

体内预应力胶合木梁抗弯承载能力研究^{*}

张晋^{1†}, 沈浩¹, 高森¹, 李维滨¹, 许清风²

(1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 上海市建筑科学研究院 上海市工程结构安全重点实验室, 上海 200032)

摘要:为研究体内预应力胶合木梁的抗弯承载能力,结合国内外相关试验研究结论,基于 Bazan 的木材本构关系模型、平截面假定和极限应变分析方法,提出了受拉破坏模式和受压破坏模式的判别方法,建立了构件极限承载能力公式,算例表明,本文给出的公式计算结果与试验值吻合较好;考察了极限承载能力与有效张拉力的关系,研究表明,有效张拉力是影响胶合木梁受弯破坏模式的决定性因素,且木材顺纹受压区下降段的力学性能参数对极限承载能力与有效张拉力之间的关系影响很大;定量地分析了受拉破坏模式和受压破坏模式下,承载能力极限状态下的预应力筋内力均与有效张拉力近似呈线性关系的性质;分析了预应力筋有效张拉力的上、下限值,分别对应:承载能力极限状态下预应力筋刚好屈服、受拉破坏与受压破坏同时发生,并给出了上、下限值解析解的表达形式。

关键词:木结构;胶合木梁;体内预应力;抗弯承载力;理论分析

中图分类号:TU366.3

文献标志码:A

Study on Flexural Capacity of Internal Prestressed Glulam Beams

ZHANG Jin^{1†}, SHEN Hao¹, GAO Sen¹, LI Weibin¹, XU Qingfeng²

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, SRIBS, Shanghai 200032, China)

Abstract: To study the flexural capacity of internal prestressed glulam beams, the relevant conclusions of experimental research at home and abroad were summarized, the methods to predict the failure mode and the formula of the flexural capacity were proposed based on Bazan's constitutive relation model, the plane-section assumption and the limit strain analysis method. The computation examples demonstrated that the calculated results according to the formula were in reasonable agreement with the experimental data. The relationship between the flexural capacity and the effective tensioning force was studied, and it showed that the effective tensioning force could determine the failure mode, and the mechanical property parameters of the compressive zone were the key influencing factors of the relationship. The internal force of the tendons under tensile failure mode or compression failure mode was approximately linear with the effective tensioning force. The upper and lower limit of the effective tensioning force were defined, which indicates that the tendons yield when the failure happens, and tension failure and compression failure occur simultane-

^{*} 收稿日期:2017-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178115), National Natural Science Foundation of China(51178115);上海市科委应用技术开发项目(2015-110), Application Technology Development Projects of Shanghai Science and Technology Commission(2015-110)

作者简介:张晋(1974—),男,安徽巢湖人,东南大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: zhangjin0622@139.com

ously. The analytical solutions of the upper and lower limit were also provided.

Key words: timber structures; glulam beams; internal prestressed; flexural capacity; theoretical analysis

胶合木结构出现于 20 世纪初,由于其具有环境友好、结构性能优良、尺寸形状不受原木径级限制等优点,目前在国外建筑结构领域应用较多。但传统胶合木梁的弯曲破坏大都是由受拉边的木节、斜纹或机械接头部位等缺陷引起的,木材强度尤其是顺纹抗压强度得不到充分利用。因此,长期以来研究人员不断探索胶合木梁的增强方法。

从 20 世纪 40 年代开始,研究者们通过利用金属材料(钢筋、钢板或铝板等)来增强胶合木梁,并取得了一定成果。Bulleit 等^[1]的研究表明,含水率低的木梁采用钢绞线增强后刚度提高了 24%~32%,受弯承载力提高约 30%。Gardner 等^[2]采用钢筋增强木梁以提高构件的承载力,并减少其在荷载作用下的变形。O'Brien^[3]利用铝板来增强木梁的抗拉强度,使其受弯承载能力有了很大的提高。从 20 世纪 60 年代开始,也有研究者利用纤维材料(玻璃纤维布、玻璃纤维型材、碳纤维布、碳纤维筋)增强胶合木梁^[4-8]。

然而,经增强后的胶合木梁依然存在如下问题:1)增强后木梁的刚度虽有提高,但依然存在变形大的问题,正常使用极限状态下木梁的变形仍然较大,木梁的承载能力主要受变形控制;2)增强材料价格较高,且其高强度通常得不到充分利用。

鉴于此,有学者开始研究利用预应力对胶合木梁进行增强。

Bohannan^[9]最早提出在木结构内部施加预应力的思想,采用无黏结预应力高强度钢绞线对木梁的内部施加预应力来改善木构件的受力性能。1965 年,Person^[10]提出一种新的尝试,使用环氧树脂将预先张拉过的钢板粘贴在木梁受拉面来增强胶合木梁,改善了胶合木梁的受力性能。

自 20 世纪 80 年代中期以来,欧美及日本等国采用纤维增强复合材料代替金属材料的研究及应用越来越多。Triantafillou 等^[11]和 Plevris 等^[12]提出在木梁持荷情况下,将 CFRP 布粘贴到木梁受拉面上,等到胶黏剂达到强度后再将荷载释放,从而实现预应力 CFRP 增强木梁的设想。试验证明对木梁施加预应力是一种比较好的增强方式,木梁承载能力、刚度均有明显提高,破坏形态良好,而且 CFRP 也得到充分利用。

Dolan 等^[13-14]采用液压千斤顶先张法张拉 KFRP 布和 GFRP 布等预应力材料对胶合木梁进行增强,结果发现胶合木梁的承载力分别提高了 25%和 110%。2005 年,Borri 等^[15]分别利用 CFRP 筋、CFRP 布及预应力 CFRP 布来增强木梁,并进行结果性能对比,发现预应力增强方式在降低构件变形方面具有一定的优势。

De Luca 等^[16]对直线形有黏结体内预应力胶合木梁进行试验研究,研究发现胶合木梁的承载力提高了 40.2%,刚度提高了 37.9%,延性提高了 79.1%。试验中只有一个试件发生钢筋与胶合木的剥离现象,说明钢筋与胶合木的黏结具有一定可靠度。

