

# 新型外包钢板-自攻螺钉连接胶合竹梁柱节点转动性能

冷予冰<sup>1</sup>, 陈溪<sup>1</sup>, 刘博<sup>2</sup>, 王明谦<sup>1</sup>, 宋晓冰<sup>2</sup>, 许清风<sup>1</sup>

(1. 上海市建筑科学研究院有限公司 上海市工程结构安全重点实验室, 上海 200032;

2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 针对胶合竹材不易预开槽和预开孔以及节点转动时竹材易发生横纹劈裂的问题, 研究了新型外包钢板-自攻螺钉连接节点的转动性能。对 T 形外包钢板-自攻螺钉连接节点和双 L 形外包钢板-自攻螺钉连接节点共 5 个试件进行了单调加载试验, 分析了节点的破坏模式、初始刚度、极限承载力、变形能力和延性系数。试验发现, T 形外包钢板-自攻螺钉连接节点相较双 L 形外包钢板-自攻螺钉连接节点, 各项受力性能参数均较优。布置直径小但数量多的自攻螺钉时, 节点(T8×8-M)的破坏表现为钢板和自攻螺钉的受拉断裂以及与胶合竹柱连接的自攻螺钉受拉断裂, 布置直径较大但数量少的自攻螺钉时, 节点(T6×10-M)的破坏则表现为竹材的横纹劈裂和自攻螺钉的剪切破坏。横纹方向采用自攻螺丝加强, 可改善节点的受力性能, 对 T 形外包钢板-自攻螺钉连接节点改善更明显。现行《工程竹结构设计标准》(T/CECS 1101—2022)提供的节点设计方法偏于安全地预测胶合竹自攻螺钉连接梁柱节点的抗弯承载力。

**关键词:** 胶合竹; 梁柱节点; 自攻螺钉连接; 外包钢板; 转动性能

中图分类号: TU366.3

文献标志码: A

## Rotational Behavior of Innovative Glued Laminated Bamboo Beam-to-Column Connections Using External Steel Plates and Self-Tapping Screws

LENG Yubing<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>2</sup>, WANG Mingqian<sup>1</sup>,  
SONG Xiaobing<sup>2</sup>, XU Qingfeng<sup>1</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to solve the difficulties of slotting and perforating of laminated bamboo, and the problem of bamboo splitting when the beam-to-column connections were rotated, the rotational behavior of innovative laminated bamboo beam-to-column connections using side steel plates and self-tapping screws were studied. Two types of connections were designed, and a monotonic loading test was conducted on 5 specimens, including T-shaped extended end plate connections with side plates that confine the beam and double L-shaped end bracket connection partially confining both the beam and column, to analyze the failure mode, initial stiffness, ultimate bearing capacity, deformation capacity, and ductility coefficient of the connections. The results of the test show that most mechanical parameters of T-connections are better than those of L-connections. The failure of the T-connection using more screws of smaller diameter (T8×8-M) is caused by tensile rupture of steel plates and self-tapping screws, while the failure of the T-connection using less screws of larger diameter (T6×10-M) is caused by bamboo splitting and shear failure of steel plates. The reinforcement of self-tapping screws transversely enhances the mechanical behavior of all connections, especially T-connections. The design code "Standard for design of engineered bamboo structures" (T/CECS 1101—2022) can conservatively predict the bending capacity of the laminate bamboo connections.

**Keywords:** laminated bamboo; beam-to-column connection; self-tapping screw connection; external steel plate; rotational behavior

收稿日期: 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(52378522); 上海市自然科学基金(23ZR1454300); 上海市青年科技启明星计划(23QB1404400)

第一作者: 冷予冰, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为木竹结构。E-mail: leng\_yb@163.com

通信作者: 许清风, 教授级高工, 工学博士, 主要研究方向为木竹结构和工程结构抗火。

E-mail: xuqingfeng73@163.com



论文  
拓展  
介绍

竹材是低碳可再生的生物质材料,具有可再生、易降解、强重比高、轻质抗震等优点,且导热系数小、保温隔热性能好、内部温湿环境舒适、装配化程度高、建造快等特点,是绿色建筑和装配式建筑的重要类型之一<sup>[1-2]</sup>。我国是世界上最主要的产竹国,竹的种类、竹林面积、蓄积和产量等均居世界首位,因此在我国推广工程竹结构具有天然优势和较大潜力。工信部联合住建部印发的《促进绿色建材生产和应用行动方案》(工信部联原[2015]309号)中指出在竹资源丰富地区大力发展竹制建材和竹结构建筑。国家发改委印发的《加快“以竹代塑”发展三年行动计划》(发改环资[2023]1375号)进一步提出鼓励竹建材的使用。由圆竹加工成的胶合竹结构符合绿色低碳和建筑工业化的行业发展需求,具有广阔的应用前景。

