

DOI: 10.11779/CJGE2023S20028

考虑土-结构相互作用倾斜状态文峰塔地震响应分析

安一劲, 韩鹏举*, 秦健栋, 白向灵, 何 斌, 王效渊

(太原理工大学土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 为研究在土-结构相互作用下倾斜状态古塔地震响应, 利用 ABAQUS 有限元软件, 采用等效线性化地基土及非线性化砖石材料, 考虑土体与结构分离滑移的几何非线性, 借助 python 语言添加黏弹性人工边界, 建立了倾斜及未倾斜状态永祚寺文峰塔两种有限元模型, 通过时程分析方法对比研究倾斜因素对古塔抗震性能影响。结果表明: 多遇地震作用下, 文峰塔历史最大倾斜量对其抗震性能影响较小, 峰值位移、层间位移角及加速度放大系数较未倾斜状态增加较小; 设防地震作用下, 倾斜状态文峰塔残余位移大幅增加, 下层层间位移角普遍放大, 加速度放大系数有所提高, 塔身在倾斜侧损伤面积及损伤程度急剧增大, 同时基础损伤也不容忽视。分析结果可为同类倾斜状态高层密檐砖塔抗震保护提供借鉴作用。

关键词: 土-结构相互作用; 倾斜砖塔; 地震响应; 黏弹性边界

中图分类号: TU311.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0201-07

作者简介: 安一劲(1999—), 男, 博士, 主要从事建筑遗产健康评估等方面的科研工作。E-mail: anyijing0020@163.com。

Seismic response analysis of leaning Wenfeng Pagoda considering soil-structure interaction

AN Yijing, HAN Pengju, QIN Jiandong, BAI Xiangling, HE Bin, WANG Xiaoyuan

(College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to study the seismic response of the leaning pagoda under soil-structure interaction, two kinds of finite element models for the leaning and un-leaning Wenfeng Pagoda of Yongzuo Temple are established by using the ABAQUS finite element software, adopting the equivalent linearization of foundation soils and non-linearization of masonry materials, considering the geometric non-linearities of the soil-structure separation and slip, and adding the visco-elastic artificial boundaries with the help of python language. By comparing the two models through the time-range analysis method, the effects of inclination factor on the seismic performance of the pagoda are investigated. The results show that under the action of small earthquakes, the historical maximum tilt has less impact on its seismic performance, and the peak displacement, section displacement angle and acceleration amplification coefficient have small increase. Under the action of middle earthquakes, the residual displacement of the leaning pagoda increases greatly, the lower layer of the pagoda section displacement angle is generally enlarged, the acceleration amplification coefficient increases, the damage area and degree of the pagoda in the leaning side increase dramatically, and the foundation damage should not be neglected. The analysis results can provide a reference for the seismic protection of similar leaning high-rise dense eaves brick pagodas.

Key words: soil-structure interaction; leaning masonry pagoda; seismic response; viscoelastic boundary

0 引 言

砖石古塔代表着中国古代高层建筑发展的极高水平, 但中国的砖石古塔大都处于地震高发区, 且其高耸的结构特点与密度较大的砖石材料, 造成其对地震作用较其他古建筑更为敏感, 大多数古塔的破坏、倒塌, 皆因地震导致, 且其今后仍然面临着地震破坏的威胁。因此合理有效地对古塔抗震性能进行评估对保护这类文化遗产至关重要。古塔倾斜是现存砖石古塔的普遍通病, 对倾斜状态古塔进行抗震性能分析更为

重要。李犇^[1]对倾斜状态虎丘塔进行了动力测试, 并寻找了不同工况古塔易发生破坏的部位。崔晓玲等^[2]依托陕西泰塔研究了倾斜砖石古塔的动力性能及其随机振动规律。严绍军等^[3]利用时程分析法验证了地震作用是云南大理崇圣寺南北塔倾斜的主要因素。

当前, 砖石古塔抗震性能研究通常把古塔视为放

基金项目: 山西省文物局科技项目 (RH2100001662)

收稿日期: 2023-11-30

*通信作者 (E-mail: 13834569544@163.com)

置于刚性地基表面上的有限自由度体系,地震动则通过刚性地基运动将地震能量传输给结构体系,引发古塔的变形与损伤。但土-结构相互作用对长细比较高的古塔动力响应影响很大。在土-结构相互作用的抗震研究中,土和基础接触面加设弹簧^[4],地基土周围设置无限元边界^[5],黏弹性边界^[6]等方法多被使用。其中黏弹性边界能够模拟人工边界外半无限截止的弹性恢复性能,有良好低频和高频稳定被广泛使用^[7]。但目前土-结构相互作用下对砖石古塔的抗震分析多采用底部加速度输入地震波,这种方法会导致动力计算结果出现连续振荡^[8]。

