

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.022

高昌故城内城墙墙体土遗址动力响应分析*

刘 琨^{1,2,3}, 李桐林², 石玉成^{1,2,3}, 唐洪敏², 缙正英³

(1. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 73000; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;
3. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 对高昌故城内城墙墙体进行现场脉动测试, 获取土建筑遗址的频谱特性及其自振频率, 分析高昌故城内城墙不同部位速度放大效应, 研究其在地震荷载作用下的动力响应特征, 明确墙体薄弱部位已有加固措施的防护效果。结果表明: 高昌故城内城墙的速度放大倍数约 1.5~2 倍, 与地脉动测试结果大致吻合; 内城墙自底部至顶部, 速度、位移响应均逐渐增大, 二者在墙体凹陷处的表现不同, 前者相对降低、后者量值最大; 内城墙凹陷及洞穴处加固前后应力分布变化明显, 应力集中部位不再处于墙体薄弱部位, 墙体加固效果良好。所得结果可为高昌故城墙体抗震加固防护提供参考依据。

关键词: 高昌故城内城墙; 自振频率; 速度放大效应; 应力集中

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-1018-06

Dynamic Response Analysis of Inner Soil Wall Ruins in Ancient Gaochang City

LIU Kun^{1,2,3}, LI Tonglin², SHI Yucheng^{1,2,3}, TANG Hongmin², XIAN Zhengying³

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China;
2. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China;
3. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Through the in-site pulsation test on the inner wall of ancient Gaochang City, the spectrum characteristics of the earthen architecture sites were measured. The self-vibration frequency was obtained by the spectrum diagram, and the velocity amplification effect at the middle and bottom of the inner wall of ancient Gaochang City was analyzed. Dynamic response analysis under seismic loading was carried out. The results show that the velocity amplification at the middle and bottom of the inner wall of ancient Gaochang City is about 1.5-2, which is roughly consistent with the pulsation test results. From the bottom of the inner wall to the top, the response velocity and corresponding displacement gradually increase. But the velocity decreases in the cavity in the wall while the displacement reaches its maximum at the same site. The distribution of stress changes greatly after the reinforcement treatment of the wall defect, the maximum stress point transfers from the weak part to the top and bottom of the wall, illustrating a good reinforcement effect. Further damage to the cultural relics of the soil sites can be avoided through the reinforcement of the wall. This research provides a refer-

* 收稿日期: 2019-05-21; 修回日期: 2019-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678545)、甘肃省科技计划项目(18JR3RA415)资助

作者简介: 刘 琨(1985-), 男, 助理研究员, 博士。主要从事岩土地震工程研究。Email: liukun@gsdzj.gov.cn

ence for the strengthening of ancient Gaochang City.

Keywords: the interior wall of ancient of Gaochang City; natural vibration frequency; speed amplification effect; stress concentration

引言

高昌故城作为第一批全国重点文物保护单位,是我国现存规模最大、形制最为复杂、保存较好的古代都城,蕴含了中国古代建筑的特有技术,反映了当时人类的社会活动、社会关系、意识形态及利用自然、改造自然的能力,具有宝贵的研究价值。但高昌故城所处的丝绸之路沿线在历史上多次遭受地震的袭击,据统计丝绸之路沿线(陕、甘、宁、青、新)104处国务院颁布的重点土遗址文物,其中34%分布在Ⅷ度或Ⅷ度以上地区,51%分布在Ⅶ度区,15%分布在Ⅵ度区^[1-2]。在此背景下,高昌故城的动力响应分析及抗震保护研究已经成为土遗址科学研究和保护的一项重要内容。

石玉成等^[3]通过对山丹明长城遗址附近高速公路车辆振动的分析测试,反映了车辆载重、车速、场地条件等因素对振动效应的影响,提出了不同类型土遗址振动安全阈值。胡明清^[4]通过对敦煌地区土遗址现场地震动特性的测试,探讨了不同地震动作用下,不同类型土遗址的破坏机理。王晓东^[5]通过振动台试验和竖直模拟,研究了古代夯土建筑在地震荷载下的动力响应以及楠竹加筋复合锚杆的抗震加固效果。谌文武等^[6]通过对苏巴什佛寺东寺的地震响应分析,得出了佛塔的位移、应力变化规律以及地震加速度放大效应。郭志谦等^[7]通过对山丹县刘富寨敌台进行地震动力响应分析,得出了双向地震荷载作用下敌台的位移、应力以及裂隙处放大效应的变化情况。

