

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2026007

大厚度旋切单板胶合板覆面承重型木质结构 保温板的抗侧性能

扎西尼玛¹, 刘红光¹, 宁新广²

(1. 北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083; 2. 蓬莱正泰木业有限公司, 山东蓬莱 265600)



摘要: 以辐射松 (*Pinus radiata*) 大厚度旋切单板胶合板为覆面板、模塑聚苯乙烯泡沫 (expanded polystyrene, EPS) 为保温芯层, 制备承重型木质结构保温板 (structural insulated panels, SIPs)。依据覆面板两种厚度 (30、60 mm)、芯层是否填充 EPS, 设计四组足尺 SIPs 试件, 分别进行单调与往复循环加载试验, 分析 SIPs 试件的破坏模式, 并测试其极限荷载、抗剪强度、刚度、延性及耗能等关键性能参数。结果表明: 1) 增加覆面板厚度可提升 SIPs 的承载力与刚度, 在单调加载下, 60 mm 厚度胶合板覆面 SIPs 试件的极限荷载是 30 mm 厚度胶合板覆面 SIPs 试件的 1.88 倍 (填充 EPS) 或 1.77 倍 (未填充 EPS); 2) EPS 填充能有效改善 SIPs 试件的延性与耗能性能。覆面板厚度为 60 mm 时, 在单调加载下, 填充 EPS 的 SIPs 试件耗能是未填充 EPS 试件的 2.02 倍; 在往复循环加载下, 填充 EPS 的 SIPs 试件耗能是未填充 EPS 试件的 1.67 倍; 3) EPS 促使破坏模式从覆面板螺栓孔局部脆性撕裂向墙骨-覆面板界面、墙骨-底梁板节点等多部位渐进式混合损伤发展, 结构整体性增强; 4) 往复循环加载下 SIPs 试件的极限承载力普遍低于单调加载结果, 并呈现推拉方向的不对称力学特征。研究表明, 覆面板厚度是影响 SIPs 抗侧承载与变形能力的关键性因素, EPS 填充则是改善延性与耗能性能的有效途径, 二者结合可协同提升承重型 SIPs 的抗侧性能, 为该类构件在中高层建筑等荷载要求较高场合中的应用提供试验支撑与设计参考。

关键词: 厚胶合板; 旋切单板; 结构保温板; 抗侧性能; 覆面板; 保温芯层

中图分类号: TU366.2; TS653.3 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 02-0069-11

Lateral Racking Performance of Structural Insulation Panels Overlaid with Thick Plywood Made of Rotary Peeled Veneer

TASHI Nyima¹, LIU Hongguang¹, NING Xinguang²

(1. College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Penglai Zhengtai Wood Industry Co., Ltd., Penglai 265600, Shandong, China)

Abstract: Load-bearing structural insulated panels (SIPs) were fabricated using thick plywood made of rotary-peeled from radiata pine (*Pinus radiata*) veneer as the sheathing material and expanded polystyrene (EPS) foam as the insulation core. Four groups of full-scale SIP specimens were designed according to two sheathing material thicknesses, 30 and 60 mm, and the presence or absence of EPS core infill. Monotonic and reversed cyclic loading tests were conducted to investigate the failure modes of the

收稿日期: 2026-01-15; 修改日期: 2026-03-15

基金项目: “十三五”国家重点研究计划课题“大跨木结构体系研究及示范工程”(2017YFC0703506)。

作者简介: 扎西尼玛 (2000—), 男, 硕士研究生。Email: zhaxi@bjfu.edu.cn

通讯作者: 刘红光, 男, 副教授。Email: bjfuliuhg@bjfu.edu.cn

SIP specimens and to determine key performance parameters, including ultimate load, shear strength, stiffness, ductility, and energy dissipation capacity. The results showed that: 1) increasing the thickness of the sheathing material enhanced the load-bearing capacity and stiffness of the SIPs. Under the monotonic loading, the ultimate load of SIP specimens with 60-mm-thick sheathing material was 1.88 times that of specimens with 30-mm-thick sheathing material when filled with EPS, and 1.77 times that of specimens without EPS infill; 2) EPS infill effectively improved the ductility and energy dissipation capacity of the SIP specimens. Under the monotonic loading, the energy dissipation of the EPS-filled SIP specimens was 2.02 times that of specimens without EPS infill for the 60-mm-thick sheathing material group. Under the reversed cyclic loading, the energy dissipation of the EPS-filled SIP specimens was 1.67 times that of specimens without EPS infill for the 60-mm-thick sheathing material group; 3) EPS changed the failure mode from localized brittle tearing around bolt holes in the sheathing material to progressive mixed damage at multiple locations, including the stud-sheathing material interface and the stud-bottom plate connections, thereby improving the structural integrity; 4) under the reversed cyclic loading, the ultimate load-bearing capacity of the SIP specimens was generally lower than that obtained under monotonic loading, and asymmetric mechanical behavior was observed in the push and pull directions. This study demonstrated that the thickness of the sheathing material was a critical factor affecting the lateral racking performance and deformation capacities of SIPs, while EPS infill was a key measure for improving ductility and energy dissipation capacity. The combined use of increased sheathing material thickness and EPS infill could synergistically enhance the lateral racking performance of SIPs, providing experimental support and design reference for the application of such components in mid- and high-rise buildings and other scenarios with high load-bearing requirements.

Key words: thick plywood; rotary-peeled veneer; lateral racking performance; structural insulated panels; sheathing material; insulation core;

在全球碳中和与建筑节能的背景下, 木质材料成为近零能耗建筑的重要选择^[1]。木质结构保温板 (structural insulated panels, SIPs) 质轻高强, 具有良好的保温、抗震与施工便捷性, 已广泛应用于各类建筑中。其结构由两侧覆面板与中间保温芯层复合而成, 覆面材料常用定向刨花板 (oriented strand board, OSB)、胶合板、水泥板等, 芯材则多采用模塑聚苯乙烯泡沫 (expanded polystyrene, EPS) 等^[2]。

作为一种多功能复合构件, SIPs 的力学性能是其工程应用的核心基础。其中抗侧性能即在水平荷载如风、地震作用下的面内承载与变形能力, 是其作为剪力墙构件时的核心性能指标, 直接关系到建筑的抗震安全性与整体稳定性^[3-4]。覆面板作为 SIPs 的主要受力部件, 其力学性能直接决定 SIPs 构件的整体抗侧性能。传统 OSB 因成本低、加工方便而被广泛使用, 但其抗剪强度与延性通

常较低, 限制其在高荷载建筑场景中的应用^[5]。近年来相关学者尝试采用多种材料替代 OSB。结构胶合板因其更高的面内抗弯强度, 可显著提升墙板的极限荷载^[6]。重组竹凭借其定向纤维排列和高弹性模量, 也能带来抗剪强度的提高^[7-8]。采用正交胶合木 (cross-laminated timber, CLT) 作为覆面板, 能在保持良好力学性能的同时, 降低能源和木材消耗^[3]。

