

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020037

基于 SAP2000 分析的预应力胶合木连续梁 调控效果

郭楠, 张启珩, 吴亦丹, 郭欣怡, 张潍, 魏嘉凝

(东北林业大学土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)



摘要: 为了充分利用胶合木的抗压强度, 常在梁中施加预应力, 但受反拱幅度等影响, 施加预应力需控制在合理范围内。通过 SAP2000 有限元程序建立分析模型, 与试验结果对比验证其可行性后, 对 8 种调控幅度的梁进行分析, 得到荷载-挠度曲线、梁截面应力云图、极限承载力及合理调控范围。结果表明, 调控幅度为极限荷载的 18%~48% 时, 极限荷载增大 3.65%~58.1%, 胶合木连续梁的承载力基本呈线性增加; 调控幅度为 54% 时, 梁因破坏形态发生改变承载力开始下降。预应力胶合木连续梁的合理调控范围为极限荷载的 24%~42%。

关键词: 胶合木连续梁; 预应力调控; 有限元分析; 极限荷载

中图分类号: TU531.2; TU366.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2021) 02-0042-07

Study on the Prestressed Control for Glulam Continuous Beams Using SAP2000

GUO Nan, ZHANG Qi-hui, WU Yi-dan, GUO Xin-yi, ZHANG Wei, WEI Jia-ning

(College of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to take full advantage of the compressive strength of glulam, prestress is often applied on the beam. However, due to the influence of the arch amplitude and other reasons, the range of prestress can't be overly large, which will limit the full strength of the glulam and prestressed steel. For this reason, this study investigated the method of prestressed control of the glulam continuous beam. The finite element analysis model was generated using the SAP2000 program. The computer model was compared with the experimental results to verify the feasibility of the method. The load-deflection relation curve, the stress cloud diagram of beam section, the ultimate bearing capacity, and the reasonable control range of 8 beams with different control amplitudes were analyzed. The results show that when the control range is at 18%~48% of the ultimate load, the ultimate load increases by 3.65%~58.1%. At the same time, the bearing capacity of the glulam continuous beam increases linearly. When the range of control was over 54%, due to the change of failure mode, the bearing capacity of the beams began to decline. Finally, the reasonable control range of the prestressed glulam continuous beam is approximately 24%~42% of the ultimate load.

Key words: glulam continuous beam; prestressed control; finite element analysis; ultimate load

收稿日期: 2020-03-16; 修改日期: 2020-05-06

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目“基于调控影响的应力胶合木连续梁受力性能研究”(LH2019E005); 黑龙江省博士科研启动金项目“可调控预应力胶合木梁短期受力性能及其设计理论研究”(LBH-Q16011)。

作者简介: 郭楠 (1978—), 男, 教授。Email: snowguonan@163.com

胶合木作为现代木结构的主要结构用材,弥补了原木截面尺寸受限、缺陷集中、可用强度较低等缺点。然而普通胶合木梁受弯时变形较大,常发生因梁底木材拉断而导致的整体脆性破坏,使胶合木梁的抗压性能得不到充分发挥。对胶合木梁施加反向预应力是避免其过早破坏的有效手段。目前,施加预应力主要有两种手段:

一是通过张拉预应力筋来施加预应力^[1-2]。在胶合木上、下表面开槽,放入钢筋和树脂胶形成组合梁,拧紧下部钢筋端部的螺丝帽来施加预应力,ANSYS有限元分析结果表明^[3-5],组合梁的强度、刚度和延性均比普通胶合木梁显著提高。二是预弯法,通过张拉纤维材料^[6-9],加固玻璃纤维或利用木材的湿胀特性^[10]施加预应力。有限元分析可知,通过预压形成反拱的胶合木梁,比普通胶合木梁的受弯性能明显提高^[11]。

