

交通激励下天水古木结构的动力响应及安全评估

王鑫¹ 孟昭博²

1 天水师范学院土木工程学院 2 聊城大学建筑工程学院

DOI:10.12238/bd.v6i5.3964

[摘要] 本文建立了天水北宅子主厅楼木结构和地基的有限元模型,对地面交通车辆20km/h和40km/h四线行驶下进行了瞬态分析,得到不同拾振点的振动速度幅值进行动力响应及安全评估研究。研究表明:从一层到二层竖向和水平振动速度幅值逐步增大,同一层中间柱比角柱水平振动速度幅值要大,整体上以Z方向水平振动和竖向振动为主;地面车辆四线行驶时,北宅子主厅楼木结构处于安全状态,该研究成果为天水古木结构的维护和管理提供依据。

[关键词] 交通激励; 古木结构; 动力响应; 安全评估

中图分类号: TU366.2 文献标识码: A

Dynamic response and safety assessment of ancient wood structures in Tianshui under traffic incentives

Xin Wang¹ Zhaobo Meng²

1 School of Civil Engineering, Tianshui Normal University

2 School of Architecture & Civil Engineering, Liaocheng University

[Abstract] Three-dimensional finite element model of the wood structure foundation of the North House's main hall in Tianshui was established, and the transient analysis was carried out on the ground vehicle of four lanes at 20 km/h and 40 km/h, and the vibration velocity amplitudes of different vibration pickup points were obtained for dynamic response and safety evaluation. The research shows that the vertical and horizontal vibration velocity amplitudes gradually increase from the first floor to the second floor. The amplitude of the horizontal vibration velocity of the central column on the same floor is larger than that of the corner column. As a whole, the horizontal and vertical vibration in the Z direction are dominant. When the ground vehicles are in four lanes, the wood structure of the North House's main hall is safe. The research results provide the basis for the maintenance and management of ancient wood structures in Tianshui.

[Key words] traffic incentives; ancient wood structures; dynamic response; safety assessment

引言

世界文化遗产基金会公布2006年世界百大濒临危险的文化遗址,天水古民居建筑名列其中^[1]。胡氏古民居为天水市明代民居建筑结构的代表之一,2001年6月25日公布为全国重点文物保护单位。胡氏古民居由南宅子和北宅子构成的,北宅子中院主厅楼设计独特、气势宏伟,是北宅子建筑的核心部分。北宅子中院主厅楼平面是长方形,坐北朝南,面阔五间共20.05米,进深三间共14.41米,至屋脊高11.4米,它是一个重檐二层楼硬山顶的砖木结构形式。它处在水秦州区民主东路位置,距市内交通要道只有20米远,5·12地震木结构受损严重。近几年天水经济迅猛发展,人口不断增长,地面交通流量不断增大,常年持续的地面交通振动使木结构疲劳损伤、榫卯松动、结构变形,安全和寿命受到严重威胁,急需进行交通激

励下的动力响应及安全评估研究^[2]。

1 国内外研究现状

交通振动对古建筑的影响受到国内外学者的高度关注,开展大量研究工作,取得相关研究成果。

在国内,赵均海研究节点特性及半刚性节点单元,建立古建筑木结构的有限元计算模型和分析方法^[3];赵鸿铁对古建筑木结构典型榫卯连接模型低周反复荷载试验,研究榫卯连接的半刚性特性及刚度退化规律^[4];谢启芳对缩尺比例1:6西安钟楼简化模型进行地震模拟振动台试验,得到结构动力特性及变化规律^[5]。

在国外,英国运输与道路研究室对地面交通激励的环境影响进行大量研究;Watts对四种不同历史建筑进行现场监测,得出建筑物基础的竖向振动速度峰值公式^[6]。Lombaert, G. 和

Degrade, G. 研究了地面交通振动和轨道交通振动对环境影响, 得出地面和自由场任一点之间的振动传递函数, 计算地面交通激励的自由场地震动^[7]。

综上所述, 国内外许多学者对古建筑木结构的研究主要集中在振动对建筑物内部的人和精密仪器的影响方面, 但是交通振动在古建筑的影响方面和安全评估的研究较少。

2 北宅子中院主厅楼木结构有限元模型的建立

(1) 课题组现场实测了北宅子中院主厅楼木结构的建筑尺寸。由于其建造年代久远, 目前还没有相关实测材性指标, 参照文献^[8]、^[9]的材料参数见表1。

表1 木材和土体材料参数

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

(2) Beam188模拟木梁和木柱构件, 大屋盖用Mass21来模拟, Combin14模拟梁柱半刚性榫卯连接, 弹簧刚度系数取 $k_x=1.26 \times 10^9 \text{KN/m}$, $k_y=k_z=1.41 \times 10^9 \text{KN/m}$, $k_{\theta_x}=k_{\theta_y}=k_{\theta_z}=1.5 \times 10^{10} \text{KN} \cdot \text{m/rad}$ ^[10]。

