

# 喷涂复合材料-密布原竹组合楼板抗弯性能试验研究

郝际平<sup>1</sup>, 寇跃峰<sup>1</sup>, 田黎敏<sup>1</sup>, 赵秋利<sup>2</sup>, 何晗欣<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 广州固保系统建筑材料有限公司, 广东 广州 510070)

**摘要:** 对一块喷涂复合材料-密布原竹组合楼板的抗弯性能进行了试验研究, 通过观察各级荷载作用下组合楼板挠度发展情况, 探讨组合楼板的破坏过程、破坏形式及破坏机理, 考虑原竹与喷涂复合材料之间的组合效应, 获得组合楼板的抗弯承载力, 并得出组合板的荷载-挠度曲线以及原竹荷载-应变曲线。结果表明: 这种组合楼板整体性能良好, 原竹与喷涂复合材料之间具有很好的组合效应, 能够提供较高的承载力。

**关键词:** 竹; 组合楼板; 破坏过程; 受弯承载力; 荷载-挠度曲线

中图分类号: TU366.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)04-0471-06

## Experimental study on bending capacity of sprayed composite material-densely covered bamboo composite slab

HAO Jiping<sup>1</sup>, KOU Yuefeng<sup>1</sup>, TIAN Limin<sup>1</sup>, ZHAO Qiuli<sup>2</sup>, HE Hanxin<sup>1</sup>

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

2. Guangzhou CRUPE Systems Building Materials Co., Ltd, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** Research is carried out about the bending properties of sprayed composite material-densely covered bamboo composite slab. By observing the deflection development of composite slab under various load levels, the bending capacity of composite slabs was presented with consideration of failure processes, failure mode and failure mechanism. At the same time, the combined effect between bamboo and sprayed composite material are considered. The load-deflection curves relationship of composite slabs and bamboo skeleton load-strain curves were obtained. The results showed the composite slabs had excellent overall performance, with a good combination effect between bamboo and sprayed composite material, providing higher carrying capacity.

**Key words:** bamboo; composite slab; failure process; bending capacity; load-deflection curve

我国竹类资源丰富, 竹子种类和竹林面积约  
占世界的 1/4, 竹材产量约占 1/3, 居世界之首<sup>[1]</sup>。  
竹材的物理性能优良, 其抗拉强度约为木材的 2  
倍, 抗压强度高出木材 10% 左右, 比强度为钢材  
的 3~4 倍<sup>[2]</sup>。然而, 原竹在材料匀质、几何规则  
及防腐防火等方面存在缺陷, 目前多以集成重组  
的形式来利用<sup>[3-6]</sup>, 限制了竹结构的发展。课题  
组<sup>[7,8]</sup>提出在原竹外包裹喷涂复合材料形成组合结  
构, 以弥补其缺陷。该结构质轻、抗震性能好、  
绿色环保, 而且有良好的保温、隔热及耐火等性  
能, 可广泛应用于我国农村低层住宅建筑中, 同  
时可以缓解目前钢材、木材等建筑材料短缺的局  
势, 符合可持续发展的理念, 具有深远的社会意

义和经济效益。

轻质、环保是未来建筑发展的两大方向。其  
中楼板所占重量较大, 有效控制其自重对降低整  
栋建筑物的重量十分关键<sup>[9]</sup>。原竹与喷涂材料组合  
在一起形成的喷涂复合材料-原竹组合楼板, 可有  
效解决自重过重的问题。本文设计制作了一种喷  
涂复合材料-密布原竹组合楼板并对其抗弯性能进  
行了试验研究和分析。

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计及制作

本次试验楼板模型长度为 2 000 mm, 宽度为  
690 mm, 厚度为 240 mm。将 7 根直径为 90±2 mm

收稿日期: 2016-11-20

修改稿日期: 2018-07-05

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0703502); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTZDSF04-02-02); 陕西省教育厅专项基  
金(17JK0441); 陕西省自然科学基金青年人才项目(2017JQ5079)

