

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231213002

列车荷载激励下夯土遗址的振动响应特性研究*

徐 杨^{1,2}, 白东明^{1,2}, 王 南^{1,2,3}, 张景科^{1,2,3}, 尹行多^{1,2}

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 岩土质文物保护基础科学研究与人才培养甘肃省文物局重点科研基地(兰州大学), 甘肃 兰州 730000; 3. 兰州大学土木工程与力学学院 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 铁路列车运行引起的场地振动为铁路周边建筑遗址带来不可忽视的影响, 为研究列车荷载激励下夯土遗址不同高度处的振动响应以及列车类型、速度、编组等因素对其的作用规律, 以夏官营古城城墙为研究对象, 基于多种工况开展现场原位监测与地质调查, 从时域、频域等多方面分析城墙旁列车运行引起的振动响应并对比现有标准, 确定振动强度及对城墙的影响。研究表明: 列车行驶引起的城墙振动速度峰值和有效值随墙高增大呈波动性衰减, 货车引起的城墙振动速度响应大于客车, 在城墙中部区域均出现了振动速度放大的现象并且达到振动最大值; 城墙振动速度与车速、编组及载重成正比, 各测点振动优势频率范围为40~70 Hz, 城墙中部区域频率放大效应明显, 振动放大区域受到列车车速和编组长度影响; 城墙Z振级衰减特性与速度响应变化规律相同, 货车Z振级最大值为80.29 dB, 客车为76.65 dB, 相比40 Hz以上的振动频率, 10~40 Hz的振动频率衰减慢, 对墙体造成的损伤更大。结合已有振动标准及土遗址基本性质, 列车运行将对夏官营古城城墙产生影响, 研究结果可为相关土遗址的保护措施提供参考。

关键词: 列车振动; 夯土城墙; 现场监测; 动力响应; 传播规律

中图分类号: U211.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)01-0137-10

Study on the Vibration Response Characteristics of Rammed Earth Sites under Train Load Excitation

XU Yang^{1,2}, BAI Dongming^{1,2}, WANG Nan^{1,2,3}, ZHANG Jingke^{1,2,3}, YIN Xingduo^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Key Scientific Research Base of Basic Science of Rock-Earthen Relics Protection and Talents Cultivation (Lanzhou University), Cultural Heritage Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730000, China; 3. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, The Ministry of Education of China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The ground vibrations induced by railway train operations significantly impact architectural sites adjacent to railways. To investigate the vibration response at different heights of rammed earth sites under train load excitation and the influence of factors such as train type, speed, and formation, this study focused on the walls of Xiaguanying Ancient City as a case study. In-situ monitoring and geological surveys were conducted under multiple operational conditions. The vibration responses caused by train operation next to the city wall were analyzed from time domain, frequency domain, and other aspects, compared with existing standards to determine the vibration intensity and its impact

* 收稿日期:2023-12-13;修回日期:2024-02-11

基金项目:国家自然科学基金(42402262)、甘肃省青年科技基金(24JRRA452)资助

作者简介:徐杨(2000—),女,硕士研究生。主要从事不可移动文物保护研究。E-mail:220220935620@lzu.edu.cn

on the city wall. The results showed that the peak and effective values of vibration velocity caused by the train decreased in a fluctuating manner as the wall height increased. The vibration response caused by freight trains was greater than that caused by passenger trains. Vibration velocity amplification was observed in the central region of the wall, where the maximum vibration values were reached. The vibration velocity of the wall was proportional to train speed, formation, and load. The dominant vibration frequency at all measurement points ranged from 40 to 70 Hz. The frequency amplification effect was significant in the central region of the wall, and the vibration amplification area was influenced by train speed and formation length. The Z-vibration level attenuation characteristics of the wall followed the same pattern as the speed response, with the maximum Z-vibration level being 80.29 dB for freight trains and 76.65 dB for passenger trains. Compared to vibration frequencies above 40 Hz, vibration frequencies between 10 and 40 Hz attenuated more slowly, causing more damage to the wall. Based on existing vibration standards and the basic properties of earth sites, train operation impacts the walls of Xiaguanying Ancient City. The research results provide valuable insights into protective measures for similar earthen heritage sites.

Keywords: train vibration; rammed earth wall; in-situ monitoring; dynamic response; propagation patterns

0 引言

我国西北干旱、半干旱地区露天保存着大量夯土遗址,伴随着铁路列车的高速发展,位于狭长地形下的河西走廊出现了许多铁路交通工程与沿线夯土遗址交叉或并行的现象。而在长期自然环境及人类生产活动的破坏作用下,夯土遗址风化剥蚀及墙体破坏等问题十分严重,抗振能力较普通建筑更差^[1]。列车荷载已对沿线土遗址的长期结构安全性产生了严重的威胁。