基于此本文选取永祚寺文峰塔作为研究对象,利用 ABAQUS 有限元软件,采用等效线性化地基土及非线性化砖石材料,考虑土体与结构分离滑移的几何非线性,建立了倾斜及未倾斜状态两种模型,通过在地基土周围施加黏弹性边界以等效节点力输入地震波,研究倾斜因素对古塔抗震性能影响。

1 永祚寺文峰塔有限元模型建立

1.1 永祚寺文峰塔概况

永祚寺文峰塔位于山西省太原市,建于 1599 年,八角十三层密檐砖塔,塔高 54.76 m,塔内有旋梯可以登临,塔身由青砖砌筑。文峰塔塔基为条石基础,由土、石灰混合浆砌,入土 1.32 m。由于湿陷性黄土地基不均匀压缩变形与偏心距增大的相互影响,文峰塔最大倾斜量达 2.86 m。后进行掏土法纠偏,使塔身复正。并采用水泥土灌注桩在塔基 2~2.7 m 进行围箍,使其形成一个隔水围幕防止外部的水渗入塔基下的土层内,减少附加湿陷变形。现古塔保存完好,是全国重点文物保护单位。

1.2 文峰塔模型

依据永祚寺文峰塔测绘剖切图,利用有限元软件 ABAQUS 采用整体式建模法^[6],建模时对金属塔刹、假窗予以简化,旋梯取各边均值高度计入开孔面积,阻尼比取 5%,依据实测频率利用瑞利阻尼定义塔身材料。塔身采用 C3D8R 单元,共生成 43230 个单元。

对于砖石同混凝土具有脆性损伤特性,故损伤本构采用 CDP 模型。塑性损伤基本参数根据相关研究选取^[9]。古塔砌体受压及受拉时采用弹塑性应力-应变关系^[10-11]。由弹性余能相等原则可推得受压及受拉状态的损伤演化方程为

$$D_c = \begin{cases} 0 & (\varepsilon < \varepsilon_{cm}) \\ 1 - \sqrt{\frac{1}{1 + (\eta - 1)(\varepsilon / \varepsilon_{cm})^{\frac{\eta}{\eta - 1}}}} & (\varepsilon \geq \varepsilon_{cm}) \end{cases}, \quad (1)$$

$$D_t = \begin{cases} 0 & (\varepsilon < \varepsilon_{tm}) \\ 1 - \sqrt{\frac{1}{\alpha_t (\varepsilon / \varepsilon_{tm} - 1)^{1.7} + (\varepsilon / \varepsilon_{tm})}} & (\varepsilon \geq \varepsilon_{tm}) \end{cases}. \quad (2)$$

式中: D_c 为受压损伤因子; D_t 为受拉损伤因子。

根据对永祚寺文峰塔砖砌体强度的测试^[12],取砌体抗压强度设计值为 2.76 MPa,峰值压应变取 0.003,轴心抗拉强度为 0.18 MPa,对应拉应变为 0.0001。砖砌体密度与泊松比分别取 1800 kg/m³, 0.15,其弹性模量取 $E=1696$ MPa^[13]。

1.3 地基土模型

根据已有研究结果^[6]结合场地条件与勘探结果进行适当简化,最终建模采用地基宽度 102.85 m,深度 25 m,土层物理力学参数如表 1 所示。土体采用 C3D8R 单元。为尽量减小土体滤波作用的影响,土体单元高度及水平方向尺寸取 1.5 m 左右,在土与基础接触的区域加密网格,共建立 81530 个单元。

表 1 土层物理力学参数

土类	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	弹性模量/ MPa
粉土	1950	0.29	16	24	217.76

等效线性模型理论较为完善,利用 EERA 迭代获得土层等效剪切模量与等效阻尼比^[14],利用 ABAQUS 基于等效剪切模量计算土体固有频率,再利用等效阻尼比输入土体瑞利阻尼依据,结合场地工程特性采用 Seed-Sun 模型^[15]。

