

文章编号:1671-1637(2014)03-0008-07

快速铁路路堤段地面振动特性

张光明, 贺玉龙, 杨立中, 苏 凯

(西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:现场测试了列车通过成灌快速铁路路堤段时的地面振动,分析了列车从内侧和外侧轨道通过时引起地面不同距离处的最大振级、等效振级和振动频率,研究了振动频率与衰减速度的相关性,建立了基于波尼茨模型的铁路路堤段地面振动的分频段预测方法,并对预测方法进行了实例验证。分析结果表明:距路堤5~75 m范围内地面最大竖向振级为51~77 dB,满足现行铁路环境振动标准要求;快速铁路路堤段列车从内侧轨道通过时的地面振动大于外侧轨道的地面振动;地面振动在距路堤35 m范围以内衰减较快,距离大于35 m后振动衰减速度变慢;在近路堤范围内以高频振动为主,5 m处振动能量主要集中在16~100 Hz内,超过65 m后振动以小于4 Hz的低频振动为主;振动反弹现象主要发生在小于20 Hz和大于100 Hz的频率范围内。预测方法取得了较好的预测精度。

关键词:路基工程;地面振动;分频段;振级;预测方法

中图分类号:U213.11 **文献标志码:**A

Ground vibration characteristic of embankment section for fast railway

ZHANG Guang-ming, HE Yu-long, YANG Li-zhong, SU Kai

(School of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University,
Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: The ground vibration induced by trains running on the embankment of Chengguan Fast Railway was measured through field test. The maximum vibration levels, equivalent vibration levels and vibration frequencies in various locations induced by trains running from inside and outside tracks were analyzed. The correlation of decay speed and vibration frequency was studied, a new frequency-division section prediction method based on Bornitz model for railway embankment ground vibration was built and verified. Analysis result indicates that the levels of the maximum vibration is 51-77 dB in the distance away from embankment 5-75 m, which meets the requirement of current railway environmental vibration standard. The environmental vibration induced by train running on inside track is greater than that on outside track. The ground vibration attenuates quickly in the region less than 35 m away from embankment, and the attenuate rate of ground vibration become slower in the region more than 35 m away from embankment. High frequency vibration is the major vibration phenomenon within the scope of nearby embankment. In the site of 5 m away from embankment, the dominate vibration frequency range is from 16 Hz to 100 Hz. The low frequency vibration less than 4 Hz is the main vibration

收稿日期:2014-01-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41272322);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-0710);中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWJTU12CX003)

作者简介:张光明(1986-),男,安徽六安人,西南交通大学工学博士研究生,从事铁路振动及其地质环境效应研究。

导师简介:杨立中(1947-),男,四川成都人,西南交通大学教授,工学博士。

phenomenon in the region of more than 65 m away from embankment. The phenomenon of vibration rebound mainly occurs in the frequency range of less than 20 Hz or greater than 100 Hz. The prediction method has good prediction accuracy. 3 tabs, 6 figs, 25 refs.

Key words: subgrade engineering; ground vibration; frequency-division section; vibration level; prediction method

Author resumes: ZHANG Guang-ming(1986-), male, doctoral student, +86-28-87600008, guangming3522@163.com; YANG Li-zhong(1947-), male, professor, PhD, +86-28-87600008, lzyang@home.swjtu.edu.cn.

