

# 基于有限元分析的摩梭木楞房抗震加固方案研究

张发晓<sup>1,2</sup>, 戴必辉<sup>1</sup>, 罗竹英<sup>1</sup>, 史凯乐<sup>1</sup>, 胡蝶<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

<sup>2</sup>日照市自然资源和规划局执法监察科, 山东 日照

收稿日期: 2026年4月22日; 录用日期: 2026年5月14日; 发布日期: 2026年5月26日

## 摘要

采用ABAQUS数值模拟的方法, 系统开展多工况下不同加固方案的抗震性能研究, 通过实地调研明确摩梭民居的构造特征与抗震薄弱环节, 基于ABAQUS建立3组对比模型, 分别是原始抗震模型、柱底增设隔震支座加固模型、梁柱节点包钢加固模型。对地震动下的层间位移、屋顶加速度及应力进行时程分析。原始抗震模型在强震作用下层间位移角与屋顶加速度急剧增大, 存在严重破坏风险。隔震支座加固通过延长结构自振周期、隔离地震能量输入, 整体应力水平显著降低, 有效保护了上部木结构。包钢加固通过提高构件刚度与节点约束, 可使层间位移降低, 屋顶加速度降低, 有效抑制了木构件本体的应力发展。该研究成果为摩梭木楞房的抗震加固及传统木结构建筑的保护提供了理论依据与技术支撑。

## 关键词

ABAQUS, 时程分析, 抗震加固, 隔震支座, 节点包钢, 摩梭民居

# Research on Seismic Reinforcement Schemes of Mosuo Wooden Houses Based on Finite Element Analysis

Faxiao Zhang<sup>1,2</sup>, Bihui Dai<sup>1</sup>, Zhuying Luo<sup>1</sup>, Kaile Shi<sup>1</sup>, Die Hu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Department of Law Enforcement and Inspection, Rizhao Bureau of Natural Resources and Planning, Rizhao Shandong

Received: April 22, 2026; accepted: May 14, 2026; published: May 26, 2026

文章引用: 张发晓, 戴必辉, 罗竹英, 史凯乐, 胡蝶. 基于有限元分析的摩梭木楞房抗震加固方案研究[J]. 土木工程, 2026, 15(5): 274-285. DOI: 10.12677/hjce.2026.155138

## Abstract

This study conducts a systematic investigation on the seismic performance of various reinforcement schemes under multiple working conditions using ABAQUS numerical simulation. Through field investigation, the structural characteristics and seismic weaknesses of Mosuo dwellings are identified. Three comparative models are established based on ABAQUS, namely the original seismic model, the model with isolation bearings at column bases, and the model with steel-jacketing at beam-column joints. Time-history analysis is performed on inter-story displacement, roof acceleration and stress under ground motions. For the original seismic model, the inter-story drift ratio and roof acceleration increase sharply under strong earthquakes, indicating a severe risk of structural damage. By extending the natural vibration period and isolating seismic energy input, base isolation significantly reduces the overall stress level and effectively protects the upper timber structure. Steel-jacketing improves member stiffness and joint constraints, which reduces inter-story displacement and roof acceleration, and restrains the stress development in timber components. The results provide a theoretical basis and technical support for seismic reinforcement of Mosuo wooden houses and protection of traditional timber structures.

## Keywords

ABAQUS, Time-History Analysis, Seismic Reinforcement, Base-Isolation Bearing, Joint Steel-Jacketing, Mosuo Dwelling

Copyright © 2026 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. 引言

云南永宁坝区摩梭木楞房[1]是滇西北高原特有的传统木结构建筑,是摩梭人适应地域环境与力学需求的智慧结晶。从结构力学体系来看,摩梭木楞房呈现“双重抗侧、协同受力”的典型特征,主体木构架由柱、梁、枋通过榫卯节点柔性连接,构成主要抗侧力骨架。竖向承重方面,木柱与木墙承担屋顶及楼面荷载,虽简化施工但存在水平滑移风险。这一构造缺陷在宁蒗 5.5 级地震和漾濞 6.4 级地震[2]-[5]中已得到印证——同类木结构建筑的夯土墙在地震中普遍出现纵横墙交接处开裂、局部坍塌等震害。



(a) 木结构地震灾害 2 害图



(b) 砌体结构地震灾害图

Figure 1. Seismic damage photos of Ninglang M5.5 earthquake

图 1. 宁蒗 5.5 级地震灾害图

如图 1 记录了 2022 年 1 月 4 日宁蒗 5.5 级地震中实地考察时记录的一组震害图片, 是滇西北高原地区两类典型建筑的震害实况, 清晰呈现不同结构形式的抗震薄弱点, 图 1(a)为木结构建筑室内地震灾害, 可见墙体与木构架连接部位出现大面积开裂、剥落, 围护结构破损严重, 室内家具倾倒, 反映出木结构建筑虽木构架主体尚存, 但围护体系与主体连接薄弱, 易在地震作用下发生非结构构件破坏; 图 1(b)为砌体结构建筑室外地震灾害, 建筑外墙出现贯通性裂缝, 屋面瓦件大面积脱落并堆积于地面, 窗间墙呈现明显的震害损伤, 抗震耗能能力远弱于传统木结构。

滇西北地区作为青藏高原东南缘的重要组成部分, 是我国地震活动最为频繁的地区之一[6]。1996 年丽江 7.0 级地震[7]、2012 年宁蒗 - 盐源 5.7 级地震[8]、2014 年鲁甸 6.5 级地震[9]、2021 年漾濞 6.4 级地震[2]等一系列破坏性地震[10], 造成了严重的人员伤亡和经济损失。在地震构造背景方面, 王斌等[7]利用 InSAR 技术对 1996 年丽江 7.0 级地震的研究表明, 表明断裂南北两段分别发震。常祖峰等[11]对 2012 年宁蒗 - 盐源 5.7 级地震的研究发现, 表现为右旋走滑兼正断性质, 最新活动时代为晚更新世晚期。杨军等[12]采用 CAP 方法反演该地震序列的震源机制解, 与永宁断裂的 NW 向走向一致。王光明等[13]采用双差定位对该地震序列进行精确定位, 进一步证实永宁断裂为发震构造。杜方、吴江[14], 薛建阳[15], 黄超群[16], 张锡成等[17]对 2001 年盐源 5.8 级地震的研究表明, 近北向节面为发震断层面。黄圣陆、王新民[8]对 1976 年盐源 - 宁蒗 6.7 级和 6.4 级地震的震害调查表明, 发震构造分别为甲米断层和辣子弧形断裂西翼。

