

木结构剪力墙中钉连接的实验研究^{*}

陈松来, 陈志勇, 樊承谋, 潘景龙, 王焕定
(哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 选用国产普通圆钉、进口规格木材和定向木片板, 制作了268个木结构剪力墙中钉连接的试件, 采用单调加载方式进行实验研究, 得到了如下主要结论: 普通圆钉连接强度主要取决于破坏模式; 边距不足明显影响钉连接的强度; 钉连接刚度离散性较大, 墙骨木材木纹方向对刚度的影响十分明显; 通过进一步的试验研究, 得出各种规格国产钉连接强度和刚度计算公式, 将是十分必要的。

关键词: 木结构剪力墙; 钉连接; 覆面板; 墙骨

中图分类号: TU366 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 04-0133-06

木结构建筑具有施工快捷、构造简单、节能美观、抗震性能优越等优点。国际上历次地震灾害调查均表明, 多数木结构房屋可以承受地震作用, 没有造成倒塌和严重的人员伤亡。因此北美地区90%以上的居住建筑是木结构房屋, 近年来在日本、韩国、中国台湾等多震害地区, 也得到了大量的应用。

随着我国木结构的复兴, 目前使用最多的是轻型木结构建筑。轻型木结构的主要竖向抗侧力构件为剪力墙, 剪力墙的抗剪能力主要取决于覆面板和墙骨之间钉连接的侧向抗剪性能。为了掌握钉连接性能, 保证木结构剪力墙的设计和使用安全。本文选用国产普通圆钉, 以及目前国内轻型木结构房屋剪力墙最常采用的进口定向木片板覆面板和S-P-F规格木材墙骨, 进行了普通圆钉连接的侧向抗剪试验和研究。

1 试验设计

1.1 试件材料

根据我国木结构设计规范 GB50005-2003 规定和当前工程实践, 轻型木结构剪力墙覆面板和墙骨之间钉连接最常采用的是直径为2.8 mm、长度为50 mm的普通圆钉^[1]。从市场上购得的钉子实测平均直径为2.84 mm, 平均屈服强度为828 MPa, 平均弹性模量为 1.91×10^5 MPa。覆面板为从北美进口厚度9.0 mm的定向木片板, 实测平均含水率为12.5%, 平均基本密度为0.41 g/cm³。墙骨为从北美进口截面尺寸为38 mm×89 mm的2

级S-P-F规格木材, 实测平均含水率为13.2%, 平均基本密度为0.48 g/cm³。

1.2 试件设计

剪力墙通常是由规格木材构成墙骨框架, 木基结构板材覆面, 覆面板与墙骨用钉子按一定间距连接。由于采用截面尺寸为38 mm×89 mm规格木材做墙骨, 墙骨的宽度为38 mm, 所以沿剪力墙周边的钉连接, 覆面板和墙骨的钉边距均为19 mm, 而在两块覆面板与同一根墙骨连接时, 钉连接边距为10 mm且要斜钉连接, 这也是我国木结构设计规范 GB50005-2003 允许的最小边距^[1]。

当剪力墙在顶部面内剪力作用下, 每一块墙板中钉子的受力方向如图1所示, 可见每一颗钉子的受力方向与板边的夹角均不同。按欧洲木结构设计规范 EC5 规定^[2], 木结构普通圆钉连接的边距不得小于 $3 + 4\sin\theta$ 倍的钉子直径, 其中 θ 为钉子受力方向与木料边的夹角。对照欧洲规范, 边距为10 mm的剪力墙普通圆钉连接其钉子受力方向与木料边夹角不得大于10度, 然而实际使用的剪力墙中大量的钉连接未能满足该最小边距的要求。为此本文设计了两组试件, 第一组试件定向木片板和规格木材的普通圆钉连接边距为10 mm斜钉情况, 钉子受力方向与规格木材木纹方向成-90°、-45°、0°、45°、90°共五种类型, 每种类型的试件又区分定向木片板主木纹方向与规格木材木纹方向平行和垂直两种情况见图2所示, 对应试件编号见表1。第二组试件为钉连接的边距为19 mm情况, 钉子受力方向与规格木材木纹方向成0°、45°、90°

^{*} 收稿日期: 2007-12-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50508012); 温州市科技局资助项目(S2004A013)