杨会峰等^[17-18]采用精轧螺纹钢为预应力筋,研究了直线形有黏结体内胶合木梁受弯性能。结果表明构件的极限承载力提高了 19%~50%(张拉控制应力越大提高越多)。若在构件的受压侧再配置非预应力筋,则相比未配置受压筋的预应力增强构件极限承载力提高 15.4%,刚度提高 14.6%。McConnell 等^[19]试验研究了有黏结直线形预应力胶合木梁的受弯性能,结果发现有胶合木梁的承载力提高了 40.1%,刚度提高了 30.0%。Johnsson 等^[20]、Yusof 等^[21]也进行了类似的试验,结果发现增强后的木梁承载力提高了 44.0%~63.1%,刚度增加了 10%,破坏模式也由受拉区木纤维拉断破坏,变成受压区木纤维的压曲褶皱破坏。

2016 年,杨会峰等^[22]采用 CFRP 筋为预应力筋,对直线形有黏结预应力胶合木梁进行试验研究。结果表明:配筋率为 0.89%的预应力 CFRP 增强胶合木梁承载力提高了 93.3%;同时对受拉区和受压区增强的胶合木梁承载力提高了 131%。并发现,由于预应力筋的存在,木梁受拉区极限拉应变提高了 24.3%~77.6%。

以上研究表明:破坏形态上,在未增强木梁中,构件强度一般由受拉区木材的抗拉强度控制,破坏时受压区木材未达到其极限强度,即破坏模式为受拉破坏;而一般在预应力胶合木梁中,虽然在木梁缺陷部位(如木节)出现了损伤和开裂,但由于增强材料的存在,使得此处的部分拉力迅速转移到邻近胶层及预应力筋材中,木梁将继续承载,受压区破坏表现为木纤维褶皱,这说明受压区木材得到了较为充

分的利用,最终破坏模式为受压破坏。

此外,根据上述试验结果,还可得到如下结论:

- 1) 试验中的胶合木之间以及预应力筋与胶合木之间黏结性能良好,基本未出现相对滑移现象。
- 2) 横截面在受力变形后仍近似保持为平面,即构件基本符合平截面假定。
- 3) 增强后的胶合木梁承载力提高,且张拉力越大,承载力提高越大。
- 4) 当受拉边配筋较多时,若在受压边配置适当的筋材,可进一步提高其强度。

综上所述,国内外对于体内预应力胶合木梁抗弯性能的相关研究主要集中于试验研究,而从理论角度分析抗弯承载能力规律的研究较少,且多基于木材为理想的弹塑性材料,过于简单,没有考虑到木材受压区存在下降段的现象;并且探讨有效张拉力的取值方法、有效张拉力对破坏模式以及承载能力影响规律的研究工作尚未见公开文献。

为此,本文结合国内外公开发表的(有黏结)体内预应力胶合木梁的试验研究结果,考虑木材受压区下降段的影响,探讨预应力胶合木梁的受力机理,分析其破坏形态,研究有效张拉力与极限承载能力的规律,确定合理的有效张拉力,为预应力胶合木在大跨木结构建筑中的设计与工程应用提供参考。

1 抗弯承载能力理论分析

1.1 基本假定

根据前述研究结论,抗弯承载力计算采用如下基本假定:

- 1) 构件横截面平均应变呈线性分布,即构件符合平截面假定。
- 2) 不考虑构件的剪切变形。
- 3) 层板间黏结完好,无相对滑移。
- 4) 受拉和受压区筋材均视为理想弹塑性材料,其本构关系本文不再赘述。

5) 胶合木梁的抗弯性能主要由木材顺纹方向的力学性能决定,因此不考虑木材的各向异性对受弯性能的影响。

6) 相比于普通胶合木梁弯曲破坏时的极限拉应变 ϵ_{wmu} ,增强后的胶合木梁弯曲破坏时极限拉应变 ϵ_{wtu} 有所提高,即: $\epsilon_{wtu} = \alpha_m \epsilon_{wmu}$,增大系数 α_m 通常可取 1.3^[7]。

7) 木材的本构关系(顺纹). Blass 根据大量试验确定了完整的拉压本构关系模型(Blass 模型),该模型能真实地反映拉压应力应变关系,但是模型较为复杂,参数较多,不方便用于计算分析^[23]. Bazan 等^[24]对 Blass 模型进行简化,提出了一个双折线的拉压本构关系模型,如图 1 所示. 图中, ϵ_{wtu} 、 ϵ_{wcu} 分别为木材的极限拉、压应变; ϵ_{wcy} 为木材的屈服压应变, f_{wtu} 、 f_{wcy} 分别为木材的抗拉、抗压强度, E_w 为木材的弹性模量, $m(m \leq 0)$ 为木材本构关系曲线中的受压区下降段的斜率与 E_w 的比值。

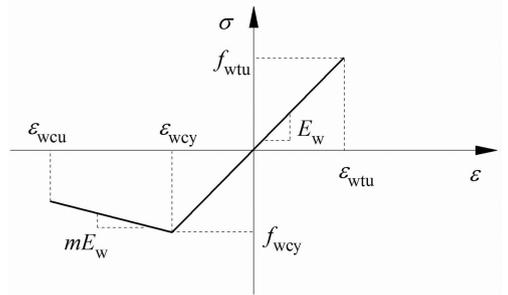


图 1 Bazan 木材本构关系模型

Fig. 1 Bazan's constitutive relation model for woods

1.2 抗弯承载能力公式的导出

采用极限应变分析方法,当构件截面边缘纤维达到极限应变时即宣告构件破坏. 其理论分析模型如图 2 所示,具体分析步骤为:

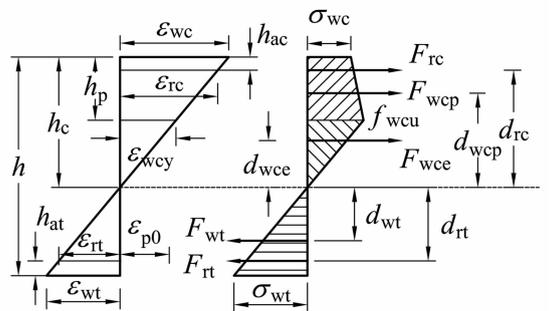


图 2 理论分析模型

Fig. 2 Theoretical analysis model

对截面列平衡方程:

$$F_{rt} + F_{wt} = F_{rc} + F_{wce} + F_{wcp} \quad (1)$$

式中: F_{rt} 、 F_{rc} 分别为受拉、受压筋材的合力; F_{wt} 为木材受拉区的合力; F_{wce} 为木材弹性受压区的合力; F_{wcp} 为木材塑性受压区的合力. 以上各合力由式(2)~(6)^[18,22]确定:

$$F_{wt} = \frac{1}{2} E_w \epsilon_{wt} b (h - h_c), \quad (2)$$

$$F_{wce} = \frac{1}{2} E_w \epsilon_{wcy} b (h_c - h_p), \quad (3)$$

$$F_{wcp} = \frac{1}{2} E_w [m \epsilon_{wce} + (2-m) \epsilon_{wcy}] b h_p, \quad (4)$$

$$F_{rc} = E_r A_{rc} \epsilon_{rc}, \quad (5)$$

$$F_{rt} = E_r A_{rt} (\epsilon_{rt} + \epsilon_{p0}). \quad (6)$$

式中: E_r 为筋材的弹性模量; ϵ_{wce} 、 ϵ_{wt} 分别为截面受压、受拉区边缘木材纤维的最大应变; ϵ_{rc} 为受压筋材的应变; ϵ_{rt} 为受拉预应力筋的应变增量; A_{rc} 为受压筋材的截面面积; A_{rt} 为受拉预应力筋截面面积。

对于式(6), ϵ_{p0} 为预应力筋合力点处胶合木材法向应力为 0 时的预应力筋的总应变. 它包含两部分: 第一项 $\epsilon_{p0,I}$ 为张拉结束时预应力筋产生的应变; 第二项 $\epsilon_{p0,II}$ 为从张拉结束至预应力筋合力点处胶合木梁法向应力为 0 时预应力筋产生的应变增量. 由于张拉结束后进行了注胶工艺, 在外荷载作用下, 预应力筋与胶合木材共同工作, 变形协调, 因此 $\epsilon_{p0,II}$ 可由预应力筋合力点处胶合木材的应变增量导出, 具体见式(7)~(8).

$$\epsilon_{p0} = \epsilon_{p0,I} + \epsilon_{p0,II} = \frac{F_{pe}}{E_r A_{rt}} + \left[\frac{F_{pe} \left(\frac{h}{2} - h_{at} \right)^2}{1/12 b h^3} + \frac{F_{pe}}{b h} \right] / E_w = k \cdot \frac{F_{pe}}{E_r A_{rt}}, \quad (7)$$

$$k = 1 + \left[\frac{\left(\frac{h}{2} - h_{at} \right)^2}{1/12 b h^3} + \frac{1}{b h} \right] \frac{E_r A_{rt}}{E_w}. \quad (8)$$

式中: h_{at} 为受拉筋材合力点到木材受拉区边缘的距离; F_{pe} 为受拉区预应力筋的有效张拉力。

以截面受拉区边缘木材纤维的最大应变 ϵ_{wt} 、木材受压区高度 h_c 为基本未知量, 由平截面假定, 结合图 2, 文献[22]给出了应变关系式(9)~(12):

$$\epsilon_{wce} = \frac{h_c}{h - h_c} \epsilon_{wt}, \quad (9)$$

$$\epsilon_{wcy} = \frac{h_c - h_p}{h - h_c} \epsilon_{wt} \Rightarrow h_p = h_c \left(\frac{\epsilon_{wcy}}{\epsilon_{wt}} + 1 \right) - \frac{h \epsilon_{wcy}}{\epsilon_{wt}}, \quad (10)$$

$$\epsilon_{rc} = \frac{h_c - h_{ac}}{h - h_c} \epsilon_{wt}, \quad (11)$$

$$\epsilon_{rt} = \frac{h - h_{at} - h_c}{h - h_c} \epsilon_{wt}. \quad (12)$$

式中: h_p 为木材的受压塑性区高度; h_{ac} 为受压筋材合力点到木材受压区边缘的距离; b 、 h 分别为预应力胶合木梁的宽度和高度。

为了求解方程(1)中包含的两个基本未知量 ϵ_{wt} 、 h_c , 显然还需补充一个条件:

$$\epsilon_{wce} = \epsilon_{wcu}, \quad (13)$$

或

$$\epsilon_{wt} = \epsilon_{wtu} = \alpha_m \epsilon_{wmu}. \quad (14)$$

式(13)(14)分别对应截面受压区边缘木材纤维达到极限压应变、受拉区边缘木材纤维达到极限拉应变, 即分别对应受压、受拉破坏模式。

由此, 可以解得两种破坏模式下的木材受压区高度 h_c , 继而由式(2)~(6)求解出各个合力。

然后, 由截面上的内力、外力矩之和等于零, 对中和轴取矩, 则极限承载力 M_u 可由式(15)导出:

$$M_u = F_{rc} d_{rc} + F_{rt} d_{rt} + F_{wce} d_{wce} + F_{wcp} d_{wcp} + F_{wt} d_{wt} \quad (15)$$

式中: d_{rc} 为受压筋材的内力臂; d_{rt} 为受拉筋材的内力臂; d_{wt} 为木材受拉区合力点的内力臂; d_{wce} 为木材弹性受压区合力点的内力臂, 具体计算方法见式(16)~(19)^[18,22]:

$$d_{rc} = h_c - h_{ac}, \quad (16)$$

$$d_{rt} = h - h_{at} - h_c, \quad (17)$$

$$d_{wce} = \frac{2}{3} (h_c - h_p), \quad (18)$$

$$d_{wt} = \frac{2}{3} (h - h_c), \quad (19)$$

$$d_{wcp} = h_c - \frac{m \epsilon_{wce} + (3-m) \epsilon_{wcy}}{3 [m \epsilon_{wce} + (2-m) \epsilon_{wcy}]} h_p. \quad (20)$$

