

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2022173

开槽沉头自攻螺钉增强轻型木结构剪力墙 抗侧性能研究

张月, 左宏亮, 郭楠, 邸静

(东北林业大学土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)



摘要: 轻型木结构剪力墙在水平荷载作用下常发生墙骨柱上拔破坏, 从而削弱剪力墙的抗侧性能。本研究提出采用自攻螺钉连接边墙骨柱与底梁板的轻型木结构剪力墙, 并以骨架钉种类、自攻螺钉直径和长度为变量, 对传统轻型木结构剪力墙和自攻螺钉增强轻型木结构剪力墙进行单调加载对比试验。结果表明: 剪力墙破坏时, 其边墙骨柱弯曲且上拔较小, 覆面板与墙骨柱间破坏较轻。与普通剪力墙相比, 自攻螺钉增强剪力墙抗剪强度提高16%~33%, 弹性抗侧刚度提高27%~111%, 延性系数提高1.7%~31.7%, 耗能提高2%~18.8%。因此, 采用自攻螺钉连接边墙骨柱与底梁板可以有效提高剪力墙抗侧性能。

关键词: 轻型木结构剪力墙; 抗侧性能; 自攻螺钉

中图分类号: TU398.2; TU366.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2023) 02-0035-08

Study on Lateral Performance of Enhanced Light-Wood-Framed Shear Walls with Slotted Countersunk Head Tapping Screws

ZHANG Yue, ZUO Hongliang, GUO Nan, DI Jing

(College of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: The lateral force resistance of light-wood-framed shear wall under a large horizontal lateral load is often weakened by uplifting a stud. Based on this phenomenon, this study proposed a connection method to strengthen the shear walls, where the side studs and bottom plates were connected with tapping screws. The enhanced light-wood-framed shear walls with tapping screws and the traditional light-wood-framed shear walls were tested under monotonic loads, respectively. The effects of different skeleton fastener types, the diameters, and lengths of the tapping screws on the lateral performance of the shear walls above were studied. Experiment results showed that when the tapping screw enhanced light-wood-framed shear walls were damaged, the side studs occurred a bit bending and little uplift, the damage between the sheathing panel and skeleton was relatively light. Compared with the traditional light-wood-framed shear walls, the shear strength of the tapping screw enhanced light-wood-framed shear walls was increased by 16%~33%, the elastic lateral stiffness was increased by 27%~111%, the ductility coefficient was increased by 1.7%~31.7%, and the energy consumption was increased by 2%~18.8%. It improves the lateral performance of the shear walls effectively by connecting the side studs to the bottom plates with the tapping screws.

收稿日期: 2022-09-08; 修改日期: 2022-12-01

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目“纳米TiO₂接枝改性亚麻纤维增强胶合木梁受弯性能研究”(LH2020E009)。

作者简介: 张月 (1996—), 女, 硕士研究生。Email: z1973686429@163.com

通讯作者: 左宏亮, 男, 教授。Email: zhl9163@163.com

Key words: light-wood-framed shear wall; lateral performance; tapping screw

轻型木结构是指由木骨架剪力墙、楼盖和屋盖组合而成的板式结构，一般适用于三层或三层以下的建筑。因其具有自重轻、刚度小等特点，在加拿大、美国等国家广泛使用^[1-2]。其中，剪力墙是轻型木结构房屋中承担地震作用和风荷载的主要抗侧力构件。传统的轻型木结构剪力墙易发生墙骨柱上拔和覆面板旋转等问题，影响剪力墙的受力性能^[3-7]，不利于墙骨架与覆面板的协同工作。目前，国内外研究剪力墙受力性能的影响，主要集中在覆面板材料、铺设方式、面板钉种类和面板钉间距等与覆面板相关的因素^[8-10]，很少考虑墙骨架相关的因素。杜敏等^[11]用榫取代钉连接墙骨柱与底梁板的研究结果表明，榫接方式能有效避免钉连接方式在循环荷载作用下的连接失效，保证墙体框架整体性；然而，榫连接因加工费时费力、对构件尺寸精度要求高、设计加工过度依赖经验等因素而受到制约^[12]。

笔者课题组前期研究发现，从胶合木梁底部旋入开槽沉头自攻螺钉（简称自攻螺钉）可有效提高其极限承载力和刚度^[13]，采用此种自攻螺钉取代普通圆钉连接边墙骨柱与底梁板，可加强骨架钉节点连接，提高墙体抗侧性能。本研究提出以自攻螺钉连接边墙骨柱与底梁板，以骨架钉类型和自攻螺钉的尺寸为变量制作轻型木结构剪力墙，系统研究墙体的抗侧性能，以期通过加固墙骨架钉连接节点，增强轻型木结构剪力墙抗侧性能。

1 材料与方法

1.1 试验材料

木质材料：1) 冷杉-松-云杉（SPF）IIIc 级规格材，两种规格材分别用作顶、底梁板和墙骨柱。2) 定向结构刨花板（oriented strand board, OSB），用作覆面板，平均密度为 0.61 g/cm³，含水率约 6.1%，外购。

