

引用本文:淳 庆,张承文,贾肖虎,等.碳纤维布加固松木梁受弯试验[J].建筑科学与工程学报,2020,37(2):71-80.

CHUN Qing, ZHANG Cheng-wen, JIA Xiao-hu, et al. Experiment on Flexural Behavior of Pine Wood Beams Strengthened with CFRP Sheets [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(2): 71-80.

DOI:10.19815/j.jace.2019.01066

碳纤维布加固松木梁受弯试验

淳 庆,张承文,贾肖虎,华一唯

(东南大学 建筑学院,江苏 南京 210096)

摘要:为研究碳纤维布加固矩形松木梁的受弯性能,通过抗弯性能试验,并结合有限元数值计算,研究了弹性模量、碳纤维布层数、初始裂缝与抗弯承载力之间的关系;在给定的 2 种初始裂缝情况下,采用虚拟裂纹闭合法进行应力强度因子计算,并使用最大周向应力准则作为断裂判据;基于试验数据和有限元计算结果,提出碳纤维布加固松木梁抗弯承载力的计算公式。结果表明:松木梁经碳纤维布加固后,其抗弯承载力提高幅度为 12.9%~34.5%;松木梁截面应变沿高度方向的分布基本符合平截面假定;当碳纤维布弹性模量在加固松木梁弹性模量 30 倍以内时,随着碳纤维布弹性模量的增加,木梁的抗弯承载力显著升高,但超过这一限值后,提高速度逐渐减慢;计算得出松木梁在考虑初始裂缝情况下的抗弯承载力削减幅度为 6.5%~27.3%,并且刚度有一定程度降低;综合考虑计算结果与经济效应,可以认为加固矩形松木梁时使用 3 层或 4 层碳纤维布加固最为合理。

关键词:碳纤维布;松木梁;抗弯承载力;受弯试验;虚拟裂纹闭合法;最大周向应力准则

中图分类号:TU366.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)02-0071-10

Experiment on Flexural Behavior of Pine Wood Beams Strengthened with CFRP Sheets

CHUN Qing, ZHANG Cheng-wen, JIA Xiao-hu, HUA Yi-wei

(School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the flexural behavior of rectangular pine wood beams strengthened with CFRP sheets, the relationships between modulus of elasticity, number of layers of CFRP sheets, initial cracks and the flexural bearing capacity were studied based on the flexural behavior test and finite element numerical calculation. With the consideration of the two initial cracks, the virtual crack closure method was used to calculate the stress intensity factor and the maximum circumferential stress criterion was used to judge the fracture. Based on experimental data and finite element calculation results, the formula for calculating flexural capacity of pine wood beam strengthened with CFRP was proposed. The results show that the flexural capacity of pine wood beams strengthened with CFRP is improved by 12.9%-34.5%. The distribution of strain along the height of wood beam section basically conforms to the assumption of plane section. When the elastic modulus of CFRP is less than 30 times of the elastic modulus of strengthened pine wood beam, the flexural capacity of pine wood beams increases significantly with the increase of CFRP

收稿日期:2019-05-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51778122,51578127)

作者简介:淳 庆(1979-),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:cqnj1979@163.com。

elastic modulus. After exceeding the limit, the speed of increase slows down gradually. With the consideration of the initial cracks, the flexural capacity of the pine wood beam is reduced by 6.5%-27.3%, and the stiffness is reduced by a certain extent. Considering the calculation results and economic effects comprehensively, it can be concluded that it is most reasonable to use 3 layers or 4 layers of CFRP to strengthen rectangular pine beams.

Key words: CFRP sheet; pine wood beam; flexural capacity; flexural behavior test; virtual crack closure method; maximum circumferential stress criterion

0 引言

木结构建筑蕴含丰富的历史文化内涵,中国目前仍留存大量的宫殿、名居等木结构建筑文化遗产。木结构是作为中国和亚洲其他国家建筑文化遗产中最重要的结构形式,对其进行结构性能分析是十分有必要的。木材常见的自身缺陷有木节、虫蛀、开裂等天然缺陷,并且木材含水率、长期荷载作用等因素也会显著改变木结构的承载能力,这些均使得木结构需要进行定期维护和修复。传统的木结构加固方法容易使历史建筑改变原貌,而且比较容易在加固施工过程中对结构产生新的破坏。由于纤维增强复合材料(FRP)具有高比强度^[1],并且采用其加固对结构的外观改变很小^[2],因此在结构加固领域逐渐得到了重视与研究^[3-4]。

目前,国内外学者对纤维增强复合材料加固结构进行了一些研究。首先,一些学者对碳纤维布加固混凝土结构进行了深入研究^[5-6],而后对木结构的研究也逐渐展开。Dempsey 等^[7]进行 FRP 增强木梁抗弯强度的研究,得出木梁初始刚度提高、延性改善的结论。Borri 等^[8]采用 FRP 材料对既有建筑木结构构件在弯曲荷载作用下的加固进行了研究,提出了一种非线性梁模型来预测极限荷载。Rescalvo 等^[9]对碳纤维增强复合材料(CFRP)加固具有天然缺陷的樟子松木梁最大弯曲荷载进行了对比试验和理论计算研究,给出了含损伤木材的加固计算公式。

中国在这方面也进行了一定的研究,近年来相关研究陆续展开。周乾等^[10]采用静力加载试验方法,研究了 CFRP 布墩接加固底部糟朽柱根的轴压承载性能。邵劲松等^[11]进行了木材理想塑性条件下 FRP 加固木梁的抗弯承载力理论公式推导,并将计算结果与试验结果进行对比分析,论证了该公式的准确性。Xu 等^[12]进行了碳纤维布加固受拉区存在初始缺陷的木梁受弯试验承载力研究,结果表明含有初始缺陷的构件加固后抗弯承载力提高幅度达 53%~109%。高本立等^[13]在木材材性试验和木梁

