

石若利,熊建漓,张军,等.基于 ABAQUS 的木结构房屋榫卯节点加固——以云南昭通光明村为例[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(2): 33-42. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.02.006

SHI R L, XIONG J L, ZHANG J, et al. On Strengthening of Tenon-mortise Joint of Wood Structure Building Based on ABAQUS: A Case Study of Guangming Village, Zhaotong City, Yunnan Province[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022,37(2): 33-42. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.02.006

基于 ABAQUS 的木结构房屋榫卯节点加固

——以云南昭通光明村为例

石若利¹,熊建漓²,张军^{1*},史少华³,李其伦¹

(1.云南大学 建筑与规划学院,云南 昆明 650500;

2.重庆交通大学 土木工程学院,重庆 400074;3.四川文理学院 建筑工程学院,四川 达州 635000)

摘要:对光明村木结构房屋的榫卯节点进行分析,根据实际调研结果,以光明村木结构常见节点为研究对象,提出 6 种加固方式,采用 ABAQUS 软件建模分析节点加固后的性能提升情况.结果表明:扁钢加固、马口铁加固、扁钢和马口铁组合加固、扒钉加固、钢夹板加固、钢夹板和扒钉组合加固时,榫卯接头根部的最大米泽斯应力分别为 1.6,10.8,4.1,2.6,3.0,1.6 MPa,梁最大挠度分别为 0.72, 1.52, 0.36, 0.70, 0.83, 0.67 mm,榫卯节点加固后最大米泽斯应力和最大挠度均得到有效降低,最大米泽斯应力减少率分别为 97.04%, 86.25%, 94.75%, 96.70%, 96.19%, 97.97%,最大挠度减少率分别为 81.59%, 61.13%, 90.78%, 82.10%, 78.77%, 82.86%,双侧弧形软钢加固对节点产生的应力减少最少,马口铁加固对节点产生的最大挠度减少最少.本研究可为类似受损木结构房屋的修缮和抗震预加固提供参考.

关键词:木节点加固;有限元分析;榫卯节点;光明村

中图分类号:TU366.2 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2022)02-0033-10

On Strengthening of Tenon-mortise Joint of Wood Structure Building Based on ABAQUS: A Case Study of Guangming Village, Zhaotong City, Yunnan Province

SHI Ruoli¹, XIONG Jianli², ZHANG Jun¹, SHI Shaohua³, LI Qilun¹

(1. School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming 650500, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. School of Architectural Engineering, Sichuan University of Arts and Science, Dazhou 635000, China)

Abstract: In order to study the influence of different reinforcement methods on the stress and deflection of mortise and tenon joints, this paper analyzes the mortise and tenon joints of wood structure houses in Guangming Village. It puts forward six reinforcement methods, and uses ABAQUS software to model and analyze the performance improvement of joints after reinforcement. Results show that the maximum Mises stress at the root of mortise joint is 1.6,10.8,4.1,2.6,3.0 and 1.6 MPa respectively, and the maximum deflection of beam is 0.72, 1.52,0.36,0.70,0.83 and 0.67 mm respectively. The maximum stress and maximum deflection of mortise and

收稿日期:2020-11-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11862024;51264037)

*通信作者,E-mail:zhang334513@163.com

tenon joints after reinforcement are effectively reduced. The maximum stress reduction rates are 97.04%, 86.25%, 94.75%, 96.70%, 96.19% and 97.97% respectively, and the maximum deflection reduction rates are 81.59%, 61.13%, 90.78%, 82.10%, 78.77% and 82.86%. The stress reduction of joints by bilateral arc mild steel reinforcement is the least, and the maximum deflection reduction of joints by tinplate reinforcement is the least. This study provides a reference for the repair and seismic pre reinforcement of similar damaged wood structure buildings.

Keywords: wood joint reinforcement; finite element analysis; tenon and tenon joint; Guangming Village

木结构建筑因其取材方便、设计施工灵活、工期短、污染小和造价成本低等优点,得到大面积使用,在历史发展中形成了建筑史上独特的木构架建筑体系.木构件间的连接形式基本决定了原木结构体系的力学性能^[1],通常,木结构建筑在梁柱节点的地方采用榫卯结构,因其材料质轻而强度高,故抗震性能较好^[2].榫卯连接需要非常严格的工艺,因此对施工的要求较高^[3].作为木构架房屋的重要装配点,榫卯节点是木结构的受力薄弱位置,在水平地震力作用下,容易出现水平拔榫现象,使整体或局部木结构出现歪闪、倾斜甚至破坏的问题^[4].

当前,有限元模拟和试验是研究木质榫卯构件的主要手段^[5].在理论研究方面,翟磊等^[6]对扁钢加固的受损榫卯节点进行了研究;杨森^[7]计算出在单调加载下的木质榫卯构件的弯矩-转角关系;陈春超^[8]提出了用于木质房屋架构的安全评价方法.在实验研究方面,Ghazijahani T G等^[9]使用经过CFRP加固的木质榫卯构件进行三点弯曲实验;Seri N A等^[10]在此基础上整理部分研究成果,得出用CFRP加固木梁具有重要的研究价值意义;Lindt J W等^[11-12]做了大量的振动台试验和数值模拟分析来评价加固的效果.现有研究主要限于采用单构件的方式对榫卯节点加固,而对于多构件组合加固方式的研究较少,因此,分别探讨单构件与多构件加固对榫卯节点受力性能的影响具有重要意义.

选择云南光明村作为研究区域,对木结构房屋节点加固进行定量分析,以期为今后学者的相关研究提供一定的支持.