第一作者: 郝际平(1959—), 男, 教授, 从事结构工程研究和教学工作。E-mail: haojiping@xauat.edu.cn

通讯作者: 田黎敏(1983—), 男, 副教授, 从事钢结构、现代竹木结构的研究。E-mail: tianlimin701@163.com

原竹并排,通过顶部、底部直径为  $50\pm 1$  mm 的横向原竹和螺栓连接成竹筏状骨架,如图 1 所示,原竹的截面尺寸见表 1 所示.然后在原竹上喷涂复合材料,最后在组合楼板的两侧涂抹 10 mm 厚抹面砂浆.

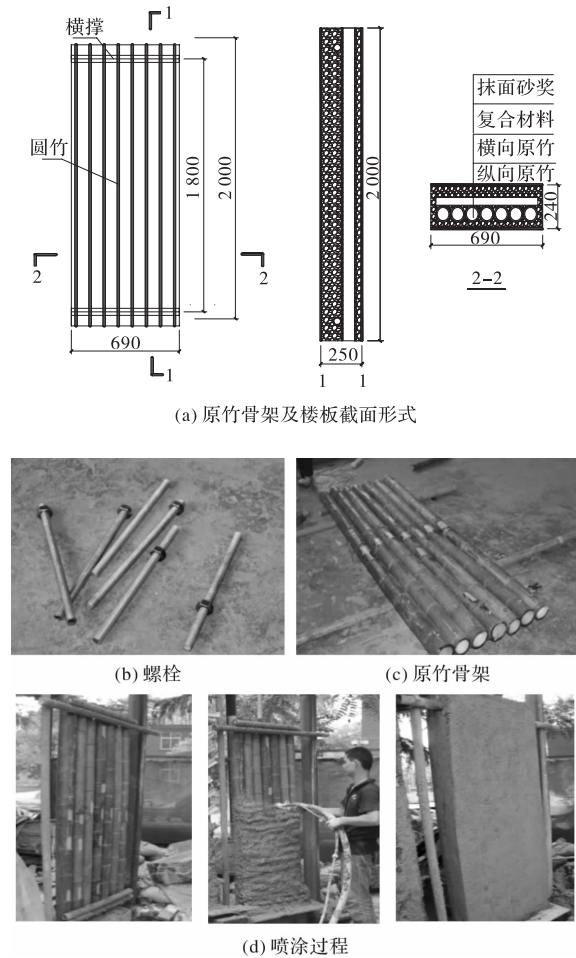


图 1 楼板制作过程 (单位: mm)

Fig. 1 Working process of specimens (unit: mm)

表 3 竹材材性数据

Tab. 3 Properties of bamboo sheets

含水率/%	顺纹抗拉强度/MPa	顺纹抗压强度/MPa	纹抗剪强度/MPa	顺纹抗拉弹性模量/GPa	顺纹抗压弹性模量/GPa
14.35	163.1	66.3	11.28	11.61	11.9

### 1.3 加载方案

本次试验在西安建筑科技大学结构工程实验室完成.试验采用在楼板三分点处集中加载的方式,见图 2.试验首先预加载 2 kN,然后进入正式加载阶段.试件屈服前采用荷载控制,分级加载,每级 3 kN 维持 2 min;试件屈服后采用位移增量控制,每级 3mm,直至试件破坏.

### 1.4 测试内容

试验位移计布置如图 2 所示,位移计 D1~D5 沿楼板长度方向布置,用来测量楼板在支座处、

表 1 原竹尺寸

Tab. 1 The sample size of bamboo culms

原竹	试件尺寸/mm			
	外径 $D$	内径 $d$	壁厚 $t$	长度 $l$
纵向原竹	90	70	10	2 000
横向原竹	50	40	5	690

## 1.2 材料

### 1.2.1 喷涂复合材料及抹面砂浆

喷涂复合材料由灰浆混合料、聚苯乙烯颗粒和矿物基黏合剂等组成,通过喷涂方式施工,快速初凝,具有一定强度,并兼有良好保温、隔声以及耐火等性能<sup>[7-9]</sup>.参照 JGJ/T 70-2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》<sup>[10]</sup>中的试验方法,对喷涂复合材料及抹灰的抗压强度、弹性模量等性能参数进行测试,结果见表 2.