弯曲试验结果的基础上,考虑木材的弹塑性,提出了计算纤维布加固矩形木梁抗弯承载力的公式。

国内外学者目前对碳纤维布加固木梁的研究主要针对胶合木结构,或者杉木结构,很少有涉及松木结构。此外,很少有同时进行试验分析与有限元数值计算的研究。基于上述情况,本文从试验研究和有限元分析 2 个角度出发,在试验中设置 0~2 层碳纤维布加固松木梁试件,并得出与试验结果吻合的有限元模型,以该模型为基础进行相关参数分析,并推导多层碳纤维布加固矩形松木梁的抗弯承载力公式。

1 试验设计

松木是中国北方传统木结构建筑的主要承重用材。因此,本文选用松木作为试验用材。试件为矩形简支梁,图 1、2 分别为未加固和加固试件。

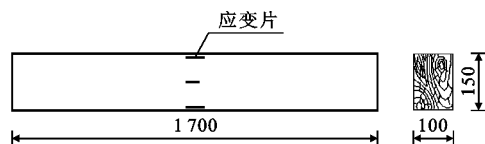


图 1 未加固试件示意(单位:mm)

Fig. 1 Schematic Diagram of Unstrengthened Specimen (Unit:mm)

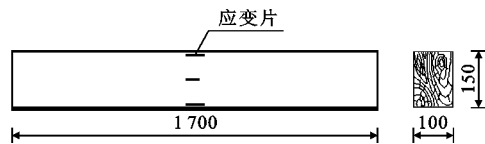


图 2 加固试件示意(单位:mm)

Fig. 2 Schematic Diagram of Strengthened Specimen (Unit:mm)

松木力学参数通过同一批次的木材进行材性试验获得,结果见表 1。碳纤维布的厚度为 0.167 mm,抗拉强度标准值为 3 500 MPa,拉伸弹性模量为 2.4×10^5 MPa,伸长率为 1.8%。底胶、浸渍胶采用配套结构胶。本文试验的试件设计方案见表 2。

表 1 试件力学参数

Tab. 1 Mechanical Parameters of Specimens MPa				
顺纹抗拉强度	顺纹抗压强度	抗弯强度	顺纹抗剪强度	抗弯弹性模量
132.90	42.78	64.31	8.70	12 204.50

表 2 试件设计方案

Tab. 2 Design Scheme of Specimens		
梁类型	试件编号	加固方式
参照梁	PB0Ba	未加固
	PB0Bb	未加固
加固梁	PH1Ba	粘贴 1 层碳纤维布
	PH1Bb	粘贴 1 层碳纤维布
	PH2Ba	粘贴 2 层碳纤维布
	PH2Bb	粘贴 2 层碳纤维布

本文研究采用试验梁弯曲加载装置进行木梁的四点弯曲试验,竖向荷载由最大荷载 200 kN 的液压千斤顶提供,加载值通过 GDD-331 型峰值测力仪确定。加载过程为分级加载,在梁被压褶皱以前,每级荷载增幅约为 5.0 kN,在梁被压褶皱后,每级荷载增幅约为 2.0 kN。考虑到木梁集中受力处会发生横向压坏,在加载处与约束处垫上钢板。当底部木纤维拉断或产生较大位移不适合继续加载时,认为构件已破坏。试验装置如图 3 所示。在每级加载后记录梁跨中截面上木纤维的应变与梁跨中位移,并记录木梁的破坏情况。

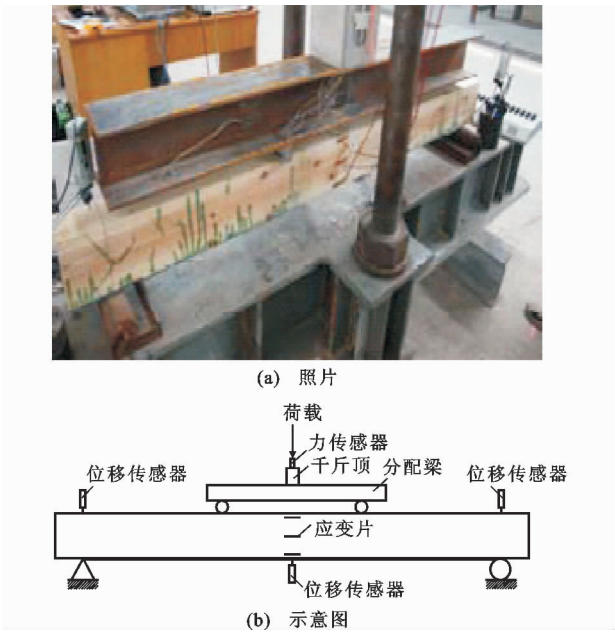


图 3 试验装置

Fig. 3 Test Equipment

2 试验结果分析

2.1 试验现象

对于未加固的试件 PB0Ba, PB0Bb:在极限荷载的 45%~65%时,有细微的响声;在后几级加载中,出现短促的细小劈裂声;加载将近极限荷载时,较大的断裂声出现,最后均为木梁底部跨中处的木纤维发生突然拉断,试件脆性破坏。图 4 为未加固试件的破坏形态。

