

纤维增强复合材料增强胶合木受弯构件 研究综述与展望

何敏娟, 王毓萱, 李 征

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对纤维增强复合材料(FRP)增强胶合木受弯构件研究进行综述,系统梳理了现有增强技术,详细阐述了界面黏结性能、抗弯性能、蠕变性能的影响因素与分析方法。研究表明:FRP增强技术能更有效地利用胶合木受弯构件中木材的强度,提高构件抗弯承载力、控制弯曲变形并改善脆性破坏模式。针对FRP增强胶合木受弯构件在工程应用上的制约因素,提出了在预应力增强技术、长期性能、防火性能和可靠性方面研究中亟需解决的关键问题。

关键词: 胶合木梁;纤维增强复合材料;黏结;抗弯性能;蠕变

中图分类号: TU366.3

文献标志码: A

Review and Prospect of Research on FRP-Reinforced Glulam Bending Members

HE Minjuan, WANG Yuxuan, LI Zheng

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper provides a comprehensive review of the research on fiber-reinforced polymer (FRP) reinforced glulam bending members, systematically summarizes the existing reinforcing technologies, and elaborates on the influencing factors and analytical methods of the interfacial bond performance, the bending performance, and the creep performance of FRP-reinforced glulam beams. The findings demonstrate that FRP reinforcing technologies effectively utilize the strength of wood in glulam bending members, enhance their bending capacity, control bending deformation, and improve the brittle failure mode. Considering the constraints of FRP-reinforced glulam bending members in engineering applications, it also proposes key issues that

need to be addressed in the research on the prestressing technologies, long-term performance, fire resistance, and reliability.

Keywords: glulam beam; fiber-reinforced polymer (FRP); bond; bending performance; creep

木材是一种绿色低碳的生物质材料,木结构建筑装配化程度高、保温性能好,可实现全生命周期的低碳排放和低能耗。随着第十四个五年规划和“双碳”战略的深入推进,我国对绿色建材和低碳建筑的需求剧增,为木结构提供了广阔的应用前景。在现代木结构特别是重木结构中,常采用胶合木作为受弯构件,然而,胶合木的抗弯性能仍受到一些制约:在强度方面,天然缺陷和荷载持续作用效应极大削弱了木材受拉强度,导致受拉侧木材易发生过早的脆性断裂而受压侧木材强度尚未充分发挥;在变形方面,较低的弹性模量和较明显的蠕变会导致木材弯曲变形较大,且木材蠕变对环境温湿度的波动敏感,为构件长期受弯性能评估带来了较大困难。上述问题导致胶合木受弯构件的设计截面增大、可靠性降低、增大了前期材料成本和后期维护成本,制约了大跨度胶合木受弯构件的应用。

近年来随着高性能复合材料的发展,采用纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)增强受弯木构件成为了改善上述不足的一种有效途径。FRP由高强纤维和树脂基体组成,具有轻质、高强、耐腐蚀等优点,可按常用的玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维和玄武岩纤维分为GFRP(玻璃纤维增强复合材料)、CFRP(碳纤维增强复合材料)、AFRP(芳纶纤维增强复合材料)、BFRP(玄武岩纤维增强复合材

收稿日期: 2024-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(52378256)

第一作者: 何敏娟,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为现代木结构。E-mail: hemj@tongji.edu.cn

通信作者: 李 征,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为现代木结构。E-mail: zhengli@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

料)4类。基于FRP的增强方法可有效提高胶合木受弯构件的抗弯承载力、刚度以及延性,并改善其脆性破坏模式,更充分利用木材受压强度。此外,FRP在耐腐蚀性方面的优势可减少维护成本,使其在建筑减碳方面拥有潜在优势。

从20世纪90年代起,FRP增强木结构研究逐渐增多,而工程木的发展又使胶合木受弯构件的FRP增强技术愈发得到重视。本文综述该类构件在增强技术、黏结性能、抗弯性能、蠕变性能等方面的研究成果,并展望需进一步开展的研究工作。

1 增强技术

增强胶合木受弯构件中常用的FRP包括筋材(筋、索)和片材(板、纤维布),依据是否对FRP施加预张力可将增强技术分为被动式增强和预应力增强(主动式增强)2类。

1.1 被动式增强技术

被动式增强技术通常将单向纤维编织的FRP粘贴在构件受拉侧,并按FRP的配置位置分为体外增强和体内增强2类,其截面构造如图1所示。

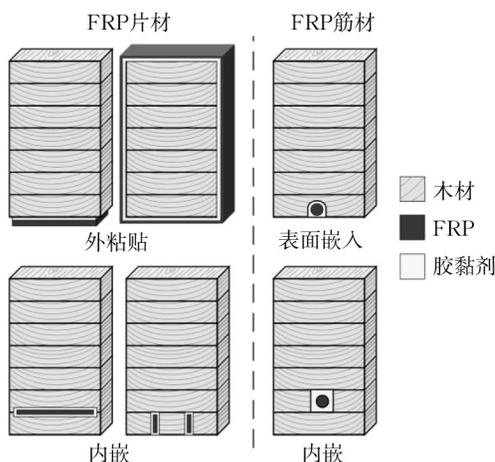


图1 被动式FRP增强胶合木受弯构件的截面构造

Fig. 1 Cross-sectional structure of passively FRP-reinforced glulam bending members

