

DOI: 10.11779/CJGE2021S1027

# 高速列车运行荷载作用下路堤段阶梯式黄土斜坡场地动力响应研究

严武建<sup>1,2</sup>, 郑海忠<sup>\*1</sup>, 车爱兰<sup>3</sup>, 王平<sup>1,2</sup>, 田欣欣<sup>1</sup>

(1. 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000;  
3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

**摘要:**为了研究高速列车运行荷载作用下黄土斜坡场地动力响应,评价高速列车运行荷载作用对黄土斜坡场地稳定性的影响,选择宝兰客专路堤段阶梯式黄土斜坡场地进行现场振动测试,从时域、频域多个方面分析了列车荷载作用下黄土斜坡场地的振动特性,进而分析黄土斜坡场地效应。研究表明:不同速度的列车通过时路堤段阶梯式黄土斜坡场地在不同的阶梯田边缘位置会出现加速度和振动加速度级反弹增大的现象;各个测点的振动频率主要集中在10~80 Hz,各个测点的主频分布明显不同,列车以不同速度经过同一测点时,其振动频率分布也存在着很大的差异。

**关键词:**高速列车;阶梯式黄土斜坡场地;场地效应;加速度级;三分之一倍频程

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S1-0149-06

**作者简介:**严武建(1980—),男,副研究员,博士,主要从事岩土地震工程与有限元模拟等方面的研究。E-mail: yanwj1980@126.com。

## Dynamic response of stepped loess slopes in embankment under running loads of high-speed train

YAN Wu-jian<sup>1,2</sup>, ZHENG Hai-zhong<sup>1</sup>, CHE Ai-lan<sup>3</sup>, WANG Ping<sup>1,2</sup>, TIAN Xin-xin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou 730000, China; 2. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China; 3. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to study the dynamic response of loess slopes under high-speed train loads and evaluate their influence on the stability of the loess slopes, the vibration characteristics of loess slope site under train loads are analyzed in time domain and frequency domain, then the site effect of the loess slopes is analyzed. The results show that the acceleration and vibration acceleration increase in different stepped loess slope sites when different speed trains pass. The vibration frequency at each measuring point is mainly concentrated in the range of 10~80 Hz, the distribution of the main frequency at each measuring point is obviously different, and that when the train passes through the same measuring point at different speeds is also very different. The time-frequency curve is stable during 2~5 s and no abrupt change occurs, which indicates that the train runs at uniform speed. The spectral curve shows a abrupt peak between 0~2 s and 5~7 s, which indicates that the running state of the train has changed.

**Key words:** high-speed train; stepped loess slope site; site effect; acceleration level; 1/3 octave

## 0 引言

黄土高原地区分布着大量的斜坡、塬、梁和峁等特殊地形地貌,且黄土与其他类土体相比,是第四纪沉积的多孔隙弱胶结特殊物质,具有极强的水敏感性和极高的动力易损性<sup>[1]</sup>。在国家“一带一路”的倡议下,在黄土集中分布的陕西、甘肃等黄土高原地区建设了大量的高速铁路网。高速列车运行引起的环境振动问题也日益突出,引起铁路沿线周围建筑物的振动,并产生大量的噪声,影响周围附近居民的正常生活,影响周边

高校和科研单位等精密仪器的正常使用,对途经的历史名胜古迹产生破坏性影响,同时也会造成铁路沿线一些地质灾害。

国内外学者对铁路列车触发的地面振动冲击开展

**基金项目:**中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项项目(2014IESLZ01);中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2020EEVLO304);国家自然科学基金项目(41472297, U1939209)  
**收稿日期:**2020-12-15  
**\*通信作者:** (Email: zhengzhzho@126.com)

