

杜浩,陈祥,王登科.车辆行驶振动对古长城影响分析及评价[J].地震工程学报,2019,41(6):1448-1453.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1448

DU Hao, CHEN Xiang, WANG Dengke. Impact Analysis and Evaluation of Vehicle-driving-induced Vibration on the Ancient Great Wall[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1448-1453. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1448

## 车辆行驶振动对古长城影响分析及评价

杜浩, 陈祥, 王登科

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 交通振动会对周边古建筑产生不利影响,研究振动规律对古建筑的稳定性评价非常重要。为此,利用振动探测器采集古长城因周边道路车辆行驶引起的振动数据。通过解译振动波形了解场地的振动强度衰减过程及大小,确定振动强度及对长城的影响,以及各因素与振动强度的关系。以国家古建筑允许振动规范对波形解译结果进行评价,为解决此类文明遗址的保护问题提供了技术支持。分析结果表明:不同路况,振动衰减规律不同,路况较好振动强度衰减迅速;行驶车辆的车速、荷载及行驶道路质量均可影响长城水平振动强度,车速越快、荷载越大、道路质量越差,长城水平振动强度越大;长城不同位置对车辆行驶产生的振动响应不同,长城脚水平振动强度大于长城顶水平振动强度。

**关键词:** 车辆行驶; 振动强度; 衰减规律; 明长城

**中图分类号:** K928.71; X839

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2019)06-1448-06

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1448

## Impact Analysis and Evaluation of Vehicle-driving-induced Vibration on the Ancient Great Wall

DU Hao, CHEN Xiang, WANG Dengke

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Traffic vibration has a negative impact on adjacent ancient buildings, so it is very important to determine the vibration rule when evaluating the stability of ancient architecture. In this paper, we used a vibration detector to obtain vibration data induced by vehicles driving around the ancient Great Wall. By interpreting the vibration waveforms, we determined the influence of vibration intensity on the Great Wall and the relation between various factors and vibration intensity. To evaluate the waveform results, we used the national standard for the allowable vibration in ancient buildings, which provides technical guidelines for the protection of historically valuable sites. The results indicate that the vibration attenuation law is different under different road conditions, and that vibration strength decays rapidly under good road conditions. The speed and load of driving vehicles and road quality can affect the horizontal vibration strength of the

**收稿日期:** 2018-10-20

**第一作者简介:** 杜浩(1991-),男,硕士,主要从事路基工程方面研究。E-mail: 1721108205@qq.com。

**通信作者:** 陈祥(1980-),男,博士,副教授,主要从事岩土工程、路基工程及古建筑评价方面研究。E-mail: Chenx@bjtu.cn。

Great Wall, that is, the higher the speed, the greater the load, the worse the road quality, and the greater the horizontal vibration strength of the Great Wall. Different positions along the Great Wall respond differently to vehicle driving vibration and the horizontal vibration strength at the foot of the Great Wall is greater than that at the top.

**Keywords:** vehicle driving; vibration intensity; attenuation law; the Ming Great Wall

## 0 引言

交通荷载振动会对周边建筑,特别是一些历史古建筑产生不利影响。潘复兰教授等<sup>[1]</sup>对 22 处不同类型的古建筑在振动作用下的响应进行了现场监测,并整理分析了不同土层中弹性波随距离衰减的时程曲线样本,从中发现了很多历史遗产像西安大雁塔等,在振动影响下都有不同情况的损坏,有些情况还十分严重。孟昭博等<sup>[2]</sup>对交通振动对钟楼的影响进行了分析和评估。梁铁成等<sup>[3]</sup>主要研究了车辆振动对精密仪器的影响以及车辆振动的衰减规律,指出靠近公路时车辆的振动频率主要是 10~20 Hz,远离时振动频率有所降低,振幅衰减规律跟距离呈近似负平方规律。袁新敏等<sup>[4]</sup>对过往车辆对地面振动影响做了监测实验,并着重分析了振动衰减规律,得出振动水平在近处以高频为主,远处以低频为主,并且低频振动明显要比高频振动衰减的慢,加速度幅值随地面距离的增加而减小。梁志闯<sup>[5]</sup>研究了地面车辆振动对西安城墙的影响,得出了地面交通振动对城墙的振动影响和衰减规律。张逸静<sup>[6]</sup>利用数值模拟提出了不同类型古建筑距离隧道中心线的安全距离。然而,以往的研究对不同路况、车速、荷载下的振动强度变化、振动强度衰减规律研究较少,对古建筑本身不同位置响应问题也较少涉及。因此,本文通过在明长城顶、底安置振动探测仪采集长城水平、铅垂方向振动数据,采用不同车辆、车速控制激振工况。通过对波形解译得到不同路况车辆行驶振动衰减规律及不同路况、车速、长城位置的水平振动强度变化规律。同时,提出合理性建议,为解决此类文明遗址保护问题提供了技术参考。

