

DOI: 10.11779/CJGE2023S20001

空沟-波阻板联合隔振屏障的试验研究与数值分析

周凤玺¹, 周志雄^{*1}, 梁玉旺¹, 刘佳¹, 马强²

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 青海大学土木工程学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 采用模型试验和数值模拟相结合的方法研究了空沟-波阻板联合隔振屏障对竖向简谐荷载的隔振效果。首先, 对比了空沟-波阻板联合屏障与空沟屏障的隔振效果, 试验结果表明: 空沟-波阻板联合屏障在各个激励频率下的隔振效果均优于空沟屏障, 在低频段最为明显。然后, 结合完全匹配层吸收边界, 利用 COMSOL 建立了简谐荷载作用下弹性半空间中设置空沟-波阻板联合隔振屏障的三维有限元模型, 并通过加速度振幅衰减系数来评价隔振效果, 研究了空沟-波阻板联合屏障的几何参数对其隔振效果的影响。结果表明: 空沟-波阻板联合屏障的几何参数对其隔振效果影响较大。其中, 空沟深度越大, 隔振效果越好, 但在频率较低时有所不同; 波阻板深度以及屏障长度越大, 联合屏障的隔振效果越好。此外, 空沟-波阻板联合屏障更适用于近场主动隔振。

关键词: 地基隔振; 空沟-波阻板联合屏障; 模型试验; 相似理论; 数值模拟

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2023)S2-0055-06

作者简介: 周凤玺(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土力学、结构振动方面的研究工作。E-mail: geolut@163.com。

Experimental research and numerical analysis of an open Trench-WIB barrier

ZHOU Fengxi¹, ZHOU Zhixiong¹, LIANG Yuwang¹, LIU Jia¹, MA Qiang²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: The vibration isolation effects of an open trench-WIB barrier on the vertical harmonic loads are studied by using the combined method of model tests and numerical simulations. Firstly, the vibration isolation effects of the open trench-WIB barrier and the open trench are compared. The experimental results show that the vibration isolation effects of the combined barrier are better than those of the open trench barrier at each excitation frequency and the most obvious in the low frequency. Then, combined with the perfectly matched layer absorption boundary, a three-dimensional finite element model is established using the COMSOL to set up the open trench-WIB barrier in an elastic half space under harmonic loads. The vibration isolation effects are evaluated through the acceleration amplitude attenuation coefficient, and the influences of the geometric parameters of the combined barrier on the isolation effects are studied. The results show that the geometric parameters of the combined barrier have a great influence on the vibration isolation effects. The larger the depth of the open trench, the better the isolation effects, but different in the low frequency. Meanwhile, the larger the depth and length of the WIB, the better the vibration isolation effects of the combined barrier. Moreover, the open trench-WIB barrier is more suitable for the near-field active vibration isolation.

Key words: vibration isolation of foundation; open trench-WIB barrier; model test; similarity theory; numerical simulation

0 引言

随着现代工业化、城市化进程的持续推进, 大规模的生产建设活动和繁忙的交通运输等人工振动引起的环境振动污染问题对附近人们的生活和工作带来了很大的影响, 国际上已将环境振动污染列为七大环境公害之一^[1]。

由于地基是振动传播的主要途径之一, 因此在地基中设置隔振屏障是常见的振动治理措施^[2]。目前研究较多、应用较广的隔振屏障主要包括空沟、填充沟、

排桩和波阻板等。试验研究方面, Woods^[3]首先对空沟的隔振效果进行了一系列的现场试验研究, 提出了空沟屏障设计的一些基本准则。Klevin 等^[4]、Hasan 等^[5]对空沟和填充沟进行了试验研究。孙立强等^[6]通过模型试验研究了空沟、碎石填充沟以及排桩的隔振

基金项目: 国家自然科学基金项目(12362032, 51978320); 甘肃省重点研发计划项目(23YFFA0063)

收稿日期: 2023-11-30

***通信作者** (E-mail: zzx_0603@163.com)

效果,结果表明:空沟的隔振效果好于填充沟,空沟深度是影响隔振效果的重要因素,空沟深度越大,隔振效果越好,且排桩也具有良好的隔振效果。Takemiya^[7]在高架铁路桩基振动的现场试验中,采用了一种新型的蜂窝状波阻板隔振屏障(简称HWIB),研究发现:HWIB对低频振动具有显著的隔振效果。后期,李宁等^[8]通过现场试验也对地基中混凝土波阻板的实际隔振效果进行了研究,发现减小波阻板深度可以有效提高隔振效果。可以看出,目前试验研究主要集中于单独使用空沟或波阻板隔振效果的情形。