高昌故城包括外城、内城和宫城(可汗堡)等三重城。论文选择的现场动力测试点位于北内城墙西段(分为上下两期建筑),通过对高昌故城内城墙进行动力响应分析,研究高昌故城内城墙的位移、应力响应特征和放大效应沿墙体不同部位的分布情况,评价城墙已有加固措施在抗震防护方面的实际效用,其结果对高昌故城城墙的抗震加固防护的措施选取和设计施工具有一定指向价值。

1 地区地震活动概况

高昌故城位于天山地区东部的吐鲁番地区,区域内由北向南主要有4组呈东西走向的地震断裂带,分别为北部的大河沿—洛包泉地震断裂带、中部的吐鲁番中央盆地断裂带、中南部的博罗霍洛断裂带以及南边的库鲁克塔格断裂带。根据地震与构造的相关性以及地质构造的差异,吐鲁番地区的中强震场所主要分为南北两块,北块中强震次数相对较多,呈现北强南弱的特点,而吐鲁番地区即处于地震强度相对较高的北块,本世纪以来已有三次邻区强震和一次研究区内强震,使吐鲁番地区地震烈度达Ⅵ-Ⅶ度^[8-9]。因此,高昌故城土遗址抗震保护尤为重要。

2 现场脉动测试

在一般情况下,任何时刻任何地点地球表面都在进行着振幅很小的微弱振动,其位移甚至不到 $1\mu\text{m}$,我们把这种微小的振动称为地脉动^[10-11],波是由面波和体波组成的,主要反映了场地结构的动力特性^[12]。土建筑遗址的抗震性能和破坏形式与其动力特性密切相关,虽然通过理论计算可以确定结构的自振周期,但往往理论计算与实际情况有一定出入,加之土遗址现存外型的不规则,导致计算值与实际值差别较大。因此,通过现场实际脉动测试获得其动力参数,对于评价土遗址抗震性能至关重要^[4]。

测试仪器由INV3060S型网络分布式数据采集系统、传感器和计算机三部分组成,DASP大容量数据自动采集和处理系统包含六路四合一拾振器和大容量采集系统,通过连线与计算机实行全自动通讯,其振动频率的量测范围为 $0.5\sim 500\text{Hz}$ 。

本次测试在无其他扰动的情况下进行,测试时间为 120s 以上,采用无损害脉动观测,每个测试点分为土建筑遗址顶(中)部和底部两组,每组分为顺墙向、垂直墙向、竖直向3个方向脉动测试,测试时间间隔为 0.0039s 。

结构动力特性测试关键在于是否能准确反映现场结构的振动特性和规律,并将测试结果完整的记录下来,但由于现场测试环境不可控加之测试仪器的零漂、干扰和非线性输出等问题,导致实测波形产生畸变。为使记录的数据更好的反映结构的动力特性,应对数据进行筛选和信号处理,最终确定结构的主频范围或主频频率。

表1 高昌故城内城墙墙体土遗址动力特性测试结果

Table 1 Test results of dynamic characteristics of typical soil sites

名称	卓越频率/Hz		
	顺墙向	垂直墙向	竖直向
内城墙	2.00	3.25	2.24

在频谱分析中,主要采用频谱图进行判断基本自振频率(图1)。各测试点谱图存在一定差异,功率谱形多以“山脉状”为主,主峰突出,较好的分辨出自振频率,总体频带较宽,测试结果较好反映出土建筑遗址的微振动特征。高昌故城内城墙自振频率高于居民墙自振频率,在高度相近的情况下,可能造成该现象的原因是内城墙宽度较大,且墙底多处洞穴。根据自振频率与周期的关系可换算得出,高昌故城内城墙测试点处自振周期为0.31~0.50 s,为之后验证数值模型的准确性提供依据。

