

西安鼓楼抗震性能分析

赵鸿铁^{1,2}, 马 辉¹, 薛建阳^{1,2}, 张凤亮¹, 张锡成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:分析了西安鼓楼的防震构造,建立了鼓楼上部木结构的三维有限元模型,并对有限元模型输入 El centro 波(加速度峰值 400 gal)作为地震激励,进行了柱根和柱顶的位移及加速度曲线等分析.结果表明:防震构造有利于鼓楼的抗震,鼓楼柱础与木柱的连接形式具有一定的隔震效果,上部木结构具有减震耗能的能力,鼓楼具有良好的抗震性能.

关键词:西安鼓楼;木结构;防震构造;抗震性能;有限元分析

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)01-0001-06

我国是一个地震多发的国家,很多古建筑都位于较高的地震烈度区,其中西安鼓楼就位于 8 度设防的地震烈度区内.据文献记载,自 1582 年以来,西安鼓楼共经历了 5 次 4 级以上较大地震,鼓楼都表现出较好的抗震性能,虽然有所损坏,但整体结构仍然良好,如图 1 所示.最近一次地震是四川汶川 8.0 级特大地震,其对鼓楼的破坏程度接近 6 度左右,鼓楼只是出现了一些较小的缝隙,这说明鼓楼具有一定的抗震能力.为了更好的了解西安鼓楼的抗震性能,本文首先从建筑防震措施方面来研究其防震机理,然后对鼓楼上部木结构进行了地震有限元分析.



图 1 西安鼓楼

Fig. 1 Xi'an Drum Tower

1 西安鼓楼结构特点

西安鼓楼始建于明太祖洪武十三年(公元 1380 年),整体高 34 m,由 9 m 高的台基和 25 m 高的歇山顶重檐两层木结构组成.鼓楼高台基为长方形,东西向长为 52.6 m,南北向宽为 38 m,台基内部主要为人工分层夯实的素填土,外部为青砖砌筑.台基南北正中辟有高、宽各为 6 m 券洞门.上部木结构东西向长 38.6 m(面阔七间),南北向宽为 19.8 m(进深三间),通高中心柱 12 根、周围有 20 根木柱,西安鼓楼建筑中间立柱高 18 m,边柱高 13.2 m,柱直径为 680~700 mm;鼓楼的主梁截面尺寸大致为 600×400 mm.柱下端支承在台基柱础上,木柱之间由较大高跨比的梁连接,梁与柱采用榫卯连接,形成歇山顶式木框架.图 2 鼓楼的剖面图和平面图.

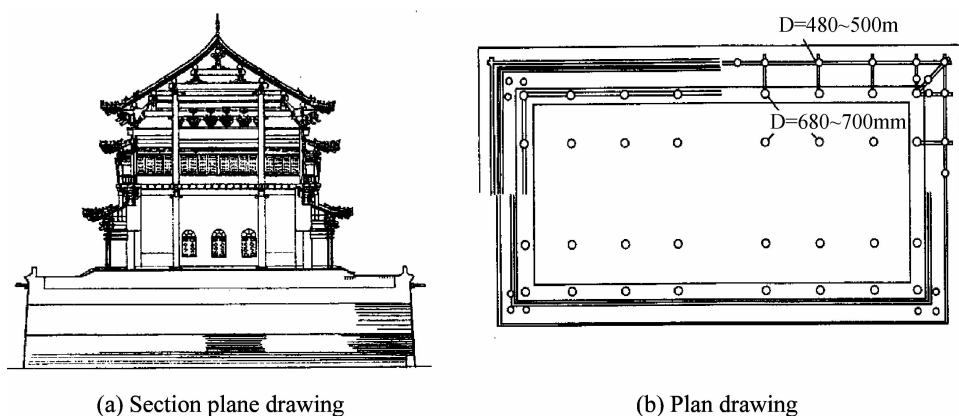
2 防震构造

为了更好的了解西安鼓楼的防震构造,本文主要从鼓楼的下部高台基和上部木结构两部分进行分

收稿日期:2010-11-16 修改稿日期:2011-12-20

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基金资助项目(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.



