

文章编号: 1000-7598-(2008)11-3113-06

列车运行对周围地面振动影响的试验研究

陈建国^{1, 2}, 夏 禾¹, 肖军华¹, 曹艳梅¹

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 石家庄铁道学院 土木分院, 石家庄 050043)

摘 要: 针对日益严重的轨道交通引起的环境振动问题, 通过对京—广铁路线附近某小区内地面的竖向、横向振动速度和加速度的现场测试, 研究了运行列车引起的地面振动及其传播规律。由试验分析可知, 列车引起的地面振动速度、加速度振级均随着列车速度的提高和轴重的增加而增大。速度每小时提高 10 km 时, 速度振级和加速度振级均增大约 3 dB; 车速相同的货车比客车引起的速度振级竖向大 10 dB 左右, 横向大 5~15 dB 左右; 加速度振级竖向大 12 dB, 横向大 8 dB。钢轨接缝附近地面的振动比无缝附近的地面振动大, 速度振级大 2~6 dB。振动随着距振源距离的增大而逐渐减小, 竖向振级的衰减过程表现出一定的波动性; 横向振级的衰减随距离增大单调减小。

关 键 词: 列车; 地面; 振动; 现场试验

中图分类号: U 260.17

文献标识码: A

Experimental study of ground vibrations induced by moving train

CHEN Jian-guo^{1, 2}, XIA He¹, XIAO Jun-hua¹, CAO Yan-mei¹

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Branch of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: To study more and more serious vibrations problem induced by moving train traffic in urban areas, in a residential district near Jing-Guang Railway, field tests of velocity and acceleration vibrations of ground were carried out during train moving; and some conclusions were drawn. It is shown that the vibrations of ground due to moving train rise with train speed or axle load increasing. Generally, when speed of train increases 10 km per hour, the vibrations level raises 3 dB, while at the same speed, vibration induced by freight train is bigger than passenger train because of the difference of axle load. In the test, at speed of 50 km per hour or so, the vertical velocity vibration induced by freight train is about 10 dB bigger than that of passenger train, and as for the difference of lateral velocity vibration, this magnitude is about 5 to 15 dB; moreover, as for the difference of vertical and lateral acceleration vibrations, they are 12 dB and 8 dB respectively. The vertical velocity vibration of ground near the joints of rails is 2 to 6 dB bigger than the other positions far from joints. Ground vibration decreases gradually with increasing in the distance between testing locations and rail; and there is a fluctuated characteristic of the decay process for vertical vibrations; while the lateral vibration decreases monotonically with increasing in the distance between testing locations and rail.

Key words: train; ground; vibrations; field experiments

1 引 言

铁路交通对环境的振动污染越来越引起人们的关注, 已经被列为七大污染之一^[1-3]。世界许多国家和地区诸如日本、美国、德国、比利时等发达国家都制定了相应的规范对其引起的影响限值进行了规定, 我国的《城市区域环境振动标准》^[4]也对这一影响有限值规定。各国学者对列车引起的环境振动进行了研究, 并取得了很多的成果, 但大都集中

在对自由场地或建筑物进行了实测^[4-9], 而对建筑物间的地面振动情况研究和实测的较少, 因此研究振动在建筑物间地面的传播规律, 对分析建筑物的振动和隔振都有着重要的意义, 本文结合工程实际, 对列车这行的振动影响进行了试验研究。

2 工程概况

京—广铁路线靠近石家庄北二环路附近的一个住宅小区现场平面如图 1 所示, 有 5 栋 6 层住宅

收稿日期: 2007-04-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.50538010); 比利时-中国政府间合作项目 (BIL07/07); 北京交通大学科技基金 (No.2007XM027)。

作者简介: 陈建国, 男, 1973 年生, 博士, 工程师, 主要从事轨道交通引起的环境振动研究。E-mail: jgchen1973@163.com

楼，结构形式为砖混结构，层高 2.8 m，条形基础，其中靠近铁路的 3 栋建于 2000 年，无地下室，每栋 4 个单元；其它 2 栋建于 2006 年，有地下室，每栋 2 个单元，离线路最近的建筑物只有 14 m。