作者简介: 陈松来(1972年生), 男, 博士研究生, 高级工程师; E-mail: csllhy@163.com

三种类型的试件，每种类型的试件也同样区分定向木片板主木纹方向与规格木材木纹方向平行和垂直

两种情况见图 2 所示，对应试件编号见表 1。

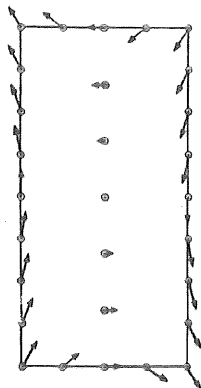


图1 墙板荷载分布
Fig. 1 Force distribution on the sheathing

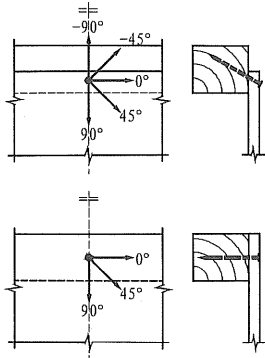


图2 钉连接侧向剪力分布示意图
Fig. 2 Lateral shear forces distribution of nailed joints

表 1 各类试件数量
Tab. 1 Numbers of specimens

试件编号	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
边距和端距/mm	10	10	10	10	10	10	10	10
受力方向与墙骨木纹夹角/(°)	0	0	45	45	90	90	-45	-45
覆面板和墙骨木纹夹角/(°)	0	90	0	90	0	90	0	90
钉入形式	斜钉	斜钉	斜钉	斜钉	斜钉	斜钉	斜钉	斜钉
试件编号	E1	E2	H1	H2	J1	J2	K1	K2
边距和端距/mm	10	10	19	19	19	19	19	19
受力方向与墙骨木纹夹角/(°)	-90	-90	0	0	45	45	90	90
覆面板和墙骨木纹夹角/(°)	0	90	0	90	0	90	0	90
钉入形式	斜钉	斜钉	直钉	直钉	直钉	直钉	直钉	直钉

1.3 试验方案与装置

我国目前尚无钉连接试验方法标准，本文的试验方法参照美国标准 ASTM D1761 - 88 和欧洲标准 EN26891^[3-4]。为使试验条件尽可能接近实际剪力墙结构的使用和受力特点，在试件制作完成后，在室内标准环境中放置时间不少于 2 周。采用单调匀

速加载直到试件破坏的加载模式，以荷载作为加载控制，试验采用固定加载速度，每个试件试验加载时间为 5 ~ 8 min，电脑自动采集荷载与滑移曲线。试验加载装置见图 3 所示，试验装置均为自行设计制作，而且十分可靠和有效。

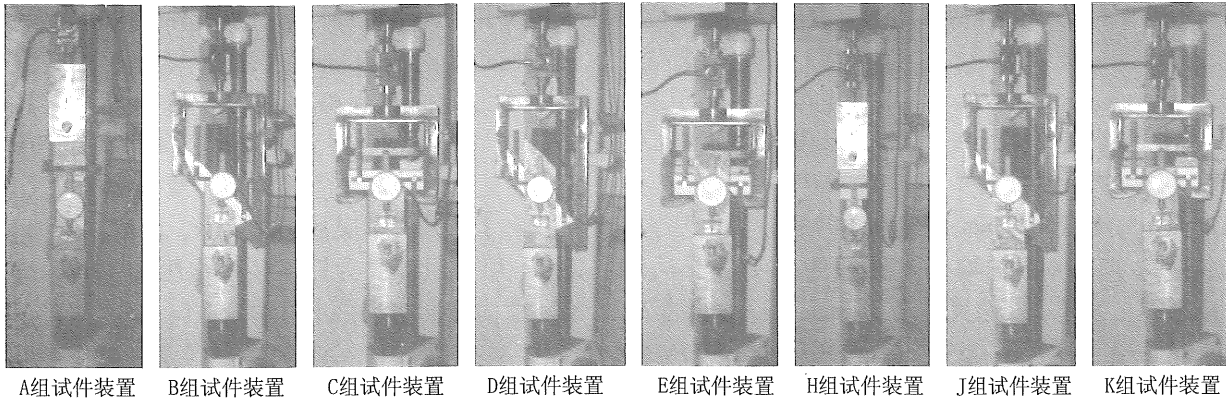


图 3 钉连接试验装置
Fig. 3 Set-ups for nailed joints lateral tests

2 试验结果

2.1 变形与破坏形态

钉连接在单调加载试验过程中,初始阶段(本文定义其为工作阶段),表现为近似于弹性工作状态,之后进入强化阶段,表现出明显的塑性,直到最大承载力,之后进入下降阶段,直至破坏。

