

王华, 张成. 砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析[J]. 华南地震, 2019, 39(4): 125-129. [WANG Hua, ZHANG Cheng. Spatial Simulation Analysis of Earthquake Damage Characteristics of Masonry Ancient Tower Structure[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(4): 125-129]

砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析

王 华¹, 张 成²

(1. 杨凌职业技术学院 建筑工程分院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西安市绿化养护管理处, 西安 710000)

摘要: 采用当前方法对砖石古塔结构的震害破坏特征进行分析时, 构建的砖石古塔有限元模型精度较低, 得到的分析结果与实际不符, 存在分析结果准确率低的问题。提出砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法, 以小雁塔为例, 对砖石古塔结构的震害破坏特征进行分析, 确定小雁塔的几何尺寸和材料特性, 利用 ANSYS 分析软件中的 solid95 实体单元构建小雁塔有限元模型。在小雁塔有限元模型的基础上对砖石古塔结构的震害破坏特征空间进行模拟分析。实验结果表明: 所提方法通过构建高精度的小雁塔有限元模型对砖石古塔结构的震害破坏特征进行分析, 提高了分析结果的准确率。

关键词: 砖石古塔; 结构特征; 地震损害; 有限元

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)04-0125-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.04.018

Spatial Simulation Analysis of Earthquake Damage Characteristics of Masonry Ancient Tower Structure

WANG Hua¹, ZHANG Cheng²

(1. Department of Architecture and Civil Engineering, Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, China; 2. Xi'an Greening Maintenance and Management Office, Xi'an 710000, China)

Abstract: When the current method is used to analyze the damage characteristics of the masonry tower structure, the finite element model of the masonry tower is constructed with low precision, and the analysis results are inconsistent with the actual ones, which is low. The spatial simulation analysis method of seismic damage characteristics of masonry tower structure is proposed. Taking Xiaoyan Tower as an example, the damage characteristics of masonry tower structure are analyzed to determine the geometric size and material properties of Xiaoyan Tower. The solid95 solid element in the analysis software is used to construct the small geese finite element model. Based on the finite element model of Xiaoyan Tower, the seismic damage characteristics of the masonry structure are simulated and analyzed. The experimental results show that the proposed method analyzes

收稿日期: 2019-07-19

基金项目: 杨凌职业技术学院 2018 年度自然科学基金项目(A2018019)

作者简介: 王 华(1982-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事古建筑结构抗震研究和建筑施工管理。

通信作者: 张 成(1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事园林绿化设计与养护管理。

E-mail: shuyue5478956@163.com.

the seismic damage characteristics of the masonry structure by constructing the high-precision geese finite element model, and improves the accuracy of the analysis results.

Keywords: Masonry tower; Structure; Earthquake damage; Finite element

0 引言

文明古国——中国是一个地震多发的国家，中国古代的典型高层建筑之一是砖石古塔，经调查发现我国现在存在的砖石古塔有两千多座^[1]。砖石古塔在汶川大地震和唐山大地震中是一种标志性的建筑物，可以作为主要参照物反应灾区的震害程度^[2]。小雁塔是砖石古塔的一种，具有一千三百年的历史，是全国第一批重点文物保护单位，与故宫和长城相同^[3]。小雁塔通常是由基座内地宫、塔基座、塔檐和塔身等部分构成。平面是由黄泥浆和青砖砌筑而成，为正方形，其中青砖主要分为两大类分别是方砖和条砖^[4]。小雁塔是工程抗震研究和历史地震实物见证的重要资源，需要对砖石古塔结构的震害破坏特征进行分析。当前砖石古塔结构震害破坏特征分析方法存在模型精准度低和分析结果准确率低的问题，需要对砖石古塔结构的震害破坏特征进行模拟分析。

