

空沟、碎石填充沟和排桩隔振效果试验研究^①

孙立强¹, 李 嘉¹, 刘 彬², 樊继良³

(1.天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072;

2.天津市滨丽建设开发投资有限公司,天津 300301; 3.天津市勘察院,天津 300191)

摘要:高速铁路、地铁、轻轨等轨道交通迅速发展深入城市内部人群密集地区,对环境产生的振动影响不容忽视。空沟、碎石填充沟和排桩是三种常用的轨道交通隔振措施。通过大比例尺试验,采用加速度作为振动的评价指标,分别研究空沟、碎石填充沟和排桩的隔振效果。各组试验除隔振措施外其他条件均完全相同,使不同隔振措施的隔振效果具有较强的可比性,通过比较三种隔振措施与无隔振措施下影响区的加速度衰减率,评价其隔振效果,同时通过三种隔振措施下距离振源不同位置处的加速度比较其隔振效果。研究成果可为轨道交通隔振措施及方案的选取提供依据。

关键词: 隔振; 空沟; 碎石填充沟; 排桩; 模型试验

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0342-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0342

Experimental Study on Vibration-isolation Effects of Open Trench, Gravel-filled Trench, and Piles in a Row

SUN Li-qiang¹, LI Jia¹, LIU Bin², FAN Ji-liang³

(1.State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2.Tianjin Binli Construction Development Investment Co., Ltd, Tianjin 300301, China;

3.Tianjin Institute of Geotechnical Investigation & Surveying, Tianjin 300191, China)

Abstract: Rail transportation such as high-speed railways, metros, and skytrains develop fast and go deep into the densely populated inner cities, where its vibration impact on the environment cannot be ignored. Open trenches, gravel-filled trenches, and piles in a row are three common vibration-isolation measures. We established a model test, which uses the acceleration as the evaluation index of vibration, and studied the vibration-isolation effects of open trenches, gravel-filled trenches, and piles in a row. Test conditions among each group of tests are the same except for the isolation measure. Each isolation measure's isolation effect can be analyzed by contrasting the results between this isolation measure and the test group without an isolation measure; the effects of different isolation measures can be analyzed by contrasting the results between test groups without different isolation measures, so the effects of different vibration-isolation measures can be objectively evaluated.

Key words: vibration isolation; open trench; gravel-filled trench; piles in a row; model test

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目(13JCZDJC35300)

作者简介: 孙立强(1979—), 男, 山东青岛人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事软土地基处理及岩土工程等方面的教学和科研。

E-mail: slq0532@126.com

通讯作者: 李 嘉(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: li_jia@tju.edu.cn

0 引言

随着城市化进程的加快,高速铁路、城际快速列车、城市地铁和轻轨等轨道交通由于其方便、快捷、安全、准时等优点迅速发展,已深入到城市建筑 and 人群密集区域。轨道交通引起的振动对城市生活环境和工作环境产生的影响引起人们的高度重视,轨道交通引起的环境振动及控制研究成为一个重要的研究课题^[1]。

国内外已有很多学者对轨道交通引起的周围环境的振动进行了理论研究,研究表明,当列车运行速度较高时,将引起周边环境的强烈振动,尤其当列车运行速度接近地基表面波速时,将引起列车与地基的共振^[2],需要采取一定的隔振措施来降低轨道交通振动对周边环境的影响。

空沟(又称隔振沟)、碎石填充沟和排桩是三种常见的轨道交通隔振措施。卜建清^[3]定性简述了设置地下隔振沟和隔振墙减振效果。曹志刚等^[4]从理论上运用饱和半空间模型来研究地基上隔振沟对高速列车的隔振效果,表明随着列车运行速度的提高,空沟的隔振效果明显提高。李志毅等^[5]基于瑞利波散射的积分方程法,研究了瑞利波作用下弹性土体中排桩隔振效果。为避免理论模型假设造成的误差,一些学者用有限元方法对隔振措施进行了研究,冯牧等^[6]通过有限元方法结合现场测试,分析了隔振沟对地铁周边建筑的隔振效果;肖世伟等^[7]运用无限元和黏弹性边界模拟土体的半无限空间状态对空沟隔振进行了数值分析。