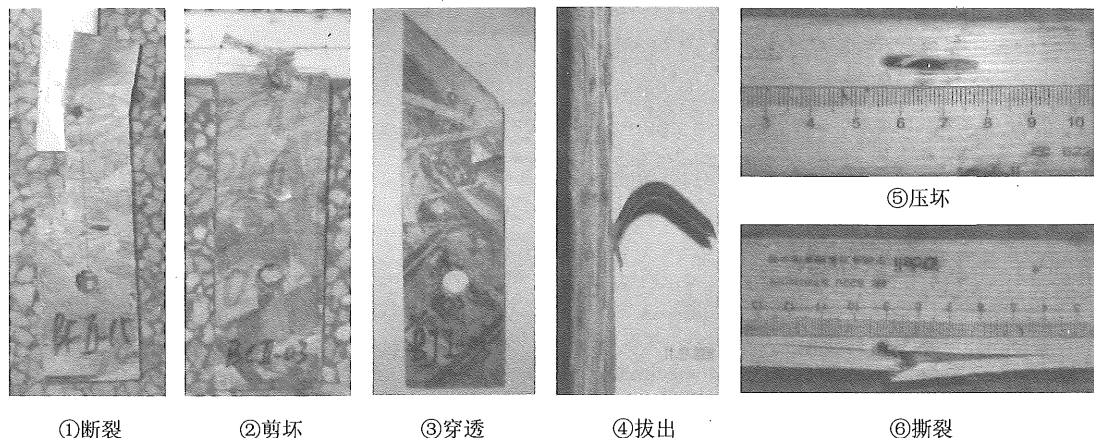


图4 钉连接的破坏模式

Fig. 4 Failure modes of nailed joints

2.2 试验结果

A类试件的全部试验曲线如图5所示,其破坏形式主要表现为①种板边撕裂、③种钉帽穿板、④种钉杆拔出和⑤种规格木材承压破坏。对试验曲线采用文献[5]建议的五参数指数函数进行拟合,得到A类试件平均拟合曲线见图5中粗线所示。

