

新型耗能连接正交胶合木剪力墙抗侧力性能试验

陈佳炜¹, 熊海贝², 彭增鑫³, 王瑞明²

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

3. 联领建筑科技(上海)有限公司, 上海 202172)

摘要: 为研究基于软钢屈服与橡胶剪切变形双重耗能机制新型连接的正交胶合木剪力墙抗侧力性能, 考虑顶部竖向荷载、墙体高宽比、耗能连接件可更换性等因素, 对6榀2.4m高足尺试件进行了单调及低周往复加载试验, 并与普通金属连接正交胶合木墙体进行对比试验, 获取并分析了剪力墙的破坏过程、力学性能参数及各项因素对抗侧力性能的影响规律。结果表明: 新型耗能连接正交胶合木剪力墙在侧向力下的损伤主要集中在耗能连接的软钢耗能段屈服断裂与耗能橡胶脱胶破坏, 墙体板材与自攻螺钉未见损伤; 增大顶部竖向荷载可有效提升墙体的抗侧力性能, 而增大高宽比主要可增加墙体的变形能力与延性; 与普通金属连接墙体相比, 耗能连接墙体的最大承载力相近, 但延性提升26%, 耗能能力提升38%, 最大层间位移角可达1/23, 且原位替换耗能连接修复的墙体与原墙体的抗侧力性能相近, 表明新型耗能连接正交胶合木剪力墙具有较好抗震性能, 可实现强震后连接可更换、结构可修复的设计目标。

关键词: 正交胶合木; 剪力墙结构; 新型耗能连接; 抗侧力性能; 破坏模式

中图分类号: TU366.3

文献标志码: A

Experimental Study on Lateral Resistance of Cross-Laminated Timber Shear Walls with Innovative Energy-Dissipating Connections

CHEN Jiawei¹, XIONG Haibei², PENG Zengxin³, WANG Ruiming²

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Lianling Construction Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 202172, China)

Abstract: To investigate the lateral performance of the

cross-laminated timber (CLT) shear walls connected by innovative energy-dissipating connections with a mechanism of “yielding of soft steel” and “shear deformation of rubber”, a series of monotonic and reversed cyclic loading tests were conducted on six full-scale specimens with a height of 2.4 meters, considering various factors including vertical load distributions, aspect ratios, and replaceability of the energy-dissipating connections. A comparative test was also conducted on a CLT wall specimen with common metal connections. The failure process, mechanical properties, and the influence of preset factors were obtained and analyzed. The results indicate that the damage of the CLT walls with the innovative energy-dissipating connections mainly concentrates on the dissipative connections with yielding fracture of the soft-steel dissipative sections and debonding failure of the rubber, preventing the CLT panels and screws from damage. The increase of the vertical load effectively enhances the lateral resistance performance of the wall, while the increase of aspect ratio mainly improves the deformation capacity and ductility of the wall. Compared with the wall with common metal connections, the load-carrying capacity of the wall with energy-dissipating connections is similar, but its ductility increases by 26%, energy dissipation capability increases by 38%, and the maximum inter-story drift can reach 1/23. Moreover, the lateral performance of the wall repaired by the in-situ replacement of the energy-dissipating connections is similar to that of the original wall. The results indicate that the CLT shear walls connected by innovative energy-dissipating connections exhibits an excellent seismic performance, which can achieve the design objective of replaceable connections and repairable structures after a strong earthquake.

收稿日期: 2024-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(51978502, 52308259); 地震工程国际合作联合实验室合作研究项目(TMGFXX-2015-002-2)

第一作者: 陈佳炜, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为竹木结构抗震。E-mail: jiawei_chen@njfu.edu.cn

通信作者: 熊海贝, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构、木结构及混合结构的抗震性能。E-mail: xionghaibei@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

Keywords: cross-laminated timber; shear wall structure; innovative energy-dissipating connections; lateral performance; failure mode

木材作为一种可再生建材,具有固碳环保、轻质高强等突出优点,发展现代木结构契合“加快绿色城市发展”、“碳达峰、碳中和”的国家战略需求^[1]。正交胶合木(Cross-laminated timber, CLT)是将3层及以上规格材按正交叠层组坯后胶合形成的板材,因其优良的平面内外承载性能、良好的抗火性能与突出的模块化建造优势,目前已成为欧美等地住宅、办公和文旅建筑建设中极具竞争力的新型建筑材料^[2-6]。

正交胶合木结构一般以CLT板材作为剪力墙与楼板,通过底部抗剪与抗拉连接、板材间拼接连接等形成剪力墙结构体系。近年来,国内外学者针对CLT剪力墙的抗侧力性能展开了多项研究,探究了底部连接件布置^[7]、拼接连接性能^[8]、墙体层板材料^[9]、建造方式^[10]、顶部竖向荷载^[11]等因素对墙体抗侧力性能的影响,结果表明尽管CLT剪力墙的抗侧刚度和承载力较高,但其损伤模式与抗侧力性能存在一定提升空间:①侧向力下墙体损伤主要集中在连接处,易产生连接件金属板断裂或屈曲、CLT板材劈裂、紧固件剪断或拔出等脆性破坏模式^[12-13];②即使发生锚固件弯曲等理想破坏模式,墙体刚度和承载力将迅速退化,无法发挥连接区域外的大部分材料强度,同时因木材销槽承压破坏严重,墙体难以修复^[14-15];③剪力墙主要依靠连接件的塑性变形耗散能量,然而,普通金属抗剪与抗拉连接的耗能性能较差,致使结构的抗震韧性不足,结构优势在高烈度区不能充分发挥^[16-17]。

为进一步提升正交胶合木剪力墙的抗侧力性能,各国学者提出了多种解决方案,主要可归纳为提升板材间拼接连接力学性能与底部抗剪与抗拉连接力学性能2个方面。就前者而言,Polastri等^[18]采用刚性抗剪键作为拼接连接以避免竖向拼缝损伤,进而使墙体较易修复;Lu等^[19]提出在竖向拼缝中采用U型软钢耗能件以提升墙体极限位移与耗能能力;He等^[20]在墙体竖向拼缝中引入两类耗能件,基于试验证明了墙体优越的耗能性能。另一方面,国内外学者更多通过引入新型抗剪与抗拉连接件以改善CLT剪力墙的抗震性能。Wrzesniak等^[21]采用铅挤压阻尼器代替普通金属抗拉连接件,验证其可有效

