

嵌固墙体对穿斗式木构古建 抗震性能的影响

The Effect on Seismic Resistance of Chuandou Style
Ancient Wooden Building Embedded with Masonry Walls

周 乾

Zhou Qian

故宫博物院
The Palace Museum

Journal of Gugong Studies 2015 Vol. 14

故宫学刊

二〇一五年 总第十四辑

故宫出版社 | The Forbidden City Publishing House

嵌固墙体对穿斗式木构古建抗震性能的影响

The Effect on Seismic Resistance of Chuandou Style Ancient Wooden Building Embedded with Masonry Walls

周 乾

Zhou Qian

内容提要:

为保护古建筑,采取数值模拟方法,以四川广元某穿斗式木结构古建筑为例,研究了嵌固墙体对古建筑木结构抗震性能的影响。采用ANSYS有限元分析程序,建立了该古建筑的2种有限元模型:仅考虑木构架抗震性能;考虑墙体与木构架接触作用后结构整体抗震性能。通过模态分析,获得了两种模型的基频和主振型。通过时程分析,获得了各模型典型节点的位移和加速度响应,讨论了嵌固墙体对结构整体的抗震性能影响。结果表明:未考虑墙体嵌固作用时,结构的基频为 $f=1.38\text{Hz}$,x向振型以第1阶为主,y向振型以第2阶为主;与当考虑嵌固墙体的影响时,结构的基频为 $f=1.59\text{Hz}$,主振型以x向的第一振型为主,且与古建筑实际震害相符。此外,考虑墙体嵌固作用时,地震作用下,木构架表现为更小的位移响应及更大的加速度响应。

关键词:

嵌固墙体 中国古建筑 抗震影响 穿斗式木结构 汶川地震

ABSTRACT:

For protecting ancient buildings, a Chuandou style ancient wooden building in Guangyuan city was taken as an example to adopt numerical simulation method to study the effect on seismic resistance of ancient wooden building embedded with masonry walls. 2 kinds of finite element model of the ancient building are set up by the ANSYS finite element analysis program. One considers the seismic performance of timber frame only. Another considers the entirety structure seismic performance due to the connection of wall and timber frame. Basic frequency and main modes of the structure are obtained from modal analysis. Through the time history analysis, the displacement and acceleration response of typical node in each model are obtained, and then the influence of entirety structure seismic performance by the masonry wall is discussed. Results show that without considering the wall effect, the basic frequency of the structure is 1.38Hz , main mode is mode 1 on X direction and mode 2 on Y direction; And when considering the masonry wall effect, the basic frequency of the structure is 1.59Hz , main mode is mode 1 on X direction, and consistent with the actual damage of ancient building. Additionally under the earthquake situation, wooden framework with masonry wall presents smaller displacement response and greater acceleration response.

KEYWORDS:

embedded wall, Chinese ancient building, seismic resistance, Chuandou style wooden structure, Wechuan earthquake