采用黏弹性人工边界作为边界条件,其可等效为与岩土体材料性质有关^[7]的地基土边界上连续分布的 3 个方向弹簧-阻尼器单元(图 1)。

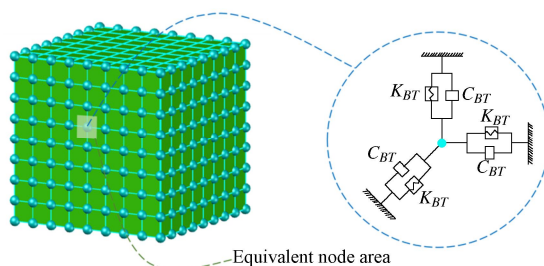


图 1 黏弹性边界示意图

Fig. 1 Schematic diagram of viscoelastic boundary

1.4 土-结构相互作用模型

文峰塔位置依据现场位置比例确定,采用 contact 方法来模拟考虑基础与土体分离滑移情况。定义塔基为主接触面、土体为从接触面,采用罚函数计算,接触面对法向行为采用硬接触,切向作用采取库伦摩擦方式,摩擦系数为 0.4。文峰塔倾斜状态利用刚性转角

向 x 正向旋转 2.5° 来模拟文峰塔历史最大倾斜量。由此构建倾斜及未倾斜状态永祚寺文峰塔两种有限元模型见图 2。

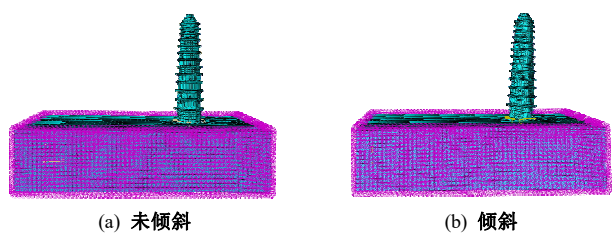


图 2 文峰塔土-结构相互作用模型

Fig. 2 Model for soil-structure interaction of Wenfeng Pagoda

先在固定边界下进行地应力平衡, 土体的应变满足 10^{-5} 以下, 得到应力应变场与边界节点反力; 施加黏弹性边界后去掉静力约束条件并施加节点反力, 以此完成静动力边界转换。

2 模态分析

在 ABAQUS 中采用线性摄动法进行模态分析, 将 `contact` 在模态分析中转换为 `tie`, 对两种模型开展模态分析, 表 2 给出水平向前二阶自振频率计算结果和实测值的对比验证。

表 2 文峰塔两种模型前二阶自振频率及差值

Table 2 First two natural frequencies and differences of three models for Wenfeng Pagoda

模态阶数	非倾斜模型			倾斜模型	
	实测频率 f_0/Hz	频率 f_1/Hz	误差 $e_{1-0}/\%$	频率 f_2/Hz	差值 $e_{1-0}/\%$
一阶 X 向	0.732	0.718	-1.91	0.662	-7.80
一阶 Z 向	0.732	0.719	-1.78	0.700	-2.64
二阶 X 向	3.125	3.393	8.58	3.391	-0.06
二阶 Z 向	3.125	3.410	9.12	3.407	-0.09

注: $e_{i-j} = (f_i - f_j)/f_j$ 。

文峰塔结构近似对称, 未倾斜状态下塔体每阶两个方向的自振频率均比较接近, 有限元分析结果与实测值接近^[16], 最大误差在 10% 以内。当塔体倾斜后整体自振频率降低, 尤以一阶频率降低最为严重, 一阶 X 向下降 7.80%, 塔体出现严重不对称情况, 第二振型下相差较小。

3 地震响应分析

3.1 地震波反演与输入

大量研究表明虽然地基土是非线性的, 但大多数地基土非线性是地震作用的结果^[17], 因此可以采用自由场进行地震反演分析。文峰塔场地类别为 III 类场地, 抗震设防烈度为 8 度。选择 El-Centro 波、Parkfield 波两条实测波并利用 SIMQKE_GR 生成一条符合规范反应谱的人工波以研究文峰塔地震响应。按 8 度 (0.20g)

多遇、设防地震的峰值加速度进行调幅, 地震动持续时间截取包含峰值段的 16 s。以调幅后的 3 种地震波为地表波利用 EERA 程序反演至距地表 25 m 深度处, 用 SeismoSignal 对地震波进行基线校正, 三向地震 $a_x:a_y:a_z=1:0.85:0.65$ 。图 3 为 x 向地表波及 25 m 土体底部波 (为 0.20g 为例)。