以上研究能够从经验上或者理论上得到某种隔振措施的隔振效果,但是在建立理论模型或数值模型的过程中进行了相当程度的简化,导致计算结果和实际有一定差距,且计算结果未能得到试验的验证。同时上述研究多围绕某一种隔振措施展开研究,不同隔振措施的效果之间难以相互比较。因此,本文通过几组可供对比的模型试验,分别进行不设置障碍、空沟、碎石填充沟和排桩的试验,除隔振措施外其他条件相同,使不同的隔振措施具有真实的可比性。

1 试验原理和设备

针对空沟、碎石填充沟和排桩三种隔振措施分别进行模型试验,其中空沟又对不同深度、不同宽度等工况,混凝土桩又对不同桩长、不同桩距等工况分别进行试验。各组试验除隔振措施外其他条件均完全相同,使不同隔振措施的隔振效果具有较强的可

比性。不同隔振措施的试验结果和不设置隔振措施的试验组进行对比可分析该种措施的隔振效果,不同隔振措施的试验结果之间进行对比可分析不同隔振措施的隔振效果,从而使评价更客观。

试验使用的设备主要包括激振器、功率放大器、任意波信号发生器、数据采集箱、信号调理仪、力传感器和加速度传感器。激振器的四端分别用四根弹簧与铁架的四个角点连接,如图 1 所示;将传感器固定在与地面水平贴合良好的角铁上,保证其测量结果的准确性,如图 2 所示。传感器测试到的信号采用动态信号采集分析系统 CRAS 进行采集。



图 1 试验采用的激振器

Fig.1 The vibration exciter used in the test



图 2 加速度传感器固定

Fig.2 The accelerometer fixed on the angle iron

2 试验方案

试验仪器布置如图 3 所示,其中激振器位置处设置力传感器,1~6 为六个加速度传感器,图中已标明它们和振源的距离。其中为准确测试振动波经过隔振结构后距离隔振措施距离较近位置处的变化情况,设置 1、2、3 三个测点。测试结果取平均值以减小试验误差影响,和振源的距离可近似认为均为 2.0 m。

为得到更好的试验结果,对地基土进行处理,开

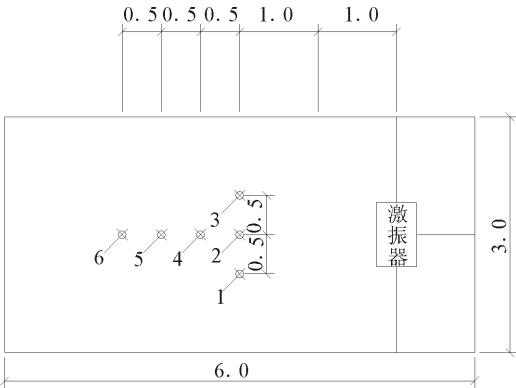


图 3 试验仪器布置平面图
Fig.3 Test instrument layout plan

挖一个长 6 m、宽 3 m、深 0.6 m 的基坑,将土体中不均匀的石块、树根等杂物筛除后分三层夯实。

李志毅^[8]通过实测和理论计算指出,高速列车引起地面振动的主频在 100 Hz 左右,属于高频范围,在距轨道近处出现,随距轨道距离增大衰减为中频(40~100 Hz),距轨道 15 m 以上时主要由低频控制。因此,本试验分别对不同工况采用不同频率的波激振,激振波的频率范围为 20~80 Hz,属于中低频的范围,以模拟轨道交通荷载引起的路基的振动,分别得到不同频率下各测点位置的加速度。

3 不同试验工况方案和试验结果

通常采用振级作为对振动的评价指标,振级系由加速度得到,我国相关国家标准^[9]规定了振动加速度级的计算方法:

VAL = 20lg(a/a₀) (1)

