

胶合竹植筋深度及直径对抗拔性能的影响

严彦^{1,2}, 刘焕荣¹, 聂玉静³, 张秀标^{1*}

(1. 国际竹藤中心, 北京 100102; 2. 安徽太平试验中心, 太平 245716; 3. 浙江农林大学工程学院, 临安 311300)

摘要: 采用胶合竹梁、双组份环氧树脂胶黏剂, 不同直径和长度的公制螺纹杆, 进行胶合竹顺纹双端植筋拉伸试件制备及测试, 初步分析研究了植入深度和植筋杆直径 2 个因素对胶合植筋强度和破坏模式的影响。抗拉试验破坏模式主要为植筋杆的拔出破坏和螺纹杆的韧性断裂破坏 2 种模式, 其中植筋杆的拔出破坏位于胶合竹/胶黏剂界面; 胶合竹顺纹双端植筋的破坏载荷及名义剪切强度随螺纹杆直径和植入深度增加而增大; 胶合竹基材较胶合木基材渗透性差, 植筋杆受力不能很好地传递到竹材内部, 是影响抗拔载荷主要因素之一。

关键词: 胶合植筋; 胶合竹; 影响因素; 抗拔强度; 破坏模式

中图分类号: S785; TQ351

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2015)02-0177-04

Effects of the glued-in threaded rod depth and diameter on the connection strength of structural glued laminated bamboo

YAN Yan^{1,2}, LIU Huanrong¹, NIE Yujing³, ZHANG Xiubiao¹

(1. International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102; 2. Anhui Taiping Experimental Station, Taiping 245716;

3. School of Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300)

Abstract: Through the both-end pullout test on the glued-in threaded rods in bamboo plywood, the effects of the depth and the diameter of the embedded rods in the bamboo glulam on the connection strength and the failure modes were investigated. Two failure modes were identified during the pullout test: the fracture of threaded rods and the pullout failure of the rods that existed in the interface between bamboo and the adhesive. The pullout critical load and the normal shear strength of both-end glued-in rods in bamboo plywood increased with an increase of the diameter and embedded length of the threaded rods. In addition, the low stress transfer efficiency caused by the poor permeability of bamboo is the main reason for hindering the further improvement of the connection strength of bamboo plywood composites.

Key words: epoxy bonded steel connection; bamboo plywood; impact factors; pullout strength; failure mode

竹类植物分部广面积大, 是一种最早被人类利用的非木材森林资源, 世界有竹类植物 70 余属, 1200 余种。竹子与人类的生产生活息息相关, 表现在生产工具、生活用品、建筑、文化用品、食品药品以及精神文化等方面; 随着对竹材的结构及性能的深入研究, 竹质工程结构材料在人们的经济与生活中扮演着重要角色^[1]。竹材有较高的抗拉与抗压强度, 良好的弹性与韧性, 且节能环保^[2]; 但由于缺乏牢固可靠的连接方式, 制约了竹工程结构材料在建筑中的推广应用。胶合植筋连接是一种可靠的抗力

矩连接方式, 由基材、胶黏剂和植入杆 3 种不同刚度和强度性能材料构成, 能够提供很高的连接强度和刚度, 胶合植筋连接优点是直接传递力到构件横截面的内部^[3], 能够有效的传递载荷并且连接处具有很好的防火和外观性能, 因此可以很好的提供抵抗动态荷载, 如风载和地震荷载产生的弯曲力矩而应用于超静定结构中^[4]。目前木结构胶合植筋方式主要应用在柱-基础连接、梁-柱连接、弯头连接^[5]和梁的接长等^[6]。我国竹建筑发展迅速, 但是对于竹质工程结构材料的胶合植筋连接研究开展较少,

