

# 盾构施工过程诱发振动振源特性

郭飞<sup>1</sup>, 黄俊<sup>2</sup>, 苏艺<sup>3</sup>, 边金<sup>1</sup>, 许淇<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中建三局人防与地下空间设计院, 武汉 430071;  
3. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京 100037)

**摘要:** 以北京地铁某线区间盾构隧道为背景, 结合现场调查和初步实测, 识别出盾构施工诱发振动的主要振源为刀盘与地层相互作用、渣土/管片运输车辆、盾构内部设备引起的振动。通过现场实测与数值模拟分别对振源的特性展开研究, 结果表明: 刀盘掘进诱发振动频带较宽, 主频主要集中于 20 ~ 90 Hz; 后配套车信号振动幅值较小, 幅值较大的频带带宽为 0 ~ 20 Hz; 运输车由于临时轨道均直接与隧道结构接触并相互作用, 使得中高频未得到衰减, 幅值较大频率主要集中于 70 ~ 90 Hz, 振动传至地表后主频衰减至 20 Hz 以下, 振动影响范围主要为隧道中线 15 m 范围内。研究结果对北京、成都、沈阳等砂卵石地层盾构施工所诱发振动具有借鉴作用。

**关键词:** 砂卵石地层; 盾构施工; 振动识别; 频谱特性

中图分类号: U 455. 43

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2014)12 - 1820 - 08

## Shield Construction Process Induced Vibration Source Characteristics

GUO Fei<sup>1</sup>, HUANG Jun<sup>2</sup>, SU Yi<sup>3</sup>, BIAN Jin<sup>1</sup>, XU Qi<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
2. CCTEB Civil Defense and Underground Space Institute, Wuhan 430071, China;  
3. Beijing Railway Construction and Management Co., Ltd., Beijing 100037, China)

**Abstract:** Cutter and soil structure interaction, muck and segment transport vehicle, shield equipment were the primary cause of shield construction vibration based on field investigation and preliminary test in Beijing metro line shield tunnels. According to the researches of field investigation and numerical simulation, the following conclusions could be drawn: 1) vibration frequency band caused by cutter is wide, and dominant frequency is concentrated in the range of 20 ~ 90 Hz; 2) vibration amplitude value caused by supporting vehicles is smaller than other factors, and frequency band of vibration amplitude is concentrated in the range of 0 ~ 20 Hz; 3) there is no attenuation in medium high frequency result from the interaction between track and structure. The frequency correspond to vibration amplitude is concentrated in 70 ~ 90 Hz. The frequency will drop below 20 Hz when vibration propagates to the earth surface. Vibration incidence is concentrated in the scope of 15 m from tunnel center line. The researches have reference for the vibration induced by shield construction in sand and gravel stratum in Beijing, Chengdu, Shenyang and so on.

**Key words:** sand gravel layer; shield construction; vibration recognition; spectral features

目前我国正处于城市轨道交通建设的大发展时期, 在轨道交通选线过程中, 线路不可避免临近或穿越重要建筑, 如科研院校、医院、微电子工业

区等, 轨道交通建设带来的振动问题必然对这些敏感区域产生不利影响。国内外学者针对振动产生的原因、传播规律、控制措施以及对人体危害等

收稿日期: 2014-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51038009)

作者简介: 郭飞, 男, 博士研究生, 主要从事岩土与地下工程方面的研究, E-mail: guofei2007@163.com

开展了大量的研究<sup>[1-3]</sup>,但主要集中在运营阶段,对于由施工诱发的振动问题,尤其对夹杂着卵石、漂石的砂卵石、砾石地层,这方面的研究还有待展开<sup>[4-5]</sup>.针对盾构施工诱发振动,只有 Nelson 等曾在布法罗 LRRT 隧道掘进机施工过程中研究过振动特性<sup>[6]</sup>.

北京地铁先后有多个区间出现盾构施工诱发振动扰民事件,民众多次投诉上访,致使工程停工数月.本文以北京地铁某线隧道盾构施工为工程背景,首次开展现场实测,识别砂卵石地层盾构施工诱发振动的振源,采用现场实测和数值模拟的手段研究振源的特性,研究结果可为今后开展施工阶段振动问题研究提供依据.

## 1 施工过程振源识别

振动在地层传播具有时间-空间特性,盾构掘进的流程为:土体切削—排土—安装管片—出渣土,盾构施工中不同工序振动的振源、振源所处空间位置、振动产生的时间及持时长短等均有较大差别,地表感知随时间空间变化也不同.因此,对复杂振源有必要进行识别和分解.振源识别主要通过现场地面调查与初步测试相结合的方式,识别结果见表 1.

表 1 振源识别

Table 1 Vibration source identification

振源	位置	原因
刀盘	前部	掘进时刀盘与地层作用
设备台车	中部	设备振动
渣土/管片	盾尾及已建成	轨道不平顺
运输车辆	线路上	产生的振动

## 2 盾构掘进诱发振动振源分析

现场测试采集目标为隧道结构加速度和地层加速度,采集频率 200 Hz,采集系统主要由 WS-5921 信号采集分析处理仪、941B 超低频测振仪等组成.

