

doi: 10.11707/j.1001-7488.20220317

# 斜螺钉 2 种角度不同组合形式对钢板-正交胶合木剪切性能的影响<sup>\*</sup>

陈志渊<sup>1</sup> 王 硕<sup>1</sup> 王昕萌<sup>1</sup> 张柳柳<sup>1</sup> 周 斌<sup>1</sup> 黄 慧<sup>2</sup> 阙泽利<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学材料科学与工程学院 南京 210037; 2. 江西省林业科学院林产工业研究所 南昌 330032)

**摘 要:** 【目的】制作一种采用自攻螺钉连接的钢板-正交胶合木节点,探究螺钉不同钉入角度不同组合形式对节点力学性能的影响,并依据现有的理论计算模型与试验值比较对计算模型进行优化,为新型连接件的开发和应用提供理论模型和参考。【方法】参考美国标准(ASTM D1761-12)以  $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  的速度匀速加载,对夹角为  $45^\circ$  和  $90^\circ$  2 种自攻螺钉钉入角度进行 6 种不同组合形式的抗剪试验,记录分析受剪切节点的破坏形态并对比各组试件的荷载-位移曲线、承载力、刚度和能量耗散。【结果】试件主要破坏模式包括 2 颗钉同时被剪断、钉未被剪断但产生塑性铰和钉未被剪断但同时被拔出。6 组试件均出现一侧钉被剪断的破坏模式,组 J-Cross $45^\circ$ T 和 S-Double $45^\circ$ T 出现钉未被剪断而被拔出、组 S- $45^\circ$ T- $45^\circ$ C 出现钉未被剪断而产生塑性铰的破坏模式。组 J-Cross $45^\circ$ T、J-Double $45^\circ$ T、S-Double $45^\circ$ T 的承载力和刚度均远高于组 S- $45^\circ$ T- $45^\circ$ C、S- $90^\circ$ - $45^\circ$ C、S- $90^\circ$ - $45^\circ$ T 组 S- $90^\circ$ - $45^\circ$ C 的能量耗散和承载力对应位移最大。【结论】对于承载力、刚度、能量耗散和承载力对应位移 4 个力学性能指标,钉尖间距影响很小,不同角度组合影响较大。6 组试件中组 S-Double $45^\circ$ T 的综合受力性能最好,组 S- $90^\circ$ - $45^\circ$ C 适用于建筑中对抗震要求较高的节点。

**关键词:** 斜螺钉; 钢板; 正交胶合木; 剪切性能

**中图分类号:** TU366.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7488(2022)03-0159-08

## Effects of Different Combination Forms of Inclined Self-Tapping Screws with Two Angles on Shear Performance of Steel-to-Cross-Laminated Timber

Chen Zhiyuan<sup>1</sup> Wang Shuo<sup>1</sup> Wang Xinmeng<sup>1</sup> Zhang Liuliu<sup>1</sup> Zhou Bin<sup>1</sup> Huang Hui<sup>2</sup> Que Zeli<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037;

2. Institute of Forest Products Industry, Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032)

**Abstract:** 【Objective】This study was implemented to make a kind of steel-to-cross-laminated timber joint connected by self-tapping screws, and to explore the influences of different combinations on the mechanical properties of the joint. Based on the comparison between the existing theoretical models and the experimental values, the calculation model was optimized. 【Method】Six groups of shear tests with different combinations were carried out for self-tapping screws with angles of  $45^\circ$  and  $90^\circ$  by changing the screw tapping angles and combination forms, and loaded at a uniform speed of  $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  according to the American standard ASTM D1761-12. The failure modes of the joints subjected to shear were recorded and analyzed, and the load-displacement curves, load-carrying capacity, stiffness and energy dissipation of each specimen were compared. 【Result】The main failure modes of the specimens were two screws cut off at the same time, the screws not cut off but plastic hinges produced, and the screws not cut off but pulled out at the same time. For all the 6 groups, there was a failure mode in which one side of the screws were cut off. In addition, there was a failure mode in which the screws for the group J-Cross $45^\circ$ T and S-Double $45^\circ$ T were pulled out instead of being cut off, and in group S- $45^\circ$ T- $45^\circ$ C there was a failure mode in which plastic hinges were produced instead of being cut off. In this test, the load-carrying capacity and stiffness of groups J-Cross $45^\circ$ T, J-Double $45^\circ$ T were much higher than those of groups S- $45^\circ$ T- $45^\circ$ C, S- $90^\circ$ - $45^\circ$ C and S- $90^\circ$ - $45^\circ$ T. The displacement corresponding to energy dissipation and load-

收稿日期: 2021-04-25; 修回日期: 2021-07-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670566); 江西省林业局科技创新专项(202013); 南京林业大学大学生创新项目(2018NFUSPITP177)。

<sup>\*</sup> 阙泽利为通讯作者。

carrying capacity of group S-90°-45° C was the maximum. 【Conclusion】 Among the 6 groups of specimens, Group S-Double45°T might have the best comprehensive mechanical performance, while group S-90°-45° C could be suitable for the joints with high seismic requirements in the building.