胶合竹又称竹集成材,是以定宽精刨竹片为构成单元,按顺纹组坯经热压胶合而成的板材或方材,成品具有材质均匀、性能稳定、强重比高、韧性好等优点,适合作为结构承重用材。与木材相比,胶合竹材的硬度更大,采用螺栓连接时预开螺栓孔的成本更高。利用自攻螺钉锁紧力强、操作简便的优点,研发胶合竹结构的高性能连接技术,能够减少构件的预开孔工作,显著提高胶合竹结构的装配化施工效率,降低生产成本,提升结构性能,进而对充分利用我国的竹材资源、推动我国绿色建筑的发展具有重要意义。

在胶合木结构节点中,自攻螺钉已用于对胶合木梁的横纹进行加强,从而改善木材横纹劈裂导致的脆性破坏模式。文献[3-5]通过不同形式的节点试验对比了有无自攻螺钉对节点受力性能的影响,研究表明,通过传递木构件的横纹拉应力和承受顺纹剪应力,自攻螺钉可以减轻或延缓木材开裂,从而保证节点在大变形或是大震下有继续承载的能力。

针对工程竹梁柱节点的受力性能,Leng等<sup>[6-7]</sup>分别针对胶合竹梁柱节点和重组竹梁柱节点进行了设计与试验,对比了内填钢板螺栓连接节点与外包钢板螺栓连接节点的转动性能,结果显示内填钢板与木材之间的滑移使得这类节点的刚度和承载力均明显低于外包钢板连接节点。Cui等<sup>[8]</sup>开展了胶合竹梁柱螺栓节点弯剪受力性能研究,量化了梁柱之间间隙、螺栓布置方式和碳纤维布缠绕加固方法对节点受力性能的影响。Chen等<sup>[9-11]</sup>开展了胶合竹钉连接节点顺纹受压性能的试验研究和理论分析,发现

节点的主要破坏模式为胶合竹的横纹劈裂破坏。除了足尺节点的受力性能试验外,研究者还开展了自攻螺钉与工程竹拉拔性能试验。Leng等<sup>[12]</sup>开展了自攻螺钉与胶合竹拉拔性能试验研究,发现自攻螺钉钻入胶合竹深度对其拉拔性能具有重要影响。Li等<sup>[13]</sup>开展了自攻螺钉与重组竹拉拔性能试验研究,确定了自攻螺钉受拉屈服时对应的自攻螺钉钻入深度。

在已有研究基础上,本文设计了2种新型外包钢板-自攻螺钉连接胶合竹梁柱节点,采用不预开槽和不预开孔的节点形式,通过5个试件的单调加载试验,研究了节点构造形式、自攻螺钉植入方式和布置等参数对节点转动性能的影响,分析了外包钢板-自攻螺钉连接胶合竹梁柱节点的破坏机理、初始刚度、抗弯承载力和变形能力。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

基于梁柱节点中剪力传递机制和竹材常见横纹劈裂的破坏模式,设计了2种梁柱节点形式,包括T形外包钢板-自攻螺钉连接节点和双L形外包钢板-自攻螺钉连接节点,节点构造如图1所示。在T形外包钢板-自攻螺钉连接节点中,T形外包钢板包括柱侧面的钢板和梁周围的U形钢板,柱侧面的钢板上设有加强肋,梁上U形钢板将梁2个侧面与梁底面包覆。双L形外包钢板-自攻螺钉连接节点由2个对称的L形外包钢组成,每个L形外包钢都包括了包覆柱半圈和包覆梁半圈的U形钢。由于梁和柱中不预开槽,2种节点中梁和柱的钢板均焊接为一体。安装时,T形外包钢板-自攻螺钉连接节点中,先将T形外包钢板通过植入自攻螺钉固定在柱上,后将梁放置在U形钢板中并用自攻螺钉固定;双L形外包钢板-自攻螺钉连接节点中,先将梁下侧的T形外包钢板通过植入自攻螺钉固定在柱上,将梁放置到U形钢中后,放置梁上侧的T形外包钢板,并将外包钢板用自攻螺钉分别于梁、柱固定。梁柱上均不需要预开螺栓孔。2种自攻螺钉连接梁柱节点构造如图1所示。

为研究螺钉直径、数量、布置方式以及是否有自攻螺钉在梁上进行横纹加强对节点性能的影响,T形外包钢板-自攻螺钉连接设计了3个节点试件,双L形外包钢板-自攻螺钉连接设计了2个节点试件。各试件的详细信息如表1所列。胶合竹梁截面尺寸

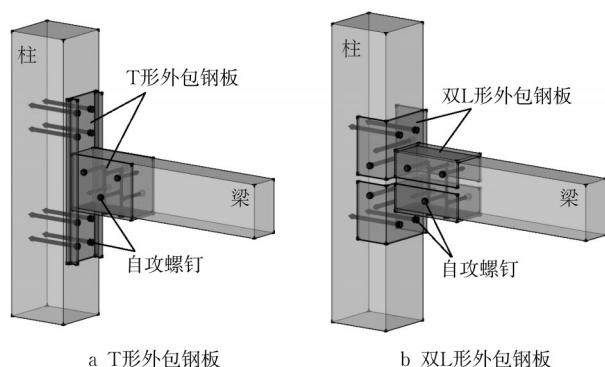


图1 2种自攻螺钉连接梁柱节点构造

Fig. 1 Configuration of two kinds of beam-to-column connections using self-tapping screws

