

大雁塔震害调查及有限元模拟分析

陈平¹, 陈厚飞¹, 魏俊亚²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055 2. 天津城市建设学院, 天津 300381)

摘要: 5.12 汶川地震对大雁塔造成了较大的损坏, 为了有效地保护大雁塔这一人类文化遗产, 在震害调查与分析的基础上, 运用大型有限元软件 ANSYS 建立大雁塔三维实体模型, 进行了模态分析和时程分析, 通过输入不同地震波, 计算出结构的位移反应与层间位移。结果表明: 不同地震波输入时结构上部位移反应均较大; 塔体的最大层间位移发生在结构薄弱层第五层、第六层。在震害与理论分析的基础上, 提出了大雁塔保护加固建议。

关键词: 大雁塔; 震害; 时程分析; 保护加固

中图分类号: U442.55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2010)02-0037-05

Investigation and Finite Element Analysis of Earthquake Damage on Big Wild Goose Pagoda

CHEN Ping¹, CHEN Hou-fei¹, WEI Jun-ya²

(1. School of Civil Engineering Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

2. Tianjin Institute of Urban Construction Tianjin 300381, China)

Abstract Wenchuan earthquake on May 12th caused great damage to the Big Wild Goose Pagoda—a cultural heritage of mankind. In order to protect the pagoda effectively, the large-scale finite element software ANSYS is used to establish a model based on the investigation and analysis of earthquake damage. A modal analysis and a transient analysis are then conducted. The displacement of the structure and the inter-drift of the floors are calculated by inputting different seismic waves. It is shown through the results that the upper displacements are larger and that the largest inter-drift of the tower occurs in the weak layer of fifth, sixth floor. Reinforcement proposals are proposed to protect the Great Wild Goose Pagoda on the basis of the earthquake damage and theoretical analysis.

Key words Big Goose Pagoda; earthquake damage; transient analysis; reinforcement

0 引言

大雁塔位于西安市南郊的慈恩寺, 其最初的设计与奠基人为唐代高僧玄奘法师, 始建于 652 年, 起初为 5 层, 701 年改建为 10 层, 砖砌, 909 年遭兵火剩 7 层, 930 年整修保留至今^[1], 如图 1 所示。这座已有 1300 多年历史的著名古塔已成为西安古都历史文化的标志和象征。

大雁塔竖立三秦大地已逾千年, 这本身说明了其具有良好的抗震能力; 然而千年的历史也给这座名塔留下了斑斑伤痕^[2]。5.12 汶川地震之后, 西安市及周边大小古塔都受到不同程度的破坏, 大雁塔震害尤为严重。本文总



图1 大雁塔

Fig.1 Big Wild Goose Pagoda

收稿日期: 2009-11-09. 基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目(项目编号: 03JK195); 国家科技部科技厅行动计划[建科][2001]第 002 号(2001~2005).

第一作者简介: 陈平(1956-), 男, 教授. 主要研究方向: 古建筑的保护与研究. E-mail: cping86@163.com

总结了大雁塔经历汶川地震后主要的震害特点,运用有限元软件 ANSYS 建立了实体单元模型,通过输入天津波、E1-centro 波、西安人工波三组典型地震波,计算结构的位移反应与最大层间位移,从理论上论证了大雁塔的主要震害特点,为加固保护提供有益的参考。

1.5 12大雁塔震害概况

2008年5月12日汶川地震后,西安市有关方面即组织专家对大雁塔进行了现场勘查,塔内部破坏严重(图2~图5)。其主要震害情况见图2~图5



图2 五层东券洞上部开裂
Fig.2 Cracks of 5th floor east hole



图3 六层楼梯裂缝
Fig.3 Cracks of 6th floor staircase



图4 六层西券洞上部开裂
Fig.4 Cracks of 6th floor west hole

大雁塔四面中轴线处分别开有洞口,使得中轴线方向抗剪能力极大减弱,在强烈地震中,砖塔沿竖向中轴线券洞上方产生严重的纵向劈裂裂缝,破坏以五层、六层券洞上方裂缝尤为严重,结构表面粉刷已被震落,说明结构已产生较为明显的脆性破坏.这种破坏已严重危及大雁塔塔体的整体稳定性和安全性^[2].

2 有限元模拟分析

2.1 大雁塔的结构特点及截面几何尺寸

大雁塔是中国古塔仿木楼阁式砖塔的代表,砖砌单壁中空,逐层收分.平面方形,塔身及塔顶总高 59.05 m,包括基座总高 63.25 m.表 1 为塔体各层截面实录几何尺寸^[2].