表 2 喷涂复合材料及墙体抹灰材性

Tab. 2 Properties of sprayed composite material and plasterer

材料类型	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa
喷涂复合材料	806.27	1.68	1 860
抹面砂浆	1 845.83	14.85	12 759

### 1.2.2 竹材

本次试验所用竹材为浙江产 4 年生毛竹.在原竹立地处从不少于 100 株样竹中选取 7 株胸径约为 90 mm 和 4 株胸径约 50 mm 的成熟、无缺陷的样竹.每株从胸径以上截取满足长度和直径要求的竹材.按照 JG/T199-2007《建筑用竹材物理力学性能试验方法》<sup>[11]</sup>要求对原竹进行力学物理性能测试,测试结果见表 3.

分配梁加载处及跨中处的竖向位移;位移计 D6、D7 布置在楼板跨中边侧,用于测量其竖向位移.

试件应变测点布置见图 3,用于测量楼板关键位置处原竹的应变,其中,原竹上侧测点编号为奇数,下侧为偶数.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验现象

加载初期,挠度随荷载变化缓慢,整体工作性能较好.当荷载为 7 kN(约  $5.6 \text{ kN/m}^2$ )时跨中

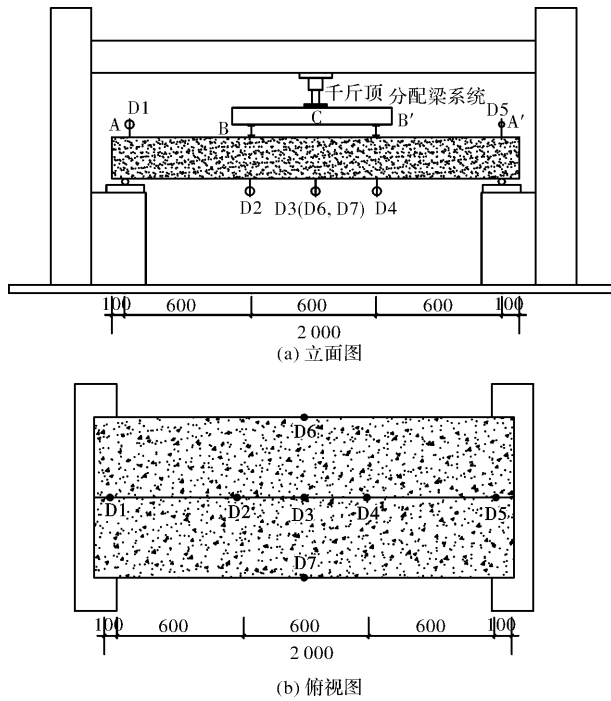


图2 位移计布置图(单位: mm)

Fig. 2 Arrangement of displacement gauges (unit: mm)

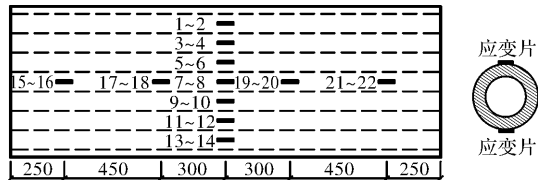


图3 应变片布置图(单位: mm)

Fig. 3 Arrangement of strain (unit: mm)

