

文章编号:1009-3087(2014)01-0081-06

古建嵌固墙体对木构架抗震性能的影响分析——以太和殿为例

周 乾^{1,2,3}, 闫维明¹, 关宏志³, 纪金豹¹

(1. 北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 故宫博物院, 北京 100009;

3. 北京工业大学 交通工程北京市重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 现有的古建筑木结构抗震分析模型很少考虑嵌固墙体。为探讨嵌固墙体对木构架抗震性能的影响, 采用数值模拟方法, 以故宫太和殿为例进行了对比分析。基于榫卯节点及斗拱的力学特性, 建立太和殿的2种有限元模型——包括/不包括嵌固墙体。通过模态分析, 研究了嵌固墙体对木构架基频及主振型的影响; 通过谱分析, 研究了8度常遇地震作用下嵌固墙体对典型节点位移及加速度响应的影响; 通过时程分析, 研究了8度罕遇地震作用下嵌固墙体对木构架整体变形及内力分布的影响。结果表明: 考虑嵌固墙体后, 太和殿结构基频变大, 在墙体部位的振动不明显; 地震作用下, 太和殿结构内力普遍增大, 但变形峰值偏小, 有利于避免木构架产生整体倾覆, 且在罕遇地震时表现明显。

关键词: 嵌固墙体; 木构架; 抗震性能; 古建筑; 太和殿

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

Influence of Embedded Walls to Aseismic Performances of Timber Structure of Chinese Ancient Timber Buildings —Taking Taihe Palace as Example

ZHOU Qian^{1,2,3}, YAN Wei-ming¹, GUAN Hong-zhi³, JI Jin-bao¹

(1. Beijing Key Lab. of Earthquake Eng. and Structural Retrofit, Beijing Univ. of Technol., Beijing 100124, China;

2. Palace Museum, Beijing 100009, China; 3. Beijing Key Lab. of Transportation Eng., Beijing Univ. of Technol., Beijing 100124, China)

Abstract: In order to find out the influence of embedded walls to aseismic performances of timber structure, Taihe Palace in the Forbidden City was taken as example for analysis by simulation methods. Based on mechanical characteristics of tenon-mortise joint as well as bracket sets, 2 finite element models of Taihe Palace were built with and without embedded walls. By modal analysis, spectrum response and time history analysis, the influence of embedded walls to main modes as well as seismic responses of timber structure under different intensity of earthquakes were studied. Results showed that with the consideration of embedded walls, the basic frequency of Taihe Palace increases. Its vibration at wall locations is inconspicuous. Under 8 degree intensity of earthquakes, its internal forces generally increase, however peak distortion value of its timber structure decreases to avoid overturn, especially under rarely occurred earthquakes.

Key words: embedded walls; timber structure; aseismic performances; ancient buildings; Taihe Palace

中国古建筑构架类型以木结构为主, 结构承重主体为榫卯连接的木构架。位于山面及后檐位置的

厚重墙体嵌固在木柱两侧, 主要起维护作用。千百年来, 古建筑能历经各种地震灾害而保持完好, 体现了一定的抗震性能, 不少学者亦开展了相关理论及试验研究。然而从研究现状来看, 大部分古建筑抗震分析模型侧重于木构架本身, 考虑墙体的影响的有限元分析较少^[1-5]。由于木材材质轻, 与厚重的墙体刚度相差较大, 因而地震作用下, 墙体对木构架抗震性能的影响不可忽略。图1所示的2008年汶川地震中某古建筑的震害, 木构架整体受损较轻, 与之嵌固的墙体则产生倒塌。除木构架本身因素外,

收稿日期: 2013-06-20

基金项目: 北京市博士后工作经费资助项目(2013ZZ-04); 国家自然科学基金资助项目(51278013); 故宫博物院科研基金资助项目(KT2012-7); 文化部科技创新基金资助项目(17-2009)

作者简介: 周 乾(1975—), 男, 高级工程师, 博士后。研究方向: 文物建筑抗震加固与振动控制。E-mail: qianzhou627@hotmail.com