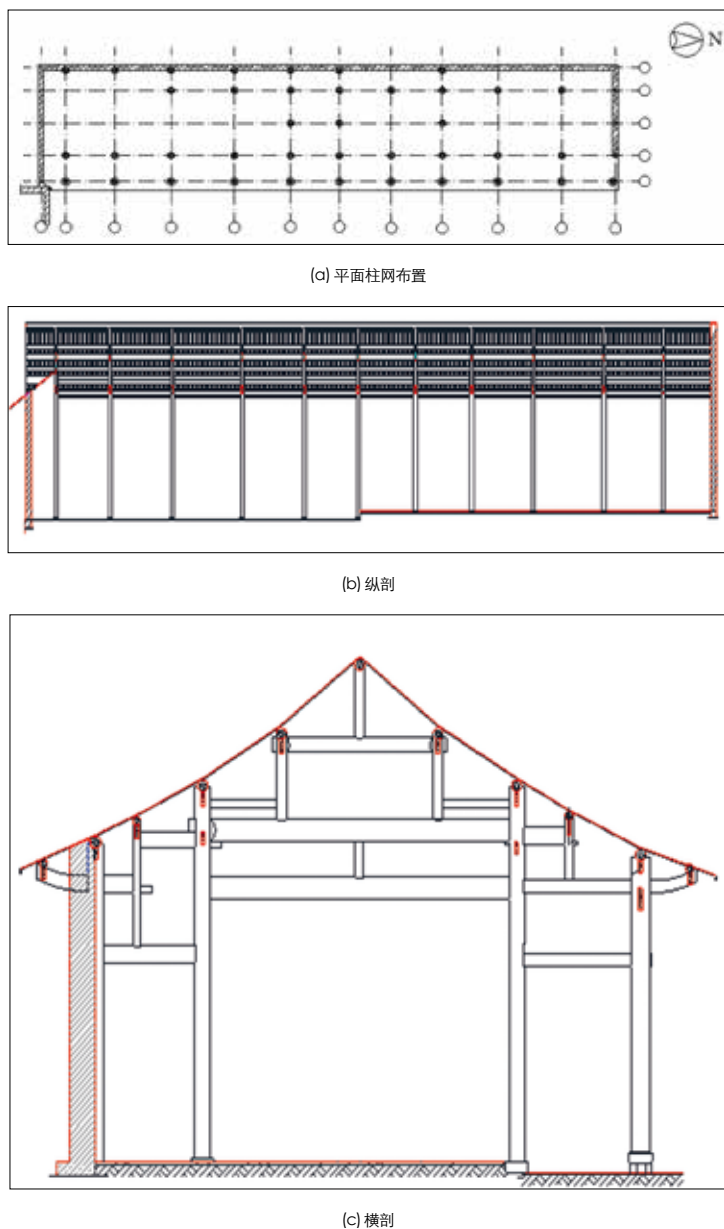


图1 西厢房平、剖面示意图

我国古建筑以木结构为主，具有重要的文化和历史价值，保护意义重大。然而在地震作用下，它们容易产生不同形式的破坏。2008年5月12日下午2点28分，在四川汶川映秀镇发生了里氏8.0级特大地震，震中最大烈度达11度，影响了包括震中50千米范围内的县城和200千米范围内的大中城市，造成了不计其数的人员及财产损失。位于距震中189千米的广元市觉苑寺西厢房，在此次地震中也受到了一定的损伤。该古建筑始建于清代，南北向布置，现存房屋长45米，进深三间8.2米，单檐，其平面、纵剖、横剖〔图1〕。该古建筑属穿斗式木构架，其主要构造特点为¹：柱子布置比较密，沿进深方向各柱随屋顶坡度升高，柱子顶部直接承椽，在柱子之间使用称为“穿”的木条，将其连成房屋的基本单位——“架”，柱枋用料断面较小。此外，该建筑梁与柱采用直榫节点形式连接；后檐及两山砌筑墙体，并将柱子嵌固在墙体内。勘查表明，此次汶川地震对西厢房造成的破坏程度较轻，除了地震烈度较小（震害烈度为7度）的原因外，西厢房本身因为已于2005年进行过修缮加固，因此结构并未出现大的变形或

破坏，主要震害表现为：墙体开裂、屋面瓦块掉落、柱根错位、装修出现裂纹等，如图2所示。由于该古建筑遭受此次地震的震害程度轻，残损点少，大部分为非承重部位，且结构在震后能满足正常使用要求，因此按《古建筑木结构维护与加固技术规范》(GB50165-92)确定其建筑残损等级为Ⅱ类建筑。

关于古建筑的抗震性能，国内外部分学者已开展了理论和试验研究。国内方面，俞茂宏、赵均海等^{2,3}通过模型的动力、静力试验及现场脉动试验，对西安北门箭楼的动力特性、地震荷载作用下的破坏机理及抗震

1 中国文物研究所：《祁英涛古建论文集》，华夏出版社，1992年

2 Fang DP, Iwasaki S, Yu MH. Ancient Chinese timber architecture-I: Experimental study [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 12(11): 1348-1357.

3 Fang DP, Iwasaki S, Yu MH. Ancient Chinese timber architecture-II: Dynamic characteristics [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 12(11): 1358-1364.