挠度值为 0.56 mm ( $l/3\ 214$ ,  $l$  为楼板计算跨度 1 800 mm). 荷载达到 10 kN (约 8 kN/m<sup>2</sup>) 时, 跨中挠度为 0.81 mm ( $l/2\ 222$ ). 继续加载, 楼板底面出现大量微小裂纹, 楼板整体出现较明显的弯曲变形, 如图 4(a). 当跨中挠度达到 GB50005-2003《木结构设计规范》<sup>[12]</sup> 限值  $l/250$  (7.2 mm) 时, 荷载为 29 kN. 随后楼板底面裂缝宽度增加, 如图 4(b). 当加载到 48 kN 时, 东西两端原竹与喷涂材料之间出现较明显滑移, 如图 4(c) 所示. 当荷载加到 85 kN 时, 横向原竹劈裂, 如图 4(d) 所示. 加载至 96 kN 时, 楼板南侧跨中发出两声巨响, 两根原竹下侧断裂, 如图 4(e) 和 4(f) 所示, 荷载迅速下降.

## 2.2 应变分析

采用电阻应变片记录原竹上下侧的应变变化情况, 结果如图 5 所示. 试件在不同荷载作用阶段, 原竹各测点的应变情况如图 6 所示, 其中上侧曲线表示原竹顶部应变, 下部曲线表示原竹底部应变. 分析图 5 及图 6 可知, 在试件破坏前, 各测点应变基本呈现线性变化趋势. 加载初始, 原竹

顶部应变与底部应变一致为拉, 表明此时楼板整体性良好, 原竹上侧喷涂材料承压; 之后顶部应变开始为压, 表明喷涂材料逐渐与原竹剥离, 上侧原竹逐渐承压, 楼板中性轴位于原竹水平中轴上侧; 当荷载达到一定值时, 喷涂材料大面积剥

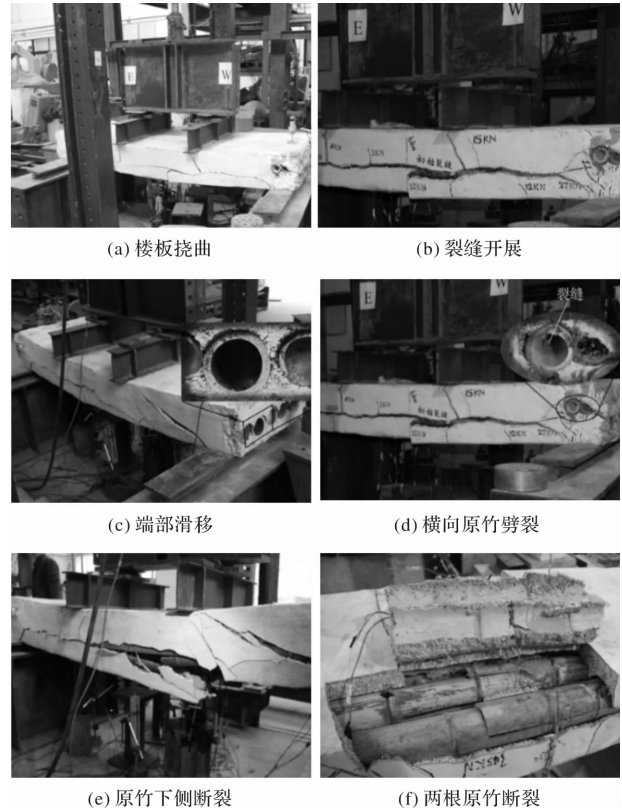
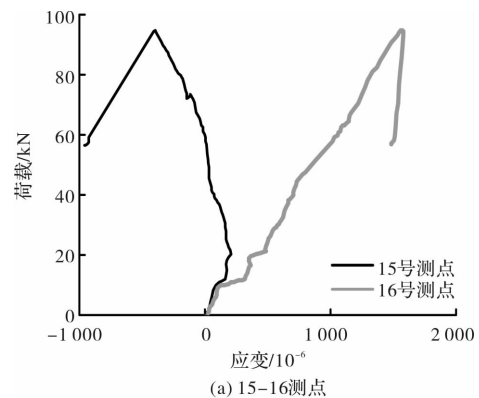
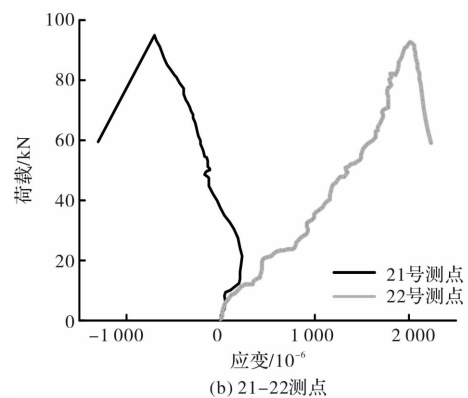


