

加固作用下台藏塔对地震荷载的动态响应

雷海涛

(咸阳职业技术学院, 陕西 咸阳 712046)

摘要: 大量调查表明, 影响我国西部干旱半干旱地区土遗址安全的主要因素为结构的稳定性问题。通过有限元数值实验的手段, 分析了台藏塔在加固前后对地震荷载作用的响应, 探究加固措施对其应力应变场的影响。结果表明: 加固措施对塔身及其下基础的最大位移和应力集中具有显著约束作用。另外, 加固措施使地基土的承载力得到显著提高。

关键字: 土遗址; 有限元法; 地震响应; 动态响应

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 94047-(2017)03-037-04

0 引言

古遗址属于历史文物分支的重要领域, 它不但能彻底地表现出人类在一定社会背景下的生产、生活方式和改造自然的能力, 还能够对了解地域性生土建筑发展和演变具有重要意义^[1,2]。土遗址作为古遗址领域中的重要组成部分, 其往往能够以一种信息载体的方式将各种各样的历史文化和艺术文化进行传承。

在漫长历史演变中, 土遗址遭受各种侵蚀作用, 例如风蚀、地震和人类破坏等。同时, 这些侵蚀作用不但对土遗址进行不可修复的破坏, 还对其安全性带来许多潜在危害^[3]。

近年来, 我国的地震灾害频繁发生, 且其危害程度呈逐年上升趋势。在我国, 由于许多土遗址位于地震活动区, 因此土遗址在地震荷载作用下的稳定性研究具有重要的意义^[4]。

1 有限元分析理论

根据经典弹性理论, 台藏塔整体结构的动弹性平衡方程可定义为线弹性, 其表达式如下^[5]:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -m\ddot{x}_g \quad (1)$$

式(1)中, M 为结构整体质量矩阵; C 为结构整体阻尼矩阵; K 为结构整体刚度矩阵; \ddot{u} 为节点加

速度向量系统; \dot{u} 为节点系统速度矢量; u 为节点位移矢量的系统; \ddot{x} 为结构采用的地震加速度向量。本文采用瑞利阻尼解决阻尼矩阵:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (2)$$

式(2)中, α 为质量阻尼系数; β 为刚度阻尼系数。阻尼系数可通过下式计算:

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}, \beta = \frac{2(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (3)$$

式(3)中, ω_1 和 ω_2 分别表示一阶和二阶自然频率(模态分析获得)。此处, 令 ξ_1 和 ξ_2 均为0.05。

目前为止, 线性平衡方程可通过直接积分法和多点法进行计算。本文中采用Newmark- β 法, 该方法属于一种较为精确的直接积分法^[6]。

2 台藏塔的动态分析

2.1 工程背景

台藏塔始建于公元前6至7世纪, 为高昌王国时期的佛教建筑。该项目位于吐鲁番市以东约40Km, 南距高昌故城约1Km。塔东面与北面均有佛教洞龕。西面塔壁中有洞, 贯穿墙壁, 作用不明, 南壁已毁。由于距高昌古城较近, 又是高昌王国佛教建筑, 充分反映了高昌时期佛教的兴盛。台藏塔是第五批国家重点文化保护项目由国务院公布^[7]。

该塔塔身约高20m, 占地面积约939m², 平面呈口字形。朝南偏西。塔基底部外边南北长约36m, 东西残长34m, 塔壁基部厚8~12m。塔内中空, 内边方约15m。南向正中有宽约3m的缺口。由于温差交替、地震、冻融和卸荷等自然外力的作用, 使遗址内夯土、土坯建筑产生了纵横交错的裂隙和泥坯的开裂与破碎。风蚀、人为破坏等造成的孔洞、缺损增大了结构不稳定的风险, 甚至塔身已严重损毁, 表面出现大量裂缝。故降雨可通过裂缝下渗入塔体内部。因防雨措施不当, 塔顶已出现严重雨水冲刷印痕。由此可见, 该遗址的安全稳定性已受到严重威胁。

