

轻型木结构中覆面板钉连接承载性能试验研究

陈志勇, 祝恩淳, 潘景龙

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要:通过对 222 个采用中国产圆钢钉制作的轻型木结构覆面板钉连接试件进行单调加载试验, 研究了它们的承载性能。试验结果表明, 钉连接发生模式 M-c₁ 屈服、覆面板断裂、覆面板剪坏、规格材撕裂和钉子穿透等 5 种破坏; 直钉连接的承载力比斜钉高, 而两者刚度基本相同; 覆面板主方向与规格材木纹夹角对钉连接承载力和刚度的影响很小; 荷载方向与规格材木纹夹角影响钉连接的刚度, 但不影响其承载力。通过与欧洲木结构设计规范钉连接计算公式的分析对比, 获得了符合中国轻型木结构覆面板钉连接的刚度计算公式, 为计算分析剪力墙和横隔(楼盖和屋盖)的抗侧力性能提供参考。

关键词:轻型木结构; 钉连接; 承载性能; 试验

中图分类号: TU 366.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)06-0047-08

Experimental Analysis on the Behavior of Panel-to-lumber Nailed Joints in Light Wood Frame Construction

CHEN Zhi-yong, ZHU En-chun, PAN Jing-long

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China)

Abstract: To study their resistance performance, totally 222 specimens of panel-to-lumber nailed joints, in different configurations and used in light wood frame construction, were manufactured and tested under monotonic load. There are five kinds of destruction produced with nailed joints, which are model M-c₁, rupture of panel, shear failure of panel, wood tear-off and push-through of nail. The resistance of nailed joints with vertical nailing is higher than that with toe-nailing, while the stiffness is almost the same. The angle between the panel orientation and dimension lumber wood grain affects the resistance and the stiffness of nailed joints little, while the angle between loading and dimension lumber wood grain affects the stiffness but not the resistance. The empirical equations to calculate the stiffness of the nailed joints are derived, thus providing reference for evaluating the performance of shear walls and diaphragm (floor and roof) in design of light wood frame structures.

Key words: light wood frame construction; nailed joints; lateral loading performance; test

木材是天然绿色的建筑材料, 由其建造的轻型木结构房屋具有施工快捷、构造简单、节能美观及抗震性能好等优点。因此, 轻型木结构住宅在欧洲、美洲和亚洲的多个国家和地区得到广泛应用。中国木结构经 19 世纪 80—90 年代短暂的停歇后, 在 20 世

纪之交再度复兴起来, 尤以北京、上海、苏州及成都等地区建造的轻型木结构建筑为一大热点。

轻型木结构 (Light wood frame construction) 是由规格材和木基结构板材钉合而成的剪力墙和横隔(楼盖和屋盖)组合而成^[1], 因此钉连接的侧向抗

收稿日期: 2010-03-09

作者简介: 陈志勇(1981-), 男, 博士生, 主要从事木结构研究, (E-mail) zhiyong_chen@hit.edu.cn;

祝恩淳(联系人), 男, 博士生导师, 主要从事木结构研究, (E-mail) e. c. zhu@hit.edu.cn.

剪承载性能是轻型木结构抵抗水平荷载的关键问题。1949年, Johansen^[2]提出了用于计算销连接承载力的“屈服理论”(Yield Theory),之后 Möller^[3]将该理论推广到钉连接的多种连接形式的承载力计算中。Siimes^[4]、Mack^[5]、Aune^[6]、Larsen^[7]和 Norén^[8]等分别先后通过大量试验验证了“屈服理论”的适用性,并将其应用到各国木结构设计规范中。Aune^[9-10]、Jorissen^[11]、Blass^[12-13]、Steve^[14]、Chui^[15]、Hirai^[16]和 Johansson^[17]等从试件形式、群销效应、楔入效应或施工工艺等方面研究了连接形式对钉连接承载性能的影响; Dolan^[18]、Dujic^[19]、David^[20]、Kuilen^[21]、Robert^[22]、Hirai^[16]、Nakajima^[23]和 Scott^[24]等从反复荷载作用、荷载持续作用或环境因素等方面对钉连接承载性能衰退效应进行了研究; David等^[25]研究了钉连接在侧向荷载和拔出荷载共同作用下的工作机理; Larsen^[26]、Kuipers^[27]、Douglas^[28]、David^[25]和 Dujic^[19]等通过试验对其他连接形式和钉连接的承载性能进行了对比。

既有钉连接的试验分析和理论研究,大都基于具有足够边距和端距的直钉钉连接试件的侧向抗剪试验^[29],但轻型木结构的覆面板钉连接往往并不满足设计规范^[30-31]对其边距或端距的要求,尤其是两块覆面板共用一根规格材(墙骨或搁栅)时采用斜钉方式的情况。因此,该文参考工程实际设计制作了16组共222个具有轻型木结构覆面板钉连接构造特点的试件,通过单调加载试验研究揭示了钉入方式、覆面板主方向与规格材木纹夹角 α 、及荷载方向与规格材木纹夹角 θ 等因素对钉连接承载性能的影响规律,并与欧洲木结构设计规范 EC5^[31]钉连接计算公式的计算结果进行对比分析,通过增加角度修正项得到了适合中国工程轻型木结构覆面板钉连接刚度的计算公式,为计算分析剪力墙和横隔(楼盖和屋盖)的抗侧力性能提供参考。