B类试件的全部试验曲线如图6所示,其破坏形式主要表现为②种板边剪坏、⑥种规格木材边撕裂和⑤种规格木材承压破坏。B类试件平均拟合曲线见图6中粗线所示。

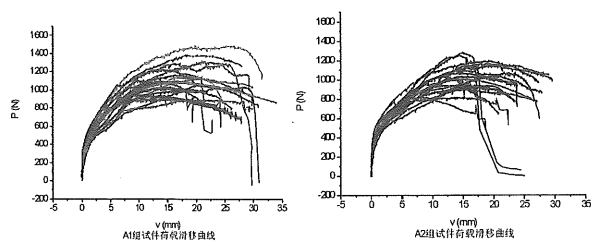


图5 A类试件荷载滑移曲线

Fig. 5 Load-slip curves of type A test specimens

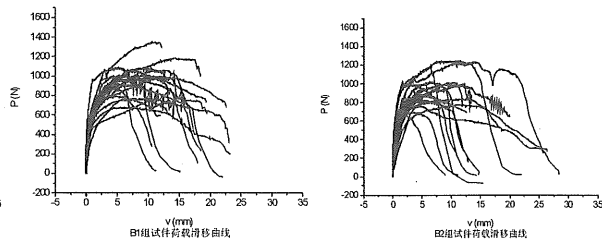


图6 B类试件荷载滑移曲线

Fig. 6 Load-slip curves of type B test specimens

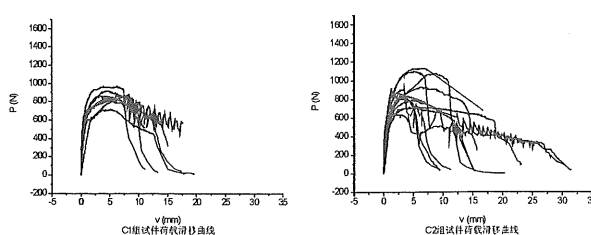


图7 C类试件荷载滑移曲线

Fig. 7 Load-slip curves of type C test specimens

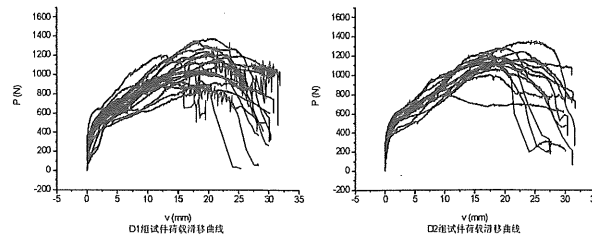


图8 D类试件荷载滑移曲线

Fig. 8 Load-slip curves of type D test specimens

试验中可以发现如图4所示的6种破坏形式:①板边断裂;②板边撕坏;③钉帽穿透板;④钉杆拔出;⑤规格木材承压破坏;⑥规格木材边撕裂。其中④种破坏形式试件承载力最高,延性也最好;⑤种破坏形式试件承载力最低,延性较好;②和⑥种破坏形式试件承载力较差,且表现为明显脆性破坏,是工程中应避免出现的形式。

E类试件的全部试验曲线如图9所示,其破坏形式主要表现为③种钉帽穿板、④种钉杆拔出和⑤种规格木材承压破坏。E类试件平均拟合曲线见图9中粗线所示。

H类试件的全部试验曲线如图10所示,其破坏形式主要表现为③种钉帽穿板、④种钉杆拔出和⑤种规格木材承压破坏。H类试件平均拟合曲线见图10中粗线所示。

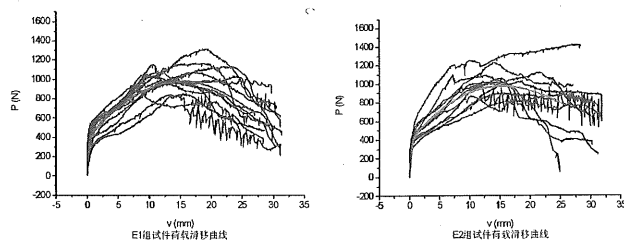


图9 E类试件荷载滑移曲线
Fig. 9 Load-slip curves of type E test specimens

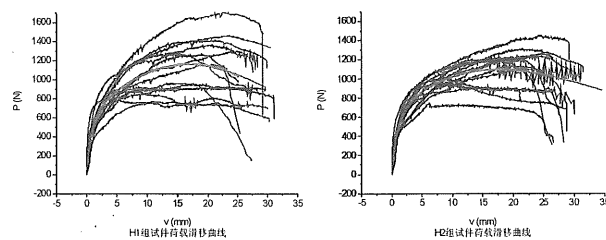


图10 H类试件荷载滑移曲线
Fig. 10 Load-slip curves of type H test specimens

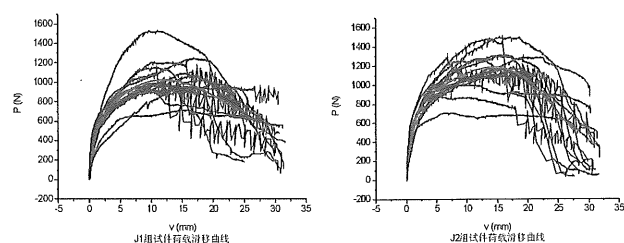


图11 J类试件荷载滑移曲线
Fig. 11 Load-slip curves of type J test specimens

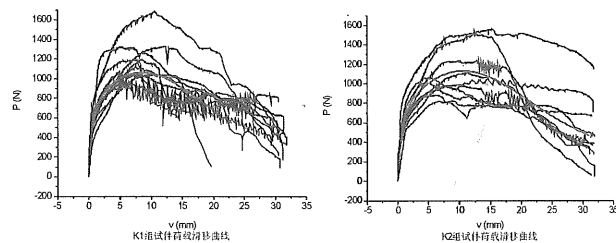


图12 K类试件荷载滑移曲线
Fig. 12 Load-slip curves of type K test specimens

2.3 试验数据分析

欧洲标准 EN26891^[4]规定:当钉连接试验曲线上最大荷载对应的滑移值 ≤ 15 mm时,取该最大荷载值作为 $P_{\max}$;当钉连接试验曲线上最大荷载对应的滑移值 > 15 mm时,取15 mm滑移值对应的荷载值作为 $P_{\max}$ 。钉连接的刚度 K 取为10% $P_{\max}$ 和40% $P_{\max}$ 两点间曲线的割线斜率。采用以上规则,计算各类试件平均拟合曲线的 $P_{\max}$ 和 K 值如表2所示。

