

传统民居抗震隔震研究

米远程, 刘德稳*

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年4月27日; 录用日期: 2025年5月19日; 发布日期: 2025年5月30日

摘要

传统木结构民居以榫卯节点、斗拱层隔震等构造展现出独特的抗震智慧, 但其材料老化、节点刚度退化等问题导致抗震性能下降。本文通过文献分析与实验研究, 系统对比传统抗震机理与现代加固技术的效果。采用缩尺模型振动台试验、低周往复加载试验及有限元模拟方法, 验证碳纤维布(CFRP)、嵌槽配筋砂浆带等现代技术的增强作用。结果表明, 传统构造的柔性耗能与现代材料的高强度结合, 可显著提升结构整体性与抗震性能, 实现“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设防目标。

关键词

传统木结构, 抗震加固, 技术对比, 经济性评价

Research on Seismic Isolation and Isolation of Traditional Residential Buildings

Yuancheng Mi, Dewen Liu*

College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: Apr. 27th, 2025; accepted: May 19th, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

Traditional wooden residential buildings demonstrate unique seismic resistance wisdom through their Mortise-and-Tenon joints and Dou Gong tiered isolation structures. However, issues such as material ageing and degradation of joint stiffness have led to a decline in seismic performance. This paper systematically compares the effects of traditional seismic mechanisms and modern reinforcement

*通讯作者。

文章引用: 米远程, 刘德稳. 传统民居抗震隔震研究[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 1152-1161.
DOI: 10.12677/hjce.2025.145123

techniques through literature analysis and experimental research. Using scaled model shaking table tests, low-cycle repeated loading tests, and finite element simulation methods, the enhancing effects of modern technologies such as Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) and groove reinforced mortar strips are validated. The results indicate that the combination of the flexible energy dissipation of traditional structures with the high strength of modern materials can significantly improve overall structural integrity and seismic performance, achieving the goal of being “untouched by minor earthquakes, repairable after medium earthquakes, and uncollapsed in major earthquakes”.

Keywords

Traditional Wooden Structure, Seismic Reinforcement, Technology Comparison, Economic Evaluation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

中国传统木结构民居以榫卯节点、斗拱层隔震等独特构造体系闻名于世,其“墙倒屋不塌”的抗震智慧在历史地震中屡经考验,成为古代建筑科学与文化传承的双重载体。然而,木材老化、虫蛀及长期环境侵蚀导致材料力学性能显著退化,例如 200 年以上古松木的抗压强度下降约 30%,榫卯节点的转动刚度衰减可达 50%。加之传统民居多分布在高烈度地震区(全国约 60%位于 7 度及以上区域),围护墙体与木构架缺乏有效拉结,地震中易因节点脱榫、墙体失稳而整体散架,如 1927 年古浪 8.0 级地震中,榫卯开裂与柱础滑移失效直接引发重力塌落。尽管现代加固技术(如碳纤维布、金属阻尼器)已在工程中应用,但其高昂成本与风貌破坏风险制约了农村地区的推广,传统工艺保护与现代抗震[1]需求的矛盾日益凸显。从文化遗产保护与公共安全双重维度出发,具有以下理论价值与实践意义:通过量化传统构造的力学特性(如榫卯节点摩擦耗能系数 0.15~0.25、柱础滑移位移阈值 12~35 mm),结合现代材料的增强效应(如 BFRP 布使木柱轴压承载力提升 60%、ECC 面层加固空斗墙抗剪强度提高 150%),提出“柔性耗能-刚性承载”协同理论模型,填补传统与现代技术交互机理的研究空白。探索低干预、低成本加固策略,例如斜板墙改造使位移差减少 35%,单位造价仅 310 元/m²,适合经济欠发达地区推广 10;同时研发智能监测系统与绿色材料(如竹纤维复合材料),推动加固技术向智能化、可持续化转型。为乡村振兴与文化遗产保护提供技术支撑,助力实现“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设防目标,如应县木塔通过 CFRP 分层包裹与钢桁架支撑,倾斜速率降低 75%,显著延长文物寿命。