研究表明列车的环境振动问题主要是由轮轴相互作用引起的,与列车编组、速度、轴重、土体性质等有着密切联系,具有时间间隔短、循环次数多的特点^[2-3]。为了探究列车行驶对周围环境的影响,韩俊艳等^[4]对地铁运行中的场地振动进行了分析,得出土体表面的动力响应随土体阻尼比的增大而减小。孟祥连等^[5]研究了西宝铁路沿线列车通过时场地的振动,发现路堤三向振幅均随着列车速度和轴重的增加而增大。张永福等^[6]根据宝兰高铁列车振动的时域和频域实测,提出列车主要影响范围在铁路外轨中心线 30 m 内。部分研究指出振动波在地层间的反射折射引起的振动叠加效应会使线路一定范围内存在一个振动放大区^[7-9]。闫维明等^[10]认为振动放大区位置依地层条件和隧道埋深而定。李政等^[11]通过数值模拟手段指出列车荷载会诱发建筑结构本身的自振,从而产生振动响应放大。在

对铁路旁阶梯式斜坡的振动实测与数值模拟的研究中明确了振动放大区位置受场地地形地貌特征与土体弹性模量影响^[12]。

长期的列车动荷载正在逐渐成为工程结构失效的主要原因之一,经评估 44% 的列车引起的振动已经超过地面振动限值^[13]。任权等^[14]提出列车长时振动荷载作用下会导致黄土结构不断变形、强度降低,最终发生破坏。而古建筑遗址对这种长期微振动更为敏感,罗马一著名砖石结构山庄就因周围交通流量和重量的增加发生开裂现象^[15]。20 世纪 80 年代国内开展了列车微振动对岩土质文物的影响研究,随后许多学者通过对开封、北京等地的砖石结构城墙附近交通振动的实测,研究分析了车辆速度、距离及荷载对不同地点城墙的影响^[16-19]。石玉成等^[20]、刘琨等^[21]对交通荷载及地震荷载影响下的土遗址提出了容许振动速度和墙体加固建议。乔雄等^[22]通过数值模拟汽车荷载激励下的城墙不同高程的振动速度,提出城墙振动放大效应是振动强度达到一定值后发生的。目前,对交通荷载影响下的周边环境及建筑,特别是砖石结构文物动力响应的研究较多,但有关列车振动对土遗址的研究还比较有限。由于振动传播规律的复杂性以及土体性质的多样性,不同列车类型对于振动的高程放大效应会有很大的影响,尚无有针对不同速度、种类列车影响下的土遗址不同位置处的振动变化规律进行分析。

鉴于此,本文通过对与铁路并行城墙在列车荷载激励下振动特性的现场原位监测,得到了不同车

次运行下城墙的振动速度。对古城墙所处测试区域进行地质调查,基于时域频域分析,结合已有振动控制标准分析不同类型、速度和编组列车行驶产生的振动在城墙不同高度处的变化规律,以期为受列车振动影响下的夯土城墙研究提供理论依据。

1 现场实测概况

1.1 研究对象

夏官营古城位于兰州市榆中县夏官营镇西上堡子村,海拔 1 716 m。研究区域主要由中新统泥

岩、冲洪积砂砾层与上覆第四系黄土三套地层组成,大部分区域地层被黄土与冲洪积物覆盖。上覆黄土以粉质土为主,呈黄色,孔隙较为发育;下部砂砾层呈青灰色,成份以砂砾岩、石英砂岩等为主,泥砂质充填,如图 1 所示。

城墙采用黄土作为夯筑材料,下部为河流侵蚀和人为开挖形成的台地,呈高低起伏状。底部 3 条铁路于夏官营古城遗址及东城墙间穿过,其中 2 条货车轨道距城墙底部水平距离 10 m,1 条客车铁路距城墙约 25 m(图 2)。试验地点选在平行铁路的城墙斜坡上,测点城墙高 6.9 m,宽 7.72 m,夯层厚 0.1~0.14 m^[23],下部台地高 13.5 m。

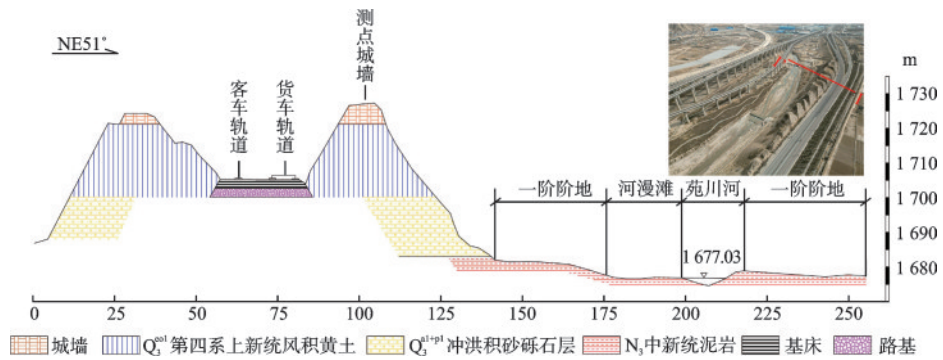


图 1 地层岩性剖面

Fig.1 Stratigraphic lithology profile



图 2 测试现场

Fig.2 Test site and surroundings

1.2 现场检测方案

现场监测采用振动探测仪进行数据采集,在距离城墙顶部到底部沿斜坡布置15个传感器,每个测点放置3个独立的传感器。共布置5个测点,控制测点间水平间距2 m,高差1~1.8 m,分别采集测点垂向、水平垂直和水平平行铁路3个分量的振动强度(图3)。同时,基于通行的不同车型、车速对城墙的激振探究不同工况下城墙的振动响应。监测工况的情况见表1。

