

穿斗木结构房屋地震响应分析与构造技术研究

王 博, 白国良, 王超群, 陈磊杰

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 穿斗木结构是我国西南农村地区较常见的房屋结构类型. 以一种典型穿斗木结构房屋为研究对象, 采用 ANSYS 有限元软件建立结构整体模型, 分析其静力反应、动力特性以及不同强度地震下的响应特性. 研究表明: 该类结构平动第二周期与扭转第一周期较为接近, 有可能发生平扭耦联现象; 不同强度地震下, 加速度响应均在柱底最大, 越往上越小, 而位移响应均在柱顶最大, 越往下越小; 结构中的榫卯属于抗震有利部件, 能够吸收和耗散地震能量, 使结构顶部加速度响应较小, 但由于节点的半刚性特点及纵向刚度较小, 使结构整体性较差, 造成顶部位移响应较大; 基于有限元分析结论与实际施工特点, 提出在中柱间设置剪刀撑, 在梁下设置枋, 加强檩条、柱、梁之间的连接, 加强围护墙体与构件的连接等措施来提高穿斗木结构房屋的抗震性能.

关键词: 穿斗木结构; 动力特性; 地震反应; 构造措施; 有限元分析

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)04-0536-06

穿斗木结构房屋在我国西南的农村地区比较常见, 为白族、彝族、纳西族等民居中通常采用的结构形式^[1]. 由于该类房屋一般均由工匠凭经验建造, 缺乏专业的抗震设计指导, 在地震中多有震害发生^[2]. 目前我国对木结构抗震性能的研究主要集中在古建筑^[3-10]方面, 针对农村的穿斗木结构房屋抗震性能研究还相对较少. 文献[1-2]总结了穿斗木结构房屋的震害特点, 初步分析了震害原因并提出了抗震构造建议, 但未对该类结构进行定量的地震响应分析与探讨. 鉴于此, 本文以农村典型的穿斗木结构房屋为研究对象, 采用 ANSYS 有限元软件建立整体结构模型, 对其进行静力分析与地震响应分析, 并在此基础上提出抗震构造措施.

1 穿斗木结构房屋的结构组成

穿斗木结构属于轻型木结构房屋, 主要有穿枋、梁、柱等构件组成, 木柱和木梁是结构的主要承重构件. 柱与柱之间通过木梁连接, 梁柱节点处做成燕尾榫的形式, 梁下设穿枋, 如图1所示, 穿枋可以将梁柱节点挤紧, 保证结构体系具有一定的整体刚度. 结构多采用双坡屋面, 屋面先布置檩条, 然后在檩条上设椽子, 椽子上再铺望板, 最后撒瓦, 因此屋面相对于结构下部而言较重.

穿斗式木结构房屋在建造时先在地面上拼装成整榀屋架, 以便于施工. 同时, 密列的立柱也便于安装壁板和筑墙. 此外, 由于立柱所承受的荷载远比抬梁式结构立柱小, 因而柱径也相应缩小, 这样可以发挥小直径木料的作用, 不仅用料经济而且体态也比较轻盈.

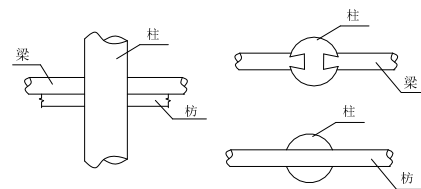


图1 梁柱节点连接示意图

Fig.1 Sketches of beam-column joints

2 穿斗木结构房屋有限元模型建立

2.1 结构模型选取

本文依据文献[2,11]选取典型的穿斗木结构为研究对象, 并对其进行适当简化, 其建筑平面布置及主体结构形式如图 2-图 3 所示. 该结构位于 7 度区, II 类场地, 设计基本地震加速度为 0.10 g, 地震分组为第一组. 结构木柱纵向间距为 3.3 m, 木梁顶标高为 3.3 m, 内、外围护墙均为生土墙, 墙厚 400 mm, 木柱跨度为 4.8 m, 木柱直径为 200 mm, 木檩条、横梁、瓜柱、枋的直径均为 180 mm. 为便于分析研究, 本文中结构所用木材的树种均选取杉木.

