

自攻螺钉连接正交胶合木抗剪承载力研究

董惟群¹, 姚悦², 宋焕¹, 祁云扬¹, 任海青³, 王志强¹

(1. 南京林业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210037; 2. 苏州昆仑绿建木结构科技股份有限公司, 江苏苏州 215105;

3. 中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 采用自攻螺钉 (Self-tapping screw, STS) 连接正交胶合木 (Cross-laminated timber, CLT), 对 5 种不同参数的连接试件进行单调加载和分级加载试验, 测试其抗剪承载力。结果表明, 增加 STS 长度、直径, 可明显提高 CLT 连接试件的抗剪承载力; 钉入角度为 45° 比钉入角度 30° 时的抗剪承载力提高了 28.3%; 主侧材对接、STS 左右双向斜钉是一种较优的连接形式, 比搭接的抗剪承载力提高了 50.7%。

关键词: 自攻螺钉; 正交胶合木; 连接方式; 抗剪承载力

中图分类号: TS6; TU366.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654 (2018) 05-0001-05

Shear Strength of Cross-Laminated Timber Connected with Self-Tapping Screws

DONG Wei-qun¹, YAO Yue², SONG Huan¹, QI Yun-yang¹, REN Hai-qing³, WANG Zhi-qiang¹

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

2. Suzhou Crownhomes Co. Ltd., Suzhou 215105, Jiangsu, China;

3. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Based on monotonic loading and step loading test methods, shear strength of five types of cross-laminated timber (CLT) connected with self-tapping screws (STS) were tested. Testing results showed that increasing length and diameter of STS could significantly improve CLT shear strength. CLT shear strength with an STS 45 degree inclination angle was 28.3% higher than that of the CLT with an STS 30 degree inclination angle. The connection assembly with double fastener inclination showed a better shear strength, which was 50.7% higher than that with half-lapped joints.

Key words: self-tapping screws (STS); cross-laminated timber (CLT); connection forms; shear strength

正交胶合木 (Cross-laminated timber, CLT) 起源于欧洲, 是一种至少由 3 层实木锯材或结构复合板材正交组坯, 采用结构胶黏剂压制而成的新型工程木产品^[1]。随着中高层木结构建筑以及装配式建筑

的发展, CLT 的优势越发突显, 在国外已广泛应用于住宅和非住宅建筑。

近年来, 我国也逐步开展 CLT 的研究和应用推广, 主要研究内容包括 CLT 的生产工艺、滚动剪切性能, CLT 作为桥面板的力学性能, 以及国产树种 CLT 的力学性能等^[2-10]。随着 GB/T 51226-2017《多高层木结构建筑技术标准》的实施, CLT 作为承重构件在多高层木结构中的应用, 成为重要的研究方向。

多高层木结构构件的连接性能, 对整个建筑的结构性能有重要的影响, 是重要的研究内容之一。

收稿日期: 2018-03-03; 修改日期: 2018-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目“正交胶合木滚动剪切性能评价及影响机理研究”(31570559); 国家林业行业标准“木结构用自攻螺钉”(2018-LY-172)。

作者简介: 董惟群 (1993—), 男, 南京林业大学硕士研究生。

责任作者: 王志强, 男, 南京林业大学教授。

由于产品形式、功能和用途与其他工程木不同, CLT 建筑的连接方式, 与轻型木结构、普通木结构等建筑有明显区别。

目前, CLT 楼盖、墙体构件之间的连接方式主要有: 内部连接片连接, 单、双侧表面连接片连接、搭接并使用自攻螺钉 (Self-tapping screw, STS) 等, 这些连接方式往往需要对 CLT 构件进行开槽等二次加工。新型结构连接用自攻螺钉 STS, 具有无需预钻孔、轴向抗拉强度高、螺纹长度达 1.5 m 等特点, 欧洲、北美等地区已展开将 STS 斜向钉入连接 CLT 或胶合木等重型木构件的研究和应用, STS 产品种类和连接性能设计值等参数均有详细说明^[11-13]。