## 2. 木结构数值模拟方法和基于木结构有限元研究现状

### 2.1. 数值模拟方法

摩梭木楞房以单层建筑为主, 部分搭配阁楼式花楼, 整体尺寸兼顾居住舒适度与结构稳定性。“祖母屋”为典型, 面宽 3~5 m, 进深 2~4 m, 开间净距 1.5~3 m, 符合摩梭母系家庭的聚集生活需求; 单层主体层高 2 m 以内, 檐口高度 3~4 m, 既保证室内通风采光, 又降低高原强风对屋顶的荷载影响, 如图 2 单层摩梭木楞房构造图, 后续有限元建模即参照如图所示的构造进行搭建。



Figure 2. Structural diagrams of single-story Mosuo wooden log houses  
图 2. 单层摩梭木楞房构造图

图 3 为木楞房结构设计参考大样图, 通过左视图与主视图清晰展示了其核心受力体系的构件组成与传力路径。该图基于宁蒗 5.5 级地震中木楞房的震害特征进行力学简化, 既还原了“木墙承重、梁柱传力”的传统构造逻辑, 也为后续有限元建模及抗震性能分析提供了直观的结构参考依据。

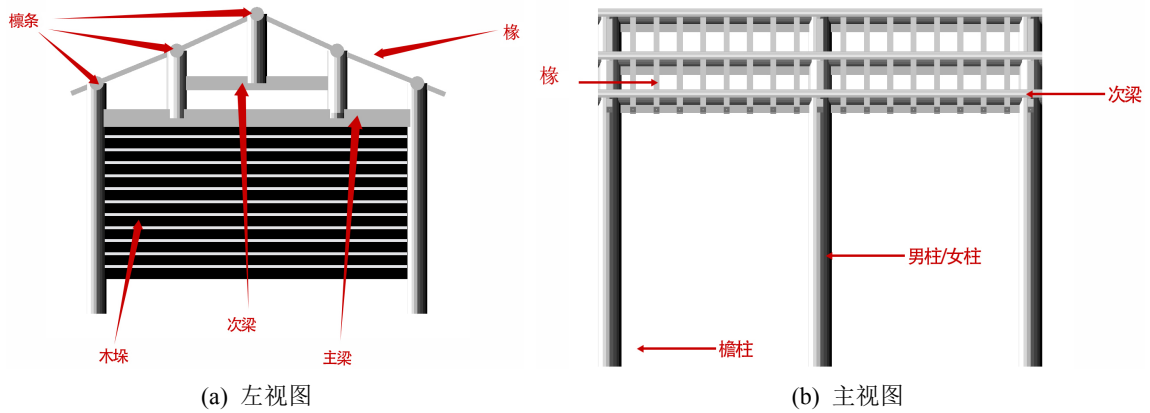


Figure 3. Reference structural detail drawings  
图 3. 结构设计参考大样图

## 2.2. 有限元模型

建立了木楞房的三维精细化有限元模型，包含原始抗震模型、贴钢加固模型与隔震加固模型三种工况。木楞房的核心构造与尺寸如表 1 所示，如图 4 木楞房为三种有限元模型。

- ① 木楞房抗震模型，为原始结构模型，未施加任何加固措施。
- ② 木楞房贴钢加固模型在原始模型基础上，榫卯节点粘贴 Q235 钢板，厚度为 8 mm。
- ③ 木楞房隔震模型在柱底部增设天然橡胶隔震支座，橡胶隔震支座。

Table 1. Dimensions of wood components  
表 1. 木构件形状尺寸

名称	截面形状	截面尺寸/mm	长度/mm
男柱	圆形	Φ200	1960
女柱	圆形	Φ200	1960
檐柱	圆形	Φ200	700
主梁	矩形	140*175	3200
次梁	矩形	140*140	1800
水平枋	矩形	140*70	3800
木垛	矩形	30*30	3200
檩条	矩形	140*90	3200

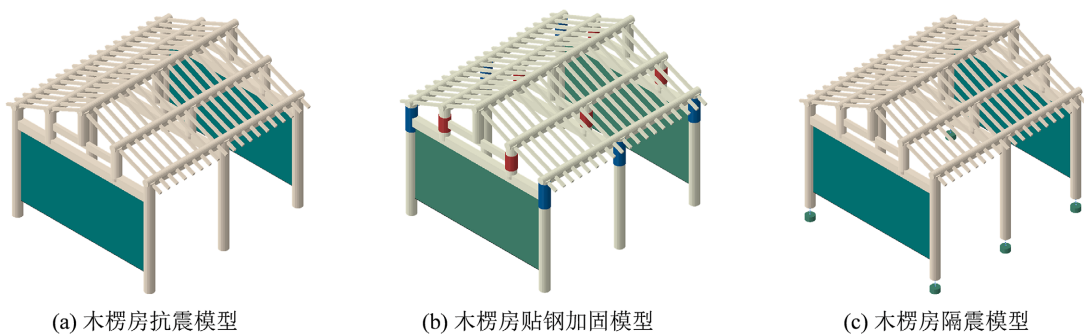


Figure 4. Finite element model of the wooden log house  
图 4. 木楞房有限元模型

### 2.3. 网格单元选取

主体受力体系由梁、柱、枋等线性构件组成，如图 5 为有限元模型的网格详图。整体结构建模时采用 B31 单元进行模拟。该单元为一阶线性三维梁单元，通过构件两端节点即可定义。木垛采用 S4R 壳单元代替，该单元为四结点曲面薄壳或厚壳，减缩积分，沙漏控制，有限膜应变。

