

钢框架内填正交胶合木剪力墙结构的性能分析

贾宏宇, 赵艳阳

北京工业大学城市建设学部, 北京

收稿日期: 2024年5月30日; 录用日期: 2024年6月19日; 发布日期: 2024年6月27日

摘要

为了研究用U型阻尼器节点连接的钢框架内填正交胶合木(CLT)剪力墙体系的性能, 本文对一榀钢框架内填CLT剪力墙的缩尺构件开展低周反复荷载试验, 同时通过OpenSees有限元软件进行模拟分析, 结果表明: CLT墙体可同时承受拉压荷载, 结构延性和耗能主要通过耗能连接件的变形来实现, 抗侧刚度由CLT墙体与钢框架实现, 整体倾覆力矩由钢框架承担, 框架和CLT剪力墙实现了协同工作, 同时也具有良好的延性。采用有限元模型分析得到的试件荷载-位移滞回曲线与试验结果吻合较好。

关键词

U型阻尼器, 低周反复荷载试验, 剪力墙, OpenSees

Analysis of Performance of Steel Frame Filled with Cross-Laminated Timber Shear Walls

Hongyu Jia, Yanyang Zhao

Department of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing

Received: May 30th, 2024; accepted: Jun. 19th, 2024; published: Jun. 27th, 2024

Abstract

To investigate the performance of steel frames filled with cross-laminated timber (CLT) shear walls connected by U-shaped damping devices, this paper conducted low-cycle reversed loading tests on scaled specimens of steel frames filled with CLT shear walls. Concurrently, simulation analyses were performed using the OpenSees finite element software. The results indicate that CLT walls can withstand both tensile and compressive loads, with structural ductility and energy dissipation primarily achieved through the deformation of energy-dissipating connections. Lateral

stiffness is provided by the CLT walls and the steel frame, while overall overturning resistance is borne by the steel frame. The frame and CLT shear walls exhibit synergistic behavior, coupled with good ductility. The load-displacement hysteresis curves obtained from finite element model analyses closely match the experimental results.

Keywords

U-Shaped Damping, Low-Cycle Reversed Loading Tests, Shear Walls, OpenSees

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着正交胶合木(CLT)材料的兴起,钢框架内填 CLT 剪力墙混合结构被越来越多的关注。钢框架内填正交胶合木剪力墙组合结构是 2011 年由加拿大英属哥伦比亚大学(UBC)的 Stiemer、Solomon 教授提出。

已有研究主要集中于 CLT 剪力墙的抗侧性能,研究采用试验或有限元模拟的方法,内容涉及不同材料 CLT 剪力墙的抗侧性、以 CLT 作填充墙的胶合木框架或钢框架等混合结构的抗侧性研究。对于混合结构,通常使用一系列标准金属连接器(例如,角撑架、压紧装置、螺钉)将 CLT 面板连接到其他钢或混凝土构件。大量先前的研究[1]-[7]表明,连接对于 CLT 结构的强度、刚度、变形和能量耗散至关重要。但整个结构延性低,耗能能力弱;不同制造商的标准金属连接器和紧固件的使用导致了连接的各种失效模式,以及承载能力和能量耗散的巨大差异[8] [9] [10] [11] [12]。沈银澜[13]等通过对标准角钢连接的组合墙体进行数值模拟,研究了墙体与钢框架之间的协同工作性能以及连接个数对整体结构受力性能的影响,发现此混合结构的抗侧刚度、承载能力均高于纯钢框架结构。凌秀、程海旭[14]等通过对该组合墙体的植筋连接开展了抗震研究,得出了主要破坏发生在连接节点处。薛敬丞等[15]则对以 CLT 剪力墙填充的胶合木框架结构开展了抗侧性试验研究,与胶合木纯框架结构进行对比,发现其极限荷载、抗侧刚度和耗能分别为木结构纯框架的 2.45 倍、3.65 倍和 2.4 倍。薛建阳等[16]通过试验,同样得出填充 CLT 剪力墙板后胶合木框架的抗侧承载力得到较大幅度提高的结论。

本文主要通过钢框架和内填 CLT 剪力墙之间设置高延性、高耗能的连接节点(将传统钢板连接件与 U 型金属阻尼器连接相结合)来提高钢木混合结构体系的节点性能和整体结构性能;同时为了提高结构效率,通过连接节点的合理设计,CLT 墙体可同时承受拉压荷载,结构延性和耗能主要通过耗能连接件的变形来实现,抗侧刚度由 CLT 墙体与钢框架实现,整体倾覆力矩由钢框架承担。在 OpenSees 建立组合墙体有限元模型,分析得出的滞回曲线与耗能和试验数据吻合良好。