墙体对木构架变形的约束作用可能是木构架震害较轻的主要原因。



图 1 汶川地震某古建筑震害照片

Fig.1 Photo of damage of an ancient building under Wenchuan earthquake

位于紫禁城(今故宫博物院)前朝的太和殿,是中国规模最大、建筑等级最高的宫殿建筑。太和殿始建于 1420 年,随后屡遭焚毁并重建,现存建筑为清朝(1695 年)重建后形制。建筑长 64 m,宽 37.2 m,高 26.92 m,面阔 11 间,进深 5 间,重檐庑殿屋顶形式,墙体厚 1.25 ~ 1.45 m,主要分布在太和殿两山及后檐位置。建筑主要尺寸见图 2。为探讨嵌固墙体对古建木构架抗震性能影响,下面以太和殿为例进行分析。

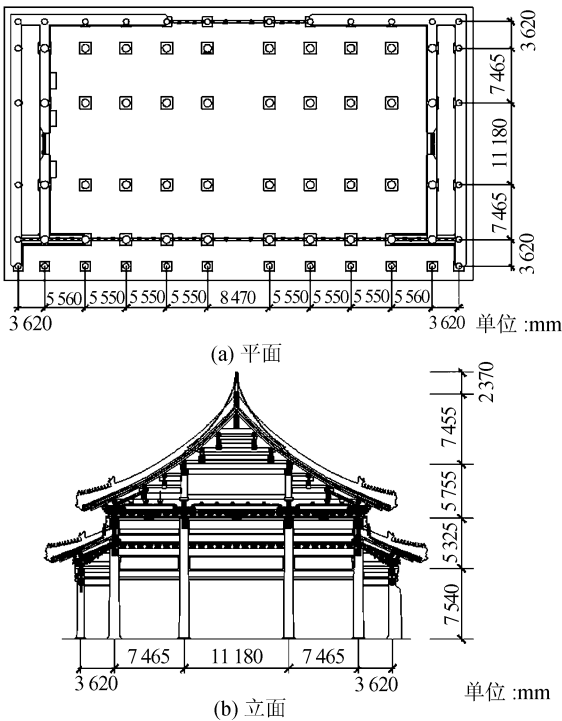


图 2 太和殿尺寸图

Fig.2 Sizes of Taihe Palace

1 有限元模型

采用有限元分析程序 ANSYS 建立太和殿有限元模型,相关说明如下:

1) 基于已有研究成果,榫卯节点刚度值可取为^[1-2,6-7]: $K_x = K_y = K_z = 1.0 \times 10^9 \text{ kN/m}$, $K_{\text{rot } x} = K_{\text{rot } y} = K_{\text{rot } z} = 5.755 \text{ kN} \cdot \text{m}$,斗拱刚度可取值为^[8-9]: $K_x = K_y = K_z = 1550 \text{ kN/m}$, $K_{\text{rot } x} = K_{\text{rot } y} = K_{\text{rot } z} = 3.1 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

2) 根据屋顶构造特征,屋顶重量由檩 3 件(檩、垫板、枋)承担,因而采用均匀分布的质点单元模拟屋顶质量。

3) 柱子受到墙体嵌固,且柱底与柱顶石之间的摩擦系数为 0.5 左右,在 8 度多遇地震作用下一般不会产生滑移^[10-11],因而柱础约束条件考虑为铰接。

4) 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,太和殿墙体与木柱的嵌固关系见图 3(说明:根据古建筑施工工艺,墙体砌筑到梁底时,并不采取与梁拉结措施,仅采用低标号灰浆将其间细缝填实,因而不考虑墙体与梁底之间的接触关系)。在使用 ANSYS 程序模拟墙体嵌固作用时,可采用线线接触单元,建立墙体-柱子接触对。其中:墙体侧边为接触单元,用 CONTA172 单元模拟;柱子为目标单元,用 TARGE169 单元模拟。