1 研究领域及数据处理

1.1 研究区域的选择

光明村隶属云南省昭通市鲁甸县龙头山镇($103^{\circ}24'11''E$, $27^{\circ}4'30''N$),全村总面积 21.20 km^2 ,海拔 $1\ 700 \text{ m}$,年平均气温 $15.80 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 $1\ 002 \text{ mm}$ ^[13].光明村地处滇东北地区,该地区的地震发生率高,所处的乌蒙山区地形复杂^[14].此外,年久失修,虫蛀损害及其木材经年腐朽使得光明村木结构房屋的安全性普遍较低^[15].因此,对光明村木结构节点进行加固研究是非常有必要的.

1.2 数据的采集和处理

光明村的民居采用木结构所占的比例很大,住宅以木结构构件为主要承重构件的现象也较为普遍,是光明村的一种传统民居形式.这种民居形式的出现是基于几百年来该地地理环境、气候条件和经济基础等客观因素,与当地村民的生活生产习惯相契合,与村庄的地理地形相结合,在不做任何装饰的情况下形成了当地的自然肌理^[16].

根据光明村的走访调研成果,三角屋架结构是光明村的主要建筑形式,一般为单层,主要结构示意图如图 1 所示,其中,横梁截面是矩形($15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$),立柱截面也为矩形($21 \text{ cm} \times 21 \text{ cm}$).

针对榫卯节点破坏,采用 $210 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$ 的矩形截面进行研究,横梁长 950 mm ;柱截面采用矩形截面,尺寸 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,长 600 mm .榫卯节点的尺寸性质如图 2 和图 3 所示.

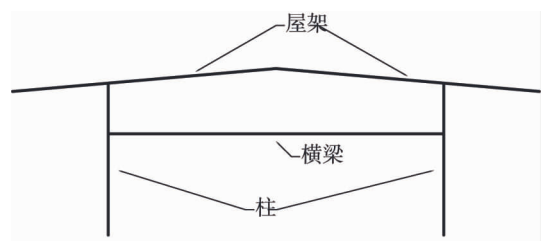


图 1 光明村房屋结构

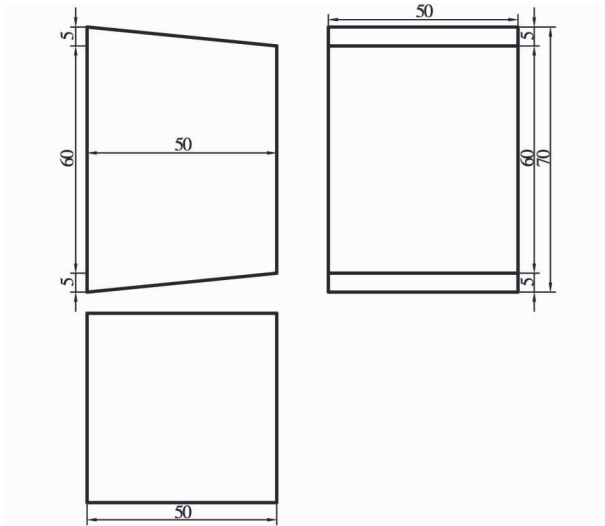


图 2 榫头尺寸(单位:mm)

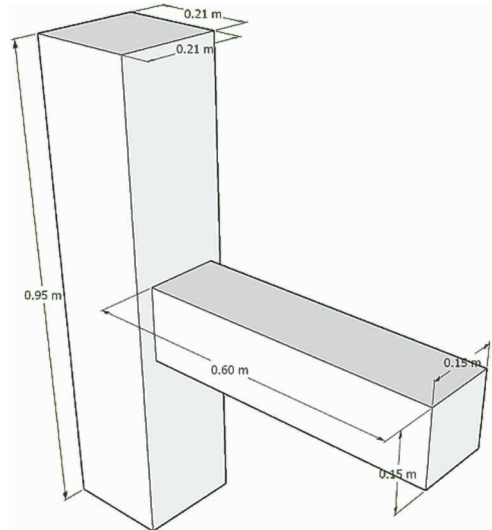


图 3 梁柱节点尺寸

木材是一种典型的各向异性材料,合理选择材料方向可以最大化其承载能力.一般来说,木材弹性最大的是顺纹方向,径向和弦向依次降低.木材选取杉木,取顺纹方向为 x 轴,径向为 y 轴,弦向为 z 轴,取杉木三向弹性模量分别为 12 200, 1 220 和 610 MPa,三向泊松比分别为 0.20, 0.47 和 0.43,三向切变模量分别为 915, 732 和 219.6 MPa^[17].根据调研测量当地木结构屋架尺寸,取每根柱承受 2.6 m×3.3 m 屋架自重荷载,屋架坡度为 5°,屋架结构自重为 7 kN/m²,受力情况如图 4 所示.三角屋架结构表现出正对称的受力特性,其结构简图如图 5 所示,通过计算得出其榫卯接头处的受力.

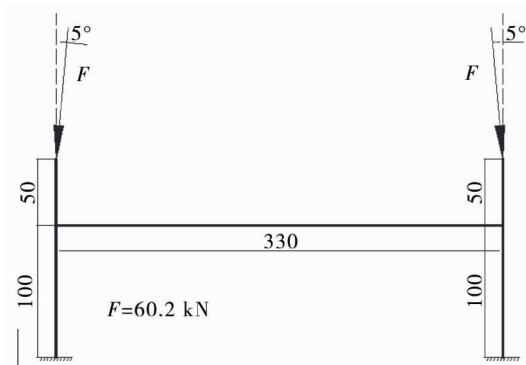


图 4 屋架结构受力情况(单位:cm)