2. 试件

2.1. 试件设计

试验所用钢框架跨度为 1500 mm,框架柱高为 1250 mm。试件所用钢梁采用热轧型工字钢 HM 200 mm × 150 mm × 6 mm × 9 mm,所用钢柱采用热轧型工字 HW 150 mm × 150 mm × 7 mm × 10 mm,CLT 剪力墙与钢框架之间采用环形阻尼器相连,连接件采用 8 个 12.9 级 M14 螺栓与钢框架、CLT 木板上的锚固钢板相连,试件如图 1 所示。

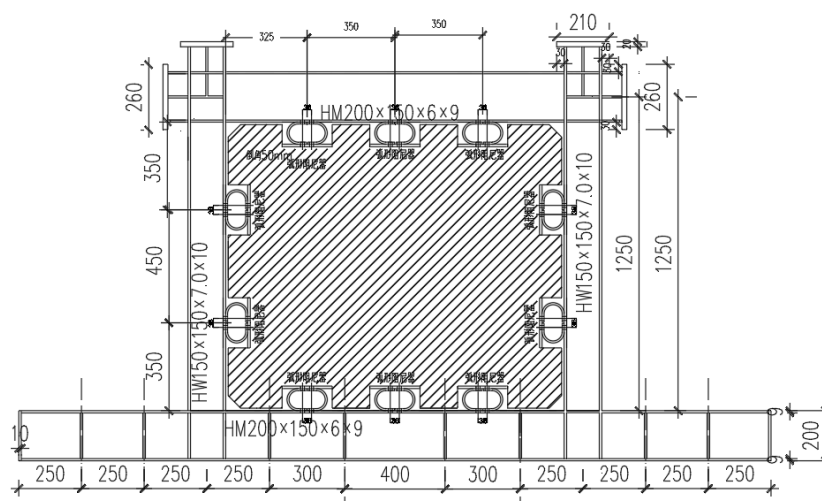


Figure 1. Specimen FSW
图 1. 试件 FSW

2.2. 材料力学性能

试验中钢材均采用 Q235; CLT 力学性能如表 1 所示。

Table 1. Mechanical properties of 105 mm thick three-layer SPF cross-laminated timber (CLT) material
表 1. 105 mm 三层 SPF 正交胶合木(CLT)材料力学性能

E1	抗弯强度 [MPa]	抗压弹性 模量[MPa]	抗拉强度 [MPa]	抗压强度 [MPa]	抗剪强度 [MPa]	滚剪强度 [MPa]	密度 g/cm ³	含水量 %
主强度方向	28.2	11,700	15.4	19.3	1.5	0.5	0.458	12.3
次强度方向	7.0	9000	3.2	9	1.5	0.5		

2.3. 试验加载装置

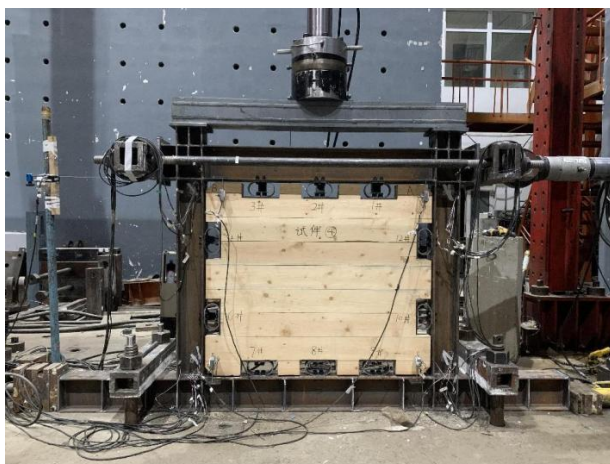


Figure 2. Experimental loading device diagram
图 2. 试验加载装置图

根据静态往复作用, 对钢木组合墙体墙体进行了准静力试验。首先, 使用垂直千斤顶通过刚性分布

梁向框架柱的端部施加 440 kN (轴压比为 0.2) 的总轴向力, 并在试验过程中保持恒定。垂直千斤顶通过钢梁滑轨的轴承提供水平移动, 并与顶梁的水平横向位移相协调。水平载荷通过连接到反作用壁的液压伺服致动器施加。顶部框架梁通过螺钉和箱梁铰接到执行机构的加载端。水平执行机构的最大静载能力为 500 kN, 最大位移行程为 ± 250 mm。底部钢梁通过箱梁和地锚放置在地面上, 底部钢梁的端面用千斤顶拧紧以防止滑动。试验加载装置如图 2 所示。

