

探讨木结构古建筑结构模型固有频率的 几种计算方法

赵鸿铁^{1,2}, 张凤亮¹, 薛建阳^{1,2}, 隋 龔¹, 张锡成¹, 马 辉¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘 要:结构的固有频率是研究结构动力性能的最基本参数. 采用激振锤人工敲击法和有限元软件模态分析法计算出木结构古建筑结构模型的固有频率, 并将二者所得结果进行比较; 同时, 根据振动台试验, 提出了一种计算木结构古建筑固有频率的新方法—振动台试验法, 给出了计算简图并提出了此方法在实际试验中可能会遇到的几个问题. 通过研究表明: 人工敲击法测得振动台试验模型震前的固有频率为 2.05 Hz, 比地震最大加速度为 100 gal 震后的固有频率(2.1 Hz)略小; ansys 有限元软件模态分析的结构一阶固有频率为 2.226 Hz, 稍微高于激振锤人工敲击法测得结果; 由于木结构古建筑构件之间的连续性和互相约束性能较差以及谱曲线放大以后, 肉眼读取的数据结果存在一定的误差, 可能会导致振动台试验法无法准确的计算出结构固有频率. 为木结构古建筑的研究和修缮加固提供参考依据.

关键词:固有频率; 木结构; 古建筑; 振动台试验; 有限元模型

中图分类号: TU366; TU311.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)02-0159-05

中国古建筑木结构向来以抗震性能好而著称: 半刚性榫卯节点的耗能减震、柱础的摩擦耗能减震、铺作层的滑移隔震等机理^[1-3], 在国内外古建筑研究领域已基本认同, 但是作为研究结构动力性能的最基本参数—结构固有频率, 它的计算方法比较少且互相之间有差异. 因此, 根据本课题组进行的古建筑木构架振动台试验及数值理论分析, 分别采用有限元模态分析法和激振锤人工敲击法得出了木结构古建筑的结构固有频率, 并将两种方法所得结果进行比照. 同时, 根据振动台试验^[4], 提出了另外一种计算古建筑结构模型固有频率的新方法—振动台试验法, 并列出了此方法在实际试验中可能会遇到的问题, 为研究古建筑木结构的动力抗震性能提供理论依据和科学论证.

1 模型的建立

1.1 振动台试验模型的建立

试验模型材料采用俄罗斯进口红松, 柱础石采用青石板, 为了准确直观的记录和测量柱底发生的位移, 在板上面画上不同半径的圆, 并用螺栓将其固定于振动台台面上, 构架模型直接平摆浮搁在础石上. 梁柱节点连接方式为燕尾榫连接, 梁枋上面铺设普拍枋, 与柱架之间的连接方式为柱头榫连接. 料拱搁置在普拍枋与柱架之上, 通过柱头的馒头榫彼此连接. 按照《营造法式》^[5]材份制度构造要求, 制作缩尺比例为 1 : 3.52 的模型(如图 1 所示). 屋盖采用钢筋混凝土板来代替, 厚度为 250 mm, 尺寸为 2 m × 2.2 m, 配重为 14 kN/m²^[4].

1.2 有限元模型的建立

参照殿堂式古建筑木结构振动台试验模型的有关尺寸及设置(见图 1), 建立有限元模型如图 2 所示. Ansys 有限元模型梁柱单元采用 Beam189 单元, 屋面混凝土配重采用 Shell181 单元, 梁柱间榫卯和斗拱连接采用横向 Combin39+Combin14 组合单元及竖向 Combin14 单元, 考虑到柱与础石间的滑移

收稿日期: 2011-11-24 修改稿日期: 2011-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59878043, 51108373); 国家文物局文物保护科学和技术研究课题(20110123); 陕西省教育厅科研计划项目(11JK0939)

作者简介: 赵鸿铁(1939-), 男, 江苏常州人, 教授, 博导, 从事钢与混凝土组合结构、钢筋混凝土结构、古建筑及其抗震性能研究.