了大量主要针对高架桥梁工程、铁路轨道等的研究,研究方法与研究角度多集中于微观机理分析、数值计算预测、振动致灾后果分析等方面<sup>[2-3]</sup>,但难以直接分析振动导致的空间环境效应。路基工程作为铁路的重要组成部分,列车运行引起的地面振动强度大于桥梁工程,而直接针对路基工程的相关研究较少<sup>[4-5]</sup>。Thompson 等<sup>[6]</sup>和 Chen 等<sup>[7]</sup>采用 2.5 维有限元方法对路基表面进行了模拟,发现了路基表面在某些特殊速度水平下突然振动放大的现象。在频域方面, Ma 等<sup>[8]</sup>和王嘉斌<sup>[9]</sup>还分析了列车在极高速水平(最大速度可达 350 km/h)下路基的振动特性和加载条件,结果表明,动态列车加载引起的路基振动频率主要在 0 ~ 60 Hz 范围内,与列车动态加载的激励频率基本一致。对于路基振动,沉降与动载工况的关系, Zhai 等<sup>[10]</sup>发现如果列车速度水平达到 380 ~ 400 km/h,高频轮轨冲击载荷引起的动应力的主要频率将在 P-SV 波分散曲线与路基表面弹性波分散曲线的交点附近。这种巧合可能导致路基进入共振状态。孟祥连等<sup>[11]</sup>研究了西宝高铁某路堤段振动沿地表、地下深度的强度、时程、频谱等空间特征。陈建国等<sup>[12]</sup>对普通列车运行引起的周围地面振动规律进行了研究。

宝兰客专沿线分布有大量的黄土梁峁沟壑区,地貌条件复杂,湿陷性黄土厚度大。在列车运行荷载作用下不同地形的黄土场地对振动有不同的放大效应,可能会造成严重影响,使得黄土高原地区的斜坡、塬、梁、峁、丘陵等地貌可能发生失稳破坏,给铁路沿线的居民带来严重的灾难,同时可能致使黄土滑坡、崩塌、塌陷等,影响高速列车的正常运行和安全行驶。为了研究湿陷性黄土地区高速列车运行荷载作用下斜坡场地动力响应,评价高速列车运行荷载作用对黄土斜坡场地稳定性的影响,本文选择宝兰客专路堤段阶梯式黄土斜坡场地进行现场振动测试,从时域、频域多个方面分析了列车荷载作用下黄土斜坡场地的振动特性,进而分析黄土斜坡场地效应。

1 基本概况

1.1 阶梯式黄土斜坡场地环境与测点布置

试验工点处于宝兰客运专线秦安—通渭段路堤段,沿线路一侧场地地势较为平坦,另一侧为阶梯状黄土斜坡,共 5 个阶梯,是典型的黄土场地,梯田土层主要是素填土和粉质黄土,每阶梯田较为平坦,布置测点较为容易。每一阶梯田的几何尺寸:第 1 阶梯田的前缘距轨道中心为 14 m,其前端坡高 1.4 m,坡角约 80°,梯田宽度为 7.5 m;第 2 阶梯田坡高 3 m,宽度为 5.4 m;第 3 阶梯田坡高 2.6 m,宽度为 7.4 m;第 4 阶梯田坡高 2.5 m,宽度为 8.4 m;第 5 阶梯田坡高为 3.3 m 且