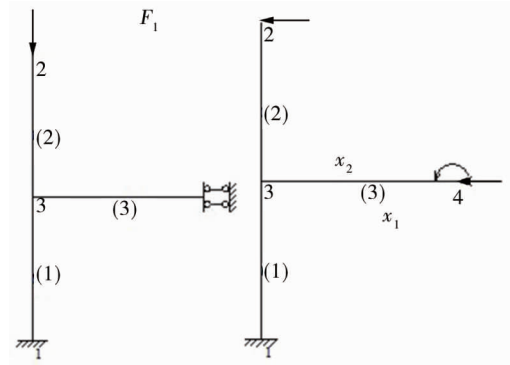


图 5 对称结构力学

超静定结构通过以下的公式计算多余的未知力(x_1 和 x_2):

$$\begin{cases} \delta_{11}x_1 + \delta_{21}x_2 + \Delta_{1p} = 0; \\ \delta_{21}x_1 + \delta_{22}x_2 + \Delta_{2p} = 0. \end{cases}$$

式中: δ_{11} 为位置 1 处施加一个单位力对位置 1 处的位移; x_1 为位置 1 处的未知力; δ_{21} 为位置 1 处施加一个单位力对位置 2 处的位移; x_2 为位置 2 处的未知力; Δ_{1p} 为基本结构上 x_1 作用点沿 x_1 方向由原荷载单独作用产生的位移; δ_{22} 为位置 2 处施加一个单位力对位置 2 处的位移; Δ_{2p} 为基本结构上 x_2 作用点沿 x_2 方向由原荷载单独作用产生的位移.

通过计算,得到榫卯接头受力简图如图 6 所示.

通过在 ABAQUS 中定义局部坐标,取梁、柱和榫头长度方向木材为 x 轴,柱指向梁方向、榫头及梁垂直方向为 y 轴,柱垂直梁方

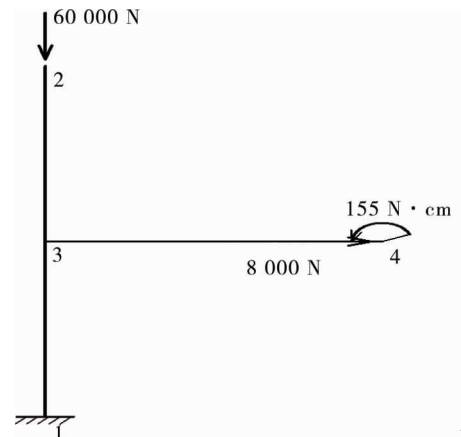


图 6 榫卯接头力学

向、榫头及梁水平方向为 z 轴. 设置榫头和榫眼过盈量, 在接触区域设置摩擦系数. 通过选取合适的接触设置、荷载、边界条件及模拟受力情况, 最后根据有限元法分别得出加固前后的自重荷载作用下的结构响应图.

2 研究方法

使用有限元软件研究选定的实体结构, 从建模和分析中得出结果, 然后评价加固的效果. 使用的 ABAQUS 软件既可以模拟梁单元, 也可以模拟桁架单元, 基本上可以用来模拟所有真实的几何图形. 除此之外, ABAQUS 软件还可以定义各种材料的物理、力学特征^[18]. 通过软件建立模型, 基本可以建立现实中的任何木结构建筑^[19].

为了探讨不同加固模式下构件的最大米泽斯应力和梁端最大下挠, 在 ABAQUS 软件中建立梁-柱榫卯节点的静力学模型, 选定单元形式为 C3D8R, 如图 7 所示, 其有限元分析步骤如下:

1) 对结构进行离散. 按照结构的几何特征划分单元并形成网格.

2) 形成单元的刚度矩阵和等效结点载荷阵, 单元刚度矩阵:

$$\mathbf{K}^U = \int V_e \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV.$$

式中: \mathbf{K}^U 为单元刚度矩阵; V_e 为单元体积; \mathbf{B}^T 和 \mathbf{B} 为应变矩阵; \mathbf{D} 为材料弹性矩阵.

考虑单元存在初应力和初应变的情况, 单元等效结点载荷列阵的一般表达式:

$$\mathbf{P}^T = \mathbf{P}_f^e + \mathbf{P}_T^e + \mathbf{P}_{\sigma_0}^e + \mathbf{P}_{\varepsilon_0}^e.$$

式中: \mathbf{P}^T 为单元等效结点载荷; $\mathbf{P}_f^e, \mathbf{P}_T^e, \mathbf{P}_{\sigma_0}^e, \mathbf{P}_{\varepsilon_0}^e$ 为作用于单元的体积力 f 、边界分布力 T 、单元内的初应力 σ_0 、初应变 ε_0 等效的结点载荷列阵, $\mathbf{P}_f^e = \int V_e \mathbf{N}^T f dV$ (\mathbf{N}^T 为结点力), $\mathbf{P}_T^e = \int S_0^e \mathbf{N}^T T dS$ (S_0^e 为单位面积的作用力), $\mathbf{P}_{\sigma_0}^e = - \int V_e \mathbf{B}^T \sigma_0 dV$, $\mathbf{P}_{\varepsilon_0}^e = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D} \varepsilon_0 dV$.

3) 集成结构的刚度矩阵和等效结点载荷列阵:

$$\mathbf{K} = \sum \mathbf{K}^e;$$

$$\mathbf{P} = \sum (\mathbf{P}_f^e + \mathbf{P}_s^e + \mathbf{P}_{\sigma_0}^e + \mathbf{P}_{\varepsilon_0}^e) + \mathbf{P}_y.$$

式中: \mathbf{K} 为结构刚度矩阵; \mathbf{K}^e 为单位结构刚度矩阵; \mathbf{P} 为结构结点载荷列阵; \mathbf{P}_y 为直接作用于结点的合力.

4) 引入强制边界条件.

5) 求解有限元方程, 得到节点位移 α , 并利用以下公式计算单元应变和应力:

$$\mathbf{K} \alpha = \mathbf{P};$$

$$\varepsilon = \mathbf{B} \alpha^e;$$

$$\sigma = \mathbf{D}(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 = \mathbf{D} \mathbf{B} \alpha^e - \mathbf{D} \varepsilon_0 + \sigma_0.$$

式中: α^e 为单位结点位移; ε 为单元应变; σ 为单元应力.