避免墙体发生损伤;D'Arenzo等^[22]采用TITAN V连接代替普通金属抗剪连接件,试验结果表明墙体表现为延性破坏;Hashemi等^[23]将滑动摩擦耗能装置与复位弹簧的组合应用于正交胶合木剪力墙中,验证了墙体具有较好的耗能能力,且可实现自复位;Zhang等^[24]验证了多孔钢板良好的耗能能力使其得以应用于高层正交胶合木结构中。Chen和Xiong等^[25-26]基于“软钢屈服+橡胶剪切变形”双重耗能机制,研发了新型耗能抗剪与抗拉连接,并通过节点试验研究验证了两类新型耗能连接具备良好的延性与耗能能力,可避免木材与紧固件发生破坏,进而使连接具备可更换性。然而,目前针对该新型耗能抗剪与抗拉连接的研究尚处于节点层次,对采用新型耗能抗剪与抗拉连接的足尺CLT剪力墙进行的试验研究鲜有报道。

为此,本文针对新型耗能连接正交胶合木剪力墙开展了抗侧力性能试验研究,基于单调和低周往复加载试验结果,揭示了新型耗能连接正交胶合木剪力墙的破坏模式,获取了墙体的主要力学性能,并分析了顶部竖向荷载、高宽比及耗能连接件可更换性等因素对墙体抗侧力性能的影响规律,以期新型耗能连接正交胶合木剪力墙结构的设计提供理论支撑。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验共设计了6片新型耗能连接CLT剪力墙足尺试件以探究顶部竖向荷载、墙体高宽比及耗能连接件可更换性等因素的影响规律,此外,为对比研究CLT剪力墙采用新型耗能连接件或普通金属连接件的抗侧力性能,设计了一片普通金属连接CLT剪力墙足尺试件,各试件高度均为2.4m,宽度为2.4m或1.2m,各项设计参数见表1。

试件尺寸详图见图1。试验墙体由1块或2块1.2m宽CLT墙板组成,板材由3层35mm厚的加拿大铁杉层板(E2级)正交胶合而成。2.4m宽试件采用盖板搭接节点连接2片墙板,盖板采用长条形旋切板胶合木(Laminated veneer lumber, LVL),紧固件采用 $\varnothing 8.0\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的自攻螺钉,钉入间距为100mm。抗拉连接件布置于距墙板边缘100mm处,抗剪连接件布置于各墙板中部。

耗能抗拉连接件与耗能抗剪连接件具有相同的构造组成与耗能机理,主要由金属骨架和耗能橡胶

表1 正交胶合木剪力墙抗侧力性能试验试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens for lateral resistance test of CLT shear walls

试件编号	连接形式	高度/m	宽度/m	顶部竖向荷载 / (kN·m ⁻¹)	加载方式
D-A1-V0-M	耗能连接	2.4	2.4	0	单调加载
D-A1-V0-R	耗能连接	2.4	2.4	0	往复加载
D-A1-V1-R	耗能连接	2.4	2.4	12.3	往复加载
D-A1-V2-R	耗能连接	2.4	2.4	24.6	往复加载
D-A2-V0-R	耗能连接	2.4	1.2	0	往复加载
D-A1-V0-R*	耗能连接	2.4	2.4	0	往复加载
C-A1-V0-R	普通连接	2.4	2.4	0	往复加载

注: 1) 试件编号中, D表示采用耗能连接; C表示普通连接; A1和A2表示高宽比为1.0和2.0; V0、V1和V2表示顶部竖向荷载为0、12.3kN·m⁻¹和24.6kN·m⁻¹; M表示单调加载; R表示低周往复加载; *表示原位更换耗能连接件。

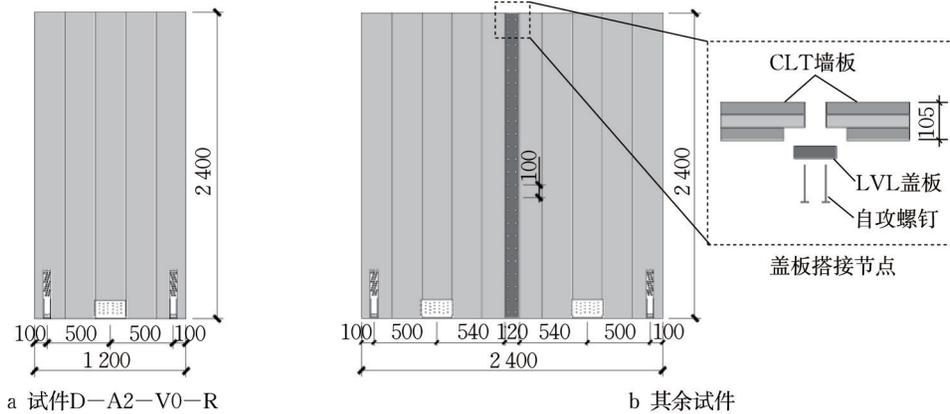


图1 试件详图(单位:mm)

Fig. 1 Geometric detail of specimens (unit: mm)

两部分组成,见图2。前期试验研究与理论分析表明,两类耗能连接件的工作机理为:当外荷载较小时,连接件保持弹性,金属骨架可提供较大初始刚度,通过预设软钢耗能段(前后面板间的桥接部分)尺寸构造实现可控的屈服点;荷载超过屈服点后,软钢耗能段首先发生屈服耗能,同时内嵌耗能橡胶层发生剪切变形耗能,实现良好耗能能力;而即使在软钢耗能段发生屈服断裂后,内嵌耗能橡胶层仍可紧密粘结在前后面板之间,使两者继续同步工作直至橡胶层发生脱胶破坏,有效提升了耗能连接件的整体性与延性。本次试验所用耗能连接件的金属骨架采用20#软钢,其屈服强度与极限强度分别为245 MPa和410 MPa,断后伸长率为52.5%;钢板厚度为3.5mm,单个软钢耗能段宽度为10mm;耗能橡胶剪切模量为0.4MPa,阻尼比为20%。所用普通金属抗拉与抗剪连接件由Q235钢制成,厚度3.5mm,尺寸与相应耗能抗拉或抗剪连接件相近。

1.2 试验装置与加载制度

试验装置由作动器、加载梁、限位装置、钢基础、龙门架与反力墙组成,见图3。采用作动器通过加载梁施加水平与竖向荷载,为防止墙体试件发生平面

外扭转,在加载梁上布置滑轮限位装置,墙体试件底部通过抗拉与抗剪连接件与钢基础连接。

试验仪器布置见图3,其中编号①至⑬指位移计,其中①、③、⑤、⑦号位移计测量水平位移,②、④、⑥、⑧号位移计测量竖向位移。采用位移计测量抗拉与抗剪连接件处墙体的水平与竖向位移(位移计①至⑧)、盖板搭接节点两侧墙体的竖向位移(位移计⑨和⑩)、墙体的平面外位移与顶部水平位移(位移计⑪、⑫与⑬),采用作动器自带力传感器记录荷载值。

