

不同荷载比下螺栓斜向加固对既有建筑耐火极限的影响

张凤丽 万振东 陈国宝 郑嘉瑶 王冬冬 曲鑫鑫

中国建筑第六工程局有限公司

摘要:目的 探究不同荷载比下螺栓加固对既有建筑耐火极限的影响。方法 对柱上双梁加固前后的模型进行数值模拟。结果 $\lambda=1$ 时,未加固模型的耐火极限为16.5min,而加固模型,无论是变形量还是变形速率均未达到破坏标准; $\lambda=3$ 时,未加固模型的耐火极限为9.84min,而加固模型的耐火极限为18.69min, $\lambda=5$ 时,未加固模型的耐火极限为7.51分钟,而加固模型的耐火极限为11.34min。结论 $\lambda=1$ 时可以保证加固模型高温下的承载能力, $\lambda=3$ 时其耐火极限增加了接近一倍的时间, $\lambda=5$ 时其耐火极限为原来的1.5倍;加固后的模型其耐火极限有了较大的提高,证明此加固方法有效。

关键词:村镇建筑;火灾模拟;钢-木螺栓连接;热-力耦合;耐火极限

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.14.024

引言

众所周知,木材虽然是易燃材料,但在受火过程中会形成一层封闭的炭化层,保护了内部木材免受火灾影响。对于木结构建筑,在建造时材料选择随意,木材存在木节、初始裂缝等原始缺陷,许多房屋年久失修,构件老化损伤,节点松动、脱榫折榫,木柱开裂腐朽,木构架整体倾斜,屋面漏雨等现象严重^[1]。

本论文提出了一种新型木梁柱节点加固方式,即用螺栓对木梁柱节点进行斜向加固,将螺栓放在炭化层以内,以保证螺栓不受高温影响。这种方式不仅符合当地的经济条件,提高了耐火极限,而且螺栓将榫头和卯口紧密的连接在一起,在地震来临时,可以有效的防止卯口脱榫,保证木结构提供完整的承载能力。

一、节点设计

采用云贵地区常见的杉木作为本论文木梁柱节点模型用材,根据实地调研的结果确定木梁柱节点模型榫卯的具体尺寸,由于一榫框架存在对称性,选取其木梁的二分之一作为本文模型的梁长,另外为保证木材材性的一致性,木梁柱节点的柱高取为卯口的10倍,木梁柱节点三维模型及所选尺寸如下所示。

表1.1 各构件所选尺寸表

试件名称		尺寸/mm
柱	长	1200
	柱径	160
梁	长	1500
	宽	90
	高	120
榫头/卯口	长	160
	宽	60
	高	120

(一) 计算模型三维图

1) 未加固模型

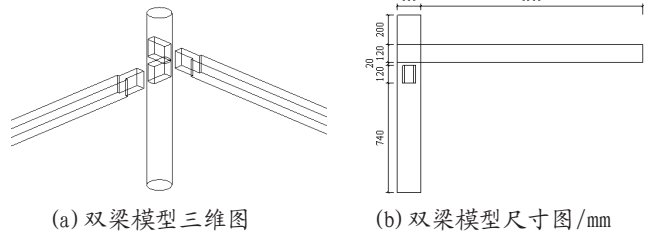


图1.1 未加固双梁节点三维模型图

2) 加固模型

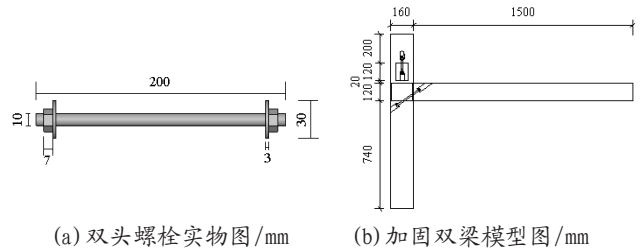


图1.2 加固节点三维模型图

本加固方式考虑的是南方村镇建筑既有房屋的加固,具体的加固流程为首先根据未加固模型的温度场分析确定炭化层的基本厚度,在木梁柱节点上做好标记,然后选取直径为12毫米的钻头进行斜向钻孔,对螺栓施加预紧力,将木梁柱节点紧固在一起,剩余缝隙用混凝土进行封填,再在表面涂刷防火涂料,进行二次防护。具体的三维模型图和螺栓的细节图如上图2.2所示。