0 引言

随着列车运行速度的提高和高速铁路的飞速发展,列车引起的地面振动对人们生产和生活的影响日益突显^[1]。国内外学者对铁路列车引起的地面振动进行了大量研究,Sheng等建立了轨道结构多层梁与层状大地耦合模型,分析了移动轴荷载引起的大地振动^[2];Ditzel等基于域积分方程,提出了一种新方法计算列车通过路堤时引起的地面振动位移,分析了路堤对地面振动的影响^[3];朱志辉等采用车-桥-墩-桩-土耦合系统的三维有限元模型研究了高速铁路桥梁段地面振动响应^[4];董国庆通过有限元数值软件研究了高速铁路高架桥段诱发的地面振动与地面隔振^[5];李征徽采用ANSYS软件建立了列车-桥梁-桥墩和基础-土体2个子模型,研究了列车通过桥梁段时的地面振动频域特征以及列车速度和阻尼比对地面振动的影响^[6];陈松通过数值模拟得出列车运行于高架无砟轨道引起的地面振动在10 m范围内衰减很快,在30、40 m处出现了振动反弹现象^[7]。铁路环境振动不仅受到车辆、轨道、路基结构形式的影响,同时也受到场地地质条件的影响。Krylov等利用格林函数研究了低频铁路振动的产生与传播特点,认为铁路地基土的力学性质是铁路地面振动的主要影响因素之一^[8];Kouroussis等通过数值方法研究了场地土性质和地层条件对地面振动的影响^[9];Chen等对台湾高速铁路路堤段和桥梁段的地面振动进行了大量测试,指出场地地质条件是影响振动衰减的重要因素^[10-11];毕苏萍等研究了列车引起的饱和地基地面振动特点,分析了饱和分层地基的渗透系数、流体黏滞系数、空隙特征、剪切波速等参数对列车引起的地面振动的传播和衰减的影响^[12-13]。

可见目前对铁路列车运行引起的环境振动的研究主要集中在高架线路列车引起的环境振动,但是通常铁路线路中路堤段线路也占据不小的比例,并

且有研究表明,铁路路堤段地面振动强度甚至大于铁路桥梁段,因此,铁路路堤段的环境振动也不容忽视。上述国内外研究同时表明场地地质条件对地面振动的影响较大,成灌快速铁路位于成都平原,铁路沿线场地地质条件较为特殊,浅层具有双层结构特点,上层为粘土层,下层为砂卵石层。鉴于此,本文通过现场试验研究了成灌快速铁路路堤段特殊场地的地面振动强度、衰减与频率特征,并提出了基于波尼茨模型的地面环境振动分频段预测方法。

1 现场测试

1.1 成灌快速铁路概况

成灌快速铁路为中国第1条市域铁路,线路全长为74.55 km,途经四川省成都市的成华区、金牛区与郫县、都江堰市等闹市区,其中路基线路占线路长度的37.80%,桥梁线路占线路总长度的57.93%,列车设计速度为200 km·h⁻¹(其中成都市中心城区至郫县段为120 km·h⁻¹),为双线电气化铁路,线间距为4.6 m。运行列车为CRH1A型动车组,编组形式为8辆编组,轴重不大于16 t,长度为213.5 m,质量为420.4 t。测试段轨道为抗震型框架板式无砟轨道,按照一次铺设跨区间无缝线路设计,采用线密度为60 kg·m⁻¹、长度为100 m定尺长U71Mn(k)无孔新轨。

1.2 场地条件

测试场地位于线路DK37+865 m处,场地情况见图1,地面平整,视野开阔,无其他振动源干扰,测试条件较好,该段路堤高度为5 m。场地的浅层地层为第四系冲洪积层,表层为粉质粘土地层,层厚为1~3 m,下层为砂卵石地层,层厚大于15 m。地下水丰富,且主要分布在砂卵石地层中。

1.3 测试仪器

测试仪器采用杭州爱华仪器有限公司生产的AWA6256B⁺和AWA6291型环境振动测量仪。2种测量仪的全身振动测量范围为48~158 dB(以



图 1 测试场地

Fig. 1 Tested site

加速度为 $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 为参考), 采样频率为 750 Hz, 主要测量指标为 V_{lmax} 、 V_{le} , V_{lmax} 为测量时间段内的最大竖向振级, 是铁路环境振动的重要评价指标^[14-15], V_{le} 为等效连续竖向振级, 是测量时间段内竖向振级的能量平均值, 代表测点的平均振动强度。AWA6291 测量仪具有低频 1/3OCT 分析功能, 分析频率范围为 0.63~250 Hz。2 种测量仪均采用 AWA14400 型环境振动加速度传感器, 灵敏度为 $40 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 质量为 550 g。