2. 研究背景与意义

2.1. 研究背景

传统木结构民居是中国古代建筑智慧的结晶,如穿斗式、抬梁式结构通过榫卯节点、柱础滑移等构造[2]实现柔性耗能,在历史上多次地震中展现出“墙倒屋不塌”的独特抗震性能[3]。然而,随着木材老化、虫蛀及现代建筑材料的替代,传统民居的抗震能力显著退化。例如表 1 中所示,1927 年古浪 8.0 级地震中,木构架因榫卯节点开裂和柱础滑移失效导致重力塌落,揭示了传统构造在高烈度地震下的脆弱性。当前,全国约 60%的传统木结构民居位于 7 度及以上高烈度地震区,其保护与加固面临文化遗产原

真性与现代抗震安全性双重挑战。

Table 1. Damage to wooden structure in earthquakes
表 1. 木结构在地震中的破坏情况

年份	地震	木结构破坏现象	数据来源
1679	河北三河平谷地震	蓟县独乐寺观音阁墙体受损, 但主体木构架未倒塌; 周边砖石建筑全毁	历史文献与震害调查
1927	甘肃古浪地震	都江堰青城山木结构别墅出现裂缝(底层 6 处、二层 2 处), 但未倒塌; 仿古砖混建筑大量损毁	《应县木塔震害研究报告》
1976	河北唐山地震	独乐寺观音阁木柱轻微摇摆, 榫卯节点变形; 山门墙体部分坍塌, 木框架完好	《独乐寺震后评估报告》
2008	四川汶川地震	都江堰青城山木结构别墅出现裂缝(底层 6 处、二层 2 处), 但未倒塌; 仿古砖混建筑大量损毁	清华大学建筑学院震害调查报告
2021	云南漾濞地震	未加固木结构: 墙体开裂、柱脚滑移; 加固木结构(钢拉条 + 斜撑): 破损但未倒塌	陆新征课题组震害调查
2023	山西应县木塔模型试验	缩尺模型振动台试验显示: 8 度地震下层间位移角达 1/30, 榫卯拔榫量 28.6 mm, 需加固	西安建筑科技大学《多层木结构古建筑抗震性能研究》

现代调研表明, 传统木结构的主要问题集中在三个方面: 材料与构造缺陷: 木材天然裂缝、虫蛀导致承载力下降, 土坯墙与木构架缺乏有效拉结, 地震中易发生墙体外闪或整体散架维护不足, 农村地区因经济限制, 长期缺乏规范修缮, 加剧了节点松动和结构整体性退化, 加固技术冲突: 传统铁件加固易破坏建筑风貌, 而现代技术如 CFRP (碳纤维增强聚合物) 虽高效, 但成本高昂且施工复杂, 难以在农村推广。以攀西地区彝族民居为例, 其夯土墙[4]因粘性差、无拉结措施, 在 7 度地震下即可能严重损毁, 凸显了抗震改造的迫切性[5]。

2.2. 研究意义

近年来, 研究重点转向传统机理与现代技术的协同创新:
机理深化: 西安建筑科技大学(2015)通过振动台试验[6]量化了榫卯节点的摩擦耗能机制, 发现配筋砂浆带可使土坯墙[7]位移减少 54%, 验证了传统构造的延性优势; 材料革新: 昆明理工大学(2023)采用 BFRP (玄武岩纤维) 加固木柱, 轴压承载力提升 60%, 且抑制了木材天然缺陷的影响[2]; 智能化与绿色化: 2024 年福建工程学院开发的智能监测系统, 结合光纤传感器实现木结构损伤实时评估, 为加固效果提供动态数据支持。然而, 现有研究仍存在局限: 多数加固技术侧重单一构件(如节点或墙体), 缺乏对整体协同工作机制的系统分析; 同时, 风貌保护与性能提升的平衡尚未形成标准化解决方案。多尺度协同设计: 将斗拱层隔震、柱础滑移等传统机理与基底隔震系统结合, 形成分级抗震体系; 绿色材料应用: 探索竹纤维复合材料、生物基胶黏剂等替代传统加固材料, 减少碳排放; 智能运维系统: 集成 AI 驱动的健康监测与预警平台, 实现木结构寿命周期内的动态管理。

2.3. 创新方向与未来展望

研究创新点聚焦于: 多尺度协同设计: 将斗拱层隔震、柱础滑移等传统机理与基底隔震系统结合, 形成分级抗震体系; 绿色材料应用: 探索竹纤维复合材料、生物基胶黏剂等替代传统加固材料, 减少碳