图4 楼板破坏情况

Fig. 4 Failure modes of the slab



(a) 15-16测点



(b) 21-22测点

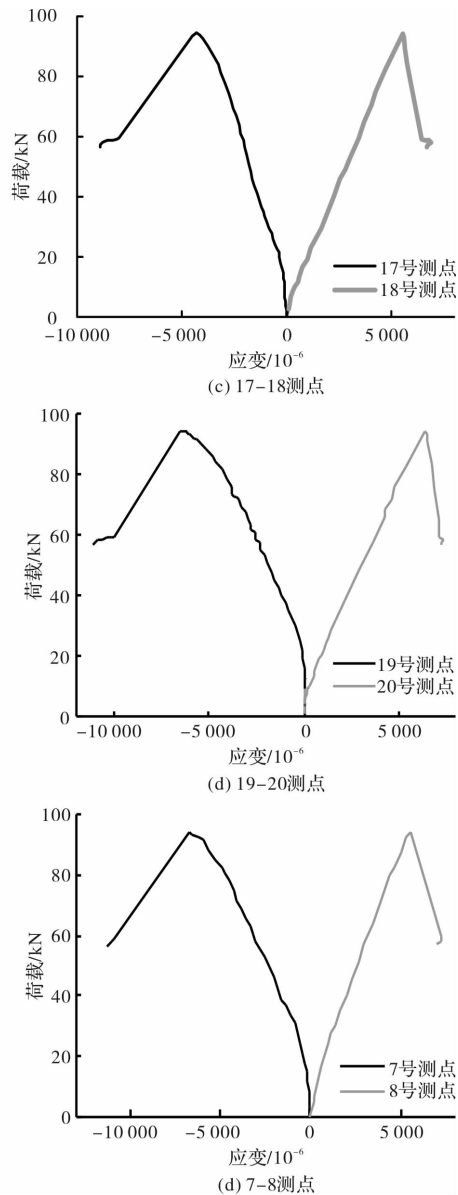
图 5 各测点  $P-\varepsilon$  曲线

Fig. 5 Load-strain curves on monitoring points

落,退出工作,此后压力基本由原竹上半部分承担,此时楼板中性轴下移到原竹中轴附近。

### 2.3 挠度分析

参考文献[13],试件在竖向荷载作用下,跨中挠度实际值按下列公式进行计算:

$$\alpha_i^0 = \alpha_q^0 + \alpha_g^0 \quad (1)$$

$$\alpha_q^0 = v_m^0 - \frac{1}{2}(v_l^0 + v_r^0) \quad (2)$$

$$\alpha_g^0 = \frac{M_g}{M_b} \alpha_b^0 \quad (3)$$

式中:  $\alpha_i^0$  为全部荷载作用下构件跨中的挠度实际值;  $\alpha_q^0$  为外加试验荷载作用下构件跨中的挠度实测值;  $\alpha_g^0$  为构件自重和加荷设备重量产生的跨中挠度值;  $v_m^0$  为全部荷载作用下构件跨中的位移实测值;  $v_l^0$ 、 $v_r^0$  为外加荷载作用下构件左、右支座

