

# 螺栓加固钢-竹箱型组合梁有限元分析

靳紫成

西南林业大学

DOI : 10.12238/jpm.v5i7.7032

**[摘要]** 为研究钢-竹箱型组合梁翼缘位置在不同连接方式下的受力性能,本文以结构胶黏结、螺栓连接、结构胶加螺栓连接、螺栓间距为变量参数,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。结果表明:钢-竹箱型组合梁的破坏模式主要包括翼缘端部位置脱胶导致的翘起、螺栓受剪变形、钢材的屈曲和腹板位置竹板的劈裂;结构胶加螺栓的连接方式可以有效提高组合梁屈服承载力;适当减小螺栓间距可以提升试件整体承载力和延性,使组合梁充分发挥翼缘位置的受力性能。

**[关键词]** 组合结构;重组竹;冷弯薄壁型钢;有限元;抗弯性能

## Finite element analysis of bolt-reinforced steel-bamboo box-type combination beams

Jin Zicheng

Southwest Forestry University

**[Abstract]** In order to study the force performance of steel-bamboo box-type combined beam flange position under different connection methods, this paper takes structural adhesive bonding, bolted connection, structural adhesive plus bolted connection, and bolt spacing as variable parameters, and establishes a three-dimensional solid model for analysis through the finite element software ABAQUS to study the influence law on the ultimate load carrying capacity, stiffness, and deflection deformation of the combined beam. The results show that: the damage modes of steel-bamboo box-type combined beams mainly include buckling caused by debonding at the end of the flange, shear deformation of the bolts, buckling of the steel, and splitting of the bamboo plate at the web position; the structural adhesive plus bolts connection can effectively improve the yield capacity of the combined beams; and the appropriate reduction of the bolt spacing can enhance the overall load carrying capacity and ductility, so as to make the combined beams give full play to the stress performance at the flange position.

**[Key words]** Combined structure; Reorganized bamboo; Cold-formed thin-walled steel section; Finite element; Flexural performance

### 引言

建筑行业在世界能源消耗中占三大重要行业之一,每年直接或间接产生的碳排放将近 50%,因此减少建筑行业碳排放量,发展绿色建筑迫在眉睫。竹材具有生长周期短,保温性能好,力学性能优异,外形美观等优点<sup>[1]</sup>。我国钢材产业位居世界第一,钢材储备充足。冷弯薄壁型钢具有施工便捷,抗震性能好,节能环保等优点,属于高效经济型材料<sup>[2]</sup>。

近些年有学者提出将两种材料组合使用。李玉顺等人对钢-竹组合楼板、组合柱、组合梁、组合墙体等结构进行研究,研究表明钢-竹组合结构两种材料能够良好的协同工作且具有优异的力学性能<sup>[3]</sup>。姜章迪等人对钢-竹组合箱形梁抗剪性能进行研究,研究表明剪跨比、腹板部分对组合梁的抗剪性能影响较大,并以此为参数利用 ABAQUS 进行有限元模拟<sup>[4]</sup>。陈智强等人采用一种新型结构胶与螺栓混合连接的型钢-胶合木组合

梁，并利用 ABAQUS 进行有限元模拟，研究表明跨中设置加劲肋和在翼缘连接处布置螺栓并减小螺栓间距可以有效增强组合梁极限承载能力和改善变形程度<sup>[5]</sup>。

本文以钢-竹箱型组合梁为研究对象，利用螺栓对组合梁翼缘位置进行加固，并以螺栓间距、连接方式等作为研究参数，采用有限元软件 ABAQUS 进行模拟分析，研究其对组合梁极限承载力、破坏模式、挠度变形等力学性能的影响，钢-木箱型组合梁连接方式如图 1 所示。

### 1 有限元模型

#### 1.1 本构关系与材料属性

##### 1.1.1 重组竹

重组竹是将竹丝通过高温高压热固化形成的一种竹质新

表 1 重组竹弹性参数

$E_1/\text{MPa}$	$E_2/\text{MPa}$	$E_3/\text{MPa}$	$G_{12}/\text{MPa}$	$G_{13}/\text{MPa}$	$G_{23}/\text{MPa}$	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$
5807	659	659	1150	1130	300	0.245	0.245	0.13