图5 七层西券洞上部开裂
Fig.5 Cracks of 7th floor west hole

表 1 大雁塔几何尺寸

Tab 1 Physical dimension of Big Wild Goose Pagoda

层号	边长 /m	层高 /m	墙厚 /m	层面积 /m ²	塔室宽 /m	墙断面积 /m ²	券洞宽 /m	券洞高 /m
七	11.60	5.2	4.22	134.56	3.17	124.5	1.4	2.3
六	13.92	6.4	4.80	193.77	4.32	175.1	1.5	2.4
五	16.23	6.7	5.78	263.41	4.67	241.6	1.5	2.5
四	18.20	6.65	6.50	331.24	5.20	304.2	1.7	2.6
三	20.33	7.15	7.49	413.31	5.35	384.7	1.8	2.6
二	22.69	7.37	8.31	514.84	6.07	478.0	1.85	2.7
一	25.20	10.36	9.15	635.04	6.90	587.4	1.9	2.7

2 2 材料特性的确定

经实际调查及查阅有关资料^[3], 大雁塔砖标号可取 MU15, 砂浆取 M0.4 砌体的弹性模量参照砌体规范, 取 $f = 1.12 \text{ MPa}$, $E = 700f = 784 \text{ MPa}$ 砌体密度 ρ 取 1900 kg/m^3 , 泊松比 ν 取 0.15, 阻尼比 ξ 取 0.02

2 3 计算模型

本文采用 SOLID95 实体单元建立大雁塔简化计算模型, 即把大雁塔每层简化为回字形截面的实体单元, 不考虑塔体外檐, 计算模型如图 6 所示. 采用的三维 20 节点实体单元 SOLID95 具有可塑性、较好的延伸性、大变形、大偏转能力, 同时具备选择不同结果输出的能力.

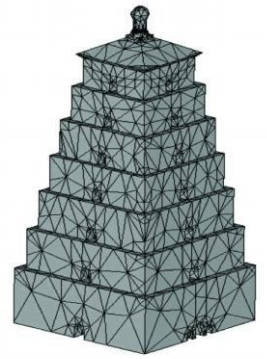


图6 计算模型
Fig.6 Calculating model

经模态分析计算, 计算模型得到的结构自振周期和实际检测结果比较接近^[3], 所以采用该模型模拟实际结构的时程分析是可行的, 见表 2

3 大雁塔模型的时程分析^[4]

3 1 地震波的选取

由于缺乏校正的汶川地震波实际记录, 本文主要选用两条典型地震记录以及一条人工地震波进行计算分析. 根据抗震验算要求^[5], 将加速度峰值调整为 0.70 m/s^2 (8度小震) 和 2 m/s^2 (8度中震), 计算采用三维地震波输入, 从 x 方向 (南北) 输入, y 方向 (东西) 与纵向加速度分别折减到原来的 85% 和 65%. 其主要数据参数如表 3 示.

表 2 自振周期实测值与模型计算结果 (s)

Tab 2 Natural period measured value and calculated results

塔名	大雁塔			
	方向	东	西	南 北
振型	I	II	I	II
模型计算值	0.80	0.3	0.80	0.3
实测值	0.67	—	0.67	0.25

表 3 三个地震波的特性

Tab 3 Characteristic of three earthquake waves

地点	方向	记录时间	震级	最大地面加速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	持续时间 / s	特征周期 / s	场地类别
EL-centro	南-北	1940.5.18	7.1	341.7	30	0.55	2
天津波	南-北	1976.11.25	6.9	145.8	19.19	0.9	4
西安人工波	—	—	—	5.4	20.48	0.1	3

3 2 地震反应结果分析

为便于分析, 现将三组地震波时程分析计算所得结构最大位移、最大层间位移、层间位移突变层以及它们出现的部位列表对比, 如表 4 所示.

表 4 三组地震波结构位移反应值对比

Tab 4 Structure displacement of three earthquake waves

地震波	结构最大位移		结构最大层间位移		结构层间位移突变层	
	名称	最大加速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	数值 / mm	部位	数值 / mm	部位
天津波	0.7	114	顶部	31.6	塔刹	五层
天津波	2	327	顶部	90.5	塔刹	五层
EL-centro波	0.7	117.5	顶部	42	塔刹	六层
EL-centro波	2	336	顶部	120.1	塔刹	六层
西安人工波	0.054	4.99	顶部	0.87	塔刹	五层

从计算结果可知, 结构位移值都是随着结构的高度增加而增大的. 从表 4 可以看出, 塔体的最大位移和最大层间位移都发生在塔刹处, 这主要与结构在地震作用下的“鞭梢效应”有关. 结构的层间位移并不是随着结构高度的增加而线性增加, 而是在塔体结构腰部靠上的五层、六层之间有个层间位移突变过程, 如图 7~图 9 所示.