在体外增强技术中,片材外粘贴法应用最广泛;筋材则多采用表面嵌入法,施工时需在构件表面开槽,该技术也适用于宽度较窄的FRP板。体外增强技术仅需表面处理,因其施工便利而常用于结构修复或补强,不足的是美观性较差,且会将黏结界面暴露在外界环境下,导致界面存在耐久性较低的隐患。

体内增强技术的发展得益于胶合木构件的层板式构造,加工时木层板的处理往往先于木层板胶合

进行,从而将FRP嵌于构件内部。对于片材,通常将FRP横向嵌入层板间,也可将片材竖向嵌入小层板后再与其他层板胶合^[1]。对于筋材,需在层板胶合前预留孔道,待层板胶合后黏结筋材。体内增强技术的美观性好、预制化水平高,黏结界面不易受环境因素影响,且木材良好的隔热性能可防止胶黏剂以及FRP中的树脂材料在高温下发生快速退化。

由于FRP的原材料与产品形式较丰富,因此实际研究中并不局限于上述技术,如可同时在受拉侧和受压侧^[2]、同时在体外和体内增强^[3]或同时在纵向和横向配置FRP。

1.2 预应力增强技术

预应力FRP增强技术的关键在于锚固系统与张拉工艺。FRP通常依靠胶黏剂或锚具锚固于木构件中,然而在较大的预张力作用下,FRP与木材间黏结锚固的耐久性尚待研究。同时,FRP的剪切强度、横向拉伸强度仅为纵向抗拉强度的5%~20%^[4],这对锚具提出了较高的要求,尤其是对于比表面积较小的筋材,其应力集中更明显,易被传统的夹片式锚具夹断。国内外已开发了黏结型、机械型(或夹持型)和复合型等各型FRP锚具,取得了较高的锚固效率,但标准化的FRP锚具产品在市场上仍较为缺乏,针对锚固系统的研发与优化工作仍在持续开展。

现有张拉工艺包括先张法、后张法和预弯法。基于先张法的研究较多,大多是在张拉FRP片材后粘贴于外表面;受限于锚具和夹具,基于后张法的研究较少;预弯法通过预弯构件、黏贴FRP、最后释放预弯荷载^[5-6]可避免直接张拉FRP。

FRP在长期高应力下会发生蠕变断裂,中国规范GB 50068—2020、美国规范ACI 440.4R-04等规定了FRP的蠕变断裂折减系数和张拉控制应力比限值,该限值通常不大于0.65,且由于GFRP蠕变断裂应力过低,不建议作为预应力筋。

2 FRP-木黏结性能

2.1 FRP-木黏结节点

良好的界面黏结性能是FRP与木材协同抗弯的必要保障,常用节点试件形式如图2所示,片材节点一般采用单面剪切或双面剪切试件,筋材节点采用拔出试件或对拉试件^[7],目前国内相关试验标准尚待补充。

界面黏结性能常关注几类指标:黏结剪应力、黏结承载力、破坏模式、有效黏结长度和黏结剪应力-

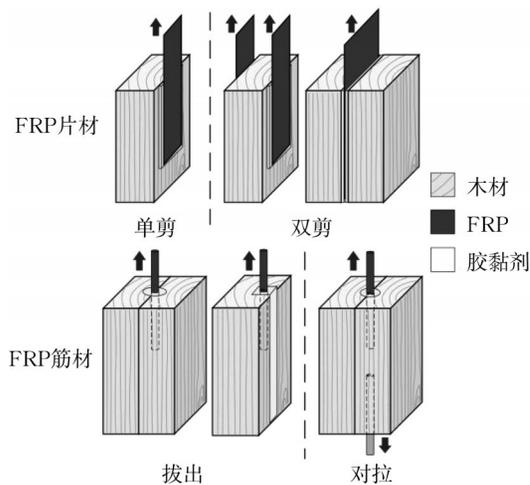


图2 FRP-木黏结节点的试件类型

Fig. 2 Specimen types of FRP-timber bond joints

滑移曲线。如图3所示,以荷载作用在FRP一端为例,界面黏结剪应力在前期分布在加载端附近,由此形成带有峰值点的有效黏结区域^[7-9](历程1);随着荷载增大,该区域不断扩大,其中的黏结剪应力不断上升(历程2);继续加载,随着滑移增大,加载端面开始出现黏结刚度的退化,有效黏结区逐渐向自由端转移^[7-10](历程3);破坏时刻的荷载即为黏结承载力(历程4),通常认为始于木材处的失效是较理想的界面黏结破坏模式,若此时有效黏结区域未覆盖黏结界面,则该区域长度即为有效黏结长度。上述历程是基于带退化段的黏结剪应力-滑移曲线推导得到,也有研究发现了存在屈服段和强化段的曲线^[7],该曲线形状决定了黏结剪应力的分布,此外,即使在同一试件中,该曲线通常会因所处黏结区中的位置而异。