2.4. 试验加载制度

本试验采用位移控制方法对试件进行低周往复加载。参考《钢板剪力墙技术规程》规定, 设计弹塑性层间位移角的最大极限值为 1/50, 即在滞回荷载作用下层间位移角度达到 2% 时的标准荷载。标准荷载分为 8 个等级, 分别对应 0.25%、0.50%、0.75%、1.00%、1.25%、1.50%、1.75% 和 2.00% 的层间位移角。每个加载级别循环两次。为了研究剪力墙的极限滞回性能, 在标准加载阶段后进行额外加载, 使层间位移角增加 0.50%。每个级别加载一次, 直到试件失效。加载制度如图 3 所示。

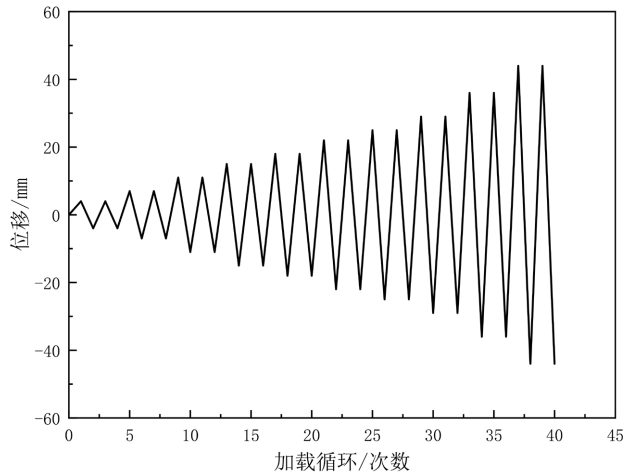


Figure 3. Loading system
图 3. 加载制度

2.5. 测点布置

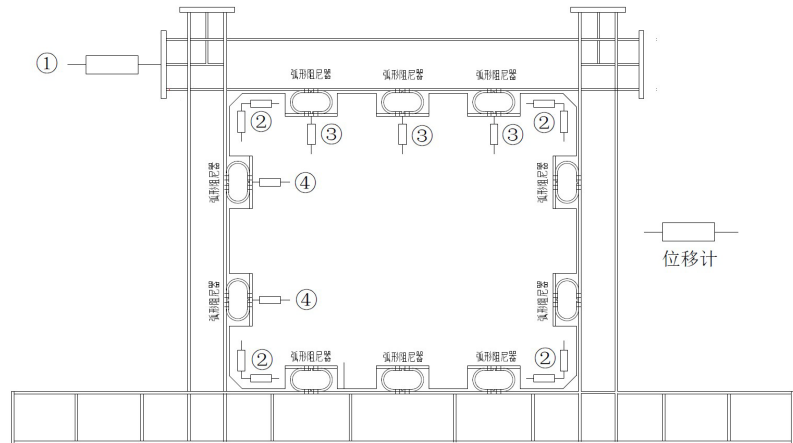
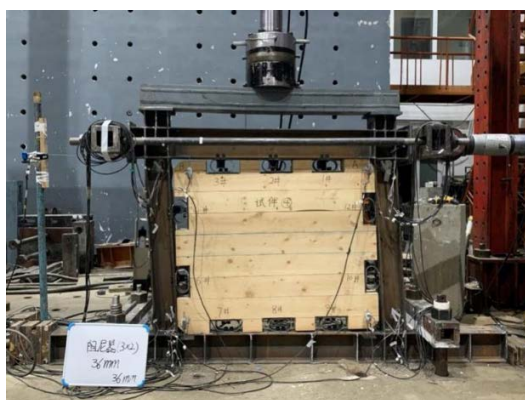