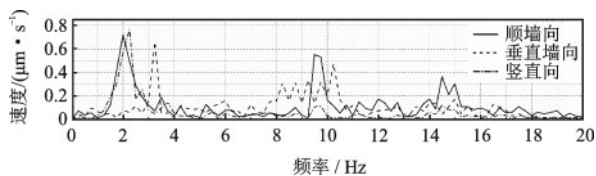


图1 测试点功率谱

Fig.1 Power spectrum of each test point

3 土建筑遗址动力衰减特性

3.1 测试结果分析

选取高昌故城内城墙两个测试点(图2)傅里叶谱进行土建筑遗址动力放大特性研究,通过对比土遗址中部与底部傅里叶谱的变化,得出土建筑遗址的放大倍数范围(图3)。

从图3可以得出,高昌故城内城墙测试点脉动频率为1~80 Hz,主频大约为5~40 Hz,峰值频率为5~20 Hz。40 Hz以上的脉动较小,且主要为“单峰



(a) 正视图



(b) 侧视图

图2 高昌故城内城墙测试点

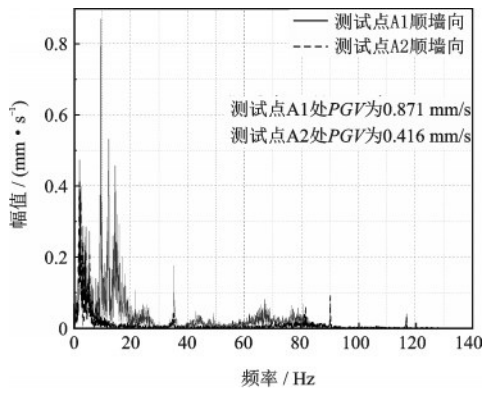
Fig.2 Test point on the inner wall of ancient Gaochang City

状”,测试点从底部到中部速度都有不同程度的放大效应,放大倍数大约为2~4倍,底部垂直墙向速度出现异常,造成其异常的原因可能是拾振器底部与地面接触不实。而中部竖直向速度明显小于其他中部其他两个方向,与底部竖直向速度几乎相等,仍待进一步验证。

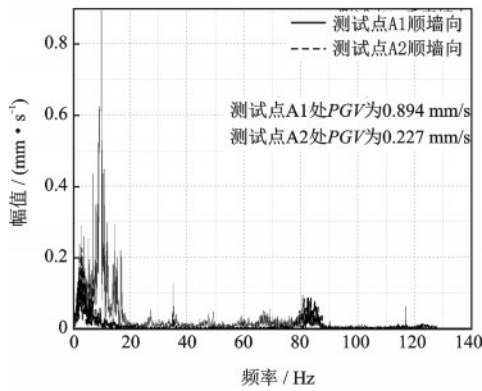
3.2 有限元模型计算

数值计算选取高昌故城内城墙为研究对象,测试点位置如图4所示,模型尺寸具体参数如图5所示,通过与实际测试结果进行对比,矫正模型计算准确性,对其动力特性及抗震稳定性情况进一步分析。模型具体参数标注于图5中,岩土材料采用摩尔-库伦理想弹塑性本构模型,土体物理特性参数见表2^[13],土体单元为八节点线性六面体单元(C3D8),单元网格最大尺寸为1 m×1 m,经计算均满足精度要求。三维模型底部为完全约束,其他部位为自由边界。地震波施加于模型底部,其地震波为根据吐鲁番工程场地设计的50年超越概率10%人造地震波(图6),较准确地模拟现实地震作用情况。

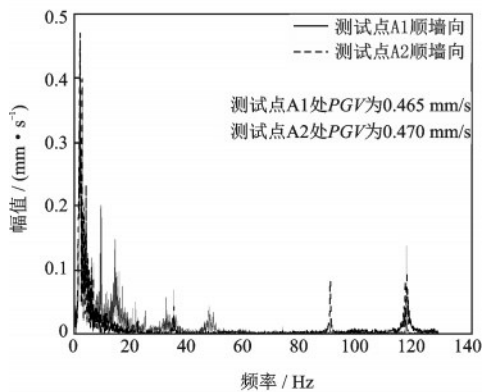
计算模型测试点A1与测试点A2与模型东侧实际测试点中部与底部位置相一致(图7),分别对