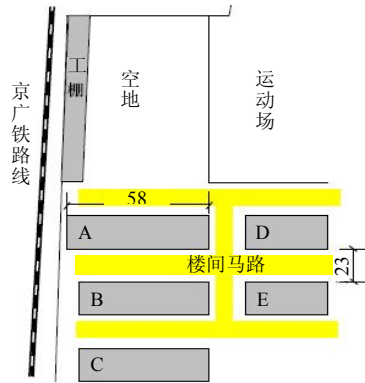


图 1 试验现场平面图 (单位: m)
Fig.1 Experimental site skeleton (unit: m)

据楼内居民反映，列车通过时楼内有明显的振动，夜间休息有被振动吵醒的现象发生，场地参数见表 1。通过对该小区内建筑物和地面的振动速度和加速度测试，研究了运行列车对周围建筑物的振动影响以及在地面的传播规律。本文对地面振动及其传播部分作了介绍，有关建筑物的振动部分另在他文论述。

表 1 场地土质特性参数

Table 1 Parameters of experimental site soils

土类	层厚 /m	承载力 /kPa	压缩模量 /MPa	含水率 /%	密度 /(g·cm ⁻³)
粉质黏土	0.5~2.0	150	17.0	19.6	1.91
粉土	2.0~2.4	130	17.5	24.0	1.82
粉质黏土	2.0~2.3	150	17.5	21.2	1.75
粉土	2.2~3.0	160	18.5	22.1	1.90
粉质细砂	1.9~2.5	200	18.0	22.5	1.95
中粗砂	5.4~5.6	320	22.0	22.0	2.11
粉土	2.8~3.0	150	16.5	23.6	1.90

3 试验及其分析

3.1 测点布置

选择 A、B 楼之间的一条马路作为试验场地，马路的结构形式为：底层为 30 cm 厚 3:7 灰土，面层为 18 cm 厚 C25 素混凝土。在测试范围内，地下无任何垂直于马路方向的管沟。在距离边轨的 5 m 处设置第 1 个测点，10 m 处设置第 2 个测点，以后每隔 10 m 设置一个，最远测点设在距离轨道 80 m

处，共设置 9 个测点，每个测点都布置了竖向传感器，距离线路最近的 5 个测点还同时布置了垂直于线路的横向传感器。在靠近 B 栋楼房处的线路上有一个钢轨接缝，为了研究钢轨接缝对地面振动的影响，在接缝处和距离接缝 100 m 的地方各设置一个竖向传感器进行对比，测点距离线路边轨均为 10 m。测点布置如图 2 所示。

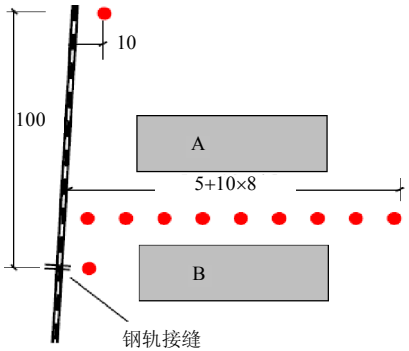


图 2 测点布置图 (单位: m)
Fig.2 Arrangement of testing apparatuses on ground (unit: m)

3.2 试验荷载及试验仪器

试验荷载为京广线上正常行驶的列车。试验数据的采集使用东方振动和噪声技术研究所制造的 INV303/306 型采集仪和哈尔滨工力所生产的 891-IV 型传感器 (本试验中的采样频率为 200 Hz)，对运行列车的速度测定采用 LD-98-II P 型雷达测速仪 (图 2)，各仪器和传感器在测试前均进行了调试和标定。

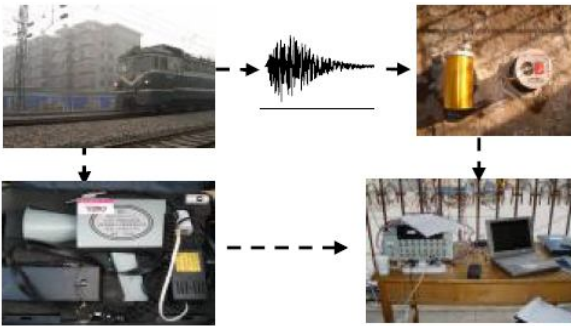


图 3 数据采集流程图
Fig.3 Data collecting flowchart

3.3 试验结果分析

振级计算采用国际标准化组织 (International Standard Organize) 制定的 ISO2631 标准规定的计算的方法，用列车通过时采集数据的有效值 (RMS) 进行计算^[11-12]。速度振级的计算为