理论研究方面,Ahmad等^[9]和Tan等^[10]采用边界元法对空沟的隔振效果进行了研究,结果表明:沟深对空沟隔振效果影响显著,但沟宽影响不大。此外,Ahmad等^[9]还对填充沟进行了研究,发现其隔振效果受到深度、宽度及填充材料的剪切模量、密度等因素的影响。Adam等^[11]采用多维频域边界元法对波阻板的隔振效果进行了分析,发现增加波阻板的刚度,可以改善其隔振效果。Peplow等^[12]采用边界积分方程法研究了二维双层地基中波阻板的主动隔振效果。高广运等^[13]采用半解析边界元法对波阻板的主动隔振性能进行了研究,发现波阻板对低频振动具有较好的隔振效果。Luan等^[14]研究了任意结构排桩在竖向谐波作用下的隔振稳定性,发现排桩之间的间距对于阻尼具有显著的影响。近期,周凤玺等^[15]对二维地基中的空沟-波阻板联合隔振屏障进行了数值分析。然而,黄强等^[16]研究发现,二维模型可以较好的定性描述振动规律,但在具体数值上和三维模型存在较大的差异,因此利用三维模型计算振动响应更为合理。并且,理论研究目前也主要集中在单独使用空沟或波阻板隔振效果的情形,对空沟-波阻板联合隔振效果的研究较少。

因此,本文采用模型试验和数值模拟相结合的方法,通过建立三维模型研究了空沟-波阻板联合屏障在竖向简谐荷载作用下的隔振效果,分析了几何参数(空沟深度、波阻板深度、屏障长度和距振源的距离)对其隔振性能的影响规律。

1 模型试验

考虑到试验中施加的简谐荷载较小,因此物理模型试验采用了弹性相似律。根据弹性相似律^[17],首先确定了3个基本相似系数,即几何、密度和弹性模量相似比分别为1/20,1/1和1/20,然后根据弹性相似律对相关参数进行推导,各参数详见表1。

1.1 试验设备

图1为试验所采用的激振系统和测量系统。激振系统由德国APS400型激振器(频率范围为DC~200 Hz)和对应的信号发生器组成。测量系统由941B型振动传

感器和INV3018CT型24位数采仪组成。

表1 物理参数的模型缩放

参数	相似系数	模型/原型
几何尺寸	λ_l	1/20
密度	λ_ρ	1/1
弹性模量	λ_E	1/20
外力	$\lambda_F = \lambda_E \cdot \lambda_l \cdot \lambda_u$	1/8000
应变	$\lambda_\epsilon = \lambda_l \cdot \lambda_\rho \cdot \lambda_E^{-1}$	1/1
应力	$\lambda_\sigma = \lambda_E \cdot \lambda_\epsilon$	1/20
加速度	$\lambda_a = a_m / a_p$	1/1
速度	$\lambda_v = \lambda_E^{0.5} \cdot \lambda_\rho^{-0.5}$	1/4.47
位移	$\lambda_u = \lambda_l \cdot \lambda_\epsilon$	1/20
动力时间	$\lambda_t = \lambda_l \cdot \lambda_\rho^{0.5} \cdot \lambda_E^{-0.5}$	1/4.47
频率	$\lambda_\omega = \lambda_l^{-1}$	1/0.224



图1 试验仪器

Fig. 1 Test instruments

1.2 试验参数及方案

试验模型尺寸为:2.6 m×1.5 m×1.2 m,为了满足试验的相似定律,土体采用特定比例的石英砂、粉煤灰、河砂和石油的混合物^[18];波阻板由硅藻土、石膏和水的混合物制成^[19]。地基土及波阻板的物理力学参数分别见表2,3(分别用下标s和w表示)。为减小小模型试验箱四周及底部对振动波的反射引起的试验误差,激振器、隔振屏障以及振动监测点设置在距离模型箱边界较远的位置,图2为模型试验布置图。试验工况如表4所示,试验中采用的激振频率分别为5,30,50,100 Hz。

表2 土的物理力学参数

项目	$\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E_s / MPa	G_s / MPa	ν_s
原型	2000	60	23.08	0.3
模型	2000	3	1.15	0.3