连接件：1) 开槽沉头自攻螺钉（商品名：梅花槽沉头滚花割尾自攻螺钉），采购自上海檀筑实业有限公司，材料为中碳钢，抗弯屈服强度约 2 356.3 MPa。如图 1 所示。长度 80 mm、100 mm、140 mm，直径 6 mm、8 mm。

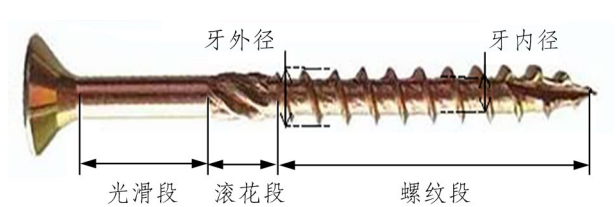


图 1 开槽沉头自攻螺钉示意图
Fig.1 Schematic diagram of slotted countersunk head tapping screw

2) 普通圆钉，两种规格。
材料规格列于表 1。

表 1 试件材料及尺寸规格
Tab.1 Material and specification of specimens

材料	尺寸规格/mm	用途
OSB	2 400×1 200×10	覆面板
SPF 规格材 IIIc 级	1 200×89×38	顶、底梁板
	2 286×89×38	墙骨柱
自攻螺钉	长度 80、100、140 公称直径 6、8	边墙骨柱-底梁板骨架钉
普通圆钉	长度 80，公称直径 3.8	
普通圆钉	长度 80，公称直径 3.8	中墙骨柱-顶、底梁板骨架钉
	长度 50，公称直径 2.5	面板钉

1.2 主要设备

试验装置主要包括：MTS 电液伺服作动器系统（最大载荷 250 kN、行程 250 mm）、侧向支撑、加载梁、底梁、支墩以及 YHD 型位移计（精度 1 mm、量程 300 mm）。

1.3 试验方法

1.3.1 试件制作 以 SPF 规格材为墙骨架、OSB 为覆面板，参照 GB 50005—2017《木结构设计标准》的要求制作 6 片自攻螺钉增强轻型木结构剪力墙和 1 片常规的轻型木结构剪力墙（分别简称为增强剪力墙和普通剪力墙）。制作步骤主要包括：选材、定位、摆放、划线、铺板和钉接。墙体尺寸 2 400 mm×1 200 mm，边缘面板钉间距为 150 mm，中部面板钉间距为 300 mm，墙骨柱间距为 400 mm，如图 2a 所示。根据 GB 50005—2017 第 9.3.5 和第 9.3.7 条规定：轻型木结构剪力墙受拉边界构件所受的上拔力大于重力荷载时，应设置抗拔紧固件将上拔力传递到下部结构。本次试验虽然只对试件作用水平荷载，但加载时，剪力墙边缘墙

骨柱所受上拔力远大于其重力荷载，因此，墙底两拐角均设有抗拔紧固件。由于长120 mm的自攻螺钉嵌入边墙骨柱内的螺纹段长度不同，故不考虑长120 mm的自攻螺钉。边墙骨柱与底梁板通过

自攻螺钉或普通圆钉连接，如图2所示。中间墙骨柱顶部、底部和边墙骨柱顶部的骨架钉，均选用长度80 mm、直径3.8 mm的普通圆钉。在拧入8 mm直径自攻螺钉时，需对底梁板进行预钻孔。