卢俊龙、李晓蕾通过输入不同烈度的三向、双向、单向地震波对砖石古塔的加速度和位移反应进行测试，并对砖石古塔的结构破坏进行分析，根据分析结果获得砖石固态结构的特征变换规律，获得砖石结构在不同加载工况下的变化特点，该方法得到的分析结果与实际不符，存在分析结果准确率低的问题^[5]。李涛、王社良、杨涛结合单参数畸变相似和一致相似率理论在结构动力相似基本方程的基础上对砖石古塔的砂浆和灰砖进行相似设计，选取并调整实验过程中输入的地震波，通过分析动力特征值和实验现象完成砖石古塔结构的震害破坏特征分析，该方法的分析结果误差较大，分析结果准确率较低^[6]。邓志轩、陆伟东、刘杏杏将砖石古塔作为研究目标，采用有限元分析软件通过材性指标和实测数据构建砖石古塔的有限元模型，通过有限元模型对砖石古塔的震害破坏特性进行分析，该方法构建的有限元模型精度较低^[7]。

综上所述，提出砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法。

1 砖石古塔有限元模型

以小雁塔为例对砖石古塔结构的震害破坏特征进行分析。构建砖石古塔有限元模型的具体步骤如下：

1.1 确定几何尺寸

小雁塔的几何尺寸如表 1 所示。

表 1 小雁塔的几何尺寸
Table 1 Geometric Dimensions of Xiaoyan Tower

层号	边长/m	边长的层间差/m	塔顶板层高/m	墙厚/m	卷高/m	南外圈宽/m
1	11.38	—	—0.90	3.57	2.68	1.77
2	10.68	0.7	6.84	3.38	1.45	0.968
3	10.56	0.12	10.59	3.28	1.40	0.942
4	10.41	0.15	41.02	3.20	1.36	0.882
5	10.32	0.09	17.36	3.10	1.22	0.756
6	10.00	0.32	20.54	3.00	1.20	0.733
7	9.64	0.36	23.36	2.85	0.85	0.655
8	9.13	0.51	25.98	2.78	0.80	0.614
9	8.62	0.51	28.45	2.50	0.80	0.59
10	8.04	0.58	30.73	2.26	0.60	0.537
11	7.64	0.40	32.71	2.20	0.40	0.488
12	7.18	0.46	34.31	1.94	0.37	0.406
13	6.53	0.65	35.85	1.82	0.37	0.36
14	6.18	0.35	37.30	1.76	0.30	—
15	—	—	—	1.16	—	—

1.2 确定材料特性

为了分析砖石古塔结构的震害破坏特征需要确定小雁塔的材料特性，因为小雁塔属于古代文物，不能采集小雁塔的建筑材料进行特征分析取样和实验，在测定小雁塔材料强度特性的过程中受到了多种限制，为小雁塔加固和维修带来的难度。

在调研小雁塔的过程中，因为不能对小雁塔进行材料性能试验，因此选取年代差距较小的塔寺结合文献材料获取小雁塔的材料特征参数，将 MU15 作为砖标的取号，选用 M0.4 砂浆，根据砌

体规范获取砌体弹性模量 $E = 700f$ ，其中， f 代表的是砌体抗压强度，通常情况下 f 的值为 1.12 MP，即可将砌体弹性模量转变为下式：

$$E = 700f = 784\text{MPa} \quad (1)$$

密度和泊松比分别为 1900 kg/m^3 ，0.15。

1.3 单元类型

ANSYS 分析软件中的 solid95、solid45、solid86、solid65 等实体单元可以对混凝土进行设计。

砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法在模拟小雁塔的过程中采用的是三维 20 节点实体单元 solid95。

在三个坐标轴方向上单元每个节点都存在三个自由度，solid45 单元对应的高次形式为 solid95 单元，可以提高精度，用于不规则形状。solid95 单元具有大应变、可塑性、大变形和延伸性等能力。

设砖砌体对应的弹性刚度矩阵为 $[D]$ ，其计算公式如下：

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & \nu & \nu \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & \nu \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， ν 代表的是砌体材料对应的泊松比； E 代表的是砌体材料对应的弹性模量。

1.4 建立模型

砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法根据获得的小雁塔几何尺寸，通过实体建模方法构建小雁塔有限元模型。

小雁塔有限元模型受塔体倾斜的影响变化较小，在构建小雁塔有限元模型的过程中不考虑塔体倾斜的因素。在小雁塔和地面垂直的基础上对小雁塔结构的震害破坏特征进行分析，构建的小雁塔有限元模型如图 1 所示。

1.5 网格划分

用有限元代替小雁塔实体是网格划分单元的主要内容。网格划分精度影响着求解的精度，计算精度随着单元划分细度的提高不断提高，网格划分的越细计算所用的时间越长^[10]。所以根据小雁塔的实际情况在网格划分的过程中选择对应的网格单元尺寸。