二、数值模拟分析结果

(一) 温度场结果

对柱上双梁加固前后模型进行了高温数值分析,通过ABAQUS软件模拟出了不同受火时间下的温度云图,其具体结果如下图2.1所示:

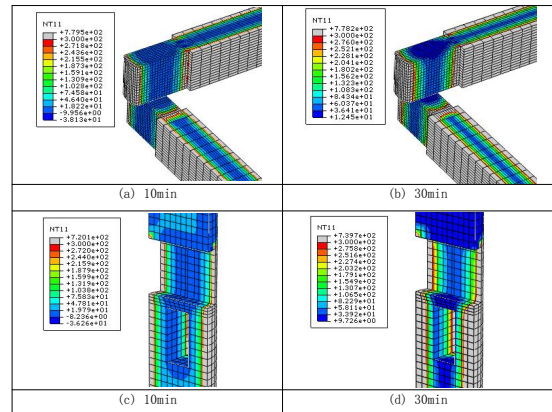


图2.1 未加固模型各构件不同时刻下温度云图

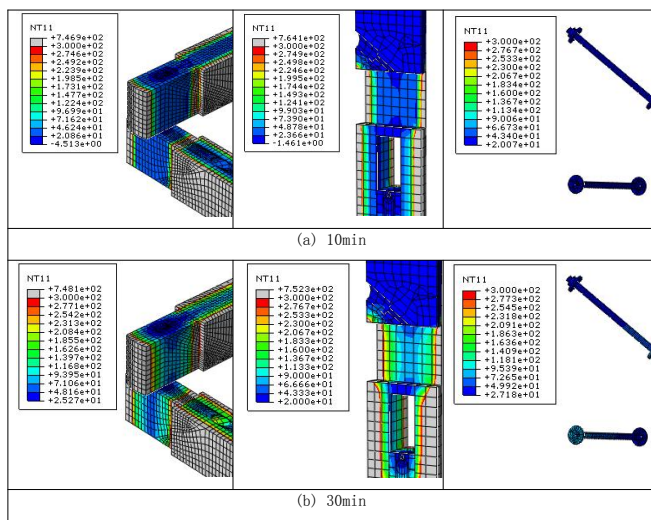


图 2.2 加固模型各构件不同时刻温度云图

上图 2.1、2.2 显示了柱上双梁模型加固前后不同截面处在受火前 30min 内的温度云图，图中灰色部分为温度超过 300℃ 后木材发生炭化的部分。从图中可以看出，随着温度的升高，前 30min 内，木梁柱节点炭化深度不断增加，且有较明显的变化。

由于螺栓放置在炭化层以内，受到炭化层的保护，螺栓位于柱子内部的部分，不受火场的影响，温度几乎不变；木梁三面受火，螺栓位于梁内的部分，受到炭化层的保护，温度爬升不快，前 30min 内最大温度仅达到 100 多度。

另外，上梁和下梁反映在受火面的变化趋势相一致，不同之处在于上表面的炭化深度表现不同。上梁上表面在宽度方向上随着两侧面受火时间加长，炭化深度不断增加；高度方向上由于上表面不受火而没有发生炭

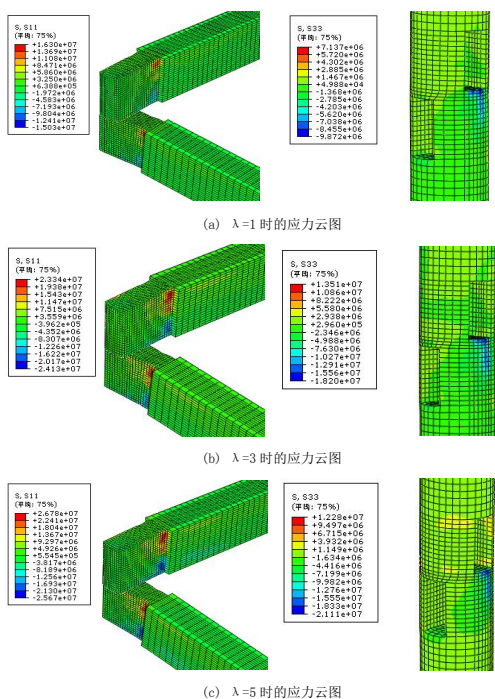


图 2.3 未加固模型不同荷载比下应力云图

化。下梁上表面同样为不受火面，却在下梁变截面处高度方向上发生了炭化，原因可能是由于高于下梁上表面的柱子以及上梁处于火场之中，对下梁上表面产生了高温作用，导致了变截面处高度方向上的炭化。

