



Open Access

引用格式: 黄鹤强, 单波, 秦培成, 等. 胶合竹-GFRP 植筋黏结锚固性能试验研究 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2026, 44(1): 76-86.

Citation: HUANG Heqiang, SHAN Bo, QIN Peicheng, et al. Experimental research on the bonding and anchorage performance of glued-in GFRP rod in glubam[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(1): 76-86.

胶合竹-GFRP 植筋黏结锚固性能试验研究

黄鹤强¹, 单波¹✉, 秦培成¹, 李天宇¹, 张宗富², 代上棋³

(1. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228; 2. 海南建设工程股份有限公司, 海南 海口 570203;
3. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对纤维复材筋在工程竹结构植筋连接中应用性能与设计方法研究基本处于空白, 本研究通过对 60 个胶合竹-GFRP 植筋试件进行对拉试验。研究了玻璃纤维复材筋的锚固长度、直径和锚固长径比对黏结锚固的影响, 试验结果表明: 胶合竹-GFRP 植筋试件的破坏均发生在胶合竹-胶层界面附近, 其中, 27% 的胶合竹-GFRP 植筋试件表现为胶层粘接失效, 70% 的胶合竹-GFRP 植筋试件表现为胶合竹剪切破坏, 3% 的胶合竹-GFRP 植筋试件表现为胶合竹的劈裂失效; 植筋连接的黏结强度主要由 GFRP 筋的锚固长度或锚固长径比控制, 且两者呈负相关; 植筋连接的轴向刚度受 GFRP 筋直径的影响大, 且两者呈正相关。最后基于单参数回归分析, 本研究提出了胶合竹-GFRP 植筋的强度模型和轴向刚度模型, 模型预测结果与试验结果吻合较好。

关键词: 植筋; 玻璃纤维复材; 胶合竹; 锚固强度; 锚固长径比

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1004-1729(2026)01-0076-11

DOI: 10.65658/j.hndk.2025041101

CSTR: 32403.14.hndk.2025041101

Experimental research on the bonding and anchorage performance of glued-in GFRP rod in glubam

HUANG Heqiang¹, SHAN Bo¹✉, QIN Peicheng¹, LI Tianyu¹, ZHANG Zongfu², DAI Shangqi³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Hainan Construction Engineering Co., Ltd, Haikou 570203, China; 3. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Fiber reinforced polymer (FRP) rod is a reasonable alternative to steel rod used in glued-in rod engineered bamboo structures, mainly attributed to its significantly higher strength-to-weight ratio and excellent corrosion resistance. However, research in this field is limited. In this study, a total of 60 glued-laminated bamboo (glubam) specimens with glued-in single glass fiber reinforced polymer (GFRP) rod were subjected to axial pull-pull tension tests. The investigation focused on the effects of anchorage length, rod diameter, and bonding length-to-diameter ratio on the anchorage performance. Test results revealed that all specimens failed due to debonding at the glubam-adhesive interface. Approximately 27% of the specimens exhibited pure adhesive failure, while about 70% of specimens experienced a mixed failure mode involving both adhesive pull-out and shear failure in glubam, and 3% of specimens exhibited splitting failure of glubam. Furthermore, the bonding strength of the glued-in glubam joints is primarily governed by the anchorage length

Received: 2025-04-11; Revised: 2025-04-30; Accepted: 2025-05-05; Available online: 2025-10-09

✉ Corresponding author(s): SHAN Bo, E-mail: bshan@hainanu.edu.cn

or abonding length-diameter ratio of glued-in GFRP rods, corresponding to a negative correlation between them. In contrast, the axial stiffness of the glued-in glubam joints increases with increasing of the diameter of the GFRP rod. Based on the single-parameter correlation analysis, a strength model and an axial stiffness model were proposed for predicting the mechanical performance of glubam joints with glued-in GFRP rod, which also demonstrated good agreement with the experimental data.

Keywords: glued-in rod; glass fiber reinforced polymer (GFRP); glubam; anchorage strength; bonding length-diameter ratio

0 引言

近年来,随着建筑业向绿色低碳方向的转型升级,极大地推动了现代木结构在中国的发展^[1-2],但中国结构性木材基本依赖进口,这已成为制约中国木结构发展的资源性瓶颈^[3]。相比常用的针叶材,竹子具有更高的强度和较短的生长周期^[4-5],并且通过胶合重组技术制成的工程竹材突破天然竹材尺寸不规则和力学性能离散性大的缺陷,为实现“以竹代木”提供了可行的技术解决方案^[6-7]。

常见的工程竹材主要有胶合竹^[8]、竹集成材^[9]和重组竹^[10]。相比于竹集成材和重组竹,胶合竹的加工工艺较为简单,且材料利用效率高,因而在力学性能与成本之间表现出更好的均衡性^[11-13]。目前,胶合竹在现代竹结构工程中得到较为广泛的应用^[14-15]。竹构件之间的连接对竹结构的性能影响大,竹结构常用的连接方式主要有钉连接、螺栓连接及齿板连接等^[16]。相比于钢材和混凝土,竹材的弹性模量较低,其连接区域在受力过程中产生明显的局部挤压形变,导致节点刚度较低。因此,研发高刚度、高强度的连接方式,对于提升竹结构的性能有重要意义。

植筋连接被认为是实现木结构节点高刚度和高强度的连接形式,其植入的筋材通过胶黏剂以拉压的方式直接传递节点荷载,因而承载效率高,且外观美观、施工简便。目前,在木结构植筋连接方式得到了广泛应用^[17-18]。