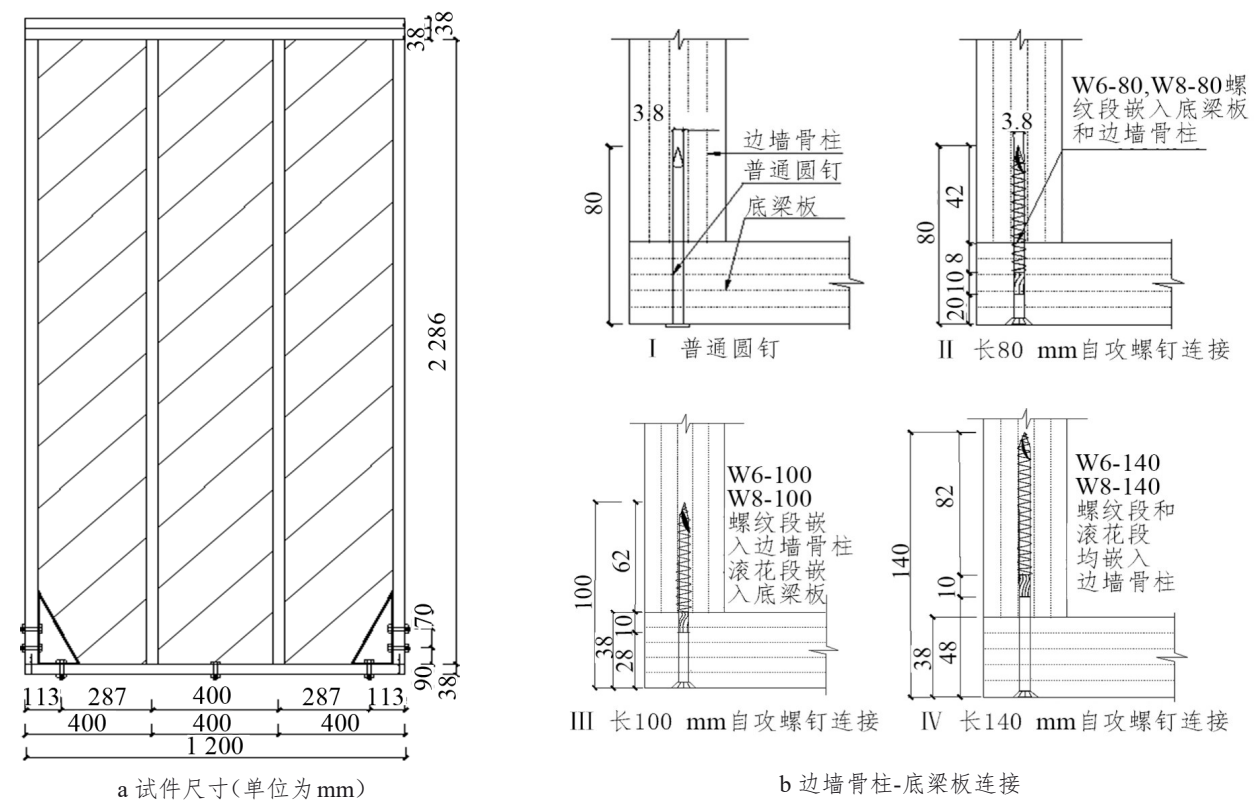


图2 增强轻型木结构剪力墙试件示意图

Fig.2 Details of enhanced light-wood-framed shear wall specimens

将7片剪力墙根据边墙骨柱-底梁板骨架钉的种类与规格分为7组，试件分组见表2。

表2 试件分组

Tab.2 Specimens groups

钉种类	试件编号	边墙骨柱-底梁板骨架钉 尺寸/mm	嵌入墙骨柱 螺纹长度/mm
普通圆钉	W0	杆径3.8,钉长80	—
	W6-80	螺纹底径3.8,公称直径6	42
	W8-80	螺纹底径4.8,公称直径6	
自攻螺钉	W6-100	螺纹底径3.8,公称直径6	62
	W8-100	螺纹底径4.8,公称直径8	
	W6-140	螺纹底径3.8,公称直径6	82

1.3.2 加载方法 试件安装结束后，墙体分别通过螺栓和基础梁以及加载梁连接、固定，在固定位置放置好位移传感器、连接MTS试验测试系统，

在电脑中设置加载程序，在墙体顶端对轻型木结构剪力墙施加单调荷载。试验过程中，实时监测荷载和位移，观测破坏形态，并拍照做好记录。加载制度采用ISO 16670: 2003 “*Timber structures—Joints made with mechanical fasteners—Quasi-static reversed-cyclic test method*” 位移控制的单调加载方案，即按照7.5 mm/min的位移速率控制加载，墙体破坏严重不适宜继续加载或荷载下降到荷载-位移曲线峰值荷载的80%时停止加载。

试验采用MTS液压伺服加载系统。在测点处放置YHD型位移传感器测量位移，采用MTS试验系统测量荷载。试验装置及测点布置见图3。

依据等效能量弹塑性曲线参数（equivalent energy elastic plastic curve, EEEPC）分析方法（图4）^[14]对每一片墙的荷载-位移曲线进行计算，获得