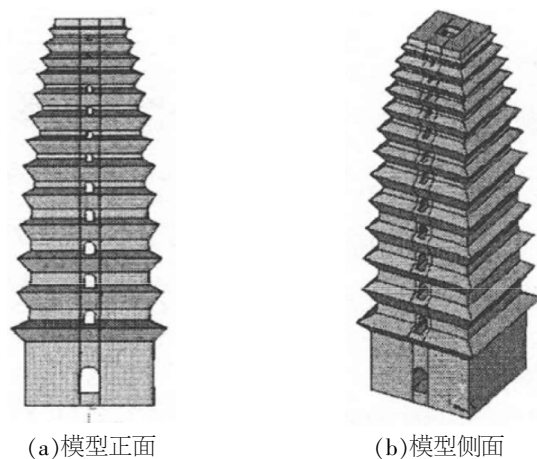
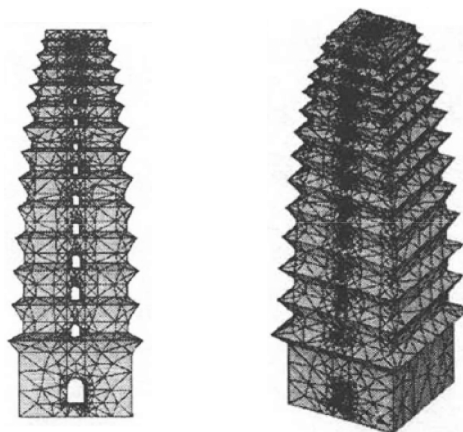


图 1 小雁塔有限元模型

Fig.1 Finite element model of Xiaoyan Tower

砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法采用智能网格对单元尺寸进行控制，智能网格可以在小雁塔模型形状的基础上选择对应的单元大小。小雁塔有限元模型的网格划分结果如图 2 所示。



(a)模型正面网格划分结果 (b)模型侧面网格划分结果

图 2 模型网格划分结果

Fig.2 Results of model meshing

2 震害破坏特征模拟分析

在小雁塔有限元模型的基础上，分析砖石古塔结构的震害破坏特征。

在分析砖石古塔结构的震害破坏特征时将砖石古塔看做竖直方向中的悬臂杆，如图 3 所示。

在各微段 dx 的物理条件和平衡条件的基础上获得砖石古塔的振动微分方程，其表达式如下：

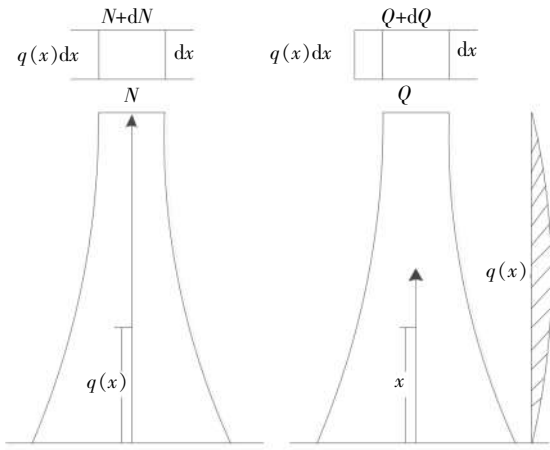


图3 悬臂杆模型

Fig.3 Cantilever bar model

$$\frac{d}{dx}(k_x \frac{dw}{dx}) + q(x) = 0 \quad (3)$$

式(3)中, k_x 代表的是界面刚度, 其对应的轴向变形和剪切变形的表达式分别如下:

$$k_x = EF(x) \quad (4)$$

$$k_x = \frac{1}{k} GF(x) \quad (5)$$

式中, E 代表的是塔体材料对应的抗压弹性模量; k 代表的是剪切变形截面对应的的影响系数; G 代表的是塔体材料对应的剪切弹性模量。

设 $q(x)$ 代表的是静荷载, 其计算公式如下:

$$q(x) = \omega^2 \bar{m}(x) X(x) \quad (6)$$

静荷载 $q(x)$ 生成的位移曲线即为振型函数 $X(x)$, 将静荷载 $q(x)$ 带入公式(3)中, 获得微分方程:

$$k_x \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{dk_x}{dx} \frac{dX}{dx} + \omega^2 \bar{m}(x) X(x) = 0 \quad (7)$$