场地广阔平坦。为研究地面振动在每一阶梯田的传播特征,将测点布置在每阶梯田边缘,见图 1。

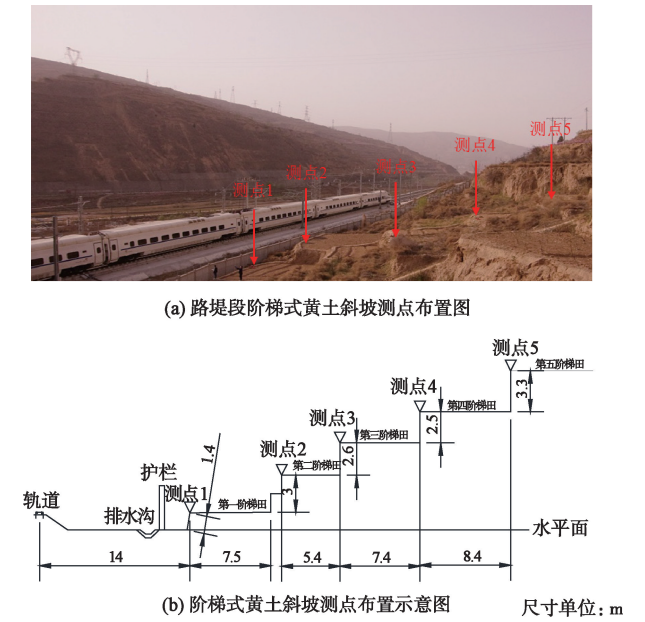


图 1 路堤段黄土斜坡测点布置图及示意图

Fig. 1 Schematic diagram of layout of measuring points for loess slope in embankment section

1.2 测试仪器

地面振动数据采集仪为 891-II 型测振仪,可用于测试建筑结构的脉动、地面振动及工程振动。仪器的加速度测试范围为 0 ~ 2.0g,采样间隔为 0.005 s,该仪器的记录长度为激震前 5 s,激震后 35 s。本次测试中 X 方向与列车运行的方向一致,Y 方向与线路方向垂直,Z 方向为重力的方向。

2 阶梯式黄土斜坡振动加速度级

现场测试了从兰州—宝鸡和宝鸡—兰州两个运行方向的高速列车引起的地面振动,其中宝鸡—兰州方向的高速列车是从测试位置的远轨通过,兰州—宝鸡方向的列车是从近轨通过,共记录了 5 组型号为 CRH2C 高速列车通过时的振动加速度数据,见表 1。

表 1 5 组列车基本参数

Table 1 Basic parameters of 5 trains recorded by vibrometer			
编号	运行方向	车辆编组/节	速度/(km·h <sup>-1</sup> )
#1	由宝鸡—兰州	8	201
#2	由兰州—宝鸡	8	216
#3	由兰州—宝鸡	8	222
#4	由兰州—宝鸡	8	242
#5	由兰州—宝鸡	16	214