加载制度参考美国材料与试验协会 ASTM E564规范和 ASTM E2126规范建议的加载方法,采用位移加载,其中单调加载采用两阶段加载方法:首先施加10%的预估承载力并保持5min,以测试试验装置与仪器是否正常工作,并消除安装空隙误差与接触问题;随后连续加载至试件破坏,或荷载下降至峰值荷载的80%。低周往复加载制度见图4,可分为2个阶段:首先依次采用极限位移值 Δ_u 的1.25%、2.50%、5.00%、7.50%和10.00%进行1个循环加载;随后从 Δ_u 的20.00%开始每个加载幅值进行3个循环加载,加载幅值增量为20.00% Δ_u ,直至结构

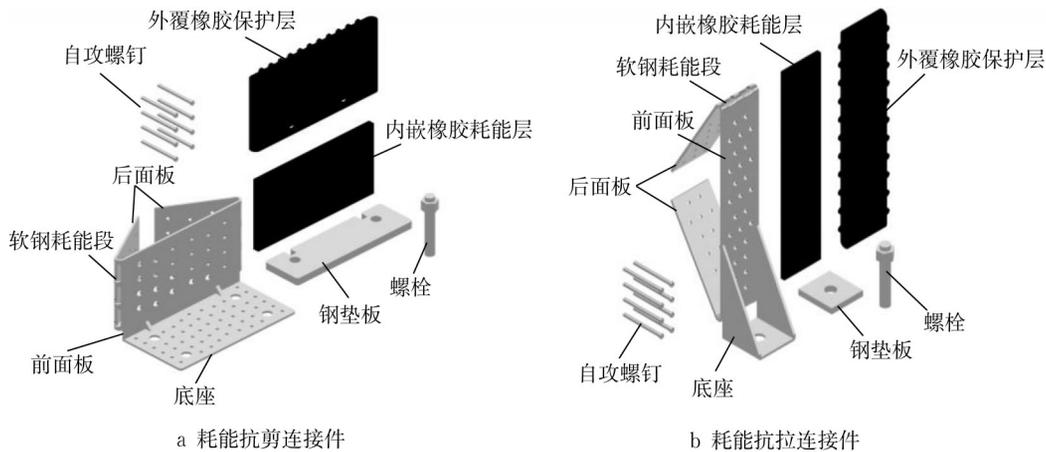


图2 新型耗能抗剪连接件与耗能抗拉连接件示意

Fig. 2 Innovative energy-dissipating angle bracket and hold-down

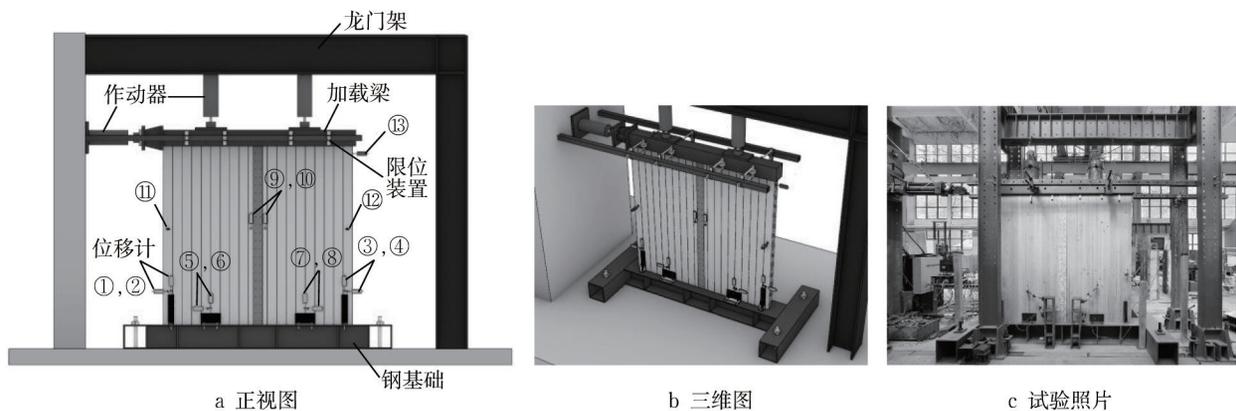


图3 试验加载装置与仪器布置示意

Fig. 3 Test setup and test instruments

破坏。

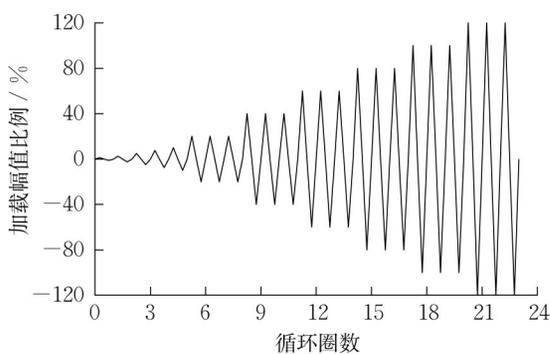


图4 低周往复试验加载制度

Fig. 4 Loading protocol for reversed cyclic tests

2 试验现象

2.1 新型耗能连接 CLT 剪力墙试件破坏过程

对于新型耗能连接 CLT 剪力墙试件,除试件 D-A1-V2-R 外,各试件的破坏过程与失效模式相似,见

图5,破坏过程与层间位移角 θ 相关,可总结如下:

(1) 当 θ 为 $1/160 \sim 1/120$ 时,耗能抗拉连接件中的前面板与后面板产生相对错动,软钢耗能段发生屈服。

(2) 当 θ 为 $1/75 \sim 1/60$ 时,耗能抗拉连接件中的软钢耗能段开始发生屈服断裂,且随 θ 增加,耗能段断裂个数逐渐增加,但未发生橡胶脱胶破坏,因而耗能抗拉连接件仍可继续承载;

(3) 当 θ 为 $1/50 \sim 1/33$ 时,耗能抗剪连接件中的软钢耗能段随着 θ 的增大逐渐屈服断裂,但仍可继续承载。

(4) 当 θ 为 $1/25 \sim 1/23$ 时,耗能抗拉连接件中所有软钢耗能段均发生断裂,内嵌耗能橡胶层发生脱胶破坏;而耗能抗剪连接件中,尽管绝大多数软钢耗能段也发生屈服断裂,但未观察到耗能橡胶层发生脱胶破坏。此外,未观察到 CLT 墙板压溃或劈裂以及自攻螺钉拔出或剪断破坏。盖板搭接节点(即墙体竖向拼缝连接处)未观察到 LVL 搭接板劈裂破