表3 波阻板的物理力学参数

项目	$\rho_w / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E_w / GPa	G_w / GPa	ν_w
原型	2400	30	11.54	0.3
模型	2400	1.5	0.58	0.3

表 4 模型试验方案设计
Table 4 Plan for model tests

工况	工况编号	空沟深度 d_1/cm	波阻板深度 d_2/cm	屏障厚度 b/cm	屏障长度 L/cm
无隔振	1	0	0	0	0
空沟屏障	2	30	0	10	80
联合屏障	3	30	40	10	80

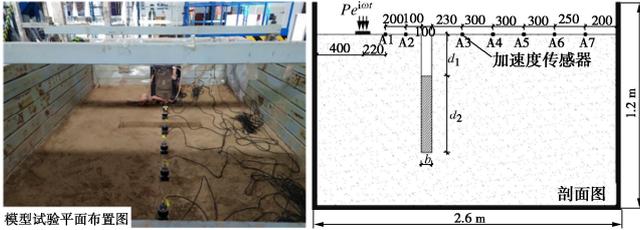


图2 模型试验布置图

Fig. 2 Layout of model tests

1.3 试验结果分析

分别在地基中设置空沟屏障以及空沟-波阻板联合屏障, 与无隔振时的地表振动加速度响应进行对比 (图 3)。为了节省篇幅, 仅以 A4 测点数据进行分析, 选取频率为 5, 30, 50, 100 Hz 的激振力作用。由图 3 可以看出, 空沟屏障在频率较低时, 隔振性能较差, 随着激振频率的增加, 隔振效果显著提高。而空沟-波阻板联合屏障在各振动频段范围内均具有良好的隔振性能, 且振动频率越高, 隔振效果越好。对比空沟屏障和空沟-波阻板联合屏障的振动曲线也可以看出, 联合屏障的隔振性能要优于单一的空沟屏障, 在低频时更为明显。

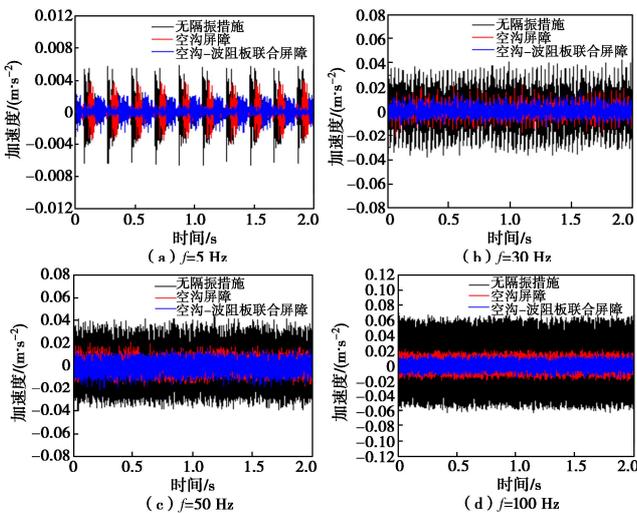


图 3 不同频率下地表振动加速度时程曲线

Fig. 3 Time-history curves of surface vibration acceleration at different frequencies

为了进一步明确空沟-波阻板联合隔振屏障的几何参数对其隔振性能的影响规律, 结合完全匹配层吸收边界, 利用 COMSOL 数值建模分析各参数对其隔振性能的影响特征。

2 数学模型

2.1 基本方程

考虑半空间和波阻板为均匀的各向同性线弹性材料, 在直角坐标系中其动力学基本方程为

$$\sigma = C:\varepsilon \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2}[\nabla u + (\nabla u)^T] \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \sigma + f = \rho \ddot{u} \quad (3)$$

式中: σ 和 ε 分别为应力矢量和应变矢量; u 为位移矢量; f 为体积力矢量; ρ 为弹性介质的密度; C 为材料的弹性张量。

结合式 (1) ~ (3) 可得到三维弹性波动方程, 即 Navier 方程为

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla u) + \mu\nabla^2 u + \rho f = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4)$$

2.2 边界条件

为模拟半无限地基, 模型边界条件分别为

底部完全固定条件: $u^s = 0$;

竖直侧法向固定条件: $u^s \cdot n = 0$;