式中:VAL 为振级,单位为 dB;a 为振动加速度有效值;a₀ 为基准加速度。

各国对振级的规定基本按式(1)计算,但稍有差

异,体现在对振动加速度有效值 a_{rms} 进行一定的修正和基准加速度 a_0 取值的差异。

本试验使用的激振设备功率有一定的限制,产生的振动强度和列车荷载引起的振动有一定的差距,因此采用加速度作为振动的评价指标。激振器施加的力由功率放大器调节,无法精确控制其大小,所以在进行结果对比时,采用加速度峰值除以力峰值作为测试结果,消除激振器施加力大小不同引起的结果差异。以下为不同工况的试验详细方案和测试结果。

3.1 不设置障碍的试验结果

为了比较各种隔振措施的不同效果,首先在不设置障碍情况下进行试验,作为各种隔振措施试验的对照组,试验方案如图 3 所示。试验得到不同频率激振力作用下各测点的加速度值,经过处理如表 1 所示。将不同频率下各测点试验值绘制成随距离变化的曲线(图 4)。

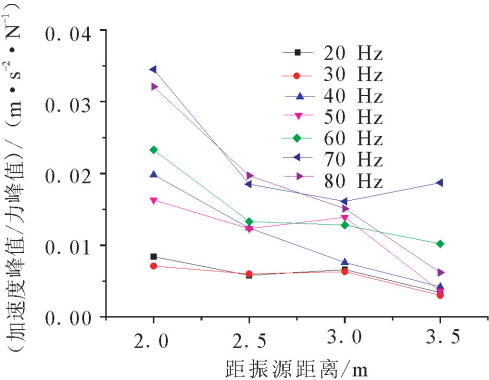


图 4 不设障碍时加速度峰值/力的峰值随距离变化曲线
Fig.4 Variation curve of peak acceleration / peak force with distance when no obstacle was installed

表 1 不设障碍时不同频率下加速度峰值/力的峰值测试结果(单位:(m/s²)/N)

Table 1 The test results of peak acceleration / peak force at different frequencies when no obstacle was installed (unit:(m/s²)/N)

距振源距离/m	激振频率/Hz						
	20	30	40	50	60	70	80
2.0	0.008 4	0.007 1	0.019 8	0.016 3	0.023 3	0.034 5	0.032 1
2.5	0.005 8	0.006 0	0.012 4	0.012 3	0.013 3	0.018 5	0.019 7
3.0	0.006 6	0.006 3	0.007 6	0.013 9	0.012 8	0.016 1	0.015 1
3.5	0.003 4	0.003 0	0.004 2	0.003 6	0.010 2	0.018 7	0.006 2

3.2 设置空沟的试验结果

空沟是一种常见的简单隔振措施,对不同宽度和深度的空沟隔振效果进行试验研究,试验设置的空沟如图 5 所示,试验方案如图 6 所示。空沟宽×

深分别为 0.2 m×0.25 m、0.2 m×0.5 m、0.6 m×0.5 m,其他仪器在图 1 试验仪器布置平面图中已有标示,没有变动不再重新标示。试验得到不同频率激振力作用下各测点的加速度值,经过处理如表 2

所示,将不同频率下各测点试验值绘制成随距离变化的曲线(图 7)。



图 5 试验设置的空沟

Fig.5 The open trench installed in the test

3.3 设置碎石填充沟的试验结果

碎石填充沟也是一种常见的隔振措施,在宽×

深为 0.2 m×0.5 m 的空沟内填入碎石,如图 8 所示,试验方案如图 9 所示。同样进行上述试验,得到不同频率激振力作用下各测点的加速度值,经过处理如表 3 所示,将不同频率下各测点试验值绘制成随距离变化的曲线(图 10)。