为避免该遗址的安全稳定性继续劣化, 当地文物部门协同其他有关机构于2014年4月对其进行了加固(如图1所示), 主要措施有: 土坯扶壁; 灌浆抹缝; 设置锚杆和钢支撑^[8,9]。

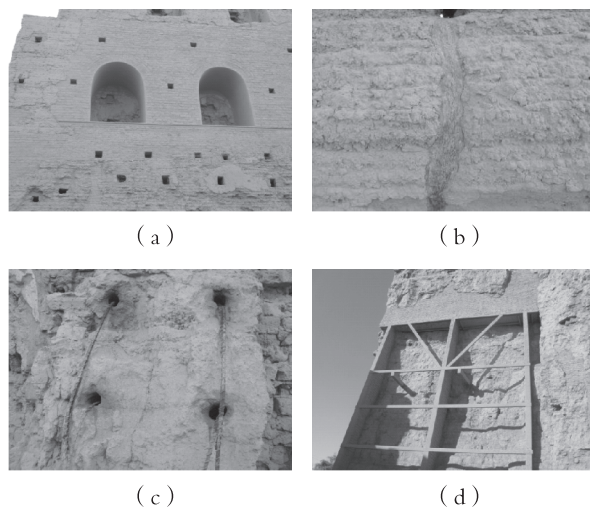


图1. 加固措施示意图

2.2 塔身土体力学参数

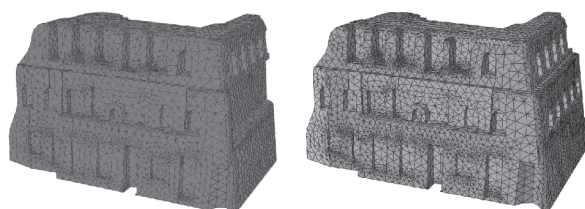
遗址结构的材料参数通过电子材料试验机测量(CSS-88100), 试件尺寸为50mm*50mm*50mm。测量结果见表1。

表1 台藏塔体材料力学参数

参数	弹性模数	粘聚力	内摩擦角	密度	平均抗压强度
测量值	30 MPa	45 kPa	20°	1870 kg/m ³	1.44MPa

2.3 有限元模型

该模型根据台藏塔的实际测量尺寸并利用ABAQUS数值分析软件建立(如图2所示)。模型的单元类型选用C3D4单元。整个模型包含19006个节点, 94331个单元。模型底部位移设为固定约束。土壤和钢支架均假设为各相同性的线弹性均匀材料, 且其接触表面设置摩擦单元。



(a) 加筋前

(b) 加固后

图2. 有限元模型示意图

2.4 载入地震波种类

由于地震活动的随机性, 数值分析验算过程中地震类型的选择困难增加。因此, 为了能准确地模拟地震荷载对结构的影响, 需要将地震强度(峰值加速度)的频谱特征和持续时间设置在合适范围内。通常我们可采取以下三点措施:

2.4.1 地震强度(峰值加速度) 为了准确选择地震波峰值加速度, 我们必须扩大或减少现有的地震峰值加速度记录。最大地震加速度时程分析如表2所示。

表2 地震最大加速度时程分析[cm/s²]

震级	6度	7度	8度	9度
多遇地震	18	35 (55)	70 (110)	140
罕遇地震	125	220 (310)	400 (510)	620

注: 括号中数值分别用于设计基本地震加速度为0.15g和0.30g的地区。

2.4.2 频谱特征 频谱特征包括频谱峰值、形状、特征周期等 由于地震波为重点考虑对象, 需将结构的特征周期和设计特征周期一致化。

2.4.3 持续时间 所在场地的地震波持续时间不宜小于结构基本自振周期的5~10倍。

根据上述分析, 结合设计总则(该抗震设防烈度为7度; 设计基本地震加速度为0.1g), 地震波设为16秒, 振动频率设为50Hz。调幅后的地震加速度曲线如图3所示。