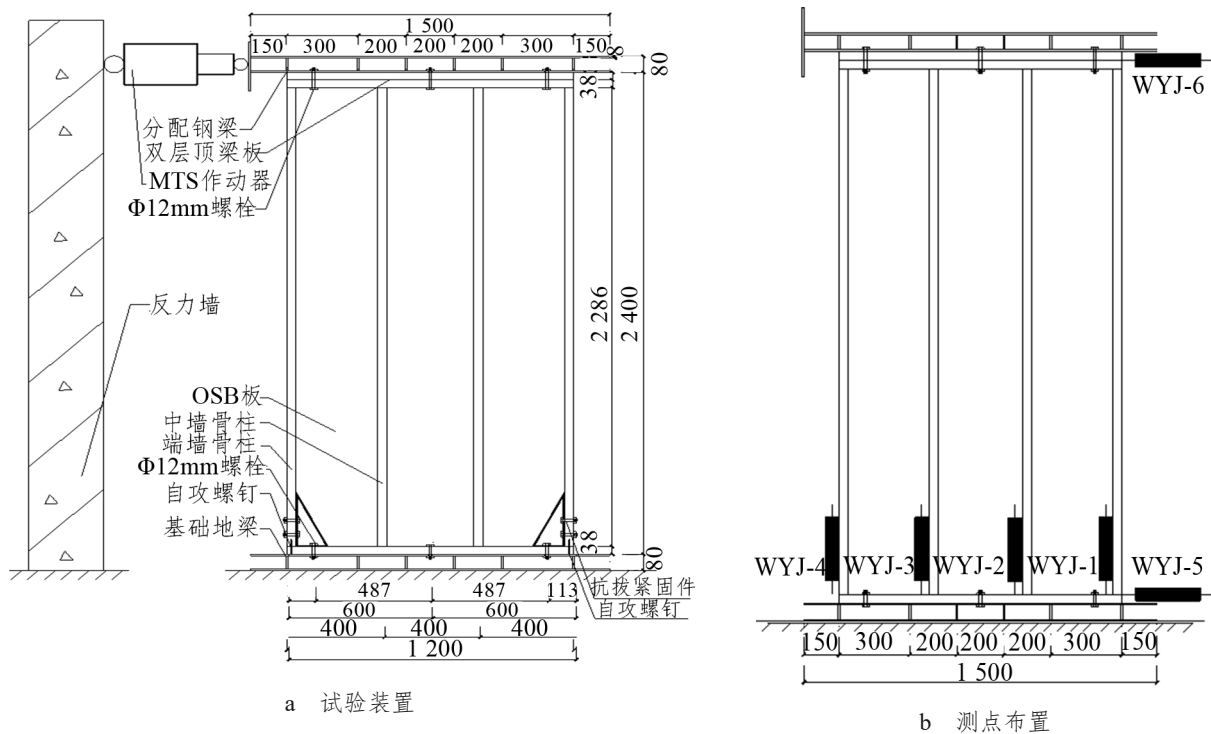


图3 试验装置和测点布置(单位:mm)

Fig.3 Shear wall test setup: (a) illustration of the apparatus and (b) arrangements of the transducers

极限荷载 $F_{\max}$ (对应曲线峰值点处荷载, kN)、极限位移 Δ_{failure} (对应曲线最终点处的位移, mm)、抗剪强度 f_{vd} (极限荷载 $F_{\max}$ 和墙体有效长度的比值, kN/m)、弹性抗侧刚度 K_e (0.4倍 $F_{\max}$ 对应点与原点之间割线的斜率, kN/mm)、延性系数 D ($D = \frac{\Delta_{\text{failure}}}{\Delta_{\text{yield}}}$)、屈服荷载 F_{yield} 、屈服位移 Δ_{yield} 和耗能 A (荷载-位移曲线包络曲线面积) 等7个参数。

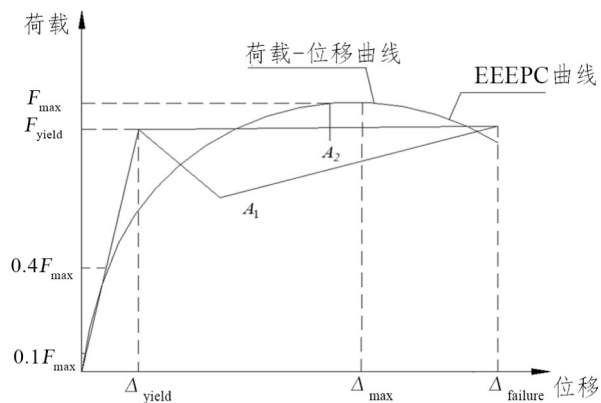


图4 荷载位移曲线和等效能量弹塑性曲线

Fig.4 Load-displacement and equivalent energy elastic-plastic curves

2 结果与分析

2.1 破坏形态

普通剪力墙受力侧墙骨柱弯曲变形小, 增强剪力墙则有明显弯曲, 如图5所示。

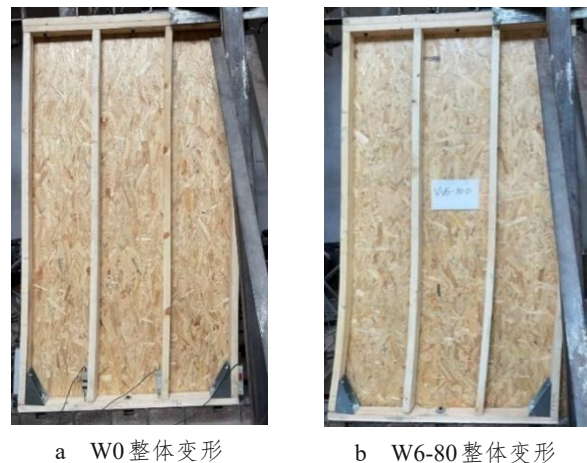


图5 试件W0和W6-80破坏后的整体变形

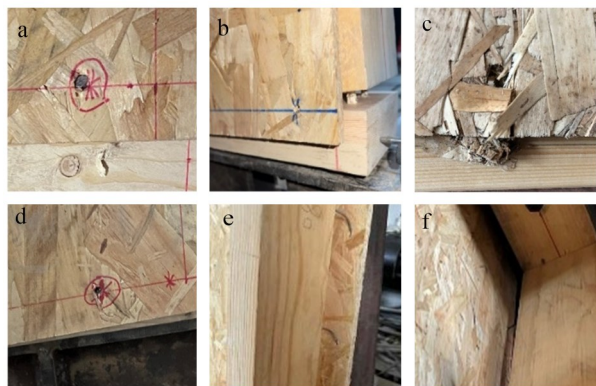
Fig.5 Overall deformation of test W0 and W6-80 after failure

普通剪力墙采用普通圆钉的边墙骨柱更易上拔, 边墙骨柱-底梁板节点易松动, 使受力侧底端面板钉节点破坏延缓, 从而提高墙角面板与骨架

的协同工作性。相比于普通剪力墙, 增强剪力墙因自攻螺钉螺纹限制了边墙骨柱上拔, 覆面板相对墙骨架位移增大, 使受力侧底端面板钉节点较早破坏。此时, 受力侧墙骨柱相当于柱下端约束在抗拉锚固件、柱上端约束在未撕裂面板钉处的受弯构件, 墙体在受力过程中, 逐渐弯曲变形。