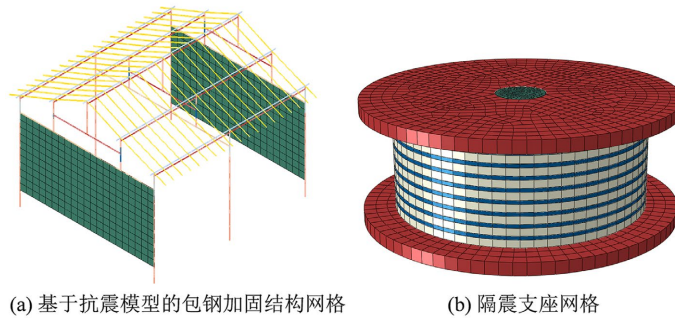


Figure 5. Detailed mesh diagram  
图 5. 网格详图

### 2.4. 地震波的选取及模态分析

地震波的选取需与永宁坝区的场地地质条件严格匹配。根据区域地质勘察资料，永宁坝区属于 II 类场地。避免因场地类别差异导致结构响应失真，这与《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)中“地震波应与场地条件相适配”的要求一致。最终选取 3 条地震波形成分析组合，具体组合形式为：2 条天然波 + 1 条人工合成波。如表 2 为所选地震波的信息。

Table 2. Information of selected seismic waves  
表 2. 所选地震波信息

序号	名称	时间	测站	PGA (X、Y、Z)/g
1	“Umbria Marche_IItaly”	1997	“Norcia-Zona Industriale”	0.01/0.04/0.03
2	“Whittier Narrows-01”	1987	“LA-Evernon Ave”	0.55/0.30/0.38
3	“Artwave-01”	/	/	0.20/0.20/0.20

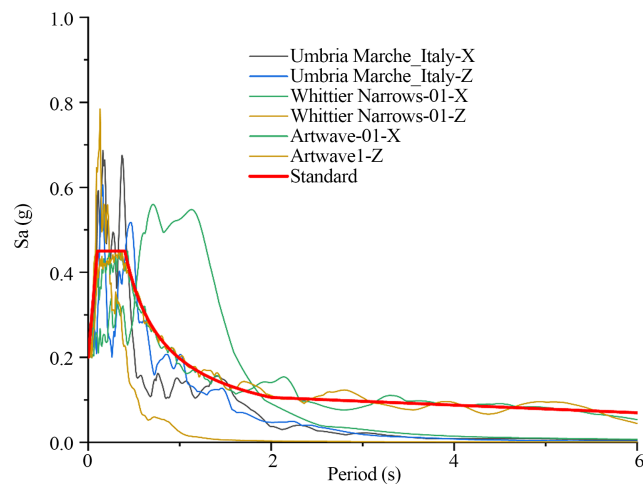


Figure 6. Response spectrum curve  
图 6. 反应谱曲线

根据图 6 结果, 所选地震波的反应谱曲线包络住设计反应谱, 在特征周期处的地震波加速度平均反应谱曲线与设计反应谱的值相差不大, 满足抗震设计规范的误差要求, 所选地震波可以有效反映光岳楼在地震作用下的动力响应。

振型是结构的固有属性, 与振动位移的大小无关, 在地震中高阶振型会因阻尼作用造成衰减加快, 仅分析前三阶低阶振型, 木楞房框架结构抗震模型、隔震模型和贴钢加固模型的前三阶振型如下图 7 所示。