1 钉连接侧向抗剪试验

1.1 试件材料

根据中国 GB 50005-2003^[30]《木结构设计规范》的规定和当前工程实践,轻型木结构中覆面板和

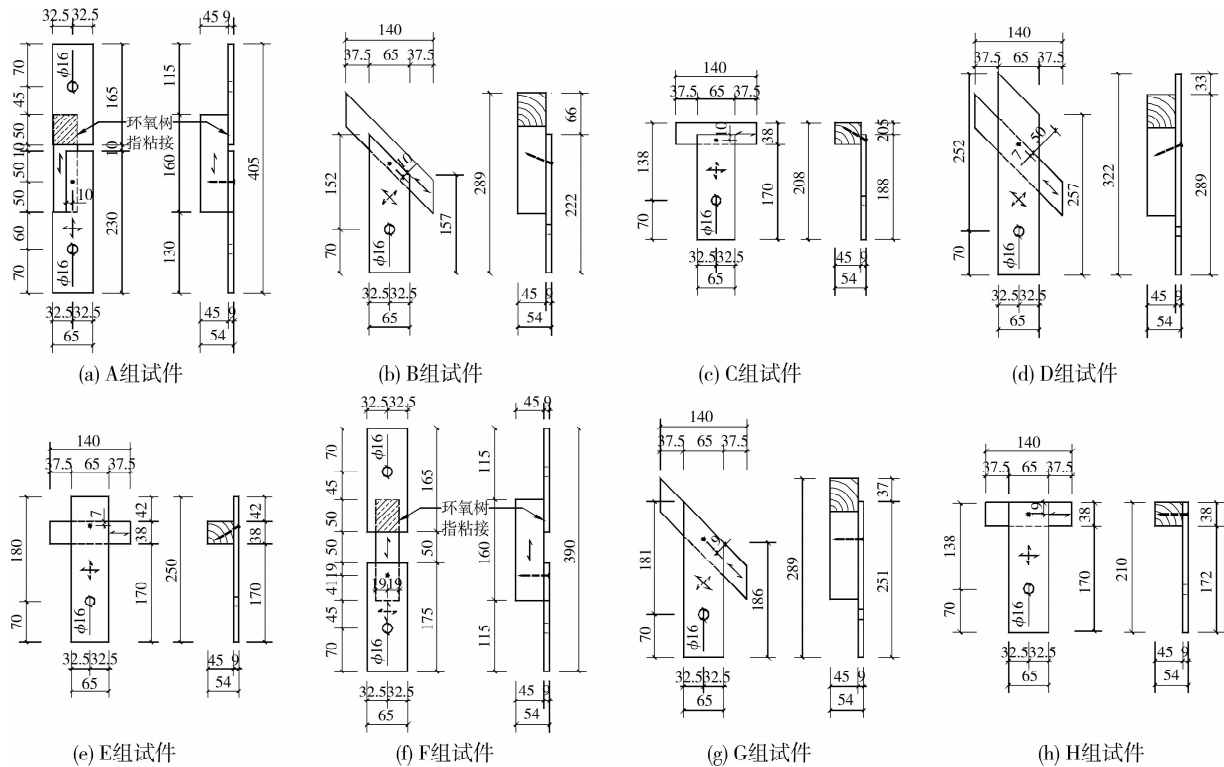
规格材之间的钉连接最常用直径为 2.8 mm、长度为 50 mm 的 2 寸普通圆钢钉。从市场购得钉子的平均实测直径为 2.92 mm,平均弯曲屈服强度为 802 MPa,平均抗拉强度为 1 007 MPa。覆面板采用北美进口厚度为 9.5 mm 的定向木片板(OSB),实测平均含水率(MC)为 10.7%,平均气干密度(MC=12%)为 620 kg/m³。规格材选用截面尺寸为 38 mm×89 mm 北美进口 II 级云杉-松-冷杉(S-P-F),实测平均含水率为 13.8%,平均气干密度(MC=12%)为 440 kg/m³。