对比试件局部破坏形态发现, 破坏形态主要为面板钉和骨架钉节点破坏。面板钉节点破坏包括面板钉拔出、钉帽穿透覆面板、覆面板撕裂、面板钉嵌入覆面板; 骨架钉节点破坏指骨架钉拔出和骨架钉弯曲。

2.1.1 面板钉节点破坏 所有试件均有面板钉节点破坏。普通剪力墙破坏主要在覆面板边缘, 特别在面板四角破坏较严重, 主要有面板钉拔出(图6a)、钉帽穿透覆面板(图6b)和覆面板撕裂(图6c); 覆面板边缘中部除了以上3种形式, 还有钉嵌入覆面板(图6d)和面板钉屈服(图6e), 因覆面板发生相对旋转从而与墙骨架之间有明显缝隙, 即覆面板局部脱离(图6f)。



a 面板钉拔出; b 钉帽穿透面板; c 覆面板撕裂;
d 钉嵌入覆面板; e 面板钉屈服; f 覆面板脱离。

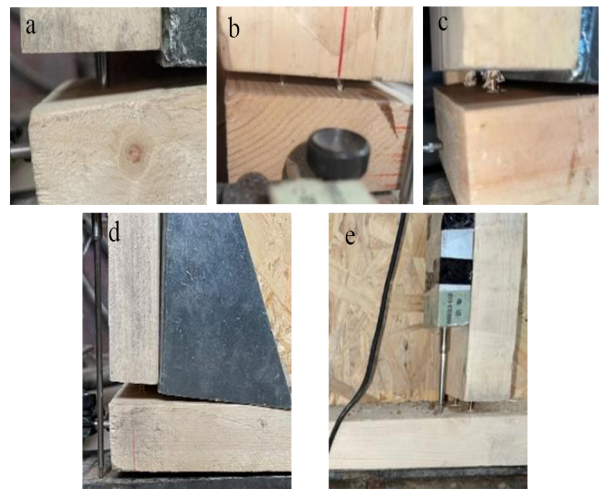
图6 面板钉节点破坏形态

Fig.6 Failure mode of wall panel-to-frame connection

增强剪力墙的破坏位置不仅在面板边缘, 在面板中央也有部分钉帽嵌入覆面板。因自攻螺钉限制了墙骨柱上拔, 覆面板和墙骨柱相对位移减小, 缝隙不明显。

2.1.2 骨架钉节点破坏 试验虽按 GB 50005—2017 木结构设计标准设置了抗拔紧固件, 但所有墙体均有墙骨柱上拔现象, 可见墙骨柱上拔是轻型木结构剪力墙主要的破坏形态之一。在加载初

期, 普通剪力墙的骨架钉拔出较明显(图7a); 继续加载, 普通剪力墙圆钉出现弯曲(图7b), 而增强剪力墙的边墙骨柱只出现轻微拔出(图7c), 柱底端自攻螺钉无明显弯曲, 反而是底梁板的受力侧向上弯曲变形(图7d), 且所有试件的中墙骨柱均有骨架钉拔出(图7e)。由剪力墙边墙骨柱拔出位移-剪力墙水平位移曲线(图8)可知, 自攻螺钉可有效减小墙骨柱上拔位移。



a W0 边墙骨柱底端骨架钉拔出; b W0 边墙骨柱底端骨架钉弯曲; c W6-100 边墙骨柱底端骨架钉拔出; d 底梁板端部弯曲; e 中墙骨柱底端骨架钉拔出。