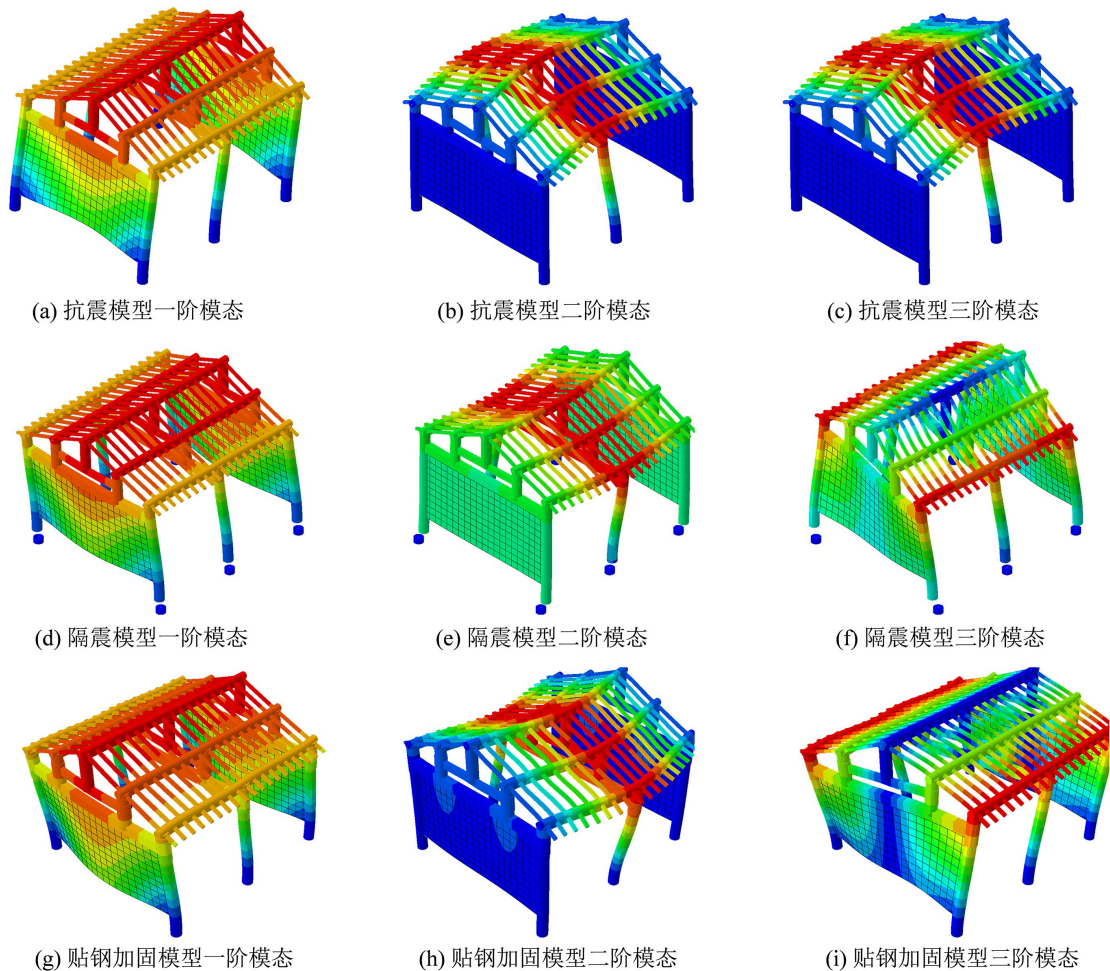


Figure 7. The first three modal shapes  
图 7. 模态前三阶振型

由上图可以看出, 木楞房木结构有限元模型的前三阶振型表现为: 第一阶振型为 X 方向的平动, 第二阶振型为 Y 方向的平动, 第三阶振型为扭转, 与框架结构的振型规律相同, 因此可以证明有限元模型建立的合理性。

在 ABAQUS 中木结构有限元分析时选用瑞利阻尼(Rayleigh), 它假设结构的阻尼矩阵为质量矩阵与刚度矩阵正交, 简单易操作, 如式(3)所示:

$$[C]=a_0[M]+a_1[K] \quad (1)$$

式中,  $a_0$  与  $a_1$  为待定常数, 可通过结构的阻尼比  $\zeta$  确定,  $a_0$  与  $a_1$  的解析表达式如下式(2)所示:

$$\{a_0; a_1\} = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \left\{ \frac{\omega_j}{\omega_i} - \frac{\omega_i}{\omega_j} \right\} \{\zeta_i; \zeta_j\} \quad (2)$$

一般情况下对结构的阻尼比进行简化, 使  $\zeta_i = \zeta_j = \zeta$  时进行计算, 计算结果如下式(3)所示:

$$\left\{ \begin{matrix} a_0 \\ a_1 \end{matrix} \right\} = \frac{2\zeta}{\omega_i + \omega_j} \{\omega_i\omega_j; 1\} \quad (3)$$

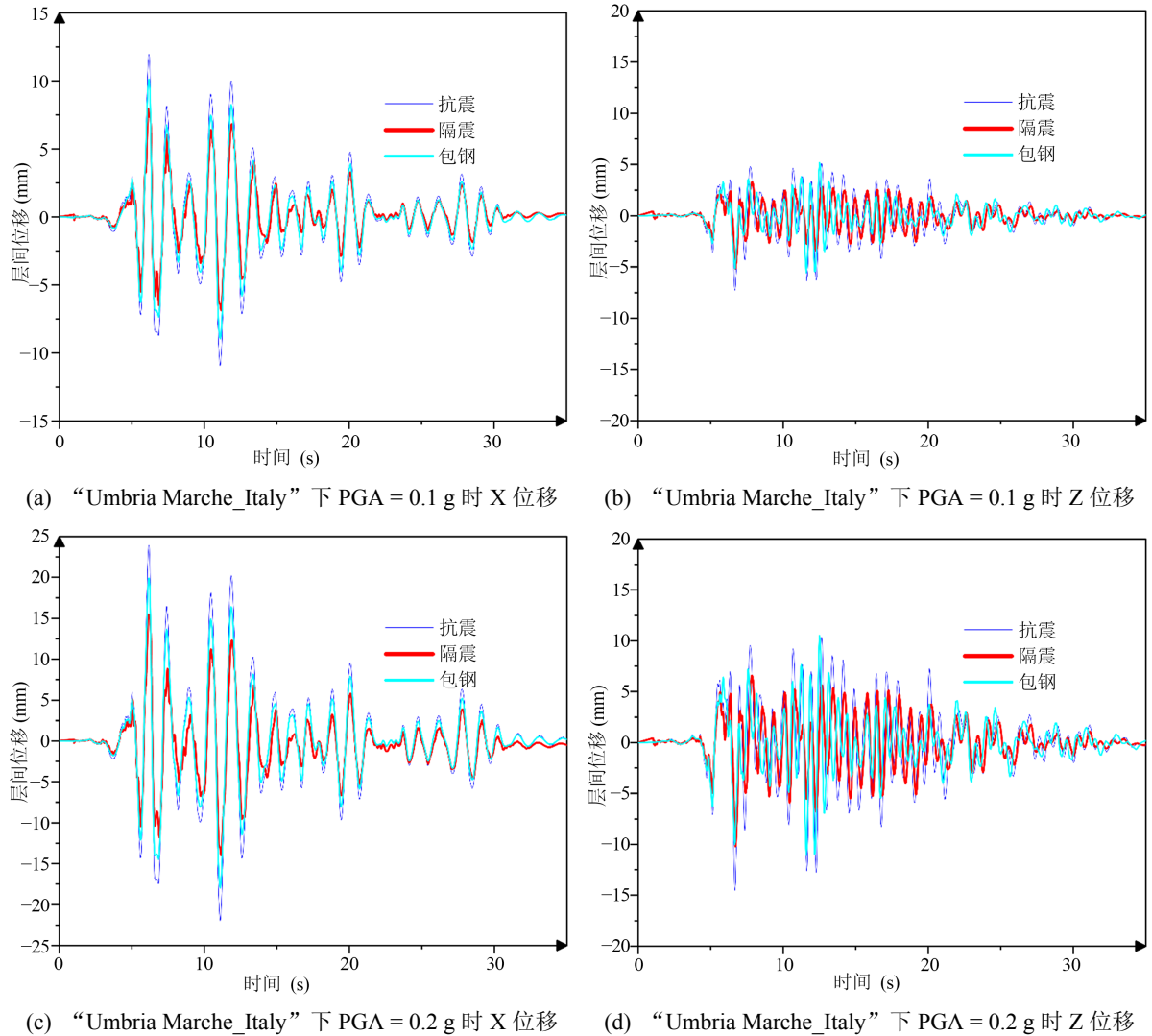
式中, 通常情况下将其转化为结构的自振频率  $f$  进行计算, 如下式(4)所示:

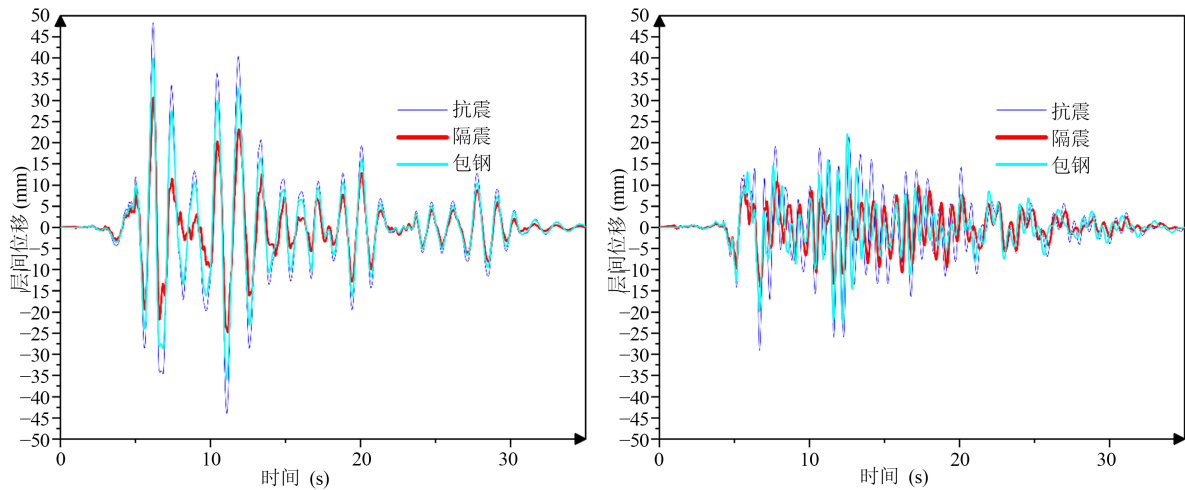
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (4)$$

### 3. 木楞房有限元分析

#### 3.1. 位移分析

图 8 为“Umbria Marche\_Italy”地震动作用下, 木楞房在不同峰值加速度(PGA = 0.1 g、0.2 g、0.4 g)及不同工况(抗震、隔震、包钢)下的层间位移时程曲线。





(e) “Umbria Marche\_Italy” 下 PGA = 0.4 g 时 X 位移

(f) “Umbria Marche\_Italy” 下 PGA = 0.4 g 时 Z 位移

**Figure 8.** Inter-story displacement under the seismic action of “Umbria Marche\_Italy”**图 8.** “Umbria Marche\_Italy” 地震作用下的层间位移

从图中可以看出：在 PGA = 0.1 g 的小震作用下，三种工况的层间位移均较小，隔震与包钢加固均能有效控制位移，其中隔震方案的位移响应略低于包钢方案，表现出更优的减震效果。随着地震动强度提升至 PGA = 0.2 g，原始抗震结构的层间位移显著增大，而包钢加固通过提升构件刚度，使位移得到一定程度的抑制。在 PGA = 0.4 g 的强震作用下，原始抗震结构的层间位移峰值急剧增大，包钢加固虽能限制构件变形，但结构仍直接承受地震作用，位移响应依然较大；有效保护了上部木结构及榫卯节点免受严重破坏。

**Table 3.** Maximum inter-story displacement under the seismic action of “Umbria-Marche-Italy”**表 3.** “Umbria-Marche-Italy” 地震作用下的最大层间位移

PGA	方向	抗震模型位移(mm)	隔震模型位移(mm)	包钢模型位移(mm)
0.1 g	X	12.4	7.9	9.5
	Z	15.2	9.2	11.4
0.2 g	X	24.6	13.6	17.1
	Z	20.3	11.7	14.7
0.4 g	X	44.7	24.1	30.0
	Z	49.5	22.2	27.1

**Table 4.** Inter-story drift ratio and suppression ratio under the seismic action of “Umbria-Marche-Italy”**表 4.** “Umbria-Marche-Italy” 地震作用下的层间位移角和抑制率