1.2 试件设计与制作

在轻型木结构中,剪力墙和横隔(楼盖和屋盖)通常是由规格材构成框架,再覆以木基结构板材(结构胶合板或 OSB)作面板,覆面板与规格材用钉子按一定间距钉结。由于规格材截面宽度为 38 mm,沿剪力墙和横隔周边覆面板钉连接的边距或端距即为 19 mm;当两块覆面板与同一根规格材连接时,钉子在覆面板的边距或端距为 10 mm,而在规格材的则为 7 mm,且需斜钉连接。这都比 GB 50005-2003^[30]对直径为 2.92 mm 钉子的最小边距(11.68 mm)和端距(43.8 mm)要求低。当剪力墙或横隔受面内水平荷载作用时,覆面板上各点钉连接的荷载方向与规格材木纹夹角 θ 均不相同。欧洲木结构设计规范 EC5^[31]规定木结构普通钉连接的边距和端距不得小于 $(3+4\sin\theta)$ 倍钉子直径。由此可知,只有当夹角 θ 小于 6.1°时其最小边距和端距才不大于 10 mm,然而大部分覆面板钉连接的夹角 θ 都大于 6.1°,不能满足最小边距和端距的要求。因此,为考察实际工程中钉连接的承载性能,设计制作了两类试件进行单调加载试验。第 1 类试件:采用斜钉方式,钉连接边距或端距为 10 mm,按荷载方向与规格材木纹夹角 θ 分为 0°、45°、90°、-45°和-90°共 5 大组(如图 1 所示),每大组有 30 个试件。第 2 类试件:采用直钉方式,钉连接边距或端距为 19 mm,按夹角 θ 分为 0°、45°和 90°3 大组(如图 1 所示),每大组有 24 个试件。以上 8 大组试件又分覆面板主方向与规格材木纹平行(I 型)和垂直(II 型)两种情况,即共有 16 组 222 个试件,试件参数详见表 1,各组试件形式如图 2 所示。

表 1 钉连接试件参数设计

试件组别	AI	AII	BI	BII	CI	CII	DI	DII	EI	EII	FI	FII	GI	GII	HI	HII
钉入方式	斜	斜	斜	斜	斜	斜	斜	斜	斜	斜	直	直	直	直	直	直
边距或端距/mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	19	19	19	19	19	19
荷载方向与规格材木纹夹角 $\theta/(^\circ)$	0	0	45	45	90	90	-45	-45	-90	-90	0	0	45	45	90	90
覆面板主方向与规格材木纹夹角 $\alpha/(^\circ)$	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90
试件数量/件	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	12	12	12	12	12	12



(规格材上的双向箭头表示木纹方向,而覆面板上的实线和虚线两种双向箭头分别表示 I 型和 II 型试件的覆面板主方向)

图 2 钉连接试件形式

为避免含水率的影响,先将切割好的覆面板与规格材放置于标准环境(温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $65\% \pm 5\%$)的人工气候室中养护,直至含水率达到平衡后再钉合成试件。

1.3 试验方案和装置

中国尚无钉连接侧向抗剪试验方法标准,故参考国际上常用的 3 个试验标准 ASTM D1761^[32]、EN26891^[33]和 NT Build 133^[34],制定了试验方法和研制了加载夹具(如图 3 所示)^[35]。图 3(a)、(b)和 (c)分别为进行荷载方向与规格材木纹夹角 $\theta = 0^{\circ}$ 、 $\pm 45^{\circ}$ 和 $\pm 90^{\circ}$ 的钉连接侧向抗剪试验的加载夹具。为使试件尽可能地接近实际工程中轻型木结构的使用与受力特点,将钉合好的试件存放在标准环境的人工气候室中养护 2 周,然后在具有同样温湿度环境的实验室内进行钉连接侧向抗剪试验。试验时,将钉连接试件、力传感器和百分表安装到加载夹具上并连通采集系统后,如图 3 所示,以 2.50 mm/min 匀速加载,至荷载降到最大荷载 P_{\max} 的 80% 时停止加载。试验表明,该试验方法及加载夹具是有效和可靠的。

2 试验结果

2.1 覆面板钉连接的破坏模式

钉连接的承载力与其屈服破坏模式^[2]密切相

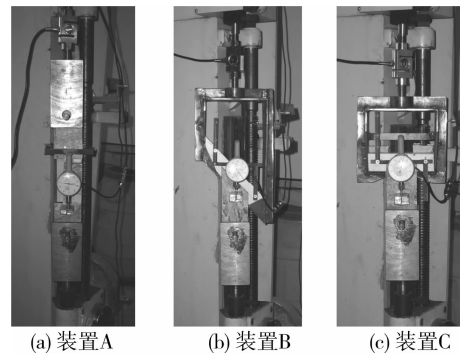


图 3 钉连接试验装置

关,根据主、边材的厚度及销槽承压强度和钉子直径及抗弯强度等因素的关系,单剪钉连接共有 6 种屈服模式(如图 4 所示)^[31]:M-a₁(钉杆与主材未屈服而边材屈服)、M-a₂(钉杆与边材未屈服而主材屈服)、M-b(钉杆未屈服而主、边材都屈服)、M-c₁(钉杆屈服出现 1 个塑性铰,边材屈服而主材部分屈服)、M-c₂(钉杆屈服出现 1 个塑性铰,主材屈服而边材部分屈服)和 M-d(钉杆屈服出现 2 个塑性铰,主、边材部分屈服)。根据钉连接试件所用材料特性,按欧洲木结构设计规范 EC5^[31]钉连接承载力公式预测,该文所有试件的屈服模式均应为 M-c₁。从破坏试件中取出钉子,其屈服形态如图 5 所示。可见,95% 以上钉连接试件的屈服模式为 M-c₁,尚