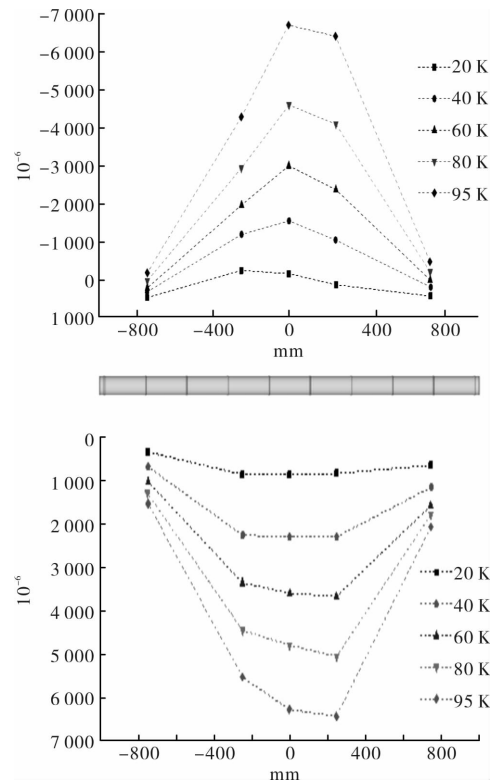
图 6 不同荷载阶段作用下的  $P-\varepsilon$  曲线

Fig. 6 Load-strain curves under different load levels

沉陷位移的实测值;  $M_g$  为构件自重和加荷设备重产生的跨中弯矩值;  $M_b$  为从外加试验荷载开始至构件出现裂缝的前一级荷载为止的外加荷载产生的跨中弯矩值;  $\alpha_b^0$  为从外加试验荷载开始至构件出现裂缝的前一级荷载为止的外加荷载产生的跨中挠度实测值。

1-5 号测点实测位移值如图 7(a)所示,根据各级荷载下各测点的位移实测值,按式(1)~(3)计算楼板跨中实际挠度值,结果如图 7(b)所示。可知,在加载初期楼板抗弯刚度较大,曲线呈线性快速上升,此时喷涂复合材料与原竹的组合效应较好。当荷载超过 12 kN 后,曲线变缓,主要是因为喷涂材料逐渐开裂剥离,与原竹协同作用变弱,楼板刚度降低。荷载达到峰值前,楼板跨中 3 号、6 号和 7 号测点挠度值基本相同,说明试验实际加载较为成功,楼板未出现扭转。荷载达到极值后,由于南侧原竹断裂,楼板整体倾斜,楼板跨中挠曲由北到南(沿测点 6→3→7 方向)逐渐增大。荷载达到峰值(95 kN)时,楼板跨中挠度为 46 mm( $l/39$ )。

图 8 给出了试件在各级荷载作用下其挠曲变形的发展情况。图中横坐标为试件上各点距楼板跨中的距离;纵坐标为楼板挠度。其中 95 kN 为峰值荷载。由图可知,楼板在整个加载过程中竖向变形基本呈正弦半波的形式。由于组合楼板是由