从表2中可知,每类试件的1型和2型,分别

代表覆面板主木纹方向垂直和平行于墙骨木纹方向,其对试件的 $P_{\max}$ 和 K 值影响并不明显,也就是说面板木纹方向并不明显影响普通圆钉连接的受力性能(试验结果与文献[6]基本相符);普通圆钉连接受力方向垂直于墙骨木纹方向的如E类、C类、K类试件 K 值明显大于平行于墙骨木纹方向的如A类、H类试件,而对 $P_{\max}$ 值的影响却并不显著;B类和C类试件由于端距和边距为10 mm,容易发生覆面板剪坏和墙骨规格木材边撕裂破坏,其 $P_{\max}$ 值偏低,延性也较差。

表2 单调加载试验钉连接强度和刚度

Tab. 2 The test results of the strength and stiffness of nailed joints

连接形式	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
$P_{\max}/N$	1 073.8	996.5	894.4	865.4	842.9	826.5	1 018.9	1 056.4
$K/(N \cdot mm^{-1})$	376.60	563.15	911.69	889.23	1 141.8	999.9	308.58	468.60
连接形式	E1	E2	H1	H2	J1	J2	K1	K2
$P_{\max}/N$	980.2	976.8	1 155.4	1 090.3	1 026.8	1 180.7	1 063.7	1 128.7
$K/(N \cdot mm^{-1})$	532.27	523.61	460.41	467.93	460.50	531.92	1 042.3	793.15

2.4 钉连接强度分析

除去 B、C 类试件由于边距不满足欧洲规范最小边距要求,强度试验值明显偏低外,其它类型试验强度平均值为 1 055.2 N,变异系数为 0.048;试验也证明了强度值不随所连接木材的木纹方向影响^[7-9]。B、C 类试件试验强度平均值为 857.3 N,明显低于其它类型的试件,且延性也较差,可见钉连接的边距明显影响强度。建议我国木结构设计规范对轻型木结构剪力墙覆面板与墙骨的普通圆钉连接的最小边距要求做出更加严格的规定,保证结构设计和使用的安全。

除去 B、C 类试件以外,本文统计了其它试件共计 196 个强度值,按 95% 保证率得到强度标准值为 770 N,按欧洲木结构设计规范 EC5 公式可以得到钉连接强度设计值为 513 N^[2]。对比我国木结构设计规范 GB50005-2003 附录 Q 中剪力墙强度设计值规定为 430-450 N^[1],该设计值是参照加拿大设计规范^[9],可见在采用国产普通圆钉后,我国木结构设计规范的取值是偏于安全。

2.5 钉连接刚度分析

钉连接的刚度 K 值通常是以试验曲线上 10% $P_{\max}$ 和 40% $P_{\max}$ 之间的割线斜率来表示,见表 2 所示。可见钉连接刚度具有很高的离散性,从平均值可以明显看出墙骨木材木纹方向显著影响钉连接刚度。不计入 B、C 类试件,则 A 类和 H 类试件为钉连接受力方向与规格木材木纹方向平行,其钉连接刚度最低;E 类和 K 类试件为钉连接受力方向与墙骨木纹方向垂直,其钉连接刚度最高;D 类和 J 类试件为钉连接受力方向与墙骨木纹方向成 45°,其刚度也介于两者之间。

根据钉连接受力机理,剪切滑移刚度决定于墙骨承压变形和钉子的弯曲变形,钉子假设为理想弹塑性体,而规格木材为各向异性体,刚度与木纹夹角的关系近似可以按椭圆关系计算。欧洲木结构设计规范 EC5 提供了钉连接刚度的理论计算公式^[2](其它国家木结构设计规范均没有给出相应的公式),公式认为刚度与木材密度和圆钉直径有关,与木纹方向无关,这和本文的试验结果不符。由于钉连接刚度对剪力墙的刚度影响显著^[10],为了推导我国剪力墙普通圆钉连接刚度公式,填补木结构设计规范的空白,还需要进一步开展不同规格普通圆钉和不同规格木材钉连接的试验和研究。