有不足 5% 的试件以 M-d 模式屈服。由此再次验证了 EC5^[31] 钉连接设计公式能基本反映钉连接承载力与材料性能间的关系。

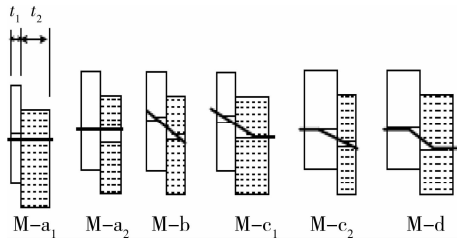


图 4 钉连接屈服破坏模式

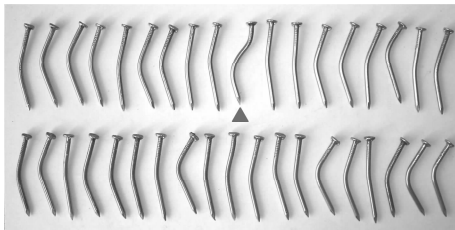
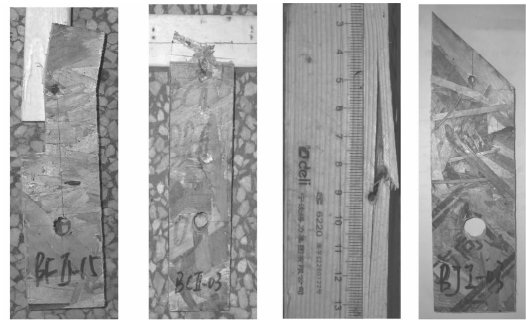


图 5 部分钉连接试件的钉子屈服破坏模式

然而, A 组试件由于其覆面板边距(10 mm)太小, 个别试件在连接屈服前发生覆面板断裂破坏, 如图(6a)所示; B 组和 C 组试件因其覆面板或规格材端距(10 mm)太小, 较多试件在连接屈服前发生覆面板剪坏或规格材撕裂两种脆性破坏, 如图 6(b)和 6(c)所示; 个别

钉连接钉子的钉帽直径偏小, 致使覆面板在钉帽下局部承压破坏而发生钉子穿透, 如图(6d)所示。



(a)覆面板断裂 (b)覆面板剪坏 (c)规格材撕裂 (d)钉子穿透

图 6 钉连接其他破坏形式

2.2 荷载—滑移曲线

图 7 为 16 组钉连接侧向抗剪试验的荷载—滑移曲线。由图可见, 钉连接在受力初始阶段的荷载和滑移关系表现为近似线弹性, 然后进入屈服强化阶段, 除 B、C 两大组试件塑性变形较小且因覆面板剪坏(如图 6(b)所示)或规格材撕裂(如图 6(c)所示)而在达到最大荷载后立即失去承载力外, 其它 6 大组试件塑性变形较大且在达到最大荷载后逐渐失去承载力。