坏或自攻螺钉剪断及拔出破坏;试验过程中盖板搭接节点两侧墙体在侧向力作用下的变形近似于整体墙,且由位移计⑨、⑩数据可知,两侧墙体的竖向位移基本呈相似比例关系,表明盖板搭接节点较强,两侧墙板未出现明显错位现象。

对于试件D-A1-V2-R,与其余耗能连接CLT剪力墙试件破坏过程主要存在两点差异:一是软钢耗能段的屈服断裂首先出现在耗能抗剪连接件处,而非在耗能抗拉连接处;二是橡胶脱胶现象除在耗能抗拉连接件出现外,还在耗能抗剪连接件中出现。

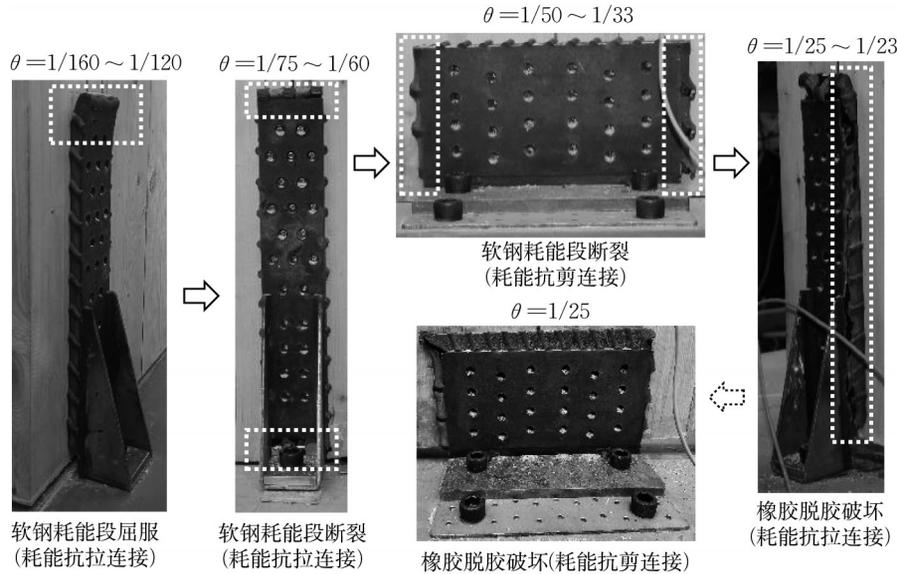


图5 新型耗能连接CLT剪力墙试件破坏过程

Fig. 5 Damage process of specimens with energy-dissipating connections

值得注意的是,对于试件D-A2-V0-R,即墙体高宽比较大(2:1)时,墙体试件表现为明显的摇摆变形,耗能抗拉连接件的损伤更为严重,内嵌耗能橡胶层最终发生较大面积的脱胶破坏;而对于试件D-A1-V0-R,尽管耗能连接件出现软钢耗能段屈服断裂与橡胶脱胶破坏,但耗能连接件处的自攻螺钉仍基本保持平直,试验结束后拆卸自攻螺钉,观察到墙板上螺钉孔未出现明显扩大现象,故在原位更换新的耗能连接件后,形成试件D-A1-V0-R进行试验,该试件破坏过程与试件D-A1-V0-R相似。

2.2 普通金属连接CLT剪力墙试件破坏过程

对于普通金属连接CLT剪力墙试件,即C-A1-V0-R,其破坏过程随层间位移角 θ 的变化见图6,可见:①当 θ 达到1/120,抗拉连接件的钢背板出现弯曲变形,钢背板与底座间产生脱开现象;②当 θ 增加至1/60,抗剪连接件的底座与垫板出现明显的弯曲变形,抗拉连接件的自攻螺钉产生松动;③当 θ 达到1/40,抗拉连接件的钢背板突然产生拉断破坏,一侧抗拉连接件的断口位置出现在最下部螺钉孔处,另一侧连接件的断口位置出现在钢背板与底座焊接截面处,断口形状基本呈直线,部分自攻螺钉被剪断;④抗拉连接件在钢背板被拉断后完全退出工作,此

时完全依靠抗剪连接件承担侧向力,当 θ 达到1/37,抗剪连接件的钢背板产生撕裂破坏,部分自攻螺钉被拔出,抗剪连接件失去承载能力,墙体试件破坏。需要说明的是,盖板搭接节点未观察到劈裂破坏或自攻螺钉剪断及拔出破坏,CLT墙板亦未出现压溃或劈裂破坏。

3 试验结果分析

3.1 破坏过程分析

基于各试件的试验现象,对于新型耗能连接CLT剪力墙试件,其破坏过程产生原因可总结为:①CLT剪力墙的侧向位移包含摇摆变形与平动变形,当墙体顶部竖向荷载较小时,摇摆变形较明显,因而用于抵抗墙体摇摆变形的耗能抗拉连接件将首先产生变形,致使耗能抗拉连接件的前面板与后面板产生相对错动,进而使软钢耗能段发生屈服。②随着侧向位移的增大,耗能抗剪连接件的前面板与后面板亦逐渐产生错动变形,致使软钢耗能段发生屈服。③当耗能抗拉连接件的所有软钢耗能段发生屈服断裂后,荷载转移至内嵌耗能橡胶层承担,当应力超过橡胶层的黏结强度时,橡胶层产生脱胶破