为简化连接工艺, 笔者对 CLT 构件采用直接对接和 STS 双向斜钉的方式进行连接, 分析 STS 长度、直径和钉入角度对 CLT 构件连接性能的影响, 以期 STS 在 CLT 建筑中的应用提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 规格材: 云杉-松-冷杉 (Spruce-Pine-Fir, SPF), 产地加拿大, 等级为 J 级, 规格为 38 mm×89 mm×2 440 mm, 共 59 根, 平均密度 0.46 g/cm³, 平均含水率 13.8%。

2) 自攻螺钉: 半螺纹, 材质为低碳钢, 型号 0078B。螺纹外径有 6、8 mm 两种, 钉长度有 120、140 mm 两种, 上海美国澄梵紧固件有限公司生产。其参数:

STS-8-120、STS-8-140、STS-6-140 的轴向抗拉强度分别为 1 236、960、1 123 MPa, 抗弯屈服强度分别为 1 064、986、982 MPa。

3) 胶黏剂: HB S709 单组份聚氨酯, 固体含量 100%, 黏度 24 Pa·s。外购。

1.2 试验设备及仪器

万能力学试验机、数据采集仪、位移计等。

1.3 试验方法

1.3.1 CLT 压制

压制 3 层结构 CLT 试板, 根据胶黏剂说明书及 CLT 前期研究^[3-4], 设置工艺参数为:

施胶量 (单面) 220 g/m²; 上下表面施加压力 1.0 MPa, 侧面不加压; 室温下加压时间 3 h。

压制的 CLT 试板规格为: 114 mm×178 mm×1 800 mm, 共 13 根。将 CLT 试板进行横截与纵剖, 加工成 2 种规格的试样, 分别为: 114 mm×178 mm×430 mm (主材) 和 114 mm×89 mm×430 mm (侧材), 数量分别为 25 个和 50 个。

1.3.2 连接构件设计

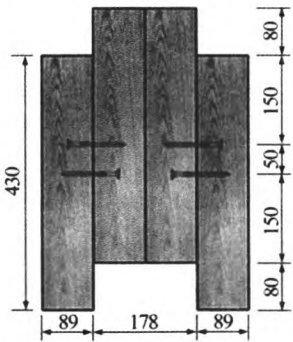
采用 STS 对称单剪形式, 连接 CLT 主材与侧材, 主、侧材之间对接, 并以搭接作为对照组。根据 STS 在 CLT 中的实际应用及相关研究^[11-13], 共设置 5 组连接形式 (表 1)。

表 1 自攻螺钉连接 CLT 的参数及连接形式
Tab.1 Parameters of self-tapping screws on CLT and joint forms

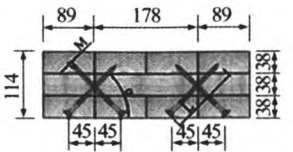
组别	直径 M/mm	长度 L/mm	钉入角度 $\alpha/^\circ$	主侧材拼接形式
A	8	120	45	对接
B	8	140	45	对接
C	8	140	30	对接
D	6	140	45	对接
E	8	140	45	搭接

注: 钉入角度指自攻螺钉轴向与钉入板面之间的夹角。

主、侧材对接的试件 (A~D 组), 采用左右双向交错的两根 STS 斜向钉入, 结构与尺寸如图 1a 所示; 而对照组主、侧材搭接的试件 (E 组), 采用上下双向交错的两根 STS 斜向钉入, 相应参数如图 1b 所示。所有 STS 从试件的同一面钉入。