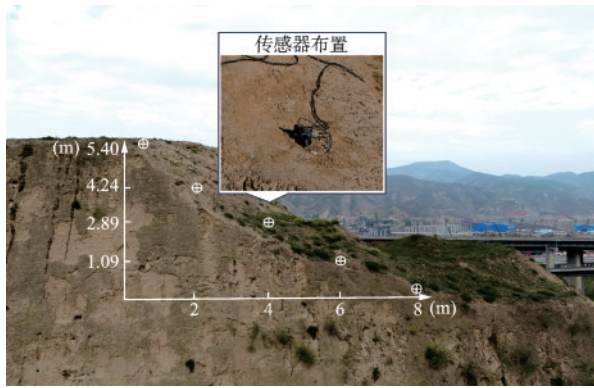


图3 测点布置

Fig.3 Measurement point arrangement

表1 列车行驶振动监测工况

Table 1 Monitoring conditions of vibration from train operation

车辆类型	编号	车速/(km·h ⁻¹)	列车编组/节
工况1 (55~60 km/h)	K-55-18-1	55	18
	K-55-18-2	55	18
	K-56-20	56	20
	K-57-19	57	19
工况2 (60~70 km/h)	K-60-19	60	19
	K-64-19	64	19
	K-69-18	69	18
工况3	H-30-55	30	55
工况4	H-40-59-1	40	59
	H-40-59-2	40	59
工况5	H-53-61	53	61

注:使用K/H-车速-编组表示不同工况,K表示客车,H表示货车

1.3 测试仪器

测量仪器采用INV3068T分布式动态信号采集分析仪和941B型传感器(采用24位高精度AD转换芯片,其动态范围典型值120 dB,最高采样率256 kHz),支持16个采集通道同时采集。分析仪可

以进行微小信号的高精度采集和分析,能够满足列车行驶对墙体的微振动影响研究。列车车速测试采用美国Bushnell手持雷达测速仪,测速范围16~322 km/h。

2 试验结果分析

2.1 时域分析

数据处理对比分析了11列列车通过测试区间时的振动信号,发现相同车速车型所产生的振动速度具有很高的相似性。为分析夏官营城墙振动特性,选取5种典型工况列车通过测试区域时的5测点振动速度时程曲线(各测点振动速度最大向),其背景振动峰值量级为 10^{-3} ,列车振动峰值量级为 10^{-1} (图4)。

通过时域分析图可知列车荷载激励下测点振动响应时域波形整体呈纺锤形,客车通过时引起的城墙的振动持续时间60~70 s,货车引起城墙振动持续时间90~120 s。列车未通过时测点振动幅值较小,为城墙背景振动。在列车驶入测试区域后,时域波形图振动速度先增大后趋于稳定,随着列车离开测试区域,振动响应逐渐恢复至背景振动大小,振动速度随城墙高度增大呈现波动式变化。

为排除异常情况导致的峰值离散的情况,除根据式(1)统计得到各测点的最大峰值振动速度外,还引入有效值反应整个时域内振动大小,计算如式(2)。将不同工况列车距铁路中心线不同高度的城墙振动速度峰值和有效值进行了对比,如图5所示。

$$v_{\max} = \max |v(t)| \quad (1)$$

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t v^2(t) dt} \quad (2)$$

式中, v_{\max} 为速度峰值; v_{rms} 为速度有效值; t 为振动时间; $v(t)$ 为 t 时刻瞬时振动速度。

不同工况列车引起的城墙不同高度处振动峰值速度和有效值速度在0~1.09 m处减小,城墙中部普遍出现振动速度放大的现象。由于货车载重较大,列车编组也远高于客车,其引起的地面振动响应大于客车,产生的放大效应也更明显(H-40-59和H-53-61工况)。地面振动强度还与列车的运行速度有关,对比工况2与工况3,在列车编组基本相同的情况下,速度大的列车引起的城墙振动速度大。

