

高速列车引起的地基土振动研究综述

林署炯^{1,2}, 曾 平¹, 林鹏威¹, 张澄博^{1,2}

(1. 中山大学 地球科学与地质工程学院, 广东 广州 510275;

2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要:对高铁所引起地基土振动的研究已有 20 多年历史了,随着新一轮高铁兴建浪潮的兴起,高铁所引起的环境振动污染备受关注,有必要对前人的研究成果进行系统总结。对地基土振动进行现场实测要遵循恰当的过程和方法,才能保证实测数据的可靠性。在数据分析前,需要对数据进行背景压缩和滤波等必要的预处理。对数据的分析,建议采用“三分之一倍频有效振级谱”的方法,该方法可以实现对振动数据的全面分析。文中还总结了已有研究得到的地基土振动特性,并提出了需要进一步深入研究的问题。

关键词:地基土振动;高速列车;分析方法;振动特性

中图分类号:TB535 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2016)04-0040-07

0 引言

高速列车已经成为现代交通系统中越来越重要的一部分。它在带来巨大的便利的同时,也带来了如噪音和振动等环境污染,影响着居民的正常生活和工作环境。研究表明^[1],振动会影响人体的健康并且导致建筑物的破坏。如今,随着列车的进一步提速,其所引起的振动级别也显著提升,振动影响越发严重。

国内外已有不少的学者对高速列车所引起地基土振动进行了研究。英国诺丁汉特伦特大学的 Victor V. Krylov^[2-4]是首位研究高铁所引起地基土振动的学者。日本学者如 Kaynia^[5]、Takemiya^[6-7]等,也对新干线高速列车所引起地基土振动进行了大量的研究。类似的工作在欧洲其他地区和台湾也有开展。在我国,关于该课题的研究虽然起步较晚,但发展迅速。在惊人的高速铁路建设速度下,我国如今已是全世界拥有最长的高铁线路里程的国家,而且我国的地质环境复杂,这也对众多研究者提出了更高的要求。学者如雷晓燕^[8-10]、夏禾^[11-14]、高广运^[15-17]等,已经开始越来越关注高速列车所引起的环境振动问题,激发起了新一轮研究的热潮。

然而,总结近几年的研究,发现存在着以下几个方面的问题:

(1) 场地实测的过程和方法不完善。如测点的布置随意性大:有的测点布置过于稀疏,未能完整反映振动强度的变化特性,可能导致无法表现出振动放大区;有的测点布置范围太远,远距离处高铁所引起地基土振动幅度已经很小,研究价值不大,反而会对研究的分析形成干扰。合理的测点布置应根据振动波的衰减特性和地基土的分布特征进行布置:在近场振动强度变化大处加密,在远场振动强度变化小处稀疏;在土性变化处加密,在土性均匀处稀疏。同样的,现场实测过程中仪器的安置、采集参数的设置等都需要得到进一步的规范。

(2) 缺少对实测数据进行合理的预处理。传感器的不稳定性以及背景噪声等因素常常会对实测原始数据造成信号干扰,所以需要进行合理的预处理,使数据能够真实反映地基土的振动特性。然而,现有的文献对此少有提及。

(3) 分析方法的有效性。对于不同的研究领域和研究目的,不同学者对振动数据的分析方法可能各不相同。但笔者认为,采用“三分之一倍频有效振级谱”法可以实现对振动波的全面分析,能较全面地反映地基

收稿日期:2015-08-17 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2016.04.07

作者简介:林署炯(1991-),男,硕士研究生,主要从事土动力学与环境振动的研究。E-mail:870657385@qq.com

林署炯,曾平,林鹏威,等.高速列车引起的地基土振动研究综述[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(4):40-46.

