



应用屏障进行被动隔振的研究综述^①

徐 平¹, 周新民², 夏唐代³

(1. 郑州大学 交通运输工程系, 河南 郑州 450002; 2. 浙江省地震局, 浙江 杭州 310013;
3. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要:人工振动作为一种新形式的环境污染,被列为世界七大环境公害之一。各种形式的人工振动都涉及弹性波的产生和传播,在既有振源与保护区之间设立屏障来切断弹性波的传播路径,衰减振动能量,降低振动幅度,是目前国际上普遍采用的隔振措施。屏障按几何构造可分为两类:连续屏障和非连续屏障。对国内外两类屏障的隔振理论和试验研究进行简述,得出的结论为:(1)连续屏障隔振效果好,但对于低频振源,屏障的深度需达到十几米以上(近似于 R 波的半波长),在软土和高地下水位地区的工程造价非常高,施工难度也非常大;(2)非连续屏障施工方便,不受深度和场地的限制,不需要进行额外的支护和维护,多排非连续屏障具有更广泛的应用前景。今后应注重和加强多排非连续屏障隔振的三维理论分析和吸振新材料的试验研究。

关键词:人工振动;被动隔振;连续屏障;非连续屏障

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0088-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0088

Review on Passive Vibration Isolation Using Barriers

XU Ping¹, ZHOU Xin-min², XIA Tang-dai³

(1. Department of Transportation Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450002, China;
2. Earthquake Administration Seismological Bureau of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310013, China;
3. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: A large number of buildings and transportation facilities have been constructed in recent years. Residential areas, commercial centers, industrial areas, and highways have formed a three-dimensional transportation network, and artificial vibrations are generated with high frequency and large cycle numbers. Artificial vibration has become a new type of environmental pollution, and is listed as one of the world's seven major environmental hazards. All the various types of artificial vibrations involve the generation and dissemination of elastic waves. Setting up of barriers between vibration sources and protection zones can block the elastic wave propagation path, attenuate the vibration energy, and reduce the vibration amplitude; this has become one of the most effective vibration isolation measures. Based on the geometric structures, normally-used barriers can be divided into two types: (1) continuous barriers, which are integrated structures, such as open trench, concrete walls, and trenches filled with mud, sawdust, or foam; and (2) discontinuous barriers, which are composed of individual elements, such as one row of cylindrical cavities, solid piles, or hollow pipe piles. In this study, theoretical and experimental studies of these two

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008286, 51278467); 河南省高校科技创新人才支持计划(14HASTIT050)

作者简介: 徐平(1977—), 男(汉族), 山东五莲人, 博士, 副教授, 主要从事土动力学研究. E-mail: plian127@163.com

types of isolation barriers are reviewed and some important conclusions are drawn;(1)the effectiveness of continuous isolation barriers is better,but the depth of the barriers is usually required to be more than ten meters for vibration sources with low frequencies,which approaches half the wavelength of a Rayleigh wave,and so high construction costs and large construction difficulties are caused when constructing in soft soils or regions with high groundwater levels;(2)discontinuous barriers can be easily constructed,are not limited to depth and space,do not need additional support and maintenance,and so several rows of discontinuous barriers have more application prospects.In the future,isolation studies should focus on three-dimensional theoretical analysis and experiments on new absorbing materials with several rows of discontinuous barriers.

Key words: artificial vibration; passive vibration isolation; continuous barriers; discontinuous barriers

0 引言

随着我国城镇化的迅猛发展,各种建筑和交通设施都得到大量的建设,居民区、商业中心、工业区和交通干道逐渐形成一个立体的交通网,使得整个城市几乎每时每刻都在产生频率高、荷载循环次数大的人工振动,如图 1 和图 2 所示^[1]。尽管打桩施工、公路和铁路交通、重工业厂房、爆破等形式的人工振动的破坏力远没有地震强烈,但这些人