## 1 工程背景

为提高旅游产业竞争力,山西省政府拟修建穿越明长城的旅游公路,如图 1 所示。旅游公路修建及运营过程中,各类穿越长城的行驶车辆会对明长城产生影响。本次振动监测选取 2 处穿越明长城的典型路段作为监测地点,对明长城遗址可能遭受的施工和车辆行驶振动影响开展研究分析工作。选取的 2 处较为代表性地段分别为保安堡、徐达窑。其

中,穿越保安堡的道路为乡村土路,穿越徐达窑的道路为乡村柏油路。

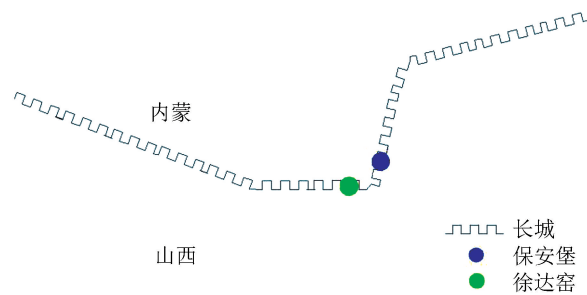


图 1 古长城及测点的示意图

Fig.1 The diagram of the ancient great wall and measuring point

## 2 现场监测方案

为了得到利用率较高的监测数据,真实有效的反应车辆振动荷载对明长城的影响。现场监测采用振动探测仪进行数据采集,在距离长城 5 m 处布置 12 个检波器,检波器间距为 5 m,用于衰减测线上的测点振动监测,目的是了解场地振动强度衰减过程;同时,分别在古长城墙顶及脚各放置三个独立的拾振器,一个铅垂分量、两个水平分量,用于明长城顶及脚下振动测点的振动监测。分别采集测点振动的铅垂向、以及两个正交的水平分量,得到振动强度,了解场地三个方向上振动强度及其对长城的影响大小。具体测线及传感器布置如图 2 所示。

同时,利用不同车型、车速进行激振探究不同工况对古长城的影响。监测工况的设定如表 1 所列。

## 3 振动监测数据分析

仪器检波器在计量科学研究院的振动台上进行了系统标定。如此便可将得到车辆行驶振动记录时程幅值  $A(t)$  转化为测点振动的振速  $V(t)$ 。同时根据《建筑工程容许振动标准》(GB 50868-2013),采用工程振动时域振速最大值作为建筑物振动影响评价参数。

### 3.1 振动衰减曲线

从每条测线的记录波形中提取各个测点引起的车辆振动的时域最大振幅  $v_{\max}$ ,从而获取同一次振动沿测线随道检距  $r$  的衰减曲线  $v_{\max}(r)$ 。