图 2 环境振动测量仪

Fig. 2 Measuring instrument for environmental vibration

1.4 测点布置

考虑到周围菜地内地表土质松散, 可能对测试结果产生影响, 因此, 将测点布置在垂直于路堤的一条坚实平整的小路上, 分别在距离路堤底边缘为 5、10、15、25、35、50、65、75 m 处设置 8 个测点, 见图 3。传感器设置见图 4, 具体方法如下: 在测点位置处挖一个一定深度的方形基坑, 将预制好的方形水泥块放置在坑内, 将水泥块的底面和四周均与土壤严格压实紧密, 并用地质罗盘确保水泥块顶面水平, 最后将传感器放置在水泥块顶面上, 当列车通过时同时测量各测点处的竖向地面振动。

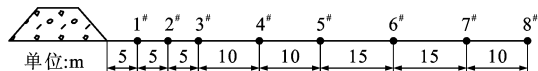


图 3 测点布置

Fig. 3 Arrangement of measuring points



图 4 传感器设置

Fig. 4 Setting of sensor

2 测试结果分析

2.1 竖向振级特性分析

地面振动竖向振级 V 为

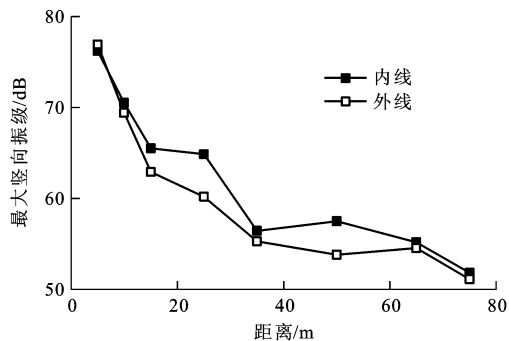
$$V = 20 \lg \left(\frac{a_e}{a_{\text{ref}}} \right) \quad (1)$$

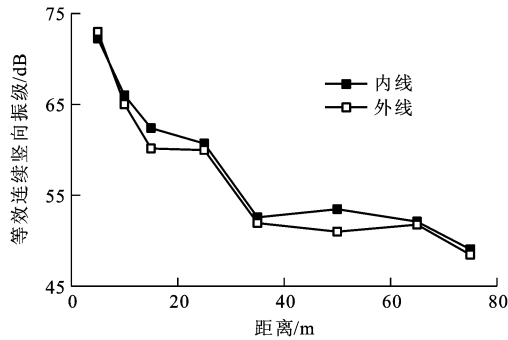
$$a_e = \sqrt{\sum_i 100.1 C_i a_i^2} \quad (2)$$

式中: a_e 为竖向频率计权因子修正后得到的振动加速度有效值; a_{ref} 为基准加速度, 本文取 $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; a_i 为 1/3 倍频程中第 i 个频段的频率 f_i 的振动加速度有效值; C_i 为 a_i 对应的竖向频率计权因子。

高速铁路列车在测区内速度为 $190 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 分别测试了列车从靠近测点的内侧轨道(以下简称内线)和远离测点的外侧轨道(以下简称外线)通过时各测点的地面振动强度。

采取多次测量取平均值的方法来消除测量过程中的偶然误差, 最终得到各测点的最大竖向振级 V_{lmax} 和等效连续竖向振级 V_{le} 分别见图 5、6。测试结果表明: 在距离路堤底边缘 5~75 m 范围内, V_{lmax} 为 51~77 dB, V_{le} 为 48~73 dB。现行的《城市区域环境振动标准》(GB 10070—1988) 规定铁路干线两侧 30 m 外竖向振级不超过 80 dB, 可见测区内的地面振动满足现行铁路环境振动要求。

图 5 V_{lmax} 变化曲线Fig. 5 Changing curves of V_{lmax}

图6 V_{1e} 变化曲线Fig. 6 Changing curves of V_{1e}

对比图5、6中列车从内线和外线通过时引起的各测点振动强度的大小,可发现列车从内线通过时引起的环境振动普遍大于从外线通过时的环境振动,并且在10~65 m范围内表现非常明显,内线与外线最大差值达到4.7 dB,发生在25 m处, V_{1e} 最大差值为2.5 dB,发生在50 m处,但是在小于5 m和大于65 m范围内,内线与外线引起的地面振动差值较小,可忽略不计。实际中对铁路环境振动进行监测时通常没有区分内线与外线,而是以内线与外线环境振动的平均值作为最终监测结果,可见这种做法有可能引起监测值较实际值偏低。