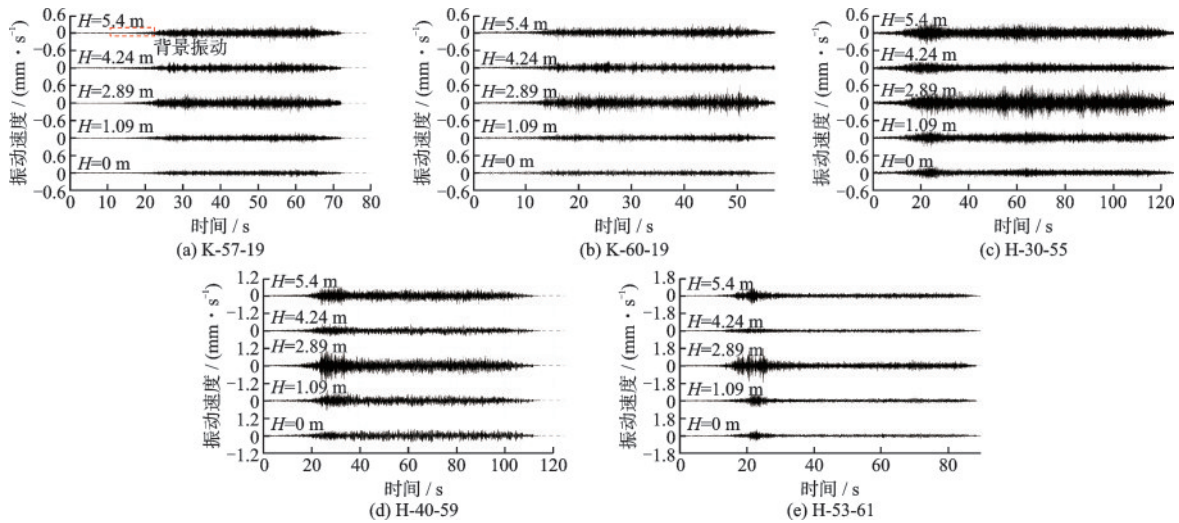


图4 列车振动速度时程曲线

Fig.4 Time-history curves of train vibration velocity

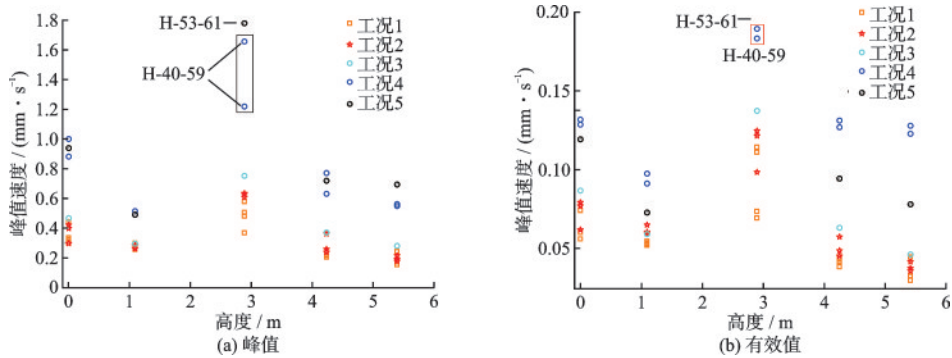


图5 不同工况-峰值有效值对比

Fig.5 Comparison of peak and effective value under different operating conditions

2.2 频域分析

振动频谱反映了振动频率成分以及振动能量的分布情况。对时域数据序列进行傅立叶变换,见式(3),提取各工况列车引起振动速度最大测点频谱(图4)。

$$FA(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(t)e^{-i\omega t} dt \quad (3)$$

式中, $A(t)$ 为时域数据序列; $F_A(\omega)$ 为频域的谱函数序列; t 为振动时间; $\omega = 2\pi f$ 。

列车引起的振动频率范围在3~100 Hz,振动能量最大区域均为城墙中部。货车引起的城墙振动的主要频率为70 Hz的中高频振动和10 Hz左右的低频振动(图6(a))。客车在频率范围内存在多个单峰值(图6(b)),振动能量分布较为分散。城墙振动能量分布随列车速度增大集中在主频附近,货车振动能量大于客车,说明客货车能量大小均与车速和列车编组成正比。