此外, 模型中存在土层与波阻板之间的接触面, 其接触边界条件为

$$\left. \begin{aligned} u^s \cdot n &= u^w \cdot n \\ u^s \cdot m &= u^w \cdot m \\ \sigma^s \cdot n &= \sigma^w \cdot n \\ \sigma^s \cdot m &= \sigma^w \cdot m \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: u^s 和 σ^s 分别为土体的位移矢量和应力矢量; u^w 和 σ^w 分别为波阻板的位移矢量和应力矢量; n 和 m 分别为交界面处法向和切向单位向量。

2.3 有限元模型

考虑简谐荷载 $P e^{i\omega t}$ 作用于半空间表面, 利用 COMSOL 建立的三维有限元模型大小为 $100 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ (如图 4 所示)。其中, 简谐荷载的幅值为 $P=1 \text{ kN}$, 正方形作用面边长为 $l_2=1 \text{ m}$, 荷载距离左边界 $l_1=20 \text{ m}$, 距隔振屏障 $l_3=5 \text{ m}$; 空沟和波阻板的宽度为 b , 长度为 L , 深度分别为 d_1 和 d_2 。为了消除对半空间域进行人为截断而引起的反射波, 模型中采用厚度为 $l_{\text{pml}}=1 \text{ m}$ 的完全匹配层 (PML) 吸收边界。模型网格进行局部细化, 加密区域的单元大小满足最小瑞利波长的 $1/8$ 以下^[20], 取为 0.4 m , 其它区域单元尺寸取为 3 m 。

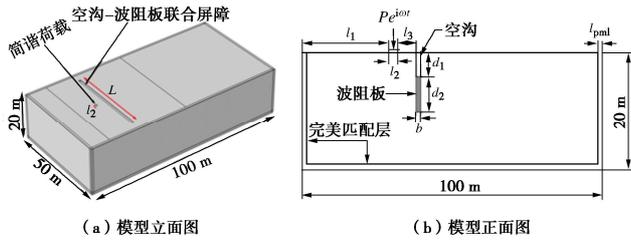


图4 有限元模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of finite element model

地基土的物理力学参数参考砂土取值，波阻板则参考混凝土参数取值（表5）。其中，材料阻尼通过各向同性损耗因子的形式实现，阻尼比为0.05。模型中设置了处于地表面的24个观察点以测试地基的振动响应，观测点从振源边缘开始，间隔1m设置。

表5 物理力学性质

Table 5 Physical and mechanical characteristics

参数	$E_s/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	ν_s	$\rho_s/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$E_w/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	ν_w	$\rho_w/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	ζ
量值	5.0×10^4	0.3	2000	5.0×10^7	0.3	2700	0.05

2.4 有效性验证

由于以往的隔振研究中没有空沟-波阻板联合隔振屏障，因此将模型退化成空沟体系进行验证，即当波阻板深度为0时，空沟-波阻板联合隔振屏障退化为空沟模型。选取与Alzawi等^[21]相同的地基土参数与空沟参数，将模型所得结果与Alzawi在2011年进行的现场试验数据^[21]作对比。空沟宽度为0.25m，深度为3m，长度为20m，空沟距离振源2.5m，激振频率为40Hz。由图5所见，两者结果吻合较好，因此该模型可用于研究空沟-波阻板联合隔振屏障的几何参数对其隔振性能的影响规律。

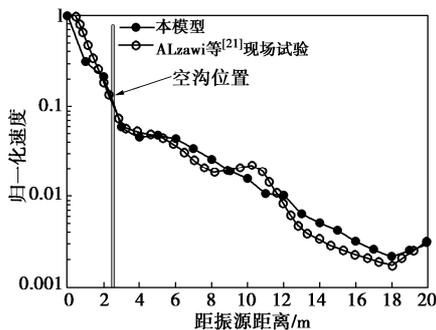


图5 退化模型验证

Fig. 5 Verification of degradation model

3 结果与分析

3.1 空沟和波阻板相对深度影响

为了分析隔振屏障的隔振效果，采用振幅衰减系数 A_R 进行评价（采用竖向位移幅值进行分析，且 A_R 值越小，隔振效果越好^[3]）。考虑联合屏障总深度为

$d_1+d_2=8\text{ m}$ ，分析在不同荷载激励频率下，空沟深度分别为 $d_1=0, 2, 4, 6, 8\text{ m}$ 时空沟-波阻板联合隔振屏障的隔振性能。其中，当 $d_1=0$ 时，联合隔振屏障退化为波阻板屏障，当 $d_1=8\text{ m}$ 时，联合隔振屏障退化为空沟屏障，计算结果如图6所示。

