

正交胶合木新型抗剪及抗拉连接耗能特性试验

熊海贝¹, 武喆¹, 陈佳炜^{1,2}

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

摘要: 连接节点是保证木结构抗震性能的重要因素, 节点的耗能能力是衡量其是否适用于抗震区的重要指标。提出了适用于正交胶合木(cross laminated timber, CLT)结构的新型耗能抗剪连接节点和新型耗能抗拉连接节点, 为研究该类连接节点的破坏模式及力学性能, 开展了 15 组低周往复加载试验。试验结果表明, 新型耗能连接节点试件延性系数(D)均大于 9.0, 满足欧洲规范 Eurocode 8 中对高延性节点 $D > 6$ 的要求, 属于高延性范围; 新型耗能连接节点工作阶段强度退化系数均低于 20%, 具备工程适用性; 新型耗能连接节点工作阶段等效黏滞阻尼系数为 12%~22%, 普通商用连接节点等效黏滞阻尼系数为 2.5%~15.8%, 两类新型耗能连接节点具有较好的耗能能力。

关键词: 正交胶合木; 新型连接节点; 耗能特性; 力学性能; 破坏模式

中图分类号: TU399

文献标志码: A

Experimental Study on Energy Dissipation Capacity of Novel Dissipative Connections for CLT Structures

XIONG Haibei¹, WU Zhe¹, CHEN Jiawei^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Connections are essential in ensuring the seismic performance of timber structures, and the energy dissipation capacity of connections is an important index to measure the serviceability of connections for earthquakes. In this paper, the novel dissipative angle bracket and hold-down for cross-laminated timber (CLT) structures were proposed. Fifteen sets of cyclic loading tests were conducted to evaluate the failure mechanisms and mechanical properties of these connections. Almost

all the tested specimens have a ductility larger than 9.0, meeting the requirements of Eurocode 8 for high ductility connections with $D > 6$, and belonging to the high ductility class. The strength degradation of the novel dissipative connections in the working stage less than 20%, indicating the engineering applicability of the novel connections. The equivalent viscous damping ratio of the novel dissipative connections in the working stage is 12%~22%, and that of the common commercial connections is 2.5%~15.8%, indicating the high energy-consuming capacity of the novel connections.

Keywords: cross-laminated timber (CLT); novel connection; energy dissipation characteristics; mechanical property; failure mechanism

在我国可持续发展和“双碳”战略大背景下, 木结构建筑凭借其绿色、环境友好等优势得到越来越多的关注。正交胶合木(cross laminated timber, CLT)通过将木板组胚层正交胶合的方式, 有效平衡了木材顺纹方向与横纹方向受力性能的差异^[1], 使其平面内与平面外均具有较高的强度和刚度。相较于传统结构材, CLT 具有轻便、装配化程度高、设计灵活等优点^[2], 在多层及高层建筑中有广阔的应用前景。

连接节点是保证 CLT 结构承载力及延性的重要因素, 对于结构体系的抗震性能有显著影响^[3]。目前商用的 CLT 连接件多为金属连接件, 应用最广的是钢制抗剪连接件(angle bracket)和抗拉连接件(hold-down)。连接件通过自攻螺钉将墙板与楼板或地面连接, 提供墙体的抗剪性能和抗拉性能。国内外学者围绕该金属连接节点的滞回性能^[4-5]、延性^[6-7]以及影响其力学性能的参数(如木材种类^[8]、锚

收稿日期: 2024-01-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978502)

第一作者: 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

通信作者: 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



论文
拓展
介绍

固件种类^[9]、轴力—剪力双向作用^[10]等)开展了大量研究。Gavric等^[5]系统地研究了抗剪连接件连接节点的力学性能,指出抗剪连接节点一般可实现较好的延性,但严重的脆性破坏往往更易发生。Roberto等^[11]对7种抗剪连接件进行了单调加载和低周往复加载试验研究,结果表明该类连接易发生脆性破坏,且不同种类的抗剪连接件性能差异较大。

在连接节点各项力学性能中,耗能能力是结构构件抗震性能的重要评价指标。大量足尺振动台试验结果表明,普通金属连接件节点延性系数为2.0~4.3,延性较低^[12-15],其延性和耗能能力很大程度上取决于锚固件的破坏模式^[16]。当自攻螺钉布置数量较少或承载能力较低时,连接节点的失效模式受螺钉弯曲破坏控制,具有相对较好的延性,但承载能力较低,且捏缩效应显著,耗能能力不强^[17];相反,当螺钉数量较多或承载能力较强时,往往呈现诸如木材劈裂和金属板断裂等脆性破坏模式,节点的延性和耗能能力也因此降低。为提高连接节点的耗能能力,近年来,部分学者提出了多种适用于CLT结构的新型连接节点。D'Arenzo等^[18-19]在普通抗剪连接件连接基础上,采用增设的大尺寸(11mm×150mm)全穿透自攻螺钉以提高连接的力学性能,并研究了其在拉力—剪力复合作用下的力学性能。Scotta等^[20]提出了新型X-bracket连接,该连接采用特制的“X”形金属骨架来消散能量,使塑性区发生在较小截面处,从而防止木材或紧固件出现局部破坏。Marchil等^[21]将新型X-Bracket连接用于抗剪,并给出了相应的分析模型。这些研究为研发新型耗能抗剪连接件提供了参考。Latour等^[22]所提出的XL-stubs连接通过将抗拉连接件的塑性区从锚固件区域转移到金属骨架的翼缘区域,从而提高节点的延性及耗能能力。然而这些新型连接件的耗能原理大部分在于充分利用金属支架的塑性性能,关于利用高阻尼橡胶的材性特点进行耗能的连接节点研究还鲜有报道。

因此,提出适用于CLT结构的新型耗能抗剪连接件和新型耗能抗拉连接件。基于单调加载试验和低周往复加载试验对其力学性能进行研究,分析新型耗能连接节点的破坏模式,给出节点的力学参数,并与普通商用金属连接节点进行对比,验证新型耗能连接节点的工程适用性和良好的耗能性能。此外,从连接节点的基本受力机理出发,提出简化计算模型以预估节点的基本力学性能,为后续研究及工程应用提供参考。

1 新型耗能连接节点简介

理想耗能连接应满足以下几个特点:一是具有良好的耗能能力和延性,以充分耗散地震能量;二是具有明显的两阶段受力性能,同时其屈服点应稳定可控,以实现其小震下的弹性状态和中震及大震下的塑性状态。参考现有连接节点的工作原理,结合普通商用CLT金属连接件的简单易用性与高阻尼橡胶的耗能优势,提出了适用于CLT结构的新型耗能连接节点,主要包括耗能抗剪连接和耗能抗拉连接两类节点,如图1和图2。

2种耗能连接节点均由两部分组成,即金属骨架部分和橡胶部分,其中金属骨架由耗能骨架和底座组成,橡胶部分由内部耗能橡胶和外覆保护橡胶层组成。具体而言,金属耗能骨架由一块钢板开槽后弯折形成并通过焊接相连。底座由金属制成,用于将连接件安装至基础或楼面。内部耗能橡胶位于前面板和后面板之间,并通过胶黏剂与金属骨架紧密粘结,外覆保护橡胶层用于保护金属骨架不受环境腐蚀。

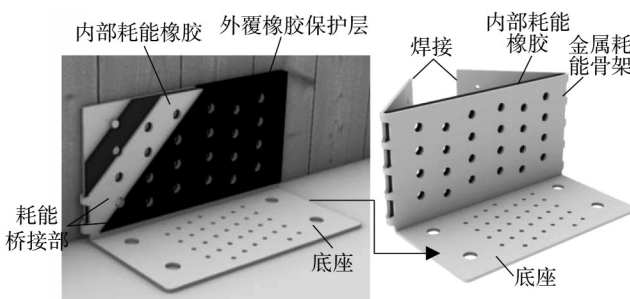


图1 新型耗能抗剪连接节点

Fig. 1 Novel dissipative angle bracket

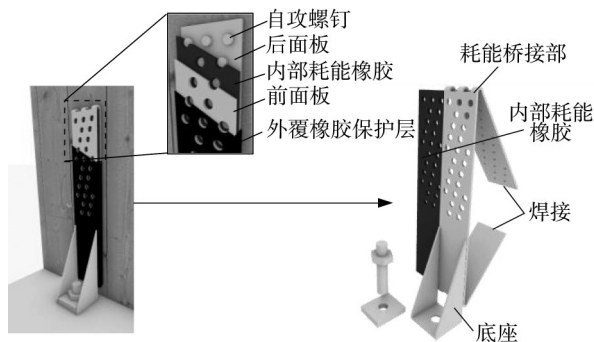


图2 新型耗能抗拉连接节点

Fig. 2 Novel dissipative hold-down

新型耗能连接节点的工作原理(设计原则)可描述为:在地震作用较小时,连接件处于弹性状态,依靠金属骨架提供较大的初始刚度;随着地震作用增

大,连接件依靠耗能桥接部发生屈服耗能,同时内部耗能橡胶发生剪切变形耗能。由于内部耗能橡胶与金属骨架紧密胶结,即使在耗能桥接部屈服甚至断裂后,连接件依然可以作为一个整体受力并耗能,有效增加了连接件的延性与耗能能力。

