

# 新型T型连接钢 - 木组合梁抗剪力学性能研究

陈 栋

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年6月15日; 录用日期: 2025年7月6日; 发布日期: 2025年7月16日

## 摘 要

为研究钢 - 木组合梁连接位置在新型T型连接方式下的受力性能, 本文以环氧树脂胶黏结、T型连接、混凝土连接、T型大小和T型开孔为变量参数, 通过有限元软件Abaqus建立三维实体模型进行分析, 研究其对组合梁极限承载力、刚度和挠度变形的影响规律。通过推出试验与模拟及理论分析对其抗剪性能进行了研究, 包括连接的抗剪承载力、抗剪刚度及延性, 并验证了不同破坏模式下现有计算理论对T型连接件抗剪承载力计算的适用性。

## 关键词

钢 - 木组合梁, T型连接, 抗剪性能, 有限元分析

# Shear Behavior Study of a New T-Jointed Steel-Wood Composite Beam

Dong Chen

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: Jun. 15<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 6<sup>th</sup>, 2025; published: Jul. 16<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

To investigate the mechanical performance of the connection in steel-wood composite beams under a novel T-shaped connection method, this study takes epoxy resin adhesive bonding, T-shaped connections, concrete connections, T-shaped dimensions, and T-shaped perforations as variable parameters. Three-dimensional solid models are established using the finite element software Abaqus for analysis, examining their influence on the ultimate bearing capacity, stiffness, and deflection deformation of the composite beams. Push-out tests, simulations, and theoretical analyses are conducted to study the shear performance, including the shear bearing capacity, shear stiffness, and ductility of the connections. Additionally, the applicability of existing theoretical calculations for the shear bearing capacity of T-shaped connectors under different failure modes is validated.

## Keywords

### Steel-Timber Composite Beam, T-Connection, Shear Performance, Finite Element Analysis

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

建筑行业是资源消耗和温室气体排放的主要贡献者，对环境产生了重大影响。建筑过程涉及自然资源的开采和利用，而建筑和拆除废物(CDW)的产生进一步加重了环境负担。仅建筑行业就消耗了全球一半以上的原始资源，占全球能源消耗的三分之一以上，占全球二氧化碳排放量的 11%，并产生了全球近 50%的废物流[1]。2023 年，在欧盟(EU)，CDW 占废物总量的 36%，使其成为所有行业中的最大的废物流。

在此背景下，建筑行业迫切需要可持续的替代方案，以尽量减少其环境消耗。解决方案包括使用更可持续的材料，回收利用和实施循环利用原则。在结构解决方案中，钢-木复合(STC)梁结合了直立钢梁和地板系统的木板，成为传统钢-混凝土复合(SCC)系统的可持续替代方案。STC 梁中使用的工程木材产品具有固碳的潜力，减少了建筑物的整体碳足迹。此外，木材对预制和批量生产的适用性提供了缩短施工时间和减少温室气体排放的前景。

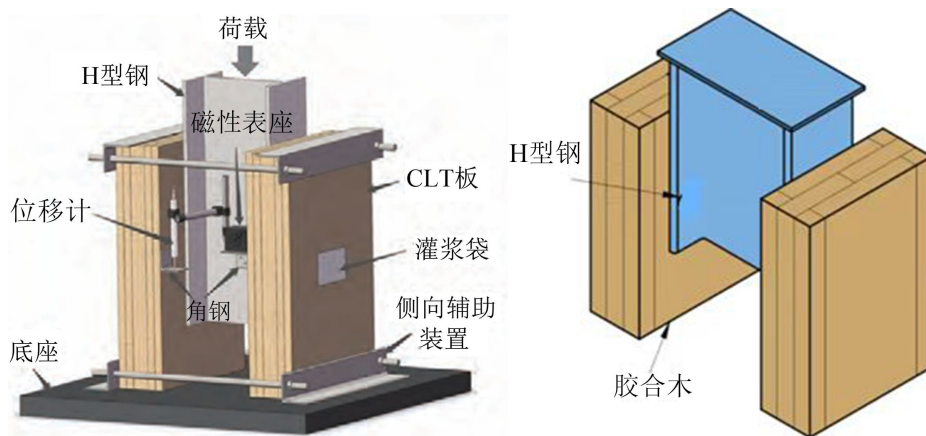


Figure 1. Structure diagram

图 1. 结构图

目前,STC 结构中常见的钢与木间的连接方式有销钉类连接(如螺钉、加强齿板与螺钉组合、销钉等)、螺栓连接、胶黏连接(环氧树脂胶合剂等)等,近年来国内外学者对上述连接的性能进行了一系列研究。例如:Yang 等对钢-木组合螺栓及自攻螺钉剪力连接件进行了试验与数值分析[2],研究结果表明螺栓直径、间距和木材厚度对界面受剪承载力有显著影响[3],自攻螺钉连接较螺栓连接有更高的剪切延性和剪切刚度,但加载后期剪切刚度退化较快[4]。Hassanieh 等提出了一种钢-木组合梁新型抗剪连接件——浆锚螺栓(bolts embedded in grout pockets, BGP) [5],由抗剪螺栓和灌浆体组成,并进行了推出试验。研究结果表明: BGP 连接的初始刚度,峰值前刚度和极限承载能力明显高出传统螺钉连接。虽然 BGP 连接相较于普

