

新型钢 - 木组合梁不同连接件力学性能研究

罗官东

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年6月23日; 录用日期: 2025年7月13日; 发布日期: 2025年7月25日

摘 要

钢木组合梁有着节能环保, 轻质高强的优点。为研究钢材和正交胶合木不同连接件对组合梁的破坏形态, 位移大小、变形能力和极限承载能力的不同影响程度, 本文采用ABAQUS软件对钢木组合梁进行模拟研究。研究结果表明: T型连接件和栓钉连接件相比, T型连接件的极限承载能力比栓钉连接件的极限承载能力提高了10%, T型连接件的变形能力强于栓钉连接件的变形能力。

关键词

钢木组合梁, 连接件, 极限承载能力, 变形能力

Study on Mechanical Properties of Different Connectors in Novel Steel-Wood Composite Beams

Guandong Luo

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: Jun. 23rd, 2025; accepted: Jul. 13th, 2025; published: Jul. 25th, 2025

Abstract

Steel-wood composite beams demonstrate advantages in energy efficiency, environmental friendliness, lightweight design, and high strength. To investigate the differential impacts of steel and cross-laminated timber connectors on displacement magnitude, deformation capacity, and ultimate bearing capacity of composite beams, this study conducted simulation research on steel-wood composite beams using ABAQUS software. The results indicate that compared with stud connectors, T-shaped connectors exhibit a 10% improvement in ultimate bearing capacity and demonstrate superior deformation capacity.

Keywords

Steel-Wood Composite Beams, Connectors, Ultimate Bearing Capacity, Deformation Capacity

Copyright © 2025 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,随着土木工程在国内外的快速发展,伴随着施工工艺和施工技术相应提升,以及顺应“二十大报告”中“推进美丽中国建设,坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理,统筹产业结构调整、污染治理、生态保护、应对气候变化,协同推进降碳、减污、扩绿、增长,推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展。”的绿色发展理念[1],进一步推进可持续建筑理念的发展,从而引入工字钢-正交胶合木组合梁的新型组合梁结构。正交胶合木(Cross-Laminated Timber, CLT)将钢材与正交胶合木相结合构成新型的组合梁,充分发挥了两种材料的力学优势性能,满足低碳环保可再生绿色发展的理念。

为了深入了解研究钢木组合梁的力学性质,大量学者对钢木组合梁进行了研究。基于有限元模拟研究,罗佳钰等[2]采用有限元程序 ANSYS 对钢-木组合梁和普通胶合木梁进行有限元分析,结果表明钢木组合梁受弯极限承载力提高 28%~85%,跨中极限变形提高 76%~146%,冷弯薄壁型钢-胶合木组合梁具有良好的抗弯性能。杨茹元等[3]利用有限元软件探索了钢-木组合(STC)梁在短期荷载作用下的承载性能表明剪力连接件的分布密度、连接的力学特性,能够影响 STC 梁整体的力学行为,连接件的间距越小,STC 的承载性能越高。

基于上述考虑和分析,进行深入探讨研究钢-正交胶合木组合梁的连接方式,本文依托于物理实验,在已有实验的基础上,基于 ABAQUS 有限元建模模拟计算,并通过实验数据进行验证,最后进行参数分析,进一步研究钢-正交胶合木的连接性质。

