

文章编号:1673-2049(2019)06-0026-09

# 小跨高比胶合木梁受弯性能及增强试验

陈伯望<sup>1</sup>, 刘陈诚<sup>1</sup>, 刘建文<sup>2</sup>, 万亚妮<sup>2</sup>, 吕炜磊<sup>1</sup>, 刘玉琪<sup>1</sup>

(1. 中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 湖南省建筑设计院有限公司, 湖南 长沙 410012)

**摘要:**为研究工程用胶合木梁的受力性能,对分别采用未增强及在底部粘贴钢板、在底部弯剪区拧入螺钉、在两侧中部粘贴钢板增强方式的4组共计9根跨高比为12的胶合木梁进行受弯承载力试验。通过试验得到各试件破坏形态、荷载-位移曲线,分析了增强后木梁的力学性能和跨中应变分布规律。提出了木梁在三分点受弯试验时发生受拉和受剪破坏的界限跨高比;在验证了受弯木梁的截面应变分布基本符合平截面假定后,提出了小跨高比胶合木梁及增强构件在三分点受弯试验时发生顺纹剪切破坏的极限承载力计算公式。结果表明:小跨高比胶合木梁的破坏形式为顺纹剪切破坏,破坏时无征兆,破坏面基本发生在木梁的中性轴及偏下位置;底部粘钢梁在受弯时受压区面积增大,中性轴下移,极限承载力和刚度都有所提高;梁底拧入螺钉和侧面贴钢板能很好地提高梁的抗剪能力和极限承载能力;所提出的承载力计算公式的计算值和实测值相对误差大都在20%以下,且计算值相比实测值偏于安全,可为此类构件的设计和工程应用提供参考。

**关键词:**小跨高比胶合木梁;顺纹剪切破坏;螺钉;钢板;极限承载力

**中图分类号:**TU366.3

**文献标志码:**A

## Experiment on Flexural Behavior and Strengthening of Glued Timber Beams with Small Span to Height Ratio

CHEN Bo-wang<sup>1</sup>, LIU Chen-cheng<sup>1</sup>, LIU Jian-wen<sup>2</sup>, WAN Ya-ni<sup>2</sup>, LYU Wei-lei<sup>1</sup>, LIU Yu-qi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. Hunan Architectural Design Institute Limited Company, Changsha 410012, Hunan, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical performance of the glued wood beam used in engineering, the flexural bearing capacity tests on 9 wood beams with the span to height ratio of 12 in 4 groups were carried by means of unreinforced, pasting steel at the bottom, screwing screws in the bottom bending shear area and pasting steel plates in the middle of both sides. The failure forms, load-displacement curves and other properties of the specimens were obtained through tests, and the mechanical properties and the distribution law of mid-span strain of the strengthened wood beam were analyzed. The limit span to height ratio of wood beam subjected to tensile and shear failure in three-point bending test was proposed. In the validation of cross section of bending beam strain distribution basic according with plane section assumption, the formula for calculating ultimate bearing capacity of glued timber beams with small span to height ratio and enhance member when shear failure along grain in the three-point bending test was proposed. The results show that the failure mode of the small span to height ratio glued wood beam is shear failure along the grain, and there is no sign of failure, and the failure surface

收稿日期:2019-01-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51578554);现代木结构工程材制造及应用技术湖南省工程实验室资助项目(20151084)

作者简介:陈伯望(1965-),男,湖南常德人,教授,工学博士,E-mail:tmcbw@163.com。

basically occurs in the natural axis and the lower location of the wooden beam. The area of compression zone of bottom bonded steel beam increases, the neutral axis moves down, and the ultimate bearing capacity and stiffness both increase. The shear resistance and ultimate bearing capacity of the beam can be improved by screwing screws into the bottom of the beam and attaching steel plates to the side. The results show that the errors between the theoretical values and the measured values are mostly below 20%, and the theoretical values are safer than the measured values, which can provide reference for the design and engineering application of such components.

**Key words:** glued timber beam with small span to high ratio; shear failure along grain; screw; steel plate; ultimate bearing capacity

## 0 引言

木结构建筑节能环保,符合可持续发展的理念。目前全球各国都在倡导低碳生活,木结构建筑的优越性逐渐体现。胶合木梁作为木结构建筑中重要的构件之一,得到国内外学者的广泛研究<sup>[1-6]</sup>,但长期以来,试验研究所采用的胶合木梁大多杆件细长,其承载力低,受弯时挠度大,不能很好地满足实际工程需求。

传统的胶合木梁受弯试验是根据《木结构试验方法标准》(GB/T 50329—2012)<sup>[7]</sup>的要求,采用跨高比 $\lambda \geq 18$ 的胶合木梁,受弯时大多发生梁底木材拉断而破坏。为增强其受弯性能,杨会峰等<sup>[8]</sup>对 FRP 板增强杨木胶合木梁的受弯性能做了详细的研究,试验通过改变 FRP 板的粘贴位置和粘贴层数,类比得出在少筋梁、适筋梁和超筋梁的情况下梁的受力特性和破坏形式,研究表明,增强后的杨木胶合木梁的受弯承载力、刚度和延性都得到了提升。杨昕卉等<sup>[9]</sup>对钢板增强樟子松胶合木梁受弯性能进行研究,分析了钢板厚度、是否设置螺钉对梁破坏形态、承载力和变形能力的影响。研究表明:与普通胶合木梁相比,粘贴钢板增强后,承载力显著提高,随着钢板厚度的增加,承载力先增后减;粘贴同厚度钢板并设置螺钉后,螺钉的增强效果在钢板较厚时表现明显。

