

地铁运行时轨道-隧道-地层振动实测与分析^{*}

黄 强^{1,2}, 姚湘静³, 黄宏伟^{1,2}, 葛世平³

(1. 同济大学地下建筑与工程系 上海, 200092)(2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室 上海, 200092)
(3. 上海申通地铁集团有限公司地铁维护保障中心 上海, 201102)

摘要 以上海地铁 9 号线某曲线段隧道为背景, 通过在隧道内部、周围土层和地表布置加速度传感器, 对地铁运行引起的轨道-隧道-地层整个空间内的振动进行了现场测试。通过统计各测点的加速度平均峰值、加速度振级以及振动主频, 分析了地铁振动在整个空间内的传播规律。实测结果表明: 隧道内部及近处地层以垂向振动为主, 但曲线段的地表水平振动可大于竖向振动; 地铁振动从钢轨传至隧道壁时会有大幅衰减, 从隧道壁传递到地表正上方时, 振级反而有所增大; 地铁振动在传播过程中振动主频范围也在不断减少。整体振动测试有助于全面认识地铁振动传播规律, 对地铁线路设计、轨道结构减振具有较好的指导意义。

关键词 列车振动; 加速度; 加速度振级; 振动主频; 现场振动测试

中图分类号 TH3

引 言

近年来, 我国城市轨道交通建设快速发展, 运营里程持续增加。与此同时, 地铁运行引起的环境振动问题引起了人们的日益关注, 并成为国内外研究的热点。地铁线路常穿过城市中心, 两侧高楼林立, 地下管线繁多, 列车运行引起的振动直接影响着建筑物安全、精密仪器的正常使用和居民的日常生活^[1]。另外, 地铁振动还可能通过影响周围的软弱地层, 威胁到地铁列车的运行安全^[2]。

现场实测可以真实了解场地的振动规律, 并为理论分析和数值模拟提供验证依据, 在实际中常被采用。例如, 栗润德等^[3]研究了地铁引起的地面振动及其对精密仪器的影响, 其研究结果表明地面振动存在一个“等振频率”, 大于“等振频率”的范围, 地面振动主要受距离的影响。闫维明等^[4]对北京地铁 1 号线地表振动进行了测试, 提出了地面振级的经验预测公式, 发现距离隧道一定处地表存在振动放大区。楼梦麟等^[2]对上海地铁运行引起的地面振动进行了实测, 认为地铁运行引起的地面振动频率主要集中在 40~90 Hz, 其中 60~80 Hz 高频成分对应的振级最大, 同时也发现地表振动在衰减过程中存在回升区。王田友^[5]对上海地铁 1 号线实测后认

为地铁引起地面振动频率在 20~80 Hz, 加速度振级高频部分衰减明显大于低频部分, 地铁所致隧道正上方振级在 70~75 dB。袁扬等^[6]对小半径曲线段地铁线路的地面振动进行了测试, 结果表明, 在曲线段距离隧道 50m 内, 水平振动是竖向振动强度的 2~5 倍, 水平加速度频率的主要成分在 30~120 Hz。此外, 文献[7-8]对地表列车运行周围临近建筑物的影响进行了实测, 认为列车引起的振动频率在 30~120 Hz, 车速对地面振动有影响, 地面振动随着离振源距离增加呈波动衰减。刘鹏辉等^[9]对不同轨道结构下地铁隧道振动进行了测试, 发现地铁振动源频谱呈宽频带特性, 钢轨的加速度频谱以 630~1 000 Hz 为主。

可以看出, 现场实测作为一种了解地铁环境振动的重要手段被广泛采用。尽管目前对地铁列车引起的环境振动有诸多的现场测试, 但这些测试都只在地表或是隧道内部进行, 鲜有对隧道周围地层也进行实测, 因而无法有效把握列车振动全过程的传播规律。基于此, 笔者以上海饱和软土地铁隧道为例, 对地铁列车运行引起的轨道-隧道-地层-地表振动全过程进行现场测试, 分析地铁振动在不同监测对象中的振动特征, 特别是在周围饱和软黏土中的传播规律, 可为理论分析和数值计算提供参照。