式(15)中的 d_{wcp} 为木材受压塑性区合力点的内力臂, 表达式列于式(20). 本文在文献[22]的基础上对其进行修正, 按应力图形的重心位置推导得到。

1.3 破坏模式的判别

从整个求解过程来看, 通过补充条件式(13)(14)可以求解出两组受压区高度 h_c , 从而确定两种截面的应变分布, 分别求解出各个区域的合力以及内力臂后, 再由式(15)可以得到受拉破坏模式下的极限承载力 M_{tt} 和受压破坏模式下的极限承载力 M_{cf} 这两组解。

然而, 对于给定的体内预应力胶合木梁, 其破坏模式、极限抗弯承载能力应唯一确定. 即 M_{tt} 、 M_{cf} 中有一个是不切实际的。

已有研究, 如文献[18]、文献[22]是通过直接比较 M_{tt} 和 M_{cf} 的大小来确定破坏模式和极限承载力, 并认为真实的承载力为二者中较小的值, 即:

$$M_u = \min \{M_{cf}, M_{tt}\}. \quad (21)$$

但本文经研究发现,这种方法在木材的极限压应变 ϵ_{wcu} 相对于屈服压应变 ϵ_{wcy} 较大时有一定的弊端,本文用如下算例说明。

【算例】某体内预应力胶合木梁,仅在受拉区配置筋材,木梁截面尺寸 $b \times h = 75 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,其余数据如下:

1) 胶合木(花旗松)相关数据:

$$E_w = 12\,500 \text{ MPa}, m = -0.25, \epsilon_{wcy} = 0.30\%, \\ \epsilon_{wtu} = \alpha_m \cdot \epsilon_{wmu} = 1.3 \times 0.25\% = 0.325\%, \epsilon_{wcu} = 1.2\%^{[25]}.$$

2) 预应力筋(CFRP)相关数据:

$$E_r = 165\,000 \text{ MPa}, A_{rt} = 200 \text{ mm}^2, F_{pe} = 50 \text{ kN}, \\ h_{at} = 20 \text{ mm}.$$

计算结果见表1。

表1 破坏模式判别

Tab.1 Failure mode identification

计算破坏模式	$\epsilon_{wc} / \%$	$\epsilon_{wcu} / \%$	$\epsilon_{wt} / \%$	$\epsilon_{wtu} / \%$	$M_u / (\text{kN} \cdot \text{m})$
受拉破坏	0.496	1.20	0.325	0.325	67.93
受压破坏	1.20	1.20	0.459	0.325	58.37

由表1可得,此算例受压破坏模式下的抗弯承载能力 $M_{cf} = 58.37 \text{ kN} \cdot \text{m}$,受拉破坏模式下的抗弯承载能力 $M_{tf} = 67.93 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $M_{cf} < M_{tf}$,按已有研究中的算法——式(21)判断破坏模式即为受压破坏。

但是,本例中受压破坏模式下,截面受拉区边缘木材纤维的最大应变 $\epsilon_{wt} = 0.459\%$,大于其极限拉应变 $\epsilon_{wtu} = 0.325\%$,显然这并不可能发生。真实的破坏模式应为受拉破坏。可以看出,已有研究提供的算法在极限状态下的最大应变产生了不协调,并造成了对破坏模式的误判。

为克服上述缺陷,本文提出将最大应变不超过极限应变加入上述算法中,具体如下:当根据式(1)~(13)计算受压破坏模式时,为确保求解结果有真实的物理意义,在利用式(15)确定承载能力之前,还应补充应变约束条件,保证截面受拉区边缘木材纤维的最大拉应变不大于其极限拉应变,即:

$$\epsilon_{wt} \leq \epsilon_{wtu}. \quad (22)$$

同理,由式(1)~(12)和式(14)计算受拉破坏模式时,还应保证截面受压区边缘木材纤维的最大压应变不大于其极限压应变,即:

$$\epsilon_{wc} \leq \epsilon_{wcu}. \quad (23)$$

例如,按本文给出的算法计算上述算例时,由于

应变约束条件式(22)的限制,受压破坏模式求解结果为空值,因此不再需要计算相应的承载能力;而受拉破坏模式下的解满足应变约束条件,由式(15)得到 $M_{tf} = 67.93 \text{ kN} \cdot \text{m}$,也就是真实的承载力。

综上所述,本文提出了通过引入应变约束条件的方法来进行破坏模式的判别以及后续的承载力的计算,解决了已有研究算法中极限状态下最大应变不协调,以及破坏模式误判的问题。

本文将在第2.1节研究极限承载能力与有效张拉力关系之后,在第2.3节提供另一种更为简单、方便的方法:通过有效张拉力与界限有效张拉力的大小关系,来预先判断破坏模式。

1.4 抗弯承载能力算例

将文献[18]和[22]中实测的构件尺寸、胶合木(花旗松)及筋材(FRP或钢筋)的相关材性指标和实测的有效张拉力代入本文提出的公式,计算各组试验中预应力胶合木梁的极限抗弯承载能力 M_u ,并与试验值进行对比,结果见表2。

表2 抗弯承载能力计算值与试验值对比

Tab.2 Comparison of calculated value and experimental value of flexural capacity

试验数据来源	试验编号	计算破坏模式	计算值 / ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	实验值 / ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	误差 / %
文献[18]	GR0.5	受拉破坏	53.03	53.8	-1.43
文献[18]	GR1.0	受拉破坏	55.31	54.5	1.49
文献[18]	GR1.8	受拉破坏	57.66	61.8	-6.71
文献[18]	GR1.8+0.5	受拉破坏	60.99	64.8	-5.89
文献[18]	SR1.8	受压破坏	71.93	69.8	3.05
文献[18]	SR1.0	受拉破坏	63.59	64.0	-0.64
文献[18]	GP0.27	受拉破坏	53.31	47.4	12.47
文献[18]	GP0.53	受拉破坏	55.80	55.0	1.45
文献[18]	GP0.8	受拉破坏	58.28	53.6	8.72
文献[18]	GP0.53+0.27	受拉破坏	58.06	54.3	6.93
文献[18]	CP0.67	受拉破坏	63.17	58.4	8.17
文献[18]	CP-V0.33	受拉破坏	60.05	64.6	-7.04
文献[18]	CP-V0.66	受压破坏	65.91	75.5	-12.71
文献[18]	CP-V0.99	受压破坏	70.98	71.4	-0.59
文献[18]	CP-V0.66+0.66	受压破坏	79.72	73.3	8.76
文献[22]	C	受拉破坏	34.50	35.3	-2.27
文献[22]	R11	受拉破坏	52.49	58.3	-9.96
文献[22]	P16	受压破坏	67.61	68.3	-1.02
文献[22]	P16R11	受压破坏	76.21	81.5	-6.49