2.1 振动加速度时程响应测试分析

在 5 个测试点收集了列车运行速度从 201 ~ 242 km/h 的 3 个方向的加速度数据。图 2 显示了#2

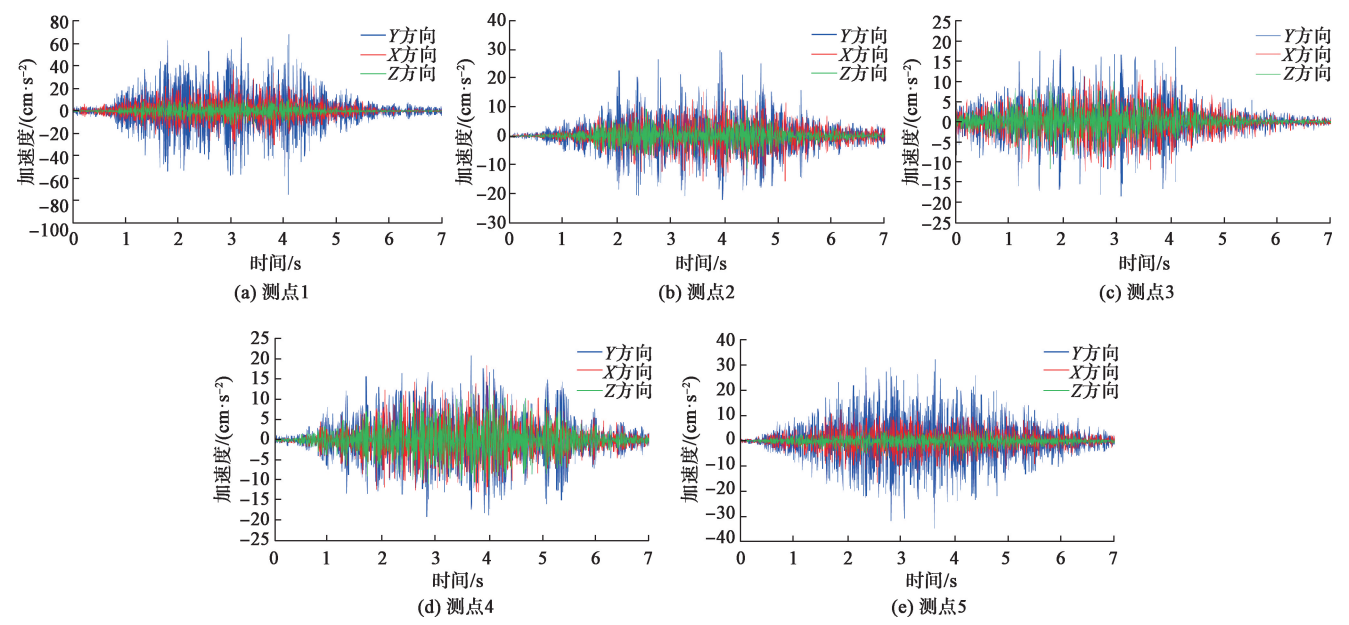


图 2 #2 号列车通过时 5 个测点地面振动加速度时程

Fig. 2 Time-history curves of ground acceleration at different observation points when train No. 2 passes

列车通过时 5 个测试点的 3 个方向的加速度时程。由图可知,当列车经过时每个测试点的波形振幅明显增加两个数量级。不同测点振动信号的持续时间基本保持不变,约为 2 ~ 7 s。在不同测试点处的 3 个分量加速度呈现明显的周期峰值,这是由列车单个转向架的周期作用引起的。测试点#1 处 3 个方向的加速度时程呈现明显的上下对称,正负方向的加速度峰值基本相同。

当列车经过时,5 个测点的 X 方向加速度峰值分别为 36.34,15.74,12.14,18.46,16.45 cm/s<sup>2</sup>;Y 方向上的峰值分别为 74.83,29.82,18.47,20.94,34.87 cm/s<sup>2</sup>;Z 方向上的峰值分别为 16.02,11.44,11.68,13.55,7.90 cm/s<sup>2</sup>。显然,Y 方向的振动最强,而 X 方向的振动最强,Z 方向的振动最弱。这与在平地上得到的结果明显不同<sup>[13]</sup>。在第四阶地水平上,3 个方向的加速度峰值反弹。与三阶层前缘振动相比,加速度峰值在 X 方向反弹最明显,在 Z 方向和 Y 方向反弹较少。此外,在第四和第五阶地水平上,Y 方向加速度的峰值反弹。

2.2 列车运行速度对振动传播的影响

列车运行荷载作用下产生的振动是引起轨道变形、路基沉降及边坡失稳的主要原因。为了研究列车速度对各级梯田的振动效应,为了保证振源的一致性,选取编组和运行方向相同,而运行速度不同的#2, #3 和#4 共 3 列列车测试数据为对象,其测试速度分别为 216,222,242 km/h。

列车不同速度经过 5 个测点的 X,Y,Z 3 个方向的峰值加速度如图 3 所示。不同速度的列车引起的峰值加速度的变化规律相似,其并不是与振中距离远近呈单调衰减,在 X,Y 方向第 4、第 5 阶梯田出现了加速度反弹增大的现象,Z 方向则在第 4 阶梯田出现了加速度反弹增大,且每个测点的峰值加速度与车速不呈正相关关系,表明出现“振动反弹”的位置与车速的大小有明显关系,且场地振动的强度不仅受到列车速度的控制,而且还与场地地形地貌特征有密切关系,甚至场地条件的影响要大于列车速度的影响。