^{*} 国家自然科学基金重点资助项目(51538009)
收稿日期: 2017-03-28; 修回日期: 2017-06-15

1 现场实测简介

1.1 测点布置

为测试地铁运行引起的隧道结构及周围软黏土的振动响应,现以上海地铁 9 号线三期醉白池站-松江南站区间隧道为背景,在隧道内部及周围土层中布置加速度传感器,测点都位于同一个横断面内,水平距离为 0~30 m。测试区段地铁线路位于一缓和曲线上(相邻圆曲线半径 $R=450$ m),场地开阔,远离市中心,周围有民宅、企事业单位,建筑物主要为砖混结构。距离测试地点 30 多米,基本可忽略建筑物对现场振动测试的影响,现场平面图如图 1 所示。

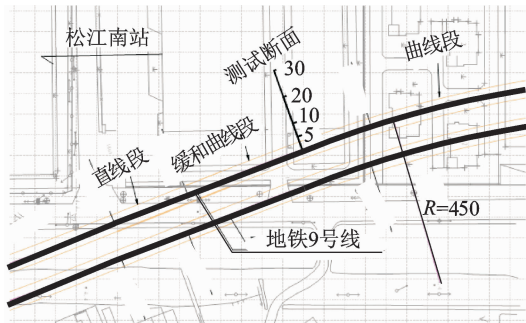


图 1 测试场地线路平面图(单位:m)

Fig. 1 Plan of the measured metro line (unit: m)

现场测试对象为轨道结构(钢轨和道床)、隧道壁、周围土层和地表。隧道内和周围地层加速度计测点布置如图 2 和图 3 所示。隧道内部布置 5 个加速度计,分别位于钢轨腰部、钢轨底上部、钢轨底部、道床及隧道壁,采样频率为 5 kHz。周围土层中共布置 26 个测点,分别距隧道中心 0, 4, 6, 9, 3, 12, 4, 15, 5 m, 竖向平行排列布置,加速度计的采样频率为 2 000 Hz。地表布置 5 个加速度计,分别距隧道中心线 0, 5, 10, 20, 30 m, 加速度计的采样频率为 300 Hz。隧道周围土层从上至下依次为:①1 杂填土;②1 粉质黏土;③1 淤泥质粉质黏土;④1 淤泥质黏土;⑤1 黏土;⑤2 砂质粉土;⑦2 粉细砂。

加速度计的测试方向定义如下:隧道纵向为 X 向;隧道横断面水平向为 Y 向;竖直方向为 Z 向。隧道内钢轨底部测点测试方向为 Z 向,钢轨腰部为 Y 向,隧道壁和道床为 Z 和 Y 两个方向,土层中测点则为 Z, Y, X 三个方向。

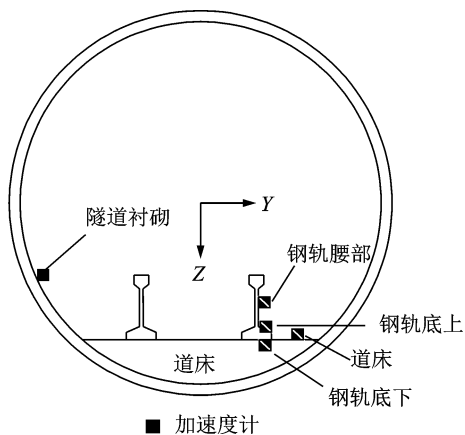


图 2 隧道内部测点布置

Fig. 2 Measurement points inside the tunnel

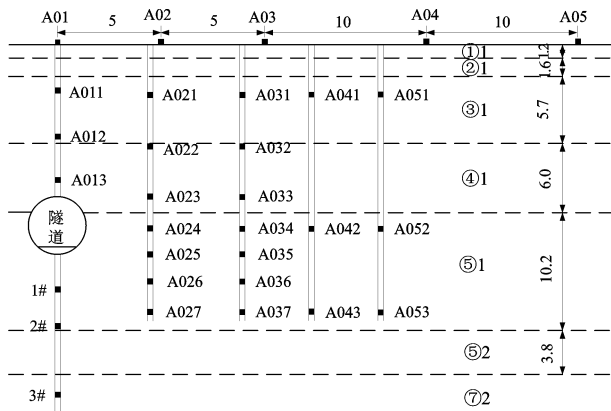


图 3 土层内及地表加速度计布置图(单位:m)

Fig. 3 Arrangement of accelerometers in the soil layers and on the ground surface (unit: m)