在振动衰减特性方面,内线与外线的 V_{1max} 和 V_{1e} 均随距离增加而呈波动性衰减,并呈现相同的衰减规律,衰减速度随距离增加而降低,在5~35 m范围内衰减速度较快,平均每5 m, V_{1max} 衰减3.5 dB, V_{1e} 衰减3.4 dB。35~75 m范围内衰减速度较慢,平均每5 m, V_{1max} 衰减0.55 dB, V_{1e} 衰减0.44 dB。可见35 m处为衰减速度的转折点,可为环境振动治理位置的选择提供参考。

2.2 振动频谱特性分析

地面振动的频谱特性对环境振动的治理和预测具有重要意义,本次测试利用AWA6291型振动分析仪的1/3倍频程分析功能,分别测试列车从内线和外线通过时,距路堤底边缘为5、15、30、65 m处,最大振动加速度级 V_{2max} 和等效振动加速度级 V_{2e} 的频谱特性,结果见表1。

比较不同距离处的振动频谱特性发现,随着距离的增加,高频振动衰减迅速,低频振动衰减缓慢。在5 m处振动能量主要集中在16~100 Hz,随着距离的增加,振动逐渐以低频为主,至65 m处时,振动能量主要集中在小于4 Hz的频率范围内。

从表1中还可以看到,随着距离的增加,在15、35、65 m处的某些频率范围内都出现了或大或小的

振动强度反弹增大的现象,并且这一现象主要发生在小于20 Hz和大于100 Hz的频率范围内,而在20~100 Hz的频率范围内未发生振动反弹现象。

不少学者对轨道交通引起的环境振动进行了现场测试,均发现了振动放大区的存在^[16-18],本文在50 m(内线)和65 m(外线)也出现振动反弹现象(图5、6)。目前研究者对这一现象产生的机理有2种不同的解释^[19-23]:一种为地面振动频率与土层的固有频率相近,因而发生共振;另一种认为是由振动波在土层之间的反射叠加作用形成的。这2种解释仍需要进一步的理论证明。本文振动频谱测试结果表明:当列车从外线通过时,在65 m处1~10 Hz之间的振动出现较大的反弹;当列车从内线通过时,1~10 Hz对应的振动在65 m处的同一测点处却没有发生振动的反弹现象。从本文的测试结果来看,地面振动与土层发生共振可能不是引起振动放大现象的最主要原因。

3 竖向振级分频段预测方法

3.1 预测方法

列车引起的地面振动频率成分非常复杂,振动的衰减特征不仅受场地条件的影响,而且与振动自身频率紧密相关,高频振动衰减迅速,低频振动衰减相对缓慢^[24]。鉴于此,本文基于波尼茨模型提出了地面振动分频段预测方法,将地面振动频率按一定规则进行分段,以各频段中心频率的振动代表该频段的振动大小,利用波尼茨模型分别对各频段振动进行预测。列车荷载作为线荷载作用下,地表振动随距离衰减的波尼茨模型为

$$\begin{cases} a = a_0 e^{-\alpha(r-r_0)} \\ \alpha = \xi\omega/c \\ \omega = 2\pi f \end{cases} \quad (3)$$

式中: a 、 a_0 分别为 r 、 r_0 处地表振动加速度幅值; r 、 r_0 为测点到振源的距离; α 为地基土的阻尼衰减系数; ξ 为地基土的阻尼比; c 为地基土中振动波速; ω 为振动圆频率; f 为振动频率。