性能进行了分析研究;赵鸿铁、薛建阳等^{1、2、3、4、5、6}《营造法式》规定做法,对古建筑榫卯节点、斗拱的力学性能开展了试验研究,将柱架简化为“摇摆柱”,将斗拱铺作层简化为“剪弯杆”,提出了单层殿堂式古建筑木结构的两质点“摇摆-剪弯”动力分析模型;瞿伟廉等⁷研究了历史建筑木结构的剩余寿命预测方法;竺润祥等⁸采用接触问题的相关理论对古建筑木结构直榫节点进行了分析;杨娜等⁹研究了藏式古建筑的力学性能;李世温、李铁英等^{10、11}系统地分析了应县木塔主要残损类型及机理,提出古建筑木结构的双参数地震损坏准则。国外方面, Lee 等¹²采取静载方法,研究了韩国古建筑木结构的抗震性能; Li 等¹³采取振动台试验方法,研究了木结构梁柱体系在地震作用下的抗震性能;楠寿博等¹⁴制作了唐招提寺金堂斗拱的足尺比例模型,进行竖向及水平向的低周反复加载试验,获得了斗拱的力



(a) 柱脚错位



(b) 墙体开裂



(c) 装修开裂



(d) 瓦块掉落

图2 典型震害照片

- 1 张鹏程:《中国古代木构建筑结构及其抗震发展研究》,《西安建筑科技大学学报》,2003年。
- 2 谢启芳、赵鸿铁、薛建阳、姚侃:《隋·中国古建筑木结构榫卯节点加固的试验研究》,《土木工程学报》,2008年。
- 3 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》,《西安建筑科技大学学报》(自然科学版),2010年。
- 4 隋奕、赵鸿铁、薛建阳等:Experimental research on the lateral stiffness of ancient wooden Dougong,《西安建筑科技大学学报》(自然科学版),2009年。
- 5 隋奕、赵鸿铁、薛建阳等:《古代殿堂式木结构建筑模型振动台试验研究》,《建筑结构学报》,2010年。
- 6 薛建阳、张凤亮、赵鸿铁等:《单层殿堂式古建筑木结构动力分析模型》,《建筑结构学报》,2012年。
- 7 李瑜、瞿伟廉、李百浩:《古建筑木构件基于累积损伤的剩余寿命评估》,《武汉理工大徐学报》,2008年。
- 8 竺润祥、董益平、任茶仙:《榫卯连接的古木静力分析》,《工程力学》,2003年。
- 9 Yang N, Li P, Law S S, et al. Experimental research on mechanical properties of timber in ancient Tibetan building. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012.
- 10 李铁英、魏剑伟、张善元、李世温:《应县木塔实体结构的动态特性试验与分析》,《工程力学》,2005年。
- 11 李铁英、秦慧敏:《应县木塔现状结构残损分析及修缮探讨》,《工程力学》,2005年。
- 12 Lee Y W, Hong S G, Bae B S. Experiments and analysis of the traditional wood structural frame [C] // Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing: 2008 (CD-ROM).
- 13 Li M, Lam F, Foschi R O, et al. Seismic performance of post and beam timber buildings I: model development and verification [J]. Journal of Wood Science, 2012, 58(1): 20-30.
- 14 楠寿博、木林長仁、長瀬正等:《唐招提寺金堂斗組の美大構造実験》,《日本建築学会大会学術講演梗概集》C-1分册,东北:日本建筑学会,2000年。

-侧移关系曲线;津和佑子等^{1、2、3}以日本部分木结构古建筑柱头科三踩斗拱为研究对象,通过水平向的静力及动力加载试验,获得了斗拱模型的自振特性及力-侧移恢复力曲线;石丸辰治等⁴对日本传统古建筑的抗震加固进行了研究,提出了在木框架特定部位增加制震壁的方法并论述了其可行性;千葉一樹等⁵采取理论分析方法,研究了日本円覚寺舍利殿的抗震性能;長瀬正等⁶采取微振动试验方法,测量了唐招提寺金堂的自振周期及基频;向坊恭介⁷等采取足尺比例模型振动台试验方法,测试了日本传统木构建筑的动力特性和地震破坏过程;鈴木祥之等^{8、9}对日本的古建筑进行了振动台试验研究,讨论了柱础、斗拱和榫卯节点的抗震性能,获得了它们的恢复力模型。