2 试验概况

2.1 试件设计

新型耗能抗剪连接试件设计主要考虑 4 种关键变量,即自攻螺钉种类、自攻螺钉数量、CLT 木材种类、楼板受力方向、耗能橡胶剪切模量、耗能橡胶阻尼比和自攻螺钉种类,进行剪力方向低周往复试验。试件设计参数详见表 1,CLT 木材种类为铁杉。新型耗能抗拉连接试件设计主要考虑 5 种关键变量,即 CLT 木材种类、耗能橡胶剪切模量、耗能橡胶阻尼比、自攻螺钉种类和自攻螺钉数量,进行拉力方向低周往复试验,试件设计参数详见表 2。并选用某商用抗剪连接件和抗拉连接件进行对比,其尺寸及自攻螺钉布置与新型耗能连接件相同。试验共测试了 2 组普通商用抗剪连接件与 CLT 组成的节点(试件分别命名为 AB-1 和 AB-2),以及 2 组普通商用抗拉连接件与 CLT 组成的节点(试件分别命名为 S-HD-

25-A-1 和 S-HD-25-A-2)。

表 1 新型耗能抗剪连接试件设计参数
Tab. 1 Configurations of tested novel angle bracket

试件编号 ¹⁾	楼板受力方向	耗能橡胶		自攻螺钉种类
		剪切模量/MPa	阻尼比/%	
Q-0°-0.4-20%-C	顺纹	0.6	20	QAS
R-0°-0.4-20%-C	顺纹	0.4	5	LBS
Q-90°-0.4-20%-C	横纹	0.4	20	QAS
Q-90°-0.4-10%-C	横纹	0.4	20	QAS
Q-90°-0.6-20%-C	横纹	0.4	20	QAS
AB-1	顺纹			ABS
AB-2	顺纹			ABS

注: 1)试件编号中,Q表示采用 QAS 自攻螺钉;R表示采用 LBS 自攻螺钉;0°表示楼板受力方向为顺纹;90°表示楼板受力方向为横纹;0.4 和 0.6 表示橡胶剪切模量为 0.4MPa 和 0.6MPa;20% 和 10% 表示橡胶阻尼比为 20% 和 10%;C 表示低周往复加载。

新型耗能抗剪连接件的尺寸信息见图 3,新型耗能抗拉连接件的尺寸信息见图 4。其中,金属骨架均由 3.5mm 厚的 20#软钢板弯折后焊接而成;金属骨架前面板和后面板各设置插入孔和安装孔,孔径分别为 10.0mm 和 5.5mm;外覆橡胶保护层厚度为 0.3mm(图中未画出);内置的耗能橡胶层厚度为 7mm。抗剪连接件和抗拉连接件示意图见图 5。

表 2 新型耗能抗拉连接试件设计参数
Tab. 2 Configurations of tested novel hold-down

试件编号 ¹⁾	CLT 种类	耗能橡胶		自攻螺钉	
		剪切模量/MPa	阻尼比/%	数量	种类
H-0.4-20%-25-C	铁杉	0.4	20	25	LBS
H-0.6-20%-25-C	铁杉	0.6	20	25	LBS
H-0.4-5%-25-C	铁杉	0.4	5	25	LBS
H-0.4-20%-17-C	铁杉	0.4	20	17	LBS
S-0.4-20%-25-C	SPF	0.4	20	25	LBS
S-0.4-20%-25-C-A	SPF	0.4	20	25	ABS
S-HD-25-C-A-1	SPF			25	ABS
S-HD-25-C-A-2	SPF			25	ABS

注: 1)试件编号中,H表示 CLT 种类为铁杉;S表示 CLT 种类为 SPF;0.4 和 0.6 表示橡胶剪切模量为 0.4MPa 和 0.6MPa;20% 和 5% 表示橡胶阻尼比分别为 20% 和 5%;25 和 17 表示自攻螺钉数量分别为 25 和 17;C 表示低周往复加载;A 表示自攻螺钉采用 ABS。

为避免试验加载引起的附加弯矩影响,每个试件采用 2 个耗能连接件和若干 CLT 板材对称排布,每块 CLT 板由 3 层厚度为 35mm 的层板正交胶合形成,见图 6 和图 7。其中,抗剪连接节点顺纹试件定义为楼面 CLT 板外侧在自攻螺钉受力方向上为顺纹,横纹试件则定义为楼面 CLT 板外侧受力方向上为横纹。

2.2 材性试验

新型耗能连接节点试验中包括 CLT、钢材、橡胶、自攻螺钉和螺栓 5 种材料,分别进行材性试验研究,得到 CLT 材性试验结果见表 3,钢材材性试验结果见表 4,橡胶材性试验结果见表 5。试验中共采用了 3 种自攻螺钉,分别为 Rothoblaas 公司生产的 LBS 自攻螺钉(5mm×70mm)、中国美国固汉得威公司生产的 QAS 自攻螺钉(5.2mm×70mm)和

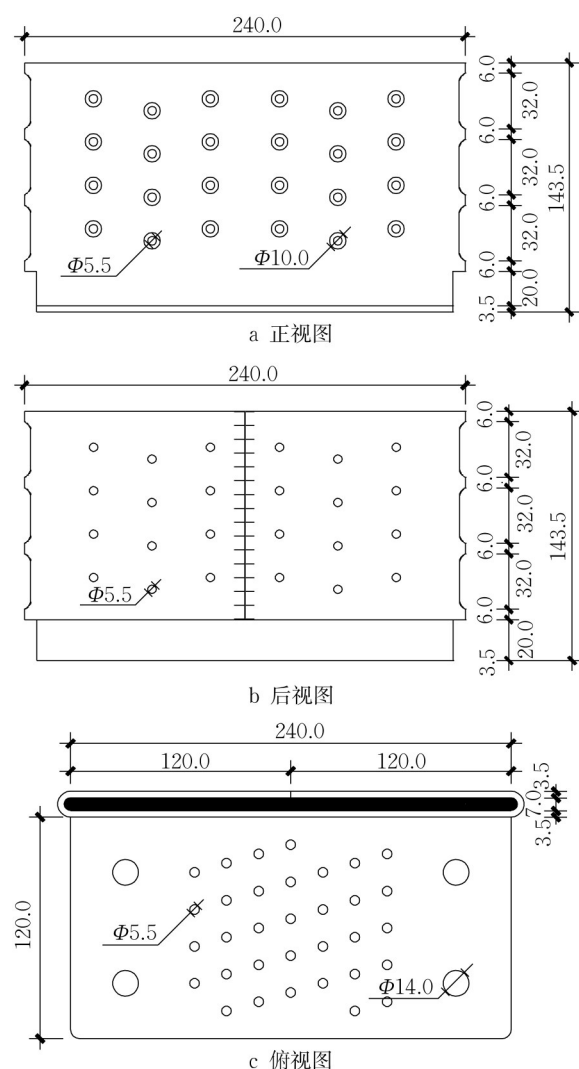


图3 新型耗能抗剪连接件示意(单位:mm)

Fig. 3 Geometric detail of novel dissipative angle bracket (unit: mm)

Eurotec 公司生产的 ABS 自攻螺钉(5mm×60mm)。采用 ASTM D1761-20 对钉入 CLT 的自攻螺钉进行单个自攻螺钉的抗剪强度试验,装置如图8所示。所用CLT为加载后的试件未受损伤的部分切割制成的木块(105mm×105mm×105mm);加载钢板厚度与耗能角支架钢骨架板材厚度相同,为 3.5mm。自攻螺钉抗剪试验结果见表6。螺栓材性采用厂家提供的出厂性能参数作为参考值,强度等级 20#直径 18mm 螺栓屈服强度为 1 050MPa,抗拉强度为 1 185MPa,拉断伸长率为 12%。