2. 试件设计与参数

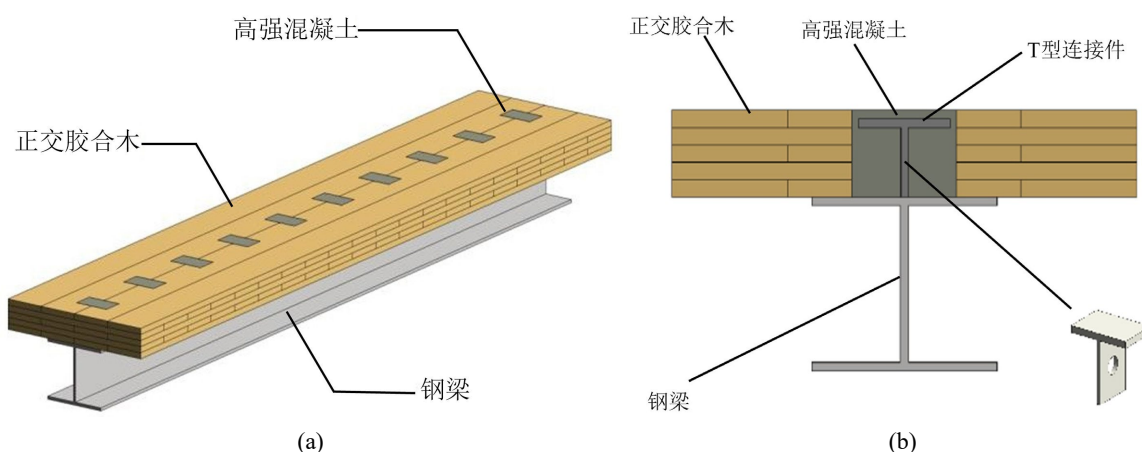


Figure 1. Connection configuration of composite beam

图 1. 组合梁连接形式

图 1(a)为 STC 梁的设计方案。试件由正交胶合木、H 型钢、高强混凝土和 T 型连接件 4 部分组成,

组合梁长度均为 3000 mm，两端支座距梁端距离为 100 mm，计算有效跨度为 2800 mm，采用四点加载方式，加载点间距为 1400 mm。木板材的厚度和宽度分别为 100 mm 和 600 mm，H 型钢尺寸为 249 × 175 × 7 × 9 (mm)。设置一组栓钉连接件双排布置，T 型连接件设置 5 组，其中两组进行 T 型连接件行开孔处理，参数如表 1 所示。

钢材与正交胶合木的连接方式如图 1(b)所示，钢梁和正交胶合木的接触面用环氧树脂粘接如图 2 所示。本实验共设置 5 根 T 型连接件组合梁试件和 1 根栓钉连接件组合梁，试件编号分别为 STC-1~STC-5 和 STC-S。

Table 1. Dimensional parameters of connectors
表 1. 连接件参数尺寸

连接件类型	上翼缘宽度(mm)	开孔大小(mm)	上翼缘厚度(mm)	腹板厚度(mm)	直径(mm)
栓钉	-	-	-	-	16
	75	-	-	-	-
	75	15	-	-	-
	75	10	8	5	-
	65	-	-	-	-
T 型件	75	-	-	-	-
	75	-	-	-	-