(a) Section plane drawing

(b) Plan drawing

图2 鼓楼的剖面图和平面图

Fig. 2 The section plane drawing and plan drawing of Drum Tower

析,下面主要对它们的结构特点和做法等进行论述.

2.1 下部高台基

高台基是指古建筑台基建造在一个人工的基础上而形成的一种特殊的基础.在高台基上建造房屋就形成了高台基建筑.西安鼓楼是典型的高台基木结构古建筑,与普通木结构古建筑相比,其特点是台基下面拥有一个高高的人工基础,而台基的做法和一般的古建筑台基做法是一样的.由于西安鼓楼和故宫建筑群都是明代重要的建筑,因此可以参考故宫的基础^[1]做法来分析鼓楼高台基的构造特点.整个高台基构造,大致顺序表示如下:(1)木桩(2)圆木筏形层(3)碎砖粘土层(4)灰土层(5)砖砌体.木桩层和圆木筏形层的采用类似现代的桩基础形式,木桩上有圆木作为承台,这种做法可以有效的防止上部木结构产生不均匀沉降,保证了鼓楼上部木结构的安全稳定.圆木层上面是碎砖粘土层和灰土层,碎砖粘土层一般由是一层碎砖一层粘土的夯实而成;灰土中一般会加入糯米一层,可以有效的加强基础灰土的粘结力.在地震作用下,基础的木柱具有一定的变形,而圆木层则可以相对的滑动,这样就起到了减震的效果;木承台上面的人工夯土层特别是灰土层,由于加入了糯米层,这就使得夯土层变柔,起到了隔振耗能的作用.从上面分析可知,良好的地基基础是鼓楼上部木结构安全稳定的重要保证,单纯从构造方面看,偏柔的人工基础类似一个隔震耗能层,其对鼓楼抗震的性能是有利于的,这里暂不讨论高台基的存在是否会影响上部结构的力学性能.

2.2 上部木结构

鼓楼的上部木结构和典型的中国木结构古建筑结构形式是一样的,下面主要从柱础与木柱的连接方式、木构架及其榫卯连接、铺作层、屋架体系等方面来分析鼓楼上部木结构的防震构造.

2.2.1 柱础与木柱的连接

鼓楼的柱础与木柱的连接形式是我国木结构古建筑的特点之一.这种连接方式是木柱直接浮搁置在柱础石的水平顶面上,使得上部木结构与下部基座断离开来,因此木柱柱根是不会传递弯矩的,改变了结构的内力传递方式.柱础只对柱根提供竖向支持力和一定的水平摩擦力,其既可适当的滑移又可发生转动.文献[3]中给出了柱脚滑移的判别条件即当柱根加速度反应与重力加速度的比值一旦超过柱与础石之间的静摩擦因数,柱子就会发生滑动.在水平地震作用下,这种滑动趋势随着地震作用的增大越明显,从而减轻了地震对上部木结构的作用.这种处理做法是我国古代建筑技术的一大特点,类似现代的隔震处理,起到一定的隔震作用.此外,露明的柱础石可以有效的保证木柱柱根的木材不被腐蚀,提高了木柱的耐久性能.

2.2.2 木构架及榫卯连接

西安鼓楼采用木构架承重,这种结构形式类似于框架结构形式,墙壁不承受竖向荷载,只起到围护和隔挡的作用.鼓楼木构架主要由中心柱12根,周围20根圆柱承重,并且梁、柱等构件之间均采用榫卯连接.鼓楼木构架的整体刚度主要是由较大高跨比的梁来实现,高跨比越大,其抗弯刚度越大;由于这种

高抗弯刚度梁的存在,这就使得它与木柱连接处的内力较大,地震时这种内力可能会急剧增大,对木构架是不利的,所以梁柱之间的榫卯连接可以有效的减轻内力集中.此外,榫卯连接的另一个特点就是其节点刚度是变化的、不是定值,刚度与连接变形有密切关系,它是一种典型的半刚性节点.所谓半刚接节点是指比刚接点变形大而比较接点变形小的特点,介于刚接点与铰接点之间的节点连接.所以这种连接方式在地震时可以吸收部分地震能量,缓和整个结构的地震反应,起到了耗能的作用,对于鼓楼的抗震是十分有利的.