隔震特性,柱根采用 Combin40 滑移弹簧单元. 模型阻尼比 $\xi=0.029^{[4]}$, 弹簧单元刚度参考文献[6]取为: $k_x=1.113 \times 10^5 \text{ N/m}$, $k_y=k_z=1.27 \times 10^8 \text{ N/m}$, $k_{xy}=k_{xz}=k_{yz}=2.967 \text{ 11} \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$.

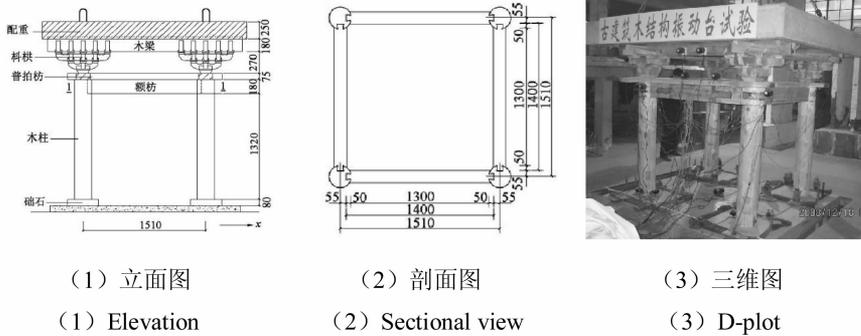


图 1 振动台试验模型
Fig. 1 Shaking table test model



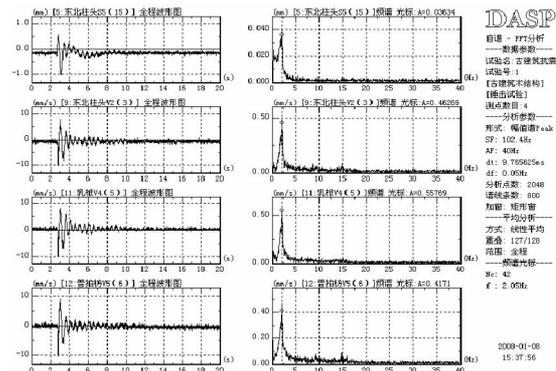
图 2 有限元模型
Fig. 2 Finite element model

2 激振锤人工敲击法

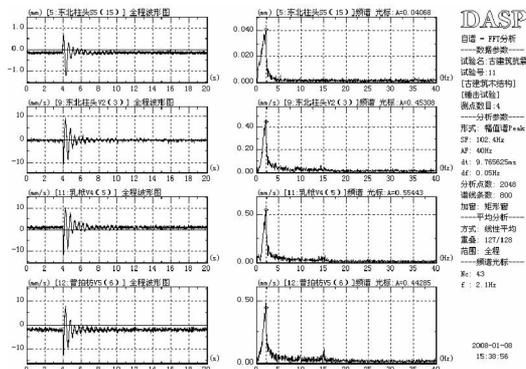
所谓激振锤人工敲击法(如图 3 所示)是指在振动台试验在震前或者是施加某一地震波振动完毕后,人持激振锤按照“快击快移”的原则,通过结构模型上面的拾振器以及传感器获取结构的自振特性数据,并通过 DASP 自谱分析得出结构的固有频率的方法. 图 4(a)–(g)分别是振动台试验模型在震前、施加地震加速度为 100 gal、200 gal、300 gal、600 gal、800 gal、1200 gal 后的人工敲击通过 DASP 自谱分析所得固有频率图.