为100 mm×170 mm,长度为700 mm;胶合竹柱截面尺寸为180 mm×200 mm,长度为900 mm,每个试件的详细尺寸详见图2。

## 1.2 试验材料

胶合竹由中国浙江产的毛竹制作而成,实测密度为580 kg·m<sup>-3</sup>,含水率为7.9%,顺纹抗压强度和弹性模量分别为56.6 MPa和8 950 MPa,抗弯强度和弹性模量分别为129.6 MPa和12 530 MPa,横纹抗拉强度和弹性模量分别为3.7 MPa和1 330 MPa。自攻螺钉选用Wurth公司生产的全螺纹和半螺纹自攻螺钉(ASSY plus VG),厂家提供的抗拉极限强度为490 MPa。

## 1.3 试验加载方案

为方便试件安装和加载,将梁柱节点试件旋转90°置于试验台上,在水平放置的柱上压置钢梁并通过地锚螺杆固定,以保证试验过程中柱不发生转动。胶合木柱两端放置固定的钢块以限制节点在加载过程中的水平移动。在梁的自由端上安装钢套箍并与电液伺服作动器的加载头相连,加载点中心到柱边的距离为600 mm。试验加载装置如图3所示。

参考ASTM E2126-11(Test method B)<sup>[14]</sup>,加载全过程采用位移控制。加载步骤为:①预加载,预加荷载为节点承载力预估值的10%,加载速率为5 mm·min<sup>-1</sup>,加载至设定的预加荷载后持荷2 min,

随后卸载;②正式加载,加载速率为5 mm·min<sup>-1</sup>,持续加载至试件产生明显破坏或荷载下降至最大荷载的80%,结束实验并卸载至初始位置。

## 1.4 量测方案

为建立节点的弯矩-转角关系,试验中需量测作动器水平荷载和若干测点的位移。梁自由端的水平荷载由电液伺服作动器内置传感器测得,位移由布置在不同位置的位移计测得,测点布置如图4所示。其中位移计W1和W2测量加载点处梁的水平位移,位移计W3测量梁中段的水平位移,位移计W4和W6测量钢板边缘处梁和钢板的水平位移,位移计W5和W7测量靠近柱一侧梁端的梁和钢板的水平位移,位移计W8测量柱的水平位移即试件整体平动。荷载、位移数据通过动态测试系统同步采集并传输至电脑。考虑到试验中主要量测胶合竹梁相对于胶合竹柱的转角,所以并未设置量测钢板的拔起和下陷的位移计。

# 2 试验结果与分析

## 2.1 试验现象和主要破坏模式

试件的典型破坏模式如图5所示。在加载初期,T形外包钢板-自攻螺钉连接节点中,柱上钢板均出现了翘起现象。梁端自攻螺钉的布置对节点的破坏模式有重要影响。梁端布置8根直径8 mm自攻螺钉的节点(T8×8-M),破坏主要表现为T形钢板的受拉断裂破坏,与胶合竹柱连接的自攻螺钉也出现受拉断裂破坏。梁端布置6根直径10 mm自攻螺钉的节点(T6×10-M),破坏则主要集中于胶合竹梁端,表现为竹材的横纹劈裂破坏和与梁连接的自攻螺钉的剪切破坏。胶合竹的横纹抗拉强度通常较低,结构胶的抗拉强度通常高于竹材抗拉强度,故而胶合竹中容易出现竹材的横纹劈裂破坏。在横纹方向进行加强后的节点(TS6×10-M)的破坏模式与节点(T8×8-M)类似,表现为T形钢板的受拉断裂破坏和与胶合竹柱连接的自攻螺钉受拉断裂破坏,未出现竹材的横纹劈裂破坏。

表1 各试件的详细信息

Tab. 1 Detailed information of each specimen

节点形式	试件编号	梁上自攻螺钉	构造参数
T形外包钢板—自攻螺钉连接节点	T8×8—M	φ8,每侧4个	8个自攻螺钉,间距70×50,横纹不加强
	T6×10—M	φ10,每侧3个	6个自攻螺钉,间距70×65,横纹不加强
	TS6×10—M	φ10,每侧3个	6个自攻螺钉,间距70×65,横纹加强2φ8
双L形外包钢板—自攻螺钉连接节点	L6×10—M	φ10,每侧3个	6个自攻螺钉,间距90×65,横纹不加强
	LS6×10—M	φ10,每侧3个	6个自攻螺钉,间距90×65,横纹加强2φ8