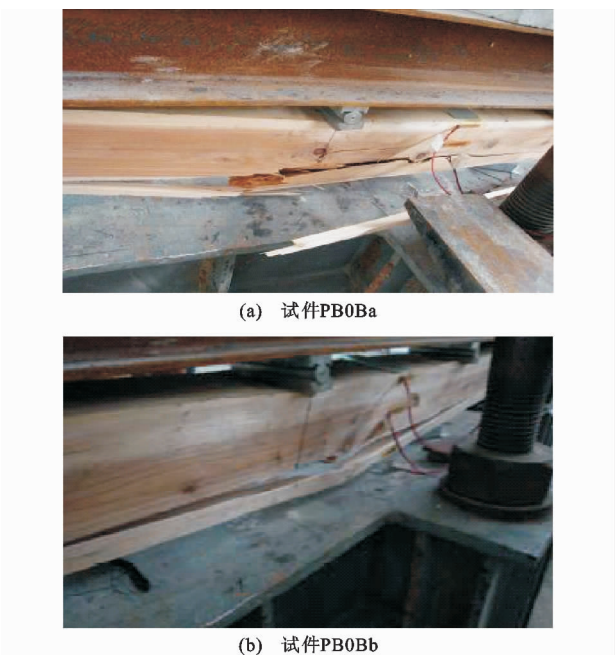


图 4 未加固试件的破坏形态

Fig. 4 Failure Modes of Unstrengthened Specimens

对于碳纤维布加固的试件,当加载达到极限荷载的 55%~65%时,PH1Ba 和 PH1Bb 试件开始出现轻微响声;而后劈裂声出现,跨中底部附近出现些许裂缝;达到极限荷载左右时,底部位置跨中处的木纤维拉断,试件破坏。当加载至极限荷载的 70%~75%时,PH2Ba 和 PH2Bb 试件开始有劈裂声;在后几级加载中,连续的劈裂声出现,加载点处木纤维被压溃;到达极限荷载附近时,连续清晰的劈裂声出现,跨中底部位置处附近的木纤维拉断,试件破坏。在试验过程中,碳纤维布均未出现拉断现象,且仅在少数构件边缘处出现轻微脱离情况,可以认为在本次加载中,碳纤维布与木梁之间始终接触良好。图 5 为加固试件的破坏形态。

2.2 抗弯承载力

抗弯承载力的试验结果见表 3。根据试验结果可以得出:松木梁经碳纤维布粘贴加固后,其抗弯承载力的提高幅度为 12.9%~34.5%。

表 3 主要试验结果

Tab. 3 Main Experimental Results

梁类型	试件编号	碳纤维布层数	抗弯承载力/ (kN·m)	抗弯承载力 提高幅度/%
参照梁	PB0Ba	0	11.60	
	PB0Bb	0	11.50	
加固梁	PH1Ba	1	13.10	12.9
	PH1Bb	1	13.20	14.8
	PH2Ba	2	15.60	34.5
	PH2Bb	2	14.60	27.0

注：抗弯承载力提高幅度是加固梁与未加固梁相比较而言的，例如 PB0Ba 和 PH2Ba；抗弯承载力和后文提及的实测试验极限荷载满足四点弯曲梁的计算公式。

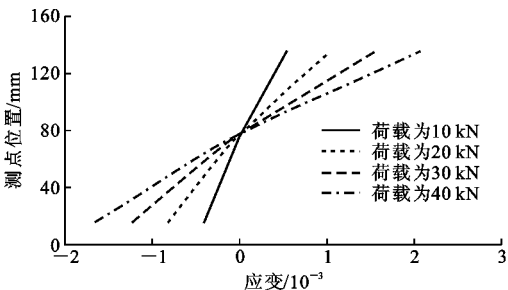


图 6 试件 PH1Bb 跨中截面上的应变分布
Fig. 6 Strain Distribution at Mid-span
Section of Specimen PH1Bb

3 有限元计算

3.1 有限元模型建立

由于试验试件的数量有限,无法进行更多情况下的数据分析,因此,本文采用有限元方法进一步对碳纤维布加固矩形松木梁的受弯性能进行参数分析。在 ANSYS 中建立有限元模型,如图 7 所示。木材采用 Solid95 单元进行模拟,其能较好地模拟木材的正交各向异性与弹塑特性。碳纤维布用 Solid186 单元模拟,根据试验结果可知,木梁和碳纤维布之间连接可靠,因此本次分析不考虑木梁与碳纤维布的黏结滑移。模型加载采用力加载的方式,为避免集中力带来的应力集中效应,故采用与时间相关的等效面荷载形式进行加载。打开大变形控制选项以考虑几何非线性,激活线性搜索和自由度求解预测,同时采用力和位移的 2-范数作为判断收敛的标准。在计算前期对有限元网格进行了多次试算,最终确定了较为合理的有限元网格精度。模型共计 1 360 个 Solid95 单元,150×n(n 为碳纤维布层数)个 Solid186 单元。

由于木材是正交各向异性材料,有纵向、径向、弦向 3 个方向的弹性模量、泊松比、剪切弹性模量共



(a) 试件PH1Ba



(b) 试件PH1Bb



(c) 试件PH2Ba



(d) 试件PH2Bb

图 5 碳纤维布加固试件的破坏形态
Fig. 5 Failure Modes of Specimens
Strengthened with CFRP Sheets

2.3 平截面假定的验证

图 6 为试验数据中比较典型的加固梁在跨中截面沿高度方向的应变分布。从图 6 可以看出,加固梁应变沿高度方向的分布基本符合平截面假定,该结果与参考文献[14]~[16]中的试验结果相吻合。因此,在计算和分析时可以把平截面假定作为一个基本假定。

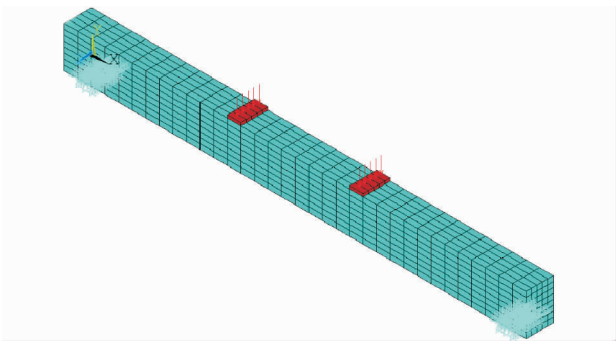


图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite Element Model

9 个独立的弹性常数,参考文献[17]与本文材性试验数据可设置表 4 所示的木材弹性参数。

表 4 木材弹性参数

Tab. 4 Elastic Parameters of Wood

E_L /MPa	E_R /MPa	E_T /MPa	μ_{LT}	μ_{LR}	μ_{RT}	G_{LT} /MPa	G_{LR} /MPa	G_{RT} /MPa
12 205	1221	610	0.1	0.1	0.35	600	700	200