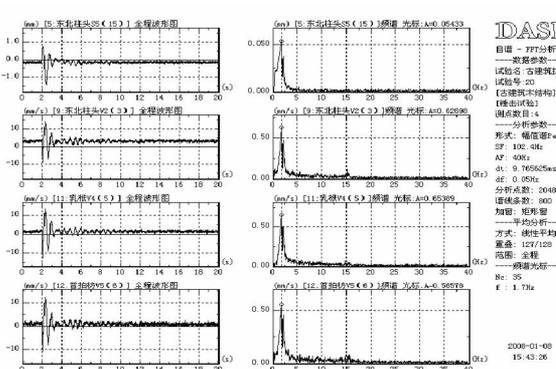
图 3 激振锤人工敲击试验
Fig. 3 Test of hammering



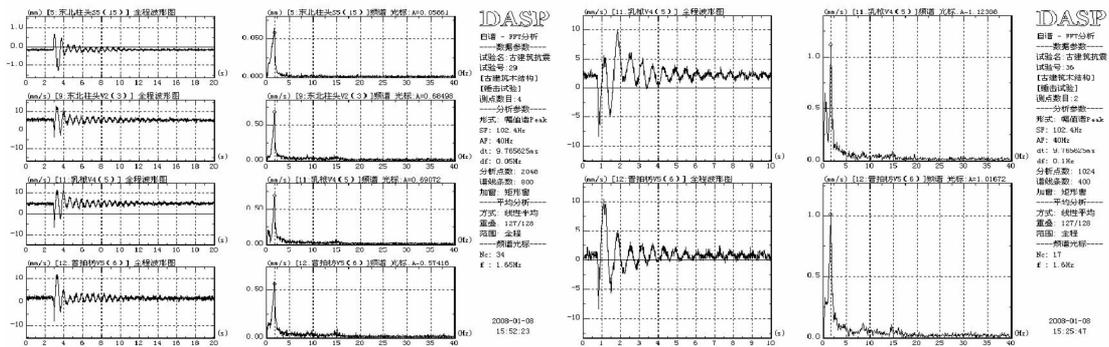
(a) Map of spectrum method before earthquake



(b) Map of spectrum method after 100 gal

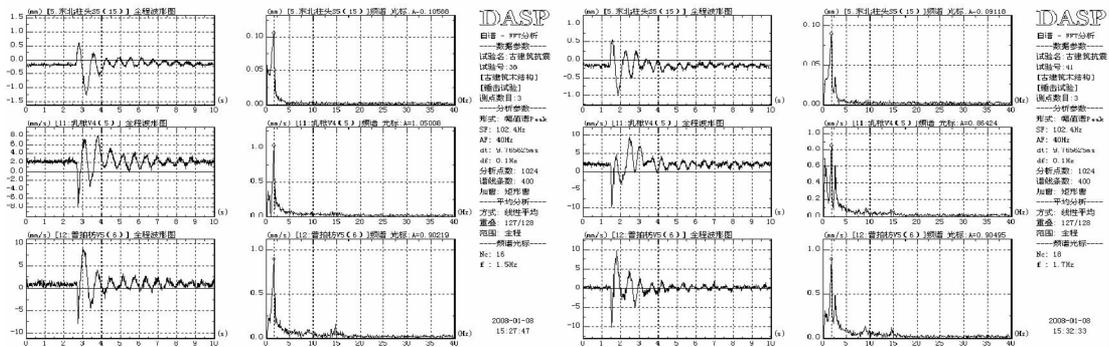


(c) Map of spectrum method after 200 gal



(d) Map of spectrum method after 300 gal

(e) Map of spectrum method after 600 gal



(f) Map of spectrum method after 800 gal

(g) Map of spectrum method after 1200 gal

图 4 激振锤人工敲击法 DASP 自谱分析各工况下模型的固有频率

Fig. 4 The nature frequency under various working conditions got by DASP

振动台模型在各工况作用后的固有频率 f 以及固有周期 T 如表 1 所示。

表 1 各工况后模型的固有频率 f 及固有周期 T

Tab. 1 The nature frequency f model and nature period T after various working condition