Figure 4. Layout of displacement meter
图 4. 位移计布置图

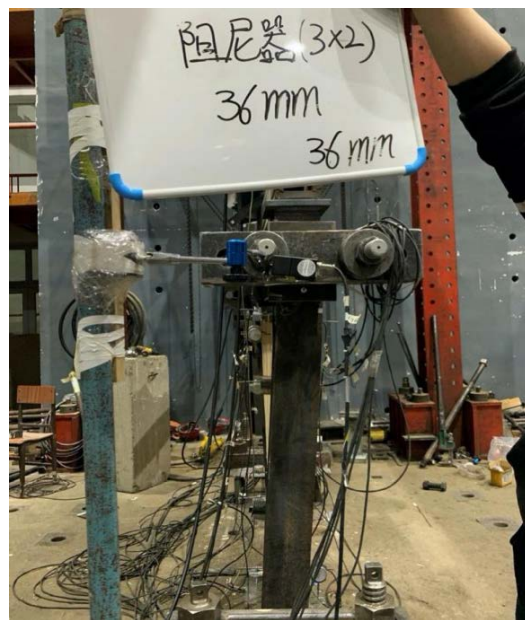
为了更好地量测钢框架的梁柱变形与不同节点的变形,通过位移计量测的内容有:① 结构顶梁中轴线位置布置 1 个拉线位移计,测量结构水平位移。② CLT 墙体四个对角与钢框架之间水平、竖向位移(共计 8 个百分表位移计)。③ 节点与钢框架顶梁之间的竖向位移(3 个百分表位移计)。④ 节点与一侧钢柱的水平相对位移(2 个百分表位移计)。位移计布置图如图 4 所示。

2.6. 试验过程及现象描述

试件 FSW 由 10 个耗能连接件连接(3×2 布置)如图 5(a)所示,在 1~4 级荷载作用下,钢木组合墙处于弹性阶段,无明显变形,并伴有嘶嘶声。在第 5 级荷载作用下,当位移达到 18 mm 时,CLT 墙板的 C 角几乎与钢框架接触,连接节点发生显著变形。在第 7 级加载过程中,CLT 墙板与钢架接触,导致 H 型钢柱基轻微变形,木板发出嘶嘶声。第 8 级荷载加载时,CLT 墙板的 C 角被压向钢架,并伴有响声和大量木屑脱落。第 9 级荷载时层间位移角为 2.5%,CLT 壁板和钢架继续受压,导致 H 型钢柱 a 底座严重屈曲,墙体扭曲,如图 5(b)所示,试验结束。



(a) 整体



(b) 局部

Figure 5. Specimen failure mode
图 5. 试件破坏现象

2.7. 试验结果

滞回曲线可以较为全面地反映结构的抗震性能, 试件 FSW 的滞回曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 滞回曲线整体看均稳定饱满, 呈现饱满的梭形, 证明组合墙体具备良好的耗能性能, 在加载初期, 结构均处于弹性阶段, 整体结构的荷载 - 位移呈线性关系, 滞回环面积较小, 结合试验现象可发现, 试件也未发生明显屈曲。随着加载层间位移角的增大, 连接件与墙体开始耗能, 滞回环面积增大, 相应承载力也增加, 整体刚度退化较小。试件 FSW 滞回曲线在层间位移角加载超过 2% 后, 出现“尖角”, 是由于试件 FSW 加载至 25 mm, CLT 墙板角部与钢框架接触, 钢框架柱脚发生屈曲, 出现破坏, 构件端部发生较大的滑移与转角, 故曲线呈现激增现象。

