

# 交通荷载对双井子堡古城墙振动影响的现场实测与数值分析

乔雄<sup>1</sup>, 刘文高<sup>1</sup>, 骆维斌<sup>2</sup>, 倪伟淋<sup>1</sup>, 杨鑫<sup>1</sup>, 黄锦聪<sup>1</sup>, 刘锦龙<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃兰州 730050;

2. 公路建设养护技术、材料及装备交通运输行业研发中心, 甘肃兰州 730050)

**摘要:** 由于古建筑结构材料特殊、历史悠久且文化内涵丰富,其在交通振动下的动力响应规律研究成为古建筑安全性研究的重要内容。针对古城墙在道路车辆运行影响下的振动高程效应,以及结构的安全性评估问题,基于多种工况开展振动特性的现场测试和振动高程响应机制的理论分析,结合数值模拟方法,并根据相应的安全判据和允许标准进行了研究。结果表明:道路交通荷载影响下古城墙的振动主频率范围为5~25 Hz,城墙顶部振速大于底部振速,顶部的放大系数范围为1.08~2.21,振动放大效应主要受车辆荷载和行驶速度的影响;随着模拟车辆荷载以及行驶速度的增加,城墙质点峰值速度放大系数 $f_{PPV}$ 增大,振动放大效应明显, $f_{PPV}$ 处在1.02~1.77之间。通过对 $f_{PPV}$ 增量ACI(Amplification Coefficient Increment)进行分析,表明车辆荷载对振动高程效应的影响程度大于车辆速度;对模拟结果以及现场实测数据进行拟合,发现在交通振动激励下城墙底部和顶部的振速存在一定的线性关系;根据现场实测数据与数值模拟结果,对古土城墙的安全性进行了评估,提出了基于通行车辆交通管理的古土城墙防振、减振措施。

**关键词:** 古土城墙; 交通振动; 现场测试; 数值模拟; 高程放大效应

**中图分类号:** TU361 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)03-0776-13

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.03.020

## 引言

随着中国交通系统全方位、多层次、立体化的发展,公路交通的建设使得交通网络的密集度大幅度增加,但随之而来的交通振动问题也开始引起人们的关注。统计数据表明,除了工厂作业振动和建筑工程施工振动外,人们反应最为强烈的振源即为道路交通振动<sup>[1]</sup>。国内外由于交通振动对邻近古建筑产生破坏的问题日益突出<sup>[2-5]</sup>,由于交通振动传播形式较为复杂,古建筑年代久远,且结构和材料特殊,使得如何在保障交通运行的前提下,保证古建筑的结构安全成为亟待解决的问题。Chikaaki<sup>[6]</sup>通过对交通振动作用下高架铁路桥梁的动力响应进行分析,为交通振动的研究发展奠定了基础。国内关于古建筑在交通振动激励下的振动响应研究始于20世纪80年代末,对焦枝铁路建设中的爆破振动,以及列车运营时产生的振动动力响应等问题进行了研究和分析<sup>[7]</sup>。为了能够探究车致振动对邻近建筑结构的影响,Lombaert等<sup>[8]</sup>通过对现场实测数据与数

值模拟结果进行对比,研究了车致振动在自由场中的影响因素,并对各种影响因素进行了分析论证。Fang等<sup>[9]</sup>通过现场实测的方法对道路车辆引起的振动进行了研究,探讨了时间域对车致振动的影响规律。谢伟平等<sup>[10]</sup>通过对客运站不同车辆、不同行驶速度以及不同行驶方式下楼板的振动响应进行实测,分析了以上各种因素对振动的动力响应以及频谱特性的影响,并对车辆的行驶速度阈值给出了相应的建议。Hinzen<sup>[11]</sup>通过对地铁振动作用下科隆大教堂的动力响应进行现场实测分析,对科隆大教堂在地铁运营时、微幅振动作用下的结构安全进行了评估。Valašková等<sup>[12]</sup>通过波动理论分析与数值模拟方法,探究了交通振动影响下古建筑结构的动力响应,并对振动环境下的结构振动进行了预测和评估。Ma等<sup>[13]</sup>通过现场实测与数值模拟的方法,对地铁交通环境下钟楼的动力响应进行研究,提出了降低地表质点振动速度峰值的方法。

当结构质点自振频率处于外部激励荷载的振动频率范围内时,就会出现上部结构的振速大于下部振速的现象,振动速度幅值在一定范围内会随着高

度的增加而表现出一定的放大效应<sup>[14-17]</sup>。李政等<sup>[18]</sup>通过建立轨道交通的整体模型,结合砌体结构模态分析,发现列车荷载诱发了砌体结构自振频率的增大,从而产生了结构振动强度的放大效应。郑鑫等<sup>[19]</sup>采用传递矩阵法对交通振动引起的结构竖向位移衰减关系进行了理论分析,得出在速度界面的波阻抗越大和覆盖层阻尼比越小时,结构局部放大越明显。李克飞等<sup>[20]</sup>基于现场实测数据的分析,发现在地铁交通环境下古城墙动力响应在水平和垂直方向呈规律性变化,并以水平方向为主,且振动在一定范围内随着高度的增加呈现出放大效应。葛家琪等<sup>[21]</sup>通过现场实测数据与数值模拟相结合的方法,评价了虎门炮台旧遗址在交通振动环境下的安全性,并提出采用减振沟的方法来削弱交通振动带来的振动效应。樊兴伟<sup>[22]</sup>对开封古城墙在交通振动作用下的动力响应进行实测,发现在水平方向上各拾振点的振动速度以及位移幅值均随着高度的增加而增大。

目前,基于交通振动研究技术的发展,虽然对于交通振动环境下的建筑结构,特别是古建筑结构动力响应的研究较多,但是相关的研究仍存在一定的缺陷。例如,在研究古建筑结构动力响应问题时,只考虑了在既有车辆载荷和行驶速度影响下建筑结构的安全性,只研究了结构基础部分和顶部的振动速度变化规律,并未对结构自下而上质点的振动高程效应变化规律进行分析。由于振动传播规律的复杂性以及结构材料的多样性,不同振源类型以及不同结构属性对于振动的高程效应会有很大的影响。

通过对公路邻近两侧的古城墙遗址在交通荷载作用下振动特性的现场实测,得到了不同车次运行下城墙的振动响应情况,并对古城墙基础质点以及城墙顶部的振动速率进行测试与统计分析,以此探讨邻近道路车辆运行对古城墙的振动速度高程放大效应的影响。利用数值模拟方法来探究不同载荷、不同速度工况下的城墙自下而上质点振动速度放大系数的变化规律,以此分析车辆载荷和车辆行驶速度对城墙质点振动速度的影响规律,为在公路交通荷载作用下,邻近公路的古建筑振动安全评估与防护提供理论依据和技术支撑。

## 1 城墙概况与试验方案

### 1.1 城墙概况

双井子堡始建于明代,城堡有东、西两门,坐北向南,目测城堡呈矩形,作为历史上嘉峪关的军事防

御前哨,具有十分重要的战略地位。城墙属于市级文物保护单位,通过对古城墙现状进行观测,确定北墙长 240.0 m、西墙长 123.1 m、东墙长 97.5 m、南墙长 94.7 m,城墙宽度为 0.6~1.6 m,城墙高度为 2.7~3.7 m。双井子堡邻近于 G312 国道,另有 G30(连霍高速)高速将双井子堡分为了南北两块区域,北侧距离老的 G312(上海-霍尔果斯)国道较近,现场概况如图 1 所示。