已知频率为 f_i 振动的加速度级 V_i 为

$$V_i = 20 \lg \left(\frac{a_i}{a_{ref}} \right) \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得到,基于波尼茨模型的频率 f_i 的振动加速度级随距离的衰减公式为

$$V_i = V_{0i} - 54.55 f_i \xi (r - r_0) / c \quad (5)$$

式中: V_{0i} 为预测基点处频率 f_i 振动的加速度级。

竖向振级 V 与各频率振动的加速度级 V_i 的关

表 1 不同距离处 $V_{2\max}$ 和 V_{2e} 的频率特征Tab. 1 $V_{2\max}$ and V_{2e} frequency characteristics at different sites

dB

中心 频率	内 线								外 线							
	不同距离(m)处的 $V_{2\max}$				不同距离(m)处的 V_{2e}				不同距离(m)处的 $V_{2\max}$				不同距离(m)处的 V_{2e}			
	5	15	35	65	5	15	35	65	5	15	35	65	5	15	35	65
0.63	79.4	72.6	69.3	80.4	75.8	71.0	66.1	65.4	74.0	68.7	80.5	76.7	66.3	67.1	75.1	74.0
0.80	77.6	74.0	70.5	75.6	73.8	72.2	63.9	67.1	66.8	62.7	76.5	77.8	60.3	60.0	69.9	76.3
1.00	75.5	69.2	69.5	69.2	73.3	68.2	66.1	64.0	64.7	66.2	72.7	75.0	59.1	65.4	67.9	73.2
1.25	75.9	74.1	67.7	65.1	72.0	71.8	63.2	59.7	61.8	62.1	65.4	71.8	60.2	59.9	62.7	68.2
1.60	71.9	72.3	62.5	62.0	69.1	70.2	59.0	58.7	61.6	58.8	65.3	69.1	58.5	55.0	62.4	65.6
2.00	69.3	70.6	61.3	57.7	64.5	68.0	57.7	56.0	56.8	59.1	63.4	68.2	53.8	55.2	60.2	64.0
2.50	67.8	72.7	61.8	55.4	62.1	66.8	57.8	51.8	57.8	56.0	60.7	66.8	54.0	53.3	57.5	61.5
3.15	66.7	70.0	57.6	54.7	59.7	63.6	52.8	50.7	55.0	54.5	59.1	60.2	50.3	51.3	55.9	54.8
4.00	62.5	69.8	56.5	48.9	55.9	63.3	51.1	46.1	51.8	54.3	58.0	56.1	48.5	50.7	53.5	51.5
5.00	62.4	67.9	53.3	51.1	55.9	61.0	48.0	47.5	50.1	50.6	53.5	57.7	46.6	47.5	50.0	49.1
6.30	60.2	66.3	50.8	49.7	53.2	58.8	45.6	44.1	50.2	46.4	49.1	59.4	46.0	43.0	46.6	48.6
8.00	57.2	62.9	46.4	44.2	49.7	55.2	41.8	42.1	48.7	44.2	49.6	58.1	45.3	42.3	47.2	45.4
10.00	53.7	56.6	43.5	44.4	46.2	49.7	39.6	40.4	49.8	47.7	46.9	55.5	45.9	42.4	43.2	42.0
12.50	53.7	54.2	46.1	47.5	49.7	50.3	41.5	43.7	51.2	50.1	47.0	49.4	47.0	45.7	44.1	41.4
16.00	64.6	62.5	51.8	55.2	59.9	58.4	47.3	50.9	61.3	55.7	52.1	50.5	57.0	51.6	47.8	47.1
20.00	68.3	65.1	57.0	57.1	63.2	61.4	52.6	53.4	67.9	63.3	55.6	58.0	63.1	59.1	51.4	52.9
25.00	67.1	62.1	56.5	55.3	62.5	58.2	51.8	51.7	65.9	66.2	56.2	55.4	61.2	61.9	51.7	50.3
31.50	80.3	65.6	55.3	49.3	75.7	61.4	51.1	45.2	72.7	60.2	52.8	49.8	67.7	56.1	49.1	45.8
40.00	92.8	74.7	64.5	60.6	88.4	70.8	60.0	47.1	89.7	69.5	60.8	50.9	84.6	65.1	56.6	47.3
50.00	89.1	70.9	60.0	50.2	84.7	66.8	56.0	46.7	89.7	66.8	63.3	52.0	85.5	63.0	59.6	48.5
63.00	87.8	67.0	60.4	50.2	83.4	63.1	56.2	47.0	91.2	69.1	65.2	56.8	86.6	64.8	61.9	52.3
80.00	77.3	66.8	55.9	47.0	73.4	62.9	52.2	43.8	79.5	64.5	57.6	49.3	75.6	60.1	53.2	46.7
100.00	68.7	58.8	51.9	45.7	64.6	55.3	47.0	42.5	66.7	58.1	48.4	52.6	62.9	55.3	45.2	45.2
125.00	67.1	59.0	52.8	53.4	63.9	55.1	47.5	49.4	65.8	58.7	48.1	59.5	62.5	55.4	44.8	52.3
160.00	68.3	59.6	54.3	53.3	64.9	56.0	48.7	49.6	66.5	64.7	45.4	61.5	63.4	57.4	42.8	55.0
200.00	67.2	54.6	53.5	55.0	62.7	50.2	48.1	51.6	64.8	68.5	49.3	60.8	60.2	59.1	45.4	54.8
250.00	55.5	59.5	53.9	54.1	52.2	56.0	49.6	50.6	52.4	71.2	52.0	53.9	49.9	62.0	48.5	51.2