2.3 试验装置及加载制度

试验采用特制的一套装置进行加载,主要包括加载装置、作动器、位移计、限位装置和控制系统等,见图9和图10。对于抗剪连接件节点试验,在CLT楼板四周布置限位块以限制试件在水平向的移动;

同时,由于试件在水平荷载作用下的轻微偏心会导致CLT墙板上拔,因此在墙板上布置聚四氟乙烯板,并通过限位钢板压紧形成导轨装置来减小不利影响。

低周往复加载采用 ASTM E2126 标准中建议的加载制度,采用位移控制,即首先采用极限位移值 Δ_m 的 1.25%、2.5%、5.0%、7.5% 和 10.0% 的三角形波进行 1 个循环加载、随后采用 Δ_m 的 20%、40%、60%、80%、100% 和 120% 的三角形波依次进行 3 个循环加载,直至试件破坏。

3 低周往复加载试验现象

3.1 试验现象

3.1.1 新型耗能抗剪连接节点破坏模式

统计各组抗剪连接低周往复加载试验现象可知,试验中各试件的耗能桥接部均出现严重破坏,新型耗能抗剪连接节点在低周往复加载作用下主要破坏模式为耗能桥接部破坏,见图11。造成该现象主要原因为:在低周往复荷载下,耗能桥接部需不断承受拉压交替的应力,塑性损伤累积快,因而容易发生断裂。值得说明的是,试验试件 Q-90°-0.4-20%-C 在试验过程中发生了CLT楼板脱胶破坏,然而在实际结构中不会出现此类脱胶破坏,这是由于试验所选用CLT墙板尺寸较小,实际结构中墙板或楼板均为大体量板材,试验边界条件与实际使用情况不符。

3.1.2 新型耗能抗拉连接节点破坏模式

两类新型耗能连接件均通过耗能桥接部与耗能橡胶协同工作,然而由于连接件尺寸以及受力方向的不同,破坏模式各不相同。新型耗能抗拉连接节点在低周往复加载作用下主要存在 5 种破坏模式,包括金属骨架焊缝断裂(破坏模式 I)、金属骨架前面板拉断(破坏模式 II)、耗能桥接部断裂(破坏模式 III)、耗能橡胶与金属骨架间脱胶(破坏模式 IV)和自攻螺钉剪断(破坏模式 V),见图12。其中,在金属骨架焊缝断裂(破坏模式 I)或耗能桥接部断裂(破坏模式 III)后,由于耗能橡胶与金属骨架仍可紧密粘结,耗能连接节点仍可继续承载,属于延性破坏;自攻螺钉剪断(破坏模式 V)属于脆性破坏,应予以避免。各组抗拉连接低周往复加载试验现象统计见表7。由表7可知,所有的连接节点均发生了耗能桥接部断裂的情况,造成该现象的原因在于,在低周往复荷载下,耗能桥接部需不断承受拉压交替的应

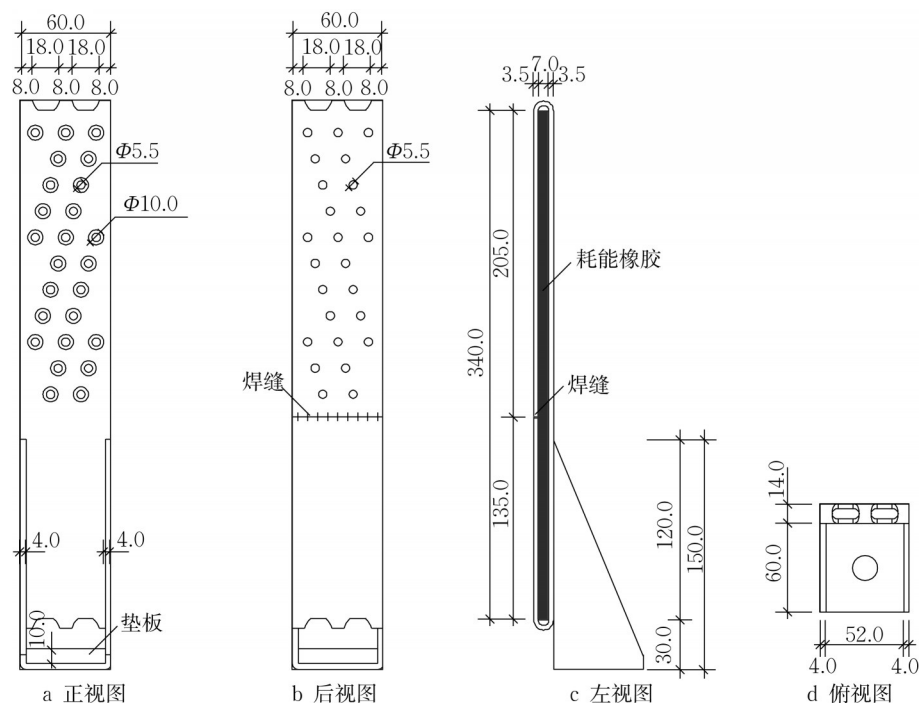


图4 新型耗能抗拉连接件示意(单位:mm)

Fig. 4 Geometric detail of novel dissipative hold-down (unit: mm)



图5 普通商用连接件示意

Fig. 5 Common commercial connectors

力,塑性损伤累积更快,因而更容易发生断裂。此外,焊缝断裂现象仅在部分试件出现,其原因在于在

耗能桥接部断裂后,金属骨架的刚度迅速下降,主要依靠耗能橡胶传递荷载,减轻了焊缝处的受力和变形需求。

3.2 荷载—位移曲线

各低周往复加载试件的荷载—位移曲线见图13和图14。由图13和图14可知,在低周往复加载试验初期,试件处于线弹性阶段,荷载—位移曲线基本表现为直线;随着荷载增大,耗能桥接部逐渐进入塑性阶段,荷载—位移曲线斜率降低,开始产生滞回圈,且较为饱满,表明节点具有较好的耗能能力;与此同时,在相同的加载幅值时,节点的最大承载能力随循环次数的增加而逐渐降低,表明节点存在一定的刚度和承载力退化现象。此外,由于抗剪连接试件在受压时存在明显偏转,试件的滞回曲线在受拉侧(图

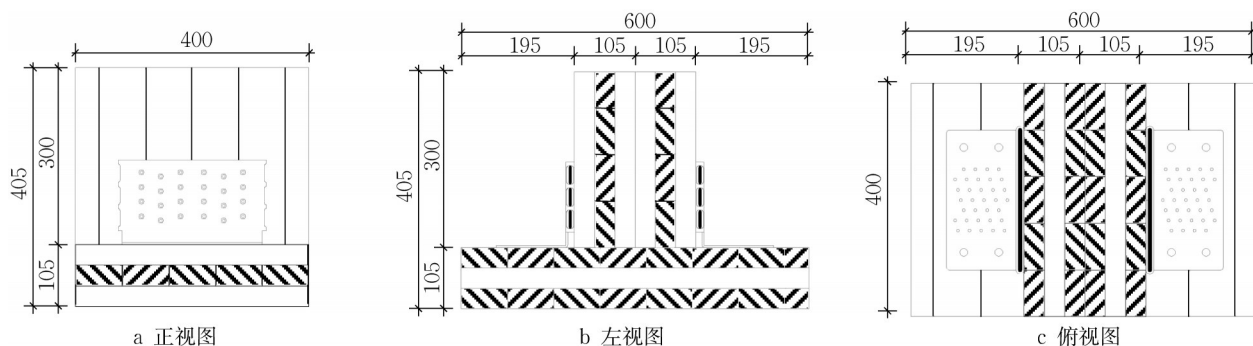


图6 新型耗能抗剪连接(顺纹)节点详图(单位:mm)

Fig. 6 Geometric detail of angle bracket specimens with parallel-to-grain slab (unit: mm)

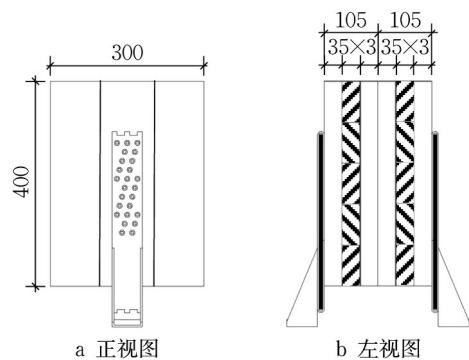


图 7 新型耗能抗拉连接(顺纹)节点试件尺寸(单位 mm)
Fig. 7 Geometric detail of hold-down specimens with parallel-to-grain slab (unit: mm)