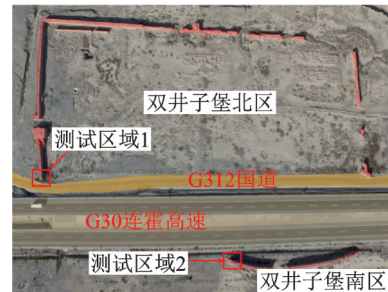


图1 道路与城墙相对位置图

Fig. 1 Relative position map of road and wall

### 1.2 测点布置

选择车辆运行振动速度观测系统时,应根据现场实际情况预估被测信号的幅值范围和频率分布范围,选择的观测系统幅值范围上限应高于被测信号幅值上限的 20%,频响范围应包含被测信号的频率分布范围,依据这个原则选择的观测系统能避免出现削波、平台等情况。为此,选择 TC-4850 型测振仪、TCS-B3 型三轴向振动速度传感器和计算机组成的观测系统(如图 2 所示)进行振动信号的采集。

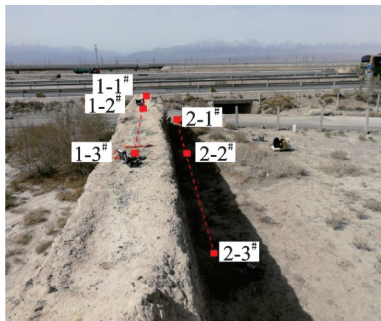


图2 智能振动监测系统

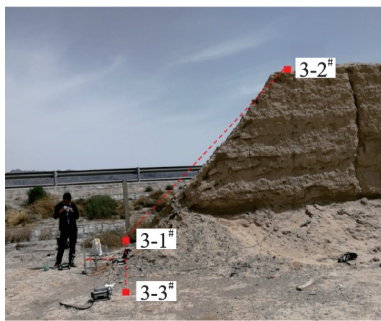
Fig. 2 Intelligent vibration monitoring system

根据现场情况,共布设 3 条测线。首先在双井子堡北区靠西侧邻近 G312 国道的城墙位置,选择垂直于道路方向的一段城墙进行振动特性测试,在城墙顶部和底部分别布设测线一和测线二,每条测线上布设 3 个测点,距离振源的水平距离分别为 2, 6 和 14 m。其次在双井子堡南区靠近西侧邻近 G30 高速方向布设测线三,测线上布设 3 个测点,其中一个测点位于城墙顶部,距离振源的水平距离分别为

3 m, 3 m 和 14 m, 现场各测线布设情况如图 3 所示。



(a) 测线一与测线二  
(a) Survey line 1 and survey line 2



(b) 测线三  
(b) Survey line 3

图 3 测线布设图

Fig. 3 Layout map of survey lines

## 2 试验数据分析与结构安全评估

为了避免由于现场测试环境的不确定性因素带来的干扰,在进行现场测试数据处理分析时进行一定的滤波措施;为了避免引发二次灾害,在不影响测试结果准确性的前提下,对重车的运行路线及运行时间进行了适当限制。通过测试结果分别分析在不同车次运行的情况下,古城墙基础质点和城墙顶部振动动力响应特性以及振速的传播规律。

根据测试仪器的特性(采样时间为0~20 s),截取典型测点振动速度峰值附近14 s速度时程段,为了能够在空间状态下更直观地观测古城墙的振动响应情况,通过比较不同车次运行下振动速度峰值变化规律来探讨古城墙的振动动力响应情况以及对其结构安全性进行评估。

### 2.1 实测数据分析

本文在现场测试时选取了具有代表性的车辆进行测试,作为邻近道路上行驶车辆的参数依据。依据现场测线布置情况,分别对每条测线进行不同的行车工况振动测试,各测试工况如表1所示(各车重量分别为吊车:57 t;卡车:25 t;货车:8 t)。

表 1 测试工况(单位: km/h)

Tab. 1 Working conditions of the tests (Unit: km/h)

	测线一				测线二				测线三			
	工况一	工况二	工况三	工况四	工况一	工况二	工况三	工况四	工况一	工况二	工况三	工况四
车辆	卡车×4	吊车	吊车	卡车	卡车×4	吊车	吊车	卡车	吊车	卡车	货车×2	货车
速度	40	40	30	30	40	40	30	30	40	40	40	40

现场测试共得到169条振动数据,考虑到路面还有其他车辆振动的影响,为了保证数据分析的便利性以及结论的准确性,每个工况选取4个典型的振动数据,并对符合现场振动情况的样本数据进行

分析处理,城墙各测线、各测点以及各工况振动速度峰值和振动速度时程曲线如图4~6所示(由于篇幅限制,只给出典型速度时程曲线,即各测线、各试验方案振动速度最大值)。

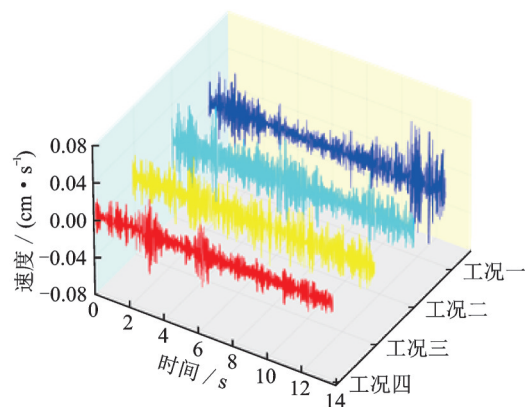
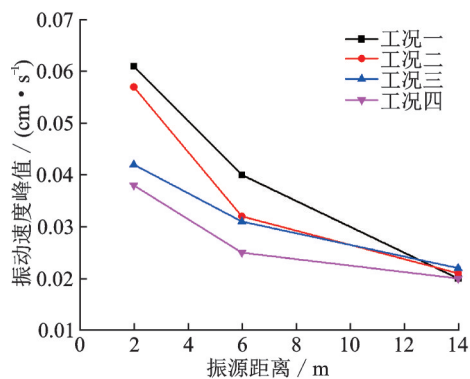


图 4 测线一峰值振速图和典型振动速度时程曲线

Fig. 4 Peak vibration velocity diagram of survey line 1 and time history curve of typical vibration velocity