对胶合木梁施加预应力后,梁产生反拱变形,梁顶部的拉应力需小于其抗拉强度,需合理调控预应力的的大小。鉴于此,笔者提出在胶合木梁中施加预应力的理念,将胶合木的受力状态从纯弯转化为压弯,通过丝扣拧张横向张拉法对胶合木梁施加预应力,并将此方法从简支梁推广到连续梁^[1]。针对这种预应力施加装置,进而提出了一种对预应力进行调控的方法,即先施加一定程度的外荷载,然后通过调控的方式施加预应力,在预应力调控的过程中把原来由木材承受的部分荷载分配给了预应力筋,相当于完成了一次内力重分配,进而实现木材强度的反复利用,以及对高强预应力筋的充分利用,获得更大的承载力。

预应力胶合木梁的承载力、刚度可通过四点弯曲实验计算^[5,12]。SAP2000有限元软件建模方便、荷载计算功能强、三维结构整体性能分析精度高、后处理速度快,故采用SAP2000程序建模。通过未调控组胶合木梁试验与有限元分析模型所得数据做对比,验证有限元分析有效性的基础之上,对不同调控幅度的八组工况进行有限元分析,通过破坏时刻的应力云图、承载力和变形情况,评价调控程度对梁受力性能的影响,为此类构件在工程应用中的推广提供技术支撑。

1 胶合木连续梁的设计与加载试验

1.1 胶合木连续梁的设计

按1:2的几何缩尺比例制作预应力胶合木张弦连续梁。采用云杉(*Picea asperata* Mast)制备成4层规格为6160 mm×80 mm×100 mm的胶合木连续梁;胶黏剂为日本光洋胶-邦尼达实木胶;冷压压力为10~12 MPa。预应力施加采用丝扣拧张横向张拉^[1]的方式,如图1所示,采用直径为7 mm的1570级预应力钢丝。

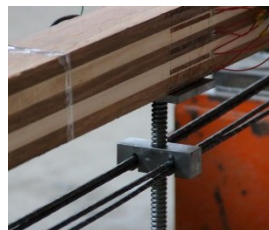


图1 丝扣拧张横向张拉装置

Fig.1 Screw thread tensioning transverse tensioning device

端部连接装置由梁顶盖板、倒T形连接件、梁侧加劲板、锚具、转向承压轮和对接螺栓等部件组成,如图2a所示。

将单跨的胶合木置于倒T形连接件和梁侧加劲板所形成的凹槽内,梁顶放置盖板,通过水平对接螺栓,将胶合木与端部连接件连成整体,形成连续梁(图2b)。预应力筋布于梁侧,通过转向承压轮,控制线型并锚固在锚具中。中间支座处,锚具与倒T形连接件的竖向板连接,形成从预应力筋至锚具再至倒T形连接件竖板的传力路径;边支座处,锚具与梁端钢垫板通过预应力筋相连。所布置预应力筋线型与连续梁的弯矩图相接近,梁的受力更合理,故不会产生支座弯矩。在中间支座处,由胶合木和倒T形连接件底板受压承担负弯矩,在梁跨中由胶合木受压承担正弯矩。

1.2 加载试验装置

通过千斤顶在左右两跨梁的跨中施加集中荷载。为防止木梁局部受压破坏,在梁支座处和千斤顶下设置厚度为10 mm的钢垫板,并在千斤顶钢垫板下设置弧形木垫块;为测量支座处位移及跨中挠度,在梁的支座处及跨中部位均放置位移计。加载时,通过力传感器控制荷载的大小,试验设计如图3所示。