6) 最后计算出节点加固前后的最大米泽斯应力及最大挠度.

3 研究结果

3.1 节点加固前的结构响应

榫卯接头网格划分与局部坐标如图 8 所示. 榫卯接头通过过盈配合组装, 在榫头和榫眼设过盈量为

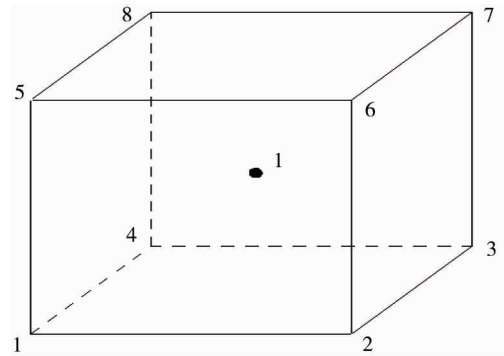


图 7 六面体元的 $1 \times 1 \times 1$ 减缩积分点单元

0.1 mm,且在接触区域设置摩擦接触并完成摩擦系数的设置.

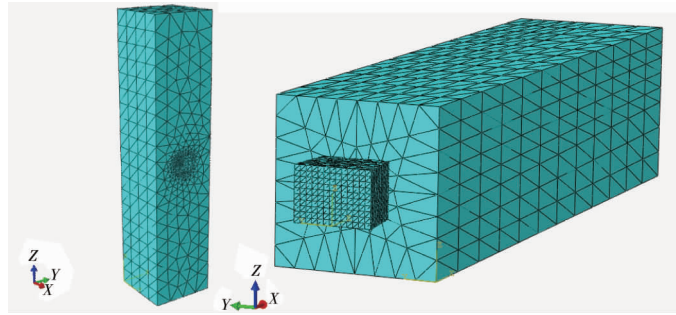


图 8 柱、榫头及梁局部坐标及网格划分

自重荷载作用下,未加固节点的结构响应如图 9 所示.由图 9 可知:榫头应力分布主要集中在上、下接触面,最大米泽斯应力出现在榫卯接头的根部,为 78 MPa,榫卯接头最大挠度为 3.90 mm.可见未加固前,节点最大米泽斯应力和最大挠度均较大.

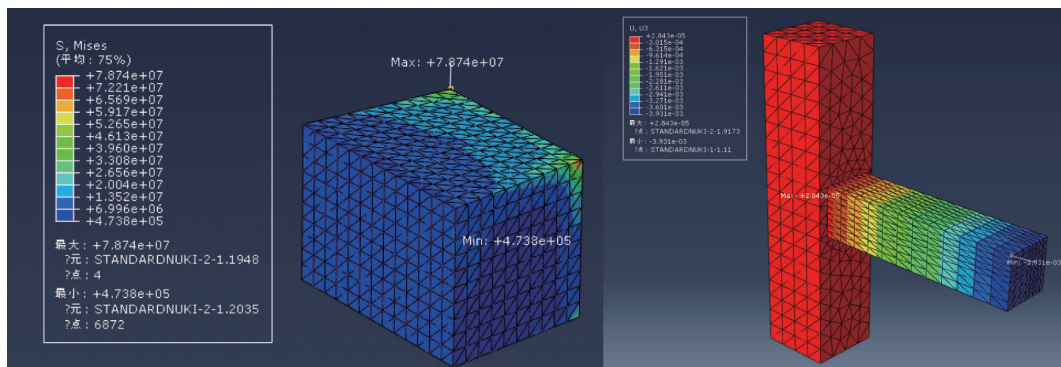


图 9 榫头应力分布和榫卯接头竖向变形分布

3.2 各加固方案节点结构响应

3.2.1 采用扁钢加固

采用扁钢加固时,沿梁中线对称布置 2 块对称钢板(图 10),螺栓和扁钢均为弹性模量为 2.10 GPa,密度为 7850 kg/m^3 的钢材.钢板顶部与梁顶部相距 15 mm,钢板厚 6 mm,钢板螺栓长 12 mm,螺栓中心线相距 50 mm,钢板尺寸见图 11.

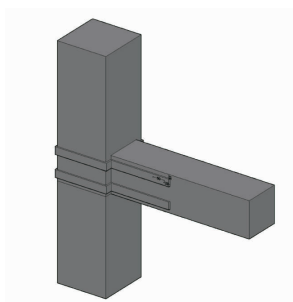


图 10 扁钢加固结构

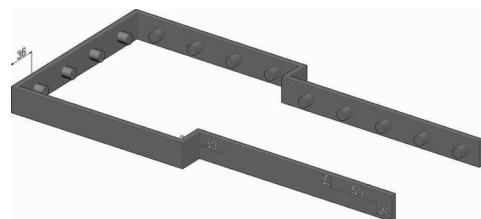


图 11 扁钢尺寸(单位:mm)

自重荷载作用下,采用扁钢加固的节点结构响应如图 12 所示.榫头应力分布主要集中在上、下接触面,最大米泽斯应力出现在榫卯接头的顶部,为 1.6 MPa,相较于其加固前减少了 97.04%,榫卯接头最大挠度为 0.72 mm,相较于其加固前减少了 81.59%.

3.2.2 采用马口铁加固

采用马口铁加固时,沿梁中线对称布置 2 块对称马口铁(图 13),马口铁为弹性模量为 2.10 GPa,密度为 7850 kg/m^3 的钢材.马口铁直径为 6 mm,插入梁柱部分长度为 50 mm,且插入部分与柱平面垂直.