2.2 有限元模型建立

本文采用 ANSYS 有限元软件建立结构整体分析模型, 其中梁、柱构件采用 Beam44^[12]单元模拟, Beam44 是一种可以承受弯、扭、拉和压的 3D 单轴梁单元; 梁柱节点及柱础间的连接采用 Combin14^[12]单

收稿日期: 2013-03-18

修改稿日期: 2013-03-18

基金项目: 国家科技支撑计划合作单位项目 (2012BAJ19B04-02; 2011BAJ08B05-4; 2011BAJ04B01-02)

作者简介: 王 博(1985-), 男, 博士生, 主要从事工程结构抗震方面的研究. E-mail: chnwangbo@163.com

元模拟, Combin14 单元是一种具有轴向和扭转性能的一维、二维或三维弹簧阻尼单元。

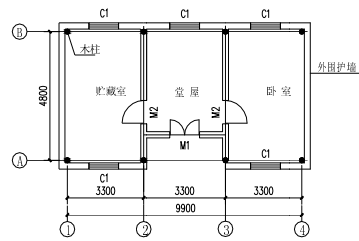


图 2 建筑平面布置
Fig.2 Building layout

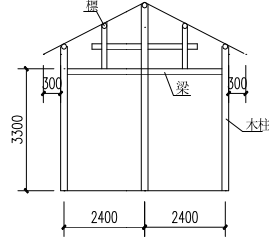


图 3 主体结构形式
Fig3. Form of main structure

已有试验研究^[6]表明, 木结构构件在低周荷载作用下塑性发展不明显, 滞回环包围面积较小, 几乎不具耗能能力, 因此对木结构的梁、柱可按弹性考虑, 材料基本参数如表 1 所示。

表中, E_L 为木材顺纹弹性模量, E_T 为木材横纹切向弹性模量, E_R 为木材横纹径向弹

表 1 木材的材料基本参数
Tab.1 Basic parameters of wood material

E_L	μ_{LT}	μ_{LR}	E_T	μ_{TR}	μ_{TL}	E_R	μ_{RT}	μ_{RL}	G_{TL}	G_{LR}	G_{RT}
9 702	0.106	0.106	1 955	0.352	0.52	1 955	0.352	0.52	609	971	218

性模量; μ_{LT} 、 μ_{LR} 为木材顺纹径向和切向泊松比, μ_{RT} 、 μ_{RL} 为木材横纹径向和切向泊松比; G_{TL} 为纵向和切向所确定的平面上的剪变模量, G_{LR} 为径向和纵向所确定的平面上的剪变模量, G_{RT} 为切向和径向所确定的平面上的剪变模量。

对于木结构的榫卯连接节点, 由于木材本身的湿胀干缩特性与加工工艺限制, 其节点不可能达到完全刚性, 其性质介于刚接与铰接之间, 是一种半刚性节点^[4,6], 这种节点不仅有一定的承受拉压能力, 还有相当的抗弯、抗扭能力, 因此, 采用弹簧单元近似来模拟, 其弹簧刚度系数取值为: $K_L=113.3\text{ kN/m}$, $K_R=127\,950\text{ kN/m}$, $K_\theta=296.71\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$, 其中, K_L 为弹簧单元沿木材顺纹方向刚度系数, K_R 为弹簧单元沿木材横纹方向刚度系数, K_θ 为弹簧单元扭转和弯曲刚度系数; 而对于柱脚与基础之间连接, 考虑其有限的滑移与摩擦, 本文采用水平弹簧单元来模拟, 其 2 个水平方向刚度系数均为 52 kN/m 。上述各参数的取值依据文献[8,13,14]的方法, 均采用试验所得结果。

对屋盖系统采用等效密度法来简化模拟, 首先根据规范求出各部分荷载^[15], 然后将屋盖质量集中到檩条上, 以此简化计算, 计算公式如式(1)所示。

$$\rho_{\text{eq}} = Aq/nV \quad (1)$$

式中: A 为屋面水平投影面积(m^2); q 为屋面荷载(kg/m^2); n 为檩条个数; V 为每根檩条的体积(m^3)。本文中檩条长度为 9.9 m , 直径 0.18 m , 共有 5 根。根据式(1)可得檩条等效密度, 至此, 通过 ANSYS 建立的有限元整体结构分析模型如图 4 所示。