然而,关于中国古建筑木结构的震害研究,现有的文献主要偏重于文字描述,鲜有具体的数值模拟分析^{10、11};另一方面,现有的古建筑木结构动力分析文献中,一般仅考虑木构架本身,而忽视了墙体嵌固作用的影响,因而与实际结果有一定差距。此外,文献¹²虽然讨论了含嵌固墙体的古建筑木结构的地震响应情况,但嵌固墙体对古建筑结构整体的动力特性及地震响应具体有何影响,原文尚未详细论述。基于此,本文以该古建筑为例,通过模态分析及时程分析研究墙体的嵌固作用对古建筑抗震性能的影响,结果可为古建筑抗震加固提供理论参考。

一 有限元模型

(一) 榫卯节点

本文采用有限元程序 ANSYS 对该古建筑进行震害数值模拟。考虑到榫卯节点具有半刚性性质,因此可利用一根空间二结点虚拟弹簧单元以模拟,此单元是由六根互不耦合的弹簧组成的弹簧系统,如图 3(a) 所示。其中, K_x 、 K_y 、 K_z 表示 x 、 y 、 z 向的变形刚度, K_{α} 、 K_{β} 、 K_{γ} 表示绕 z 、 x 、 y 轴的扭转刚度。在进行有限元分析时,可利用 ANSYS 程序中的 Matrix27 单元模拟榫卯节点。该单元没有定义几何形状,但是可通过两个节点反映单元的刚度矩阵特性,其刚度时矩阵输出格式见图 3(b) 所示。

- 1 津和佑子、藤田香織、金惠園等:《伝統的木造建築の組物の動的載荷試験(その1):微動測定と自由振動試験》,《日本建築学会大会学術講演梗概集》C-1 分册,北海道:日本建築学会,2004 年。
- 2 金惠園、藤田香織、津和佑子等:《伝統的木造建築の組物の動的載荷試験(その2):荷重変形関係と変形の特徴》,《日本建築学会大会学術講演梗概集》C-1 分册,北海道:日本建築学会,2004 年。
- 3 藤田香織、金惠園、津和佑子等:《伝統的木造建築の組物の動的載荷試験(その3):復元力特性と剛性の検討》,《日本建築学会大会学術講演梗概集》C-1 分册,北海道:日本建築学会,2004 年。
- 4 石丸辰治、石垣秀典、吉田明義:《伝統的木造建築物の制震改修について》,《日本建築学会大会学術講演梗概集》,2001 年。
- 5 千葉一樹、藤田香織、栗田哲:《国宝円覚寺舍利殿の構造評価》,《歴史都市防災論文集》,2010 年。
- 6 長瀬正、佐分利和宏、今西良男等:《唐招提寺金堂の常時微動測定》,《日本建築学会大会学術講演梗概集》,日本建築学会,2000 年。
- 7 向坊恭介、大橋好光、清水秀丸等:《伝統的構法による実大木造建物の振動台実験》,《歴史都市防災論文集》,2009 年。
- 8 前野将輝、鈴木祥之、松本慎也:《寺院建築物における伝統木造軸組みの構造力学特性のモデル化による骨組解析》,《京都大学防災研究所年報》,2007 年。
- 9 棚橋秀光、鈴木祥之:《伝統木造軸組の実大静的・動的実験のシミュレーション》,《歴史都市防災論文集》,2010 年。
- 10 杨亚弟、杜景林、李桂荣:《古建筑震害特性分析》,《世界地震工程》,2000 年。
- 11 何玲、潘文、杨正海:《村镇木结构房屋震害及抗震技术措施》,《工程抗震与加固改造》,2006 年。
- 12 周乾、闫维明、纪金豹:《含嵌固墙体古建筑木结构震害数值模拟研究》,《建筑结构》,2010 年。

图 3(b) 中, 对应 x 方向弹簧刚度 K_x 的矩阵元为 C_1 、 C_7 、 C_{58} ; 对应 y 方向弹簧刚度 K_y 的矩阵元为 C_{13} 、 C_{19} 、 C_{64} ; 对应 z 方向弹簧刚度 K_z 的矩阵元为 C_{24} 、 C_{30} 、 C_{69} ; 对应绕 x 轴转动刚度 K_{α} 的矩阵元为 C_{34} 、 C_{40} 、 C_{73} ; 对应绕 y 轴转动刚度 K_{β} 的矩阵元为 C_{43} 、 C_{49} 、 C_{76} ; 对应绕 z 轴转动刚度 K_{γ} 的矩阵元为 C_{51} 、 C_{57} 、 C_{78} 。