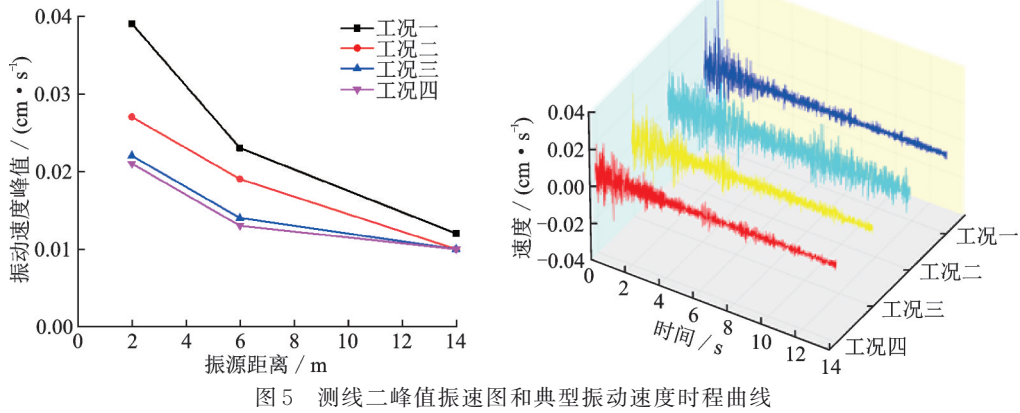


图 5 测线二峰值振速图和典型振动速度时程曲线

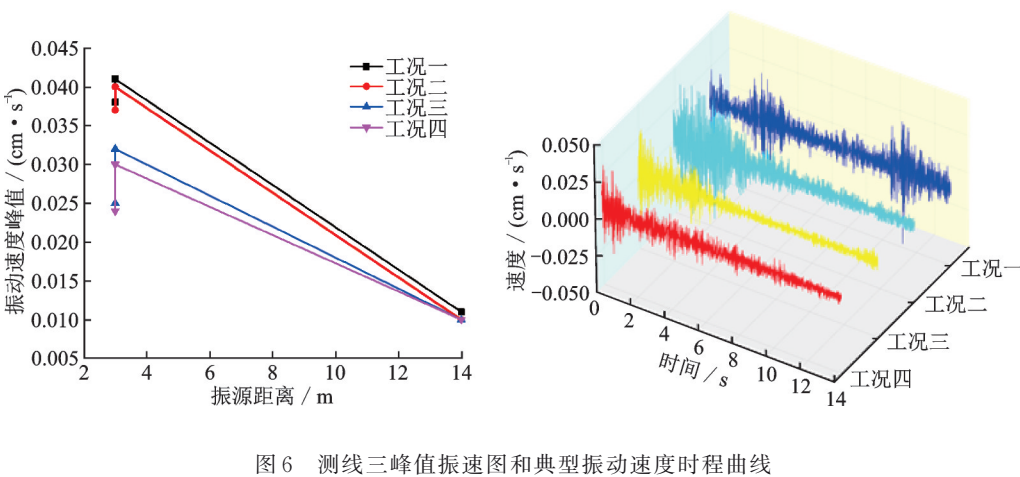


图 6 测线三峰值振速图和典型振动速度时程曲线

在 1 号测点到 2 号测点之间振动幅值随水平距离衰减很明显,衰减梯度较大;在 2 号测点到 3 号测点之间衰减不明显,变化相对较小,说明由于双井子堡古城墙较厚,振动速度衰减较快,结构振动响应较明显。测线一、二所获得的振动原始数据为双井子堡北区靠西侧邻近 G312 国道的城墙位置振动速度时程,通过对不同测线所选取的 4 组振动速度时程曲线进行峰值的提取,通过图 4~6 可以发现在相同振源情况下,古城墙底部和城墙顶部振动速度峰值的变化情况。结合实测数据分析表明,古城墙顶部的实测振动速度峰值比城墙底部大,表明古城墙墙体对于振动有一定的放大效应,振动速度在城墙顶部和底部衰减规律基本一致。

测线三所获得的振动数据为双井子堡南区靠近西侧垂直于 G30 高速的城墙位置振动速度时程,通过对测线三实测数据进行分析,进一步证明了在相同振源情况下古城墙顶部的实测振动峰值比城墙底部大。结合测线一和测线二对比可以发现,车辆重量和行驶速度越大,所引起的质点振动速度越大,结构振动响应越明显,且当连续过车时,振动幅值相对增加较为明显。通过对比相同车辆不同车速以及相

同时速不同车辆测试方案发现,相比于车辆行驶速度对古城墙质点振动响应的影响,车辆载荷对质点振动响应的影响更为明显。

为了探究双井子堡古城墙的振动放大效应规律,定义振动速度峰值 PPV (Peak Particle Velocity) 的放大系数为  $f_{PPV}$  (Factor of Peak Particle Velocity), 即为城墙研究质点的振动速度峰值 PPV 与城墙底部振动速度峰值 PPV 之比,则城墙顶部各测点  $f_{PPV}$  如表 2 所示。城墙顶部的放大比例均处在 1.08~2.21 倍之间(城墙顶部比底部的振动速率大 0.01~0.022 cm/s),说明在一定范围内随着古城墙高度的增加,城墙结构振动响应更加显著。

表 2 现场监测  $f_{PPV}$  结果  
Tab. 2  $f_{PPV}$  results of field monitoring

工况	测线一 $f_{PPV}$			测线三 $f_{PPV}$
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 2
一	1.81	1.92	1.82	1.25
二	1.91	2.21	2.00	1.28
三	2.11	1.68	2.10	1.08
四	1.56	1.74	1.79	1.08

## 2.2 结构安全性评估

不同于地震和爆破强烈而又短暂的振动,交通振动属于微幅振动,会持续对建筑结构产生影响,邻近道路的建筑物在长期交通振动的影响下,易产生墙体开裂、裂缝发展及不均匀沉降等现象。尤其对于邻近道路的古建筑结构而言,由于结构材料特殊、历史悠久且文化内涵丰富,其在交通振动影响下的安全性备受关注。

国内外相关标准及文献<sup>[23-26]</sup>都是将建筑结构质点振动速度峰值作为疲劳损伤的控制标准,若古建筑质点振动速度的峰值不超过相关规定控制振速的限值,则此类振动对古建筑结构不会产生直接性的破坏。

双井子堡为古土城墙结构,是嘉峪关市的保护文物。参考《古建筑防工业振动技术规范》<sup>[24]</sup>中对古木、砖和石结构振动速度控制限值以及上述国内外古建筑控制标准和文献,确定双井子堡的容许振动速度为0.03 cm/s。

通过分析各测线不同测试工况的现场实测数据,结果表明由双井子堡邻近道路上行驶的大型车辆所产生的振动速度已超过容许振动速度峰值0.03 cm/s,对双井子堡古城墙的安全性具有一定的

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1(t) + k_{11} y_1(t) + k_{12} y_2(t) + \dots + k_{1n} y_n(t) = F_1(t) \\ \vdots \\ m_n \ddot{y}_n(t) + k_{n1} y_1(t) + k_{n2} y_2(t) + \dots + k_{nn} y_n(t) = F_n(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $y_1(t)$  和  $y_n(t)$  分别为质点  $m_1$  和  $m_n$  的水平位移随时间变化的位移函数;  $\ddot{y}_1(t)$  和  $\ddot{y}_n(t)$  分别为质点  $m_1$  和  $m_n$  随时间变化的加速度函数;  $F_1(t)$  和  $F_n(t)$  为质点受到随时间变化的简谐激励荷载函数;  $k_1$  和  $k_n$  为结构刚度系数。

式(1)的矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} m_1 & & \\ & \ddots & \\ & & m_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \vdots \\ \ddot{y}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & \dots & k_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ \vdots \\ F_n(t) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式(2)矩阵式简化为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}\mathbf{y} = \mathbf{F}(t) \quad (3)$$

式中  $\mathbf{K}$  为城墙刚度矩阵;  $\mathbf{M}$  为城墙质量矩阵。

在振动环境下城墙受到简谐荷载的作用,简谐激励荷载函数可表达为  $F_i(t) = F_i e^{j\theta t}$  ( $i = 1 \sim n$ ), 则古城墙在激励荷载作用下系统的模态响应为:

$$\mathbf{y}(t) = \begin{Bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{Bmatrix} e^{j\theta t} = \mathbf{Y} e^{j\theta t} \quad (4)$$

式中  $\theta$  为简谐荷载的主频率。

影响,因此为了保证双井子堡的完整以及城墙的稳定,应当对行驶的车辆载荷以及车辆速度进行控制。

## 3 交通振动高程响应机制

为了能够更加直接地分析古城墙的振动放大效应,将所研究的城墙均匀地分成  $n$  等份,将城墙主体视为质点  $m_1$ ,所研究城墙放大效应的某质点为  $m_n$ ,则可得到城墙在外荷载作用下的计算力学模型,如图7所示。

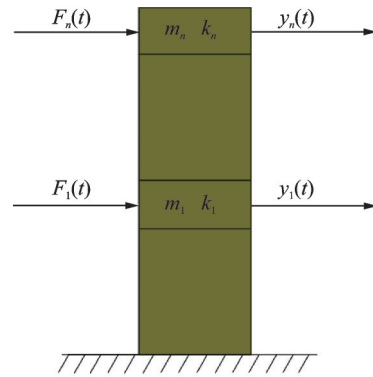


图7 城墙振动计算力学模型

Fig. 7 Computational mechanics model of wall vibration

根据刚度法建立古城墙振动微分方程为<sup>[27-29]</sup>:

将式(4)代入式(2)中可得质点在简谐荷载作用的动力向量矩阵为:

$$\mathbf{F} = (\mathbf{K} - \theta^2 \mathbf{M}) \mathbf{Y} \quad (5)$$

式(5)中,当  $|\mathbf{K} - \theta^2 \mathbf{M}| \neq 0$  时,可求得城墙的振幅  $\mathbf{Y}$ ,将其代入式(4)即得到简谐荷载作用下城墙质点任意时刻的位移。很明显,当简谐荷载的主频率  $\theta$  与城墙结构质点自振频率  $\omega_n$  相同时,就会出现振动放大效应。

在实际计算过程中,采用图7所示的力学模型计算结构的动力响应,理论研究模型尺寸较规整,研究质点的自振频率与主体的自振频率基本趋于一致。双井子堡古城墙在自然环境下出现了不同程度的损坏,城墙顶部的宽度明显小于中间位置和底部位置,质量及刚度相对较小,因此其自振频率会相对较大。现场实测振动主频率主要处在5~25 Hz之间(如图8所示,由于篇幅限制,仅给出了典型时刻幅频曲线图),当所研究城墙结构质点自振频率处于交通振动主频率范围内时,就会出现上部结构的振速大于下部振速的现象,城墙出现在振动荷载激励作用下的高程放大效应。

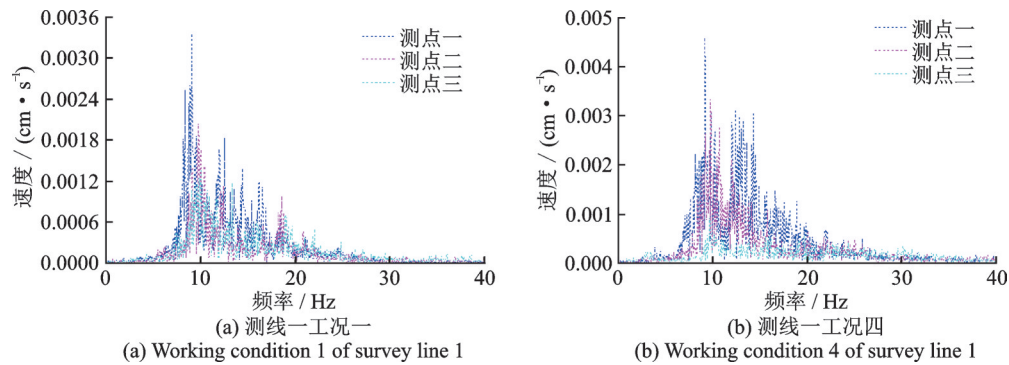


图8 典型工况下速度幅频对比曲线

Fig. 8 Comparison curve of velocity amplitude-frequency under typical working conditions

## 4 城墙动力响应的数值分析

考虑到古建筑结构的重要性,为了避免试验对城墙的进一步破坏,并未进行不同轴重车辆影响下城墙振动响应的多点现场试验。但通过现场实测数据分析发现,城墙在交通振动影响下的动力响应受车辆载荷和行驶速度的影响较为明显。为分析不同车辆载荷和行驶速度对城墙振动响应的影响情况,依据《道路车辆外轮廓尺寸、轴荷及质量限值》<sup>[30]</sup>中的规定,车辆接地载荷在600~980 kPa之间。但在实际行车过程中,重载车大部分有超载情况,为了能够使得研究更符合实际,故将接地压强取值调整为700~1500 kPa<sup>[31]</sup>。假设接触压力等于胎压,选取胎压分别为800,900,100和1100 kPa进行模拟,确定在保证古城墙处于安全振动控制标准范围内的车辆行驶速度,探讨古城墙在交通环境下的振动放大效应。

### 4.1 模型与参数

车轮与路面的接触实际上是较为复杂的相互作用,黄仰贤<sup>[32]</sup>认为轮胎与地面的接触面积由一个矩形和两个半圆组成,为了计算方便,可将接触面积等效成矩形,有限元模型中车轮荷载等效接触面积为 $0.2\text{ m} \times 0.16\text{ m}$ ,双轮中心间距取 $0.3\text{ m}$ 。为了模拟车辆在行驶过程中对邻近古建筑的振动影响,采用ABAQUS USER SUBROUTINE编写Fortran程序DLOAD进行移动荷载的输入,模型采用C3D8R等参单元,模型的边界条件为地基及路面结构约束 $x$ 或 $y$ 方向,基础土体底部全部约束。三维数值模型如图9所示。

道路材料属性为沥青混合料路面,其中,沥青混合料面层厚为 $0.12\text{ m}$ ,基层厚为 $0.3\text{ m}$ ,基础土体厚为 $4\text{ m}$ ,研究城墙厚为 $0.6\text{ m}$ ,长和高均为 $3\text{ m}$ 。通过查阅相关地基土体和沥青路面参数的文献<sup>[33-35]</sup>,并

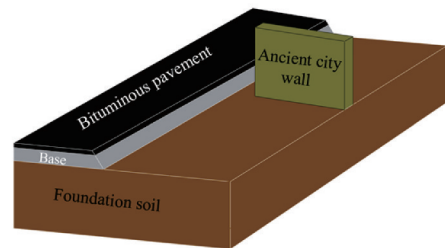


图9 数值模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of numerical model

对现场土城墙取样进行室内试验,确定各材料的物理参数如表3所示。

表3 模型材料参数

Tab. 3 Material parameters of model

材料类型	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比
沥青路面	2400	1300	0.25
基层	2200	670	0.25
基础土体	1900	45	0.3
古土城墙	1591	100	0.3

### 4.2 振动动力响应规律分析

研究内容主要为行驶车辆的载荷以及速度对城墙振动速度动力响应的影响,城墙高度和长度均为 $3\text{ m}$ ,从水平方向和竖直方向分别每隔 $0.6\text{ m}$ 取一个研究质点(竖直方向取 $A_1 \sim A_6$ ,水平方向取 $B_1 \sim B_6$ ,距离均为 $0, 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0\text{ m}$ )分析交通振动速度的变化规律。各研究质点选取位置如图10所示。

#### 4.2.1 交通振动高程效应的规律分析

在车辆荷载作用下,不同时刻双井子堡古城墙的振速云图如图11所示。

随着车辆荷载不断向城墙驶近,城墙的振动速度从底部向顶部不断传播, $t=0.02\text{ s}$ 时(见图11(a)),振动荷载开始作用到城墙上,此时振动波速由城墙底部向顶部传播,由于振动速度较小,并未出现