工况	震前	100 gal 后	200 gal 后	300 gal 后	600 gal 后	800 gal 后	1 200 gal 后
f/Hz	2.05	2.1	1.7	1.65	1.6	1.5	1.7
T/s	0.49	0.48	0.59	0.61	0.63	0.67	0.59

由表 1 可以看出振动台试验模型震前的固有频率为 2.05 Hz,比施加地震最大加速度为 100 gal 震后的固有频率(2.1 Hz)略小,且随着地震作用的增强频率越来越小,这是因为结构模型在经过小震之后各榫卯节点被慢慢挤紧,模型的节点刚度和整体刚度都变大,从而使得小震后固有频率得到提高,但随着地震激励的增大,由于节点刚度的逐渐退化以及构件的损伤积累,使得结构的固有频率呈现越来越小的趋势。

3 有限元软件模态分析法

有限元模态分析法是指采用有限元软件建立古建筑木构架模型并对整个结构进行模态动力分析,采用子空间迭代法得出结构模型各阶频率值。本模型提取结构前三阶振型图以及前 7 阶频率图 5 和如表 2 所示。

由表 2 可以看出,经 Ansys 有限元软件模态分析的结构一阶固有频率为 2.226 Hz,前两阶振型以平动为主,第三阶振型出现轻微扭转,这与振动台试验结果基本一致。

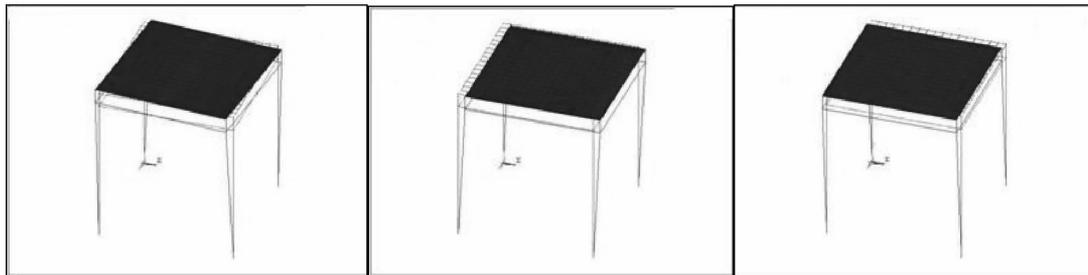


图5 模型结构前3阶振型图

Fig. 5 The first three modes' figure of the modal structure

表2 有限元模型结构的频率和周期

Tab. 2 The frequency and cycle of the finite element model

振型	1	2	3	4	5	6	7
f/Hz	2.226	2.238	2.263	2.316	2.369	2.527	2.619
T/s	0.449	0.447	0.442	0.432	0.422	0.396	0.382

4 两种方法的结果比照

振动台试验中由激振锤人工敲击法测得模型结构主频率为 2.05 Hz,而有限元模态分析所得一阶固有频率为 2.226 Hz,前 7 阶频率主要分布在 2.226~2.619 Hz.有限元模态分析方法所得结果稍微高于激振锤人工敲击法测得结果,分析其原因主要有以下几点:

(a)激振锤人工敲击法受人为因素影响比较大,“快击快移”的敲击原则很难定量“快”的速度到底有多大,一般情况下,敲击试验至少进行三次,然后取平均值来减小误差.

(b)激振锤人工敲击法受外界环境影响比较大,振动台试验处于试验室大环境中,本身采集的地震波数据就有许多杂波,再加上试验时周围的声波、走动引起的地面波以及试验室其它施工或试验产生的干扰波,各种杂波使得试验模型的频率产生一定幅度的降低.

(c)木材的各项性能受环境影响较大,模型材料的实际属性(阻尼比、密度、弹性模量、强度等)可能比试验采用值有一定程度的降低,导致模型的频率降低.