**Key words:** inclined self-tapping screws; steel plate; cross-laminated timber (CLT); shear capacity

近年来,在欧美等发达国家,以强度相对较低的速生木材为原料,由至少3层实木锯材或结构复合板材纵横交错组坯、采用结构胶黏剂压制而成的正交胶合木(cross-laminated timber, CLT)已开始应用于中层甚至多高层木结构建筑中,正在部分取代钢筋混凝土和砖混结构建筑,改变传统的建筑格局(杨学兵等, 2018)。CLT结构体系是一种以螺钉、钢制承载板和角支架连接CLT楼板、墙板、屋面板以及混凝土基础的装配式木结构体系,该体系在成本、设计、施工、环保等方面均具有明显优势(熊海贝等, 2019)。国外有学者对加拿大英属哥伦比亚大学建造的18层木结构公寓Brock Commons进行了全生命周期评估和成本计算(Teshnizi *et al.*, 2018),国内有学者整理了CLT在欧洲的发展沿革和研究现状并指出国内CLT研究中亟待解决的问题和尚未涉及的方面(阙泽利等, 2017),亦有学者设计一种高层正交胶合木-混凝土核心筒混合结构体系,运用有限元分析方法研究了不同参数对混合结构力学性能、变形和动力特性等的影响(熊海贝等, 2019)。此外,国外学者对自攻螺钉应用于CLT也作了大量研究(岡部 実等, 2011; Hossain *et al.*, 2015),结果发现当螺钉以一定倾斜角度钉入木材,即同时承受轴向荷载和侧向荷载时,对节点承载力、刚度等均有影响。近年来,国内外学者对斜螺钉的轴向-侧向复合承载也作了相关探讨,国外研究多集中于木-木节点且提出了理论模型或计算公式,如Bejtka等(2002)基于Johansen屈服理论的失效模式对钉节点进行受力分析,提出了斜螺钉单剪受力的理论模型,并将试验值与理论计算值进行比较;Tomasi等(2010)对不同钉入角度的螺钉剪切连接进行试验,研究斜螺钉承受拉-剪、压-剪与拉-压复合受力模式下的承载力和刚度,并提出了不同模式下的承载力和刚度计算公式;Girhammar等(2017)提出了拉-剪模式下木-木钉连接节点的刚度模型,其能很好预测斜螺钉节点的滑移模量。而国内研究多集中于木-木、钢-木斜螺钉连接节点,且不限于剪切试验,如鹿相戎等(2020)以云杉(*Picea asperata*)胶合木、钢板和自攻螺钉为研究材料,测试了不同荷载方向和受力情况下斜螺钉连接节点的承

载性能;阙泽利等(2020)设计一种斜螺钉连接装配式胶合梁柱连接节点,并对连接节点进行低周反复加载试验,从破坏模式、节点刚度、耗能能力等方面测试了新型节点的性能;戈禧芸等(2020)制作一种节点采用自攻螺钉连接的平行弦木桁架,探究了螺钉钉入角度对平行弦木桁架受拉节点力学性能的影响。

现行EC5欧洲设计规范中对钉连接钢-木节点的承载力计算公式基于侧向承载的屈服理论,只包括销钉的抗弯屈服性能和木材销槽承压强度,即只能用于计算螺钉90°钉入时的特征强度,而当螺钉以一定角度钉入时,还涉及抗拔出强度以及钢板与木材之间的摩擦力;规范中设计的刚度公式只包括销型紧固件垂直连接木-木节点的刚度,虽然提到钢-木节点的刚度应是木-木节点的2倍,但大量试验证明其并不能代表钢-木节点的实际刚度。对于用斜螺钉连接的钢-木节点更是没有相关公式,而探究钢板与CLT节点通过自攻螺钉连接的破坏模式以及受力机理可为新型连接件的开发和应用提供理论模型和参考。鉴于此,本研究针对双颗自攻螺钉不同组合形式对剪切性能的影响,与单紧固件试验结果进行比较分析,探讨二者之间的关系,并依据现有的理论计算模型与试验比较对计算模型进行优化,以期探究深层的变化规律,为完善木结构相关设计标准。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本研究用钢板-正交胶合木剪切性能试验试件为两侧通过自攻螺钉连接的单剪结构。定制具有不同角度预钻孔的钢板,各角度孔位符合EC5欧洲设计规范和GB 50005—2017对销轴类连接件节点连接中的边距、端距要求。正交胶合木由35 mm厚花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)正交组坯而成,密度 $540 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,含水率12.8%。自攻螺钉为国产美固全螺纹自攻螺钉(图1),具体参数见表1。2块钢板上预留3个直径30 mm的孔洞,以便试件通过螺纹锚杆和钢板1、2组合与试验机压头连接。

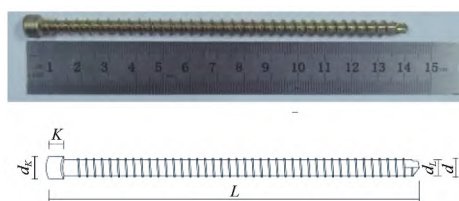


图1 试验用自攻螺钉

Fig. 1 Self-tapping screws applied in test

## 1.2 试验方法

在前期单颗钉剪切试验(陈志渊等, 2020)的基础上, 从  $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  3 种钉入角度中选择承载力等力学性能较好的角度, 即  $45^\circ$  和  $90^\circ$  进行组合, 由单颗钉剪切变为双颗钉剪切, 选取  $45^\circ$ T-S(拉-剪)、 $45^\circ$ C-S(压-剪)、 $90^\circ$ S(纯剪) 3 种受力模式, 探究双颗自攻螺钉 6 种不同组合形式对钢板-正交胶合木剪切性能的影响(单颗钉和双颗钉剪切试验划分依据为单侧钢板与 CLT 间连接的自攻螺钉数目), 具体组合形式见图 2, CLT 试件尺寸为  $175\text{ mm} \times 172\text{ mm} \times 344\text{ mm}$ , 预制钢板预留孔间距在同一水平线上为  $60\text{ mm}$ , 在同一竖直线上为  $48\text{ mm}$ 。组 A—F