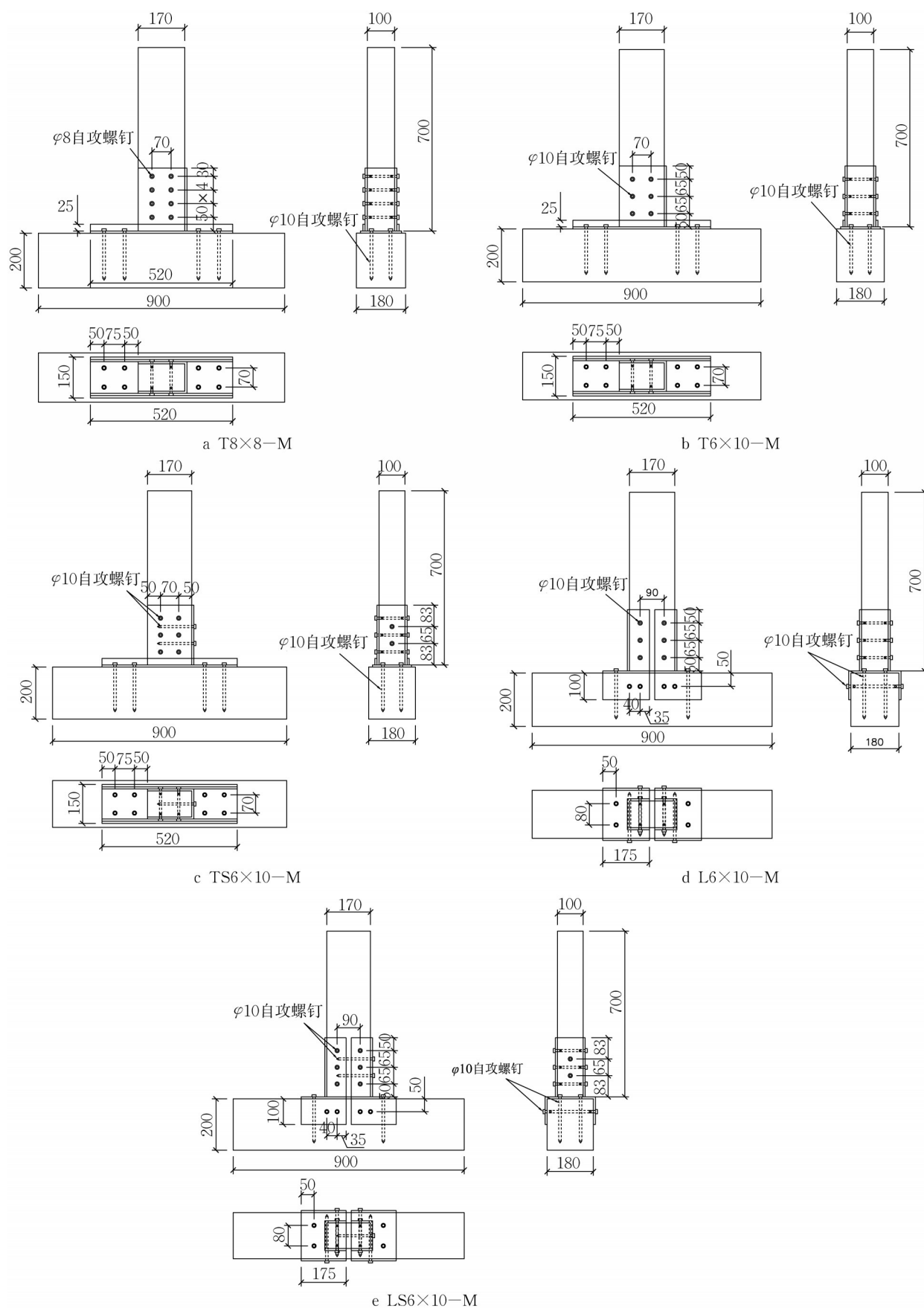


图2 各试件的几何尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Geometry of each specimen (unit: mm)

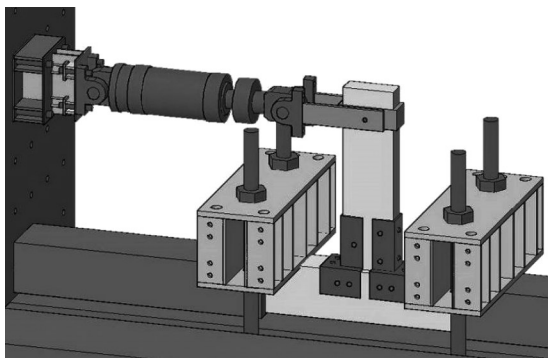


图3 胶合竹梁柱节点试件加载方案

Fig. 3 Test setup of glued laminated bamboo beam-to-column connection specimen

双L形外包钢板-自攻螺钉连接节点的破坏模式具有相似性,表现为受拉侧钢板的受拉断裂破坏和受压侧钢板的局部受压屈服破坏,同时部分与梁

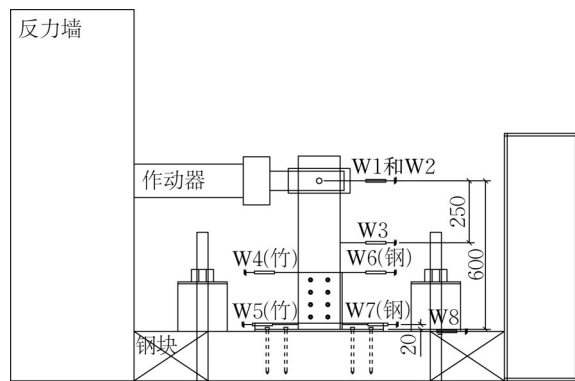


图4 测点布置(单位:mm)