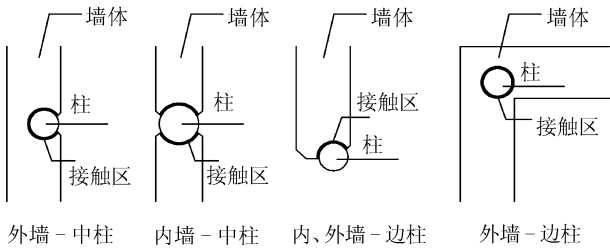


图 3 太和殿墙体与木柱嵌固关系平面示意图

Fig.3 Plan view of relation between columns and embedded walls of Taihe Palace

采用 BEAM189 梁单元模拟梁、柱, MATRIX27 单元模拟榫卯节点及斗拱, SHELL181 壳单元模拟墙体、 MASS21 质点单元模拟屋顶质量,建立太和殿有限元模型见图 4,含梁单元 854 个,柱单元 215 个,榫卯节点单元 120 个,斗拱单元 486 个,墙体单元 1328 个,屋顶质点单元 2537 个。另太和殿墙体与柱子之间的接触对分布如图 5 所示,含接触对 1327 组。

2 模态分析

对太和殿模型进行模态分析,获得不同条件下模型的前 10 阶频率及模态系数见表 1、2,主振型见图 6。本例中, X 为水平横向, Y 为竖向, Z 为水平纵向。

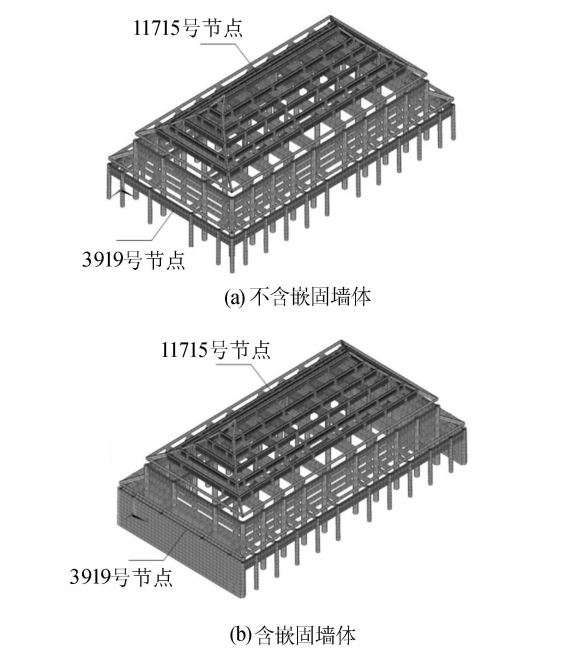


图 4 太和殿有限元模型
Fig. 4 Finite element model of Taihe Palace

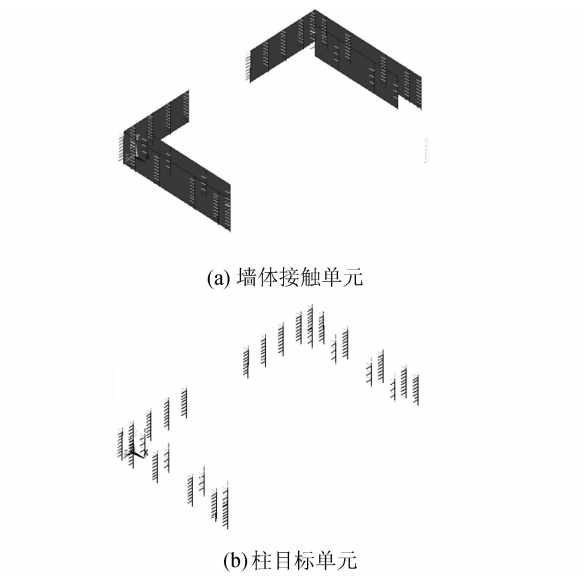


图 5 墙 - 柱接触对分布
Fig. 5 Distributions of contact pairs of wall-column

表 1 振动分析结果(不考虑墙体)