除覆面材料本身, 厚度及芯材的配置也影响 SIPs 的受力机制。增加覆面板厚度是提升墙板抗剪强度与极限位移的直接手段^[9], 但若缺乏有效的整体性设计, 其滞回曲线易出现“捏缩”现象, 延性不足^[10-11]。芯材的填充通过扩大受压面积可增强竖向抗压性能, 但对侧向荷载作用下的抗弯性能影响相对有限^[12-13]。此外, 覆面板与木框架之间的连接方式直接影响内力传递效率, 合理设计有助于减少局部撕裂风险^[14-15]。

SIPs 抗侧性能改进已取得一定进展，但开发兼具高承载力、优良延性和高效耗能能力的覆面体系，仍是推动其在高层建筑中应用的关键。大厚度旋切单板胶合板是一种采用大厚度旋切单板、按正交组坯方式层积胶合而成的工程木产品。其相较于传统胶合板，具有更高的材料利用率和更低的用胶量，厚度可灵活调整，具备在结构用覆面板领域替代传统 OSB 和胶合板的潜力。然而，目前大厚度旋切单板胶合板应用于 SIPs 覆面的研究鲜有报道。鉴于此，本研究采用两种厚度（30、60 mm）覆面板和 EPS 芯材，共设计四组足尺 SIPs 试件，通过单调与往复循环加载试验，探究覆面板厚度及 EPS 芯层填充对 SIPs 抗侧性能的影响，旨在验证大厚度旋切单板胶合板作为覆面材料在木结构墙体中的应用可行性，为大厚度旋切单板胶合板覆面 SIPs 在多高层木结构建筑等载荷要求较高场合中的工程设计与应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

框架采用云杉-松-冷杉（spruce-pine-fir，SPF）规格材，气干密度为 0.41 g/cm³，含水率为 12%，加拿大进口，由山东某公司提供。

覆面板采用大厚度旋切单板胶合板，由辐射松（*Pinus radiata*）原木经旋切工艺加工成 7.5 mm 厚度单板，经干燥、拼接、涂胶，按照正交组坯方式（相邻层纤维方向互相垂直）铺装，层数分别为 4（30 mm 厚度）和 8（60 mm 厚度），在 1.2 MPa 压力下冷压成型。由山东某公司生产。

芯板采用 EPS 泡沫板，密度为 20 kg/m³，购于山东某建材市场。

试件各部位材料规格见表 1（其中各种材料的数量为单面墙板所需）。

其他：单组分聚氨酯胶黏剂（HB S309），黏度 25 Pa·s（常温），固体含量 1.05；“U”形抗倾覆连接件；M20 螺栓，公称抗拉强度为 400 MPa，屈强比 0.6，屈服强度 240 MPa。外购。

1.2 试验设备

木结构电液伺服加载试验系统（JAW-300/2）、荷载传感器、位移计等。

表1 结构保温板制备材料及规格
Tab.1 Materials and specifications for making structural insulation panels

材料	部位	数量	规格
大厚度旋切单板胶合板	覆面板	2	2 400 mm×1 200 mm×30 mm
			2 400 mm×1 200 mm×60 mm
SPF 规格材	框架-顶、底梁板	4	543 mm×120 mm×38 mm
			543 mm×60 mm×38 mm
	框架-侧、中墙骨	3	2 400 mm×120 mm×38 mm 2 400 mm×60 mm×38 mm
EPS	保温芯层	2	2 324 mm×54 mm×120 mm
			232 mm×543 mm×60 mm

1.3 试验方法

1.3.1 承重型木质结构保温板制备 首先，将 SPF 规格材按设计尺寸加工为顶梁板、底梁板及墙骨。在框架连接部位均匀涂布聚氨酯胶黏剂，拼接形成木框架，室温下静置固化 30 min。待框架成型后，按墙板内部空腔尺寸裁剪 EPS，将其嵌入木框架中。随后，在木框架与 EPS 的表面均匀涂布同种聚氨酯胶黏剂，覆盖覆面板。采用夹具在室温下对墙板施加均匀压力，压力约 1.2 MPa，保压 12 h 后卸压。制作完成的 SIPs 试件在室温条件下陈放 48 h 以上，确保胶黏剂充分固化。试件规格为 2 400 mm×1 200 mm×180 mm，具体构造如图 1 所示。

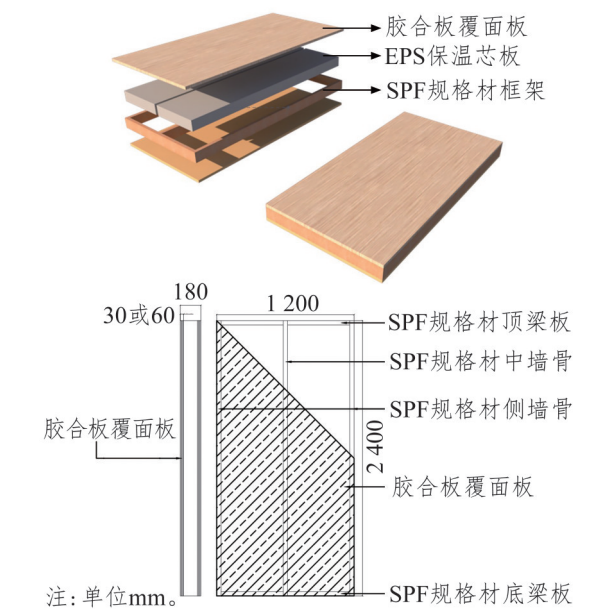


图1 结构保温板结构示意图
Fig.1 Structural configuration of structural insulation panel

1.3.2 试验设计 采用双因素两水平试验,以覆面板厚度和是否填充 EPS 为主要变量,采用单调与往复循环两种加载方式,试件分组信息列于表 2。

表 2 结构保温板信息和加载方式

Tab.2 Loading schemes of structural insulation panels

编号	覆面板厚度/mm	EPS 填充	数量	加载方式
WA-1	30	是	1	单调
WA-2	30	是	1	往复循环
WB-1	30	否	1	单调
WB-2	30	否	1	往复循环
WC-1	60	是	1	单调
WC-2	60	是	1	往复循环
WD-1	60	否	1	单调
WD-2	60	否	1	往复循环

1.3.3 加载方式 采用木结构电液伺服加载试验系统对试件进行位移控制加载。墙板底部参照 GB 50005—2017《木结构设计标准》中销连接的相关要求,采用“U”形抗倾覆连接件通过 M20 螺栓与试验机底座固定,符合实际工程使用情况,顶部则采用横向作动器的抱紧装置进行约束,具体安装方式与加载位置见图 2。