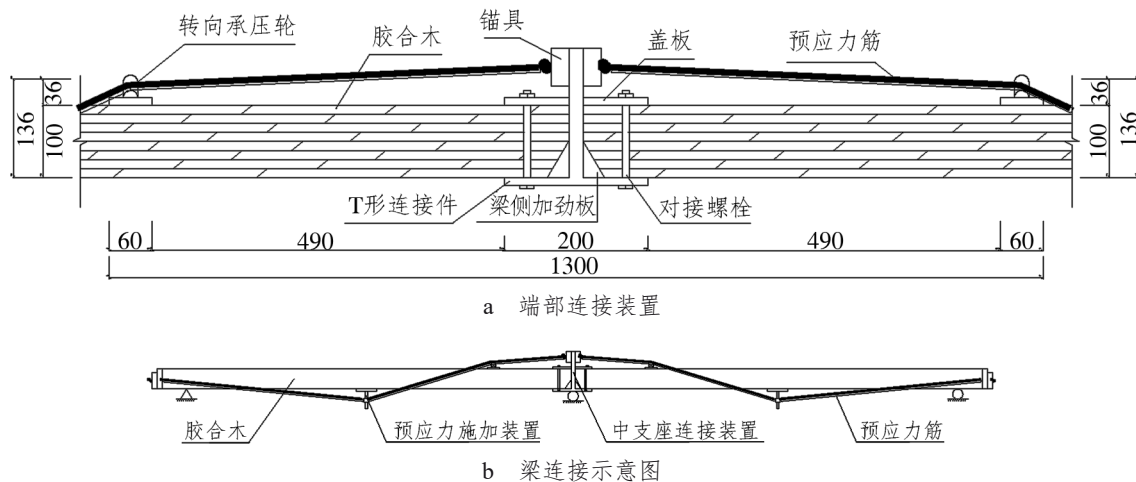
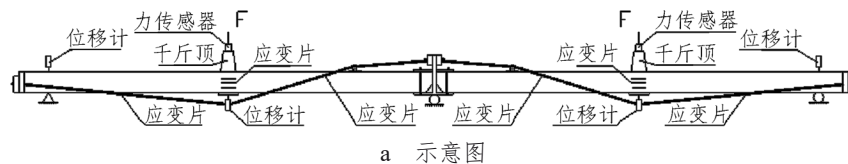


图2 预应力胶合木连续梁

Fig.2 Schematic diagram of the prestressed glulam continuous beam



a 示意图



b 实物图

图3 试验设计装置

Fig.3 Experimental design device

1.3 胶合木连续梁的极限载荷及破坏形式

对未调控的两组胶合木连续梁进行加载。初期力控制阶段为加载值达到预估极限荷载前50%，每级加载值取预估极限荷载大小的10%；中期力控制阶段为加载值在预估极限荷载的50%~75%，每级加载值取预估极限荷载大小的5%；末期位移控制阶段为加载值达到预估极限荷载75%之后，每级加载值取中期力控制阶段梁挠度变化值平均值，直至梁发生破坏。在加载初期，随着荷载增加，挠度逐渐增大；当荷载达到27.5 kN时，左跨中梁顶的右侧指接部位出现轻微褶皱（图4a）。

当荷载施增到29 kN时，左跨褶皱延伸至三层

板处（图4b）；当加载到30.5 kN时，左跨指接处褶皱延伸至第四层板（图4c），梁顶褶皱挤压导致胶合木错层，此部位梁底受拉开裂，最终，因梁底胶合木抗拉强度不足而导致整根梁的破坏（图4d）。胶合木连续梁左跨跨中的荷载-挠度曲线如图5所示。两组未调控胶合木连续梁的极限荷载均值为30 kN。