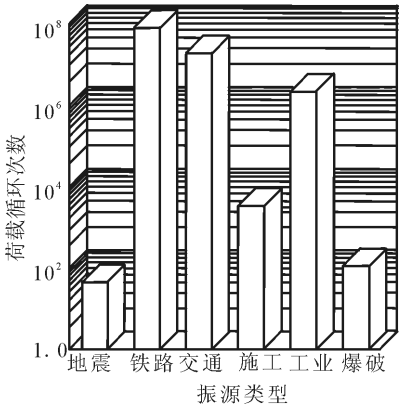


图 2 振源的振动循环次数

Fig.2 The number of cycles of vibration sources

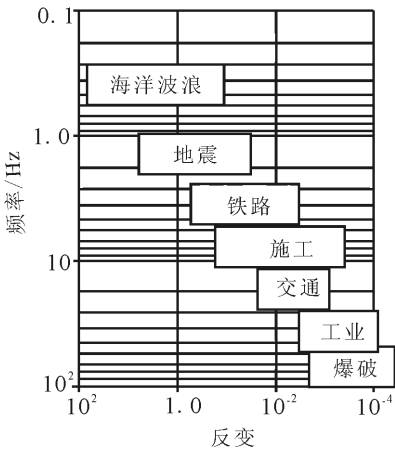


图 1 振源的振幅和频率

Fig.1 The amplitudes and frequencies of vibration sources

消除或降低振动危害,创建健康安静的学习、生活和工作环境,是目前国内外众多学者关注的研究课题之一。本文定性地描述人工振动引起的危害,并简要介绍当前国内外关于屏障隔振的研究现状,指出屏障被动隔振具有广泛的应用前景,以期

1 人工振动的危害

强烈的人工振动会产生很大的影响:① 干扰人们的日常生活,影响人们的睡眠、休息和学习,甚至还会危害人们的生理和心理健康;② 影响精密仪器的正常使用、加工与制作;③ 持久性的小幅振动会降低建筑结构的强度,使结构产生裂缝或变形,最终影响建筑物的安全和正常使用;④ 强烈的人工振动可能造成油气和天然气管道等城市生命线的破裂,带来严重后果。

我国虽然早在 1989 年 7 月就开始实施《城市区域环境振动标准》(GB10070—88),规定了城市区域振动的铅垂向振级标准值,但由于城市大面积建设、重工业的快速发展、交通的不合理规划、交通密度的大幅度提高,人工振动引起的负面新闻还是时有报道。例如大家比较关注的“楼晃晃”现象:北京西直门铁路附近的某五层居民楼、常州市圩塘新村的 21 栋居民楼、太原市省府西街的某办公楼、郑州市百合花苑小区 1 号楼、太原市北宫丰硕苑小区 8 号楼、无锡市月秀东苑沿街房屋,这些楼房不仅产生强烈的

振动,有的还出现不均匀沉降和墙体裂缝等病害,严重降低了楼房的使用寿命。另外,火车或重交通车辆在高速铁路、高架桥、立交桥等行驶时,还会产生强烈的噪声干扰。

对于噪声处理,常见的措施是在交通干道两侧或一侧安装声屏障,通过屏障材料吸收噪声能量达到减小其对居民干扰的目的。该项技术比较成熟,并已大量应用,例如:兰州的小西湖立交桥、郑州的一附院立交桥、汉宜客运铁路专线等。

隔振与隔声的机理类似,都是在振源与保护建筑物之间设立屏障,由屏障吸收振动波或声波的能量从而达到隔振/隔声的目的,但两者之间存在一定的区别:隔声的措施位于地上,屏障材料由厂家生产,直接安装即可;而隔振的措施位于地下,受场地条件(例如岩土的物理力学参数、地下水位等)的影响很大,本文主要介绍当前国内外被动隔振的相关研究。

2 当前的隔振措施

各种形式的人工振动都涉及弹性波的产生和传播,与打桩施工、火车行驶完全相似,如图 3 和图 4 所示^[2-3]:人工振动首先在土体中产生体波(P 波和 S 波)并向四周传播,一部分 P 波和 S 波在地表生成表面波(R 波,即瑞利波),而另一部分或保持传播方向不变,或在岩土层界面生成反射波和透射波,所有的弹性波都携带振动能量继续向前传播,并在沿线和周边建筑物的基础上产生反射和透射,进而诱发建筑物主体结构的振动。