盾构掘进过程中,由于无法在刀盘上设置测点,故在盾构刀盘前上方埋设竖向振动测点,在盾构刀盘前方进行钻孔,钻孔深度 8 m.从钻取土样来看,该区段隧道覆土主要分 3 层,分别为杂填土、粉质黏土、卵石圆砾.区间隧道结构大部分位于卵石、漂石④层,亚圆形,级配连续,磨圆度中等,一般粒径 2~6 cm,最大粒径大于 10 cm,细中砂充填 30%~40%

的地层中.隧道拱顶所处地层主要以新近沉积卵石、圆砾③层,亚圆形为主,一般粒径为 2~5 cm,最大粒径小于 20 cm,细中砂充填约 20%~40%(卵石层颗粒分析见表 2).

利用钻孔设备对孔底夯平,对加速度传感器进行防水处理后通过吊绳放置于孔内(如图 1 所示),盾构开始掘进时进行数据采集<sup>[7]</sup>.

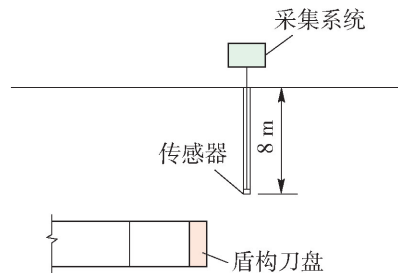


图 1 掘进诱发振动信号采集

Fig. 1 Acquisition of vibration signal by tunneling

表 2 卵石层颗粒分析

Table 2 Analysis of gravel layer particle

地层代号	岩性名称	$d_{10}/$ mm	$d_{30}/$ mm	$d_{60}/$ mm	$C_u$	$C_c$
③	卵石 圆砾	1.017	10.819	40.102	39.432	2.870
		0.483	1.733	4.859	10.060	1.280
		2.795	50.827	178.433	63.840	5.180
④	卵石 漂石	0.783	7.626	32.292	41.242	2.300
		0.489	3.191	14.069	28.770	1.480
		1.200	17.902	66.936	55.780	3.990

测点加速度信号呈现明显随机性,加速度幅值(文中记为  $A$ )小于  $1 \text{ m/s}^2$ ,对采集信号进行快速傅里叶变换,振动频带较宽,主要分布于 20 Hz 以上,通过幅值谱计算,振动频带主要集中在 20~90 Hz,如图 2 所示.

## 3 盾构内部机械振动振源分析

盾构内部机械振动主要为后配套台车风机等设备振动,振动通过台车—临时铺轨—隧道结构—地层这一途径进行传播,对台车振动通过隧道结构上布设传感器进行量测,沿后配套设备台车在盾构衬砌上布置 5 组测试断面,其中最近断面距管片安装工作面为 2~3 管片距离,最远断面距盾构面 23 管片距离(管片宽度为 1.2 m),每组测点均设置水平和竖向传感器(见图 3),当设备进入运转时开始采集,设备进行待机状态时停止.

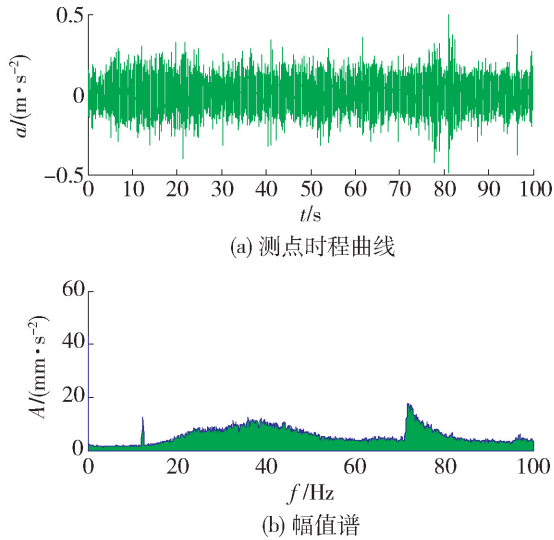


图2 掘进诱发振动信号

Fig. 2 Signal characteristics by tunneling

通过在隧道侧壁安装加速度传感器,得到台车设备振动作用下隧道衬砌的动力响应(如图4所示),由于台车设备种类繁多,各种设备振动频率及幅值不一,信号噪声较多,频带较广,振动幅值较小,隧道管片幅值均小于 $0.04 \text{ m/s}^2$ ,幅值较大的频率区间为 $0 \sim 20 \text{ Hz}$ ,从地面环境调查来看,后配套台车设备振动诱发地表振动非常小,线路经过的建筑物内居民基本感觉不到微振动。

