

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.122



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 山西稷王山砖塔地震动力响应及损伤分析

姜珊<sup>1</sup>, 李建博<sup>1</sup>, 赵慧强<sup>2</sup>, 肖迎九<sup>3</sup>, 路国运<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 太原 030024; 2. 山西省古建筑设计有限公司, 太原 030032;  
3. 山西省古建筑与彩塑壁画保护研究院, 太原 030099)

**摘要:**采用数值分析方法对山西稷王山古塔在不同地震作用下的破坏形态及损伤进行计算分析, 为古塔的抗震加固提供依据, 采用塑性损伤本构计算模型描述地震作用下砌体结构的损伤失效, 给出古塔在不同调幅系数地震波作用下的位移形态, 获得层间位移、加速度放大系数等地震响应数值, 讨论了地震引起的损伤分布规律。结果表明, 稷王山古塔整体刚度分布均匀, 塔顶加速度放大系数最大, 尽管古塔底部墙体厚于上部, 但在地震作用下仍在底层首先出现受拉损伤, 并随地震强度提高而向上扩展; 应力云图显示, 地震作用下古塔底层最大主拉应力区呈斜向上扩展形态, 易使塔体形成斜向裂缝; 古塔薄弱层为底部3层及顶层。

**关键词:**砖石古塔; 地震响应; 有限元模拟; 损伤因子; 应力分析

**中图分类号:** TU365      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2022)02-0165-09

## Seismic response and damage analysis of the pagoda on Shanxi Jiwang Mountain

JIANG Shan<sup>1</sup>, LI Jianbo<sup>1</sup>, ZHAO Huiqiang<sup>2</sup>, XIAO Yingjiu<sup>3</sup>, LU Guoyun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China;  
2. Shanxi Ancient Architecture Group Design and Research Institute, Taiyuan 030032, P. R. China;  
3. Shanxi Ancient Architecture and Painted Sculpture Mural Protection Research Institute, Taiyuan 030099, P. R. China)

**Abstract:** In this paper, the failure mode and damage of pagoda on Shanxi Jiwang Mountain under different earthquakes were calculated and analyzed by numerical method, which provides a basis for the seismic reinforcement of Jiwang pagoda. The plastic damage constitutive model was applied to describe the damage failure of masonry structures under earthquake. The displacement forms of the ancient pagoda under the action of seismic waves with different amplitude-modulation coefficients were given, the seismic responses values such as interlayer displacement and acceleration amplification factors were obtained, and the distribution rules of earthquake-induced damage were discussed. The results show that the overall stiffness distribution of the pagoda on Jiwang Mountain is uniform, and the acceleration amplification factor at the

**收稿日期:** 2020-12-31

**基金项目:** 山西省自然科学基金(201901D111089)

**作者简介:** 姜珊(1989-), 女, 博士生, 主要从事结构动力学性能研究, E-mail: jiangshan0248@163.com.

路国运(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: luguoyun@tyut.edu.cn.

**Received:** 2020-12-31

**Foundation item:** Shanxi Natural Science Foundation (201901D111089)

**Author brief:** JIANG Shan (1989-), PhD, main research interest: structural dynamics, E-mail: jiangshan0248@163.com.

LU Guoyun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: luguoyun@tyut.edu.cn.

top pagoda is the greatest. Although the bottom wall of the pagoda is thicker than that on top, the tensile damage still initiated from the bottom under earthquake, and it expands upward with increase of seismic intensity. The stress contours show that the maximum principal tensile stress area at the bottom of the pagoda under earthquake expands obliquely, which easily leads to the formation of oblique cracks in the pagoda. The weak layers of the pagoda are the bottom three layers and the top layer.

**Keywords:** masonry pagodas; seismic response; finite element simulation; damage factors; stress analysis

山西稷王山塔为 7 层密檐式砖塔,始建于北宋嘉祐二年(公元 1057 年),原为双子塔,现仅残存单塔,于 2013 年被列为国家重点保护文物。该塔具备中国砖塔中典型的密檐式形制,是现存年代较早的宋代建筑之一,保留了宋代建筑的风格特点,为宋金时期祭祀建筑类型及形制的演变提供了珍贵的实物资料。历史上稷王山塔遭遇过多次地震,历经千年风化,塔身有多处裂缝及破损,亟需保护性修缮。前期关于古塔的保护工作主要围绕结构外形开展,只是将破损处补足即止,最大限度地保留古塔原有建筑历史风貌。依据最新文物修缮原则,对塔的抗震性能进行评估,以获取古塔的动力学特性并指导加固修缮的实施,使古塔有较好的抗震能力。