注：下标数字 1、2、3 分别表示重组竹的 x、y、z 轴方向；E 为弹性模量； $\nu$  为泊松比；G 为切变模量。

##### 1.1.2 冷弯薄壁型钢和螺钉

钢材采用 Q235 冷弯薄壁型钢，螺栓采用 4.8 级普通螺栓，两者皆为各向同性材料，采用如图 2 所示三折线模型。冷弯薄壁型钢和螺栓力学参数见表 2。

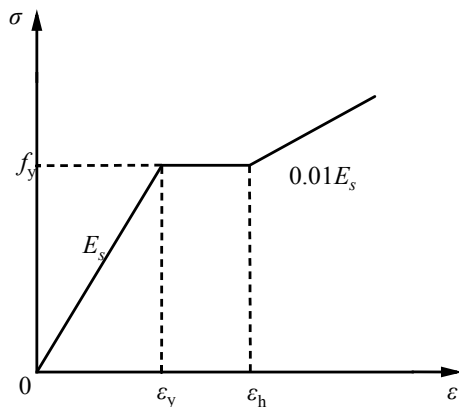


图 2 钢材三折线本构模型

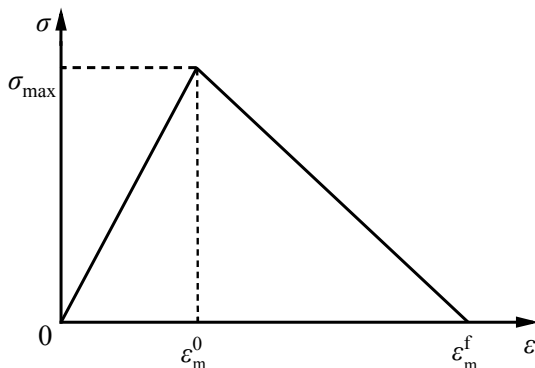


图 3 结构胶内聚力本构模型

材料，可将其近似视为横观各向同性材料。重组竹的主要力学性能指标测试结果见表 1。

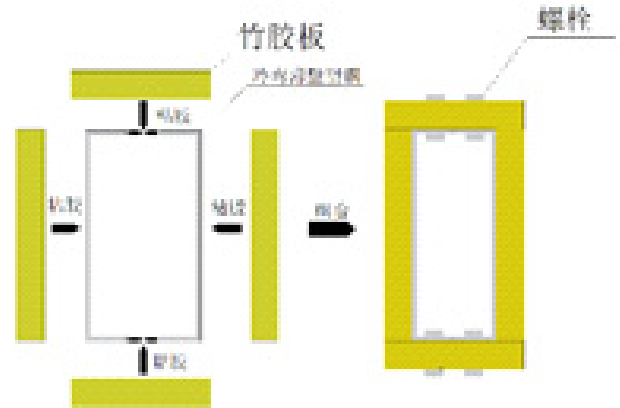


图 1 组合梁连接方式

$\sigma_{\max}$ —最大牵引力； $\epsilon_m^0$ —损伤开始时的位移； $\epsilon$ —牵引力为 0 时的位移。

表 2 冷弯薄壁型钢和螺栓力学参数

$\sigma_s/\text{MPa}$	$\sigma_L/\text{MPa}$	$E/\text{MPa}$	$\nu$
285.00	320.00	$2.05 \times 10^5$	0.31

注： $\sigma_s$  为冷弯薄壁型钢的屈服强度； $\sigma_L$  为螺栓的屈服强度；E 为弹性模量； $\nu$  为泊松比。

##### 1.1.3 有限元模型

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）模拟钢材和竹材界面间的胶层，并使用 cohesive 单元接触的方法模拟钢材和竹材胶层部分界面滑移作用。结构胶具体材料参数见表 3。

表 3 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	

注： $G_N$ 、 $G_s$ 、 $G_T$  分别为材料在法向和 2 个切向的能量释放率； $\sigma_n^{\max}$ 、 $\tau_s^{\max}$ 、 $\tau_t^{\max}$  分别为 cohesive 单元法向和 2 个切向对应的最大临界应力。

## 2 组合梁参数分析

### 2.1 螺栓间距

以螺栓布置间距作为变量参数进行模拟，共有三组，螺栓间距分别为 270mm、320mm、400mm。以其中一根标准试件为例，通过有限元后处理提取的组合梁跨中荷载-挠度曲线如图 4 所示。结果显示，三种螺栓间距试件的跨中荷载-挠度曲线在前期均为线性，属于弹性阶段，此阶段三种试件曲线几乎重合，

说明螺栓数量在加载前期弹性阶段对试件的影响有限, 抗弯刚度提升效果不大, 三条曲线进入非线性阶段时的屈服荷载值相对接近, 最大值与最小值相差 4.4MPa; 螺栓间距为 400mm 的试件承载力相对明显下降, 说明螺栓间距过大会导致翼缘重组竹板材在整体受力上发挥作用较小, 因此, 适当增加螺栓数量可以有效提高试件极限屈服承载力, 但是增加过多的螺栓对试件极限屈服承载力的影响并不太大; 进入屈服阶段后, 螺栓间距为 270mm 的试件明显变形能力更好, 整体结构承载能力发挥更充分。因此, 布置适当的螺栓可以使试件整体受力性能更好, 经济效益达到最大化, 性价比更高。