### 3.1 自由场条件振源环境影响研究

通过现场测定后配套车辆处隧道结构振动响应,建立数值模型,计算自由场地表振动时程曲线及频谱曲线,分析不同地层条件下对地表的影响程度。

#### 3.1.1 几何模型

模型计算宽度为 $400 \text{ m}$ ,计算深度为 $80 \text{ m}$ ,计算

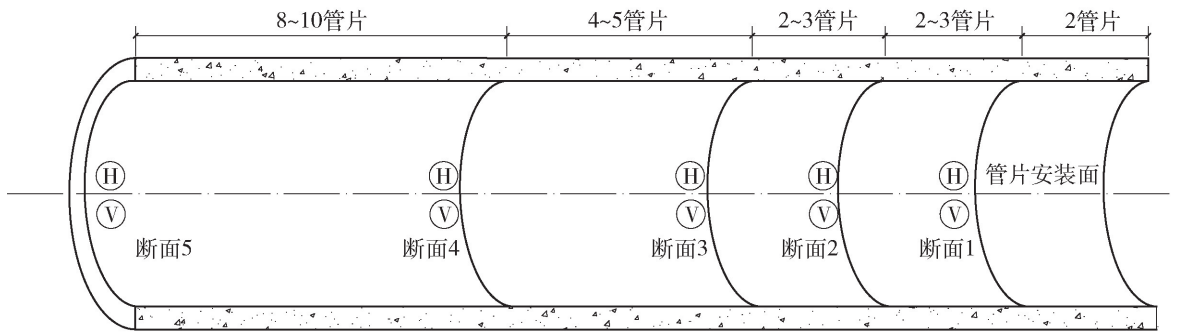


图3 隧道内测点设置

Fig. 3 Arrangement of test points in tunnel

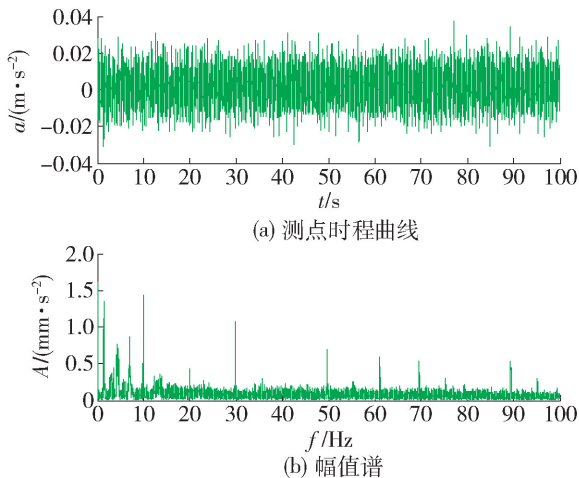


图4 后配套车诱发振动

Fig. 4 Vibration induced by supporting-vehicle

石层浅埋时,考虑上层覆土的动弹性模量为卵石层动弹性模量的 $1/4$ 、 $1/3$ 、 $1/2$ ,上层土体厚度为 $8 \text{ m}$ ,结构及土层物理力学参数见表3,借助ABAQUS有限元程序进行车辆运行诱发振动分析.由于轨道交通振动能量较小,地层及地表建(构)筑物处于弹性状态,阻尼比较小,动力计算模型阻尼比取值 $0.03$ .

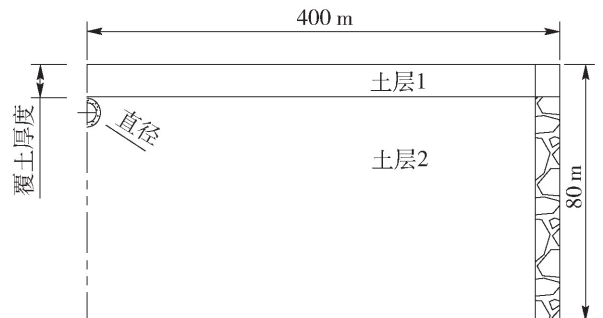


图5 几何模型

Fig. 5 Geometric model

模型为圆形隧道,隧道截面外直径 $6.2 \text{ m}$ ,隧道壁厚 $0.35 \text{ m}$ ,隧道上覆土层厚度 $10 \text{ m}$ ,如图5所示.当卵

表3 计算参数

Table 3 Calculation parameters

项目	土层 1/ 粉质黏土	土层 2/ 砂卵石	衬砌
$v_s/(m \cdot s^{-1})$	210	450	
$\mu$	0.30	0.22	0.20
$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	1 800	2 100	2 500
$C/kPa$	30	0	
$\phi/(^\circ)$	15	35	
$E_d/MPa$	900	1 800	30 000

### 3.1.2 输入荷载

对测试所得加速度数据进行处理后,取用后配套车运转时长5s的加速度时程作为激励荷载,施加于隧道底部节点,如图6所示。

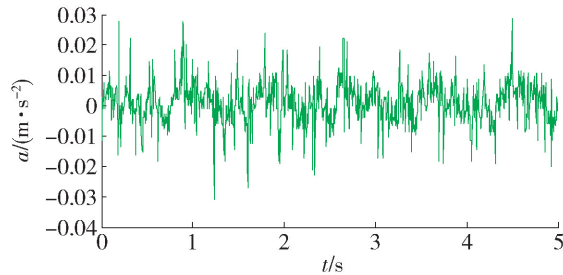


图6 加速度时程曲线

Fig. 6 Measured time history of acceleration

## 3.2 计算结果分析

### 3.2.1 地表振动响应频谱特性

振动由设备激振传至隧道结构,随隧道结构与土层相互作用向四周传播,如图7所示。图中分别为距隧道中线地表点、距中线20m处地表点的振动响应自功率谱密度和时程曲线,由地层向地表传播过程中振动波的高频部分大部分衰减,中线附近地表主频衰减为0~20 Hz,距中线20m处地表主频则衰减为0~10 Hz,且幅值衰减较快<sup>[8-9]</sup>。