针对砖石古塔抗震性能及损伤识别的研究已有很多,但由于其浆砌的本质,砖石结构力学模型的准确描述很难获得理想结果。潘毅等<sup>[1-2]</sup>归纳分析了汶川地震中砖石古塔的震害特征及形成机制,基于模糊数学理论提出了砖石古建筑震后破坏状态评估方法。邱洪兴等<sup>[3-4]</sup>提出了古塔的损伤区域判别分析法,采用条件分布损伤值估计来评估古塔震后的损伤识别,并将该方法用于崇教兴福寺塔的地震损伤识别中。Ditommaso 等<sup>[5]</sup>研究了包含塑性损伤本构、连续损伤等砌体结构震害后的动力特性。Valente 等<sup>[6]</sup>、Sarhosis 等<sup>[7]</sup>采用 pushover 法对意大利东北部的 8 座砖石古塔进行了地震响应计算,提出古塔地震作用安全系数简化计算方法及极限加速度实用计算公式。李胜才等<sup>[8]</sup>基于显式动力原理开展了砖石古塔地震作用下的动态非线性数值分析,描述了古塔外表面的损伤演化。张文芳等<sup>[9]</sup>以太原舍利生生塔砖结构为研究对象,将塔砖视为正八边形整截面墙体,通过计算单元拉压负载系数来判别塔墙体失效模态。童丽萍等<sup>[10]</sup>对河南登封嵩岳寺在 3 种地震波调幅下的位移、加速度及应力状态进行了数值计算。卢俊龙<sup>[11-13]</sup>等运用动力测试系统结合数值模拟,对陕西兴教寺基师塔进行了自振频率测试及损伤识别,对兴教寺玄奘塔开展了缩比模型振动台试验,分析实心古塔频域地震响应规律。张永亮等<sup>[14]</sup>用古塔砌体极限承载力及层间位移角

评估砖石古塔的抗震性能,提出了以对穿锚杆及贯穿钢筋为主、裂缝注浆为辅的抗震加固措施。

综上所述,对于砖石古塔的抗震性能研究多采用理论研究及原位动力性能测试手段,砌体损伤区域判定多采用试验与数值模拟相结合的方法,而将古塔的损伤、应力分析及结构震后弹塑性状态评估进行系统综合研究较少。笔者对山西稷王山砖塔进行地震时程响应计算,对古塔在不同类型、不同调幅系数地震波作用下的弹塑性动力学响应、损伤演化及塔身应力分布等进行分析评估,探究古塔遭遇地震时的损伤机制。

## 1 稷王山砖塔工程概况

图 1 所示为现存稷王山塔,共 7 层,各层截面自下而上向内逐层收进,总高度 16.315 m(由塔基地面最低处至坍塌顶部残高),每边均为 1.9 m 的砖质八边七级密檐式结构。塔心内填黏土,1 层塔檐仿木构砖雕辅作,其余各级塔檐均为叠涩式样,每层塔外檐直檐均有缺失,塔刹不存,塔顶塌毁严重,碎砖散落,原形制不详,风铎缺失。1 层塔身破损严重,大面为后人补砌,但补砌后的砌体也有开裂、倾斜状。塔身整体由青砖灰浆砌筑而成,已有不同程度的酥碱、破损。表 1 列出了塔的具体尺寸。历史上山西万荣地区地震频发,长期的环境侵蚀也使得某些部位的砖块性能损伤过大,现有塔体的主要破损多由此引起<sup>[15]</sup>。笔者主要通过数值分析探究塔体形制在地震载荷作用下的动力响应及其引起的损伤失效,为后续进行古塔抗震加固提供依据。



图 1 稷王山塔全貌图

Fig. 1 Full view of pagoda on Jiwang Mountain

表1 塔的主要几何尺寸

Table 1 Main geometric dimensions of the pagoda

层数	塔身边长/m	叠涩边长/m	层高/m	标高/m
1	1.90	2.73	5.72	5.72
2	1.80	2.51	2.13	7.85
3	1.65	2.36	1.92	9.77
4	1.50	2.16	1.85	11.62
5	1.40	1.98	1.64	13.26
6	1.36	1.82	1.41	14.67
7	1.20	1.62	1.65	16.32

## 2 有限元模型

根据古塔现有测绘数据,运用有限元计算软件 ABAQUS,对稷王山塔建立 1:1 三维实体单元数值模型,如图 2 所示。采用 8 节点六面体线性减缩积分单元进行古塔模态及地震弹塑性时程计算。



图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

基于砖石的脆性损伤特性,砖石损伤本构采用 ABAQUS 材料库中的混凝土塑性损伤模型。具体参数参考文献[16],塑性损伤基本参数取膨胀角为  $40^\circ$ ,偏心率为 0.1,双轴抗压强度与单轴抗压强度比值为 2,拉压子午线上第二应力不变量比值为 0.666 7,黏性参数为 0.005<sup>[16]</sup>。