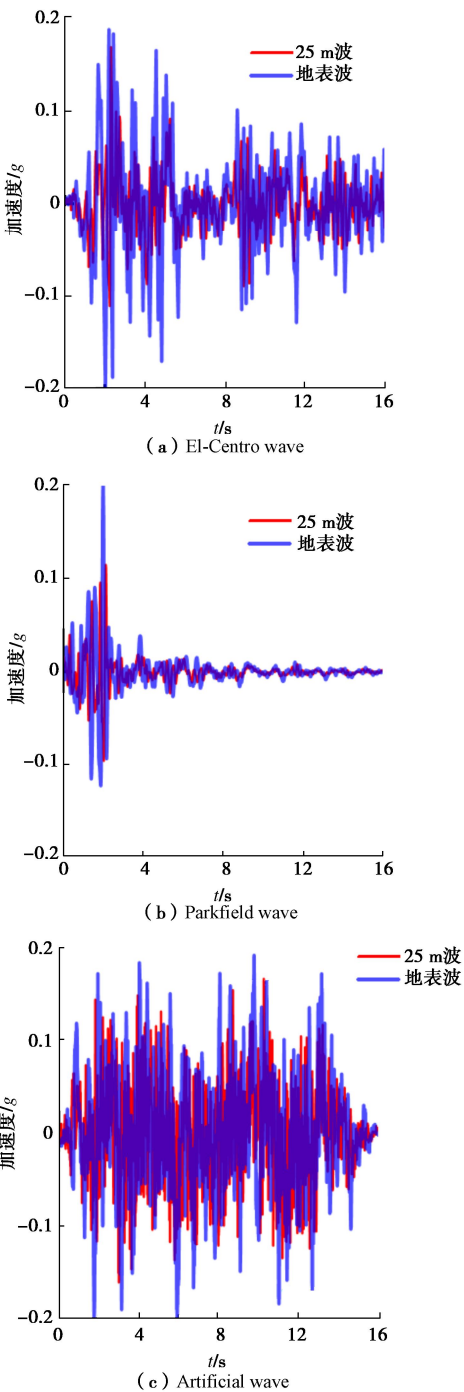


图 3 地震波加速度时程曲线

Fig. 3 Seismic acceleration-time curves

将地震波作为等效节点力输入模型。设黏弹性边界外侧的节点 b 处位移向量为 $\mathbf{u}_b^{\text{ff}} = [u \ v \ w]^T$, 速度向量为 $\dot{\mathbf{u}}_b^{\text{ff}} = [\dot{u} \ \dot{v} \ \dot{w}]^T$, 应力张量为 $\boldsymbol{\sigma}_b^{\text{ff}}$, 构成黏弹性边

界的弹簧刚度为 K_b ，阻尼系数为 C_b ，则人工边界上的节点等效应力为^[18]

$$F_b = K_b u_b^{\text{ff}} A_b + C_b \dot{u}_b^{\text{ff}} A_b + \sigma_b^{\text{ff}} n A_b, \quad (3)$$

式中： A_b 为边界节点的影响面积； n 为边界外法线方向余弦量； K_b ， C_b 为 3×3 对角矩阵。

3.2 古塔抗震性能分析

以各层塔身横截面顶部突变处特征点为分析对象，如图 4 所示在多遇烈度 El-Centro 波作用下，倾斜状态下文峰塔位移峰值略有增大，且在 9.5 s 后波峰产生较为明显的差别，塔体位移曲线向倾斜侧偏移，塔顶偏移量增长 37.6%，但整体位移时程曲线与未倾斜时波形相位基本一致，多遇地震作用下文峰塔历史最大倾斜量对其抗震性能影响较小，塔体仍具有良好的抗震性能未产生明显破坏。

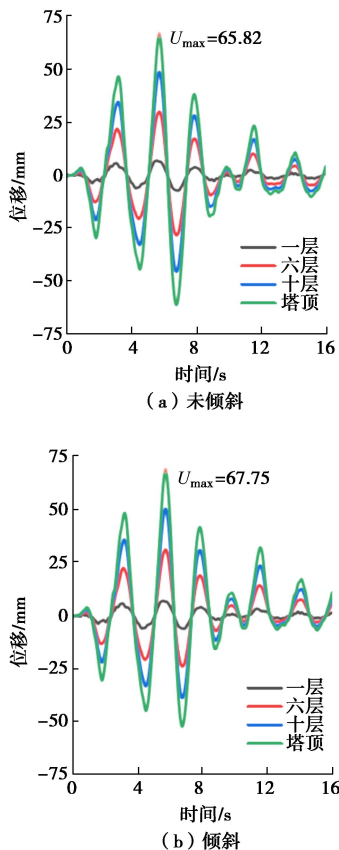


图 4 多遇烈度 El-Centro 波作用下文峰塔 x 向位移时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of x -directional displacement under action of El-Centro wave with small intensities