近年来,一些研究者将植筋连接引入现代竹结构中,开展了相关试验研究,基本上都采用钢杆作为筋材。Li等^[19]采用对拉的方式测试了胶合竹-钢螺杆植筋节点的性能,并提出了承载力计算公式。Yan等^[20]测试了钢螺杆-竹集成材黏结锚固性能,提出钢螺杆植筋的锚固长细比不应小于10。He等^[21]和Luo等^[22]采用拉-压加载方式开展了钢筋-竹集成材和钢螺杆-重组竹试件的锚固抗拔试验,研究了筋材表面形状、锚固长度等对连接性能的影响。Zhang等^[23]也研究了植筋连接在竹展平集成材中应用。相比于钢杆,纤维复材(fiber reinforced polymer, FRP)筋轻质高强、耐腐蚀,与胶黏剂的化学兼容性也更好,被视为植筋连接中的理想筋材^[24]。目前,已有学者开始关注FRP筋-工程竹植筋连接,并选择碳纤维复材筋(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)开展了竹集成材植筋连接的初步试验^[25-26]。玻璃纤维增强聚合物(class fiber reinforced polymer, GFRP)也因性价比高、韧性好、普适性强,也适配常见的工程场景。

已有的研究均表明工程竹的植筋连接力学性能好,适用于现代竹结构,但研究亟待深入,特别是在植筋连接方面的研究基本处于空白。因此,本研究开展胶合竹-GFRP植筋节点的对拉试验,研究GFRP筋的锚固长度、直径和锚固长径比对植筋锚固性能的影响,并提出GFRP植筋连接的强度和轴向刚度计算方法,以期为胶合竹-GFRP植筋连接的设计提供依据。

1 试验设计

1.1 试验材料 胶合竹是将单向竹帘按正交方向叠铺、热压胶合而成的双向纤维板材,如图1所示,纵向与主纤维方向平行(即顺纹方向),而横向为次纤维方向(即横纹方向),分别对应于 x 轴和 y 轴方向。因此,胶合竹的力学性能与纵横向竹纤维比密切相关^[27]。本研究用的胶合竹板材为湖南产,长度为2 400 mm,宽度为1 200 mm,厚度为28 mm,纵横向纤维比约为4:1。参照《工程竹材: T/CECS 10138—2021》^[28]的相关规定,对胶合竹的基本性能进行测试,测试结果:顺纹抗压强度59.8 MPa,变异系数

8.6%。顺纹抗拉强度 83.3 MPa, 变异系数 9.3%。顺纹剪切强度 16.3 MPa, 变异系数 9.5%。横纹剪切强度 18.8 MPa, 变异系数 8.2%。弹性模量 9 400 MPa, 变异系数 13.6%。密度 $830 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 变异系数 5.2%。

3 种直径分别为 8、12 和 16 mm 的 GFRP 筋用作植筋筋材, 如图 2 所示。GFRP 筋的表面带肋, 在生产过程中采用尼龙绳的缠绕挤压而成, 可以提高其与胶黏剂的结合能力。参照《金属材料室温拉伸试验方法: GB/T 228—2002》^[29] 对 GFRP 筋进行拉伸试验, 测得 GFRP 筋的拉伸强度 f_t 、极限应变 ε_r 、弹性模量 E_r 及其对应的变异系数 COV , 如表 1 所示。

植筋胶黏剂为双组分改性环氧树脂。其中, 主剂为双酚 A, 固化剂为低分子量聚酰胺, 两者混合质量比为 100:40, 并添加质量掺量为 2% 的纳米二氧化硅粉来调节环氧树脂的黏度。依据《树脂浇铸体性能试验方法: GB/T 2567—2008》^[30] 的相关规定, 对环氧树脂进行测试, 测得其弹性模量为 3.0 GPa, 剪切强度为 25.8 MPa, 抗压强度为 85.1 MPa。

表 1 GFRP 筋力学性能

直径/mm	拉伸强度		极限应变		弹性模量	
	f_t/MPa	$COV/\%$	ε_r	$COV/\%$	E_r/GPa	$COV/\%$
8	1 226	8.2	0.024	11.2	56.2	5.2
12	984	8.7	0.019	12.6	58.1	6.6
16	846	9.9	0.015	11.8	57.7	8.9

1.2 试验设计 试验采用对拉方式进行测试。如图 3 所示, 试件的 2 端分别为测试端和锚固端, 在试验中, 为了防止锚固段先于测试端出现破坏, 锚固端的筋材直径和锚固长度均大于测试端, 具体为 $l_s = 1.4l_a$ 和 $d_s = d_r + 2 \text{ mm}$, 其中, l_s 和 d_s 分别表示锚固端的黏结长度和杆直径, l_a 和 d_r 表示测试端的黏结长度和杆直径。此外, 为减小测试杆与锚固杆端部之间受力不均匀的现象, 锚固端与测试端之间的间距 l_m 设为测试杆黏结长度的 1.2 倍 ($l_m = 1.2l_a$)^[31]。试件的截面设计为方形, 其边长为 a 。测试端和加载端的筋材均定位于截面中心, 如图 3 所示。为防止试件发生劈裂破坏, 按照欧洲规范 EC-5 的规定^[32], 试件的边距比 e/d_r 不小于 2.5, 其中 e 为边距 ($a/2$), 即筋材中心至试件截面边缘的距离。对于本试验, 考虑到胶合竹试件截面的最小边长为 56 mm (即为 2 层胶合竹的厚度), 故试件的 e/d_r 取为 3.5。所有试件的胶层厚度 t 均为 2 mm。因此, 测试端和锚固端的钻孔植筋分别为 $d_h = d_r + 4 \text{ mm}$ 和 $d_m = d_s + 4 \text{ mm}$ 。

各组试件的设计参数如表 2 所示。试验参数包括 GFRP 筋直径 d_r 、锚固长度 l_a 和锚固长径比 λ , 其中锚固长径比为锚固长度与钻孔直径之比 (l_a/d_h), 依次变化为 5、10、15 和 20。表 2 一共包