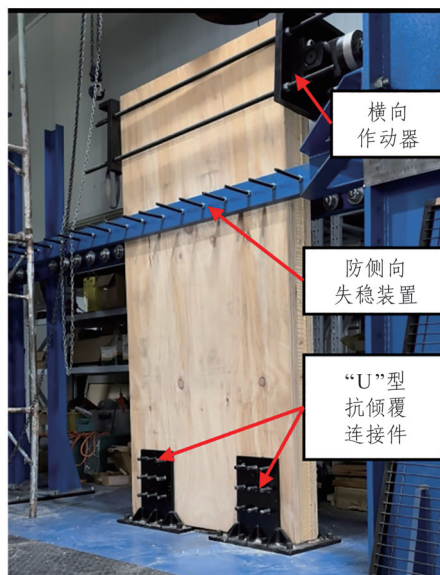


图 2 结构保温板安装方式与加载位置

Fig.2 Experimental setup and loading position of structural insulation panel

将墙板试件安装固定结束后,打开油泵和伺服系统,在电脑中设置加载程序对试件进行单调和往复循环加载。其中单调加载依据 ASTM E 564-

06(2018) “Standard practice for static load test for shear resistance of framed walls for buildings” 实施,采用位移控制模式,以 7.5 mm/min 的恒定速率进行加载。试件破坏失效判据设定为荷载值衰减至极限承载力的 80% 或发生不可恢复的结构损伤(未达荷载衰减标准时),记录此时位移值为极限位移 Δ_f 。往复循环加载参考标准 ASTM E 2126-25 “Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings”,采用位移控制模式。加载位移基准值取单调加载试验测得的极限位移 Δ_f ,按渐进式分级制度执行:预加载阶段依次施加 Δ_f 的 1.25%、2.50%、5.00%、7.50%、10.00% 位移幅值,各完成单循环预加载;主加载阶段采用 Δ_f 的 20%、40%、60%、80%、100%、120% 分级递增作为循环级数,每级位移幅值执行 3 次完整滞回循环后进入下一阶段加载,直至试件被破坏。加载过程保持恒定速率,位移加载速率为 1 mm/s。通过荷载-位移曲线分析试件的极限荷载、极限位移、抗剪强度、弹性抗侧刚度、屈服位移、延性系数、耗能。

2 结果与分析

2.1 破坏形态分析

在单调加载与往复循环加载试验中,各试件覆面板的破坏形态基本类似,如图 3 所示。破坏主要发生在覆面板底部螺栓孔区域,具体表现为孔周局部挤压破损、沿表板顺纹方向扩展的竖向贯通裂缝,以及孔间相连的波浪状水平裂缝。这是由于试件通过螺栓连接传递侧向力,孔壁承受集中挤压导致破坏,并在加载过程中螺栓孔处剪切力逐渐接近覆面板极限,引发劈裂。

在单调加载试验中,除覆面板破坏外,仅 WA-1 与 WC-1 在受推侧墙骨发生开裂破坏,其余试件未出现墙骨开裂。如图 4a、4b 所示,WA-1 的开裂位置位于墙骨底部并向上延伸,WC-1 的开裂位置位于墙骨顶部并向下发展,且其覆面板无明显破坏。这可能是由于 EPS 的填充导致荷载传递路径发生一定改变,使部分荷载传递至加载侧墙骨,导致该处开裂。

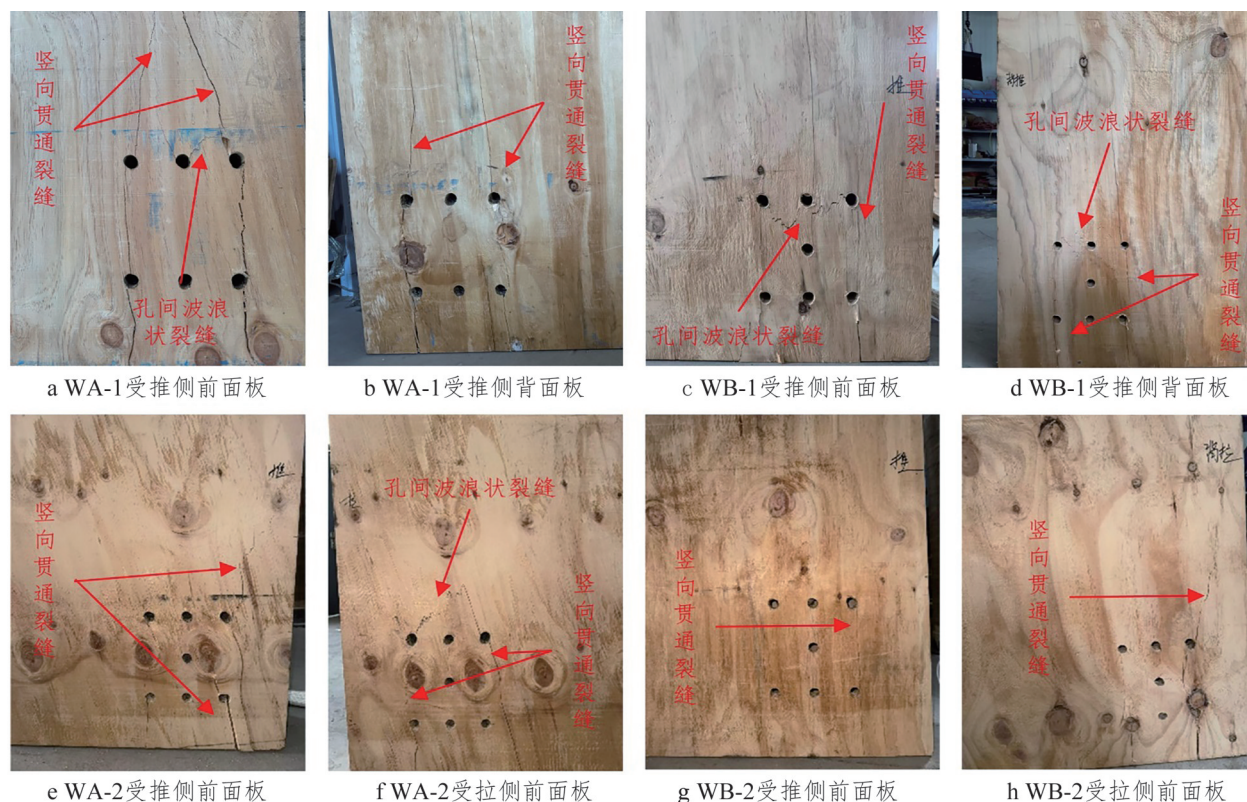


图3 单调加载与往复循环加载覆面板破坏形态

Fig.3 Failure modes of sheathing materials under the monotonic and reversed cyclic loadings