在几何参数中,黏结长度对黏结性能有显著影响。当小于有效黏结长度时,增加黏结长度可提高界面承载力、减小滑移、改善非木材区破坏,但大于有效黏结长度时,增加黏结长度对黏结性能无显著提升^[8-9,11]。对于片材,增加其宽度可提高黏结承载力^[9]、减小最大黏结剪应力、增大有效黏结长度^[8]。对于筋材,增加直径可提高界面承载力^[11],但相对表面积的减小可能导致黏结强度下降。采用表面嵌入节点时,增加筋材的嵌入深度可提升黏结性能^[12]。

在材料性质方面,由于木材强度通常低于FRP或胶黏剂,破坏常发生在木材或胶-木界面,故木材强度对黏结强度、有效黏结长度有影响,进而影响破坏模式^[8,13]。Wan等^[10]研究发现软木节点的木材破坏相较硬木节点更多,而此时胶黏剂强度、弹性模量

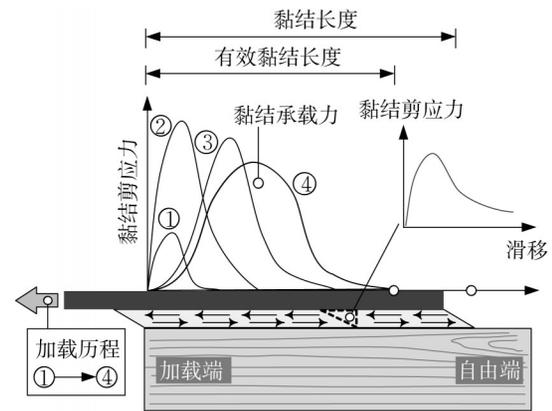


图3 FRP-木界面的常用黏结性能指标

Fig. 3 Regular bond performance indices of FRP-timber interface

对界面黏结性能的影响较小。一些针对片材节点的研究指出,增加FRP片材的刚度可提高界面黏结强度和有效黏结长度^[13-14]。

在环境方面,高温、高湿或紫外线会引起材料退化,可能导致黏结强度下降^[15]、有效黏结长度增大、界面断裂能下降^[16]。Yarigaravesh等^[17]发现酸性溶液和碱性溶液分别对GFRP和CFRP节点黏结强度削弱最多,海水对AFRP节点黏结强度影响最小。

黏结节点涉及3种材料和2种材料界面,其影响参数与性能指标较多,影响关系较复杂,除上述参数,试件形式、加载方式、边界条件、材料的表面情况^[9,12]等都会影响黏结性能。在开展增强构件试验前,建议开展黏结节点试验以保证黏结性能,并依据材料受力状态选取适当的试件形式,就受弯构件而言,通过调控几何参数、胶黏剂成分和材料表面,可方便且高效地提高界面黏结性能。

2.2 黏结构造对胶合木构件抗弯性能的影响

为避免受弯木构件发生黏结破坏,需探明界面黏结剪应力的整体分布情况。杨会峰等^[18]指出黏结剪应力在构件纵向上的分布形式受加载方式影响,整体上同梁中剪力分布一致,最大值常分布在梁端,并随FRP与木梁刚度比的增大而增大、随胶层厚度的增大而减小。Vahedian等^[19]基于弯曲试验发现黏结应力主要分布在弯剪区,增加片材长度和宽度可减小黏结应力,同时增加宽度可使黏结应力在横向上分布更均匀。

一些改进措施被用于改善界面性能,如Kramár等^[20]将木梁底面在横向上加工为波纹形,也可通过附加装置提高锚固作用,如在梁端安装FRP锚杆^[21]或横向缠绕FRP布。对于预应力增强构件,黏结界面传递预应力可能引起脱胶或木材撕裂,可通过理

论分析确定张拉力限值^[22],也有学者采用分阶段张拉的技术^[23]。一些研究则额外设置端部夹板^[23]或锚具^[6]以缓解端部木材处的应力集中,避免因黏结性能不足制约预张力。

综上所述,对于FRP增强受弯木构件,需结合节点试验的成果探明黏结强度,分析黏结应力分布,从而进行合理设计。当胶体无法提供足够的黏结力时,应采取加固措施。

3 抗弯性能

3.1 被动式增强构件

FRP增强胶合木受弯构件的弯曲破坏以木材受拉断裂破坏或受压延性破坏为主,同时伴随一些剪切裂缝,而FRP断裂和脱胶需在设计时予以避免。针对发生木材弯曲破坏的构件,综述其增强机理与影响因素。

FRP对受弯木构件的抗弯增强机理可归纳如下:一方面,FRP的弹性模量远大于木材,使木构件的换算截面增大、中和轴下移,从而较充分利用受压侧木材的强度、推迟受拉侧木材开裂,但由于FRP通常是一种线弹性材料,构件的延性变形主要得益于木材受压屈服;另一方面,FRP改善了缺陷对受拉侧木材的不利影响,提高了木材抗拉性能。文献[2, 24]表明,采用FRP增强后,胶合木梁的木材受拉断裂应变可提升约10%~50%。Vahedian等^[19]分析认为FRP推迟了已有裂缝的发展,弥合了局部缺陷的不利影响,进而提升木材抗拉强度。Yeboah等^[25]的研究表明FRP降低了胶合木梁抗弯强度变异性。