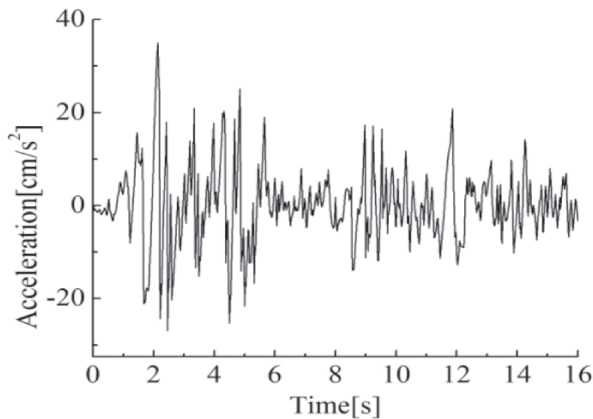


图3. 调幅后的地震加速度曲线

2.5 应变场分析

图4a给出最大裂纹附近的位移变量时程曲线。由图可知，在地震荷载作用下，台藏塔的应力场发生规律性变化。实际测量发现，裂缝周围土体在加固前发生较大的相对位移。而经灌浆抹缝处理后，裂缝两侧土体成为整体，塔身裂缝附近的最大相对位移和整体位移均得到显著降低，最大降幅达10.01%。当未设置钢支撑时，土体聚合力较差，进而塔身结构整体性也较差，位移水平相对较高。图4b给出塔身设置钢支撑后土体最大位移变量的时程曲线。从图中可见，当设置钢支撑后，土体结构的位移随其支撑提供聚合力的增加而减小，最大降幅为1.68%。图4c和d分别给出了土坯加固附近区域和塔顶的最大位移变量的时程曲线。由图可知，土坯加固对结构整体性的提高具有显著作用。随着结构整体性的提高，结构的应变水平将逐渐降低，土坯加固区和塔顶的应变降幅分别可达6.22%和9.9%。

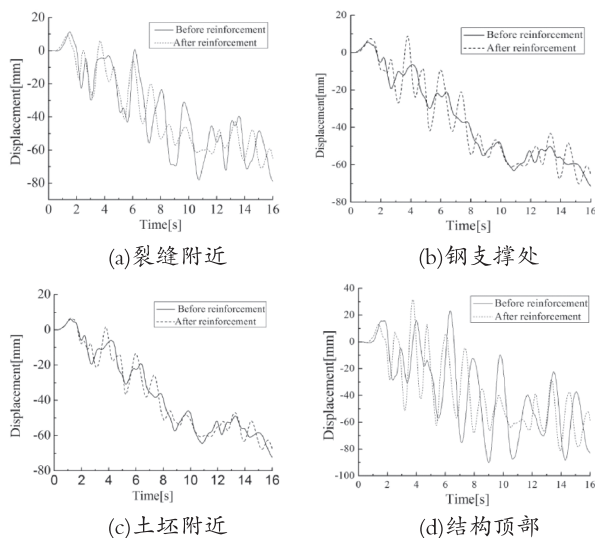


图4. 加固前后最大的位移变量的时程曲线

2.6 应力场分析

应力水平不但可以反映结构在受力过程中所处的应力状态，而且还可以对土体结构的稳定性进行有效评定。图5给出了加固前后结构整体的有限元计算应力云图。在该工程中，由于裂缝和空洞所导致应力集中对塔身整体的应力水平产生了严重影响。另外，加固材料的嵌入使得结构整体的质量显著提高，故加固后的加筋土应力水平明显高于加固之前，且该状态下的最大应力值仍小于土体的抗压强度（1.44MPa）。同时，由于加固作用，应力集中区域的应力集中现象被弱化。

对比图5a和b，在钢筋加固后，塔身裂缝附近对地震的动态响应显著降低。也就是说，加固措施可以有效提高结构的整体稳定性。对比图5c和d，加固后孔洞附近的应力分布趋于均匀，应力集中程度得到抑制。由此可见加固措施可以有效提高结构整体的抗震能力。