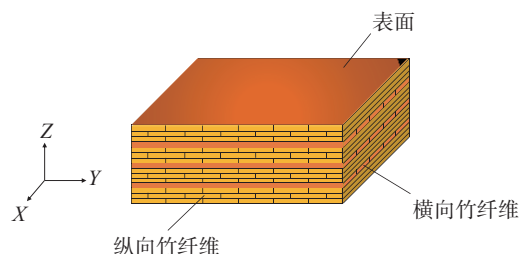


图 1 胶合竹板示意图

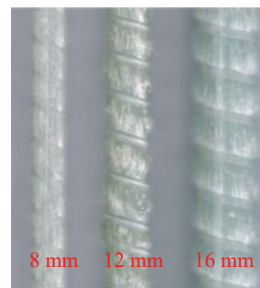


图 2 GFRP 筋

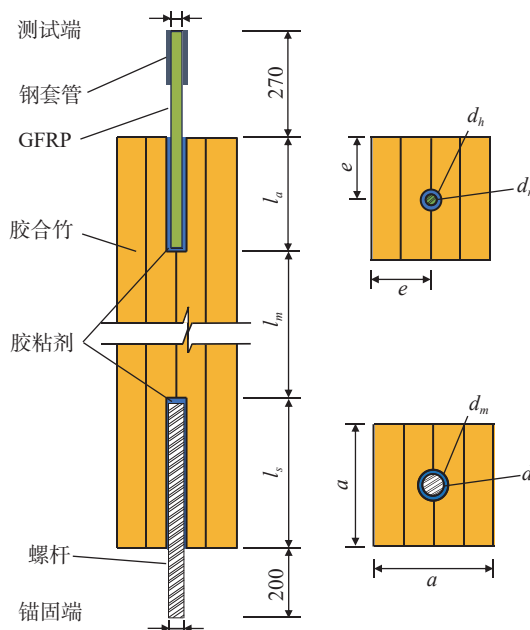


图 3 植筋连接示意图(单位:mm)

含了 12 组试验, 每组试验设置 5 个重复试件, 试件总数为 60 个。试件的命名由筋材直径与锚固长径比组合而成, 如 G8-5 表示该组试件的 GFRP 筋为 8 mm, 锚固长径比为 5。

表 2 试件设计参数

试件编号	l_a	d_h/mm	λ	t/mm	a/mm	d_r/mm	e/d_r	试件数目
G8-5	60	12	5	2	56	8	3.5	5
G8-10	120	12	10	2	56	8	3.5	5
G8-15	180	12	15	2	56	8	3.5	5
G8-20	240	12	20	2	56	8	3.5	5
G12-5	80	16	5	2	84	12	3.5	5
G12-10	160	16	10	2	84	12	3.5	5
G12-15	240	16	15	2	84	12	3.5	5
G12-20	320	16	20	2	84	12	3.5	5
G16-5	100	20	5	2	112	16	3.5	5
G16-10	200	20	10	2	112	16	3.5	5
G16-15	300	20	15	2	112	16	3.5	5
G16-20	400	20	20	2	112	16	3.5	5

1.3 试件制备 对拉试件的制作包括胶合竹方材压制与 GFRP 筋植入 2 个步骤: (1)将多层胶合竹板材采用胶黏剂冷压胶合成方材, 按照试件的设计尺寸进行切割, 分别在胶合竹的两端钻孔, 并用压缩空气清洁孔道。(2)注入约三分之一钻孔深度的胶黏剂, 缓慢插入并旋转 GFRP 筋, 试件在室内放置 10 d (平均温度约为 25 ℃, 湿度约为 60%), 以保证胶黏剂的充分固化。

1.4 测试方法与设备 对拉试验采用 600 kN 的万能试验机进行加载, 并采用位移控制模式, 加载速度为 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。试验过程中, 测试端的荷载由试验机自带的荷载传感器进行测量, GFRP 筋与胶合竹之间的相对滑移采用 2 个对称布置的位移传感器 (LVDT) 进行监控 (如图 4 所示), 荷载和相对滑移均采用数据采集系统自动记录。为防止试验机夹具损坏 GFRP 筋端部, 在筋材的夹持区域黏结钢套管 (如图 4b 所示)。

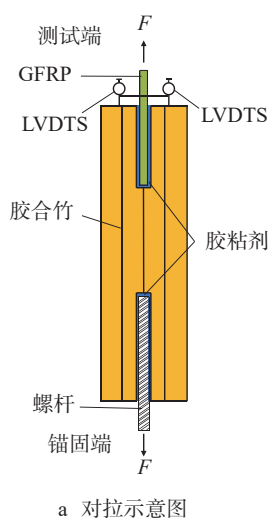


图 4 对拉试验

2 试验结果

2.1 破坏模式 胶合竹-GFRP 植筋试件的破坏模式几乎都表现为 GFRP 筋地拔出破坏, 拔出破坏又可细分为 3 种: 第一种为黏结失效 (破坏模式 A), 即胶合竹和胶黏剂的界面发生脱粘, 如图 5a 所示; 第二种为胶合竹的剪切破坏 (破坏模式 B), 即胶层表面附着大量的竹纤维, 如图 5b 所示; 第三种为劈裂失效 (破坏模式 C), 即胶合竹块以钻孔为中心, 产生径向劈裂, 破坏面出现在胶合竹内部, 如图 5c 所示。

各组试件的试验结果见表 3, 其中破坏模式前的数字表示发生此类破坏的试件数量。从表 3 中可以看到, 胶合竹-GFRP 植筋试件主要发生胶合竹的剪切失效, 达到了总试件数的 70%。总试件数的 27% 的试件发生了黏结失效, 此失效模式在竹集成材以及硬木的植筋连接试验中也较为常见, 这主要是由于工程竹和硬木的密度较高, 导致胶黏剂的渗透性相对较差, 从而影响了界面黏结力。此外, 3% 发生了胶合