如图 5 所示，未倾斜状态古塔与其多遇地震时相比 6.5 s 后波形产生明显变化，较大的地震能量使基础变形累积，与周围土体出现分离滑移，塔身损伤逐步扩展，向 x 正向产生明显偏移，进入弹塑性阶段；倾斜状态古塔前 4.2 s 波形与未倾斜时基本一致，破坏尚不明显，4.2 s 后位移曲线向 x 正向偏移显著，峰值位移较未倾斜时增长 20.2%，在 7.9, 11.5, 13.9 s 处波

峰增长 81.6%~169.2%，且产生较大的残余位移，古塔的倾斜状态致使其在设防烈度地震作用下向倾斜侧偏移大幅加剧，甚至产生倒塌的风险。

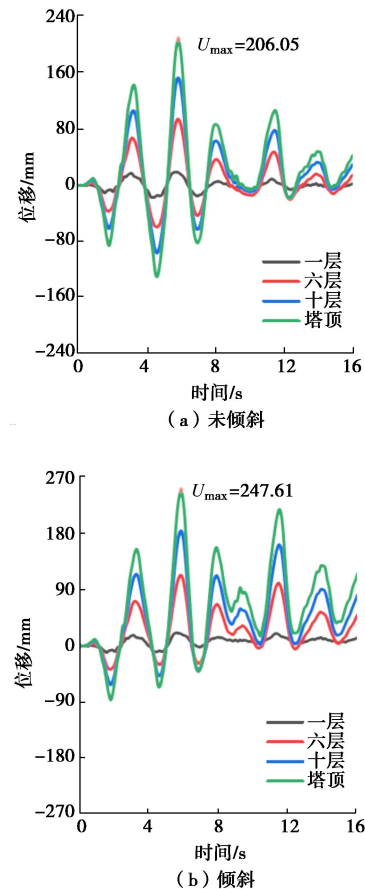


图 5 设防烈度 El-Centro 波作用下文峰塔 x 向位移时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of x -directional displacement under action of El-Centro wave with middle intensities

砖石古塔结构变形属典型的弯剪型，其层间位移角可以反映结构抗震性能。如图 6，在多遇烈度地震作用下，未倾斜和倾斜状态古塔层间位移角基本一致，层间位移角最大值为 $1/528$ ，未出现明显破坏。设防烈度地震作用时，未倾斜状态古塔在 El-Centro 波作用下自 4 层开始进入刚度退化阶段，至塔顶层间位移角达 $1/207$ ，但未超过层间极限位移角 $1/150$ 发生严重解体，倾斜状态古塔层间位移角大幅增大，第 1 层处于屈服阶段，2 层以上刚度退化，设防烈度 El-Centro 波作用下倾斜因素大幅削弱了古塔抗震稳定；人工波作用下倾斜状态较未倾斜时前四层层间位移角增大，其余各层降低了 4.0%~8.1%，倾斜古塔在具有与倾斜向相反的较大加速度及位移的人工波作用下侧向倾斜量耗散了部分地震能量，造成上层塔体层间位移角有一定下降回落，但由于古塔下层弯矩及剪力较大，较大的峰峰值加剧下层塔体的塑性损伤，使下层层间位移角增大 1.8%~21.8%。