中正值部分)明显大于受压侧。

总结低周往复加载试验荷载—位移曲线,新型耗能连接节点的工作机理主要分为 3 个阶段:① 线弹性阶段,荷载—位移曲线表现为直线段;② 工作阶段,随着耗能桥接部的屈服,骨架曲线的刚度明显降低,但仍可近似为直线,此时依靠耗能桥接部和耗能橡胶进行耗能,滞回圈较为饱满;③ 高延性阶段,此时耗能桥接部发生破坏,但由于耗能橡胶仍紧密胶黏于金属骨架上,因此仍可继续承载,进一步提供耗能和延性,此时滞回圈的饱满程度有所降低。

需要说明的是,新型耗能连接节点要实现理想的工作模式,需要首先保证自攻螺钉可提供近似固接的边界条件。在测试的绝大多数试件中,自攻螺钉与 CLT 板可有效共同工作,不发生自攻螺钉拔出、剪断或 CLT 板劈裂或压溃等不利现象。尽管合理利用自攻螺钉的塑性变形可进一步提高连接节点的耗能能力与延性,如试件 H-0.4-20%-17-C 所示,

但同时也会导致自攻螺钉和 CLT 板发生严重的损伤。此外,当自攻螺钉性能较弱时,会在耗能桥接部或耗能橡胶破坏前发生破坏,从而导致连接节点的承载能力和耗能性能较差,如试件 S-0.4-20%-25-C 所示。与之相反的是,在试件 S-0.4-20%-25-C-A 中,由于用 ABS 自攻螺钉替换了 LBS 自攻螺钉,保证了自攻螺钉不首先发生破坏,使得连接节点的承载能力和耗能能力均有大幅提升。

为进一步讨论新型耗能连接的可行性与适用性,将耗能连接试验结果与普通商用连接进行对比。试验结果表明,普通抗剪连接节点的失效模式为钢背板撕裂破坏,自攻螺钉剪断或拔出,如图 15 a;普通抗拉连接节点的失效模式表现为金属板的拉断,见图 15 b。耗能连接节点与普通连接节点的荷载—位移曲线对比见图 16。由图 16 可知,普通抗剪连接件试件 AB-1、AB-2 最大荷载分别为 99.7kN、107.3kN,最大荷载所对应最大位移分别为 14.3mm、28.3mm,新型耗能抗剪连接试件 Q-0°-0.4-20%-C 最大荷载为 163.1kN,最大位移为 74.6mm;普通抗拉连接节点试件 S-HD-25-C-A-1、S-HD-25-C-A-2 最大荷载均分别为 88.7kN、85.7kN,所对应最大位移分别为 25.9mm、22.4mm,新型耗能抗拉连接试件 S-0.4-20%-25-C-A 最大荷载为 100.5kN,最大位移为 32.1mm。因此,与普通商用连接节点相比,新型耗能连接节点具有更大的强度和更好的变形能力,同时,其滞回圈也更加饱满,表明其耗能能力更高。

3.3 力学性能分析

3.3.1 新型耗能抗剪连接节点力学性能

表 3 CLT 材性试验结果

Tab. 3 Test results of material properties of CLT

木材种类	顺纹抗压强度/ MPa	横纹抗压强度/ MPa	顺纹抗压弹模/ MPa	横纹抗压弹模/ MPa	密度/ (g·cm ⁻³)	含水率/ %
铁杉	均值	46.32	3.04	15.31	0.47	0.483
	变异系数	0.05	0.18	0.19	0.2	0.06
	试验依据	GB/T 1935	GB/T 1939	GB/T 15777	GB/T 1943	GB/T 1933
SPF	均值	37.8	2.98	10.13	0.84	0.454
	变异系数	0.15	0.11	0.16	0.18	0.20
	试验依据	GB/T 1935	GB/T 1939	GB/T 15777	GB/T 1943	GB/T 1933

表 4 钢材材性试验结果

Tab. 4 Test results of material properties of steel

钢材牌号	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	断后伸长 率/%	弹性模量/ GPa
20#	245	410	52.5	200

注:共 6 个试样,按《金属材料室温拉伸试验》(GB/T 228—2010)要求测试并确定其强度值。

为进一步分析新型耗能连接节点的力学性能,根据各组试件的荷载—位移曲线得到新型耗能连接节点的各项力学性能参数。根据欧洲标准 BS EN12512,各力学参数定义如下:① 屈服荷载(F_y)和屈服位移(Δ_y):荷载—位移曲线弹性阶段和屈服阶段 2 条拟合直线的交点为屈服点,屈服点对应的位

表 5 橡胶材性试验结果

Tab. 5 Test results of material properties of rubber

剪切模量/ MPa	阻尼比/ %	拉伸强度平均值/ MPa	拉伸伸长率平均 值/%
0.4	20	8.66	460.01
0.6	20	12.09	375.67
0.4	5	18.28	676.19

注：共 3 组，每组 6 个试样，按《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》(GB/T 528—2009)要求测试。

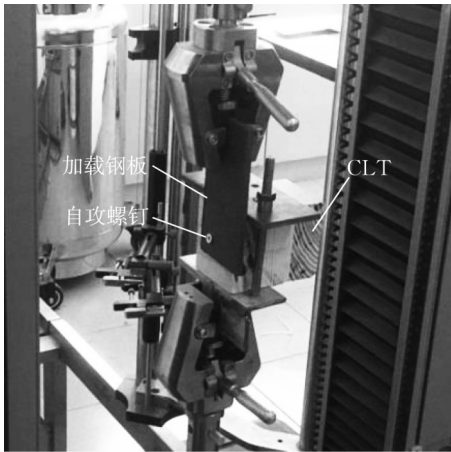
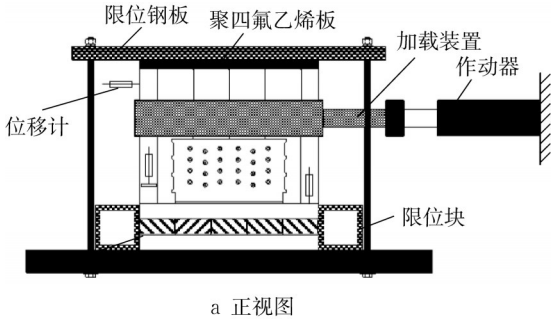


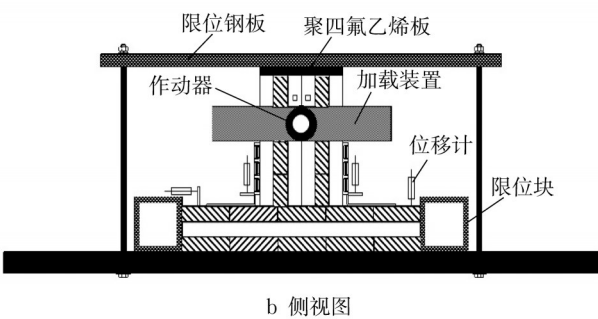
图 8 自攻螺钉抗剪性能试验加载装置

Fig. 8 Test setup for shear performance of screws

移即为屈服位移，屈服点对应的荷载即为屈服荷载。
② 最大荷载(F_m)和最大位移(Δ_m)：最大荷载定义为荷载—位移曲线中的荷载最大值为节点荷载，最大荷载对应的位移为最大位移。
③ 极限荷载(F_u)和极



a 正视图



b 侧视图

图 9 抗剪连接节点试验装置

Fig. 9 Test setup for angle bracket

强度退化系数表征了节点在往复荷载作用下，随时间或循环加载次数增加，其承载能力降低的性质。定义节点的强度退化系数 ΔF_i 为某一加载幅值下第 1 圈峰值荷载 P_1 与第 i 圈峰值荷载 P_i 的差值与第 1 周峰值荷载的比值，即

$$\Delta F_i = \frac{P_1 - P_i}{P_1}, i = 2, 3 \quad (1)$$

表 9 给出了节点在循环加载下各阶段的强度退

表 6 自攻螺钉抗剪性能试验结果

Tab. 6 Test results of material properties of screws

组合	刚度/(N·mm ⁻¹)	最大承载力/N
LBS—铁杉(顺纹)	281	9 842
LBS—铁杉(横纹)	237	7 134
QAS—铁杉(顺纹)	342	9 941
QAS—铁杉(横纹)	289	6 880
LBS—SPF	244	5 539
ABS—SPF	308	6 234