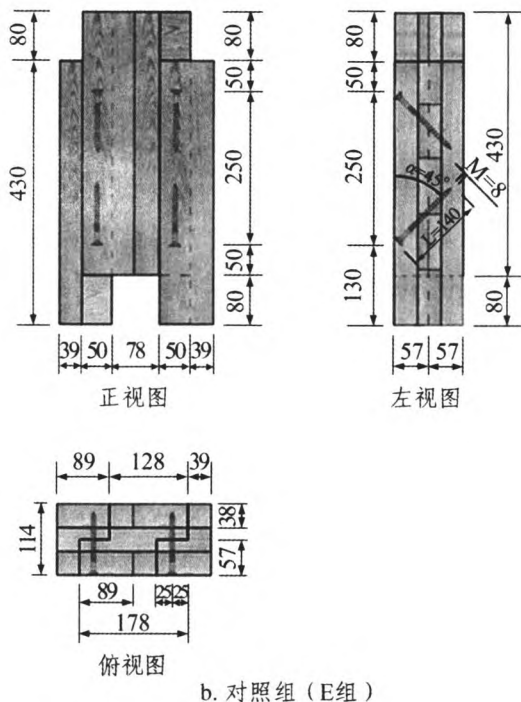


正视图



俯视图

a. 对接组 (A~D 组)



b. 对照组 (E 组)

注: 图中尺寸单位为 mm。

图 1 剪切试件的结构与尺寸

Fig.1 Structure and size of CLT shear strength

STS 的端距、边距和间距按 GB 50005-2003《木结构设计规范》和欧洲 ETA-11/0190-2013“Self-tapping screws for use in timber constructions”要求设置。每组 5 个试件。

1.4 抗剪性能测试

参考欧洲标准 EN 26891-1991“Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics”进行测试。

首先从每组中选择 1 个试件进行单调匀速加载至破坏, 加载速度为 4 mm/min, 测出最大荷载值 $P_{\max}$, 将其作为最大荷载预估值 P_{est} , 其余 4 个剪切试件采用分级加载:

- 1) 以 $0.2 P_{\text{est}}/\text{min} \pm 25\%$ 的速度, 匀速加载至 $0.4 P_{\text{est}}$, 保持 30 s; 荷载匀速卸载至 $0.1 P_{\text{est}}$, 保持 30 s;
- 2) 使用 $0.2 P_{\text{est}}/\text{min} \pm 25\%$ 的速度, 匀速加载至 $0.7 P_{\text{est}}$; $>0.7 P_{\text{est}}$ 以后, 3~5 min 内匀速加载至最大荷载, 或位移达到 70 mm 时停止试验。

测试总时间控制在 10~15 min, 记录整个过程的最大荷载, 即为 STS 连接 CLT 试件的抗剪承载力, 观察并记录木材及 STS 破坏现象。

2 结果与分析

2.1 荷载-位移曲线

单调加载方式的荷载-位移曲线见图 2a。与 STS 连接轻钢结构时相似^[14], 加载过程可以分为 3 个阶段: 1) 弹性阶段, 荷载-位移曲线呈线性变化, 荷载增加快; 2) 弹塑性阶段, 直到极限承载力状态, 非线性特征主要是因为 STS 的屈服, 以及 STS 对木材造成的局压破坏、钉帽拉穿破坏。从弹性阶段至弹塑性阶段没有很明显的拐点; 3) 下降阶段, 直至试件破坏, STS 螺纹段拔出区域、钉帽拉穿区域的木材均出现了较大破坏。

分级加载方式的荷载-位移曲线见图 2b。以 B 组试件为例, 分级加载与单调加载破坏不同的是在荷载加至 $0.4 P_{\text{est}}$ 保持 30 s、并匀速卸载至 $0.1 P_{\text{est}}$ 的过程中, 试件本身受到的荷载减少, STS 处于弹性形变, 试件发生一定回弹, 位移减少, 此阶段为卸载回弹阶段。其余阶段与单调加载方式第 2、3 阶段相似。