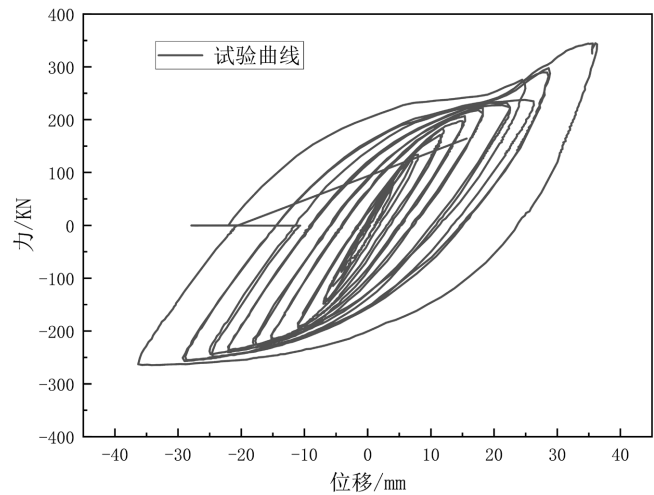


Figure 6. FSW hysteresis curve of the specimen
图 6. 试件 FSW 滞回曲线

3. 数值模拟

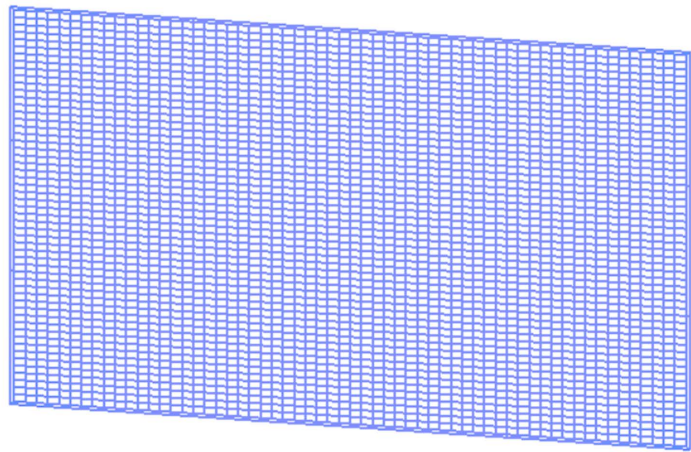


Figure 7. Finite element model of composite wall based on simplified connection nodes
图 7. 基于简化连接节点的组合墙体有限元模型

采用 OpenSees 对钢框架内填 CLT 墙板进行建模, 简化的有限元模型如图 7 所示。钢构件采用基于柔度法的非线性梁柱单元(Nonlinear Beam Column)进行模拟, 非线性梁柱单元被指定为多线型的滞回材

料(Hysteretic Material)。正交胶合木填充墙板采用平面应力的四边形单元(Quad Element)进行模拟, 环形耗能节点连接件采用两点连接单元(Two Node Link Element), 每一个连接简化成基于 Castfuse 模型的两个耦合正交弹簧单元来模拟水平和竖向运动。考虑到钢框架和 CLT 填充墙之间的接触挤压作用, 采用理想弹塑性缝隙材料(Elastic-Perfectly Plastic Gap Material)对二者可能存在的接触点进行模拟。

3.1. 模拟结果

采用本节的建模方法, 分析得到试件模拟与试验得到荷载 - 位移滞回曲线的对比如图 8 所示。从图中可以看出, 为各个节点的数值与试验的滞回曲线对比, 对比发现有限元模型可较为准确地模拟组合墙体的力学行为, 从而实现合理的节点设计和准确的承载力预测。表 2 给出滞回曲线中各个位移节点力的对比。由表可知, 在 15 mm 之前误差有所提升, 在 15 mm 之后误差逐步减小, 而在 29 mm 时, 由于 CLT 墙板角部与钢框架接触, 钢框架柱脚发生屈曲, 出现破坏, 构件端部发生较大的滑移与转角, 曲线呈现激增现象, 试验承载力突然增大, 因此误差变大。

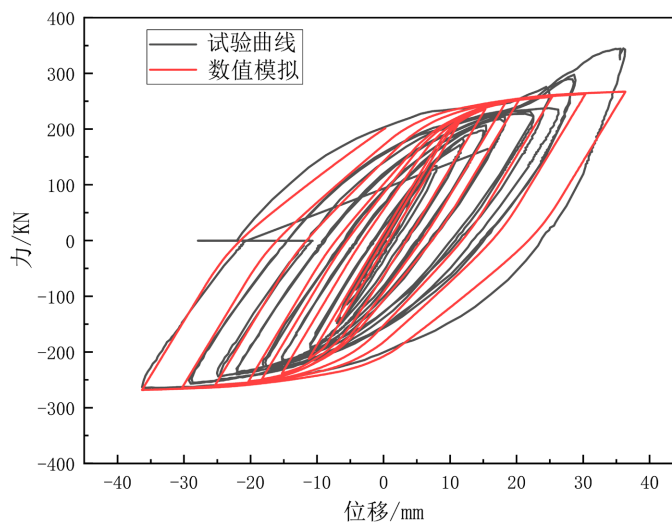


Figure 8. Hysteresis curve comparison

图 8. 滞回曲线对比

Table 2. Critical joint force

表 2. 关键节点力

类别	11 mm	15 mm	18 mm	22 mm	25 mm	29 mm	36 mm
试验	182.7 9	197.1	218.02	227.38	237.57	289.32	310.89
模拟	197.183	224.101	238.076	245.367	249.636	253.426	256.049
误差	7.874%	13.699%	9.199%	7.911%	5.079%	-12.406%	-17.640%