受压模型选取文献[17]中的砌体受压应力-应变关系曲线,如式(1),按弹性余能等效原理计算受压损伤变量,表达式如式(2)。

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = \frac{\eta}{1 + (\eta - 1) \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{0c}} \right)^{\frac{\eta}{\eta-1}}} \frac{\epsilon_c}{\epsilon_m} \quad (1)$$

$$D_c = 1 - \frac{1}{1 + (\eta - 1) \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{0c}} \right)^{\frac{\eta}{\eta-1}}} \quad (2)$$

式中: $\sigma_c$  为砌体压应力; $\epsilon_c$  为砌体压应变; $\eta$  为砌体弹性割线模量与初始弹性模量之比,取 1.633; $f_c$  为

砌体轴心抗压强度设计值; $\epsilon_{0c}$  为砌体轴心受压强度设计值对应的压应变值; $D_c$  为砌体单轴受压损伤变量。

受拉损伤本构模型选取文献[16]中混凝土受拉应力-应变关系曲线,如式(3)。考虑受拉损伤在拉应力峰值后开始发生,其受拉损伤变量根据能量等效原理按式(4)确定。

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \frac{\frac{\epsilon_t}{\epsilon_{0t}}}{0.312 f_t^2 \left( \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{0t}} - 1 \right)^{1.7} + \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{0t}}} \quad (3)$$

$$D_t = 1 - \sqrt{\frac{\frac{\epsilon_t}{\epsilon_{0t}}}{0.312 f_t^2 \left( \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{0t}} - 1 \right)^{1.7} + \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{0t}}}} \quad (4)$$

式中: $\sigma_t$  为砌体拉应力; $\epsilon_t$  为砌体拉应变; $f_t$  为砌体轴心抗拉强度平均值; $\epsilon_{0t}$  为砌体轴心受拉强度设计值对应的拉应变值; $D_t$  为砌体单轴受拉损伤变量。受压及受拉损伤变量的取值范围均为 0~1。

对稷王山塔现场采集的残砖进行抗压强度试验,获得的结果与宋代青砖抗压强度<sup>[18]</sup>基本相近。考虑古塔已有不同程度裂缝损伤,计算时取砌体密度为  $2000 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $1250 \text{ MPa}$ ,泊松比为 0.15,阻尼比为 5%。塔内部填充黏土,密度取为  $1900 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $26 \text{ MPa}$ ,泊松比为 0.2。抗压强度设计值  $f_c$  为  $3.15 \text{ MPa}$ ,峰值压应变  $\epsilon_{0c}$  取 0.04,参照混凝土抗压强度换算关系,取轴心抗拉强度均值  $f_t$  为  $0.089 \text{ MPa}$ ,对应拉应变为 0.000 12。

## 3 动力性能分析

### 3.1 模态分析

对稷王山古塔进行模态分析并提取其振型及频率,如图 3 所示。稷王山塔为对称式密檐古塔,塔在水平方向前两阶振型呈 1 阶弯曲线,分别为  $x$  (代表东西方向) 和  $y$  (代表南北方向) 方向,频率为 2.21 Hz;第 3、4 阶振型以 2 阶弯曲平动为主,频率为 7.29 Hz。前 4 阶振型两两对称,结构的第 5 阶振型为扭转振型,频率远大于前两阶振型,这与塔的轴对称筒状结构构型有关。

依据文献[19]验算塔体结构自振频率,其推荐的砖石古塔水平固有频率经验公式为

$$f_j = \frac{\alpha_j b_0}{2\pi H^2} \psi \quad (5)$$

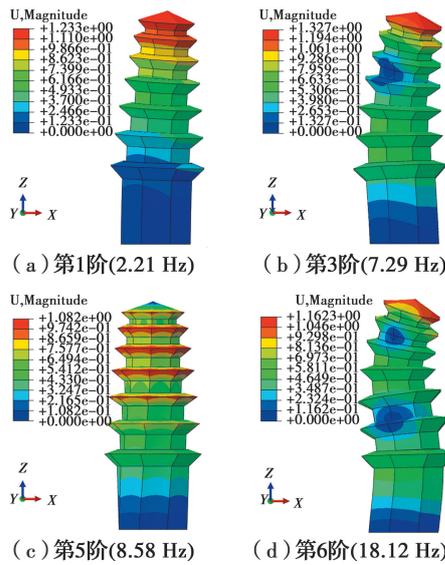


图 3 稷王山塔振型

Fig. 3 Vibration modes of pagoda on Jiwang Mountain

式中： $f_j$  为古塔的第  $j$  阶固有频率，Hz； $H$  为塔总高度（由台基顶至塔刹根部的高度），m； $b_0$  为结构底部宽度（八边形取两对边宽度）； $\alpha_j$  为结构第  $j$  阶固有频率综合变形系数，其值根据  $H/b_m$  与  $H/b_0$  查表确定； $b_m$  为塔高  $H$  范围内各层宽度对层高的加权平均值，m； $\psi$  为结构的质量刚度参数，m/s，砖塔取  $\psi = 5.4H + 615$ ，石塔取  $\psi = 2.4H + 591$ 。