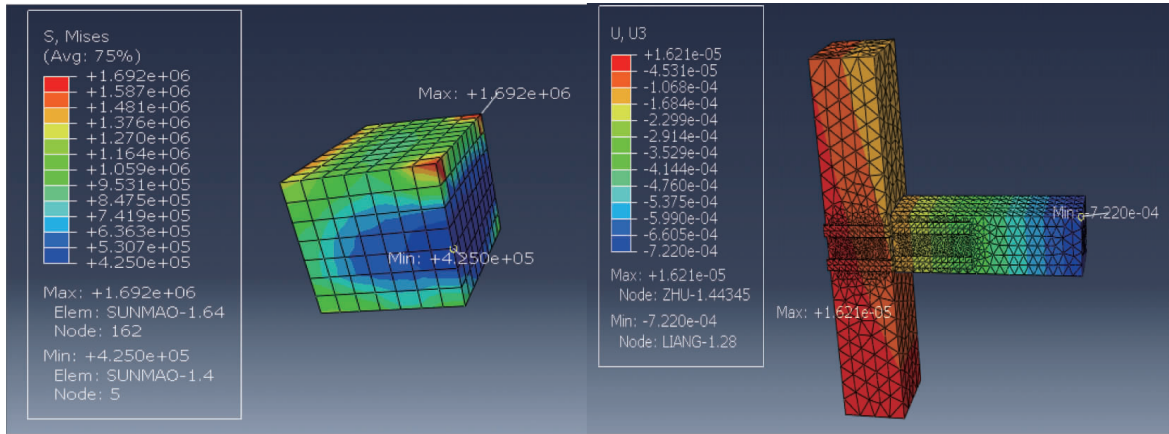


图 12 扁钢加固榫头应力分布和榫卯接头竖向变形分布

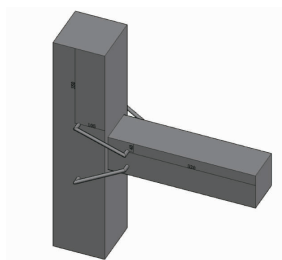


图 13 马口铁加固结构

自重荷载作用下,采用马口铁加固的节点结构响应如图 14 所示.榫头应力分布主要集中在上接触面,最大米泽斯应力出现在榫卯接头的顶部,为 10.8 MPa,相较其加固前减少了 86.25%,榫卯接头最大挠度为 1.52 mm,相较其加固前减少了 61.13%.

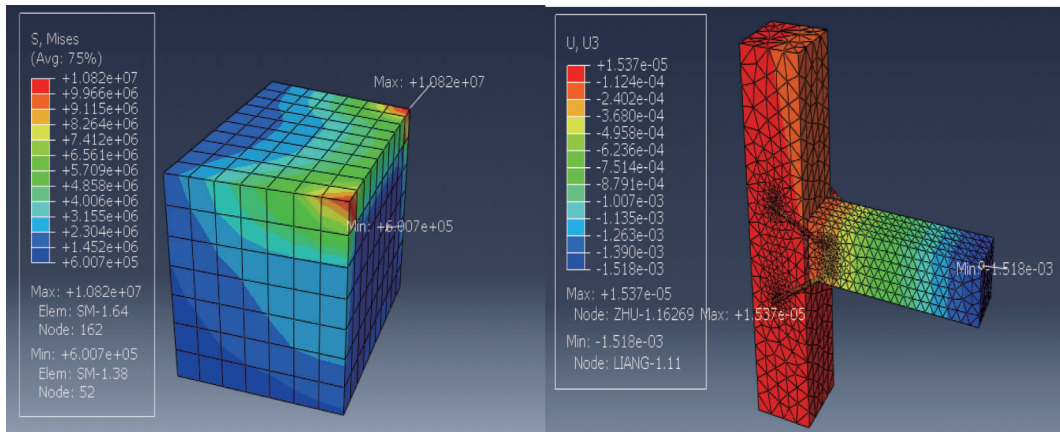


图 14 马口铁加固榫头应力分布、榫卯接头竖向变形分布

3.2.3 采用扁钢和马口铁组合加固

扁钢与马口铁可同时用于榫卯节点加固,根据前述几何特征,通过同时布置扁钢与马口铁,可获得该方案组合后最大加固效果.加固方案如图 15 所示.

自重荷载作用下,同时采用扁钢与马口铁组合加固的节点结构响应如图 16 所示.榫头应力分布主要集中在榫卯与柱接触的后中间,最大米泽斯应力出现在榫卯接头的中部,为 4.1 MPa,相较其加固前减少了 94.75%,榫卯接头最大挠度为 0.36 mm,相较其加固前减少了 90.78%.