由于现有穿斗式木构古建筑榫卯节点刚度参数研究极其有限, 因此作者参考西安交通大学的相关研究成果³, 对本文榫卯节点相关刚度值近似取值如下:

$$K_x=K_y=1.0 \times 10^9 \text{ KN/m}, K_z=2.1 \times 10^8 \text{ KN/m}$$

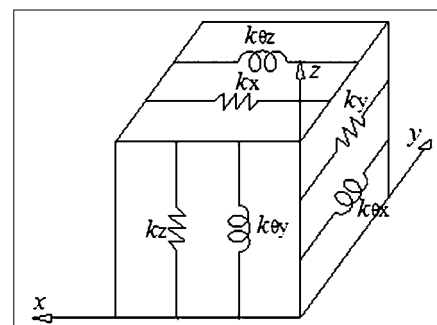
$$K_{\alpha}=5.8 \times 10^{13} \text{ KN} \cdot \text{m}, K_{\beta}=6.3 \times 10^{12} \text{ KN} \cdot \text{m}, K_{\gamma}=3.1 \times 10^{11} \text{ KN} \cdot \text{m}$$

(二) 墙体嵌固模拟

按照古建筑木结构施工工序要求, 立大木在先, 墙体砌筑为后, 而嵌固在梁柱间的墙体对木结构整体抗震性能有一定影响。在使用 ANSYS 程序模拟墙体嵌固作用时, 可采用面接触单元, 建立柱子 - 墙体接触对, 如图 4 所示。其中, 柱子侧面及梁底面为接触单元, 用 CONTA174 单元模拟; 墙体侧面及顶面为目标单元, 用 TARGE170 单元模拟。另关于墙体与柱子的摩擦系数取值, 文献¹采取试验方法, 获得了木材与木材、木材与石材之间的摩擦系数为 0.5 左右。由于本文试验条件有限, 且考虑木柱被包砌在砖石墙体之间, 柱 - 墙体之间存在一定嵌固作用, 这种嵌固作用在地震作用下表现为柱与墙之间的挤压与摩擦。为简化分析, 因此柱与墙体的静摩擦系数取值 0.5。

(三) 有限元模型

根据古建筑施工工艺特点并参考当地管理部门提供的施工图纸, 建模时考虑外檐周圈柱子 1% 侧脚构造, 将柱根外移 0.04 米。为简化计算, 用均匀分布的 Mass21 质点单元模拟屋顶质量。另根据作者在现场的勘查, 该古建筑地基未在地震中受损, 且柱底浮放在柱顶石上, 震后仅个别柱子产生侧移, 这与中国古建筑柱底平摆浮搁, 在中、低震作用下产生转动为主的震害形式基本吻合, 因此考虑柱底约束条件均为铰接。用 Beam189 单元模拟梁、柱, 用 Shell63 单元模拟墙体, 建立西厢房有限元模型如图 5 所示, 含梁、柱单元 2102 个, 榫卯节点单元 84 个, 墙体单元 1580 个, 屋顶质量单元 611 个。



(a) 弹簧单元

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}
C_2	C_{13}	C_{14}	C_{15}	—	—	—	—	—	—	C_{22}	C_{23}
C_3	C_{14}	C_{24}	C_{25}	—	—	—	—	—	—	—	C_{33}
C_4	C_{15}	C_{25}	C_{34}	—	—	—	—	—	—	—	C_{42}
C_5	—	—	—	C_{43}	—	—	—	—	—	—	C_{50}
C_6	—	—	—	—	C_{51}	—	—	—	—	—	C_{57}
C_7	—	—	—	—	—	C_{58}	—	—	—	—	C_{63}
C_8	—	—	—	—	—	—	C_{64}	—	—	—	C_{68}
C_9	—	—	—	—	—	—	—	C_{69}	—	—	C_{72}
C_{10}	—	—	—	—	—	—	—	—	C_{73}	—	C_{75}
C_{11}	C_{22}	—	—	—	—	—	—	—	—	C_{76}	C_{77}
C_{12}	C_{23}	C_{33}	C_{42}	C_{50}	C_{57}	C_{63}	C_{68}	C_{72}	C_{75}	C_{77}	C_{78}