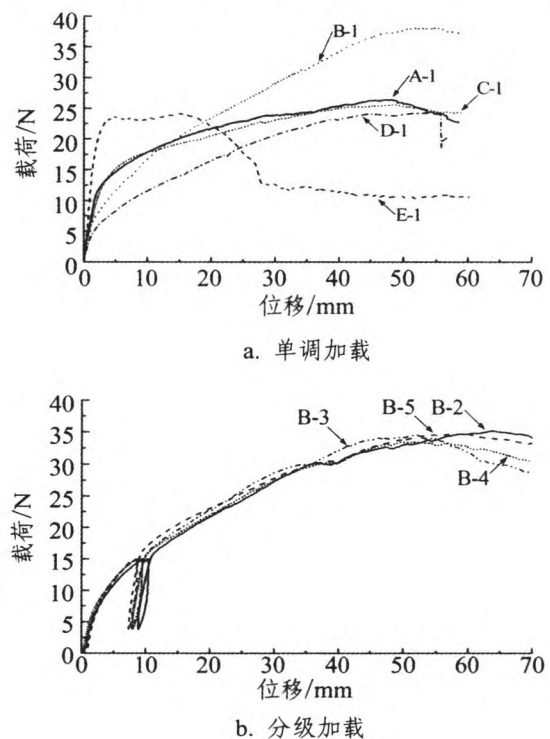


图 2 CLT 抗剪试件荷载-位移曲线

Fig.2 Load-deformation of CLT shear strength

比较 B 组 (对接) 和 E 组 (搭接) 的荷载-位移曲线 (图 3) 可见, E 组试件在分级加载过程中, 弹性阶段更为明显, 弹塑性阶段较短, 在位移很小时即达到极限承载力; 而 B 组试件允许的相对位移较

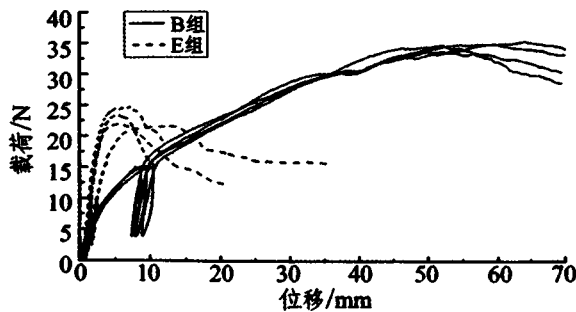


图3 B组和E组CLT抗剪试件荷载-位移曲线
Fig.3 Load-deformation of groups B and E

大,表现出极高的延性。可能是由于在加载前期的弹性阶段,CLT材料之间的搭接提供了较好的承载性能,降低了构件之间的位移;而在加载后期阶段,构件连接的承载能力主要由STS承担,左右双向交错、斜向钉入的方式,表现了较好的承载能力和延性。

2.2 抗剪性能及其影响因素

所有试件的抗剪承载力测试结果列于表2。可以看出,不同连接参数试件的抗剪承载力有较大差别。

表2 不同STS连接CLT试件的抗剪承载力
Tab.2 Shear strength of CLT with different STS connection forms

加载制度	组别	数量/个	抗剪承载力/kN	变异系数/%
单调加载	A	1	26.4	-
	B	1	38.1	-
	C	1	25.5	-
	D	1	24.3	-
	E	1	24.2	-
分级加载	A	4	24.3	7.69
	B	4	34.5	2.15
	C	4	26.9	20.95
	D	4	23.6	7.11
	E	4	22.9	6.42

2.2.1 STS长度的影响

A组和B组试件采用不同长度的STS连接。使用较长STS(140 mm)连接的B组试件,抗剪承载力平均值比A组提高42.0%。这主要是因为STS在抗剪过程中,较长的STS在木材中承压面积更大,较难屈服;由于受拉力和剪力作用而产生的变形更大,使之在主侧材相对位移不断增大的过程中,钉入木材的部分更长,较难被拔出。因此,在连接CLT时,在板材厚度允许的情况下,增加STS的长度,可以提高构件的抗剪承载力。

2.2.2 STS钉入角度的影响

B组和C组试件采用相同长度(140 mm)的STS,以不同钉入角度连接。钉入角度较大(45°)的B组试件,其抗剪承载力平均值比C组试件(30°)提高28.3%。主要原因是,钉入角度较小时,STS钉入木材的深度变浅,即与木材表面距离较近,在抗剪试验中,更容易发生螺纹段拉出和钉帽拉穿破坏。因此,STS钉入角度为45°左右时抗剪承载力较高。