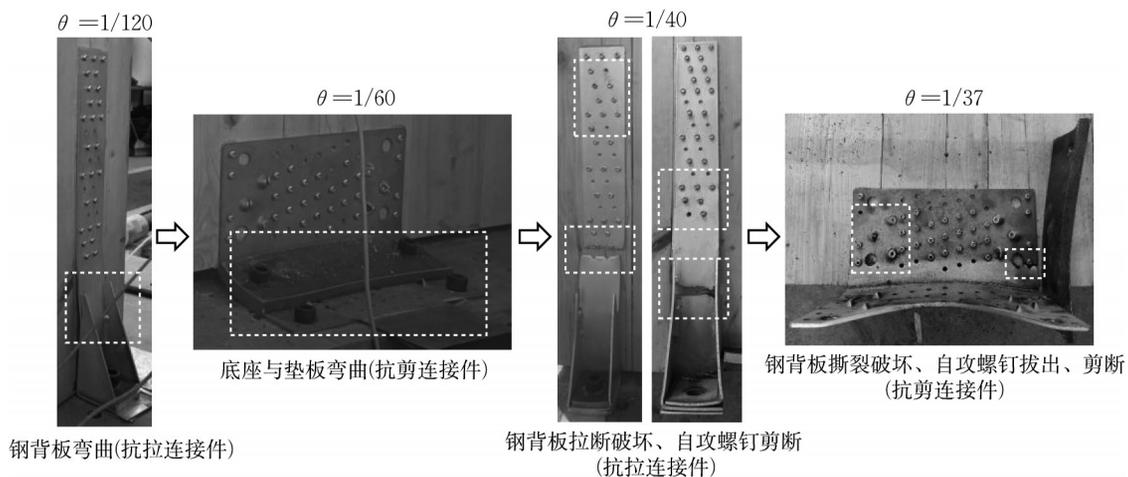


图6 普通金属连接CLT剪力墙试件破坏过程

Fig. 6 Damage process of specimens with common metal connections

坏。④值得注意的是,由于耗能抗拉连接件与耗能抗剪连接件良好的变形能力,CLT剪力墙在侧向力作用下表现出良好的变形能力,其最大层间位移角可达4.35%,远大于我国规范对木结构弹塑性变形能力的限值要求(即2.0%)。⑤此外,由于新型耗能连接件良好的耗能能力,CLT剪力墙的损伤主要集中在耗能连接的软钢耗能段屈服断裂与耗能橡胶剪切变形,有效避免了CLT板材劈裂或压溃以及自攻螺钉的拔出或剪断,保证了耗能连接件损伤后的可更换性及墙体的可修复性。

当墙体顶部竖向荷载较大时,如对于试件D-A1-V2-R,墙体的侧向位移主要表现为滑动变形,因而耗能抗剪连接件的变形需求相应更大,其软钢耗能段较早产生屈服断裂,同时内嵌耗能橡胶层亦会发生脱胶破坏。当顶部竖向荷载相同而高宽比较大时,如对于试件D-A2-V0-R,墙体的侧向位移主要由摇摆变形控制,因而对耗能抗拉连接件的变形需求相应更大,耗能抗拉连接件的损伤程度明显增加。

对于普通金属连接CLT剪力墙试件C-A1-V0-R而言,由于金属抗拉与抗剪连接件中,自攻螺钉的数目较多,因而未发生自攻螺钉的弯曲破坏及CLT板材的销槽承压破坏,可有效提高连接件的承载能力。然而,此时金属连接件中钢背板或底座相应成为薄弱部位,并最终发生钢板拉断或钢板撕裂破坏,伴随自攻螺钉的拔出与剪断。由试验现象可知,该破坏形态为脆性破坏,不利于结构抗震。需要说明的是,试件C-A1-V0-R产生脆性破坏模式的原因与试件设计有关,若减少金属连接件中的自攻螺钉数量,可能出现螺钉屈服等延性破坏模式。对于普通金属连接CLT剪力墙而言,在工程设计时通常采用

能力设计法,将破坏模式控制为金属连接件或墙体竖向拼缝连接处的自攻螺钉屈服,以实现延性破坏模式。

3.2 荷载—位移曲线

各墙体试件的荷载—位移曲线和骨架曲线分别见图7和图8。从图中可知:①墙体单调加载下的荷载—位移曲线与低周往复曲线的骨架曲线相近。②由试件D-A1-V0-R、D-A1-V1-R与D-A1-V2-R的荷载—位移曲线可知,顶部竖向荷载的增大可提高墙体的刚度与承载能力,其原因在于顶部竖向荷载的增加抑制了墙体的摇摆变形,进而延缓了耗能抗拉连接件的破坏,充分利用了耗能抗剪连接件的力学性能。③由试件D-A1-V0-R与D-A1-V0-R*的曲线对比可知,在原位更换耗能连接件后,D-A1-V0-R*在正向加载下的曲线与D-A1-V0-R相近,但在负向加载下的曲线值明显低于D-A1-V0-R,同时D-A1-V0-R*的曲线捏缩效应更为明显,其原因在于试件D-A1-V0-R在试验后,尽管未发生CLT板材压溃或劈裂现象,但连接件处的自攻螺钉孔仍有一定程度的扩大,因而原位更换耗能连接件后,墙体的抗侧力性能有所下降,但仍有较好的变形性能与较饱满的滞回圈。需要说明的是,本研究原位更换耗能连接件与自攻螺钉的原因一方面在于保证各墙体试件的边界条件一致,另一方面在于测试耗能连接件是否可将损伤集中至软钢耗能段与橡胶中,而避免自攻螺钉和CLT板材损伤,试验结果表明原位更换的自攻螺钉与CLT板材仍有较好的咬合作用。然而,在实际工程中,应距原自攻螺钉孔位一定距离重新布置耗能连接件,以充分保证自攻螺钉与木材的咬合作用。④由普通金属连接墙体试件与耗能连

接墙体试件的曲线对比结果可知,耗能连接CLT墙体在侧向力下具有明显较大的极限变形值与更为饱满的滞回圈,表明其具有较好的延性与耗能能力,但其抗侧刚度低于普通金属连接墙体。

