

高盟,高运昌,徐晓,等.青岛岩质地基地铁 3 号线与上海软土地基地铁 10 号线振动实测对比分析[J].地震工程学报,2020,42(2):468-474.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.468

GAO Meng,GAO Yunchang,XU Xiao,et al.Comparative Analysis of Vibration Measurement Between Qingdao Metro Line 3 on Rock Foundation and Shanghai Metro Line 10 on Soft Foundation[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(2):468-474.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.468

青岛岩质地基地铁 3 号线与上海软土地基地铁 10 号线振动实测对比分析

高 盟^{1,2}, 高运昌^{1,2}, 徐 晓^{1,2}, 石传志^{1,2}, 田抒平^{1,2}, 陈青生³

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;

3. 新加坡国立大学 土木与环境工程系, 新加坡 119077)

摘要: 地铁运行产生的环境振动超过一定值会影响人体健康,准确评价地铁运行引起的振动响应值意义重大。本文采用进口测振仪分别对青岛地铁 3 号线和上海地铁 10 号线进行现场测振,对数据进行处理得出振动加速度时程曲线,对测试数据进行 Fourier 变换得到相应的频谱曲线,将频谱曲线按 1/3 倍频程滤波转化为 1/3 倍频程谱,进而计算出分频振级平均值。通过加速度时程、频谱、1/3 倍频程谱和分频振级的对比分析,结果表明:青岛地铁振动响应明显大于上海地铁,其分频振级已超过我国的环境振动标准,而上海地铁的分频振级基本上与我国的环境振动标准相当。

关键词: 地铁振动; 环境振动污染; 分频振级; 1/3 倍频程谱

中图分类号: TU413

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)02-0468-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.468

Comparative Analysis of Vibration Measurement Between Qingdao Metro Line 3 on Rock Foundation and Shanghai Metro Line 10 on Soft Foundation

GAO Meng^{1,2}, GAO Yunchang^{1,2}, XU Xiao^{1,2}, SHI Chuanzhi^{1,2},
TIAN Shuping^{1,2}, CHEN Qingsheng³

(1. Shandong Key Laboratory of Civil Engineering & Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;

2. Institute of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;

3. Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore 119077, Singapore)

Abstract: The environmental vibration caused by subway running can affect human health if it exceeds a certain value. Evaluating the exact vibrational response caused by the subway is of great

收稿日期:2018-12-12

基金项目:山东省自然科学基金面上项目资助(ZR201702160391);国家自然科学基金资助项目(51808324)

第一作者简介:高 盟(1974-),男,山东临沂人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事地基加固及土动力学等岩土工程领域的教学和科研工作。E-mail:gmxzy@sdust.edu.cn.

importance. Therefore, an imported vibration meter is used to measure the vibration of Qingdao Metro Line 3 and Shanghai Metro Line 10, respectively. By processing the data, the time-history curves of vibration acceleration are obtained, and the Fourier transform also obtains the corresponding spectrum curves. The spectrum curves are then transformed into the frequency range of the one-third octave spectrum. Finally, the average value of frequency vibration levels is worked out. The differences between Qingdao Metro Line 3 and Shanghai Metro Line 3 in terms of vibration acceleration time-history curves, vibration acceleration spectra, one-third octave spectra, and frequency vibration rates are also discussed. The findings show that the Qingdao Metro's vibration response is greater than that of Shanghai Metro; the frequency vibration level of Qingdao Metro has surpassed China's environmental vibration standard, whereas Shanghai Metro's frequency vibration level is equal to environmental vibration standard.

Keywords: metro vibration; environmental vibration pollution; frequency vibration level; one-third octave frequency spectrum

0 引言

当前,城市地铁交通大力建设,如北京、上海、广州、深圳、南京等城市已拥有多条地铁线路并继续规划新线路。截至 2017 年,我国大陆已有地铁运行的城市达 28 个且将有新的城市地铁项目陆续获批。城市地铁交通缓解交通阻塞、改善人们出行条件的同时,地铁运行产生的环境振动问题日趋强烈和频繁^[1],如:北京大兴线穿越青岛嘉园小区,高层有明显震感,严重影响了居民的正常生活;列车经过时可使距离地铁 150 m 的居民楼内家居错位;西安地铁穿越古城墙时导致城墙出现裂缝;深圳地铁经过某电子芯片厂时使生产的电子器件 30% 不合格。