(二) 结构场模拟结果

对加固前后柱上双梁模型进行了结构应力场数值模拟，通过 ABAQUS 软件模拟出了不同荷载比下榫头和卯口处破坏时刻的应力云图，其具体结果如下图 2.3 所示：

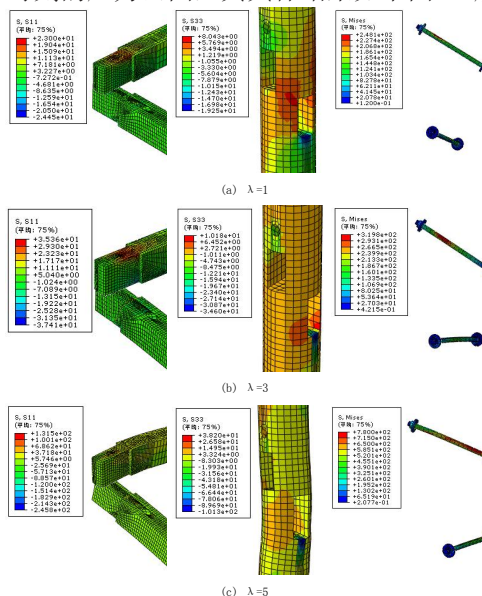


图 2.4 加固模型不同荷载比下应力云图

上图 2.3、2.4 给出了加固前后柱上双梁模型各构件在不同荷载比下顺纹方向（即梁在 S11 方向和柱在 S33 方向）破坏时刻的应力云图。可以看出：在压强作用下，梁上最大拉压应力均出现在榫头靠近变截面处，上部主要承受拉应力，下部主要承受压应力；针对柱身卯口部位，不同荷载比下上卯口的应力均小于下卯口的应力，与榫卯节点实际受力情况相一致，证明了模型的准确性。且卯口内部下截面压应力明显，主要原因在于均布荷载作用下的榫卯挤压作用；另外针对螺栓应力图可以看出，由于施加了螺栓预紧力，螺栓最大应力发生在螺杆中间部位，并逐渐向两侧发展；另外各构件所受应力随着荷载比的增大也逐渐增大。