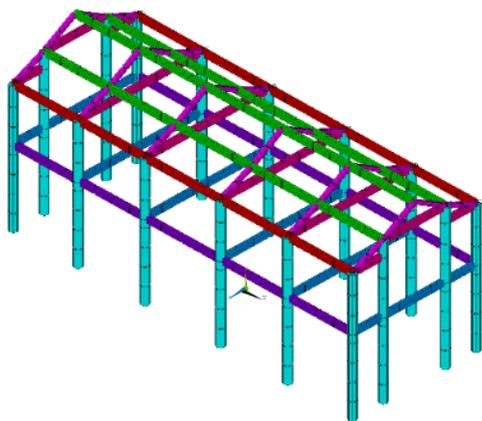


图1 北宅子主厅楼木结构有限元模型

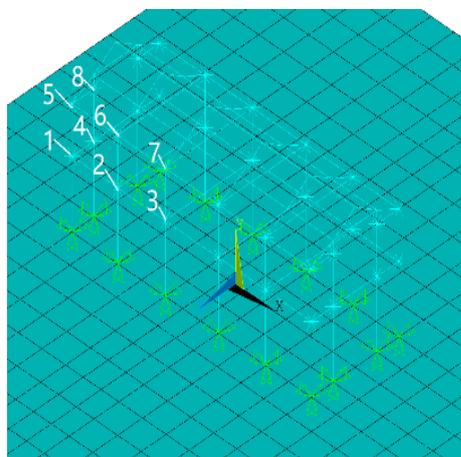


图2 木结构-地基土有限元模型和拾振点示意图

(3) 采用面积等效方式将屋面荷载集中在其相应的柱端, 得

到屋面荷载 $G=1.925 \text{kN/m}^2$ ^[11]。

(4) 地基土长度取67.02m, 宽度取39.25m, 深度取8m^[12]。地基土用Solid45单元来模拟, 其单元长度取2m, 柱础和地基土体对应节点耦合处理, 体系阻尼比取 $\xi_i = \xi_j = 0.03$ ^[13]。

基底和地基四周土体固定约束, 地面不做约束, 建立北宅子主厅楼木结构、木结构-地基土体的有限元模型^[2], 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, 见图1、2所示。

3 北宅子主厅楼木结构的动力响应

3.1 车辆荷载的模拟

天水市内公交车较多, 载重量也较大, 根据对路面疲劳损伤影响的大小, 对总重小于30kN的轻小型客、货车辆以及摩托车忽略不计, 选择了代表性的公交车模拟地面车辆荷载^[14]。