注：共 6 组，每组 5 个试样，按 ASTM D1761—20 要求测试并确定其强度值。

限位移(Δ_u)：极限位移定义为试件产生明显破坏或荷载下降至最大荷载的 80% 时对应的位移，对应的荷载为极限荷载。
④ 节点初始刚度(K)：定义为荷载—位移曲线中屈服前直线的斜率。
⑤ 节点延性系数(D)：定义为极限位移与屈服位移的比值，即 $D = \Delta_u / \Delta_y$ 。

基于抗剪连接节点往复加载作用下的骨架曲线，计算得到各试件的力学性能指标(表 8)。由表 8 可知，抗剪连接节点在低周往复加载下的屈服荷载为 33.8~41.6 kN，初始刚度为 4.7~7.18 kN·mm⁻¹。值得注意的是，抗剪连接节点在低周往复加载下的延性约为 9.2~10.9，均大于欧洲规范 Eurocode 8 中对高延性节点的要求($D > 6$)，可认为新型耗能抗剪连接节点的延性系数属于高延性范围，具有较好的延性。

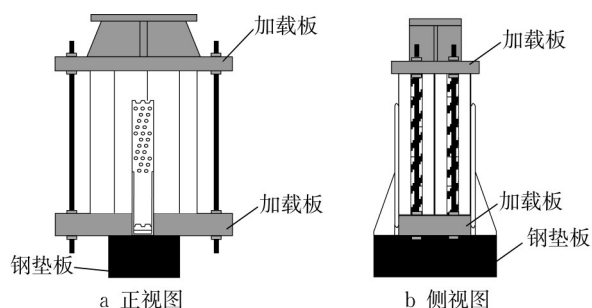


图10 抗拉连接节点试验装置

Fig. 10 Test setup for hold-down

化系数不大于20%的要求,因此总体上看可认为该连接节点具备工程实用性。

节点的耗能能力是衡量其是否适用于抗震区的另一个重要指标。欧洲规范EN12512通过等效黏滞阻尼系数 $v_{eq,i}$ 定义节点的耗能能力。该系数通过节点在地震作用下的耗能 E_d 和有效势能 E_p 之比再除

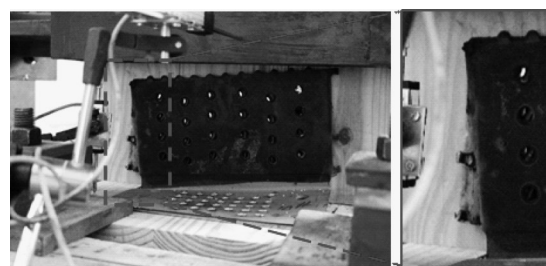


图11 新型抗剪连接节点低周往复试验典型破坏模式

Fig. 11 Failure modes of tested novel angle bracket under cyclic loading

以 2π 来求得,见式(2)。 $E_{d,i}$ 为在第 i 圈下荷载一位移曲线的滞回面积, $E_{p,i}$ 为在第 i 圈下理想状态的弹性体滞回面积,可通过 $0.5P_i\Delta_i$ 求得,其中 P_i 为峰值荷载, Δ_i 为对应的位移。

$$v_{eq,i} = \frac{E_{d,i}}{2\pi E_{p,i}} \quad (2)$$

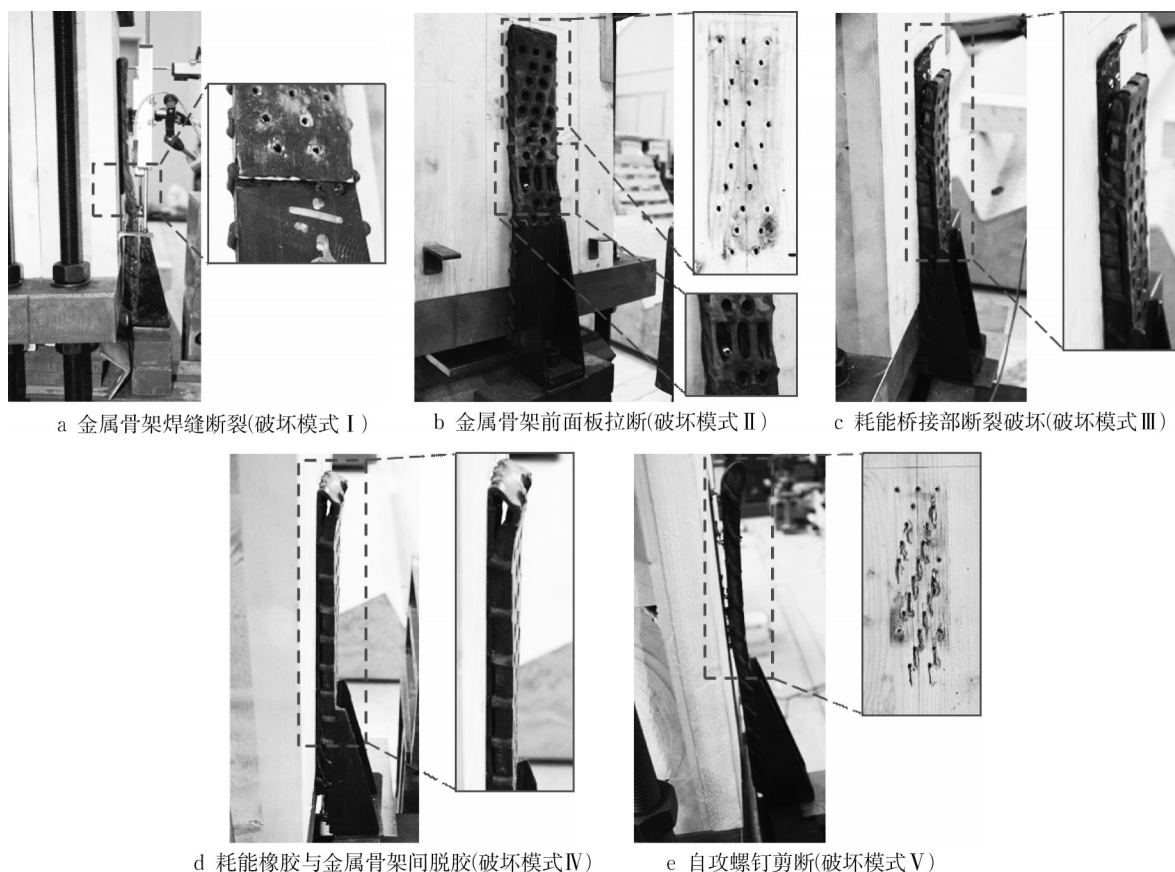


图12 新型抗拉连接节点低周往复试验典型破坏模式

Fig. 12 Failure modes of tested novel hold-down under cyclic loading

图17给出了各试件在每个加载圈下的等效黏滞阻尼系数。由图17可知,由于强度退化现象,抗剪节点在同一加载幅值下的等效黏滞阻尼系数随加载圈数增加而降低。同时,节点的等效黏滞阻尼系数随加载圈数的增加呈现先增大后减小的趋势。在

线弹性阶段,耗能抗剪连接节点的等效黏滞阻尼系数为9%~14%;在进入工作阶段后,等效黏滞阻尼系数迅速增大至18%~22%,在达到峰值后逐渐降低,并在高延性阶段保持在10%左右。通过对比不同参数试件的等效黏滞阻尼系数可知,当CLT楼板

表 7 新型耗能抗拉连接节点低周往复加载试验现象

Tab. 7 Failure modes of novel dissipative hold-down under cyclic loading

编号	抗拉连接件				自攻螺钉剪断	CLT 板顺纹劈裂	破坏模式
	焊缝断裂	前面板拉断	橡胶脱开	耗能桥接部断裂			
H-0.4-20%-25-C	✓		✓	✓		轻微	I + III + IV
H-0.6-20%-25-C	✓	✓		✓		轻微	I + II + III
H-0.4-5%-25-C			✓	✓		轻微	III + IV
H-0.4-20%-17-C			✓	✓		轻微	III + IV
S-0.4-20%-25-C				✓	✓	较重	V
S-0.4-20%-25-C-A	✓		✓	✓		轻微	I + III + IV