图7 骨架钉节点破坏形态

Fig.7 Failure mode of wall plate-to-stud connection

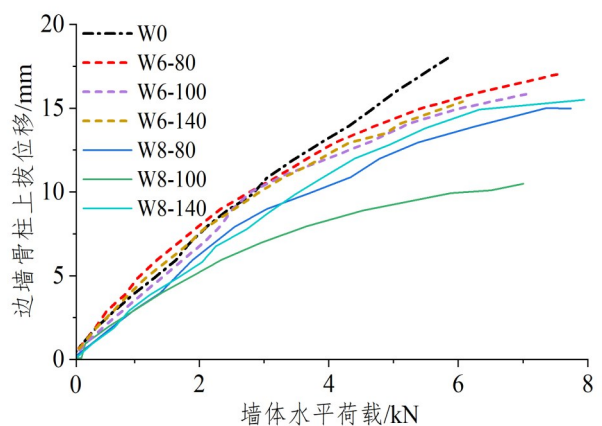


图8 边墙骨柱上拔-墙体水平位移曲线

Fig.8 Uplifting of edge wall stud column-wall horizontal displacement curve

2.2 荷载-位移曲线

增强剪力墙与普通剪力墙的荷载-位移曲线, 如图9所示。

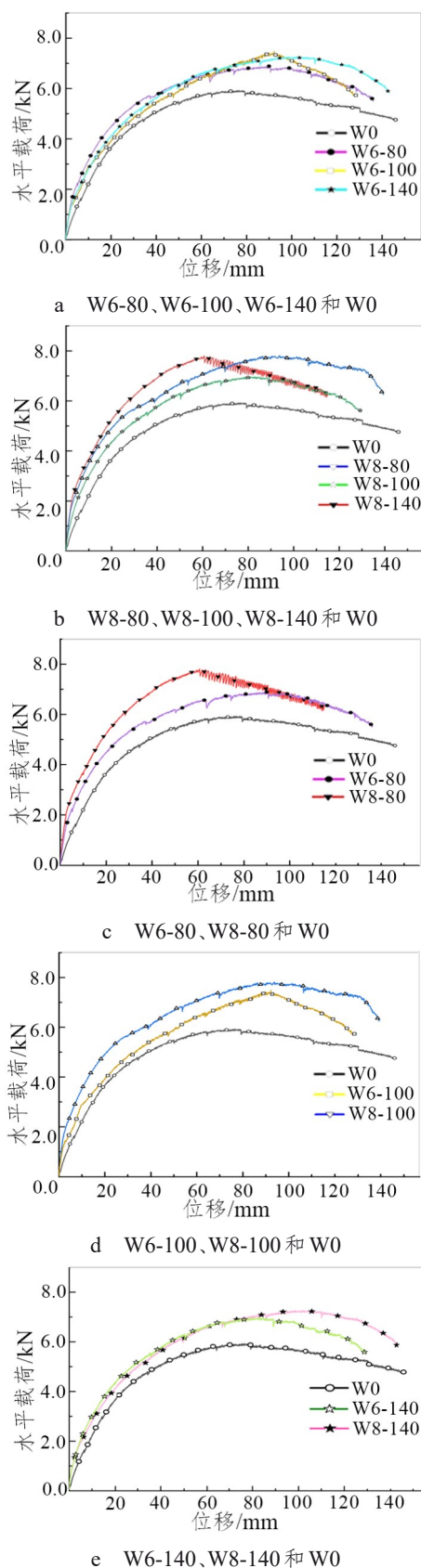


图9 不同直径和长度的螺钉增强剪力墙试件荷载-位移曲线
Fig.9 Shear wall load-displacement curves enhanced with different nail diameters and lengths

由图9可知：从加载初始到终止，试件共经历了三个阶段：基本弹性阶段、弹塑性上升阶段和塑性下降阶段。1) 在加载初期，墙体近似弹性，基本无破坏，在基本弹性阶段的水平荷载为极限荷载的64%~67%。2) 随着加载位移的增加，墙体由基本弹性阶段进入弹塑性上升阶段，覆面板相对墙骨架发生旋转，面板钉节点剪力逐渐增大，在剪切作用下，覆面板边缘逐渐被撕裂，面板钉发生弯曲现象。3) 加载位移继续增加，墙体进入塑性下降阶段，面板钉滑移进一步增大，边缘面板钉节点由每边的两端向中间逐个失效，墙体承载力逐渐降低，且降至极限承载力的80%，终止加载。对于W8-80，如图10所示，由于受力侧墙骨柱螺栓孔附近有直径约8 mm的木节，导致墙体达到峰值荷载时，螺栓孔孔径增大，面板钉节点逐个出现脆性破坏，因此曲线下阶段波动较大。

随着自攻螺钉直径的增加，荷载-位移曲线的峰值和基本弹性阶段的斜率均有所增大，即增强剪力墙的极限荷载和弹性抗侧刚度增大。这是因为直径大的自攻螺钉与木材的咬合力大，从而提升了墙体水平荷载，降低了初始水平位移。

由图9可知，随着自攻螺钉长度的增加，位于基本弹性阶段的荷载-位移关系曲线斜率有逐渐减小的趋势，也即增强剪力墙的弹性抗侧刚度逐渐减小。这是因为，自攻螺钉包括螺纹段、滚花段和光滑段三部分，自攻螺钉在旋入墙骨柱后的细节如图10所示。

80 mm长自攻螺钉螺纹段位于底梁板和墙骨柱之间，100和140 mm长的自攻螺钉则依次是滚花段和光滑段位于底梁板和墙骨柱之间，由于螺纹段可以使底梁板和墙骨柱连接更紧密，因此，墙体的弹性抗侧刚度随着钉长度的增加而降低。随着自攻螺钉长度的增加，荷载-位移关系曲线峰值先升高再降低，也即增强剪力墙的极限荷载先增大后减小，在自攻螺钉长度是100 mm时，增强剪力墙的极限荷载最高。这是因为，自攻螺钉存在于边墙骨柱内的螺纹段长度是影响边墙骨柱抗拔力的主要因素之一，钉长从80 mm增加到100 mm时，螺纹段增大，边墙骨柱的抗拔力也增大，所以增强剪力墙的极限荷载增加；因为长度100 mm