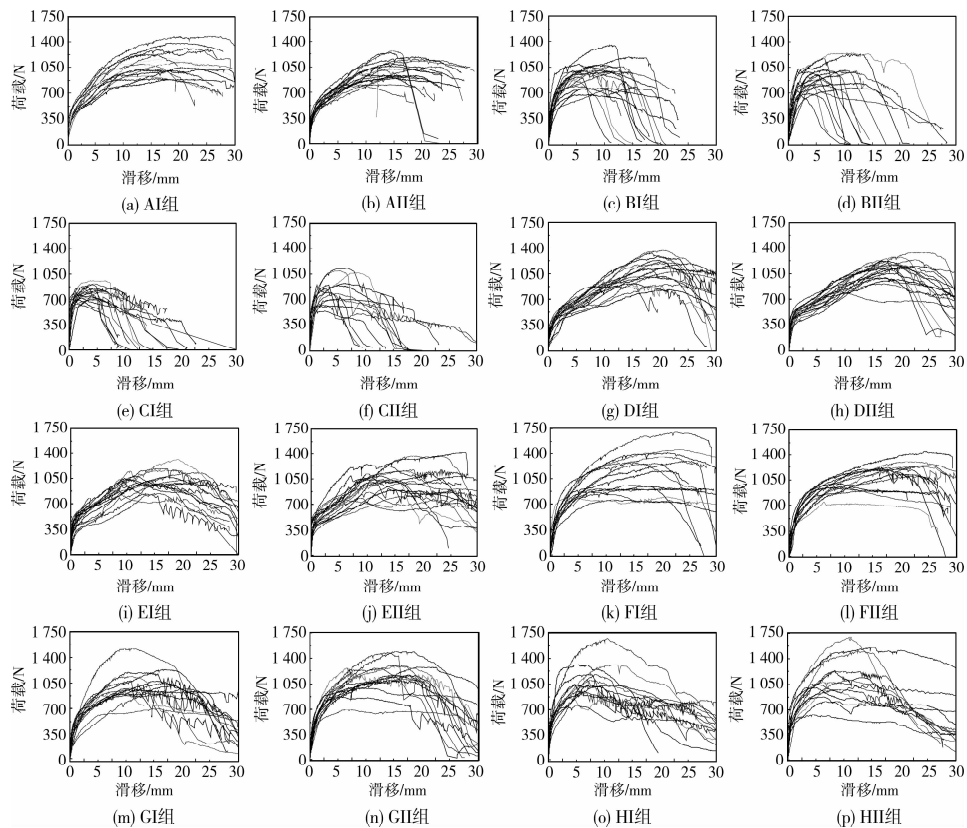


图 7 钉连接侧向抗剪试验荷载—滑移曲线

3 试验结果分析

3.1 承载力和刚度定义

按 EN26891^[33] 的规定,取荷载值分别为 10% P_{max} 和 40% P_{max} 两点间的割线斜率为钉连接的刚度 K ;参考 NT Build 133^[34] 将钉连接在滑移不大于 7.62 mm(0.3 in.) 时的最大荷载定义为钉连接的承载力 P_y ,如图 8 所示。

试验结果与国际上几本主要木结构设计规范的钉连接承载力和刚度计算公式^[36] 比较,发现与欧洲木结构设计规范 EC5^[31] 的计算结果吻合最好,详见表 2。表中实测承载力与计算值接近,而实测刚度除荷载方向垂直于规格材木纹方向($\theta = 90^\circ$)时稍大于计算刚度外,其他情况皆小于计算刚度,这是因为试件钉合后并未立即进行加载试验,而是放置了

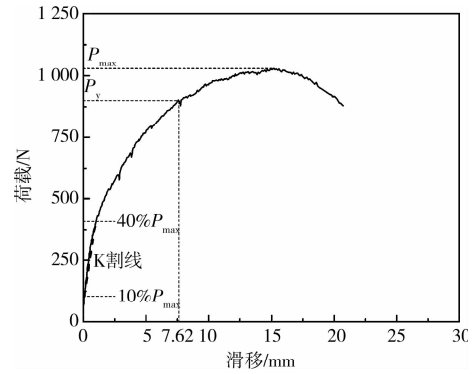


图 8 钉连接刚度 K 和承载力 P_y 定义示意图

14 d 后再进行试验,使钉连接的销槽承压应力松弛从而导致钉连接刚度降低^[37]。这体现了试件放置时间对钉连接刚度的显著影响^[35]。

表 2 钉连接承载力和刚度统计

试件组别	AI	AII	BI	BII	CI	CII	DI	DII	EI	EII	FI	FII	GI	GII	HI	HII
实测承载力 \bar{P}_y^* /N	867	906	912	907	860	847	794	763	856	841	1003	975	1002	966	1123	1097
变异系数/%	9.4	8.2	18.8	12.6	22.8	9.2	11.1	13.0	22.1	14.4	17.2	7.1	16.2	12.1	17.3	24.2
计算承载力 \bar{P}_{ser}^* /N	829	842	825	827	838	821	842	822	832	829	863	866	868	863	866	865
实测刚度 \bar{K}^* /($N \cdot mm^{-1}$)	448	432	794	643	993	922	453	406	556	500	455	449	506	483	1135	1077
变异系数/%	24.1	18.4	42.8	40.9	38.1	37.9	44.1	79.8	11.9	47.0	27.6	25.4	39.9	30.7	32.1	46.4
计算刚度 \bar{K}_{ser}^* /($N \cdot mm^{-1}$)	938	962	936	927	959	926	958	923	949	933	1020	1022	1023	1021	1026	1025

* - \bar{P}_y 与 \bar{K} 分别为每组试件的实测承载力和刚度平均值;

* - \bar{P}_{ser} 与 \bar{K}_{ser} 分别由欧洲木结构设计规范 EC5^[31] 钉连接设计公式计算得到的承载力和刚度。

3.2 钉连接的承载力

为分析荷载方向与规格材木纹夹角 θ 、钉入方式、覆面板主方向与规格材木纹夹角 α 等因素对钉连接承载力的影响,将实测承载力 (P_y) 除以由欧洲木结构设计规范 EC5^[31] 钉连接计算公式得到的承载力 (P_{ser}),即得 P_y/P_{ser} ,此比值与夹角 θ 的关系如图 9 所示。图中,荷载方向与规格材木纹夹角 $\theta = 315^\circ$ 和 270° 分别为 $\theta = -45^\circ$ 和 -90° 的情况。因 $\theta = 135^\circ$ 、 180° 和 225° 的钉连接形式分别与 $\theta = 45^\circ$ 、 0° 和 -45° 的钉连接试件相同(如图 1 所示),故前者承载力与后者相同。

荷载方向与规格材木纹夹角 θ 的影响 由图 9 可见,斜钉和直钉各种 θ 情况的承载力比 (P_y/P_{ser}) 的连线基本呈圆形和半圆形,表明钉连接的承载力基本不受夹角 θ 的影响。