正确评估地铁运行产生的振动响应是地铁环境振动污染防治的前提。目前研究地铁振动响应的方法有解析理论法、数值计算、现场实测等。解析理论方面,如蔡袁强^[2]课题组采用 Helmholtz 和 Fourier 等数学理论,解析研究了列车运行时由于轨道不平顺引起的地基振动及列车运行产生的振动对轮轨动力接触的影响。钱建固等^[3]解析研究了高速移动荷载作用下弹性半空间饱和地基的振动。蔡袁强^[4]课题组利用双重 Fourier 变换及逆变换解析求解了移动点荷载作用下饱和土体全空间中圆形衬砌隧道的三维动力响应^[4]。解析求解往往需要较为严格的基本假定和边界条件,造成计算结果与实际有较大差别。

与解析理论相比,有限元和边界元等数值计算方法具有编程自由的特点,能够尽可能的接近实际。近几年发展了周期性有限元、边界元法和 2.5 维有限元、边界元法。DEGRANDE 等^[5]采用三维周期性有限元-边界元耦合模型研究了深埋于伦敦黏土

中的隧道在试验列车不同速度条件下产生的振动,并分析了轨道-隧道-地基的动力相互作用。刘卫丰和刘维宁等^[6]采用三维周期性有限元-边界元耦合数值模型研究了北京地铁 1 号线的振动响应问题,并分析了减振对策。YANG 等^[7]提出了用 2.5 维有限元法模拟地铁运行引起的地面振动。边学成等^[8]用 2.5 维有限元法及吸收边界条件模拟地铁交通引起的波的传播。ANDERSEN 等^[9]又提出用 2.5 维耦合有限元-边界元模型模拟成层地基中地铁产生的振动。Galvín 等^[10]采用 2.5 维耦合有限元-边界元模型研究了层状半空间中地铁移动荷载引起的轨道及自由场的振动响应。边学成等^[11-12]通过参数化分析了软土地基和分层地基上高速列车轨道刚度、路堤高度、地基土的剪切波速及阻尼系数、列车速度和振动频率等参数对周围环境的振动影响。蔡袁强课题组基于 Biot 饱和多孔介质的波动方程,通过双重 Fourier 变换得频域-波数域内的波动方程,再通过 Fourier 逆变换得到饱和土在列车荷载作用下轨道-地基的动力响应^[13-14]。根据 Biot 饱和多孔介质 U-W 格式动力控制方程,采用 Galerkin 法和 Fourier 变换,推导了饱和土体 2.5 维有限元方程及黏弹性人工边界,分析了移动荷载作用下均质饱和土地基、分层饱和土地基、上覆单相弹性层饱和土地基 3 种饱和土地基模型中空沟的隔振效果。高广运课题组采用薄层法-半解析边界元法和 2.5 维有限单元法,初步分析了饱和地基上(中)列车(地铁)运行引起的地面振动响应,推导了移动荷载作用下横观各向同性饱和地基 2.5 维有限元方程,分析了列车移动荷载引起的横观各向同性饱和地基动力特性^[15-16]。

数值计算虽能尽可能模拟实际工况,但还是受到计算参数取值的影响。现场实测是研究地铁振动响应规律的最直接的方法。高广运等^[17-18]通过对秦-沈铁路列车和上海地铁 1 号线人民广场站区间隧道进行振动测试,研究了地面振动加速度与列车运行速度和列车轴重的关系,分析了不同频率的简谐地铁激励荷载引起的地面振动的衰减规律;夏倩等^[19]通过对北京良乡塔的现场测试与数值模拟,评估了列车振动下良乡塔的振动响应;CHAO ZOU 等^[20]对广州三层地铁车站进行振动实测,通过分析加速度频谱和 1/3 倍频程,提出了地铁车站振动噪声预测模型,可用于新建车站设计和噪音评估。

作者采用意大利振动测试仪 Tromino 分别对青岛岩质地基地铁 3 号线和上海软土地基地铁 10 号线进行了地铁振动测试,通过对振动测试数据进行加速度的时域、频域及 1/3 倍频程分析,以 z 振级作为评价指标,对比分析两种不同地质条件地基上地铁振动特性的差异。

1 现场测试

1.1 测试仪器

现场测试采用意大利进口振动测试仪 Tromino。该仪器是一种用于测试场地为微振动的超轻量化、超紧凑便携性型的仪器。其集三分量采集系统、三分量速度(或加速度)感应系统和数据存储系统于一体,随采随存,可长时间连续不间断采集数据。

1.2 监测方案

振动测试分别在青岛地铁 3 号线五四广场站和上海地铁 10 号线同济大学站进行,测振部位均选在地铁区间隧道出口处,监测点的土层分布如图 1 所示。各土层相应的动力参数(经验值)^[21]见表 1 所列。