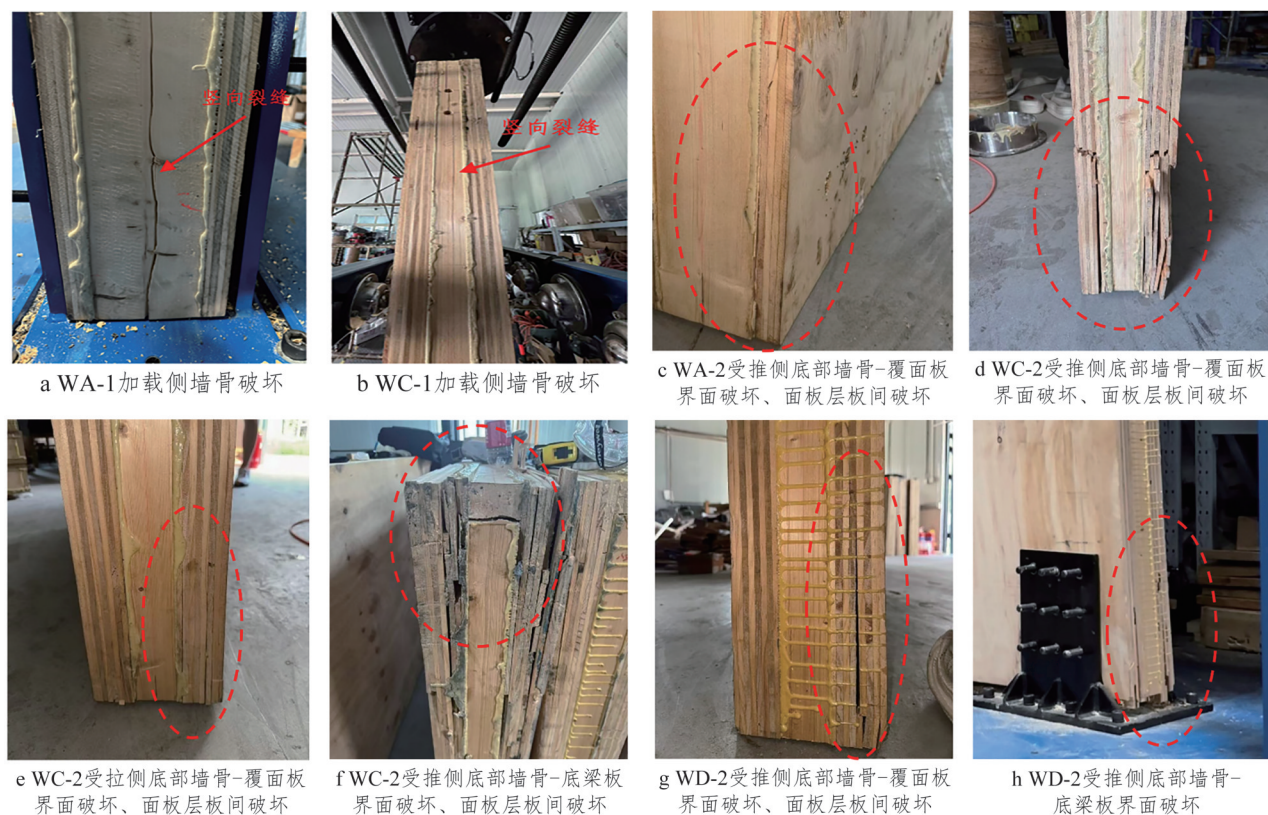


图4 单调加载与往复循环加载墙骨破坏形态

Fig.4 Failure modes of the studs under monotonic and reversed cyclic loadings

图4c~4h是往复循环加载下墙骨侧破坏形态。在往复循环加载试验中,各试件覆面板推、拉侧底部螺栓孔处出现局部挤压破损与贯通撕裂,破坏形态与单调加载一致。除了WB-2外,其余3组试件均在底部墙骨-面板胶接面、墙骨-底梁板结合处及覆面板层板之间出现不同程度的开裂、错动破坏。这是因为WA-2、WC-2填充EPS,增强覆面板与墙骨的协同受力效果,往复循环荷载下的变形力可通过EPS传递至胶接面与结合处,引发界面开裂错动;而WD-2虽然未填充EPS,但60 mm厚度覆面板自身刚度较大,往复变形时会直接拉扯面板层板及墙骨-底梁板结合处,进而诱发损伤。反观WB-2因无EPS且采用30 mm厚度覆面板,荷载作用下的变形集中于面板自身,未向胶接面、结合处传递,因此未出现此类破坏。

传统SIPs及轻型木结构剪力墙在单调与往复循环加载下,破坏多发生在钉连接处。刘晓娜^[9]对聚氨酯芯材SIPs墙板水平抗侧性能试验中观察到,破坏主要发生于靠近作动器的抗拔装置处,表现为自攻螺钉弯曲或断裂、墙骨柱与底梁板分离、面板与底梁板钉连接失效。在轻型木结构方面,破坏模式也多是面板钉连接破坏(钉拔出、钉帽穿透面板、面板撕裂)、墙骨柱上拔及与底梁板分离等^[16-18]。本研究中墙板破坏也发生在连接部位,与上述研究类似。但本研究墙板采用整体胶合工艺,无面板钉连接,覆面板通过螺栓直接与底座相连,因此破坏表现为面板螺栓孔区域损伤及墙骨-面板胶接面、墙骨-底梁板结合处的开裂错动。

2.2 荷载-位移曲线分析

根据单调加载试验各组试件的荷载-位移曲线(图5)可知,增加覆面板厚度可显著改善墙板抗侧性能。60 mm厚度覆面板SIPs试件的曲线线性段持续时间更长,荷载上升更平稳,极限荷载与位移远高于30 mm厚度覆面板SIPs试件,表明其损伤发展具有更好的渐进性。在相同覆面板厚度下,填充EPS试件的曲线线性段斜率更高、形态更平滑,表明其受力传递更为均匀,且极限荷载与极限位移均优于未填充试件。

对于覆面板厚度为30 mm的试件,WA-1与WB-1在加载后期均出现荷载短暂下降后继续上升

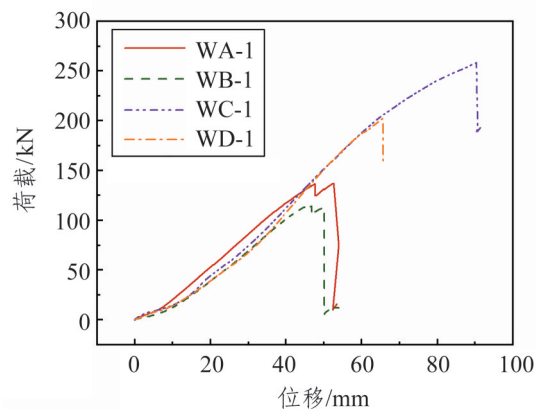


图5 结构保温板单调加载试验荷载-位移曲线

Fig.5 Load-displacement curves of structural insulation panel under the monotonic loading

的现象,这是由于薄面板抗剪强度较弱,螺栓孔处产生缝隙,但墙板并没有因此彻底失效,随着位移继续增大,承载力仍可上升直至破坏,这与重组竹板增强轻型木结构剪力墙单调加载试验中观察到的现象一致^[16]。在荷载恢复阶段,含EPS的WA-1因损伤分布更均匀、新传力路径更稳定,恢复平稳且残余刚度保持较好。

在初始0~10 mm位移区间,试件刚度较低,可能与试验机加载初期与顶部连接装置间的轻微滑移以及螺栓孔处的缝隙在加载初期逐步压实等因素有关。随着位移增加,各部件协同工作趋于稳定,刚度随之提高并进入稳定的弹性阶段。