Fig. 4 Data measurement scheme (unit: mm)

连接的自攻螺钉出现了剪切破坏,但均未出现竹材的横纹劈裂破坏。

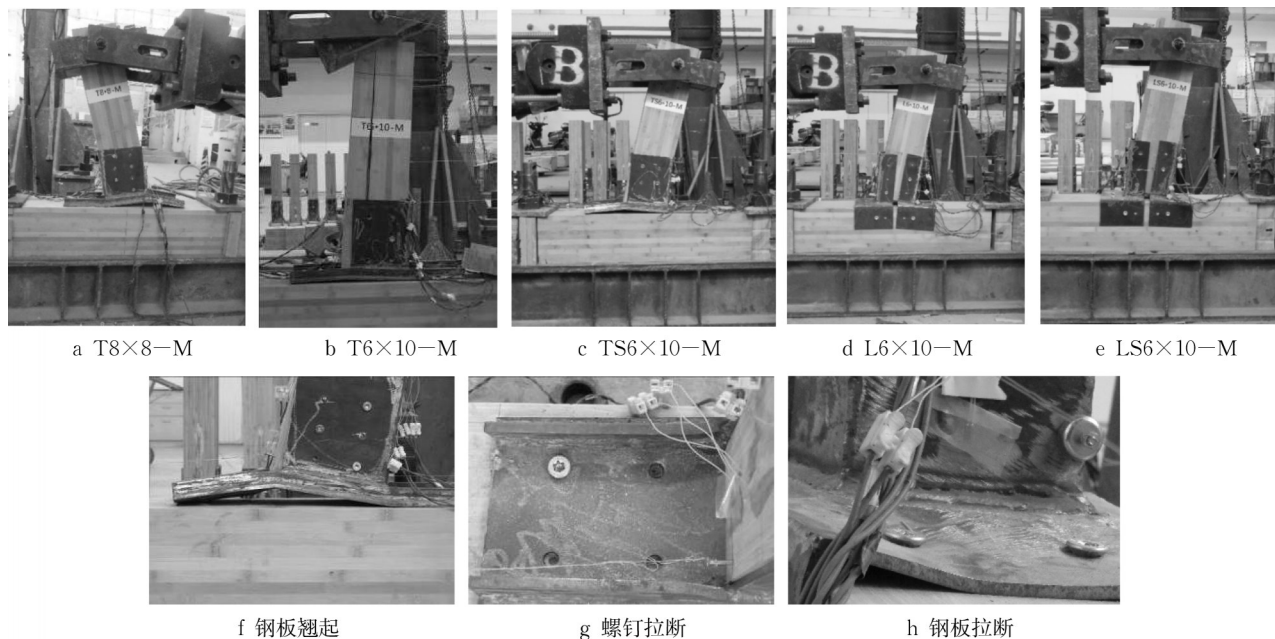


图5 破坏模式

Fig. 5 Modes of typical failure

## 2.2 承载性能分析

试验中节点承载性能由梁上节点域控制,因此选取梁上节点域为研究对象。对于T形外包钢板节点,由于加劲肋增加了梁柱间钢板的平面外刚度,在加载过程中明显看到梁柱间钢板处的胶合竹受到挤压,T形外包钢板节点的转动中心可认为位于胶合竹梁端截面的形心处。对于双L形外包钢板节点,由于梁柱间钢板的平面外刚度较小,外包钢板随胶合竹梁一起转动,胶合竹梁在转动过程中端部有脱开的趋势且梁端胶合竹无明显受压痕迹,节点的转

动中心在胶合竹梁端的受压侧角部。节点域的弯矩由梁自由端水平荷载和加载点到转动中心的垂直距离计算得到;转角则根据梁沿高度方向的水平位移分布计算得到。

各试件的弯矩-转角曲线如图6所示,基本表现为三阶段受力模式。在加载初期(转角在 $2^\circ$ 以内),5个试件的弯矩-转角曲线基本呈线性关系,试件处于弹性阶段,各试件的弹性刚度相近,其中设置6个螺钉的T形钢板连接节点(T6×10-M)刚度最小,在横纹加强后的节点刚度最大(TS6×10-M)。当转角大

约为4°、荷载超过60%的峰值荷载时,刚度均显著下降,非线性明显增加,其中横纹不加强的双L形钢板连接节点(L6×10-M)刚度最小。临近峰值荷载时,钢板和自攻螺钉的破坏使得曲线进入下降阶段。