(a) 顺墙体方向



(b) 垂直墙体方向



(c) 竖直方向

图3 高昌故城内城墙测试点傅里叶谱
Fig.3 Fourier spectrum at the inner wall test point of ancient Gaochang City

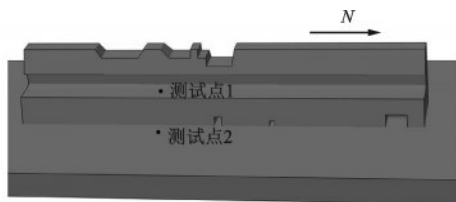


图4 高昌故城内城墙测试点位置
Fig.4 Location of the test wall in ancient Gaochang City

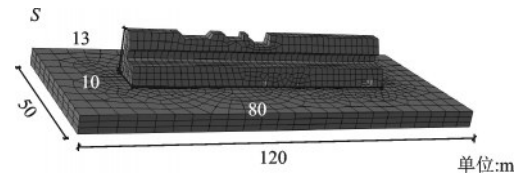
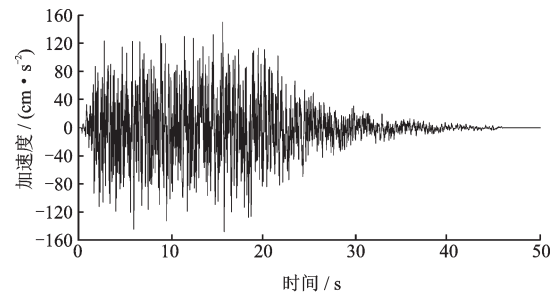
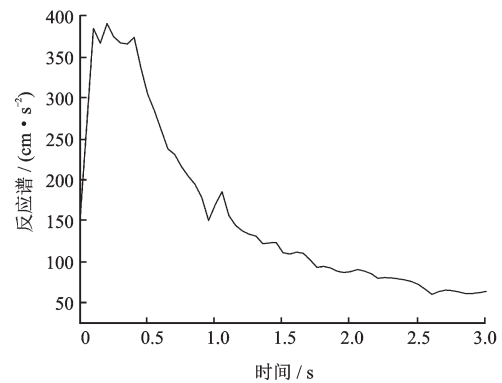


图5 高昌故城内城墙测试点数值计算模型

Fig.5 Numerical calculation model of the test point on the inner wall of ancient Gaochang City



(a) 地震波时程曲线



(b) 地震波反应谱

图6 人造地震波时程曲线和反应谱

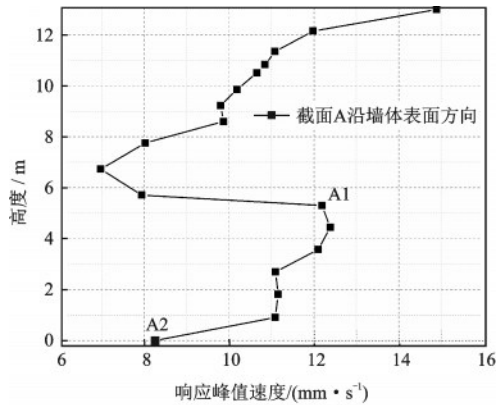
Fig.6 Time history curve and response spectrum of artificial seismic wave

应1、2号测点,由于计算模型所加地震波为水平向地震波,因此只对其水平向各参数进行对比验证。计算模型中A1点最大速度为12.387 mm/s,A2点最大速度为8.251 mm/s,两点速度之比约为1.5,整体放大趋势相一致,但模型的速度放大效应与实际测试放大倍数略小,可能是由于模型细观尺寸造成的偏差。通过对模型西侧、南侧和北侧最大速度提取,从内城墙底部由顶部速度逐渐增大,但在3~9 m时速度有小幅下降的趋势,而在9 m之后速度迅速增大。且顶部速度最大,相对于底部速度,放大倍数约为2倍。内城墙中部凹陷处减缓速度的放大趋势甚至衰减速度强度。