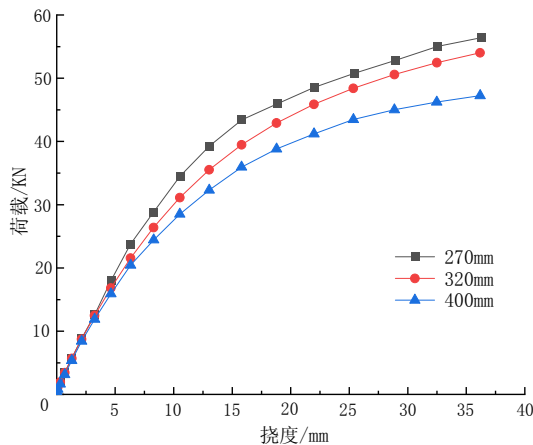


图4 不同螺栓间距组合梁荷载-挠度曲线

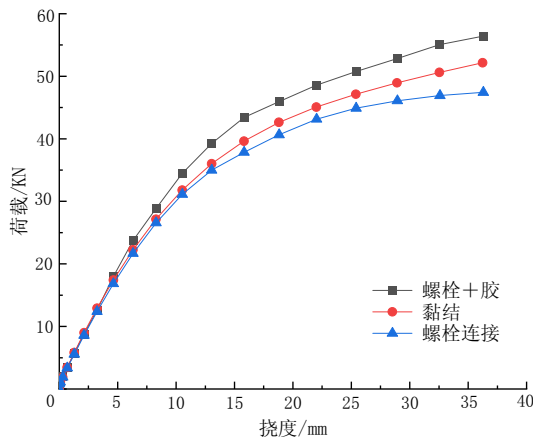


图5 翼缘位置不同连接方式荷载-挠度曲线

## 2.2 翼缘位置不同连接方式

以某一试件为例, 改变其翼缘位置连接方式, 分别对结构胶黏结、螺栓连接和结构胶加螺栓连接三种方式进行模拟分析, 其余参数不变, 提取组合梁不同连接方式的荷载-位移曲线进行对比 (如图 5 所示)。结果表明: 结构胶加螺栓连接比纯螺栓连接屈服荷载提升 12%, 比结构胶黏结屈服强度提升 8%, 且结构胶黏结方式效果要优于螺栓连接的效果。进入屈服阶段, 组合连接的试件承载力和延性提升较大 (组合梁整体应力如图 6 所示)。在模拟过程中发现螺栓主要以抗剪为主 (螺栓应力如图 7 所示), 本文试件以抗弯为主要作用, 组合连接仍可以有效改善试件的整体受力性能, 提高试件的整体承载力。

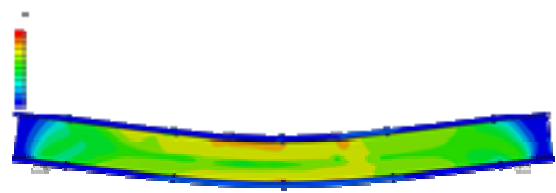


图6 组合梁应力云图

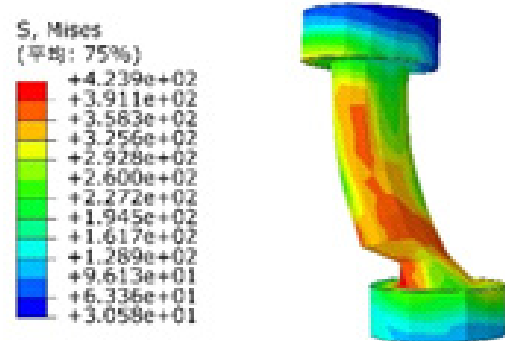


图7 螺栓应力云图

## 3 结论

1) 试件在受弯为主的四点加载方式下, 其破坏特征包括翼缘端部位置脱胶导致的翘起、螺栓受剪变形、试件钢材的屈服和竹板的劈裂, 为后续类似试验改进提供了参考。

2) 适当减小螺栓间距, 可以使增幅效果最好, 经济型达到最佳。结构胶加螺栓组合连接可以有效提高试件整体受力性能和极限承载力。

## 参考文献:

[1]郭格理.竹材在绿色建筑中的应用[J].江苏建材, 2023, (06): 53-54.

[2]胡志明.装配式冷弯薄壁型钢结构的应用研究[J].建材发展导向, 2023, 21(24): 27-29.DOI: 10.16673/j.cnki.jcfdzdx.2023.0304.

[3]李玉顺, 张家亮.钢-竹组合构件及其结构体系研究进展[J].工业建筑, 2016, 46(01): 1-6+19.DOI: 10.13204/j.gyjz201601001.

[4]娄章迪, 童科挺, 吕博, 等.钢-竹组合箱形梁抗剪性能有限元分析[J].森林工程, 2023, 39(04): 170-179.

[5]陈智强, 廖文远, 戴必辉, 等.结构胶与螺栓混合连接的型钢-胶合木组合梁受力性能研究[J].中国科技论文, 2024, 19(03): 313-322.

作者简介: 靳紫成 (1999.3.2), 男, 汉族, 河南安阳人, 西南林业大学土木工程学院, 22 级在读研究生, 硕士学位, 专业: 土木水利, 研究方向: 钢-竹组合结构。