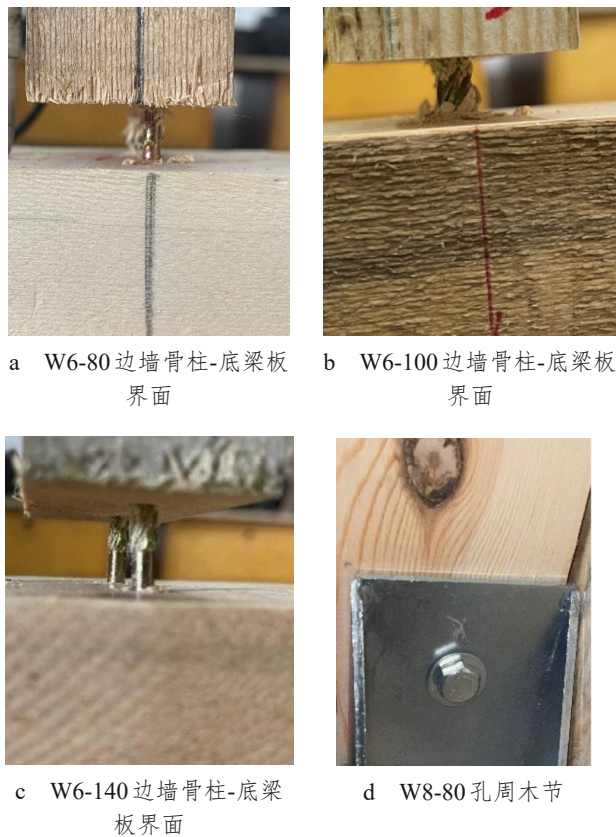


图10 自攻螺钉旋入边墙骨柱

Fig.10 The tapping screw drilling into the side stud

自攻螺钉的螺纹段已能提供足够的抗拔力，此后，螺纹段继续增加，抗拔力不再增加，而上拔位移较大，使得墙体其他部分的破坏更明显，从而降低了墙体的极限荷载。

2.3 EEPC 参数分析

各墙体的主要力学性能参数列于表3。

2.3.1 抗剪强度 由图7和表3可知，增强剪力墙的抗剪强度、极限荷载和屈服荷载均明显高于普通剪力墙，而极限位移和屈服位移均小于普通剪力墙。与普通剪力墙相比，直径6和8 mm自攻螺

钉连接的剪力墙抗剪强度最大提高了29%和33%。因为自攻螺钉与木材之间的咬合力能有效抑制墙骨柱上拔，减小墙体水平位移。直径8 mm，长度为80、100和140 mm自攻螺钉连接的剪力墙试件的抗剪强度，与直径6 mm、相同长度钉连接试件相比，分别高17%、高4%、低6%，因此，自攻螺钉的直径对墙体抗剪强度的影响不明显，自攻螺钉直径为6 mm时已满足墙体对于墙骨柱抗拔性能的要求，即使直径变大，抗拔力没有明显增加，对剪力墙抗剪强度的影响不显著。钉长较小时，大直径螺钉更能提供抗拔力；长度较大时，直径6 mm的螺钉足以提供抗拔力，若增大钉径，则对木材削弱变大，所以不升反降。

2.3.2 弹性抗侧刚度 增强剪力墙的弹性抗侧刚度均高于普通剪力墙，最大可提高211%。且钉径为8 mm的抗侧刚度更大。同一钉径下，墙体抗侧刚度随钉长的增加而减小，这与钉螺纹段距离钉帽大小有关。

2.3.3 屈服荷载和屈服位移 与普通剪力墙相比，增强剪力墙的屈服荷载最大可提高30.2%，且屈服位移随着钉长的增加而增加，但均小于普通剪力墙的屈服位移，即均小于24.4 mm。根据等效能量弹塑性理论公式，屈服位移是屈服荷载和弹性抗侧刚度的比。由前文分析可知，自攻螺钉长度变大，墙体刚度明显减小，而仅改变墙骨架底角处的自攻螺钉长度，对于提高强度作用不大，屈服荷载变化小，因此，墙体需通过更大水平变形达到屈服。

2.3.4 延性 与普通剪力墙相比，增强剪力墙的延性系数较大，最小为6.1，最大为7.9。自攻螺钉长度为100 mm、直径为6和8 mm的延性分别为7.9和6.3、长度为80 mm，直径为6和8 mm的延

表3 墙体主要力学性能参数

Tab.3 Main mechanical performance parameters of the tested shear walls

试件编号	抗剪强度 $f_{vd}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	极限荷载 $F_{\max}/\text{kN}$	屈服位移 $\Delta_{\text{failure}}/\text{mm}$	弹性抗侧刚度 $K_e/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	屈服荷载 $F_{\text{yield}}/\text{kN}$	屈服位移 $\Delta_{\text{yield}}/\text{mm}$	延性系数 D	耗能 A/J
W0	4.9	5.9	146.3	217.4	5.3	24.4	6.0	714 682
W6-80	5.7	6.8	136.3	353.7	6.1	17.2	7.8	783 630
W6-100	6.3	7.6	129.0	309.0	6.3	20.5	6.3	733 858
W6-140	6.1	7.3	143.1	276.9	6.5	23.3	6.1	848 727
W8-80	6.5	7.8	115.0	458.3	6.8	14.8	7.8	728 767
W8-100	6.5	7.8	139.6	391.3	6.9	17.6	7.9	901 696
W8-140	5.8	7.0	129.5	322.9	6.2	19.2	6.8	740 799