编号中, J 表示钉沿水平方向并列, S 表示钉沿竖直方向顺列, Cross 表示同侧 2 颗钉交叉排列, Double 表示同侧 2 颗钉平行排列。试验采用  $100\text{ kN}$  三思万能力学试验机 UTM5105, 参考美国标准( ASTM D1761-12) 以  $1\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  的速度匀速加载, 直至试件破坏或荷载降至最大荷载的  $80\%$  时停止加载。荷载和位移通过 TDS-530 采集, 在试件两侧共设置 4 个位移传感器, 其中 2 个量程为  $100\text{ mm}$  的 YWC-100 型位移传感器(精度为  $0.01\text{ mm}$ ) 用于测量钢板相对试验机面的绝对位移, 2 个量程为  $50\text{ mm}$  的 YWC-50 型位移传感器(精度为  $0.01\text{ mm}$ ) 用于测量 CLT 与钢板的相对位移, 试验装置与测点布置见图 3。6 组试件中每组试件数量均为 5 个, 共进行 30 次剪切试验。从施加荷载开始, 观察节点的受力情况, 记录第 1 次试验机上指示的松弛荷载和最大荷载以及钉的断裂顺序。试验结束后, 观察试件破坏现象, 将自攻螺钉小心旋出观察钉子变形情况以及木材破坏特征。参考日本木结构设计计算方法获得试件的刚度和能量耗散。

表1 自攻螺钉主要性能参数

Tab.1 Main mechanical properties of self-tapping screws

| $L/\text{mm}$ | $d/\text{mm}$ | $d_L/\text{mm}$ | $d_K/\text{mm}$ | $K/\text{mm}$ | 抗弯屈服强度特征值<br>Characteristic value of<br>yield bending strength/MPa | 抗拉强度特征值<br>Characteristic value of<br>tensile strength/MPa | 抗拉力特征值<br>Characteristic value of<br>tensile resistance/kN |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 140.00        | 6.00          | 4.00            | 8.40            | 5.50          | 1 000.0                                                            | 1 100.0                                                    | 13.8                                                       |

## 2 结果与分析

### 2.1 试验现象

加载初期, 试件处于弹性阶段, 随加载位移逐渐增大, 大部分试件在荷载达到峰值后钉帽被剪断导致试件破坏, 同时荷载突降, 伴有巨大声响, 根据组合形式不同, 自攻螺钉断裂数量和顺序有所差别; 但也有少部分试件钉未被剪断而出现其他破坏模式。

当荷载达到峰值时, 组 A 表现为钢板一侧一颗钉被剪断, 钢板发生偏转, 而另一颗钉继续发挥作用, 这是因为交叉排列形式, 自攻螺钉轴向力产生 2 个分力增强其承载力, 受力过程中自攻螺钉会发生扭转, 尤其是钉帽与钢板接触部分会发生明显的弯曲变形带动钢板偏转, 使 2 颗钉受力不一致(图 4a)。组 B、C 表现为同一侧 2 颗钉同时被剪断, 另一侧 2 颗钉产生不明显塑性铰, 这可能是因为钉入角度相同, 自攻螺钉受力一致, 其中一侧钉达到极限承载力后侧钢板失效, 另一侧钉未达到极限承

载力在剪应力作用下产生塑性铰(图 4b 右、图 4c 右下)。组 D、F 表现为拉-剪  $45^\circ$  状态的钉被剪断, 这是因为单颗钉处于拉-剪  $45^\circ$  状态时, 达到最大承载力的自攻螺钉位移小于压-剪  $45^\circ$  和  $90^\circ$  剪切状态的位移, 组合形式的破坏模式取决于拉-剪  $45^\circ$  状态的钉(图 4c 右上)。组 E 表现为压-剪  $45^\circ$  状态的钉先被剪断,  $90^\circ$  剪切状态的钉后被剪断, 这是因为达到最大承载力的自攻螺钉位移小于  $90^\circ$  剪切状态的位移, 二者组合时, 位移小的先被破坏(图 4d)。

但组 A—D 中也有部分试件在荷载达到峰值后进入弹塑性阶段, 随着位移增大荷载呈逐渐减小趋势, 其中组 B、C 表现为同一侧 2 颗钉未被剪断但同时被拔出(图 4b 左)。由于自攻螺钉未被剪断, 达到最大承载力后继续被向上拉动出现较大位移, 从而导致自攻螺钉产生 2 个明显的塑性铰。组 D 表现为拉-剪  $45^\circ$  状态钉未被剪断而产生塑性铰, 主要是因为试件两侧钉尚未达到屈服极限, 在拉力作用下同时弯曲产生较大塑性变形(图 4e)。组 E 表现为