(b) 刚度矩阵

图 3 榫卯节点单元模拟

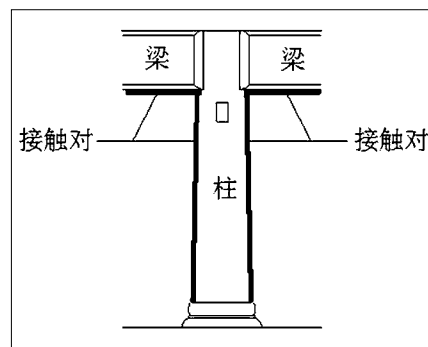


图 4 墙体嵌固模拟

1 王其超:《滑动摩擦系数的确定》,《教学仪器与实验》,1987 年。

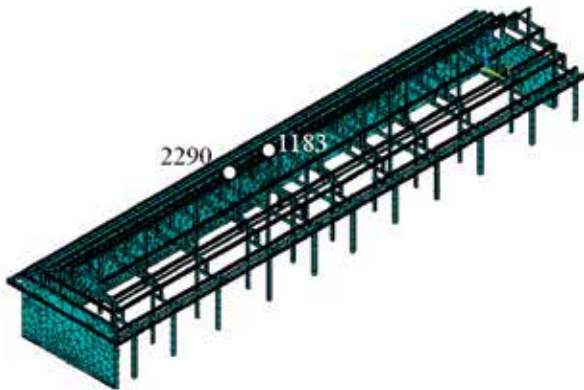
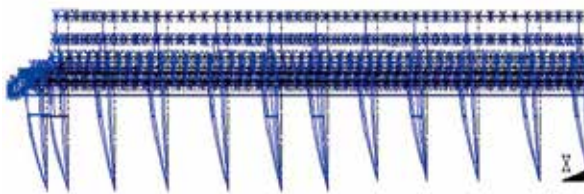
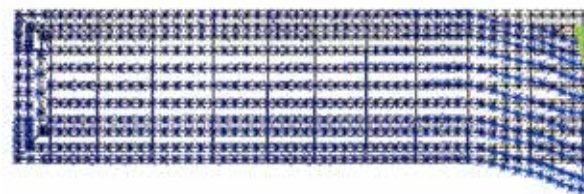


图5 结构有限元模型



(a) 第1振型正立面



(b) 第2振型平面

图6 主要振型图 (仅考虑木构架)



图7 第1振型平面 (考虑木构架与墙体嵌固作用)

二 模态分析

由于该古建筑为木构架承重体系，而两山及后檐均有 40 ~ 50 厘米厚墙体嵌固，为研究墙体嵌固作用对木构架振动的影响，特分析如下两个工况：(1) 仅考虑木构架的振动；(2) 木构架与墙体共同作用时的振动。两种工况的前 10 阶振型频率及质量参与系数见表 1 至 2 所示，主要振型如图 6、图 7 所示。其中，x 代表纵向，y 代表横向，z 代表竖向。

表1 工况1振动分析结果 (不考虑墙体)

阶数	频率 (Hz)	质量参与系数		阶数	频率 (Hz)	质量参与系数	
		x向	y向			x向	y向
1	1.38	104.25	-3.08	6	5.21	-0.17	4.24
2	2.44	5.18	55.17	7	5.74	-0.52	0.38
3	3.24	-0.49	0.24	8	6.86	-0.55	0.40
4	4.11	1.10	0.13	9	6.95	0	-2.63
5	4.69	1.23	10.06	10	7.23	-0.56	0

说明：z 向振型参与系数为 0

表2 工况2振动分析结果 (考虑墙体)

阶数	频率 (Hz)	质量参与系数	阶数	频率 (Hz)	质量参与系数
		x向			x向
1	1.59	195.59	6	3.79	2.47
2	2.87	1.90	7	4.11	-5.16
3	3.04	-6.06	8	4.39	22.46
4	3.38	8.32	9	4.60	18.91
5	3.50	-15.90	10	5.83	19.91

说明：y、z 向振型参与系数为 0

由表 1 可知，仅考虑木构架本身振动时，结构的基频为 $f=1.38\text{Hz}$ ，x 向振型以第 1 阶为主，y 向振型以第 2 阶为主；而由图 6 可知，结构沿 x 向的振动主要表现为后檐柱向西侧移并造成西山构架局部扭曲，沿 y 向的振动主要表现为东山构架局部侧移；上述形式与实际震害不符。