钉入方式及覆面板主方向与规格材木纹夹角 α 的影响 由表 2 和图 9 可知,直钉试件的承载力比值 (P_y/P_{ser}) 平均比斜钉试件约大 14.2%,即直钉连

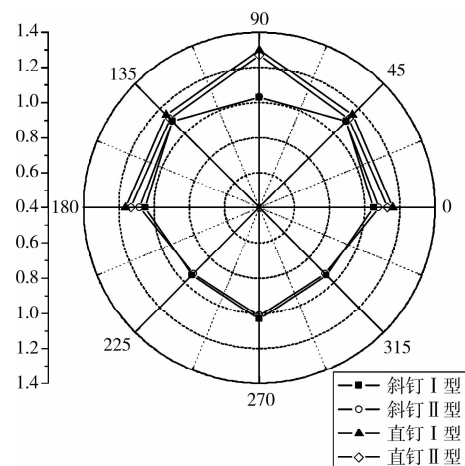


图 9 钉连接承载力 P_y/P_{ser} 比与夹角 θ 的关系

接承载力比斜钉连接的高。无论是斜钉还是直钉试件,其 I 类试件(覆面板主方向与规格材木纹夹角 $\alpha = 0^\circ$) 的 P_y/P_{ser} 比 II 类试件($\alpha = 90^\circ$) 的稍大,但不超过 5%,故夹角 α 的影响可忽略不计。同时,与文献[35]中放置 7 d 的试件比较,其覆面板主方向

垂直于规格材木纹的试件的承载力为平行时的 91.6%，由此可知，夹角 α 对钉连接承载力的影响随试件放置时间的增加而减小。

3.3 钉连接的刚度

为分析荷载方向与规格材木纹夹角 θ 、钉入方式、覆面板主方向与规格材木纹夹角 α 等因素对钉连接刚度的影响，与 3.2 的处理相似，将实测刚度 (K) 除以由欧洲木结构设计规范 EC5^[31] 钉连接计算公式得到的刚度 (K_{ser})，即得 K/K_{ser} 。此比值与夹角 θ 的关系如图 10 所示。图中，荷载方向与规格材木纹夹角 $\theta = 315^\circ$ 和 270° 分别为 $\theta = -45^\circ$ 和 -90° 的情况。因 $\theta = 135^\circ$ 、 180° 和 225° 的钉连接形式分别与 $\theta = 45^\circ$ 、 0° 和 -45° 的钉连接试件相同(如图 1 所示)，故前后两者的刚度相同。

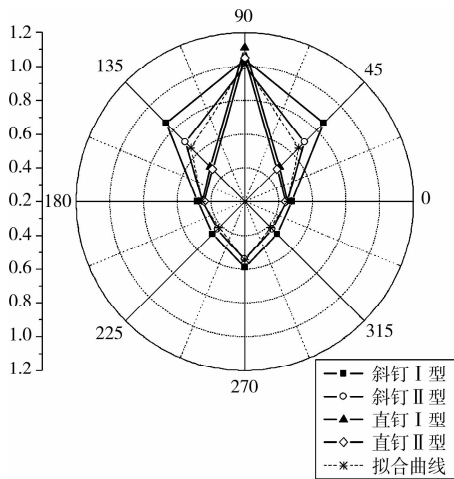


图 10 钉连接刚度比 K/K_{ser} 与夹角 θ 的关系

荷载方向与规格材木纹夹角 θ 的影响 由图 10 可见，斜钉和直钉各种 θ 情况刚度比 (K/K_{ser}) 的连线基本呈椭圆形和半椭圆形，表明夹角 θ 对钉连接的刚度影响较大。对于夹角 $\theta = 0^\circ$ 、 -45° 和 -90° 的斜钉试件，因覆面板与规格材受力端的端距(覆面板 ≥ 50 mm，规格材 > 10 mm) 足够大，且斜钉方向对钉子抗弯有利(如图 1 所示钉杆与荷载方向的夹角小于 90°)，所以其 K/K_{ser} 受夹角 θ 的影响较小，基本为一定值，约为 0.5；经统计发现，夹角 $\theta = 0^\circ$ 、 45° 和 90° 的斜钉试件，其 K/K_{ser} 与夹角 θ 成线性递增关系；对于夹角 $\theta = 0^\circ$ 、 45° 和 90° 直钉试件，板受力端的端距为 19 mm，其 K/K_{ser} 与夹角 θ 成指数递增关系。可见，钉连接在覆面板或规格材受力端的端距足够大时，其刚度受荷载与规格材木纹夹角 θ 的影响很小；在覆面板或规格材受力端的端距较小时，其刚度受夹角 θ 的影响很大。