土振动的总体特性。所以建议研究者在进行分析时,可以先以该方法为基础,对所研究场地的地基土振动特性进行全面的评价,再根据研究目的不同,结合特定的方法,对振动的某些特性进行详尽的分析。

出现以上问题的原因可能是部分研究者的实测经验不足或对已有研究成果认识不够深刻。为此,在总结已有研究成果的基础上,详细地介绍了对地基土振动进行现场实测的过程和方法,对振动数据进行预处理的方法,以及对振动数据进行分析的方法。再者,本文还全面地总结了已有研究所取得的地基土振动的主要特性,方便研究者与自己的研究成果进行对比验证。最后,提出了需要进一步深入研究的问题。

1 现场实测方法

1.1 测前场地数据获取

场地数据主要包括列车的动力参数和地基土的特征参数这两大部分,它们都与高速列车引起的地基土振动特性息息相关。

列车的动力参数主要包括列车的质量、长度和速度^[15-18]。这 3 个参数是进行数据分析和建立数值模型所必须的。质量决定了列车的静荷载作用,车速决定了列车的动力作用,长度则决定了作用力的范围。这 3 个参数都可通过查阅相关的资料获取,表 1 列出了世界上现行部分高速列车的主要参数。

表 1 世界现行部分高速列车的主要参数

国家	车型	质量/t	长度/m	最高时速/(km·h ⁻¹)
日本	N700 series	700	400	300
	E5 series	453	254	320
法国	TGV-TMST	752	394	300
德国	ICE-3	495	200	320
意大利	ETR500	664	329	300
中国	CRH2c	345	201	350
	CRH380AL	890	403	380

地基土的特征参数主要包括土粒密度、泊松比、静弹性模量、动弹性模量、剪切波速、衰减系数这 6 个参数。首先,应采用地质钻孔勘探的方法,勘察土的类型和各土层的埋深。勘探的结果将会生成一个场地剖面图来反应土层在横向和垂向上的分布以及各个土层的类型,如图 1 所示。

进一步还需要通过室内土工试验来测量土壤的静弹性模量、泊松比和土粒密度。对于土的动弹性模量、剪切波速、衰减系数,需要采用地球物理勘探的方法来获取,一般采用重锤激发法^[19]。若条件有限,也可以采用经验值来代替。本文对常见地基土的这些特性进行了相应的总结,见表 2^[19-21]。

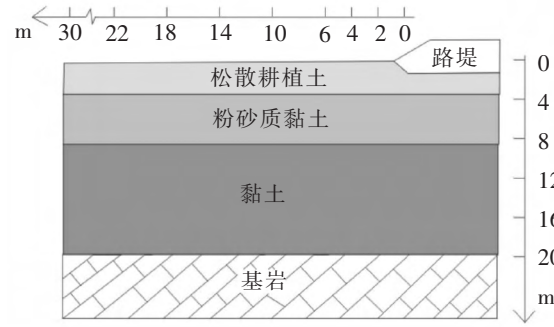


图 1 测试场地剖面图

表 2 常见地基土的动力特性

土的类别	土粒密度 $\rho_s / (g \cdot cm^{-3})$	泊松比 ν	静弹性模量 E / MPa	动弹性模量 E_d / MPa	剪切波速 $V_s / (m \cdot s^{-1})$	衰减系数 $\eta / (m^{-1})$
回填土、表土	2.7~2.76	0.35~0.45	2~10	10~100	90~220	0.05~0.1
淤泥、淤泥质土	2.74~2.76	0.45	2~5	10~30	100~170	0.04~0.06
软粘土	2.74~2.76	0.45	3~8	30~100	90~170	0.04~0.06
硬粘土	2.74~2.76	0.35	6~20	40~150	120~190	0.06~0.1
坚硬粘土	2.74~2.76	0.25	8~50	100~500	170~240	0.06~0.10
粉细砂	2.65~2.7	0.2~0.25	40~80	150~300	100~200	0.03~0.04
中粗砂	2.65~2.69	0.2~0.25	80~160	200~500	160~250	0.04~0.06

1.2 地基土振动测量

在地基土振动的测量中,一般采用振动速度测振仪或者振动加速度测振仪。振动速度直接与振动的能量相关($E=1/2 mv^2$)反映了振动级别的大小。振动加速度则与作用力成正比例关系($F=am$),反映了列车振动的动力响应。振动速度和振动加速度可通过微积分进行相互变换。本文中以振动速度为例进行说明。地基土振动实测的过程主要包括 3 个步骤,分别为测点布置、仪器安置和参数设置。