注:表中列出的计算破坏模式与文献[18]、文献[22]中定性描述的构件破坏形态一致。

由表 2 可见,本文提出的基于 Bazan 本构关系的体内预应力胶合木梁的抗弯承载能力理论计算结果与试验值吻合较好。

2 有效张拉力的确定

2.1 极限承载能力与有效张拉力的关系

本文根据文献[22]中的试验数据,基于前文提出的理论公式,对一组典型的预应力胶合木梁(仅在受拉区配置筋材,试验编号 P16)进行有效张拉力的参数分析。

1) 按照实测数据,取 $\epsilon_{wcu} = 0.47\%$, $m = -0.25$, 得到 $M_u - F_{pe}$ 关系曲线,如图 3 所示。

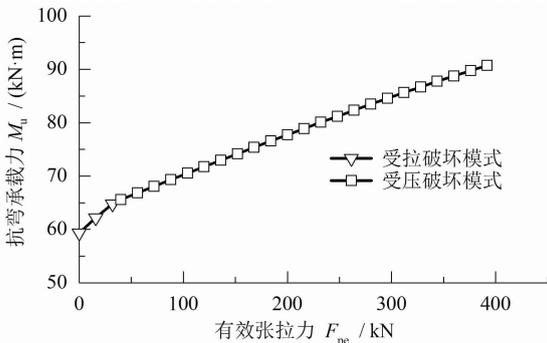


图 3 $\epsilon_{wcu} = 0.47\%$, $m = -0.25$ 时 M_u 与 F_{pe} 关系曲线
Fig. 3 $M_u - F_{pe}$ curve at $\epsilon_{wcu} = 0.47\%$, $m = -0.25$

可以发现,①当 F_{pe} 较小时,破坏模式为受拉破坏,随着 F_{pe} 的增加,到某一临界值时,破坏模式转变为受压破坏;②承载能力 M_u 随着有效张拉力 F_{pe} 的增大而增大. 这些结论均与试验现象一致。

2) 假设木材的极限压应变 $\epsilon_{wcu} = 1.2\%$, 其余参数保持与 1) 中一致,可得到图 4 所示的 $M_u - F_{pe}$ 关系曲线。

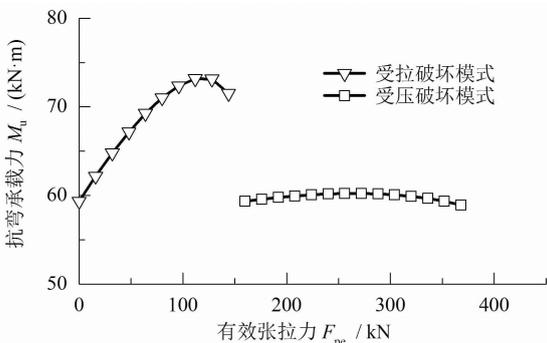


图 4 $\epsilon_{wcu} = 1.2\%$, $m = -0.25$ 时 M_u 与 F_{pe} 关系曲线
Fig. 4 $M_u - F_{pe}$ curve at $\epsilon_{wcu} = 1.2\%$, $m = -0.25$

可以发现,①当 F_{pe} 较小时,破坏模式为受拉破坏,随着 F_{pe} 的增加,承载能力先增加,后减小;②当

F_{pe} 较大时,破坏模式为受压破坏,承载能力基本不变. 这与 1) 中的现象差别很大。

这主要是因为,木材的受压区存在着下降段,即 $m < 0$, 且木材的极限压应变 ϵ_{wcu} 相对屈服压应变 ϵ_{wey} 较大. 当有效张拉力 F_{pe} 较大时,木材受压区塑性得到发展,受压区合力增加的同时,内力臂在减小,且内力臂减小的作用大于合压力增大的作用,综合效应使得截面抵抗的弯矩减小。

3) 取 $\epsilon_{wcu} = 1.2\%$, 并假设 $m = 0$, 可以得到图 5 所示的 $M_u - F_{pe}$ 关系曲线。

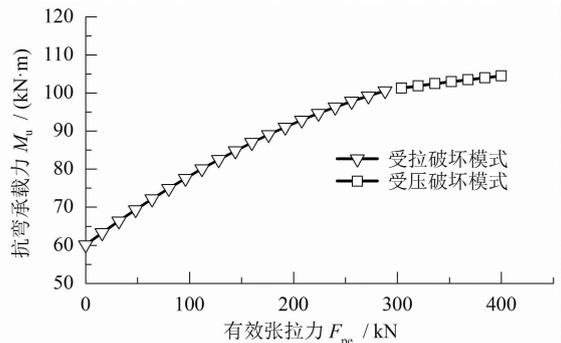


图 5 $\epsilon_{wcu} = 1.2\%$, $m = 0$ 时 M_u 与 F_{pe} 关系曲线
Fig. 5 $M_u - F_{pe}$ curve at $\epsilon_{wcu} = 1.2\%$, $m = 0$

结合图 4 和图 5 可以发现,木材顺纹受压本构关系是影响抗弯承载能力与有效张拉力关系的重要因素. 如果木材受压区为理想的弹塑性材料(即 $m = 0$), 即便是 ϵ_{wcu} 很大的情况下,提高有效张拉力也可以进一步提高抗弯承载能力。

4) 假定 $\epsilon_{wcu} = 1.2\%$, $m = -0.25$, 在受压区配置筋材,配筋面积 $A_{rc} = 95 \text{ mm}^2$ 时 $M_u - F_{pe}$ 关系曲线如图 6 所示。