$$L_v = 20 \lg(v/v_{\text{ref}}) \quad (1)$$

式中: L_v 为速度振级 (dB); v 为振动速度的有效值 (m/s); v_{ref} 为基准振动速度取 1×10^{-8} m/s。

加速度振级为

$$L_a = 20 \lg(a/a_{\text{ref}}) \quad (2)$$

式中: L_a 为速度振级 (dB); a 为振动速度的有效值 (m/s²); a_{ref} 为基准振动速度取 1×10^{-6} m/s²。

4 地面振动速度

4.1 地面振动速度时程曲线

图 4 和图 5 分别为车速是 40 km/h 货车通过时场地竖向和横向振动速度时程曲线。由图 4 可以看出, 5 m 处的振动明显大于 50 m 和 30 m 处的振动水平, 5 m 处的竖向振动速度一般为 0.5 mm/s 左右, 最大值可达到 1.7 mm/s, 50 m 处的为 0.1 mm/s; 5 m 处的横向振动速度一般为 0.5 mm/s 左右, 最大值可达到 1.5 mm/s, 50 m 处的为 0.1 mm/s, 并且靠近振源处测点的振动速度时程曲线能更好的反映出列车通过时的动力特性。

4.2 竖向振动速度随距离的衰减规律

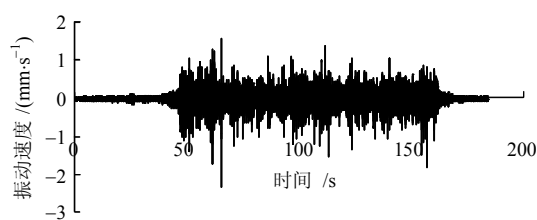
将列车通过时各测点的竖向振动速度振级对比于图 6~9, 其中图 6 和图 8 分别是不同车速的客车和货车引起的地面竖向振动速度对比图, 图 7 为客车不同平均车速引起振级的对比图, 图 9 为不同轴重的列车引起振级的对比图。

综合分析图 6~9 可以发现, 地面的竖向振动速度随着与振源距离的增大振级不断减小, 当客车车速在 56~113 km/h 之间时, 距轨道边 5 m 处的振级为 83~95 dB, 80 m 处测点的振级相应衰减了约 12~15 dB; 衰减规律还表现为一定的波动性, 在 50 m 和 70 m 各出现一个放大区并且距离轨道近的放大效果大于较远处的放大效果; 地面的振动随着车速的提高而增大, 当客车的平均车速由 66 km/h 增大到 105 km/h 时, 振级增大 8~10 dB, 每提高 10 km/h 振级增大 2~3 dB; 时速为 56 km/h 的客车引起的竖向速度振级小于速度为 46 km/h 的货车引起的振级, 一般小 10 dB 左右, 这是因为货车的轴重和减振体系与客车的差异造成的。提速后的列车特别是轴重增大以后的货车引起的振动是影响环境的主要因素。