2 胶合木连续梁的有限元分析

由于受试件数量等因素的影响，笔者没有对胶合木连续梁进行预应力调控试验，采用有限元分析研究预应力调控对梁受力性能的影响。

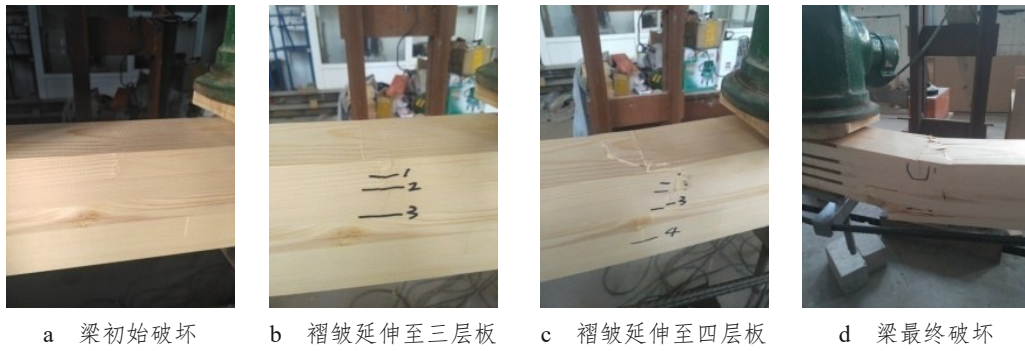


图4 破坏形态

Fig.4 Failure mode

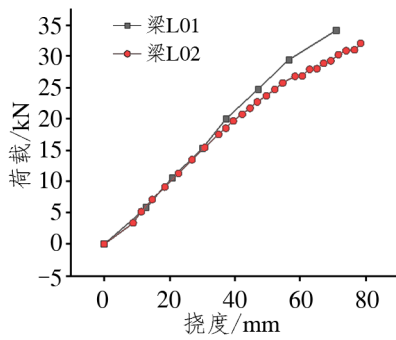


图5 未调控组荷载-挠度曲线

Fig.5 Unregulated group load-deflection curve

2.1 有限元分析模型建立

胶合木本身为一种复杂的非均质且各向异性的材料，无法直接使用SAP2000有限元分析软件中常用的本构模型，考虑到木材的各向异性特点，以及胶合木连续梁在受力过程中呈现出明显的非线性特性，采用各向异性的弹塑性本构关系进行分析。具体设置如下：在定义胶合木梁弹性属性时，类型选择为正交各向异性。SAP2000中各向异性材料的刚度矩阵为：

$$\begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & D_{1212} & 0 & 0 \\ & & & & D_{1313} & 0 \\ & & & & & D_{2323} \end{bmatrix}$$

其中：

$$D_{1111}=E_1(1-\nu_{23}\nu_{32})r, \quad (1)$$

$$D_{2222}=E_2(1-\nu_{13}\nu_{31})r, \quad (2)$$

$$D_{3333}=E_3(1-\nu_{12}\nu_{21})r, \quad (3)$$

$$D_{1122}=E_1(\nu_{21}+\nu_{31}\nu_{23})r=E_2(\nu_{12}+\nu_{32}\nu_{13})r, \quad (4)$$

$$D_{1133}=E_1(\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32})r=E_3(\nu_{13}+\nu_{12}\nu_{23})r, \quad (5)$$

$$D_{2233}=E_2(\nu_{32}+\nu_{12}\nu_{31})r=E_3(\nu_{23}+\nu_{21}\nu_{13})r, \quad (6)$$

$$D_{1212}=G_{12}, \quad (7)$$

$$D_{1313}=G_{13}, \quad (8)$$

$$D_{2323}=G_{23}. \quad (9)$$

实体木材力学分析的基本轴线为纵向、径向和弦向，但对于胶合木材料，木材的径向、弦向统称为横向。定义胶合木纤维方向为“1”，径、弦向分别为“2”和“3”^[13]。则有 $D_{2222}=D_{3333}$ ， $D_{1313}=D_{1212}$ ， $D_{1133}=D_{1122}$ 。

参照GB/T 1938—2009《木材顺纹抗拉强度试验方法》进行胶合木的材性试验，监测点为标准试件的中部，绘出其应力-应变关系曲线，作为分析的本构关系，如图6所示。