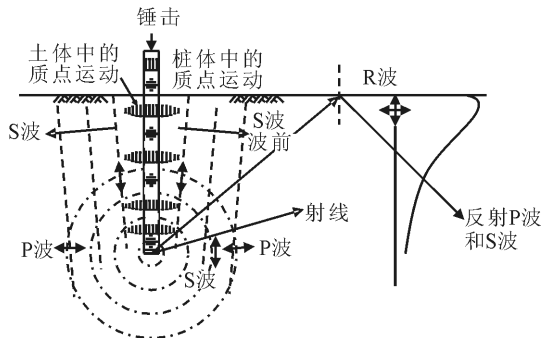


图 3 打桩施工时产生的振动机理

Fig.3 Vibration generated by the pile driving construction

在既有振源与保护区之间设立屏障来切断弹性波的传播路径,衰减振动能量,降低振动幅度,是目前国际上普遍采用的隔振措施。

隔振按隔离体的位置可分成两类(如图 5 和图 6 所示^[3]):

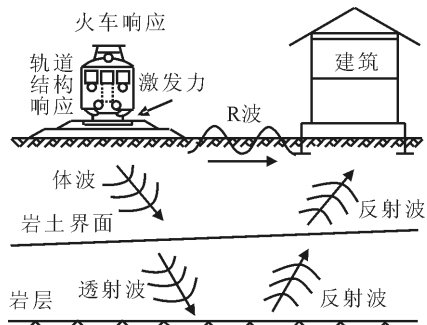


图 4 火车行驶时产生的振动机理

Fig.4 Vibration generated by moving train

(1) 主动隔振,适应于尺寸较小且独立的振源,例如机器基础,围绕振源设立屏障,减小振动能量的输出,主要隔离 P 波、S 波和 R 波;

(2) 被动隔振,适应于分布范围较广或连续的振源,例如铁路和重载公路,在重要建筑或精密仪器等周围设立屏障,减小振动能量的输入,主要隔离 R 波。

屏障按几何特性可分成两类:

(1) 连续屏障,由连续的整体构成,例如空沟、混凝土墙或用泥浆、锯屑、泡沫等填充的沟渠等;

(2) 非连续屏障,由间断的个体组成,例如单排柱腔(圆柱形空腔)、实心桩或空心管桩等,如图 7 所示^[4]。

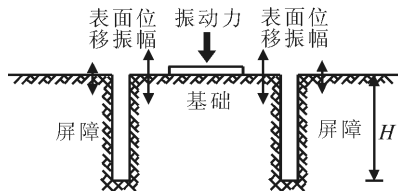


图 5 屏障近场主动隔振

Fig.5 Near-field active vibration isolation using barriers

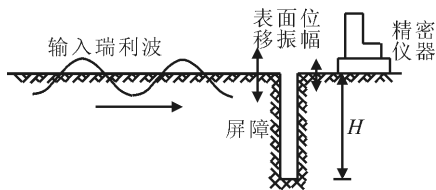


图 6 屏障远场被动隔振

Fig.6 Far-field passive vibration isolation using barriers

上述两类屏障各有优缺点:

(1) 连续屏障隔振效果好,但对于低频振源,屏障的深度需达到十几米以上(近似于 R 波的半波长)^[6],这对于实际工程尤其是软土和高地下水位地区,工程造价非常高,施工难度也很大;

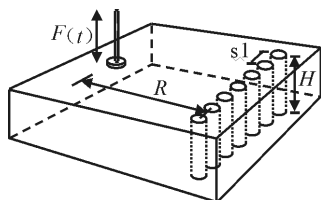


图 7 非连续屏障隔振体系

Fig.7 Vibration isolation system using discontinuous barrier

(2) 非连续屏障施工方便,不受深度和场地的限制,不需要进行额外的支护和维护,但隔振效果不如隔振沟理想。

3 国内外被动隔振的研究现状

3.1 非连续屏障的理论分析和数值模拟

假定桩长远大于桩径,从而将非连续屏障对弹性波的隔离问题简化成二维平面问题,进而采用波动理论进行求解;Avilés 和 Sánchez-Sesma^[4-6]运用波动理论和 Graf 加法定理研究了均质弹性土体中单排实心桩屏障对 SH 波的二维隔离问题;采用相似的研究思路,徐平等^[7]求解了单排弹性实心桩屏障对 P 波和 SV 波的隔离问题,完善了弹性土体中单排实心桩屏障对各种弹性波隔离的解答;蔡袁强等^[8]由弹性土体推广到饱和土体,分析了饱和土体中单排弹性实心桩屏障对 P 波和 S 波的隔离。徐平等^[9]参考 Pao^[10]关于深埋单个圆形衬砌对平面 P 波散射的解答,利用空心管桩和圆形衬砌(两者同属圆柱形壳体)具备相同波场势函数的特点,在单排实心桩屏障的基础上,首次较系统地求解了单排空心管桩屏障对 P 波和 S 波的二维隔离问题。