阶数	频率/Hz	模态系数		
		X 向	Y 向	Z 向
1	0. 70	0. 18	0	1. 00
2	0. 71	1. 00	0	0
3	0. 80	0. 60	0	0. 03
4	1. 33	0. 16	0	0
5	1. 67	0. 01	0	0. 01
6	2. 50	0. 04	0	0. 02
7	3. 38	0	0	0. 02
8	3. 56	0	0	0. 04
9	3. 89	0. 01	0	0. 03
10	4. 31	0. 03	0	0

表 2 振动分析结果(考虑墙体)				
Tab. 2 Results of vibration analysis(with filler wall)				
阶数	频率/Hz	模态系数		
		X 向	Y 向	Z 向
1	0. 90	0. 23	0. 50	1. 00
2	1. 58	1. 00	1. 00	0. 03
3	2. 04	0. 05	0. 04	0. 38
4	2. 39	0. 05	0. 00	0. 19
5	2. 73	0. 07	0. 02	0. 03
6	3. 06	0. 04	0. 01	0. 01
7	3. 24	0. 00	0. 01	0. 02
8	3. 45	0. 02	0. 04	0. 05
9	3. 75	0. 02	0. 00	0. 05
10	3. 85	0. 06	0. 01	0. 04

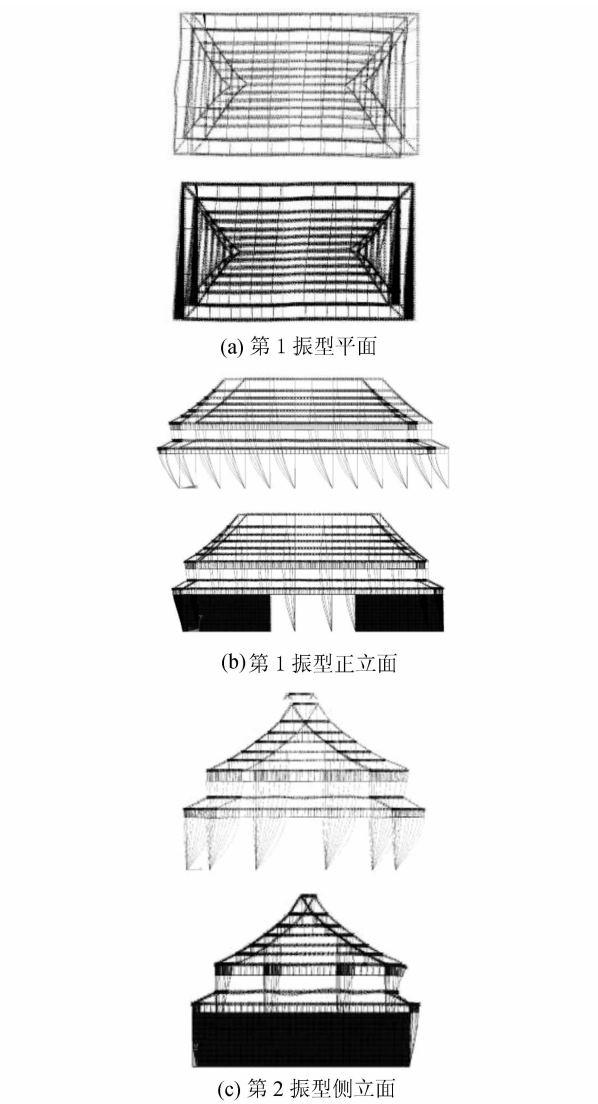


图 6 振型对比图 (上图为未考虑嵌固墙,下图为考虑嵌固墙)
Fig. 6 Contrasted modes (up: without filler wall, bot-
tom: with filler wall)