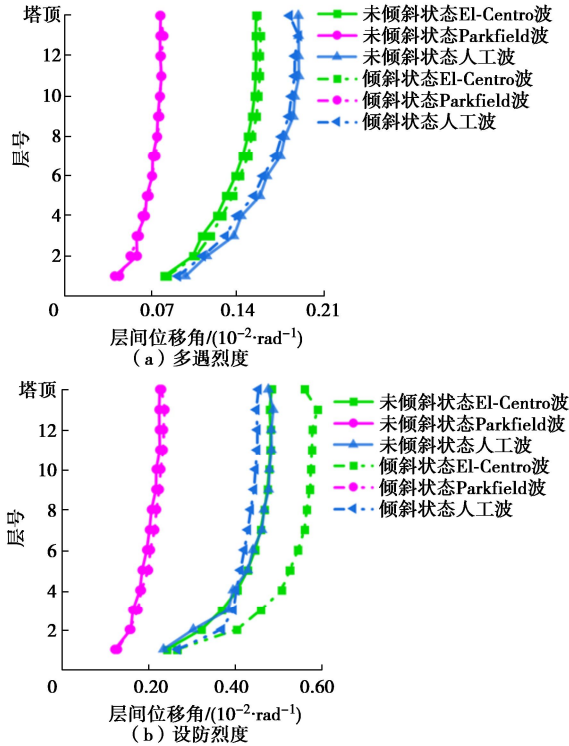


图 6 层间位移角

Fig. 6 Section displacement angles

如图 7 所示, 多遇地震未对古塔造成较大破坏, 其整体基本处于弹性阶段, 未倾斜与倾斜状态古塔二者加速度放大系数基本一致; 在设防地震作用下, 倾斜状态古塔加速度放大系数较未倾斜时最高增大了 15.8%, 其对较大地震荷载响应敏感。整体上多遇地震作用下加速度放大系数较大, 其原因为多遇地震作用下多数时间古塔基础与土体间静摩擦力大于地震剪力, 二者间产生的相对位移较小, 地震能量由基础传递到上部塔身损耗较小; 而随着地震能量的增大基础与土体发生较大相对位移, 能量耗散增大, 且设防地震作用下结构均已进入弹塑性阶段, 塑性形变不断增加, 结构损伤累积消耗的塑性能较大, 刚度降低, 结构的动力响应相对于线性阶段大大减小。

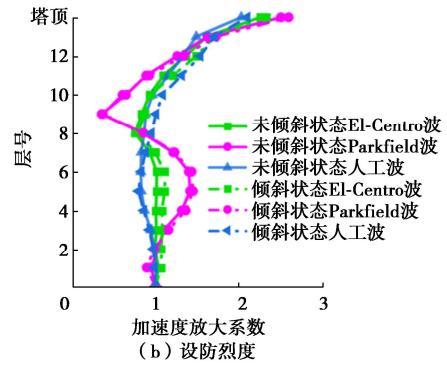
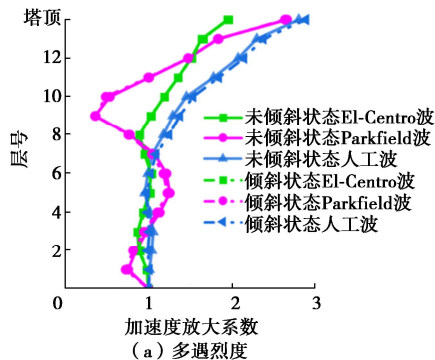


图 7 加速度放大系数

Fig. 7 Acceleration amplification factors

3.3 古塔损伤分析

图 8, 9 为设防烈度 El-Centro 波作用下未倾斜和倾斜状态古塔受拉损伤云图, 由图 8 可知在 El-Centro 波作用下未倾斜状态古塔 x 正向较负向损伤严重, 一、二层损伤面积增大 22% 且平均损伤因子增大 31%, 塔身呈现出砖石古塔沿中和轴破坏的典型震损特点。由图 9 可知倾斜状态下古塔 x 正向损伤面积较未倾斜时显著提高, 一、二层平均损伤因子增大 32% 达 0.874, 且受损面积增大 19%; x 负向较未倾斜状态负向损伤面积降低 18%, 且平均损伤因子降低了 30%, 较倾斜状态 x 正向损伤面积降低 44%, 平均损伤因子降低了 59%, 可见倾斜状态下古塔地震损伤主要集中于倾斜向塔身造成塔身不均匀破坏, 加剧古塔倾斜发展。其原因主要为地震作用下文峰塔底部弯矩与剪力较大, 且塔檐及开洞处截面刚度发生突变, 在地震作用下引发应力集中, 底层及塔檐损伤较为明显。而倾斜古塔的倾斜侧砖石应力增大, 在地震往复荷载作用下弯曲变形更加明显, 更易发生塑性损伤且损伤程度更加严重。

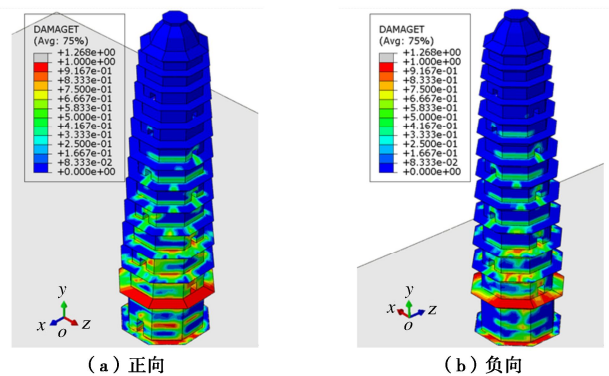


图 8 El-Centro 波作用下未倾斜状态古塔损伤云图

Fig. 8 Damage cloud of Wenfeng Pagoda in untilted state under action of El-Centro wave