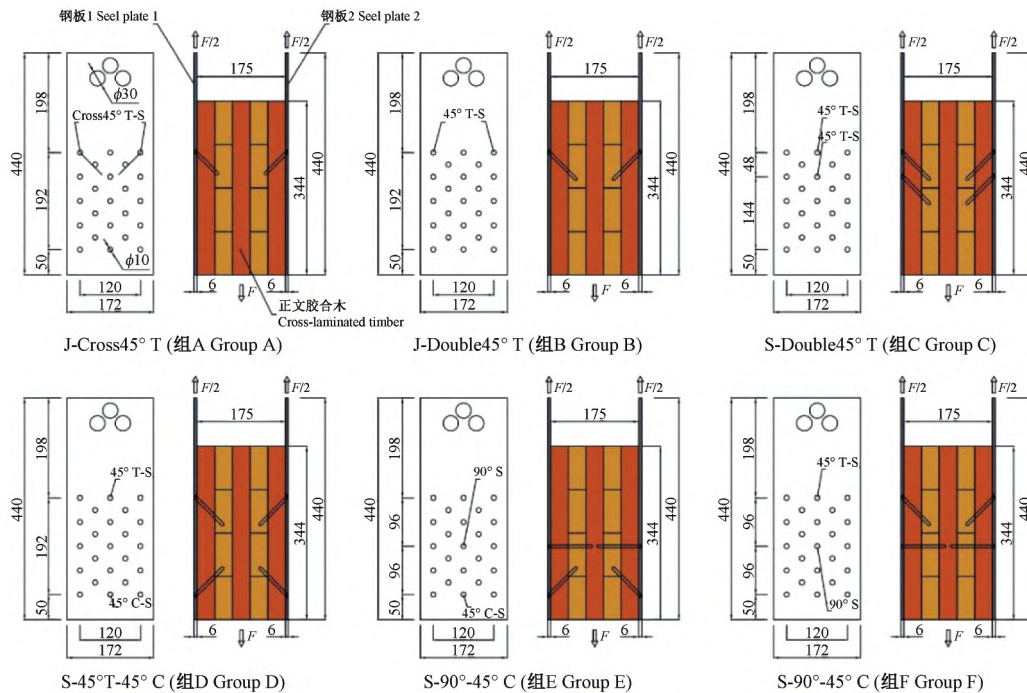


图 2 不同组合形式剪切试件( mm)

Fig. 2 Different combinations of shear specimens

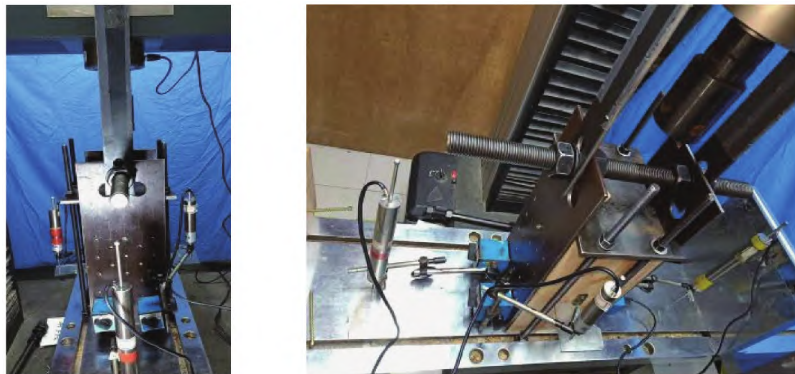


图 3 试验装置与测点布置

Fig. 3 Test equipment and measuring point arrangement

试件一侧 2 颗钉中处于拉-剪 45° 状态的自攻螺钉先被剪断,这是因为在单颗钉剪切试验中,处于拉-剪 45° 状态的自攻螺钉达到最大承载力的位移小于 90° 剪切状态的位移,所以组 F 的破坏模式依旧取决于拉-剪 45° 状态的钉(图 4f)。

## 2.2 不同组合形式的荷载-位移关系

图 5 为双颗自攻螺钉连接钢板-正交胶合木节点试件的荷载-位移曲线, a-f 代表组 A-F。各组试件加载初期处于弹性阶段,荷载和位移呈线性关系,大部分试件在达到最大承载力时荷载突降。组 A 试件 1 的荷载-位移曲线存在明显屈服阶段,可能是该试件钉帽部分在钢板作用下弯曲变形较小,产生较长位移后才被剪断,其荷载在最大承载力附近保持较好,试件属于延性破坏。组 B 试件 1 和组 C

试件 1、3 的荷载-位移曲线先以一定斜率直线上升,当达到自攻螺钉极限承载力后缓慢下降,这是因为自攻螺钉未被剪断,达到最大承载力后继续被向上拉动出现较大位移。组 D 试件 1、2 的荷载-位移曲线初期表现为线性上升,后进入屈服阶段,在较长位移范围内荷载处于最大承载力附近,最后缓慢下降,这是因为加载过程中,试件两侧自攻螺钉皆出现相同程度的弯曲变形,但均未被剪断而产生明显塑性较,试件最终为钉拔出破坏。