配筋率对抗弯性能有重要影响。随着配筋率的增加,构件的抗弯承载力、刚度、极限挠度均提高,破坏模式从木材受拉断裂的脆性破坏过渡到木材受压屈曲的延性破坏。Plevris等^[26]分析发现FRP配筋率存在上限值,超过该值后配筋率的增加对梁抗弯承载力无显著提升。杨会峰等^[27]定义了增强胶合木梁少筋、适筋、超筋的破坏模式,给出了FRP适筋破坏的配筋率范围。Lu等^[1]发现随着配筋率的增加,梁的断裂模量会先提高,随后在某一范围内波动。He等^[24]发现木材极限拉应变会随配筋率的增加而提高。

FRP的配置位置可能存在影响。对于体外增强方法,Gómez等^[28]研究了FRP布黏贴位置对木梁的影响,发现在相同配筋率下,侧面或底面黏贴法对梁抗弯性能提升程度无较大区别。对于体内增强方

法,即使位于FRP下部的层板断裂,FRP和其上部层板可能仍有承载能力^[27,29],但由于抗弯刚度下降且断裂层板可能对FRP产生横向损伤^[24,29],因此建议可视该现象为安全储备。在受压侧也配置FRP时,Yang等^[2]的试验结果表明,由于受压侧木材的过早屈曲或分层,双侧增强技术对梁抗弯刚度的提升比抗弯强度的提升更显著,因此建议在受压侧采用高弹性模量的层板以代替配置增强材料;Yeboah等^[25]对筋材增强胶合木梁的研究发现,开槽可能引起木材损伤,双侧增强梁相对单侧增强梁的抗弯性能无显著提升甚至下降。

FRP的弹性模量可能对抗弯性能存在影响。试验表明^[2,24]:在避免黏结失效的前提下,提高FRP的弹性模量可提高抗弯承载力和刚度。Gómez等^[28]分别将5类FRP布用于木梁增强,发现在配置相近拉伸刚度的GFRP布和CFRP布时,低弹性模量的GFRP材料对梁在极限挠度和承载力上的提升较大。

在FRP产品形式上,Rescalvo等^[30]分别采用纤维布和FRP板增强胶合木梁,发现纤维布对梁抗弯刚度的增强效果不如FRP板显著。作为纤维织物,纤维布厚度较薄、配筋率较低,一种解决措施是在多个层板间嵌入FRP布^[24],而板或其他型材由多层纤维制成,其厚度较大,可满足较高配筋率的要求。在类似的筋材增强研究中,Fossetti等^[31]采用纤维索(cord)对胶合木梁进行体内增强,并灌注树脂作为胶黏剂,研究指出胶黏剂的过量使用和对纤维材料的不当浸渍将削弱纤维索对梁的性能提升。由上述可知,虽然纤维材料可较好贴合梁体表面且其布置方式较灵活,但由于涉及的湿作业较多,施工质量将极大影响纤维材料的增强效果。

利用FRP增强基于速生树种的胶合木构件有望进一步提高经济效益。Lu等^[1]对比了低强度速生杨木层板和高强度花旗松层板对FRP增强胶合木梁抗弯性能的影响,发现在相同配筋率下,花旗松梁的承载力提升率更高,而速生杨木梁的刚度提升率更高,此外,由于速生木的屈服强度和弹性模量相对较低,增强后梁截面的受压区高度较大,受压屈服出现较早,此时受拉区木材应力远小于断裂强度,使得梁在受弯时表现出更明显的非线性特征,从而有效改善低等级木梁的脆性破坏模式。

增强胶合木构件的抗弯分析方法已发展得较充分,如图4所示,图中 σ 为应力; ϵ 为应变; f 为强度;下标w为木材、fp为FRP、t为受拉、c为受压、cy为受

压屈服。FRP和木材受拉皆被视为线弹性,木材受压常采用Bazan-Buchanan模型^[32]或理想弹塑性模型,视木材达到极限应变为极限状态。在此基础上,Plevris等^[26]考虑了应力分布效应(stress distribution effect),可依据中和轴变化更新木材抗拉强度。Lindyberg等^[33]考虑了胶合木的长度效应和层板效应,并通过蒙特卡洛法模拟了木材抗拉强度、抗压强度、弹性模量的随机分布。Blank等^[34]在分析中考虑了增强材料的裂缝弥合效应、木材的受拉侧初始裂缝和受压侧皱折,该方法对增强胶合木梁承载力的平均值和特征值的预测都与试验结果较为吻合。Yang等^[2]基于试验和理论分析结果,总结了影响增强木梁抗弯性能的3个重要参数:增强材料与木梁的轴向刚度之比、受拉侧增强材料到梁底的距离与梁高之比、木材拉压强度之比。

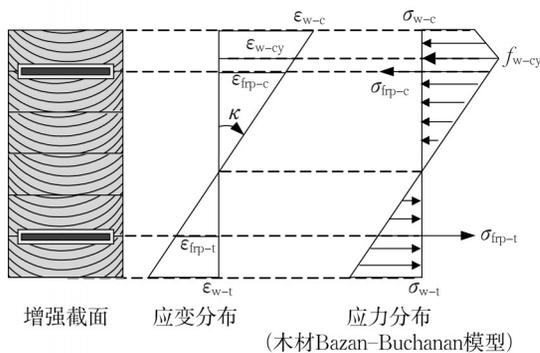


图4 被动式FRP增强木构件抗弯性能理论模型

Fig. 4 Theoretical model for the bending performance of passively FRP-reinforced timber members