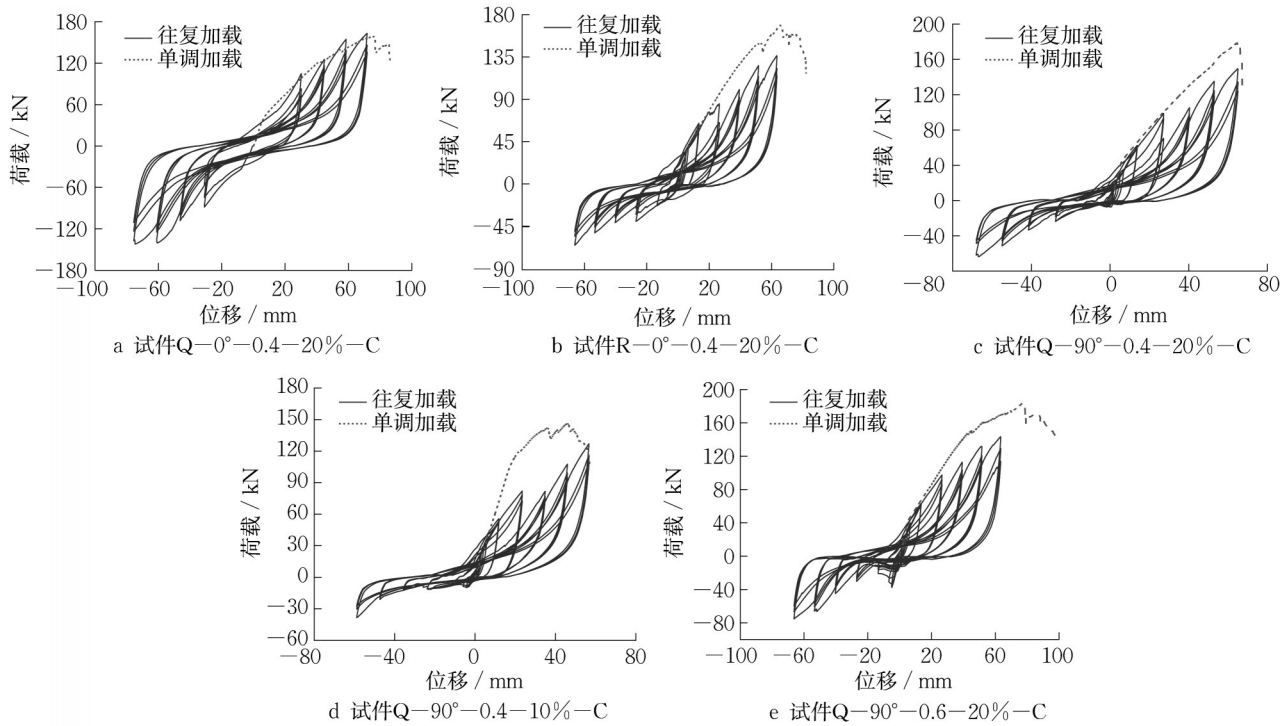


图 13 抗剪连接件低周往复加载试验荷载—位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves under cyclic loading for angle bracket

为横纹受力方向时,节点耗能能力相对较大;耗能橡胶阻尼比的增大有利于节点耗能能力的增加;增大耗能橡胶的剪切刚度不利于节点耗能能力的增加;自攻螺钉种类对等效黏滞阻尼系数的影响不明显。此外,图 17 给出了普通商用抗剪连接的等效黏滞阻尼系数,可见普通商用抗剪连接节点的等效黏滞系数为 6.8%~15.8%,明显小于新型耗能抗剪连接节点。因此,相较于普通商用抗剪连接,可认为本文所提出的新型耗能抗剪连接具有明显较优的耗能能力。

3.3.2 新型耗能抗拉连接节点力学性能

基于各抗拉连接节点的骨架曲线,计算得到各试件的力学性能指标,见表 10。其中失效荷载 F_t 定义为荷载—位移曲线在首次发生荷载急剧降低时的荷载,对应位移为失效位移 Δ_t ;延性系数定义为失效位移与屈服位移的比值,即 $D = \Delta_t / \Delta_y$ 。由表 10 可

知,耗能抗拉连接节点在低周往复加载下的屈服荷载为 22.4~26.6 kN,初始刚度为 5.6~10.9 kN·mm⁻¹,失效荷载为 63.4~106.9 kN。同时,耗能抗拉连接试件延性系数为 6.7~20.5,均大于 6.0,表明其具有较好的变形能力。

表 11 给出了节点在循环加载下各阶段的强度退化系数。由表 11 可知,耗能抗拉节点的强度退化系数随加载位移的增大而增大。在节点的工作阶段(即 60% 的最大位移前),强度退化系数为 0.4%~19.7%,表明该连接节点具备工程实用性。需要说明的是,随着施加位移的进一步增大(即 80% 的最大位移时),由于耗能橡胶与金属骨架间脱胶,耗能橡胶退出工作,连接节点承载能力下降,会出现强度退化系数超过 20% 的现象,如在高延性阶段试件 H-0.4-5%-25-C、H-0.4-20%-17-C 和 S-0.4-20%-25-C-A 所示。

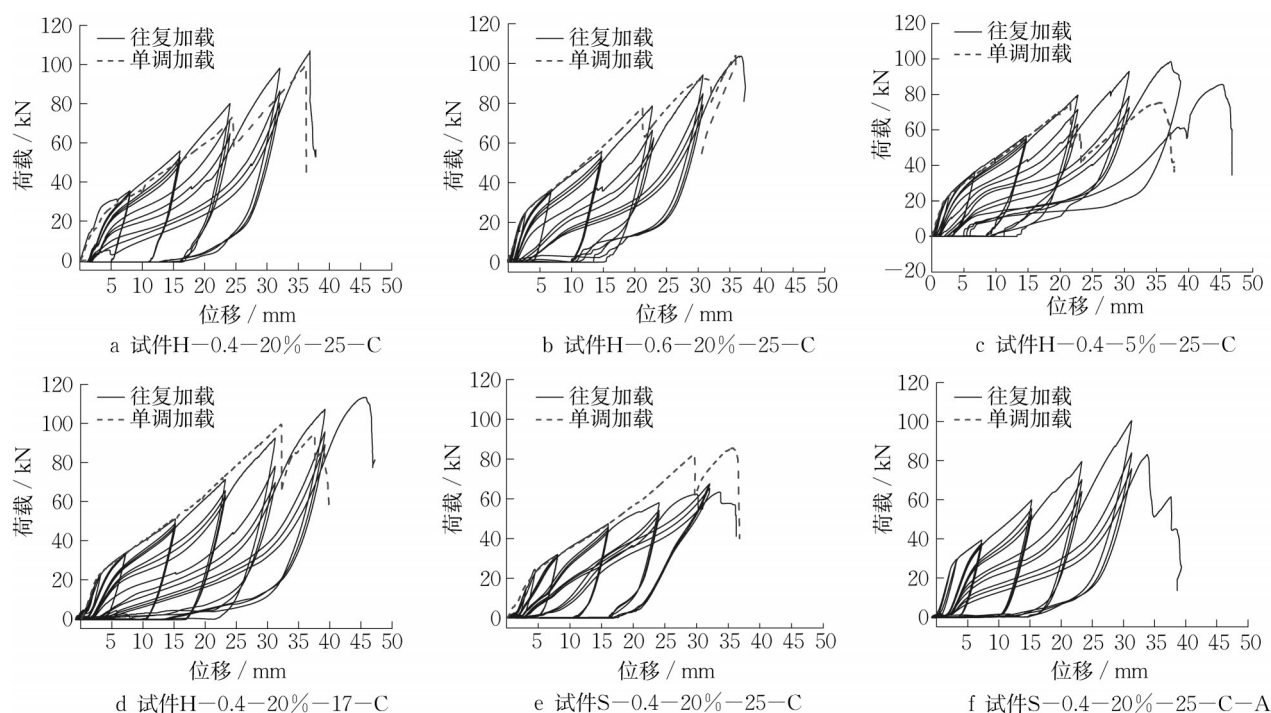
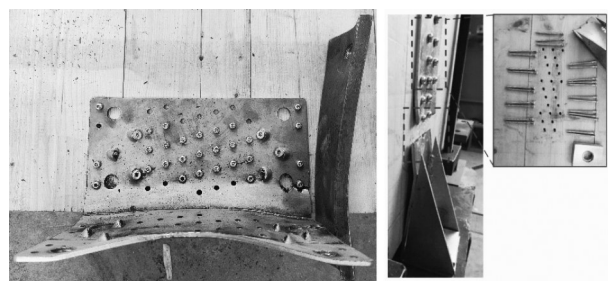