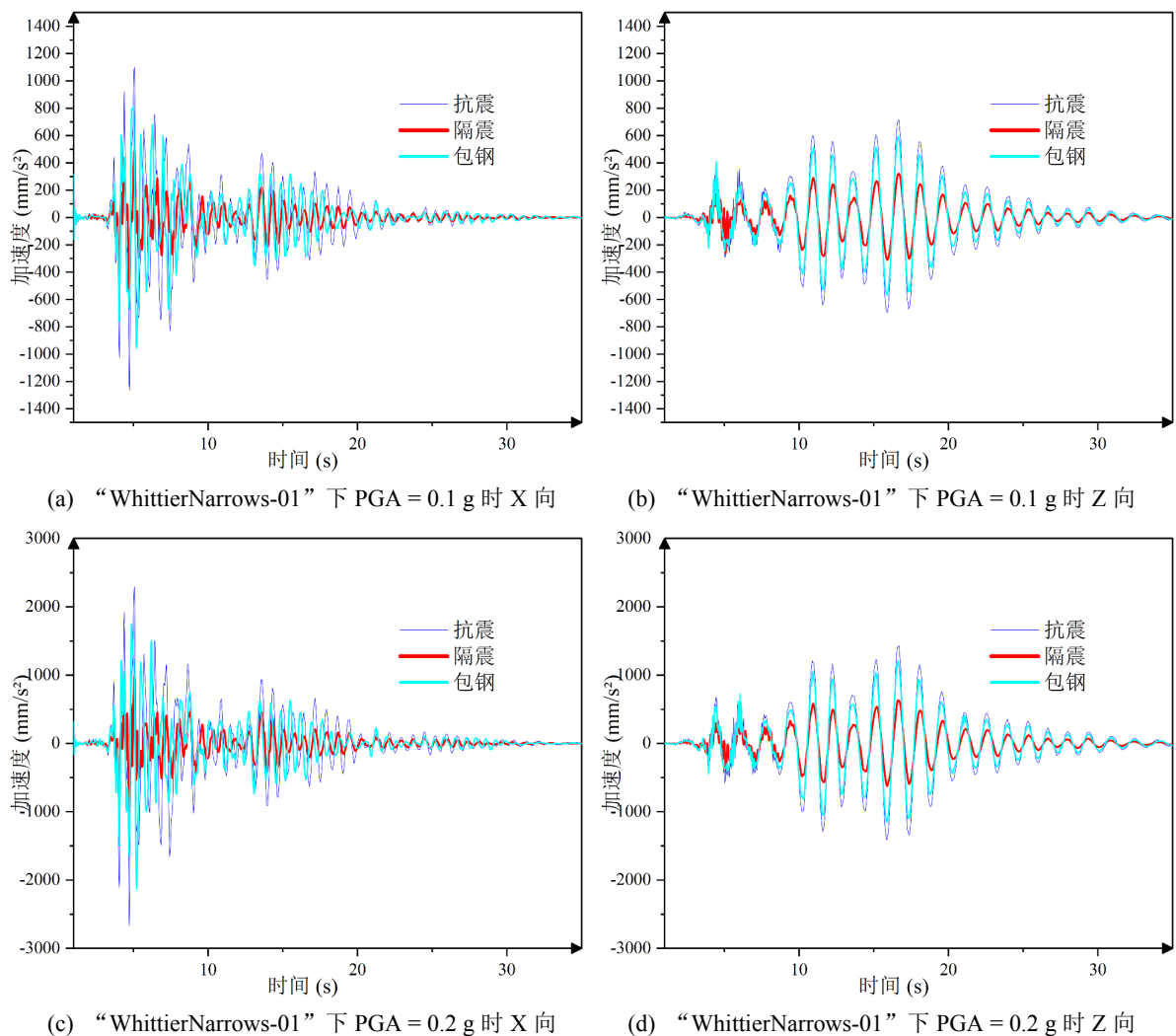
PGA	方向	抗震层间位移角	隔震层间位移角	包钢层间位移角	隔震降低率/%	包钢降低率/%
0.1 g	X	0.0054	0.0034	0.0041	36.2	23.7
	Z	0.0066	0.0066	0.0049	39.4	25.1
0.2 g	X	0.0107	0.0107	0.0074	44.8	30.6
	Z	0.0088	0.0088	0.0064	42.3	27.4
0.4 g	X	0.0194	0.0194	0.0131	46.1	32.8
	Z	0.0172	0.0172	0.0118	43.7	31.3

如表 3 “Umbria Marche-Italy” 所示为地震动作用下的最大层间位移, 表 4 “Umbria Marche-Italy” 为地震动作用下的层间位移角和抑制率, 在 Umbria-Marche 地震动作用下, 未加固模型的层间位移随地震动峰值加速度的提高显著增大。隔震支座加固对层间位移的降低幅度为 36.2%~46.1%, 包钢加固为 23.7%~32.8%, 两种加固方式均能有效控制结构位移。

### 3.2. 加速度分析

在 “Whittier Narrows-01” 地震动作用下, 隔震加固与包钢加固均能有效降低木楞房的屋顶加速度响应。其中, 隔震方案通过延长结构自振周期、隔离地震能量输入, 使屋顶加速度峰值降低 35%~48%; 包钢方案通过提高构件刚度与节点约束, 减小动力放大效应, 使加速度峰值降低 20%~32%。两种加固方式均表现出稳定的减震效果, 且隔震方案的优势更为显著。随着地震动峰值加速度(PGA)从 0.1 g 提升至 0.4 g, 原始抗震模型的屋顶加速度急剧增大, 在强震作用下甚至达到数千毫米每平方秒, 结构面临严重的冲击破坏风险。

图 9 呈现了 “WhittierNarrows-01” 地震动下, 不同工况的屋顶加速度响应规律。在小震(PGA = 0.1 g)作用下, 三种模型的加速度响应差异较小, 隔震与包钢加固均能有效降低屋顶加速度。当中震(PGA = 0.2 g)作用时, 未加固结构的加速度峰值显著增大, 而隔震模型的加速度响应明显低于包钢模型与原始结构,



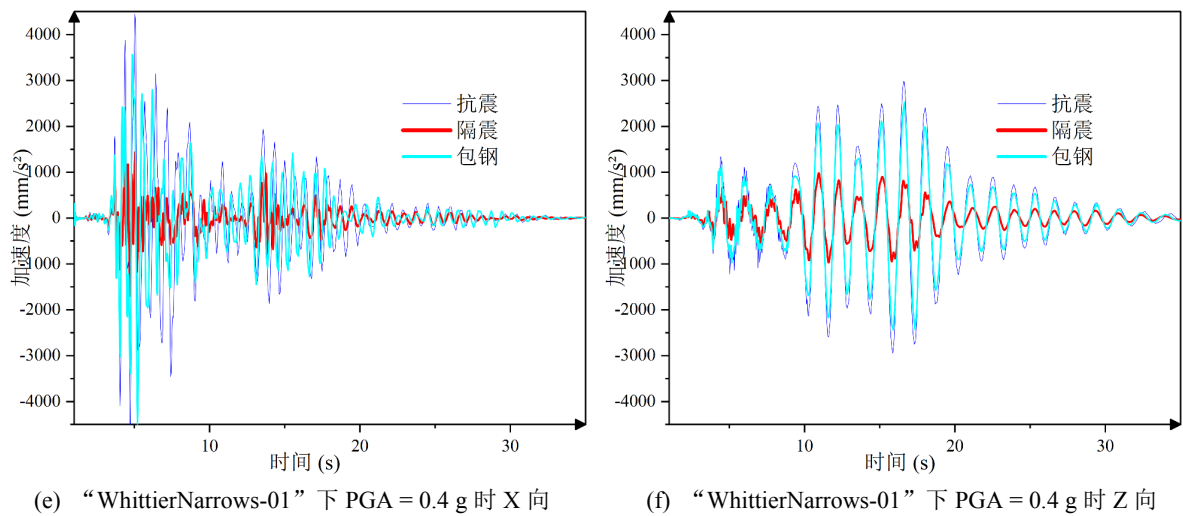


Figure 9. Time-history analysis of roof acceleration under the seismic action of “WhittierNarrows-01”

