

喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体 抗震性能试验研究

田黎敏, 靳贝贝, 郝际平, 赵秋利

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 提出一种在密布原竹骨架外喷涂轻质复合砂浆的组合墙体。对喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体试件进行低周反复加载试验, 分析试件的受力过程和破坏模式, 对试件的承载能力、抗侧刚度、延性、承载力退化、刚度退化以及耗能性能等力学特征进行研究, 并将试验结果与压型钢板—竹胶板组合墙体、喷涂保温材料—原竹骨架组合墙体的试验数据进行对比分析。试验结果表明: 喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体的主要破坏模式为抗拔件被拉出, 墙体底部发生破坏。当试件处于极限状态时, 组合墙体出现裂缝, 但试件整体结构较为完好。喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体的延性和耗能能力较好, 且具有较高的抗剪承载力和初始抗侧刚度。与压型钢板—竹胶板组合墙体相比, 喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体具有更好的抗震性能和耗能能力。与喷涂保温材料—原竹骨架组合墙体相比, 喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体经济性好, 同样具有较高的推广价值。

关键词: 密布竹墙体; 喷涂轻质复合砂浆; 拟静力试验; 破坏模式; 抗震性能

中图分类号: TU366.1, TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)05-0675-07

Study on seismic behavior of covered bamboo framing wall with sprayed lightweight composite mortar

TIAN Limin, JIN Beibei, HAO Jiping, ZHAO Qiuli

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

Abstract: The covered bamboo framing wall with sprayed lightweight composite mortar that sprayed lightweight composite mortar is used outside the frame of the wall. Through tests of the covered bamboo framing wall with sprayed lightweight composite mortar under low reversed cyclic loading, the failure process and pattern were observed. The mechanical behaviors such as bearing capacity, lateral stiffness, ductility, strength degradation, stiffness degradation and energy dissipation capacity were analyzed. The experimental results of specimen presented in this paper were compared with the profiled steel sheet-bamboo plywood composite walls and bamboo framing wall with sprayed thermal insulation material. The results indicate that the main failure modes of wall are dragged out of resistance uplift piece and local failure at the bottom of the wall. Though the composite wall has some cracks in the limit state, the overall structure of the specimen is relatively intact. The composite wall has both good ductility and seismic behavior, and higher shear bearing capacity and initial lateral stiffness. Compared with profiled steel sheet-bamboo plywood composite walls, covered bamboo framing wall with sprayed lightweight composite mortar has better seismic behavior and energy dissipation capacity. The composite wall presented in this paper has good economical effect and high generalized value, as compared with bamboo framing wall with sprayed thermal insulation material.

Key words: covered bamboo wall; sprayed lightweight composite mortar; quasi-static test; failure pattern; seismic behavior

竹子是重要的非木质森林资源组成部分, 中国是世界上竹类资源最丰富的国家, 种植面积和蓄积量均居世界首位, 竹材在我国有广阔的应用

前景^[1-2]。

相对于砖、混凝土等传统建筑材料, 竹材有着低碳环保、加工能耗低、可自然降解等优点,

收稿日期: 2016-11-20

修改稿日期: 2018-08-30

基金项目: 科技部国家重点研发计划课题(2017YFC0703502), 国家自然科学基金项目(51608433), 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTZDSF04-02-02)

第一作者: 田黎敏(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事现代竹木结构研究和教学工作。E-mail: tianlimin701@163.com

通讯作者: 郝际平(1959—), 男, 博士, 教授, 主要从事现代竹木结构研究和教学工作。E-mail: hao-jp168@163.com

是一种可再生的绿色建筑材料。此外,竹材轻质高强高韧的材料特性使得竹结构建筑受到的地震作用较小;竹结构具有优良的变形性能,能够有效耗散地震能量,从而减轻震害。由于原竹存在防火、防虫、保温、隔声、防腐性能差以及刚度、强度分布不均的缺点,大大限制了其在工程中的直接应用^[3-9]。