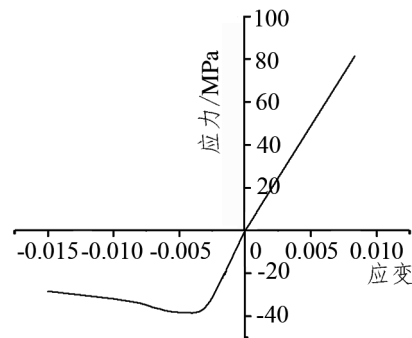


图6 胶合木应力-应变曲线

Fig.6 Glulam stress-strain curve

从本构关系来说，将拉、剪方向的本构关系简化为线性，达到其强度即认为退出工作；又根据胶合木弹性模量 E 、剪切模量 G 及泊松比 ν ^[14]，计算出SAP2000所需要的胶合木各项参数，见表1。

其中， E_1 、 E_2 、 E_3 分别代表纤维方向、径向、弦向的弹性模量； G 代表剪切模量， ν 代表泊松比。

G_{12} 表示变形产生在纵向和径向组成面上的剪切模量; G_{23} 表示径向和切向所组成面上的剪切模量; G_{13} 表示纵向和切向所组成面上的剪切模量; ν_{12} 表示纵向和径向所组成面上的泊松比; ν_{31} 表示纵向和切向所组成面上的泊松比; ν_{23} 表示径向和切向所组成面上的泊松比。

表1 胶合木各项参数
Tab.1 Glulam parameters

E_1 / MPa	E_2 / MPa	E_3 / MPa	G_{12} / MPa	G_{23} / MPa	G_{13} / MPa	ν_{12}	ν_{31}	ν_{23}
8 301	355.5	642	543.22	440.49	494.49	0.309	0.265	0.337

建模的部件涉及胶合木梁、钢丝、端垫板、钢垫板、螺杆和支座。为了使结构简化并便于计算,根据试验和预应力胶合木张弦梁的实际受力特点,省略端部锚具,将预应力钢丝直接锚固在端部钢垫板上。按照表1,完成对胶合木的属性定义。钢丝及端垫板、支座、钢垫板等刚性部件的本构关系,可采用SAP2000中现有模型。完成材料定义后,进行三种截面类型定义。建立与试验尺寸相同的“三维实体”模型,创建各个部件,指定各截面类型和各节点的约束形式,组装完成预应力胶合木梁。

采用对螺杆施加应变荷载的方式,模拟加载预应力,通过对钢垫板施加面荷载,来实现千斤顶施加破坏荷载的过程。设置8种工况,初始预加力均为9 kN,其中7组加载预应力分别为极限荷载的18%、24%、30%、36%、42%、48%和54%,另1组为对照。

2.2 有限元分析结果

将未调控的两组试验胶合木梁与有限元分析模型所得数据进行对比,如图7所示。由图7可以看出,整个加载阶段有限元分析与试验结果相差不超过24.5%,可用于胶合木连续梁调控效果的后续研究。

2.2.1 不同工况承载力

将不同工况下的荷载-挠度曲线对比如图8所示。由图8可知,由于在整个调控过程中,张弦高度一定,在弹性阶段,调控幅度不改变梁的刚度大小。调控幅度<48%时,随着预应力调控幅度的增加,梁的极限荷载有所增大;当调控幅度>48%时,极限荷载有所下降。这是因为调控幅度

<48%时,梁因胶合木底部达到抗拉强度而发生破坏,调控幅度越大,胶合木底部达到抗拉强度所需的荷载越大,因此承载力越大。调控幅度为54%时,梁因胶合木顶部达到抗压强度而破坏,所以承载力下降。