测点的布置应采用变间距法。根据现有研究的结果,振动在 10 m 内随距离的增加衰减较快,随后衰减变缓,普通场地 30 m 外的振动基本就很微弱,接近本底振动。所以有必要在近场处加密测试点位而在远场处稀疏点位。对于土性均匀的场地,建议水平向的测振距离为 0 m、2 m、4 m、6 m、10 m、14 m、18 m、22 m、30 m。若土性在水平方向上不均一,地基土会在土性变化交界处出现振动异常,表现为局部振动放大现象,所以应在土性变化处加密测点。垂向点位的设置应该根据土层的分布来确定,尽量将点位设置在各土层的中间而不是土层的分界处,这样才能更好地反映各土层的振动特性。

测量仪器的安置,应采用“一平二定三固”的方法。一平指首先应平整场地,清除地基土表面的碎屑。二定指使用罗盘测定测振仪的方向并且保持测振仪水平。需要注意的是,由于测振仪的测头一般都带有磁性,会对罗盘造成干扰,所以应先用罗盘定好方位,在点位处做好标记再放置仪器。三固指的是对测振探头进行固定,要求将探头的 $1/3 \sim 1/2$ 埋到土中,并适当进行压实。对于无法挖埋的硬质场地,可以使用石膏拌水进行固定。

测振仪参数的设置主要为采样频率和采样时间这两个参数。高速列车的通过时间一般小于 10 s,所以采样时间建议设置为 20 s,保证 5 s 的提前量和 5 s 的滞后量来采集前背景振动和后背景振动。根据采样定理,当采样频率是原始信号最高频率的两倍的时候,采样得到的数字信号可以完整地保留原始信号的信息。在实际应用中,一般将采样频率设置为最高频率的 5~10 倍。由于高铁所引起的地基土振动的主要频率一般小于 100 Hz,所以建议将采样频率设置为 1 000 Hz。

实测结果将获得一系列记录了振动速度的时间序列数据。如图 2 所示,为某一次振动所采集的数据。

2 数据分析方法

2.1 数据预处理

在实地测量之后,将获得一系列以时间为序列的振动数据。这些数据完整地反映了地基土的全部振动信号,既包含了高铁振动的信号,也包含了干扰信号的部分,因此需要将干扰信号从振动信号中剔除出去。通常需要进行背景振动压缩和滤波处理。

背景振动指的是除了所要检测的振动(主振动)外的其余振动。它会叠加到主振动上引起振动信号的放大,所以必须进行背景压缩来恢复高铁振动的真实值。压缩算法为

$$F(t) = \left(1 - \frac{B_{\max}}{V_{\max}}\right) \times f(t) \quad (1)$$

式中, $F(t)$ 为测量得到的以时间为序列的振动数据; $B_{\max}$ 为背景振动速度的最大值; $V_{\max}$ 为所采集振动信号的最大值。

图 3 为原始信号和压缩后信号的对比图,从图 3 中可以看出,所有的数据点都被进行了压缩。最大振动速度从 2.66×10^{-4} m/s 被压缩到 2.44×10^{-4} m/s,最小振动速度从 -2.33×10^{-4} m/s 被压缩到 -2.13×10^{-4} m/s。

大量研究表明,高速列车所引起的地基土振动的主要频率在 4~100 Hz 的区间内。较低频成分(小于 3 Hz)和较高频成分(高于 200 Hz)会对振动信号形成较大的干扰。较低频成分,也称为直流分量,主要是测量过程中仪器误差所产生的。由于放大器温度的改变,感应器低频成分的不稳定以及背景环境的