1.2 地铁振动评价标准

由于地铁振动的频率范围较宽,不能只考虑加速度峰值,应对其整个时程进行评价。根据《城市区域环境振动标准》(GB10071-88)^[10],采用振动加速度振级评价地铁列车运行引起的振动,加速度振级的计算公式如下

$$I = 20 \log \frac{a_r}{a_{ref}} \quad (1)$$

其中: a_r 为不同频率下计权修正后得到加速度有效值,计算公式如下

$$a_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 10^{\frac{C_i}{10}}} \quad (2)$$

其中: a_i 为第 i 个中心频率下的加速度有效值; C_i 为第 i 个中心频率对应的计权修正值,当不需考虑计权修正时, C_i 为零; a_{ref} 为基准加速度, 10^{-6} m/s^2 。

上述振动加速度有效值即为加速度均方根值,按下式计算

$$a_i = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^T a^2 dt \right)} \quad (3)$$

其中: T 为时长; a 为任一时刻的加速度。

对于离散的加速度时程数据,则用频域幅值谱各离散频率的加速度有效值计算,即采用第*i*个中心频率所在频带内*m*个离散点的加速度值求得

$$a_i = \sqrt{\frac{1}{m} (a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_m^2)} \quad (4)$$

2 振动实测结果

测试段地铁列车为6节编组,A型车,每节车长22.8 m,时速约50~60 km/h,列车驶过测点时间约8~10 s。地铁采用UIC60钢轨,“科隆蛋”减振扣件,现浇整体式道床。每个测点采集21组振动加速度数据,通过统计21组加速度数据的峰值及其振级,最后得到每个测点的加速度平均峰值和振级,同时,对加速度时程数据进行频谱分析。

2.1 钢轨-隧道振动规律

在本研究中, Z 向、 Y 向、 X 向加速度分别表示为 a_x 、 a_y 和 a_z ;对应的振级分别为 I_z 、 I_y 和 I_x 。

钢轨、道床、隧道壁 Z 向和 Y 向的加速度平均峰值与振级如表1所示。钢轨、道床和隧道壁的振级属于工程振动,不需要考虑人体的感受,这里不对其振级计权考虑。从加速度统计结果看,钢轨的振动以 Z 向为主,但由于测试段位于曲线段, Y 向振动也较明显。钢轨振动传至道床时加速度振幅急剧减少, Z 向加速度从112.54 m/s²降至0.184 m/s²,两者相差几个数量级。由于道床和隧道连接为整体,故振动由道床传至隧道壁时,振动强度只有轻微的降低, Z 向加速度由0.18 m/s²降至0.11 m/s²。同时, Y 向加速度由0.20 m/s²变为0.105 m/s²,两者相差不大。与加速度峰值变化规律类似,由钢轨传至道床时加速度振级也会急剧减少, Z 振级由140.42 dB降至89.21 dB, Y 振级由135.06 dB降至88.26 dB,下降幅度分别高达37%和35%。从道床传至隧道壁时,加速度振级只有轻微减少。选择其中有代表性加速度实测数据,钢轨、道床、隧道壁的 Z 向加速度时程如图4所示。

表1 隧道内部测点加速度平均峰值及振级

Tab. 1 Average acceleration peak and acceleration level of measurement points in the tunnel

| 测点 | $a_z/(m \cdot s^{-2})$ | I_z/dB | $a_y/(m \cdot s^{-1})$ | I_y/dB |
|-----|------------------------|----------|------------------------|----------|
| 钢轨上 | 139.340 | 141.63 | | |
| 钢轨下 | 112.540 | 140.42 | | |
| 道床 | 0.184 | 89.21 | 0.200 | 88.260 |
| 隧道壁 | 0.110 | 84.21 | 0.105 | 83.600 |
| 钢轨腰 | | | 103.070 | 135.060 |