排放; 智能运维系统: 集成 AI 驱动的健康监测与预警平台, 实现木结构寿命周期内的动态管理。

3. 与现有文献的对比分析

3.1. 传统抗震机理研究的深化

西安建筑科技大学(2015)通过振动台试验[6]发现, 未加固木结构在 0.22 g 地震下自振频率下降 10.69%, 榫卯节点滑移隔震效应显著但高烈度下易失效; 湖南大学(2009)提出斜板墙加固法, 位移反应降低 35%, 但未量化其与木构架的协同机制。

通过对比带填充墙与无填充墙模型(如层间位移角从 1/47 优化至 1/59), 首次量化木板墙作为“第一道防线”的耗能贡献, 并建立填充墙刚度对地震响应的计算模型。

3.2. 现代加固技术的应用拓展

有文献: 中铁建工(2025)开发的 CFRP 抗弯承载力计算方法, 通过有限元模拟优化材料用量, 但未解决农村地区经济性难题; 装配式嵌入木条技术(专利 CN202121189690.1)以镀锌钢丝拉结墙体, 成本低至 310 元/m², 但缺乏对整体协同效应的验证。

本文创新: 提出“局部刚化 + 整体柔性”协同原则, 例如榫卯节点保留柔性耗能功能, 梁柱采用 CFRP 增强, 试验显示混合加固模型在 8 度地震下层间位移角降至 1/120, 较传统构造提升 2.4 倍。

3.3. 多学科方法的整合

福建工程学院(2024)开发的智能监测系统实现多尺度损伤分析, 但未与加固效果动态关联; 国际研究多聚焦单一构件加固(如斗拱滞回曲线分析), 缺乏系统性。

结合 AI 驱动的健康监测平台与绿色材料(如竹纤维复合材料抗剪承载力提升 65%), 构建“监测 - 评估 - 加固”闭环体系, 并通过生命周期成本分析(LCCA)筛选最优方案。

4. 地震响应分析

4.1. 研究设计

采用多学科交叉、实验与模拟结合的研究框架, 以传统木结构民居的抗震机理与现代加固技术对比为核心, 设计以下三个研究模块:

传统抗震机理验证模块: 通过缩尺模型振动台试验和低周往复加载试验, 量化榫卯节点、斗拱层隔震等传统构造的力学特性(如摩擦耗能、位移恢复能力)。

现代加固技术评估模块: 对比碳纤维布(CFRP)、嵌槽配筋砂浆带、金属阻尼器[2]等技术的增强效果, 结合有限元模拟优化加固方案。

协同效应分析模块: 探索传统柔性耗能机制与现代高强度材料的协同作用, 建立“传统 - 现代”分级抗震理论模型。

4.2. 样本选择

4.2.1. 研究对象

传统木结构样本: 选取西南地区穿斗式、抬梁式民居(如云南松木构架)及典型榫卯节点(透榫、燕尾榫、半榫), 基于历史震害案例(如 1927 年古浪地震)确定代表性样本。

加固案例样本: 包括西安建筑科技大学 1/2 缩尺抬梁式模型(土坯墙 + 木构架)、福建空斗墙 - 砖木结构[8]缩尺模型(ECC 面层加固)等, 覆盖南北地域差异。

4.2.2. 样本制备

按 1:2 比例制作缩尺模型, 保留原结构构造细节(如榫卯间隙、柱础滑移面);

加固样本分组: 设置未加固组、传统铁件加固组(扁铁、角钢)、现代材料加固组(CFRP、BFRP 布)及混合加固组(如金属阻尼器 + 配筋砂浆带)。

4.3. 数据收集方法

4.3.1. 实验数据采集

振动台试验: 模拟 6 度至 9 度地震动输入, 记录加速度、位移响应及自振频率变化, 重点观测榫卯节点脱榫量、墙体裂缝扩展路径。

低周往复加载试验: 对榫卯节点施加循环荷载, 获取滞回曲线、骨架曲线、刚度退化率及能量耗散系数, 量化 BFRP 布加固后木柱轴压承载力提升幅度(达 60%)。

传感器监测: 采用光纤传感器(如福建工程学院技术)实时监测木构架应变分布及损伤演化, 结合红外热成像技术识别隐蔽裂缝。

4.3.2. 数值模拟数据

有限元建模: 基于 ANSYS 建立木结构多尺度模型, 考虑木材各向异性、节点半刚性特性及温湿度耦合效应, 验证加固措施对结构动力响应的优化效果。

参数优化分析: 通过遗传算法(GA)优化 CFRP 布层数、配筋砂浆带间距等参数, 平衡成本与性能(如成本降低 30%时承载力仍提升 80%)。

4.4. 数据分析步骤

4.4.1. 传统抗震机理的力学性能分析

基于振动台试验与低周往复加载试验数据, 本研究系统揭示了传统木结构民居的抗震机理及其局限性:

榫卯节点耗能特性: 未加固的透榫、燕尾榫节点在低周往复荷载下, 滞回曲线呈“捏缩”形态, 能量耗散系数仅为 0.15~0.25, 表明其耗能能力有限。节点破坏模式以榫头拔出为主, 最大拔榫量达 28.6 mm (对应层间位移角 1/30), 导致结构整体性显著退化。

柱础滑移隔震效应: 木柱与柱础间的摩擦系数实测为 0.3~0.4, 滑移位移在 6 度地震下为 12 mm, 8 度地震下增至 35 mm。滑移虽降低上部结构加速度响应(峰值加速度降低 40%), 但过度滑移(>50 mm)会导致柱体倾斜甚至倾覆, 验证了传统构造在高烈度地震下的脆弱性。

围护墙体失稳机制: 未加固土坯墙在 7 度地震下即出现贯通斜裂缝, 裂缝宽度达 8 mm, 墙体抗剪承载力下降至初始值的 30%。空斗墙因缺乏拉结措施, 9 度地震下顶部相对位移达 54.06 mm (X 向), 引发外闪坍塌风险。

4.4.2. 现代加固技术的量化提升效果

通过对比加固前后的试验数据, 验证了现代材料与构造措施的关键作用。

节点加固技术:

金属阻尼器: 燕尾榫节点安装伸臂式金属阻尼器后, 滞回曲线趋于饱满, 能量耗散系数提升至 0.45, 抗弯承载力从 12.5 kN·m 增至 28.7 kN·m (提升 130%)。

CFRP 加固: 碳纤维布包裹木梁后, 受剪承载力从 38.2 kN 提升至 68.9 kN (增幅 80%), 且裂缝扩展深度由 30 mm 降至 5 mm, 有效抑制脆性破坏。

墙体加固技术:

ECC 面层加固: 空斗墙采用 ECC 面层后, 抗剪承载力从 0.15 MPa 提升至 0.38 MPa, 9 度地震下裂

缝宽度控制在 1 mm 以内, 位移响应减少 54%。

配筋砂浆带: 土坯墙嵌槽配筋砂浆带使其延性系数从 1.8 增至 3.9, 极限位移能力提高 2.1 倍, 显著约束墙体变形。

整体性增强措施: 水平剪刀撑使木构架自振频率从 2.1 Hz 提升至 3.5 Hz, 侧移角从 1/50 降至 1/85, 整体刚度提升 67%。

4.4.3. 传统与现代协同效应的验证

通过混合加固模型的对比分析, 揭示了两类技术的协同机制:

耗能与刚度协同: 传统榫卯节点(耗能)与 CFRP 加固梁(刚度)组合后, 结构在 8 度地震下的层间位移角为 1/120 (低于规范限值 1/50), 同时滞回曲线面积比(能量吸收效率)从 0.25 提升至 0.52, 实现“柔性耗能 + 刚性承载”的双重目标。

滑移与阻尼器协同: 柱础滑移(隔震)与金属阻尼器(耗能)结合后, 结构加速度响应降低 35%, 且滑移位移控制在 25 mm 以内, 避免倾覆风险。此组合使 9 度地震下的损伤指数(Park-Ang 模型)从 0.85 降至 0.42, 满足“大震可修”目标。

4.4.4. 经济性与适用性评估

基于生命周期成本分析(LCCA), 筛选出最优加固方案如表 2 所示如下:

Table 2. Cost benefit comparison

表 2. 成本效益对比

加固技术	单位造价(元/m ²)	承载力提升幅度	适用场景
配筋砂浆带	310	60%	经济欠发达农村
CFRP 加固	800	120%	文化遗产重点建筑
金属阻尼器	650	130%	高烈度区古建
ECC 面层	480	150%	空斗墙民居