综上所述,国内针对被动式增强胶合木受弯构件开展了大量研究,取得较为丰硕成果,但鉴于增强技术、材料类型、FRP产品的多样性,研究仍有较大的开展空间。在理论分析方面,现有研究不断优化传统模型,完善对各类力学效应的考量,故需总结设计方法并建立相关标准,为工程建设提供理论基础。

3.2 预应力增强构件

被动式增强技术存在一些不足:① FRP强度利用不充分,工作应力仅为抗拉强度的20%~50%^[19,24];② 抗弯刚度的提升往往不如承载力的提升显著,在变形控制方面有待加强。通过对FRP施加预张力,可更充分利用FRP强度,预应力引起的截面反向弯矩和预拱可有效提高构件的抗弯承载力并控制弯曲变形。

预应力水平是影响预应力构件抗弯性能的重要因素。Triantafillou等^[22]研究了基于先张工艺的片

材外黏贴增强木梁,提出了允许最大初始张拉力的理论预测方法。陈暑冰等^[35]发现对CFRP片材施加55%~60%的预应力后,胶合木梁的极限荷载、抗弯强度、抗弯弹性模量获得了最高51.8%、81.7%、70.5%的提升,同时,预应力水平的增加显著增大了受压区面积,提高了木材利用率。

预应力FRP增强技术在变形控制上的优势主要归功于预拱。Yang等^[6]研究了预应力FRP筋增强胶合木梁,结果表明,由于预拱的存在,预应力梁在 $l/250$ (l 为梁计算跨度)的正常使用极限挠度时的竖向荷载相较未增强木梁有极大提升,对于在受拉侧采用预应力增强而受压侧采用被动式增强的木梁,该提升甚至可达211%。郑玉槟等^[36]推导了预应力FRP增强胶合木梁的预拱挠曲线公式,在考虑预应力损失的基础上,公式计算值与试验值较吻合。Halicka等^[23]在试验前对预应力片材增强木梁的预拱值进行了28天的监测,结果表明在较大预应力等级下,预拱值短期内会因木材蠕变而不断增大。目前,欧洲木结构规范EN 1995-1-1在挠度计算时已纳入预拱,而中国标准中有关预应力木构件的内容尚待补充。

当预应力FRP置于体内或近体表时,构件的木材换算截面未显著增大,故抗弯刚度提升并不显著^[37-38]。对此可采用主被动结合的方式,增加非预应力FRP的配筋率来提高刚度,但也应考虑到增强材料过多会导致施工不便,开槽易导致木材损伤。虽然对短期刚度的提升不显著,但在长期持荷时,由于预应力构件的木材受拉工作应力大幅降低,木材长期受拉损伤可被有效减少,这使得预应力增强技术在减小长期刚度退化方面有潜在优势,可予以关注。

预应力构件开展理论分析时需区分黏结方式。现有研究主要关注有黏结构件,由于FRP和木材可协同变形,在准确掌握施加预张力对构件应力分布的影响这一基础上,被动式增强构件的截面分析方法已可较好预测预应力构件的承载力和刚度^[2,37]。现有试验^[39]证实了黏结方式对增强构件抗弯性能的影响,在无黏结构件中,FRP仅通过锚具与木材相连,材料间的应变协调条件不再适用,需要建立FRP的应变与构件的整体变形的协调条件,且锚固处木材存在局部应力集中,FRP内力变化较复杂,故尚待深入研究。

综上所述,国内外针对预应力FRP增强胶合木受弯构件的抗弯性能开展了一些研究,验证了预应力增强技术的优势,但尚需针对不同的增强技术和

影响参数开展大量试验,以阐明构件增强机理以及各类参数的影响规律,并进一步完善设计理论,以准确预测构件的抗弯性能。

4 蠕变性能

现有蠕变研究主要针对被动式增强构件,通常基于长期弯曲试验的监测结果,校核理论模型或数值模型、评估构件在设计使用年限内的蠕变发展。

在结合了理论分析的研究中,王卓琳等^[40]对筋材增强木梁开展了为期6年的长期试验,结果发现跨中无初始缺陷的增强木梁的长期挠度小于未增强木梁,并利用试验结果分别对老化模型、Burgers模型和五参数模型进行了参数拟合,结果都比较吻合。上述多参数模型将梁的长期变形简化为木材单向蠕变过程,是一种建立在构件层面的分析方法,其计算较为便捷,但材料参数需通过弯曲试验拟合得到。一些学者则采用了建立在截面层面的分析方法,Plevris等^[41]采用应力松弛法(stress-relaxation method)对片材增强木梁的长期抗弯性能开展了参数分析,研究发现提高FRP配筋率可显著减小梁长期变形,同时,受拉侧木材应力将不断向FRP“转移”,这一现象在变温湿环境下更为明显。该技术也被Li等^[42]应用于片材增强胶合竹梁中,研究发现,在恒定荷载作用下,提高FRP配筋率可有效降低胶合竹梁的竹材长期应力。Davids等^[43]利用分层弯矩一曲率法分析预测了变湿度环境下的片材增强胶合木梁长期变形,发现提高FRP弹性模量可有效减小梁的蠕变变形。上述分析基于平截面假定开展,材料参数通过单向蠕变试验获得,因此该技术可预测材料长期应变,并可基于温湿度监测数据开展抗弯时程分析。