当胶合木梁的跨高比小于《木结构试验方法标准》的取值时,学者们对木梁进行了抗剪性能研究<sup>[10-12]</sup>,Svecova 等<sup>[13]</sup>采用沿木梁长度方向在梁截面中心插入 GFRP 销钉的方法对其进行了抗剪加固试验研究。许清风<sup>[14]</sup>在木梁弯剪区粘贴 CFRP 布来进行抗剪加固试验研究。结果表明,在弯剪区粘贴 CFRP 布加固木梁的承载力平均提高 28.4%,破坏位移平均提高 32.8%。

本文研究的胶合木梁是实际工程中的构件,跨高比为 12,通过对 9 根小跨高比胶合木梁的受弯试验,研究采用钢板和螺钉的方式增强后木梁的破坏形态、承载力和变形情况,探索木梁在三分点受弯试验时发生受拉和受剪破坏的界限跨高比,并提出此类构件受弯时极限承载力计算公式。

## 1 试验研究

### 1.1 试件设计

本试验所用的木材是东北落叶松,其力学性质见表 1。试件尺寸为 4 000 mm $\times$ 100 mm $\times$ 300 mm,单层板厚度为 30 mm,为避免出现缺陷处破坏,将强度相对较高、缺陷较少的层板放置在受拉和受压侧,强度低、缺陷较多的放在中间层。钢板为 Q235 级,长 4 m,宽 100 mm,厚 2 mm。粘贴钢板选用固特邦改性环氧胶黏剂(A,B 双组)。螺钉采用外 4.8 级六角木螺钉,直径为 8 mm,螺杆长 200 mm。试件分为 4 组,其中 ML 组为对比木梁,包括 3 根试件;ZGL 组为底部粘贴钢板梁,包括 3 根试件,其中钢板与梁底等宽,胶层厚度为 2 mm;LDL 组为螺钉梁,在梁底弯剪区拧入螺钉,间距为 200 mm;TGL 组为胶合木梁两侧中间贴钢板,钢板宽 100 mm,与梁等长,包括 2 根试件。各试件参数见表 2,加固方案见图 1。

### 1.2 加载方案和量测方案

试件采用三分点弯曲加载法,荷载  $P$  通过分配梁传递。正式加载前,先对试件进行预加载,以消除加载装置、百分表和试件之间的间隙。跨中梁表面的木纤维应变和钢板应变数据由 TST3826 静态应变测试仪采集。正式加载时采用匀速单调加载,每级加载 4 kN,持荷 3~5 min。为了得到梁的抗弯性能,在梁跨中位置沿梁高度均匀对称粘贴 5 个 100 mm $\times$ 3 mm 的应变片;为了得到梁的变形情况,在

表 1 木材物理力学性能

Tab. 1 Physical and Mechanical Properties of Wood

树种名称	密度/(10 <sup>2</sup> kg·m <sup>-3</sup> )	顺纹抗压强度/MPa	顺纹抗拉强度/MPa	顺纹抗剪强度/MPa	抗弯强度/MPa	顺纹抗拉弹性模量/MPa
东北落叶松	6.41	57.6	129.9	6.8	113.3	16 900

表 2 试件设计方案

Tab. 2 Design Scheme of Specimens

试件编号	加固方式	剪跨比	跨高比	截面尺寸	计算跨度/mm
ML1	未加固	4	12	100 mm×300 mm	3 600
ML2	未加固	4	12	100 mm×300 mm	3 600
ML3	未加固	4	12	100 mm×300 mm	3 600
ZGL1	底部贴钢板	4	12	100 mm×300 mm	3 600
ZGL2	底部贴钢板	4	12	100 mm×300 mm	3 600
ZGL3	底部贴钢板	4	12	100 mm×300 mm	3 600
LDL1	弯剪段加螺钉	4	12	100 mm×300 mm	3 600
TGL1	侧面贴钢板	4	12	100 mm×300 mm	3 600
TGL2	侧面贴钢板	4	12	100 mm×300 mm	3 600

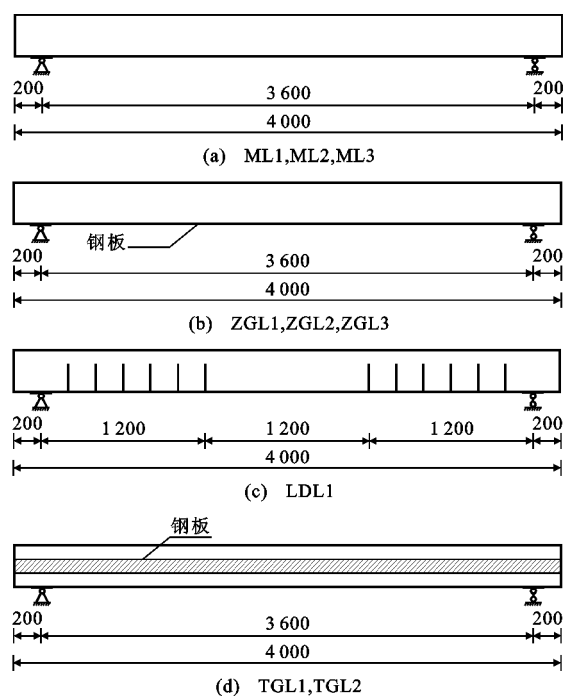


图 1 木梁加固方案(单位:mm)

Fig. 1 Schemes for Reinforcing Timber Beams (Unit:mm)