### 3.2.2 上覆土层动弹性模量变化对地表振动响应的影响

考虑上层覆土动弹性模量为卵石层的1/4、1/3、1/2,上层土体厚度为8m,建立模型计算分析,工况1、2、3分别对应上层覆土动弹性模量为卵石的1/4、1/3、1/2三种情况,取地表距隧道中线50m范围作为地表衰减研究对象,隧道中线地表沿深度方向10m范围作为地层响应研究对象。地表振动衰减如图8所示,随着表层覆土动弹性模量增大,地表竖向加速度峰值逐渐减小,随着距隧道中线距离增

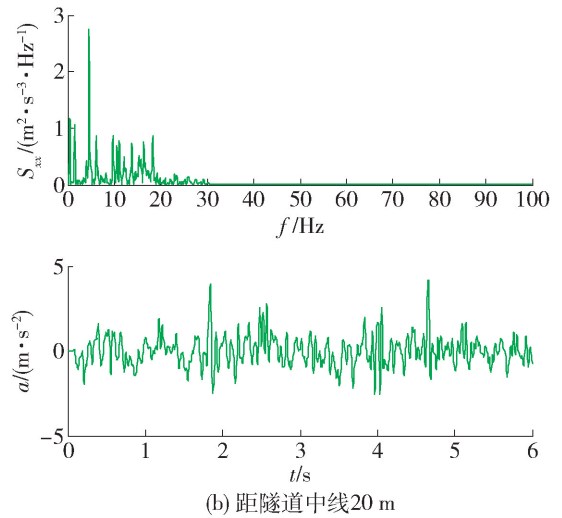
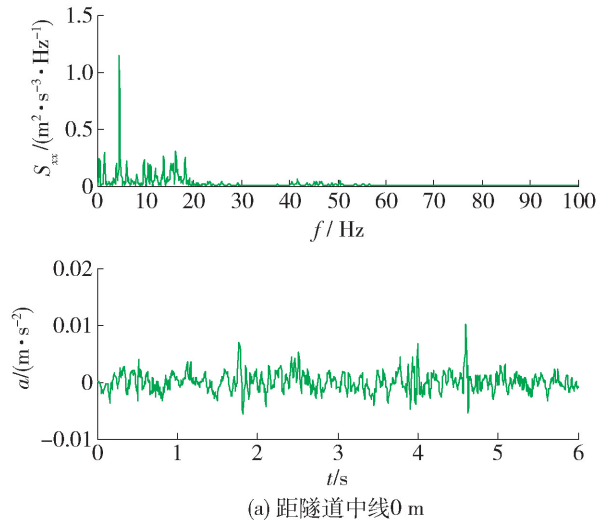


图7 地表点振动响应

Fig. 7 Vibration response of surface point

加,地表振级均小于60 dB,地面居民对振动感知不明显。

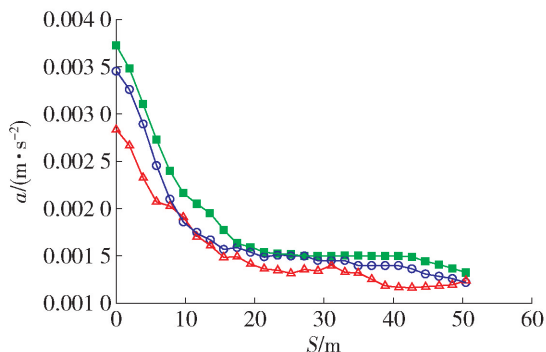
## 4 运输车轨道不平顺诱发振动源分析

盾构推进时的运输主要是掘进渣土从盾构作业面向地面运出以及管片、砂浆料及其他辅助材料向盾构作业面运入。隧道盾构施工中,每台盾构机每循环掘进渣土及材料的运输由2列车完成,每列车由1节交流变频机车、4节渣土车、1节砂浆车、2节管片车(2节管片运输车也可代替为材料车)组成,见图9。

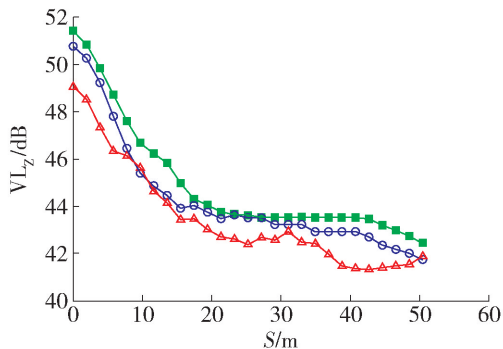
单辆渣土车出土量约为14 m<sup>3</sup>,载质量达到20 t,由于轨道平顺性较差,使得运输车辆诱发振动幅值较大。

### 4.1 运输车诱发振动振源测试

在隧道内布置2组测试断面,为避免后配套车



(a) 加速度峰值衰减



(b) 振级衰减

—■— 工况1 —○— 工况2 —△— 工况3

图8 50 m 范围内地表振动衰减

Fig.8 Surface vibration attenuation within 50 m



图9 运输车辆组成

Fig.9 Composition of transport vehicles

机械振动对测试结果产生影响,在离盾构机盾尾约15管片的距离(距离台车尾部约18 m)设置第1组断面,间隔4组管片后设置第2组监测断面,如图10所示,2组监测断面均设置水平、垂直加速度传感器。