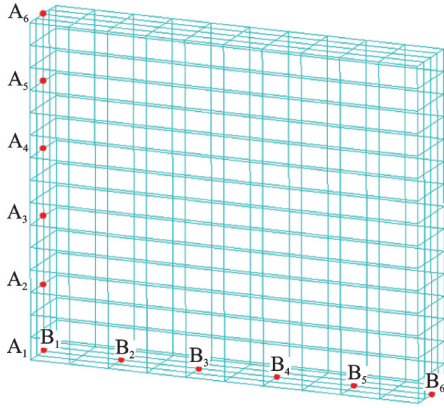


图 10 城墙各研究质点位置

Fig. 10 The location of each research particle of the wall

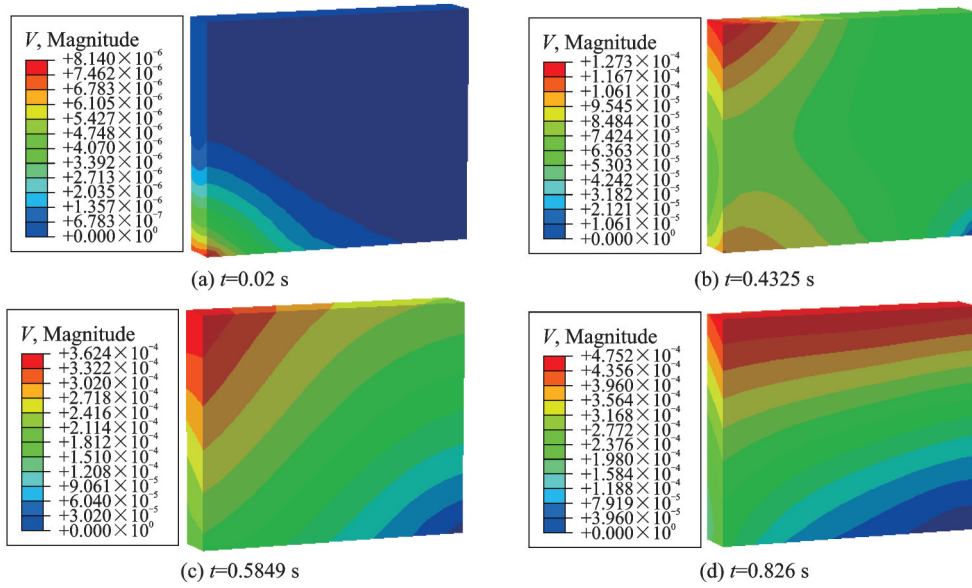


图 11 不同时刻城墙振速云图

Fig. 11 Cloud picture of wall vibration velocity at different time

通过对图 12 所示的 4 组不同车辆载荷和车速情况下,不同高程上的  $f_{PPV}$  结果分析发现,当车辆载荷  $P=800$  kPa 时(见图 12(a)),从城墙底部到城墙顶部方向,  $f_{PPV}$  先减小后增大,在  $Z=0\sim 1.8$  m 位置处,  $f_{PPV}$  自下而上逐渐减小,在  $Z=1.8\sim 3.0$  m 位置处,  $f_{PPV}$  自下而上开始呈现出增大的趋势(如图 11 振动速度云图所示,自下而上出现先减小后增大的动力响应状态),且随着车辆行驶速度从  $V=20$  km/h 到  $V=50$  km/h 不断增大,  $f_{PPV}$  逐渐增大,但整体放大系数均小于 1,说明城墙顶部振动速度并没有超过城墙底部;当车辆载荷为  $P=900$  kPa 时(见图 12(b)),  $f_{PPV}$  随高度的增加逐渐增大,当速度为  $V=40$  km/h 和  $V=50$  km/h 时,分别在  $Z=2.4$  m 和  $Z=1.8$  m 位置处  $f_{PPV}$  大于 1,说明随着车辆行驶速度的增加,振动放大效应逐渐变得明显;当车辆载荷为  $P=1000$  kPa 时(见图 12(c)),  $f_{PPV}$  基本大于 1,且  $f_{PPV}$  曲线

振动速度的放大效应; $t=0.4325$  s 时(见图 11(b)),车辆继续向城墙附近行驶,此时可以看出城墙开始出现振动放大效应,但振动速度在竖直方向上呈现先减小后增大的趋势; $t=0.5849$  s 时(见图 11(c)),古城墙在交通载荷的作用下出现完全的振动速度放大效应,由城墙底部向顶部的振动速度逐渐增大; $t=0.826$  s 时(见图 11(d)),车辆行驶到离城墙最近位置,此时振动速度达到峰值。

不同高程  $Z$ (从城墙底部到顶部)的振动速度峰值放大系数  $f_{PPV}$  随着车辆行驶速度的变化结果如图 12 所示。

上升趋势逐渐趋于稳定,说明随着车辆荷载和速度的不断增加,放大系数逐渐增大;当车辆载荷  $P=1100$  kPa 时(见图 12(d)),  $f_{PPV}$  均大于 1,说明在移动载荷速度为  $V=20$  km/h 到  $V=50$  km/h 的整个历程中,古城墙都表现出速度放大效应。随着模拟车辆载荷以及行驶速度的增加,城墙质点振动速度放大系数  $f_{PPV}$  随之增大,振动放大效应明显。由图 12(a)~(d)可知,  $f_{PPV}$  处在 1.02~1.77 之间,与现场实测数值基本一致。

通过对比图 12 中车辆载荷从 800 kPa 到 1100 kPa 以及车速从 20 km/h 到 50 km/h 时的  $f_{PPV}$  的变化规律可以发现,在车辆荷载不变的情况下,随着车辆行驶速度的不断增加,城墙质点  $f_{PPV}$  逐渐增大,但当车辆载荷和行驶速度较小时,质点振动速度会出现先减小后增大的现象,说明在交通振动环境下城墙振动放大效应并不是一定存在,而是当振动强度达

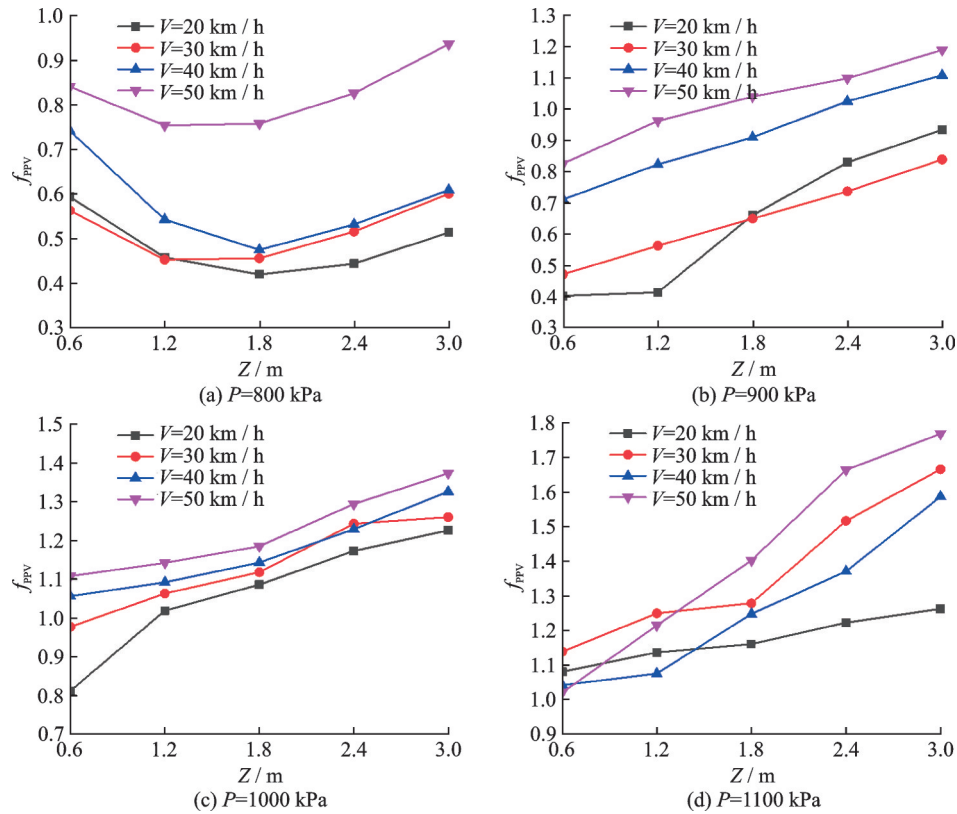


图 12 不同高程的  $f_{PPV}$  结果

Fig. 12  $f_{PPV}$  results at different elevations

到一定值后才发生;在车辆速度不变的情况下,随着车辆载荷的不断增大,城墙质点  $f_{PPV}$  逐渐增大,且车辆载荷越大,  $f_{PPV}$  增量也随之越大。

定义 ACI 为古土城墙顶部 3.0 m 位置与城墙 0.6 m 位置的振动速度放大系数  $f_{PPV}$  之差。不同车速和不同车载工况下 ACI 变化结果如图 13 所示。