试件跨中位置处布置 1 个百分表。试验装置及测点布置见图 2。

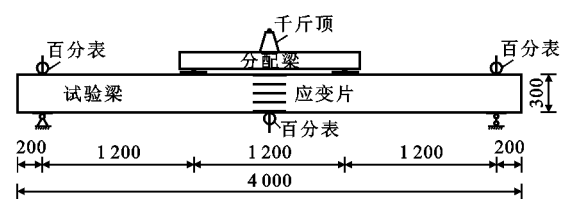


图 2 试验加载装置(单位:mm)

Fig. 2 Test Loading Device (Unit:mm)

2 试验结果分析

2.1 试验现象

图 3 为试件的破坏形态与特征。由图 3 可知：未增强对比试件在加载过程中出现木节开裂并伴随着轻微响声，随着荷载的逐渐增大，在支座处和加载点附近梁体侧面出现几条细微的纵向裂纹；继续加载，梁体内部出现的响声越来越大，当继续加载到极限荷载时，梁体突然一声巨响，层板破坏，出现 1 条顺纹纵向裂缝，分为上下 2 个梁体，上下梁体相互错开 1~2 cm，属于顺纹剪切破坏。

梁底粘钢梁在加载过程中随着荷载增加，在梁体两侧出现多条纵向裂纹，破坏时无显著预兆，属于顺纹剪切破坏；ZGL3 由于受拉边缘层板有明显木节，加载到 80 kN 时，木节处受拉破坏，随着荷载增加，裂缝迅速发展，属于梁底受拉破坏。

梁底弯剪区拧入螺钉，梁在加载过程中的试验现象与对比梁相似，也属于顺纹剪切破坏，出现 1 条顺纹纵向裂缝，裂缝长度大约为梁长的 3/4，梁体一端上下错开约 1 cm。

TGL1 荷载达到 80 kN 时，梁左端支座处第 2 层层板出现横向裂缝，继续加载，木梁不断发出响声，加载到 120 kN 时，一声巨响，从梁底木节处开裂破坏，木梁一侧钢板从右端脱落至梁中部位置，破坏面沿着钢板下侧，说明贴钢板对裂缝发展有一定的抑制作用。TGL2 荷载加载到 134 kN 时，首先背面一侧的中间位置钢板鼓起，紧接着一声巨响，木梁破坏，钢板脱落，裂缝沿着粘贴钢板的下方往粘贴位置处发展，而正面钢板张开至裂缝离开粘贴范围处。