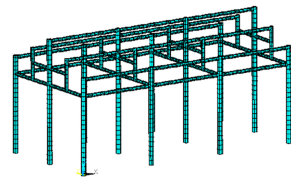


图 4 有限元模型
Fig.4 Finite element model

3 穿斗木结构房屋地震响应分析

3.1 静力分析

结构在重力荷载作用下的变形如图5-图6所示。

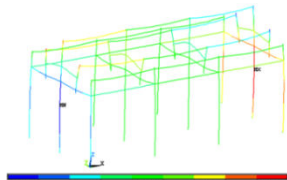


图5 重力荷载作用下房屋纵向位移
Fig.5 Longitudinal displacement under gravity load

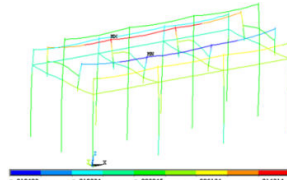


图6 重力荷载作用下房屋横向位移
Fig.6 Transverse displacement under gravity load

由图可知:

(1)房屋的纵向(X 方向)最大位移为 5.2 mm , 出现在两边跨的中柱标高 3.3 m 以下部分。分析认为主要原因有以下两点: 1)中柱在纵向没有穿枋连接, 且每榀木框架之间没有纵向支撑, 仅边柱间在纵向有穿枋连接, 导致结构的纵向稳定性差; 2)中柱承受的重力荷载较边柱大。

(2)房屋的横向(Y方向)最大位移为11.1 mm,出现在瓜柱柱顶,即瓜柱顶的檩条整体向两侧发生位移.

由于建模时把屋盖质量通过等效密度的方法集中到檩条,忽略了屋盖系统对结构的有利约束作用.因此本次分析中的结果偏于保守,但通过结构纵、横向位移的对比依然可以看出,横向位移偏大.

3.2 动力特性分析

通过 ANSYS 模态分析得出结构的前三阶如图 7 所示,对应的各阶周期分别为:0.71 s、0.68 s 和 0.65 s.

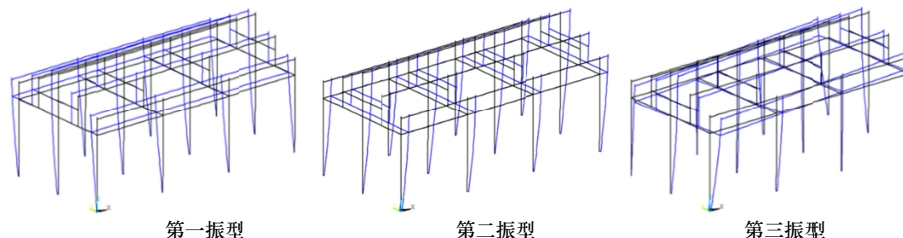


图7 结构的前三阶振型

Fig.7 The top three vibration modes of structure

计算分析表明,结构的第一振型为横向平动,第二振型为纵向平动,第三振型为扭转.由于结构的平动第二周期与扭转第一周期较为接近,因此在地震作用下结构可能发生平扭耦联现象.

3.3 地震响应分析

在对结构进行地震响应分析时以 El-centro 地震波作为输入,沿结构横向(Y向)分别输入 35 gal、110 gal 和 220 gal 的地震波以分析 7 度小震、中震与大震下的结构响应.由于文献[16]在对木结构进行试验研究中发现,木结构房屋阻尼比接近或大于 5% 的规范建议值,因此,本文阻尼比取 $\xi=0.05$.

由于角柱受力复杂,既要承受竖向压力,又要承受横向剪力和扭转力,而中柱的受力较大,因此,选取角柱与中跨中柱作为主要研究对象,分别提取其重要节点的加速度响应与位移响应进行对比分析,如图 8-图 10 所示.

由图 8 可以看出:

(1)在小震作用下,最大加速度出现在角柱柱脚处,为 0.58 m/s^2 ,而角柱柱顶加速度峰值则为 0.36 m/s^2 ,动力放大系数由 1.66 下降到 1.03;中跨中柱柱脚加速度最大值为 0.50 m/s^2 ,柱顶加速度峰值为 0.36 m/s^2 ,动力放大系数由 1.43 下降到 1.03.分析认为,这主要是由于榫卯的耗能作用,使地震激励传到柱顶的能量减小,有效的减弱了地震对上部结构的破坏作用.