3 结 论

(1) 钉连接强度不受木纹夹角的影响,但是明显受边距的影响。试验中 B、C 类试件强度值明显

偏低,且延性也较差,建议我国木结构设计规范 GB50005-2003 对木结构剪力墙普通圆钉连接的最小边距要求做出更加严格的规定^[1],保证结构设计和使用的安全。

(2) 钉连接强度主要决定于破坏形式^[11-12],从本文的试验可以发现,以钉子拔出的破坏形式,强度值最高,且延性也最好。所以在剪力墙设计中宜选用足够厚度的面板和保证足够的边距,尽可能控制钉连接的破坏形式为拔出破坏。

(3) 钉连接刚度试验结果具有较大离散性;试验表明钉连接刚度明显受墙骨木材木纹方向的影响,计算钉连接刚度时应计入剪力作用方向与木材木纹方向的角度影响。

(4) 对国产普通圆钉连接进行系统的试验研究,从而得出木结构剪力墙面板和墙骨普通圆钉连接强度和刚度的理论计算公式,填补我国木结构设计规范 GB50005-2003 的空白^[1],将是一件十分有意义的工作。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. GB50005-2003 木结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
Ministry of Construction of P. R. C. GB50005-2003 Code for design of timber structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2005.
- [2] prEN 1995-1-1: 2003. Eurocode 5: Design of timber structures - part 1: General rules and rules for buildings [S]. European Committee for Standardization, Brussels, 2003.
- [3] ASTM. Standard test methods for mechanical fasteners in wood. Designation D1761[S]. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1988.
- [4] European standard. 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.
- [5] GIRHAMMAR Ulf Arne, BOVIRN Nils Ivar. Characteristics of sheathing - to - timber joints in wood shear walls [C]. WCTE 2000 6th World Conference on Timber Engineering, 2000.
- [6] NAKAJIMA S, OKATE M. Effects of dry and humid cyclic climate on the performance of nail joints and shear walls [C]. WCTE 2004 8th World Conference on Timber Engineering, 2004, Volume I: 117-122.
- [7] Step(1995) Timber Engineering, Step, Volumes 1 and 2 [M]. Centrum Hout, Netherlands, 1995.
- [8] DONALT E Breyer. Design of wood structures - ASD

- [M]. 5th ed. McGraw - Hill, 2004.
- [9] CSA (1994) CAN/CSA - O86.1 - 94, Engineering Design in Wood (Limit States Design) [S]. Canadian Standards Association, Ottawa, 1994.
- [10] 王焕杰, 陆洲导, 张盛东, 等. 木结构剪力墙钉节点变形研究[J]. 结构工程师, 2007, 12: 78 - 82.
- WANG Huanjie, LU Zhoudao, ZHANG Shengdong, et al. Study on nail fastener deformation in wood frame structures[J]. Structural Engineers, 2007, 12: 78 - 82.
- [11] DOLAN J D, MADSEN B. Monotonic and cyclic nail connection tests [J]. Canadian Journal of Civil Engineering. Ottawa, Canada, 1997, 19 (1): 104.
- [12] 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: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2006.
- CHEN Zhiyong. Performance of nail connections in shear walls of light wood frame houses - an experimental Study[D]. Eng. in HIT, 2006.

Experimental Study on Nail Fasteners in Wood Shear Walls

CHEN Song-lai; CHEN Zhi-yong; FAN Cheng-mou; PAN Jing-long; WANG Huan-ding
(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: 268 specimens of nail fasteners in wood shear walls were tested under monotonic lateral load protocol. The specimens were made with common nails made in China and No. 2 graded S-P-F dimensional lumber and OSB imported from North America. From the tests, the following primary conclusions were drawn: ①The lateral shear strengths of nail fasteners were mostly governed by failure modes; ②The edge distances of the fastener joints significantly influenced the strength; ③Even the stiffness of the fastener was discrete, the stiffness was significantly influenced by the loading-to-grain directions. The further experimental studies are necessary for drawing the design formulas of the nail fasteners under lateral load in wood shear walls using common nails made in China.

Key words: wood shear wall; nail fastener; sheathing; stud