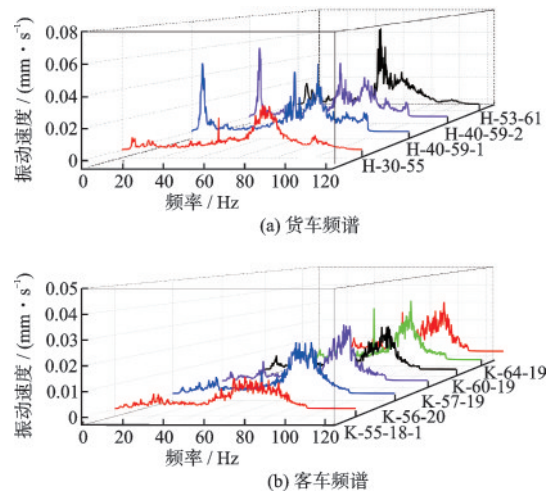


图6 频谱特征对比

Fig.6 Comparison of spectral characteristics

选取H-53-61和K-60-19工况进行分析(图7),货车墙高1 m范围内振动能量分散,峰值不明显,在城墙中部区域最为集中。客车振动频率在墙高1 m

处出现 30~40 Hz 峰值,中部存在 60~90 Hz 峰值。其余三处测点列车经过时引起的振动频率变化不

明显,除 10 Hz 左右的背景振动有一峰值,能量均匀分布在频率范围内。

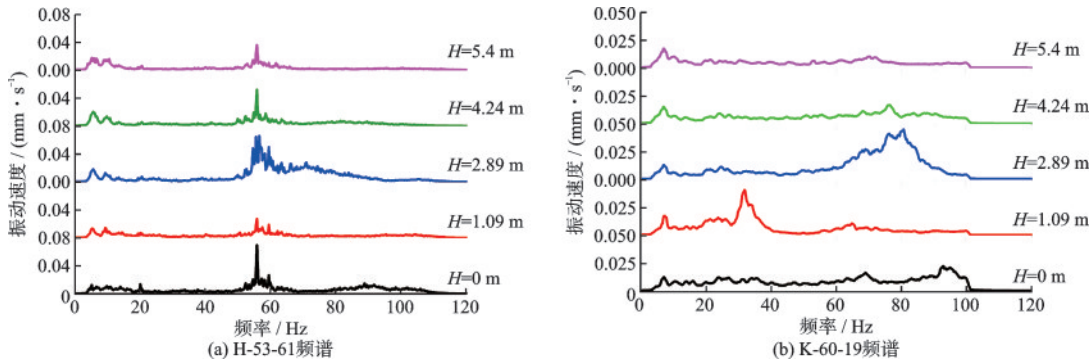


图 7 不同测点频谱

Fig.7 Frequency spectra at different measurement points

2.3 1/3 倍频程

为研究交通振动引起城墙动力响应的主要频段对周围环境的影响大小,对城墙各测点的振动加速度时程进行 1/3 倍频程谱分析。本文选用铁道部规定^[23]的 Z 向计权因子修正后的振动加速度级 (VAL) 作为衡量铁路环境振动问题的标准,按式(4)~(5)计算。

$$VAL = 20 \lg \frac{a_{rms}}{a_0} \quad (4)$$

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t a^2(t) dt} \quad (5)$$

式中, a_{rms} 为 1/3 倍频程频段的加速度有效值; a_0 为加速度基准值,一般取 10^{-6} m/s^2 ; t 为振动时间; $a(t)$ 为 t 时刻瞬时加速度。

选取 K-55-18、K-69-18、H-30-55、H-40-59 和 H-53-61 5 种工况,引起的城墙振动 1/3 倍频程如图 8 所示。在列车激励引起的振动主要频率范围内,振级衰减规律与振动速度相同。60 Hz 以上的较高频成分衰减速率较快,频率低、波长较长的 10~60 Hz 低频成分衰减慢,穿越地层以及建筑物的能力强,对建筑物开裂的影响也较高频振动更大^[17-24]。

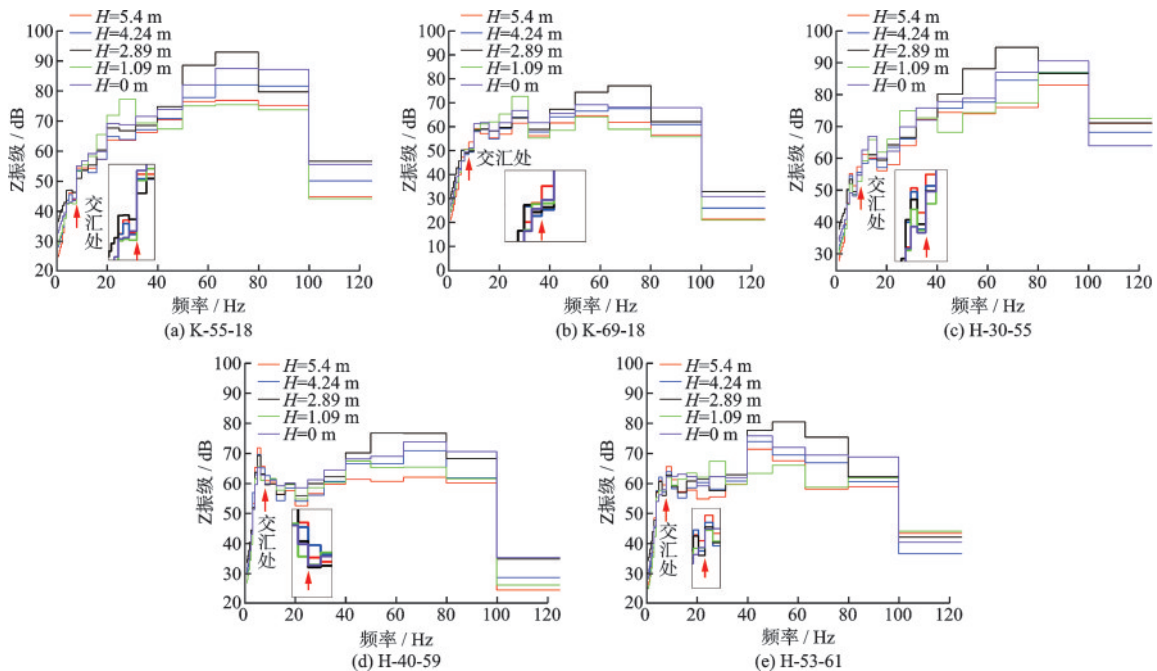


图 8 城墙 1/3 倍频程曲线

Fig.8 1/3 octave band curves of city wall

计算结果表明Z振级随城墙高度衰减的规律与速度变化规律基本一致,在城墙中部也出现了振动放大现象。此外,城墙振动的1/3倍频程频谱曲线在8 Hz处均有1个交汇点,在小于“交汇频率”的范围列车引起的城墙振动主要受背景振动制约^[25]。在大于“交汇频率”的范围城墙振动主要受振源距离和列车工况影响,与土层特性有明显关系并且影响列车行驶时的城墙振动响应。