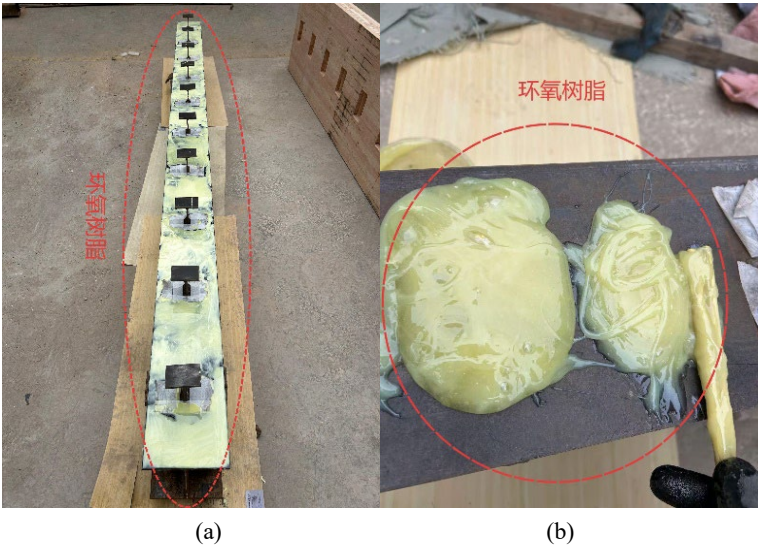


Figure 2. Epoxy resin bonding
图 2. 环氧树脂粘接

3. 有限元模拟

3.1. 单元类型选择

基于 ABAQUS 软件，对钢梁，木材 T 型连接件和混凝土进行建模，采用六面体八节点单元(C3D8R)进行缩减积分，沙漏控制，如图 3 所示[4]，当网格整体尺寸在 15 mm 以内时，结果相对稳定，因此木材和钢材钢材的网格尺寸选取 15 mm，考虑到混凝土和 T 型连接件尺寸较小，为了保证精确度以及混凝土与连接件的滑移问题混凝土网格尺寸选用 3 mm，栓钉和 T 型连接件网格尺寸选用 2 mm。

3.2. 材料的选择

正交胶合木属于各项异性材料，实测含水率在 9%~12%，有限元各项异性材料设置如表 2。

Table 2. Anisotropic finite element modeling parameters
表 2. 各项异性有限元建模参数

弹性模量参数/MPa								
E ₁	E ₂	E ₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃	ν ₁₂	ν ₁₃	ν ₂₃
10195	700.5	520.5	801	540	215	0.297	0.426	0.372
强度参数/MPa								
X _t	X _c	S ₁₂	Y _t	Y _c	S ₂₃	Z _t	Z _c	S ₁₃
77.645	41.29	8.1	4.06	6.05	3.89	3.15	6.96	8.21
硬/软化参数								
N ₁	N ₂	N ₃	C ₁	C ₂	C ₃	G ^f ₁	G ^f ₂	G ^f ₃
0.1	0.2	0.2	400	100	100	0.042	0.004	0.004

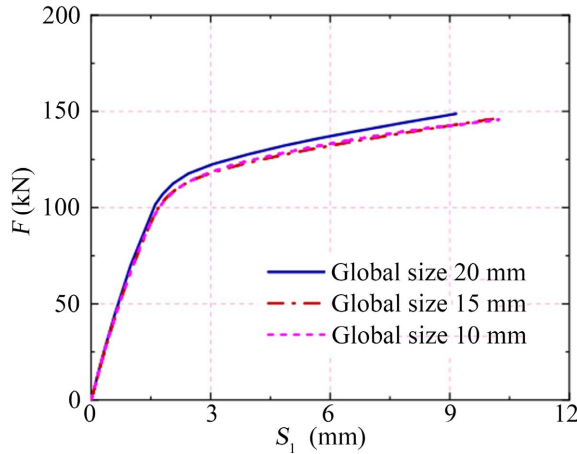


Figure 3. Sensitivity analysis of mesh size
图 3. 网络尺寸大小性分析

混凝土使用 C80 高强混凝土，材料属性采用塑性损伤模型，弹性阶段泊松比系数取 0.15，在混凝土塑性损伤阶段，膨胀角取 30°，偏心率为 0.1，双轴等压受压强度与单轴受压强度之比取值 1.16，拉压子午线上的第二应力不变量比值取 0.667，粘性系数为 0.001。

钢材和 T 型连接件选用 Q235 钢材，分析时均考虑为理性状态下的弹塑性材料，不再考虑钢材的强化阶段，屈服后应力保持不变，材料参数由厂家提供如表 3。

Table 3. Material parameters of steel
表 3. 钢材材料参数

弹性模量 E/Gpa	泊松比 ν	屈服强度 f _y /Mpa
200	0.25	235

3.3. 有限元参数设置

有限元模型中包括三个主要的接触对，分别为钢材与木材表面的接触，木材和混凝土的接触，钢材

和混凝土的接触，因为栓钉和 T 型连接件是焊接在 H 型钢上，默认栓钉和 T 型连接件和 H 型钢是刚接。定义接触属性时主要包括切向作用和法向作用两种，法向作用设置为硬接触允许分离，切向作用通过定义两种材料之间接触面的摩擦系数来定义模拟[5]。设置切向作用力没有超过临界切应力不会发生相对滑移，摩擦系数的取参考常用材料摩擦系数表，钢材和木材之间选取 0.35，钢材和混凝土之间取 0.45，混凝土和钢材之间取 0.2。