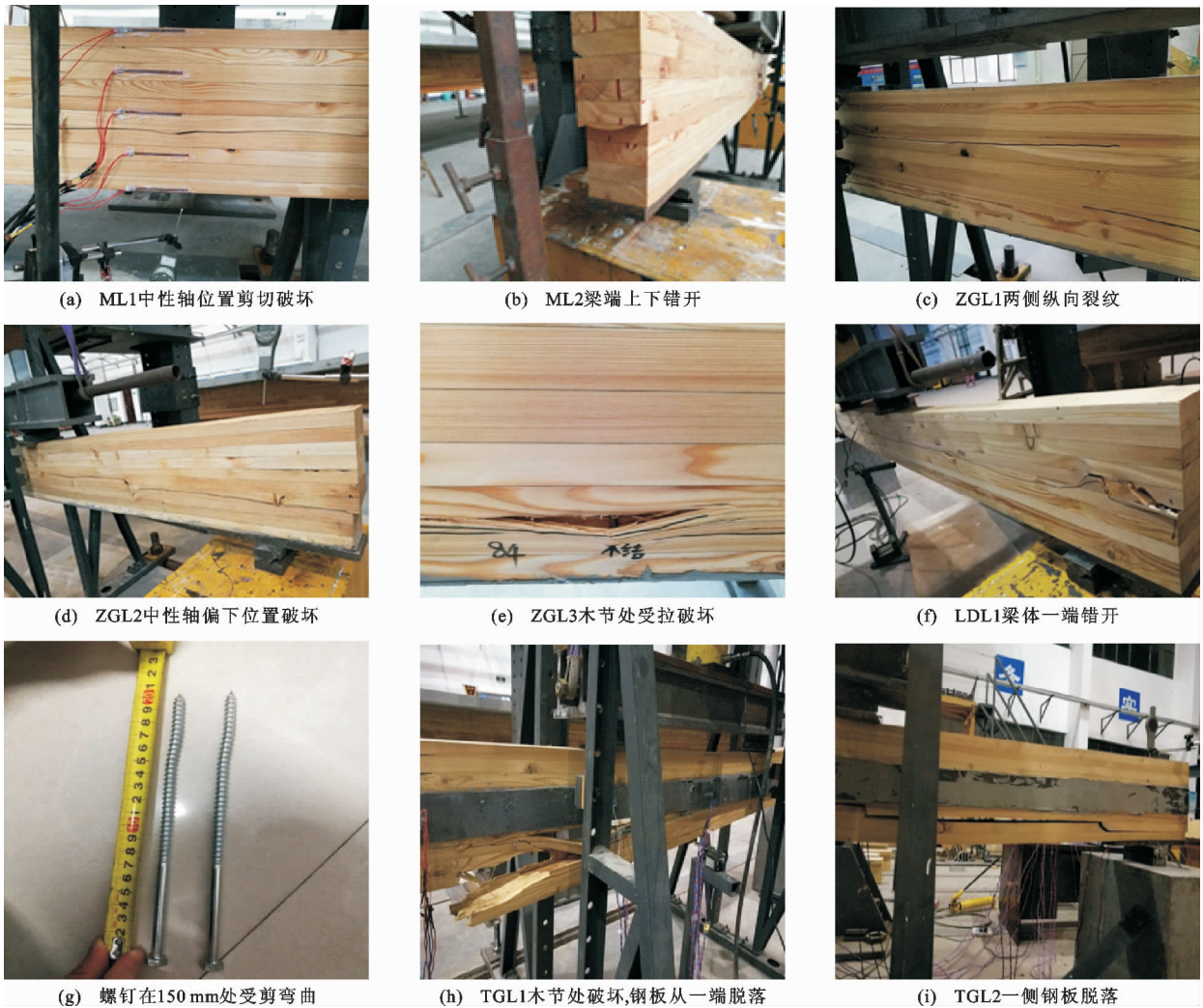


图 3 试件的破坏形态与特征

Fig. 3 Failure Modes and Characteristics of Specimens

2.2 荷载-位移曲线

各试件的极限荷载对比见图 4;各试件的荷载-位移曲线见图 5。

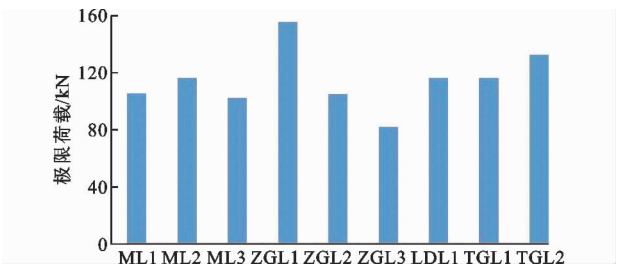


图 4 极限荷载对比

Fig. 4 Comparison of Limit Load

由图 4 可知,由于部分试件存在明显木节,本次试验结果较离散,增强效果不够明显,ZGL3 由于梁底附近有木节等缺陷,导致试件过早破坏,但总体来说,梁底粘贴钢板不仅提高了木梁的刚度,而且对承载力也有一定的提高。螺钉梁中螺钉参与抗剪和传

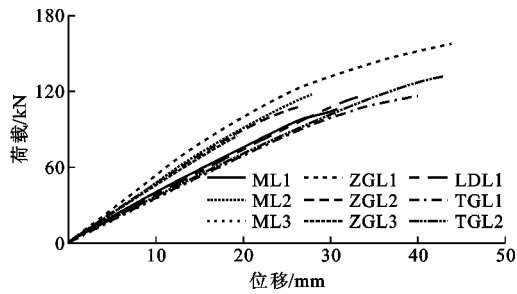


图 5 荷载-位移曲线

Fig. 5 Load Displacement Curves

递木材剪应力,并有效地限制了裂缝的发展。侧面贴钢板梁对承载力有一定的提高,并能提高其抗剪能力,使裂缝往受拉区发展。

3 理论分析

3.1 平截面假定验证

在各组试验中分别选取 1 个有代表性的梁,得

到跨中截面高度-应变关系曲线,如图 6 所示。

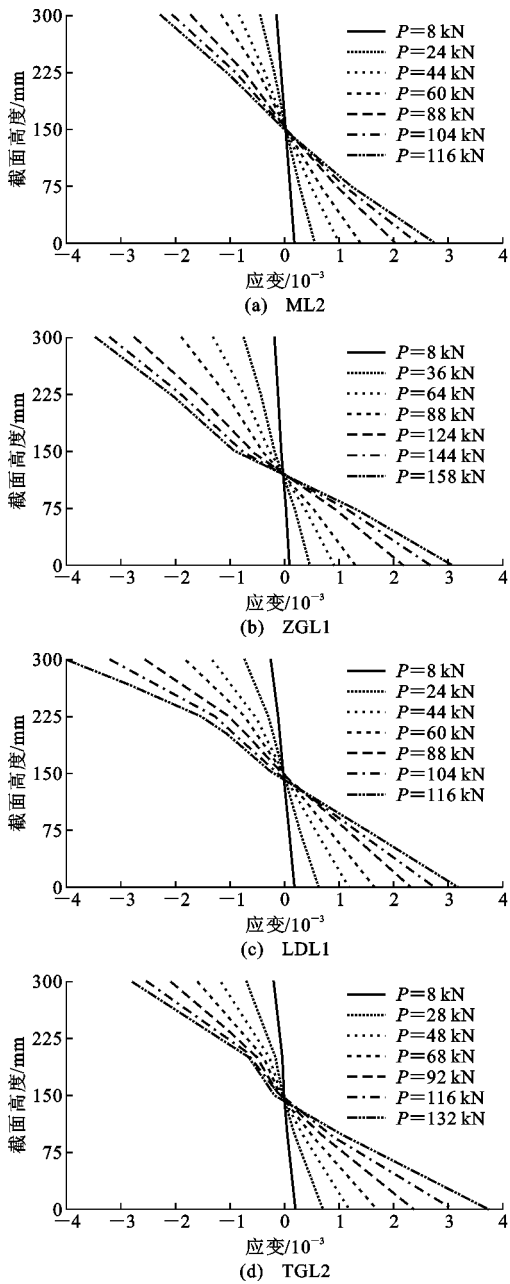


图 6 代表试件截面高度-应变曲线  
Fig. 6 Section Height-strain Curves of Representative Specimens

由图 6 可知,各组试件的跨中截面应变分布基本符合平截面假定。底部粘钢梁的中和轴下移约 25 mm,表明钢板发挥作用承受了较大拉应力,其受拉区面积减小,受压区面积增大,加载过程中跨中应变沿截面高度基本呈线性分布,只是在加载后期由于钢板达到屈服其变形变得不规则。螺钉梁与侧面贴钢板梁受弯时其中性轴在梁截面中心,在加载后期应变变得不规则是由于采用螺钉和侧面贴钢板的方法提高了木梁的抗剪性能。