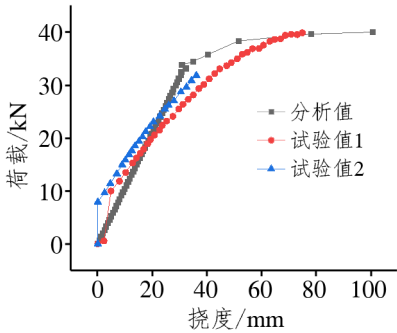


图7 荷载-挠度曲线
Fig.7 Load-deflection curve

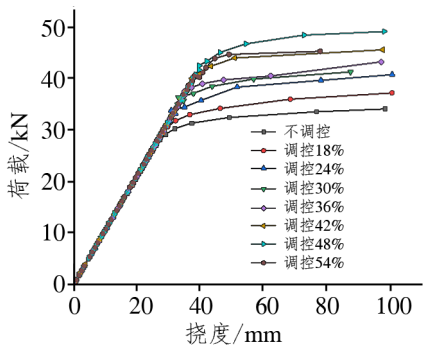


图8 不同工况下荷载-挠度曲线
Fig.8 Load-deflection curves under different working conditions

2.2.2 不同工况截面应力

为了探讨调控幅度对梁截面应力分布的影响,对8种工况的预应力胶合木梁进行分析,对比达到极限荷载时刻的应力云图。由于此分析模型两跨梁完全对称,故只列出一跨梁应力云图(图9a~9h)。

由图9可以看出,随着调控幅度的增大,整根梁的拉应力区逐渐减小,压应力区逐渐增大,说明调控可以更好地利用胶合木梁的抗压强度。当调控程度小于48%时,梁因胶合木底部达到最大拉应力而发生破坏,最大拉应力出现在加载点附近的胶合木下表面;当调控程度为54%时,梁因胶合木顶部达到最大压应力而发生破坏,最大压应力出现在加载点附近的胶合木上表面。