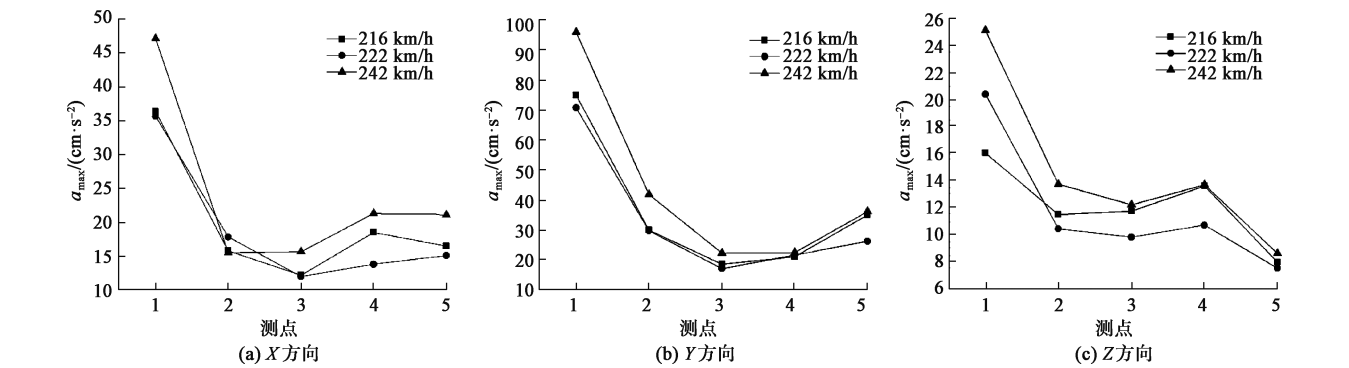


图 3 列车速度对振动传播的影响

Fig. 3 Effects of train speed on vibration propagation



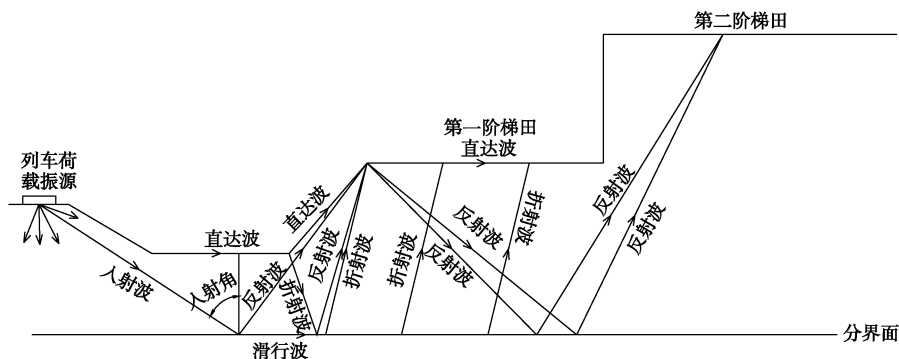


图4 阶梯式黄土斜坡振动传播过程

Fig. 4 Vibration propagation process of stepped loess slope

图4是列车运行荷载作用下阶梯式黄土斜坡振动传播过程示意图。由图可知,在列车行驶过程中,振动主要是因为轨道不平顺导致,它以振动波的形式从轨道传播到路基,然后传播到周围的土壤。当振动波的入射角小于其临界角时,入射波只在界面处产生反射波。当入射角大于临界角时,也会产生折射波。反射波和折射波传播到第一阶梯田的边缘,然后产生反射波,当反射波到达界面时,反射波又产生反射波。同样,直达波在第一阶地水平的斜坡底部产生折射波。然后,折射波到达界面,产生反射波,到达第一阶梯田的边缘。反射波在界面上反射。因此,各阶地的振动主要是由直达波、反射波和折射波的相互作用引起的。

### 3 振动加速度频谱分析

#### 3.1 阶梯式斜坡振动加速度数据傅里叶谱分析

对振动加速度数据进行频谱分析,就是对加速度数据进行傅里叶变换的过程。在采样间隔相等的  $N$  (偶数)个样本值为  $x_m$  ( $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ) 时,其傅里叶变换为

$$\left. \begin{aligned} A_k &= \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \cos \frac{2\pi km}{N} (k = 0, 1, 2, \dots, N/2 - 1, N/2), \\ B_k &= \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \sin \frac{2\pi km}{N} (k = 1, 2, \dots, N/2 - 1), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $x_m$  为系数为  $A_k, B_k$  的有限三角函数,

$$x_m = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \left[ A_k \cos \frac{2\pi km}{N} + B_k \sin \frac{2\pi km}{N} \right] + \frac{A_{N/2}}{2} \cos \frac{2\pi (N/2)m}{N} \quad (2)$$