2.3 铺作层

铺作层是指柱架层与梁架层或平座层之间的过渡层.铺作层主要由纵横交叉、互相咬合、层层铺叠的斗、拱、昂、枋等组成,其基本构件主要是水平放置的方形斗、弓形的拱和斜置的昂.铺作层在竖向剖面内主要呈倒梯形,座于柱头之上,上承梁架层.梁架与柱架间铺作的单朵整体转角,各层间摩擦系数及屋盖的重量决定了斗拱层所能传递的摩擦力的大小,限定了其上梁架层所能发生的最大水平加速度.上部荷载穿过斗拱逐渐地将上部荷载集中于柱头上,与采用柱支承梁的简单形式相比要有利的多.鼓楼结构屋顶荷载正是通过这种结构形式传递给檐柱与内柱的,然后借助木柱将其传递到地基上.在水平地震作用下,坐斗与柱头之间的滑移摩擦可以消耗一部分地震能量,减轻地震对结构作用;斗拱在竖向地震作用下经过多重斗拱之间的磨合与变形,具有较大的柔性,犹如一个弹簧减震器一样,在剧烈颠簸中能消耗掉相当部分的地震能量,从而防止了主体结构在振动时发生较大的破坏,对结构的抗震十分有利.除此之外,斗拱因其外形特点,再加上表面图彩绘制,因而具有建筑装饰的效果.

2.4 屋架体系

屋架体系是指木结构古建筑的屋顶部分,屋架体系主要依靠横向大梁承重,横向大梁为一品简支梁层叠相抬的平面复合梁架,以柱头铺作为支座,一层上再抬一层,层层缩进举高从而构成整体呈三角形的举架.各层简支梁在距梁头一椽投影长度位置设蜀柱(瓜柱),蜀柱头上再安放沿纵向布置的檩,檩上密排横向布排的椽,椽上铺望板,板上覆以瓦茸、鸱吻等,从而形成厚重的屋架层.鼓楼的屋架层占据着其上部木结构的大部分质量,保证梁架层的稳定就显得十分重要了,由于坐斗与柱头是分离的,因此可以将鼓楼的梁架整体简化成一个三角形质量块坐落于柱头上,如图3所示.鼓楼的梁架跨度为 $L=19.8$ m, 竖向高度为 $H=7$ m, 并假设屋架重量为 M ; 柱头与坐斗间的静摩擦力为 f , 静摩擦系数为 μ ; 水平地震作用为 F_{EK} , 竖向地震作用为 F_{VK} , 对 B 点取弯矩, 要保证屋架层稳定, 则应满足以下条件:

$$F_{EK} \cdot \frac{H}{3} \leq (G - F_{VK}) \cdot \frac{L}{2} \quad (1)$$

根据国家建筑抗震设计规范,鼓楼在水平地震和竖向地震作用下,有

$$F_{EK} = \alpha_1 G_{eq} \quad (2)$$

$$F_{VK} = 0.65 F_{EK} \quad (3)$$

其中 α_1 为水平地震影响系数,西安为 8 度抗震设防区,取 $\alpha_1 = 0.16$; G_{eq} 为等效总重量荷载代表值,对于屋架层取 $G_{eq} = G$, 将(2)和(3)式代入(1),得到(1)式左边为: $0.373 G$, 右边为: $8.870 G$, 故鼓楼的屋架层满足抗倾覆要求.

当水平地震作用小于柱头与坐斗间的摩擦力时,屋架层在柱头上不会产生水平滑移,则有:

$$F_{EK} \leq (G - F_{VK}) \cdot \mu \quad (4)$$

求解(4)式得: $\mu \geq 0.179$, 即当柱头与坐斗间的静摩擦系数大于 0.179 时(木材间的静摩擦系数显然是符合要求的),则可以满足鼓楼屋架层的抗滑移要求.