(d)所建立的有限元模型可以看成是“理想化”模型,一方面有限元模型的榫卯节点采用弹簧单元模拟,并在一开始就赋予其一定的刚度值,而试验模型只有在小震发生节点咬紧之后才会有比较理想的刚度值;另一方面,试验模型中额枋施有普柏枋以坐斗拱,而有限元模型中只以一根横梁替代;有限元模型的柱础与地面采用弹簧单元,而试验模型采用平摆浮搁方式.

5 振动台试验法

鉴于以上两种方法都有各自的缺陷或者存在一定的误差,结合振动台试验以及实际情况,大胆地提出了另外一种计算古建筑木结构模型固有频率的方法—振动台试验法.此方法有待于验证,现将此方法以及试验中可能存在的问题列举如下:

所谓振动台试验法就是指试验模型在施加某一段地震波结束后,由于惯性作用,此时模型将继续运动,此时因为外界其它波(声波、人走动产生的地面波、试验室其它施工引起的干扰波等等)的干扰,试验模型会做有阻尼自由振动,可以顺势采集下结构模型开始作自由振动时的响应数据,通过各类谱曲线(加速度、速度、位移等)都能读出该模型的自振周期,从而获得结构的固有频率,计算简图如图 6 所示.

在试验过程中可能会存在以下两个难点:由于木结构古建筑构件之间的连续性和互相约束性能较差,使得结构模型的无阻尼自由振动持续时间特别短,甚至是加载完毕立刻停止,难以采集到合适的的数据;谱曲线放大以后,肉眼读取的数据结果可能会存在一定的误差.

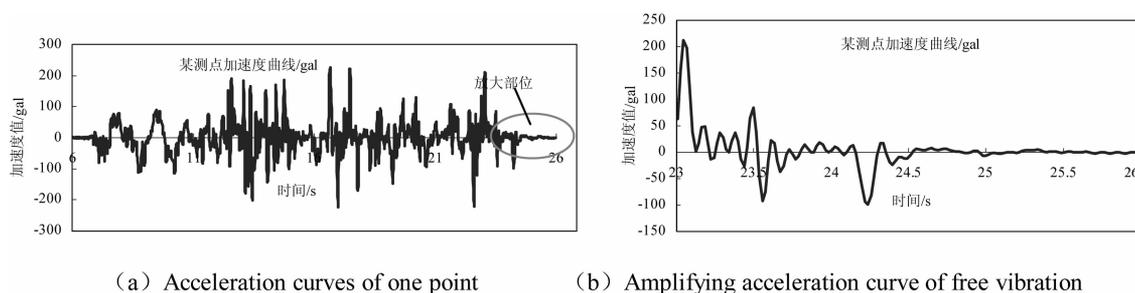


图6 振动台试验法固有频率计算简图

Fig. 6 Nature frequency calculation diagram of shaking table test method

6 结 论

(1)人工敲击法测得振动台试验模型震前的固有频率为 2.05 Hz,比施加地震最大加速度为 100 gal 震后的固有频率(2.1 Hz)略小。

(2)Ansys 有限元软件模态分析法所得结构一阶固有频率为 2.226 Hz。

(3)两种方法所得结果出现差异的原因是:由于人工敲击法“快击快移”的敲击速度很难定量,且受外界杂波影响和木材性能降低使得频率降低,而有限元模型太“理想化”使得模态分析法频率增大。

(4)提出了一种计算木结构古建筑固有频率的新方法—振动台试验法,并给出了计算简图及试验中可能遇到的问题:由于木结构古建筑构件之间的连续性和互相约束性能较差以及谱曲线放大以后,肉眼读取的数据结果存在一定的误差,可能会导致振动台试验法无法准确的计算出结构固有频率。