非连续屏障的三维问题主要借助于数值计算,例如 BEM(边界单元法)和虚拟桩法;Kattis 等^[11]采用先进的频域边界元技术计算了单排圆形和方形桩屏障的三维隔振问题;Tsai 等^[12]在文献^[11]的基础上研究了单排圆形桩、柱腔和空心管桩对竖向简谐振动荷载作用下方形基础的隔离;高广运等^[13]基于 Lamb 问题得到了瑞利波散射积分方程,并利用迭代法对该方程进行了精确求解,进一步分析了弹性土体中多排桩对瑞利波的隔离问题;陆建飞等^[14]和徐满清^[15]根据虚拟桩法求解了弹性和饱和土体中多排桩对交通荷载的隔离问题。

上述研究的主要结论为:

(1) 单排桩的长度、入土深度及整体宽度是影响单排桩屏障隔振效果的因素,而桩间距是决定性因素,只有当桩间距较小时,单排桩屏障才能起到隔

振的作用;

(2) 单排空心管桩与柱腔的隔离效果存在明显的差异,另外屏障的隔离效果受频率的影响很大;

(3) 当桩间距较小时多排桩屏障的隔离效果可以等价于隔振沟,另外桩的排距对多排桩屏障的整体隔振效果影响很小;

(4) 长桩、小间距构成的多排桩屏障更有利于减小移动荷载引起的振动。

3.2 连续屏障的理论分析和数值模拟

尽管隔振沟等形式的连续屏障在结构形式上比排桩要简单得多,但振动波除了在隔振沟侧边上产生反射,还会在底部产生绕射,其理论解答要比排桩复杂得多,目前隔振沟等连续屏障的研究主要集中于数值计算(FEM 和 BEM)。

Yang 和 Sato^[16]运用 FEM 系统地研究了空沟、填充沟和弹性基础等三种屏障对铁路振动的隔离效果;Shrivastava 和 Kameswara^[17]采用 FEM 计算了空沟和填充沟对瞬态 R 波的隔振效果;罗锟等^[18]采用 ANSYS 软件模拟了屏障对铁路振动的治理效果。Leung 等^[19]采用 BEM 分别计算了均质和非均质地基中空沟、填充沟的隔振效果;Ahmad 等^[20]采用三维 BEM 研究了几何尺寸和材料参数对混凝土和膨润土填充沟隔振效果的影响;Conter 等^[21]采用高阶单元的 BEM 计算了填充沟的隔振效果;Al-Hussaini 等^[22]采用时域 BEM 分析了三维空沟和填充沟的隔振效果;Andersen 等^[23]和 Adam 等^[24]分别采用 FEM-BEM 耦合的方法研究了填充沟对列车运行产生的地面振动的屏蔽;Celebi 等^[25]采用 BEM 结合 TLM/FVM 法分析了空沟的隔振问题;时刚等^[26]采用 BEM 分析了饱和地基中填充沟对 Rayleigh 的远场被动隔振问题。上述研究的主要结论如下:

(1) 对于工程实际来说,土体泊松比可以忽略;

(2) 隔振沟中填充材料的剪切模量和密度是制约隔振效果的两个参数;

(3) 隔振沟的隔振效果主要取决于深度,受宽度的影响较小;

(4) 对于充填沟渠,充填材料与土体相比,材料越硬,隔振效果越好。

3.3 屏障的试验研究

屏障的试验研究主要集中于连续屏障;Erkan 等^[27]在现场开挖 1.0 m 宽、2.5 m 深的沟渠,由电动摇振器产生激振力,通过测试和对比加速度信号,分析了空沟和填充沟渠(水、斑脱黏土、混凝土)的隔振