由式(5)计算得到稷王山塔自振频率并与数值计算结果进行对比，结果见表 2。其中，自振频率最大误差为 5.6%，这是由于数值模型与理论计算公式存在力学简化上的差异，但误差较小。因此，有限元计算模型可用于后续的地震弹塑性动力响应分析。

表 2 古塔自振频率

Table 2 Natural frequency of pagoda

阶次	经验公式	数值结果	误差/%
第 1 阶	2.18	2.21	1.5
第 2 阶	8.77	8.31	5.6
第 3 阶	18.81	18.12	3.9

### 3.2 地震响应分析

根据抗震设计规范<sup>[20]</sup>确定古塔的地震计算参数，考虑高耸孤立山丘等不利地段对设计地震动参数的放大作用，按 7 度(0.15g)抗震设防，场地类别为 II 类，设计地震分组为第 3 组，选取地震波对古塔进行地震时程响应分析。选取两条实测波及一条人

工波用于稷王山塔地震时程分析。根据场地类别及古塔自振周期选取实测波 EI-Centro 波、TAR-TARZANA 波及兰州波作为地震波分别输入数值模型，并按 7 度(0.15g)多遇、设防、罕遇地震(小震、中震、大震)的峰值加速度进行调幅，即分别调幅至 55、150、310  $\text{cm/s}^2$ ，地震动持续时间截取包含峰值段的 15 s。在模型  $x$  轴方向加载不同地震波进行古塔地震动力响应计算。

#### 1) 位移响应

图 4 为设防 EI-Centro 地震波作用下古塔不同高度的位移时程曲线，可知塔身位移时程波形基本一致而幅值有差异，未出现明显位移相位差，塔身整体刚度较均匀，古塔的位移响应为低阶平动响应，塔顶位移响应最大，最大水平位移幅值达 44 mm。塔中层、顶层位移反应分别在 13、6 s 后向一侧偏移，并产生了残余位移，这是由于振动后期塔体损伤逐步向上部塔身扩展，结构进入塑性阶段所致。

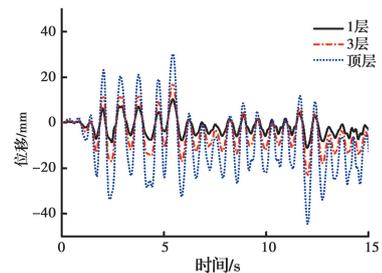


图 4 EI-Centro 波作用下的古塔位移时程

Fig. 4 Displacement time-history of pagoda under EI-Centro seismic wave

图 5 给出了采用两种结构阻尼比时 TAR-TARZANA 波作用后的塔体层间位移，可见古塔底层的层间位移最大，第 2 层层间位移迅速减小，形成拐点；小震时，3 层以上塔层间位移变化幅度较小，

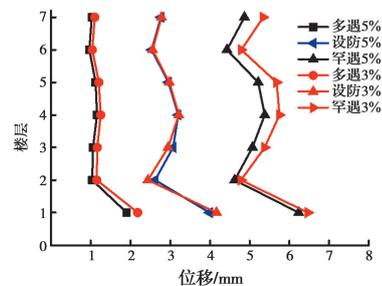


图 5 TAR-TARZANA 波作用下塔水平层间位移

Fig. 5 Horizontal interlayer displacement of pagoda under TAR-TARZANA seismic wave

未出现明显突变;而中震、大震时,塔的层间位移在第 2 层及第 6 层均出现拐点,整体趋势已有高阶模态特征。进一步对比结构阻尼比为 3%和 5%时的层间位移响应,可知阻尼比的变化对小震及中震作用时塔层间位移影响较小,但对大震作用下塔层间位移影响较大,表现为结构阻尼比越小,塔层间位移越大,不同阻尼比对应塔层间位移的差别小于 7%。

采用地震弹塑性分析中的层间位移角进行古塔震后弹塑性状态评估。按照位移角评估准则取弹性层间位移角限值为 1/550,弹塑性极限阶段的层间位移角为 1/100~1/200<sup>[20]</sup>。以 TAR-TARZANA 波作用下塔的层间位移角为例,如图 6。小震时,塔的层间位移角随塔高变化不大,塔身均处于弹性阶段;中震作用下,塔的首两层及以下层间位移角较小,塔身处于弹性阶段,第 3 层位移角增大至 1/458,塔身进入弹塑性阶段,第 4 层至第 6 层位移角较大,达 1/389,塔身处于弹塑性阶段与弹塑性极限阶段之间,结构中等破坏;大震作用下,塔身首两层进入弹塑性阶段,而 3 层至塔顶均处于弹塑性极限阶段,结构刚度退化,结构破坏较严重,其中第 5 层层间位移角最大达 1/197。以上分析表明,古塔若遭受中震以上地震作用,塔层间位移角较大,结构上部为弹塑性极限状态,有倒塌的风险。