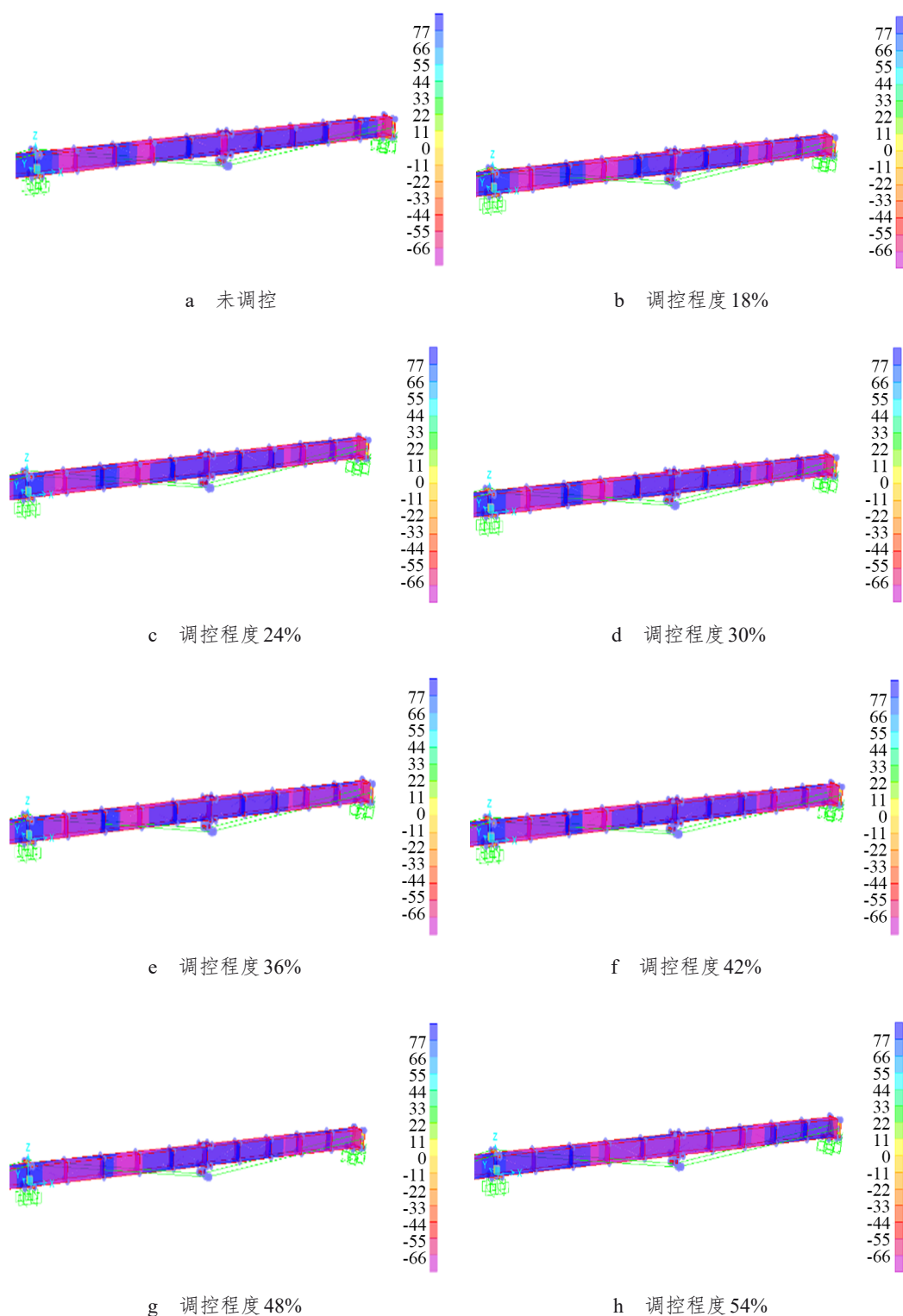


图9 调控程度0~54%的应力云图

Fig.9 The stress nephogram with the control range of 0~54%

2.2.3 合理调控范围分析

在上述有限元分析的过程中, 由于钢丝应力尚未达到抗拉强度, 因此, 以胶合木部分达到抗

拉或抗压强度为梁的破坏标志, 得到不同调控幅度下梁的极限荷载, 如图10所示。

由图10可知, 与未调控的梁相比, 调控幅度

在18%~48%时,梁的极限荷载增大3.65%~58.1%。调控幅度<18%时,梁的极限荷载增加有限;当调控幅度在18%~48%时,极限荷载明显增加,随着调控幅度的增加,梁的极限荷载基本上呈线性增加;调控幅度达到极限荷载的54%时,梁的破坏形态由之前的梁底受拉破坏转变为梁顶受压破坏,承载力开始下降。

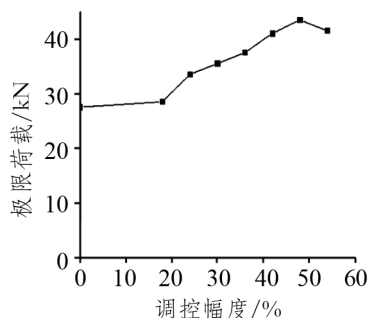


图10 不同工况下达到抗拉强度或抗压强度的荷载值

Fig.10 The load value of the tensile strength or compressive strength under different working conditions

结合有限元分析结果来看,调控幅度为18%时,调控效果不明显;调控幅度为48%时,调控效果下降。再考虑实际工程的不确定性和有限元分析误差,建议预应力胶合木连续梁的合理调控范围约为极限荷载的24%~42%。

3 结论

1) 调控幅度<48%时,梁因胶合木底部达到抗拉强度而发生破坏,调控幅度越大,中和轴越上移,承载力越大;调控幅度为54%时,梁因胶合木顶部达到抗压强度而破坏,破坏形态发生改变,承载力下降。

2) 随着调控幅度的增大,梁中胶合木部分的拉应力区逐渐减小,压应力区逐渐增大,说明调控可以更好地利用木材的抗压强度。当调控程度<48%时,最大拉应力出现在加载点附近的胶合木下表面;当调控程度为54%时,最大压应力出现在加载点附近的胶合木上表面。