注: E 为弹性模量; G 为剪切弹性模量; μ_{ij} 为*j*方向压缩应变除以*i*方向拉伸应变; L 表示纵向; R 表示径向; T 表示弦向。

碳纤维布采用 Mises 屈服准则,木材则采用广义 Hill 屈服准则。由于本文木材极限强度为清材小样试验测得,因此需要考虑天然缺陷影响系数、干燥缺陷影响系数、长期荷载影响系数和尺寸影响系数。参考文献[18],本文木材的塑性参数取值如表 5 所示。

表 5 木材塑性参数

Tab. 5 Plastic Parameters of Wood

参数	纵向	径向	弦向
$\sigma_{ten-yield}$	30.4	3.04	3.04
$E_{tan-ten}$	0	0	0
$\sigma_{com-yield}$	26.886	3.060	3.060
$E_{tan-com}$	0	0	0
τ	3.352	3.352	3.352
G	0	0	0

注: $\sigma_{ten-yield}$ 为抗拉屈服强度; $\sigma_{com-yield}$ 为抗压屈服强度; τ 为抗剪屈服强度; $E_{tan-ten}$ 为抗拉屈服后模量; $E_{tan-com}$ 为抗压屈服后模量; G 为抗剪屈服后模量。

3.2 有限元模型验证

3.2.1 平截面假定验证

图 8 为通过有限元计算得到的部分加固梁在跨中截面沿高度方向的应变分布。从图 8 可以看出,加固梁的应变沿高度方向的分布基本符合平截面假定,这与试验结果保持一致。

3.2.2 荷载-挠度曲线

图 9 为未加固松木梁、粘贴 1 层碳纤维布的松

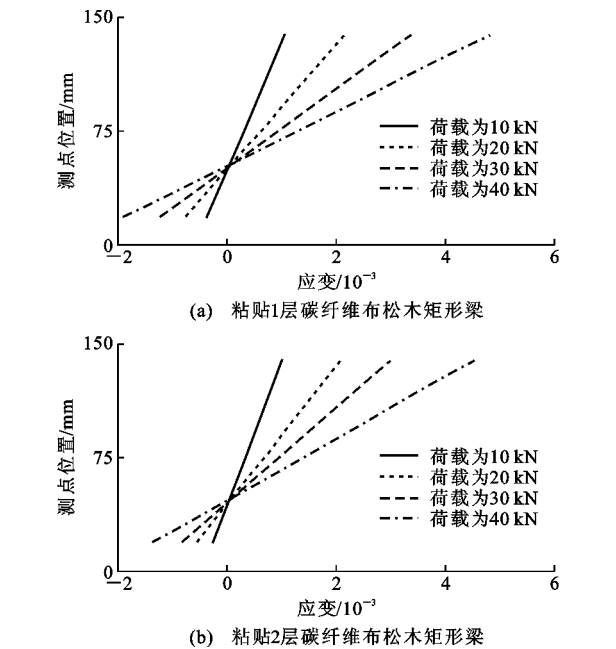


图 8 有限元计算的跨中截面上应变分布

Fig. 8 Strain Distribution at Mid-span Section Calculated with Finite Element Method

木梁与粘贴 2 层碳纤维布的松木梁试验和有限元荷载-挠度曲线。表 6 为试验和有限元计算的抗弯承载力对比分析。

可以看出,有限元模拟的木梁荷载-挠度曲线与抗弯承载力和试验结果,误差在可以接受的范围内。因此,本文建立的有限元模型是准确的。

3.3 参数分析

3.3.1 碳纤维布弹性模量

文献[19]进行了大量碳纤维布的材性试验,研究表明碳纤维布的弹性模量在 200~500 GPa 范围内,其极限抗拉强度最大测试结果约在 5 000 MPa 附近。基于该研究结果,本文在有限元软件中,对加固 1 层碳纤维布的木梁,将碳纤维布的弹性模量取值以 10 GPa 为摄动值进行变化,遍历 200~500 GPa 区间,分析每次改变后碳纤维布弹性模量与极限抗弯荷载的关系,计算结果如图 10 所示。

碳纤维布弹性模量达到加固木材弹性模量的 30 倍以上时,随着弹性模量的继续增大,其对极限荷载的提高作用越来越不明显。可以预测,达到某一超过 500 GPa 的值后,提高弹性模量将逐渐失去提高极限荷载的作用,这是因为:随着碳纤维布弹性模量的增大,整体构件的刚度将越来越高,而间接使得木材拉应力降低;达到某一刚度后,破坏模式将由木材底部的纤维拉断变为碳纤维布的拉断。