组 E、F 试件的荷载-位移曲线变化基本一致,但组 E 试件与其他组不同之处在于曲线达到最大承载力前均存在一个较大幅度下降,这是因为试件一侧有 2 颗钉,处于压-剪 45° 状态的螺钉先被剪断,由于剪断部分在木材内部,故产生较小幅度下



图4 不同组合形式下的试验现象

Fig. 4 Experimental phenomena in different combination forms

降,荷载继续上升至最大承载力时,曲线因 $90^\circ$ 剪切状态的螺钉被剪断而突然下降。组F试件的荷载-位移曲线则均在前期处于弹性上升阶段,达到最大承载力后突然下降,但试件1、2的荷载-位移曲线与组内其他试件存在一定偏差,可能是由于各种误差导致钢板发生轻微偏转,致使得到的荷载-位移曲线离散性略大。

### 2.3 不同组合形式对试件承载力、刚度和能量耗散的影响

经计算得出各组试件的承载力、承载力对应位移、刚度和能量耗散,其平均值、标准方差和变异系数见表2,为更直观表示不同组合形式对试件剪切

性能的影响,绘制如图6所示柱状图。单颗钉剪切试验中 $45^\circ\text{T-S}$ 、 $45^\circ\text{C-S}$ 和 $90^\circ\text{S}$ 状态下试件的承载力、刚度和能量耗散见表3(陈志渊等,2020),其与自攻螺钉数目的比值可记为每颗钉的承载力、刚度和能量耗散。双颗钉与单颗钉承载力和刚度的比较见图7。

由表2、表3、图6、图7可以看出,对承载力而言,组J-Cross $45^\circ\text{T}$ 、J-Double $45^\circ\text{T}$ 、S-Double $45^\circ\text{T}$ 的承载力远高于组S- $45^\circ\text{T-}45^\circ\text{C}$ 、S- $90^\circ\text{-}45^\circ\text{C}$ 、S- $90^\circ\text{-}45^\circ\text{T}$ ,组J-Cross $45^\circ\text{T}$ 略低于组J-Double $45^\circ\text{T}$ 和组S-Double $45^\circ\text{T}$ 。在单颗钉剪切试验中, $45^\circ\text{T}$ 受力模式下每颗钉的承载力为12 741.67 N,而J-Double $45^\circ$