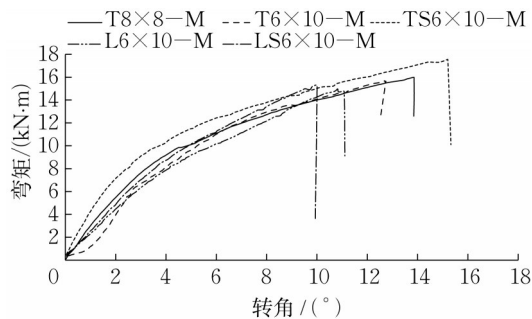


图6 各试件的弯矩-转角曲线

Fig. 6 Moment-rotational angle of each specimen

2.3 主要力学性能参数

根据各试件的弯矩-转角曲线进一步计算各试件的关键受力性能参数,如表2所列。其中,试件的抗弯承载力 $M_{max}$ 和对应的转角 $\theta_{max}$ 根据曲线的峰值点确定;初始刚度 $k$ 根据40%  $M_{max}$ (其中 $M_{max}$ 为抗弯承载力的最大值)和对应的转角确定;极限承载力 $M_u$ 和对应的转角 $\theta_u$ 根据降至80%峰值荷载时的荷载和对应的转角确定;试件的屈服承载力 $M_y$ 和对应的转角 $\theta_y$ 根据等效能量法(EEEP)<sup>[15-16]</sup>确定;试件的延性系数 $\mu$ 取为极限承载力对应的转角 $\theta_u$ 与屈服承载力对应转角 $\theta_y$ 的比值。

表2 各试件的关键受力性能参数

Tab. 2 Key mechanical parameters of each specimen

试件编号	$K / (kN \cdot m \cdot (^{\circ})^{-1})$	$M_y / (kN \cdot m)$	$\theta_y / (^{\circ})$	$M_{max} / (kN \cdot m)$	$\theta_{max} / (^{\circ})$	$M_u / (kN \cdot m)$	$\theta_u / (^{\circ})$	$\mu$
T8×8-M	2.7	13.2	5.0	16.0	13.8	12.8	13.8	2.8
T6×10-M	2.3	13.5	5.9	15.7	12.7	12.5	12.3	2.1
TS6×10-M	3.6	14.2	3.9	17.5	15.2	14.0	15.3	3.9
L6×10-M	2.1	11.4	5.3	15.0	10.8	12.0	11.1	2.1
LS6×10-M	2.4	12.4	5.1	15.3	10.0	12.2	10.0	1.9

3 节点承载力分析

现行《工程竹结构设计标准》(T/CECS 1101—2022)<sup>[17]</sup>建立了胶合竹结构螺栓连接的设计方法与构造措施,考虑了销槽承压破坏、销槽局部挤压破坏、销轴单个塑性铰破坏和销轴2个塑性铰破坏4种破坏模式下的连接承载力。基于《工程竹结构设计标准》(T/CECS 1101—2022)<sup>[17]</sup>,计算了本文设计的2种胶合竹自攻螺钉节点的承载力,通过与试验结果的对比分析其安全裕度。

由表2可看出,T形外包钢板-自攻螺钉连接节点的初始刚度、屈服弯矩、极限弯矩和极限转角均大于双L形外包钢板-自攻螺钉连接节点。对于出现脆性的自攻螺钉剪切破坏的试件,延性系数小于3.0。

对于T形外包钢板-自攻螺钉连接,梁端布置8根直径8 mm自攻螺钉的节点(T8×8-M)与梁端布置6根直径10 mm自攻螺钉的节点(T6×10-M)相比,布置直径小、数量多的T8×-M节点的初始刚度、极限转角和延性系数较T6×10-M试件分别大17.4%、12.2%和33.3%,其余受力性能参数均相似。

沿胶合竹梁横纹方向钻入自攻螺钉对节点的受力性能有所提升,提升程度与节点形式有关。加强后T形外包钢板-自攻螺钉连接节点(TS6×10-M)与未加强的节点相比(T6×10-M),初始刚度、抗弯承载力和延性系数分别提高了56.5%、11.5%和85.7%。加强后双L形外包钢板-自攻螺钉连接节点(LS6×10-M)与未加强的节点(L6×10-M)相比,初始刚度、抗弯承载力和延性系数分别提高了14.3%、2.0%和9.5%。

现行规范同样对层间位移角限值给出了明确规定,该数值远低于本次试验中节点的极限转动角度,这样能保证节点具有足够的安全储备。节点抗弯承载力的设计值需考虑这2种工况的共同影响,选取最小值作为节点抗弯承载力的设计值。

3.1 梁柱节点受力分析

梁柱节点区域承受弯矩和剪力共同作用时,对于T形外包钢板-自攻螺钉连接节点,试验过程中发现梁的转动中心位于胶合竹梁端截面的形心处,节点区域每个自攻螺钉的受力如图7所示,忽略节点转动引起的荷载 $F_H$ 的力臂变化,弯矩 $M$ 引起的每个螺钉的剪力垂直于该螺钉与转动中心的连线,且与该螺钉到转动中心的距离 $r_i$ 成正比,因此弯矩 $M$ 引起的每个螺钉承受的剪力为

