

# 交通激励下天水古民居木结构的隔振措施研究

## Research on Vibration Isolation Measures of Ancient Wood Structures in Tianshui under Traffic Excitation

王鑫 马丽娜 陈庭芳

Xin Wang Lina Ma Tingfang Chen

天水师范学院土木工程学院 中国·甘肃 天水 741001

School of Civil Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui, Gansu, 741001, China

**摘要:** 建立天水北宅子主厅楼木结构—地基的三维有限元模型, 地面车辆 40km/h 四线行驶下得到不同拾振点的水平振动速度幅值进行动力响应分析及隔振措施研究, 提出了设置隔振沟的减隔振措施, 讨论隔振沟位置、深度、宽度、填充材料对减振效果的影响。结果表明: 隔振沟设置位置、深度、宽度对减振影响较大, 在隔振沟内填充软性材料比硬性材料减隔振效果更佳。隔振沟设置距北宅子中院主厅楼木结构外墙 45m、沟深度 6m、宽度 2m, 减振效果最佳; 同时沟内填充橡胶和泡沫塑料减振效果更好, 该研究成果为天水古民居木结构的维护和管理提供依据。

**Abstract:** The three-dimensional finite element model of wood structure and foundation of the North House's main hall in Tianshui was established. The horizontal vibration velocity amplitude of different pickup points was obtained, and the measures of vibration isolation was studied on the ground vehicle 40km/h in four lines. The measures of setting isolation ditch were put forward, and the effect of the location, depth, width and filling material was discussed. The results show that the position, depth and width of the isolation ditch have great influence on the vibration reduction effect, and the effect of filling the ditch with soft material is better than that of hard material. It is recommended to set the isolation ditch 45m away from the external wall of the wood structure. The best vibration reduction effect is the ditch depth is 6m and the width is 2m. The groove with rubber and foam soft materials have better damping effect. It provides a basis for maintenance and management of ancient wood structures in Tianshui.

**关键词:** 交通激励; 古木结构; 隔振措施

**Keywords:** traffic incentives; ancient wood structures; vibration isolation measures

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(项目编号: 52068063); 甘肃省科技计划项目(21JR1RE286); 天水师范学院麦积山石窟艺术研究项目(项目编号: MJS2021-06); 天水师范学院伏羲科研创新团队项目(项目编号: FXD2020-13); 甘肃省教育厅青年博士基金项目(2021QB-110); 天水师范学院科研创新基金项目(项目编号: CXJ2020-12)。

**DOI:** 10.12346/etr.v5i7.8288

## 1 引言

胡氏古民居为天水市现存明代民居建筑杰出代表, 国务院 2001 年 6 月 25 日公布为全国重点文物保护单位。它由南、北宅子组成, 北宅子中院主厅楼处于北宅子的核心, 平面为长方形, 面南背北, 开间为五间 20.05m, 进深三间 14.41m, 屋脊高 11.4m, 为重檐二层楼阁式硬山顶砖木结构。

其位于天水市秦州区民主东路中段, 距市内交通要道 40 多米远, 5·12 汶川地震受损严重。天水经济发展, 人口增长, 地面车辆增加, 常年地面车辆振动使结构出现疲劳损伤、榫卯松动、结构变形, 安全和寿命遭到威胁, 因此急需开展天水古民居木结构的地面交通激励下的隔振措施研究。

孟昭博<sup>[1]</sup>建立聊城光岳楼木结构—高台基—土层有限

【作者简介】王鑫(1971-), 女, 中国陕西西安人, 博士, 副教授, 从事结构健康监测研究。

元模型,讨论车辆类型、车速、距离等对光岳楼的振动响应,提出环形隔振沟的减振措施。袁俊<sup>[2]</sup>对西安钟楼提出振源传导桩减振措施。

论文研究北宅子中院主厅楼木结构在地面交通激励下动力响应及隔振措施,讨论隔振沟位置、沟宽、沟深、填充材料对减振效果的影响,为天水古民居木结构的保护提供指南。

## 2 北宅子中院主厅楼木结构的有限元模型

采用 ANSYS 软件建立北宅子主厅楼木结构—地基土有限元模型,其建造时间与西安钟楼较接近,材料参数见表 1。

表 1 材料参数

材料	厚度(m)	弹性模量(MPa)	密度(kg/m <sup>3</sup> )	泊松比
木材	—	8307	410	0.25
地基土	8	11.2	1780	0.33

Beam188 模拟木梁、柱, Mass21 模拟大屋盖, Combin14 模拟梁柱榫卯连接,在梁柱榫卯节点处建立多个有限元重合节点,梁和柱连接处加弹簧单元,弹簧刚度系数  $k_x=1.26 \times 10^9 \text{ kN/m}$ ,  $k_y=k_z=1.41 \times 10^9 \text{ kN/m}$ ,  $k_{\theta_x}=k_{\theta_y}=k_{\theta_z}=1.5 \times 10^{10} \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ <sup>[3]</sup>。按面积等效方式将屋面荷载集中相应柱端,屋面荷载  $G=1.925 \text{ kN/m}^2$ 。地基土长度 101.02m,宽度 59.25m,深度 8m。Solid45 模拟地基土<sup>[3]</sup>,其单元长度 2m,柱基础和地基土相应节点耦合,阻尼比  $\zeta_i=\zeta_r=0.03$ 。把基底和地基土固定,上部木结构—地基土有限元模型如图 1 所示<sup>[3]</sup>。