2.2.3 STS直径的影响

B组和D组试件采用不同直径的STS连接。直径相对较大的B组试件(8 mm),抗剪承载力平均值比D组试件(6 mm)提高46.2%。主要是因为直径大的STS在加载过程中更难屈服,因此,选用直径较大的STS,可以提高CLT构件的抗剪承载力。

2.2.4 主侧材拼接形式影响

从表2结果可知,B组试件(对接)的抗剪承载力平均值,比对照组E组(搭接)提高了50.7%。同尺寸STS在E组试件中极限承载力偏小,主要是因为是在搭接方式下,STS沿荷载方向上下交叉45°连接布置,导致上下两根STS所提供的抗剪承载能力不同。其中沿荷载方向自上而下45°钉入的STS,破坏主要是螺纹段拉出,STS弯曲较小;自下而上45°钉入的STS破坏比较严重,螺纹段被拔出,弯折角度大,甚至有的被“剪断”。

2.3 破坏模式

CLT抗剪试件主要破坏模式包括:STS钉帽拉穿破坏、STS螺纹部分拔出破坏、STS断裂破坏和STS周围木材承压、剪切劈裂破坏,如图4a、b、c和d^[11-13, 15]。STS钉帽拉穿破坏是指STS斜向拉穿CLT抗剪试件侧材,CLT钉帽拉穿破坏处侧材劈裂明显,如图4d。

木材劈裂主要是由于STS钉帽在加载过程中对木材周围产生环向应力所致,当应力超过木材横纹剪切强度时发生劈裂。STS在加载过程中与周围木材滑移摩擦,周围木材纤维被剪断,因此,在试验中伴随着木材撕裂的声音。

A组试件使用STS较短,螺纹段提供的握钉力较小,试件以STS拔出破坏为主,且STS只从CLT板一面钉入,使之在STS受剪时前后两个面受力不均,发生平面外偏转较大。

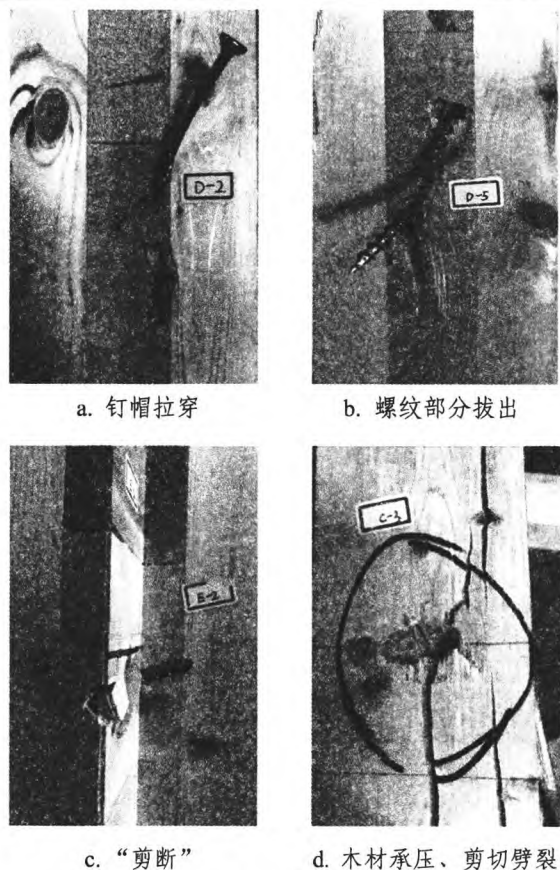


图4 STS连接CLT抗剪试件的破坏模式

Fig.4 Shear failure modes of CLT specimens connected with STS

B组试件使用STS较长,螺纹部分钉入CLT内深度更长,所能提供的握钉力更大,出现STS螺纹段拔出破坏、钉帽拉穿破坏两种破坏模式,发生平面外偏转较小。

C组试件以STS钉帽拉穿破坏为主,由于钉入角度小,且钉帽所能提供的“拉力”较小,STS受剪滑移将钉帽拉出,钉帽周围木材破坏较大。

D组试件也以STS钉帽拉穿破坏为主,钉帽拉出周围木材撕裂。

E组试件是CLT建筑中常用的连接方式,主要破坏模式是上部STS螺纹段被拔出、下部STS被“剪断”,由于下部STS斜向上45°连接,在受剪过程中弯折更大,也更易被“剪断”。