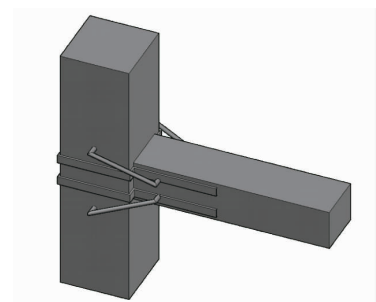


图 15 扁钢及马口铁同时加固结构

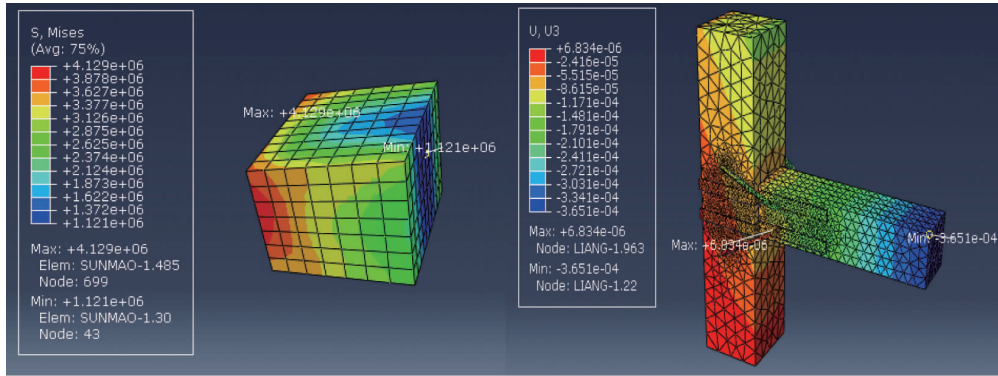


图 16 扁钢与马口铁同时加固榫头应力分布和榫卯接头竖向变形分布

3.2.4 采用扒钉加固

采用扒钉加固时,2 根 Q235 钢 $\Phi 10$ 扒钉沿梁中心线对称斜向布置,连接梁、柱,并在梁、柱节点下方设置托木进一步加固节点,实验室使用的杆均由弹性模量为 210 GPa,密度为 7.85 g/cm^3 的 Q235 钢铸造得到.扒钉与丝杆分别采用绑定连接与榫卯接头连接且均位于梁截面中心线上,其几何属性如图 17 所示.

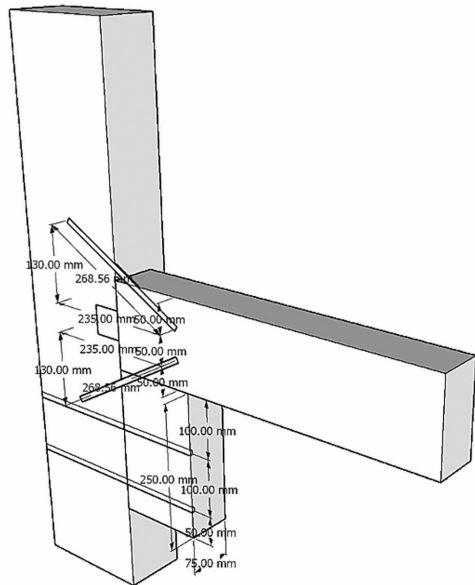


图 17 扒钉加固尺寸(半剖面)

自重荷载作用下,采用扒钉加固的节点结构响应如图 18 所示.由图 18 可知:榫头应力分布主要集中在上、下接触面,最大米泽斯应力出现在榫卯接头的根部,为 2.6 MPa,相较于其加固前减少了 96.70%,榫卯接头最大挠度为 0.70 mm,相较于其加固前减少了 82.10%.

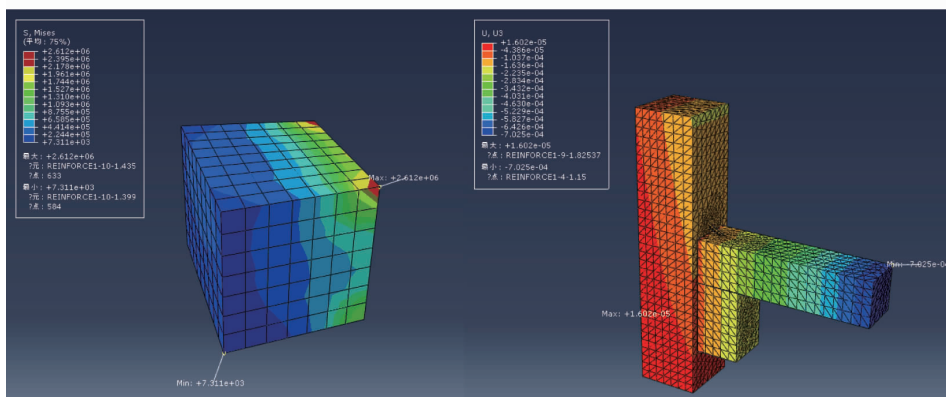


图 18 扒钉加固榫头应力分布和榫卯接头竖向变形分布

3.2.5 采用钢夹板加固

采用钢夹板加固时,2根厚6mm的钢夹板沿梁中心线对称水平布置,端部分别通过2颗 $\Phi 12\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的螺栓连接梁、柱,并在梁、柱节点下方设置托木进一步加固节点,螺栓和钢夹板均为弹性模量为2.1 GPa,密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$ 的钢材,分别采用绑定连接与榫卯接头连接且均位于梁截面中心线上,其几何特征如图19和图20所示.

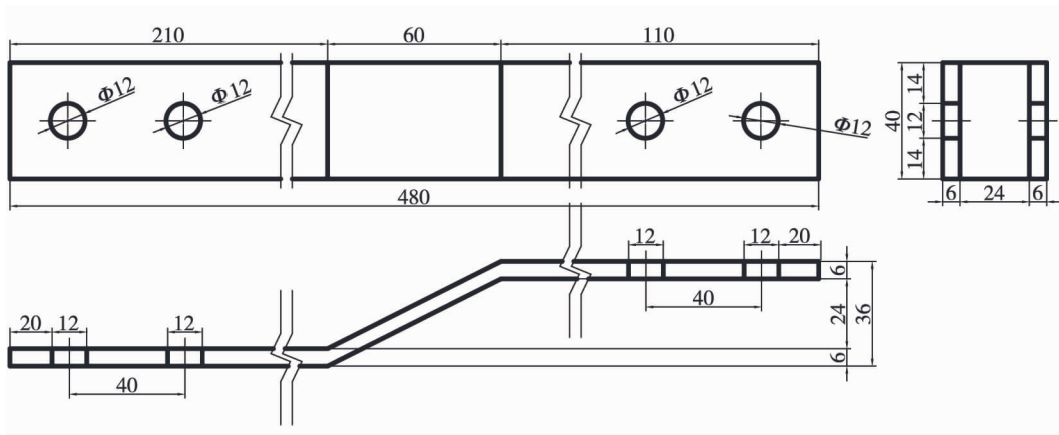


图19 钢夹板设计(单位:mm)