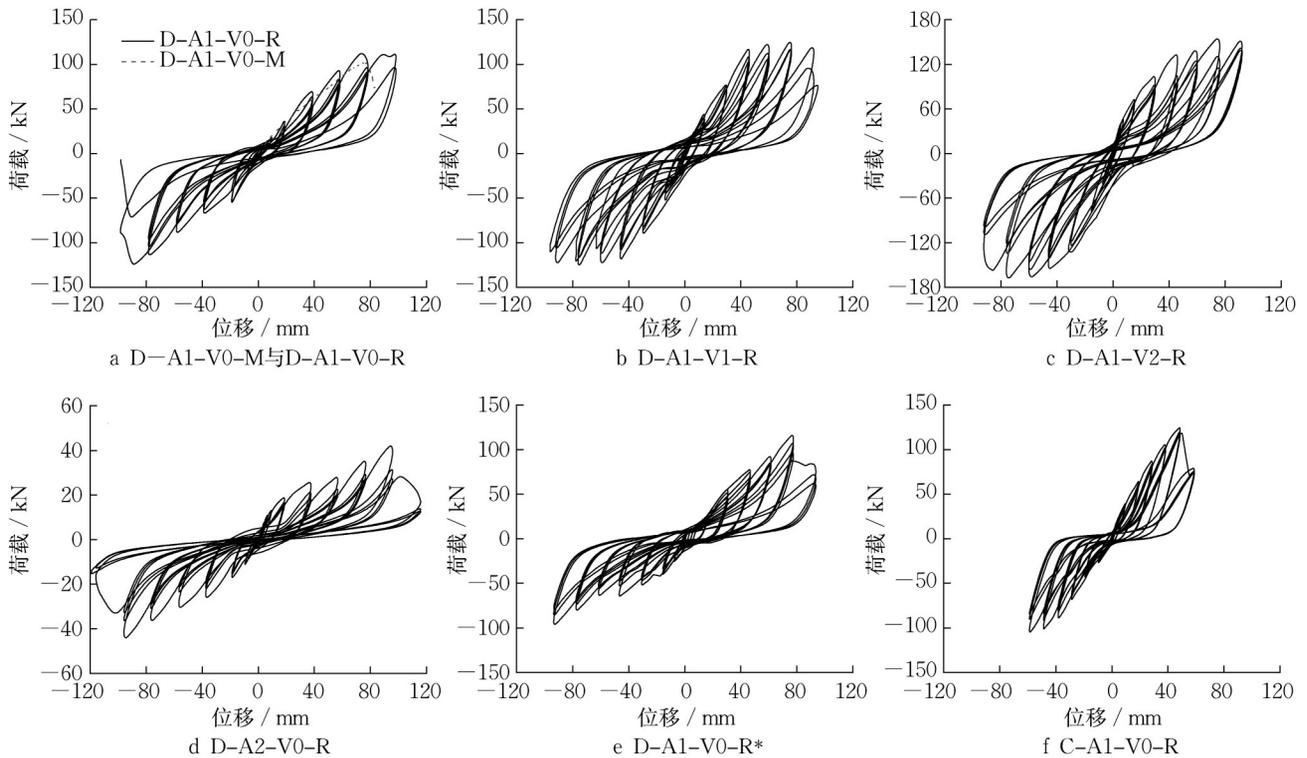


图7 荷载—位移曲线

Fig. 7 Curves of load-displacement

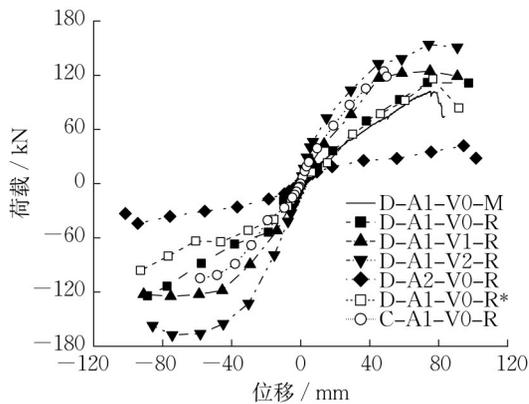


图8 骨架曲线

Fig. 8 Curves of skeleton

3.3 主要力学性能参数

为进一步定量分析新型耗能连接CLT剪力墙的抗侧力性能,根据各试件的平均骨架曲线(取正向加载与负向加载骨架曲线绝对值的平均值)计算并分析多项力学性能参数,包括屈服荷载 P_y 、峰值荷载 P_m 、极限荷载 P_u 及相应的屈服位移 Δ_y 、峰值位移 Δ_m 和极限位移 Δ_u 、弹性抗侧刚度 K_e 和延性系数 D 。其中 P_m 、 P_u 、 Δ_m 、 Δ_u 可直接由平均骨架曲线确定; K_e 取原点与 $0.4P_m$ 两点连线的斜率; P_y 、 Δ_y 由等效能量理想弹塑性(Equivalent Energy Elastic Plastic, EEEP)方法确定;延性系数 D 由 Δ_u 与 Δ_y 的比值确定,各项力学性能参数定义见表2。

表2 试件力学性能参数

Tab. 2 Mechanical performance parameters of tested CLT shear walls

试件编号	P_y /kN	Δ_y /mm	P_m /kN	Δ_m /mm	P_u /kN	Δ_u /mm	K_e /(kN·mm ⁻¹)	D
D-A1-V0-R	95.1	41.4	117.7	93.0	117.7	93.0	2.30	2.25
D-A1-V1-R	115.4	33.7	124.7	75.2	120.5	90.9	3.42	2.70
D-A1-V2-R	144.2	27.5	160.8	74.4	154.1	88.3	5.24	3.21
D-A2-V0-R	32.5	32.8	43.0	94.5	36.5	98.2	0.99	3.00
D-A1-V0-R*	83.3	44.1	98.0	76.7	89.9	92.2	1.89	2.09
C-A1-V0-R	103.5	35.5	112.7	48.3	111.5	54.2	2.91	1.53

由表2可知:①高宽比为1.0的耗能连接墙体试件初始刚度为 $2.30 \sim 5.24 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$,最大承载能力为 $118 \sim 160 \text{ kN}$,延性系数为 $2.3 \sim 3.2$,其中增大顶部竖向荷载可提升耗能连接CLT剪力墙的初始刚度、最大承载能力与延性,与上部未施加荷载的墙体试件相比,顶部竖向荷载为 $12.3 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $24.6 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 的墙体试件初始刚度为其1.5倍和2.3倍,最大承载能力提升了6%和36%,延性提升了20%和43%,顶部竖向荷载对抗侧力性能的提升原因在于侧向变形模式的改变,文献[11]亦报道了相似结论。②高宽比为2.0的墙体试件D-A2-V0-R的初始刚度与最大承载能力最低,仅为高宽比为1.0的试件D-R1-V0-C的40%左右,但其具有较大变形能力,延性可提升33%,其原因在于试件D-A2-V0-R底部仅有一个耗能抗剪连接件,因而刚度与承载能力较低,而此时墙体侧向变形主要由摇摆变形控制,因而具有更大变形能力。③原位更换耗能连接件后,CLT剪力墙的初始刚度下降了17.8%,最大承载能力下降了16.7%,而延性仅降低7.1%,总体可认为修复后的墙体具有良好的抗侧力性能,新型耗能连接具备一定的可更换性。④普通金属连接墙体试件C-A1-V0-R与耗能连接墙体试件D-A1-V0-R相比,前者具有较大的初始刚度与屈服荷载、相近的最大承载能力,但其延性系数为1.53,仅为后者的68%,表明新型耗能连接CLT剪力墙具有较好的抗侧力性能。

3.4 刚度退化

为探究墙体在低周往复荷载下的刚度变化规律,以割线刚度衡量结构的有效刚度,其中第 i 次循环下的有效刚度定义见式(1):

$$K_i = \frac{|P_i^+| + |P_i^-|}{|\delta_i^+| + |\delta_i^-|} \quad (1)$$

式中: P_i^+ 、 P_i^- 分别为第 i 次循环下正向与负向加载方向的峰值荷载; δ_i^+ 、 δ_i^- 分别为第 i 次循环下正向与负向加载方向的峰值荷载对应位移。

各试件的有效刚度随加载循环圈数的变化过程见图9。由图9可知:①试件的有效刚度总体上随加载圈数的增加而逐渐降低,表明各试件的有效刚度随连接件的塑性发展而逐渐退化,同时在加载初期的刚度衰减速度较大,而加载后期的刚度衰减速度减缓。②在同等条件下,增大顶部竖向荷载可明显提升墙体的有效刚度,但其破坏时有效刚度的退化程度也相对较大,如试件D-A1-V2-R相较于其初始刚度下降了约85%。③对于试件D-A2-V0-R,由于较少的耗能抗剪连接件个数,墙体的有效刚度明显较低,同时