钉入方式及覆面板主方向与规格材木纹夹角 α

的影响 直钉试件的刚度除夹角 $\theta = 45^\circ$ 的情况比斜钉的低外，其它 θ 情况与斜钉试件的基本相同。无论是斜钉还是直钉试件，其 I 类(覆面板主方向与规格材木纹夹角 $\alpha = 0^\circ$) 试件的 K/K_{ser} 都比 II 类 ($\alpha = 90^\circ$) 试件的稍大，但基本不超过 5%，故夹角 α 的影响可忽略不计。同时，与文献[35]中放置 7 d 的试件比较，其覆面板主方向垂直于规格材木纹的试件刚度为平行时的 84.0%，从而可知，夹角 α 对钉连接刚度的影响随试件放置时间的增加而减小。

考虑夹角 θ 和试件放置时间影响的刚度计算公式 由以上分析可知，荷载方向与规格材木纹夹角 θ 对钉连接的刚度有明显影响。通过对试验数据进行拟合(如图 10 所示)，可在 EC5^[31] 钉连接刚度公式基础上增加一角度修正项，得到轻型木结构覆面板钉连接刚度计算公式：

$$K = \lambda_{K,\theta} K_{ser} \quad (1)$$

式中， K 为覆面板钉连接刚度，N/mm； $\lambda_{K,\theta}$ 为夹角 θ 修正系数，如式(2)所示； K_{ser} 为欧洲木结构设计规范 EC5^[31] 钉连接的计算刚度，N/mm。

$$\lambda_{K,\theta} = 4 \times 10^{-5} \theta^2 + 0.0026 \theta + 0.4529 \quad (2)$$

4 结论

通过 16 组共 222 个钉连接试件在单调荷载作用下的试验研究，获得如下主要结论：

1) 轻型木结构覆面板钉连接主要发生模式 M-c₁ 屈服破坏，符合欧洲木结构设计规范 EC5^[31] 钉连接设计公式的结果。但一些试件因覆面板或规格材端距或边距太小而在连接完全屈服前就发生了覆面板断裂、剪坏或规格材撕裂破坏；个别试件的钉子钉帽直径太小而发生钉子穿透。

2) 直钉试件的承载力比斜钉试件平均高 14.2%，但两者的刚度基本相同。覆面板主方向与规格材木纹夹角 α 对钉连接的承载力和刚度的影响可以忽略不计。钉连接的承载力基本不受荷载方向与规格材木纹夹角 θ 的影响。当钉连接覆面板或规格材受力端端距足够大时，其刚度不受夹角 θ 的影响；在覆面板或规格材受力端端距较小时，其刚度则随夹角 θ 的增大而增加。

3) 养护 2 周后再进行试验的钉连接，其实测承载力与 EC5^[31] 计算公式结果接近，而由于木材应力松弛导致其实测刚度与 EC5^[31] 计算公式结果相差较大，同时以上 2 个公式都未曾考虑荷载方向与规格材木纹夹角 θ 的影响。通过在 EC5^[31] 钉连接刚度公式的基础上增加一角度修正项，得到了轻型木结构覆面板钉连接刚度的计算公式，为计算分析剪力

墙和横隔(楼盖和屋盖)的抗侧力性能提供参考。

参考文献:

- [1] 潘景龙,祝恩淳. 木结构设计原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [2] JOHANSEK K. Theory of timber connections [J]. International Association of Bridge and Structural Engineering, 1949(9): 249-262.
- [3] Möller. New method of estimating the bearing strength of nailed wood connections, No. 117 [R]. Gothenburg: The Chalmers Institute of Technology Documents, 1950.
- [4] SIIMES F E, JOHANSON P E, NISKANEN E. Investigations on the ultimate embedding stress and nail holding power of finish pine, Tiedoitus 122 [R]. Helsinki: The State Institute for Technical Research, 1954.
- [5] MACK J J. The strength of nailed timber joints, No. 9 [R]. Melbourne: Division of Forest Products Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1960.
- [6] AUNE P. The load-carrying capacity of nailed joints; Calculations and experiments [R]. Trondheim: The Norwegian Institute of Technology, 1966.
- [7] LARSEN H J. The yield load of bolted and nailed joints [C]//International Union of Forestry Research Organizations Working Group on Structural Utilization. Pretoria, 1973: 646-654.
- [8] NOREN B. Formulas indicating the strength of mechanical wood joints, Series B, No. 226 [R]. Swedish Research Institute, 1974.
- [9] AUNE P, PATTON-MALLORY, MARCIA. Later load-bearing capacity of nailed joints based on the yield theory: Theoretical development, FPL 469 [R]. Madison: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1986.
- [10] AUNE P, PATTON-MALLORY, MARCIA. Later load-bearing capacity of nailed joints based on the yield theory: Experimental verification, RPL 470 [R]. Madison: U. S. department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1986.
- [11] JORISSEN A J M. Double shears timber connections with dowel-type fastener [D]. Delf: Delf University of Technology, 1998.
- [12] BLASS H J. Characteristic strength of nailed joint [J]. Forest Products Journal, 1994, 44(4): 33-39.
- [13] BLASS HJ, SCHMID M. Self-tapping screws as reinforcement perpendicular to the grid in timber connections [C]// Proceedings PRO 22: International RILEM Symposium on Joints in Timber Structures. Stuttgart, Germany, 2001: 163-172.
- [14] STEVE G W, LAWRENCE A S. Lateral and withdrawal strength of nail connections for manufactured housing [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1994, 120(12): 3577-3594.
- [15] CHUI Y H, CHUN N. Performance of wood joints fastened with power-driven nails [C]// The 6th World Conference on Timber Engineering. July 31-August 3, 2000, Vancouver, British Columbia, Canada. Vancouver: University of British Columbia Vancouver, 2000: 6.4.1.
- [16] HIRAI T, YANAGA K, ZHANG P W. Practical effective resistance of nailed shear walls [C]// The 6th World Conference on Timber Engineering. July 31-August 3, 2000, Vancouver, British Columbia, Canada. Vancouver: University of British Columbia Vancouver, 2000: 16.
- [17] JOHANSSON H, LUKASCEWSKA E, STEHN L. Nailed timber joints with a thick interlayer [C]// The 8th World Conference on Timber Engineering. June 14-17, 2004, Helsinki, Finland. Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland, 2004: 281-284.
- [18] DOLAN J D, MADSEN B. Monotonic and cyclic nail connection tests [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1997, 19 (1): 104.
- [19] DUJIC B & al. Hysteretic responses of different sheathing to framing joints [C]// The 8th World Conference on Timber Engineering. June 14-17, 2004, Helsinki, Finland. Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland, 2004: 407-412.
- [20] DAVID V R, TIMOTHY A R. Rate-of-load and duration-of-load effects for wood fasteners [J]. Journal of Structural Engineering, 1999(7): 719-724.
- [21] VAN DE KUILEN J W G. Duration of load effects in timber joints [D]. Delft: Delft University of Technology, 1999.
- [22] ROBERT A M, WILLIAM M B. Load-duration behavior of wood connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2005(9): 1434-1443.
- [23] NAKAJIMA S, OKABE M. Effects of dry and humid cyclic climate on the performance of nail joints and shear walls [C]//The 8th World Conference on Timber Engineering. June 14-17, 2004, Helsinki, Finland. Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland, 2004: 117-122.
- [24] KENT S K, LEICHTI R M, ROSOWSKY D V, et al. Effects of decay on the cyclic properties of nailed connections [J]. ASCE Journal of Materials in Civil

- Engineering, 2005, 17(5): 579-585.
- [25] ROSOWSKY D V, SCHIFF D S. Combined loads on sheathing to framing fasteners in wood construction [J]. ASCE Journal of Architectural Engineering, 1999, 5(2): 37-43.
- [26] LARSEN H J, REESTRUP V. Tests on screws in wood [J]. Building Static Announcements, 1969, 1: 3036.
- [27] KUIPERS J, VANDERPUT T A C M. Reflections From the Fracture Mechanism Nail Connections [M]. Karlsruhe: Publisher Brother Karlsruhe, 1982.
- [28] DOUGLAS R R, DONALD A B, DAVID G P. Withdrawal and lateral strength of threaded nails [C]// The 5th World Conference on Timber Engineering, August 17-20, 1998, Montreux, Switzerland. Montreux: Polytechniques et universitaires romandes, 1998: 238-245.
- [29] 陈志勇, 陈送来, 樊承谋, 等. 木结构钉连接研究进展 [J]. 结构工程师, 2009, 25(4): 152-157.
CHEN ZHI-YONG, CHEN SONG-LAI, FAN CHENG-MOU, et al. A review on the nail connection of wood structures [J]. Structural Engineers, 2009, 25(4): 152-157.
- [30] 中华人民共和国建设部. GB 5005-2003 木结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [31] EN 1995-1-1. Euro code 5: Design of Timber Structures - Part 1. 1: General rules and rules for buildings [S]. European Committee for Standardization, Brussels, 2008.
- [32] D1761. Standard test methods for mechanical fasteners in wood [S]. America Society of Testing and Materials, West Conshohocken, 2006.
- [33] EN 26891. Timber structures-joints made with mechanical fasteners-general principles for the determination of strength and deformation characteristics [S]. European Committee for Standardization, Brussels, 2001.
- [34] NT Build 133. Nails in wood, lateral strength [S]. Nordtest, Stockholm, 2001.
- [35] 陈志勇. 轻型木结构中剪力墙钉连接承载性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [36] 王焕杰, 陆州导, 张盛东, 等. 木结构剪力墙钉节点变形研究[J]. 结构工程师, 2007, 23(6): 78-82.
WANG HUAN-JIE, LU ZHOU-DAO, ZHANG SHENG-DONG, et al. Study on nail fastener deformation in wood frame structures [J]. Structural Engineers, 2007, 23(6): 78-82.
- [37] 陈松来, 陈志勇, 樊承谋, 等. 木结构剪力墙中钉连接的实验研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(4): 133-138.
CHEN SONG-LAI, CHEN ZHI-YONG, FAN CHENG-MOU, et al. Experimental study on nail fasteners in wood shear walls [J]. ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(4): 133-138.

(编辑 胡 玲)