(2)在小震作用下,最大位移出现在中跨中柱柱顶,为 36 mm,该柱柱脚位移值为 5 mm,位移差为 31 mm;角柱柱顶位移为 34 mm,角柱柱脚位移为 2.6 mm,位移差为 31.4 mm.柱脚位移均比柱顶位移小得多,这主要是由于该类结构柔度大,且屋面质量与下部结构质量相差较大而引起的.

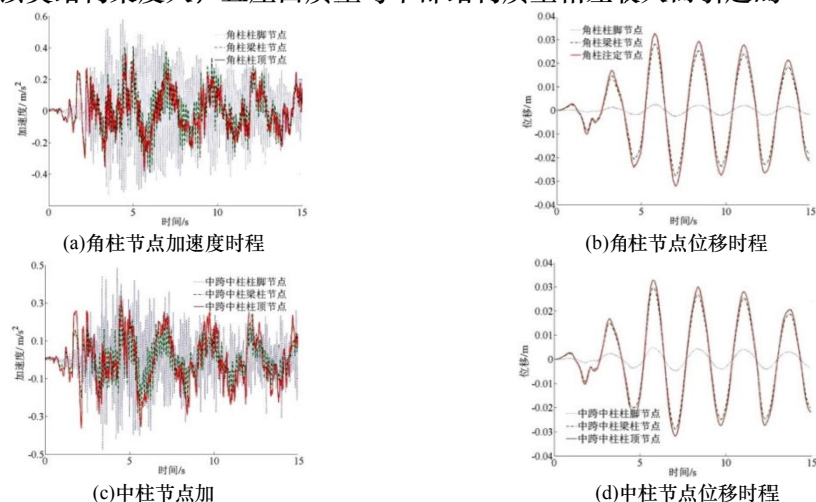


图8 小震(35gal)下的典型节点地震反应时程曲线

Fig.8 Time-history curves of seismic response for typical joints under the minor earthquake (35gal)

由图 9 可以看出:

(1)在中震作用下,加速度最大值依然出现在角柱柱脚处,最大值为 1.70 m/s^2 ,角柱柱顶节点处为 1.30 m/s^2 ,动力放大系数由 1.55 下降到 1.18;中跨中柱柱脚加速度最大值为 1.50 m/s^2 ,柱顶加速度减小为 1.26

m/s^2 , 动力放大系数由 1.36 下降到 1.15. 由此也可看出榫卯的耗能作用对结构的抗震能力的贡献.

(2)在中震作用下,最大位移出现在中间跨中柱柱顶节点,最大值为 120 mm,该柱柱底最大位移为 16 mm,位移差为 104 mm;角柱柱底最大位移为 8 mm,柱顶最大位移为 105 mm,位移差为 97 mm.

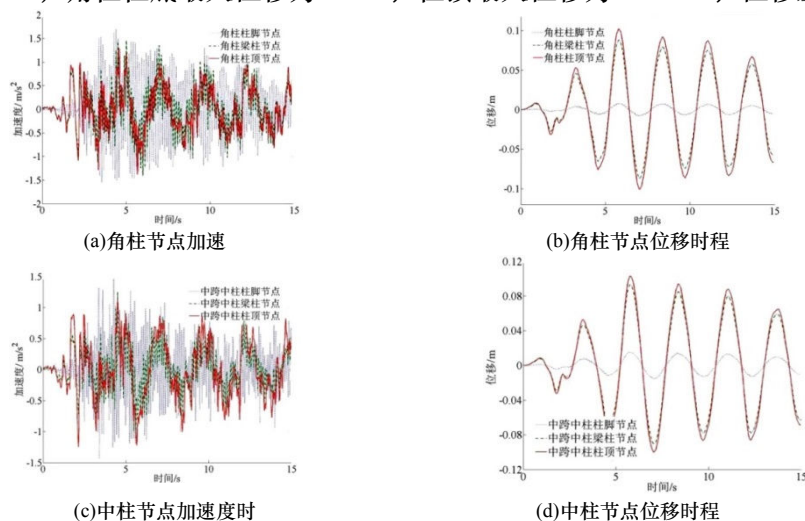


图9 中震(110gal)作用下典型节点的地震反应时程曲线

Fig.9 Time-history curves of seismic response for typical joints under moderate earthquake (110gal)