收稿日期: 2014-12-11

基金项目: 国际竹藤中心基本科研业务费专项资金 (1632011002, 1632015013) 资助。

作者简介: 严彦, 助理研究员。E-mail: yanyan@icbr.ac.cn

* 通信作者: 张秀标, 博士, 助理研究员。E-mail: zhangxb@icbr.ac.cn

连接可靠性与作用机理尚不清楚。胶合植筋连接根据植入杆数量的不同可分为单杆植筋连接和多杆植筋连接,单杆植筋连接在实际生产应用中很少出现,但是在试验中研究胶合植筋连接特性时通常是对单杆植筋连接的研究,这主要是因为单杆植筋连接有助于分析单个试验参数对连接性能的影响^[7],目前此项技术还处于研究发展阶段,因此对单个因素影响的分析是十分重要的。本试验以精刨毛竹条为初始材料,生产胶合竹,对其进行顺纹双端植筋抗拔实验,并对破坏模式及机理进行初步探究,以期对竹质工程结构材料连接设计和制造提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 原材料

毛竹(*Phyllostachys heterocycla* (var.)) 采集于浙江新昌,选择4年生竹龄毛竹;经开条、粗刨、精刨加工和干燥处理后,制备成精刨竹条,其含水率4.4%、截面尺寸1800 mm×15 mm×4 mm,密度为0.67 g·cm⁻³。

酚醛树脂,型号16L511,固含量48%~51% (3 g/135℃/1 h),pH值10.5~11.5 (25℃),粘度20~40 cps (25℃),购自北京太尔化工有限公司。

聚氨酯,型号PURBOND HB S709,固含量100%,密度1.160 g·cm⁻³,布氏粘度24000 mpa·s。

双组份环氧树脂,E-51型,主剂为CYD-128型环氧树脂,环氧当量184.3 g·eq⁻¹,粘度为12380 mpa·s,外观无机械杂质且透明。固化剂采用593#环氧合物与脂肪胺反应合成的低粘度固化剂,为浅黄色或无色透明液体,是一种低毒、低挥发性常温环氧树脂固化剂。配置质量比例为主剂:固化剂=4:1。

螺纹钢选用直径M8、M12和M16螺纹钢,强度等级为4.8级,屈服强度(yield strength) $f_y=320$ MPa,抗拉强度(tensile strength) $f_u=400$ MPa。

1.2 样品制备

1.2.1 胶合竹梁制备 将竹条浸入酚醛树脂中浸渍2 h后取出晾干。晾干后的竹条进入拼板机进行拼接,组坯时将竹条侧立、浸胶竹条与未浸胶竹条交替放置,端头对齐侧面拼接。板材成型后即胶合竹层板,经截断、表面刨光处理后备用,胶合竹层板尺寸为1800 mm×110 mm×15 mm。刨光的胶合竹层板单面涂覆单组份聚氨酯后进行层积组坯,树脂固化后即胶合竹梁(图1),经四面刨光后加工成尺寸为1800 mm×110 mm×110 mm植筋基材。

1.2.2 胶合竹双端顺纹植筋抗拉试件制备 采用台锯将胶合竹梁按试件长度进行截断,制成植筋基材;

再经打孔、注胶、植筋制成双端拉伸试件,其中 d_a 测试端打孔直径, D_s 为支撑端打孔直径, d 为测试端螺纹杆直径, D 为支撑端螺纹杆直径。 L_a 和 L_s 分别是测试端和支撑端植入深度。其中 $D=1.5d$, $L_s=1.2L_a$, $L_m=1.4L_a$ 。两端钢筋露出80 mm,便于测试时夹持。

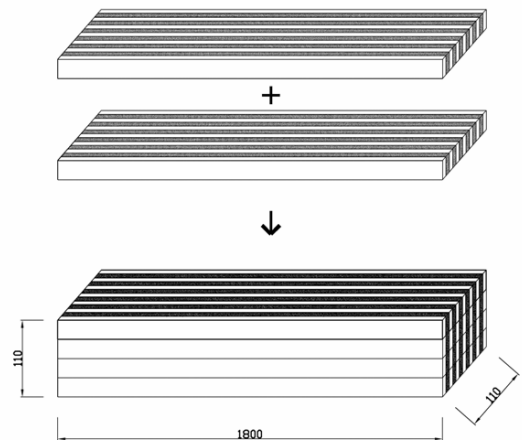


图1 竹层板及胶合竹梁加工图

Figure 1 Schematic diagram of laminated bamboo and glulam beam

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计及测试方法 植入深度和螺纹钢直径是胶合植筋的重要参数,2个参数结合,定义的影响因素为长细比 λ ,即植入深度与植筋杆直径之比,因此 λ 成为胶合植筋抗拔强度的主要影响因子。采用双端植筋拉伸的方式进行测试,试件如图2,胶黏剂为双组份环氧树脂,本试验胶层厚度选择2 mm,即打孔直径较螺纹钢大4 mm。为保证足够的边距,不产生基材的开裂,采用边距均大于2.5d,即植筋胶合竹基材截面尺寸为110 mm×110 mm。