$$V_{Mi} = \frac{M}{\sum_{i=1}^n r_i^2} r_i$$

(1) 剪力  $F_H$  在连接螺钉上平均分配, 每个螺钉承受的剪力为

$$V_{Hi} = \frac{F_H}{n} \quad (2)$$

式中:  $i$  为螺栓编号;  $n$  为螺栓个数。

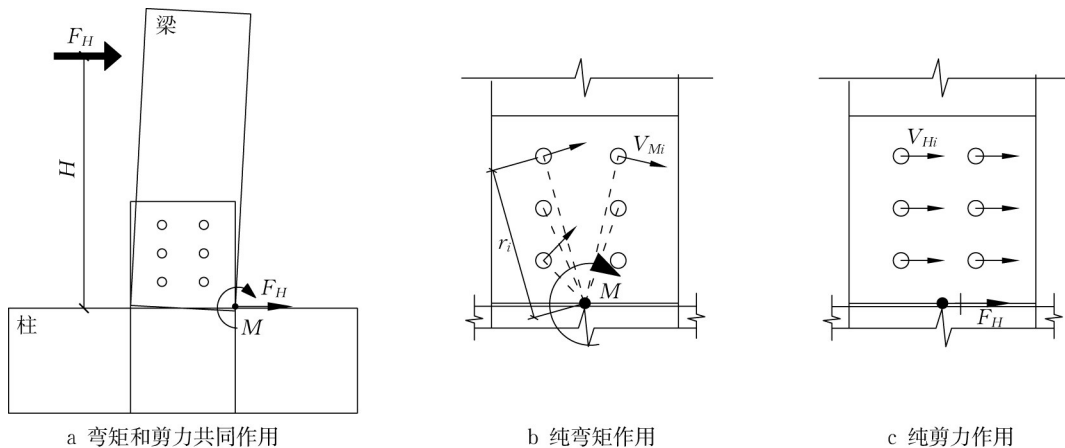


图7 节点区在弯矩和剪力共同作用下的受力简图

Fig. 7 Simplified calculation diagram of connection under combined bending and shear

对于双L形外包钢板-自攻螺钉连接节点, 试验过程中发现胶合竹梁在转动过程中端部有脱开的趋势, 梁的转动中心在梁端的受压侧角部, 梁上节点区

域在弯矩和剪力共同作用下的受力如图8所示, 弯矩  $M$  和剪力  $F_H$  引起的每个螺栓承受的剪力依然按照式(1)和式(2)计算。

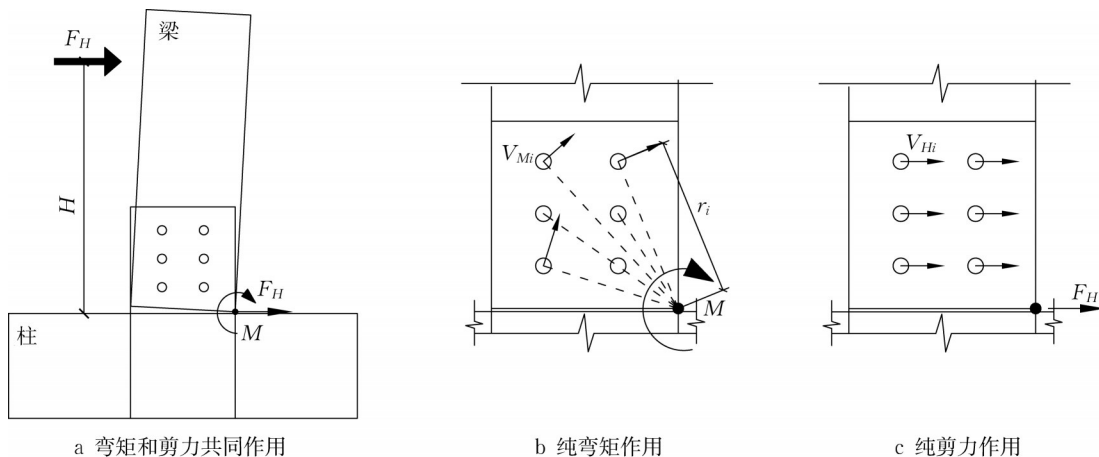


图8 梁上节点区在弯矩和剪力共同作用下的受力

Fig. 8 Forces of beam connection subjected to combined bending and shear

在图7所示的荷载作用方向上, 受力最大的自攻螺钉为左上角或右上角的自攻螺钉; 在图8所示的荷载作用方向上, 受力最大的自攻螺钉为左上角的自攻螺钉。其承受的剪力包括  $V_{Mi}$  和  $V_{Hi}$ , 剪力的合力与梁轴线呈  $\alpha$  角。

$$\tan \alpha = \frac{\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} V_{Mi} + V_{Hi}}{\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} V_{Mi}} \quad (3)$$

### 3.2 工程竹梁柱节点承载力验算

基于《工程竹结构设计标准》(T/CECS 1101—2022)的计算方法, 分析每个自攻螺钉的承载力, 当受力最大的自攻螺钉承受的剪力达到该螺钉的抗剪强度时, 节点发生破坏。试验结果与计算结果的对比如表3所示, 表中  $M_{\max, t}$  为试验结果最大值,  $M_{\max, p}$  为计算结果最大值。由表3可知, 实测节点承载力与计算承载力的比值为 1.97~2.16, 平均比值为 2.07。