为证明该结论,计算了碳纤维布在线弹性范围

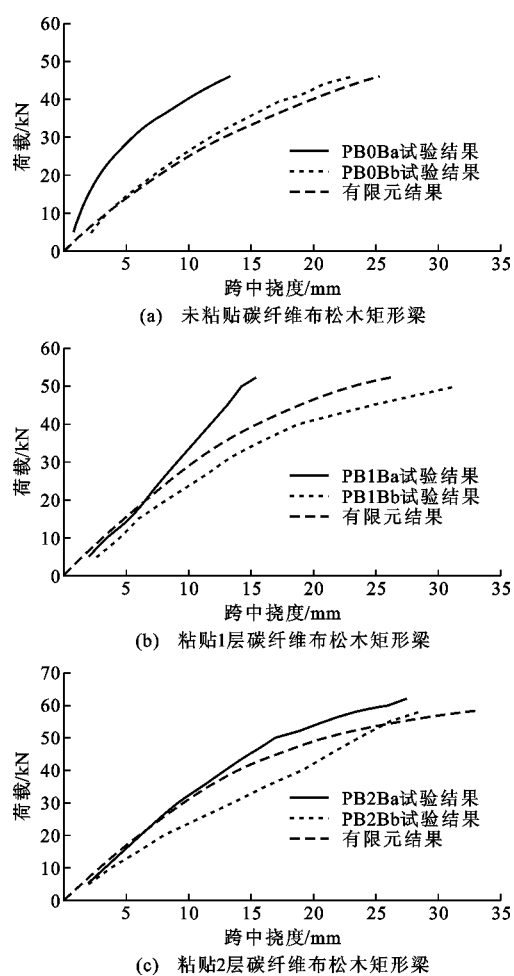


图 9 荷载-挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection Curves

表 6 试验与有限元分析结果对比

Tab. 6 Comparison of Experiment and Finite Element Analysis Results

梁类型	试件编号	抗弯承载力/ (kN·m)	抗弯承载力提高幅 度/%	有限元与试 验极限荷载 相对误差/%
未加固梁	PB0Ba	11.60		0.60
	PB0Bb	11.50		0.26
	有限元模型	11.53		
1 层碳 纤维布 加固梁	PH1Ba	13.10	12.9	0.38
	PH1Bb	13.20	14.8	0.38
	有限元模型	13.15	14.1	
2 层碳 纤维布 加固梁	PH2Ba	15.60	34.5	6.22
	PH2Bb	14.60	27.0	0.21
	有限元模型	14.63	26.9	

内,弹性模量从 200~800 GPa 变化时,底层碳纤维布的 Von Mises 应力值增长趋势。可以发现,在弹性模量高达 800 GPa 后,Von Mises 应力达到了 5 000 MPa 以上,大于文献中测试的最大极限抗拉

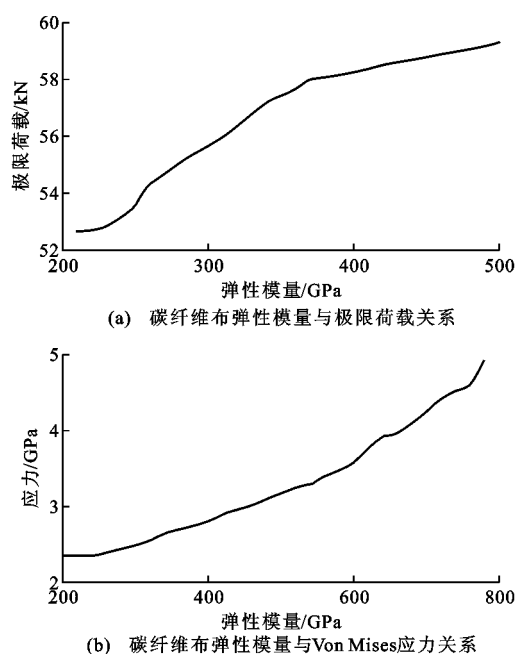


图 10 碳纤维布弹性模量参数分析结果

Fig. 10 CFRP Elastic Modulus Parameter Analysis Results

强度。因此,本文算例中当碳纤维布的弹性模量大于 800 GPa 后,继续增大弹性模量将不会再增加极限荷载值。由此可以说明,只有当碳纤维布弹性模量在小于等于加固木材弹性模量 30 倍时,碳纤维布弹性模量越大,加固后构件抗弯承载力提升效果才更好。

3.3.2 碳纤维布粘贴层数

本文在有限元软件中对加固木梁的碳纤维布层数与抗弯承载力之间的关系进行分析。分析结果如图 11 所示。当碳纤维布层数为 0~3 层时,木材的抗弯承载力得到了显著提升,在超过 3 层后,木材的抗弯承载力变为缓慢提升。这说明:在本文算例中,碳纤维布 0~3 层为适配碳纤维布阶段,该阶段构件破坏机制为木材的受拉区纤维拉断,碳纤维布较好地发挥了作用;碳纤维布 4 层以上为超配碳纤维布阶段,该阶段破坏机制为木材的受压区屈服,由于过多的碳纤维布使构件受拉区高度变小,使得碳纤维布没有发挥应有的效果。

3.3.3 初始裂缝工况

经过多处木结构工地现场考察,考虑了 2 种常见初始缺陷对承载力的影响:①古建筑经受长期荷载后,底部出现裂纹,沿宽度方向的贯穿裂缝宽度为 8 mm,深度为 25 mm;②干缩开裂后产生底部裂缝,沿长度方向的非贯穿裂缝长度为 300 mm,宽度为 5 mm,深度为 20 mm。

在三维裂纹分析软件 FRANC3D 中,参考文献

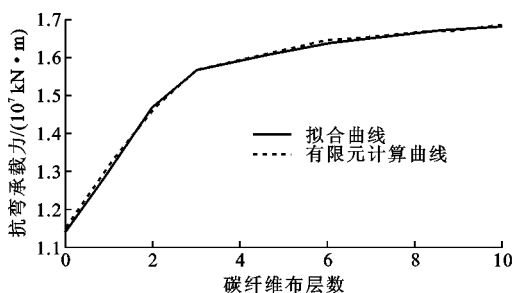
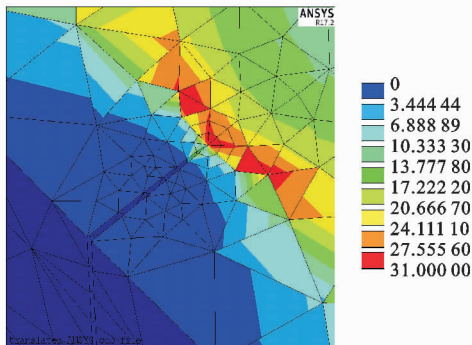
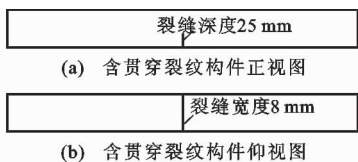