效果;Murillo 等^[28]进行了室内试验,激振力由压电式振动器产生,同样根据加速度信号,分析了不同尺寸(宽度分别为 20、40 mm,深度分别为 120、240 和 340 mm)的泡沫填充沟渠的隔振效果;Takemiya^[30]进行了 4 层的橡胶 WIB 结构的现场试验,测试了屏障后不同位置处的三向加速度时程曲线,并基于试验结果进行了三维 FEM 分析。

4 当前研究分析

综观国内外的当前研究,非连续屏障主要基于弹性波的多重散射理论进行理论分析,连续屏障主要基于有限元和边界元进行数值模拟,隔振试验则限于连续屏障(隔振沟),主要结论为:

(1) 单排或多排桩非连续屏障的二维理论分析已经比较成熟,但局限于 P 波和 S 波,实际上 R 波的能量比在人工振动波中占的比例最大,为 67.3%,而且不论是半空间激振还是平面激振,R 波的衰减都比 P 波和 S 波慢得多,在距离振动较远处 R 波占统治地位,因此研究多排桩或多排管桩非连续屏障对 R 波的隔离更具理论和工程应用价值;

(2) 空沟的隔振效果理想,但对 R 波进行隔离时需要进行大开挖,支护和维护费较高,目前的研究主要集中于充填沟,而充填沟的研究主要局限于混凝土、泡沫等材料,关于材料本身的吸振性能的研究不多。

5 结语

简要介绍了人工振动引起的危害,并简述了当前国内外关于屏障隔振的研究现状,指出屏障被动隔振具有广泛的应用前景,但在今后的研究应注重:

(1) 基于波动理论,建立多排非连续屏障隔振的三维理论解答;

(2) 借助于声屏障理念,应用能吸收大部分振动能量的材料建立屏障;

(3) 注重理论联系实际,加强非连续屏障的现场试验,并对现有理论和经验公式进行验证。

参考文献(References)

- [1] Massarsch K R, Madshus C, Bodare A. Engineering Vibrations and Solutions [C]//Proceedings of the Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III. Missouri: University of Missouri-Rolla, 1995: 1349-1353.
- [2] Athanasopoulos G A, Pelekis P C. Ground Vibrations from Sheet Pile Driving in Urban Environment: Measurements, A-

- nalysys and Effects on Buildings and Occupants[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 19(5): 371-387.
- [3] Lars H. Simulations and Analyses of Train-induced Ground Vibrations in Finite Element Models [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23: 403-413.
- [4] Avilés J, Sánchez-Sesma F. Piles as Barriers for Elastic Waves [J]. Geotech Engng, 1983, 119(9): 1133-1146.
- [5] Woods R D. Screening of Surface Waves in Soils [J]. Solids Mech. and Found. Div, 1968, 94(4): 951-979.
- [6] Avilés J, Sánchez-Sesma F. Foundation Isolation from Vibrations Using Piles and Barriers [J]. Geotech Engng ASCE, 1988, 114(4): 1854-1870.
- [7] 徐平, 周新民, 夏唐代. 非连续弹性圆柱实心桩屏障对弹性波的隔离 [J]. 振动工程学报, 2007, 20(4): 388-395.
XU Ping, ZHOU Xin-min, XIA Tang-dai. Discontinuous Barrier Used a Row of Elastic Piles for Incident Elastic Waves [J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(4): 388-395. (in Chinese)
- [8] Cai Y Q, Ding G Y, XU C J. Amplitude Reduction of Elastic Waves by a Row of Piles in Poroelastic Soil [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(3): 463-473.
- [9] 徐平, 夏唐代, 周新民. 单排空心管桩屏障对平面 SV 波的隔离效果研究 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 131-136.
XU Ping, XIA Tang-dai, ZHOU Xin-min. Study on Effect of Barrier of a Row of Hollow Pipe Piles on Isolation of Incident Plane SV Waves [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 131-136. (in Chinese)
- [10] Pao Y H, Mow C C. Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations [M]. New York: Crane and Russak, 1973.
- [11] Kattis S E, Polyzos D, Beskos D E. Vibration Isolation by a Row of Piles Using a 3-D Frequency Domain BEM [J]. Numer. Meth Engng, 1999, 46(5): 713-728.
- [12] Tsai P H, Feng Z Y, Jen T L. Three-dimensional Analysis of the Screening Effectiveness of Hollow Pile Barriers for Foundation-induced Vertical Vibration [J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(3): 489-499.
- [13] Gao G Y, Li Z Y, Yue Z Q. Three-dimensional Analysis of Rows of Piles as Passive Barriers for Ground Vibration Isolation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(11): 1015-1027.
- [14] Lu J F, Xu B, Wang J H. A Numerical Model for the Isolation of Moving-load Induced Vibrations by Pile Rows Embedded in Layered Pore Media [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(21): 3771-3781.
- [15] 徐满清. 饱和土体中排桩对移动荷载的被动隔振效果分析 [J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3997-4005.
XU Man-qing. Analysis of Passive Isolation of Vibration Due to Moving Loads Using Pile Rows Embedded in a Poroelastic Half Space [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3997-4005. (in Chinese)
- [16] Yang J, Sato T. On the Velocity and Damping of Elastic