在结合了数值分析的研究中,Yahyaee-Moayyed等^[44]建立了恒定环境下的片材增强木梁的数值模型,其中FRP和木材的蠕变均采用幂律模型模拟,研究发现梁的长期蠕变预测值与试验值吻合较好。O'Ceallaigh等^[45-47]对筋材增强胶合木梁开展了一系列长期弯曲试验,建立了变湿度环境下的数值模型,利用有限元子程序实现了对水分分布和木材黏弹性蠕变、机械吸附蠕变、胀缩等特性的模拟。研究发现,在恒定环境下梁的相对蠕变变形主要受木材应力等级影响,在变湿度环境下FRP可有效减小木材的胀缩应变,而对木材的机械吸附蠕变无显著影响。马晨晨^[48]研究了3类典型温湿度环境下片材增强木

梁的长期抗弯性能和残余力学性能,建立了考虑湿热耦合作用的数值模型,研究发现湿热环境可显著加快梁的蠕变变形速率和力学性能退化,并提出了各类环境下梁抗弯强度和弯曲模量退化系数的建议值。

有关预应力FRP增强构件蠕变性能的研究鲜有报道,仅有Yahyaee-Moayyed等^[49]基于FRP、木梁、被动式FRP增强木梁的蠕变试验,建立了恒定环境下预应力FRP增强胶合木梁的蠕变数值模型,证实了预应力FRP可有效减小木材的工作应力及其蠕变应变。虽然缺乏相关研究,但预应力钢材增强木梁的研究成果可供借鉴,如Davies等^[50-51]推导了预应力LVL(laminated veneer lumber)梁的预应力损失解析式,其中木材蠕变计算采用基于龄期调整的有效模量法(age-adjusted effective modulus method)进行了简化,研究发现木梁与预应力筋的纵向刚度之比对预应力损失有显著影响;Granello等^[52]对预应力LVL木梁开展了为期4年的弯曲试验,研究发现采用单一的蠕变系数无法反映不同荷载形式对梁跨中挠度的影响;Guo等^[53]推导了体外预应力胶合木竹组合梁长期刚度的解析式。

综上所述,针对被动式FRP增强胶合木受弯构件的蠕变性能,国内外已开展了一些试验,发现FRP可有效控制构件的蠕变挠度和蠕变应变,并约束温湿度波动引起的木材环境应变,且现有分析模型已发展得较为完善,可实现对多物理场作用下的长期变形和材料应变的准确预测,后续研究应进一步完善现有模型,以此开展更全面的参数分析;针对预应力FRP增强胶合木受弯构件,则亟需开展相关试验研究。此外,在长期高应力水平作用下,FRP的强度和锚固效果将发生退化、木材的荷载持续作用效应将加剧,因此预应力构件的长期承载力退化也是一个待研究的关键问题。

5 结语

综述了FRP增强胶合木受弯构件在增强技术、界面黏结性能、抗弯性能、蠕变性能4个方面的研究进展。现有研究证明了FRP在增强胶合木受弯构件性能上的优势,采用适当的FRP增强技术并保证良好的黏结性能,将有效提高胶合木受弯构件的抗弯承载力和抗弯刚度、改善木材脆性破坏模式、充分利用材料强度、控制长期变形。FRP增强胶合木受弯构件将有助于推动现代木结构向更大跨度发展,

但其工程应用仍受许多问题的制约,故对未来研究侧重点提出以下建议:

(1)预应力增强技术。预应力增强在材料利用、变形控制乃至木材受拉损伤控制方面有较大优势,应加强对FRP的预应力增强技术特别是锚固系统和张拉工艺的研发,并推动相关研究成果的商品化。

(2)长期性能。木结构的长期性能是学界长期关注的研究重点,而木材、FRP、胶黏剂等材料的力学性能表现出明显的长期特性,需结合材料的长期性能研究,明确荷载及各类环境长期作用下各材料的协同抗弯机理,揭示构件的蠕变变形和性能退化规律。

(3)防火性能。FRP、胶黏剂在高温下会发生性能退化,而FRP与木材这一可燃材料的结合,将使防火性能成为制约工程应用的突出问题,因此需对FRP-木黏结界面开展火灾试验,并开发相关防火技术。

(4)可靠性。FRP的诞生时间尚短,对其耐久性的研究尚待完善,这使得FRP增强构件的安全服役能力成为设计人员的重点关注问题,需基于前述各项性能的研究结果开展可靠性分析,为FRP增强胶合木受弯构件在服役期内的可靠运维提供科学依据。

作者贡献声明:

何敏娟:论文选题、指导、修改和项目资助。

王毓萱:论文撰写、文献收集与整理。

李征:论文指导、修改。

参考文献:

- [1] LU W, LING Z, GENG Q, *et al.* Study on flexural behaviour of glulam beams reinforced by Near Surface Mounted (NSM) CFRP laminates [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 91: 23. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.050.
- [2] YANG H, LIU W, LU W, *et al.* Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: experimental and theoretical evaluation [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 106: 550. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.135.
- [3] SHI H, LIU W, FANG H, *et al.* Flexural responses and pseudo-ductile performance of lattice-web reinforced GFRP-wood sandwich beams [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 108: 364. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.10.009.
- [4] 叶列平, 冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(3): 24.
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(3): 24.
- [5] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6578.2005.02.005.
WANG Feng, WANG Zengchun, HE Yanli, *et al.* Research of prestressed FRP in the reinforcement of timber beams [J]. *Spatial Structures*, 2005, 11(2): 34. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6578.2005.02.005.
- [6] YANG H, JU D, LIU W, *et al.* Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 109: 73. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.008.
- [7] LING Z, YANG H, LIU W, *et al.* Local bond stress-slip relationships between glue laminated timber and epoxy bonded-in GFRP rod [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 170: 1. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.052.
- [8] VAHEDIAN A, SHRESTHA R, CREWS K. Effective bond length and bond behaviour of FRP externally bonded to timber [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 151: 742. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.149.
- [9] LIU S, LEI Y, ZHANG J, *et al.* Experimental study and analysis on bonding strength of CFRP-wood interface [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2023, 123: 103335. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2023.103335.
- [10] WAN J, SMITH S T, QIAO P, *et al.* Experimental investigation on FRP-to-timber bonded interfaces [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 18(3): A4013006. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000418.
- [11] ZHU H, FAGHANI P, TANNERT T. Experimental investigations on timber joints with single glued-in FRP rods [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 140: 167. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.091.
- [12] SENA-CRUZ J, BRANCO J, JORGE M, *et al.* Bond behavior between glulam and GFRP's by pullout tests [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(3): 1045. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.10.022.
- [13] VAHEDIAN A, SHRESTHA R, CREWS K. Bond strength model for externally bonded FRP-to-timber interface [J]. *Composite Structures*, 2018, 200: 328. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.05.152.
- [14] BISCAIA H C, CRUZ D, CHASTRE C. Analysis of the debonding process of CFRP-to-timber interfaces [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 113: 96. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.033.
- [15] HUANG S, YAN L, BACHTIAR E V, *et al.* Durability of epoxy and polyurethane bonded timber-hybrid FRP joints under hydrothermal and weathering conditions [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 58: 104989. DOI: 10.1016/j.job.2022.104989.
- [16] ZHOU A, QIN R, CHOW C L, *et al.* Bond integrity of aramid, basalt and carbon fiber reinforced polymer bonded wood composites at elevated temperature [J]. *Composite Structures*, 2020, 245: 112342. DOI: 10.1016/j.

- compstruct.2020.112342.
- [17] YARIGARRAVESH M, TOUFIGH V, MOFID M. Environmental effects on the bond at the interface between FRP and wood[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, 76(1): 163. DOI: 10.1007/s00107-017-1201-z.
- [18] 杨会峰, 刘伟庆. FRP增强胶合木梁的黏结剪应力分析[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(1): 72.
YANG Huifeng, LIU Weiqing. Study on bond shear stress of FRP reinforced glued laminated timber beams [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2007, 28(1): 72.
- [19] VAHEDIAN A, SHRESTHA R, CREWS K. Experimental and analytical investigation on CFRP strengthened glulam laminated timber beams: full-scale experiments[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 164: 377. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.12.007.
- [20] KRAMÁR S, BRABEC M, PAŘIL P, *et al.* Constraining delamination of CFRP by beam corrugation [J]. *Engineering Structures*, 2020, 207: 110237. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110237.
- [21] İŞLEYEN Ü K, GHOROUBI R, MERCIMEK Ö, *et al.* Behavior of glulam timber beam strengthened with carbon fiber reinforced polymer strip for flexural loading [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2021, 40(17/18): 665. DOI: 10.1177/0731684421997924.
- [22] TRIANTAFILLOU T C, DESKOVIC N. Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(5): 1270. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:5(1270).
- [23] HALICKA A, ŚLÓSZARZ S. Strengthening of timber beams with pretensioned CFRP strips [J]. *Structures*, 2021, 34: 2912. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.09.055.
- [24] HE M, WANG Y, LI Z, *et al.* An experimental and analytical study on the bending performance of CFRP-reinforced glulam beams [J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 8: 802249. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.008.
- [25] YEBOAH D, GKANTOU M. Investigation of flexural behaviour of structural timber beams strengthened with NSM basalt and glass FRP bars [J]. *Structures*, 2021, 33: 390. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.04.044.
- [26] PLEVRIS N, TRIANTAFILLOU T C. FRP-reinforced wood as structural material [J]. *Journal of materials in Civil Engineering*, 1992, 4(3): 300. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1992)4:3(300).
- [27] 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.01.010.
YANG Huifeng, LIU Weiqing. Study on flexural behavior of FRP reinforced glulam beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(1): 64. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.01.010.
- [28] GÓMEZ E P, GONZÁLEZ M N, HOSOKAWA K, *et al.* Experimental study of the flexural behavior of timber beams reinforced with different kinds of FRP and metallic fibers [J]. *Composite Structures*, 2019, 213: 308. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.01.099.
- [29] RAFTERY G M, RODD P D. FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 91: 116. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.026.
- [30] RESCALVO F J, TIMBOLMAS C, BRAVO R, *et al.* Improving ductility and bending features of poplar glued laminated beams by means of embedded carbon material [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 304: 124469. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124469.
- [31] FOSSETTI M, MINAFÒ G, PAPIA M. Flexural behaviour of glulam timber beams reinforced with FRP cords [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 95: 54. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.116.
- [32] BUCHANAN A H. Bending strength of lumber [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(5): 1213. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:5(1213)
- [33] 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. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000496.
- [34] BLANK L, FRANGI A. Design model for the bending resistance of fibre reinforced glulam [J]. *Engineering Structures*, 2020, 211: 110385. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110385.
- [35] 陈暑冰, 申士杰, 范诒杰, 等. 不同预应力CFRP增强结构用集成材抗弯性能研究[J]. *林产工业*, 2017, 44(9): 13. DOI: 10.19531/j.issn1001-5299.201709003.
CHEN Shubing, SHEN Shijie, FAN Yijie, *et al.* Research on the flexural performance of the structural glued laminated timber reinforced with different prestressed CFRP [J]. *China Forest Products Industry*, 2017, 44(9): 13. DOI: 10.19531/j.issn1001-5299.201709003.
- [36] 郑玉槟, 刘问, 申士杰, 等. 预应力FRP增强胶合木的预应力损失研究[J]. *世界地震工程*, 2019, 35(3): 99.
ZHENG Yubin, LIU Wen, SHEN Shijie, *et al.* Prestress loss of prestressed glulam beam reinforced with FRP [J]. *World Earthquake Engineering*, 2019, 35(3): 99.
- [37] THORHALLSSON E R, HINRIKSSON G I, SNÆBJÖRNSSON J T. Strength and stiffness of glulam beams reinforced with glass and basalt fibres [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 115: 300. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.09.074.
- [38] WDOWIAK-POSTULAK A. Numerical, theoretical and experimental models of the static performance of timber beams reinforced with steel, basalt and glass pre-stressed bars [J]. *Composite Structures*, 2023, 305: 116479. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116479.
- [39] MCCONNELL E, MCPOLIN D, TAYLOR S. Post-