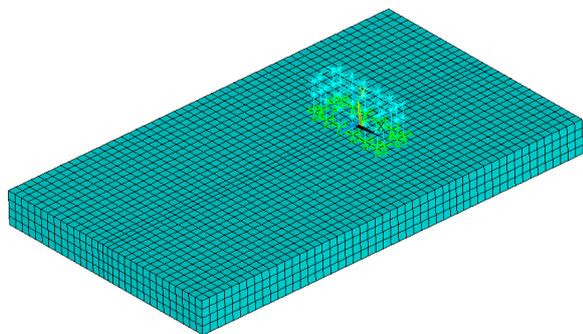


图 1 上部木结构—地基土有限元模型

## 3 地面交通荷载模拟

天水市区公交车较多,载重量较大,对总重量小于 30kN 的轻小型客、货车辆及摩托车忽略不计,选取有代表性公交车模拟地面车辆荷载<sup>[4]</sup>,  $V=40 \text{ km/h}$  时,  $F(t)=35000+8.64 \sin(6t)$ 。

分析 40km/h 四线行驶对北宅子中院主厅楼木结构的影响,在有限元模型的车道单元节点处施加竖向车辆荷载来模拟地面交通荷载。拾振点 1、2、3、4 分别设置在木结构一层角柱、中柱顶点,5、6、7、8 分别设置在二层角柱、中

柱顶点,如图 2 所示。

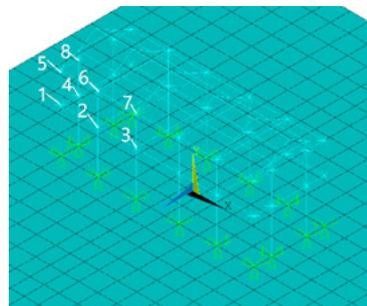


图 2 木结构—地基土有限元模型和拾振点示意图

## 4 地面车辆四线行驶的影响

地面车辆 40km/h 四线行驶时,拾振点 1~8 水平速度幅值如图 3~4 所示。

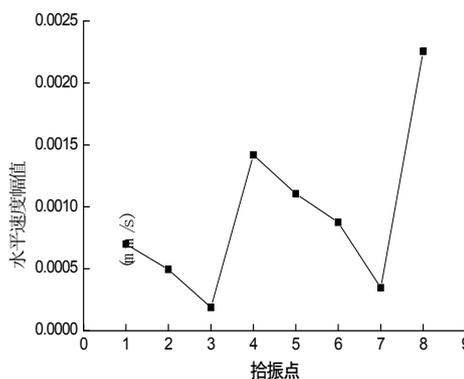


图 3 拾振点 x 方向速度幅值

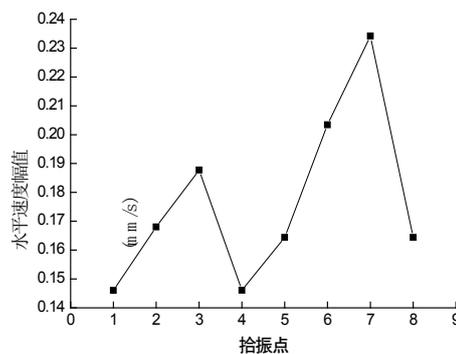


图 4 拾振点 z 方向速度幅值

从图 3~4 看出,一层到二层 X、Z 向水平速度幅值逐步增大,X 向拾振点 8 水平速度幅值最大值 0.0023mm/s,拾振点 3 和 7 水平速度幅值明显减小;Z 向拾振点 4 和 8 水平速度幅值明显减小,拾振点 7 水平速度最大值 0.234mm/s,因此选二层中柱柱顶 7 水平速度幅值作为水平速度响应值;Z 向水平速度幅值远大于 X 向,整体以 Z 向水平振动为主。

地面车辆 40km/h 四线行驶水平方向速度幅值超出全国重点文物保护单位水平振动速度的限值<sup>[5]</sup>,因此应采取隔振减振措施进行保护。

## 5 隔振沟参数的选取

地面车辆 40km/h 四车道行驶，在车道与北宅子主厅楼木结构间设置隔振沟，分析空沟到其的距离、深度、宽度以及在空沟内填充不同材料减振效果的影响。

### 5.1 隔振沟位置对减振效果的影响分析

研究隔振沟位置对减振效果的影响，将其设置距北宅子中院主厅楼木结构外墙 45m、47m、49m 处，沟宽取 2m，沟深取 4m 进行动力响应分析。图 5 表示隔振沟处于不同位置各拾振点的水平振动速度幅值曲线。