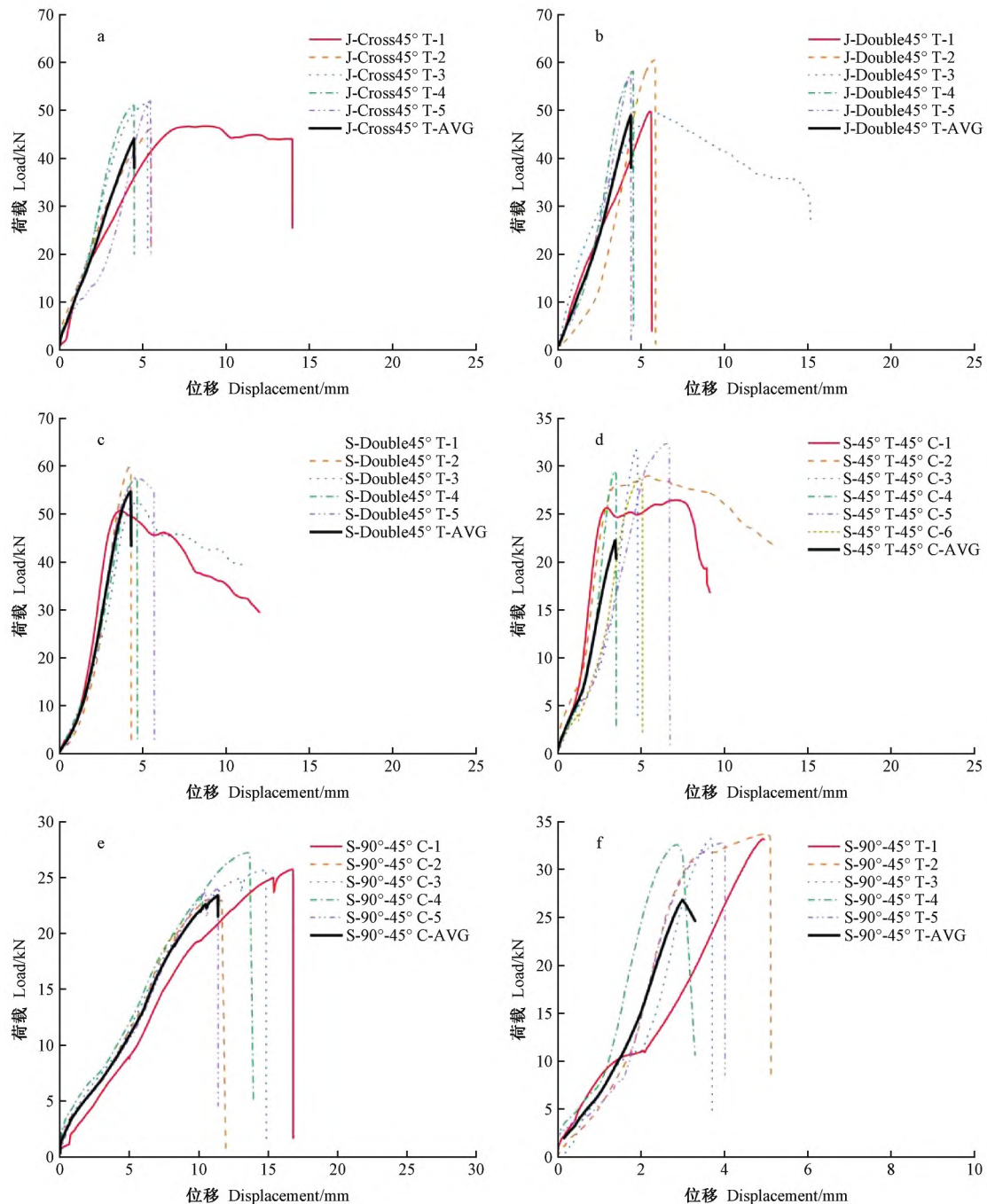


图5 双颗自攻螺钉连接钢板-正交胶合木节点试件的荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of steel-cross-laminated timber joint with two self-tapping screws

T 和 S-Double45°T 组合形式下每颗钉的承载力分别为单颗钉剪切试验的 1.08 和 1.09 倍。标准规定 根据公式计算出每颗钉的承载力乘以有效钉个数即为该钉节点的总承载力,但通常情况下,因群组效应或循环荷载下的衰减作用会导致该方式计算出的承载力不能反映节点的真实承载力;通过试验现象已知 S-45°T-45°C 状态的破坏模式取决于 45°T 状态,当 45°T 状态失效时,45°C 状态几乎达到最大承载力,故该种组合形式的最大承载力与单颗钉 45°T 和

45°C 作用之和近乎相等,仅相差 60 N 左右;而 S-90°-45°C 组合形式的承载力大于单颗钉 90°S 和 45°C 之和,为 1.15 倍。这是因为 45°C 状态的螺钉先被剪断,由于剪断部分在木材内部,仍可提供一定承载力,直至 90°S 剪切状态的螺钉被剪断节点失效;至于 S-90°-45°T 状态,则因为 45°T 状态的螺钉先达到最大承载力被剪断,而 90°S 剪切状态的螺钉未达到最大承载力节点已经失效,故该种组合形式的最大承载力小于单颗钉 90°S 和 45°T 之和,为

0.77 倍。这表明, 应尽量避免在试件一侧出现  $90^{\circ}\text{S}$  与其他承受拉-剪状态螺钉的组合形式。

对刚度而言, 组 J-Cross $45^{\circ}\text{T}$ 、组 J-Double $45^{\circ}\text{T}$  和组 S-Double $45^{\circ}\text{T}$  的刚度几乎相同, 但分散到每颗钉的刚度均小于单颗钉的刚度, 为 0.9 倍。这说明, 增加螺钉个数可能导致刚度减小, S- $45^{\circ}\text{T}$ - $45^{\circ}\text{C}$  组合形式的刚度小于  $45^{\circ}\text{T}$  和  $45^{\circ}\text{C}$  之和, 为 0.86 倍;

S- $90^{\circ}$ - $45^{\circ}\text{T}$  组合形式的刚度也小于  $90^{\circ}\text{S}$  和  $45^{\circ}\text{T}$  之和, 为 0.89 倍; S- $90^{\circ}$ - $45^{\circ}\text{C}$  在 6 种组合形式中刚度最小, 但其刚度大于  $90^{\circ}\text{S}$  与  $45^{\circ}\text{C}$  之和, 为 1.03 倍。

对能量耗散而言, S- $90^{\circ}$ - $45^{\circ}\text{C}$  组合形式具有更好的能量耗散能力, 比单颗钉  $90^{\circ}\text{S}$  和  $45^{\circ}\text{C}$  之和增加 57%; 而其他组合形式皆远小于单颗钉受力相加, 未达到预期加强效果。

表 2 不同组合形式对试件剪切性能的影响<sup>①</sup>

Tab.2 Influence of different combinations on shear performance

| 指标<br>Index                       | 组 A Group A<br>J-Cross $45^{\circ}\text{T}$ | 组 B Group B<br>J-Double $45^{\circ}\text{T}$ | 组 C Group C<br>S-Double $45^{\circ}\text{T}$ | 组 D Group D<br>S- $45^{\circ}\text{T}$ - $45^{\circ}\text{C}$ | 组 E Group E<br>S- $90^{\circ}$ - $45^{\circ}\text{C}$ | 组 F Group F<br>S- $90^{\circ}$ - $45^{\circ}\text{T}$ |
|-----------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| $F_{\max}/\text{N}$               | AVG                                         | 49 457.07                                    | 55 120.94                                    | 55 578.82                                                     | 29 451.35                                             | 24 672.44                                             |
|                                   | SD                                          | 2 836.72                                     | 5 168.86                                     | 3 836.08                                                      | 2 191.53                                              | 1 760.66                                              |
|                                   | COV                                         | 5.74                                         | 9.38                                         | 6.90                                                          | 7.44                                                  | 7.14                                                  |
| $V_{\max}/\text{mm}$              | AVG                                         | 5.21                                         | 5.17                                         | 4.35                                                          | 5.48                                                  | 13.376                                                |
|                                   | SD                                          | 0.54                                         | 0.77                                         | 0.42                                                          | 0.98                                                  | 2.50                                                  |
|                                   | COV                                         | 10.32                                        | 14.92                                        | 9.6                                                           | 17.88                                                 | 18.69                                                 |
| $K/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$ | AVG                                         | 10 126.50                                    | 10 265.52                                    | 10 173.55                                                     | 5 211.56                                              | 2 156.08                                              |
|                                   | SD                                          | 2 066.76                                     | 2 430.33                                     | 626.98                                                        | 1 235.88                                              | 251.21                                                |
|                                   | COV                                         | 20.41                                        | 23.67                                        | 6.16                                                          | 23.71                                                 | 11.65                                                 |
| Energy/J                          | AVG                                         | 143 766                                      | 126 661                                      | 139 209                                                       | 54 944.36                                             | 203 234.2                                             |
|                                   | SD                                          | 21 506.12                                    | 25 053.98                                    | 42 067.94                                                     | 12 934.79                                             | 47 948.82                                             |
|                                   | COV                                         | 14.96                                        | 19.78                                        | 30.22                                                         | 23.79                                                 | 23.59                                                 |