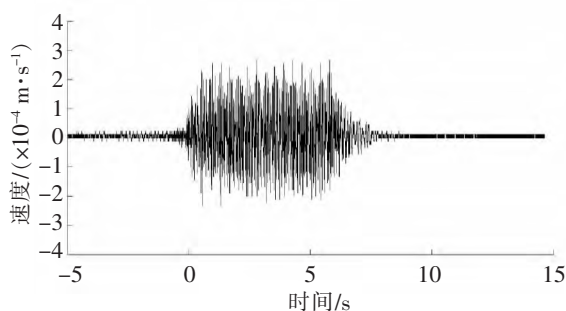


图 2 高速列车所引起的地基土振动的信号

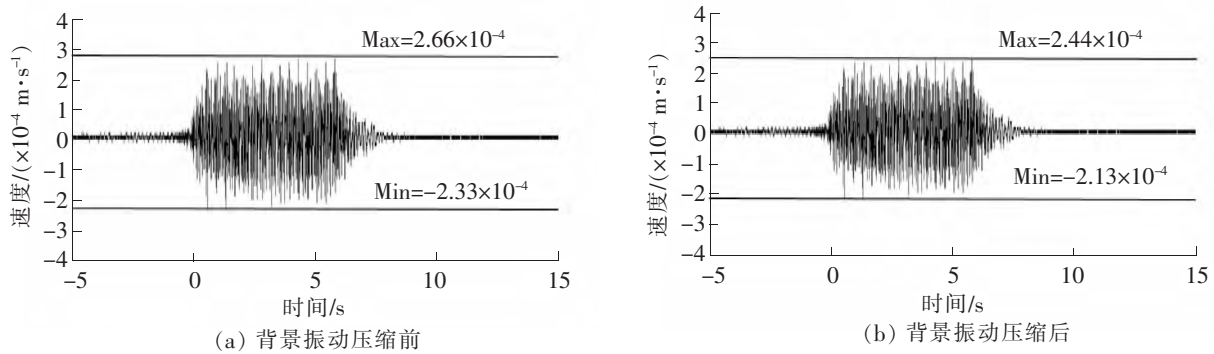


图 3 背景振动压缩前后对比

干扰, 振动信号将会偏离基线, 偏移量会随时间的增加而增加, 形成所谓的滑移现象^[22]。如图 4(a) 所示, 在进行积分之后, 积分值急剧地增加。这种滑移现象将会使计算的振动级别变大, 影响对振动能量的真实评价。图 4(b) 则为进行低频滤波处理后的积分, 可以看到积分值随基线对称地上下波动, 滑移现象基本消除。虽然较高频成分主要是由高速列车所产生的^[23], 但可以对高频成分不予关心, 因为高频成分不会对人体或建筑物产生显著的影响。但高频成分会使振动波产生毛刺现象而不平滑, 如图 4(c) 所示。图 4(d) 为进行高频滤波处理后的振动波, 可以看到毛刺现象被消除, 振动波谱变得光滑。

滤波处理主要通过傅里叶变换(FFT)和逆傅里叶变换(RFFT)实现。首先通过快速傅里叶变换将振动信号从时域转换到频域, 然后删除低于 3 Hz 和高于 200 Hz 的成分, 再使用逆傅里叶变换将频域的数据转换回时域, 就完成了滤波的过程。滤波结果如图 4(f) 所示, 图 4(e) 为滤波前的数据。