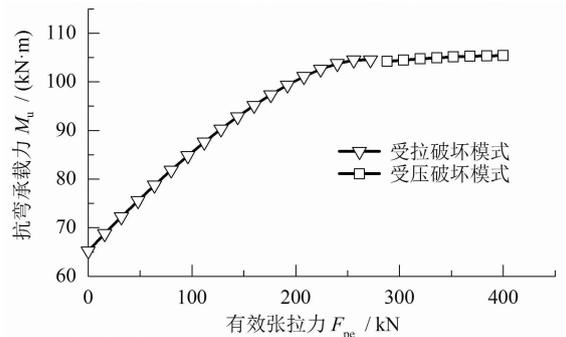


图 6 $\epsilon_{wcu} = 1.2\%$, $m = -0.25$, $A_{rc} = 95 \text{ mm}^2$ 时 M_u 与 F_{pe} 关系曲线
Fig. 6 $M_u - F_{pe}$ curve at $\epsilon_{wcu} = 1.2\%$, $m = -0.25$, $A_{rc} = 95 \text{ mm}^2$

由图 6 可知,当在受压区配置一定量的筋材时,即便是 ϵ_{wcu} 很大的情况下,增大有效张拉力也可以

进一步提高抗弯承载能力。

综上所述,有效张拉力的大小是影响体内预应力胶合木梁弯曲破坏模式的决定性因素,且木材顺纹受压本构关系曲线下降段的力学性能参数是影响体内预应力胶合木梁抗弯承载能力与有效张拉力关系的重要因素:当 ϵ_{wcu} 相比于 ϵ_{wcy} 很大,且 $m < 0$ 时,承载能力先随有效张拉力的增加而增加,然后随着有效张拉力的增加而减小,最终随着有效张拉力的增加基本稳定,保持不变;当 ϵ_{wcu} 相比于 ϵ_{wcy} 不是很大,或 $m \geq 0$,或者在受压区配置一定数量的筋材时,承载能力随有效张拉力的增加而增加。

2.2 承载能力极限状态下预应力筋内力与有效张拉力的关系

通过大量算例计算表明,在受拉和受压破坏模式下,承载能力极限状态下的预应力筋内力 F_{rt} 均与有效张拉力 F_{pe} 近似呈线性关系,且 F_{pe} 越大, F_{rt} 就越大,如图7所示。现对此现象分析如下。

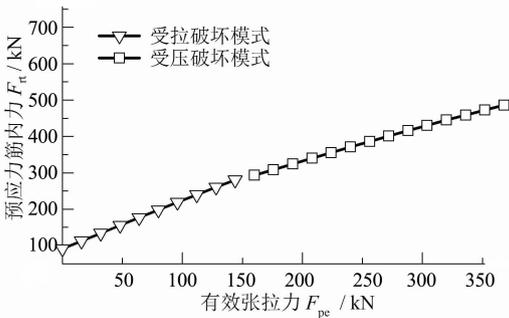


图7 F_{rt} 与 F_{pe} 关系曲线

Fig.7 F_{rt} - F_{pe} curve

2.2.1 受拉破坏模式

由式(6)可知,预应力筋的应变由两部分组成:从张拉到消压状态的应变 ϵ_{p0} 、从消压状态到极限状态的应变 ϵ_{rt} 。显然 ϵ_{p0} 正比于 F_{pe} 。受拉破坏模式下,木材的受拉边缘应变达到极限拉应变 ϵ_{wtu} ,而预应力筋一般距离受拉边缘较近,相比较于梁高,可基本认为 $\epsilon_{rt} \approx \epsilon_{wtu}$,两项叠加,从而预应力筋的总应变与有效张拉力近似呈线性关系。所以, F_{rt} 与 F_{pe} 近似呈线性关系。

2.2.2 受压破坏模式

一方面,受压破坏模式下, F_{pe} 已经足够大,即 ϵ_{rt} 相比于 ϵ_{p0} 很小, F_{rt} 主要取决于 ϵ_{p0} ,因此,可以近似认为, F_{rt} 与 F_{p0} 呈线性关系。

另一方面,通过联立式(1)~(13),可得到受压破坏模式下预应力筋在承载能力极限状态下的内力

表达式(24)。

$$F_{rt} = a_1 \left[a_2 \sqrt{a_3 + (a_8 - a_9 F_{pe})^2} - a_4 + a_5 F_{pe} \right]. \quad (24)$$

式中: $a_1 \sim a_5$, $a_8 \sim a_9$ 均为与 F_{pe} 无关的常量,具体表达式见式(25)。

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{bE_w \epsilon_{wcu} h^3 [2A_{rc} E_r h_{ac} + 2A_{rt} E_r (h - h_{at}) + bE_w h^2]}, \\ a_2 &= A_{rt} E_r (h_{at} - h) \epsilon_{wcu}, \\ a_3 &= b^3 E_w^3 h^6 (m - 1) (\epsilon_{wcu} - \epsilon_{wcy})^2 \cdot \\ &\quad [2A_{rc} E_r h_{ac} + 2A_{rt} E_r (h - h_{at}) + bE_w h^2], \\ a_4 &= A_{rt} b E_r E_w \epsilon_{wcu}^2 h^3 \cdot \\ &\quad [A_{rc} E_r (-h + 2h_{ac} + h_{at}) + A_{rt} E_r (h - h_{at}) + bE_w h h_{at}], \\ a_5 &= [4A_{rt} E_r (h^2 - 3hh_{at} + 3h_{at}^2) + bE_w h^3] \cdot \\ &\quad [2A_{rc} E_r h_{ac} + A_{rt} E_r (h - h_{at}) + bE_w h^2] \epsilon_{wcu}, \\ a_6 &= 4(h^2 - 3hh_{at} + 3h_{at}^2), \\ a_7 &= A_{rc} E_r \epsilon_{wcu} + bE_w \epsilon_{wcu} h, \\ a_8 &= bE_w h^3 a_7 + A_{rt} E_r bE_w \epsilon_{wcu} h^3, \\ a_9 &= bE_w h^3 + A_{rt} E_r a_6. \end{aligned} \quad (25)$$