根据 STC 梁的尺寸图如图 4 所示，进行有限元建模如图 5。

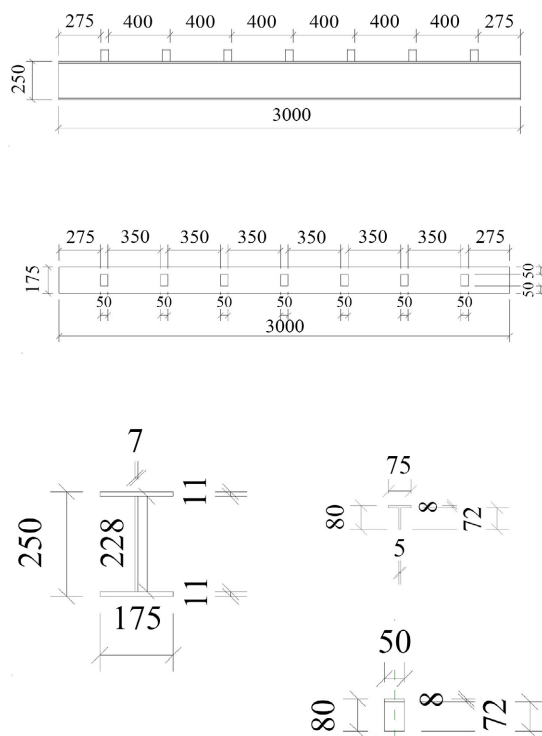


Figure 4. Dimensional drawing of STC
图 4. STC 尺寸图

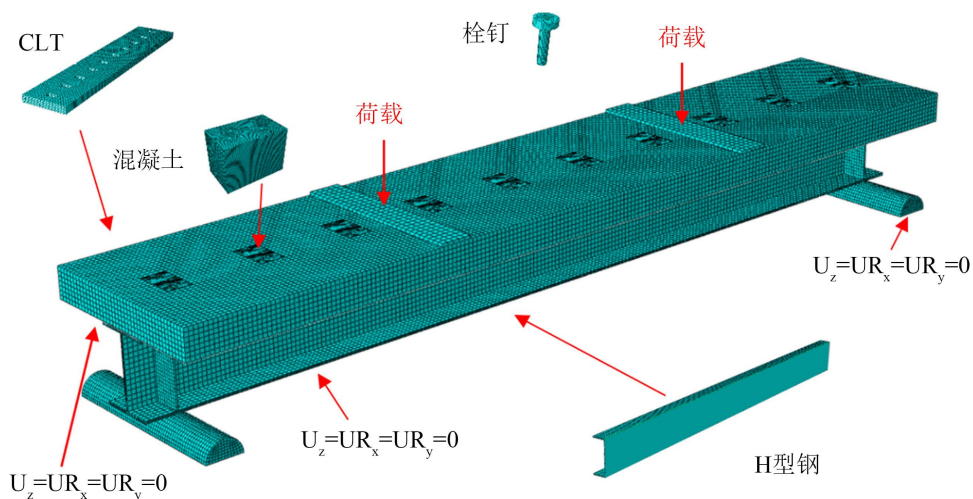


Figure 5. Finite element modeling
图 5. 有限元建模

对于 T 型梁构件的两端面采用端部固定约束, 限制节点在三个方向的位移, 转角和自由度, 模拟理想状态下的刚接, 荷载施加在距离梁端 800 mm 处, 对称布置进行四点弯实验模拟, 具体操作是: 在梁中建在点处设置垫块, 在其端面设置参考点, 并与端面进行耦合约束在一起, 给加载点施加荷载相当于给梁面施加荷载。

4. 试件破坏形式

对于 STC 梁的破坏形式, 通过实验验证和模拟结果得出, 试件加载后, 试件纯弯段部分木材底部纤维受拉撕裂出现较大的裂痕, 木材侧面层面出现小范围的脱胶现象, 端部混凝土出现明显开裂, 沿着梁长方向有贯穿裂缝, 钢梁出现起皮或者出现明显的受拉纹路, 钢梁挠度位移过大, 梁端 CLT 与钢梁连接处环氧树脂粘接出现脱胶状态且有明显滑移, 如图 6 所示。