货车Z振级最大值为H-53-61工况的80.29 dB,客车Z振级最大值为K-69-18工况的76.65 dB,均为两种列车的速度最大工况。我国《城市区域环境振动标准》^[26]中将80 dB作为“铁路外轨30 m外两侧”区域的垂向Z振级限值,认为80 dB会对铁路周围建筑物产生不利影响,货车振动产生的振级大小已不符合标准。

3 分析与讨论

3.1 车速对振动强度的影响

根据测试结果,对不同工况列车产生的城墙振动进行列车行驶速度与墙体振动速度对比分析(图9)。

货车引起的城墙振动峰值整体随速度增加而呈现增大趋势。列车速度越快城墙中部振动有效值越高。所有工况货车在城墙中部均出现了振动速度峰值的放大现象,除此之外,H-30-55和H-40-59工况在墙高4.24 m区域,H-53-61工况在城墙顶部5.4 m区域同样出现了振动放大情况。

客车整体随速度增大引起的城墙振动响应增大趋势不明显,是由于客车荷载相差较小。除城墙中部2.89 m的放大区域外,其余测点振动响应随城墙高度增高而减小。

测试结果显示所有工况列车引起的振动波在传递过程中,客车引起的墙体振动不但存在随高度的衰减情况,在特定范围内还会出现振动放大效应。除城墙中部外,货车在墙顶区域也出现了放大效应,表明城墙振动反弹位置受列车种类影响。

由于测点东北侧苑川河冲洪积物堆积,测试地点下部为砂砾石层,上部大面积覆盖黄土,部分区域因河水侧向侵蚀发生黄土滑塌(图2)。测试地点材料由砂砾石地层、黄土和夯土墙体组成,具有各向异性,且振动响应作用在较松软的土体时要比作用在相对较硬的土体上剧烈^[4],导致传播时不同频率的振动产生的衰减特性不同,从而造成了频谱差

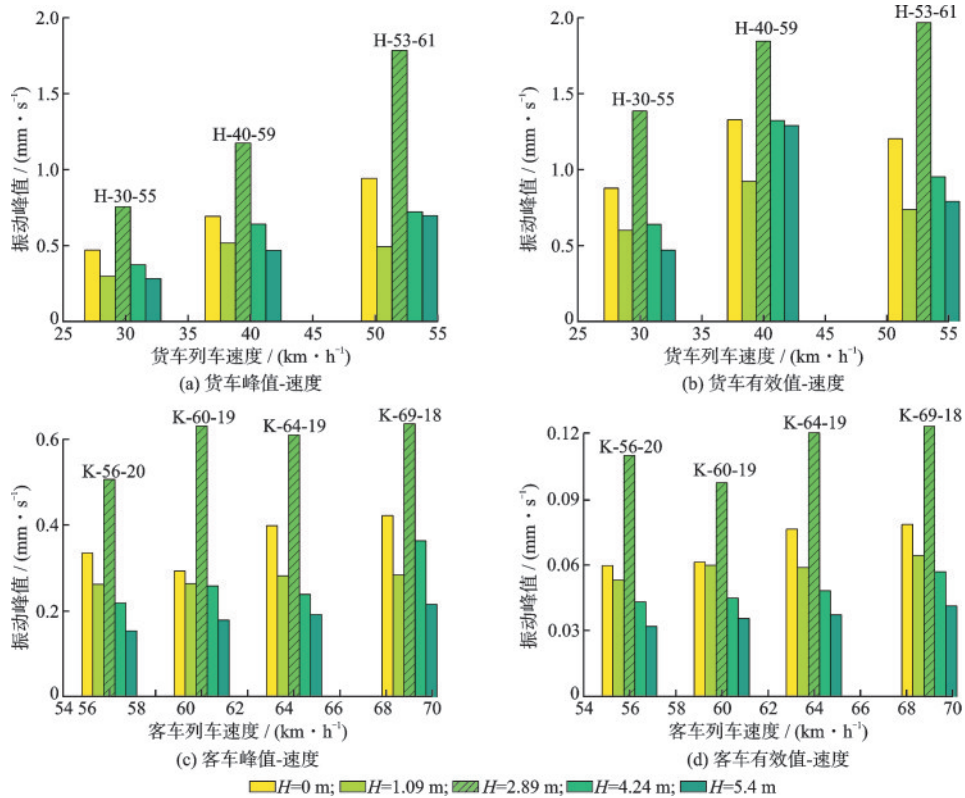


图9 不同工况激励下振动变化规律

Fig.9 Vibration variation patterns under different industrial control excitations

异。从波的传播理论解释,地面振动可以看作一系列简谐波的叠加,车速和载重不同时,引起的地面各频率振动强度不同。测试地点多个地层间振动波的反射折射会出现振动波叠加的现象,从而导致了城墙振动放大效应出现。不同工况频率的反射波、折射波的波峰到达地面的位置不同,且由于城墙下方存在台地,结构顶部会出现随高程的放大现象^[22],所以不同车速和种类列车的振动反弹出现的位置表现出一定的差异。