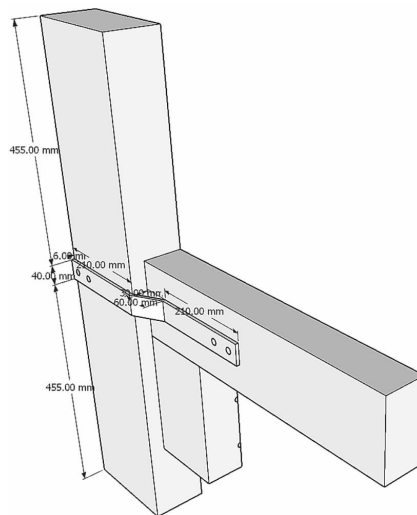


图20 钢夹板加固(半剖面)

自重荷载作用下,采用钢夹板加固的节点结构响应如图21所示.由图21可知:榫头应力分布主要集中在上、下接触面,最大米泽斯应力出现在榫卯接头的根部,为3.0 MPa,相较其加固前减少了96.19%,榫卯接头最大挠度为0.83 mm,相较其加固前减少了78.77%.

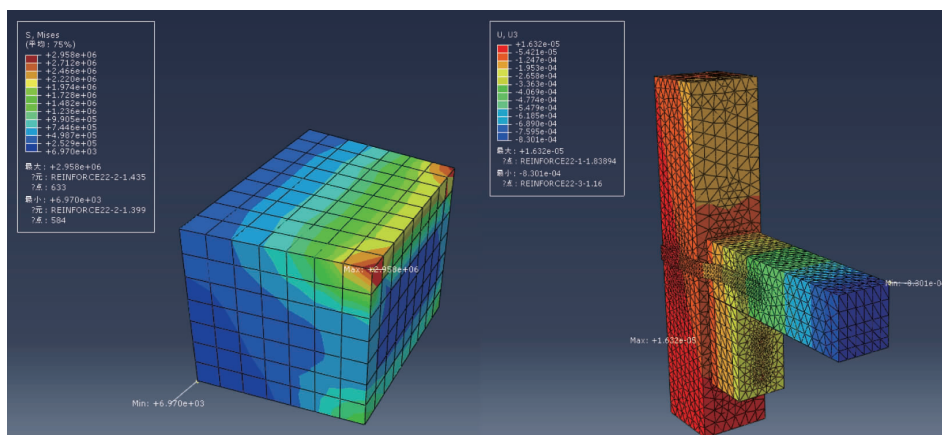


图21 钢夹板加固榫头应力分布和榫卯接头竖向变形分布

3.2.6 采用钢夹板和扒钉组合加固

扒钉与钢夹板可同时用于榫卯节点加固,根据前述几何特征,通过同时布置扒钉与钢夹板,可获得该方案组合后的最大加固效果.加固方案如图 22 所示.

自重荷载作用下,同时采用钢夹板和扒钉同时加固的节点结构响应如图 23 所示.榫头应力分布主要集中在上、下接触面,尤其是榫头上侧与梁连接两角点,最大米泽斯应力出现在榫卯接头的根部,为 1.6 MPa,相较其加固前减少了 97.97%,梁最大挠度为 0.67 mm,相较其加固前减少了 82.86%.

加固前后及各加固方式下榫卯接头的结构响应如表 1 所示.由表 1 可知:6 种加固方式均有效地降低了榫头处的最大米泽斯应力和梁端挠度,这是由于节点加固后,节点与加固试件共同受力,榫头处的最大米泽斯应力和梁端挠度得到有效减小,其中,同时采用扁钢及马口铁同时加固的效果最好,但是在实际施工过程中,加固难度大,不易操作.在具体应用时,可根据实际情况,综合考虑选择合适的加固措施.

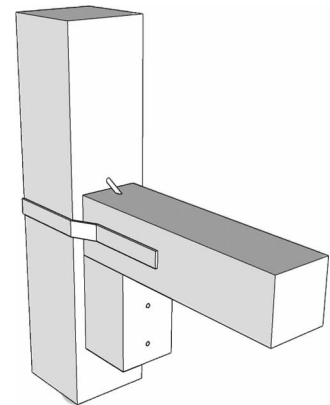


图 22 钢夹板和扒钉同时加固结构

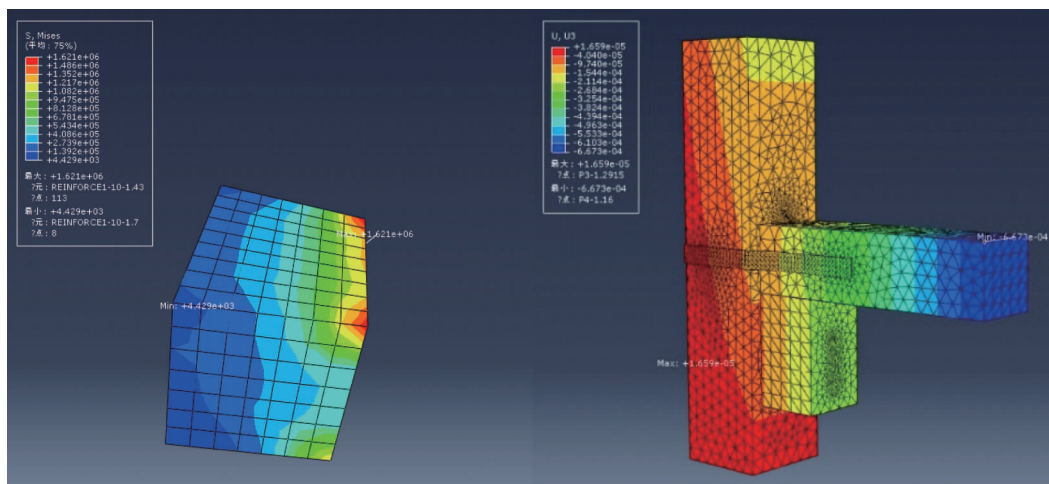


图 23 钢夹板与扒钉同时加固榫头应力分布和榫卯接头竖向变形分布

表 1 榫卯接头加固前后及各加固方式结构响应

接头类型	榫头最大米泽斯应力/MPa	梁最大挠度/mm	应力减少率/%	挠度减小率/%
未加固	78.7	3.90	/	/
扒钉加固	2.6	0.70	96.70	82.10
钢夹板加固	3.0	0.83	96.19	78.77
扒钉和钢夹板同时加固	1.6	0.67	97.97	82.86
扁钢加固	1.6	0.72	97.04	81.59
马口铁加固	10.8	1.52	86.25	61.13
扁钢和马口铁同时加固	4.1	0.36	94.75	90.78