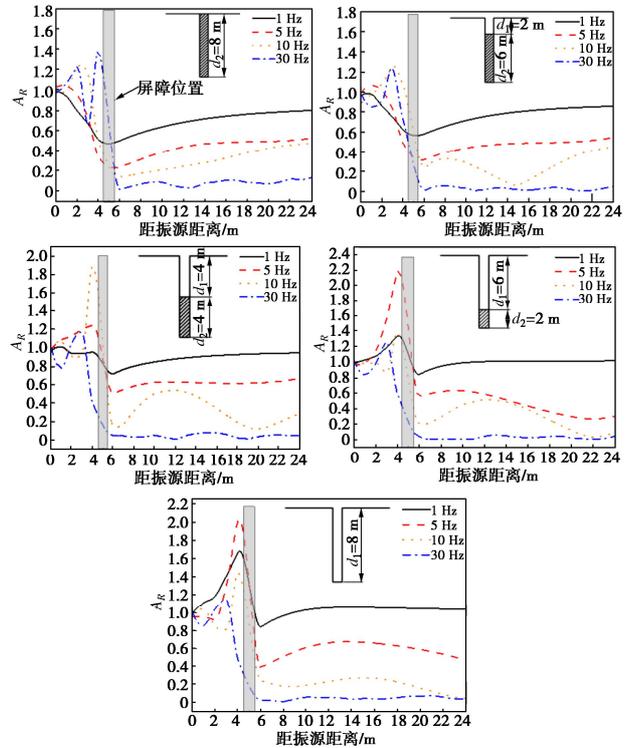


图6 相对深度对隔振效果的影响

Fig. 6 Effects of relative depth on vibration isolation

由图6可知，在总深度相等的情况下，空沟-波阻板联合隔振屏障对低频的隔振效果好于空沟屏障，对中高频率振动波的隔振效果和空沟屏障相差不大，这与试验结果也基本一致（图3）。相比于波阻板屏障，空沟-波阻板联合隔振屏障对中高频率的振动波隔振效果较好。空沟-波阻板联合隔振屏障对于频率为10Hz和30Hz的振动波可以达到较为理想的隔振效果，且随着空沟深度的增加，隔振效果逐渐变好；对于频率为5Hz的振动波可以实现有效隔振，基本达到了50%的隔振效率，且隔振效果随空沟深度的增加逐渐变好；对于频率为1Hz的振动波隔振效果尚不理想，且随着波阻板深度的减小隔振效果逐渐变差。由此可见，空沟深度和波阻板深度对联合隔振屏障的隔振效果影响较大。

3.2 屏障长度的影响

为研究屏障长度对空沟-波阻板联合屏障隔振效果的影响，考虑空沟和波阻板的深度分别为 $d_1=4\text{ m}$ 和 $d_2=6\text{ m}$ 。当屏障长度分别为 $L=10, 20, 30, 40, 50\text{ m}$ 时，联合隔振屏障的隔振效果分别如图7所示。由图

7 可知, 屏障长度对空沟-波阻板联合隔振屏障的隔振效果有一定的影响。振动波频率为 1 Hz 时, 隔振屏障长度越大, 隔振效果越好; 当频率为 5 Hz 时, 联合屏障的隔振效果亦随屏障的长度增加而变好, 当屏障长度达到 30 m 时, 继续增加屏障长度影响并不大, 而这一界限数值与其 1.5 倍波长值接近; 当频率为 10, 30 Hz 时, 增加屏障长度有一定的影响, 但总体并不大, 这是因为两种频率的振动波波波长较小, 影响范围不大。一般来说, 在条件允许的情况下, 屏障长度越大, 隔振效果越好。