由于较大的高宽比(2:1)导致墙体以摇摆变形为主,因而耗能抗拉连接件的塑性发展程度更高,墙体的有效刚度退化程度最深,相较于初始刚度下降了约94%。④得益于耗能连接良好的延性与耗能能力,修复后的CLT剪力墙在原位更换耗能连接件后,其刚度退化发展趋势与衰减程度与原剪力墙基本相同。⑤普通金属连接CLT剪力墙的有效刚度在加载全过程中均大于同等条件下的耗能连接CLT剪力墙,但其破坏时的刚度退化程度更大,有效刚度降低幅度达80%,而后者的降低幅度约为75%。

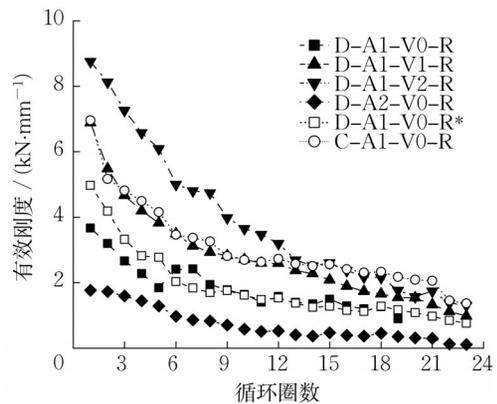


图9 刚度退化曲线

Fig. 9 Curves of stiffness degradation

3.5 强度退化

在低周往复加载中,对应于同一加载位移幅值,结构构件的承载力一般随往复加载次数的增加而降低,表现为强度退化现象。对于正交胶合木剪力墙结构,在主震作用后存在强度退化现象,此时若再遭受余震,可能使结构产生破坏,因此需探究剪力墙的强度退化性能。定义强度退化系数 λ_i 为同一位移幅值下第 i 次加载的峰值荷载 P_i 与第1次加载的峰值荷载 P_1 的比值,见式(2):

$$\lambda_i = \frac{P_i}{P_1} \quad (2)$$

各试件强度退化曲线见图10。由图10可知。

①各墙体试件均出现强度退化现象,其原因在于加载过程中,耗能连接件中的软钢耗能段与耗能橡胶逐渐进入塑性阶段,自攻螺钉等紧固件亦在木材处产生一定程度的销槽承压变形。②试件D-A2-V0-R的强度退化现象显著,原因在于较大的高宽比和较少的耗能抗剪连接件个数使耗能抗拉连接件的塑性发展程度更深。③采用普通金属连接的墙体试件C-A1-V0-R的强度退化现象较为轻微,其原因在于普通金属连接件采用基于承载力的设计理念,在

破坏前金属连接件进入塑性的程度较低,但在产生脆性破坏后,强度退化系数迅速降低至0.8以下。
④ 对除试件D-A2-V0-R以外的耗能连接墙体试件而言,其在破坏前的强度退化系数均大于0.76,即强度退化小于24%,表明耗能连接CLT剪力墙在地震作用中可提供可靠的承载力性能。

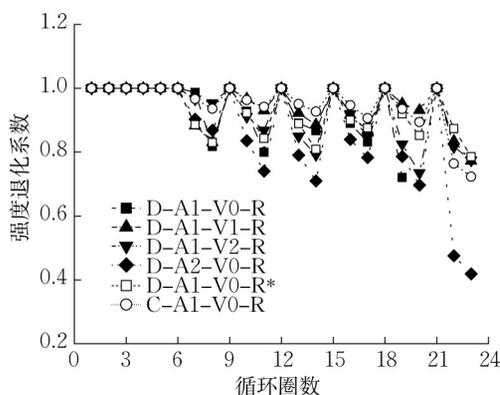


图10 强度退化曲线

Fig. 10 Curves of strength degradation

3.6 耗能能力

耗能能力是结构构件抗震性能的重要评价指标,一般采用滞回圈的面积总和进行表征,可综合反映结构构件的刚度、变形能力等因素。各试件每个加载循环下的总累积滞回耗能发展趋势见图11。由图11可知。
① 在同等条件下,耗能连接墙体试件的最大耗能能力比普通金属连接墙体试件高38%,表明耗能连接CLT剪力墙具有优越的耗能能力,其原因在于耗能连接墙体中可通过耗能连接件中软钢耗能段的屈服变形与耗能橡胶的剪切变形耗散大量能量,而普通金属连接墙体中主要依靠金属板及自攻螺钉的塑性变形、木材的销槽承压变形与劈裂耗能,耗散能量较少。
② 增大顶部竖向荷载可进一步提升耗能连接墙体试件的耗能能力,顶部竖向荷载为 $24.6\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 试件的累积滞回耗能总量接近未施加顶部竖向荷载试件的2倍。
③ 对于原位替换耗能连接件的墙体试件D-A1-V0-R*,尽管其总累积耗能的增幅略低于原墙体试件D-A1-V0-R,但其耗能总量高于后者,表明经修复的耗能连接CLT剪力墙具有同样较好的耗能能力。

4 结论

基于试验现象观察与试验数据分析,得到以下结论:
(1) 在侧向力作用下,新型耗能连接CLT剪力

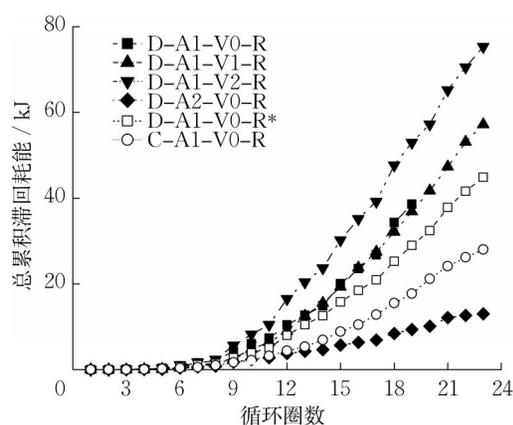


图11 总累积滞回耗能曲线

Fig. 11 T Curves of total cumulative hysteretic energy

墙的损伤主要集中在耗能连接处,表现为软钢耗能段的屈服断裂与耗能橡胶脱胶破坏,而CLT板材与自攻螺钉未见损伤。得益于耗能连接所带来的理想损伤路径、良好耗能能力与较高延性,CLT墙体的最大层间位移角可达 $1/23$ 。

(2) 新型耗能连接CLT剪力墙与普通金属连接CLT剪力墙相比,最大承载力相近,而延性提升了26%,最大耗能能力提升了38%,表明新型耗能连接CLT剪力墙具有更好的抗震性能。