3.2 土遗址振动阈值分析

国外对文物建筑破坏的定义偏重于“结构破坏”,即建筑主要受力构件发生破坏,国内标准更侧重包括墙面开裂、建筑附属部件的开裂和剥落等损坏的“建筑破坏”。德国 DIN4150^[27]对振动特别敏感的建筑物和历史性古建筑规定振动速度标准为 3~10 mm/s,瑞士 SN640312^[28]规定交通引起的古建筑振动速度标准为 3~5 mm/s。中国《古建筑防工业振动技术规范》(GB/T 50452—2008)^[29]按文物结构类型和文物级别给出了古建筑的容许振动速度,对于强度最差的砖结构古建筑(弹性纵波传播速度 $V_p < 1\ 600$ m/s)和砂岩石窟($V_p < 1\ 500$ m/s),规定容许振动速度分别为 0.15 mm/s 和 0.10 mm/s。

土遗址与砖质石质建筑文物的结构形式、地基及自身物理力学性质等许多因素差异巨大,对于结构更加脆弱的夯土遗址(通常 $V_p < 1\ 000$ m/s^[30-31]),尚未有明确的振动阈值。对于夏官营古城城墙而言,列车引起的振动速度最高达 1.8 mm/s,其长期振动会使得夯土城墙与下部黄土台地土体微观结构发生变化,进而出现斜坡体黄土振陷现象^[14]。根据分析结果,除 H-40-59 和 H-53-61 工况,其余列车行驶引起的城墙测点振动速度均小于 1 mm/s,且货车引起的城墙振动响应大于客车。基于本研究测试结果建议限制货车车速小于 40 km/h,编组小于 55 节,避免城墙部分区域产生较大振动响应。

4 结 论

通过对夏官营古城穿越长城铁路上的列车行驶的振动监测,分析了不同工况铁路列车在城墙不同高度处引起的场地振动响应及振动衰减规律,得出以下结论:

(1) 城墙振动速度的呈波动式衰减,在城墙中

部达到最大值,总体衰减程度小,列车编组和载重与城墙振动响应成正比。

(2) 列车引起的城墙振动频率范围是 3~100 Hz,货车振动主频为 50~60 Hz,峰值明显,能量集中。客车振动频率分布宽,能量分布均匀。

(3) 不同工况列车振动随车速增大整体呈增大趋势,列车引起的低频振动传播距离更远,对城墙造成影响更大。受地层、列车车速和载重影响,在城墙中部区域有一个明显的放大区。

(4) 按国内城市建筑及古建筑安全振动标准对监测结果评价,部分工况列车在城墙引起的振动响应对城墙已经产生了影响。在铁路修建及运营管理中,可以针对不同种类列车控制载重及行驶速度保护临近铁路的土遗址。

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, 2010.
- [2] 郑晓, 刘胜群. 地铁运行引起地表振动的现场测试与分析[J]. 铁道建筑, 2007, 399(6): 41-43.
Zhen X, Liu S Q. Field testing and analysis of ground surface vibration induced by subway operation[J]. Railway Engineering, 2007, 399(6): 41-43. (in Chinese)
- [3] 司丕贤, 尹学军, 雷晓燕. 路基段列车引起的大地振动试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(2): 214-221.
Si P X, Yin X J, Lei X Y. Experimental study of train-induced earth vibration in roadbed section[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(2): 214-221. (in Chinese)
- [4] 韩俊艳, 万宁潭, 赵密, 等. 地铁振动荷载作用下场地动力响应及振动衰减规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 191-199.
Han J Y, Wan N T, Zhao M, et al. Research on site dynamic response and vibration attenuation under the vibration loading of subway[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 191-199. (in Chinese)
- [5] 孟祥连, 周福军. 西宝高铁黄土地区路基振动效应空间分析研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(8): 28-33.
Meng X L, Zhou F J. Spatial analysis of vibration effect of roadbed in loess area of Xibao high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(8): 28-33. (in Chinese)
- [6] 张永福, 李斌, 白广明, 等. 黄土地区高速铁路路基环