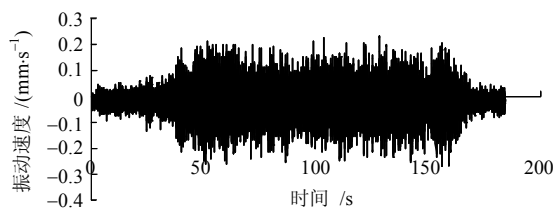
4.3 横向振动速度随距离的衰减规律

图 10 和图 11 分别为不同速度的客车和货车引

起的地面横向振动的振级对比图, 图 12 是客车不同平均车速引起横向振级的对比图, 图 13 为不同轴重的列车引起的横向振级对比图。

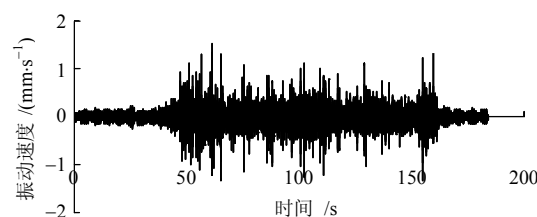


(a) $D=5$ m

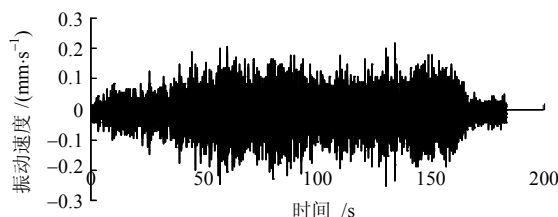


(b) $D=50$ m

图 4 场地竖向振动速度实测时程曲线
Fig.4 Time history curve of vertical velocity



(a) $D=5$ m



(a) $D=30$ m

图 5 场地横向振动速度实测时程曲线
Fig.5 Time history curve of lateral velocity

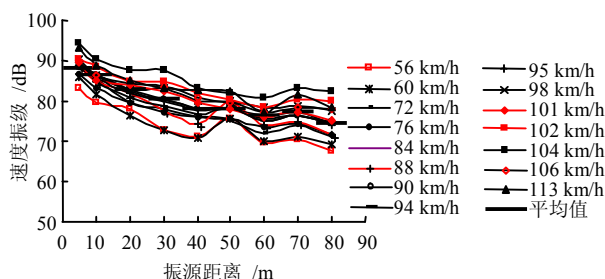


图 6 竖向速度振级随距离的衰减 (客车)
Fig.6 Decay of vertical velocity vibration with distance to rails (passenger train)

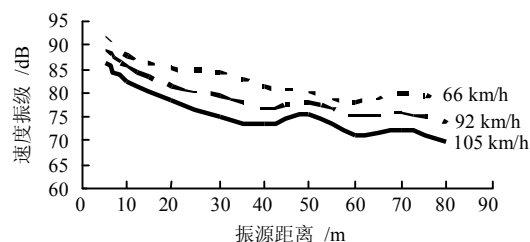


图7 不同平均速度下的竖向速度振级对比

Fig.7 Comparison of vertical vibration for different speeds

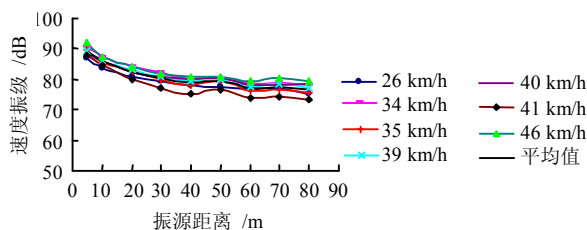


图8 竖向速度振级随距离的衰减(货车)

Fig.8 Decay of vertical vibration with distance to rails (freight train)

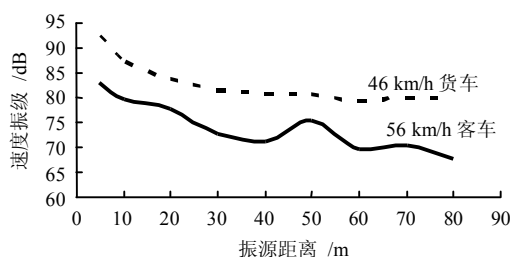


图9 不同轴重的列车引起的竖向速度振级对比

Fig.9 Comparison of vertical vibration for different axle loads

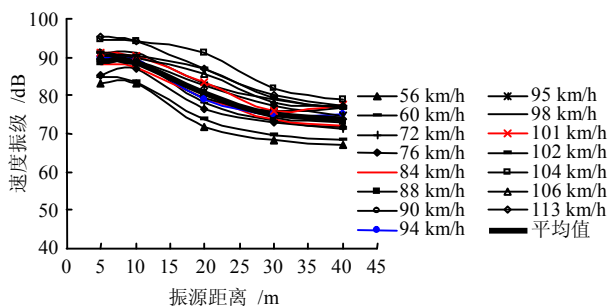


图10 横向速度振级随距离的衰减(客车)

Fig.10 Decay of lateral velocity vibration with distance to rails (passenger train)

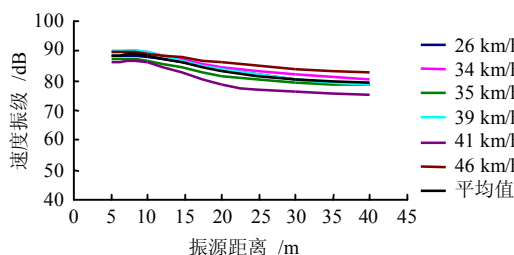


图11 横向速度振级随距离的衰减(货车)