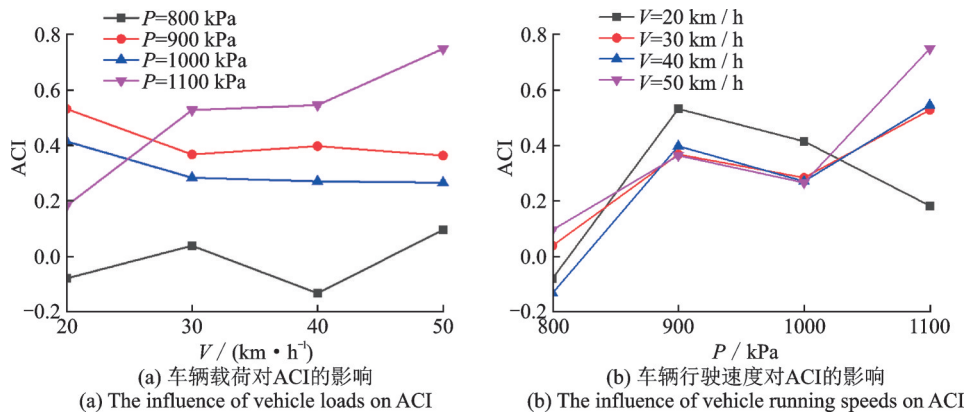


图 13 不同车速与车载荷载对 ACI 的影响

Fig. 13 Influence of different vehicle speeds and loads on ACI

通过对图 13 所示的不同车辆载荷和不同车速情况下 ACI 的结果分析发现,当车辆载荷固定的情况下(见图 13(a)),随着车速的增加,各载荷下的 ACI 表现出减小的趋势,只有当  $P=1100$  kPa 的情况下,ACI 出现持续增长的趋势,说明随着车辆载荷的增加,城墙振动放大效应变得更加明显;当车速固定的情况下(见图 13(b)),随着车辆载荷的不断增大,各车速下的 ACI 表现出持续增长的趋势,仅当  $V=20$  km/h 的情况下,ACI 出现了减小的情况,再

次说明随着车辆载荷的增加,城墙振动放大效应逐渐明显。

通过上述对 ACI 的分析可以确定,对振动高程效应的显著性影响程度为车辆载荷大于车辆速度。

#### 4.2.2 水平方向振动衰减规律分析

沿城墙水平方向,从邻近道路城墙底部到城墙最远端位置,根据数值模型所选取的研究质点,振动速度峰值随着车辆行驶速度增加的变化结果如图 14 所示。



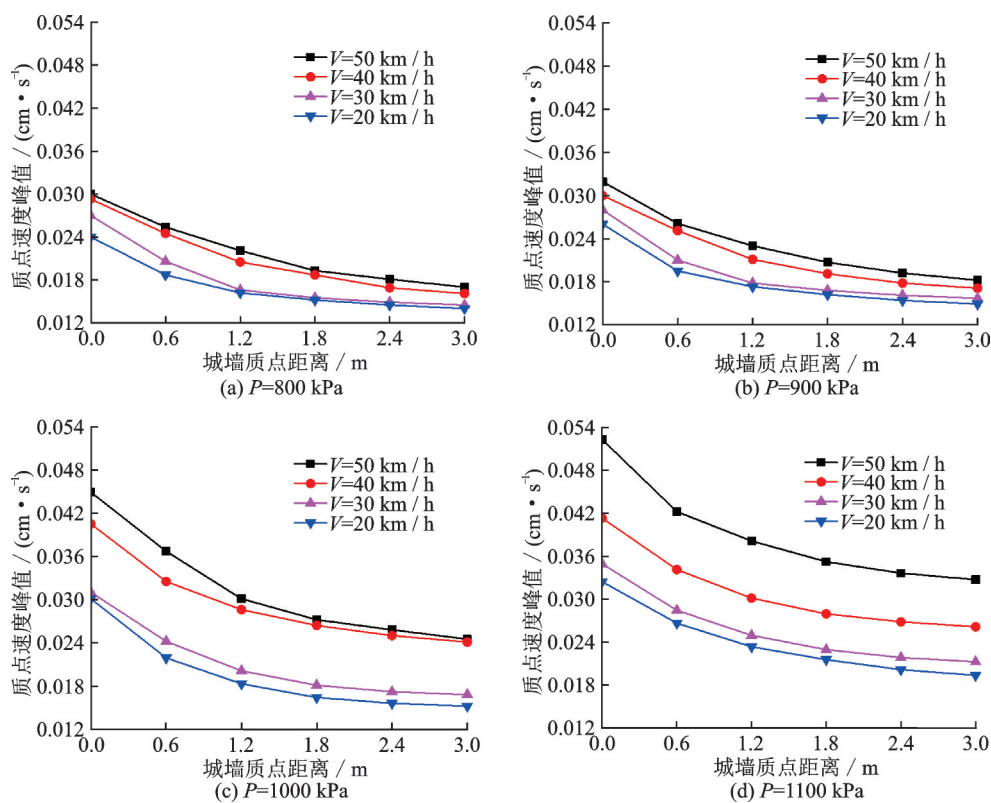


图14 城墙质点振动速度峰值变化规律

Fig. 14 Variation law of vibration velocity peak of wall particle

通过对模拟数据进行分析可知,各工况下的振动速度峰值衰减规律大致相同,都随着振源距离的增加,振动速度峰值逐渐减小。当车辆载荷为1000 kPa和1100 kPa时,距离振源最近位置质点的振动速度峰值均超过安全控制标准0.03  $\text{cm/s}$ 。当车辆载荷低于900 kPa时,为了保证古土城墙结构的安全性,车辆行驶速度应控制在40  $\text{km/h}$ 以下;当车辆载荷超过900 kPa时,应对车辆进行提前改道或分流。

## 5 城墙底部与顶部振动速度峰值的关系

在古建筑受交通振动影响的实际监测过程中,由于古建筑结构的特殊性和受保护性,不便于对其顶部以及高程方向上质点的振动信号进行采集,故在实际现场监测中无法实现结构本身振动传播规律的研究分析。根据现场监测信号以及模拟结果分析,可以用地表质点速度峰值作为表征值来反映城墙高程方向上的质点振速。对不同振源类型情况下城墙顶部与城墙底部质点振动速度峰值的关系进行研究分析,通过确定两者之间的振速关系,以此利用城墙底部质点的振动速度来表现出城墙顶部的振动速度。以模拟结果为研究内容,分别分析在车辆载

荷为800,900,1000和1100 kPa情况下各研究质点的振速关系。城墙底部与顶部的模拟振速关系如图15所示。

图15中 $V_t$ 为城墙顶部质点振动速度峰值; $V_b$ 为城墙底部质点振动速度峰值。

通过图15可以看出,拟合曲线相关性系数 $R^2$ 分别为0.89,0.93,0.93和0.93。结合图12(a)发现,当载荷为800 kPa时,城墙并没有出现明显的振动放大现象,因此可以推断出,随着车辆载荷的增大,城墙在高程方向上的振动放大效应逐渐明显,且在该放大条件下,城墙底部和顶部质点振动速度峰值的相关性较为显著,拟合曲线相关性系数较大。

同时,为了进一步验证城墙底部与顶部在邻近道路交通振动激励下的振速线性关系,结合现场测试数据,对现场采集的振动信号进行线性拟合。根据现场测试12种工况,选取测线一的1-1 $^\#$ ,1-2 $^\#$ ,1-3 $^\#$ (城墙顶部)和测线二的2-1 $^\#$ ,2-2 $^\#$ ,2-3 $^\#$ (城墙底部)在4种工况下各个测点的振动信号以及测线三3-1 $^\#$ 和3-2 $^\#$ 在4种工况下城墙底部和顶部的振动信号进行数据分析,统计分析结果如图16所示。

通过图16可以看出,现场实测城墙底部和顶部振动信号之间同样存在一定的线性关系,且线性相关系数 $R^2=0.92$ ,现场实测数据与数值模拟结果线性拟合相关系数基本一致,进一步说明了模拟结果