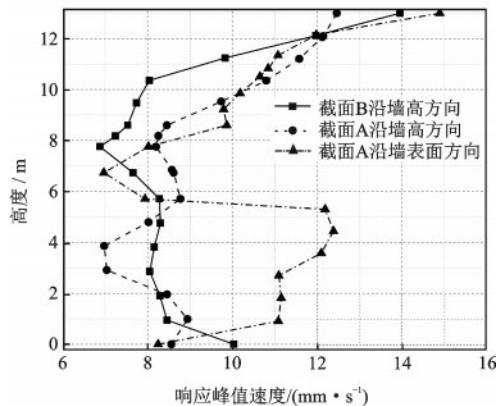
表2 模型计算参数

Table 2 Parameters for calculation model

材料参数	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	泊松比	弹性模 量/MPa
高昌故城					
内城墙	1.43	40.5	25.02	0.3	51
地基	2.1	50.6	35.4	0.3	200



(a) 墙体截面A处



(b) 墙体表面与内部轴线

图7 高昌故城内城墙计算模型速度对比

Fig.7 Speed comparison of the calculation model of the interior wall in ancient Gaochang City

3.3 位移场和应力场分析

在地震水平作用下,土遗址随之发生的位移呈现时空上的规律变化,由总位移云图(图8)可知,在地震作用下位移由下到上逐渐增大,位移最大处主要集中在墙体顶部,特别是顶部残缺处,最大永久位移为7.2 mm,且中部凹陷处使得位移出现连通扩展。

应力是反应高昌故城内城墙各点的受力状态、判断其是否稳定的直接证据。应力场的分布与土遗址的类型、形状等密不可分,裂隙、凹陷、孔洞等都会导致拉应力和剪应力的集中,是土遗址在地震

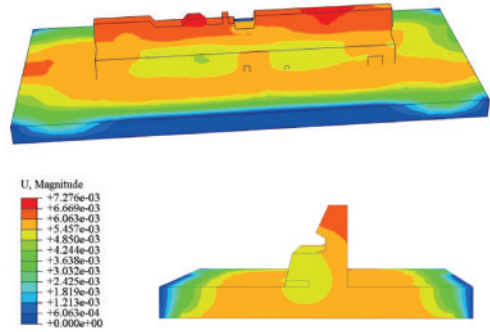


图8 高昌故城内城墙总位移云图

Fig.8 The total displacement of the inner wall of ancient Gaochang City

作用下最易破坏的部位。由最大主应力云图(图9)可知,在地震作用下墙体局部产生了拉应力,最大应力为82 kPa,主要位于墙体凹陷处及下部孔洞处,墙体的抗拉强度为80~270 kPa^[14],部分抗拉强度较低的墙体已接近危险状态。

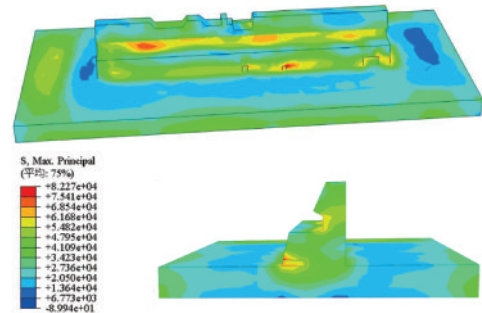


图9 高昌故城内城墙最大主应力云图

Fig.9 The maximum principal stress contour of the inner wall in ancient Gaochang City

将内城墙中部凹陷处、底部洞穴等应力集中点进行填补加固,通过数值模型的方法与未加固前进行对比,应力集中部位由未加固前的凹陷以及洞穴处转变为顶部缺陷处和南北侧底部墙基处,最大应力由82 kPa降至64 kPa,中部凹陷处应力降至40 kPa左右(图10),由于内城墙薄弱处主要为中部凹陷处和底部洞穴处,而在加固后转移至墙顶及墙基较为坚实处,且内城墙在人工地震波作用下整体趋于稳定状态,由此充分说明其加固方法得当,效果显著。

研究中仍存在一些不足之处,现场脉动测试受环境和建筑形状等影响较大,自振频率出现一定差异,不排除外部干扰的可能,因此后续应进一步测试验证。数值计算中对于现实土建筑遗址中的细小裂隙和孔洞无法全面还原,需进一步研究验证。