Fig.11 Decay of lateral velocity vibration with distance to rails (freight train)

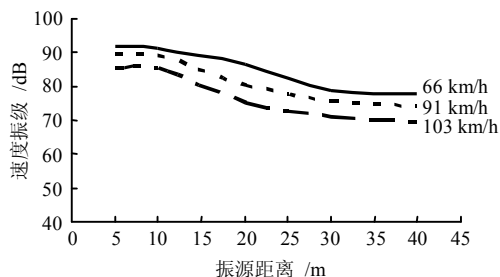


图12 不同平均速度下的横向振动速度对比

Fig.12 Comparison of lateral vibration for different speeds

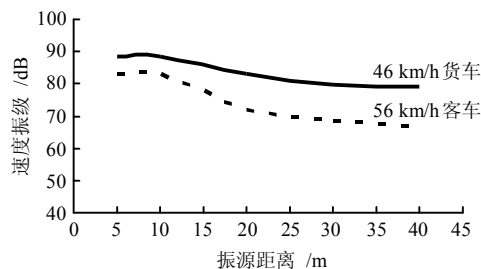


图13 不同轴重的列车引起的横向速度振级对比

Fig.13 Comparison of lateral vibration for different axle loads

4.4 钢轨接缝对地面振动速度的影响

对实验过程中列车通过接缝线路时无接缝处地面的振动速度振级进行了对比, 见图 14 和表 2。

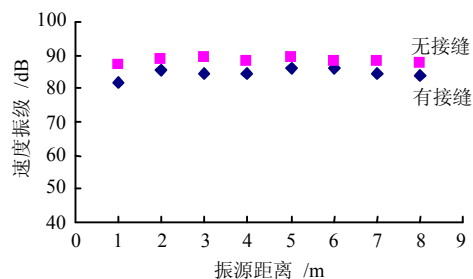


图14 有、无缝处地面速度振级对比

Fig.14 Ground velocity vibrations with or without rail joints

表2 有、无缝处地面速度振级对比

Table 2 Ground velocity vibrations with or without joints

比较	不同车速 (km/h) 振级 /dB							
	客车				货车			
	76	90	94	98	103	34	39	40
有接缝	87.4	88.7	89.1	88.3	89.5	88.3	88.0	87.8
无缝处	81.9	85.5	84.6	84.5	86.2	86.1	84.2	84.1
振级差	5.5	3.2	4.5	3.8	3.3	2.2	3.8	3.7

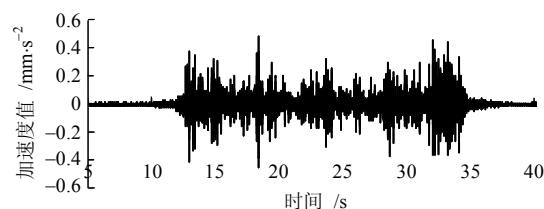
表 2 表明, 有接缝处的地面振动明显大于无缝处的地面振动, 二者的振级一般相差 2~6 dB 左右, 这主要是由于轨道接头处的不平顺值突然变大, 列车对地面的冲击力也相应增大的原因造成

的, 因此建议铁路设计单位在线路设计时, 要尽可能在住宅区附近的线路设计为无缝线路以使线路接缝远离住宅区。

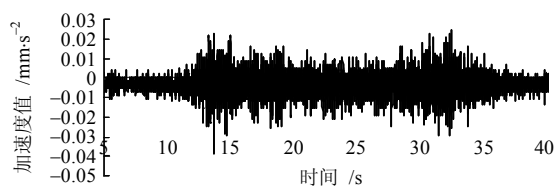
5 地面振动加速度

5.1 地面振动加速度时程曲线

图 15 和图 16 分别给出了时速为 92 km/h 客车引起的场地竖向和横向振动加速度时程曲线。由图可以看出, 5 m 处的振动明显大于 50 m 和 30 m 处的振动水平, 5 m 处的振动加速度一般为 0.1 mm/s^2 , 30 m 和 50 m 处的振动加速度为 0.01 mm/s^2 。同样, 靠近振源处测点的振动加速度时程曲线能更好的反映出列车通过时的动力特性。