比较双梁模型上梁与下梁的应力大小，发现：针对拉压应力，上榫头与下榫头承受的拉应力相差不大，但上卯口承受的压应力要远大于下卯口承受的压应力。

(三) 结果

1. 温度测点对比

将双梁模型加固前后不同位置处的测点进行升温后的温度对比，通过图 2.5 可以发现：

上梁与下梁加固前后模型的温度攀升趋势一致；

测点 1#、3#、4#、5#、7# 在升温到一定度数后均出现了下降段，原因在于在燃烧了 30 多分钟后，自然火呈现衰退现象，越靠近受火面，衰退的速率越快；

测点 6# 的温度变化在前 40min 里都是缓慢提升的，

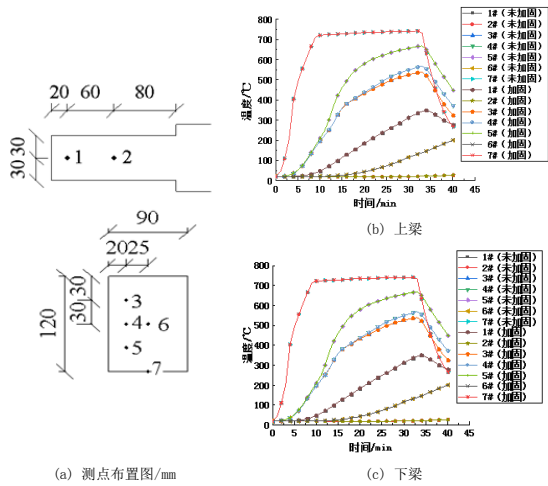


图2.5 双梁模型温度测点对比图

没有下降段，虽然周围火场温度呈现降低趋势，但是还是比木材内部温度要高，依然可以给木材内部提供升温条件，再加上炭化层的保护，所以测点还是逐渐升温的；

测点2#位于榫头正中间位置，受到柱身的保护，所以温度几乎没有变化；

另外，比较加固前后同一位置处的测点，不管加固与否，相同测点处的温度都是一致的，加固措施并不影响木材温度场的变化。

2. 炭化速率对比

将双梁模型加固前后的炭化速率^[8]进行整理、分析，如表2.1所示：

表2.1 双梁炭化速率对比分析

构件	原始尺寸(mm)	炭化速率(mm/min)						
		未加固模型			加固模型			
		10min	20min	30min	10min	20min	30min	
上榫头	L	160	1.22	1.03	0.84	1.14	1.02	0.91
下榫头	L	160	1.22	1.01	0.82	1.15	1.04	0.92
上梁	B	90	1.38	1.19	1.03	1.24	1.11	1.03
	H	120	1.18	1.02	1.00	1.17	1.05	0.94
下梁	B	90	1.39	1.21	1.03	1.27	1.13	1.05
	H	120	1.19	1.00	0.99	1.19	1.06	0.96
上卯口	D	160	1.28	1.24	0.95	1.21	1.08	0.97
下卯口	D	160	1.25	1.20	0.92	1.23	1.09	0.99

从构件来看：卯口以及梁跨宽度方向，因为双面受火，其炭化速率要高于单面受火的榫头以及梁跨的长度方向。

从时间方面看：针对上下榫头以及卯口部位，未加固模型的炭化速率前30min内总体上大于加固模型的炭化速率；但是对于上下梁来说，未加固模型的炭化速率只有前10min是明确大于加固模型的炭化速率的，但后20min，两个模型的炭化速率并无明显规律性的特征。

其次，不管加固与否，随着时间的增加，各构件的炭化速率都是逐渐降低的。

3. 耐火极限对比

双梁模型取上梁数据绘制位移-时间曲线，将不同荷载比下模型加固前后的数据进行对比，如图2.6所示：

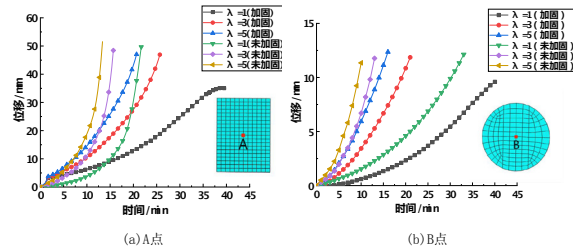


图2.6 双梁模型加固前后典型位置位移-时间曲线

针对梁端位移-时间曲线：

荷载比相同时，加固后的模型前期位移相比较加固前的模型增速较快，随着时间的发展，加固前的模型位移增速逐渐加快，加固后的模型位移增速逐渐变缓。

荷载比不同时，比较加固前后的单梁模型，加固后的模型明显比加固前的模型位移增加缓慢， $\lambda=1$ 时甚至没有达到破坏标准，说明螺栓加固起到了较好的作用。

针对柱顶位移-时间曲线：

不同荷载比下单梁模型加固前后的位移-时间曲线总体变化趋势是相同的，加固前的模型总体上比加固后的模型更快达到破坏变形量，但是加固前荷载比 $\lambda=1$ 时的耐火极限要大于加固后荷载比 $\lambda=3, 5$ 模型，说明，螺栓加固对柱身的影响要小于对梁身的影响。

表2.2 双梁模型耐火极限

荷载比	耐火极限			
	未加固双梁模型		加固双梁模型	
	按变形量判别	按变形速率判别	按变形量判别	按变形速率判别
$\lambda=1$	20.6min	16.5min	-	-
$\lambda=3$	13.0min	9.84min	21.14min	18.69min
$\lambda=5$	10.4min	7.51min	15.76min	11.34min

将不同荷载比下未加固双模型的耐火极限与加固双梁模型做对比， $\lambda=1$ 时，未加固模型的耐火极限为16.5min，而加固模型，无论是变形量还是变形速率均未达到破坏标准； $\lambda=3$ 时，未加固模型的耐火极限为9.84min，而加固模型的耐火极限为18.69min， $\lambda=5$ 时，未加固模型的耐火极限为7.51min，而加固模型的耐火极限为11.34min。

三、结论

通过对比发现， $\lambda=1$ 时可以保证加固模型高温下的承载能力， $\lambda=3$ 时其耐火极限增加了接近一倍的时间， $\lambda=5$ 时其耐火极限为原来的1.5倍；加固后的模型其耐火极限有了较大的提高，证明了加固方法的有效性，但随着荷载比的增加，耐火极限增加的越来越小。

参考文献

[1] 梁利军. 穿斗式木结构民居现状调查与安全性提升技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技