①  $F_{\max}$ : 承载力 Load-carrying capacity;  $V_{\max}$ : 承载力对应位移 Displacement corresponding to load-carrying capacity;  $K$ : 刚度 Stiffness; Energy: 能量耗散 Energy dissipation; AVG: 平均值 Average; SD: 标准差 Standard deviation; COV: 变异系数 Coefficient of variation. 下同。The same below.

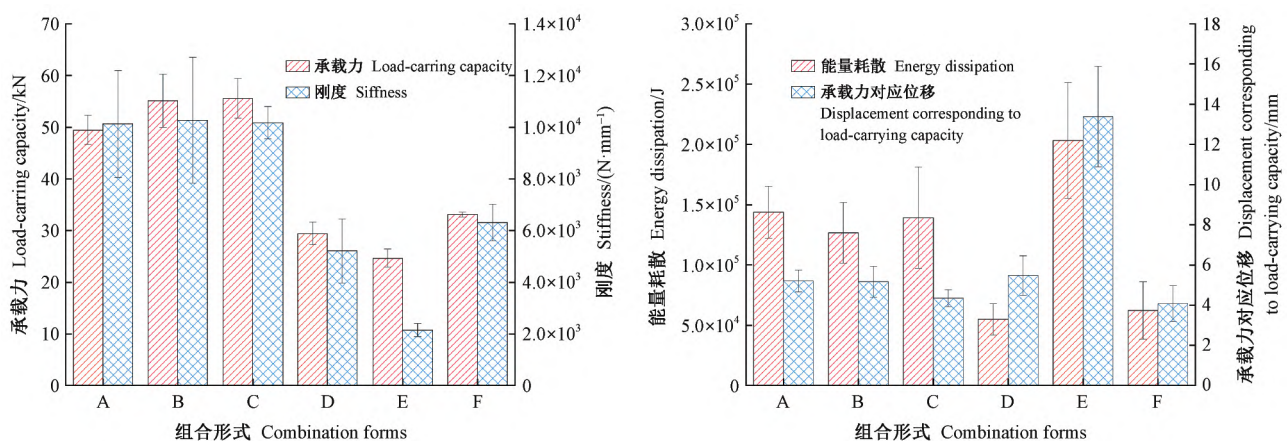


图 6 不同组合形式对试件剪切性能的影响

Fig. 6 Influence of different combination forms on shear performance of timber

表 3 单颗钉剪切试验中试件的承载力和刚度

Tab.3 Load-carrying capacity and stiffness of timber in single screw shear test

| 组合形式<br>Combination forms | $F_{\max}/\text{N}$ | $K/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$ | Energy/J  |
|---------------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------|
| $45^{\circ}\text{T-S}$    | 25 483.33           | 5 538.13                          | 60 038.02 |
| $45^{\circ}\text{C-S}$    | 4 027.53            | 548.854                           | 40 413.73 |
| $90^{\circ}\text{S}$      | 17 479.63           | 1 545.99                          | 88 674.23 |

### 3 结论

1) 组 J-Cross $45^{\circ}\text{T}$  的承载力略低于组 J-Double $45^{\circ}\text{T}$  和组 S-Double $45^{\circ}\text{T}$ , J-Double $45^{\circ}\text{T}$  和 S-Double $45^{\circ}\text{T}$  组合形式下每颗钉的承载力分别为单颗钉剪切试验的 1.08 和 1.09 倍; 组 J-Cross $45^{\circ}\text{T}$ 、组 J-Double $45^{\circ}\text{T}$  和组 S-Double $45^{\circ}\text{T}$  的刚度几乎相同, 但分散到每颗钉的刚度均小于单颗钉的刚度, 为 0.9

倍;计算节点一侧双颗钉 S-45°T-45°C 组合形式的承载力时,可以单颗钉 45°T 与 45°C 作用之和得到;S-45°T-45°C 组合形式的刚度小于 45°T 和 45°C 之和,为 0.86 倍;S-90°-45°T 组合形式的承载力小于单颗钉 90°S 和 45°T 之和,为 0.77 倍。