竹的劈裂破坏,这可能是由加工误差引起的 GFRP 筋对中误差较大,使得试件出现明显的偏心受拉所导致的。

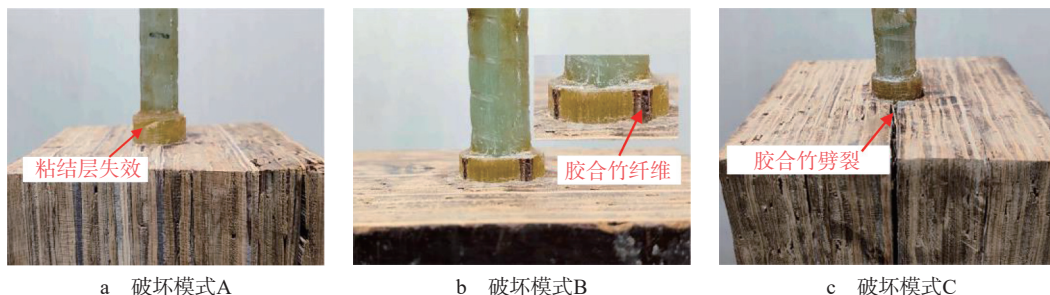


图5 3种破坏模式

表3 试验结果汇总

试件编号	极限荷载		极限滑移		轴向刚度		黏结强度 f_b /MPa	破坏模式
	F_u /kN	COV/%	s_u /mm	COV/%	K /(kN·mm ⁻¹)	COV/%		
G8-5	26.2	6.9	0.73	6.1	49.4	7.6	11.59	1A+4B
G8-10	35.4	8.5	1.28	5.4	47.2	6.3	7.83	2A+3B
G8-15	46.2	3.2	1.91	6.4	46.8	3.6	6.81	2A+3B
G8-20	55.2	3.2	2.95	7.7	46.4	4.7	6.10	5B
G12-5	45.9	8.6	0.79	9.8	87.4	2.2	11.42	3A+2B
G12-10	67.1	3.3	1.43	7.3	85.3	4.2	8.35	5B
G12-15	83.1	4.2	1.98	10.7	82.7	9.3	6.89	1A+3B+1C
G12-20	94.4	8.2	2.67	10.4	80.2	5.1	5.87	2A+3B
G16-5	66.8	9.2	0.83	7.3	126.8	8.0	10.64	1A+4B
G16-10	92.8	9.3	1.30	7.9	124.6	7.2	7.38	5B
G16-15	110.7	6.4	2.10	4.4	122.5	7.7	5.88	2A+3B
G16-20	140.6	7.1	3.12	11.7	118.5	10.3	5.60	2A+2B+1C

注: F_u 为极限荷载, s_u 为极限滑移, K 为轴向刚度, f_b 为黏结强度。

2.2 荷载-滑移曲线 3组典型试件的荷载-滑移曲线,如图6所示。从图6中可以看出,同组试件的荷载-滑移曲线发展趋势基本相同,离散性较小,而且不同破坏模式对胶合竹-GFRP植筋试件的锚固性能存在一定影响。以G16-20为例(如图6c所示),相比于破坏模式B,经计算可得破坏模式A的极限荷载和极限滑移分别降低了约10%和23%,这是因为胶合竹发生剪切破坏,其材料强度可以得到较为充分的利用,进而提高了GFRP筋的连接强度。相对而言,在破坏模式C中GFRP筋的锚固性能较差。因此,在实际工程中,筋材在胶合竹中的定位误差需要严格控制。

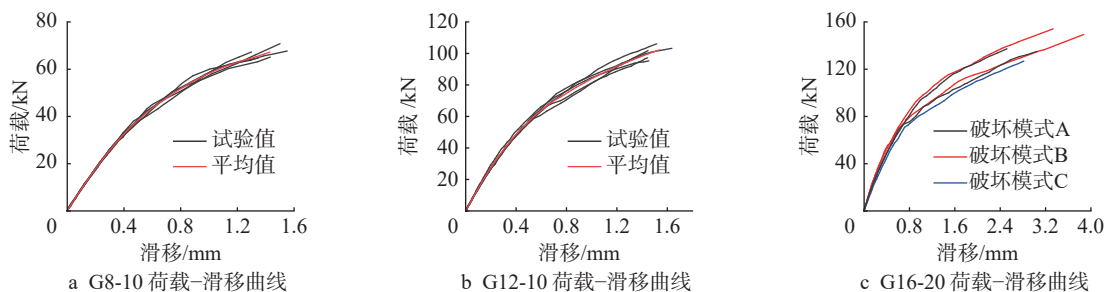


图6 典型的荷载-滑移曲线

各组试件的平均荷载-滑移曲线,如图7所示。从图7可以看到,增加GFRP筋的锚固长度和直径,

胶合竹-GFRP 植筋试件的极限荷载 F_u 和极限滑移 s_u 都得到显著提高, 这表明增大 GFRP 筋与胶合竹的黏结面积可以显著提升植筋锚固性能。需要说明的是, 由于 3 种破坏模式都具有突然性, 所以几乎所有试件都未能测得稳定的下降段, 胶合竹-GFRP 植筋连接表现出明显的脆性破坏特征。

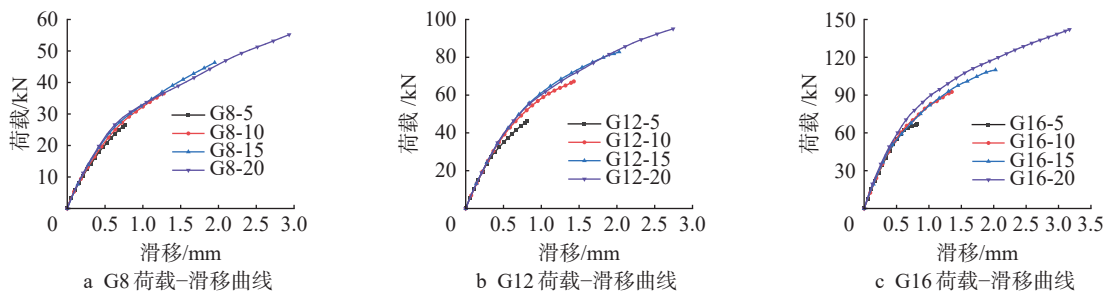


图 7 平均荷载-滑移曲线

3 分析与讨论

轴向刚度和黏结强度是植筋连接重要的力学指标。定义轴向刚度 K 为荷载-滑移曲线过 $0.4F_u$ 的割线刚度^[31]。考虑到胶合竹-GFRP 植筋试件均在竹材与胶层的界面附近发生拔出破坏, 因此选择破坏界面的平均黏结强度 f_v 作为强度指标,

$$f_v = \frac{F_u}{\pi d_h l_a} \quad (1)$$

其中, F_u 为极限荷载, d_h 为钻孔直径, l_a 为锚固长度。

3.1 锚固长度的影响 锚固长度 l_a 对黏结强度 f_v 和轴向刚度 K 的影响如图 8 所示。从图 8a 可以看出, 在 GFRP 筋直径 d_r 相同的情况下, f_v 均随 l_a 的增加而下降, 且其下降幅度率逐渐趋于平缓, 如对于 d_r 为 12 mm 的 GFRP 筋, 当 l_a 从 80 mm 依次增加到 160、240 和 320 mm 时, 经计算可得 f_v 下降幅度分别为 27%、40% 和 48%。一般而言, 胶层应力沿锚固长度的分布并不均匀, 这种不均匀性会随锚固长度的增加而愈发严重, 从而导致黏结强度随锚固长度增加而下降^[26]。从图 8b 可以看到, K 随 l_a 的增加而大致呈线性下降趋势, 这可能与黏结界面应力分布不均匀所导致的胶层连续破坏有关^[19], 但其下降的幅度并不大。以 d_r 为 12 mm 的 GFRP 筋为例, 当 l_a 从 80 mm 增加到 320 mm 时, 经计算可得 K 的下降幅度约为 8%。

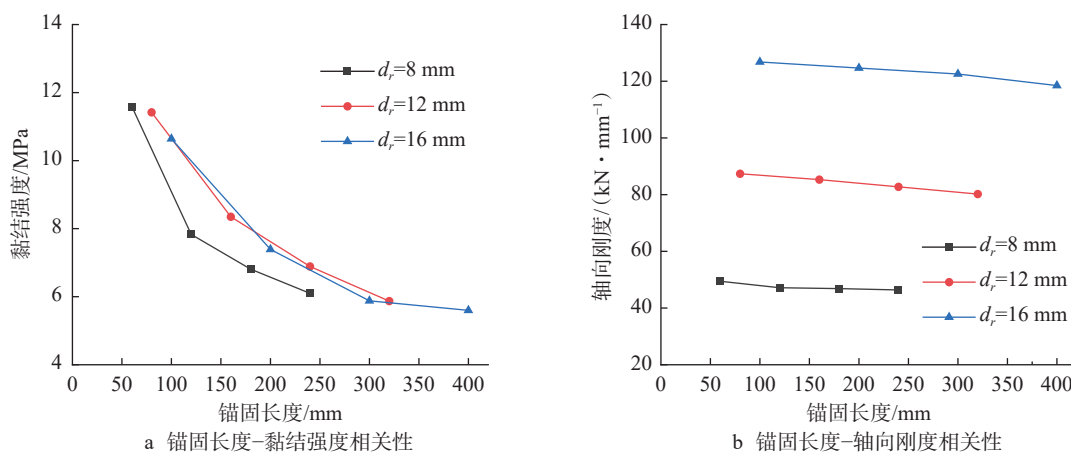


图 8 不同直径的 GFRP 筋锚固长度影响分析

3.2 GFRP 筋直径的影响 GFRP 筋直径 d_r 对 f_v 和 K 的影响, 如图 9 所示。在锚固长度接近的情况下, d_r 与 f_v 的相关性没有呈现出简单的递增或递减的关系 (如图 9a 所示), 但 K 随着 d_r 的增加而显著增大 (如图 9b 所示)。例如, d_r 从 8 mm 增加到 12 和 16 mm, 经计算可得 K 分别增加了 77% 和 159%。回归分析表明, 在试验范围内, K 和 $d_r^{1.35}$ 之间存在较好的一致性。

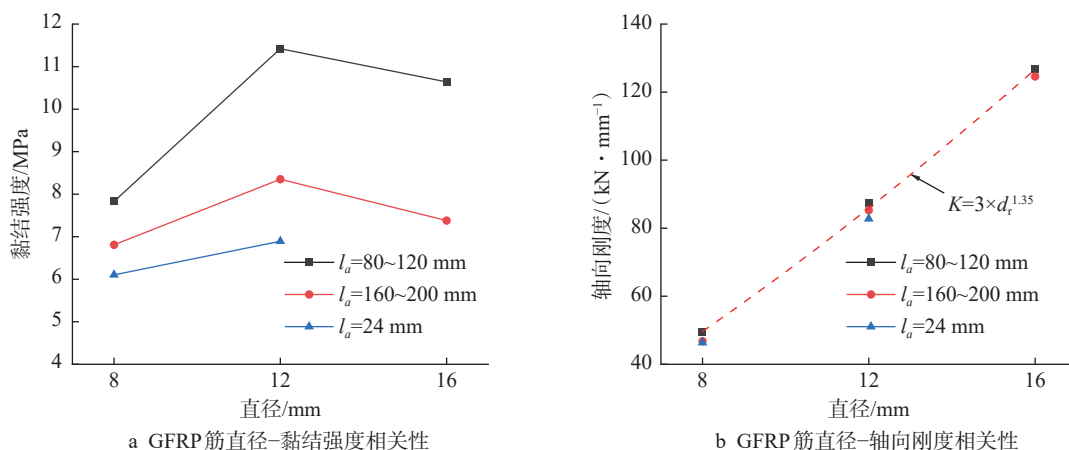


图9 GFRP 筋直径影响分析

3.3 锚固长径比的影响 在木结构植筋中, 广泛使用锚固长径比 $\lambda(l_a/d_h)$ 来综合考虑 l_a 、 d_r 和胶层厚度 t 的影响^[33]。 λ 与 f_v 和 K 之间的相关关系如图10所示。从图10可以看出, f_v 和 K 与 λ 之间均呈负相关, 且 λ 对 f_v 的影响要明显高于 λ 对 K 的影响。回归分析表明, f_v 和 K 与 λ 的相关关系可以采用幂函数来描述。通过对比图8和图10可以发现, 胶合竹-GFRP 植筋试件的黏结强度主要由 GFRP 筋的锚固长径比(或锚固长度)控制, 而其轴向刚度则主要由 GFRP 筋的直径(或钻孔直径)决定。

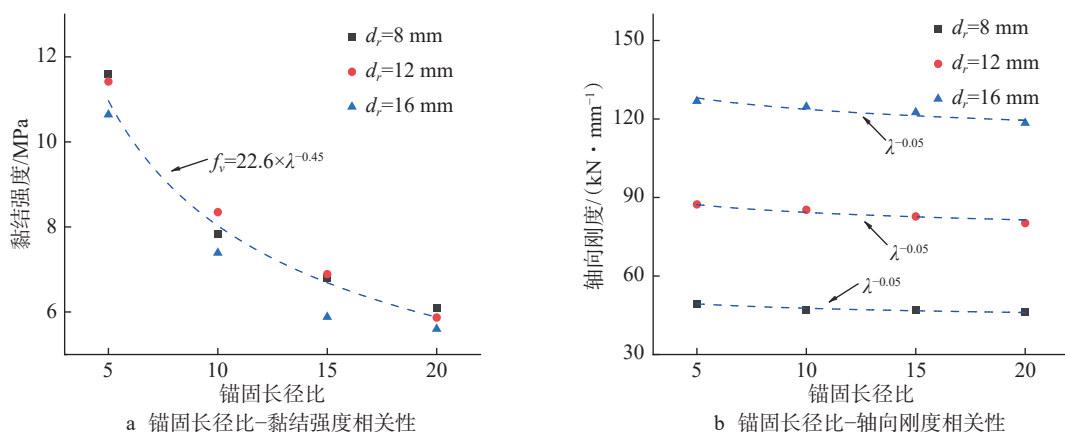


图10 锚固长径比影响分析

4 胶合竹-GFRP 植筋黏结剪切强度与轴向刚度预测

4.1 现有模型评估 现有木/竹结构植筋连接的相关研究已经给出了一些植筋黏结剪切强度的预测模型, 选取了3个常用的强度模型对本文试验结果进行预测, 具体包括 BS ENV: 1995-2 模型^[32]、Li 模型^[19]和 He 模型^[26]。其中, BS ENV: 1995-2 模型主要针对木结构-钢杆植筋连接, 使用较为广泛; Li 模型和 He 模型分别基于胶合竹-钢螺杆植筋连接和竹集成材-CFRP 筋植筋连接的试验数据而得出。

(1) BS ENV: 1995-2 模型:

$$f_v = 1.2 \times 10^{-3} \times d_{equ}^{-0.2} \rho_k^{1.5} \quad (2)$$

$$F_{u,v,k} = \pi d_{equ} l_b f_v \quad (3)$$

其中, d_{equ} 表示钢杆的等效直径, 取值为 $\min(d_h, 1.25d_r)$; ρ_k 表示木材密度。

(2) Li 模型:

$$F_u = f_v \pi d_h l_a \quad (4)$$

$$f_v = 7.9 \left(\frac{\lambda}{10} \right)^{-0.45} \left(\frac{e}{d_r} \right)^{0.1} t^{-0.08} \quad (5)$$

(3) He 模型:

$$F_u = f_v \pi d_{equ} l_a (0.15\theta^2 + 1), 0 \leq F_u \leq A_r f_y \quad (6)$$

$$f_y = 0.52 \times 10^{-3} \times d_{equ}^{-0.2} \rho^{1.5} \quad (7)$$

其中, θ 为 CFRP 筋与竹集成材顺纹方向的夹角; ρ 为竹集成材密度; 等效杆径 d_{equ} 取值为 $\min(d_h, 1.25d_r)$ 。

(4) 本研究提出的胶合竹-GFRP 植筋黏结剪切强度模型(简称“新模型”):

$$F_u = f_v \pi d_h l_a \quad (8)$$

$$f_v = 8.0 \left(\frac{\lambda}{10} \right)^{-0.45} \quad (9)$$

4 个模型对胶合竹-GFRP 植筋试件的极限承载力预测结果如图 11 所示。从图 11 可以看出, BS ENV: 1995-2 模型的计算结果明显高于试验值。Li 模型可以较好地预测 G8 和 G12 组试件的极限承载力, 但其明显高估了 G16 组试件的极限承载力。He 模型的预测结果也存在较大误差。新模型预测结果与试验结果吻合较好, 经计算误差均在 10% 以内。因此, 计算结果与试验结果比较, 新模型更符合试验结果。

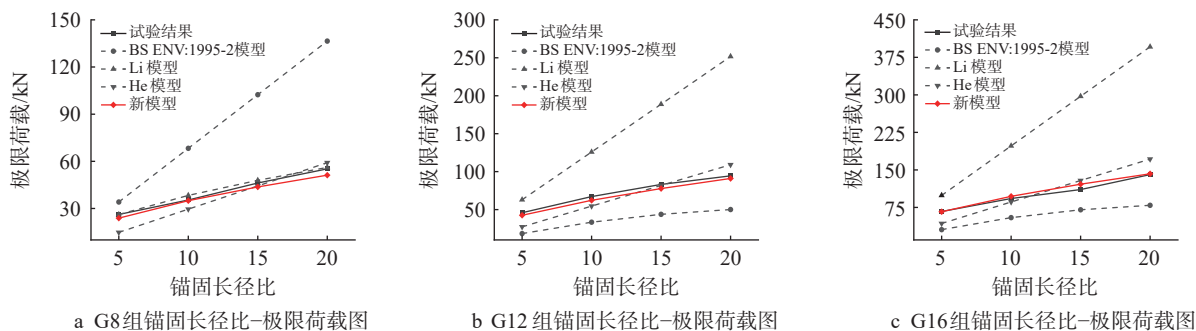


图 11 4 种模型计算结果与试验结果比较

4.2 胶合竹-GFRP 植筋轴向刚度模型 木/竹结构的节点一般为半刚性, 需通过节点转动刚度来表征, 转动刚度的计算是构件的挠度、内力分布以及结构的整体性分析的关键^[34]。对于植筋节点而言, 节点转动刚度与植筋连接的轴向刚度密切相关^[35], 但目前鲜有木/竹植筋连接的刚度计算方法。基于图 9b 和 10b 给出的 GFRP 筋直径和锚固长径比与轴向刚度的相关关系, 提出的胶合竹-GFRP 植筋连接轴向刚度预测模型:

$$K = 94.3 \lambda^{-0.05} \left(\frac{d_r}{12} \right)^{1.35} \quad (10)$$

由式 (12) 得到的轴向刚度预测模型计算结果与试验结果对比, 如图 12 所示。从图 12 可以看出, 在试验范围内, 预测结果与试验结果基本吻合, 预测误差均在 5% 以内。

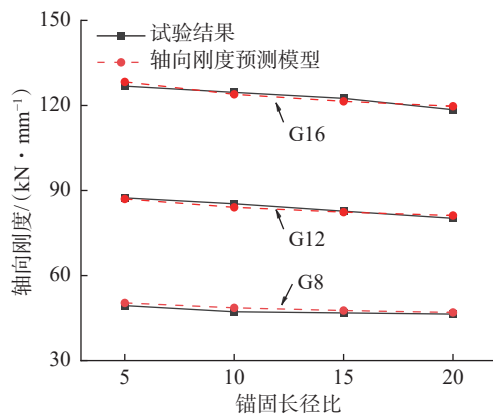


图 12 轴向刚度预测模型计算结果与试验结果对比

5 结 论

本试验对胶合竹-GFRP 植筋连接的锚固性能进行了对拉试验研究与分析, 获得的主要结论如下:

(1) 胶合竹-GFRP 植筋试件均在胶合竹-胶层界面附近发生破坏, 其中, 27% 的试件表现为胶层脱粘破坏(破坏模式 A), 70% 的试件发生胶合竹剪切破坏(破坏模式 B), 3% 的试件发生胶合竹劈裂失效(破

坏模式 C), 即破坏面附着大量的竹纤维。相比破坏模式 B, 破坏模式 A 对应的平均极限承载力和极限滑移分别降低 10% 和 23%, 这表明在发生剪切破坏时, 胶合竹提高了植筋的连接强度。

(2) 胶合竹-GFRP 植筋试件的荷载-相对滑移曲线呈现明显的脆性特征。胶合竹-GFRP 植筋试件的黏结强度和轴向刚度都随 GFRP 筋的锚固长度和锚固长径比的增加而降低, 而 GFRP 筋的直径对黏结强度的影响规律并不明显, 但增大筋材直径可以显著提升植筋连接的轴向刚度。因此, 植筋连接的黏结强度主要由 GFRP 筋的锚固长径比(或锚固长度)控制, 而轴向刚度主要由 GFRP 筋的直径(或钻孔直径)控制。

(3) 基于单参数回归分析, 提出了新的强度模型, 对比 3 个强度模型对本试验胶合竹-GFRP 植筋试件的极限承载力进行了预测, 结果表明现有模型的预测误差较大, 均不适用于胶合竹-GFRP 植筋试件, 新模型的预测结果与试验结果吻合较好。此外, 本试验也提出了胶合竹-GFRP 植筋连接的轴向刚度计算模型, 可用于竹结构植筋节点的转动刚度的计算与分析。

参考文献:

- [1] 熊海贝, 欧阳禄, 吴颖. 国外高层木结构研究综述 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 1297-1306.
XIONG H B, OUYANG L, WU Y. State-of-the-art research of tall wood buildings[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(9): 1297-1306.
- [2] 张欣怡, 李灵芝, 张磊, 等. 现代木结构建筑全生命周期碳足迹评价研究进展 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2024, 46(4): 387-396.
ZHANG X Y, LI L Z, ZHANG L, et al. Research progress on life cycle carbon footprint assessment of modern timber construction[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2024, 46(4): 387-396.
- [3] 刘伟庆, 杨会峰. 现代木结构研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 16-43.
LIU W Q, YANG H F. Research progress on modern timber structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 16-43.
- [4] MAHDAVI M, CLOUSTON P L, ARWADE S R. Development of laminated bamboo lumber: review of processing, performance, and economical considerations[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(7): 1036-1042.
- [5] 冯鹏飞, 李玉敏. 2021 年中国竹资源报告 [J]. 世界竹藤通讯, 2023, 21(2): 100-103.
FENG P F, LI Y M. China's bamboo resources in 2021[J]. World Bamboo and Rattan, 2023, 21(2): 100-103.
- [6] 肖岩, 李佳. 现代竹结构的研究现状和展望 [J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 1-6.
XIAO Y, LI J. The state of the art of modern bamboo structures[J]. Industrial Construction, 2015, 45(4): 1-6.
- [7] 肖岩, 杨瑞珍, 单波, 等. 结构用胶合竹力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(11): 150-157.
XIAO Y, YANG R Z, SHAN B, et al. Experimental research on mechanical properties of glulam[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(11): 150-157.
- [8] TANG Z, SHAN B, LI W G, et al. Structural behavior of glulam I-joists[J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 292-305.
- [9] TAN C, LI H T, WEI D D, et al. Mechanical performance of parallel bamboo strand lumber columns under axial compression: experimental and numerical investigation[J]. Construction and Building Materials, 2020, 231: 117168.
- [10] XIAO Y. Engineered Bamboo Structures[M]. London. CRC Press: 2022.
- [11] XIAO Y, YANG R Z, SHAN B. Production, environmental impact and mechanical properties of glulam[J]. Construction and Building Materials, 2013, 44: 765-773.
- [12] YANG R Z, XIAO Y, LAM F. Failure analysis of typical glulam with bidirectional fibers by off-axis tension tests[J]. Construction and Building Materials, 2014, 58: 9-15.
- [13] WANG R, WEI S Q, LI Z, et al. Performance of connection system used in lightweight glulam shear wall[J]. Construction and Building Materials, 2019, 206: 419-431.
- [14] 肖岩, 李智, 吴越, 等. 胶合竹结构的研究与工程应用进展 [J]. 建筑结构, 2018, 48(10): 84-88.
XIAO Y, LI Z, WU Y, et al. Research and engineering application progress of laminated bamboo structure[J]. Building Structure, 2018, 48(10): 84-88.
- [15] 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 Y, CHEN G, SHAN B, et al. Research and application of lightweight glue-laminated bamboo frame structure[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 195-203.

- [16] 冯立, 肖岩, 单波, 等. 胶合竹结构梁柱螺栓连接节点承载力试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 230–235.
FENG L, XIAO Y, SHAN B, et al. Experimental study on bearing capacity of glulam beam-column bolted joints[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4): 230–235.
- [17] 凌志彬, 陆帆, 杨会峰. 胶合木植筋节点抗拔性能理论预测 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 654–662.
LING Z B, LU F, YANG H F. Theoretical prediction of withdrawal behaviour of glue laminated timber joints with glued-in rod[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2021, 43(5): 654–662.
- [18] 凌志彬, 杨会峰, 刘伟庆, 等. 胶合木植筋黏结锚固性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(9): 132–141.
LING Z B, YANG H F, LIU W Q, et al. Experimental study on bond and anchorage behavior of glued-in rebar in glulam[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(9): 132–141.
- [19] LI T Y, SHAN B, XIAO Y, et al. Axially loaded single threaded rod glued in glulam joint[J]. Construction and Building Materials, 2020, 244: 118302.
- [20] YAN Y, LIU H R, ZHANG X B, et al. The effect of depth and diameter of glued-in rods on pull-out connection strength of bamboo glulam[J]. Journal of Wood Science, 2016, 62(1): 109–115.
- [21] HE Z W, XIAO Y. Experimental study on axial pull-out behavior of steel rebars glued-in glulam[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(3): 04020021.
- [22] LUO X Y, REN H Q, ZHONG Y. Experimental and theoretical study on bonding properties between steel bar and bamboo scrimber[J]. Journal of Renewable Materials, 2020, 8(7): 773–787.
- [23] ZHANG H, LI H T, XIONG Z H, et al. Experimental study and analysis of the bond-anchorage properties of laminated flattened-bamboo lumber connections with glued-in steel rod[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 185: 110580.
- [24] TOUMPANAKI E, RAMAGE M. Cyclic loading of glued-in FRP rods in timber: experimental and analytical study[J]. Journal of Composites for Construction, 2022, 26(2): 04021075.
- [25] TOUMPANAKI E, RAMAGE M H. Glued-in CFRP and GFRP rods in block laminated timber subjected to monotonic and cyclic loading[J]. Composite Structures, 2021, 272: 114201.
- [26] HE Z W, CHEN C Q, SHAN B, et al. Pull-out behavior of CFRP bars in glued-in glulam joints[J]. Journal of Composites for Construction, 2021, 25(4): 04021036.
- [27] LI Z, HE X Z, CAI Z M, et al. Mechanical properties of engineered bamboo boards for glulam structures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(5): 04021058.
- [28] 中国工程建设标准化协会. 工程竹材: T/CECS 10138—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
China Association for Engineering Construction Standardization. Engineered bamboo composite: T/CECS 10138—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料 室温拉伸试验方法: GB/T 228—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Metallic materials—Tensile testing at ambient temperature: GB/T 228—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 树脂浇铸体性能试验方法: GB/T 2567—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for properties of resin casting body: GB/T 2567—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [31] LING Z B, YANG H F, LIU W Q, et al. Local bond stress-slip relationships between glue laminated timber and epoxy bonded-in GFRP rod[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 1–12.
- [32] European Committee for Standardization CEN. Eurocode 5: design of timber structures: part 2: bridges: ENV 1995–2: 1997[S]. Brussels, Belgium, 1997.
- [33] TLUSTOCHOWICZ G, SERRANO E, STEIGER R. State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods[J]. Materials and Structures, 2011, 44(5): 997–1020.
- [34] NAVARATNAM S, THAMBOO J, PONNAMPALAM T, et al. Mechanical performance of glued-in rod glulam beam to column moment connection: an experimental study[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 50: 104131.
- [35] XU B H, BOUCHAÏR A, RACHER P. Analytical study and finite element modelling of timber connections with glued-in rods in bending[J]. Construction and Building Materials, 2012, 34: 337–345.

作者贡献声明

本声明旨在明确各作者对本论文的具体贡献,确保学术成果署名的规范性与公平性。各作者贡献如下:黄鹤强负责实验和仿真实施、数据采集与系统整理,主导数据统计分析、结果可视化及结论解读,撰写论文初稿,并完成内容的修订与语言润色。单波提出核心研究问题,设计整体实验方案及理论框架,参与数据统计分析及结果可视化工作。李天宇协助解读分析结论,对论文初稿内容提出关键修改意见。张宗富参与逻辑结构调整及细节完善。代上棋负责研究过程的学术指导与方向把握,对研究设计及结论推导提出指导性建议。秦培成提供实验所需核心设备及部分经费支持,协调关键数据资源,参与论文最终修订,给出系统性修改方案。

利益冲突声明

作者声明,不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文未使用人工智能(AI)协助撰写。

伦理声明

不适用:本文不涉及人类或动物研究。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 <https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025041101>。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件和/或电子补充材料中。如需获取与本文相关的其他数据,可向通信作者提出申请。

致谢 (Acknowledgements)

本文得到以下基金项目支持:国家自然科学基金项目(52268040);海南省重点研发计划项目(ZDYF2024GXIS295)。

This article is supported by the following fund projects: National Natural Science Foundation of China Project (52268040); Key Research and Development Program of Hainan Province (ZDYF2024GXIS295).

作者简介

黄鹤强(1998—),男,河南许昌人,海南大学材料与化工专业2022级硕士研究生, E-mail: xiaohu@hainanu.edu.cn

单波(1976—),男,湖南益阳人,海南大学教授,博士,研究方向:现代竹木结构、组合结构, E-mail: bshan@hainanu.edu.cn

(责任编辑:高喆,英文校对:张海滨)



This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.