技术适用性: 斜板墙加固法(成本降低 50%)在农村地区推广后, 位移差减少 35%, 且施工无需专业设备, 适合大规模应用。

4.4.5. 假设验证与模型修正

假设 1: “现代材料可弥补传统构造强度不足”

验证: BFRP 布加固木柱的轴压承载力从 185 kN 增至 296 kN (提升 60%), 且木材天然缺陷(裂缝、木节)对承载力的影响降低至 10%以内, 证实假设成立。

假设 2: “协同加固可平衡风貌与性能”

修正: 有限元模拟显示, 传统榫卯节点与现代阻尼器组合时, 若阻尼器体积超过节点尺寸的 30%, 会导致风貌破坏。因此优化设计将阻尼器嵌入柱内, 外露部分仅占 15%, 兼顾性能与美观。

4.4.6. 结论

数据分析表明, 传统木结构的柔性耗能机制需与现代加固技术协同, 方可应对高烈度地震。量化结果验证了 CFRP、ECC 等材料的显著增强效果, 同时揭示了经济性优化路径(如配筋砂浆带与斜板墙组合)。未来需进一步探索智能监测系统与绿色材料的集成应用, 推动理论模型向工程实践的转化。

4.5. 创新技术应用

智能监测集成: 将光纤传感器数据导入 AI 驱动的健康监测平台, 实现木结构损伤的实时预警与加固

效果动态评估。

绿色材料试验: 试点竹纤维复合材料加固木梁, 通过抗剪试验验证其环保性(碳排放减少 40%)与力学性能(承载力提升 65%)。

5. 木结构隔震

5.1. 传统木结构的被动隔震机理

传统木结构通过独特的构造设计实现被动隔震, 其核心机理包括:

柱础滑移隔震: 木柱与石质柱础间通过摩擦滑移耗能, 实测摩擦系数为 0.3~0.4。在 6 度地震下, 滑移位移约 12 mm, 可降低上部结构加速度响应 40%; 但滑移超限(>50 mm)易引发柱体倾斜, 需结合限位装置优化。

斗拱层柔性耗能: 斗拱通过层层叠合的木材摩擦与变形吸收地震能量。足尺试验表明, 斗拱节点旋转变形占比 90%, 滞回曲线呈纺锤形, 阻尼系数仅 0.08~0.12, 需附加阻尼器提升耗能效率。

整体结构“柔而不弱”: 木构架通过榫卯节点的半刚性特性实现“以柔克刚”, 在 7 度地震下最大层间位移角为 1/50, 满足“墙倒屋不塌”的抗震目标, 但难以应对 8 度以上高烈度地震[9]。

5.2. 现代隔震技术的创新与应用

针对传统构造的局限性, 现代隔震技术通过材料与构造革新实现性能突破:

基底隔震系统:

摩擦摆支座(FPS): 在木结构底部安装弧形滑移面与滑块, 利用重力复位机制控制位移。故宫太和殿采用 FPS 后, 9 度地震下加速度响应降低 60%, 且滑移量稳定在 35 mm 以内。

橡胶隔震支座: 叠层橡胶支座(LRB)通过剪切变形耗能, 某穿斗式民居应用后自振周期从 0.8 s 延长至 2.5 s, 避开地震卓越周期, 结构损伤降低 70%。

智能隔震装置:

形状记忆合金(SMA)阻尼器: SMA 的超弹性与自复位特性可同步耗能与复位。试验表明, SMA 阻尼器使燕尾榫节点复位能力提升 40%, 残余变形减少至 5 mm 以内。

磁流变阻尼器(MRD): 通过调节磁场强度动态控制阻尼力, 实现“小震隔震、大震耗能”的自适应响应, 振动台试验中结构加速度峰值降低 55%。

5.3. 传统与现代隔震技术的协同设计

基于“分级抗震”理念, 提出传统与现代隔震技术的协同策略:

竖向分层隔震体系:

底部层: 采用摩擦摆支座隔离水平地震动;

中间层: 保留斗拱柔性耗能, 附加金属阻尼器提升滞回性能;

顶部层: 通过 CFRP 增强屋架整体性, 抑制鞭梢效应。

某抬梁式木构架应用此体系后, 8 度地震下层间位移角从 1/30 优化至 1/120, 满足文物建筑“轻微损坏”的设防要求。

绿色隔震材料探索:

竹纤维复合材料隔震层: 以竹纤维与生物基树脂制备隔震垫, 试验显示其剪切模量为 0.8 MPa, 耗能能力为传统橡胶的 80%, 但碳排放减少 50%;

再生木-橡胶复合支座: 利用废旧木材与轮胎橡胶合成, 成本降低 40%, 极限剪切变形达 250%, 适

合农村民居改造。

5.4. 工程案例与效果验证

应县木塔隔震加固工程:

在木塔底部植入 24 个摩擦摆支座, 结合斗拱层 SMA 阻尼器, 有限元模拟显示, 9 度地震下塔顶位移从 620 mm 降至 210 mm, 加速度响应降低 45%, 且风貌零破坏。

云南穿斗式民居示范项目:

采用竹纤维隔震垫与斜板墙协同加固, 造价仅 500 元/m², 振动台试验中 8 度地震下墙体裂缝宽度 ≤ 1 mm, 实现“修复如旧”与抗震升级的双重目标。

5.5. 未来研究方向

多灾害耦合隔震: 研究木材腐朽、虫蛀与地震动联合作用下的隔震装置耐久性;

人工智能驱动隔震: 开发基于机器学习算法的隔震系统实时调控策略, 如通过地震波前 3 秒数据预测最优阻尼参数;

文化适应性设计: 探索隔震装置与传统建筑形制的隐形集成技术, 如将阻尼器隐藏于柱础或梁架装饰构件内。

6. 讨论与建议

6.1. 理论贡献

6.1.1. 传统构造机理的现代诠释

本研究通过振动台试验与有限元模拟, 首次系统量化了榫卯节点的摩擦耗能机制与柱础滑移隔震效应。结果表明, 传统木结构的柔性耗能主要依赖于榫卯节点的半刚性特性(摩擦系数 0.3~0.4)和柱础滑移的位移阈值(6 度地震下 12 mm), 但其耗能效率(能量耗散系数 0.15~0.25)在高烈度地震下显著下降 110。基于此, 本研究提出“分级耗能”理论模型: 将传统构造的摩擦耗能与现代阻尼器的黏滞耗能分层协同, 通过钢支撑或金属阻尼器补充节点刚度, 使结构在 8 度地震下层间位移角从 1/50 优化至 1/12056。这一模型突破了传统木结构“全柔性”或“全刚性”的二元对立框架, 为文化遗产抗震设计提供了新范式。

6.1.2 动态性能评估模型的创新

针对古建筑木结构缺乏塑性铰的特点, 本研究引入基于位移的抗震设计方法(Direct Displacement-Based Design), 结合榫卯节点的滞回耗能特性, 建立了适用于木结构的等效阻尼比计算模型。通过校准 OpenSees 有限元模型, 验证了斗拱层隔震效应与附加阻尼器的协同作用可使结构加速度响应降低 35%。该方法弥补了传统 Pushover 法在木结构分析中的局限性, 为古建筑抗震评估提供了动态量化工具。

6.2. 实践建议

6.2.1. 分层次加固技术体系

经济欠发达地区: 优先采用低干预、低成本技术。例如, 装配式嵌入木条加固法(单位造价 310 元/m²)通过镀锌钢丝拉结生土墙与木屋盖, 使位移响应减少 54%; 打包带网格加固石砌墙体则通过围箍木柱与墙体, 成本降低 50%且施工周期缩短 30%。

文化遗产重点建筑: 采用高性能材料与智能监测结合。如 CFRP 加固榫卯节点(抗弯承载力提升 130%)搭配光纤传感器实时监测损伤演化, 确保加固效果与风貌保护的双重目标。

6.2.2. 智能化与绿色化发展路径

智能监测系统: 集成 AI 驱动的健康预警平台, 如福建工程学院开发的温湿耦合损伤模型, 可预测木材腐朽速率并动态调整加固策略。

绿色材料替代: 推广竹纤维复合材料(碳排放减少 40%)和生物基胶黏剂, 替代传统化学加固材料。试点研究表明, 竹纤维加固木梁的抗剪承载力提升 65%, 且与木结构风貌兼容。

6.2.3. 政策与技术标准优化

分类保护标准: 依据《古建筑木结构维护与加固技术规范》(GB 50165-20), 将木结构按震害风险与文化遗产价值分为四级, 制定差异化的加固阈值(如普通民居层间位移角限值 1/50, 重点文物 1/100)。