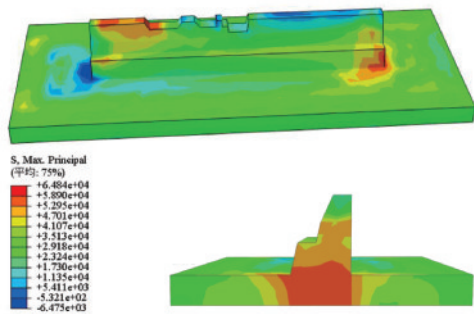


图10 高昌故城内城墙加固后最大应力云图

Fig.10 Maximum stress contour after reinforcement of the wall in ancient Gaochang City

4 结 论

(1)高昌故城居民墙自振频率为2.49 Hz,内城墙自振频率为4.19 Hz,可能是内城墙宽度较大且墙底有洞穴影响所致。

(2)由高昌故城内城墙脉动测试可知,脉动由底部传至中部,速度存在放大效应,且放大倍数约为1.5~2倍,通过与数值计算结果进行对比,放大倍数也较为吻合,由此高昌故城内城墙中部与底部速度放大倍数得到验证,且从底部至顶部速度逐渐增大,底部速度约为底部速度的2倍,但中部凹陷处减缓甚至衰减速度的放大效应。

(3)通过数值计算结果可得,高昌故城内城墙在地震荷载作用下,墙体位移发生约7 mm的永久位移,最大位移位于墙体中部,且墙体中部缺陷处更为显著;墙体凹陷、孔洞处出现应力集中,最大应力约80 kPa,已接近危险状态,需对墙体凹陷处和底部孔洞部位进行修补加固处理,以防止土遗址文物进一步破坏。

(4)对内城墙凹陷及洞穴处填补加固处理前后进行对比可得,最大应力由82 kPa降至64 kPa,最大应力集中处由中部凹陷处转移至顶部缺陷处和南北侧底部墙基处,避免其薄弱部位承受应力集中,由此可判断其加固方法得当,效果显著,可作为高昌故城内城墙处加固工程参考。

参考文献:

[1] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M].北京:科学出版社,2003:21-32

Li Z X. Conservation of the ancient sites on the Silk Road [M]. Beijing: Science Press, 2003: 21-32. (in Chinese)

[2] 石玉成,王旭东,胡明清,等.西北地区典型土遗址抗震安全性分析[J].世界地震工程,2010,26(增1):148-152.

Shi Y Ch, Wang X D, Hu M Q, et al. Seismic safety analysis of typical earthen archaeological sites in north-west China [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(Sup1):148-152. (in Chinese)

[3] 石玉成,郭青林,刘琨,等.车辆振动对山丹明长城遗址的影响分析[J].地震工程与工程振动,2014,34(增1):988-993.

Shi Y Ch, Guo Q L, Liu K, et al. Impacting analysis of vehicle vibration on ancient earthen sites of the Great Wall of Ming Dynasty in Shandan County [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34 (Sup 1):988-993. (in Chinese)

[4] 胡明清.丝绸之路典型土遗址地震破坏机理与抗震安全性研究[D].兰州:中国地震局兰州地震研究所,2008.

Hu M Q. The study on earthquake damage mechanism and seismic safety of typical earthen archaeological sites along the Silk Road [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, 2008. (in Chinese)

[5] 王晓东.古代夯土建筑动力响应及抗震保护[D].兰州:兰州大学,2011.

Wang X D. Dynamic response and earthquake-resist conservation of historic rammed earth construction [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese)

[6] 谌文武,李鹏飞,梁涛,等.苏巴什东寺佛塔的地震动响应[J].西南交通大学学报,2011,46(3):373-378.

Chen W W, Li P F, Liang T, et al. Dynamic responses of East Temple Pagoda of Subashi Temple under seismic loads [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(3):373-378. (in Chinese)

[7] 郭志谦,谌文武.单体土遗址地震动力响应分析——以山丹县刘富寨敌台为例[J].地震工程学报,2017,39(4):609-616.

Guo Zh Q, Chen W W. Dynamic responses of single earthen sites under seismic loads: a case study of the Liufuzhai watchtower in Shandan [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39 (4) : 609-616. (in Chinese)

(本文责编:池营营)

(下转第1052页)