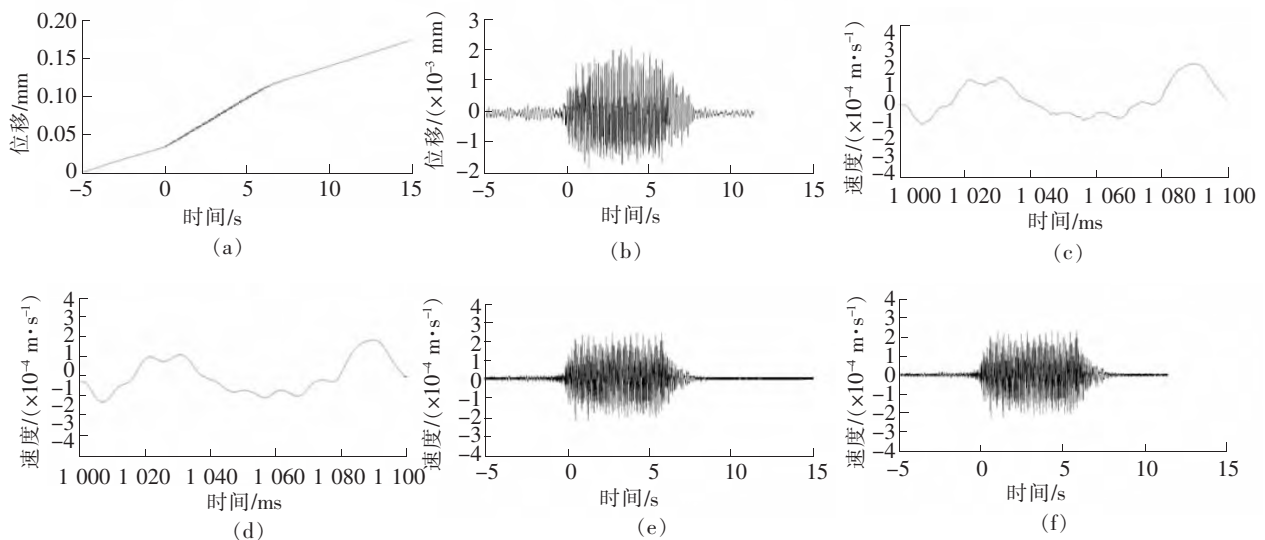


图 4 滤波前后数据对比

对数据进行预处理十分重要, 一方面可以排除其它因素的干扰, 保证下一步分析的有效性, 另一方面还能对数据进行初步的检验。如果对数据进行预处理后数据的变化太大, 或者预处理也不能消除数据的基线滑移或毛刺现象, 那么就有理由怀疑数据的可靠性。

2.2 振级分析

评价振动级别的指标主要有最大振动速度、平均速度、有效速度(计算均方根值)等。其中以有效速度为基础的“三分之一倍频有效振级谱”法^[24-25], 可以较好地对比振动级别进行分析和评价。有效振级是通过计算均方根值, 并将计算结果进行对数处理。均方根值反应了振动能量的大小, 对数处理则可以使计算结果易于比较。三分之一倍频处理可以使数据简化集中到研究所关心的几个中心频率上。这种方法可通过以下几个步骤实现^[25]。

(1) 使用快速傅里叶变换将时域数据 $Y(t)$ 转换为频域数据 $Y(f)$ 。

$$Y(f) = FFT(Y(t)) \quad (2)$$

(2) 得到傅里叶幅值谱 $S_y(f)$, T 为进行快速傅里叶变换的截止时间长度。

$$S_y(f) = \frac{|Y(f)|}{T} \quad (3)$$

(3) 生成三分之一倍频的数值序列, 中心频率值为 1 Hz、1.25 Hz、1.6 Hz、2 Hz、2.5 Hz、3.15 Hz、4 Hz、5 Hz、6.3 Hz、8 Hz、10 Hz...200 Hz。每隔 3 个中心频率, 频率值将会增加一倍。上限频率 f_u 、下限频率 f_l 和中心频率 f_c 三者之间的关系为

$$\frac{f_u}{f_l} = 2^{1/3}, \frac{f_c}{f_l} = 2^{1/6}, \frac{f_u}{f_c} = 2^{1/6} \quad (4)$$

(4) 计算下限频率和上限频率之间数据的均方根值。 N 为数据点的数目。

$$\sigma_y(f_c) = \sqrt{\frac{\sum_{f_l}^{f_u} S(f)^2}{N}} \quad (5)$$

(5) 计算各个中心频率处的振级, 单位为 dB

$$L_v = 20 \lg \frac{\sigma_y(f_c)}{\sigma_0} \quad (6)$$

一般参考速度为: $\sigma_0 = 2.54 \times 10^{-8}$ m/s。

(6) 计算总的振级

$$L_{al} = 20 \lg \frac{\int \sigma_y(f_c)}{\sigma_0} \quad (7)$$

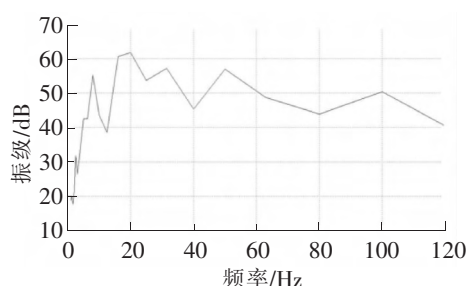


图 5 三分之一倍频有效振级谱

图 5 为一计算实例, 从图 5 中可以很清楚地看出振动波在不同频率处的振动级别。

基于“三分之一倍频有效振级谱”的结果, 可以进行一系列的分析来发现地基土的振动特性。以下为几种常用的分析方法:

(1) 主频分析。找出不同距离点位处振动的主要频率, 分析它们的分布特征。

(2) 振动强度衰减特性分析。以点位距离为横坐标, 振级为纵坐标, 统计所有点位的总振动级别的大小, 可以得到一条振动能量的衰减曲线。进一步可以通过数学函数来拟合这条曲线, 从而建立相应的振动强度衰减模型。