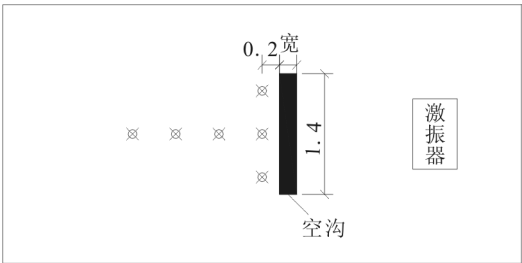


图 6 设置空沟的试验方案布置

Fig.6 Test program of installing open trenches

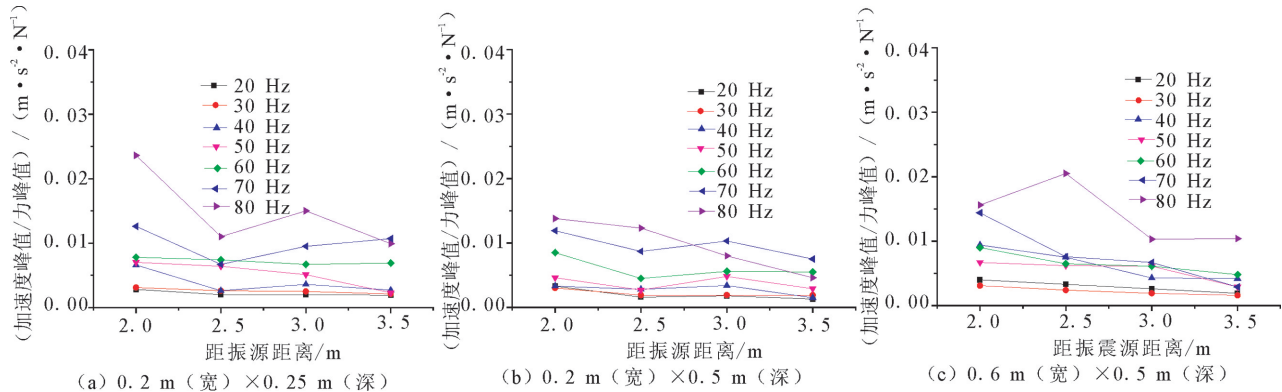


图 7 设置空沟时加速度峰值/力的峰值随距离变化曲线

Fig.7 Variation curve of peak acceleration / peak force with distance when open trenches were installed

表 2 设置空沟时不同频率下加速度峰值/力的峰值测试结果(单位:(m/s²)/N)

Table 2 The test results of peak acceleration / peak force at different frequencies when open trenches were installed (unit: (m/s²)/N)

空沟宽×深 (m×m)	距振源距 离/m	激振频率/Hz						
		20	30	40	50	60	70	80
0.2×0.25	2.0	0.002 8	0.003 1	0.006 6	0.007 0	0.007 8	0.012 6	0.023 6
	2.5	0.002 0	0.002 6	0.002 6	0.006 4	0.007 4	0.006 7	0.011 0
	3.0	0.002 0	0.002 5	0.003 6	0.005 1	0.006 7	0.009 5	0.015 0
	3.5	0.001 9	0.002 1	0.002 7	0.002 3	0.006 9	0.010 7	0.009 9
0.2×0.5	2.0	0.003 3	0.003 0	0.003 3	0.004 6	0.008 5	0.011 9	0.013 8
	2.5	0.001 6	0.001 9	0.002 8	0.002 7	0.004 5	0.008 7	0.012 3
	3.0	0.001 8	0.001 9	0.003 4	0.004 8	0.005 6	0.010 3	0.008 0
	3.5	0.001 3	0.001 9	0.001 5	0.002 9	0.005 5	0.007 5	0.004 6
0.6×0.5	2.0	0.004 0	0.003 1	0.009 4	0.006 7	0.009 0	0.014 4	0.015 6
	2.5	0.003 3	0.002 4	0.007 5	0.006 2	0.006 5	0.007 6	0.020 5
	3.0	0.002 6	0.001 9	0.004 3	0.006 1	0.006 1	0.006 7	0.010 3
	3.5	0.001 9	0.001 6	0.004 2	0.002 9	0.004 8	0.002 9	0.010 4

3.4 设置混凝土排桩方案和试验结果

排桩隔振也是工程中较为常见的隔振措施,本次试验制作了边长 0.2 m,长 0.5 m 和 1 m 两种混凝土方桩,试验布置的排桩如图 11 所示,具体方案

见图 12。试验得到不同频率激振力作用下各测点的加速度值,经过处理如表 4 所示,将不同频率下各测点试验值绘制成随距离变化的曲线(图 13)。

表 3 设置碎石填充沟时不同频率下加速度峰值/力的峰值测试结果(单位:(m/s²)/N)