1.3 监测数据处理

将测试数据由测振仪的存储设备导入电脑,采用 ORIGIN 画图软件得出的上海同济大学站和青岛五四广场站的 x, y, z 三方向振动加速度时程曲线如图 2、图 3 所示。对测试数据进行 Fourier 变换得到相应的频谱曲线如图 4、图 5 所示。

由图 2、图 3 加速度时程曲线可知,青岛五四广场站 x 向最大加速度为 $3.3 \times 10^{-2} g$,远大于上海同济大学站的 $6.5 \times 10^{-3} g$,青岛五四广场站 y 向最大加速度为 $3.2 \times 10^{-2} g$,远大于上海同济大学站的 $7.5 \times 10^{-3} g$, z 向最大加速度为 $4.0 \times 10^{-2} g$,也大于上海同济大学站的 $2.4 \times 10^{-2} g$ 。原因在于影响地

铁地面振动的主要因素是能量的扩散和地铁周围介质对振动能量的吸收。而在地铁振源能量和测点相同条件下,上海同济大学站和青岛五四广场站振动能量的扩散是相同的。但是振动能量的吸收与周围介质的特性(阻尼)有关,介质阻尼越大,振动传播衰减越快。由表 1 可以看出,上海同济大学站所在的软土层阻尼比远大于青岛五四广场站所在基岩的阻尼比,所以其地铁振动远大于上海地铁的振动。

标准层号	地层名称	柱状剖面图	常见厚度/m	标准层号	地层名称	柱状剖面图	常见厚度/m
①	杂填土		0.5	①	杂填土		3
②	黏性土		2.5	⑪	粉质黏土		2.8
③	淤泥质黏土		9	⑫	含砂性黏土		2.2
④	粉质黏土		23	⑬	强风化性花岗岩		10.4
⑦	细砂		15	⑰	中风化性花岗岩		6.2
⑧	粉砂、黏土互层		10	⑱	微风化性花岗岩		20.3
⑨	细砂夹中、粗砂和细砾		20				

(a) 同济大学站

(b) 五四广场站

图 1 测点工程地质剖面图

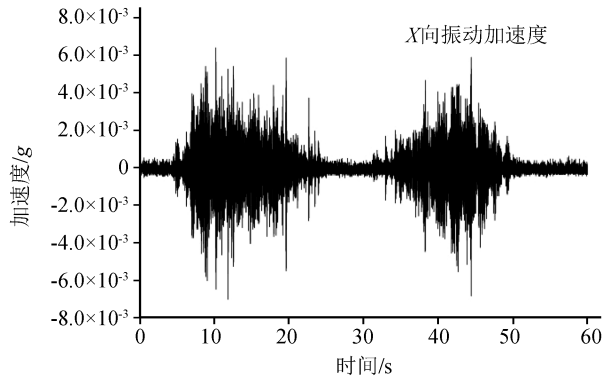
Fig.1 Geologic profile of observation point

表 1 各岩土动力参数经验值

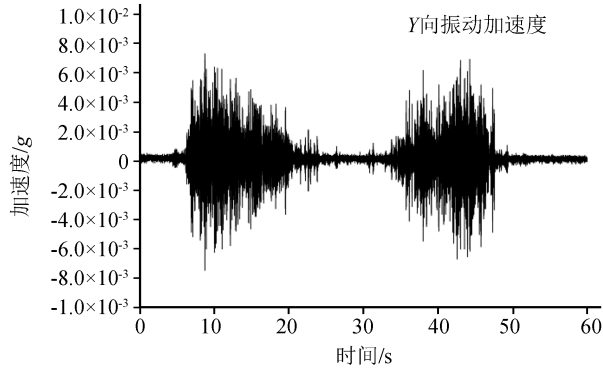
Table 1 Dynamic parameters of various kinds of rock and soil

土类	剪应变 $\gamma = 10^{-5}$	
	动剪切模量比 G/G_{max}	阻尼比 λ
黏土	0.96	0.015
粉质黏土	0.97	0.015
粉土	0.952 5	0.012 5
砂土	0.935	0.01
淤泥质土	0.97	0.035
基岩	1	0.008