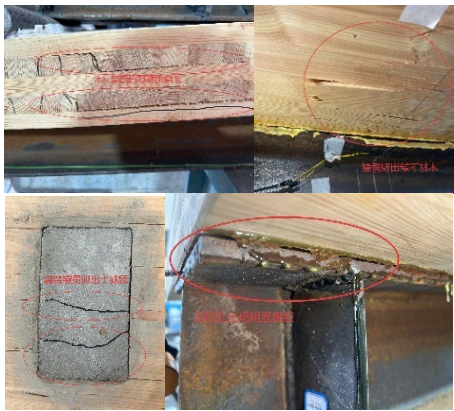


Figure 6. Failure modes of test specimen
图 6. 试件破坏形态

试件的主要力学性能组合后的位移刚度可定义[6]为:

$$k_d = \frac{F_{0.4} - F_{0.1}}{u_{0.4} - u_{0.1}} \quad (1)$$

式中 $F_{0.4}$ 和 $u_{0.4}$ 表示为极限荷载的 40%所对应的荷载和跨中位移, $F_{0.1}$ 和 $u_{0.1}$ 表示为极限荷载的 10%所对应的荷载和跨中位移。

5. 有限元结果模拟对比

Table 4. Error comparison of ultimate loads
表 4. 极限荷载误差对比

试件名称	极限承载力/KN		荷载相对误差/%
	实验	有限元	
STC-S	380.5	405.7	6.2
STC-1	417.6	434.2	3.8

为了验证有限元结果的可靠性, 取了两组将模拟的结果与实验结果进行对比如表 4、表 5 所示, 极限承载力与位移还是存在一定的误差。与实验对比来看极限荷载误差在允许的误差范围内, 极限位移存在的误差是由于试件存在工艺误差, 以及试件养护时存在天气温度的影响等等, 总体来说是在可以接受的

范围内。

Table 5. Error comparison of ultimate displacements

表 5. 极限位移误差对比

试件名称	极限位移/mm		荷载相对误差/%
	实验	有限元	
STC-S	52	60	13
STC-I	68	75	9.3

6. 结论

钢木组合梁的强度和位移的大小和连接的形式以及连接件布置距离有直接的关系。

(1) 选用双排栓钉布置当连接件时(其他条件不变)与 T 型连接件相比极限承载力 T 型连接相对较强。

(2) 选用 T 型连接件但布置间距改变时, 间距小的组合效应比较明显, 承载力略低于间距大的, 但间距大的试件出现提前脱胶显现组合效果不太明显。

(3) 选用 T 型连接 T 型连接件开孔的承载力比不开孔的承载力提高了 15%~25%说明开孔的 T 型件与混凝土之间存在销栓组合效应能明显提高 STC 梁的强度。

参考文献

- [1] 中国共产党中央委员会. 党的二十大报告[EB/OL]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm, 2022-10-25.
- [2] 罗佳钰, 李响, 邓瑞泽. 新型钢-木组合梁抗弯性能数值分析[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(2): 46-48.
- [3] 杨茹元, 万佳, 孙友富, 等. 钢-木组合梁抗弯性能的数值模拟及参数分析[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(1): 96-103.
- [4] Kyvelou, P., Gardner, L. and Nethercot, D.A. (2017) Design of Composite Cold-Formed Steel Flooring Systems. *Structures*, **12**, 242-252. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.09.006>
- [5] 张慎, 陈州, 李霆, 等. 基于 ABAQUS 的木材本构模型及试验验证[J]. 工程力学, 2025, 42(3): 77-89.
- [6] Zhao, Y., Yuan, Y., Wang, C.-L., et al. (2023) Experimental and Finite Element Analysis of Flexural Performance of Steel-Timber Composite Beams Connected by Hybrid-Anchored Screws. *Engineering Structures*, **292**, Article ID: 116503.