此外,厚重屋架层是木构架之间的连接趋于密合,是加强梁柱结构之间的整体性和稳定性,也是维

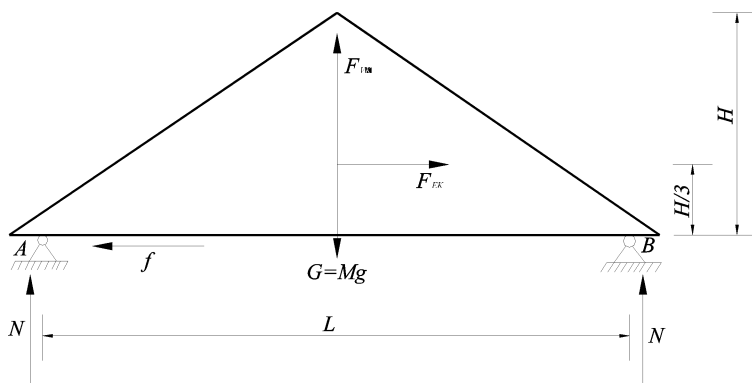


图3 梁架层受力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the beams for the roof layer

持柱础底部抗滑移能力等的必不可少条件。

2.5 其他构造

鼓楼建筑结构平面是典型的矩形布置方式,具有对称性,质量、刚度分布较均匀,这就使地震时弯曲振动和扭转振动耦合较轻,防止了局部合成内力过大,这主要是由于刚度中心与质量中心位置偏差较小的原因。为了改善角柱的受力状态,鼓楼采用将角柱两边的立柱用具有较大高跨比的梁来连接,再在其上立一圆柱用以将屋顶荷载的一部分分配给边柱,从而减弱了角柱的受力强度,而中间部分则采用通柱提高了其承载能力。另外,这种梁构件的添加使得整个结构在对角线方向上弯曲刚度增大,从而使结构整体性加强,同时也使建筑平面各个方向上的刚度趋于均匀,这些都有利于抗震。此外,平板枋及其他连接件的使用都提高了西安鼓楼的整体结构刚度和构件的抗弯刚度。鼓楼底层墙壁将柱子完全包在墙内,有效的提高了鼓楼结构体系沿墙体方向的抗侧移能力,增强了结构的整体性,在某种意义上说发挥了剪力墙作用,抵制部分水平地震产生的不利影响。

3 鼓楼上部木结构有限元分析

3.1 有限元模型的建立

为了更好的了解鼓楼上部木结构的抗震性能,根据鼓楼的结构特点并结合中国古建筑木结构的特征,利用 ANSYS 软件建立鼓楼上部木结构有限元模型。对鼓楼的上部木结构,主要考虑其木构架,其中梁、柱均采用 Beam188 单元;梁柱的榫卯连接采用 Combin14 弹簧单元来模拟其半刚性特性;斗拱模拟采用 Combin14 弹簧单元;厚重屋顶采用 Mass21 质量单元并以集中质量的形式加载在柱顶上。如图 4 所示。

榫卯节点和斗拱的刚度系数参照文献[3~7]中所给出的值,其中榫卯连接节点的转动刚度为 $K_{\theta_x} = K_{\theta_y} = K_{\theta_z} = 296.711 (\text{kN} \cdot \text{m}/\text{rad})$,榫卯柱架水平刚度为 $K_x = 113.3 (\text{kN}/\text{m})$, $K_z = 127950 (\text{kN}/\text{m})$;斗拱的水平侧移刚度为 $K_x = 2197.3 (\text{kN}/\text{m})$, $K_z = 127950 (\text{kN}/\text{m})$,转动刚度为 $290.017 (\text{kN} \cdot \text{m}/\text{rad})$ 。柱础与木柱的连接弹簧刚度为 $52 (\text{kN}/\text{m})$ [6]。木材和夯土的力学性能指标 [8] 见表 1。

3.2 地震有限元分析

采用时程分析法对鼓楼进行地震反应分析,根据国家建筑抗震设计规范和西安设防烈度要求,选择加速度峰值为 400 gal El Centro 波作为地震波激励,时间间隔为 0.02 s ,持时为 20 s 。对鼓楼的上部木结构输入上述地震波进行地震反应分析,为了了解柱础隔震特点和整体木结构的抗震性能,取木构架通柱柱根及柱顶节点作为研究对象,分别得出柱根及柱顶的位移和加速度响应曲线,如图 5 所示。