图14 抗拉连接件低周往复加载试验荷载—位移曲线

Fig. 14 Load-displacement curves under cyclic loading for hold-down



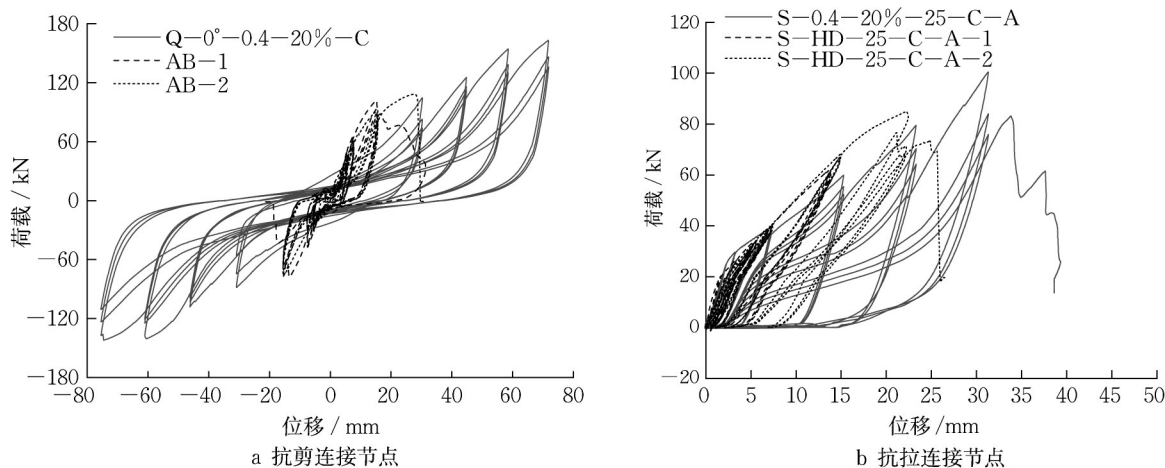
a 抗剪连接

b 抗拉连接

图15 普通商用连接节点失效模式

Fig. 15 Failure modes of common connections

图18给出了各试件在每个加载圈下的等效黏滞阻尼系数。由图18可知,在线弹性阶段,节点的等效黏滞阻尼系数为3%~4%。随着位移的增大,在进入工作阶段后,节点的等效黏滞阻尼系数迅速增大至12%~17%,在达到峰值后平稳下降到8.5%~11.0%,并在高延性阶段仍可保持在4%~7%。由图18知,耗能橡胶的等效阻尼比的增大有利于节点耗能能力的提高,如试件H-0.4-20%-25-C的等效黏滞阻尼系数明显大于H-0.4-5%-25-C。通过比较试件H-0.4-20%-25-C和H-0.4-20%-17-C可



a 抗剪连接节点

b 抗拉连接节点

图16 低周往复加载荷载—位移曲线对比

Fig. 16 Comparison of load-displacement curves under cyclic loading

表 8 新型耗能抗剪连接节点低周往复加载试验力学性能

Tab. 8 Test results of angle bracket specimens under cyclic loading

编号	F_y / kN	Δ_y / mm	F_m / kN	Δ_m / mm	F_u / kN	Δ_u / mm	$K / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	D
Q-0°-0.4-20%-C	33.8	7.2	163.1	74.6	110.7	75.5	4.70	10.5
R-0°-0.4-20%-C	40.5	6.6	136.4	63.4	114.2	63.5	6.15	9.6
Q-90°-0.4-20%-C	41.1	6.1	149.5	64.9	133.8	65.1	6.75	10.7
Q-90°-0.4-10%-C	40.6	6.2	127.0	56.6	115.1	56.7	6.55	9.2
Q-90°-0.6-20%-C	41.6	5.8	143.3	63.4	129.2	63.5	7.18	10.9

表 9 新型耗能抗剪连接节点低周往复加载试验强度退化系数

Tab. 9 Strength degradation of novel angle bracket at different displacement levels under cyclic loading

编号	20% Δ_u		40% Δ_u		60% Δ_u		80% Δ_u		100% Δ_u	
	ΔF_2	ΔF_3	ΔF_2	ΔF_3	ΔF_2	ΔF_3	ΔF_2	ΔF_3	ΔF_2	ΔF_3
Q-0°-0.4-20%-C	15.6	29.4	4.9	8.7	10.3	13.9	10.4	16.6		
R-0°-0.4-20%-C	18.4	30.7	8.0	11.7	9.1	13.9	10.0	15.5		
Q-90°-0.4-20%-C	2.4	4.2	5.1	23.1	11.6	16.2	10.9	16.6	10.2	16.8
Q-90°-0.4-10%-C	3.8	5.6	4.3	11.2	6.1	8.9	7.7	11.5	21.2	28.2
Q-90°-0.6-20%-C	9.0	15.6	5.3	11.5	8.2	12.1	9.8	19.5		

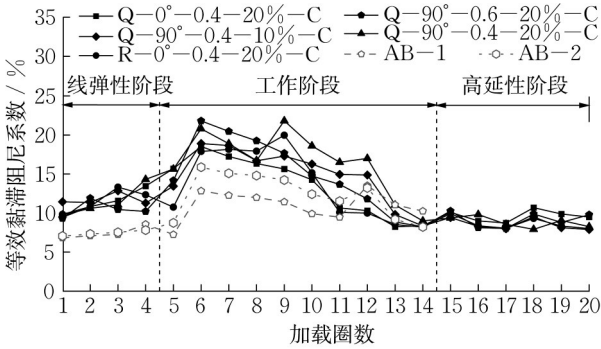


图 17 新型耗能抗剪连接节点等效黏滞阻尼系数

Fig. 17 Equivalent viscous damping ratio of each cycle for angle bracket

知,自攻螺钉数目的减少会降低节点的耗能能力,原因在于耗能连接节点传力机制为:耗能橡胶与钢骨架形成并联关系,两者并联后又与自攻螺钉形成串联关系,节点耗能能力由连接件和自攻螺钉两部分提供,因此节点耗能能力与自攻螺钉数目呈正相关。图 18 中给出了普通商用抗拉连接节点的等效黏滞阻尼系数,由图 18 可知,普通商用连接节点的等效黏滞系数为 2.5%~8.5%,明显小于新型耗能抗拉连接节点。因此,相较于普通商用抗拉连接,可认为本文所提出的新型耗能抗拉连接具有显著的耗能能力。

表 10 新型耗能抗拉连接节点低周往复加载试验力学性能

Tab. 10 Test results of hold-down specimens under cyclic loading

编号	F_y / kN	Δ_y / mm	F_t / kN	Δ_t / mm	F_m / kN	Δ_m / mm	$K / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	D
H-0.4-20%-25-C	22.39	2.46	106.97	36.88	106.97	36.88	9.10	15.0
H-0.6-20%-25-C	23.64	2.18	103.69	37.75	103.69	37.75	10.96	17.3
H-0.4-5%-25-C	22.35	2.21	85.59	45.31	98.51	37.22	10.32	20.5
H-0.4-20%-17-C	22.68	3.17	113.34	46.43	113.34	46.43	6.86	14.6
S-0.4-20%-25-C	26.53	5.03	63.41	33.63	67.55	32.09	5.63	6.7
S-0.4-20%-25-C-A	26.62	2.42	83.13	34.61	100.45	32.11	10.84	14.3

表 11 新型耗能抗拉连接节点低周往复加载试验强度退化系数

Tab. 11 Strength degradation of hold-down at different displacement levels under cyclic loading

编号	20% Δ_u		40% Δ_u		60% Δ_u		80% Δ_u	
	ΔF_2	ΔF_3	ΔF_2	ΔF_3	ΔF_2	ΔF_2	ΔF_3	ΔF_2
H-0.4-20%-25-C	1.8	3.1	5.6	8.7	10.3	19.1	11.9	18.2
H-0.6-20%-25-C	0.8	1.8	4.8	7.6	14.4	19.7	10.0	15.9
H-0.4-5%-25-C	0.4	0.5	2.9	5.1	10.2	19.5	15.1	21.9
H-0.4-20%-17-C	0.5	1.3	4.5	6.8	8.0	11.7	15.6	24.6
S-0.4-20%-25-C	1.6	3.1	3.7	6.3	6.7	10.2	0.4	3.6
S-0.4-20%-25-C-A	4.2	6.0	7.5	12.6	11.5	19.2	16.3	24.4