由图 10 可以看出:

(1)在大震作用下,加速度最大值出现在角柱柱脚处,为 3.50 m/s^2 ,角柱柱顶节点处为 2.70 m/s^2 ,动力放大系数由 1.59 下降到 1.23;中跨中柱柱脚加速度最大值为 3.30 m/s^2 ,柱顶加速度减小为 2.40 m/s^2 ,动力放大系数由 1.36 下降到 1.09.

(2)在大震作用下,最大位移出现在中跨中柱柱顶,其值为 240 mm,该柱柱脚位移值为 31 mm,位移差为 209 mm;角柱柱顶位移为 220 mm,角柱柱脚位移为 17 mm,位移差为 203 mm,此时由于位移较大,对于木构件的节点而言,可能已经松动,甚至脱开.

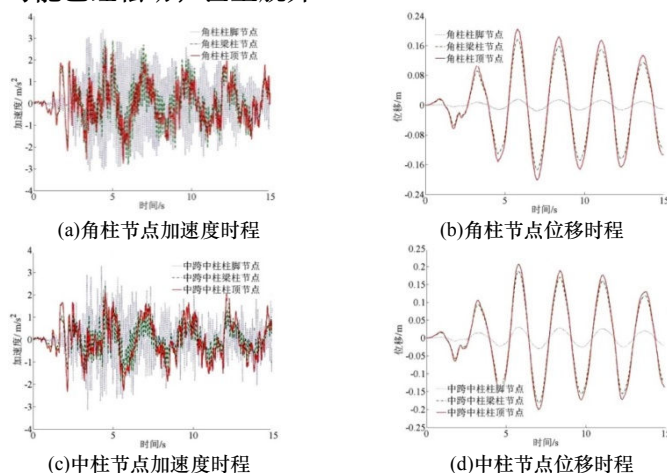


图10 大震(220gal)作用下典型节点的地震反应时程曲线

Fig.10 Time-history curves of seismic response for typical joints under the rarely expected earthquake (220gal)

综上所述,结构在不同强度地震作用下,加速度响应均在柱底最大,越往上越小,而位移响应均在柱顶最大,越往下越小;整体结构的变形图与框架结构变形图类似,均属于剪切型变形.在地震作用下,由于榫卯节点的存在,使结构顶部受到的地震力较小,但由于其刚度较小,使顶部位移较大.因此,在对穿斗木结构房屋进行抗震构造措施研究时,既要保证其节点的耗能能力,又不能使结构刚度过小.

4 穿斗木结构房屋的构造加强措施

4.1 剪刀撑的设置

通过对结构静力分析表明,结构在纵向最大变形发生在中柱标高以下部分,主要是由于结构中柱在纵向没有支撑,使纵向抗侧移刚度较小,整体性差,鉴于此,本文建议采取钢结构设计中的方法,即在纵向

木柱之间设置剪刀撑,剪刀撑和上下弦之间用螺栓连接,如图11所示。

4.2 枋的设置

虽然现有的木结构房屋也设有枋,但枋的主要作用是为了加强节点的连接,而为了提高穿斗木结构房屋的整体空间性能,本文建议在穿斗木结构房屋的柱上下端同样也设置枋,如图12所示,枋可以设在木梁的下方,但不同的是,枋应贯通各木柱,使其作用类似于砌体结构中的圈梁,使整体结构形成“弱框架”,既可以增强结构的整体性,又能够保证节点的耗能性能。