图2 双端植筋拉伸试件

Figure 2 Schematic diagram of sample and the key parameters

对样品进行测试^[8],测试设备为美国MTS系统公司的MTS 810万能力学试验机,加载速度为1 mm·min⁻¹。记录峰值载荷。位移传感器精度0.001 mm、载荷传感器精度0.001 N。

1.3.2 数据处理 胶合竹顺纹双端植筋性能指标为名义剪切强度 τ ,表征胶合竹-胶黏剂-螺纹钢之间界面性能,计算公式如下:

$$\tau = F/S$$

$$S = h \times \pi \times d_a$$

其中, F 为峰值载荷, S 为胶合面积, h 为植筋深度, d_a 为植筋孔直径。

2 结果与分析

2.1 胶合竹植筋工艺研究

图 3a 为实验测试结果, 图 3b 为相对应的 2 种破坏情况, 包括螺纹杆破坏、胶层破坏即螺纹杆拔出, 螺纹杆的直径 d 、长细比 λ 为抗拔强度决定因素。

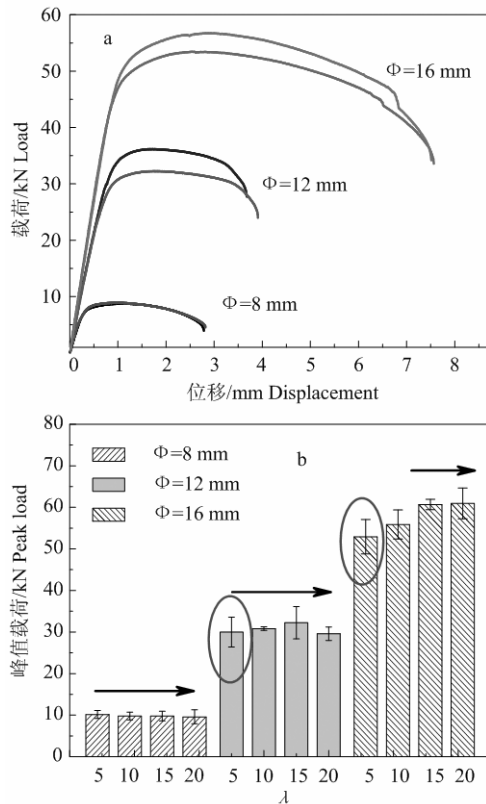


图 3 胶合竹顺纹双端植筋抗拔实验测试结果

Figure 3 Gluing bamboo along the grain planting bar double side pull-out test results

胶合植筋样品破坏应为螺纹杆屈服断裂, 钢筋的选择必须满足建筑力学的要求, 图 3-b 的统计结果表明, 当 $\lambda=5$ 时, $\Phi=8$ 及 $\Phi=12$ mm 的 2 种试件破坏模式均出现了螺纹杆的屈服断裂, $\Phi=16$ mm 试件破坏模式为螺纹杆拔出破坏, 当 $\lambda=10$ 时, 3 种试件破坏模式均为螺纹杆的屈服断裂。因此在 $\lambda \geq 10$ 时, 植筋连接强度表现为植筋杆屈服强度相当且极为稳定, 连接强度的设计可以充分发挥植筋杆性能稳定, 强度可预测的特点^[9], 所以当单根螺纹杆顺纹植筋用于建筑构件连接时, 需满足 $\lambda \geq 10$ 条件以保证胶合植筋部位稳定, 其结构连接强度设计值应低于螺纹杆的屈服强度值。