表3 试验结果与计算结果对比

Tab. 3 Comparison of test results and calculated results

试件编号	$M_{\max,t} / (\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{\max,p} / (\text{kN}\cdot\text{m})$	$\frac{M_{\max,t}}{M_{\max,p}}$
T8×8—M	16.0	7.5	2.13
T6×10—M	15.7	7.8	2.01
TS6×10—M	17.5	8.1	2.16
L6×10—M	15.0	7.6	1.97
LS6×10—M	15.3	7.4	2.07

## 4 结语

针对胶合竹梁柱节点性能提升同时不预开槽、不预打孔的需求,设计了2种自攻螺钉连接的胶合竹梁柱节点构造,分别为T形外包钢板-自攻螺钉连接节点和双L形外包钢板-自攻螺钉连接节点,制作了5个试件进行单调加载试验,研究了节点形式、自攻螺钉植入方式和布置参数对节点转动性能的影响。主要研究结论如下。

(1)T形外包钢板-自攻螺钉连接节点相较双L形外包钢板-自攻螺钉连接节点,初始刚度、承载力、变形能力和延性系数均较优。

(2)梁端自攻螺钉的布置方式对T形外包钢板-自攻螺钉连接节点的破坏模式有重要影响。布置直径小但数量多的自攻螺钉时,节点(T8×8-M)破坏模式为T形钢板的受拉断裂破坏和与胶合竹柱连接的自攻螺钉出现受拉断裂破坏;布置直径较大但数量少的自攻螺钉时,节点(T6×10-M)破坏主要集中于胶合竹梁端,表现为竹材的横纹劈裂破坏和与梁连接的自攻螺钉的剪切破坏。此外,T8×8-M试件的初始刚度、极限转角和延性系数也略优。

(3)横纹方向采用自攻螺钉加强可改善节点的受力性能,对T形外包钢板-自攻螺钉连接节点改善更明显。在横纹方向进行加强后的节点(TS6×10-M)的破坏模式为钢板的受拉断裂破坏和与胶合竹柱连接的自攻螺钉出现受拉断裂破坏,与节点(T8×8-M)类似,且初始刚度、承载力和延性系数均得到明显提升。

(4)基于《工程竹结构设计标准》(T/CECS 1101—2022)的计算方法对自攻螺钉节点的承载力进行了分析,实测与计算承载力的比值为1.97~2.16,平均比值为2.07,说明现行《工程竹结构设计标准》(T/CECS 1101—2022)提供的节点设计方法能偏于安全地预测胶合竹自攻螺钉连接梁柱节点的抗弯承载力。

## 作者贡献声明:

冷予冰:负责论文及所涉及试验的设计与执行。  
陈 溪:协助完成节点力学性能试验及文本整理。  
刘 博:协助完成节点力学性能试验。  
王明谦:节点承载力验算与分析。  
宋晓冰:试验设计及论文撰写指导。  
许清风:研究方案及试验设计指导。

## 参考文献:

- [1] 冷予冰,陈珍珠,王明谦,等.工程竹结构建筑:从传统走向现代[J].世界科学,2022(11):38.  
LENG Yubing, CHEN Lingzhu, WANG Mingqian, *et al.* Engineering bamboo structure buildings: from tradition to contemporary [J]. World Science, 2022(11): 38.
- [2] 冷予冰,许清风,陈珍珠.工程竹在建筑结构中的应用研究进展[J].建筑结构,2018,48(10):89.  
LENG Yubing, XU Qingfeng, CHEN Lingzhu. Research progress of application of engineered bamboo in building structures [J]. Building Structure, 2018, 48(10): 89.
- [3] 陆伟东,孙洪锋,刘伟庆.自攻螺钉增强胶合木梁柱螺栓节点受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(4):80.  
LU Weidong, SUN Hongfeng, LIU Weiqing. Experimental study on behavior of bolted glulam beam-to-column connections strengthened by self-tapping screws [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(4): 80.
- [4] 刘慧芬,何敏娟.自攻螺钉参数设置对胶合木梁柱节点受力性能的影响[J].建筑结构学报,2015,36(7):148.  
LIU Huifen, HE Minjuan. Effects of self-tapping screw on performance of glulam beam-to-column connections [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(7): 148.
- [5] 何敏娟,赵艺,高承勇,等.螺栓排数和自攻螺钉对木梁柱节点抗侧力性能的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(6):845.  
HE Minjuan, ZHAO Yi, GAO Chengyong, *et al.* Effect of bolt row and self-tapping screws reinforcement on lateral performance of bolted timber connection [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(6): 845.
- [6] LENG Y, XU Q, HARRIES K A, *et al.* Experimental study on mechanical properties of laminated bamboo beam-to-column connections [J]. Engineering Structures, 2020, 210: 110305.
- [7] LENG Y, WANG Z, XU M. Experimental study and analysis on rotational behavior of bamboo scrimber beam-to-column bolted connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(9): 04021122.
- [8] CUI Z, HUANG D, HUANG Z, *et al.* Experimental investigation and calculation method for the bearing capability of bolt steel-to-laminated bamboo connections under the coupling of bending moment and shear force [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 59: 105126.

(下转第748页)