为了评估在频域内的阶梯式斜坡振动特性,通过快速傅里叶变换(FFT)将时域信号转换为频域信号。

图5是#2列车通过时5个测点的频谱曲线。由图可知,各测点的振动频率在5~90 Hz,各测点傅里叶频谱曲线显著异同:各测点的振动加速度峰值随着轨道

距离越远呈衰减趋势,而在频率20~50 Hz, 60~90 Hz时加速度峰值没有随距离变化单调衰减;但在频率50~60 Hz时,加速度峰值随距离变化单调衰减。测点1的傅立叶谱存在2个显著的峰值,且各测点加速度主频随着距离轨道越远向低频范围移动。在5~10 Hz的低频值时,由于低频信号存在更大的波长所以各测点的振动加速度峰值大致相等,导致它们较容易穿透土质斜坡场地,且不会产生显著衰减。同时将测点#1的频谱作为基准,当频率20 Hz与50 Hz左右时测点#3的振动加速度产生了放大,当频率40 Hz与50 Hz左右时测点#4的振动加速度出现放大现象,主要是由于在该频率域内振动波在斜坡阶梯边缘场地受到了反射波和折射波的相互作用,导致振动显著放大。

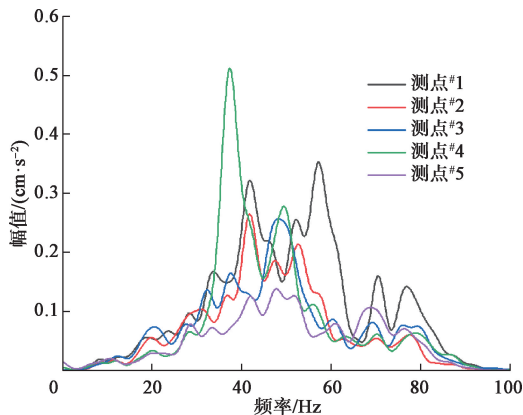


图5 不同测点在2号列车通过时地面加速度的频谱曲线

Fig. 5 Spectral curves of ground acceleration at different measuring points when train No. 2 passes

#### 3.2 阶梯式斜坡振动加速度数据1/3倍频程分析

在对振动数据做频域分析时,不需要对频率值做逐个分析,只需将振动信号的频率阈划分为数个频带并计算在该频带上的加速度级。将频带中高、低截断频率记作  $f_u$  和  $f_l$ , 将其  $n$  倍频程定义为<sup>[14]</sup>