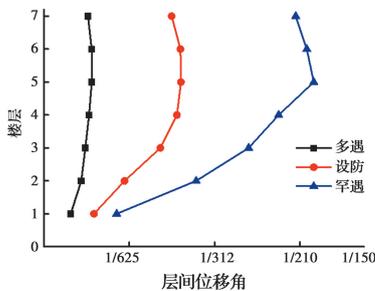


图 6 TAR-TARZANA 波作用后的塔层间位移角  
Fig. 6 Interlayer displacement angle of pagoda under TAR-TARZANA seismic wave

2) 加速度响应

对比分析多遇、设防及罕遇 EI-Centro 地震波作用下的塔顶加速度时程曲线,如图 7。不同调幅波作用后,塔顶加速度响应趋势基本一致,塔对不同调幅地震波的放大效应不同,总体表现为加速度幅值随地震波调幅的增大而增大。小震作用下,塔的加速度时程曲线较稳定;而中震和大震时,塔对地震波的加速度响应后期仍出现较多峰值,这与强震作

用下塔身损伤程度较大有关。

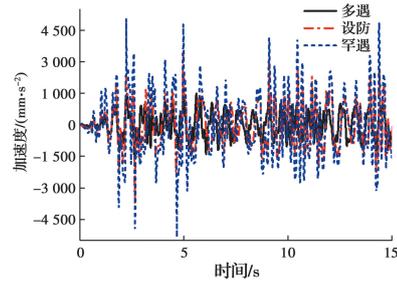


图 7 EI-Centro 波作用下塔顶加速度时程

Fig. 7 Acceleration time-history on top of pagoda under EI-Centro wave

每层加速度响应幅值与相应的调幅波加速度时程幅值之比为塔每层的动力放大系数,如图 8 所示。由图 8 可见,塔顶的加速度放大效应最大,原因在于塔顶的截面刚度最小,地震响应较大,且现有古塔塔顶已有较严重的破损,若再经受较大地震会加剧塔顶破损。整体分析可知,多遇地震调幅下的动力放大系数较大,这是因为中震或大震作用下古塔砌体进入弹塑性阶段并发生弹塑性损伤,因此,消耗的塑性性能较大,对地震加速度的响应较小。此外,由于结构对于 3 种不同频率特征的地震波产生的变形模态不同,在振幅及持续时间均相同的条件下,同等强度的 3 种地震波作用后的加速度放大曲线差异较大,其中,古塔的自振周期与 EI-Centro 波的特征周期最接近,因此,加速度响应较 TAR-TARZANA 波更大,但塔对人工波的加速度响应更显著。

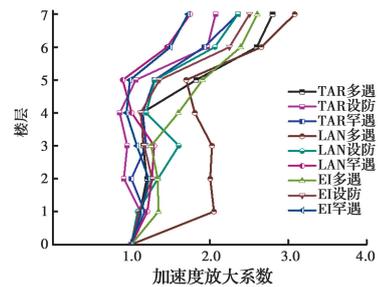


图 8 加速度放大系数

Fig. 8 Acceleration amplification coefficient

3) 结构损伤分析

采用 ABAQUS 嵌入的塑性损伤本构模型计算可以直观地反映出地震作用下古塔的损伤区域及损伤过程,由于砖砌体在剪力较大时极易产生剪切破坏以致开裂<sup>[9]</sup>,地震损伤部位为地震剪力较大部位,由此判断地震剪力对古塔损伤的影响。图 9~图 11

为稷王山塔在 EI-Centro 波作用后的损伤云图,其中(a)为受拉损伤云图,(b)为受压损伤云图。同时,提取损伤时程曲线分析结构的损伤起始时间及损伤值大小,见图 12。