多根原竹组成,部分原竹断裂后,剩余原竹依仍能承担一定荷载。

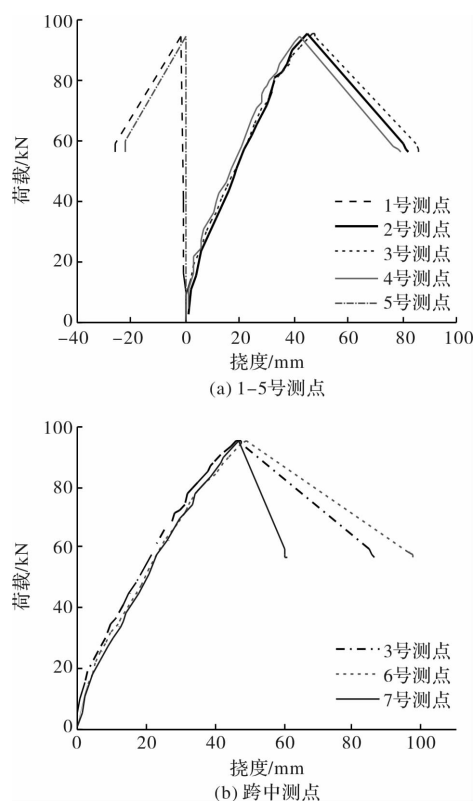


图7 荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-displacement curves

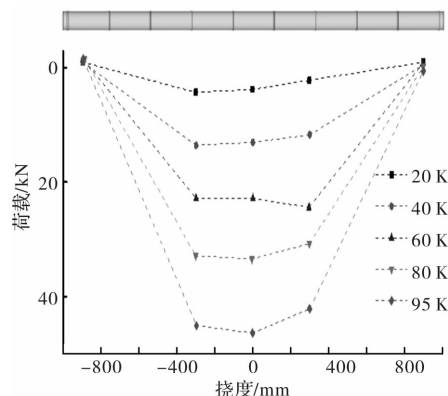


图8 不同荷载阶段的挠度发展

Fig. 8 Development of displacement under different load levels

## 2.4 受弯承载力

根据《建筑结构荷载规范》GB 50009-2012<sup>[14]</sup>要求计算得楼面最不利荷载组合为  $6.5 \text{ kN/m}^2$ 。试验组合楼板挠度达到木结构规范规定的限值  $l/250$  ( $7.2 \text{ mm}$ )时,荷载为  $29 \text{ kN}$ (约  $23 \text{ kN/m}^2$ ),为最不利荷载组合的  $3.5$  倍,满足正常使用要求。可知在规范所允许的挠度限值内,喷涂复合材料-密布原竹组合楼板可作为建筑楼板使用。

根据材料力学方法,不考虑原竹初始弯曲、

劈裂、尖削等缺陷,假设原竹为等截面圆筒且满足平截面假定,取弹性模量  $E=11 \text{ GPa}$ 。对于外径  $D=90 \text{ mm}$ ,内径  $d=72 \text{ mm}$  ( $0.8D$ ),长度  $l=2000 \text{ mm}$ 的原竹,按公式  $\Delta=\frac{5ql^4}{384EI}$  计算可知,在楼板挠度达到木结构规范的限值  $l/250$  时,本试验原竹能够承担荷载  $5.6 \text{ kN/m}^2$ ,占组合楼板总称重量的  $24.3\%$ 。

## 3 结论

通过对喷涂复合材料-密布原竹组合楼板受弯试验的整理和分析,得到了荷载-挠度的关系曲线,荷载-应变的关系曲线以及受弯承载力情况,得出如下结论:

- (1)试验结果表明竹材与喷涂材料组合效应良好,在正常使用荷载作用下挠度值在规范所允许的范围内,可以作为土木建筑楼板使用;
- (2)喷涂复合材料-密布原竹龙骨组合楼板组合方式比较理想,大大提高了原竹楼板的抗弯刚度;
- (3)从荷载-挠度曲线看出,该类组合楼板在其正常使用条件下的承载力应由其变形条件控制;
- (4)材料在破坏前一直属于弹性范围,因此可不考虑塑性状态;
- (5)楼板的变形能力极强,最终承载力也非常大,抗震性能非常突出。

## 参考文献 References

- [1] 叶忠华. 毛竹材特性及工业利用分析[J]. 林业科技, 2002, 27(3): 39-42.  
YE Zhonghua. Analysis on the character and industrial utilization of bamboo timber[J]. Forestry Science and Technology 2002, 27(3): 39-42.
- [2] 李玉顺, 张王丽, 沈煌莹, 等. 复合胶结型压型钢板-竹胶板组合楼板受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(S2): 176-181.  
LI Yushun, ZHANG Wangli, SHEN Huangyu, et al. Experimental study on flexural behavior of multiple-interlink profiled steel sheet-bamboo plywood composite slabs[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30 (S2): 176-181.
- [3] 张保良. 我国竹胶合板工业的现状和发展前景[J]. 林产工业, 1995, 2(6): 1-3.  
ZHANG Baoliang. Status of bamboo plywood industry and prospects [J]. Forest Industry, 1995, 2(6): 1-3.
- [4] 赵仁杰, 喻云水. 竹材人造板工艺学[M]. 北京: 中