$$V=20 \text{km/h时}^{[15]}, F(t)=35000+2.16 \sin(3t)$$

$$V=40 \text{km/h时}^{[15]}, F(t)=35000+8.64 \sin(6t)$$

选择车辆以20km/h、40km/h四线行驶对北宅子中院主厅楼木结构的影响, 用在有限元模型的车道单元节点上施加竖向的车辆荷载来模拟地面交通。

3.2 地面交通车辆四线行驶的影响

地面车辆20km/h四线行驶时, 拾振点1~8的竖向速度和水平速度幅值如图3~5所示。

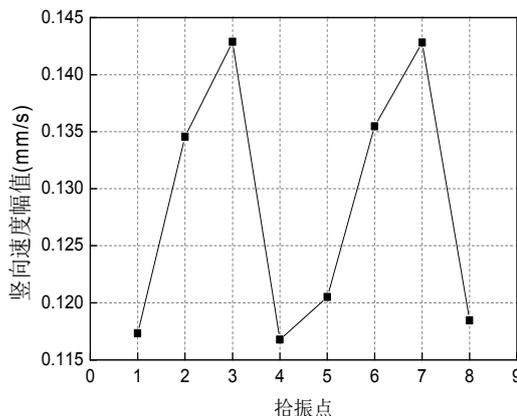


图3 拾振点竖向速度幅值

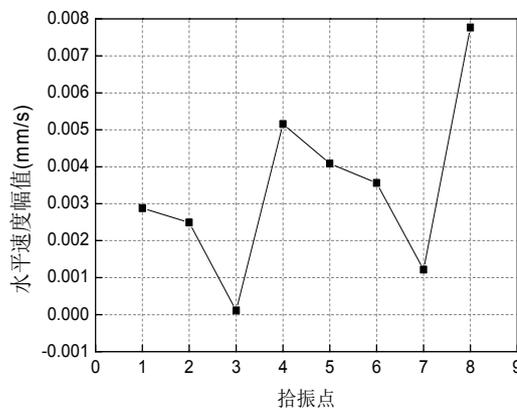


图4 拾振点x方向速度幅值

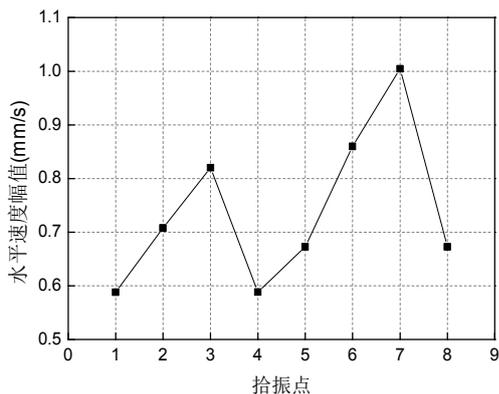


图5 拾振点z方向速度幅值

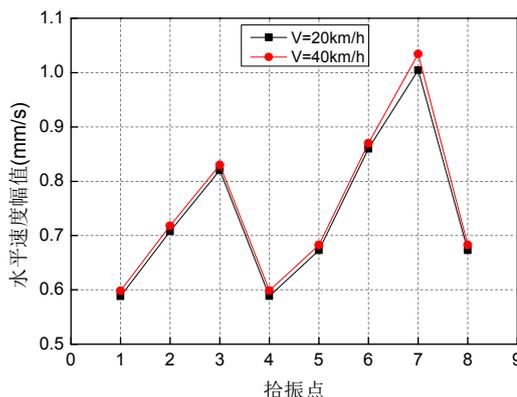


图8 拾振点z方向速度幅值

从图3~5看出,地面车辆四线行驶时,从一层到二层竖向振动速度幅值逐步增大,拾振点7处达到最大值0.1428mm/s,处于木结构侧向一二层柱顶的4和8竖向速度幅值明显减小;从一层到二层X方向和Z方向水平振动速度幅值逐步增大,X方向拾振点8水平振动速度幅值达到最大值0.0078mm/s,拾振点3和7水平速度幅值明显减小;Z方向拾振点4和8水平速度幅值明显减小,拾振点7处水平速度达到最大值1.0044mm/s,因此选择二层中柱柱顶7的水平方向速度幅值作为水平方向速度的响应值;同一层的中间柱比角柱的水平方向速度幅值要大,拾振点4和8水平速度幅值明显减小,水平速度幅值在Z方向最大,次之是竖向速度幅值,X方向水平速度幅值最小,因此整体上以Z方向水平振动和竖向振动为主。

3.3 地面车辆行驶速度的影响分析

地面车辆20km/h和40km/h四线行驶,拾振点1~8的竖向速度和水平速度幅值如图6~8所示。

从图6~8看出,地面车辆行驶速度增加,水平和竖向速度幅值均在增大,表明车辆行驶速度越大对北宅子主厅楼木结构的交通振动响应越大。

2009年1月1日颁布中华人民共和国国家标准GB/T50452-2008,对古建筑木结构的容许振动速度见表2所示^[16]:

表2 古建筑木结构的容许振动速度[v] (mm/s)^[16]

保护级别	控制点位置	控制点的方向	顺木纹 V_p (m/s)		
			<4600	4600~5600	>5600
全国重点文物保护单位	顶层柱顶	水平	0.18	0.18~0.22	0.22
省级文物保护单位	顶层柱顶	水平	0.25	0.25~0.30	0.30
市、县级文物保护单位	顶层柱顶	水平	0.29	0.29~0.35	0.35

注: V_p 在4600~5600m/s之间, [v]采用插入法取值。

由表2看出,地面车辆20km/h和40km/h四线行驶,水平方向速度幅值均超出了国标GB/T 50452-2008对于古建筑保护的限值要求。

采用瑞士SN640312建筑物安全振动控制标准,见表3所示^[8]。

表3 SN640312建筑物安全振动控制标准^[8]

建筑物分类	振源分类	频率 Hz	PPV(mm/s)
对振动敏感的建筑	机械振动	10~30	3
		30~60	3~5
	爆炸	10~60	8
		60~90	8~12

由表3看出,地面车辆20km/h和40km/h四线行驶,北宅子主厅楼木结构都处于安全状态。

4 结语

本文建立北宅子主厅楼木结构-地基的三维有限元模型,对地面车辆20km/h和40km/h四线行驶进行瞬态分析,得到不同拾振点的振动速度幅值进行动力响应及安全评估研究,得出结论:

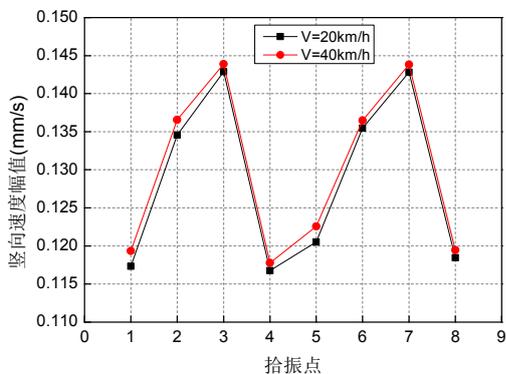


图6 拾振点竖向速度幅值

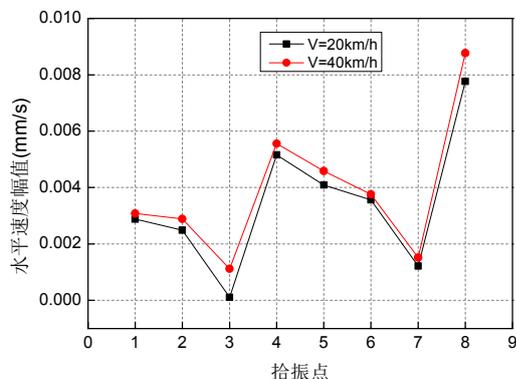


图7 拾振点x方向速度幅值

(1) 从一层到二层竖向及水平速度幅值逐步增大,拾振点7处水平速度达到最大值,选择二层中柱柱顶7的水平方向速度幅值为水平方向速度的响应值;同一层的中间柱比角柱的水平方向速度幅值大,整体上以Z方向水平振动和竖向振动为主。

(2) 地面车辆四线行驶时,北宅子主厅楼木结构都处于安全状态。

[基金项目]

国家自然科学基金项目(52068063);甘肃省科技计划项目(21JR1RE286);甘肃省高等学校创新基金项目(2020B-173);山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME240);麦积山石窟艺术研究项目(MJS2021-06);伏羲科研创新团队项目(FXD2020-13)。

[参考文献]

[1]孙婷.关于天水古民居现状与保护的思考[J].现代城市研究,2008,(11):20-25.

[2]王鑫,杨帆,吕向明.基于小波包能量谱天水古民居木结构的损伤识别[J].天水师范学院学报,2020,40(5):91-95.

[3]赵均海,俞茂宏,高大峰,等.中国古代木结构的弹塑性有限元分析[J].西安建筑科技大学学报,1999,31(2):131-133.

[4]赵鸿铁,董春盈,薛建阳,等.古建筑木结构透榫节点特性试验分析[J].西安建筑科技大学学报,2010,42(3):315-318.

[5]谢启芳,王龙,张利朋,等.西安钟楼木结构模型振动台试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(12):128-138.

[6]Watts, G.R., & Krylov, V.V. Ground-borne vibration generated by vehicles crossing road humps and speed control cushions[J].Applied Acoustic,2000,59(3):221-236.

[7]Lombaert, G., and Degrande, G. Experimental validation of a numerical pre-diction model for free field traffic induced vibrations[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001,21(6):485-497.

[8]孟昭博.西安钟楼的交通振动响应分析及评估[D].西安:西安建筑科技大学,2009.

[9]西安钟楼工程地质勘察报告[R].西安:机械工业勘察设计研究院,1985.

[10]方东平,俞茂宏,官本裕,等.木结构古建筑结构特性的计算研究[J].工程力学,2001,18(1):137-144.

[11]高大峰,祝松涛,丁新建.西安永宁门箭楼结构及抗震性能分析[J].山东大学学报(工学版),2013,43(2):62-69.

[12]仇敏玉,俞亚南.道路行车荷载影响深度分析[J].岩土力学,2010,31(6):1822-1826.

[13]袁晓铭,孙锐,孙静,等.常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J].地震工程与工程振动,2000,20(4):133-139.

[14]童乐为,沈祖炎,陈忠延.城市道路桥梁的疲劳荷载谱[J].土木工程学报,1997,30(5):20-27.

[15]梁志闯.交通随机荷载作用下西安城墙结构动力响应分析[D].西安:西安建筑科技大学,2013.

[16]中华人民共和国国家标准.古建筑防工业振动技术规范(GB/T50452-2008)[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.

作者简介:

王鑫(1971--),女,汉族,陕西西安人,博士,副教授,研究方向:结构健康监测。