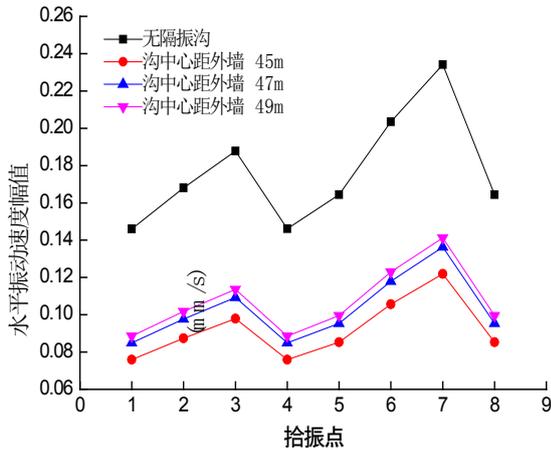


图 5 各拾振点水平振动速度幅值

由图 5 可知，不同工况各拾振点水平速度幅值均比无隔振沟时小得多，在距木结构外墙 45m 时，各拾振点在水平方向振动速度峰值最小。说明距木结构外墙 45m 处设置隔振沟减振效果最佳，因此将隔振沟设置在木结构外墙 45m 处。

### 5.2 隔振沟深度对减振效果的影响分析

为研究隔振沟深度对减振效果的影响，将其设置距北宅子中院主厅楼木结构外墙 45m 处，沟宽取 1m，沟深取 2m、4m、6m 进行动力响应分析；图 6 表示隔振沟在不同深度各拾振点的水平振动速度幅值曲线。

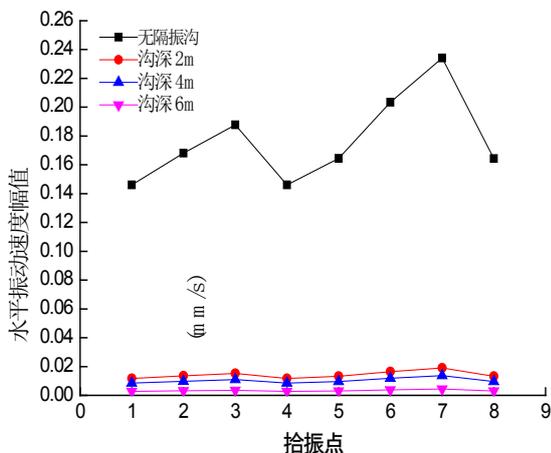


图 6 各拾振点水平振动速度幅值

由图 6 看出，隔振沟深度对减振效果显著，不同工况各拾振点水平振动速度幅值均比无隔振沟时小得多，各拾振点水平速度随沟深度增大而减小。当沟深 6m，各拾振点减振效果最显著，因此隔振沟设置在距木结构外墙 45m 处，宽度取 1m，深度取 6m 最优。

### 5.3 隔振沟宽度对减振效果的影响分析

为研究隔振沟宽度对减振效果的影响，将其设置距北宅子中院主厅楼木结构外墙 45m 处，沟深 6m，宽度分别为 1m、2m、3m、4m、5m 进行动力响应分析。图 7 表示不同宽度时各拾振点的水平振动速度幅值曲线。

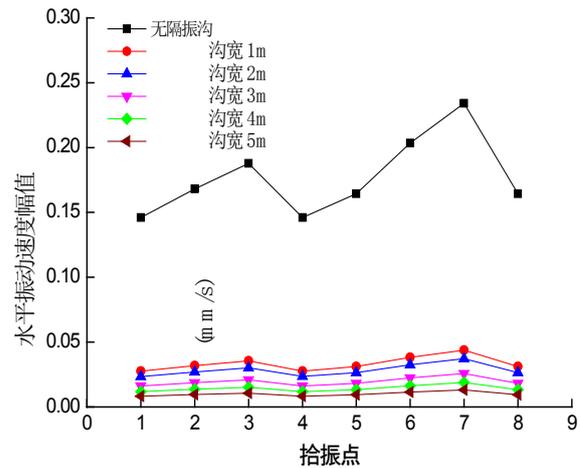


图 7 各拾振点水平振动速度幅值

由图 7 得出，隔振沟的宽度对减隔振效果明显，不同工况各拾振点的水平速度幅值均比无隔振沟时小得多，各拾振点水平振动速度随着沟宽度增大而减小，但减小幅度较小，沟宽 5m 水平速度幅值最小。考虑沟宽 5m，施工工作面过宽，综合考虑隔振沟位置、深度、宽度对减隔振效果的影响，建议隔振沟深度取 6m，宽度取 2m，设置于距北宅子中院主厅楼木结构外墙 45m 处，减振效果最显著。

### 5.4 隔振沟填充材料对减振效果的影响分析

距北宅子中院的主厅楼木结构外墙 45m 处，设置 6m 深、2m 宽隔振沟，将不同填充材料填充空沟内，分析填充材料对减振效果的影响。填充材料参数见表 2，图 8 表示不同填充材料各拾振点水平振动速度幅值。

表 2 填充材料参数

填充材料	弹性模量 /Pa	泊松比 $\nu$	密度 /( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
混凝土	$3.5 \times 10^{10}$	0.2	2200
木材	$1.1 \times 10^{10}$	0.28	700
橡胶	1100	0.42	1950
砂子	$7.5 \times 10^7$	0.35	2040
泡沫塑料	120	0.46	1920