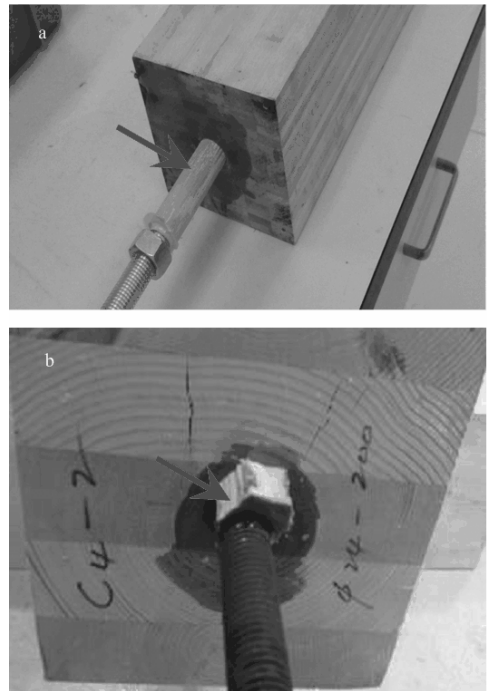


图 4 竹基材料 (a) 与木基材料 (b) 胶合植筋拔出的破坏模式对比

Figure 4 The typical surface morphology of threaded rods pull out from bamboo plywood (a) and glulam (b)

当 $\lambda=5$ 时, $\Phi=12$ mm 的样品中出现 2 个样品为钢筋的拔出, 相对应的 6 个为螺纹杆屈服破坏, 极限强度约等于螺纹杆屈服强度, 表明此时载荷是胶合界面破坏的强度, 也是一个临界值, 对于 $\Phi=12$ mm 的样品, $\lambda > 5$ 即可保证植筋强度的稳定。

当 $\lambda=5$ 时, $\Phi=16$ mm 的试件 8 组均为钢筋的拔出, 而当 $\lambda=10$ 时, $\Phi=16$ mm 的试件 8 组均为钢筋的屈服, 表明此直径钢筋的临界值在 $5 < \lambda < 10$ 之间, 具体数据还需进一步实验确定。

由此也可以得出, 胶合竹顺纹植入单根螺纹杆时, 为保证植筋强度的稳定, 随着螺纹杆直径的增加, λ 值会随之增加, 且 λ 与螺纹杆直径之间必存在一定的相关关系, 具体数据需进一步的研究。

λ 低于临界值时不宜作为植筋参数, 但却为我们研究胶合植筋的机理及界面性能提供一个途径。

2.2 胶合竹植筋的机理研究

胶合植筋连接部位复杂, 为钢筋-胶层-基材三相复合界面, 其中胶层与螺纹杆的界面依靠钢筋表面的螺纹增强结合, 胶层与基材之间则是依靠胶向基材内部的渗透形成的胶合界面, 对于胶合竹植筋破坏, 破坏界面为胶层-基材界面破坏, 胶层-螺纹杆的界面则非常稳固, 对于胶合竹植筋来说, 胶层-基材界面强度决定了试件名义剪切强度。这可能与竹材的横向渗透性很差有关。改善方法为提高植筋

孔内壁的粗糙度或渗透性。

拔出样品中,测试端螺纹杆直径分别为12 mm和16 mm的2种试件,植筋孔壁胶合面积分别为0.003和0.005 m²,破坏载荷分别为29.82 kN和52.93 kN,但名义界面剪切强度却非常相近,分别为9.94和10.54,差异小于6%;这表明在相同长细比条件下,随着螺纹杆直径和植筋胶合面积的增大,破坏载荷相应增大,但二者名义界面剪切强度相近,这可能是剪切应力沿植筋杆表面分布不均匀造成,与Broughton^[10]和Rossignon^[11]等人研究结论相接近。

为进一步理解胶合竹胶合植筋的机理,以及胶层-基材界面破坏形态,因此我们对比了不同基材植筋拔出测试的结果。

2.3 竹基材料与木基材料胶合植筋拔出破坏的差异性研究

由图4可见,竹基材料与木基材料胶合植筋拔出的破坏模式对比,其区别在于木基材料的破坏表现为圆锥状几何形态,破坏位置为基体,因此,对于木基材料胶合植筋来说,基体的强度决定了植筋的性能。