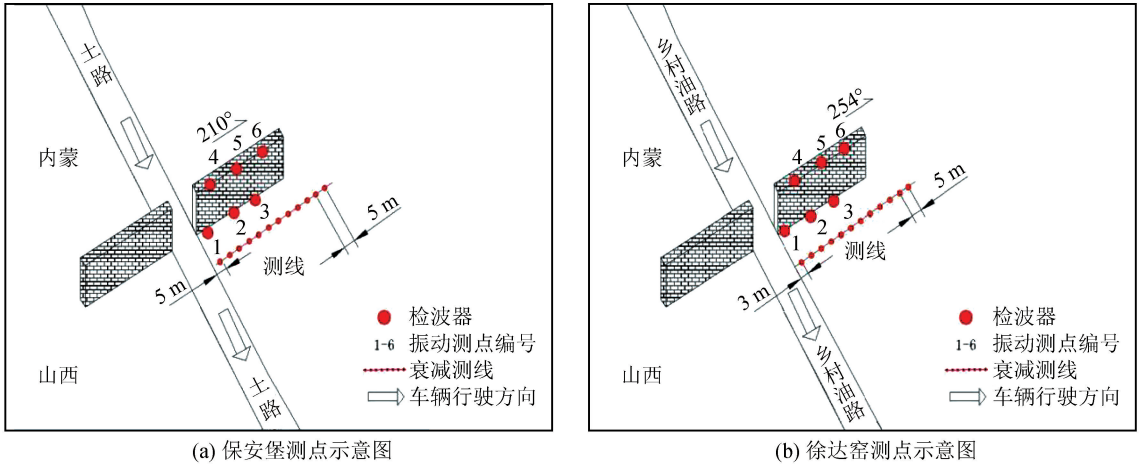


图2 测点示意图

Fig.2 Map of measuring point

表1 车辆行驶振动监测工况

Table 1 Monitoring condition of vehicle running vibration

工况	车辆类型	车辆行驶方向	车辆行驶速度
1	雪佛兰科帕奇中型 SUV 越野车	内蒙古—山西	40 km/h
2		内蒙古—山西	20 km/h
3	中型装货卡车	内蒙古—山西	10 km/h
4	轮式装载机	内蒙古—山西	20 km/h

由测线的振动记录所提取的数据,可以绘制实测振动时域最大铅锤方向振速值  $v_{Zmax}$  随源检距 (检波器离开车辆行驶轨迹与测线交点的距离,这里大致取检波器离开道路边缘的距离)  $r$  变化的散点图(实测衰减曲线)。另外,为刻画车辆振动的衰减规律,采用式(1)所示的衰减公式拟合实测最大振速随距离的变化,得到车辆振动拟合衰减

曲线。

$$v_{max} = K \cdot r^{-\beta} \quad (1)$$

根据表1的工况设定道路行驶激振,每一种工况激振若干次,以便获得可靠的车辆行驶振动记录。按最不利原则,选取振动强度最大的振动时程记录进行分析处理。通过对监测波形的解译,得到车辆振动最不利的衰减曲线,如图3所示。

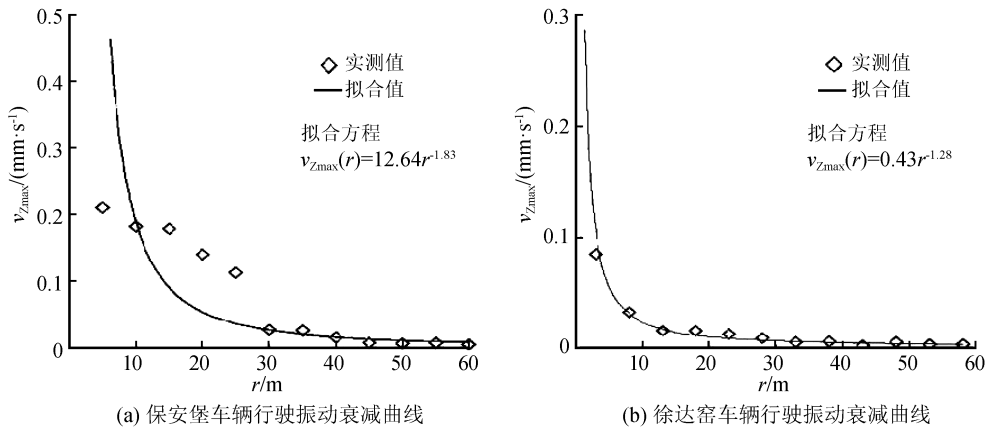


图3 车辆行驶振动衰减曲线

Fig.3 Vehicle running vibration attenuation curve

得到保安堡及徐达窑振动衰减曲线拟合方程,如式(2)、(3)。

$$v_{max}(r) = 12.64r^{-1.83} \quad (2)$$

$$v_{max}(r) = 0.43r^{-1.28} \quad (3)$$

根据获得的衰减曲线及拟合方程可以看出,在振动工况(车辆行驶方向由内蒙古向山西;车辆行驶速度为 40 km/h)相同的情况下,徐达窑和保安堡的振动衰减情况并不相同,在徐达窑柏油路上行驶车

辆引起的振动衰减较迅速,保安堡土路上行驶车辆引起振动衰减较为缓慢。同时也可以看出保安堡因道路条件差,其振速更大。

### 3.2 测点振动水平振动强度

结构物振动影响评价中,主要考虑控制点水平振动的影响。控制点水平振动强度可取测点两个正

交的水平最大振速  $v_{X_{max}}$ 、 $v_{Y_{max}}$  的合成振速  $v_H$ ,作为控制点的水平振动强度。即:

$$v_H = \sqrt{v_{X_{max}}^2 + v_{Y_{max}}^2} \quad (4)$$

如此,即可得到长城脚、顶各测点的水平振动强度。同理,根据式(4)计算得到工况对应的保安堡、徐达窑各测点水平振动强度,如表 2 表列。

表 2 保安堡及徐达窑段各测点水平振动强度

Table 2 Horizontal vibration intensity of each measuring point of Baoanbao and Xudayao