- 境振动现场测试分析[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(7): 172-177.
- Zhang Y F, Li B, Bai G M, et al. Field test and analysis of environmental vibration of high-speed railroad roadbed in loess area[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(7): 172-177. (in Chinese)
- [7] 杨金川, 丁选明, 瞿立明, 等. 山区地形条件下高架轨道交通引起地面振动实测研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(1): 133-139, 151.
- Yang J C, Ding X M, Zhai L M, et al. Field tests on ground vibration caused by viaduct rail transit under mountainous terrain conditions [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(1): 133-139, 151. (in Chinese)
- [8] 夏禾, 张楠, 曹艳梅. 列车对周围地面及建筑物振动影响的试验研究[J]. 铁道学报, 2004, 26(4): 93-98.
- Xia H, Zhang N, Cao Y M. Experimental study of the effect of train vibration on the surrounding ground and buildings [J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(4): 93-98. (in Chinese)
- [9] Wenbo Y, Gaoyu M, Jiulin T, et al. The effects of voids on the dynamic response of tunnels under train induced vibration loads[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2023, 23(2): 77-91.
- [10] 闫维明, 聂晗, 任琨, 等. 地铁交通引起地面振动的实测与分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(2): 1-5.
- Yan W M, Nie H, Ren M, et al. Measurement and analysis of ground vibration caused by subway traffic[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(2): 1-5. (in Chinese)
- [11] 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 Z, Jin H, Zhen J. Analysis of local amplification of masonry structure vibration along the rail transit caused by rail transit [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(15): 263-270. (in Chinese)
- [12] 郑海忠, 严武建, 石玉成, 等. 列车荷载作用下黄土阶梯斜坡的动力响应及稳定性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(5): 1080-1089.
- Zhen H Z, Yan W J, Shi Y C, et al. Dynamic response and stability study of loess step slopes under train loads [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(5): 1080-1089. (in Chinese)
- [13] Connolly D P, Marecki G P, Kouroussis G, et al. The growth of railway ground vibration problems-A review [J]. Science of the Total Environment, 2016, 568(15): 1276-1282.
- [14] 任权, 王家鼎, 谷天峰, 等. 列车长历时振动引起黄土滑坡微结构变化研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 117-120.
- Ren Q, Wang J D, Gu T F, et al. Study on microstructural changes of loess landslides induced by train long-hold vibration[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(4): 117-120. (in Chinese)
- [15] Clemente P, Rinaldis D. Protection of a monumental building against traffic-induced vibrations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1998, 17(5): 289-296.
- [16] 袁玉卿, 张弦, 樊兴伟. 道路交通振动对开封城墙的影响[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(6): 192-197, 246.
- Yuan Y Q, Zhang X, Fan X W. Impact of road traffic vibration on the Kaifeng city wall[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(6): 192-197, 246. (in Chinese)
- [17] 贾颖绚, 郭猛, 刘维宁, 等. 列车振动荷载对古建筑的动力影响[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(1): 118-122.
- Jia Y X, Guo M, Liu W N, et al. Dynamic effects of train vibration loads on ancient buildings[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(1): 118-122. (in Chinese)
- [18] 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 K F, Liu W N, Liu W F, et al. Test and analysis of the dynamic effects of traffic vibration on neighboring ancient buildings[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(1): 79-83. (in Chinese)
- [19] 胡卫兵, 王鑫, 于海平. 城市轨道交通微幅振动对西安南城墙的影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(4): 88-95.
- Hu W B, Wang X, Yu H P. Impact analysis of urban rail transit micro-amplitude vibration on the south city wall of Xi'an[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(4): 88-95. (in Chinese)
- [20] 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 C, Guo Q L, Liu K, et al. Analysis of the impact of vehicle vibration on the site of the Ming Great Wall in Shandan[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(Sup1): 988-993. (in Chinese)
- [21] 刘琨, 李桐林, 石玉成, 等. 高昌故城内城墙墙体土质

- 址动力响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(6): 1018-1023, 1052.
- Liu K, Li T L, Shi Y C, et al. Dynamic response analysis of inner soil wall ruins in ancient Gao-chang city [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 1018-1023, 1052. (in Chinese)
- [22] 乔雄, 刘文高, 骆维斌, 等. 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[J]. 振动工程学报, 2023, 36(3): 776-788.
- Qiao X, Liu W G, Luo W B, et al. Field measurements and numerical analysis of traffic loads on the vibration effects of the ancient city wall of Shuangjingzi Fortress [J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(3): 776-788. (in Chinese)
- [23] 铁路环境振动测量: TB/T 3152—2007[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [24] 曹艳梅, 夏禾. 振动对建筑物的影响及其控制标准[C]//第十一届全国结构工程学术会议论文集第Ⅱ卷. 北京: 《工程力学》期刊社, 2002: 396-400.
- Cao Y M, Xia H. Effects of vibration on buildings and their control criteria [C]//Proceedings of the Eleventh National Structural Engineering Conference, Volume II. Beijing: Journal of Engineering Mechanics, 2002: 396-400. (in Chinese)
- [25] 栗润德, 刘维宁, 张鸿儒. 区间地铁列车振动的地面响应测试分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(1): 120-126.
- Li R D, Liu W N, Zhang H R. Ground response test analysis of vibration of inter-district subway train [J]. China Railway Science, 2008, 29(1): 120-126. (in Chinese)
- [26] 城市区域环境振动标准: GB 10070—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [27] Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke: SN 640312[S]. Zürich: Schweizerische Normenvereinigung SNV, 1992.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 易泉. 干旱区土遗址风化特征及劣化模型研究[D]. 兰州: 兰州大学.
- Yi Q. Weathering characteristics and deterioration modeling of soil sites in arid zones [D]. Lanzhou: Lanzhou University. (in Chinese)
- [31] 崔凯, 陈瑞, 张国军, 等. 不同改性方式下夯筑土的兼容性[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2023, 59(3): 351-357.
- Cui K, Chen R, Zhang G J, et al. Compatibility of compacted soils with different modifications [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2023, 59(3): 351-357. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)