为了改进上述不足,文献[10]提出在原竹龙骨上喷涂一种保温材料(主要成分为灰浆组合物、聚苯乙烯颗粒和矿物黏合剂等,在本文中称为“轻质复合砂浆”),经养护后试件具备一定强度,且具备保温、隔声、防腐等优良性能。在此基础上,为提高组合墙体的抗剪承载力和抗侧刚度,同时减小墙体厚度、降低造价,本文提出在密布原竹骨架上喷涂该轻质复合砂浆,形成喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合结构体系。

本文通过对喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体试件进行低周反复加载试验,分析试件的受力过程和破坏模式,并研究该组合墙体的承载能力、抗侧刚度、延性、承载力退化、刚度退化及耗能性能等力学特征,为该组合墙体的推广应用奠定理论基础。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

以1:1.5模型试件作为试验模型,墙体宽度为2.5 m,高度为2 m。原竹骨架由24根立柱及斜向竹篾组成(图1),原竹立柱的截面平均外径为50 mm,平均壁厚为5 mm。各竹构件间均采用螺栓固定,水泥纤维板用自攻螺钉与横向原竹连接,在竹篾与立柱的空隙中喷涂轻质复合砂浆,使原竹被其完全包裹。在原竹骨架外侧直接喷涂40 mm厚的轻质复合砂浆和10 mm厚的外墙抹灰,墙体厚度总计为200 mm。试件的几何尺寸及构造如图2所示,轻质复合砂浆的喷涂过程如图3(a)所示。在试件表面粉刷一层较薄的白灰,以便在试验过程中更好地观察组合墙体裂缝的开展,最终试件如图3(b)所示。原竹、喷涂轻质复合砂浆的力学性能以及它们之间的粘结滑移性能见文献[10]。

1.2 试验装置及测点布置

试验在西安建筑科技大学结构与抗震实验室完成。由200 kN的MTS作动器提供往复水平荷载,反力梁与千斤顶之间设滚动导轨。为避免试验过程中组合墙体的面外变形过大,在该组合墙

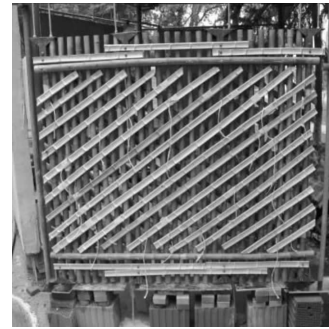


图1 原竹骨架

Fig. 1 Bamboo skeleton

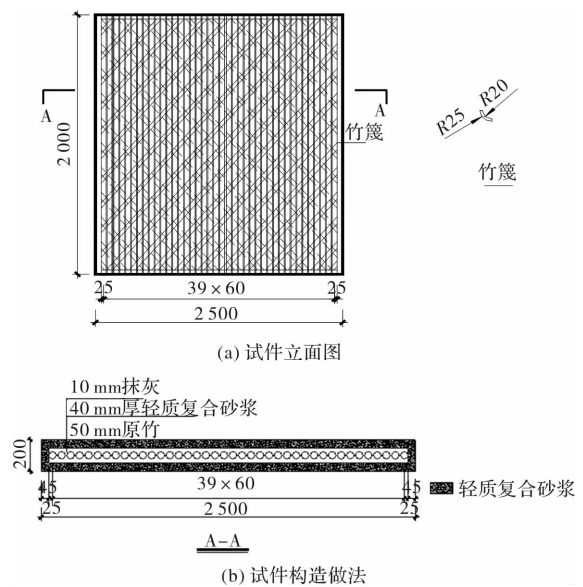


图2 试件构造图

Fig. 2 Configuration of specimen

体顶梁处安装面外侧向滚动支撑;同时,为确保墙体的竖向荷载正确传递,在每根立柱的上、下端部以及螺栓连接处布置有20 mm厚的钢垫板。此外,墙体试件的立柱两端底部设置抗拔件,试验装置如图4所示。