由表 1~2 可知:1) 考虑嵌固墙体后,太和殿模型基频明显增大,这主要因为模型刚度增大。2) 不考虑墙体嵌固作用时,模型在 Y 向的模式系数为 0;而考虑墙体后,模型在 Y 向的模式系数为一定值。计算结果显示,考虑嵌固墙体后,太和殿结构在 X 、 Y 、 Z 向主振型的有效参与质量比例为:0.21:0.01:1,即参与竖向振动的结构质量几乎为 0。但考虑墙体嵌固后模型在竖向的振动相对而言更明显。3) 无论考虑墙体与否,模型的主振型集中在前两阶,表现为第 1 振型的纵向振动及第 2 振型的横向振动。

结合表 1~2 及图 6 可知:1) 无论考虑墙体与否,模型的主振型表现为平动为主,且在 X 、 Z 向的关联很小;2) 未考虑墙体嵌固作用时,模型的主振型表现为木构架的整体侧移;而考虑墙体后,由于模型在山面及背面有墙体嵌固木柱,造成上述位置的木柱并无明显振动,即墙体对木构架振动具有约束作用。

3 响应谱分析

采用响应谱分析方法研究常遇地震作用下墙体对木构架整体抗震性能的影响。假设结构阻尼比 $\xi = 0.05$,根据《建筑结构抗震设计》(GB50011—2010) 的相关规定计算地震影响系数 $\alpha(\omega, \xi)$ 。各参数取值为:地震影响系数最大值 $\alpha_{\max} = 0.16$;考虑故宫所处场地类别为 II 类,设计地震分组为第 1 组,特征周期 $T_g = 0.35$ s;阻尼调整系数 $\eta_2 = 1$;曲线下降段的衰减指数 $\gamma = 0.9$;直线下降段斜率调整系数 $\eta_1 = 0.02$ 。

对模型施加 8 度常遇烈度的水平双向单点响应谱(single-point response spectrum),采用 SRSS 法合并模态,获得太和殿变形及 Von Mises 应力分布结果见图 7~8。

由图 7(a) 可知,未考虑墙体嵌固作用时,结构变形值为 0.04 m,且产生大变形的部位为结构七架梁以上的整体梁架。由图 7(b) 可知,考虑墙体嵌固时,结构变形偏小,最大值为 0.03 m,且变形较大值的部位集中在中间跨的明间梁架位置,该位置不易引起结构侧向失稳。这说明墙体对木构架的侧向变形有一定约束作用,使得地震作用下,结构变形值相对减小,且最大变形部位分布区域减小,分布位置对结构稳定有利,因而减小结构倾覆的隐患。

由图 8 可知,考虑墙体嵌固影响后,结构的 Von Mises 应力分布的主要变化特征为:1) 应力峰值变大,由 2.29 MPa 增至 3.10 MPa,这使得结构产生受拉破坏的可能性增大。2) 应力分布发生变化,未考

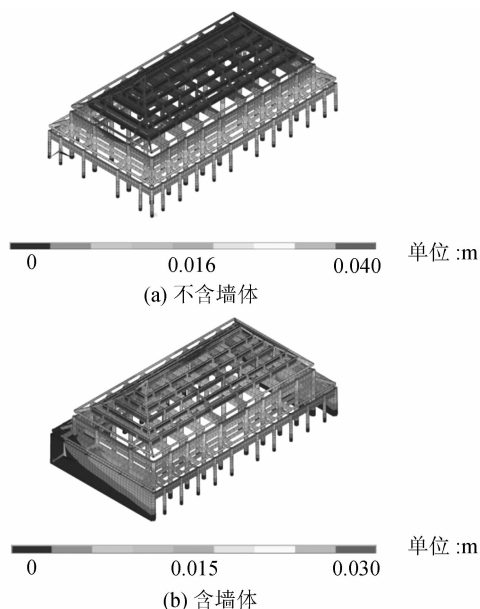


图 7 8 度常遇地震作用下结构变形分布
Fig. 7 Deformation distributions of model under 8 degree intensity of frequently occurred earthquakes