(3) 顶部竖向荷载的增加可有效提升新型耗能连接CLT剪力墙的抗侧刚度、最大承载力、延性与耗能能力;而高宽比的增大可提升墙体的侧向变形能力与延性。

(4) 在对加载后的CLT剪力墙采用原位替换新型耗能连接方式进行修复后,修复的CLT剪力墙与原剪力墙具有相近的抗侧刚度、最大承载力、延性与耗能能力,表明新型耗能连接CLT剪力墙可实现强震后连接可更换、结构可修复的设计目标。

作者贡献声明:

陈佳炜:方法计算,试验测试,论文撰写。
熊海贝:研究选题,项目指导,论文修改。
彭增鑫:材料提供,论文撰写,数据处理。
王瑞明:试验测试,数据处理,材料整理。

参考文献:

- [1] 刘伟庆,杨会峰. 现代木结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 16.
LIU Weiqing, YANG Hui Feng. Research progress on modern timber structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 16.

- [2] 熊海贝, 欧阳禄, 吴颖. 国外高层木结构研究综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 1297.
XIONG Haibei, OUYANG Lu, WU Ying. State-of-the-art research of tall wood buildings[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(9): 1297.
- [3] 孙晓峰, 何敏娟, 李征. 铁杉正交胶合木板弯曲及剪切性能[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(8): 144.
SUN Xiaofeng, HE Minjuan, LI Zheng. Bending and shear properties of cross-laminated timber panels made from hemlock[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(8): 144.
- [4] 张晋, 孙一鸣, 王跃翔, 等. 室内火灾作用下正交胶合木结构受火性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 115.
ZHANG Jin, SUN Yiming, WANG Yuexiang, *et al.* Experimental study on fire performance of cross laminated timber structure exposed to compartment fire[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(9): 115.
- [5] 肖岩, 王睿, 闻婕, 等. 正交胶合竹木(CLB T)研究进展[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(11): 126.
XIAO Yan, WANG Rui, WEN Jie, *et al.* Research progress of cross-laminated timber and bamboo (CLBT)[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(11): 126.
- [6] LI H, WEI Y, YAN L, *et al.* In-plane compressive behavior of short cross-laminated bamboo and timber[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 200: 116807.
- [7] TRAN D K, JEONG G Y. Effects of wood species, connection system, and wall-support interface type on cyclic behaviors of cross-laminated timber (CLT) walls under lateral loads[J]. Construction and Building Materials, 2021, 280: 122450.
- [8] 王希珺, 李征, 何敏娟. 竖向拼缝对正交胶合木剪力墙抗侧性能的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 366.
WANG Xijun, LI Zheng, HE Minjuan. Influence of wall-to-wall vertical connections on the lateral performance of cross-laminated timber shear walls[J]. Journal of Nanjing Tech University: Natural Science Edition, 2021, 43(3): 366.
- [9] 王志强, 罗冬, 郑维, 等. 混合结构对正交胶合木剪力墙抗侧性能的影响[J]. 林业工程学报, 2017, 2(2): 145.
WANG Zhiqiang, LUO Dong, ZHENG Wei, *et al.* Effect of hybrid structure on lateral load resistance of cross-laminated timber shear wall[J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(2): 145.
- [10] 何敏娟, 王希珺, 李征. 往复荷载下正交胶合木剪力墙的承载能力与变形模式研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(9): 60.
HE Minjuan, WANG Xijun, LI Zheng. Cyclic load capacity and deformation mode of cross-laminated timber shear walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(9): 60.
- [11] GAVRIC I, FRAGIACOMO M, CECCOTTI A. Cyclic behavior of CLT wall systems: Experimental tests and analytical prediction models[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(11): 04015034.
- [12] LIU J, LAM F. Experimental test of coupling effect on CLT angle bracket connections[J]. Engineering Structures, 2018, 171: 862.
- [13] SUN X, HE M, LI Z. Experimental and analytical lateral performance of posttensioned CLT shear walls and conventional CLT shear walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(6): 04020091.
- [14] RINGHOFER A, BRANDNER R, BLASS H J. Cross laminated timber (CLT): Design approaches for dowel-type fasteners and connections[J]. Engineering Structures, 2018, 171: 849.
- [15] D'ARENZO G, CASAGRANDE D, POLASTRI A, *et al.* CLT shear walls anchored with shear-tension angle brackets: Experimental tests and finite-element modeling[J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(7): 04021089.
- [16] IZZI M, CASAGRANDE D, BEZZI S, *et al.* Seismic behaviour of cross-laminated timber structures: A state-of-the-art review[J]. Engineering Structures, 2018, 170: 42.
- [17] PAN Y, SHAHNEWAZ M, TANNERT T. Seismic performance and collapse fragility of balloon-framed CLT school building[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2023, 27(11): 3115.
- [18] POLASTRI A, CASAGRANDE D. Mechanical behaviour of multi-panel cross laminated timber shear-walls with stiff connectors[J]. Construction and Building Materials, 2022, 332: 127275.
- [19] LU B, LU W, ZHONG M, *et al.* Experimental investigation and analytical model of cross-laminated timber wall with coupled U-shaped flexural plate connectors[J]. Construction and Building Materials, 2021, 307: 124984.
- [20] WANG X, HE M, LI Z. Experimental testing of platform-type and balloon-type cross-laminated timber (CLT) shear walls with supplemental energy dissipators[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 66: 105943.
- [21] WRZESNIAK D, RODGERS G W, FRAGIACOMO M, *et al.* Experimental testing of damage-resistant rocking glulam walls with lead extrusion dampers[J]. Construction and Building Materials, 2016, 102: 1145.
- [22] D'ARENZO G, RINALDIN G, FOSSETTI M, *et al.* An innovative shear-tension angle bracket for cross-laminated timber structures: Experimental tests and numerical modelling[J]. Engineering Structures, 2019, 197: 109434.
- [23] HASHEMI A, QUENNEVILLE P. Large-scale testing of low damage rocking cross laminated timber (CLT) wall panels with friction dampers[J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110166.
- [24] ZHANG X, POPOVSKI M, TANNERT T. High-capacity hold-down for mass-timber buildings[J]. Construction and Building Materials, 2018, 164: 688.
- [25] CHEN J, XIONG H, FURUTA T, *et al.* Experimental and analytical studies on mechanical performance of innovative energy-dissipating hold-down for CLT structures[J]. Construction and Building Materials, 2022, 317: 125966.
- [26] CHEN J, PENG Z, FURUTA T, *et al.* Mechanical properties and analytical model of a novel dissipative angle bracket for CLT structures[J]. Engineering Structures, 2024, 300: 117229.