### 3.2 破坏形态的判断

美国的木结构规范 ASTM D 198-09<sup>[15]</sup>建立了剪跨比与破坏形态的关系:当剪跨比小于 2.5 时,胶合木梁将会产生较高概率的剪切破坏;当剪跨比大于 2.5 小于 6 时,既有可能产生剪切破坏,也有可能产生弯曲破坏;当剪跨比大于 6 时,剪应力可以忽略不计,产生弯曲破坏。由此可以得出:在胶合木梁三分点受弯试验中,当跨高比小于 7.5 时,胶合木梁将会产生较高概率的剪切破坏;当跨高比大于 7.5 小于 18 时,既有可能产生剪切破坏,也有可能产生弯曲破坏;当跨高比大于 18 时,剪应力可以忽略不计,产生弯曲破坏。本试验为胶合木梁三分点受弯试验,其跨高比为 12,按上述结论可知胶合木梁以发生剪切破坏为主,试验结果与结论一致。

为了研究小跨高比胶合木梁三分点受弯试验时发生受拉和受剪破坏的界限,根据材料力学容易得出梁承载力极限状态下的应力和应变分布,图 7 为木梁截面的计算简图<sup>[16]</sup>,假设此时发生顺纹剪切破坏。计算推导过程中采用如下假定:①木梁截面应变分布符合平截面假定;②木梁受拉和受压的弹性模量相同;③不考虑钢板与木材之间粘钢胶的厚度;④钢板和螺钉均采用线弹性应力-应变模型;⑤木材受拉采用线弹性应力-应变本构模型,木材受压采用理想弹塑性应力-应变本构模型。

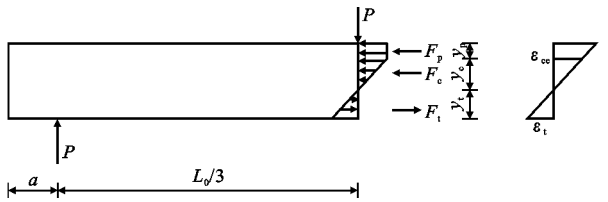


图 7 木梁截面的计算简图

Fig. 7 Calculation Sketch of Timber Beam Section

考虑构件的尺寸效应、材料强度变异以及天然缺陷等综合因素,对构件材料强度进行折减。根据《木结构设计手册》<sup>[17]</sup>求得顺纹抗剪强度折减系数为 0.32,木材弹性模量的调整系数为 0.8,底部粘钢木材的弹性模量调整系数取 0.85。

根据平衡关系  $F_p + F_c = F_t$ ,有

$$b y_p E_w \epsilon_{cc} + \frac{1}{2} b y_c E_w \epsilon_{cc} = \frac{1}{2} b y_t E_w \epsilon_t \quad (1)$$

根据几何关系,可得

$$\frac{y_c}{y_t} = \frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_t} \quad (2)$$

$$y_p = h - y_c - y_t \quad (3)$$

将式(2),(3)代入式(1)得

$$y_t = \frac{2\epsilon_{ce}\epsilon_t}{(\epsilon_{ce} + \epsilon_t)^2} h \quad (4)$$

若破坏时沿中性轴发生剪切破坏,则有

$$b(a + \frac{L_0}{3})f_v = F_t = \frac{1}{2}by_tE_w\epsilon_t \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)得

$$\epsilon_t = \epsilon_{ce} / \{ \sqrt{hE_w\epsilon_{ce} / [(a + L_0/3)f_v]} - 1 \} \quad (6)$$

发生剪切破坏应满足  $\epsilon_t \leq \epsilon_{tu}$ , 则有

$$\epsilon_{ce} / \{ \sqrt{hE_w\epsilon_{ce} / [(a + L_0/3)f_v]} - 1 \} \leq \epsilon_{tu} \quad (7)$$

整理可得跨高比应满足如下条件

$$\frac{L_0}{h} \leq 3\sigma_{cy} / [f_v(1 + \epsilon_{ce}/\epsilon_{tu})^2] - \frac{3a}{h} \quad (8)$$

式中:  $b, h$  分别为木梁截面宽度和高度;  $a, L_0$  分别为支座距梁端的距离和梁的计算跨度;  $y_t, y_c, y_p$  分别为木梁受拉区高度、木梁弹性受压区高度和木梁塑性受压区高度;  $F_p, F_c, F_t$  分别为木梁塑性受压区合力、木梁弹性受压区合力和木梁受拉区合力;  $\epsilon_{ce}, \epsilon_t, \epsilon_{tu}$  分别为木梁最大弹性压应变、木梁下边缘拉应变和木梁极限拉应变;  $\sigma_{cy}$  为木梁弹性极限压应力;  $f_v$  为强度折减后木材的顺纹剪切强度;  $E_w$  为调整后的木材弹性模量。

式(8)为三分点受弯试验时发生顺纹剪切破坏梁跨高比的界限。

### 3.3 极限承载力计算

#### 3.3.1 底部粘钢梁承载力

底部粘钢梁发生顺纹剪切破坏,在加载点处截面应力-应变分布如图 8 所示。

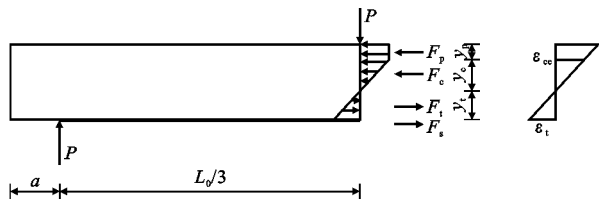


图 8 底部粘钢梁截面的计算简图

Fig. 8 Calculation Sketch of Steel Beam  
Section at Bottom

根据木梁截面上的内力平衡,有

$$F_p + F_c = F_t + F_s \quad (9)$$

式中:  $F_s$  为钢板所受拉力,  $F_s = btE_s\epsilon_t$ ,  $t$  为钢板厚度,  $E_s$  为钢板的弹性模量。

设  $\frac{E_s}{E_w} = n$ , 代入式(9), 可得

$$by_pE_w\epsilon_{ce} + \frac{1}{2}by_cE_w\epsilon_{ce} = \frac{1}{2}by_tE_w\epsilon_t + btE_s\epsilon_t \quad (10)$$