从图 5 柱根位移及加速度曲线中可知,在 400 gal 地震激励作用下,通柱柱根的位移为 3.755 cm ,加速度为 $3.801 \text{ m}/\text{s}^2$ 。根据文献[3]的判别条件,柱脚滑移的判别条件即当柱根加速度反应与重力加速度的比值一旦超过柱与础石之间的静摩擦因数,柱子就会发生滑动。本文计算得到的柱根加速度与重力加速度比值为 0.388 ,与实验得到的柱与柱础间的摩擦系数 $0.4 \sim 0.5$ 左右较接近,柱根将发生滑移,但滑移不是很大。柱根的动力系数为 0.950 ,动力系数小于 1 ,说明柱础发生滑移起到了隔震减震的作用,

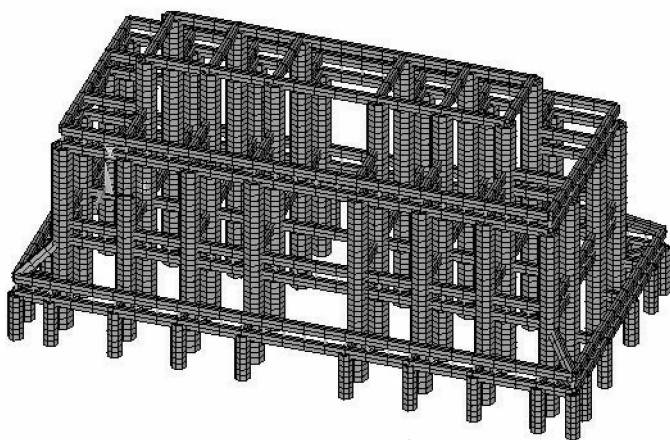


图 4 鼓楼上部木结构有限元模型

Fig. 4 The finite element model of the upper timber structure of the Drum Tower

表 1 木材和夯土的主要力学参数

Tab. 1 The main mechanical parameters of wood and rammed soil

性能	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 / 10^7 Pa	泊松比
夯土	1870	2.09	0.33
木结构	420	830	0.25

验证了柱础与柱的这种连接方式具有一定的隔震减震效果,对鼓楼的抗震是有利的。

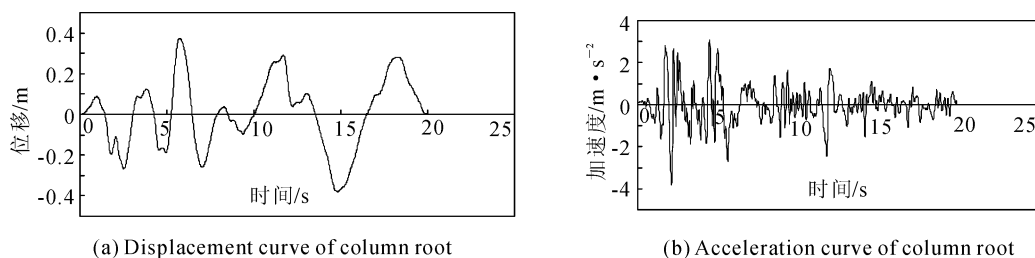


图5 柱根位移及加速度曲线

Fig. 5 Displacement and acceleration curves of column root

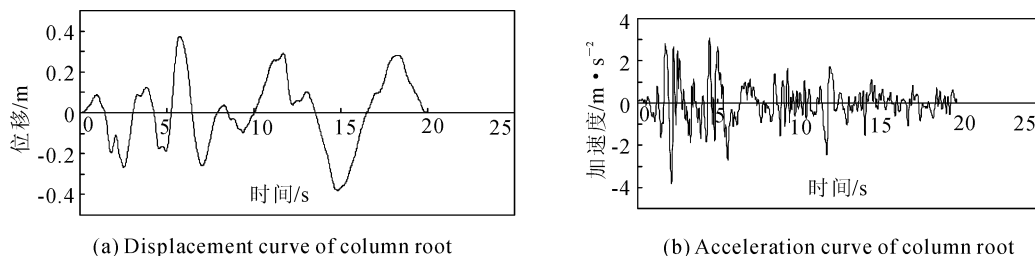


图6 柱顶位移及加速度曲线

Fig. 6 Displacement and acceleration curves of column head

在图6柱顶位移及加速度曲线中可知,通柱柱顶的位移为16.58cm,加速度为 3.311m/s^2 ,动力系数为0.828,动力系数小于1,这一计算结果与文献[5]中的实验结果趋势是一致的,说明了整体木结构具有减震的能力。从上文的分析中可知,木结构具有减震的能力主要是因为柱础的隔振,梁柱间榫卯连接的摩擦耗能,铺作层的耗能减震以及古建筑的建筑构造措施等等。从上述分析可知,鼓楼上部木结构具有良好的抗震性能,这也是鼓楼经历数次地震依然屹立在关中大地的原因所在;同时通过对鼓楼上部木结构的有限元分析,也进一步验证了前文关于鼓楼防震构造的分析结论。