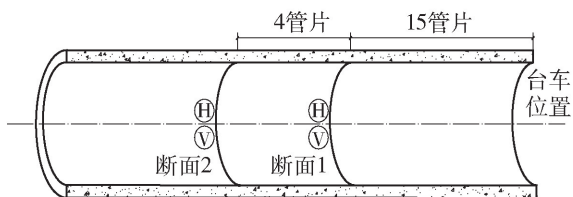
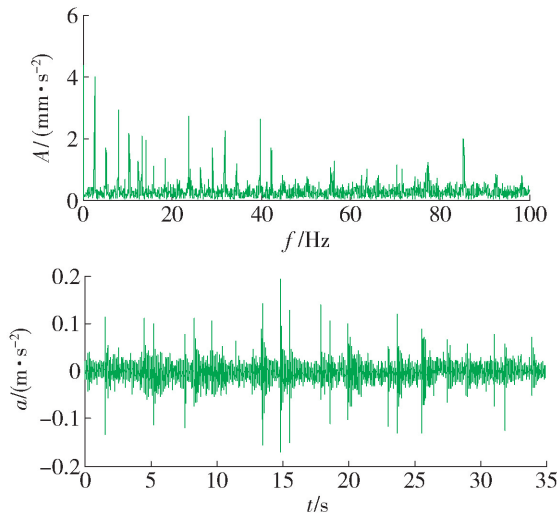


图10 运输车辆振动测试

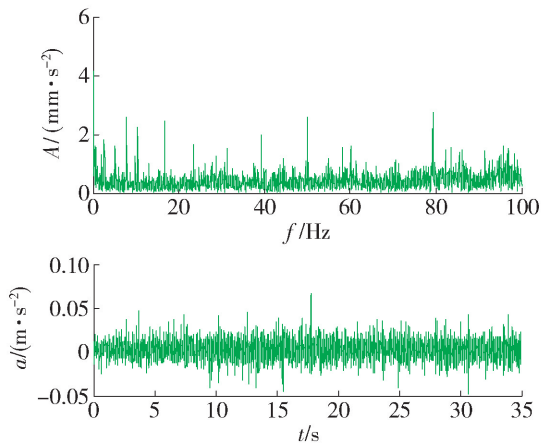
Fig.10 Test of transport vehicles

通过在隧道侧壁安装加速度传感器,得到车辆作用下隧道衬砌的动力响应(如图11所示),振动信号与运营阶段列车诱发振动类似,都存在大量幅

值较大的瞬时冲击作用,而从隧道侧壁振动幅值谱上看,各频段频率均存在,该特点与人工临时铺轨有关,由于临时轨道均直接与隧道结构接触并相互作用,且不存在运营阶段轨道板与道床的隔振作用,使得中高频未得到衰减,幅值较大频率主要集中在0~40 Hz和60~90 Hz.通过对竖向和水平向振动加速度时域上的对比,竖向加速度峰值大于水平向,对地表环境产生影响的也主要为竖向振动。



(a) 竖向振动信号



(b) 水平向振动信号

图11 运输车辆诱发振动信号

Fig.11 Characteristics of vibration signal by transport vehicles

#### 4.2 自由场条件振源环境影响研究

由于临时轨道不平顺的随机性,难以获取运输车辆作用的不平顺谱,对现场测定隧道结构振动响应进行分析,建立了用于分析运输车荷载引起环境振动的数值模型,通过计算得到自由场地表振动时程曲线及频谱曲线,分析了不同埋深及地层条件下对地表的影响程度。

结合现场在隧道内部测得的竖向振动加速度时程(如图 12 所示),对加速度数据进行处理后,当渣土满载通过测试断面时,测点加速度峰值最大,取该时段时长 6 s 的加速度时程作为激励荷载施加于隧道底部节点.

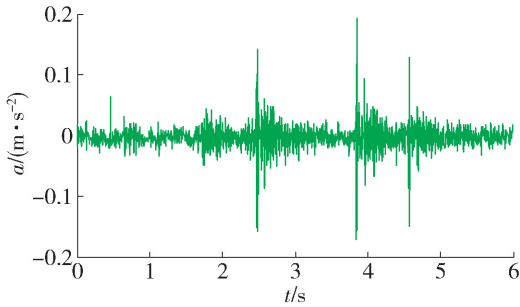


图 12 加载示意图

Fig. 12 Schematic diagram of load

### 4.3 计算结果

以地层振动响应加速度幅值为研究对象,考察地层振动响应随时间的传播过程(如图 13 所示).运输车荷载作用下地层的振动是一个放射性且由近及远的波动传播过程,与地铁列车运行振动传播类似.振动起始于隧道结构,通过结构-地层的相互作用,荷载加载至  $t=0.01$  s 时,振动响应扩大至地表,当加载至  $t=0.05$  s 时,地表振动范围约为 20 m,继续加载影响范围持续扩大直至边界.

综合来看,运输车辆运行与地铁运行均属于半空间埋置振源作用下地层响应,地层的振动是放射性的波动过程.由于隧道处于卵石层而上覆土层为粉质黏土,卵石层动弹性模量大,其波速也大于粉质黏土层,振动向下方地层传播速度快于向上传播速度.

振动由车辆激振传至隧道结构,随着隧道结构与土层相互作用向四周传播,其中,向地表传播过程由于能量耗散,振动幅值与频率均大幅衰减(如图 14 所示),图中分别为隧道中线地表点、距中线 20 m 处点及距中线 50 m 处点的振动响应时程曲线和自功率密度谱,由地层向地表传播过程中高频部分大部分衰减,只有频率在 0~20 Hz 的振动仍保持较高能量幅值.