根据几何关系, 可得

$$\frac{y_c}{y_t} = \frac{\epsilon_{ce}}{\epsilon_t} \quad (11)$$

$$y_p = h - y_c - y_t \quad (12)$$

将式(11), (12)代入式(10)得

$$y_t = \frac{2h\epsilon_{ce}\epsilon_t - 2nt\epsilon_t^2}{(\epsilon_{ce} + \epsilon_t)^2} \quad (13)$$

破坏时沿中性轴发生剪切破坏, 则有

$$b(a + \frac{L_0}{3})f_v = F_t + F_s = \frac{1}{2}by_tE_w\epsilon_t + btE_s\epsilon_t \quad (14)$$

将式(13)代入式(14)得到关于  $\epsilon_t$  的一元二次方程, 解方程得到方程的正根。将方程的正根代入式(10)中, 进而求出式(9)中各合力的值。

对截面处钢板合力点即梁底取矩, 可得到木梁所能承担的极限弯矩, 即

$$M_u = F_p(h - \frac{1}{2}y_p) + F_c(y_t + \frac{2}{3}y_c) - \frac{1}{3}F_t y_t \quad (15)$$

那么底部粘钢梁在三分点受弯作用时所能承受的极限荷载为

$$N_u = 2P = \frac{6M_u}{L_0} \quad (16)$$

式中:  $M_u$  为底部粘钢梁发生顺纹剪切破坏时梁底的极限弯矩;  $N_u$  为底部粘钢梁发生顺纹剪切破坏时所能承受的极限荷载。

#### 3.3.2 螺钉梁承载力

木螺钉主要用于单剪连接, 它也能承受一定的轴向拉拔荷载作用。如果木螺钉垂直于较厚构件的木纹方向(从较薄构件向较厚构件拧入)拧入深度为 7 倍螺杆直径以上, 则它的抗剪承载力可按下列 3 种屈服模式(图 9)进行计算, 并取其最低值为公称设计值<sup>[18]</sup>

$$Z = \begin{cases} \frac{Dt_s F_{cs}}{K_D} & \text{I 模式} \\ \frac{KDt_s F_{em}}{K_D(2 + R_e)} & \text{III 模式} \\ \frac{D^2}{K_D} \sqrt{\frac{1.75 F_{em} F_{yb}}{3(1 + R_e)}} & \text{IV 模式} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $K$  为系数,  $K = -1 + \sqrt{\frac{2(1 + R_e)}{R_e} + \frac{F_{yb}(2 + R_e)D^2}{2F_{em}t_s^2}}$ ,

$R_e = F_{em}/F_{cs}$ ,  $F_{em}$  为较厚构件的销槽承压强度,  $F_{cs}$  为较薄构件的销槽承压强度,  $F_{em} = 77G$ ,  $G$  为木材相对密度;  $F_{yb}$  为螺钉的抗弯强度;  $t_s$  为较薄构件的厚度;  $D$  为螺钉公称直径;  $K_D$  为计算系数, 当  $D \leq 4.32$  mm 时,  $K_D = 2.2$ , 当  $4.3$  mm  $\leq D \leq 6.35$  mm 时,  $K_D = 0.394D + 0.5$ , 当  $D \geq 6.35$  mm 时,  $K_D = 3.3$ 。

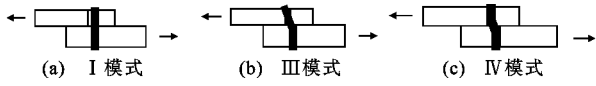


图 9 3 种屈服模式

Fig. 9 Three Yielding Modes

根据试验现象可知,螺钉梁发生顺纹剪切破坏,而且螺钉在 150 mm 处发生了弯曲,如图 3(g)所示,与Ⅲ模式的破坏情况相似。本文将螺钉梁的剪切看成Ⅲ模式,即在较厚部分产生一个塑性铰的单剪屈服破坏。那么单个螺钉的屈服破坏连接承载力满足

$$V_L = Z = \frac{KD_t F_{em}}{K_D(2+R_e)} \quad (18)$$

式中: $V_L$  为单个螺钉受到的剪应力。

螺钉梁发生顺纹剪切破坏,在加载点处截面应力-应变分布如图 10 所示。

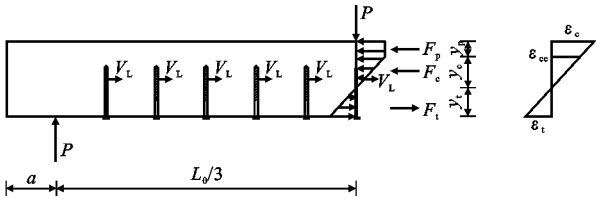


图 10 螺钉梁截面的计算简图

Fig. 10 Calculation Sketch of Cross

Section of Screw Beam

根据木梁截面上的内力平衡,有

$$F_p + F_c = F_t + V_L \quad (19)$$

式中: $V_L = Z$ 。

将  $V_L = Z$  代入式(19)得

$$b y_p E_w \epsilon_{ce} + \frac{1}{2} b y_c E_w \epsilon_{ce} = \frac{1}{2} b y_t E_w \epsilon_t + Z \quad (20)$$