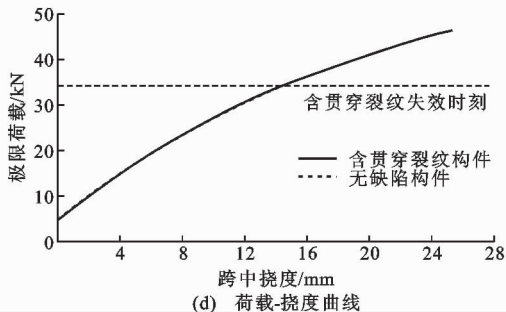
图 11 碳纤维布粘贴层数与极限荷载有限元计算曲线和拟合曲线

Fig. 11 Finite Element Calculation Curve and Fitting Curve of CFRP Sheet Layer Number and Ultimate Load

[20]研究的最佳计算强度因子方式与断裂判据,采用虚拟裂纹闭合法进行应力强度因子计算,并使用最大周向应力准则进行断裂判断,为简化计算,认为发生断裂时即构件失效,结合 ANSYS 进行计算,得到图 12,13 所示的 Von Mises 应力云图与荷载-挠度曲线。



(c) Von Mises应力云图(单位:MPa)

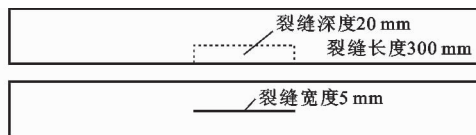


(d) 荷载-挠度曲线

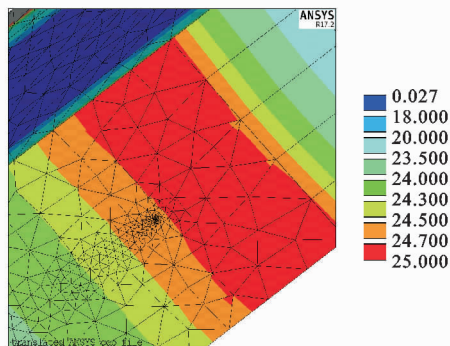
图 12 初始穿透裂纹对构件极限荷载的影响

Fig. 12 Influence of Initial Penetration Crack on Ultimate Load of Component

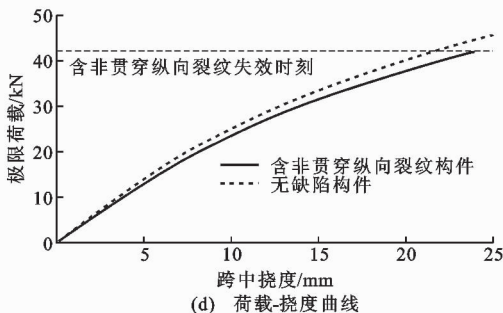
根据结果可以发现,初始缺陷①使得极限承载力变为原来的 72.7%,初始缺陷②使得极限承载力



(a) 含非贯穿纵向裂纹构件裂缝尺寸



(b) Von Mises应力云图(单位:MPa)



(d) 荷载-挠度曲线

图 13 初始非贯穿纵向裂纹对构件极限荷载的影响

Fig. 13 Influence of Initial Non-penetrating Longitudinal Crack on Ultimate Load of Component

变为原来的 93.5%,两者均会略微降低原构件的刚度。事实上,实际构件中常常存在不止 1 条裂纹,因此初始裂纹的存在会极大程度影响结构的极限承载力。

4 计算公式

4.1 理论推导

4.1.1 基本假定

木梁抗弯承载力公式推导采用如下基本假定:①木材为均匀无天然缺陷构件;②考虑线弹性应力-应变碳纤维布;③木材表现为受拉线弹性、受压理想弹塑性;④达到极限承载力之前,碳纤维布与木材黏结可靠,保持应变协调;⑤碳纤维布中心离梁顶的距离与梁高近似相等;⑥木材的弹性模量在拉、压、弯状态下相同;⑦截面符合平截面假定。

4.1.2 抗弯承载力计算公式

根据试验中记录的破坏现象,木材基本为受拉边脆断破坏,顶部木材的压应变小于木材的极限压应变。参考文献[21],由平截面假定、力学平衡方程

和变形协调关系可得

$$c=f_bbh^2/(2E_f\frac{f_b}{E_b}A_f+2f_bbh)$$

(1)

$$M_u=\frac{f_bbc^2}{3}+\alpha\frac{f_bE_fA_fc}{E_b}+\frac{f_bb(h-c)^3}{3c}$$

(2)

式中： c 为木梁截面受拉区高度； b 为木梁截面宽度； h 为木梁截面高度； f_b 为考虑天然缺陷、干燥缺陷、长期荷载和尺寸影响系数后的木材抗弯强度； E_b 为木材抗弯弹性模量； E_f 为碳纤维布的弹性模量； A_f 为碳纤维布的面积； α 为衡量碳纤维影响的系数； M_u 木梁抗弯承载力。

对试验数据进行回归分析，得到碳纤维布加固矩形松木梁的抗弯承载力计算公式为

$$M_u=\frac{f_bbc^2}{3}+1.93\frac{f_bE_fA_fc}{E_b}+\frac{f_bb(h-c)^3}{3c}$$

(3)