往复循环加载试验的荷载-位移曲线如图6所示。各试件滞回曲线均呈现明显“反S形”特征,中部存在捏缩现象,表明在循环荷载作用下试件存在较强的滑移效应,整体耗能能力有限^[9, 16, 19]。这可能源于螺栓孔处的缝隙反复挤压破损,以及墙骨-面板、墙骨-底梁板等胶接界面的开裂错动。

对比不同构造试件,填充EPS的WA-2和WC-2滞回环相对饱满,尤其WA-2在推、拉方向分别维持至100% Δ_f 和120% Δ_f 的首循环才破坏,表现出较好的变形延续性;WC-2虽然在推、拉方向分别于80% Δ_f 和100% Δ_f 的首循环破坏,但其在破坏前的各阶段保持较高的承载力和环面积。未填充EPS的WB-2性能最弱,滞回环捏缩显著,承载力和刚度退化最快;WD-2虽然也未填充EPS,但凭借60 mm厚度覆面板的较高刚度,其破坏发生在推方向100% Δ_f 的第二循环和拉方向120% Δ_f 的首循环,

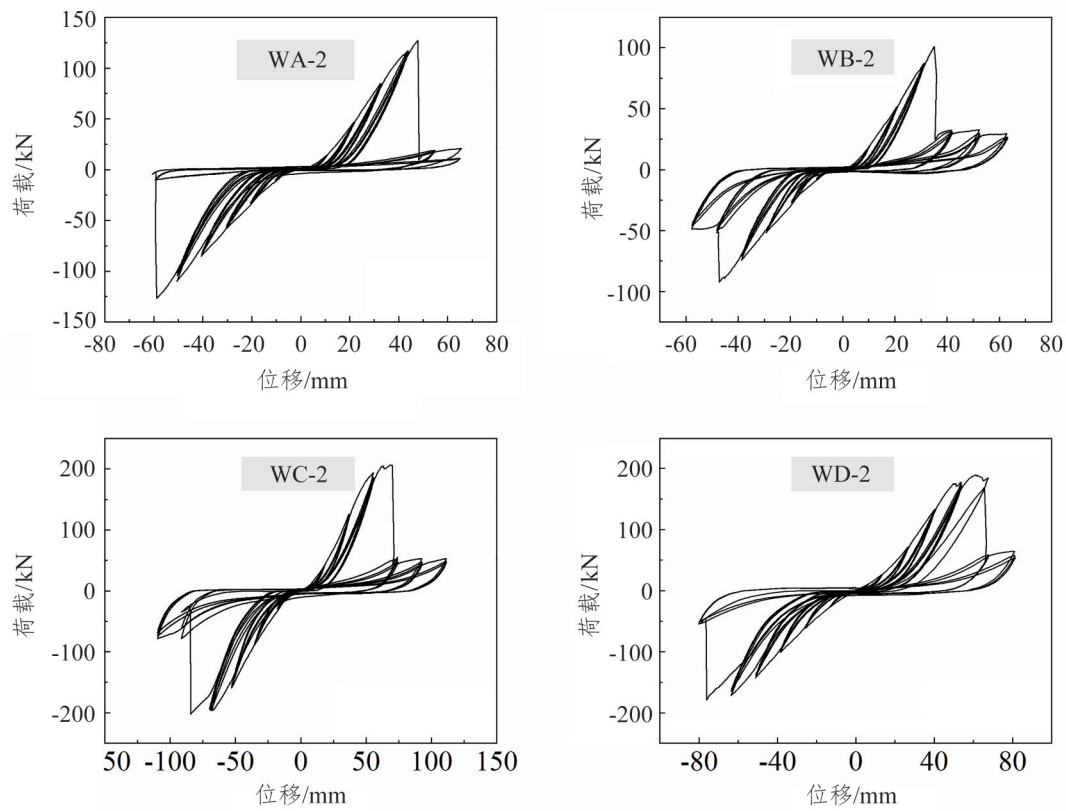


图6 结构保温板往复循环加载试验荷载-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves of structural insulation panel under the reversed cyclic loading

表现出比WB-2更好的损伤容限。增加覆面板厚度可有效提升墙板的初始刚度与极限承载力^[4, 17], 60 mm厚度覆面板的SIPs试件在相同位移级下的荷载水平均显著高于30 mm厚度覆面板对应试件。从破坏发展模式看, EPS的加入增强了覆面板与框架的整体性, 使损伤发展更为分散, 破坏位移有所延后^[4]; 而无EPS填充的试件破坏则集中于连接节点, 表现出更明显的脆性特征。

往复循环加载作用下各组试件滞回曲线的骨架曲线如图7所示。可以看出往复循环加载试验中各试件在推方向的峰值荷载大于拉方向, 极限位移小于拉方向^[20]。60 mm厚度覆面板试件的峰值荷载与极限位移都显著高于30 mm厚度覆面板试件, 在相同厚度覆面板条件下, EPS填充使峰值荷载略有提升, 且明显提高了拉方向承载力的对称性。在初始弹性阶段, 60 mm厚度覆面板试件的刚度高于30 mm厚度覆面板试件, 而在相同覆面板厚度条件下, EPS填充对刚度影响较小, 说明覆面板厚度是决定弹性阶段抗侧刚度的主导因素。

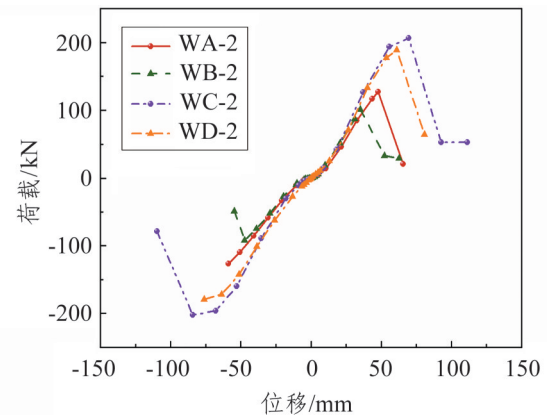


图7 结构保温板往复循环加载试验骨架曲线

Fig.7 Skeleton curves of structural insulation panel under the reversed cyclic loading

2.3 单调加载抗侧性能分析

单调加载试验中各组试件的抗侧性能参数列于表3。

2.3.1 极限荷载与抗剪强度 由于所有试件墙板长度相同, 极限荷载与抗剪强度的变化趋势一致, 排序均为WC-1>WD-1>WA-1>WB-1。覆面板厚度是影响墙板承载力的主要因素, 60 mm厚度覆面板

表3 结构保温板单调加载抗侧性能参数

Tab.3 Lateral racking performance parameters of structural insulation panel under the monotonic loading

试件编号	极限荷载 $F_{\max}/\text{kN}$	极限位移 ρ_d/mm	抗剪强度 $f_{\text{vd}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	弹性抗侧刚度 $K_e/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	屈服位移 ρ_d/mm	延性系数 D	耗能 E/J
WA-1	136.98	52.58	114.15	2.66	24.72	2.13	3 934.62
WB-1	114.26	50.22	95.22	2.04	26.27	1.91	2 839.78
WC-1	258.16	90.41	215.13	2.74	44.3	2.04	11 865.63
WD-1	202.33	65.56	168.81	2.41	38.43	1.71	5 882.26