技术推广机制: 建立“政府-高校-工匠”协作网络, 通过示范工程(如云南穿斗式民居斜板墙加固项目)培训农村工匠, 确保低成本技术落地。

6.3. 未来研究方向

6.3.1. 多灾害耦合效应研究

当前加固技术多针对单一地震作用, 需进一步探究木材腐朽、虫蛀与地震动的耦合损伤机制。例如, 昆明理工大学提出的 BFRP 布加固可抑制裂缝扩展, 但其在湿热环境下的长期性能仍需验证。

6.3.2. 智能材料与自适应结构

开发形状记忆合金(SMA)阻尼器与木结构的集成技术, 利用 SMA 的超弹性实现“小震自复位、大震耗能”的双重功能。试点研究表明, SMA 加固燕尾榫节点可使复位能力提升 40%。

6.3.3. 传统工艺的数字化传承

利用三维扫描与 BIM 技术建立榫卯节点数据库, 结合机器学习优化传统工匠的加固决策。例如, 通过分析 1927 年古浪地震的震害案例, 构建节点损伤预测模型。

7. 研究结论

本研究通过多尺度实验与数值模拟, 系统揭示了传统木结构民居的抗震机理及其与现代加固技术的协同效应, 取得以下核心发现与学术贡献。

传统构造的抗震性能边界:

榫卯节点的摩擦耗能机制(能量耗散系数 0.15~0.25)与柱础滑移隔震效应(6 度地震下滑移 12 mm)在低烈度地震中表现优异, 但在 8 度及以上地震中, 榫卯拔榫量超过 28.6 mm、滑移位移超限(>50 mm)导致结构整体失稳, 验证了传统构造的抗震性能阈值。

现代加固技术的量化增强效果: FRP 加固木梁抗剪承载力提升 80%, BFRP 布抑制木柱裂缝扩展, 轴压承载力提高 60%; 嵌槽配筋砂浆带使土坯墙位移减少 54%, ECC 面层加固空斗墙抗剪强度提升 150%; 斜板墙加固法以 310 元/m²的低成本实现位移差降低 35%, 适合农村地区推广。

协同机制的理论突破:

提出“分级耗能”理论模型, 将传统榫卯柔性耗能与现代阻尼器(如金属阻尼器耗能效率提升 40%)分层协同, 混合加固模型在 8 度地震下层间位移角降至 1/120 (较传统构造提升 2.4 倍), 加速度响应降低 35%, 实现“小震不坏、大震可修”的设防目标。

学术与实践贡献:

建立传统木结构多尺度协同分析框架, 首次量化填充墙刚度对地震响应的贡献(带填充墙模型层间位移角优化至 1/59);

开发智能监测系统与绿色材料(竹纤维复合材料抗剪承载力提升 65%, 碳排放减少 40%), 构建“监测-评估-加固”闭环体系;

提出基于位移的抗震设计方法, 结合榫卯节点滞回特性校准等效阻尼比模型, 为古建筑抗震评估提供动态量化工具[10]。

基金项目

西南林业大学大学生创新创业项目(国家级 2023 年)。

参考文献

- [1] 吴东平, 裴明晓, 李成玉. 装配式钢筋混凝土梁柱螺栓连接节点抗震性能试验[J]. 工程抗震与加固改造, 2024, 46(3): 72-80.
- [2] 朱传伟. 传统木结构民居节点及构件抗震加固研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- [3] 谢瑞杰, 樊冬, 朱兴, 等. 安徽铜陵农村民居抗震性能普查与研究[J]. 地震科学进展, 2020, 50(1): 20-26.
- [4] 王晓东. 古代夯土建筑动力响应及抗震保护[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [5] 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+370.
- [6] 张俊峰, 高锦文, 王欢. 冷弯薄壁型钢加固土坯墙体抗震性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2018, 40(5): 117-123.
- [7] 张挣鑫. 浅析喀斯特地区木结构建筑发展关键技术研究[C]//国家新闻出版广电总局中国新闻文化促进会学术期刊专业委员会. 2017 年国际科技创新与教育发展学术会议论文集(第二部分). 2017: 98-99.
- [8] 张博. 空斗墙-砖木结构传统民居抗震加固试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [9] 左德亮. 木结构传统民居抗震加固试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [10] 黄曙. 农村典型木结构房屋的抗震性能及加固措施研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2009.