- tensioning glulam timber beams with basalt FRP tendons [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 2015, 168(5): 232. DOI: 10.1680/jcoma.14.00032
- [40] 王卓琳,刘伟庆,许清风,等.内嵌CFRP筋加固木梁持荷6年受力性能的试验研究[J].*建筑结构*,2020,50(5):15. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.05.003.
- WANG Zhuolin, LIU Weiqing, XU Qingfeng, *et al.* Experimental study on mechanical behavior of timber beams reinforced by near-surface mounted CFRP reinforcement under 6-year sustained loading[J]. *Building Structure*, 2020, 50(5): 15. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.05.003.
- [41] PLEVRIS N, TRIANTAFILLOU T C. Creep behavior of FRP-reinforced wood members [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995, 121(2): 174. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:8(981.x).
- [42] LI L, XIAO Y. Creep behavior of glulam and CFRP-enhanced glulam beams [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2016, 20(1): 04015028. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000585.
- [43] DAVIDS W G, DAGHER H J, BRETON J M. Modeling creep deformations of FRP-reinforced glulam beams[J]. *Wood and Fiber Science*, 2000, 32(4): 426.
- [44] YAHYAEI-MOAYYED M, TAHERI F. Experimental and computational investigations into creep response of AFRP reinforced timber beams [J]. *Composite Structures*, 2011, 93(2): 616. DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.08.017.
- [45] O'CEALLAIGH C, SIKORA K, MCPOLIN D, *et al.* An investigation of the viscoelastic creep behaviour of basalt fibre reinforced timber elements [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 220. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.193.
- [46] O'CEALLAIGH C, SIKORA K, MCPOLIN D, *et al.* The mechano-sorptive creep behaviour of basalt FRP reinforced timber elements in a variable climate [J]. *Engineering Structures*, 2019, 200: 109702. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109702.
- [47] O'CEALLAIGH C, SIKORA K, MCPOLIN D, *et al.* Modelling the hygro-mechanical creep behaviour of FRP reinforced timber elements [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 259: 119899. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119899.
- [48] 马晨晨. 温湿度与荷载耦合作用下BFRP加固木梁蠕变性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- MA Chenchen. Research on the creep performance of BFRP strengthened timber beams under the effect of load temperature and humidity [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [49] YAHYAEI-MOAYYED M, TAHERI F. Creep response of glued-laminated beam reinforced with pre-stressed sub-laminated composite [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(5): 2495. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.078.
- [50] DAVIES M, FRAGIACOMO M. Long-term behavior of prestressed LVL members. I: experimental tests [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(12): 1553. DOI: 10.1061/(ASCE)St.1943-541x.0000405.
- [51] FRAGIACOMO M, DAVIES M. Long-term behavior of prestressed LVL members. II: Analytical approach [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(12): 1562. DOI: 10.1061/(ASCE)St.1943-541x.0000410.
- [52] GRANELLO G, GIORGIN S, PALERMO A, *et al.* Finch R. Long-term behavior of LVL posttensioned timber beams [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(12): 04017158. DOI: 10.1061/(ASCE)St.1943-541x.0001907.
- [53] GUO N, XIONG H, WU M, *et al.* Long-term bending behaviour of prestressed glulam bamboo-wood beam based on creep effect [J]. *Structural Durability & Health Monitoring*, 2020, 14(3): 229. DOI: 10.32604/sdhm.2020.09104.