3.2. 耗能分析

耗能能力是评价结构抗震性能的重要指标, 可通过对结构滞回曲线所包含的面积进行积分计算, 滞回环越饱满, 所包含面积越大, 表明结构的耗能能力越强。本文采用 Origin2021 软件进行滞回环面积积分计算, 试件的耗能曲线如图 9 所示。由图可知, 有限元模型模拟出的耗能能够精确的模拟试验耗能。

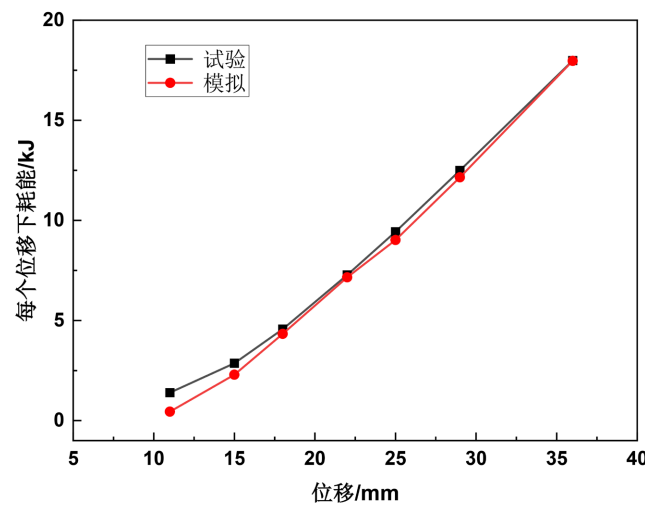


Figure 9. Energy consumption curve
图 9. 耗能曲线

3.3. 内部抗侧力分析

图 10 给出滞回曲线中各个位移节点框架与剪力墙抗侧力的占比, 从图中可以看出, 试件 FWS 中的 CLT 剪力墙分担的剪力占比范围位于 15.473%~24.966%之间, 各个位移下抗侧力占比如表 3 所示。

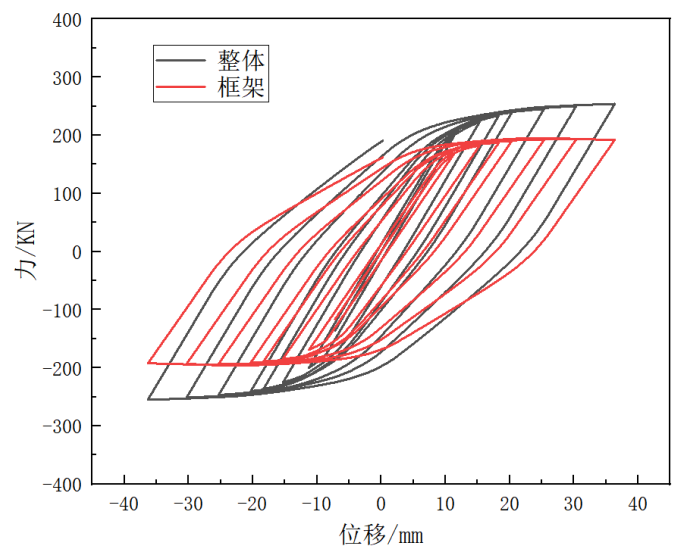


Figure 10. Analysis of lateral force resistance of specimens
图 10. 试件抗侧力分配

Table 3. The proportion of lateral force resistance of shear walls in test specimens

表 3. 试件剪力墙抗侧力占比

类别	11 mm	15 mm	18 mm	22 mm	25 mm	29 mm	36 mm
模拟	197.183	224.101	238.076	245.367	249.636	253.426	256.049
框架	166.674	181.003	186.975	188.774	191.01	192.01	192.1235
剪力墙占比	15.47%	19.23%	21.46%	23.06%	23.29%	23.79%	24.97%

4. 结论

本文详细描述了采用 U 型阻尼器节点连接的钢框架内填 CLT 剪力墙(FSW)试件的低周反复荷载试验, 以及建立了 OpenSees 模型模拟, 对比了两者的滞回曲线, 主要得出以下结论:

(1) 在 1~4 级荷载作用下, 钢木组合墙处于弹性阶段, 无明显变形, 并伴有嘶嘶声。第 9 级荷载时层间位移角为 2.5%, CLT 壁板和钢架继续受压, 导致 H 型钢柱 a 底座严重屈曲, 墙体扭曲。