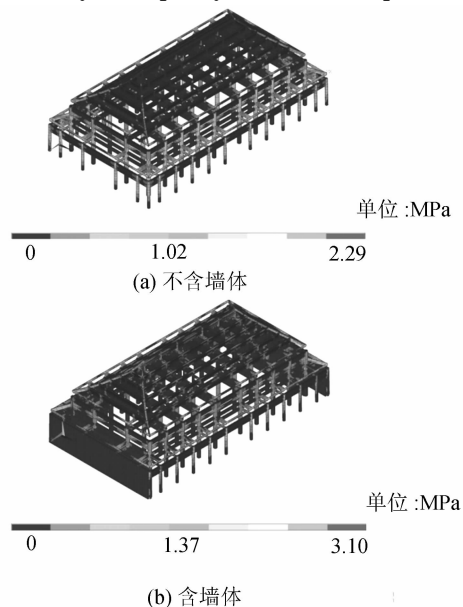


图 8 8 度常遇地震作用下结构 Von Mises 应力分布
Fig. 8 Von Mises stress distributions of model under 8 degree intensity of frequently occurred earthquakes

虑墙体时的木构架应力较大值主要分布在一层檐柱上部;考虑墙体作用后,结构应力较大值主要分布在一层檐柱上部、两山墙体与檐柱相交部位,以及脊瓜柱部位。

综上所述,可以认为考虑墙体嵌固作用后,地震作用下,结构因过大变形产生倒塌的风险减小,即结构偏于安全;但结构同时因强度不足产生较大范围开裂、拔榫等残损问题的可能性增大。

4 时程分析

采取时程分析法研究罕遇地震作用下墙体对太和殿结构整体抗震性能影响。故宫所在地为8度抗震设防,所处场地类别为Ⅱ类,设计地震分组为第1组,且太和殿属甲类建筑,综合上述因素,选取水平双向(X 、 Z 向, X 为横向, Z 为纵向)天津波作用于太和殿,时间间隔0.02 s,持时30 s, X 方向的加速度峰值为 $PGA(\text{peak ground acceleration}) = 0.4g$, X 、 Z 向加速度峰值比为1:0.85。在进行弹性地震响应分析时,选取明间屋脊部位某节点(编号:11715)及西山墙某节点(编号:3919),以研究墙体对结构位移及加速度响应的影响。