(3) 振动频率衰减分析。通过对比不同点位处的主要频率, 可以发现振动波在频率域的衰减特性。

(4) 列车车速影响分析。通过对比不同车速的“三分之一倍频有效振级谱”, 可以分析振动特性随车速增加的变化。

3 对现有研究成果的主要认识

对高速列车所引起的基础土振动的研究已有 20 多年的历史, 经过 20 多年的发展, 高铁所引起的基础土振动的一些主要特性也被陆续发现并展示出来。以下是对现有研究成果的几点主要认识:

(1) 振动在频率域的分布特性。振动频率主要分布在 0~100 Hz^[15] 的频率域内, 并且可以将其细分为 3 个次级区间, 分别为 0~10 Hz(低频)、10~40 Hz(中频)、40~100 Hz(高频)。在这 3 个区间内通常会分别存在 3 个振动峰值。

(2) 振级随车速增加而变化的特性。在车速较低时, 振动的级别只会随着车速的增加而平稳地增加^[23]。但当车速超过某些临界速度之后(瑞利波速和轨道临界速度), 振级将会随着车速的增加急剧地增加^[2-4, 26], 特别是在软土地区^[27], 这两种临界速度都非常低。在频率域, 随着车速的增加, 频谱将会向高频率的方向转移^[7]。

(3) 振动波在地基土中的衰减特性。振动波的强度会随距轨道距离的增加而呈指数的形式衰减^[28]。但衰减函数不仅与距离有关, 还与地基土的特性和振动的频率有关^[29]。振动强度受到地质条件的影响较

大,振动在较软的地基土中要比在较硬的地基土中强烈得多,而且在软土中传播的距离也更远。在传播过程中,高频成分较容易衰减,在远场区域,主要为低频成分的振动波。

(4)振动的异常放大现象。振动的异常放大现象^[13,30-31]主要是由于地基土在水平方向和垂直方向上的不均一性引起的。在水平方向上,当振动波从较硬的地基土中传播到较软的地基土中时,较软的地基土未能及时响应传递来自较硬地基土中的振动,导致振动能量在软硬交界处积累,从而产生放大现象。在垂直方向上,振动波在不同土层传播时会发生反射,反射波在某些点位叠加而产生振动放大。振动放大主要发生在低频域,这与低频波在地基土中的衰减幅度较小有关。

4 需要进一步深入研究的问题

虽然对高铁引起地基土振动的研究已经取得了不少成果,但仍存在一些需要进一步研究的问题。

(1)当高速列车在山体隧道中运行的时候,振动波将会从一个较宽的底部(山脚)向上传播到一较窄的顶部(山顶),这种传播与在地基土中的传播差别很大。而且山体中经常会存在各种构造面,如岩层面、断层、节理等,这些构造面都会严重影响振动的传播。受山体地形起伏的影响,测点布置难度较大,而数值模拟的方法又难以模拟山体中的各种构造面,所以关于高铁引起的山体振动仍需较好的方法来进行研究。

(2)当高速铁路穿过高速公路或地铁线路的时候,来自不同振动场的振动波将会叠加放大,造成意想不到的伤害。高铁与地铁或高速汽车的交会概率较小,需要长期监测才能获得足够的数据,而且,高铁所引起的地基土振动振源属于桩基振动,而地铁属于地下振动,两者的叠加会造成分析的困难。数值模拟则会由于多场振动的存在和土的弹塑性模型的建立,使得求解过程难以收敛。

(3)雨水的影响。虽然在暴雨天气,高速列车会减速运行或停运,但暴雨过后,某些地势低洼处会有积水。水位上升会导致孔隙水压力增大而有效应力减小,使地基土的承载力下降。振动波在土水多相介质中的传播机理还不清楚,可能会产生超孔隙水压力而导致地基承载力进一步下降。而且,在雨水场地,测振仪器难以安置,测量结果可靠性低。

(4)地质条件是影响地基土振动最复杂的因素^[27],而且往往是不可控的,数值模拟也难以实现对复杂地质条件的模拟,因此需要进行系统研究来总结归纳各种地质条件对振动传播的影响规律。