测点编号	测点位置	路况	SUV 车速 40 km/h	SUV 车速 20 km/h	货物卡车 10 km/h	轮式装载机 20 km/h
			$V_H/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_H/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_H/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_H/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
保安堡	1	城墙脚	0.895	0.449	0.326	0.483
	2	城墙脚	0.366	0.179	-	-
	3	城墙脚	0.170	0.122	0.115	0.169
	4	城墙顶	0.352	0.233	-	-
	5	城墙顶	0.520	0.198	-	-
	6	城墙顶	0.152	0.044	-	-
徐达窑	1	城墙脚	0.387	0.297	-	-
	2	城墙脚	-	-	-	-
	3	城墙脚	0.159	0.147	-	-
	4	城墙顶	0.167	0.111	-	-
	5	城墙顶	0.152	0.115	-	-
	6	城墙顶	0.087	0.022	-	-

注:-表示未测振动

根据计算得到的水平振动强度可进行分析:

(1) 首先对 SUV 型车在不同车速下分别通过保安堡、徐达窑引起的水平振动强度进行分析,因监测数据两两对应比较,故长城顶和长城脚数据可

统一对比,不再区分,其水平振动强度对比如图 4 所示。从图可知,车速 40 km/h 工况下测得水平振动强度明显大于车速 20 km/h 工况下测得水平振动强度。

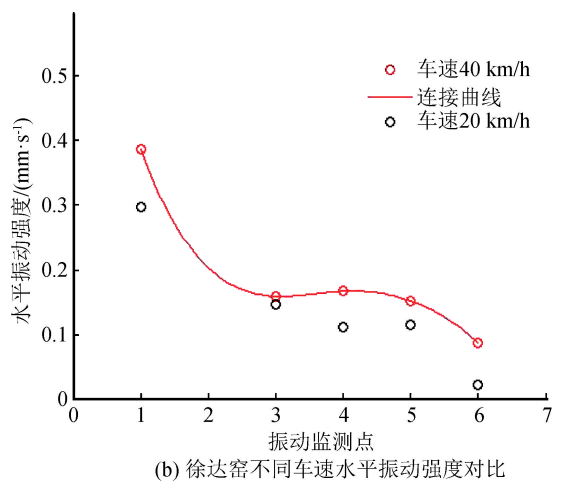
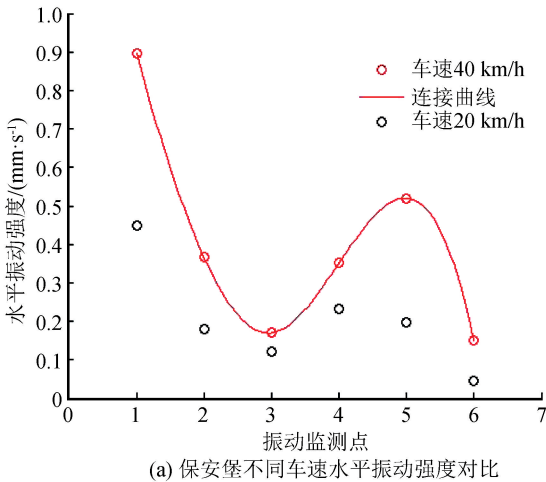


图 4 不同路况水平振动强度对比

Fig.4 Comparison of horizontal vibration intensity under different road conditions

(2) 明长城不同的位置对车辆行驶振动响应也不相同,因数据两两对比,故 SUV 车型车速 40 km/h 和车速 20 km/h 测得的振动强度可统一分析,得到其水平振动强度对比如图 5 所示。从图可知,在路况、车速相同情况下,长城脚水平振动强度较高。

(3) 穿越保安堡与徐达窑的路况不同,穿越保安堡道路为土路,穿越徐达窑道路为柏油路。在车速、监测点位置相同的情况下,对比不同路况水平振动强度,如图 6 所示。从图可知,车辆行驶在柏油路面引起的振动较小,对明长城的影响也较小。