$$\frac{f_u}{f_l} = 2^n \quad (3)$$

在振动和噪声测试分析中  $n = 1/3$  则为1/3倍频程。用中心频率  $f_c$  表示各频程,

$$f_c = \sqrt{f_w f_l} \quad (4)$$

运用 1/3 倍频程分析各梯田在不同频段的垂直向振动能量分布,如图 6 所示。

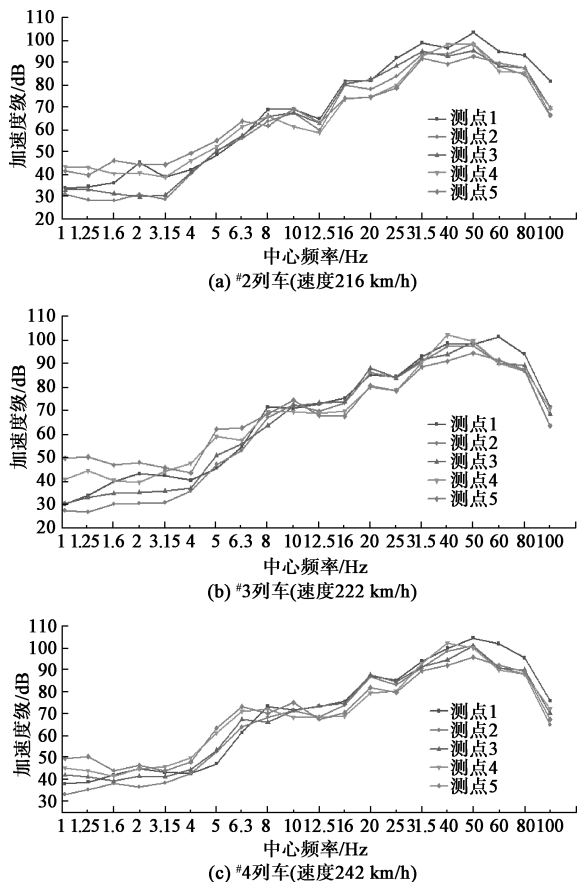


图 6 列车不同速度通过各测点的 1/3 倍频程

Fig. 6 1/3 octave curves when trains with different speeds pass through measuring points

由图 6 可知, #2 列车(速度 216 km/h)通过测试断面时振动频率在 1 ~ 2 Hz 时, 振动加速度级由大至小分别是测点 #5, #4, #1, #3, #2, 说明振动在测点 #3—#5 该频段出现了放大现象; 在 2 ~ 8 Hz 频段, 测点 #1, #2 的加速度级小于测点 #3, #4, #5 的; 在 8 ~ 12.5 Hz 频段, 振动加速度级由大至小分别是测点 #1, #5, #2, #3, #4, 此频段内测点 #4 的振动出现了显著的衰减; 在 12.5 ~ 31.5 Hz 频段, 振动加速度级由大至小分别是测点 #1, #3, #2, #4, #5, 测点 #3 的振动相对于测点 #2 出现放大现象; 在 35 ~ 100 Hz 内, 测点 #4 的振动出现显著放大, 但测点 #5 表现出显著的衰减。#3 列车(速度 222 km/h)通过测点 #5 在 1 ~ 6.3 Hz 频段的振动相对测点 #1 出现显著的反弹增大, 测点 #4 在 1 ~ 1.6, 3.15 ~ 6.3, 31.5 ~ 50 Hz 频段的振动相对测点 #1 出现反弹增大, 测点 #3 在 5 ~ 6.3, 20 Hz 频段的振动相对于测点 #1 出现反弹增大现象。#4 列车(速度 242 km/h)通过测试断面时振动频率在 1 ~ 5 Hz 时振动加速度级由大至小分别是测点 #5, #4, #3, #1, #2, 说明振动在测点 #3—#5 该频段出现了

放大现象; 在 10 ~ 25 Hz 频段测点 #1, #3 的加速度级最大, 次之为测点 #2, 该频段测点 #3 的振动出现放大; 在 50 ~ 100 Hz 频段, 振动加速度级由大至小分别是测点 #1, #2, #3, #4, #5, 振动随距离表现出显著的衰减。

根据以上分析, 可以发现高频振动随轨道中心距离越远都发生了衰减现象, 但低频振动在距离更远的第四和第五阶梯田表现出放大现象, 振动放大频带范围受列车速度影响存在着明显的差异。

## 4 结 论

通过对宝兰客专路堤段阶梯式黄土斜坡场地现场振动实测, 并从时域和频域两个方面进行了分析研究, 得到 3 点结论。

(1) 根据峰值加速度和振动加速度级分析了路堤段阶梯式黄土斜坡场地在不同速度的列车经过时其与轨道中心距离并不是存在单调衰减关系, 而是会呈现二者都反弹增大现象。“振动反弹”位置与车速具有正相关性, 即场地振动强度既受列车速度影响, 也与场地地貌密切相关, 且场地地貌的影响高于列车速度。

(2) 在 #2 列车通过时各测点的振动频率在 5 ~ 95 Hz, 主频分布显著不同, 不同速度列车通过同一测点的振动频率也存在明显差异, 且产生了共振效应。各测点的振动加速度峰值随着轨道距离越远呈衰减趋势, 受反射波和折射波的相互作用在斜坡阶梯边缘场地振动显著放大。