系为

$$V = 10 \lg \left[\sum_i 10^{0.1(V_i + C_i)} \right] \quad (6)$$

由式(5)、(6)可得到基于波尼茨模型的分频段预测公式为

$$V = 10 \lg \left\{ \sum_i 10^{0.1[V_{0i} - 54.55 f_i \xi(r - r_0)/c + C_i]} \right\} \quad (7)$$

3.2 实例验证

按照 1/3 倍频程将振动频率进行分段(目前对铁路环境振动评价和测量的频率范围为 1~80 Hz),现场利用 AWA6291 型振动测量仪测得 10 m 处各 1/3 倍频程中心频率对应的加速度级 V_i ,见表 2。

测试场地的地表土层为粉质粘土层,对于一般交通荷载引起的地面振动,土的应变量为 10^{-5} 或更小,因此,结合经验取值^[25],振动波速取 $130 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,阻尼比取 0.0276,根据 ISO8041:1990 确定各 1/3 倍频程中心频率 f_i 对应的竖向频率计权因子 C_i (同时也是本文中振动测量仪内置计权因子)。以 10 m 处为预测基准点,采用式(7)分别预测 15、25、35、50、65、75 m 处的竖向振级,预测值与实测值的对比见表 3。

从表 3 的预测值与实测值对比来看,除 25 m 处外,15~75 m 范围内各测点的预测值均比实测值大

表 2 振动加速度级实测值
Tab. 2 Measured values of vibration acceleration levels

<i>i</i>	<i>f_i/Hz</i>	<i>V_i/dB</i>	<i>i</i>	<i>f_i/Hz</i>	<i>V_i/dB</i>	<i>i</i>	<i>f_i/Hz</i>	<i>V_i/dB</i>	<i>i</i>	<i>f_i/Hz</i>	<i>V_i/dB</i>
1	1.00	54.6	6	3.15	46.8	11	10.00	38.9	16	31.50	63.1
2	1.25	53.7	7	4.00	43.2	12	12.50	48.2	17	40.00	78.6
3	1.60	47.5	8	5.00	42.8	13	16.00	57.4	18	50.00	75.0
4	2.00	48.8	9	6.30	41.0	14	20.00	57.2	19	63.00	73.0
5	2.50	48.4	10	8.00	39.9	15	25.00	56.9	20	80.00	67.5

表 3 预测值与实测值对比
Tab. 3 Comparison between predicted values and measured values

距离/m	预测值/dB	实测值/dB	绝对误差/dB
10	66.9	66.9	0.0
15	64.5	62.0	2.5
25	60.7	64.5	-3.8
35	57.8	55.4	2.4
50	55.3	53.7	1.6
65	54.1	52.8	1.3
75	53.6	50.5	3.1