通螺栓连接大大降低了对螺栓安装精度的要求,但螺栓往往会由于孔径的容许误差值影响构件的初始滑移,导致构件初始刚度降低[6]。栓钉连接件已广泛应用于钢-混组合结构中,在钢-木组合梁中也有所研究。其后 Zhao 等[7]对 STC 灌浆螺钉连接进行双剪试验,通过试验发现有灌浆连接比无灌浆连接的 STC 螺钉节点的受剪承载力和初始剪切刚度大,且随着灌浆孔半径和深度的增加,二次剪切刚度和受剪承载力也相应提高。因此本研究以 T 型连接件替代栓钉,将浆锚 T 型件(Grouted T-shaped Connector, GTC)连接引入钢-木组合梁(图 1)。不仅避免了对钢梁进行预钻孔,减少施工难度,而且能获得比 BGP 连接更佳的抗剪性能。本文基于 Abaqus 分析 T 型连接件大小、开孔直径大小、栓钉连接方式对 GTC 连接钢-木组合梁力学性能的影响。

## 2. 有限元模型

### 2.1. 本构关系与材料属性

#### 2.1.1. 正交胶合木(CLT)

木材三个方向的弹性模量  $E_{11}$ 、 $E_{22}$  及  $E_{33}$  分别为 11000、370 及 370 MPa;泊松比  $V_{12}$ 、 $V_{13}$  及  $V_{23}$  分别为 0.48、0.48 和 0.22;剪切模量  $G_{12}$ 、 $G_{13}$  和  $G_{23}$  分别为 690、690 和 50 MPa。考虑 CLT 分层交错布置,建模时采用分层建立,材料方向通过其顺纹方向分层指派,同时忽略层板之间胶合层。

#### 2.1.2. H 型钢

钢材:采用三折线模型进行模拟(图 2),钢梁和 T 型连接件均为 Q235 材质,弹性模量 206 GPa,屈服强度和极限强度为 235 和 370 MPa。

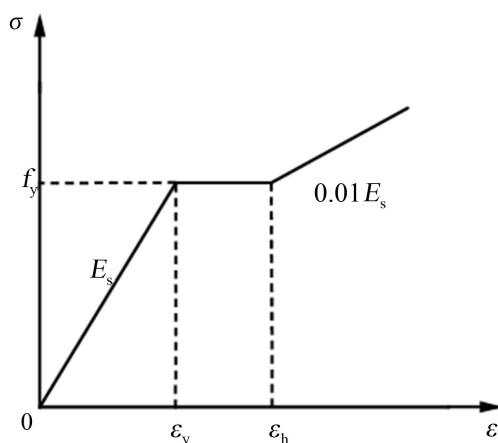


Figure 2. Trilinear constitutive model of steel

图 2. 钢材三折线本构模型

#### 2.1.3. 混凝土

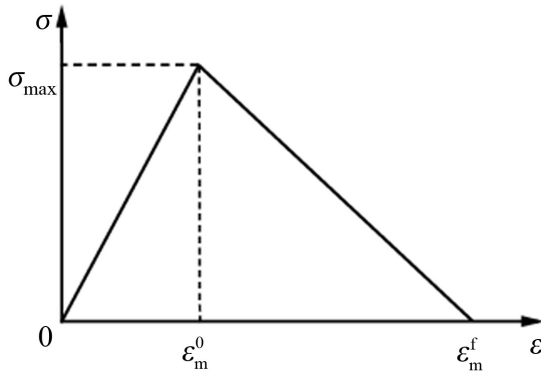
灌浆体:采用混凝土损伤塑性模型模拟,弹性模量为 38000 MPa,抗压强度为 80 MPa,泊松比取 0.2,膨胀角取  $30^\circ$ ,偏心率取 0.1。

#### 2.1.4. 结构胶材料

本文采用有限元软件 Abaqus 进行建模。加载过程中,结构胶界面会发生相对滑移,故采用内聚力本构模型(如图 3 所示)模拟钢材和木材界面间的胶层,并使用 cohesive 单元接触的方法模拟钢材和木材胶层部分界面滑移作用。结构胶具体材料参数见表 1。