4.3 加强檩条、柱、梁之间的连接

虽然节点的存在能使结构顶部加速度响应减小,但由于这样的半刚性连接使整体刚度较小,导致结构顶部位移较大,而当位移较大时,节点比较容易松动甚至脱落,从而引起结构倾斜,甚至倒塌。因此,应在保证节点耗能性能的前提下,适当增强节点的连接。在施工时要认真扣榫,保证榫卯节点紧密;檩条和穿斗木柱顶的连接节点应采用燕尾榫,如图13所示,而不宜用平榫,且燕尾榫长度不能过短;梁柱节点接头可在梁下设置托木,如图14所示,这类类似于钢结构梁柱螺栓连接时在梁端下设置的钢托板,这样可以将梁端剪力传递给托木来承受,从而提高梁的抗震抗剪性能。

4.4 加强围护墙体与构件的连接

在穿斗木结构房屋中,围护墙属于非承重墙,且主要采用生土筑成。在地震中由于墙体和木构件之间缺少有效连接,使倒塌伤人事故时有发生。为了增强连接,可以沿墙高设置藤条、竹条等做成的拉结网,类似于砌体结构中的墙体水平构造钢筋,或者沿木梁长度方向每隔一定间距钉上双面木板夹住隔墙,以防止地震时墙体倒塌。

5 结论与建议

本文以典型的穿斗木结构房屋为研究对象,通过ANSYS有限元软件对其进行静力分析及地震响应分析,在此基础上探讨加强结构抗震性能的措施,得到的主要结论如下:

(1)结构的第一振型为横向平动,第二振型为纵向平动,第三振型出现了扭转。由于结构的平动第二周期与扭转第一周期较为接近,因此在地震作用下可能发生平扭耦联现象。

(2)由于结构抗侧刚度较小,整体性较差,使结构在重力荷载作用下纵横向位移均较大。

(3)不同强度地震下,加速度响应均在柱底最大,越往上越小,而位移响应均在柱顶最大,越往下越小;整体结构的变形属于剪切型变形。在地震作用下,由于榫卯节点的存在,使结构顶部受到的地震力较小,但由于其刚度较小,使顶部位移较大。

(4)结合有限元分析与实际施工特点,提出在中柱间设置剪刀撑、在梁下设置枋、加强檩条、柱、梁之间的连接、加强围护墙体与构件的连接等措施来提高穿斗木结构房屋的抗震性能,可为同类设计提供参考。

参考文献 References

- [1] 谷军明, 缪升, 杨海名. 云南地区穿斗木结构抗震研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(s): 205-210.
GU Junming, MIAO Sheng, YANG Haiming. Study on seismic performance of through type timber frame in Yunnan[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2005, 27(s):205-210.
- [2] 何玲, 潘文, 杨正海, 等. 村镇木结构房屋震害及抗震技术措施[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(6): 96-101.
HE Ling, PAN Wen, YANG Zhenghai, et al. Seismic Damage and Seismic Countermeasures of Timber Houses in Villages and Towns[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(6): 96-101.
- [3] 赵鸿铁, 张锡成, 薛建阳, 等. 中国古建筑木结构的概念设计思想[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2011, 43(4):457-463.
ZHAO Hongtie, ZHANG Xicheng, XUE Jianyang, et al. Conceptual design thoughts of Chinese ancient timber buildings[J]. J