根据几何关系,可得

$$\frac{y_c}{y_t} = \frac{\epsilon_{ce}}{\epsilon_t} \quad (21)$$

$$y_p = h - y_c - y_t \quad (22)$$

将式(21),(22)代入(20)得

$$y_t = \frac{2bhE_w\epsilon_{ce}\epsilon_t - 2Z\epsilon_t}{bE_w(\epsilon_{ce} + \epsilon_t)^2} \quad (23)$$

破坏时沿中性轴发生剪切破坏,则有

$$b(a + \frac{L_0}{3})f_v + mZ = F_t = \frac{1}{2} b y_t E_w \epsilon_t \quad (24)$$

式中: $m$  为螺钉的数量。

将式(23)代入式(24)得

$$\epsilon_t = \epsilon_{ce} / \left\{ \sqrt{\frac{bhE_w\epsilon_{ce} - Z}{b(a + \frac{L_0}{3})f_v + mZ}} - 1 \right\} \quad (25)$$

将式(25)代入式(19)中进而求出各合力。

对截面处梁底取矩,可得到木梁所能承担的极限弯矩,即

$$M_u = F_p(h - \frac{1}{2}y_p) + F_c(y_t + \frac{2}{3}y_c) - \frac{1}{3}F_t y_t \quad (26)$$

那么螺钉梁在三分点受弯作用时所能承受的极限荷载  $N_u$  为

$$N_u = 2P = \frac{6M_u}{L_0} \quad (27)$$

### 3.3.3 侧面粘钢梁承载力

由试验可以得出侧面粘钢梁在受弯时属于顺纹剪切破坏,主要原因是木材的抗拉、抗压强度一般为其抗剪强度的几十倍,木梁由于截面中心轴受剪力过大而导致剪切破坏,所以其受弯时极限承载力取决于木梁的抗剪承载力。

《木结构设计标准》(GB 50005—2017)<sup>[19]</sup>中受弯构件的抗剪承载力计算公式为

$$\frac{VS}{Ib} \leq f_v \quad (28)$$

式中: $V$  为剪力; $I$  为构件全截面惯性矩; $S$  为剪切面以上的截面面积对中性轴的面积矩。

图 11 为截面特征。在公式(28)的基础上提出了两侧中部贴钢板木梁受剪承载力的计算公式<sup>[20]</sup>

$$f_{v,n} = \frac{VS_n}{I_n b_n} \quad (29)$$

式中: $f_{v,n}$  为两侧中部贴钢板木梁的抗剪强度值; $b_n$  为考虑钢板贡献的等效截面宽度,  $b_n = b + 2t \frac{E_s}{E_w} = b + 2nt$ ;  $I_n$  为考虑钢板贡献的等效全截面惯性矩,且钢板的高度为梁高的 1/3,  $I_n = \frac{bh^3}{12} + \frac{nth^3}{162}$ ;  $S_n$  为考虑钢板贡献的等效面积矩,  $S_n = \frac{bh^2}{8} + \frac{nth^2}{36}$ 。

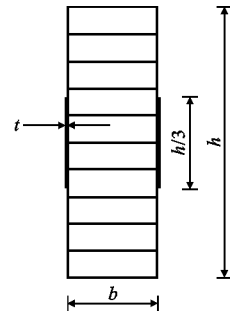


图 11 截面特征

Fig. 11 Section Characteristics

由于不易测得侧面粘钢板木梁的抗剪强度,现保守取  $f_{v,n} = f_v$ ,侧面贴钢梁在三分点受弯作用时所能承受的极限荷载为



$$N_u=2V=\frac{2I_nb_nf_v}{S_n}\tag{30}$$

4 实测值与计算值的比较

已知木材最大弹性压应变值为  $2\,500\times10^{-6}$ , 极限拉应变为  $5\,000\times10^{-6}$ , 顺纹抗剪强度折减系数为 0.32, 木材弹性模量的调整系数为 0.8。根据所推理论公式计算出三分点受弯试验时发生顺纹剪切破坏梁跨高比的界限为 18.7, 可以判断本试验梁发生顺纹剪切破坏的概率较高, 与试验结果吻合。

按第 3.3 节计算方法算出各试件的极限承载力, 由于木材的离散性较大, 导致某些梁的实测值与计算值有较大差距, 见表 3。

表 3 极限承载力计算值与实测值比较  
Tab.3 Comparison of Ultimate Bearing Capacity  
Between Calculated Values and Measured Values

试件编号	破坏类型	极限承载力 计算值/kN	极限承载力 实测值/kN	相对误差%
ML1	顺纹剪切破坏	101	106	4.7
ML2	顺纹剪切破坏		116	12.9
ML3	顺纹剪切破坏		102	0.9
ZGL1	顺纹剪切破坏	108	158	31.6
ZGL2	顺纹剪切破坏		108	0.0
ZGL3	梁底受拉破坏		84	28.6
LDL1	顺纹剪切破坏	105	116	9.5
TGL1	梁底受拉破坏	124	116	6.9
TGL2	顺纹剪切破坏		132	6.1

由表 3 可知, 梁极限承载力的计算值和实测值相对误差大都在 20% 以下, 且计算值相比实测值偏于安全, 因此可以认为理论公式合理, 可以应用于实际工程构件中。

5 结 语

(1)小跨高比胶合木梁的破坏形式以顺纹剪切破坏为主, 破坏时无征兆, 破坏面基本发生在木梁的中性轴及偏下位置; 底部粘钢梁受弯时中性轴会下移, 当受拉区有明显缺陷时, 梁底发生弯曲受拉破坏的几率增大。