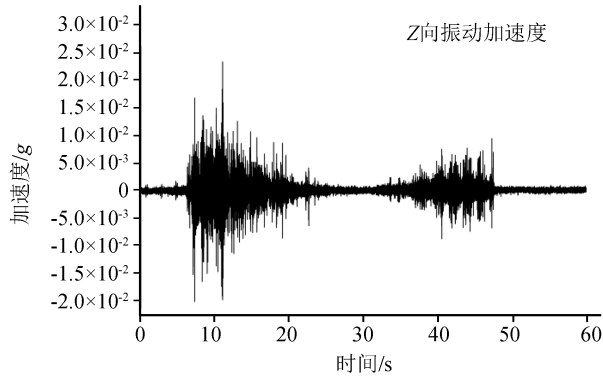
图 4、图 5 分别为上海同济大学站和青岛五四广场站地铁振动频谱曲线。由频谱曲线可以看出,同济大学站 x 向主导频率有两个,分别为 $50 \sim 70$ Hz, $80 \sim 90$ Hz, y 方向的主导频率为 $50 \sim 70$ Hz,而 z 方向的主导频率也有两个,分别为 $50 \sim 80$ Hz, $150 \sim 180$ Hz。青岛五四广场站水平向和竖直向,各种频率均有出现,存在多个主导频率,主导频率总体大于上海同济大学站。导致这一结果的主要原因为振动频率与水平向和竖直向的土层分布及岩土层的动力参数有关。上海软土地区土层呈层状分布,



(a) 同济大学站x方向振动加速度时程曲线



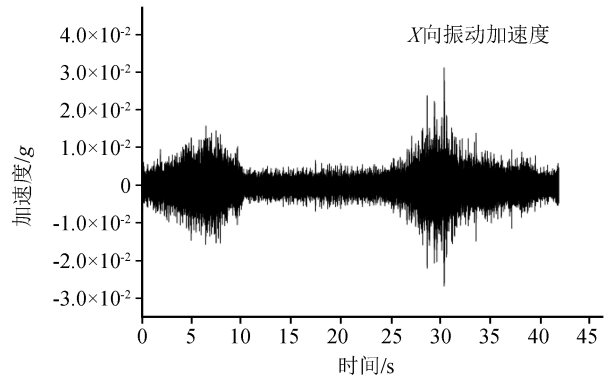
(b) 同济大学站y方向振动加速度时程曲线



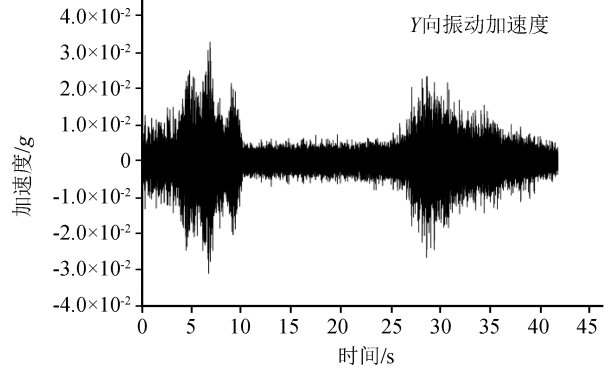
(c) 同济大学站z方向振动加速度时程曲线

图 2 同济大学站振动加速度时程曲线

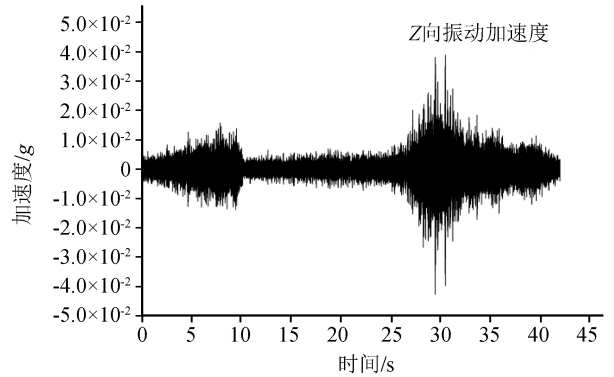
Fig.2 The time history curve of vibration acceleration at Tongji University station



(a) 五四广场站x方向振动加速度时程曲线



(b) 五四广场站y方向振动加速度时程曲线



(c) 五四广场站z方向振动加速度时程曲线

图 3 五四广场站振动加速度时程曲线

Fig.3 The time history curve of vibration acceleration at May Forth Square station

而青岛五四广场站岩土层水平向和竖直向分布远不如上海软土层分布均匀,且岩土层阻尼小、动剪切模量比较大,高频振动能量衰减较小。

通过对比青岛地铁和上海地铁的地基振动可以得出,振动的大小和频率与土层介质有着直接的关系。青岛岩质地基阻尼较小,对振动能量吸收能力较差,所以测得的振动较大。上海软土地基阻尼较大,振动波在高阻尼介质中传播时衰减较快,所以测得的振动较小。总结来说就是:介质阻尼越大,地基振动越小;介质阻尼越小,地基振动越大。