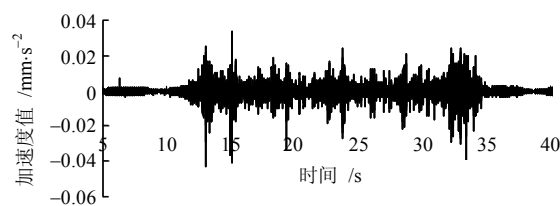


(a) $D=5 \text{ m}$

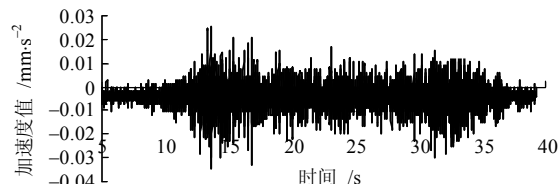


(b) $D=50 \text{ m}$

图 15 场地竖向振动加速度实测时程曲线
Fig.15 Time history curves of vertical acceleration



(a) $D=5 \text{ m}$



(b) $D=30 \text{ m}$

图 16 场地横向振动加速度实测时程曲线
Fig.16 Time history curves of lateral acceleration

5.2 竖向振动加速度随距离的衰减规律

图 17 为列车通过时引起的地面竖向振动加速

度的曲线图, 图 18 为不同车速和轴重的列车引起地面竖向振动加速度的对比图。通过分析, 可以发现距轨道边 5 m 处的加速度振级为 100~114 dB, 80 m 处的振级相应衰减了 20~25 dB; 地面的振动随着车速的提高而增大, 当客车车速由 54 km/h 增大到 92 km/h 时, 振级增大 2~15 dB; 时速为 54 km/h 的客车引起的竖向加速度振级小于相同速度的货车引起的振级, 一般小 12 dB 左右。

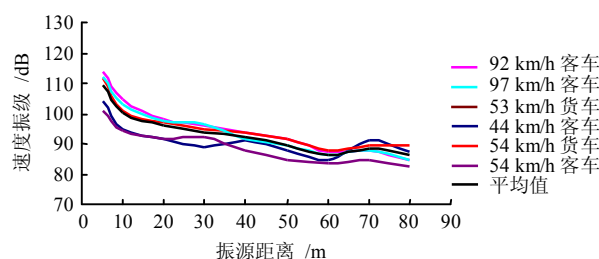


图 17 竖向加速度振级随距离的衰减 (客车)
Fig.17 Decay of vertical acceleration vibration with distance to rails (passenger train)

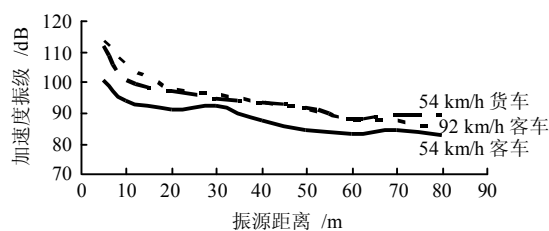


图 18 不同车速和轴重下的竖向加速度振级对比
Fig.18 Comparison of vertical acceleration vibration for different speeds and axle load

5.3 横向振动加速度随距离的衰减规律

图 19 为列车引起的地面横向振动加速度的振级对比图, 图 20 为不同车速和轴重的列车引起地面横向振动加速度的对比图。由图可以看出, 地面的横向振动随着振源距离的增大而单调减小, 距轨道边 5 m 处的加速度振级为 100~114 dB, 40 m 处的振级相应衰减了 15 dB; 地面的横向振动加速度随着车速的增大而增大, 当车速由 54 km/h 增大到 92 km/h 时, 振级增大 4~14 dB; 车速相同的货车引起的振级大于客车引起的振级, 振级差别一般为 8 dB 左右。

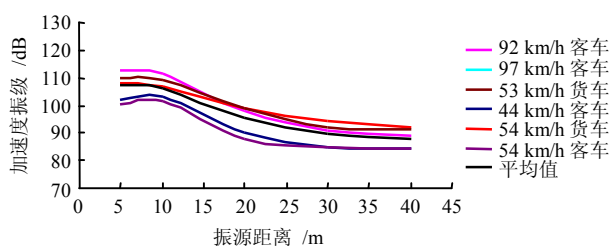


图 19 横向加速度振级随距离的衰减 (客车)
Fig.19 Decay of lateral acceleration vibration with distance to rails (passenger train)