图9. “WhittierNarrows-01”地震作用下的屋顶加速度时程分析

展现出更优的减震性能。在强震(PGA = 0.4 g)作用下,原始结构的加速度峰值急剧升高,而隔震模型通过“以柔克刚”的机制,大幅削弱了地震作用向上部结构的传递,使屋顶加速度得到显著控制,有效保护了上部木结构免受冲击破坏。

### 3.3. 应力分析

如图10~12所示,在“Artwave-01”地震动作用下,三种工况的应力发展规律与前两条地震动基本一致。

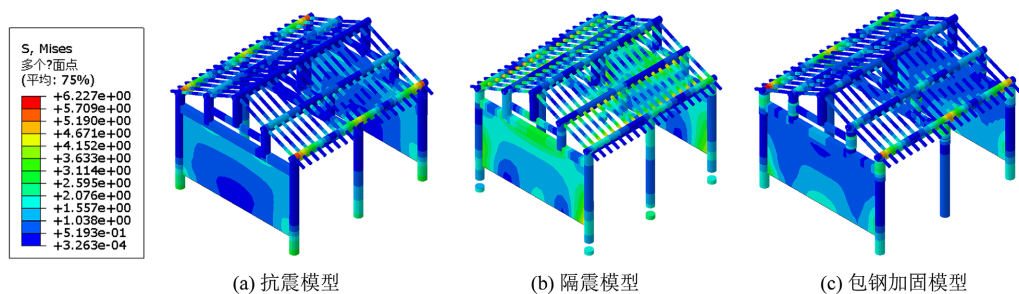


Figure 10. Stress nephogram with PGA = 0.1 g under “Artwave-01”

图10. “Artwave-01”下PGA = 0.1 g时应力云图

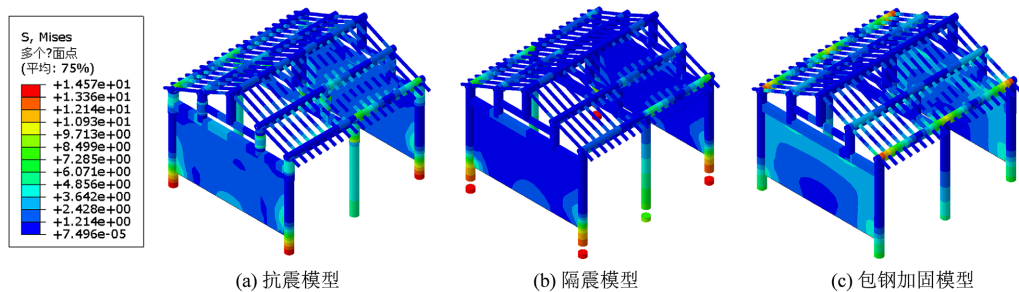


Figure 11. Stress nephogram with PGA = 0.2 g under “Artwave-01”

图11. “Artwave-01”下PGA = 0.2 g时应力云图

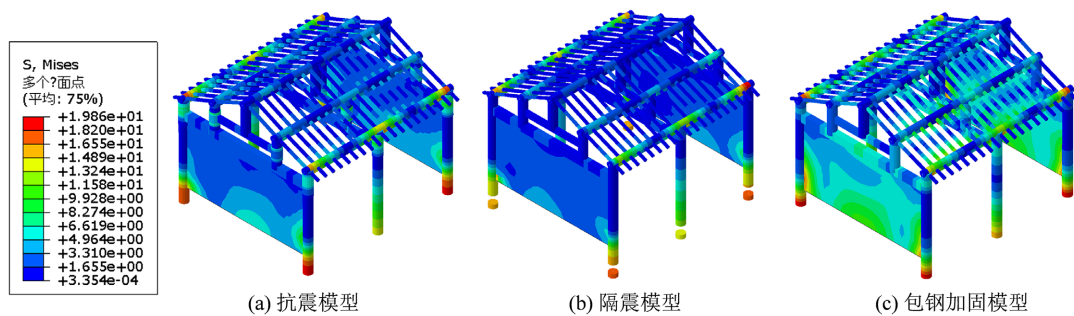


Figure 12. Stress nephogram at PGA = 0.4 g under the excitation of "Artwave-01"

图 12. "Artwave-01" 下 PGA = 0.4 g 时应力云图

原始抗震模型：在各类地震动作用下，应力集中主要发生在柱根、主次梁交接处及榫卯节点等关键部位。随着地震动强度(PGA)的提升，高应力区域迅速扩大，在强震(PGA = 0.4 g)作用下，部分区域应力远超木材屈服限值，结构面临严重的损伤甚至破坏风险。

隔震加固模型：通过延长结构自振周期、隔离地震能量输入，从源头上有效阻隔了地震应力向上部结构的传递。在所有工况下，模型整体应力水平显著降低，仅柱底与隔震支座连接部位出现轻微应力集中，上部木构架绝大部分区域始终处于低应力状态，有效保护了主体木结构。

包钢加固模型：通过提高关键构件的刚度与强度，有效抑制了木构件本体的应力发展。应力集中区域明显缩减，高应力主要集中在包钢钢板与木材的结合部位，木构件本体的应力水平得到有效控制。但在强震作用下，包钢区域应力急剧上升，存在局部粘结失效的潜在风险，其整体应力水平仍高于隔震模型。