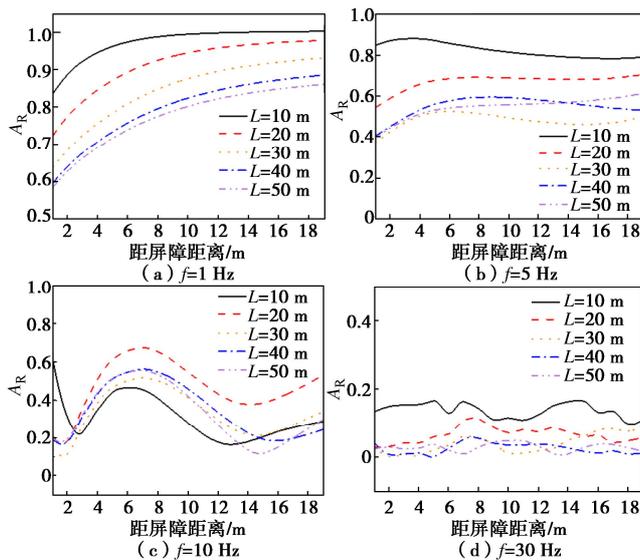


图 7 屏障长度对隔振效果的影响

Fig. 7 Effects of barrier length on vibration isolation

3.3 屏障距振源距离的影响

根据屏障距振源的距离远近, 可将隔振分为近场隔振和远场隔振。考虑空沟深度为 4 m, 波阻板深度为 6 m, 当屏障距离振源分别为 $l_3=5, 20, 50$ m 时, 观察联合隔振屏障的隔振效果, 计算结果如图 8 所示。从图 8 中可知, 当振动波频率为 1 Hz, 屏障距离振源 20 m 及以上时, 联合屏障几乎没有隔振效果; 当频率为 5 Hz, 屏障距离振源为 5 m 时隔振效果最好; 当频率为 10, 30 Hz 时, 屏障距振源距离对联合屏障的隔振效果影响不大。总体来看, 屏障距振源的距离越大, 越不利于隔振, 说明空沟-波阻板联合隔振屏障更适用于近场主动隔振, 在实际应用时, 应将联合隔振屏障设置于离振源较近的位置。

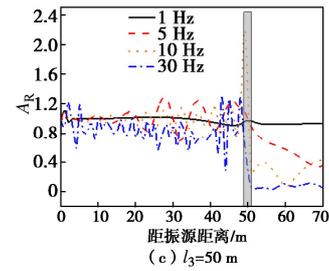
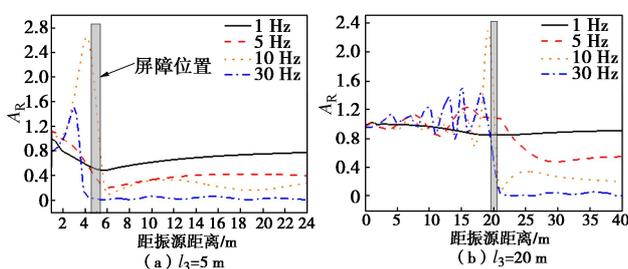


图 8 屏障距振源距离对隔振效果的影响

Fig. 8 Effects of distance between barrier and vibration source on vibration isolation

4 结 论

基于模型试验和数值模拟, 研究了空沟-波阻板联合隔振屏障与传统隔振屏障的隔振效果, 并分析了几何设计参数对联合屏障隔振效果的影响, 主要得到以下 3 点结论。

(1) 空沟-波阻板联合屏障相比于单一空沟屏障具有更优越的隔振性能。在进行合理的参数设计后, 空沟-波阻板联合隔振屏障可以实现对低频波有效隔振, 改善对中高频率振动的隔振效果, 具有更全面的隔振效果。

(2) 空沟的深度对联合屏障的隔振效果有一定的影响, 一般来说, 空沟深度越大, 隔振效果越好, 但不应过大, 具体数值可通过高频波波波长判断。并且, 波阻板的深度同样对联合屏障的隔振性能有较大的影响。

(3) 振动波频率较低时, 屏障长度越长, 联合屏障的隔振性能越好; 频率较高时, 当屏障长度达到一定数值时, 隔振效果不再发生变化。空沟-波阻板联合隔振屏障的隔振性能随屏障距振源的距离增大而逐渐变差, 即联合屏障适用于近场主动隔振。

参考文献:

- [1] 徐平, 周新民, 夏唐代. 应用屏障进行被动隔振的研究综述[J]. 地震工程学报, 2015, 37(1): 88-93. (XU Ping, ZHOU Xinmin, XIA Tangdai. Review on passive vibration isolation using barriers[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 88-93. (in Chinese))
- [2] 杨先健. 工业环境振动中的土动力学问题[J]. 岩土工程学报, 1992, 114(2): 82-88. (YANG Xianjian. Soil dynamics problems in industrial environment vibration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 114(2): 82-88. (in Chinese))
- [3] WOODS R D. Screening of surface wave in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94:

