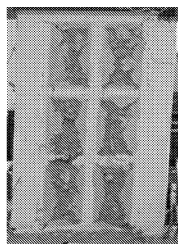
1 试验概况

1.1 试件设计

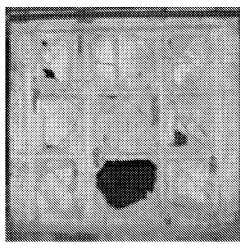
为研究不同高宽比生态复合墙体破坏模式变化情况,试验选取两组共 5 榀 1/2 比例模型生态复合墙体试件,墙体高宽比由 0.67 增加至 2.3,试件设计参数见表 1。试件 XML-1、ECW-4 为填充秸秆泥坯砖墙体,试件 MLB-1、MLB-3A 和 MLB-3B 为填充加气混凝土砌块墙体,试件外框尺寸均为 0.1 m × 0.1 m,肋格尺寸为 0.05 m × 0.05 m。外框纵筋均为 4Φ6,肋格纵筋为 4Φ4,试件设计见表 1。墙板混凝土采用 C20,外框混凝土采用 C30。墙体内部材料实测值见表 2。



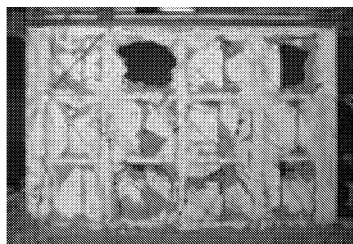
(a) XML-1



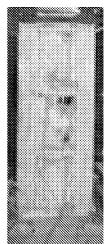
(b) ECW-4



(c) MLB-1



(d) MLB-3A



(e) MLB-3B

图 2 生态复合墙体最终破坏图

(1) 剪切型破坏(试件 XML-1、MLB-1)

试件 MLB-1、XML-1 高宽比为 1,二者均发生剪切型破坏,墙体破坏表现为弹性、弹塑性段及破坏三个阶段。弹性阶段时,墙体可看作一个整体受力构件。当荷载增加至一定值,墙体中填充砌块逐渐出现裂缝,并不断发展至肋梁柱,此时墙体进入弹塑

表 1 不同高宽比生态复合墙体试件设计参数

| 试件 | 填充材料 | 宽 × 高 × 厚 /m | 肋梁、柱个数 | 高宽比 |
|--------|----------|------------------|--------|------|
| XML-1 | 秸秆泥坯砌块 | 1.4 × 1.44 × 0.1 | 4/4 | 1.00 |
| ECW-4 | 秸秆泥坯砌块砌块 | 0.7 × 1.44 × 0.1 | 4/3 | 2.00 |
| MLB-1 | 加气混凝土砌块 | 1.4 × 1.4 × 0.1 | 4/4 | 1.00 |
| MLB-3A | 加气混凝土砌块 | 2.1 × 1.4 × 0.1 | 4/5 | 0.67 |
| MLB-3B | 加气混凝土砌块 | 0.6 × 1.4 × 0.1 | 4/2 | 2.33 |

表 2 墙体内部材料性能

| 内填材料 | 抗压强度 /MPa | 抗拉强度 /MPa | 弹性模量 /MPa | 与水泥砂浆粘结性 |
|---------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 加气混凝土砌块 | 3.00 | 0.3 | 2000 | 好 |
| 秸秆泥坯砖 | 1.14 | 0.1 | 200 | 差 |

1.2 加载方式

试件 XML-1、ECW-4 采用水平低周反复加载;MLB-1、MLB-3A 和 MLB-3B 均采用单调加载。本文仅描述分析了与研究工作相关的试验情况,详细试验分析见文献[6-9]。

2 试验结果分析

2.1 破坏过程及破坏模式

由于各试件墙体高宽比不同,各个墙体的破坏形态有所差异,墙体最终破坏形态见图 2。5 榀生态复合墙体在施加荷载后,根据破坏过程的不同,墙体可划分为三组。

性阶段。随着荷载逐渐增大,砌块出现破碎及剥落现象。随着砌块破坏基逐步退出工作,肋梁多处出现塑性铰,纵筋达到屈服。而肋柱及隐形外框破坏不明显。此时,复合墙板可视为已退出工作,但隐形外框仍可承担一定的竖向荷载,墙体具有较好的抗倒塌能力。由此可知:发生剪切型破坏的墙体,在弹

性、弹塑性及破坏三阶段,各构件对应的破坏顺序为“填充砌体-肋格-隐形外框”,表明各构件可分阶段抗震耗能,该破坏为墙体合理的破坏模式。

(2) 弯曲型破坏(试件 MLB-3B)

试件 MLB-3B 高宽比为 2.33,破坏模式为整体弯曲型破坏。当荷载较小时,墙体处于弹性阶段,与剪切型破坏墙体类似,可看作一个整体受力构件,复合墙板与隐形外框变形协调。随着荷载的增大,墙体中砌块开裂,但开裂荷载较剪切型破坏墙体高。砌块裂缝逐渐发展至肋梁、柱。同时,边框柱受拉侧出现均匀分布的水平裂缝,当荷载继续增大,边框柱裂缝发展迅速,贯穿整个受拉截面,并向边肋柱延伸,最终墙体因受拉侧边框柱拉坏而破坏。破坏过程中,墙板中砌块与肋梁、柱均破坏不明显。可见,整体弯曲型破坏将直接致使结构整体失效,其破坏机制不合理,为不利破坏模式。

(3) 弯剪型破坏(试件 ECW-4、MLB-3A)

试件 ECW-4 及 MLB-3B 发生弯剪型破坏。墙体在加载前期,试验现象与剪切型破坏墙体类似,表现为砌块与肋格依次发生破坏。加载后期,外框柱脚混凝土压碎明显,部分钢筋暴露。最终破坏时,墙体受拉区边框柱纵筋首先达到屈服,即边框柱先于复合墙板破坏。墙体破坏显弯剪型破坏特征。发生弯剪型破坏的墙体,其材料利用较充分,但由于边框柱最终先于内墙板发生破坏,没有形成墙体的多道抗震防线,因此属于不利的破坏机制。

2.2 不同高宽比生态复合墙体破坏模式对比分析

由试验结果可知,生态复合墙体中复合墙板主要承担水平剪力,边框柱主要承担整体弯矩引起的拉压力,二者的相对强弱关系决定了墙体的最终破坏模式。因此,生态复合墙体的破坏模式本质上由剪切破坏所考虑抗剪构件的实际承载力与弯曲破坏所考虑抗弯构件的实际承载力之间相对大小的关系决定,如果前者大于后者,则墙体必然发生剪切破坏,反之则发生弯曲破坏,如果二者相等,则发生弯剪型破坏。生态复合墙体高宽比在一定程度上可以体现这种相对强弱关系^[10-11]。由试验结果分析可知,墙体的破坏模式类型随着高宽比的变化而改变。具体表现为:

(1) 试件 XML-1、MLB-1 高宽比均为 1,试件 MLB-3A 高宽比为 0.67,3 榀墙体的填充材料不同,墙体均发生了剪切型破坏,试件 MLB-3B 发生了整体弯曲型破坏,这是因为 MLB-3B 高宽比为试件 XML-1、MLB-1 的 2.3 倍,为试件 MLB-3A 的 3.43

倍。由于高宽比的增加,墙体承担的整体弯矩增大,边框柱的内力增大,最终由于边框柱破坏而引发了墙体的整体破坏。可见,随着墙体高宽比的增大,墙体的破坏模式由剪切型向整体弯曲型过渡。

(2) 试件 ECW-4 发生了弯剪型破坏,其高宽比为 2,大于发生剪切型破坏的试件 XML-1、MLB-1,与发生弯曲型破坏的试件 MLB-3B 相近,墙体边框柱整体弯矩较大,但由于试件 MLB-3B 为填充加气混凝土砌块墙体,该砌块具有较高的抗压强度及较大的弹性模量,同时其与肋格水泥砂浆粘结性能良好,而试件 ECW-4 为内填秸秆泥坯块的墙体,内填材料抗压强度与弹性模量均较低,且与肋格水泥砂浆粘结性能差,墙体开裂荷载较低,墙体加载初期,破坏主要集中在内填墙板上。后期由于边框柱内力较大发生破坏,因此,墙体最终发生了介于剪切型与弯曲型破坏之间的弯剪型破坏。可见,研究高宽比对墙体破坏模式影响时,应同时考虑墙体内填材料的影响。

3 高宽比对生态复合墙体破坏模式的影响分析

3.1 有限元模型及验证

运用 ANSYS 建立墙体非线性数值分析模型^[12-15],选择的单元为:混凝土—Solid65 六面体单元;砌块—Solid65 六面体单元;钢筋—Link8 空间杆单元。不考虑钢筋和混凝土之间的联系单元模型,混凝土和砌块的连接按固接处理,混凝土采用 William-Warnke 五参数破坏准则,肋梁及肋柱纵筋采用二折线模型本构关系,砌块本构模型由前期内填材料试验结果拟合得到^[16]。

本文以发生剪切破坏的试件 XML-1 为例,分析其钢筋应变。图 3 为试件 XML-1 屈服及极限状态时的钢筋应力图,从图中可以看出:试件 XML-1 在屈服状态时肋梁钢筋应力达到屈服,而此时的边框柱受拉侧及受压侧钢筋均未达到屈服强度,表明此时墙体破坏主要集中在复合墙板上,边框柱破坏较小。达到极限状态时,肋梁钢筋均进入屈服状态,甚至到达强化阶段,外框柱钢筋受拉侧最后也达到屈服,墙体中钢筋利用充分,表明该墙体中复合墙板与边框柱依次达到破坏,符合剪切型破坏模式特征,与试验现象吻合。采用与试件 XML-1 同样的分析方法,对其余试件进行有限元分析,结果表明,有限元模型适用于生态复合墙体的模拟分析。

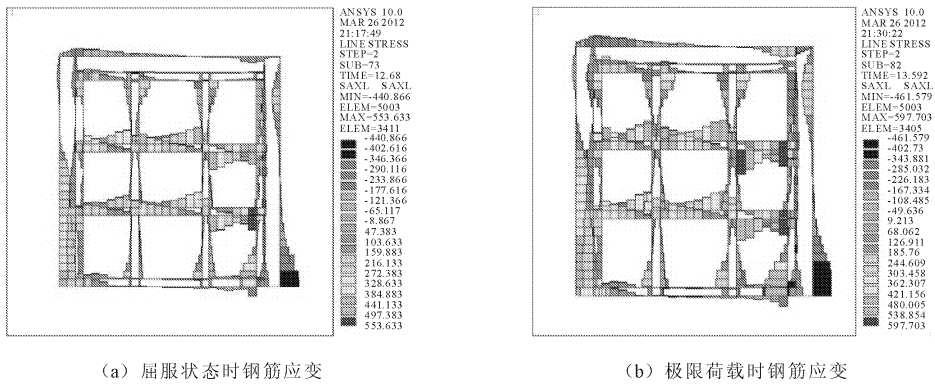


图 3 试件 XML-1 钢筋应力图

3.2 破坏模式分析

采用上述有限元模型,分析不同高宽比情况下墙体破坏模式,得到不同破坏模式发生时对应高宽

比取值范围,模型试件外框及肋格尺寸、配筋均与试验试件相同,试件选取同时考虑了框格划分(4组试件)及填充材料(2种材料)的影响,计算结果见表3。

表 3 高宽比不同的墙体破坏模式

| 编号 | 墙体尺寸/mm | 肋梁、柱个数 | 高宽比 | 填充砌块材料 | 破坏模式 |
|----|--------------------|--------|------|--------|------|
| A1 | 0.55 × 1.45 × 0.10 | 2/4 | 2.64 | 加气混凝土 | 弯曲破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 弯曲破坏 |
| A2 | 0.85 × 1.45 × 0.10 | 3/4 | 1.71 | 加气混凝土 | 弯剪破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 弯剪破坏 |
| A3 | 1.15 × 1.45 × 0.10 | 4/4 | 1.26 | 加气混凝土 | 剪切破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 剪切破坏 |
| A4 | 1.45 × 1.45 × 0.10 | 5/4 | 1.00 | 加气混凝土 | 剪切破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 剪切破坏 |
| A5 | 1.75 × 1.45 × 0.10 | 6/4 | 0.83 | 加气混凝土 | 剪切破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 剪切破坏 |
| B1 | 0.60 × 1.45 × 0.10 | 2/4 | 2.42 | 加气混凝土 | 弯曲破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 弯曲破坏 |
| B2 | 0.95 × 1.45 × 0.10 | 3/4 | 1.53 | 加气混凝土 | 弯剪破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 剪切破坏 |
| B3 | 1.30 × 1.45 × 0.10 | 4/4 | 1.12 | 加气混凝土 | 剪切破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 剪切破坏 |
| B4 | 1.65 × 1.45 × 0.10 | 5/4 | 0.88 | 加气混凝土 | 剪切破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 剪切破坏 |
| C1 | 0.65 × 1.45 × 0.10 | 2/4 | 2.23 | 加气混凝土 | 弯曲破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 弯剪破坏 |
| C2 | 1.05 × 1.45 × 0.10 | 3/4 | 1.38 | 加气混凝土 | 剪切破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 剪切破坏 |
| C3 | 1.45 × 1.45 × 0.10 | 4/4 | 1.00 | 加气混凝土 | 剪切破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 剪切破坏 |
| C4 | 1.95 × 1.45 × 0.10 | 5/4 | 0.74 | 加气混凝土 | 剪切破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 剪切破坏 |
| D1 | 0.70 × 1.45 × 0.10 | 2/4 | 2.07 | 加气混凝土 | 弯曲破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 弯剪破坏 |
| D2 | 1.15 × 1.45 × 0.10 | 3/4 | 1.26 | 加气混凝土 | 剪切破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 剪切破坏 |
| D3 | 1.60 × 1.45 × 0.10 | 4/4 | 0.91 | 加气混凝土 | 剪切破坏 |
| | | | | 秸秆泥坯 | 剪切破坏 |

由计算结果可知:

(1) 对于填充加气混凝土砌块生态复合墙体, 墙体中的加气混凝土砌块具有较高的抗压强度及较大的弹性模量, 同时其与肋格水泥砂浆粘结性能良好, 当高宽比 > 2 时, 墙体发生由于墙体整体弯矩较大引起的整体弯曲型破坏; 当高宽比 $1.5 \leq \lambda \leq 2$ 时, 墙体发生弯剪型破坏; 当高宽比 $\lambda < 1.5$ 时, 墙体发生合理的剪切型破坏。

(2) 对于填充秸秆泥坯砖生态复合墙体, 由于填充材料抗压强度与弹性模量均较低, 且与肋格水泥砂浆粘结性能差, 抗压强度低, 弹性模量低且与水泥砂浆粘结性能不好, 当高宽比 $\lambda > 2.4$ 时, 墙体发生整体弯曲型破坏; 当高宽比 $1.7 \leq \lambda \leq 2.4$ 时, 墙体发生弯剪型破坏; 当高宽比 $\lambda < 1.7$ 时, 墙体发生合理的剪切型破坏。

4 结 论

在试验研究的基础上, 对不同高宽比生态复合墙体破坏机理及模式进行分析, 建立非线性数值扩展分析模型, 分析不同高宽比下墙体破坏模式, 得到不同破坏模式发生时对应高宽比取值范围, 并给出设计合理取值, 结论如下:

(1) 生态复合墙体破坏模式本质上由主要抗剪构件—复合墙板及主要抗弯构件—边框柱的相对强弱决定, 当前者大于后者, 则墙体发生合理的破坏模式——剪切型破坏, 高宽比在一定程度上可以体现二者相对关系。为了使生态复合墙体发生其合理破坏模式——剪切型破坏, 墙体的高宽比应控制在合理的范围之内。

(2) 随着生态复合墙体高宽比的增加, 墙体的破坏模式由剪切型向整体弯曲型过渡。对于填充加气混凝土砌块生态复合墙体, 当墙体高宽比 $\lambda < 1.5$ 时, 墙体发生合理的剪切型破坏; 对于填充秸秆泥坯砖生态复合墙体, 当墙体高宽比 $\lambda < 1.7$ 时, 墙体发生剪切型破坏。研究结果对于生态复合墙体的抗震

优化设计具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(2): 16-19.
- [3] 姚谦峰, 吴 芳, 黄 炜, 等. 密肋复合双片墙体的受力性能研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(1): 31-35.
- [4] 黄 炜, 姚谦峰, 章宇明, 等. 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, (1): 29-34.
- [5] 姚谦峰, 陈 平, 张 荫, 等. 密肋墙板轻框结构节能住宅体系研究[J]. 工业建筑, 2003, 33(1): 1-5.
- [6] 张 杰. 密肋复合墙板受力性能及斜截面承载力实用设计计算方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- [7] 郭 猛, 姚谦峰, 袁 泉, 等. 框架—密肋复合墙体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 50-56.
- [8] 郭 猛, 袁 泉, 钱 坤. 高宽比对密肋复合墙抗震性能的影响[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(2): 10-15.
- [9] 姚谦峰, 余晓峰, 张 荫. 组合式密肋复合墙体的受力性能研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(4): 67-71.
- [10] 王鹏里. 不同剪跨比 EPS 新型节能墙体抗震性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
- [11] 张 展, 周克荣. 变高宽比高性能混凝土剪力墙抗震性能的试验研究[J]. 结构工程师, 2004, 20(2): 62-68.
- [12] 吕西林, 等. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [13] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994.
- [14] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [15] 李 杰, 李奎明. 钢筋混凝土短肢剪力墙结构非线性分析研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 23-30.
- [16] 陈国新. 基于统一强度理论的生态复合墙体等效斜压杆宽度计算[J]. 工程力学, 2010, 27(2): 91-94.