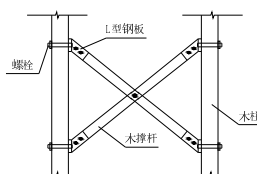


图11 剪刀撑设置示意图

Fig.11 Sketch of the diagonal bridging

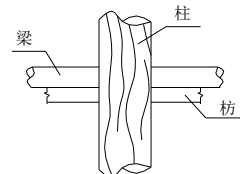


图12 枋的设置示意图

Fig.12 Sketch of the girder

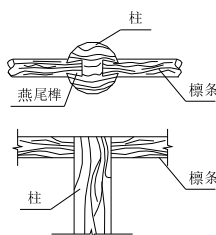


图13 檩条与柱连接示意图

Fig.13 Sketch of the purlin-column joint

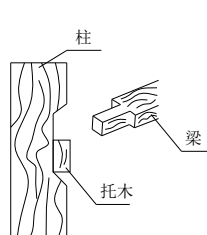


图14 梁端设置的托木示意图

Fig.14 Sketch of the support block at the beam end

- of Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2011, 43(4): 457-463.
- [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:自然科学版,2010,42(3):315-318.
ZHAO Hongtie, DONG Chunying, XUE Jianyang, et al. The experimental study on the characteristics of mortise-tenon joint historic timber buildings[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(3):315-318.
- [5] 薛建阳,张鹏程,赵鸿铁.古建筑木结构抗震机理的探讨[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2000,32(1):8-11.
XUE Jianyang, ZHANG Pengcheng, ZHAO Hongtie. Study on the aseismic mechanism of historic timber structural building[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2000, 32(1): 8-11.
- [6] 张鹏程.中国古代木构建筑及其抗震发展研究[D].西安:西安建筑科技大学,2003.
ZHANG Pengcheng. Study on Structure and Its Seismic Behavior Development of Chinese Ancient Timber Structure Buildings[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. and Tech., 2003.
- [7] 乔迅翔.中国古代木构楼阁的建筑构成探析[D].南京:东南大学,2004.
QIAO Xunxiang. Research of the Architectural Constitution of Multi-storied Pavilions and Buildings in China[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [8] 苏军.中国木结构古建筑抗震性能的研究[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 Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [9] 李彬彬.传统木结构建筑抗震性能试验研究[D].武汉:武汉理工大学,2009.
LI Binbin. Experimental Study on Seismic Performance of Traditional Wooden Structure[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [10] SUI Yan, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. Experimental research on the lateral stiffness of ancient wooden Dougong[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 41(5):668-671.
- [11] 黄曙.农村典型木结构房屋的抗震性能及加固措施研究[D].长沙:湖南大学,2009.
HUANG Shu. Study on Seismic Behaviors and Strengthening Measure of Typical Rural Wooden House[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [12] 曾攀.有限元分析基础教程[M].北京:清华大学出版社,2008.
ZENG Pan. Fundamentals of Finite Element Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [13] 马辉.中国高台基本结构古建筑动力特性及地震反应研究[D].西安:西安建筑科技大学,2011.
MA Hui. Research on the Dynamic Characteristic and Seismic Response of Chinese High Pedestal Ancient Timber Buildings[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [14] XUE Jianyang, ZHAO Hongtie, ZHANG Pengcheng, et al. Study on the seismic behaviors of China ancient wooden building by shaking table test[C]//Proceedings of the Seventh International Symposium on Structural Engineering for Young Experts. Tianjin, China. 2002.
- [15] GB 50005-2003 木结构设计规范 [S].北京:中国建筑工业出版社,2005.
GB 50005-2003 Code for design of timber structures [S]. Beijing: China building industry press, 2005.
- [16] 熊海贝,康加华,吕西林.轻型木结构房屋动力特性测试及研究[J].同济大学学报:自然科学版,2011,39(3):346-352.
XIONG Haibei, KANG Jiahua, LÜ Xilin. Test and Investigation on Dynamic Characteristics of Wood-frame Constructions[J]. JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY: NATURAL SCIENCE, 2011, 39(3):346-352.

Study on the seismic response and construction measure of the *chuan dou* wooden structure

WANG Bo, BAI Guoliang, WANG Chaoqun, CHEN Leijie

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: *Chuan dou* wooden structures are common residential buildings in China southwestern rural areas. This paper takes a representative *Chuan dou* wooden building as the object of study, and establishes a finite element model with ANSYS to analyze the static response and seismic response under different earthquake intensities. The results show that the second translation period is almost the same as the first torsion period, so the structure may present a translation-torsion coupling phenomenon. Under different intensities earthquakes, acceleration response is severest at the bottom of columns and lightest on the top, while the displacement response is severest on the top of the column and lightest at the bottom. The tenon-mortise, which is advantage of fighting against the earthquake, could absorb and dissipate earthquake energy, so the acceleration response at the top of the structure is relative lighter, but the displacement response at the top of the structure is relative severer and the integrity of structure is poor because of the Semi-rigid joints and weak longitudinal stiffness. Based on the finite element analysis results and actual construction characteristics, some measures are put forward to improve the seismic performance of structures, such as setting diagonal bridging in the column, setting girder under the beam, strengthening the connection of joint, and strengthening the connection of wall and components.

Key words: *Chuan dou* wooden structures; dynamic characteristics; seismic response; construction measures; finite element analysis

(本文编辑 吴海西)