(2) 由模拟可知, 在 15 mm 之前误差有所提升, 在 15 mm 之后误差逐步减小, 而在 29 mm 时, 由于 CLT 墙板角部与钢框架接触, 钢框架柱脚发生屈曲, 出现破坏, 构件端部发生较大的滑移与转角, 曲线呈现激增现象, 试验承载力突然增大, 因此误差变大

(3) 有限元模型模拟出的耗能能够精确的模拟试验耗能。

(4) 试件 FWS 中的 CLT 剪力墙分担的剪力占比范围位于 15.473%~24.966%之间。

参考文献

- [1] Ceccotti, A., Follesa, M., Lauriola, M.P., et al. (2006) Sofie Project-Test Results on the Lateral Resistance of Cross-Laminated Wooden Panels. *Proceedings of 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, 3-8 September 2006.
- [2] Dujic, B., Pucelj, J. and Zarnic, R. (2004) Testing of Racking Behavior of Massive Wooden Wall Panels. *Proceedings of the 37th CIB-W18 Meeting*, Edinburgh.
- [3] Popovski, M. and Karacabeyli, E. (2012) Seismic Behaviour of Cross-Laminated Timber Structures. *Proceedings of 12th World Conference on Timber Engineering*, Auckland.
- [4] Shen, Y., Schneider, J., Tesfamariam, S., Stierner, S.F. and Mu, Z. (2013) Hysteresis Behavior of Bracket Connection in Cross-Laminated-Timber Shear Walls. *Construction and Building Materials*, **48**, 980-991. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.050>
- [5] Fragiocomo, M., Dujic, B. and Sustersic, I. (2011) Elastic and Ductile Design of Multi-Storey Crosslam Massive Wooden Buildings under Seismic Actions. *Engineering Structures*, **33**, 3043-3053. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.05.020>
- [6] Lukacs, I., Björnfor, A. and Tomasi, R. (2019) Strength and Stiffness of Cross-Laminated Timber (CLT) Shear Walls: State-of-the-Art of Analytical Approaches. *Engineering Structures*, **178**, 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.126>
- [7] Rinaldin, G., Amadio, C. and Fragiocomo, M. (2013) A Component Approach for the Hysteretic Behaviour of Connections in Cross-Laminated Wooden Structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **42**, 2023-2042. <https://doi.org/10.1002/eqe.2310>
- [8] Gavric, I., Fragiocomo, M. and Ceccotti, A. (2014) Cyclic Behaviour of Typical Metal Connectors for Cross-Laminated (CLT) Structures. *Materials and Structures*, **48**, 1841-1857. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0278-7>
- [9] Shen, Y., Schneider, J., Tesfamariam, S., Stierner, S.F. and Chen, Z. (2021) Cyclic Behavior of Bracket Connections for Cross-Laminated Timber (CLT): Assessment and Comparison of Experimental and Numerical Models Studies. *Journal of Building Engineering*, **39**, Article ID: 102197. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102197>
- [10] Izzi, M., Polastri, A. and Fragiocomo, M. (2018) Modelling the Mechanical Behaviour of Typical Wall-to-Floor Connection Systems for Cross-Laminated Timber Structures. *Engineering Structures*, **162**, 270-282. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.045>
- [11] Liu, J. and Lam, F. (2018) Experimental Test of Coupling Effect on CLT Angle Bracket Connections. *Engineering Structures*, **171**, 862-873. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.013>
- [12] Shen, Y., Schneider, J., Stierner, S.F. and Ren, X. (2019) Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber. *MATEC Web of Conferences*, **275**, Article ID: 01011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927501011>
- [13] 沈银澜, 牟在根, Siegfried, F., 等. 正交胶合木填充墙——钢框架体系受力性能[J]. 工程科学学报, 2017, 39(1): 155-165.
- [14] 凌秀, 程海旭, 薛敬丞, 等. 钢框架内填正交胶合木剪力墙结构的抗震性能[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 778-784.
- [15] 薛敬丞, 陈志琪, 杨会峰, 等. 胶合木框架-CLT 剪力墙结构抗震性能试验[J]. 土木工程与管理学报, 2019,

36(5): 150-156.

- [16] 薛建阳, 任国旗, 袁振, 等. 填充正交胶合木剪力墙板的胶合木框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(11): 140-150.