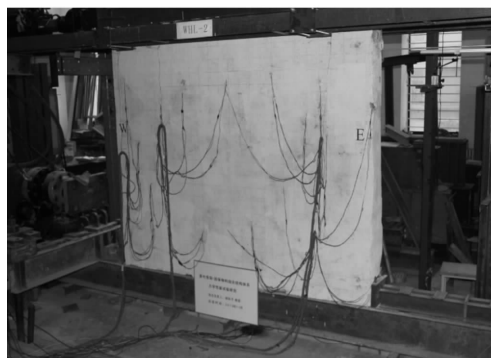
试件的位移计布置如图5所示。其中 D_1 、 D_2 分别测量试件的水平位移, D_3 、 D_4 用于测量试件与加载底梁间的相对滑动位移, D_5 、 D_6 分别测量试件相对底梁的垂直方向位移, D_7 、 D_8 用于测量底梁相对地面的垂直方向位移值, D_9 测试试验中墙体发生的面外变形。

1.3 加载制度

依据JGJ/T 101-2015《建筑抗震试验规程》^[11],水平荷载采用力和位移联合控制的加载方式。试验具体加载制度如下:试件开裂前采用荷载控制,以2 kN为增量且每级荷载循环1次;而试件开裂后,试验采用位移控制加载,以 $0.5\Delta_y$ 为级差且每级荷载循环3次,直至荷载降至峰值的85%时,试验结束。



(a) 喷涂过程



(b) 实际试件图

图3 制作过程

Fig. 3 Production process

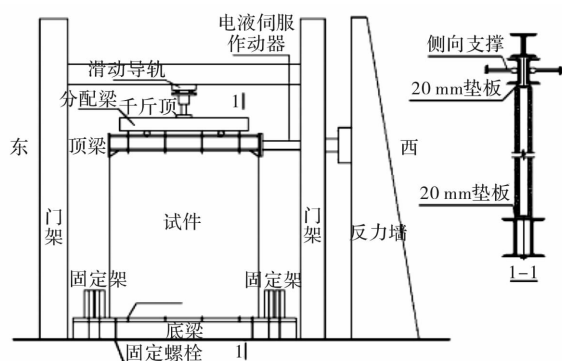


图4 试验加载装置

Fig. 4 Test set-up

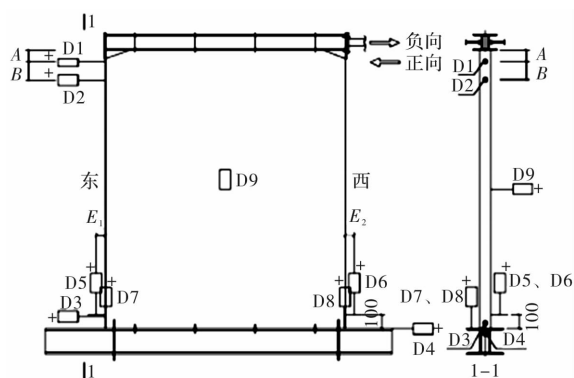
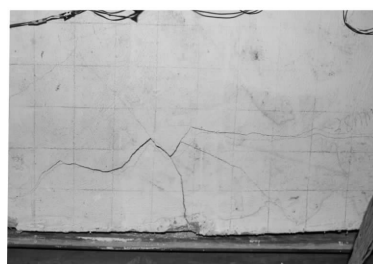