1.3~3.1 dB。由于 25 m 处出现振动反弹,波尼茨模型无法预测地面的振动反弹现象,因此,该点预测值比实测值低 3.8 dB。总体来看,利用波尼茨预测模型对地面振动进行分频段预测能够取得较好的预测精度。本文预测方法是针对铁路路堤段地面振动,由于桥梁段列车荷载是通过各个桥墩传入地下,振源荷载形式不宜视为线荷载。桥梁段地面振动的振源形式与路堤段的不同导致其振动的衰减规律不同,因此,本文预测方法并不适用于铁路桥梁段的地面振动。使用分频段预测方法时理论上只需知道路堤段振源处或其他预测基准点处的各频段振动大小,即可预测其他不同距离处的竖向振级,该方法无法反映地层间的振动反射影响,比较适用于覆盖层较厚且土质均匀的场地。

4 结 语

距离路堤 5~75 m 范围内的地面振动 $V_{1\max}$ 为 51~77 dB, V_{1e} 为 48~73 dB,满足现行的铁路环境振动标准要求。列车从内侧轨道通过时引起的环境振动大于外侧轨道的环境振动, V_{1e} 最大相差 2.5 dB, $V_{1\max}$ 最大相差 4.7 dB。地面竖向振动级在小于 35 m 范围内的衰减速度大于 35 m 后衰减速度,并且高频振动衰减速度大于低频振动衰减速度,在近路堤范围内地面振动以高频振动为主,在大于 65 m 后振动以 4 Hz 的低频振动为主。随距离的增加,某些频率对应的竖向振动级会出现反弹增大现象,并且

这一现象主要发生在小于 20 Hz 和大于 100 Hz 的频率范围内。快速铁路路堤段环境振动分频段预测方法中没有考虑体波效应的影响以及振动波在地层间的反射,而是将地面振动全部按照面波振动衰减规律来考虑,因此,预测结果会存在一定的误差,振动波在地层间的反射和体波效应对地面振动的影响仍需要进一步研究。

参 考 文 献 :
References :

[1] 张鹏飞,雷晓燕,高 亮,等. 铁路环境振动对厂房内精密仪器的影响分析[J]. 振动与冲击,2013,32(16):187-192.
ZHANG Peng-fei, LEI Xiao-yan, GAO Liang, et al. Effect of railway environment vibration on precision instruments inside the plant[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(16): 187-192. (in Chinese)

[2] SHENG X, JONES C J C, PETYT M. Ground vibration generated by a load moving along a railway track[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 228(1): 129-156.

[3] DITZEL A, HERMAN G C. The influence of a rail embankment on the vibrations generated by moving trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 271(1): 937-957.

[4] 朱志辉,余志武,蒋丽忠,等. 高速铁路桥梁及场地土交通振动分析[J]. 振动工程学报,2012,25(5):548-555.
ZHU Zhi-hui, YU Zhi-wu, JIANG Li-zhong, et al. Analysis of bridge-ground vibrations induced by moving loads of high-speed train[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(5): 548-555. (in Chinese)

[5] 董国庆. 高速铁路高架桥的振动与场地隔振分析[D]. 长沙: 湖南大学,2010.
DONG Guo-qing. Analysis on vibration of high-speed railway viaducts and field vibration isolation[D]. Changsha: Hunan University, 2010. (in Chinese)

[6] 李征徽. 高速铁路高架线路环境振动影响与分析[D]. 北京: 北京交通大学,2011.
LI Zheng-hui. Influence and analysis of environmental vibration induced by elevated high-speed railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)

[7] 陈 松. 高架无砟轨道交通引起的环境振动研究[D]. 南昌: 华东交通大学,2012.
CHEN Song. Study on environmental vibration induced by