对砖石古塔的结构进行简化, 如图4所示。

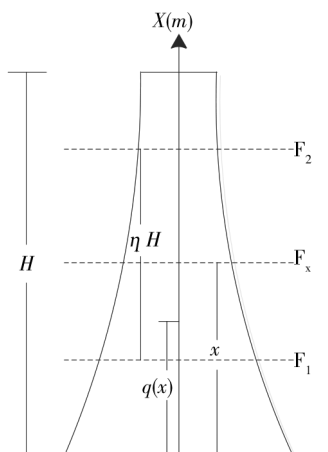


图4 变截面悬臂杆模型

Fig.4 Variable cross-section cantilever beam model

下式为沿高度横截面的变化规律:

$$F(x) = Ae^{-b\frac{x}{H}} \quad (8)$$

式中, H 代表的是砖石古塔的高度。

设 F_1 、 F_2 分别代表的是控制横截面 1、2, 将其与 x_1 、 x_2 带入上式中, 获得下式:

$$\begin{cases} A = e^{\frac{b x_1}{H}} F_1 \\ b = \frac{1}{\eta} \ln \frac{F_1}{F_2} \end{cases} \quad (9)$$

此时抗剪刚度和质量分布密度的计算公式分别如下:

$$k_x = \frac{1}{k} GF(x) = \frac{AG}{k} e^{\frac{b x_1}{H}} \quad (10)$$

$$m(x) = \rho F(x) = \rho A e^{\frac{b x_1}{H}} \quad (11)$$

式中, ρ 代表的是小雁塔结构对应的材料密度。通过上述公式获得下式:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} - \frac{b}{H} \frac{dX}{dx} + \left(\frac{\omega}{a}\right)^2 X = 0 \quad (12)$$

其中参数 a 的计算公式如下:

$$a = \sqrt{\frac{G}{k\rho}} \quad (13)$$

如果此时为竖向振动, 则存在下式:

$$a = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (14)$$

通过上述分析获得公式(12)的解 $X(x)$:

$$X(x) = e^{\frac{bx}{2H}} (C_1 \cos \frac{\xi x}{H} + C_2 \sin \frac{\xi x}{H}) \quad (15)$$

其中参数 ξ 的计算公式如下:

$$\xi^2 = \frac{H^2}{4} \left(4 \frac{\omega^2}{a^2} - \frac{b^2}{H^2} \right) \quad (16)$$

在边界条件 $X(0)=0$ 的基础上, 获得频率方程:

$$\tan \xi = -\frac{2}{b} \xi \quad (17)$$

如果对基地的变形进行考虑, 获得竖向振动对应的频率方程:

$$\tan \xi = \frac{k_v}{\xi - \frac{b}{2\xi} (k_v - \frac{b}{2})} \quad (18)$$

$$k_v = \frac{c_v H}{EF_0} \quad (19)$$

式中, c_v 代表的是竖向方向中基地对应的刚度系数。通过上述分析获得水平振动对应的频率方程:

$$\tan \xi = \frac{k_h}{\xi - \frac{b}{2\xi}(k_h - \frac{b}{2})} \quad (20)$$

$$k_h = \frac{kc_h H}{GF_0} \quad (21)$$

式中, c_h 代表的是水平方向中地基对应的刚度系数。

3 实验结果与分析

为了验证砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法的整体有效性,在 Matlab 平台中对砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法进行测试。分别采用砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法、文献方法和文献方法进行测试,测试三种方法构建的有限元模型精度,测试结果如下:

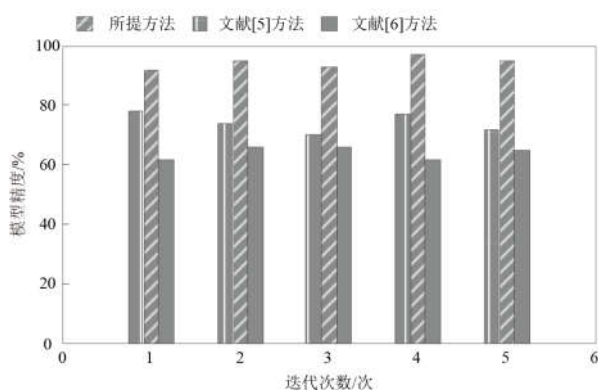


图5 三种方法的模型精度

Fig.5 Model accuracy of three methods

由图5可知,在多次迭代中砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法的有限元模型精度均高于文献方法、文献方法的有限元模型精度。因为砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法采用 ANSYS 有限元模型中的 solid95 实体单元构建小雁塔有限元模型, solid95 实体单元具有大应变、可塑性、大变形和延伸性等优点,提高了小雁塔有限元模型的精度。

分别采用砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法、文献方法和文献方法进行测试,对比三种不同方法的分析准确率,测试结果如下:分析图6可知,砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法在多次迭代中获得分析结果准确率均高于文献方法和文献方法的分析结果准确率。因为砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法构建了高精度的小雁塔有限元模型,通过高精度的小雁塔有限元模型对震害破坏特征进行分

析,提高了分析结果的准确率。

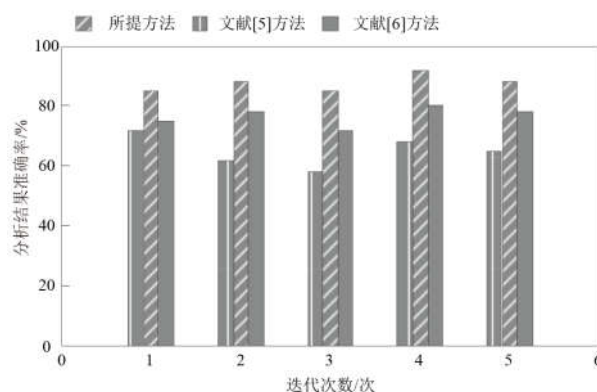


图6 三种方法的分析结果准确率

Fig.6 Accuracy of analysis results of three methods

5 结语

砖石古塔具有重要的艺术、科学和历史价值,历史记载中地震是造成砖石古塔倒塌和结构破坏的主要原因,因此需要对砖石古塔结构的震害破坏特征进行分析。当前砖石古塔结构震害破坏特征分析方法存在有限元模型精度低和分析准确率低的问题,提出砖石古塔结构的震害破坏特征空间模拟分析方法,该方法通过 ANSYS 软件构建小雁塔有限元模型,在小雁塔有限元模型的基础上对震害破坏特征进行模拟分析,解决了当前方法中存在的问题,为砖石古塔的维修和加固奠定了基础。

参考文献:

- [1] 芦苇,赵冬,王玉兰. 基础刚度对砖石古塔地震响应影响研究[J]. 地震工程学报,2016,38(4):498-503.
- [2] 袁建力. 砖石古塔水平地震作用的分析方法 [J]. 地震工程与工程振动,2018,v.38(2):018-27.
- [3] 潘毅,王子超,尚枫,等. 四川省某砖石古塔隔震加固方案研究[J]. 西南交通大学学报,2018,53(3):540-547.
- [4] 呼梦洁,张苏俊,李胜才,等. 砖石古塔灌浆与围箍加固的抗震性能研究[J]. 建筑技术,2017,48(11):1196-1199.
- [5] 卢俊龙,李晓蕾. 内填黏土实心结构砖塔振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2017,38(12):154-162.
- [6] 李涛,王社良,杨涛. 砖石古塔结构振动台试验模型设计与试验验证[J]. 振动工程学报,2018,31(2):136-144.
- [7] 邓志轩,陆伟东,刘杏杏,等. 楼阁式错角筒砖塔结构性能分析研究[J]. 结构工程师,2016,32(2):60-63.
- [8] 赵祥,刘忠华,王社良,等. 变阻尼式 TMD 对小雁塔减震控制研究[J]. 振动与冲击,2018,37(8):93-98.
- [9] 董朕,王社良,苏三庆,等. 新型 SMA 复合悬摆减震系统对小雁塔减震控制分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2018,39(4):695-702.
- [10] 汤永净,赵红,叶真华,等. 古代砖砌体风化性能分析及风化程度评定[J]. 土木建筑与环境工程,2017,39(3):67-74.