另一方面，由表 2 可知，当考虑墙体嵌固时，结构的基频为 $f=1.59\text{Hz}$ ，主振型仅限于第 1 阶的 x 向，而由图 7 可知，第一阶振型主要表现为前檐构架向西振动，西山构架的振动表现更为明显，后檐柱则由于墙体的嵌固作用而保持不动。根据实际震害勘查结果，该古建筑木构架在此次地震中未发现明显变形或破坏，

见图 8(a) 所示；另除部分后檐墙与木构架相交处墙皮脱落外，其它墙体完好，如图 8(b) 所示。因此，工况 2 木构架振动形式与实际震害基本吻合，且反映了墙体对结构的振动有一定的制约作用。

三 地震响应

根据对汶川地震波的相关记录，截取峰值段进行调幅，然后作用于该古建筑进行动力分析，研究结构的地震响应情况。参照结构的实际震害状况，x、y、z 三向地震波的加速度峰值均调幅至 100gal，作用时间间隔取 0.005 秒，共 10 秒。另结构的阻尼比取 0.05¹。为研究嵌固墙体对木构架抗震性能的影响，选取典型的两个节点进行分析：节点 1183（位于屋顶中部）及 2290（位于后檐墙顶与木梁接触的中部），具体位置如图 5 所示。图 9、图 10 为节点的位移响应对比曲线；图 11、图 12 为节点的加速度响应对比曲线。其中，n 表示未考虑墙体的嵌固作用，y 表示考虑墙体嵌固作用。

由图 9 至图 10 可知，考虑墙体嵌固作用后，节点在 x、y 向的位移响应普遍减小。其中，节点 2290 在考虑墙体嵌固后，x 向的位移响应几乎为零，远小于不考虑墙体嵌固的位移峰值 0.015 米；另节点 1183 在考虑墙体嵌固后，y 向的位移峰值也由 0.039 米降至 0.018 米。此外，由节点 1183 及 2290 的位移响应曲线可知，节点基本上以平衡位置为中心进行振动，因此可认为无论考虑墙体嵌固与否，木构架处于稳定的振动状态。

由图 11、图 12 可知，考虑墙体嵌固作用后，节点的在 x、y 向的加速度响应普遍增大。其中，节点 1183 在考虑墙体嵌固后，与不考虑墙体的木构架相比，x 向的加速度峰值比达 2.27/1.12，y 向的加速度峰值比为 2.14/1.27；而节点 2290 在 x 和 y 向的加速度峰值比也分别达到 1.26/1.23 及 3.04/1.69。这说明考虑墙体嵌固作用后，木构架位移减小的同时，其内力也增大。