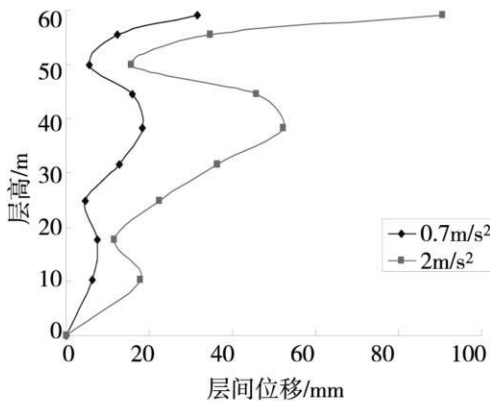


图7 天津波层间位移
Fig.7 Tianjin relative displacement

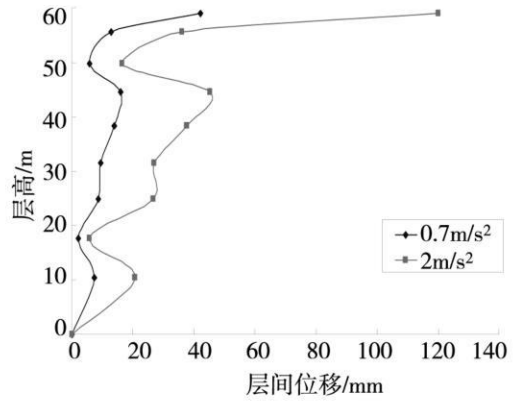


图8 EL-centro波层间位移
Fig.8 EL-centro relative displacement

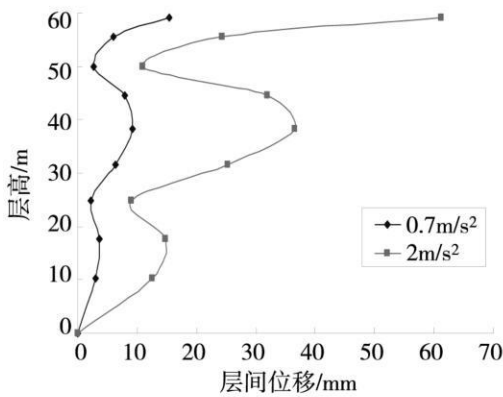


图9 西安人工波层间位移
Fig.9 Xi'an relative displacement

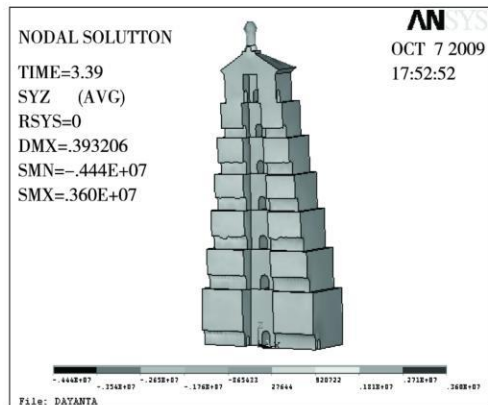


图10 天津波剪力图
Fig.10 Tianjin shear

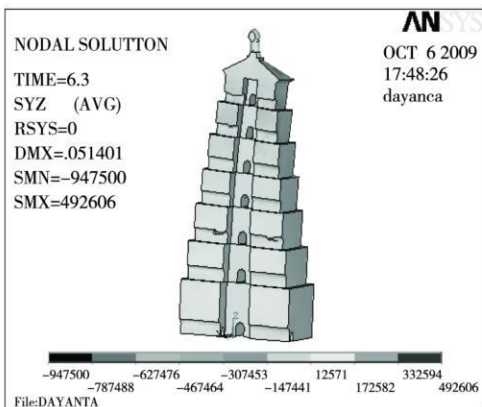


图11 EL-centro波剪力图
Fig.11 EL-centro shear

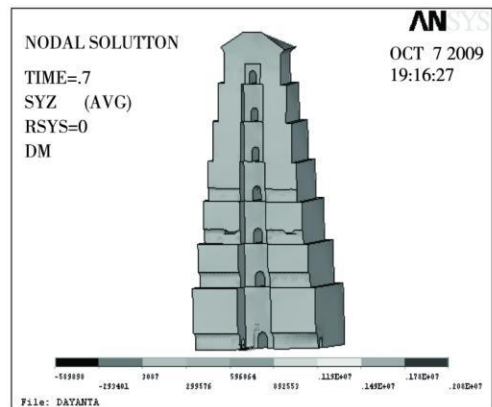


图12 西安人工波剪力图
Fig.12 Xi'an shear

同时,由于塔体四面沿中轴线处都开有券洞,分析结果显示,四面中轴线券洞上部剪力集中现象比较明显,如图 10~图 12所示,其中五层、六层尤为突出。综合结构的层间位移曲线和剪力云图可判断,结构的薄弱层为五六层。