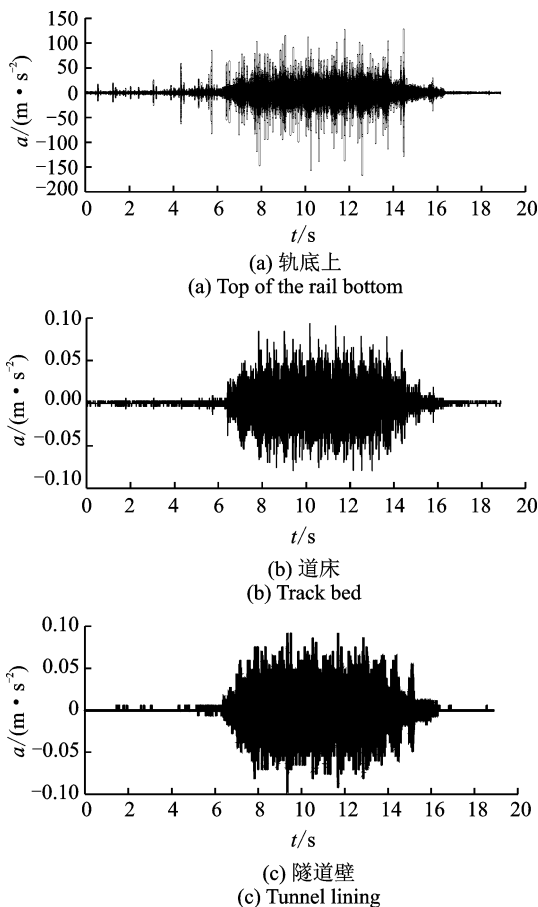


图4 隧道内部测点 Z 向加速度时程

Fig. 4 Time history of vertical acceleration of measurement points in the tunnel

2.2 隧道周围地层振动规律

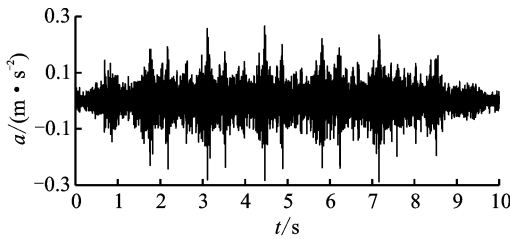
由于周围土层内部测点较多,这里只给出隧道正下方1#测点及隧道一侧A024测点的结果,测点加速度平均峰值及振级如表2所示。可以看出,在隧道正下方,土层的振动以 Z 向为主, X 向与 Y 向振动加速度则较接近。在隧道侧向近处,如A024侧点,土体仍以 Z 向振动为主,但 Y 向加速度明显增大,表明 Y 向振动在隧道侧面较为明显,这可能和线路为曲线段有关。需要提到的是,在隧道正下方, Z 向加速度理应随着深度增加而减少,但表2中2#测点垂向加速度小于3#测点,这可能是2#测

点位于不同土层交界面上,测试误差导致。对比隧道近处土层和隧道壁的加速度值,发现土层中 Z 向加速度振幅值有所增加。给出隧道下方测点的 Z 向加速度时程曲线,如图 5 所示。

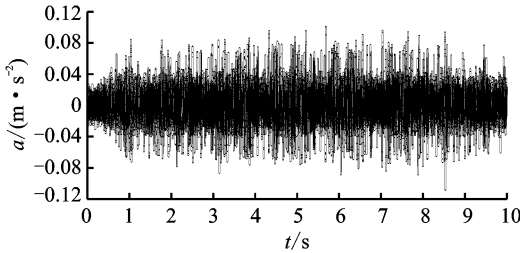
表 2 土层测点加速度平均峰值和振级

Tab. 2 Average acceleration peak and acceleration level of measurement points in the soil layers

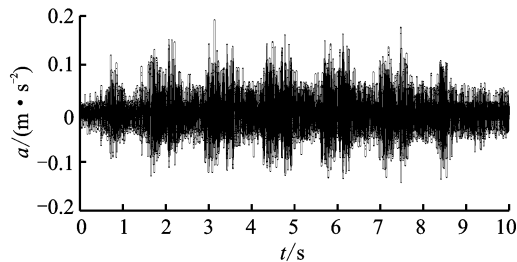
| 测点 | 加速度/(m·s ⁻²) | | | 振级/dB | | |
|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | a _z | a _y | a _x | I _z | I _y | I _x |
| 1# | 0.287 | 0.072 | 0.079 | 95.3 | 83.8 | 85.4 |
| 2# | 0.135 | 0.097 | 0.092 | 91.4 | 87.2 | 88.8 |
| 3# | 0.167 | 0.071 | 0.073 | 92.2 | 84.6 | 85.2 |
| A024 | 0.296 | 0.186 | 0.035 | 95.5 | 92.8 | 79.8 |



(a) 1#测点
(a) Measurement point 1#



(b) 2#测点
(b) Measurement point 2#



(c) 3#测点
(c) Measurement point 3#

图 5 隧道正下方测点 Z 向加速度时程

Fig. 5 Time history of vertical acceleration of measurement points below the tunnel invert