参 考 文 献

- [1] Sanayei M, Zhao N, Maurya P, et al. Impedance modeling for prediction of train induced floor vibrations[C]// Structures Congress, Las Vegas, NV. United states: American Society of Civil Engineers(ASCE), 2011:371-382.
- [2] Krylov V V. Generation of ground vibrations by superfast trains[J]. Applied Acoustics, 1995, 44(2): 149-164.
- [3] Krylov V V, Dawson A R, Heelis M E, et al. Rail movement and ground waves caused by high-speed trains approaching track-soil critical velocities[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2000, 214(2): 107-116.
- [4] Krylov V V. Focusing of ground vibrations generated by high-speed trains[C]// 26th International Conference on Noise and Vibration Engineering. Belgium: KU Leuven, 2014: 2007-2016.
- [5] Kaynia A M, Madshus C, Zackrisson P. Ground vibration from high-speed trains: prediction and countermeasure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(6): 531-537.
- [6] Takemiya H, Bian X C. Shinkansen high-speed train induced ground vibrations in view of viaduct-ground interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(6): 506-520.
- [7] Takemiya H. Analyses of wave field from high-speed train on viaduct at shallow/deep soft grounds[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 310(3): 631-649.
- [8] 圣小珍,雷晓燕. 铁路交通噪声与振动[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] 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.
- [10] 雷晓燕. 高速铁路轨道振动与轨道临界速度的傅里叶变换法[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(6): 30-34.
- [11] 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.
- [12] Xia H, Cao Y M, De Roeck G. Theoretical modeling and characteristic analysis of moving-train induced ground vibrations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(7): 819-832.
- [13] Xia H, Zhang N, Cao Y M. Experimental study of train-induced vibrations of environments and buildings[J]. Journal

- of Sound and Vibration, 2005, 280(3-5): 1017-1029.
- [14] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [15] Gao G, Li Z, Feng S, 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.
- [16] 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.
- [17] 李志毅, 高广运, 冯世进, 等. 高速列车运行引起的地表振动分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(7): 909-914.
- [18] Chen Y, Lin S, Shen Y. Establishment of ground vibration prediction model for high-speed trains on embankments [J]. Journal of Vibroengineering, 2014, 16(4): 1877-1887.
- [19] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [20] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [21] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [22] Degrande G, Schillemans L. Free field vibrations during the passage of a thalys high-speed train at variable speed[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 247(1): 131-144.
- [23] Connolly D P, Kouroussis G, Woodward P K, et al. Field testing and analysis of high speed rail vibrations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 67: 102-118.
- [24] Chen Y, Chiu T. Ground vibration induced by high-speed trains on bridge structures[J]. Noise and Vibration Worldwide, 2012, 43(7): 2-10.
- [25] Chen Y, Shen Y. Measurement techniques of ground vibration for rail system[C]// Advances in Analysis, Modeling and Design Conference, West Palm Beach, FL. United states: American Society of Civil Engineers, 2010: 1255-1264.
- [26] Madshus C, Kaynia A M. High-speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 689-701.
- [27] Chen Y, Shen Y, Chen K, et al. Some characteristics of ground vibration as induced by high-speed trains[C]// Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, Sacramento, CA. United states: American Society of Civil Engineers. 2008.
- [28] He Y, Zhou Q, Yang L. Environmental Vibration Test and Analysis of Viaduct Bridge of 350 km/h High-speed Railway[J]. Noise and Vibration Control, 2012, 32(1): 170-173.
- [29] 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.
- [30] Zhang L, Feng Q. Experimental analysis on ground vibration generated by high-speed train[C]//3rd International Conference on Transportation Engineering. China: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2011: 1597-1602.
- [31] 肖明清, 姚捷, 黄盾, 等. 广深港高铁狮子洋隧道列车所致环境振动实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3527-3534.

A Review on Ground Vibration Induced by High-Speed Train

Lin Shujiong^{1,2}, Zeng Ping¹, Lin Pengwei¹, Zhang Chengbo^{1,2}

(1. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Guangdong key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources Exploration, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Researches on ground vibration induced by high-speed train have been studied for more than 20 years. With another upsurge of constructing high-speed railway, more and more people are concerned about the environmental vibration problems caused by high-speed train. So, it is necessary to summarize the results of the former researches systematically. The field test of the ground vibration must be carried out under proper process to ensure the quality of the data. Data pretreatment is necessary before data analysis. “1/3 octave valid vibration level spectrum” is recommended to process the data analysis. The characteristics of the ground vibration can be fully analyzed using this method. The main characteristics of the ground vibration are also concluded in this article. Finally, some analysis recommendations and further studies are proposed.

Key words: ground vibration; high-speed train; analysis methods; vibration characteristics