地层性质对振动传播规律有较大影响,特别是隧道上覆土层的动力性质使振动波产生折射、反射进而地表衰减规律更加复杂.砂卵石层与上覆黏土层动力性质差异较大,卵石层动弹性模量、剪切波速等均远大于黏土层,而埋置于卵石层隧道在内部荷载

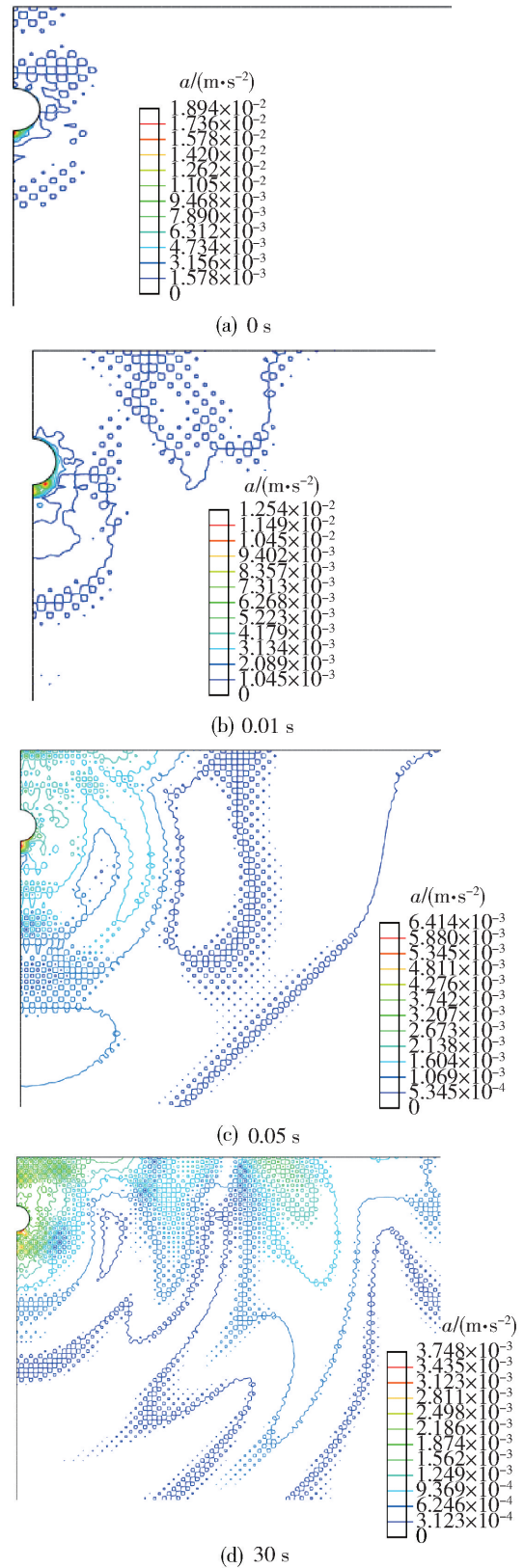


图 13 振动传播示意图

Fig. 13 Schematic diagram of vibration propagation

激振作用下振动由卵石层向黏土层透射,因此,在卵石层参数不变的情况下,考虑上覆黏土层动弹性模

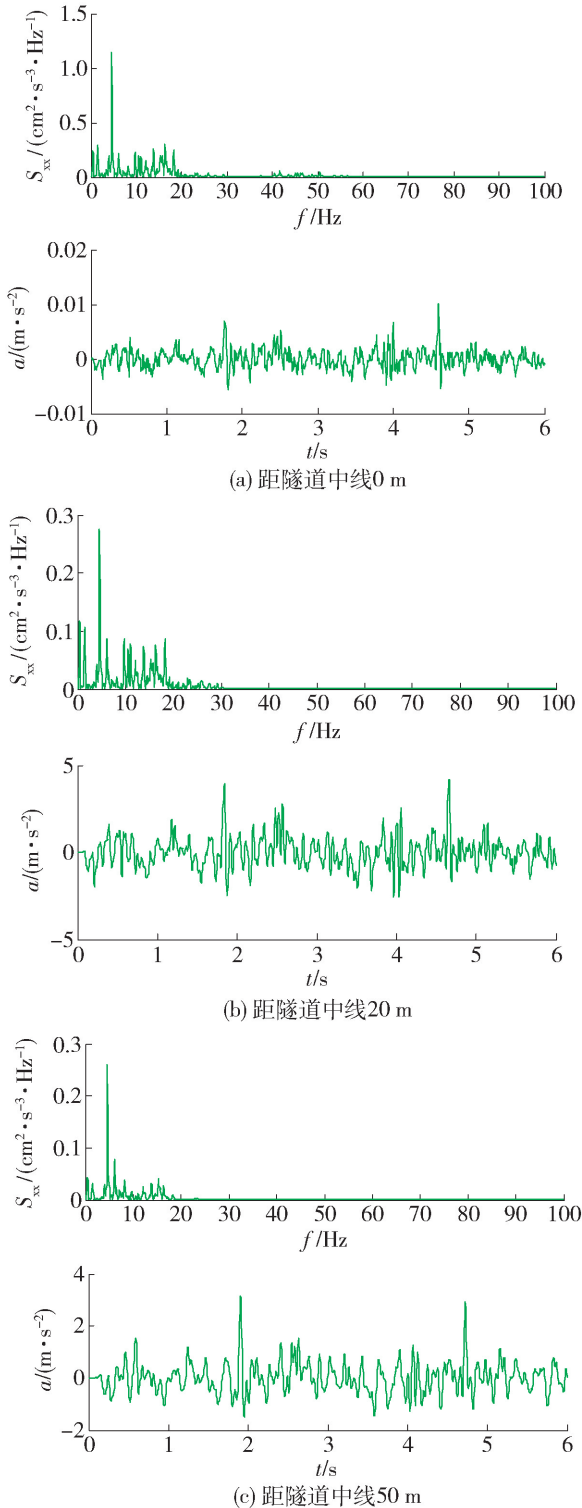


图 14 地表点振动响应

Fig. 14 Vibration response of surface

量变化,分析振动地表衰减及地层中沿深度振动响应规律.

考虑上层覆土动弹性模量为卵石层的 1/4、1/3、1/2,上层土体厚度为 8 m,建立模型计算分析,工况