性分别为 6.8 和 6.1。当钉长相等时, 自攻螺钉直径为 8 mm 比直径 6 mm 时的墙体延性大。因为钉长较小的自攻螺钉在初始加载时就能发挥抗拔作用, 而对于钉长较大的自攻螺钉, 其螺纹段还未完全发挥作用, 墙体已经破坏。自攻螺钉虽降低了墙体屈服位移和极限位移, 但提高了墙体延性, 这说明采用自攻螺钉可以使墙体弹塑性阶段变长, 使墙体在进入弹塑性阶段后直至破坏前, 可以继续承受较大的变形, 所以延性较大。

2.3.5 耗能 增强剪力墙的耗能均大于普通剪力墙, 最大可以提高 26.2%。相比普通剪力墙, 增强剪力墙在加载初期的墙骨柱抗拔性能增强, 与底梁板分离程度小, 从而覆面板相对墙骨架位移较小, 协同工作性良好, 剪力墙强度提高; 当边墙骨柱上拔量变大, 边墙骨柱、底梁板上的面板钉被有效嵌固在覆面板内, 在加载端墙角处的边缘面板钉退出工作之前, 中墙骨柱上的面板钉被有效利用, 墙体强度缓慢提高到最大承载力, 部分边缘面板钉失效, 直到墙体破坏。因此, 普通剪力墙和增强剪力墙的耗能机制主要来自边缘面板钉节点和中间面板钉节点提供的剪力, 而增强剪力墙的中墙骨柱节点提供的剪力更大; 此外, 增强剪力墙耗能机制还包括自攻螺钉抗弯能力、其与木材的咬合力, 以及墙骨柱抗弯力等。

3 结论

1) 自攻螺钉能有效减小墙体在破坏时墙骨柱的上拔量。

2) 与普通剪力墙相比, 使用自攻螺钉可提高剪力墙的抗剪强度、弹性抗侧刚度、屈服荷载、延性系数和耗能, 墙体抗侧性能得到了增强。

3) 相比于使用直径 6 mm 的自攻螺钉, 使用直径 8 mm 自攻螺钉的墙体极限荷载和弹性抗侧刚度较大。随着自攻螺钉长度的增加, 增强剪力墙的弹性抗侧刚度逐渐减小, 极限荷载先增大后减小。

参考文献:

- [1] 陈志军. 小径木组合搁栅楼盖面内抗剪性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [2] ELLINGWOOD B R, ROSOWSKY D V, PANG W. Performance of light-frame wood residential construction subjected to earthquakes in regions of moderate seismicity[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(8): 1353-1363.
- [3] 左宏亮, 邸静, 王桐, 等. 预应力交叉拉杆轻型木结构剪力墙低周往复荷载的抗侧性能[J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(6): 61-64.
ZUO H L, DI J, WANG T, et al. Lateral performance of prestressed diagonal cross-bar reinforced timber shear walls under cyclic loading [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47(6): 61-64.
- [4] 李铁强. 配筋轻型木结构剪力墙低周反复荷载作用抗剪性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
- [5] Anderson E N, Leicht R, Sutt E G, et al. Sheathing nail bending-yield stress: effect on cyclic performance of wood shear walls[J]. *Wood and Fiber Science*, 2007, 39: 536-547.
- [6] Mckee S, Crandell J, Hicks R, et al. The performance of perforated shear walls with narrow wall segments, reduced base restraint, and alternative framing methods: DC(Contract H-21065CA) [R]. Upper Marlboro, MD: NAHB Research Center, Inc., 1998.
- [7] Spasojevic M, Daneshvar H, Niederwestberg J, et al. Structural performance of light wood shear walls built with insulated sheathing panels[J]. *Engineering Structures*, 2021, 241: 112449.
- [8] 何敏娟, 周楠楠. 不同覆面材料木剪力墙抗侧性能试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(3): 340-345.
HE M J, ZHOU N N. Experimental study on racking performance of light-frame shear walls with various sheathing materials[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(3): 340-345.
- [9] 邸静. 端部条带面板增强轻型木结构剪力墙单调荷载下抗侧性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [10] LAM F, PRION H G L, HE M. Lateral resistance of wood shear walls with large sheathing panels[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1997, 123(12): 1666-1673.
- [11] 杜敏, 费本华, 谢宝元, 等. 榫接木框架剪力墙受剪性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(6): 144-150.
DU M, FEI B H, XIE B Y, et al. Shear performance of wood-frame shear walls with rabbet stud connection[J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(6): 144-150.
- [12] 武国芳, 钟永, 龚迎春, 等. 木结构梁柱间榫卯连接节点性能研究进展[J]. *木材工业*, 2019, 33(5): 25-29.
WU G F, ZHONG Y, GONG Y C, et al. Review of performance of tenon-mortise joints between column and beam in timber structures[J]. *China Wood Industry*, 2019, 33(5): 25-29.
- [13] 左宏亮, 刘翰然, 鲁建鑫. 新型自攻螺钉加固措施对胶合木梁受弯性能的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2020, 48(5): 112-116, 121.
ZUO H L, LIU H R, LU J X. Effect of new self-tapping screw reinforcement measures on bending performance of glulam beams[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, 48(5): 112-116, 121.
- [14] ASTM E 2126-08, Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings[S].

(本文编校 张 鹏、向 琴)