根据隧道周围土层中 26 个测点的加速度平均峰值及加权加速度振级(土体振动属于环境,采用加权),绘制出隧道周围土层 Z 向加速度和加速度振级等值线图,如图 6、图 7 所示。土层的加速度呈弧形辐射状向外衰减,隧道周围 30 m 范围内的 Z 向加速度幅值为 0.002~0.300 m/s²。Z 向加速度最

大值在隧道正下方,加速度振幅基本随着离隧道距离增加而衰减,局部有放大效应。在离隧道 15 m 范围,Z 向振级在 68~96 dB,距离隧道 30 m 时,Z 向振级可降至 58 dB。

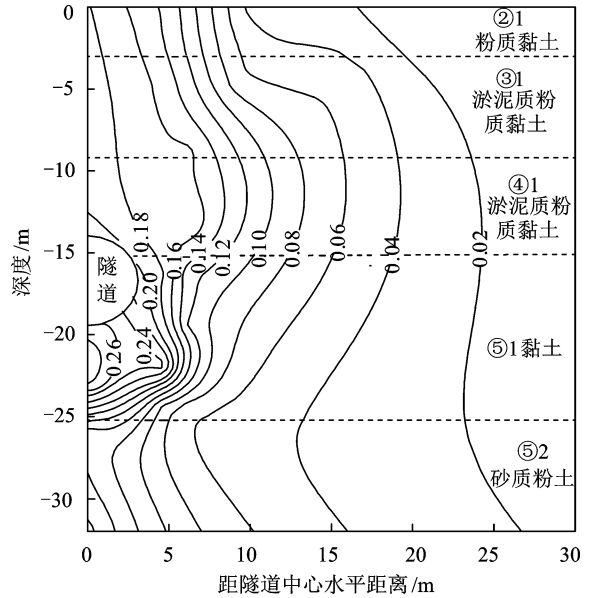


图 6 周围地层 Z 向加速度等值线

Fig. 6 Contour of vertical acceleration in the soil layers

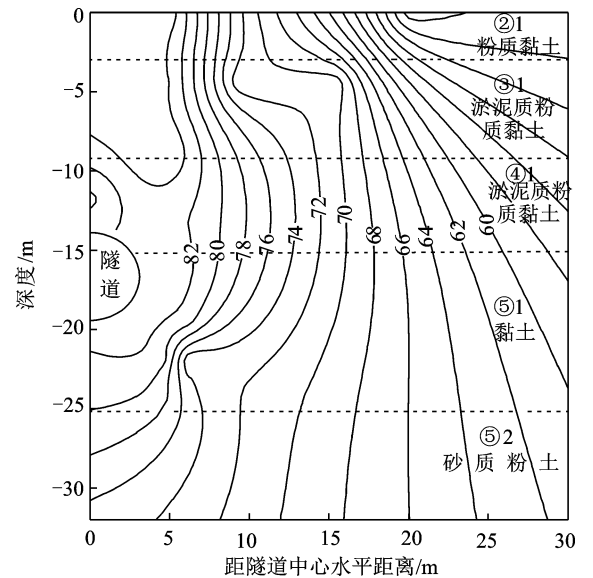


图 7 周围地层 Z 向加速度振级等值线

Fig. 7 Contour of vertical acceleration level in the soil layers

2.3 地表振动规律

地表横向布置 5 个测点,得到地表测点的加速度平均峰值和振级如表 3 所示。从实测的地表加速度看,地表 Y 向加速度幅值大于 Z 向,比值可达 2~3 倍,与文献[6]中曲线段振动测试结果一致,表明

曲线段会使得地表水平振动明显大于垂向振动。可见,对于曲线段,只用竖向振级来评价环境振动是不够的。随着测点远离隧道水平距离增加,Z向和Y向的加速度峰值快速衰减。对比地表的加速度振级,随着水平距离的增加,振级呈下降的趋势,但30 m处振级比20 m处的稍大,表明在20~30 m地表会有一个加速度放大区,振级在20~30 m先增加再衰减,这种现象在一些振动监测现场中也发现过^[2,4,6-8]。地表振动中的局部放大现象与波传播过程中振动叠加效应有关,导致在远离隧道中心方向上地表振动响应并非单调衰减,而是以波浪形衰减。这种衰减规律与隧道埋深、振动荷载频率、体波波速与瑞利波速不同等因素都有关。另外,可以发现,隧道正上方地表测点Z,Y振级分别为93.4和97.6 dB,大于隧道壁的84.2和83.6 dB,可见,地层振动传至地表时加速度振级还会有增大的现象。