图5 位移计布置

Fig. 5 Arrangement of displacement meters

2 试验现象

加载初期无明显现象,当水平荷载加载至 18 kN 时,墙体正面中部出现第一条斜裂缝,此后改由位移控制加载.位移加至 -6 mm 时,西侧墙体正面顶部出现斜向裂缝;加载至 -10 mm,西侧墙体正面下部出现斜裂缝;加至 $+12$ mm 时,西侧墙体正面底部出现裂缝,东侧墙体正面底部出现斜裂缝,反向加载,东侧墙体背面底部出现斜裂缝.位移加载至 $+14$ mm 时,西侧墙体背面底部出现斜裂缝,反向加载,东侧墙体正面顶部出现斜裂缝.加载至 $+16$ mm 时,西侧墙体正面底部出现斜裂缝,加至 -16 mm 时,西侧墙体正面底部出现裂缝.位移加载至 $+24$ mm 时,裂缝延伸.加载至 -24 mm 时,墙体正面中部出现一条斜向裂缝,墙体背面出现一条斜裂缝.继续加载,裂缝不断变大,加载至 38 mm 时,东侧墙体正面底部出现多条斜裂缝[图 6(a)],且墙体正面底部与地梁连接处连续发出响声,墙体底部抗拔件被拉出,墙体底脚破坏,如图 6(b)所示.墙体正面裂缝发展如图 6(c)所示,墙体背面裂缝发展如图 6(d)所示.



(a) 东侧底部裂缝



(b) 抗拔件被拔出



(c) 墙体正面裂缝



(d) 墙体背面裂缝

图6 试件破坏情况

Fig. 6 Failure mode of specimen

3 结果分析

3.1 滞回性能

试件滞回曲线中的侧移为墙体顶部的净侧移 Δ (剪切变形),即试验过程中墙体顶部实测侧移 Δ_0 与由墙体绕被拉伸的锚栓转动而引起的墙体顶部侧移 Δ_φ 和墙体相对底梁的滑动位移 Δ_l 的差值^[12]

(图 7):

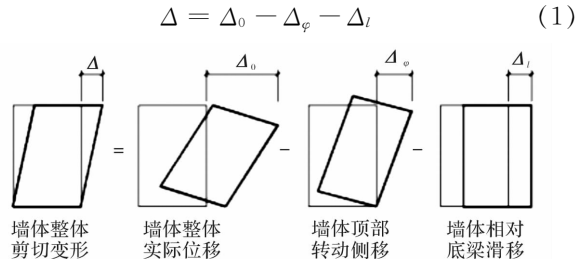


图 7 墙体实际剪切变形

Fig. 7 Actual shear deformation of wall

根据上述原理, 给出试件的滞回曲线如图 8 所示: 在加载初期处于弹性阶段, 随后进入弹塑性阶段, 滞回曲线呈梭形. 当荷载卸载至零时试件开始出现残余变形. 荷载继续增加, 滞回曲线向弓形发展, 并出现一定的“捏拢”现象. 当试件屈服后, 滞回曲线由弓形向反 S 形发展, “捏拢”现象更加明显. 当达到峰值荷载后, 试件外部轻质复合砂浆与内部竹骨架出现滑移, 导致曲线由反 S 形向 Z 形转变, 滞回环的“捏拢”现象也更加严重, 并表现出明显的刚度退化及承载力退化.

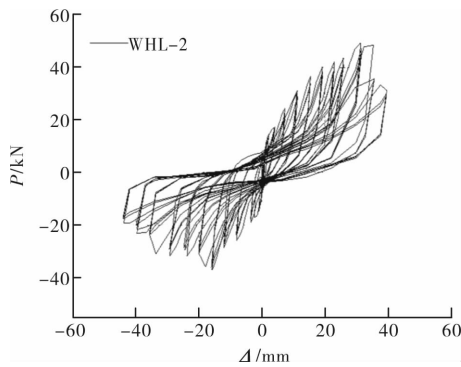


图 8 试件滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic loops of specimen

3.2 骨架曲线及延性

试件的骨架曲线如图 9 所示, 组合墙体骨架曲线的弹性段较短, 在加载初期表现出较强的非线性, 且无明显的屈服点. 达到峰值荷载后, 试件的骨架曲线略有下降, 在塑性阶段, 墙体整体侧移可达 36.8 mm。