**Table 1.** Structural adhesive material parameters  
**表 1.** 结构胶材料参数

| $E_s/\text{MPa}$           | $G_1/\text{MPa}$                    | $G_2/\text{MPa}$ | $\sigma_n^{\max}/\text{MPa}$        | $\tau_s^{\max}/\text{MPa}$          |
|----------------------------|-------------------------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1500                       | 1500                                | 1500             | 13.6                                | 13.7                                |
| $\tau_t^{\max}/\text{MPa}$ | $G_N/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-2})$ |                  | $G_S/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-2})$ | $G_T/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-2})$ |
| 13.7                       | 0.32                                |                  | 0.41                                | 0.41                                |



**Figure 3.** Cohesive zone model of structural adhesive  
**图 3.** 结构胶内聚力本构模型

**2.1.5. 组合梁参数**

以 T 型连接件上翼缘尺寸、T 型连接件是否开孔、T 型连接件开孔大小作为变量参数，并以直径为 16 mm 的栓钉连接件(GCS)作为对照组进行模拟，见表 2。

**2.1.6. 单元选择和网格划分**

本文采用 Abaqus 按照试件实际尺寸建立了 GSC 连接件的全模型。模型中所有构件均采用 SOLID 三维实体单元，主要包括① 钢垫块、② 钢梁、③ CLT 板、④ 栓钉连接件与⑤ 灌浆袋，如图 4 所示。由于六面体八节点线性减缩积分三维实体单元(C3D8R)适用于接触、破坏等非线性有限元分析，故采用 C3D8R 单元以定义钢梁、CLT 板、灌浆袋与栓钉等部件。为了平衡计算精度和计算时间，网格只在部分区域进行局部细化，如灌浆袋与栓钉连接件、栓钉连接件与钢梁接触面处。此外，在有限元模型中栓钉连接件的网格尺寸设置为 = 2.5 mm 左右。有限元模型中各构件的网格划分如图 5 所示。

**Table 2.** Connector parameter dimensions  
**表 2.** 连接件参数尺寸

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

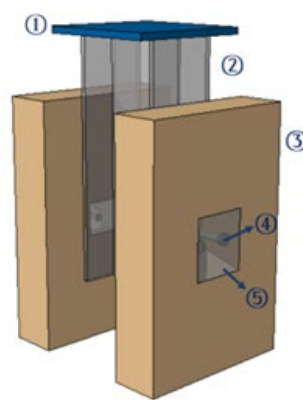


Figure 4. Finite element model of GSC connector  
图 4. GSC 连接件有限元模型

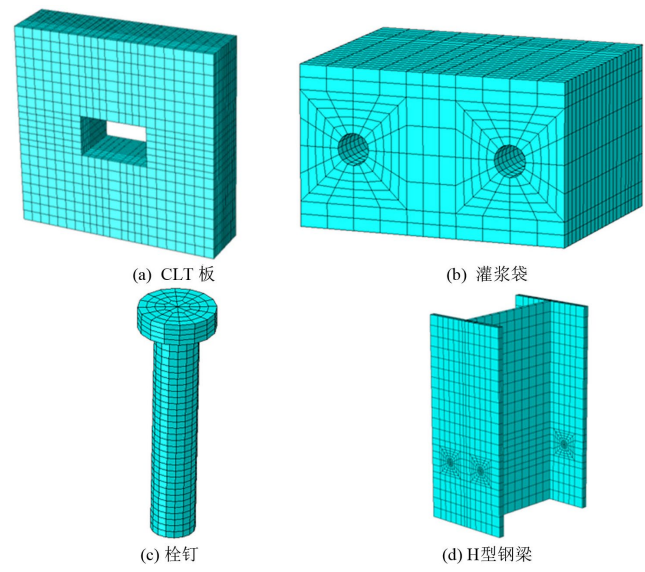


Figure 5. Mesh generation of GSC connector FEM model  
图 5. GSC 连接件有限元模型网格划分

3. 结果与分析

屈服承载力  $F_y$  及与其对应的屈服滑移  $v_y$  由规范 BS EN 12512:2001 提供的计算方法确定，屈服点定义为初始刚度斜线与曲线相切的 1/6 初始刚度斜线的交点，如图 6 所示。试件的荷载滑移曲线如图 7 和图 8 所示。其中，纵坐标为总荷载，横坐标为 4 个位移计所测得相对滑移的平均值。图 7 为 GSC 连接件荷载 - 滑移关系曲线。