SIPs 试件的承载力为 30 mm 厚覆面板 SIPs 试件的 1.88 倍（填充 EPS）或 1.77 倍（未填充 EPS）。EPS 填充使 30、60 mm 厚覆面板 SIPs 试件的承载力分别提升 20%、28%，这得益于其增强的整体性与应力传递效果。

2.3.2 极限位移与屈服位移 极限位移与屈服位移的大小顺序与极限荷载一致。增加覆面板厚度可提升墙板的变形能力，EPS 填充对墙板变形能力的影响与覆面板厚度有关。覆面板厚度为 30 mm 时，WA-1 极限位移较 WB-1 仅提高 4.7%；覆面板厚度为 60 mm 时，WC-1 极限位移较 WD-1 提高 37.9%，屈服位移提高 15.3%。这表明在覆面板刚度较高时，EPS 填充对于提升墙板极限抗形变能力具有积极作用。

2.3.3 弹性抗侧刚度 弹性抗侧刚度从高到低依次为：WC-1>WA-1>WD-1>WB-1。结果表明，增加覆面板厚度与填充 EPS 均对墙板弹性抗侧刚度具有提升作用。在覆面板厚度方面，60 mm 厚度覆面板 SIPs 试件的弹性抗侧刚度均高于对应 30 mm 厚度覆面板试件，WC-1 较 WA-1 高 3.0%，WD-1 较 WB-1 高 18.1%；在 EPS 填充方面，WA-1 较 WB-1 高 30.4%，WC-1 较 WD-1 高 13.7%。其中 WA-1 的覆面板厚度虽然小于 WD-1，但由于填充了 EPS，其弹性抗侧刚度较 WD-1 提升了 10.4%。说明 EPS 填充对墙板弹性抗侧刚度的提升作用^[21]在一定程度上可以弥补覆面板厚度的不足。

2.3.4 延性系数 单调加载下试件延性系数排序为：WA-1>WC-1>WB-1>WD-1。结果表明，承载力与延性并非简单正相关，如综合性能最优的 WC-1 延性略低于 WA-1，相差 4.4%，而未填充 EPS 的 WD-1 延性最低。

在相同覆面板厚度条件下，WA-1 较 WB-1 提高 11.5%，WC-1 较 WD-1 提高 19.3%，说明 EPS 填

充对墙板延性改善效果明显^[21]，且 WA-1 的延性值高于 WC-1，说明薄覆面板墙板在 EPS 协同下仍可获得较好的延性表现。本研究制备承重型 SIPs 墙板各部件均为胶连接，与传统轻型木结构剪力墙（延性系数为 6.04）^[16]、OSB 覆面 SIPs 墙板（延性系数为 3.25）^[5]相比延性较低。这是由于钉连接节点的塑性变形提供了更高的延性，而胶连接在受力过程中脆性特征明显，塑性变形能力有限导致。

2.3.5 耗能能力 在单调加载下，各试件耗能能力排序为：WC-1>WD-1>WA-1>WB-1。60 mm 厚度覆面板 SIPs 试件（WC-1、WD-1）的耗能为 30 mm 厚度覆面板 SIPs 试件（WA-1、WB-1）的 3.01 倍与 2.07 倍；相同覆面板厚度下，填充 EPS 试件（WA-1、WC-1）为无 EPS 填充试件（WB-1、WD-1）的 1.38 与 2.02 倍。耗能由荷载-位移曲线所包围的面积决定，大厚度覆面板与 EPS 填充带来的极限承载力和抗形变能力的提升，进一步提高耗能能力。

各试件在单调荷载下的耗能能力均高于传统轻型木结构剪力墙（600 J）^[16]，这表明尽管胶连接限制了延性，但通过大厚度胶合板覆面板而获得的高承载力，使得本研究墙板在单调加载下可获得高于传统轻型木结构剪力墙的耗能能力。

2.4 往复循环加载抗侧性能分析

往复循环加载试验中各组试件的抗侧性能参数，列于表 4。

2.4.1 极限荷载与抗剪强度 极限荷载与抗剪强度变化规律一致，60 mm 厚度覆面板 SIPs 试件均高于 30 mm 厚度覆面板 SIPs 试件。其中，综合性能最优的 WC-2 平均极限荷载约为最弱试件 WB-2 的 2.1 倍。在相同覆面板厚度下，EPS 填充均带来稳定提升，WA-2 较 WB-2 提高约 31%，WC-2 较 WD-2 提高约 11%。

表4 往复循环加载结构保温板抗侧性能参数

Tab.4 Lateral racking performance parameters of structural insulation panel under the reversed cyclic loading

试件编号	加载方向	极限荷载 $F_{\max}/\text{kN}$	极限位移 ρ_d/mm	抗剪强度 $f_{vd}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	弹性抗侧刚度 $K_e/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	屈服位移 ρ_f/mm	延性系数 D	耗能 E/J
WA-2	推(+)	127.13	47.87	105.94	2.20	26.46	1.81	11 027.57
	拉(-)	126.81	58.88	105.68	1.86	32.09	1.83	
	平均	126.97	53.37	105.81	2.03	29.28	1.82	
WB-2	推(+)	100.97	35.09	84.14	2.33	20.39	1.72	9 914.98
	拉(-)	92.49	47.19	77.08	1.62	27.05	1.74	
	平均	96.73	41.14	80.61	1.98	23.72	1.73	
WC-2	推(+)	206.50	70.25	172.08	2.88	32.53	2.16	46 474.92
	拉(-)	202.45	84.28	168.71	2.45	38.64	2.18	
	平均	204.48	77.27	170.40	2.67	35.59	2.17	
WD-2	推(+)	189.06	65.83	157.55	2.72	31.96	2.06	27 786.08
	拉(-)	179.25	76.02	149.38	2.47	34.78	2.19	
	平均	184.16	70.93	153.46	2.60	33.37	2.12	

由图8可见,同一试件在往复循环加载下的极限荷载均低于单调加载结果,这可能与往复循环加载引起的累积损伤导致节点与界面刚度退化有关^[5]。同时,所有试件在往复循环加载中均表现出推方向极限荷载略高于拉方向的不对称性,这可能与“先推后拉”的加载制度有关^[16,20]。含EPS试件的这种不对称程度相对较小。