由于试验所得到的 $P-\Delta$ 曲线没有明显的屈服

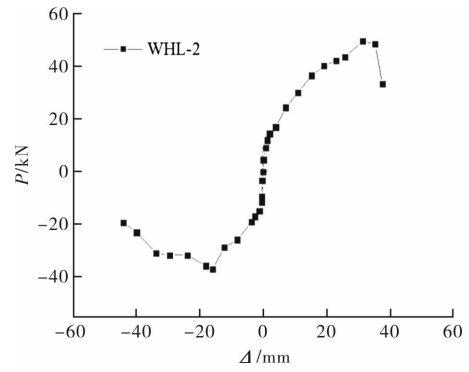


图 9 试件骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curve of specimen

点, 因此, 按照 JGJ/T 101-2015《建筑抗震试验规程》^[11] 采用能量等效面积法确定屈服荷载 P_y 和屈服位移 Δ_y , 如图 10 所示. 具体做法为: 过 P_{max} 作一水平线 AB , 再过原点 O 作割线 OD 与 AB 交于点 D , 当面积 $ADCA$ 与面积 $CFOC$ 相等时, 过点 D 作垂线交曲线 OA 于点 E , 则 E 点对应的荷载为屈服荷载, 相应的侧移 Δ_y 为屈服位移.

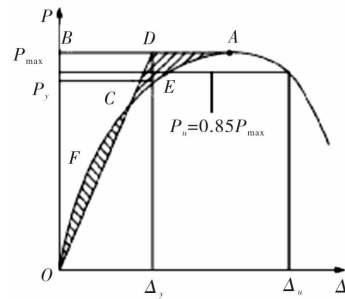


图 10 屈服点的确定

Fig. 10 Determination of yield point

试件的主要抗震性能指标见表 1. 由表 1 结果可知, 试件的位移延性系数 $\mu = 2.22$. 该组合墙体的延性系数相比于文献[13-14]中的偏小, 一方面是由竹材本身的延性所决定的, 另一方面, 试验过程中抗拔件被拉出, 墙体底部发生破坏, 后期承载力下降较快, 导致试件承载力未能充分发挥. 综合来看, 该组合墙体基本具有较好的延性.

需要注意的是, 组合墙体在正向、反向加载方向下, 其屈服荷载、极限荷载及破坏荷载值相差较大, 这是由东侧抗拔件提前失效导致的.

表 1 试件主要抗震性能指标

Tab. 1 Main seismic properties of specimen

加载方向	屈服荷载		极限荷载		破坏荷载		单位墙长 屈服荷载 $P'_y / (kN \cdot m^{-1})$	延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$
	P_y / kN	Δ_y / mm	P_{max} / kN	Δ_{max} / mm	P_u / kN	Δ_u / mm		
正向	41.18	20.67	49.56	31.37	42.13	37.19	17.16	1.80
负向	27.33	10.49	37.07	15.86	31.51	31.82	11.39	3.03
均值	34.26	15.58	43.32	23.62	36.82	34.51	14.28	2.22

3.3 刚度与承载力退化

采用 JGJ/T 101-2015《建筑抗震试验规程》^[11] 的规定, 试件的割线刚度 K_i 按下式计算:

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \tag{2}$$

式中: P_i 为第 i 次峰点荷载值; Δ_i 为第 i 次峰点位移值.

试件的刚度退化曲线如图 11 所示: 整个刚度衰减比较均匀, 没有明显的刚度突变. 在试验加载初期, 刚度退化速率较快, 随着位移的增加, 塑性变形不断发展, 刚度退化速率降低, 逐渐趋于平缓.

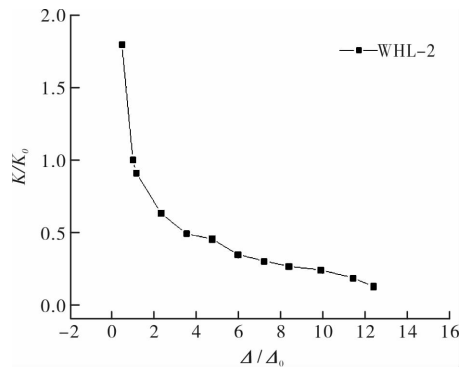


图 11 试件刚度退化曲线

Fig. 11 Stiffness degradation curve of specimen

注: K_0 为初始刚度, 本文将墙体的弹性刚度作为初始刚度, 即取为试验骨架曲线上 $0.4 P_{\max}$ 点处对应的割线刚度^[15];

Δ_0 为初始位移, 取试验骨架曲线上 $0.4 P_{\max}$ 点处对应的位移值作为初始位移.