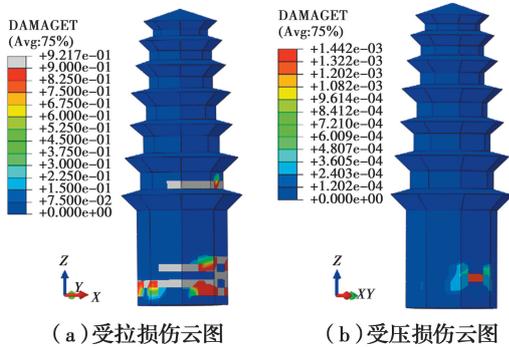


图 9 多遇地震作用下的塔损伤云图

Fig. 9 Damage contour of pagoda under frequent earthquakes

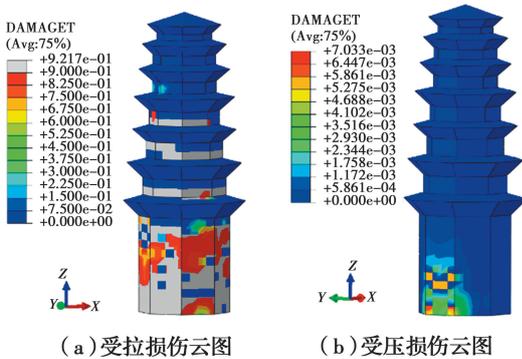


图 10 设防地震作用下的塔损伤云图

Fig. 10 Damage contour of pagoda under design earthquakes

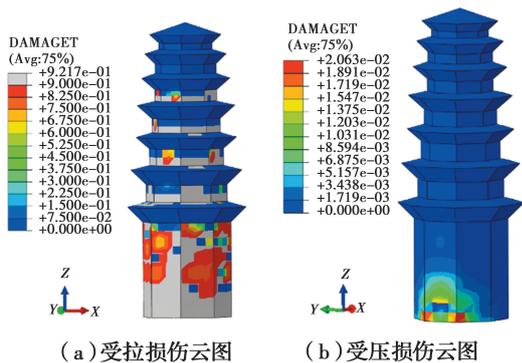
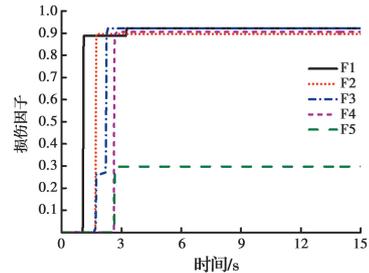


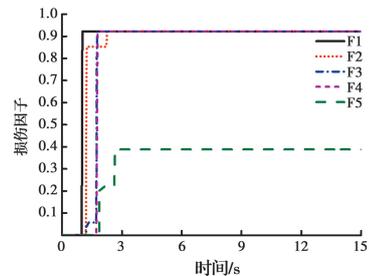
图 11 罕遇地震作用下的塔损伤云图

Fig. 11 Damage contour of pagoda under rare earthquakes

由损伤云图可知,小震时,如图 9 所示,古塔受拉受压损伤均较小,仅在 1 层底部及 2 层塔底局部产生了受拉损伤,但未见大面积损伤破坏。中震时,如图 10 所示,塔底首先在地震波的振动方向发生受拉损伤,且由下至上损伤区域明显增多,塔身 4 层以



(a) 中震作用下的损伤时程



(b) 大震作用下的损伤时程

图 12 受拉损伤因子时程

Fig. 12 Tensile damage factor time-history

下受拉损伤面积较大,受压损伤值较小。大震作用下,如图 11 和图 12 所示,各层塔身出现受拉损伤的时间更早,塔底在地震波加载至 1 s 时首先出现受拉损伤,且沿地震波加载方向迅速扩展,同时自下而上传递至塔顶,1~4 层塔身受拉损伤因子较大,均达到 0.9 以上,损伤较严重,第 5 层塔身最终损伤值也较中震的更大。塔底层至 3 层出现受拉损伤的时间较早且最终损伤因子较大,是塔身材料最易破坏的薄弱区域。这是由于地震作用下古塔的剪力和弯矩在底部最大,沿塔高逐层递减,因此,塔底首先出现受拉损伤。另外,古塔截面逐层向内收缩,截面刚度发生突变,大震作用下截面刚度突变引发的应力集中愈发严重,因此,损伤区域多集中在每层塔身底部且由底层向上蔓延。由以上分析可知,塔底 3 层是加固的重点部位。

4) 应力状态分析

古塔砌体是单轴抗拉强度远小于单轴抗压强度的脆性材料,而地震荷载作用下砌体墙的裂缝多因主拉应力超过其轴心抗拉强度而受拉破坏,因此,可采用单元主拉应力大于材料轴心抗拉强度时发生开裂破坏作为判别砌体单元失效的准则。

图 13~图 14 为稷王山塔在中震及大震作用下的最大主应力分布图。图中标识了最大主拉应力超过砌体抗拉强度值的起始时间及初始开裂区域。由图

可知,在 3 种波作用下,最大主拉应力迅速在塔底层及 2 层斜向上开展并大面积超过古塔砌体的抗拉极限值,表明裂缝斜向上开展。EI-Centro 波作用下的主拉应力出现时间较早并集中于塔底加载一侧,古塔