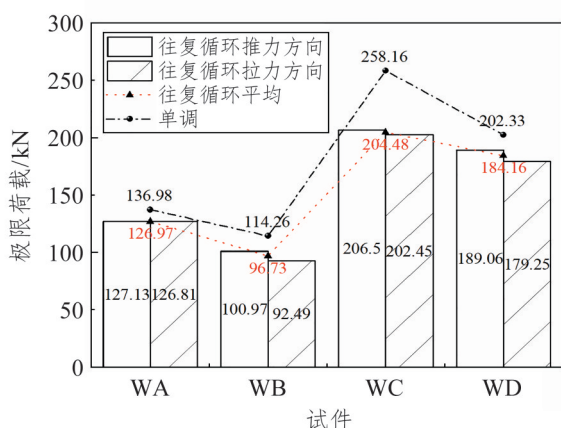


图8 各组结构保温板极限荷载

Fig.8 Ultimate load of structural insulation panel groups

2.4.2 极限位移 SIPs 极限位移受覆面板厚度与EPS填充的共同影响。当EPS填充条件相同时,60 mm厚胶合板覆面SIPs试件的极限位移平均值明显大于30 mm厚胶合板覆面SIPs试件,WC-2较WA-2提升约45%,WD-2较WB-2提升约72%。在覆面板厚度相同的情况下,EPS填充亦对极限位移有提升作用,WA-2较WB-2提高约30%,WC-2较

WD-2提高约9%。由于往复循环加载中存在残余推力效应,所有试件在拉方向的极限位移均大于推方向^[20]。

2.4.3 弹性抗侧刚度 SIPs 平均弹性抗侧刚度随覆面板厚度增加与EPS填充而提高。60 mm厚胶合板覆面SIPs试件的平均刚度较30 mm厚胶合板覆面SIPs试件提升约31%;在相同覆面板厚度下,填充EPS的试件较未填充试件提升约3%。所有试件推方向的刚度均高于拉方向。

2.4.4 抗力衰减 SIPs 抗力衰减反映其在一位移幅值下,后续循环峰值荷载相对于首次循环的降低程度,采用第2、3次与第1次循环峰值荷载的比值(衰减系数)进行量化,结果如图9所示。填充EPS的SIPs试件在同级位移下3次循环间的荷载衰减更小,破坏前性能更为稳定,破坏后承载力下降也较平缓。覆面板厚度主要影响破坏后SIPs的衰减行为,厚覆面板试件因刚度与强度较高,峰值后衰减较慢,残余强度更高;而EPS填充则通过增强墙板整体性与促进内力重分布,延缓破坏发生,并提升试件在峰值荷载附近的循环稳定性。

2.4.5 延性 在往复循环加载下,SIPs试件的延性受覆面板厚度与EPS填充的共同影响,且表现与单调加载有所差异。SIPs延性系数随覆面板厚度增加而提高,且相同厚度下含EPS的试件延性更高,表明EPS能通过促进应力重分布、延缓局部破坏,有效提升墙板在循环荷载下的塑性变形能力^[21]。与单调加载相比,60 mm厚胶合板覆面

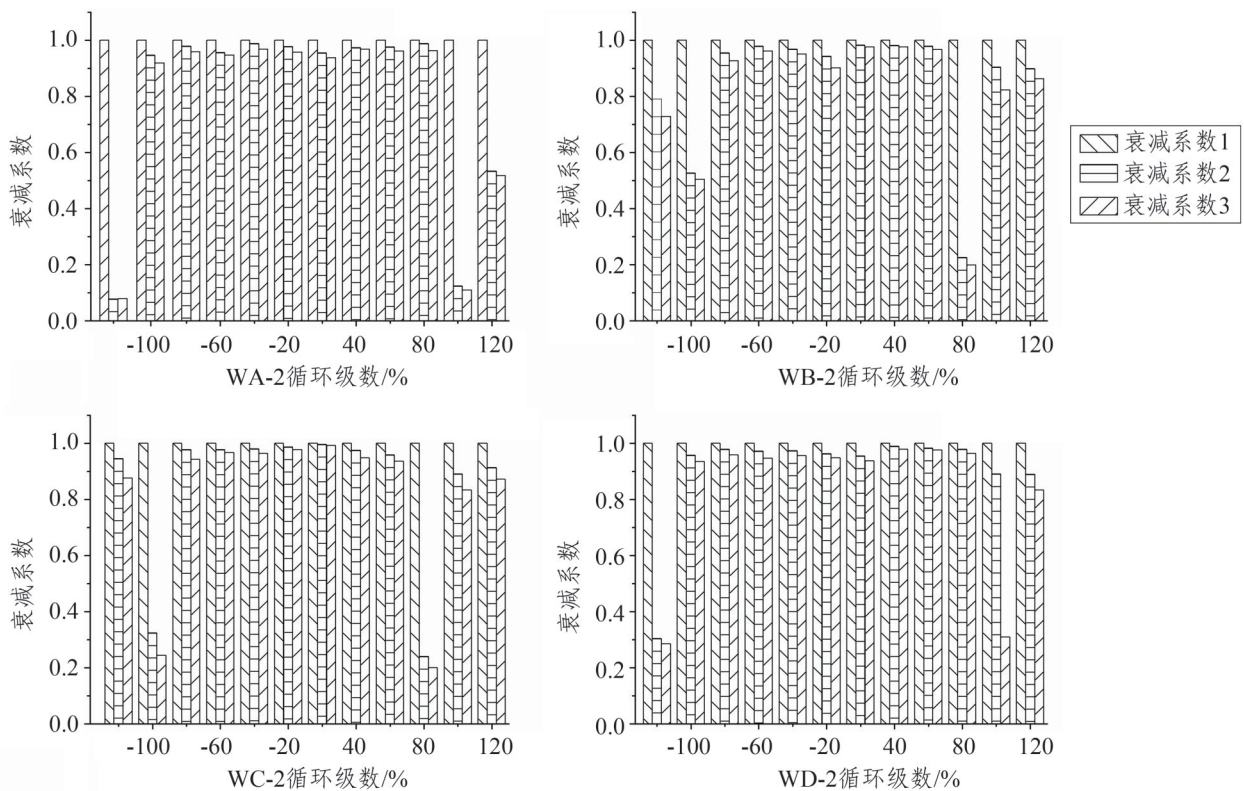


图9 各组结构保温板的抗力衰减

Fig.9 Resistance degradation of structural insulation panel groups

SIPs 试件在往复循环加载下延性略有提升, 而 30 mm 厚覆面板 SIPs 试件则略有下降。这可能由于薄覆面板试件在往复累积损伤下更易发生脆性集中破坏, 极限位移发展受限; 而厚覆面板试件则表现从“集中破坏”向“分布式损伤”转化的优化能力, 从而在循环荷载中保持乃至提高延性。

2.4.6 耗能能力 增大覆面板厚度与填充 EPS 均可提升墙板的耗能能力。覆面板厚度相同时, 填充 EPS 的 SIPs 试件耗能高于未填充 EPS 的 SIPs 试件, 如 WC-2 较 WD-2 提高约 67%。EPS 芯材在循环荷载下为覆面板与框架提供持续侧向支撑, 增强变形协调性, 促使破坏从单一的螺栓孔挤压扩展为包含墙骨开裂、界面滑移等多阶段耗能过程, 增大滞回环面积^[21]。覆面板厚度主要通过提高极限承载力与变形能力, 为耗能提供基础支撑。因此, 实现耗能能力最大化依赖覆面板强度与 EPS 带来高耗能效率的相互结合。尽管延性表现略差, 但得益于高抗侧承载力, 各墙板试件在往复循环下的耗能表现均高于传统 OSB 覆面 SIPs 墙板 (单位耗能 5 595.4 J/m)^[5]。