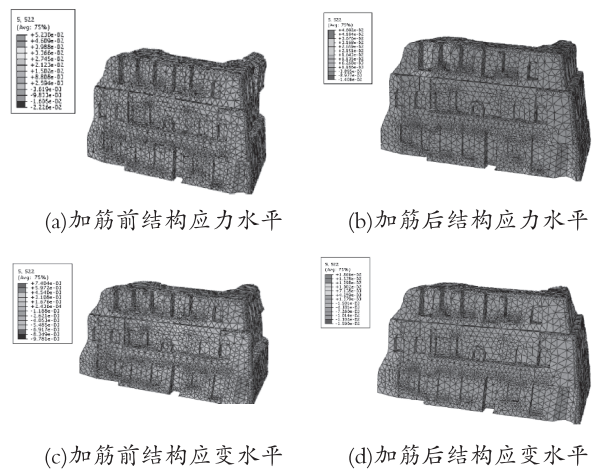


图5. 结构应力应变云图

3 结论

通过对比加固前后有台藏塔有限元模型在地震作用下的应力应变水平，发现加固措施有效地提高了该塔的安全性及稳定性，并得出以下结果：

- (1) 文中采取加固措施对塔体裂缝的扩展起到了有效抑制作用，薄弱区域得到有效改善，土体稳定性得到提高。
- (2) 灌浆抹缝有效地提高了塔身整体刚度，使得加固后塔身在地震荷载作用下的位移水平显著降低，最大降幅达10.01%。
- (3) 加筋土的嵌入使结构整体质量有所增

加,故应力水平较加固前有所提高,但最大值未超过土体的抗压强度。

(4) 由于加固作用,塔身的应力集中现象得到缓解。由此可见,加固措施可以明显改善塔身结构的应力分布,避免应力集中,使结构更加安全。

参考文献

- [1]张卫喜,陈平,赵冬,毛筱霏.高昌故城西南大佛寺结构病害分析与加固[J].工业建筑.2007,37(8):86-106.
- [2]徐有邻,字秉训,姜红.三股钢绞线基本性能的试验研究.工业建筑,1998, 28(9): 32-37.
- [3]赵海英,李最雄.西北干旱区土遗址的主要病害及成因.岩石力学与工程学报,2003,(10):2875-2880.
- [4]周双林,袁思训,郭宝发等.土遗址加固保护材料研制及效果检验.//第六届全国考古与文物保护化学学术研讨会.泉州:2000.
- [5]R.W.Clough,J.Penzien.Dynamics of Structures[M]. McGraw-Hill.2006:172-194.
- [6]李鸿晶,王通,廖旭.关于Newmark- β 法机理的一种解释[J].地震工程与工程振动.2011,31(2):56-62.
- [7]国家文物局.第一至五批全国重点文物保护单位保护管理调研资料手册.2005.
- [8]联合国科教文组织.文物保护中的适用技术[M].北京:中国对外翻译出版公司,1985.
- [9]李最雄.丝绸之路古遗址保护[M].北京:科学出版社,2003.

[责任编辑、校对:王军利]

Dynamic Despondence of the Taizang Tower with the Reinforcement under Seismic Load

LEI Hai-tao

(Xianyang vocational & technical college, Shannxi, Xianyang,712000)

Abstract: It was shown that the structural stability is the greatest important issues threatened the earthen in the western of China from a lot of investigations and analyses of soil sites. The Taizang tower was studied as a research suffering the earthquake. The stress and displacement field were analyzed by dynamic finite element method (FEM) for the tower before and after reinforcement under seismic load, respectively. The results showed that, with the measure of reinforcement, the maximum displacement of the tower can be obviously decreased; the stress distribution of the tower tends to be uniformity; the stability of the soil site can also be improved.

Key words: soil sites, FEM, seismic excitation, dynamic response