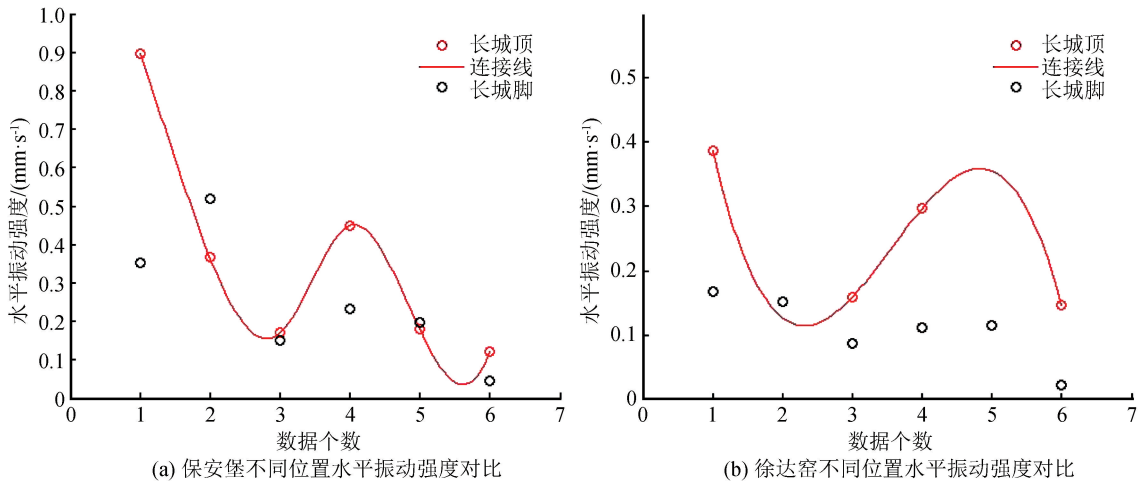


图5 不同位置水平振动强度对比

Fig.5 Comparison of horizontal vibration intensity at different location

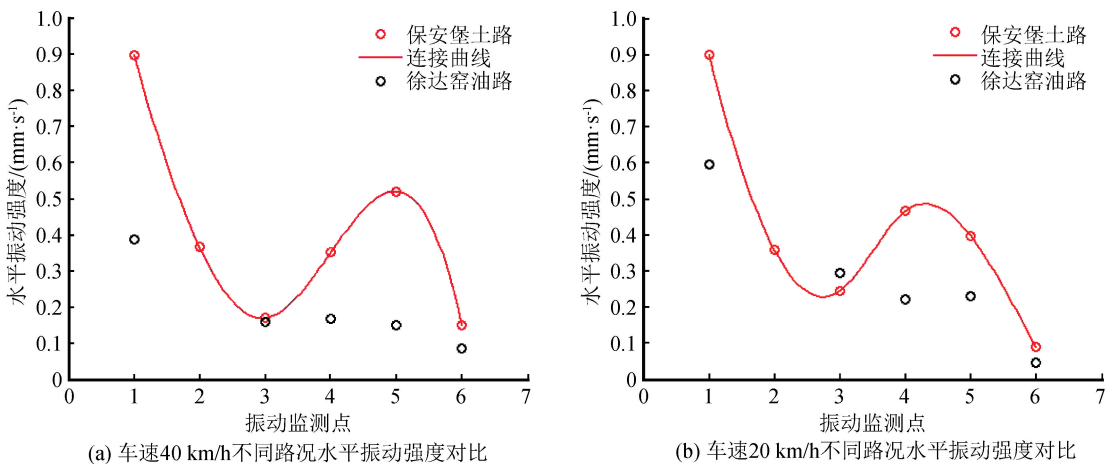


图6 不同路况水平振动强度对比

Fig.6 Comparison of horizontal vibration intensity under different road conditions

(4) 因大型机械行驶不便,现场只测得卡车与转载机行驶引起明长城各一组振动数据,但从得到水平振动强度表可知,行驶在道路上的荷载越大,引起的振动越大。

## 4 振动结果评估

### 4.1 评估标准

古长城为国家重点保护的历史构筑物,属珍贵文物,应采用较为严格的安全标准,因此,按具有保护价值的建筑容许振动值的70%来设定古长城的振动允许振速(峰值)。由监测结果可知,车辆沿道路行驶所产生振动的时域最大振速值对应的振动频率(标称频率,亦称“视频率”)大多在  $10\text{ Hz} \leq f \leq 50\text{ Hz}$  范围内,确定容许振速时按30 Hz考虑,按国家标准<sup>[7]</sup>确定明长城或附属构筑物承受交通振动作

用的安全标准为:

在明长城或附属构筑物脚下的容许振动速度峰值为  $v_B = 1.2\text{ mm/s}$ ;在明长城或附属构筑物顶部的容许振动速度峰值为  $v_T = 1.4\text{ mm/s}$ 。