3 结论

1) 通过单调与往复循环加载试验, 分析覆面板厚度与 EPS 填充对承重型木质结构保温板 (SIPs) 墙板抗侧性能的影响, SIPs 破坏模式受覆面板厚度与 EPS 填充显著影响。30 mm 厚度覆面板及未填充 EPS 的 SIPs 试件破坏集中于面板螺栓孔区域, 表现为脆性挤压裂缝; 60 mm 厚度覆面板可将荷载更多传递至墙骨, 引发墙骨开裂。

2) 覆面板厚度是墙板承载力、刚度及变形能力的基础因素。60 mm 厚度胶合板覆面 SIPs 试件的极限荷载、抗剪强度、弹性刚度及耗能, 均优于 30 mm 厚度胶合板覆面 SIPs 试件。在单调加载下, 60 mm 厚度覆面板 SIPs 试件的极限荷载是 30 mm 厚度覆面板试件的 1.77 或 1.88 倍 (未填充或填充 EPS)。EPS 填充主要改善延性与耗能性能。覆面胶合板厚度为 60 mm 时, 填充 EPS 的 SIPs 试件耗能更高, 在单调、往复循环荷载下的耗能分别为未填充 EPS 的 2.02、1.67 倍。

3) 由于累积损伤的影响, 往复循环加载下试件的极限承载力普遍低于单调加载。60 mm 厚覆面

板 SIPs 试件中, 填充 EPS 的极限荷载降低 20.8%, 未填充 EPS 的降低 9.0%; 30 mm 厚度覆面板 SIPs 试件中, 填充 EPS 的降低 7.3%, 未填充 EPS 的降低 15.3%。在延性方面, 往复循环加载下, 60 mm 厚覆面板 SIPs 试件延性提升, 填充 EPS 提高 6.4%, 未填充 EPS 提高 24.0%; 30 mm 厚覆面板 SIPs 试件的延性略降, 填充 EPS 降低 14.6%, 未填充 EPS 降低 9.4%。所有试件在往复循环加载中均呈现推方向承载力与刚度较高、拉方向极限位移较大的不对称特征。

4) 研究主要针对大厚度旋切单板胶合板覆面承重型木质结构保温板的抗侧性能进行试验与分析, 未涉及保温性能(热工性能)的测试。后续可进一步开展不同覆面板厚度与 EPS 芯层厚度配比下的热工性能研究, 分析覆面板与 EPS 厚度变化对墙板保温性能的影响。

参考文献:

- [1] 李瑜, 梅诗意, 孟鑫淼, 等. 基于全生命周期评价法的雄安新区某木混结构建筑碳排放及其减碳效果研究[J]. 木材科学与技术, 2022, 36(5): 63-70.
LI Y, MEI S Y, MENG X M, et al. Study on carbon emission and its reduction effect of timber-concrete constructions in xiong' an new district based on life cycle assessment[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(5): 63-70.
- [2] 刘晓娜, 周海宾. 结构用木质保温板(SIPs)的产业现状及发展前景[J]. 木材工业, 2017, 31(2): 14-18.
LIU X N, ZHOU H B. Current status and future development of wood-based structural insulated panels (SIPs) [J]. China Wood Industry, 2017, 31(2): 14-18.
- [3] LEOSKOOL L, DESCAMPS T, VAN PARYS L, et al. Cross-laminated timber: towards a consistent structural insulated panel for passive buildings in belgium[C]. The 2014 World Conference on Timber Engineering (WCTE2014), 2014.
- [4] KAWASAKI T, ZHANG M, WANG Q, et al. Elastic moduli and stiffness optimization in four-point bending of wood-based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors[J]. Journal of Wood Science, 2006, 52(4): 302-310.
- [5] THONGCHAROEN N, KHONGTONG S, SRIVARO S, et al. Development of structural insulated panels made from wood-composite boards and natural rubber foam[J]. Polymers, 2021, 13(15). <https://doi.org/10.3390/polym13152497>.
- [6] 刘晓娜, 薛硕, 王晓欢, 等. 面板种类和芯板厚度对结构用木质保温板力学性能的影响[J]. 木材工业, 2018, 32(4): 9-13.
LIU X N, XUE S, WANG X H, et al. Effect of face panel type and core board thickness on mechanical properties of wood-based structural insulated panels[J]. China Wood Industry, 2018, 32(4): 9-13.
- [7] 王雪花, 方露, 吴智慧, 等. 不同覆面材料 SIP 墙体抗剪性能研究[J]. 应用力学学报, 2017, 34(2): 354-359, 409.
WANG X H, FANG L, WU Z H, et al. Shearing behavior of SIP wall faced with different materials[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(2): 354-359, 409.
- [8] 徐斌, 王恒旭, 陆杰, 等. 重组竹/玻纤/PET 泡沫复合多层结构保温板制备及性能评价[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(2): 396-402.
XU B, WANG H X, LU J, et al. Preparation and performance evaluation of bamboo scrimber/glass fiber/PET foam multilayer structural insulated panel[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2021, 38(2): 396-402.
- [9] 刘晓娜. 聚氨酯芯材的结构用木质保温板构件力学性能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [10] XUE S, LIU X N, WANG Y F, et al. Lateral force resistance of structural insulated panels consisting of wood-based sheathing and a polyurethane core[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 40. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102317.
- [11] SMAKOSZ Ł, TEJCHMAN J. Evaluation of strength, deformability and failure mode of composite structural insulated panels[J]. Materials & Design (1980-2015), 2014, 54: 1068-1082.
- [12] JACQUES E, MAKAR J. Behaviour of structural insulated panels (SIPs) subjected to short-term out-of-plane transverse loads[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2019, 46(9): 858-869.
- [13] JACQUES E, MAKAR J. Behavior of structural insulated panels subjected to short-term axial loads[J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.000239](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.000239).
- [14] TERENCE S, MEMARI A. Seismic evaluation of structural insulated panels in comparison with wood-frame panels[J]. Buildings, 2014, 4(3): 394-417.
- [15] PURASINGHE R, DUSICKA P, GARTH J S, et al. In-plane cyclic behavior of structural insulated panel wood walls including slit steel connectors[J]. Engineering Structures, 2018, 174: 178-197.
- [16] 邱静. 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.
- [17] 汪业盛. 基于蒙皮效应的 LVL 木框架剪力墙抗侧性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2025.
- [18] 嵇佳龙. 梁端扩翼型钢框架-意杨 LVL 轻木剪力墙抗侧性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2025.
- [19] 陈福涛. 边骨柱榫接轻型木结构剪力墙抗侧性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2025.
- [20] 文伟. 低周反复荷载作用下轻型木结构-磷石膏板剪力墙受力性能分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [21] 单超, 袁康, 周晗. EPS 自保温砌块填充墙 RC 框架抗震性能研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2025, 43(5): 538-548.

(责任编辑 方长华/编校 曹惠敏、向琴)