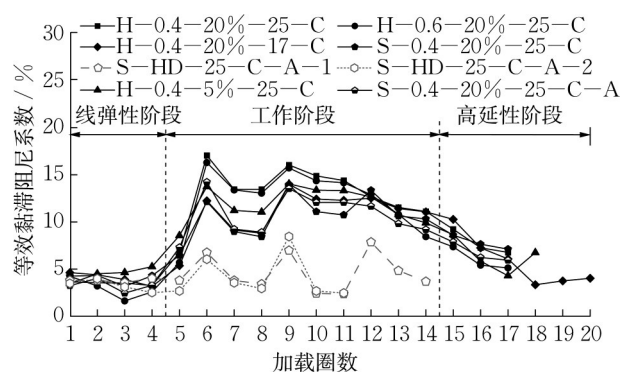


图18 新型耗能抗拉连接节点等效黏滞阻尼系数

Fig. 18 Equivalent viscous damping ratio of each cycle for hold-down

4 结论

正交胶合木连接节点耗能能力是评估结构抗震性能的重要指标之一,为提高连接节点耗能能力,结合耗能橡胶的高延性优势,本文提出一种新型耗能连接系统,包括新型耗能抗剪连接和新型耗能抗拉连接件。通过低周往复试验对其破坏模式和力学性能进行研究,得到以下结论:

(1)两类新型耗能连接的设计理念为:在弹性阶段,依靠金属骨架提供较大的初始刚度;在弹塑性阶段,首先依靠耗能桥接部发生屈服耗能,其次依靠内部耗能橡胶发生剪切变形耗能;此外在破坏阶段,由于内部耗能橡胶与金属骨架的紧密胶结,连接件整体即使在耗能桥接部屈服甚至断裂后仍可以继续受力。两类新型耗能连接的单调加载与低周往复加载试验均验证了该设计理念的有效性。

(2)新型耗能抗剪连接节点的破坏模式主要包括:耗能桥接部破坏和CLT 楼板脱胶破坏两类。新型耗能抗拉连接节点的破坏模式主要包括:金属骨架焊缝断裂、耗能橡胶与金属骨架间脱胶、金属骨架前面板拉断、自攻螺钉剪断和耗能桥接部断裂5类。

(3)两类新型耗能连接节点的低周往复加载的骨架曲线均表现为明显的两折线,即由初始的弹性段、屈服点和屈服后曲线段组成,基本可划分为线弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。此外,节点的延性系数均大于6.0,表明两类新型耗能连接节点具有较高的延性。

(4)两类新型耗能节点在工作阶段的强度退化系数总体上不大于20%,满足欧规对节点工程适用性的规定,因此可认为两类新型耗能连接节点具备一定的工程适用性。

(5)两类新型耗能节点在低周往复加载下的滞回圈较为饱满,在工作阶段的等效黏滞阻尼系数可达12%~22%,而普通商用连接节点等效黏滞阻尼系数为2.5%~15.8%,表明新型耗能连接节点具有良好的耗能能力,可有效减小地震作用,并成为韧性可更换连接节点,应用在高地震烈度区的多高层正交胶合木剪力墙结构体系中。

需要说明的是,新型耗能抗剪连接件楼板处自攻螺钉布置过于集中,同时缺少加劲肋,导致在受剪时,在附加弯矩作用下易发生一侧的翘起变形,另一侧受压下陷,不利于耗能橡胶与耗能桥接部发生期望变形,因此应在后续设计中优化自攻螺钉孔排布,同时增设加劲肋。

作者贡献声明:

熊海贝:试验指导,研究思路指导,论文修改与写作指导。

武 喆:试验结果分析,图表可视化,参数分析,论文撰写。

陈佳伟:试验方案设计与开展,论文修改与写作指导。

参考文献:

- [1] 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0306.
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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0306.
- [2] 何敏娟,陶铎,李征.多高层木及木混合结构研究进展[J].建筑结构学报,2016,37(10):1. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.10.001.
HE Minjuan, TAO Duo, LI Zheng. State-of-the art of research advances on multi-story timber and timber-hybrid structures[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37 (10): 1. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.10.001.
- [3] 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.02.002.
LIU Weiqing, YANG Huifeng. Research progress on modern timber structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40 (2): 16. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.02.002.
- [4] WRIGHT TDW, LI M, Carradine D, *et al.* Cyclic behaviour of hold-downs using mixed angle self-tapping screws in douglas-fir CLT[C]//Proceedings of the 2021 New Zealand Society for earthquake engineering annual technical conference 2021. Christchurch: New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2021: 10.
- [5] GAVRIC I, FRAGIACOMO M, CECCOTTI A. Cyclic

- behaviour of typical metal connectors for cross-laminated (CLT) structures. *Materials and Structures* [J]. *Materials and Structures*, 2015, 48 (6): 1841. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0278-7>.
- [6] DONG W, LI M, OTTENHAUS L M, *et al.* Ductility and overstrength of nailed CLT hold-down connections [J]. *Engineering Structures*, 2020, 215: 110667. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110667>.
- [7] 刘新虎, 黄大典. 正交胶合木墙体与楼板角钢连接节点力学性能研究[J]. *工业建筑*, 2022, 52 (4): 107. DOI: 10.13204/j.gyjzG21081309.
- LIU Xinhui, HUANG Dadian. Research on mechanical properties of clt wall-to-floor joints with angle bracket [J]. *Industrial Construction*, 2022, 52 (4): 107. DOI: 10.13204/j.gyjzG21081309.
- [8] FRANCO B, VICTOR R, ALEXANDER O-V, *et al.* Experimental and numerical evaluation of hold-down connections on radiata pine cross-laminated-timber shear walls: a case study in Chile [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2019, 77 (3): 79. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1365-1>.
- [9] 沈银澜, 牟在根, JOHANNES S, *et al.* 交叉层积木数值模拟研究以及连接损伤分析[J]. *工程科学学报*, 2016, 38 (1): 149. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2016.01.020.
- SHEN Yinlan, MOU Zaigen, JOHANNES S, *et al.* Numerical simulation study and damage analysis of cross laminated timber connections [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2016, 38 (1): 149. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2016.01.020.
- [10] POZZA L, FERRACUTI B, MASSARI M, *et al.* Axial - shear interaction on CLT hold-down connections - experimental investigation [J]. *Engineering Structures*, 2018, 160: 95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.021>.
- [11] ROBERTO T, IAN S. Experimental characterization of monotonic and cyclic loading responses of CLT panel-to-foundation angle bracket connections [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 27 (6): 04014189. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001144](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001144).
- [12] VAN DE LINDT J W, FURLEY J, AMINI M O, *et al.* Experimental seismic behavior of a two-story CLT platform building [J]. *Engineering Structures*, 2019, 183: 408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.079>.
- [13] VIKTOR H, BRUNO D, MARTA S, *et al.* Full-scale shaking-table tests of Xlam panel systems and numerical verification; specimen 1 [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139 (1): 2010. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000754](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000754).
- [14] MOTOI Y, KENJI K, MINORU O, *et al.* Full-scale tests and numerical analysis of low-rise CLT structures under lateral loading [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142 (4): E4015007. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001348](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001348).
- [15] ARIO C, CARMEN S, MINORU O, *et al.* SOFIE project - 3D shaking table test on a seven - storey full - scale cross - laminated timber building [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamic*, 2013, 42: 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.2309>.
- [16] 钟森麟, 李静, 强智森, 等. 紧固件数量对CLT钢木连接节点性能的影响 [J]. *林产工业*, 2021, 58 (10): 18. DOI: 10.19531/j.issn1001-5299.202110004.
- ZHONG Miaolin, LI Jing, QIANG Zhisen, *et al.* The influence of the number of fasteners on the properties of clt steel-to-timber connections [J]. *China Forest Products Industry*, 2021, 58 (10): 18. DOI: 10.19531/j.issn1001-5299.202110004.
- [17] 贾苑, 乔菁, 张佳男, 等. CLT墙体-楼板T型连接件节点力学性能研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40 (10): 123. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20180243.
- JIA Yuan, QIAO Jing, ZHANG Jianan, *et al.* Mechanical performance of CLT wall-to-floor joints with T connector [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40 (10): 123. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20180243.
- [18] 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109434>.
- [19] D'ARENZO G, SEIM W, FOSSETTI M. Experimental characterization of a biaxial behaviour connector for CLT wall-to-floor connections under different load directions [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 295: 123666. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123666>.
- [20] SCOTTA R, MARCHI L, TRUTALLI D, *et al.* A dissipative connector for CLT buildings: concept, design and testing [J]. *Materials*, 2016, 9 (3): 139. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma9030139>.
- [21] MARCHI L, TRUTALLI D, SCOTTA R, *et al.* Macro-element modelling of a dissipative connection for CLT structures [J]. *Structures*, 2020, 26: 582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.044>.
- [22] LATOUR M, RIZZANO G. Cyclic behavior and modeling of a dissipative connector for cross-laminated timber panel buildings [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2015, 19 (1): 137. DOI: <https://doi.org/10.1080/13632469.2014.948645>.