4 结论

1) 加固后节点的榫头最大米泽斯应力及梁最大挠度相较加固前节点得到有效降低,扁钢加固、马口铁加固、扁钢和马口铁组合加固、扒钉加固、钢夹板加固、扒钉和钢夹板组合加固时,榫卯接头根部的最大米泽斯应力分别为 1.6, 10.8, 4.1, 2.6, 3.0, 1.6 MPa,梁最大挠度分别为 0.72, 1.52, 0.36, 0.70, 0.83, 0.67 mm,榫卯节点加固后最大米泽斯应力和最大挠度均得到有效降低,最大米泽斯应力减少率分别为 97.04%, 86.25%, 94.75%, 96.70%, 96.19%, 97.97%,最大挠度减少率为 81.59%, 61.13%, 90.78%, 82.10%, 78.77%, 82.86%.

2) 总体而言,本研究得到的是积极的结果,对于研究节点加固有一定的参考意义,但也有许多不足之处,如中国木结构建筑历史悠久,从过去大面积使用木构架承重体系,到如今现代化城市返璞归真地重新使用和重视木结构,这种建筑形式已成为我国使用面积最广、数量最多且广泛分布于各地区的建筑形式。由于长时间暴露在空气中,受光照、温度变化、空气中化学成分的影响,现存的木结构建筑的某些构件性能可能发生退化,结构的安全性、可靠性以及耐久性大大降低,因此,如何更好地利用有限元模型去模拟构件的实际情况也是值得深入学习研究之处。

3) 在我国农村分布着数量众多的木质结构建筑,是宝贵的文化遗产,但同时,因长时间暴露在空气中,现存的许多木结构构件性能退化、结构安全性降低,对居民生命财产安全有潜在影响,基于此,本文进行的有限元分析研究具有一定的现实意义,同时也是对农村木结构房屋研究拓展的积极探索。

参考文献:

- [1] 戴璐,肖浩楠.典型直榫梁柱节点在现代木结构中的应用研究[J].林产工业,2020,57(1):29-36.
- [2] 熊海贝,欧阳禄,吴颖.国外高层木结构研究综述[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(9):1297-1306.
- [3] 刘家亮,郭猛.景德镇地区木结构房屋抗震能力分析[J].建筑结构,2018,48(10):18-24.
- [4] 李向民,许清风,刘琼,等.传统榫卯节点木框架抗震加固方法的实验研究[J].结构工程师,2015,31(4):157-166.
- [5] 戴智彪.古建筑木结构带雀替榫卯节点力学性能与加固试验研究[D].北京:北方工业大学,2018.
- [6] 薛建阳,翟磊,张风亮,等.扁钢加固古建筑木结构残损节点的性能分析与设计方法[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(5):621-625.
- [7] 杨森.传统木结构榫卯节点静力和动力模型研究[D].昆明:昆明理工大学,2016.
- [8] 陈春超.古建筑木结构整体力学性能分析和安全性评价[D].南京:东南大学,2016.
- [9] Ghazijahani T G, Jiao H, Holloway D, et al. Composite Timber Beams Strengthened by Steel and CFRP[J]. Journal of Composites for Construction, 2017,21(1):988-990.
- [10] Seri N A, Hassan R, Hamid S, et al. A Review of Dowel Connection for Glulam Timber Strengthening with GFRP[C]// Proceedings of the International Civil and Infrastructure Engineering Conference 2014. Springer, Singapore, 2015: 1153-1162.
- [11] Bahmani P, Van de Lindt J W, Mochizuki G, et al. Experimental Seismic Behavior of a Full-Scale Four-Story Soft-Story Wood-Frame Building with Retrofits. II: Shake Table Test Results[J]. Journal of Structural Engineering, 2016,142(4): 1452-1453.
- [12] Bahmani P, Van de Lindt J W, Gershfeld M, et al. Experimental Seismic Behavior of a Full-Scale Four-Story Soft-Story Wood-Frame Building with Retrofits. I: Building Design, Retrofit Methodology, and Numerical Validation[J]. Journal of Structural Engineering, 2014,142(4): E4014003.1-E4014003.14.
- [13] 李西,徐锡伟,张建国,等.鲁甸 M_s 6.5 地震发震断层地表破裂特征、相关古地震的发现和年代测定[J].地学前缘, 2018,25(1):227-239.
- [14] 邓树荣,曹彦波,张方浩,等.基于 AHP 方法的云南地震现场通信技术系统应急响应模式研究[J].地震研究,2017,40(2):277-285.
- [15] 周铁钢,朱瑞召,朱立新,等.土坯围护墙-木结构民居抗震加固振动台试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2016,48(3):346-350.
- [16] 张濒予.乡村住宅震后重建模式研究[D].昆明:昆明理工大学,2016.
- [17] 尹思慈.木材学[M].北京:中国林业出版社,1996.
- [18] 关开宇.超高层建筑结构抗震性能目标探讨与方案对比[D].沈阳:沈阳建筑大学,2016.
- [19] Wang H W, Ji H W, Sun Y, et al. Discussion on Convergence Issues in ABAQUS/Standard while Carrying Out Damage and Fracture Analysis[J]. Advanced Materials Research, 2011,189-193: 2247-2250.