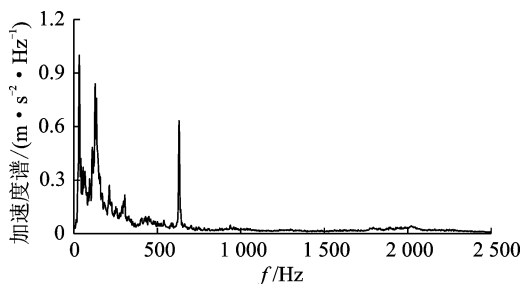
表3 地表测点加速度平均峰值及振级

Tab. 3 Average acceleration peak and acceleration level of measurement points on the ground surface

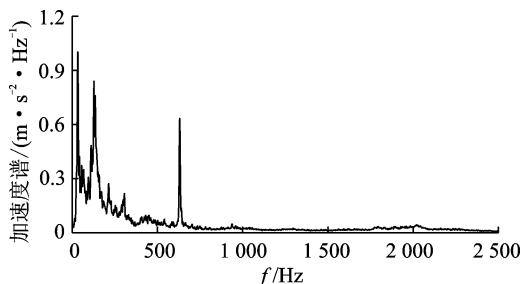
| 测点 | $a_z/(m \cdot s^{-2})$ | $a_y/(m \cdot s^{-2})$ | I_z/dB | I_y/dB |
|-----|------------------------|------------------------|----------|----------|
| A01 | 0.182 | 0.259 | 93.36 | 97.62 |
| A02 | 0.133 | 0.134 | 92.30 | 91.43 |
| A03 | 0.034 | 0.069 | 79.79 | 85.08 |
| A04 | 0.002 | 0.007 | 55.80 | 63.67 |
| A05 | 0.003 | 0.009 | 57.05 | 66.95 |

3 地铁全过程振动中的频率特征

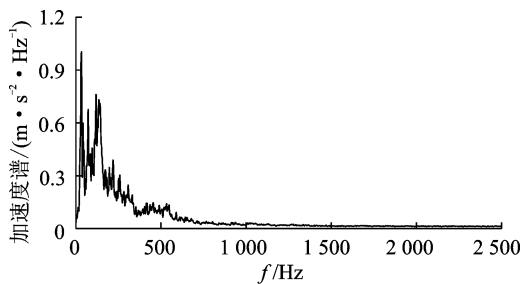
对不同测点加速度时程曲线进行频谱分析,得到地铁振动传播过程中的振动频率特征,以Z向为例,频谱曲线如图8所示。可以看到,列车振动从钢轨、道床、隧道壁传至到周围土层时,振动频率高频成分不断衰减,到 $y=15.5$ m处(测点A052),Z向振动主频已降至30 Hz左右。同样,Y方向频谱曲线也有类似规律。综合而言,钢轨振动主频在50~350 Hz,1 000~1 400 Hz,以高频振动为主;道床和隧道壁主频在30~500 Hz,为中频振动;周围土层主频在20~200 Hz。振动传播中高频成分衰减快于低频成分,在土层中仍进一步衰减,到距离隧道15.5 m的A052处,中心频率降至31.5 Hz附近,当传至地表时,振动主频会降至20~80 Hz。



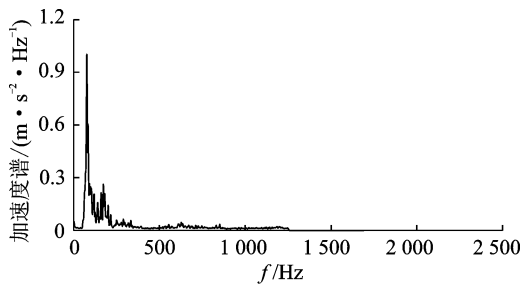
(a) 轨底上
(a) Top of rail bottom



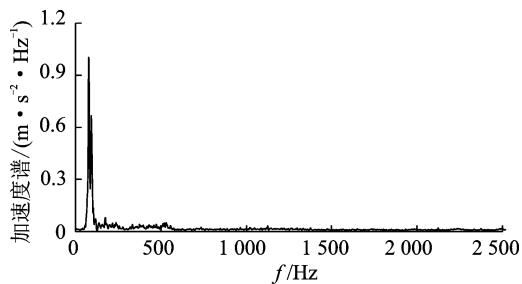
(b) 道床
(b) Track bed



(c) 隧道壁
(c) Tunnel lining



(d) A024测点
(d) Measurement point A024



(e) A052测点
(e) Measurement point A052

图8 Z向加速度频谱曲线

Fig. 8 Frequency spectrum of vertical acceleration

4 结 论

1) 钢轨加速度以垂向振动为主,曲线段水平向振动也较为明显。振动经扣件传至道床时会极大地衰减,加速度振级下降高达 37%。振动从道床传递至隧道壁时振动强度只有轻微下降,差别不大,此时隧道结构的 Z 向和 Y 向加速度也差别不大。