底层加载一侧的主应力大面积超过砌体的抗拉强度,除沿地震波加载方向外,塔体其他立面也相继出现斜向裂缝。大震作用下的最大主拉应力出现时间更早,裂缝向上扩展的塔层更多,开裂区域面积更大。

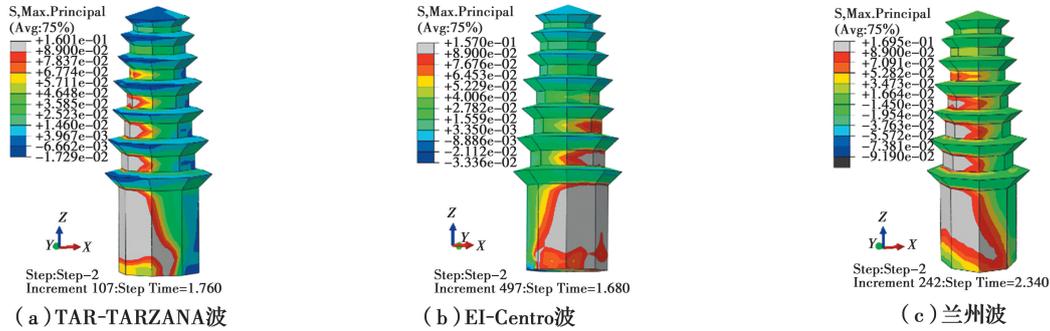


图 13 中震下古塔的最大主拉应力云图

Fig. 13 Maximum principal tensile stress contour under design earthquakes

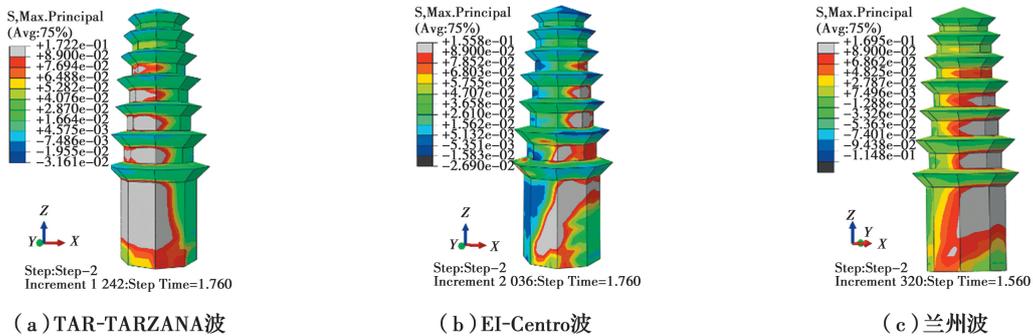


图 14 大震下古塔的最大主拉应力云图

Fig. 14 Maximum principal tensile stress contour under rare earthquakes

### 4 结论

通过对山西稷王山古塔进行模态分析及地震时程动力响应计算,得出以下主要结论:

1) 运用砖石塑性损伤本构模型并引入损伤因子,依据砖石砌体材料基本力学性能及地震动力计算基本参数,实现了稷王山古塔地震时程响应数值模拟。

2) 加速度放大系数表明塔对 3 种波的动力响应程度有差异。小震时,塔体处于弹性阶段,整体性较好;中震及大震作用下,塔体逐渐进入弹塑性极限阶段,塑性能消耗增大,加速度放大效应减弱。

3) 塔体损伤因子表明塔体主要以受拉损伤为主,损伤区域在塔首层最大,且由下至上逐步扩散。随着地震波调幅系数的增大,损伤起始时间越早,损伤区域扩散越明显,震害越严重。应力分析表明,塔

的最大主拉应力超过砌体抗拉强度即引起塔体开裂,在中震及大震作用下,裂缝在加载初始阶段出现于塔底并向斜上方扩展,易使塔体形成多立面斜向裂缝。

4) 古塔结构地震损伤结果表明:塔底层至 3 层裂缝损伤严重,需做重点修补加固;塔顶由于地震放大效应导致破损较严重,需做重点修复补砌。

### 参考文献:

[1] 潘毅,王超,季晨龙,等. 汶川地震中砖石结构古塔的震害调查与分析[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(6): 156-159.  
 PAN Y, WANG C, JI C L, et al. Seismic damage investigation and analysis of Chinese ancient masonry buildings in Wenchuan earthquake [J]. Sichuan Building Science, 2012, 38(6): 156-159. (in Chinese)