由图可见，总体上，GSC 连接试件的荷载 - 滑移曲线表现出类似的力学行为特征，主要经历了弹性段、非弹性段及下降段。加载初期，荷载 - 滑移曲线呈线性增长；随荷载持续增加，钢梁与 CLT 板之间产生相对滑移，且荷载 - 滑移关系曲线表现出了明显的非线性行为直至峰值荷载，随后进入下降阶段，GSC 连接件荷载逐步降低直至试件破坏(下降至峰值荷载的 80%或位移超过 15 mm)。由图 8 可见，T 型连接试件的荷载 - 滑移关系曲线则表现出不同于 GSC 连接件，其曲线无明显弹性段及下降段。加载初期，曲线呈线性增长。随后，荷载增长缓慢，滑移增速明显大于荷载增速，曲线表现出明显的非线性行为。在达到峰值荷载后，由于 T 型剪断，荷载 - 滑移曲线出现骤降。

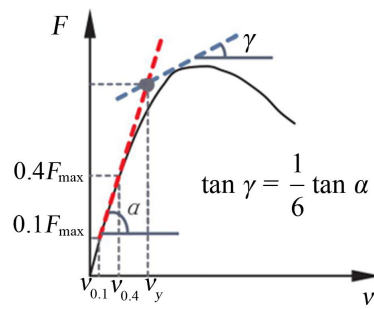


Figure 6. Yield determination method

图 6. 屈服确定方式

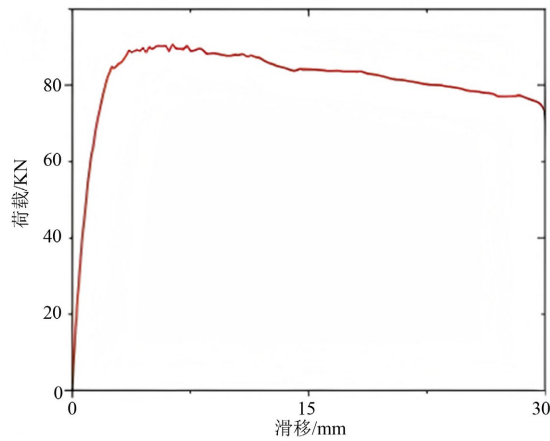


Figure 7. Load-slip curve of GSC connector

图 7. GSC 连接件荷载 - 滑移

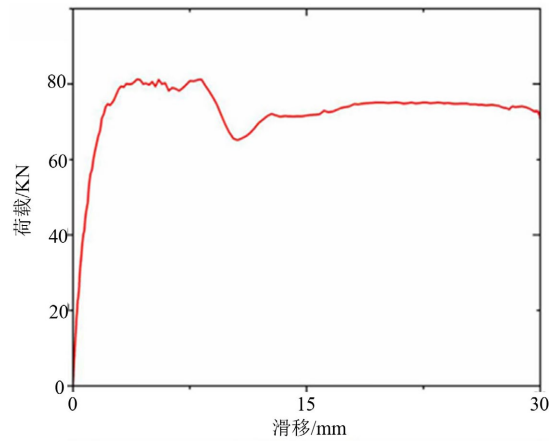


Figure 8. Load-slip curve of T-shaped connection specimen

图 8. T 型连接试件的荷载 - 滑移

#### 4. 结论

(1) 选用 GSC 连接试件的极限承载力和极限滑移与 T 型连接试件相比, T 型连接试件比 GSC 连接试件相对较强。

(2) T 型连接试件开孔的承载力比不开孔的承载力提高了 10%~15%, 滑移减少了 5%~7%, 说明开孔

的 T 型连接试件能提高 STC 梁的强度。

## 参考文献

- [1] REN21 Secretariat (2020) 2020 Global Status Report for Buildings and Construction Towards Zero-Emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector.
- [2] Yang, R., Li, H., Lorenzo, R., Ashraf, M., Sun, Y. and Yuan, Q. (2020) Mechanical Behaviour of Steel Timber Composite Shear Connections. *Construction and Building Materials*, **258**, Article ID: 119605.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119605>
- [3] 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(2): 46-48.
- [4] 姚雪峰. 钢木组合梁抗弯力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [5] 张海燕. 冷弯薄壁型钢-木塑组合梁抗弯性能研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
- [6] Hassanieh, A., Valipour, H.R. and Bradford, M.A. (2016) Load-slip Behaviour of Steel-Cross Laminated Timber (CLT) Composite Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, **122**, 110-121.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.008>
- [7] Zhao, Y., Yuan, Y., Wang, C., Zheng, J. and Zhou, Y. (2022) Experimental Study on Shear Performance of Steel-Timber Screw Connectors with Grout Pockets. *Engineering Structures*, **266**, Article ID: 114535.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114535>