参考文献 References

- [1] 赵鸿铁,张锡成,薛建阳,等. 中国木结构古建筑的概念设计思想[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2011,43(4):457-463.
ZHAO Hong-tie, ZHANG Xi-cheng, XUE Jian-yang, et al. Conceptual design thoughts of Chinese ancient timber buildings[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2011,43(4):457-463.
- [2] HIDEAKI T, YOSHIYUKI S. Elasto-plastic pasternak model simulation of static and dynamic loading tests of traditional wooden frames[C]. World Conference on Timber Engineering-WCTE 2010, Riva del Garda, Italy, 2010(2); 476-485.
- [3] 姚 侃. 木结构古建筑的结构特性及抗震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2006.
YAO Kan. Study on the structural properties and seismic performance of Chinese historical timber buildings[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture & Technology, 2006.
- [4] 隋 龔. 中国古代木构耗能减震机理与动力特性分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2009.
SUI Yan. Analysis on energy dissipation mechanism and dynamic characteristic for Chinese ancient timber buildings [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture & Technology, 2009.
- [5] 李 诚(宋). 营造法式[M]. 上海:商务印书馆,1954.
LI Jie(Song). Ying-tsaο fa-shih [M]. Shanghai: Commercial Press, 1954.
- [6] 苏 军. 中国木结构古建筑抗震性能的分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.
SU Jun. Study on the seismic performance of ancient Chinese timber structure [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture & Technology, 2008.

(下转第 176 页)

Experimental study of CFT column and truss connections with steel bolt through tubular core and end plate

ZHAO Bao-cheng, ZHU Hao, HE Ruo-quan, GU Qiang

(1. Jiangsu Key Laboratory of Structure Engineering (University of science and Technology of Suzhou), Suzhou 215011, China)

Abstract: In order to study the seismic behavior of CFT column and truss connections with steel bolt through tubular core and end plate, two connections specimen were tested under low reversed cyclic loading. Process of test was introduced and failure pattern, hysteretic behavior, skeleton curves, ductility, strength degeneration, rigidity degeneration and energy-dissipation of connections seismic behavior were all analyzed. The result indicated that steel bolt through tubular core could transmit truss tensile force effectively. hysteresis curves of connections in the shape of "S" can provide well bearing capacity and demonstrate excellent energy-dissipation capacity. During the experiment the connections rigidity degenerate significantly. Increasing the thickness of end plate could enhance the bearing capacity of connections but its ductility became poor. The connections rotation capacity may meet the requirement of the seismic performance.

Key words: concrete-filled tubular steel column; steel bolt through tubular core; end plate; hysteretic behavior; test

Biography: ZHAO Bao-cheng, Associate Professor, Ph. D., Suzhou 215011, P. R. China, Tel:0086-13814896766, E-mail: Zhaobc@mail.usts.edu.cn, zhaobc2000@163.com

(上接第 163 页)

Discussion on the calculation methods of ancient timber structure's nature frequency

ZHAO Hong-tie^{1,2}, ZHANG Feng-liang¹, XUE Jian-yang^{1,2}, SUI Yan¹,
ZHANG Xi-cheng¹, MA Hui¹

(1. Xi'an University of Architecture, & Technology, Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science And Technology In West China (XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: The nature frequency of the structure is the most basic parameter for the research on structural dynamic properties. It mainly adopts method of hammering and modal analysis to calculate the nature frequency of ancient timber structure, and makes comparison between them. Meanwhile, according to shaking table test, it puts forward a new method to calculate the nature frequency—method of shaking table test, gives its calculation model and puts forward a few questions the method may encounter in test. Research shows that the nature frequency got by the method of hammering is 2.05Hz, smaller than that got after earthquake with 100gal; and the nature frequency got by method of modal analysis is 2.226Hz. Such result is a little larger than that got by method of hammering. It may be unable to accurately calculate the nature frequency because the continuity and mutual constraint performance between components are very poor and the error lying in data results from the naked eye. The conclusion and the views reached by this paper can provide a good reference to the research and repair reinforcement of the ancient timber structure.

Key words: nature frequency; timber structure; ancient building; shaking table test; finite element model

Biography: ZHAO Hong-tie, Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel:0086-29-82201243, E-mail:zhaohongtie@hotmail.com