2) 隧道近处周围土层仍以 Z 向振动为主,特别是隧道下方区域,Z 向振动较 X,Y 向要大得多;隧道侧向和顶部,随着离隧道距离增加,Z 向振动减弱,隧道侧向水平向振动表现更为明显。振动加速度以弧形辐射状向外衰减,隧道的正下方和正上方区域是振动比较剧烈部位。

3) 地层振动传至地表过程中,地表的振级有所增大,可能与地表边界面的反射有关。本研究中地表 Y 向振级大于 Z 向,这与测试段为曲线段有关,在离隧道中心约 20~30 m 范围内存在加速度放大区。

4) 钢轨的振动频率较宽,以中高频为主,主频在 50~1 400 Hz;道床和隧道壁的振动主频为 30~500 Hz,周围地层中振动主频进一步衰减,主频在 20~200 Hz,传至地表时衰减至 20~80 Hz。

参 考 文 献

- [1] 陈国兴,苏小梅,陈斌. 地铁列车运行引起的环境振动评价[J]. 防灾减灾工程学报,2008,28(1):70-74.
Chen Guoxing, Su Xiaomei, Chen Bin. Evaluation of ambient vibration induced by passing trains in subway tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(1): 70-74. (in Chinese)
- [2] 楼梦麟,贾旭鹏,俞洁勤. 地铁运行引起的地面振动实测及传播规律分析[J]. 防灾减灾工程学报,2009,29(3):282-288.
Lou Menglin, Jia Xupeng, Yu Jieqin. Field measurement and analysis of ground vibration induced by subway trains[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(3): 282-288. (in Chinese)
- [3] 栗润德,张鸿儒,刘维宁. 地铁引起的地表振动及其对精密仪器的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(1):206-214.
Li Ruide, Zhang Hongru, Liu Weining. Metro-induced ground vibrations and the impact on precision instrument[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 206-214. (in Chinese)

- [4] 闫维明,聂晗,任珉,等. 地铁交通引起的环境振动的实测分析[J]. 地震工程与工程振动,2006,26(4):187-191.
Yan Weiming, Nie Han, Ren Min, et al. In-situ experiment and analysis of environmental vibration induced by urban subway transit[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(4): 187-191. (in Chinese)
- [5] 王田友. 地铁运行所致环境振动与建筑物隔振方法研究[D]. 上海:同济大学,2008.
- [6] 袁扬,刘维宁,刘卫丰. 基于现场测试的曲线段地铁地面振动传播规律分析[J]. 中国铁道科学,2012,33(4):133-138.
Yuan Yang, Liu Weining, Liu Weifeng. Propagation law of ground vibration in the curve section of metro based on in-situ measurement [J]. China Railway Science, 2012, 33(4): 133-138. (in Chinese)
- [7] 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 Jianguo, Xia He, Chen Shuli, et al. Investigation of running-train-induced ground vibrations near railway[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 98-103. (in Chinese)
- [8] Xia He, Chen Jianguo, Wei Pengbo, et al. Experimental of investigation of railway train-induced vibrations of surrounding ground and a nearby multi-story building[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 8(1): 137-148.
- [9] 刘鹏辉,杨宜谦,尹京. 地铁隧道内不同轨道结构振动测试与分析[J]. 振动与冲击,2014,33(2):31-36.
Liu Penghui, Yang Yiqian, Yin Jing. Test and analysis on vibration of different track structures in tunnel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2): 31-36. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国行业标准编写组. GB10070-88 城市区域环境振动标准[S]. 北京:中国标准出版社,1989.



第一作者简介:黄强,男,1987年9月生,博士生。主要研究方向为软土层地铁运行引起的环境振动与长期沉降。曾发表《饱和软土二维-三维列车振动响应对比分析》(《西南交通大学学报》2017年第52卷第6期)等论文。
E-mail: qiaghuang1987@163.com