3 结论

1) STS以45°角度斜向钉入连接CLT,具有较好的钉入深度,可防止螺纹段拉出和钉帽拉穿破坏,提高CLT构件的抗剪承载力。

2) STS直径和长度增加,可以提高STS的屈服强度以及在木材中的承压面积,从而提高CLT构件的抗剪承载力。

3) STS连接CLT主要的破坏模式为:STS钉帽拉穿破坏、STS螺纹部分拔出破坏、STS断裂破坏和STS周围木材承压、剪切劈裂破坏。

4) 采用CLT主侧材对接、左右双向交错的STS斜向钉入的连接方式,具有不需要二次开槽加工、抗剪延性好和承载能力强的优点。

致谢:感谢上海美国澄梵紧固件有限公司为本试验提供自攻螺钉试验材料。

参考文献:

- [1] Sylvain Ggnon, E M (Ted) Bilek, Lisa Podsto, et al. CLT Handbook: cross-laminated timber [M]. USA: FPInnovation, 2012.
- [2] Wang Z, Gong M, Chui Y H. Mechanical properties of laminated strand lumber and hybrid cross-laminated timber [J]. Construction & Building Materials, 2015, 101: 622-627.
- [3] 王志强, 罗冬, 郑维, 等. 混合结构对正交胶合木剪力墙抗侧性能的影响[J]. 林业工程学报, 2017, 2(2): 145-151.
- [4] 王志强, 付红梅, 陈银慧. 锯材/单板层积材混合正交胶合木力学性能研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(8): 121-124.
- [5] 龚迎春, 田兆鹏, 徐俊华, 等. 国产日本落叶松正交胶合木抗弯弹性模量评价方法[J]. 木材工业, 2018, 32(3): 1-4.
- [6] 王建和, 卫佩行, 高子震, 等. 加拿大西部铁杉正交胶合木胶合性能与耐久性初探[J]. 林产工业, 2017, 44(4): 12-15.
- [7] 赵邦林, 王立彬. 现代木结构桥梁SLT桥面板与CLT桥面板性能对比[J]. 林产工业, 2017, 44(11): 29-33.
- [8] 王韵璐, 曹瑜, 王正, 等. 加拿大铁杉正交胶合木弯曲性能预测与评估[J]. 林产工业, 2017, 44(7): 15-20.
- [9] 杨学兵. 高层木结构发展现状及其我国相关标准浅析[J]. 木材工业, 2017, 31(4): 24-27.
- [10] 阙泽利, 李哲瑞, 姜桂超, 等. 交叉层积材(CLT)的开发应用及发展前景[J]. 木材工业, 2015, 29(6): 22-26.
- [11] Hossain A, Danzig I, Tannert T. Cross-laminated timber shear connections with double-angled self-tapping screw assemblies[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(11): 04016099.
- [12] Hossain A, Popovski M, Tannert T. Static and cyclic performance of shear connections with self-tapping-screws for cross-laminated-timber panels[C]. World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 2017.
- [13] Kyle Sullivan. Behavior of cross-laminated timber diaphragm panel-to-panel connections with self-tapping screws[D]. Oregon State University, 2017.
- [14] 徐海平, 刘楠. 自攻螺钉连接抗剪性能及其设计方法研究[J]. 建筑结构, 2013(s2): 505-508.
- [15] Fueyo J L G, Dominguez M, Cabezas J A, et al. Design of connections with metal dowel-type fasteners in double shear[J]. Materials & Structures, 2009, 42(3): 385-397.

(责任编辑 向琴)