通过对比分析,地震时程计算结果与大雁塔震害调查较为“吻合”。然而,5.12地震对于大雁塔属于远场地震,塔实测周期较短,结构刚度较大,理论上塔体不应该出现如此严重的脆性破坏,距离大雁塔不远的、体型“高瘦”的小雁塔几乎没有破坏的现象。大雁塔为何出现如此严重的脆性破坏?据文献记载,公元

1556年, 陕西关中地区发生 8.3 级强烈地震, 大雁塔塔刹震落, 塔体出现严重裂缝. 而查阅大雁塔的维修与加固史, 历次维修并没有对全塔进行结构的整体加固补强, 结构“内伤”一直未得到有效的根治. 应该说, 汶川地震引起了大雁塔“旧伤复发”, 使原来的结构性损伤暴露了出来. 这对大雁塔的整体稳定性和安全性是一个极大的隐患, 采取必要妥善的加固措施刻不容缓!

4 结论及加固建议

1) 5.12 汶川地震引发了大雁塔“旧伤复发”, 破坏较为严重. 如遇强大外力作用塔体随时有沿中轴线方向劈裂成四块的危险, 必须及时采取有效措施加以修复、加固, 使这座具有极高文物价值和工程技术价值的历史名塔得到妥善保护. 鉴于 1964 年对小雁塔加固维修的成功经验, 建议采用裂缝灌浆补强, 券洞上部外檐处加设软钢箍加固, 提高塔的截面承载力和整体稳定性.

2) 将模型算得结构第一阶自振周期 0.80 s 与实测值 0.67 s 比较, 两者的相对误差为 18.3%, 计算结果比较吻合. 在无条件进行对类似砖石古塔动力特性现场实测的情况下, 采用结构实体有限元模型计算此类古塔的结构特性是可行的.

3) 理论计算揭示与大雁塔类似的砖石古塔在地震中的主要震害特点是: 塔刹震落, 上部震塌, 沿开洞中轴线竖向劈裂. 这与本课题针对陕西地区 10 余座砖石古塔的主要震害调查结果塔刹震歪或震落、顶部震塌等是相吻合的. 同时也得出大雁塔的结构薄弱层是第五、第六层, 这为大雁塔的加固维修提供有益参考.

参考文献:

- [1] 赵立瀛, 等. 陕西古建筑 [M]. 西安: 陕西人民出版社, 1992
- [2] 陈平, 姚谦峰, 赵冬. 西安大雁塔抗震能力研究 [J]. 建筑结构学报, 1999, 20(1): 46-48
- [3] 中国建筑科学研究院工程抗震研究所八室. 西安市大雁塔等六座古建筑动态试验报告 [R], 1988
- [4] 尚晓江. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008
- [5] 丰定国, 等. 工程结构抗震 [M]. 北京: 地震出版社, 1989

(上接第 36 页)

5 结论

通过离散颗粒堆加压的实验与分析, 可以得到颗粒堆中沉降变形特性:

- (1) 在荷载力作用下, 颗粒堆中沉降变形是在一次次“自组织”中完成的;
- (2) 整个沉降变形过程可以用 Poission 过程来描述;
- (3) “自组织”沉降发生的概率计算可用近解.

散体材料结构在岩土工程实际中应用非常广泛, 但其理论研究仍属起步时期, 散体材料结构动力学十分复杂, 我们将进一步地扩展实验, 进一步地深入研究.

参考文献:

- [1] Silva M D, Rajchenbach J. Stress transmission through a model system of cohesionless elastic grains [J]. Nature, 2000, 406: 708-710.
- [2] Hong D C, Quinn P V. Reverse brazil nut problem: competition between percolation and condensation [J]. Phys. Rev. Lett, 2001, 86: 3423-3426.
- [3] 蒋红英, 苗天德, 鲁进步. 二维颗粒介质中力传递的一个概率模型 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 881-885.
- [4] Geng J, Howell D, Longhi E, et al. Footprints in sand: The response of a granular material to local perturbations [J]. Physical Review Letters, 2001, 87(3): 251-258.
- [5] 刘嘉昆. 应用随机过程 [M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [6] 蒋红英, 刘杰. 正交试验在颗粒材料堆自组织分析中的应用 [J]. 甘肃科学学报, 2008, 3(20): 152-156
- [7] 王福保. 概率论及数理统计 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1988