胶合竹植筋抗拔实验中,直径12 mm和16 mm 2种螺纹杆在 $\lambda=5$ 时,其竹材与胶黏剂界面名义剪切强度分别为9.94和10.54 MPa,均高于SPF(Spruce-Pine-Fir),马尾松与胶黏剂界面名义剪切强度;同时,胶合竹植筋抗拔实验中,随着螺杆直径和植入深度的增加,竹材与胶黏剂界面名义剪切强度有增大趋势,而SPF/马尾松则相反。螺杆直径和植入深度的增加导致竹材与胶黏剂界面接触面积增大,这可能有利于胶合界面强度提升,竹材抗拉强度优于木材的优势得到发挥。竹材顺纹抗拉强度介于187.03到276.57 MPa之间,均高于SPF和马尾松顺纹抗拉强度。由此可以得出:木基材料胶合植筋的名义剪切强度要大于测试值,无提升空间;竹基材料胶合植筋的名义剪切强度接近于测试值,尚有提升空间。

竹基材料与木基材料产生差异的原因主要可能是基体材料的渗透性差异,以及螺纹杆拔出形态的差异。基体材料的渗透性差异,是由于竹材纤维细胞纹孔较木材纤维细胞纹孔小,同时,竹材中缺少木射线等横向组织,竹材径向渗透性能较木材弱,胶黏剂渗透深度相对木材较小,竹材与酚醛树脂的胶合界面中酚醛树脂的平均渗透深度为8.45 μm ,而辐射松胶合木胶黏剂透深度达到100 μm 左右。

螺纹杆拔出形态的差异也是导致螺杆受力不能很好的传递到竹材内部的原因之一。上述2种原因可能导致胶黏剂与竹材胶合界面强度低于胶黏剂与木材胶合界面的强度,在拉伸载荷下胶黏剂与竹材胶合界面提前破坏。

3 结论

胶合竹双端顺纹双端植筋的破坏模式主要为植筋杆的拔出破坏和螺纹杆的韧性断裂破坏,其中植筋杆的拔出破坏位于胶合竹/胶黏剂界面。

胶合竹双端顺纹双端植筋的破坏载荷及名义剪切强度随螺纹杆直径和植入深度增加而增大。

胶合竹基材较胶合木基材渗透性差,植筋杆受力不能很好的传递到竹材内部,是影响抗拔载荷主要因素之一,采用一定措施以提高胶合竹基材与胶黏剂界面的粘结强度需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 江泽慧. 世界竹藤[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 2-7.
- [2] 张步荣, 刘祖华. 原竹建筑竹木套接-木木榫卯节点连接方式研究[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2013, 31(4): 490-495.
- [3] Pedersen M U, Clorios C O, Damkilde L. Strength of glued-in bolts after full scale loading[J]. J Perform Construction Facil, 1999, 13: 107-113.
- [4] Wiktor R. Glulam connections using epoxy glued-in rebar. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of applied science [D]. Columbia: The University of British, 1994.
- [5] Madhoushi M, Ansell M P. Behaviour of timber connections using glued-in GFRP rods under fatigue loading Part II: Moment-resisting connections[J]. Composites Part B, 2008(39): 249-257.
- [6] Turkowskij S. Prefabricated joints of timber structure on inclined glued-in bars[C]//Proceedings of the international timber engineering conference. Trada, London, UK, 1991: 212-217.
- [7] 聂玉静. 胶合木植筋抗拔性能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012: 3-15.
- [8] ASTM D1761-88. Standard test methods for mechanical fasteners in wood[S].
- [9] 张秀标. 胶合竹植筋断裂机理及分析[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014: 67-68.
- [10] Broughton J G, Hutchinson A R. Effect of timber moisture content on bonded-in rods [J]. Construction and Building Materials, 2001(15): 17-25.
- [11] Rossignon A B, Espion B. Experimental assessment of the pull-out strength of single rods bonded in glulam parallel to the grain [J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 2008, 66: 419-432.