Table 3 The test results of peak acceleration / peak force at different frequencies when gravel-filled trench was installed (unit: (m · s²)/N)

距振源距 离/m	激振频率/Hz						
	20	30	40	50	60	70	80
2.0	0.009 0	0.015 8	0.009 6	0.015 1	0.038 7	0.029 6	0.032 0
2.5	0.003 8	0.006 6	0.007 5	0.007 8	0.010 7	0.015 0	0.022 4
3.0	0.004 7	0.007 7	0.007 1	0.007 0	0.014 9	0.019 5	0.024 7
3.5	0.003 9	0.007 2	0.004 8	0.006 5	0.013 6	0.016 8	0.012 0



图 8 试验设置的碎石填充沟

Fig.8 The gravel-filled trench installed in the test



图 11 试验设置的排桩

Fig.11 The piles in row installed in the test

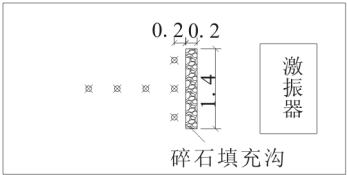


图 9 设置碎石填充沟的实验方案

Fig.9 Test program of installing gravel-filled trench

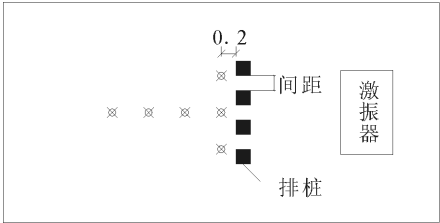


图 12 设置混凝土排桩的试验方案

Fig.12 Test program of installing piles in row

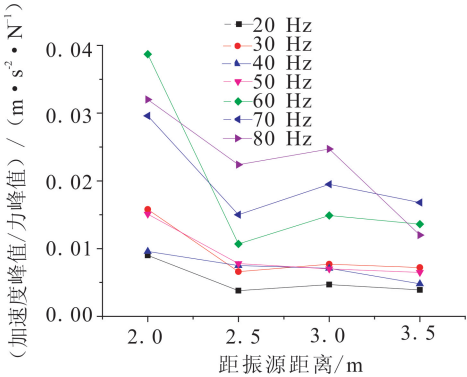


图 10 设置碎石填充沟时加速度峰值/力的峰值随距离变化曲线

Fig.10 Variation curve of peak acceleration / peak force with distance when gravel-filled trench was installed

4 结果分析和建议

为了比较不同隔振措施的隔振效果,以激振频率为 40 Hz 为例,将不设隔振措施连同不同隔振措

施下各测点的加速度峰值/力峰值试验值随距震源距离曲线绘制在同一坐标系中(图 14),比较不同激振频率下不同隔振措施的隔振效果。通过试验得到以下结论:

(1) 各测点的竖向加速度随测点距振源距离的增大而减小,距振源较近处衰减快,距振源较远处衰减慢。各点的加速度响应随输入波频率增大而增大,频率越高随距振源距离衰减越快,基本符合波在地基土中的传播规律。

(2) 比较不设置障碍和设置空沟两组试验结果的加速度峰值和力峰值的比值,空沟后该测点值明显小于不设置障碍时,表明空沟能起到有效的隔振作用;对比不同深度和宽度的空沟试验结果可知,空沟深度越大隔振效果越好,而空沟宽度对加速度影响不大。