采用 JGJ/T 101-2015《建筑抗震试验规程》^[11] 的规定用承载力退化系数 λ_i 来表征试件的承载力退化性能:

$$\lambda_i = P_j^i / P_j^{i-1} \tag{3}$$

式中: P_j^i 为 j 倍 Δ_y 位移控制加载时, 第 i 次循环峰点荷载值; P_j^{i-1} 为 j 倍 Δ_y 位移控制加载时, 第 $i-1$ 次循环峰点荷载值. 即第 j 级加载时, 第 i 次循环峰值荷载与第 $i-1$ 次循环峰值荷载之比.

各级加载位移下的承载力退化系数如表 2

所示.

由以上结果可知, 在往复荷载作用下, 试件的承载力退化系数大多均在 0.9 以上, 墙体的抗剪承载力较为稳定.

表 2 试件承载力退化系数

Tab. 2 Capacity degradation coefficient of specimen

加载位移	2.0Δ _y	2.5Δ _y	3.0Δ _y	3.5Δ _y	4.0Δ _y	4.5Δ _y
λ ₁	0.93	0.95	0.93	0.95	0.74	0.90
λ ₂	0.99	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97

3.4 耗能性能

试件在循环往复荷载作用下的耗能能力采用耗能值 E 和能量耗散系数 η 来衡量. 该墙体在各荷载级第一循环的 E 与 η 如表 3 所示.

表 3 试件的耗能能力

Tab. 3 Energy dissipation capacity of specimen

加载级别	$E/(\text{kN} \cdot \text{mm})$	η
2 kN	0.64	0.75
4 kN	1.09	0.55
6 kN	1.81	0.31
8 kN	6.07	0.56
10 kN	17.73	0.77
12 kN	53.75	0.96
14 kN	64.71	0.95
16 kN	157.78	0.82
18 kN	268.35	0.86
1.5δ _y	384.22	0.67
2.0δ _y	503.63	0.72
2.5δ _y	550.05	0.64
3.0δ _y	617.58	0.86
3.5δ _y	685.27	0.57
4.0δ _y	803.21	0.61
4.5δ _y	694.81	0.67

由表 3 可知, 试件的平均能量耗散系数高达 0.7, 因此该组合墙体具有较好的耗能能力.

3.5 试验结果与文献结果对比

将本文的试验结果与压型钢板—竹胶板组合墙体^[16]、喷涂保温材料—原竹骨架组合墙体^[10]的试验结果进行对比分析, 结果如表 4 所示.

表 4 本文试验结果与文献结果对比

Tab. 4 Comparison of results of reported test and references

数据来源	墙宽/m	墙高/m	$P'_y/\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	$P'_{\max}/\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	Δ_y/mm	Δ_{\max}/mm	μ
本文	2.5	2.0	14.28	18.05	15.58	23.62	2.22
文献[16]: W-2	1.2	1.4	19.53	23.35	8.95	19.10	2.12
文献[16]: W-3	1.2	1.4	25.03	30.00	10.77	13.96	1.30
文献[10]	2.5	3.0	18.04	20.98	15.37	31.48	2.75

注: 文献[16]中 W-2、W-3 的差别为竹胶板的厚度不同.