4.2 有限元拟合

4.2.1 结果分析

在有限元中考虑铁木辛柯梁效应，并且由于碳纤维布层数增加，会使得受拉区高度变化，因此需要对受拉区高度 c 进行修正，同时碳纤维布的适配与否也会影响抗弯承载力，综合上述因素对 M_u 进行修正，拓宽公式适用范围为

$$c'=\alpha_sf_bbh^2/(2\beta_fE_f\frac{f_b}{E_b}A_f+2f_bbh)$$

(4)

$$M'_u=\begin{cases}\frac{f_bbc'^2}{3}+\lambda\frac{f_bE_fA_fc'}{E_b}+\frac{f_bb(h-c')^3}{3c'} & 0\leq n<3 \\ M_u=\varphi_i\frac{f_bbc'^2}{3}+\phi\frac{f_bE_fA_fc'}{E_b}+ & \\ \omega_c\frac{f_bb(h-c')^3}{3c'} & n\geq 3\end{cases}$$

(5)

式中： c' 为木梁截面修正后的受拉区高度； α_s 为考虑三维实体计算的修正系数； β_f 为考虑碳纤维层数影响程度的修正系数； M'_u 为木梁抗弯承载力修正值； φ_i 为考虑受拉区作用力修正系数； ω_c 为考虑受压区作用力修正系数； λ 、 ϕ 为碳纤维层数对抗弯承载力影响系数。

4.2.2 抗弯承载力拟合公式

对有限元数据进行回归分析，得到碳纤维布加固矩形松木梁的抗弯承载力计算公式，即

$$c'=0.998\,5f_bbh^2/(2\times2.591E_f\frac{f_b}{E_b}A_f+2f_bbh)$$

(6)

$$M'_u=\begin{cases}\frac{f_bbc'^2}{3}+1.189\frac{f_bE_fA_fc'}{E_b}+\frac{f_bb(h-c')^3}{3c'} & 0\leq n<3 \\ 2.841\frac{f_bbc'^2}{3}+3.351\frac{f_bE_fA_fc'}{E_b}- & \\ 0.252\,8\frac{f_bb(h-c')^3}{3c'} & n\geq 3\end{cases}$$

(7)

表 7 为公式(7)~(9)的拟合情况，其中和方差与均方根均接近于 0，而确定系数与校正决定系数则均接近于 1；图 11 中的实线给出了抗弯承载力有限元拟合值，与虚线对比可以说明公式拟合结果非常好。将实测拟合公式、有限元拟合公式分别与实测值进行对比(表 8)。结果表明：在适配范围内实测拟合公式也具有很好的准确性。

表 7 c' 与 M'_u 拟合情况

Tab. 7 Fitting Situations of c' and M'_u

参数	c'	$M'_u(0\leq n<3)$	$M'_u(n\geq 3)$
和方差	0.402 9	0.503 9	0.374 1
确定系数	0.999 5	0.989 5	0.989 0
校正决定系数	0.999 4	0.989 5	0.984 6
均方根	0.224 4	0.158 7	0.242 5

表 8 碳纤维布适配时抗弯承载力公式拟合结果

Tab. 8 Fitting Results of Formula for Flexural Bearing Capacity when Quantity of CFRP Is Right

碳纤维布层数	抗弯承载力/(kN·m)			$E_{RT}/\%$	$E_{RF}/\%$
	实测值	实测拟合值	有限元拟合值		
0	11.55	11.40	11.42	1.30	1.13
1	13.15	13.08	13.02	0.53	0.99
2	15.10	14.73	14.72	2.45	2.58

注：抗弯承载力实测值为 2 次试验测得的抗弯承载力平均值； E_{RT} 为抗弯承载力实测拟合值与实测值的相对误差； E_{RF} 为抗弯承载力有限元拟合值与实测值的相对误差。

5 结 语

- (1)与未加固试件相比，松木梁经碳纤维布粘贴加固后，其抗弯承载力有了一定的提高，抗弯承载力提高幅度为 12.9%~34.5%。
- (2)碳纤维布弹性模量在加固松木梁的弹性模量 30 倍以内时，随着碳纤维布弹性模量增加，松木梁的极限抗弯能力显著升高；超过这一限值后，提高速度逐渐减慢，达到某一理想极限值后，则不再提高抗弯承载力。因此，未来制作高强碳纤维布可以参考这一阈值。
- (3)基于试验数据和有限元计算结果推导了 0~2 层碳纤维布加固矩形松木梁的抗弯承载力计算公式，并对矩形松木梁进行数值分析，将其抗弯承载

力公式推广到适用3层及以上。将计算结果与实测值进行了对比,验证了该公式的准确性,可以合理预测多层碳纤维布加固松木梁的抗弯承载力。综合考虑结构加固效果与经济性,认为在进行碳纤维布加固松木梁(不考虑损伤)时,粘贴3层或4层碳纤维布最为合理,这一推论仍有待进一步试验来证明。

(4)通过定量计算2种不同的常见初始裂缝构件,即经受长期荷载后底部出现裂纹的构件与干缩开裂后产生裂缝的构件,得出在该尺寸初始裂缝存在的情况下,极限抗弯承载力会分别变为原来的72.7%,93.5%,并对刚度有一定程度的削弱作用。因此,在工程设计和施工时,尽量避免将裂缝、节疤、斜理纹等缺陷放置在木梁的受拉边。

(5)本文对松木梁粘贴3个应变片,得出了构件受力变形满足平截面假定的结论,这一点需要在后续试验研究中增设应变片个数来进一步验证。另外,在后续研究中应进一步考虑碳纤维布的端部锚固效应对承载力的影响。

参考文献:

References:

- [1] 许清风,朱 雷. FRP加固木结构的研究进展[J]. 工业建筑,2007,37(9):104-108.
XU Qing-feng, ZHU Lei. State-of-the-art of Wood Structure Strengthened with FRP[J]. Industrial Construction,2007,37(9):104-108.
- [2] 周 乾,闫维明,李振宝,等. 古建筑木结构加固方法研究[J]. 工程抗震与加固改造,2009,31(1):84-90.
ZHOU Qian, YAN Wei-ming, LI Zheng-bao, et al. Study on Strengthening Methods of Timber Structures of Ancient Buildings[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2009,31(1):84-90.
- [3] 张大照. CFRP布加固修复木柱梁性能研究[D]. 上海:同济大学,2003.
ZHANG Da-zhao. Study of Strengthening Wood Column and Beam with CFRP Sheet [D]. Shanghai: Tongji University,2003.
- [4] 李向民,许清风. 粘贴CFRP板加固木梁试验研究[J]. 建筑结构,2011,41(10):123-125,145.
LI Xiang-min, XU Qing-feng. Experimental Research on Timber Beams Strengthened with CFRP Plates [J]. Building Structure,2011,41(10):123-125,145.
- [5] 洪 雷,太永伟. 预应力CFRP加固高强混凝土梁试验[J]. 建筑科学与工程学报,2018,35(6):66-72.
HONG Lei, TAI Yong-wei. Experiment of Prestressed CFRP Reinforced High Strength Concrete Beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2018,35(6):66-72.
- [6] 王苏岩,张红涛,朱方芳,等. 复杂环境及荷载共同作用下CFRP加固高强钢筋混凝土梁受力性能试验[J]. 建筑科学与工程学报,2018,35(4):54-62.
WANG Su-yan, ZHANG Hong-tao, ZHU Fang-fang, et al. Mechanical Performance Test of High-strength Reinforced Concrete Beam Strengthened by CFRP Under Combined Action of Complex Environment and Loading[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2018,35(4):54-62.
- [7] DEMPSEY D D, SCOTT D W. Wood Members Strengthened with Mechanically Fastened FRP Strips [J]. Journal of Composites for Construction,2006,10(5):392-398.
- [8] 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.
- [9] RESCALVO F J, VALVERDE-PALACIOS I, SU-AREZ E, et al. Experimental and Analytical Analysis for Bending Load Capacity of Old Timber Beams with Defects when Reinforced with Carbon Fiber Strips [J]. Composite Structures,2018,186:29-38.
- [10] 周 乾,杨 娜,闫维明. CFRP布墩接加固木柱轴压试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(增1):314-320.
ZHOU Qian, YANG Na, YAN Wei-ming. Experimental Study on Axial Compression of Timber Columns Strengthened by CFRP-Dunjie Method on Decay Bottoms[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1):314-320.
- [11] 邵劲松,薛伟辰,刘伟庆,等. FRP加固木梁受弯承载力计算[J]. 建筑材料学报,2012,15(4):533-537.
SHAO Jin-song, XUE Wei-chen, LIU Wei-qing, et al. Calculation of Bending Capacity of Wood Beams Reinforced with FRP[J]. Journal of Building Materials, 2012,15(4):533-537.
- [12] XU Q F, ZHU L, LI X M. Flexural Behavior of Wood Beams with Knots Strengthened with CFRP [C]// University of Patras. Proceedings of FRPRCS-8. Patras: University of Patras,2007:243-248.
- [13] 高本立,张 敏,蒋剑彪,等. 矩形截面木梁和碳纤维布加固木梁的受弯性能研究[J]. 建筑结构,2009,39(3):107-109,94.
GAO Ben-li, ZHANG Min, JIANG Jian-biao, et al. Study on the Flexure Behavior of Rectangular Section Timber Beams and That Strengthened with CFRP sheets[J]. Building Structure, 2009, 39(3):107-109,

- 94.
- [14] 周钟宏,刘伟庆,张怀金. CFRP 加固木梁受弯性能的试验研究[J]. 建筑技术开发,2013,40(5):2-6.
ZHOU Zhong-hong, LIU Wei-qing, ZHANG Huai-jin. Experimental Study on the Flexural Behaviors of Timber Strengthened by CFRP[J]. Building Technique Development,2013,40(5):2-6.
- [15] 代庭苇,季 韬,张 鹰,等. 碳纤维布层数对榫卯接长木梁抗弯性能影响的试验研究[J]. 福州大学学报:自然科学版,2015,43(2):225-230.
DAI Ting-wei, JI Tao, ZHANG Ying, et al. Experimental Study for the Effect of CFRP Sheet Number on the Flexural Behavior of Timber Beams Extended by a Mortise-tenon Joint[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2015, 43 (2): 225-230.
- [16] 许清风,陈建飞,李向民. 粘贴竹片加固木梁的研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2012,44(1):36-42.
XU Qing-feng, CHEN Jian-fei, Li Xiang-min. Study on Timber Beams Strengthened with Bamboo Strips[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition,2012,44(1):36-42.
- [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 Board of Wood Structure Design Manual. Wood Structure Design Manual[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press,2005.
- [18] 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 on Strengthening for Chinese Ancient Timber Buildings[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2007.
- [19] 何世华. 碳纤维布力学性能指标取值探讨[J]. 工业建筑,2012,42(5):119-121.
HE Shi-hua. Discussion on Mechanical Properties of Index Value for Carbon Fiber Sheet[J]. Industrial Construction,2012,42(5):119-121.
- [20] CHUN Q,ZHANG C W,JIA X H. Comparative Research on Calculation Methods of Stress Intensity Factors and Crack Propagation Criterion[C]//MAGD A W. Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Fatigue and Wear. Singapore City:Ghent University,2018:202-209.
- [21] 杨会峰,刘伟庆,邵劲松,等. FRP 加固木梁的受弯性能研究[J]. 建筑材料学报,2008,11(5):591-597.
YANG Hui-feng, LIU Wei-qing, SHAO Jin-song, et al. Study on Flexural Behavior of Timber Beams Strengthened with FRP[J]. Journal of Building Materials,2008,11(5):591-597.