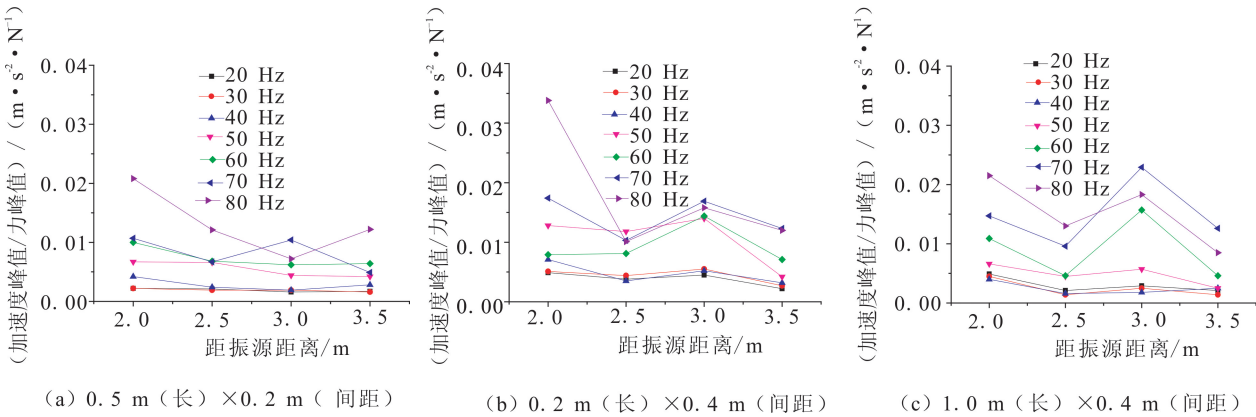


图 13 设置混凝土排桩时加速度峰值/力的峰值随距离变化曲线

Fig.13 Variation curve of peak acceleration / peak force with distance when piles in row were installed

表 4 设置混凝土排桩时不同频率下加速度峰值/力的峰值测试结果 (单位: $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})/\text{N}$)

Table 4 Test results of peak acceleration/peak force at different frequencies when piles in row were installed

排桩类型(长× 间距)/(m×m)		激振频率/Hz						
离/m		20	30	40	50	60	70	80
0.5×0.2	2.0	0.002 2	0.002 2	0.004 2	0.006 7	0.010 0	0.010 7	0.020 8
	2.5	0.002 1	0.001 9	0.002 4	0.006 6	0.006 8	0.006 7	0.012 1
	3.0	0.001 6	0.001 9	0.001 9	0.004 4	0.006 2	0.010 4	0.007 2
	3.5	0.001 7	0.001 6	0.002 8	0.004 2	0.006 4	0.004 9	0.012 2
0.5×0.4	2.0	0.004 9	0.005 1	0.007 1	0.012 8	0.007 9	0.017 4	0.033 8
	2.5	0.003 8	0.004 4	0.003 5	0.011 8	0.008 1	0.010 3	0.010 1
	3.0	0.004 5	0.005 5	0.005 2	0.014 0	0.014 4	0.016 9	0.015 8
	3.5	0.002 2	0.002 7	0.003 2	0.004 2	0.007 1	0.012 3	0.012 0
1.0×0.4	2.0	0.004 9	0.004 5	0.004 0	0.006 6	0.010 9	0.014 7	0.021 5
	2.5	0.002 1	0.001 4	0.001 6	0.004 5	0.004 6	0.009 6	0.013 0
	3.0	0.002 9	0.002 5	0.001 8	0.005 7	0.015 7	0.022 9	0.018 3
	3.5	0.002 1	0.001 4	0.002 5	0.002 5	0.004 6	0.012 6	0.008 5

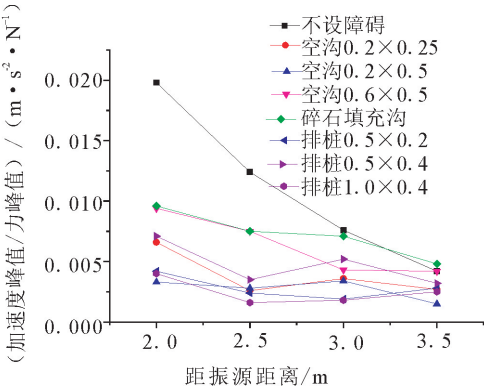


图 14 激振频率 40 Hz 下不同隔振措施效果

Fig.14 Vibration isolation effects of different measures at a frequency of 40 Hz

(3) 比较不设置障碍和设置碎石填充沟的试验结果,碎石填充沟也有一定的隔振作用,但效果不明显。

(4) 比较不设置障碍和设置混凝土排桩的试验

结果,排桩可以起到很好的减振作用,并且符合桩距越小隔振效果越好的规律,而增加桩的长度隔振效果没有明显提高。

该结果通过大比尺试验得到,与实际情况符合较好,可以真实比较不同隔振措施的隔振效果,为轨道交通隔振措施的合理选用提供一定的依据。

参考文献(References)