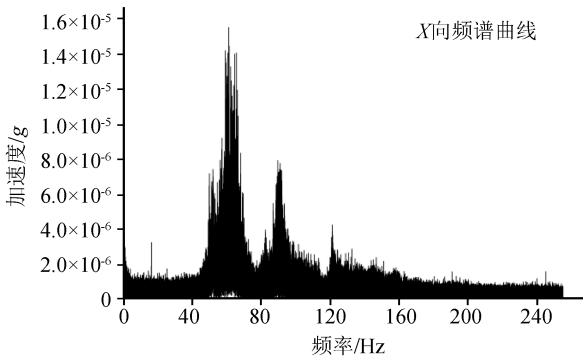
2 振级分析

为评价地铁运行产生的环境振动,将频谱曲线按 1/3 倍频程滤波转化为 1/3 倍频程谱图。然后按 (Esveld^[22] 提出)式(1)计算振级。

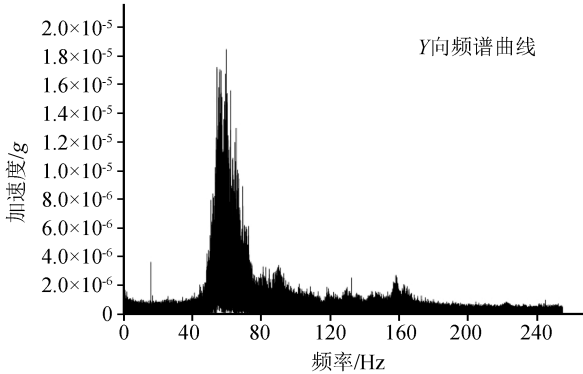
$$L = 20 \lg(p_1/p_2) \quad (1)$$

式中: L 为振级, p_1 为各 1/3 倍频程频段的竖向加速度有效值(m/s^2); p_2 为加速度标准值($10^{-6} m/s^2$)。

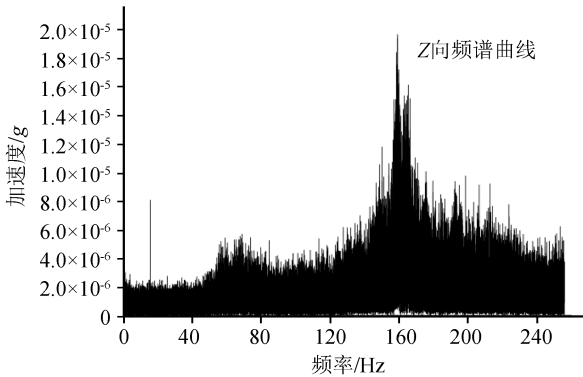
1/3 倍频程谱实际是 1/3 倍频程功率谱,可以通过两种方式实现,一种是在整个频率范围,按照不



(a) 同济大学站x方向振动加速度频谱



(b) 同济大学站y方向振动加速度频谱



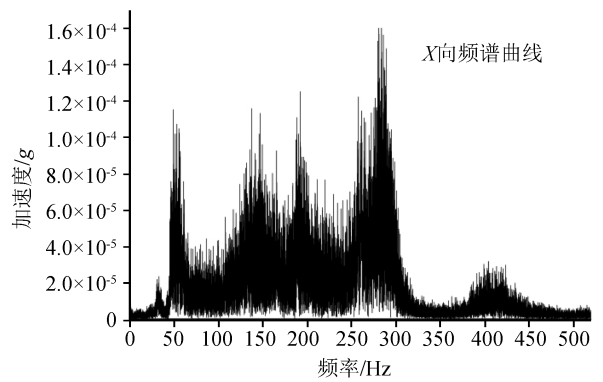
(c) 同济大学站z方向振动加速度频谱

图4 同济大学站振动加速度频谱

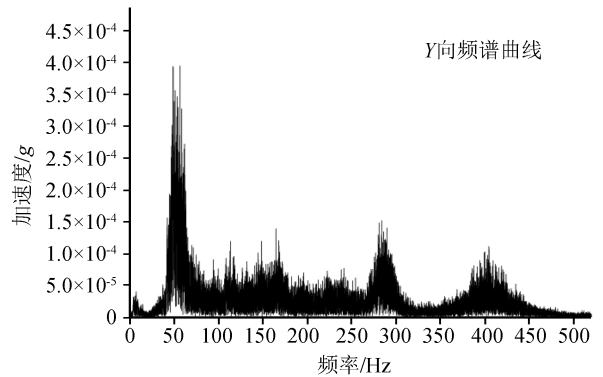
Fig.4 The spectrum curve of vibration acceleration at Tongji University station

同的中心频率定义对采样信号进行带通滤波,然后计算出滤波后数据的均方根值(RMS),这样便得到对应每个中心频率的功率谱值。另一种方法是首先对采样信号进行快速傅里叶变化,计算出功率谱或幅值谱,然后用功率谱或幅值谱的数据,计算每一个中心频率的带宽内的平均值。根据RMS值的定义,并进行离散可得:

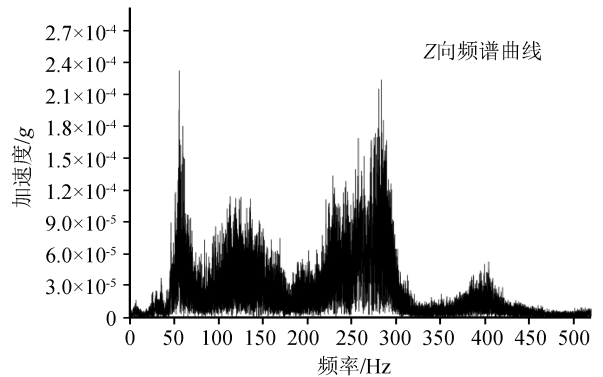
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N\Delta} \sum_{n=0}^{N1} x^2(n\Delta)\Delta} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N1} x^2(n)} \quad (2)$$



(a) 五四广场站x方向振动加速度频谱



(b) 五四广场站y方向振动加速度频谱



(c) 五四广场站z方向振动加速度频谱

图5 五四广场站振动加速度频谱

Fig.5 The spectrum curve of vibration acceleration at May Forth Square station

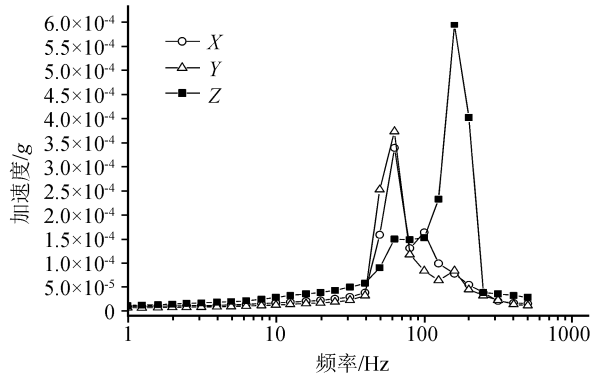
式中: Δ 为采样时间间隔, $x(t)$ 为连续的信号时程, $x(n)$ 为离散的信号时程。

计算得到的1/3倍频程谱如图6所示。

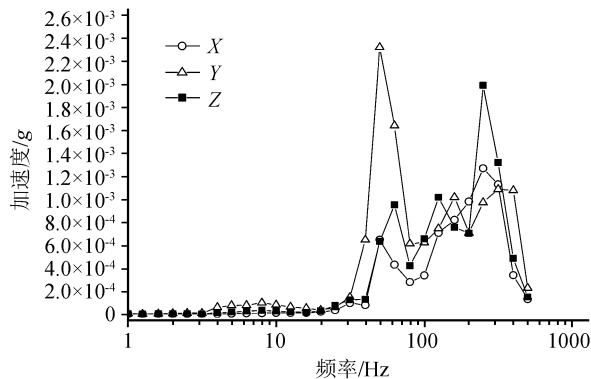
由图6可知,上海地铁的1/3倍频程谱有两个峰值,分别为55 Hz和160 Hz。在55 Hz处,Y方向振动加速度最大,为 $3.7 \times 10^{-4} g$ 。在160 Hz处,Z方向振动加速度最大,为 $6 \times 10^{-4} g$ 。青岛地铁的1/3倍频程谱也有两个峰值,分别为60 Hz和280 Hz。在60 Hz处,Y方向振动加速度最大,为 $2.3 \times 10^{-3} g$ 。在280 Hz处,Z方向振动加速度最大,为