按古建筑防工业振动技术规范<sup>[8]</sup>规定了古建筑砖结构的容许振动速度,考虑目前明长城残留墙体基本上为夯土筑体,按全国重点文物保护单位考虑,构筑体的纵波波速应有  $v_p < 1\ 600\text{ m/s}$ ,按《古建筑防工业振动技术规范》规定的容许水平振速  $0.15\text{ mm/s}$ 。从而确定在明长城城墙顶上控制点的容许振动速度水平分量为  $v = 0.15\text{ mm/s}$ 。

### 4.2 评估结果

(1) 按国标《建筑工程容许振动标准》(GB 50868-2013)对保安堡、徐达窑的测点振动影响评价。实测水平振速与国标容许振速比较,大于国

标容许振速可认为该工况下的车辆振动有影响,反之,无影响。通过数据的对比,证明若按《建筑工程容许振动标准》对监测结果评价,设定各种工况下的车辆行驶对明长城无影响。

(2) 按国标《古建筑防工业振动技术规范》(GB/T 50452-2008)对测点振动影响评价,只对长城顶进行评价,实测水平振速与国标容许振速比较,大于国标容许振速可认为该工况下的车辆振动有影响,反之,无影响。通过数据的对比,证明若按《古建筑防工业振动技术规范》对监测结果评价,设定的各种工况下的车辆行驶对明长城有影响。

## 5 结论

通过对山西、内蒙古交界处的明长城保安堡、徐达窑两处穿越长城道路上的车辆行驶的振动监测,对得到的监测数据进行时域振动分析,振动波形解译得到了以下结论及建议:

(1) 不同路况下,坚实平整的柏油路比土路更能有效减小车辆行驶的振动强度,有利于降低道路车辆行驶振动对明长城遗址的破坏,对长城的现状保护起到有利影响。

(2) 在本次监测的实施车辆行驶激振工况中,对于相同路况同一测点,车辆行驶速度较低工况(20 km/h)的测点振动强度明显小于车辆行驶速度较高工况(40 km/h)的测点振动强度,车速越高引起的振动强度越大。

(3) 古长城不同部位,如长城顶、长城脚对车辆交通荷载引起的振动响应存在差异,相同激振条件下长城脚水平振动强度大于长城顶水平振动强度。

(4) 不同的车型,对古长城的影响也不一样。根据监测结果可知,车辆荷载越大产生的振动强度越大,对古长城影响越大。

(5) 在旅游公路修建及运营管理中,应采用设定车辆行驶速度、车型标准并修建高质量道路等措施保护被穿越的明长城。

## 参考文献(References)

- [1] 潘复兰.古建筑防工业振动的研究[J].文物保护与科学考古,2008,20:(增刊):104-108.  
PAN Fulan. Study on Industrial Vibration Prevention of Ancient Buildings[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2008, 20(Supp): 104-108.
- [2] 孟昭博.西安钟楼的交通振动响应分析及评估[D].西安:西安建筑科技大学,2009.  
MENG Zhaobo. Analysis and Assessment of the Vibration Responds Traffic-Induced of Xi'an Bell Tower Traffic[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [3] 梁铁成,李桐林,董瑞春.公路车辆产生振动波的衰减研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2003,33(3):382-386.  
LIANG Tiecheng, LI Donglin, DONG Cunchun. A Study on Attenuation of Vehicle Caused Vibration[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(3): 382-386.
- [4] 袁新敏,张玉华,左鹏飞,等.公路交通引起振动的现场测试与分析[J].土工基础,2007,21(2):73-75.  
YUAN Xinmin, ZHANG Yuhua, ZHUO Pengfei, et al. Field Test and Analysis of Vibration Induced by Traffic[J]. Soil Engineering and Foundation, 2007, 21(2): 73-75.
- [5] 梁志闯.交通随机荷载作用下西安城墙结构动力响应分析[D].西安:西安建筑科技大学,2013.  
LIANG Zhichuang. The Dynamic Response Analysis of Xi'an City Wall Structure under Traffic Random Loads[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [6] 张逸静.城市轨道交通振动对古建筑的影响[D].兰州:兰州大学,2016.  
ZHANG Yijing. Influence of Urban Rail Transit Vibration on Ancient Buildings[D]. Lanzhou University, 2016.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑工程容许振动标准:GB 50868-2013[S].北京:中国计划出版社,2013  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for allowable vibration of building engineering: GB 50868-2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部.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.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specifications for protection of historic buildings against man-made vibration: GB/T 50452-2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.