- elevated unballast track[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [8] KRYLOV V, FERGUSON C. Calculation of low-frequency ground vibrations from railway trains[J]. *Applied Acoustics*, 1994, 42(3): 199-213.
- [9] KOUROUSSIS G, CONTI C, VERLINDEN O. Investigating the influence of soil properties on railway traffic vibration using a numerical model[J]. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 2013, 51(3): 421-442.
- [10] CHEN Y J, CHANG S M, HAN C K. Evaluation of ground vibration induced by high-speed trains on embankments[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2010, 58(1): 43-53.
- [11] CHEN Y J, CHIU T J, CHEN K Y. Evaluation of ground vibration induced by high-speed trains on bridge structures[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2011, 59(4): 372-382.
- [12] 毕苏萍, 时 刚, 高广运. 饱和地基上铁路交通引起的地面振动分析[J]. *郑州大学学报: 工学版*, 2010, 31(3): 73-76.
- BI Su-ping, SHI Gang, Gao Guang-yun. Ground vibration due to railway traffic on saturated half-space[J]. *Journal of Zhengzhou University: Engineering Science*, 2010, 31(3): 73-76. (in Chinese)
- [13] 高广运, 赵 宏, 张 博, 等. 饱和分层地基上列车运行引起的地面振动分析[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(12): 1805-1811.
- GAO Guang-yun, ZHAO Hong, ZHANG Bo, et al. Analysis of ground vibration induced by trains on saturated layered ground[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2013, 41(12): 1805-1811. (in Chinese)
- [14] 贺玉龙, 向 怡. 郑西高速铁路渭南北高架车站环境振动测试分析[J]. *噪声与振动控制*, 2012, 32(3): 152-154, 187.
- HE Yu-long, XIANG Yi. Test and analysis of environmental vibration of Weinan north elevated station of Zhengzhou-Xi'an High-Speed Railway[J]. *Noise and Vibration Control*, 2012, 32(3): 152-154, 187. (in Chinese)
- [15] 雷 彬, 王 毅. 关于城市快速轨道交通振动评价量的探讨[J]. *噪声与振动控制*, 2007, 27(2): 106-108.
- LEI Bin, WANG Yi. Investigation on the index of vibration estimation produced from the urban rail[J]. *Noise and Vibration Control*, 2007, 27(2): 106-108. (in Chinese)
- [16] 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.
- LI Zhi-yi, GAO Guang-yun, FENG Shi-jin, et al. Analysis of ground vibration induced by high-speed train[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2007, 35(7): 909-914. (in Chinese)
- [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 Guang-yun, LI Zhi-yi, FENG Shi-jin, 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. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] FUJIKAKE T A. A prediction method for the propagation of ground vibration from railway trains on level tracks with welded rails[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1989, 128(3): 524-527.
- [20] 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.
- XIA He, ZHANG Nan, CAO Yan-mei. Experimental study of train-induced vibrations of ground and nearby buildings[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2004, 26(4): 93-98. (in Chinese)
- [21] 张 杨, 陈国兴, 毛昆明, 等. 轨道交通运行引起的场地振动实测研究现状[J]. *防灾减灾工程学报*, 2011, 31(2): 225-231.
- ZHANG Yang, CHEN Guo-xing, MAO Kun-ming, et al. Status quo of research on measurement of ground vibration induced by rail transit[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2011, 31(2): 225-231. (in Chinese)
- [22] 李春峰, 白 冰, 贺美德, 等. 轨道交通引起的环境振动及其影响规律[J]. *市政技术*, 2006, 24(4): 220-223, 233.
- LI Chun-feng, BAI Bing, HE Mei-de, et al. The environmental vibration and influence regular of railway transit[J]. *Municipal Engineering Technology*, 2006, 24(4): 220-223, 233. (in Chinese)
- [23] 王福彤, 陶夏新, 崔高航, 等. 地面城轨交通近轨道区域自由地表振动实测研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(5): 131-135.
- WANG Fu-tong, TAO Xia-xin, CUI Gao-hang, et al. Test in situ for free ground vibration near urban railway line[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(5): 131-135. (in Chinese)
- [24] VERHAS H P. Prediction of the propagation of train-induced ground vibration[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1979, 66(3): 371-376.
- [25] 何 俊. 成灌快铁环境振动特性分析及评价的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- HE Jun. Research on environmental vibration characteristics analysis and evaluation of Cheng-Guan High-Speed Railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)