[1] 夏禾,吴萱,于大明.城市轨道交通系统引起的环境振动问题[J].北方交通大学学报,1999,23(4):1-7.
XIA He,WU Xuan,YU Da-ming.Environmental Vibration Induced by UrbanRail Transit System[J].Journal of Northern Jiaotong University,1999,23(4):1-7.(in Chinese)
[2] 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)
[3] 卜建清,高勇利,袁向荣.减小铁路振动与噪声影响的方法[J].铁道工程学报,2001(3):42-47.

BU Jian-qing, GAO Yong-li, YUAN Xiang-rong. Research on Methods to Reduce Influence of Vibration and Noise of Train [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2001(3):32-47. (in Chinese)

[4] 曹志刚, 蔡袁强, 徐长节. 空沟对列车运行引起的地基振动隔振效果研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8):2373-2382.

CAO Zhi-gang, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie. Screening Efficiency of Open Trenches to Train-induced Ground Vibration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8):2373-2382. (in Chinese)

[5] 李志毅, 高广运, 邱畅, 等. 多排桩屏障远场被动隔振分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21):3990-3995.

LI Zhi-yi, GAO Guang-yun, QIU Chang, et al. Analysis of multi-row of Piles as Barriers for Isolating Vibration in Far Field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21):3990-3995. (in Chinese)

[6] 冯牧, 雷晓燕. 列车引发建筑物振动试验及数值隔振研究[J]. 噪声与振动控制, 2009(5):80-87.

FENG Mu, LEI Xiaoyan. Field Test of Train-Induced Building Vibrations and Investigation of Numerical Isolation[J]. Noise and Vibration Control, 2009(5):80-87. (in Chinese)

[7] 肖世伟, 雷长顺, 郭超, 等. 高速铁路空沟隔振数值分析[J]. 铁道工程学报, 2011(8):23-29.

XIAO Shi-wei, LEI Chang-shun, GUO Chao, et al. Numerical Analysis of Vibration Reduction of Open Trench for High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, (8):23-29. (in Chinese)

[8] 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 Guan-gyun, 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)

[9] 国家环境保护局. GB 10071-88 城市区域环境振动测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.

Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 10071-88 Measurement Method of Environmental Vibration of Urban Area [S]. Beijing: China Standards Press, 1988. (in Chinese)

(上接 328 页)

[21] 刘国利, 刘殿魁. 位移阶跃 SH 波对半圆形凹陷地形的散射 [J]. 力学学报, 1994, 26(1):70-80.

LIU Guo-li, LIU Dian-kui. The Scattering of Displacement Step SH-waves by a Semi-cylindrical Canyon [J]. Acta Mechanica Sinica, 1994, 26(1):70-80. (in Chinese)

[22] [美]阿肯巴赫. 编. 徐植信, 洪锦如, 译. 弹性固体中波的传播 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1992.

Achenbach J D, edit. Translated by XU Zhi-xin, HONG Jin-ru. Wave Propagation in Elastic Solids [M]. Shanghai: Tongji Univerity Press, 1992. (in Chinese)

[23] 姚虞, 刘天云, 张建民. 求解二维弹性半空间散射问题的波函数组合法[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1):109-113.

YAO Yu, LIU Tian-yun, ZHANG Jian-min. The Method by the Combination of Eave Functions to Solve the Problem of Scattering in 2D Elastic Half Space [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1):109-113. (in Chinese)

[24] 鲍亦兴, 毛昭宙. 弹性波的衍射与动应力集中 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.

PAO Yih-hsing, MOW Chao-chow. The Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations [M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese)