

DOI: 10.7672/sgjs2026040146

慈竹基重组竹空心试件受压性能试验研究*

钟雪亭¹, 余弦^{1,2}

(1. 四川能投建工集团有限公司, 四川 成都 610021; 2. 重庆大学, 重庆 400044)

[摘要] 以慈竹基重组竹为原材,制备了分别采用101胶和PUR胶黏结的空心试件(共60根)和对比用实心试件10根,通过顺纹轴心抗压试验系统分析了结构形式与胶粘性能对其力学行为的相互作用机理。结果表明:所有试件的荷载-变形曲线均呈弹性、弹塑性、平台及下降四个阶段,但破坏模式存在明显差异。实心试件因内部剪切超限发生对角线或Y形剪切-劈裂复合破坏,而空心试件主要因胶层界面失效导致劈裂破坏。延性方面,实心试件延性系数最高(2.09),其次为PUR胶空心试件(1.42),101胶空心试件最低(1.03)。结构性能上,空心试件在减重11%的同时,轴向刚度提升超过8%(PUR胶8.34%、101胶8.03%),抗压强度平均值亦有显著提高(PUR胶提升18.12%,101胶5.84%),但考虑安全系数与离散性后,其设计值反而降低。研究表明:空心结构在轻量化和刚度优化方面具备优势,但胶层界面可靠性仍需提升;实心结构表现出更好的延性和破坏预警能力。

[关键词] 绿色建材;竹结构;重组竹;慈竹;破坏模式;力学性能

[中图分类号] TU531

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0146-06

Experimental Study on Compressive Performance of Recombinant Bamboo Hollow Specimens of *Neosinocalamus Affinis*

ZHONG Xueting¹, YU Xian^{1,2}

(1. Sichuan Energy Construction Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610021, China;

2. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Using *Neosinocalamus affinis*-based reconstituted bamboo as the raw material, hollow specimens (60 in total) bonded with 101 adhesive and PUR adhesive respectively, and 10 solid specimens for comparison were prepared. Through axial compression tests along the grain, the interaction mechanism between structural form and adhesive performance on their mechanical behavior was systematically analyzed. The results indicate that the load-deformation curves of all specimens exhibited four stages: elastic, elastoplastic, plateau, and descending, but their failure modes showed significant differences. Solid specimens failed due to diagonal or Y-shaped shear-splitting composite failure caused by internal shear overloading, while hollow specimens mainly failed due to splitting caused by adhesive layer interface failure. In terms of ductility, solid specimens had the highest ductility coefficient (2.09), followed by PUR adhesive hollow specimens (1.42), with 101 adhesive hollow specimens being the lowest (1.03). Regarding structural performance, while reducing weight by 11%, hollow specimens achieved an axial stiffness increase exceeding 8% (8.34% for PUR adhesive, 8.03% for 101 adhesive), and their average compressive strength also improved significantly (18.12% increase for PUR adhesive, 5.84% for 101 adhesive). However, considering safety factors and data dispersion, their design values decreased. The study shows that hollow structures offer advantages in lightweight design and stiffness optimization, but the reliability of the adhesive interface requires improvement; solid structures demonstrate better ductility and failure warning capability.

Keywords: green building materials; bamboo structures; recombination bamboo timber; omei mountain bamboo; failure mode; mechanical property

* 四川省科学技术厅重点研发项目(2023YFS0393);四川能投建工集团有限公司企业研发项目(2023510101002689,2023510101002690)

[作者简介] 钟雪亭,工程师,E-mail:zxt199268@foxmail.com

[收稿日期] 2025-09-05

0 引言

随着我国“双碳”战略对绿色建材的大力推广,重组竹作为可再生、低碳环保的材料,已在建筑建材领域的地板、墙板、栏杆等方面广泛应用,为可持续建筑和绿色设计提供了有效的替代方案^[1-2]。然而,在结构工程领域,重组竹的应用仍主要局限于乡村旅游、公园造型等^[3-4],这类建筑高度低、受力小、对建材强度要求不高。张苏俊等^[5]通过对4根由重组竹制作的方形截面柱的轴心受压进行试验研究,初步探明了方形截面重组竹柱在受压时的承载能力及破坏形态,结果表明其破坏是杆件丧失整体稳定性所致,并没有出现强度破坏,表明重组竹的抗压强度在工程结构应用中具有较高的安全余量。因此为进一步提高材料利用效率,探索重组竹空心构件的应用前景具有重要意义。

现有材料力学性能的研究主要集中于毛竹基重组竹原木的破坏机理^[6-9],探究不同因素对其力学性能的影响程度^[10-12],确定其强度设计值^[13-15],建立不同受力状态下的应力-应变本构模型^[16-19],鲜少有针对空心构件的探索。目前王骁睿^[20]对竹、木材料矩形截面及空心矩形截面构件的受压性能展开研究,得出了矩形截面和空心截面构件的轴心受压破坏模式基本一致,空心矩形截面构件的极限承载力远高于同截面的实心矩形截面构件,承载力最高可提升60%。苏相宇^[21]选取实心柱、空心柱和工字型柱3种截面形式,对不同高度的试件进行轴心受压试验,试验结果表明重组竹空心柱的破坏方式主要为重竹方料板材间的胶层破坏,空心截面柱的极限强度受制于结构胶黏结强度,不能充分发挥重组竹材本身抗压强度高的特点。另外还有肖忠平等^[22]对3种截面形式重组竹柱轴心受力性能进行试验研究,结果表明,重组竹空心的承载力与实心柱相差不大,可在实际工程中进行应用。但上述研究仅根据重组竹空心失稳破坏中的极限荷载和延性系数进行分析,未深入分析重组竹空心构件的基本力学性能。

空心试件通常由4块重组竹板材通过涂抹胶粘剂的形式进行黏结。为了深入研究不同胶粘剂对重组竹空心试件受力行为的影响,以慈竹基重组竹实心试件和采用2种胶粘剂黏结的空心试件为研究对象,开展了顺纹方向受压性能试验研究。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

本试验所用试件原材料为生长于四川省简阳市洪雅县的3~4年生慈竹,平均密度为 $1.18\text{g}/\text{cm}^3$,

含水率为9.4%。制作了60个空心试件(编号KX)和10个用于对比分析的实心试件(编号SX)。60个空心试件中,30个采用PUR胶黏结而成,30个采用101胶黏结而成。根据LY/T 3194—2020《结构用重组竹》,试件标准尺寸为 $20\text{mm}\times 20\text{mm}\times 30\text{mm}$,但是根据重组竹的实际生产情况,一次压制的最薄板厚为10mm,为将截面做成空心形式,空心试件的合理截面尺寸为 $30\text{mm}\times 30\text{mm}$,考虑长细比和受力特点尽量一致的原则,试件设计信息如表1所示,试件截面和实物如图1,2所示。

表1 试件设计

Table 1 Specimen design

组号	试件编号	数量/个	外廓尺寸/mm	用胶种类	平均质量/kg
1	SX	10	30×30×40	—	42.48
2	KX(101)	30	30×30×40	101胶	37.76
3	KX(PUR)	30	30×30×40	PUR胶	37.75

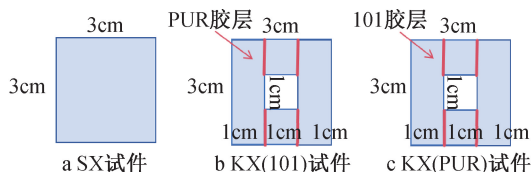


图1 试件制作横截面

Fig. 1 Cross-sectional of the specimen fabrication

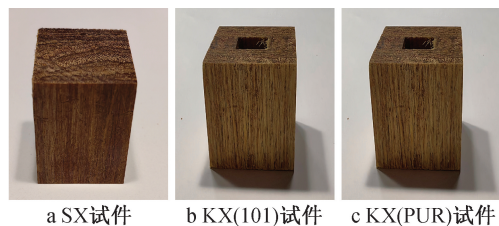


图2 试件制作

Fig. 2 Specimen preparation

1.2 试验加载

顺纹抗压强度按GB/T 1927.11—2022《无疵小试样木材物理力学性质试验方法》和《结构用重组竹》进行测试。本试验在西南交通大学土木工程国家级实验教学示范中心完成,试验设备为300kN的ETM 105D微机控制电子万能试验机,试验加载如图3所示,上下加载端均为球铰支座,以保证试件在加载过程中受到轴向压力。抗压强度试验过程均采用位移控制,加载速率为 $0.5\text{mm}/\text{min}$ 。

2 试验结果及其分析

2.1 破坏模式

实心试件和空心试件的主要破坏模式如图4,5所示。实心试件主要呈纯剪切破坏和Y形剪切-劈

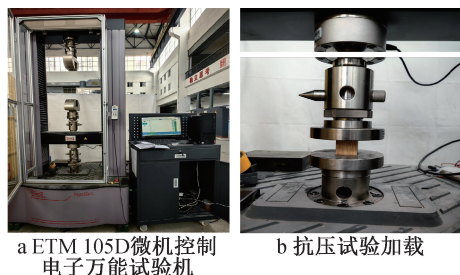


图 3 试验机及加载

Fig. 3 Test machine and loading

裂复合破坏模式,与肖纲要等^[23]、Zhao 等^[24]研究的破坏模式略有不同,这是由于试件尺寸不同引起的,表明慈竹基重组竹的破坏形式受试件尺寸影响。空心试件顺纹受压后均表现为两侧胶粘面劈裂破坏或一侧胶粘面劈裂破坏。

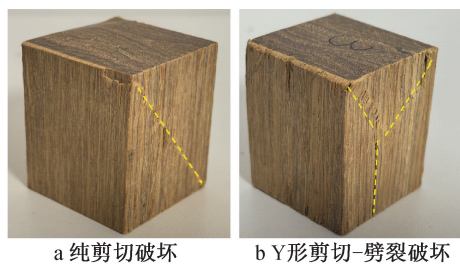


图 4 实心试件典型破坏模式

Fig. 4 Typical failure mode of solid specimens

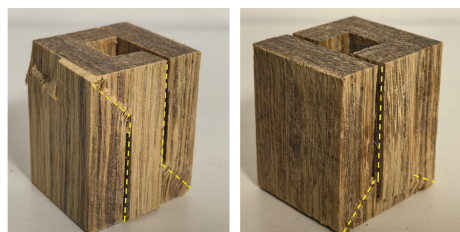


图 5 空心试件典型破坏模式

Fig. 5 Typical failure mode of hollow specimens

2.2 抗压性能

为了进一步对比分析慈竹基重组竹空心试件与实心试件的顺纹受压性能,本文仅保留各组试件中高度重合的荷载-位移曲线,并求出平均曲线,如图 6,7 所示。

由图 6,7 可知,3 种试件顺纹受压时均分为弹性段、弹塑性段、平台段及下降段,说明采用不同胶黏结的空心试件与实心试件在顺纹受压时,结构响应应具有相似的阶段特征和趋势。

2.3 力学性能参数

试件的主要力学性能参数如表 2 所示。

2.4 抗压强度标准值及设计值

我国暂时还没有关于慈竹基重组竹强度标准

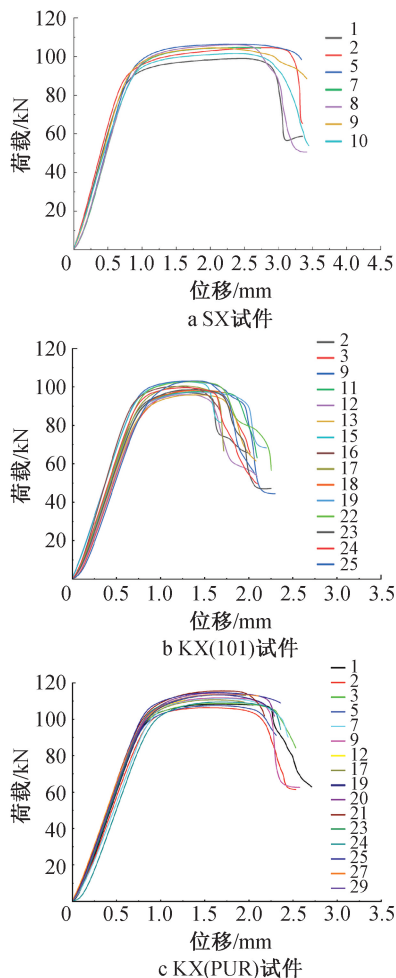


图 6 试件荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curve of test specimens

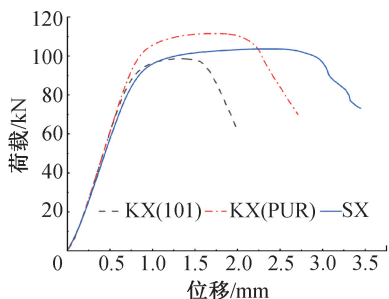


图 7 试件的平均荷载-位移曲线

Fig. 7 Average load-displacement curve of specimens

表 2 主要力学性能参数

Table 2 Main mechanical performance parameters

试件编号	抗压强度			延性系数	屈强比	轴向刚度/(kN·m ⁻¹)
	平均值/MPa	标准差/MPa	变异系数/%			
SX	117.35	3.32	2.83	2.09	1.03	12.71
KX(101)	124.20	3.20	2.57	1.03	0.91	13.73
KX(PUR)	138.61	6.62	4.78	1.42	1.20	13.77

值的计算公式,本文所用慈竹基重组竹力学性能与木材相似,故参考《木结构设计手册(第四版)》取分

布率为 0.05 分位值,进行慈竹基重组竹实心试件及空心试件的强度标准值计算:

$$f_k = \mu_f - 1.645\sigma_f \quad (1)$$

式中: μ_f 为重组竹抗压强度均值; σ_f 为重组竹抗压强度标准差。

抗压强度设计值的计算:

$$f = (K_p K_A K_Q f_k) / \gamma_R \quad (2)$$

其中:

$$K_Q = K_{Q1} K_{Q2} K_{Q3} K_{Q4} \quad (3)$$

$$K = K_p K_A K_Q / \gamma_R \quad (4)$$

式中: K 为修正系数; γ_R 为抗力分项系数,顺纹受压时 $\gamma_R = 1.45$; K_p 为方程精准性影响系数; K_A 为尺寸影响系数; K_Q 为材料强度折减系数; K_{Q1} 为天然缺陷影响系数; K_{Q2} 为干燥缺陷影响系数; K_{Q3} 为长期荷载对强度折减系数; K_{Q4} 为尺寸影响系数。

本文所用重组竹是基材为慈竹的复合环保竹纤维仿木材料,参考强度设计值基于木材设计方法确定,慈竹基重组竹空心试件与实心试件的顺纹抗压强度变异系数均比天然的竹材和木材小,故综合考虑各种因素的影响来修正慈竹基重组竹空心试件与实心试件的强度标准值,以确定慈竹基重组竹空心试件与实心试件的顺纹受压强度设计值。按照木材强度设计值的确定方法,对重组竹设计值的部分影响系数进行了调整(即乘以相应调整系数)。对于 K_{Q1} ,慈竹基重组竹实心试件经过了严格的选材和工业化生产,生物材料本身的缺陷得到了控制,故参考张秀华等^[15]分析,取 1.2 作为调整系数;但慈竹基重组竹空心试件的施工难度增加,黏结质量不易得到有效控制,故不对系数进行调整。对于其他折减系数,均参照张秀华等^[15]分析取值。材料的抗力分项系数 γ_R 取 1.45,慈竹基重组竹空心试件和实心试件强度折减系数及修正系数如表 3 所示。

根据慈竹基重组竹空心试件的试验结果及调整后的强度折减系数 K ,计算出慈竹基重组竹空心试件和实心试件的抗压强度设计值(见表 4)。

将慈竹基重组竹空心试件和实心试件的抗压强度设计值与竹楠木重组竹及几种复合木材进行对比^[14],SX,KX(101),KX(PUR),重组竹、格鲁班胶合竹、花旗松旋切板胶合木、花旗松平行木片胶

表 4 抗压强度标准值及设计值

Table 4 Standard values and design values for compressive strength

试样编号	MPa	
	抗压强度标准值	抗压强度设计值
SX	112.70	40.01
KX(101)	119.97	35.63
KX(PUR)	130.75	38.83

合木和层叠木片胶合木的顺纹抗压强度分别为 40.01, 35.63, 38.83, 22.8, 16.6, 13.8, 16.4 和 9.2MPa。慈竹基重组竹实心试件和空心试件的顺纹抗压强度设计值均高于其他材料。

3 力学性能分析

1) 破坏模式

受压时,内部产生对角线方向的最大剪切应力,当剪切应力超过材料本身的抗剪强度时,沿对角线发生剪切滑移,实心试件出现纯剪切破坏;初始剪切破坏后,实心试件内部应力重新分布,顺纹方向的拉伸应力超过木材的抗拉强度,导致沿纤维方向的劈裂,形成 Y 形复合破坏。空心试件均为胶粘面劈裂破坏,原因是:①胶层或界面薄弱,即胶粘剂(PUR 胶或 101 胶)的抗剪强度或界面结合强度低于木材基材的抗剪强度,导致应力集中在胶层或界面处;②空心结构应力集中,即空心试件受压时,荷载传递路径集中于胶粘面,局部产生剥离应力(横向拉应力),引发胶层与木材的分离。空心试件和实心试件破坏模式的关键因素对比如表 5 所示。

表 5 试件破坏模式关键因素对比

Table 5 Comparison of key factors influencing the failure mode of specimens

因素	实心试件	空心试件
破坏驱动力	材料内部剪切应力	胶层/界面剪切或剥离应力
薄弱环节	材料本身的抗剪强度	胶粘剂强度或界面结合强度
应力分布	均匀,最大剪切应力沿对角线	集中于胶粘面,局部玻璃应力显著
结构特点	连续均质材料	非连续空心结构,胶层为应力传递媒介

2) 延性方面

实心试件的延性系数三者最高(2.09),屈荷比三者居中(1.03),表明实心试件具有较好的延展性和韧性,在破坏前能够承受较大的塑性变形,适用

表 3 试件抗压强度折减系数

Table 3 Compression strength reduction factor of specimens

试件编号	K_p	K_A	$K_{Q1}(K'_{Q1})$	$K_{Q2}(K'_{Q2})$	K_{Q3}	K_{Q4}	$K(K')$
SX	1.00	0.96	0.80(0.67)	1.00(1.00)	0.67	1.00	0.355(0.297)
KX(101)	1.00	0.96	0.67	1.00(1.00)	0.67	1.00	0.297
KX(PUR)	1.00	0.96	0.67	1.00(1.00)	0.67	1.00	0.297

于需要高延展性和韧性的场景,如框架结构的梁柱节点、剪力墙等。PUR 胶黏结空心试件的延性系数三者居中(1.42),屈荷比三者最高(1.20),表明 PUR 胶黏结空心试件延性较好,但屈服后塑性变形能力较弱,适用于工程中需要吸收能量但对塑性变形要求不高的场景,如非承重墙体或隔墙、装饰性构件等。101 胶黏结空心试件的延性系数三者最小(1.03),屈荷比三者最小(0.91),表明其延性较差,但屈服后塑性变形能力较好,工程中适用于次梁、楼板、填充墙或临时支撑结构,能够满足一定的承载需求且对延展性要求不高。

3) 轴向刚度

采用 PUR 胶和 101 胶黏结的空心试件的轴向刚度相比实心试件分别提升 8.34%,8.03%,表明空心试件整体抵抗变形的能力比实心试件强,这是由于 PUR 胶和 101 胶与基材的界面黏结质量较好,能够有效传递荷载,减少界面滑移。采用不同胶黏结对空心试件轴向刚度影响不大。

4) 抗压强度

抗压强度平均值和标准值大小关系均为 KX (PUR) 试件>KX(101) 试件>SX 试件,而抗压强度设计值为 SX 试件>KX(PUR) 试件>KX(101) 试件。表明空心试件的抗压能力高于实心试件,PUR 胶黏结的空心试件的抗压强度平均值、标准值与实心试件相比分别提升 18.12%,16.02%。101 胶黏结的空心试件的抗压强度平均值、标准值与实心试件相比分别提升 5.84%,6.45%。但在实际工程设计中,考虑安全系数后,采用 PUR 胶和 101 胶黏结的空心试件的抗压强度设计值相比实心试件分别降低 2.95%,10.95%。另外,从标准差和变异系数的数据可以看出,PUR 胶黏结空心试件的抗压强度离散性最大,表明其性能一致性较差,可能受胶粘剂性能、界面黏结质量、制备工艺等因素的影响,在实际应用中需要严格控制胶粘剂性能、界面黏结质量和制备工艺,以提高其性能一致性。101 胶黏结空心试件的抗压强度离散性最小,表明其性能一致性较好,胶粘剂性能和制备工艺较为稳定。慈竹基重组竹空心试件和实心试件的强度设计值均高于格鲁班胶合竹等其他常用胶合竹材,为重组竹空心构件在工程结构中的应用提供一定的理论支撑。

4 结语

1) 空心与实心试件在顺纹受压时均呈现弹性、弹塑性、平台及下降阶段响应,验证了二者在受力阶段特征上的共性。

2) 实心试件因内部剪切应力超限,表现为对角

线剪切或 Y 形剪切-劈裂复合破坏;而空心试件因胶层界面强度不足,破坏模式为胶粘面劈裂失效,凸显胶粘性能对空心结构可靠性的关键制约。

3) 实心试件延性系数最高(2.09),适用于高延展性需求场景(如抗震结构构件);PUR 胶空心试件延性系数居中(1.42),适合能量吸收场景(如非承重墙体);101 胶空心试件延性系数最低(1.03)但塑性变形能力较好,适用于低延展性需求场景(如次梁、临时支撑)。

4) 空心试件相较于实心试件减重 11%,但抗压强度平均值显著高于实心试件,体现轻量化优势;但其设计值因安全系数与离散性限制低于实心试件,其中 PUR 胶试件变异系数最高(4.78%),需工艺优化以提升一致性。工程应用中需综合抗震、承载、轻量化需求选择结构形式,并通过胶粘剂改性与工艺控制平衡空心试件的性能优势与可靠性。

参考文献:

- [1] 彭聪聪,唐孝明,肖慧娟. 新型竹质材料在绿色建筑中的应用研究进展[J]. 城市建筑, 2025, 22(16):1-4.
PENG C C, TANG X M, XIAO H J. Research progress on the application of new bamboo materials in green buildings [J]. Urban architecture, 2025, (16):1-4.
- [2] 胡玉安,黄慧,贺磊,等. 建筑建材领域“以竹代塑”工程材料研究现状与发展趋势[J]. 林业工程学报, 2024, 9(6):1-11.
HU Y A, HUANG H, HE L, et al. Research status and development trends of “bamboo as substitute for plastic” in construction and building materials [J]. Journal of forestry engineering, 2024, 9(6):1-11.
- [3] 李霞镇,钟永,任海青. 现代竹结构建筑在我国的发展前景[J]. 木材加工机械, 2011(6):44-47.
LI X Z, ZHONG Y, REN H Q. Development prospect of modern bamboo construction in China [J]. Wood processing machinery, 2011(6):44-47.
- [4] 赵仕兴,周巧玲,齐锦秋,等. 重组竹结构的研究现状与工程应用[J]. 建筑结构, 2023, 53(7):109-117.
ZHAO S X, ZHOU Q L, QI J Q, et al. Research status and engineering application of bamboo scrimber structure [J]. Building structure, 2023, 53(7):109-117.
- [5] 张苏俊,赵志高,张文娟,等. 重组竹柱轴心受压试验研究[J]. 施工技术, 2015, 44(24):120-123.
ZHANG S J, ZHAO Z G, ZHANG W J, et al. Experimental research on axial compression of recombinant bamboo columns [J]. Construction technology, 2015, 44(24):120-123.
- [6] YU Y L, ZHU R X, WU B L, et al. Fabrication, material properties, and application of bamboo scrimber [J]. Wood science and technology, 2015, 49(1):83-98.
- [7] 李霞镇,钟永,任海青,等. 毛竹基重组竹力学性能研究[J]. 木材加工机械, 2016, 27(4):28-32.
LI X Z, ZHONG Y, REN H Q, et al. Study on mechanical properties of recombinant bamboo produced by moso bamboo [J].

- Wood processing machinery, 2016, 27(4): 28-32.
- [8] 李频. 重组竹的力学性能试验[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2018, 30(2): 53-57.
LI P. Experimental study on mechanical properties of bamboo scrimber[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (natural science edition), 2018, 30(2): 53-57.
- [9] ZOU Z H, WU J, ZHANG X M. Influence of moisture content on mechanical properties of bamboo scrimber [J]. Journal of materials in civil engineering, 2019, 31(7): 06019004.
- [10] KUMAR A, VLACH T, LAIBLOVA L, et al. Engineered bamboo scrimber; influence of density on the mechanical and water absorption properties [J]. Construction and building materials, 2016, 127: 815-827.
- [11] DU B C, HE Q, YANG D Y, et al. The influence of immersion order of low concentration ammonium polyphosphate on the interphase, mechanical and combustion properties of Moso bamboo scrimber[J]. Industrial crops and products, 2022, 180: 114664.
- [12] 王弘历, 曹学剑, 郑维, 等. 老化和饱和水处理对重组竹抗压性能的影响[J]. 林业工程学报, 2023, 8(3): 64-70.
WANG H L, CAO X J, ZHENG W, et al. Effects of aging and fiber-saturated treatments on compression behavior of bamboo scrimber[J]. Journal of forestry engineering, 2023, 8(3): 64-70.
- [13] 束必清, 张文娟, 陶玉鹏, 等. 重组竹力学性能及设计强度取值研究[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 216-222.
SHU B Q, ZHANG W J, TAO Y P, et al. Mechanical properties and strength design value of bamboo scrimber [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 216-222.
- [14] 苏光荣, 李贤军, 胡嘉裕, 等. 重组竹尺寸稳定性及力学特性[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(2): 159-168.
SU G R, LI X J, HU J Y, et al. Dimensional stability and mechanical properties of bamboo scrimber [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(2): 159-168.
- [15] 张秀华, 鄂婧, 李玉顺, 等. 重组竹抗压和抗弯力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(1): 7-12.
ZHANG X H, E J, LI Y S, et al. Experimental research on compression and flexural mechanical performance of recombinant bamboo [J]. Industrial construction, 2016, 46(1): 7-12.
- [16] HUANG D S, ZHOU A P, BIAN Y L. Experimental and analytical study on the nonlinear bending of parallel strand bamboo beams [J]. Construction and building materials, 2013, 44: 585-592.
- [17] 魏洋, 纪雪微, 端茂军, 等. 重组竹轴向应力-应变关系模型[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 572-579.
WEI Y, JI X W, DUAN M J, et al. Model for axial stress-strain relationship of bamboo scrimber [J]. Acta materiae compositae sinica, 2018, 35(3): 572-579.
- [18] GOONEWARDENA J, ASHRAF M, REINER J, et al. Constitutive material model for the compressive behaviour of engineered bamboo [J]. Buildings, 2022, 12(9): 1490.
- [19] 江凤娇, 邵文哲, 盛叶, 等. 重组竹剪切应力-应变关系及强度特征值提取[J]. 竹子学报, 2023, 42(2): 23-30.
JIANG F J, SHAO W Z, SHENG Y, et al. Shear stress of bamboo scrimber-strain relationship and extraction of strength characteristic values [J]. Journal of bamboo research, 2023, 42(2): 23-30.
- [20] 王骁睿. 竹、木构件受压性能及其极限承载力研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2020.
WANG X R. Study on the compression performance and load carrying capacity of bamboo/wood columns [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2020.
- [21] 苏相宇. 三种截面形式重组竹柱轴心受力性能试验研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
SU X Y. Axial behavior of bamboo scrimber columns with three different cross-sections [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.
- [22] 肖忠平, 李晨, 苏相宇. 不同截面形式重组竹柱轴心受压试验研究 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 231-235.
XIAO Z P, LI C, SU X Y. Experimental study on axial compression of glued laminated bamboo columns with different cross sections [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(5): 231-235.
- [23] 肖纲要, 李霞镇, 钟永. 结构用重组竹的顺纹抗压力学性能试验研究 [J]. 木材加工机械, 2019(3): 4-8.
XIAO G Y, LI X Z, ZHONG Y. Experimental study on the compressive properties parallel to grain of structural bamboo scrimber [J]. Wood processing machinery, 2019(3): 4-8.
- [24] ZHAO S X, ZHOU Q L, XIONG F, et al. Mechanical properties of bamboo scrimber made from sinocalamus affinis under monotonic axial compression; longitudinal, tangential and radial [J]. Construction and building materials, 2025, 460: 139899.

(上接第 91 页)

- LIU J. Application of shaft-drilling machine in construction of pumped storage power station [J]. Design of hydroelectric power station, 2023, 39(4): 66-69.
- [10] 张振光, 周洁, 徐杰, 等. 悬吊装配式竖井自动化掘进工法地层变形沉降实测及数值模拟分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(5): 1496-1510.
ZHANG Z G, ZHOU J, XU J, et al. Ground settlement measurement and numerical simulation analysis of vertical shaft machine [J]. Journal of basic science and engineering, 2024, 32(5): 1496-1510.
- [11] 余龙, 徐志兵, 管攀峰, 等. 超深、超大直径装配式竖井在软土地层中的应用 [J]. 隧道与轨道交通, 2024(1): 6-13, 80.
YU L, XU Z B, GUAN P F, et al. Application of ultra-deep and ultra-large diameter assembled shafts in soft ground [J]. Tunnel and rail transit, 2024(1): 6-13, 80.
- [12] 翟之阳, 聂东清, 张毅, 等. 下沉式竖井掘进工法在软土地区的应用研究 [J]. 地基处理, 2024, 6(2): 201-207.
ZHAI Z Y, NIE D Q, ZHANG Y, et al. Application of vertical shaft sinking method in soft soil area [J]. Journal of ground improvement, 2024, 6(2): 201-207.
- [13] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数数值方法及工程验证 [J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 833-845.
GU X Q, WU R T, LIANG F Y, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification [J]. Rock and soil mechanics, 2021, 42(3): 833-845.