由式(24)可以发现, F_{rt} 与 F_{pe} 的非线性关系体现在式(26)中:

$$\sqrt{a_3 + (a_8 - a_9 F_{pe})^2} = \sqrt{a_3 + a_8^2 - 2a_8 a_9 F_{pe} + a_9^2 F_{pe}^2}. \quad (26)$$

大量算例计算分析表明,上式中的 $a_9^2 F_{pe}^2$ 项相比较于其他项为小量,所以上式可进一步近似处理为式(27):

$$\sqrt{a_3 + a_8^2 - 2a_8 a_9 F_{pe} + a_9^2 F_{pe}^2} \approx \sqrt{a_3 + a_8^2 - 2a_8 a_9 F_{pe}}. \quad (27)$$

同样,上式中 F_{pe} 项相比较于常数项为小量,因此可得到式(28):

$$\begin{aligned} \sqrt{a_3 + a_8^2 - 2a_8 a_9 F_{pe}} &= \sqrt{a_3 + a_8^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{2a_8 a_9 F_{pe}}{a_3 + a_8^2}} \approx \\ &\sqrt{a_3 + a_8^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{2a_8 a_9 F_{pe}}{a_3 + a_8^2} \right) = \\ &\sqrt{a_3 + a_8^2} \cdot \left(1 - \frac{a_8 a_9 F_{pe}}{a_3 + a_8^2} \right). \end{aligned} \quad (28)$$

将上述得到的近似关系式(27)和(28)代入式(24),可得到受压破坏模式下预应力筋在承载能力极限状态下的近似内力表达式(29)。

$$F_{rt} = a_1 \left[a_2 \sqrt{a_3 + a_8^2} - a_4 + \left(a_5 - \frac{a_2 a_8 a_9 \sqrt{a_3 + a_8^2}}{a_3 + a_8^2} \right) F_{pe} \right]. \quad (29)$$

由此,受压破坏模式下, F_{rt} 与 F_{pe} 近似呈线性关

系的性质得到证明。

2.3 界限张拉力(下限)

为了充分利用木材的抗压性能,本文定义有效张拉力 F_{pe} 的下限值,为受拉破坏和受压破坏临界状态对应的有效张拉力 $F_{pe,cr}$ 。

以木材受压区高度 h_c 和 F_{pe} ($F_{pe,cr}$) 为基本未知量,只需联立式(1)~(14),即可解出:

$$F_{pe,cr} = \frac{E_w bh}{2k(\epsilon_{wtu} + \epsilon_{wcu})} \cdot [2\epsilon_{wcu}\epsilon_{wcy} - \epsilon_{wcy}^2 - \epsilon_{wtu}^2 + m(\epsilon_{wcu} - \epsilon_{wcy})^2] + \frac{E_r A_{rc}}{hk} \cdot [h\epsilon_{wcu} - h_{ac}(\epsilon_{wtu} + \epsilon_{wcu})] - \frac{E_r A_{rt}}{hk} \cdot [h\epsilon_{wtu} - h_{at}(\epsilon_{wtu} + \epsilon_{wcu})]. \quad (30)$$

当仅在受拉区配置筋材即 $A_{rc} = 0$ 时,上式可简化为:

$$F_{pe,cr} = \frac{E_w bh}{2k(\epsilon_{wtu} + \epsilon_{wcu})} \cdot$$

$$F_{pe,y} = \frac{E_r A_{rt}}{(2E_r A_{rc} h_{ac} + E_w bh^2) \cdot k} \cdot (h_{at} - h) \cdot$$

$$\sqrt{(m-1)E_w b(\epsilon_{wcu} - \epsilon_{wcy})^2 (2E_r A_{rc} h_{ac} + E_w bh^2) + [E_r A_{rt}\epsilon_{rt} - (E_r A_{rc} + E_w bh)\epsilon_{wcu}]^2} + [2E_r A_{rc} h_{ac} + E_r A_{rt}(h - h_{at}) + E_w bh^2]\epsilon_{rt} + [E_r A_{rc}(2h_{ac} + h_{at} - h) + E_w bh h_{at}]\epsilon_{wcu}. \quad (33)$$

当仅在受拉区配置筋材即 $A_{rc} = 0$ 时,上式可简化为:

$$F_{pe,y} = \frac{E_r A_{rt}}{E_w bh^2 k} \cdot E_r A_{rt}(h - h_{at})\epsilon_{rt} +$$

$$E_w bh(h_{at}\epsilon_{wcu} + h\epsilon_{rt}) - (h - h_{at}) \cdot$$

$$\sqrt{(m-1)E_w b^2 h^2 (\epsilon_{wcu} - \epsilon_{wcy})^2 + [E_r A_{rt}\epsilon_{rt} - E_w bh\epsilon_{wcu}]^2}. \quad (34)$$

由2.2节分析可知,当有效张拉力小于屈服张拉力 $F_{pe,y}$ 时,承载能力极限状态下预应力筋不会屈服,反之预应力筋则会屈服。

3 结论

本文根据国内外发表的相关文献资料,基于Bazan的木材本构关系模型,对体内预应力胶合木梁的抗弯承载能力进行了相关理论研究,主要结论如下:

1)在文献[22]的基础上进一步修正了体内预应力胶合木梁抗弯承载能力的计算公式,完善了判断其受压破坏模式或受拉破坏模式的方法.算例表明,本文给出的计算公式精度较高,计算结果与试验值

$$[2\epsilon_{wcu}\epsilon_{wcy} - \epsilon_{wcy}^2 - \epsilon_{wtu}^2 + m(\epsilon_{wcu} - \epsilon_{wcy})^2] - \frac{E_r A_{rt}}{hk} \cdot [h\epsilon_{wtu} - h_{at}(\epsilon_{wtu} + \epsilon_{wcu})]. \quad (31)$$

由2.1节分析可知,当有效张拉力小于界限张拉力 $F_{pe,cr}$ 时,破坏模式为受拉破坏,反之则为受压破坏.因此,可按此方法直接判断破坏模式,这比1.3节中提供的判别方式更为简单、方便。