- [2] 潘毅, 李玲娇, 姚蕴艺, 等. 砖石结构古建筑震后破坏状态评估方法[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(4): 704-713.  
PAN Y, LI L J, YAO Y Y, et al. Evaluation methods for post-earthquake damage state of ancient masonry buildings [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(4): 704-713. (in Chinese)
- [3] 邱洪兴, 蒋永生. 古塔结构损伤的系统识别 I: 理论[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(2): 81-85.  
QIU H X, JIANG Y S. System identification for structural damage of ancient tower I: Theory [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2001, 31(2): 81-85. (in Chinese)
- [4] 邱洪兴, 蒋永生, 曹双寅. 古塔结构损伤的系统识别 II: 应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(2): 86-90.  
QIU H X, JIANG Y S, CAO S Y. System identification for structural damage of ancient tower II: Application [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2001, 31(2): 86-90. (in Chinese)
- [5] DITOMMASO R, MUCCIARELLI M, PAROLAI S, et al. Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: Comparing classical and time-frequency analyses [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2012, 10(4): 1221-1235.
- [6] VALENTE M, MILANI G. Seismic assessment of historical masonry towers by means of simplified approaches and standard FEM [J]. Construction and Building Materials, 2016, 108: 74-104.
- [7] SARHOSIS V, MILANI G, FORMISANO A, et al. Evaluation of different approaches for the estimation of the seismic vulnerability of masonry towers [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16(3): 1511-1545.
- [8] 李胜才, 赵有军, D'Ayala Dina, 等. 砖石古塔地震损伤演化的数值模拟[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2014, 17(4): 60-63.  
LI S C, ZHAO Y J, DINA D, et al. Numerical simulation on the seismic damage evolution of masonry ancient pagodas [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2014, 17(4): 60-63. (in Chinese)
- [9] 张文芳, 田洲, 李叶, 等. 晋祠舍利生生塔砖结构的地震破坏形态研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(3): 7-12.  
ZHANG W F, TIAN Z, LI Y, et al. Research on earthquake failure configuration of the Shelishengsheng Pagoda brick structure in Jinci Temple [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(3): 7-12. (in Chinese)
- [10] 童丽萍, 唐磊, 王文华. 嵩岳寺塔地震响应及最不利受力状态分析[J]. 世界地震工程, 2019, 35(2): 147-156.  
TONG L P, TANG L, WANG W H. Seismic response and the most unfavorable stress state analysis of the pagoda in Songyue Temple [J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(2): 147-156. (in Chinese)
- [11] 卢俊龙, 司建辉, 田鹏刚, 等. 兴教寺基塔动力特性测试分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(21): 105-108.  
LU J L, SI J H, TIAN P G, et al. Dynamic characteristic test analysis of Jishi Pagoda of Xingjiao Temple [J]. Building Structure, 2017, 47(21): 105-108. (in Chinese)
- [12] 卢俊龙, 李晓蕾, 崔晓玲, 等. 实心结构古塔模型频域地震响应试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(9): 238-245.  
LU J L, LI X L, CUI X L, et al. Tests for frequency domain seismic responses of masonry pagoda with solid structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(9): 238-245. (in Chinese)
- [13] 卢俊龙, 李传立, 韩鑫, 等. 竖向荷载下砖石古塔的损伤性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(1): 164-175.  
LU J L, LI C L, HAN X, et al. Damage performance of ancient masonry pagodas under the vertical load [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(1): 164-175. (in Chinese)
- [14] 张永亮, 汪振新, 刘尊稳, 等. 砖石古塔抗震性能评估方法及抗震加固措施研究[J]. 世界地震工程, 2019, 35(2): 41-47.  
ZHANG Y L, WANG Z X, LIU Z W, et al. Research on seismic performance assessment method and seismic strengthening measures for masonry Pagodas [J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(2): 41-47. (in Chinese)
- [15] 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.
- TANG Y J, ZHAO H, YE Z H, et al. Ancient brick masonry behavior and weathering degree evaluation [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(3): 67-74. (in Chinese)
- [16] 沈继美. 砌体匀质化过程的数值模拟方法与应用研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- SHEN J M. Study on homogenization process of masonry and its applications using numerical simulation [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [17] 杨卫忠, 樊潜. 砌体受压应力-应变关系[J]. 郑州大学学报(工学版), 2007, 28(1): 47-50.
- YANG W Z, FAN J. A generic stress-strain equation for masonry materials in compression [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2007, 28(1): 47-50. (in Chinese)
- [18] 韩鑫, 卢俊龙, 韦俊, 等. 西安八云塔动力性能与地震损伤机制[J]. 应用力学学报, 2020, 37(3): 1305-1313, 1408.
- HAN X, LU J L, WEI J, et al. Dynamic performance and seismic damage mechanism of Xi'an Bayun pagoda [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(3): 1305-1313, 1408. (in Chinese)
- [19] 古建筑防工业振动技术规范: GB/T 50452—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- Technical specifications for protection of historic buildings against man-made vibration: GB/T 50452-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [20] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

(编辑 黄廷)