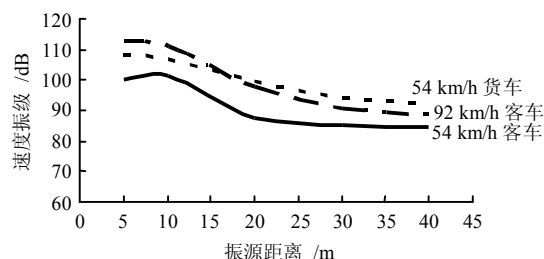


图 20 不同车速和轴重下的横向加速振级对比

Fig.20 Comparison of vertical acceleration vibration for different speeds and axle load

6 结 论

(1) 列车引起的楼间地面的振级随着车速的提高而增大, 当客车速度由 56 km/h 增大到 113 km/h 时, 竖向速度振级增大 15 dB, 横向增大 10 dB 左右; 加速度振级同样随着车速的提高而增大。

(2) 列车的轴重对地面的振动有很大的影响, 在本次测试的车速范围内, 车速基本相同的货车引起的振级大于客车引起的振级。竖向速度振级相差值 10 dB, 横向为 5~15 dB; 竖向加速度振级相差 12 dB, 横向相差 8 dB。

(3) 地面振动随振源距离的增大而减小, 地面竖向振动的衰减规律表现出一定的波动性; 横向振动则表现为随着距离的增大而单调减小。

(4) 有接缝处的地面振动大于无缝处的地面振动, 二者的速度振级一般相差 2~6 dB 左右。

本次试验是在车速相对较低的情况下对建筑物间的地面振动及传播规律进行的测试和研究, 随着列车提速和轴重的增加, 其规律有何异同有待进一步地试验和研究。

参 考 文 献

- [1] 夏禾, 张楠, 曹艳梅. 列车对周围地面及建筑物振动影响的实验研究[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 China Railway Society*, 2004, 26(4): 93—98.
- [2] XIA H, ZHANG N, CAO Y M. Experimental study of train-induced vibrations of environments and nearby buildings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 280: 1 017—1 025.
- [3] 夏禾, 曹艳梅. 轨道交通引起的环境振动问题[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1 (1): 44—51.
XIA He, CAO Yan-mei. Problem of railway traffic induced vibrations of environments[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2004, 1(1): 44—51.
- [4] GB10070—88. 城市区域环境振动标准, 1988.
- [5] 高广运, 彭争光, 李志毅. 磁悬浮列车产生的地面振动及其对周围环境的影响[J]. 工程建设与设计, 2005, (4): 7—9.
GAO Guang-yun, PENG Zheng-guang, LI Zhi-yi. Ground vibration and the influence on environment by magnetic-levitating train[J]. *Construction & Design for Project*, 2005(4): 7—9.
- [6] 蒋建群, 周华飞, 张土乔. 弹性半空间体在移动集中荷载作用下的稳态响应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (4): 440—444.
JIANG Jian-qun, ZHOU Hua-fei, ZHANG Tu-qiao. Steady-state response of an elastic half-space under a moving point load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(4): 440—444.
- [7] 王常晶, 陈云敏. 列车荷载在地基中引起的应力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (7): 1 178—2 005.
WANG Chang-jing, CHEN Yun-min. Analysis of stresses of stresses in train-induced ground[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(7): 1 178—1 187.
- [8] CELEBI E, SCHMID G. Investigation of ground vibrations induced by moving loads[J]. *Engineering Structures*, 2005, 27: 1 981—1 998.
- [9] DEGEN K G, BEHR W, GRUTZ H P. Investigations and results concerning railway-induced ground-borne vibrations in Germany[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293: 865—872.
- [10] LARS Hall. Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, 23: 403—413.
- [11] ISO Standard. ISO2631/1: Mechanical Vibration and shock-evaluation of human exposure to whole body vibration——Part1: General requirements[S]. Washington D. C.: ISO Standard, 1997.
- [12] ISO Standard. ISO2631/2: Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole body vibration —— Part2: Continuous and shock induced vibration in buildings (1—80 Hz)[S]. Washington D. C. ISO Standard, 1989.