- Waves in Nearly Saturated Soils[C]//Proceedings of the 3rd Japan National Conference on Geotechnical Engineering, 1998.
- [17] Shrivastava R K, Kameswara Rao N S V. Response of Soil Media Due to Impulse Loads and Isolation Using Trenches[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(8): 695-700.
- [18] 罗锬, 雷晓燕, 刘庆杰. 地屏障在铁路环境振动治理工程中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 124(1): 1-6.
LUO Kun, LEI Xiao-yan, LIU Qing-jie. Research on the Application of Ground Barrier in Reducing the Vibration Along High-speed Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 124(1): 1-6. (in Chinese)
- [19] Leung K L, Vardoulakis I G, Beskos D E, et al. Vibration Isolation by Trenches in Continuously Non-homogeneous Soil by the BEM[J]. Soil Dyn Earthq Eng, 1991, 10(3): 172-179.
- [20] Ahmad S, Al-Hussaini T M. Simplified Design for Vibration Screening by Open and In-filled Trenches[J]. J Geotech Eng Div ASCE, 1991, 117(1): 67-88.
- [21] Conter E, Dente G. Screening of Rayleigh waves by Open Trenches[C]//Prakash S, ed. Proceedings of the 3rd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics II. Missouri: University of Missouri-Rolla, 1995: 763-768.
- [22] Al-Hussaini T M, Ahmad S. Numerical and Experimental Studies on Vibration Screening by Open and In-filled Trench Barriers[C]//Chouw N, Schmid G, eds. International Workshop on Wave Propagation, Moving Load and Vibration Reduction. Rotterdam: Balkema, 2000: 241-250.
- [23] Andersen L, Nielsen S R K. Reduction of Ground Vibration by Means of Barriers or Soil Improvement Along a Railway Track[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25: 701-716.
- [24] Adam M, Estorff O. Reduction of Train-induced Building Vibrations by Using Open and Filled Trenches[J]. Computer Structure, 2005, 83: 1-24.
- [25] Celebi E, Schmid G. Investigation of Ground Vibrations Induced by Moving Loads[J]. Engineering Structures, 2005, 27(14): 1981-1998.
- [26] 时刚, 郭院成, 高广运. 饱和地基中填充沟远场隔振研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 104-111.
SHI Gang, GUO Yuan-cheng, GAO Guang-yun. Two-dimensional Analysis of In-filled Trenches as Passive Barriers in Saturated Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 104-111. (in Chinese)
- [27] Erkan C, Seyhan F, Günay B, et al. Field Experiments on Wave Propagation and Vibration Isolation by Using Vave Barriers[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(5): 824-833.
- [28] Murillo C, Thorel L, Caicedo B. Ground Vibration Isolation with Geofoam Barriers: Centrifuge Modeling[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(6): 423-434.
- [29] Takemiya H. Hybrid Procedure of Field Measurement and Computer Simulation to Develop WIB for Vibration Mitigation from Traffic Viaduct[C]//Proceeding of the 4th International Symposium on Environmental Vibration: Prediction, Monitoring and Evaluation. Beijing: Science Press, 2009: 221-226. (in Chinese)