由表4对比结果可知,喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体的单位墙宽抗剪承载力(注:此处用极限荷载)分别比压型钢板—竹胶板组合墙体W-2、W-3低22.70%和39.83%。但考虑到墙高不同,在墙体底部能承受相同承载力的前提下,墙体越高,能承受的水平侧向力越小(该试验简化模型为悬臂梁,固定端弯矩等于水平侧向力与墙高的乘积)。由于本文中墙体的高度高于文献[16]中的墙体W-2、W-3,故二者单位墙长抗剪承载力总体上相差不大,但是该组合墙体的延性明显好于前者,表明喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体的塑性变形能力较强,具有更好的抗震性能和耗能能力。

与喷涂保温材料—原竹骨架组合墙体相比,喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体的竖向原竹直径小,且没有竖向力作用,因此该组合墙体的单位墙长抗剪承载力略小。喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体的竖向原竹之间没有间隙引起该组合墙体的延性也略差。采用原竹密布的构造形式,喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体的竖向原竹直径以及外裹轻质复合砂浆的用量减小,更节材经济具有较高的推广价值。

4 结论

通过对喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体在反复水平荷载作用下的试验研究,得出以下结论:

(1)喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体的主要破坏模式为墙体底部破坏,具体表现为底部抗拔件被拉出。当试件处于极限状态时,组合墙体出现裂缝,但其整体结构较为完好。

(2)喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体具有较大的抗剪承载力和初始抗侧刚度,单位屈服荷载为14.28 kN/m,单位受剪承载力为18.05 kN/m,且具有较好的延性和耗能能力。

(3)与压型钢板—竹胶板组合墙体相比,喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体的单位墙长抗剪承载力略小,但总体上相差不大,但是喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体的塑性变形能力较强,具有更好的抗震性能和耗能能力;与喷涂保温材料—原竹龙骨组合墙体相比,喷涂轻质复合砂浆—密布原竹组合墙体的承载力与延性略小,但整体相差不大且经济性较好,同样具有较高的推广价值。

参考文献 References

- [1] 江泽慧,王戈,费本华,等. 竹木复合材料的研究及发展[J]. 林业科学研究, 2002, 15(6): 712-718.
JIANG Zehui, WANG Ge, FEI Benhua, et al. The research and development on bamboo/wood composite materials [J]. Forest Research, 2002, 15(6): 712-718.
- [2] 国家林业局. 中国森林资源报告(2009-2013)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014.
The State Forestry Administration of the People's. Report on China forest resources (2009-2013) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2014.
- [3] 李玉顺,单炜,黄祖波,等. 压型钢板-竹胶板组合楼板的力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 96-102, 111.
LI Yushun, SHAN Wei, HUANG Zubo, et al. Experimental study on mechanical behavior of profiled steel sheet-bamboo plywood composite slabs[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 96-102, 111.
- [4] 肖岩,余立永,单波,等. 装配式竹结构房屋的设计与研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(1): 56-59.
XIAO Yan, SHE Liyong, SHAN Bo, et al. Research and design of prefabricated bamboo house[J]. Industrial Construction, 2009, 39(1): 56-59.
- [5] 解其铁,张王丽,蒋天元,等. 钢-竹组合柱轴心受压性能的试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(S2): 221-225.
XIE Qitie, ZHANG Wangli, JIANG Tianyuan, et al. Experimental study on performance of steel-bamboo composite column under axial compression[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(S2): 221-225.
- [6] 肖岩,陈国,单波,等. 竹结构轻型框架房屋的研究与应用[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 195-203.
XIAO Yan, CHEN Guo, SHAN Bo, et al. Research and applicant of light weight glue-laminated bamboo frame structure[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 195-203.
- [7] 李琴,汪奎宏,杨伟明,等. 重组竹材胶合板制造技术的研究[J]. 竹子研究汇刊, 2003, 22(4): 56-60.
LI Qin, WANG Kuihong, YANG Weiming, et al. Research on technology of remaking bamboo glued board[J]. Journal of Bamboo Research, 2003, 22(4): 56-60.
- [8] 吕清芳,魏洋,张齐生,等. 新型抗震竹质工程材料安居示范房及关键技术[J]. 特种结构, 2008, 25(4): 6-10.
LU Qingfang, WEI Yang, ZHANG Qisheng, et al. Key technologies of the new anti-seismic model living