1、2、3 分别对应上层覆土动弹性模量为卵石的 1/4、1/3、1/2 三种情况,取地表距隧道中线 100 m 范围作为地表衰减研究对象,隧道中线地表沿深度方向 10 m 范围作为地层响应研究对象.地表振动衰减如图 15 所示.

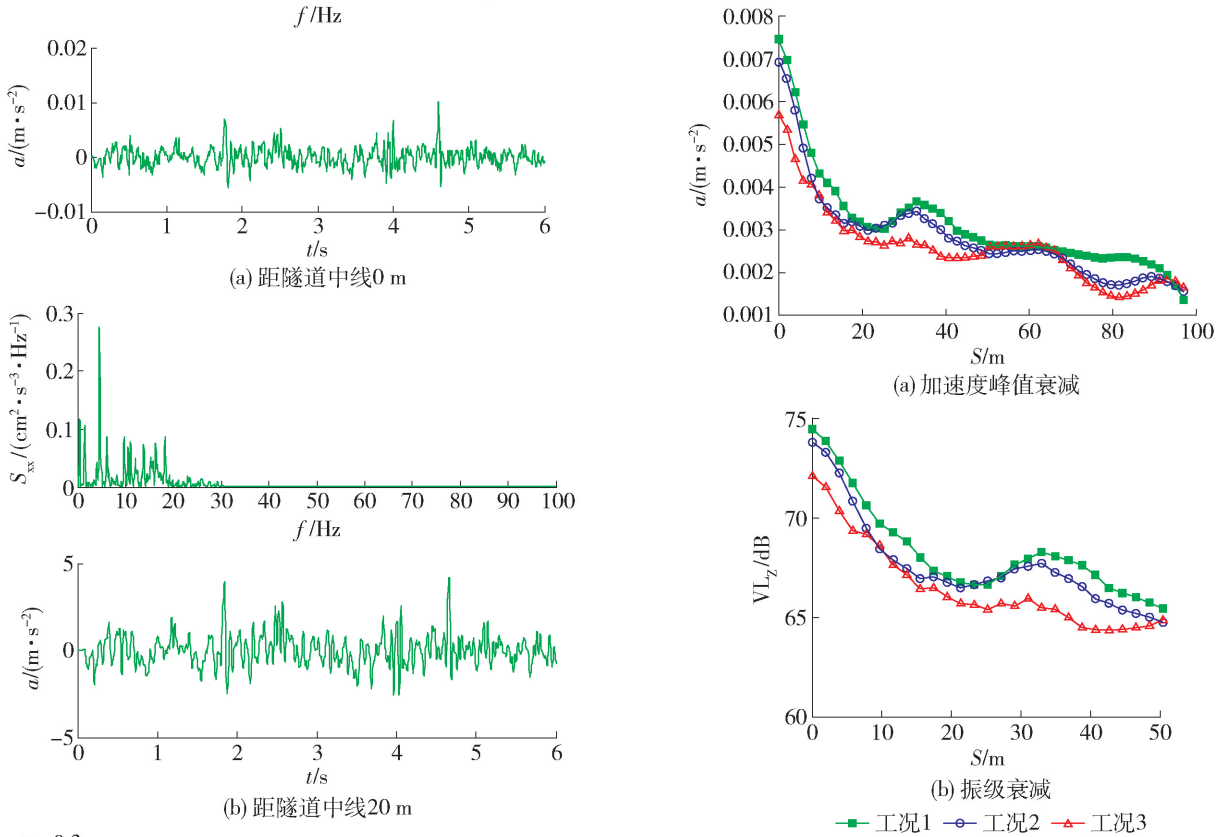


图 15 地表振动衰减

Fig. 15 Vibration attenuation of surface

随着表层覆土动弹性模量增大,地表竖向加速度峰值逐渐减小,随着距隧道中线距离增加,3 种工况衰减规律有所差别,放大区出现位置不同.工况 3 隧道中线处加速度峰值减小幅度大于工况 2,说明随上下地层动弹性模量逐渐接近,地表近振源处振动响应急剧减小,从 50 m 范围内地表 Z 振级计算来看,振动影响较为强烈区域为隧道两侧 15 m 范围,在自由场条件下 30 ~ 40 m 范围出现振动放大区,可能对该区域建筑物或居民产生影响.

地层动弹性模量变化对地层加速度峰值影响如图 16 所示,距拱顶 0 ~ 2 m 范围仍为卵石层,振动幅值传播衰减迅速,随着波由卵石层透射至黏土层,振动幅值增大,动弹性模量增大,地层振动加速度峰值变化逐渐减小.

隧道上覆土层厚度越大,振动通过地层向地表传播过程中能量衰减越多,地表振动幅值越小,当隧

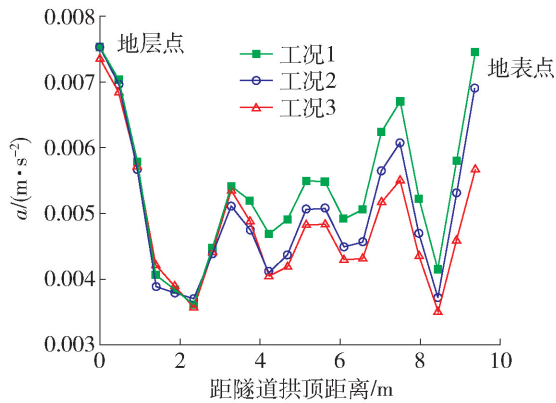


图16 隧道中线沿深度变化加速度峰值

Fig. 16 Peak acceleration changes of tunnel centerline along the depth direction

道覆土厚度每增加1 m,隧道上方地表振动加速度级减小1~2 dB,当隧道上覆土层超过15 m时,运输车辆对地表环境振动影响基本可以忽略。

## 5 结论

1) 通过现场调查、分析盾构施工特点,施工过程诱发振动主要为刀盘掘进与地层相互作用诱发振动、后配套车设备诱发振动、电瓶运输车因轨道不顺诱发振动,振动的振源、振源所处空间位置、振动产生的时间及持时长短等均有较大差别,地表振动响应强烈程度依次为:刀盘掘进振动、运输车诱发振动、后配套车诱发振动。

2) 通过对采集信号进行时域、频域分析,刀盘掘进诱发振动频带较宽,主频主要集中于20~90 Hz。后配套车信号振动幅值较小,幅值较大的频带带宽为0~20 Hz。运输车由于临时轨道均直接与隧道结构接触并相互作用,幅值较大频率主要集中于70~90 Hz,振动传至地表主频衰减至20 Hz以下,振动影响范围主要为隧道中线15 m范围以内。

## 参考文献:

- [1] 李晓霖,陶连金. 地铁运行振动对临近地下工程施工安全影响的研究分析[J]. 隧道建设, 2013, 33(2): 103-109.  
LI Xiao-lin, TAO Lian-jin. Subway vibration on adjacent underground engineering research on the effects of construction safety analysis [J]. Tunnel Construction, 2013, 33(2): 103-109. (in Chinese)
- [2] 潘昌实,李德武,谢正光. 北京地铁列车振动对环境影响的探讨[J]. 振动与冲击, 1995(4): 29-34, 78.

- PAN Chang-shi, LI De-wu, XIE Zheng-guang. Beijing subway train vibration impact on the environment of study [J]. Journal of Vibration and Shock, 1995(4): 29-34, 78. (in Chinese)
- [3] 闫维明,张祎,任珉,等. 地铁运营诱发振动实测及传播规律[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(2): 149-153.  
YAN Wei-ming, ZHANG Wei, REN Min, et al. In situ experiment and analysis of environmental vibration induced by urban subway transit [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(2): 149-154. (in Chinese)
- [4] 黄俊,张波. 砂卵石地层盾构施工振动环境影响测试分析[J]. 施工技术, 2013, 42(7): 85-88.  
HUANG Jun, ZHANG Bo. Sandy pebble formation of shield construction vibration environment impact test and analysis [J]. The Construction Technology, 2013, 42(7): 85-88. (in Chinese)
- [5] 江华. 北京典型砂卵石地层土压平衡盾构适应性研究 [D]. 北京: 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 2012.  
JIANG Hua. Feasibility study on EPB TBM applied in typical gravel strata in Beijing metro [D]. Beijing: School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, 2012. (in Chinese)
- [6] 马积新. 隧道掘进机及盾构施工引起的地层振动 [J]. 世界隧道, 1995(1): 47-52.  
MA Ji-xin. Tunnel boring machine and the cause of formation of shield construction vibration [J]. Journal of Tunnel in the World, 1995(1): 47-52. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国国家环境保护局. GB10070—88 城市区域环境振动标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [8] 黄清飞. 砂卵石地层盾构刀盘刀具与土相互作用及其选型设计研究 [D]. 北京: 北京交通大学土木建筑学院, 2010.  
HUANG Qing-fei. Research on interaction with soil of TBM cutting-wheel tools and their type selection design in gravel stratum [D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [9] 申跃奎. 地铁激励下振动的传播规律及建筑物隔振减振研究 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007.  
SHEN Yue-kui. Study on the propagation laws of subway-induced vibration and isolation or reduction methods of building vibration [D]. Shanghai: School of Civil Engineering, Tongji University, 2007. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)