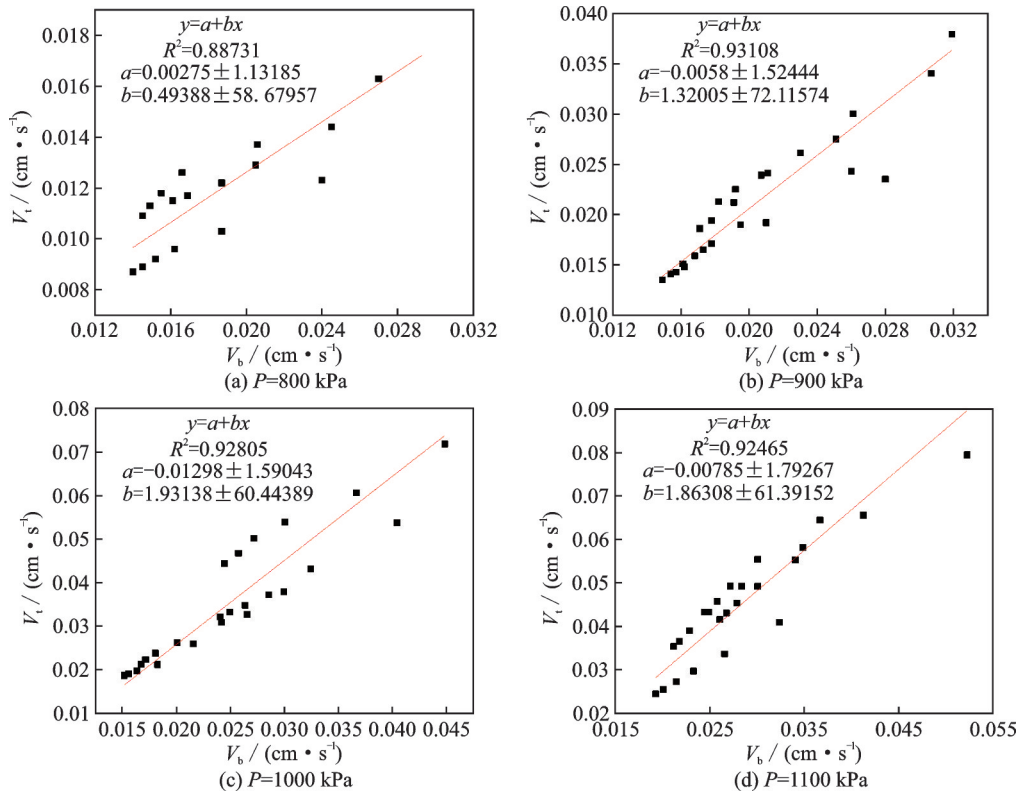


图 15 城墙底部与顶部的模拟振速关系

Fig. 15 Simulated vibration velocity relationship between bottom and top of wall

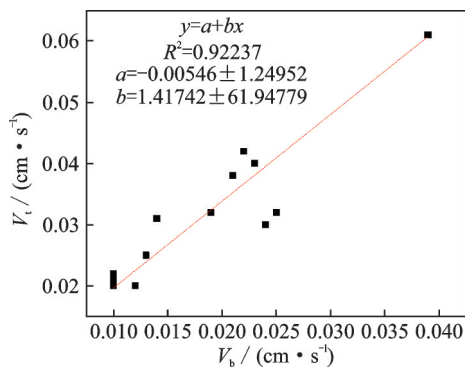


图 16 城墙底部与顶部的实测振速关系

Fig. 16 Measured vibration velocity relationship between bottom and top of wall

的准确性以及可靠性;同时也确定了在交通振动激励下城墙底部和顶部的质点振动速度确实存在一定的线性比例关系。

## 6 结 论

(1) 通过对现场实测数据进行分析发现,载重汽车运行过程中,城墙的顶部振速大于底部振速,顶部放大系数的范围为 1.08~2.21;振动频率的总体分布范围为 0~40 Hz,集中在 5~25 Hz,振动主要是以低频振动为主,高频振动衰减较为明显。

(2) 当结构质点自振频率处于交通振动主频带

范围内时,会出现振动放大效应。随着模拟车辆荷载以及行驶速度的增加,城墙质点振动速度放大系数  $f_{PPV}$  随之增大,振动放大效应明显,  $f_{PPV}$  处在 1.02~1.77 之间,与现场实测数值基本一致。通过对不同荷载和行驶速度下的 ACI 进行分析,发现对振动高程效应的显著性影响程度为车辆荷载大于车辆速度。

(3) 通过数值模拟结果的分析,对不同车辆加载形式下基础质点与城墙顶部速度峰值进行线性拟合,发现城墙底部和顶部的振动速度拟合曲线相关系数  $R^2$  的范围为 0.89~0.93,而现场实测振动信号拟合相关性系数为 0.92,表明邻近道路的古土城墙在车致振动作用下,其底部和顶部的振速存在一定的线性关系,实测与数值模拟结果可以相互印证。

(4) 实测与模拟结果均表明在车致振动影响下,古土城墙的振动速度超过了安全控制标准。为了确保古土城墙的安全性,依据振动响应规律,提出了相应的减振、防振建议:对超过 900 kPa 的车辆进行提前改道或分流;车辆荷载低于 900 kPa 的车辆应控制其行驶速度在 40 km/h 以下。同时,当结构产生振动放大效应时,应当以结构最高处的振动速度作为允许振速的控制标准。

## 参考文献:

- [1] 孙晓静. 地铁列车振动对环境影响的预测研究及减振措施分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.  
SUN Xiaojing. Prediction of environment vibrations induced by metro trains and mitigation measures analysis [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [2] Bata Miloslav. Effects on buildings of vibrations caused by traffic[J]. Building Science, 1971, 6(4): 221-246.
- [3] LIU X R, KOU M M, LU Y M, et al. An experimental investigation on the shear mechanism of fatigue damage in rock joints under pre-peak cyclic loading condition [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 106: 175-184.
- [4] 朱利明, 王成龙, 蓝天, 等. 地铁运行引起的南京鼓楼振动测试与分析[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S1): 291-296.  
ZHU Liming, WANG Chenglong, LAN Tian, et al. Vibration test and analysis of Nanjing Drum Tower caused by metro operation[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(S1): 291-296.
- [5] 马蒙, 刘维宁. 我国文物建筑受列车微振动影响研究现状及关键问题分析[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(4): 1-6.  
MA Meng, LIU Weining. Overview and key problem analysis of the vibration influences on historic buildings induced by moving trains in China[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(4): 1-6.
- [6] Chikaaki Ueda. On distribution of traffic vibration in the building under overhead railway bridges [J]. Transactions of the Architectural Institute of Japan Summaries of Technical Papers, 1965, 40: 375.
- [7] 王京礼, 苏广丰. 焦枝铁路对洛阳龙门石窟的环境影响[J]. 铁道标准设计通讯, 1991(12): 35-39.  
WANG Jingli, SU Guangfeng. The environmental impact of Jiaozhi Railway on Longmen Grottoes in Luoyang [J]. Railway Standard Design Newsletter, 1991(12): 35-39.
- [8] Lombaert G, Degrande G. The experimental validation of a numerical model for the prediction of the vibrations in the free field produced by road traffic[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 262(2): 309-331.
- [9] Fang Xinfeng, Li Dong. Field test and analysis for environmental vibration induced by road traffic load[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 482: 183-187.
- [10] 谢伟平, 张辉, 何卫. 多层立体汽车客运站车致振动实测研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 238-245.  
XIE Weiping, ZHANG Hui, HE Wei. Field measurement for vehicle induced vibration of a multi-story 3-D bus station [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(13): 238-245.
- [11] Hinzen K G. Subway-induced vibrations in cologne cathedral [J]. Seismological Research Letters, 2014, 85(3): 631-638.
- [12] Valašková Veronika, Papán Daniel, Fričová Jana. Theoretical analysis of traffic seismicity effect on important historical building in modra town [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 15(1): 193-198.
- [13] Ma M, Liu W N, Qian C Y, et al. Study of the train-induced vibration impact on a historic Bell Tower above two spatially overlapping metro lines [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 81(3): 58-74.
- [14] 孙鹏昌, 卢文波, 雷振, 等. 单薄山体岩质高边坡爆破振动响应分析及安全控制[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 877-885.  
SUN Pengchang, LU Wenbo, LEI Zhen, et al. Blasting vibration response and control of high rock slopes of thin mountain [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 877-885.
- [15] 吴多华, 刘亚群, 李海波, 等. 地震荷载作用下顺层岩体边坡动力放大效应和破坏机制的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 1945-1956.  
WU Duohua, LIU Yaqun, LI Haibo, et al. Shaking table tests on dynamic amplification and failure mechanism of layered rock slopes under seismic actions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 1945-1956.
- [16] LI H B, LIU Y Q, LIU L B, et al. Numerical evaluation of topographic effects on seismic response of single-faced rock slopes [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(3): 1873-1891.
- [17] YANG G X, QI S W, WU F Q, et al. Seismic amplification of the anti-dip rock slope and deformation characteristics: a large-scale shaking table test [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 907-916.
- [18] 李政, 金浩, 郑军. 轨道交通引起沿线砌体结构振动局部放大分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(15): 263-270.  
LI Zheng, JIN Hao, ZHENG Jun. Analysis of local amplification of masonry structure vibration caused by rail transit [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(15): 263-270.
- [19] 郑鑫, 陶夏新, 王福彤, 等. 轨道交通地面振动衰减关