#### 4. 结论

本研究通过有限元模拟与震害验证，明确了摩梭木楞房原始抗震模型在强震下的核心问题——层间位移角与屋顶加速度急剧放大，柱根、榫卯节点等关键部位应力集中显著，易引发结构性破坏；对比两种加固方案后发现，隔震支座加固通过延长自振周期、隔离地震能量，可使层间位移与屋顶加速度均降低 35%~48%，整体应力水平大幅下降，仅柱底与支座连接处存在轻微应力集中，抗震保护效果最优；包钢加固通过提升构件刚度与节点约束，实现 20%~32%的位移及加速度削减，有效抑制木构件本体应力发展，但强震下存在局部粘结失效风险，整体性能不及隔震方案。结合实地震害调研，包钢加固因成本低、工期短、效果直观，成为当地应用最广泛的加固方式；隔震支座虽性能更优，但受成本限制推广难度较大，需政策支持适配少数民族及边远山区场景，研究成果为传统木结构抗震加固与文化遗产保护提供了重要理论与技术支撑。

同时，本研究仍存在一定局限性：其一，有限元模型未充分考虑木材材性离散性、节点老化腐朽程度等实际工况差异，模拟结果与真实结构响应可能存在偏差；其二，加固效果验证仅基于特定地震波输入，未涵盖不同场地类别、地震动特性的多样化场景，结论适用性需进一步拓展；其三，未对两种加固方案的长期耐久性、维护成本及施工可行性进行系统性对比分析，缺乏全生命周期视角的评估。

未来研究可从三方面深化：一是细化模型参数，引入木材损伤累积效应、节点实际劣化状态，结合足尺模型试验提升数值模拟的精准度；二是拓展研究场景，纳入多场地类别、多强度等级地震动输入，探究不同加固方案的适配性边界；三是开展长期性能研究，通过加速老化试验、现场长期监测，对比两种方案的耐久性、维护成本及社会效益，同时探索“隔震 + 局部包钢”组合加固方案的优化设计，为传统木结构建筑提供更全面、经济的抗震保护方案；此外，可结合政策工具研究，提出适配少数民族地区

的加固补贴、技术推广机制, 推动最优技术方案的落地应用。

## 基金项目

本文受国家基金项目(项目名称: 附加消能金属连接件的新型复合穿斗木结构受力机制及承载力模型化研究; 项目编号: 52268051)资助。

## 参考文献

- [1] 靳文祎, 李瑞君. 摩梭民居建筑保护与改造设计初探——以云南永宁地区达祖村民居改造设计为例[J]. 艺术与设计(理论), 2020, 2(5): 53-55.
- [2] 高杰, 高永武. 云南漾濞 6.4 级地震现场灾害调查与震害分析[J]. 防灾博览, 2021(3): 12-15.
- [3] 贺素歌, 冉华, 周青云, 等. 漾濞 Ms6.4 地震中土木结构房屋抗震加固效果研究[J]. 地震工程学报, 2021, 43(4): 799-806, 817.
- [4] 叶阳, 明小娜, 卢永坤, 杨建强, 周洋, 刘绍昌. 漾濞 6.4 级地震大理地区穿斗木结构震害分析及加固措施[J]. 世界地震工程, 2021, 37(4): 28-37.
- [5] 刘昌伟, 常祖峰, 王光明, 等. 2021 年云南漾濞 Ms6.4 地震震区断裂构造特征[J]. 地震研究, 2023, 46(3): 323-331.
- [6] 潘曦, 丘容千, 林徐巍. 滇西北井干式民居建筑的多民族比较研究[J]. 世界建筑 2021(9): 8-12+137.
- [7] 王斌, 黄江培, 杨雄, 等. 1996 年丽江 Ms7.0 地震前后滇西地震预报实验场重力场时空演化特征[J]. 地震研究, 2025, 48(4): 623-630.
- [8] 黄圣睦, 王新民. 1976 年盐源-宁蒗地震震害调查[J]. 四川地震, 1985(3): 35-39+50.
- [9] 和嘉吉, 卢永坤, 代博洋, 庞卫东, 贺素歌, 非明伦. 鲁甸 MS6.5 与景谷 MS6.6 地震灾区房屋抗震能力差异分析[J]. 地震研究, 2015, 38(1): 137-142.
- [10] 季灵运, 王庆良, 徐晶, 等. 1996 年丽江 Ms7.0 地震的 InSAR 形变观测与构造意义[J]. 国际地震动态, 2017(8): 119-120.
- [11] 常祖峰, 杨盛用, 周青云, 等. 2012 年 6 月 24 日宁蒗-盐源 Ms5.7 地震发震构造刍议[J]. 地震地质, 2013, 35(1): 37-49.
- [12] 杨军, 李春海, 陈佳, 等. 2012 年 6 月 24 日宁蒗-盐源 Ms5.7 地震序列  $m_l \geq 3.5$  余震震源机制解[J]. 地震地磁观测与研究, 2015, 36(3): 21-26.
- [13] 王光明, 朱良保, 苏有锦, 等. 2012 年 6 月 24 日宁蒗-盐源 Ms5.7 地震的精确定位[J]. 地震学报, 2015, 37(5): 733-746, 885.
- [14] 杜方, 吴江. 四川盐源-云南宁蒗间 5.8 级地震发震特征[J]. 四川地震, 2008(3): 11-19.
- [15] 薛建阳, 吴占景, 张风亮, 赵鸿铁, 刘祖强, 王豆豆. 碳纤维布加固古建筑木结构基于结构潜能和能量耗散地震破坏评估[J]. 2013, 35(6): 103-111.
- [16] 黄超群. 三维地震作用下古建筑木结构地震响应与隔震控制研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2018.
- [17] 张锡成, 胡成明, 吴晨伟, 马赫迪, 韩乙楠. 水平地震作用下大式带斗棋木结构古建筑的抗倒塌性能分析[J]. 2020, 32(1): 10-18.