- room with bamboo engineering materials[J]. Special Structures, 2008, 25(4): 6-10.
- [9] SHARMA B. Seismic performance of bamboo structures [D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2011.
- [10] 田黎敏, 郝际平, 寇跃峰. 喷涂保温材料—原竹骨架组合墙体抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(6): 102-109.
- TIAN Limin, HAO Jiping, KOU Yuefeng. Research on seismic behavior of bamboo framing walls with sprayed thermal insulation material [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(6): 102-109.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of housing and urban-rural development of the People's Republic of China. Specification for seismic test of building: JGJ/T 101-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [12] 苏明周, 黄智光, 孙健, 等. 冷弯薄壁型钢组合墙体循环荷载下抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(8): 42-51.
- SU Mingzhou, HUANG Zhiguang, SUN Jian, et al. Experimental study of the shearing behavior of cold-formed steel wall panels under cyclic load[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8): 42-51.
- [13] 姜楠楠, 屈俊童. 云南民居传统木质隔墙抗侧移性能的改进研究[J]. 地震研究, 2012, 35(1): 128-132.
- JIANG Nannan, QU Juntong. Anti-sway performance improving study of traditional wooden brattice of yunnan dwelling[J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(1): 128-132.
- [14] 郑维, 刘杏杏, 陆伟东. 胶合木框架-剪力墙结构抗侧力性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(2): 104-112.
- ZHENG Wei, LIU Xingxing, LU Weidong. Experimental study on lateral load resistance of glulam frame-shear wall structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(2): 104-112.
- [15] 石宇. 水平地震作用下多层冷弯薄壁型钢结构住宅的抗震性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- SHI Yu. Study on seismic behavior of cold-formed steel framing system of mid-rise residential building under horizontal earthquake action [D]. Xi'an: Changan University, 2008.
- [16] 李玉顺, 沈煌莹, 张王丽, 等. 压型钢板-竹胶板组合墙体抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(S1): 108-112, 126.
- LI Yushun, SHEN Huangying, ZHANG Wangli, et al. Experimental study on seismic behavior of profiled steel sheet-bamboo plywood composite walls [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(S1): 108-112, 126.

(编辑 沈 波)

(上接第 674 页)

- [6] 王晨广. 施威德勒椭球形弦支穹顶的特征值屈曲分析[J]. 四川建材, 2011(3): 26-27, 30.
- WANG Chengguang. Characteristic value buckling analysis of schwedler elliptic suspendome[J]. Sichuan Building Materials, 2011(3): 26-27, 30.
- [7] 刘晓, 罗永峰. 复杂大跨空间钢结构非线性有限元稳定分析[J]. 计算机辅助工程, 2007, 16(3): 25-29.
- LIU Xiao, LUO Yongfeng. Non-linear finite element analysis on stability of complicated large span steel structure[J]. Computer Aided Engineering, 2007, 16(3): 25-29.
- [8] 中华人民共和国建设部. 空间网格结构技术规程: JGJ7-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Construction of the P. R. C.. Technical specification for space frame structures: JGJ7-2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [9] 沈世钊, 陈昕, 林友军, 等. 单层球面网壳的稳定性[J]. 空间结构, 1997, 3(3): 3-12.
- SHENG Shizhao, CHEN Xin, LIN Youjun, et al. Stability of single layer spherical surface reticulated shells[J]. Spatial Structures, 1997, 3(3): 3-12.
- [10] 贺拥军, 周绪红, 董石麟, 等. 膜型网壳结构静力及稳定性研究[J]. 建筑结构, 2004, 34(5): 49-52.
- HE Yongjun, ZHOU Xuhong, DONG Shilin, et al. The research on static and stability property of membranous latticed shell structure [J]. Building Structure, 2004, 34(5): 49-52.
- [11] 胡荣, 张伟. 大跨度空间桁架预拱度设置及稳定性分析[J]. 钢结构, 2011(26): 6-8.
- HU Rong, ZHANG Wei. Camber settings and stability analysis of large span space truss [J]. Steel Construction, 2011(26): 6-8.
- [12] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- CHEN Ji. Stability of steel structures theory and design [M]. Beijing: Science Press, 2011.

(编辑 沈 波)