3) 调控幅度在18%~48%范围时,梁的极限荷载增大3.65%~58.1%。调控幅度<18%时,极限荷载增加有限;当调控幅度在18%~48%时,极限荷载呈线性增加;调控幅度为54%时,梁的破坏形态改变且承载力开始下降。考虑实际工程的不

确定性和有限元分析误差,建议预应力胶合木连续梁的合理调控范围约为极限荷载的24%~42%。

参考文献:

- [1] Guo Nan, Wang Yan-Jun, Zuo Hong-Liang. Study of short-term flexural behavior for glue bamboo and lumber beams under different prestressed states[J]. The Civil Engineering Journal, 2017(26): 128-142.
- [2] 张济梅,潘景龙,董宏波.张弦木梁变形特性的试验研究[J].低温建筑技术,2006,28(2): 49-51.
ZHANG J M, PAN J L, DONG H B. Experimental research on deformation characteristic of timber beam string structure[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2006, 28(2): 49-51.
- [3] 张济梅,潘景龙. ANSYS 分析张弦木梁的变形性能[J]. 低温建筑技术,2008,30(4): 70-71.
ZHANG J M, PAN J L. Research on deformation characteristic of timber beam string structure using ansys fem[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2008, 30(4): 70-71.
- [4] 张济梅,潘景龙,董宏波.张弦木梁预应力损失初步探讨[J]. 低温建筑技术,2007,29(1): 73-75.
ZHANG J M, PAN J L, DONG H B. Discussion on prestressing loss of timber beam string structure[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2007, 29(1): 73-75.
- [5] De Luca V, Marano C. Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars[J]. Construction and Building Materials, 2012(30): 206-217.
- [6] 宋戬,林厚秦,韩建平,等. 预应力钢筋-木结构受力性能的试验研究[J]. 结构工程师,2003(1): 54-60.
- [7] 王锋,王增春,何艳丽,等. 预应力纤维材料加固木梁研究[J]. 空间结构,2005,11(2): 34-38.
WANG F, WANG Z C, HE Y L, et al. Research of prestressed FRP in the reinforcement of timber beams[J]. Spatial Structures, 2005, 11(2): 34-38.
- [8] 王增春,南建林,王锋. CFRP 增强木梁的预应力施工方法[J]. 施工技术,2006,35(10): 73-75.
WANG Z C, NAN J L, WANG F. Construction method of timber beam prestressed by CFRP[J]. Construction Technology, 2006, 35(10): 73-75.
- [9] 王增春,南建林,王锋. CFRP 增强预弯木梁抗弯承载力计算方法[J]. 建筑科学,2007,23(9): 7-11.
WANG Z C, NAN J L, WANG F. Calculation method of flexural bearing capacity of preflexed timber beams reinforced by CFRP[J]. Building Science, 2007, 23(9): 7-11.
- [10] Anshari B, Guan Z W, Kitamori A, et al. Structural behaviour of glued laminated timber beams pre-stressed by compressed wood[J]. Construction and Building Materials, 2012(29): 24-32.
- [11] GUAN ZW, Rodd P D, Pope DJ. Study of glulam beams pre-stressed with pultruded GRP[J]. Computers & Structures, 2005, 83(28/30): 2476-2487.
- [12] McConnell E, McPolin D, Taylor S. Post-tensioning of glulam timber with steel tendons[J]. Construction and Building Materials, 2014(73): 426-433.
- [13] GUO Nan, HE Tie, CHEN Hui-Hui. The research of the influence of constitutive relation on glued-timber beam bending performance analysis results[J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2015, 8(2): 665-670.
- [14] David W Green, Jerrold E Winandy, David E Kretschmann. Wood handbook Chapter 4: mechanical properties of wood[M]. Forest Products Laboratory, Wisconsin 1999.

(本文编校 张 鹏、向 琴)