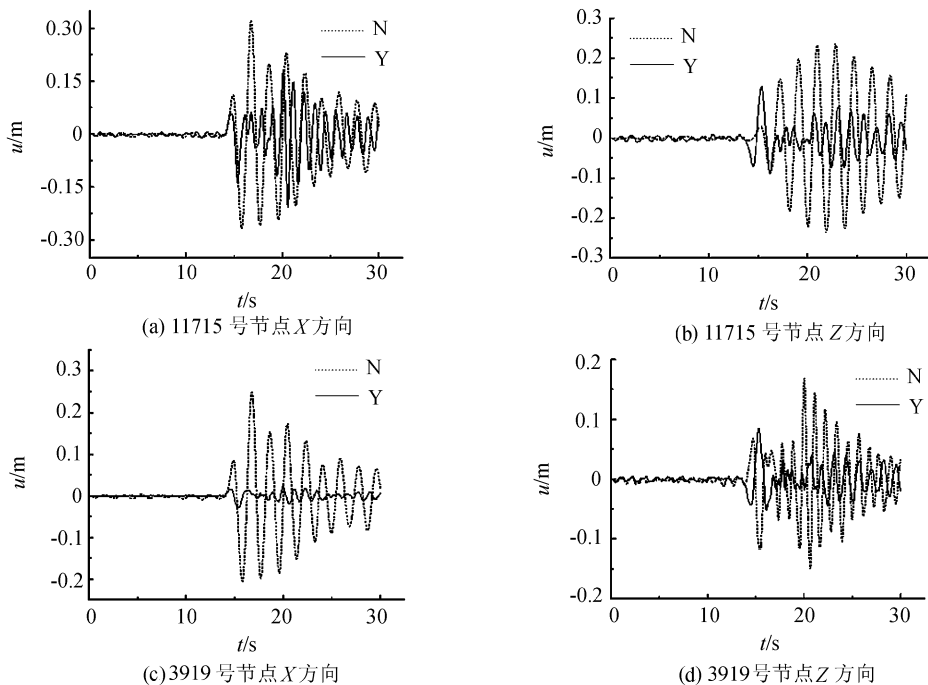


图9 节点位移响应曲线

Fig.9 Displacement response curves of nodes

4.2 加速度

节点的加速度响应与其所受内力密切相关。天津波作用下,11715号节点及3919号节点的加速度响应曲线见图10。曲线表明:1)不考虑嵌固墙体的木构架加速度响应放大不明显,这在一定程度上可反映榫卯节点和斗拱的减震作用。2)考虑墙体嵌固作用后,二节点的加速度响应峰值均增大一倍左右,这反映木构架因墙体作用而造成内力变大。对于屋顶而言,地震作用下屋顶部位产生破坏的可能性较大,具体可表现为瓦件脱落、椽子和望板开裂等症状;对于墙体而言,墙体因内力过大很可能产生

4.1 位移

11715号节点及3919号节点的位移响应曲线见图9,其中,N表示不考虑嵌固墙体,Y表示考虑嵌固墙体,下同。易知:1)无论考虑墙体嵌固与否,二节点位移响应曲线均表现为以平衡位置为中心的振动,反映了结构保持稳定的振动状态。2)考虑墙体嵌固作用后,二节点的位移响应峰值均有所减小,且3919号节点在 X 向的位移表现尤为明显。这反映墙体对木构架侧移有限制作用,尤其在木构架与墙体相交位置,位移明显减小。考虑嵌固墙体后,11715号节点在水平双向的位移响应峰值降低一半以上,减小了木构架产生失稳倾覆的危险。

开裂或倒塌;但对结构整体而言,由于结构变形明显减小,因而产生倾覆可能性变小,这与古建筑震害的实际情况吻合^[12]。

5 结论

1)考虑嵌固墙体后,太和殿结构基频明显增大,且由于墙体约束作用,模型在墙体位置的振动不明显。

2)地震作用下,考虑嵌固墙体的太和殿结构内力偏大,但位移减小,有利于避免木构架在罕遇地震作用下产生倾覆。

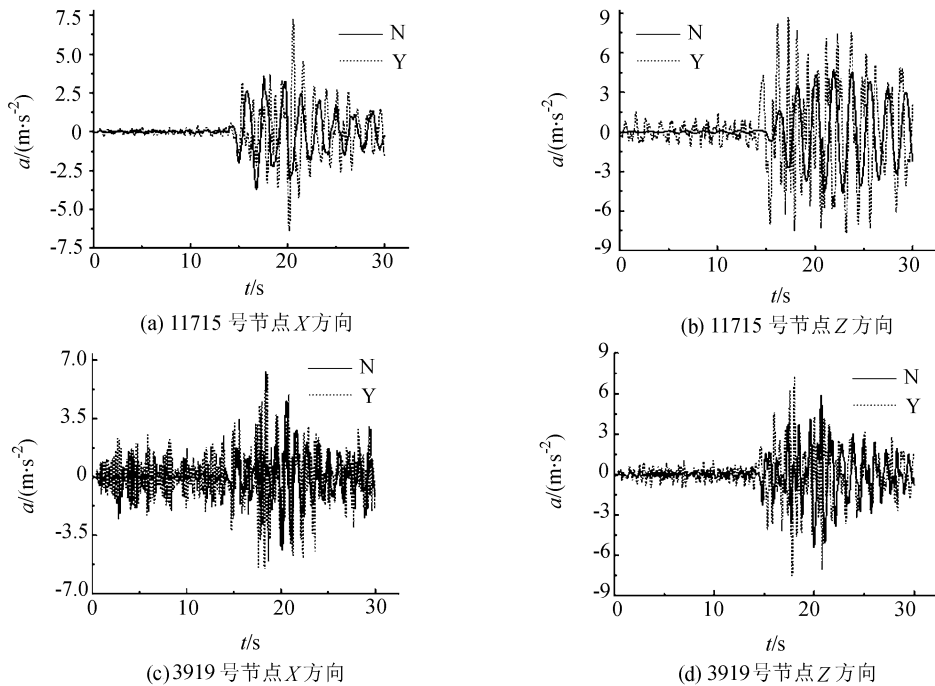


图10 节点加速度响应曲线

Fig. 10 Acceleration response curves of nodes

参考文献:

- [1] Fang D P, Iwasaki S, Yu M H. Ancient chinese timber architecture—I: Experimental study[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(11): 1348–1357.
- [2] Fang D P, Iwasaki S, Yu M H. Ancient Chinese timber architecture—II: Dynamic characters [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(11): 1358–1364.
- [3] Zhou Qian, Yan Weiming, Zhou Xiyuan, et al. Vibration characters and seismic response of Chinese ancient buildings [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(1): 13–17. [周乾, 闫维明, 周锡元, 等. 中国古建筑动力特性及地震反应[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(1): 13–17.]
- [4] Zhou Qian, Yan Weiming, Zhou Hongyu. Stochastic seismic response of Chinese ancient wood buildings [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(9): 115–118. [周乾, 闫维明, 周宏宇. 中国古建筑木结构随机地震响应分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(9): 115–118.]
- [5] Zhou Qian, Yan Weiming, Ji Jinbao. Study on damage numerical simulation of an ancient wooden building embedded with masonry walls [J]. Building Structure, 2010, 40(1): 100–103. [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[J]. 建筑结构, 2010, 40(1): 100–103.]
- [6] Zhou Qian, Yan Weiming, Zhou Xiyuan, et al. Aseismic behavior of Chinese ancient tenon-mortise joint[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6): 679–684. [周乾, 闫维明, 周锡元, 等. 古建筑榫卯节点抗震性能试验[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(6): 679–684.]
- [7] Zhou Qian, Yan Weiming, Li Zhenbao, et al. Aseismic strengthening methods on Chinese ancient tenon-mortise joint by shaking table tests[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(6): 70–78. [周乾, 闫维明, 李振宝, 等. 古建筑榫卯节点加固方法振动台试验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(6): 70–78.]
- [8] Sui Yan, Xue Jianyang, Zhao Hongtie, et al. Experimental study on lateral stiffness of Dougong layer in Chinese historic buildings [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 74–78. [隋奕, 薛建阳, 赵鸿铁, 等. 古建木构铺作层侧向刚度的试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 74–78.]
- [9] Zhou Qian, Zhang Xueqin. Study on structural actuality of western cornice purlin of Taihe Palace in the Forbidden City [C]// Zheng Xinmiao, Jin Hongkui. Proceedings of Chinese Forbidden City Association (No. 6). Beijing: Forbidden City Press, 2011: 692–702. [周乾, 张学芹. 故宫太和殿西山挑檐檩结构现状分析[C]//郑欣淼, 晋宏逵. 中国紫禁城学会论文集: 第六辑. 北京: 紫禁城出版社, 2011: 692–702.]
- [10] Yao Kan, Zhao Hongtie. Study on the mechanism of sliding friction shock isolation between timber column and plinth in historical buildings [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8): 127–131. [姚侃, 赵鸿铁. 木构古建筑柱与柱础的滑移摩擦隔震机理研究[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 127–131.]
- [11] Zhou Qian. Study on antiseismic constitution of Shen-wu Gate in the Palace Museum [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofit, 2007, 29(6): 91–98. [周乾. 故宫神武门防震构造研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(6): 91–98.]
- [12] Zhou Qian, Yan Weiming, Yang Xiaosen, et al. Damage of ancient Chinese architecture caused by the Wenchuan earthquake [J]. Sciences of Conservation and Archeology, 2010, 22(1): 37–45. [周乾, 闫维明, 杨小森, 等. 汶川地震导致的古建筑震害[J]. 文物保护与考古科学, 2010, 22(1): 37–45.]

(编辑 张琼)