4 结 论

本文主要是从防震构造和有限元分析两方面来分析西安鼓楼的抗震性能,得出以下结论:

- (1)鼓楼下部的人工基础具有一定的变形,对于鼓楼的抗震是有利的。
- (2)木柱直接浮搁置在柱础上可以起到滑移隔震的作用;木构架的榫卯半刚性连接具有摩擦减震的作用;铺作层起到了耗能减震的作用;屋架层保证了结构在地震作用下的稳定性能;鼓楼建筑结构平面形式、其他连接件的使用以及底部墙体等对鼓楼的抗震都起到了一定的作用。
- (3)通过对鼓楼上部木结构的有限元分析,在400 gal地震激励作用下,通柱柱根的位移为3.755 cm,加速度为 3.800m/s^2 ,柱根的动力系数为0.950,说明柱根发生滑移起到了隔震减震的作用;通柱柱顶的位移为16.58 cm,加速度为 3.311m/s^2 ,动力系数为0.828,说明柱础以上的木结构具有良好的减震隔震性能。
- (4)通过上述分析可知,西安鼓楼具有良好的抗震性能。

参考文献 References

- [1] 白丽娟. 故宫基础工程[J], 古建园林技术, 1996(2):38-44.
BAI Li-juan: Foundation engineering of the imperial palace[J]. Traditional Chinese Architecture and Gardens, 1996 (2):38-44.
- [2] 薛建阳,张鹏程,赵鸿铁. 古建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):9-12.

- XUE Jian-yang, ZHANG Peng-cheng, ZHAO Hong-tie. Study on the aseismic mechanism of historic timber structural building [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 2000, 32(1): 9-12.
- [3] 姚侃, 赵鸿铁. 木构古建筑柱与柱础的摩擦滑移隔震机理研究[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 127-131
- YAO Kan, ZHAO Hong-tie. 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
- [4] 姚侃, 赵鸿铁, 葛鸿鹏. 古建木结构榫卯连接特性的试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 168-173.
- YAO Kan, ZHAO Hong-tie, GE Hong-peng. Experimental studies on the characteristic of mortise-tenon joint in historic timber buildings [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23 (10) :168-173.
- [5] 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 Univ. of Arch. & Tech., 2009.
- [6] 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 Chinese ancient timber structure [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [7] 赵均海, 俞茂宏, 杨松岩, 等. 中国古代木结构有限元动力分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(1): 32-35.
- ZHAO Jun-hai, YU Mao-hong, YANG Song-yan, et al. Dynamic analysis for Chinese ancient timber structure by FEM [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33 (1): 32-35.
- [8] 俞茂宏, 王源, 俞涛, 等. 西安古城墙和钟鼓楼: 历史、艺术、科学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2009.
- YU Mao-hong, WANG Yuan, YU Tao, et al. Xi'an ancient city wall and the bell-tower & drum-tower: history, art, science[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2009.

Analysis on the seismic performance of Xi'an Drum Tower

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

(1. School of Civil Eng., Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

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

Abstract: The antiseismic constitution of Xi'an Drum Tower was analyzed in this paper. The finite element model of the upper timber structure in Drum Tower was established. The EL Centro wave (peak value of acceleration reaches 400gal) were chosen as input excitation on the finite element model, and the displacement curves and acceleration curves for the column root and column head was analyzed. The results show that the antiseismic constitution is benefit for the antiseismic performance of Drum Tower; the connection form for the column bases and columns has the effect of shock isolation; and the upper timber structure has the capacities of shock absorption and dissipation energy. Drum-Tower therefore has a good antiseismic performance.

Key words: Xi'an Drum-Tower; timber structure; antiseismic constitution; antiseismic performance; finite element analysis