(3) 各测点高频振动随轨道中心距离越远都发生了衰减现象, 但低频振动在距离更远的第四和第五阶梯田表现出放大现象, 振动放大频带范围受列车速度影响存在着明显的差异。

## 参考文献:

- [1] 王兰民. 黄土动力学[M]. 地震出版社, 2003. (WANG Lan-min. Loess Dynamics [M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 叶阳升. 高速铁路路基动力响应特性[J]. 铁道建筑, 2015, 55(10): 7-12. (YE Yang-sheng. Dynamic response performance of high speed railway subgrade [J]. Railway Engineering, 2015, 55(10): 7-12. (in Chinese))
- [3] 翟婉明, 蔡成标, 王开云. 高速列车—轨道—桥梁动态相互作用原理及模型[J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 132-137. (ZHAI Wan-ming, CAI Cheng-biao, WANG Kai-yun. Mechanism and model of high-speed train-track-bridge dynamic interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 132-137. (in Chinese))
- [4] 冯青松, 雷晓燕, 练松良. 高速铁路路基-地基系统振动响应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(1): 1-6. (FENG Qing-song, LEI Xiao-yan, LIAN Song-liang. Vibration

- analysis of high-speed railway subgrade-ground system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7(1): 1 – 6. (in Chinese))
- [5] 龚成明, 刘争平, 杨 丹. 黄土路堑边坡在振动作用下的动力响应分析[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(7): 1 – 4, 9. (GONG Cheng-ming, LIU Zheng-ping, YANG Dan. Analyses of dynamic response of the loess slope under construction vibrations [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 25(7): 1 – 4, 9. (in Chinese))
- [6] THOMPSON D J, JIANG J, TOWARD M G R, et al. Mitigation of railway-induced vibration by using subgrade stiffening[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 79: 89 – 103.
- [7] CHEN J, ZHOU Y. Dynamic responses of subgrade under double-line high-speed railway [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 110: 1 – 12.
- [8] 马利衡, 梁青槐, 谷爱军, 等. 沪宁城际高速铁路路基段振动试验研究及数值分析[J]. 铁道学报, 2014, 36(1): 88 – 93. (MA Li-heng, LIANG Qing-huai, GU Ai-jun, et al. Experimental study and numerical analysis on vibrations of subgrades of Shanghai-Nanjing intercity high-speed railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(1): 88 – 93. (in Chinese))
- [9] 王嘉斌. 高速条件下路基上 CRTS II 型无砟轨道频谱特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017. (WANG Jia-bin. Study on the Spectrum Characteristics of CRTS II Type Ballastless Track on Subgrade under High-Speed Condition[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [10] ZHAI W M, WEI K, SONG X L, et al. Experimental investigation into ground vibrations induced by very high speed trains on a non-ballasted track[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 72: 24 – 36.
- [11] 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 Xiang-lian, ZHOU Fu-jun. Spatial analysis and study of roadbed vibration effect on loess area for Xi'an-Baoji high-speed railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(8): 28 – 33. (in Chinese))
- [12] 陈建国, 夏 禾, 陈树礼, 等. 运行列车引起的周围地面振动规律研究[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 98 – 103. (CHEN Jian-guo, XIA He, CHEN Shu-li, et al. Investigation on running-train-induced ground vibrations near railway[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 98 – 103. (in Chinese))
- [13] 马利衡, 梁青槐, 谷爱军, 等. 沪宁城际铁路振动对周围环境及邻近铁路地基沉降的影响研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(2): 98 – 105. (MA Li-heng, LIANG Qing-huai, GU Ai-jun, et al. Research on impact of Shanghai-Nanjing intercity high-speed railway induced vibration on ambient environment and foundation settlement of adjacent Beijing-Shanghai railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(2): 98 – 105. (in Chinese))
- [14] 毛东兴, 洪宗辉. 环境噪声控制工程[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2010: 16 – 18. (MAO Dong-xing, HONG Zong-hui. Environmental noise control engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 16 – 18. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)