2) 应尽量避免在钢-木连接中出现一侧纯剪和拉-剪复合的组合形式;S-90°-45°C 组合形式的承载力为单颗钉 90°S 和 45°C 之和的 1.15 倍,刚度为二者之和的 1.03 倍,且具有更好的能量耗散能力,比单颗钉 90°S 和 45°C 之和增加 57%。6 种组合形式中 S-Double45°T 的承载力最大,S-90°-45°C 的承载力最小;组 J-Cross45°T、组 J-Double45°T 和组 S-Double45°T 的刚度相差不大,均为 6 种组合形式中最大,但组 S-Double45°T 的误差棒最小;在组 S-90°-45°T、S-45°T-45°C、S-90°-45°C 中,组 S-90°-45°C 刚度最小,组 S-90°-45°T 最大,相对而言组 S-45°T-45°C 耗能最小。

基于上述结论,在实际工程中建议:

1) 对承载力和刚度要求较高且变异性较小的节点可采用 6 种组合形式中的组 S-Double45°T;而组 S-90°-45°C 因具有良好的能量耗散和抵抗变形能力,建议用于对抗震要求较高的节点。

2) 组 S-90°-45°C 的承载力和刚度相较于其他组较低,在实际工程中应用时可适当增加螺钉数量或减小螺钉间距。

## 参 考 文 献

- 陈志渊,王昕萌,党文杰,等. 2020. 斜螺钉钢板连接正交胶合木力学性能研究. 建筑技术, 51(3): 288-291.
- (Chen Z Y, Wang X M, Dang W J, *et al.* 2020. Study on performance of steel-to-timber joints with inclined self-tapping screws for cross-laminated timber structures. Architecture Technology, 51(3): 288-291. [in Chinese])
- 戈福芸,蔡雨,陈志坚,等. 2020. 斜螺钉连接的平行弦木桁架节点抗拔性能. 林业科学, 56(12): 136-144.
- (Ge X Y, Cai Y, Chen Z J, *et al.* 2020. Uplift resistant performance of the joint of the parallel chords wood truss connected with inclined screws. Scientia Silvae Sinicae, 56(12): 136-144. [in Chinese])
- 鹿相戎,滕启城,李哲瑞,等. 2020. 云杉胶合木钢板斜螺钉连接的剪切性能研究. 林业工程学报, 5(3): 48-53.
- (Lu X R, Teng Q C, Li Z R, *et al.* 2020. Study on shear property of spruce glulam and steel plate connected with inclined screw. Journal of Forestry Engineering, 5(3): 48-53. [in Chinese])
- 阙泽利,韩聪,滕启城,等. 2020. 斜螺钉连接胶合木梁柱节点抗

侧性能研究. 林产工业, 57(5): 34-40.

- (Que Z L, Han C, Teng Q C, *et al.* 2020. Study on anti-side performance of glulam beam-column joints with inclined screw. China Forest Products Industry, 57(5): 34-40. [in Chinese])
- 阙泽利,李哲瑞,王菲彬,等. 2017. 中高层木结构用正交胶合木 (CLT) 在欧洲的研究与发展现状. 建筑结构, 47(2): 75-80, 27.
- (Que Z L, Li Z R, Wang F B, *et al.* 2017. Review of research and development status of cross-laminated timber used by medium high-rise structure in Europe. Building Structure, 47(2): 75-80, 27. [in Chinese])
- 熊海贝,王治方,宋依洁. 2019. 高层正交胶合木-混凝土核心筒体系力学性能参数分析. 同济大学学报(自然科学版), 47(10): 1429-1436.
- (Xiong H B, Wang Z F, Song Y J. 2019. Parametric analysis on mechanical properties of high rise CLT-concrete core-tube system. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 47(10): 1429-1436. [in Chinese])
- 杨学兵,欧加加. 2018. 我国装配式木结构建筑体系发展趋势. 建设科技, (5): 6-11.
- (Yang X B, Ou J J. 2018. Development trend of prefabricated timber structure building system in China. Construction Science and Technology, (5): 6-11. [in Chinese])
- 岡部 実,安村 基,小林研治. 2011. CLT-木ねじ接合部の降伏理論適用のための支圧強度試験. 東京: 日本建築学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 295-296.
- (Raigo Okabe, Keji Amura, Kenji Kobayashi. 2011. A test of the tensile strength of CLT-wood thread joints using the yield theory. Tokyo: Introduction of Japanese Architectural Academic Lectures, Structure III, 295-296. [in Japanese])
- Bejtka I, Blaß H J. 2002. Joints with inclined screws. Proceedings from meeting thirty-five of the international council for building research studies and documentation, CIB, Working Commission W18-Timber Structure, Kyoto, Japan.
- Hossain A, Lakshman R, Tannert T. 2015. Shear connections with self-tapping-screws for cross-laminated timber panels. Portland: American Society of Civil Engineers, Proceedings of Structures Congress, 2251-2259.
- Teshnizi Z, Pilon A, Storey S, *et al.* 2018. Lessons learned from life cycle assessment and life cycle costing of two residential towers at the university of British Columbia. Procedia CIRP, 69: 172-177.
- Tomasi R, Crosatti A, Piazza M. 2010. Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws. Construction and Building Materials, 24(9): 1560-1571.
- Girhammar U A, Jacquier N, Källsner B. 2017. Stiffness model for inclined screws in shear-tension mode in timber-to-timber joints. Engineering Structures, 136: 580-595.

(责任编辑 石红青)