- 951-980.
- [4] KLEVIN R, ANTES H, LE HOUE'DEC D. Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches[J]. *Computers and Structures*, 1997, **64**(1-4): 809-817.
- [5] HASAN A A, HAIDER S A, JAAFAR K A. An experimental study on vibration isolation by open and in-filled trenches[J]. *Open Engineering*, 2022, **12**(1): 555-569.
- [6] 孙立强, 李 嘉, 刘 彬, 等. 空沟、碎石填充沟和排桩隔振效果试验研究[J]. *地震工程学报*, 2015, **37**(2): 342-348. (SUN Liqiang, LI Jia, LIU Bin, et al. Experimental study on vibration-isolation effects of open trench, gravel-filled trench, and piles in a row[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2015, **37**(2): 342-348. (in Chinese))
- [7] TAKEMIYA H. Field vibration mitigation by honeycomb WIB for pile foundations of a high-speed train viaduct[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, **24**(1): 69-87.
- [8] 李 宁, 高广运, 郑建国. 水平激振下波阻板主动隔振试验与数值计算[J]. *地下空间与工程学报*, 2010, **6**(1): 90-95. (LI Ning, GAO Guangyun, ZHENG Jianguo, et al. Field experimental and numerical study on active vibration isolation by WIB under horizontal loading[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, **6**(1): 90-95. (in Chinese))
- [9] AHMAD S, AL-HUSSAINI T. Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, **117**(1): 67-88.
- [10] TAN Y, LU Y, PENG F, et al. Isolation of DDC impact to sheet pile walls by open trenches[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, **138**(1): 110-114.
- [11] ADAM M, PFLANZ G, SCHMID G. Two-and three-dimensional modelling of half-space and train-track embankment under dynamic loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2000, **19**(8): 559-573.
- [12] PEPLOW A T, JONES C, PETYT M. Surface vibration propagation over a layered elastic half-space with an inclusion[J]. *Applied Acoustics*, 1999, **56**(4): 283-296.
- [13] 高广运, 张 博, 李 伟. 层状和竖向非均匀地基中水平-摇摆耦合激振波阻板三维隔振分析[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(2): 349-353, 421. (GAO Guangyun, ZHANG Bo, LI Wei. 3D analysis of vibration isolation using wave impeding block in layered and vertical heterogeneous foundation under horizontal-rocking coupled excitation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(2): 349-353, 421. (in Chinese))
- [14] LUAN L B, ZHENG C J, KOURETZIS G, et al. A new dynamic interaction factor for the analysis of pile groups subjected to vertical dynamic loads[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, **15**(12): 3545-3558.
- [15] 周凤玺, 马 强, 周志雄. 二维地基中空沟-波阻板联合隔振屏障分析[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(12): 4087-4092, 4115. (ZHOU Fengxi, MA Qiang, ZHOU Zhixiong. 2D analysis of vibration-isolation efficiency of an open trench-wave impedance block barrier[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(12): 4087-4092, 4115. (in Chinese))
- [16] 黄 强, 叶 斌, 黄宏伟, 等. 饱和软土二维-三维列车振动响应对比分析[J]. *西南交通大学学报*, 2017, **2017**(6): 1121-1129. (HUANG Qiang, YE Bin, HUANG Hongwei, et al. Comparison of 2D and 3D Dynamic Responses of Saturated Soft Soil due to Metro Train Load[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2017, **2017**(6): 1121-1129. (in Chinese))
- [17] IAI S, TOBITA T, NAKAHARA T. Generalised scaling relations for dynamic centrifuge tests[J]. *Géotechnique*, 2005, **55**(5): 355-362.
- [18] YANG W, YUAN R, WANG J. Vibration induced by subway trains: open-trench mitigation analysis in the time and frequency domains[J]. *Shock and Vibration*, 2018, **2018**(8): 1-16.
- [19] 杨文波, 徐朝阳, 陈子全, 等. 列车振动荷载作用下管片接缝对盾构隧道衬砌结构与周围软土地层动力响应影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, **36**(8): 1977-1988. (YANG Wenbo, XU Zhaoyang, CHEN Ziquan, et al. Influence of segment joints on dynamic response of shield tunnel and surrounding soft soil due to train induced vibration[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, **36**(8): 1977-1988. (in Chinese))
- [20] KUHLMAYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. *ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal*, 1973, **99**(5): 421-427.
- [21] ALZAWI A, NAGGAR M H E. Full scale experimental study on vibration scattering using open and in-filled (GeoFoam) wave barriers[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, **31**(3): 306-317.