$2 \times 10^{-3} g$ 。青岛地铁振动的主导频率高于上海地铁,且振动加速度也大于上海地铁,这与加速度时程和频谱分析的结果一致。

振动加速度明显大于上海软土地基地的地铁振动,约为上海地铁振动加速度的 1.5~4.0 倍。



(a) 上海同济大学站 1/3 倍频程谱

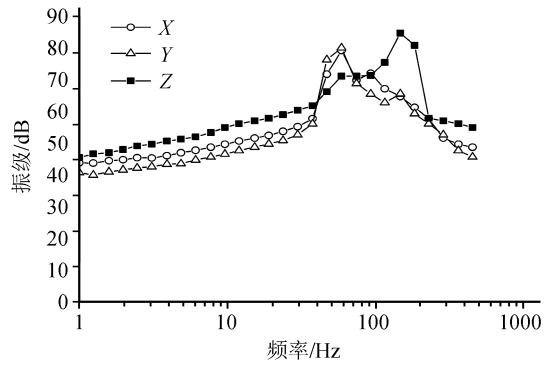


(b) 青岛五四广场站 1/3 倍频程谱

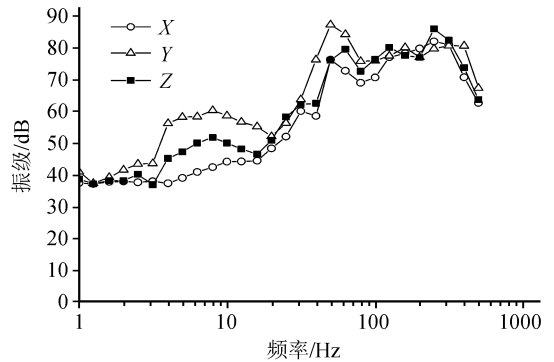
图 6 地铁振动的 1/3 倍频程谱

Fig.6 The one-third octave band of subway vibration

图 7(a)、7(b)分别为上海地铁和青岛地铁分频振级平均值。由图可以看出,在主导频率处振级最大。青岛地铁振动的振级水平明显大于上海地铁的振级,且其主导频率振级水平已超过我国环境振动标准值,而上海地铁的振级水平基本符合我国的环境振动标准值。根据我国《城市区域环境振动标准》,城市中一般商业与居民混合区的竖直方向振级标准限值为昼间为 75 dB,夜间为 72 dB,而青岛地铁五四广场站的最大振级接近 90 dB,会影响乘客的身体健康,因此须对青岛地铁采取隔振减振措施。



(a) 上海同济大学站分频振级平均值



(b) 青岛五四广场站分频振级平均值

图 7 地铁振动的分频振级平均值

Fig.7 Average value of frequency vibration levels of subway vibration

(2) 上海软土地基地铁振动以低频为主,青岛岩质地基地铁振动以高频为主,也有低频成分,其主导频率大于上海地铁的主频。

(3) 青岛岩质地基地铁的振级高于上海软土地基地铁,且其最大振级已超过我国的环境振动标准值,而上海软土地基地铁的最大振级基本和环境振动标准值相当。

3 结 论

采用进口振动测试仪 Tromino 分别对上海地铁 10 号线和青岛地铁 3 号线现场测振,并对测振数据进行加速度时程、频谱及振级分析,结论如下:

(1) 地基的工程地质条件及岩土层分布对地铁振动的影响较大。介质阻尼越大,地基振动越小;介质阻尼越小,地基振动越大。青岛岩质地基地的地铁

参考文献(References)

[1] 李志新,陈金科,宋瑞祥.地铁区间正线下穿轨道交通运营指挥中心环境振动影响及对策[J].建筑结构,2018,48(增刊2):885-889.
LI Zhixin, CHEN Jinke, SONG Ruixiang. Structure Vibration Analysis and Solutions of an Operation Control Center Caused by Metro Main Line Transit[J]. Building Structure, 2018, 48 (Supp2): 885-889.

[2] 蔡袁强,王玉,曹志刚,等.列车运行时由轨道不平顺引起的地基振动研究[J].岩土力学,2012,33(2):327-335.
CAI Yuanqiang, WANG Yu, CAO Zhigang, et al. Study of Ground Vibration from Trains Caused by Track Irregularities [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 327-335.