- 系中局部放大现象形成机理研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(3): 35-40.
- ZHENG Xin, TAO Xiaxin, WANG Futong, et al. Mechanism of local amplification in attenuation of ground vibration induced by rail traffic[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(3): 35-40.
- [20] 李克飞, 刘维宁, 刘卫丰, 等. 交通振动对邻近古建筑的动力影响测试分析[J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(1): 79-83.
- LI Kefei, LIU Weining, LIU Weifeng, et al. Tests and analysis of traffic-induced vibration effects on surrounding historic buildings [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(1): 79-83.
- [21] 葛家琪, 马伯涛, 庞玉涛, 等. 汽车所致虎门遗址振动全过程性能化研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(14): 95-100.
- GE Jiaqi, MA Botao, PANG Yutao, et al. Whole process performance-based analysis on vibration of Humen site induced by automobile running[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14): 95-100.
- [22] 樊兴伟. 道路交通振动对开封古城墙的影响研究[D]. 郑州: 河南大学, 2020.
- FAN Xingwei. Study on the influence of road traffic vibration on Kaifeng ancient city wall [D]. Zhengzhou: Henan University, 2020.
- [23] 中国机械工业联合会. 建筑工程容许振动标准: GB 50868—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- China Machinery Industry Federation. Standard for allowable vibration of building engineering: GB 50868—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [24] 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, 2008.
- 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, 2008.
- [25] Technical Committee Schwingungsfragen in Bauwesen. Vibrations in civil engineering: DIN 4150—1983 [S]. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1983.
- [26] Hinzen K G. Subway-induced vibrations in Cologne Cathedral[J]. Seismological Research Letters, 2014, 85(3): 631-638.
- [27] 包世华. 结构动力学[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005: 49-70.
- BAO Shihua. Structural Dynamics [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005: 49-70.
- [28] 王雷, 宋维源, 李吉. 框架结构鞭梢效应的分析与讨论[J]. 黑龙江科技学院学报, 2004, 14(3): 177-179.
- WANG Lei, SONG Weiyuan, LI Ji. Analysis and discussion of the whiplash effect of frames [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2004, 14(3): 177-179.
- [29] 陈明, 卢文波, 李鹏, 等. 岩质边坡爆破振动速度的高程放大效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2189-2195.
- CHEN Ming, LU Wenbo, LI Peng, et al. Elevation amplification effect of blasting vibration velocity in rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2189-2195.
- [30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 道路车辆外廓尺寸、轴荷及质量限值: GB 1589—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Limits of dimensions, axle load and masses of road vehicles: GB 1589—2004 [S]. Beijing: China Standards Press, 2004.
- [31] 董旭鹏. 基于材料非线性的多轴重载下沥青路面结构响应分析[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- DONG Xupeng. Analysis of asphalt pavement responses under multi-axle wheel load based on material nonlinearity [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [32] 黄仰贤. 路面分析与设计 [M]. 余定选, 齐诚, 译. 北京: 人民交通出版社, 1998: 19-21.
- HUANG Yangxian. Pavement Analysis and Design [M]. Translated by Yu Dingxuan, Qi Cheng. Beijing: China Communications Press, 1998: 19-21.
- [33] 张杰. 公路沥青路面结构动力响应及车辆舒适性分析 [D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- ZHANG Jie. Dynamic response of highway asphalt pavement structure and vehicle ride comfort analysis [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [34] 孔德政. 河西地区长城土遗址抗震稳定性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- KONG Dezheng. The study of seismic stability of the rammed Great Wall in Hexi area [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [35] 张恒. 甘肃地区夯土墙抗震性能试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- ZHANG Heng. Experimental study on seismic performance of rammed earth walls in Gansu area [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.

## Field measurement and numerical analysis of influence of traffic load on vibration of Shuangjingzibao ancient city wall

QIAO Xiong<sup>1</sup>, LIU Wen-gao<sup>1</sup>, LUO Wei-bin<sup>2</sup>, NI Wei-lin<sup>1</sup>, YANG Xin<sup>1</sup>,  
HUANG Jin-cong<sup>1</sup>, LIU Jin-long<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Road Construction and Maintenance Technology, Materials and Equipment R&D Center for Transportation Industry, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Due to the special structural materials, long history and rich cultural connotation of ancient buildings, their dynamic response law under traffic vibration has become an important research content of ancient building safety. Aiming at the vibration elevation effect of the ancient city wall under the influence of road vehicles and the safety evaluation of the structure, based on the field test of vibration characteristics under various working conditions and the theoretical analysis of vibration elevation response mechanism, combined with the method of numerical simulation, and according to the corresponding safety criteria and allowable standards, the research is carried out. The results show that the main frequency range of vibration of the ancient city wall under the influence of road traffic load is 5~25 Hz, the vibration speed of the top of the wall is larger than that of the bottom, and the amplification coefficient of the top is 1.08~2.21. The amplification effect of vibration is mainly affected by the load and speed of vehicles. With the increase of simulated vehicle load and driving speed, the peak velocity amplification coefficient  $f_{ppv}$  of the wall particle increases, and the vibration amplification effect is obvious,  $f_{ppv}$  is between 1.02 and 1.77. The analysis of incremental ACI of  $f_{ppv}$  shows that the effect of vehicle load on vibration elevation is greater than that of vehicle speed. By fitting the simulation results and the field measured data, it is found that there is a certain linear relationship between the vibration velocity at the bottom and the top of the wall under the excitation of traffic vibration. According to the field measured data and numerical simulation results, the safety of the ancient earth wall is evaluated, and the anti-vibration measures of the ancient earth wall based on the traffic management of passing vehicles are proposed.

**Key words:** ancient earth wall; traffic vibration; field test; numerical simulation; elevation amplification effect

作者简介: 乔 雄(1980—),男,博士,副教授。电话: 15002607797; E-mail: qiaoxiong@lut.edu.cn, qiaoxiong7599@qq.com。

通讯作者: 刘文高(1995—),男,硕士研究生。电话: 18236367085; E-mail: 1562751571@qq.com。