文献²提供了地震作用下不同结构的力 - 位移关系曲线，如图 13 所示，与本文分析结果基本相符。

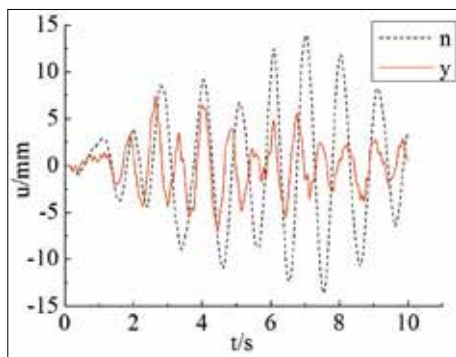


(a) 完好的木构架

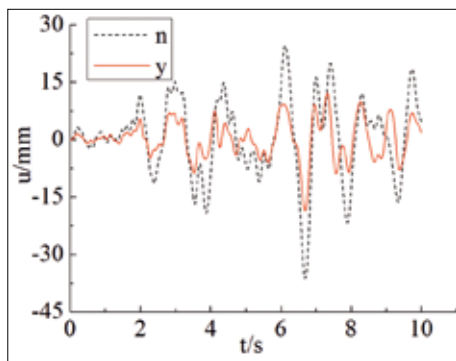


(b) 部分开裂的檐墙

图 8 汶川地震结构震后照片



(a) x 向位移

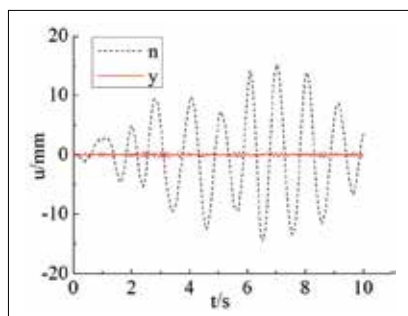


(b) y 向位移

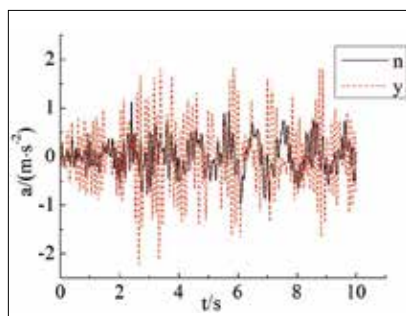
图 9 节点 1183 的位移响应

1 刘晶波、杜修力：《结构动力学》，机械工业出版社，2005 年。

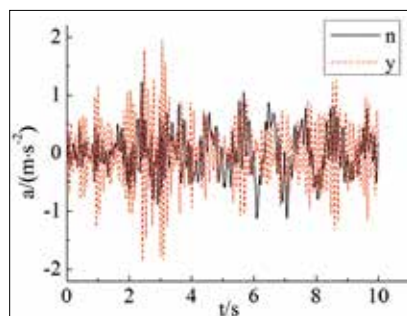
2 刘晓东：《古建筑木结构抗震性能分析》，西安交通大学，1988 年。



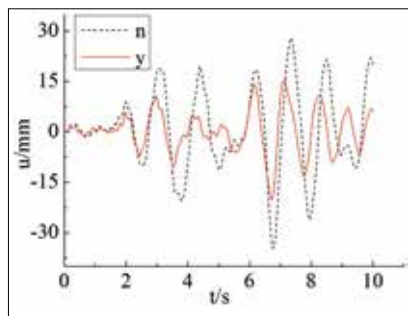
(a) x向加速度



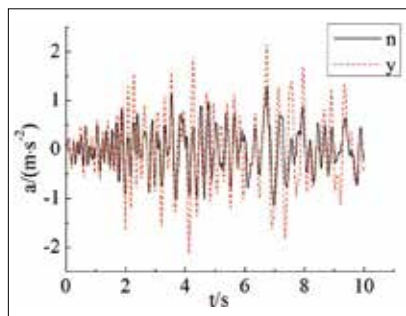
(a) x向加速度



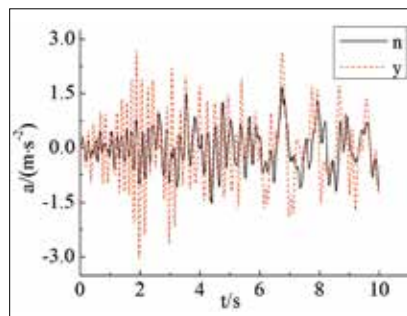
(a) x向加速度



(b) y向位移



(b) y向加速度



(b) y向加速度

图 10 节点 2290 的位移响应

图 11 节点 1183 的加速度响应

图 12 节点 2290 的加速度响应

四 结论

本分析中,地震作用下,当考虑墙体嵌固时,由于墙体的约束作用,古建筑的振动形式以 x 向振动为主,与实际震害吻合;

地震作用下,无论考虑墙体嵌固与否,木构架均保持稳定的振动状态;

地震作用下,考虑墙体嵌固后的古建筑与不考虑墙体墙体嵌固的木构架相比,位移要减小,但加速度增大。

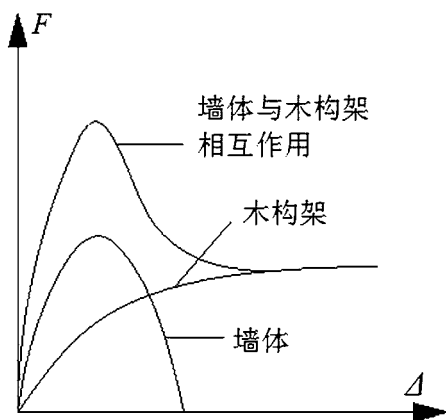


图 13 F-Δ 关系曲线

[作者单位: 故宫博物院故宫学研究所]