- [3] 钱建固,周仁义,黄茂松.高速移动荷载下弹性半空间饱和地基动应力响应[J].工程力学,2016,33(3):39-46.
QIAN Jiangu, ZHOU Renyi, HUANG Maosong. Dynamic-Stress Responses to High-speed Moving Load on Elastic Saturated Semi-space Ground[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(3):39-46.
- [4] 袁宗浩,蔡袁强,曾晨.地铁列车荷载作用下轨道系统及饱和土体动力响应分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(7):1470-1479.
YUAN Zonghao, CAI Yuanqiang, ZENG Chen. Dynamic Response of Track System and Underground Railway Tunnel in Saturated Soil Subjected to Moving Train Loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7):1470-1479.
- [5] DEGRANDE G, SCHEVENELS M, CHATTERJEE P, et al. Vibrations Due to a Test Train at Variable Speeds in a Deep Bored Tunnel Embedded in London Clay[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3-5):626-644.
- [6] 刘卫丰,刘维宁,Gupta S,等.地下列车移动荷载作用下隧道及自由场的动力响应解[J].振动与冲击,2008,27(5):81-84.
LIU Weifeng, LIU Weining, GUPTA S, et al. Dynamic Response in Tunnel and Free Field Due to Moving Underground Trains[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(5):81-84.
- [7] YANG Y B, HUNG H H. A 2.5D Finite/infinite Element Approach for Modelling Visco-elastic Bodies Subjected to Moving Loads[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001, 51(11):1317-1336.
- [8] 边学成,陈云敏,胡婷.基于2.5维有限元方法模拟高速列车产生的地基振动[J].中国科学(G辑),2008,38(5):600-617.
BIAN Xuecheng, CHEN Yunmin, HU Ting. Numerical Simulation of High-Speed Train Induced Ground Vibrations Using 2.5D Finite Element Approach[J]. Science in China Series G: Physics Mechanics and Astronomy, 2008, 38(5):600-617.
- [9] ANDERSEN L, JONES C J C. Coupled Boundary and Finite Element Analysis of Vibration from Railway Tunnels: a Comparison of Two- And Three-dimensional Models[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3-5):611-625.
- [10] GALVÍN P, FRANÇOIS S, SCHEVENELS M, et al. A 2.5D Coupled FE-BE Model for the Prediction of Railway Induced Vibrations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(12):1500-1512.
- [11] 边学成,胡婷.参数化分析列车运行产生的路堤地基振动[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊2):4353-4361.
BIAN Xuecheng, HU Ting. Parametric Study on Embankment-ground Vibrations Generated by Train Moving Loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp2):4353-4361.
- [12] 边学成,陈云敏.列车移动荷载作用下分层地基响应特性[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):182-189.
BIAN Xuecheng, CHEN Yunmin. Characteristics of Layered Ground Responses under Train Moving Loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1):182-189.
- [13] CAI Y Q, SUN H L, XU C J. Three-dimensional Analyses of Dynamic Responses of Track-ground System Subjected to a Moving Train Load[J]. Computers & Structures, 2008, 86(7-8):816-824.
- [14] 袁万,蔡袁强,史吏,等.基于2.5维有限元饱和土地基中空沟隔振性能研究[J].岩土力学,2013,34(7):2111-2118.
YUAN Wan, CAI Yuanqiang, SHI Li, et al. Study of Vibration-isolation Efficiency of Open Trench in Saturated Ground by 2.5D Finite Element Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7):2111-2118.
- [15] 高广运,何俊锋,杨成斌,等.2.5维有限元分析饱和地基列车运行引起的地面振动[J].岩土工程学报,2011,33(2):234-241.
GAO Guangyun, HE Junfeng, YANG Chengbin, et al. Ground Vibration Induced by Trains Moving on Saturated Ground Using 2.5D FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2):234-241.
- [16] 高广运,陈功奇,李佳.高速列车荷载作用下横观各向同性饱和地基动力特性的数值分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):189-198.
GAO Guangyun, CHEN Gongqi, LI Jia. Numerical Analysis of Dynamic Characteristic of Transversely Isotropic Saturated Soil Foundation Subjected to High-speed Train Load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1):189-198.
- [17] 高广运,李志毅,冯世进,等.秦-沈铁路列车运行引起的地面振动实测与分析[J].岩土力学,2007,28(9):1817-1822,1827.
GAO Guangyun, LI Zhiyi, FENG Shijin, et al. Experimental Results and Numerical Predictions of Ground Vibration Induced by High-speed Train Running on Qin-Shen Railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9):1817-1822,1827.
- [18] 高广运,朱林圆,李卫华,等.上海地铁一号线人民广场振动测试与分析[J].地震工程学报,2014,36(3):429-433.
GAO Guangyun, ZHU Linyuan, LI Weihua, et al. Vibration Test and Analysis at the People's Square of Shanghai, Metro Line 1[J]. Northwestern Seismological Journal, 2014, 36(3):429-433.
- [19] 夏倩,赵瑾,王德法,等.列车激励下基于动力特性分析的辽代古塔振动规律研究[J].建筑结构,2019,49(14):89-95.
XIA Qian, ZHAO Jin, WANG Defa, et al. Research on Vibration Law of Ancient Pagoda in Liao Dynasty Based on Dynamic Characteristic Analysis under Train Excitation[J]. Building Structure, 2019, 49(14):89-95.
- [20] ZOU C, WANG Y M, WANG P, et al. Measurement of Ground and nearby Building Vibration and Noise Induced by Trains in a Metro Depot[J]. Science of the Total Environment, 2015, 536:761-773.
- [21] 王志佳.土及岩石动力学参数的统计与分析[D].成都:西南交通大学,2012.
WANG Zhijia. The Statistical and Analysis of Dynamic Parameters of Soils and Rocks[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [22] ESVELD C. Modern railway track[M]. Zaltbommel, Netherlands: MRT-Productions, 1989.