(2)在梁底粘贴钢板可以提高木梁的承载能力, 并能提高其刚度; 在梁底弯剪区拧入螺钉可以较好地提高木梁的抗剪能力; 在侧面粘贴钢板不仅能提高木梁的抗剪性能, 还能一定程度地抑制裂缝的发展。

(3)本文提出了胶合木梁发生剪切破坏时的界限跨高比; 在验证了木梁基本符合平截面假定后, 提

出了小跨高比胶合木梁及增强构件在三分点受弯试验时发生剪切破坏时的极限承载力受力模型和计算方法, 计算值与实测值基本吻合。

参考文献:  
References:

[1] 刘伟庆,杨会峰. 工程木梁的受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2008,29(1):90-95.  
LIU Wei-qing,YANG Hui-feng. Experimental Study on Flexural Behavior of Engineering Timber Beams [J]. Journal of Building Structures,2008,29(1):90-95.

[2] 周先雁,曹磊,曾丹,等. 胶合木梁抗弯承载力分析[J]. 建筑结构,2015,45(22):91-96.  
ZHOU Xian-yan,CAO Lei,ZENG Dan,et al. Flexural Capacity Analysis of Glulam Beams [J]. Building Structure,2015,45(22):91-96.

[3] 张庆. 层板胶合木梁受力性能的试验探究[J]. 四川建材,2018,44(9):76-77.  
ZHANG Qing. Experimental Study on Mechanical Properties of Laminated Plywood Beams[J]. Sichuan Building Materials,2018,44(9):76-77.

[4] FERRIER E,LABOSSIERE P,NEALE K. Mechanical Behavior of an Innovative Hybrid Beam Made of Glulam and Ultrahigh-performance Concrete Reinforced with FRP or Steel[J]. Journal of Composites for Construction,2010,14(2):217-228.

[5] MANALO A C,ARAVINTHAN T,KARUNASENA W. Flexural Behaviour of Glue-laminated Fibre Composite Sandwich Beams [J]. Composite Structures,2010,92(11):2703-2711.

[6] KHORSANDNIA N,VALIPOUR H R,FOSTER S, et al. A Force-based Frame Finite Element Formulation for Analysis of Two-and Three-layered Composite Beams with Material Non-linearity[J]. International Journal of Non-linear Mechanics,2014,62:12-22.

[7] GB/T 50329—2012, 木结构试验方法标准[S].  
GB/T 50329—2012, Standard for Test Methods of Timber Structures[S].

[8] 杨会峰,刘伟庆. FRP 增强胶合木梁的受弯性能研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(1):64-71.  
YANG Hui-feng,LIU Wei-qing. Study on Flexural Behavior of FRP Reinforced Glulam Beams[J]. Journal of Building Structures,2007,28(1):64-71.

[9] 杨昕卉,薛伟,郭楠. 钢板增强胶合木梁的抗弯性能[J]. 吉林大学学报:工学版,2017,47(2):468-477.  
YANG Xin-hui,XUE Wei,GUO Nan. Bending Performance of Glued-lumber Beam Reinforced with Steel



- Plate[J]. Journal of Jilin University: Engineering Edition, 2017, 47(2): 468-477.
- [10] 曹磊, 陈伯望. 胶合木梁抗剪性能研究综述[J]. 工程力学, 2018, 35(6): 1-5, 14.
- CAO Lei, CHEN Bo-wang. Research Review of Shear Behavior of Glulam[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(6): 1-5, 14.
- [11] 谢启芳, 薛建阳, 赵鸿铁, 等. 碳纤维布加固木梁抗剪性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(6): 88-91.
- XIE Qi-fang, XUE Jian-yang, ZHAO Hong-tie, et al. Experimental Study on Shear Behavior of Timber Beam Strengthened with CFRP Sheet[J]. Industrial Construction, 2012, 42(6): 88-91.
- [12] 淳庆, 潘建伍. 碳-芳混杂纤维布加固木梁抗剪性能分析[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2011, 12(6): 654-658.
- CHUN Qing, PAN Jian-wu. Shear Behavior of Timber Strengthened with CFRP/AFRP Hybrid FRP Sheet[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 12(6): 654-658.
- [13] SVECOVA D, EDEN R J. Flexural and Shear Strengthening of Timber Beams Using Glass Fiber Reinforced Polymer Bars — An Experimental Investigation[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(1): 45-55.
- [14] 许清风. 粘贴 CFRP 布加固木梁受剪性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(增): 239-243.
- XU Qing-feng. Experimental Study on Shear Behavior of Wood Beams Strengthened with CFRP Sheets[J]. Industrial Construction, 2011, 41(S): 239-243.
- [15] ASTM D 198-09, Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes[S].
- [16] 谢启芳. 中国木结构古建筑加固的试验研究及理论分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- XIE Qi-fang. Experimental Study and Theoretical Analysis of Strengthening for Chinese Ancient Timber Buildings[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.
- [17] 木结构设计手册编辑委员会. 木结构设计手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- Editorial Committee of Timber Engineering Manual. Timber Engineering Manual [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [18] GB 50005—2003, 木结构设计规范[S].
- GB 50005—2003, Code for Design of Timber Structures[S].
- [19] GB 50005—2017, 木结构设计标准[S].
- GB 50005—2017, Standard for Design of Timber Structures[S].
- [20] TRIANTAFILLOU T C. Composites: A New Possibility for the Shear Strengthening of Concrete, Masonry and Wood[J]. Composites Science and Technology, 1998, 58(8): 1285-1295.