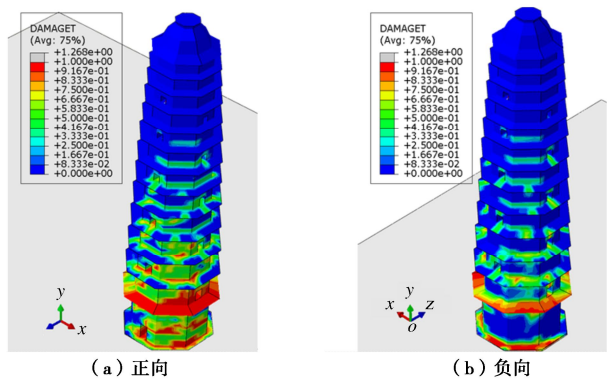


图 9 El-Centro 波作用下倾斜状态古塔损伤云图

Fig. 9 Damage cloud of Wenfeng Pagoda in inclined state under action of El-Centro wave

取古塔基础底部外缘为分析对象,如图 10 所示在人工波作用下,基础底部外缘由于古塔偏心荷载与土反力共同作用产生受拉损伤。未倾斜状态古塔随着地震波作用下前 5 s 向 x 正向偏移较大,基础积累了塑性形变,出现受拉损伤,在人工波继续作用下古塔整体大幅向 x 负向偏移,基础塑性形变积累较快,且损伤加剧,较正向损伤因子增大 16.7%;倾斜状态古塔基础前期已有一定残余应力,对地震作用较为敏感,受拉损伤产生较早,负向较未倾斜状态提高 3.8%,正向提高 22.3%,设防烈度地震作用下倾斜因素对古塔抗震性能大幅削弱,古塔呈现向倾斜侧破坏形式。由此可以推断在罕遇烈度地震作用下,基础破坏更加严重,这与 2008 年汶川地震中古塔破坏模式相吻合^[19]。

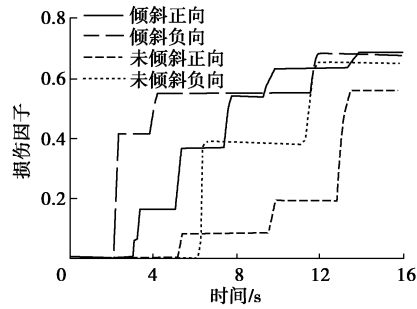


图 10 古塔基础受拉损伤因子时程

Fig. 10 Time histories of tensile damage factors of foundation

4 结 论

以永祚寺文峰塔为研究对象,采用等效线性化地基土、非线性砖石材料,并考虑土-结构分离滑移的几何非线性,通过设置黏弹性人工边界,建立了考虑土-结构相互作用倾斜与非倾斜文峰塔有限元模型,对其进行地震响应分析,得到 4 点结论。

(1) 在多遇地震作用下,历史最大倾斜量影响较小,结构安全;在设防地震作用下,文峰塔基础与

周围土体分离滑移现象明显,塔体向倾斜侧偏移。
(2) 在多遇地震作用下,文峰塔历史最大倾斜量对结构层间位移角影响较小;在设防地震作用下,倾斜状态文峰塔下层层间位移角普遍增大。
(3) 在设防地震作用下,倾斜状态古塔对较大地震荷载响应敏感,加速度放大系数有所增大。随着地震烈度的增大,加速度放大系数有所降低。
(4) 在设防地震作用下,倾斜状态古塔塔身损伤在倾斜侧大幅增加,同时基础损伤也急剧增大,古塔基础发生破坏的风险不容忽视。

参考文献:

[1] 李 犇. 倾斜砖石古塔的有限元模拟及危险性分析[D]. 南京: 东南大学, 2022. (LI Ben. Finite Element Simulation and Risk Analysis of Inclined Masonry Ancient Tower[D]. Nanjing: Southeast University, 2022. (in Chinese))
[2] 崔晓玲, 李 凯, 卢俊龙, 等. 倾斜砖石古塔随机振动测试分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(2): 70-74. (CUI Xiaoling, LI Kai, LU Junlong, et al. Analysis of random vibration test of an inclined ancient masonry pagoda[J]. Building Structure, 2017, 47(2): 70-74. (in Chinese))
[3] 严绍军, 方 云, 唐朝晖. 云南大理崇圣寺南北塔倾斜成因研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3367-3373. (YAN Shaojun, FANG Yun, TANG Zhaohui. Research on inclination reason of north and south pagodas of Chongsheng Temple, Dali, Yunnan Province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3367-3373. (in Chinese))
[4] 李宏男, 徐 静. 考虑桩-土-结构动力相互作用的输电塔线体系简化抗震计算模型[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1763-1767. (LI Hongnan, XU Jing. Simplified aseismic calculation model for transmission tower-line system considering pile-soil dynamic interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1763-1767. (in Chinese))
[5] CASOLO S, DIANA V, UVA G. Influence of soil deformability on the seismic response of a masonry tower[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15(5): 1991-2014.
[6] 刘 羽. 汶川地震中龙护舍利塔的损伤特征研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012. (LIU Yu. Research on Seismic Damage Feature of Longhu Pagoda in Wenchuan Earthquake[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012. (in Chinese))
[7] BAO X, LIU J B, LI S T, et al. A new viscoelastic artificial boundary with improved numerical stability in explicit calculation of wave propagation problems in infinite domains[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 145: 104698.

- [8] 马笙杰, 迟明杰, 陈红娟, 等. 黏弹性人工边界在 ABAQUS 中的实现及地震动输入方法的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(7): 1445-1457. (MA Shengjie, CHI Mingjie, CHEN Hongjuan, et al. Implementation of viscous-spring boundary in ABAQUS and comparative study on seismic motion input methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(7): 1445-1457. (in Chinese))
- [9] 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 Jimei. Study on Homogenization Process of Masonry and its Applications using Numerical Simulation[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012. (in Chinese))
- [10] 杨卫忠. 砌体受压本构关系模型[J]. 建筑结构, 2008, **38**(10): 80-82. (YANG Weizhong. Constitutive relationship model for masonry materials in compression[J]. Building Structure, 2008, **38**(10): 80-82. (in Chinese))
- [11] 郑妮娜, 李英民, 潘毅. 芯柱式构造柱约束的低层砌体结构抗震性能[J]. 西南交通大学学报, 2011, **46**(1): 24-29, 55. (ZHENG Nina, LI Yingmin, PAN Yi. Seismic behavior of low masonry structure with core-tie-columns[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, **46**(1): 24-29, 55. (in Chinese))
- [12] 李世温, 李庆玲. 太原永祚寺东塔维修后的抗震能力初探 [C] // 建筑物鉴定与加固改造第五届全国学术讨论会. 南京, 2000. (LI Shiwen, LI Qinglin. A preliminary investigation of the seismic resistance of the repaired Yongzuo Temple East Pagoda in Taiyuan[C]// Proceedings of the Fifth National Symposium on Building Identification and Strengthening and Renovation. Nanjing, 2000. (in Chinese))
- [13] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 78-80. (SHI Chuxian. Theory and Design of Masonry Structure[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003: 78-80. (in Chinese))
- [14] 杜修力, 许紫刚, 许成顺, 等. 基于等效线性化的土-地下结构整体动力时程分析方法研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(12): 2155-2163. (DU Xiuli, XU Zigang, XU Chengshun, et al. Time-history analysis method for soil-underground structure system based on equivalent linear method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(12): 2155-2163. (in Chinese))
- [15] BARDET J, ICHII K, LIN C. EERA-A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits[R]. Los Angeles: University of Southern California, 2000.
- [16] 魏剑伟, 李铁英. 古砖塔动力特性测试与分析研究[J]. 山西建筑, 2002, **28**(1): 18-19. (WEI Jianwei, LI Tiesheng. Research on the test and analysis of ancient brick tower dynamic characteristics[J]. Shanxi Architecture, 2002, **28**(1): 18-19. (in Chinese))
- [17] FLORA A, CHIARADONNA A, DE SANCTIS L, et al. Understanding the Damages Caused by the 1999 Kocaeli Earthquake on One of the Towers of the Theodosian Walls of Constantinople[J]. International Journal of Architectural Heritage, 2022, **16**(7): 1076-1100.
- [18] BI Z H, CUI B H, ZHAI Y F. Research on seismic input method of layered ground foundation[J]. IEEE Access, 2021, **9**: 54820-54830.
- [19] JIANLI Y, SHENGCAI L. Study of the seismic damage regularity of ancient masonry pagodas in the 2008 Wenchuan Earthquake[C]// WIT Transactions on The Built Environment", "Earthquake Resistant Engineering Structures IX. A Coruña, 2013.

(编校: 胡海霞)