2.4 屈服张拉力(上限)

为充分发挥预应力筋的作用,定义有效张拉力的上限值为极限状态下预应力筋刚好屈服时对应的有效张拉力 $F_{pe,y}$ 。

一般而言,此时对应的破坏模式为受压破坏,因此,以木材受压区高度 h_c 和 F_{pe} ($F_{pe,y}$) 为基本未知量,联立式(1)~(13),再补充条件:

$$F_{rt} = E_r A_{rt} \epsilon_{rt}. \quad (32)$$

式中: ϵ_{rt} 为预应力筋材的屈服应变.由此即可求解出:

吻合较好。

2)木材顺纹受压本构关系曲线下降段的力学性能参数是影响体内预应力胶合木梁抗弯承载能力与有效张拉力关系的重要因素:当 ϵ_{wcu} 相比于 ϵ_{wcy} 很大,且 $m < 0$ 时,承载能力先随有效张拉力的增加而增加,然后随着有效张拉力的增加而减小,最终随着有效张拉力的增加基本稳定,保持不变;当 ϵ_{wcu} 相比于 ϵ_{wcy} 不是很大,或 $m \geq 0$,或在受压区配置一定数量的筋材时,承载能力随有效张拉力的增加而增加。

3)受拉和受压破坏模式下,承载能力极限状态下的预应力筋内力和有效张拉力均近似呈线性关系。

4)定义了有效张拉力的上、下限值,分别对应:承载能力极限状态下预应力筋刚好屈服、受拉破坏与受压破坏同时发生.并给出了有效张拉力上、下限值解析解的表达形式,为确定合理的有效张拉力提供了理论基础。

参考文献

- [1] BULLEIT W M, SANDBERG L B, WOODS G J. Steel-reinforced glued laminated timber[J]. Journal of Structural Engi-

- neering, 1989, 115(2):433-444.
- [2] GARDNER G P, EATON R D. Reinforced laminated timber: US5050366[P]. 1991-09-24.
- [3] O'BRIEN M E. Reinforced laminated wood: US5026593[P]. 1991-06-25.
- [4] 庄荣忠, 杨勇新. FRP加固木结构的研究和应用现状[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(5): 89-92.
ZHUANG R Z, YANG Y X. Research and application on FRP in the reinforcement of timber structures[J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(5): 89-92. (In Chinese)
- [5] PLEVRIS N, TRIANTAFILLOU T C. FRP-reinforced wood as structural material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1992, 4(3):300-317.
- [6] 马建勋, 蒋湘闽, 胡平, 等. 碳纤维布加固木梁抗弯性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 35-39.
MA J X, JIANG X M, HU P, *et al.* Experimental study on bending behavior of timber beams reinforced with CFRP sheets [J]. Industrial Construction, 2005, 35(8): 35-39. (In Chinese)
- [7] GENTILE C, SVECOVA D, RIZKALLA S H. Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications [J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(1):11-20.
- [8] 祝金标, 王柏生, 王建波. 碳纤维布加固破损木梁的试验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(10): 86-89.
ZHU J B, WANG B S, WANG J B. Experimental study of strengthened damaged wood beams with CFRP[J]. Industrial Construction, 2005, 35(10): 86-89. (In Chinese)
- [9] BOHANNAN B. Prestressed wood members[J]. Forest Products Journal, 1962, 12(12): 596-602.
- [10] PERSON J. Wood beams prestressed with bonded tension elements[J]. Journal of the Structural Division, 1965, 91(1): 103-120.
- [11] TRIANTAFILLOU T C, DESKOVIC N. Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(5): 1270-1284.
- [12] PLEVRIS N, TRIANTAFILLOU T C. FRP-reinforced wood as structural material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1992, 4(3): 300-317.
- [13] DOLAN C W, GALLOWAY T L, TSUNEMORI A. Prestressed glued-laminated timber beam-pilot study[J]. Journal of Composites for Construction, 1997, 1(1): 10-16.
- [14] GALLOWAY T L, FOGSTAD C, DOLAN C W, *et al.* Initial tests of kevlar prestressed timber beams[C]//Proceedings of National Conference on Wood Transportation Structures. Madison, WI: Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, 1996:215-224.
- [15] BORRI A, CORRADI M, GRAZINI A. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials[J]. Composites Part B: Engineering, 2005, 36(2): 143-153.
- [16] DE LUCA V, MARANO C. Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars[J]. Construction and Building Materials, 2012, 30: 206-217.
- [17] 林诚, 杨会峰, 刘伟庆, 等. 预应力胶合木梁的受弯性能试验研究[J]. 结构工程师, 2014, 30(1): 160-164.
LIN C, YANG H F, LIU W Q, *et al.* Experimental study on the flexural behavior of prestressed glulam beams[J]. Structural Engineers, 2014, 30(1): 160-164. (In Chinese)
- [18] YANG H F, LIU W Q, LU W D, *et al.* Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: experimental and theoretical evaluation[J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 550-563.
- [19] MCCONNELL E, MCPOLIN D, TAYLOR S. Post-tensioning of glulam timber with steel tendons[J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 426-433.
- [20] JOHNSON H, BLANKSVÄRD T, CAROLIN A. Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement[J]. Materials and Structures, 2007, 40(1): 47-56.
- [21] YUSOF A, SALEH A L. Flexural strengthening of timber beams using glass fibre reinforced polymer [J]. Electronic Journal of Structural Engineering, 2010, 10: 45-56.
- [22] YANG H F, JU D D, LIU W Q, *et al.* Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars[J]. Construction & Building Materials, 2016, 109: 73-83.
- [23] 樊承谋. 张盛东, 陈松来, 等. 木结构基本原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008:63-64.
FAN C M, ZHANG S D, CHEN S L, *et al.* Basic principle of timber structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 63-64. (In Chinese)
- [24] MALHOTRA S K, BAZAN I M M. Ultimate bending strength theory for timber beams[J]. Wood Science, 1980, 13(1):50-63.
- [25] LINDYBERG R F, DAGHER H J. ReLAM: nonlinear probabilistic model for the analysis of reinforced glulam beams in bending[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(6): 777-788.