

隔振屏障位置优化及多方案隔振效率对比研究

伍文科, 刘鑫, 韩蓬勃, 初靖轩, 王辛

国机集团科学技术研究院有限公司, 国机集团工程振动控制技术研究中心,
机械工业重大科学基础设施关键工艺装备振动控制重点实验室, 北京

收稿日期: 2025年12月15日; 录用日期: 2026年1月13日; 发布日期: 2026年1月22日

摘要

本文利用SAP2000建立了三维土体有限元模型, 分析了隔振屏障相对于振源不同距离(5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m)下的隔振性能, 并对比了连续隔振沟与双排“梅花型”隔振孔两种方案的隔振效率。研究结果表明: 在1~50 Hz频率范围内, 屏障距振源30 m时表现出最佳的整体隔振效果; 隔振沟与隔振孔方案均能显著衰减振动, 但隔振沟减振效果优于双排隔振孔。本研究可为实际工程中隔振屏障的优化设计与方案选型提供理论依据与技术参考。

关键词

隔振屏障, 位置优化, 隔振效率, 数值模拟

Position Optimization of Vibration Isolation Barriers and Comparative Study on Vibration Isolation Efficiency of Multiple Schemes

Wenke Wu, Xin Liu, Pengbo Han, Jingxuan Chu, Xin Wang

Sinomach Academy of Science and Technology Co., Ltd., SINOMACH Engineering Vibration Control Technology Research Center, Key Laboratory of Vibration Control for Key Process Equipment of Major Scientific Infra-Structure in the Machinery Industry, Beijing

Received: December 15, 2025; accepted: January 13, 2026; published: January 22, 2026

Abstract

This study employs SAP2000 to establish a three-dimensional finite element model of soil, analyzing

文章引用: 伍文科, 刘鑫, 韩蓬勃, 初靖轩, 王辛. 隔振屏障位置优化及多方案隔振效率对比研究[J]. 声学 & 振动, 2025, 13(4): 71-78. DOI: 10.12677/ojav.2025.134007

the vibration isolation performance of barriers at varying distances (5 m, 10 m, 15 m, 20 m, and 30 m) from the vibration source. A comparative evaluation of the isolation efficiency between a continuous trench and a double-row quincunx arrangement of boreholes was conducted. The results indicate that within the frequency range of 1~50 Hz, the barrier placed 30 m from the source exhibits the best overall vibration isolation effect. Both the trench and borehole schemes significantly attenuate vibration, with the trench demonstrating superior performance over the double-row borehole configuration. This research provides theoretical and technical references for the optimal design and scheme selection of vibration isolation barriers in practical engineering.

Keywords

Vibration Isolation Barrier, Position Optimization, Isolation Efficiency, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化和工业化的快速发展,由交通荷载、工程施工及工业运行引起的地面与环境振动问题日益突出。这类振动不仅干扰精密仪器设备的正常运行、影响居民生活舒适度[1]-[5],长期作用还可能对历史建筑结构的安全构成威胁[6][7]。因此,发展经济有效的振动控制技术,成为岩土工程与环境振动领域的重要课题。在众多被动隔振措施中,隔振沟与隔振孔屏障因其施工相对简便、成本可控且效果显著,被广泛应用于工程实践中[8]-[12]。

在隔振屏障的研究方面,国内外学者已取得诸多成果。早期研究多集中于隔振沟的深度、宽度等几何参数对单一频率振动的影响[13]。随着数值模拟技术的发展,研究者开始关注屏障位置[14]、多排布置[15]、以及饱和土体[16]等复杂条件下的隔振性能。然而,针对宽频激励下隔振屏障相对于振源的最优布置位置,以及连续隔振沟与离散型隔振孔在时域和频域内的系统对比研究尚显不足。

本文基于上述研究成果,针对设计工程设计中如何确定隔振屏障相对于振源和保护对象的最优布置位置,最大化利用其隔振能力,以及在复杂工况下科学选择与优化不同方案等两大核心挑战进行深入研究。本研究对于提升隔振工程设计的经济性、可靠性与科学性,具有重要的理论价值与现实意义。

2. 建立有限元模型

2.1. 模型概况与材料参数

本文采用 SAP2000 有限元分析软件建立土体-结构分析模型。模型中假定土体为连续、均质的线弹性材料,模型土体分为四层,其材料参数见表 1。表中参数主要依据某项目场地岩土工程勘察报告,并结合《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)中关于土层剪切波速与动力参数的经验关系综合确定[17]。

2.2. 阻尼模型

土体的能量耗散通过阻尼来模拟。本研究采用瑞利阻尼模型,其阻尼矩阵 $[C]$ 表示为质量矩阵 $[M]$ 和刚度矩阵 $[K]$ 的线性组合: $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ 。比例系数 α 和 β 由选定的两个频率点 f_i 、 f_j 及对应的阻尼比 ζ 确定。参考同类土体数值模拟研究[18],并考虑本研究关注的 1~50 Hz 主要频段,选取 $f_i = 1$ Hz、 $f_j = 50$ Hz,阻尼比 $\zeta = 0.1$ (该值在土体小应变动力分析中较为常用[19]),由此计算得到 α 和 β 值。

Table 1. Parameters of different layers of soil
表 1. 土层参数表

土层名称	土层厚度(m)	场地分层平均剪切波速 V_s (m/s)	场地分层平均纵波波速 V_p (m/s)	湿密度 ρ (g/cm ³)	动弹性模量	动剪切模量 G_d (10 ² MPa)	动泊松比(ν_d)
填土	2	112	1360	1.89	0.71	0.24	0.497
含碎石粉质粘土	2	289	1590	1.89	4.68	1.58	0.483
强风化石英砂岩	2	636	2220	2.11	24.84	8.53	0.455
中风化石英砂岩	34	914	3340	2.65	64.62	22.14	0.46

2.3 边界条件与荷载

模型整体尺寸为 $150\text{ m} \times 150\text{ m} \times 60\text{ m}$ ，以包含足够的波传播空间并减小边界反射影响。模型底部采用固定约束，模型四周则设置人工黏 - 弹性边界以模拟无限域土体的辐射阻尼效应。该黏弹性边界通过在边界节点上并联弹簧单元(LIKE 单元)与阻尼器来模拟(图 1)，其刚度与阻尼系数依据文献[20]的方法确定。

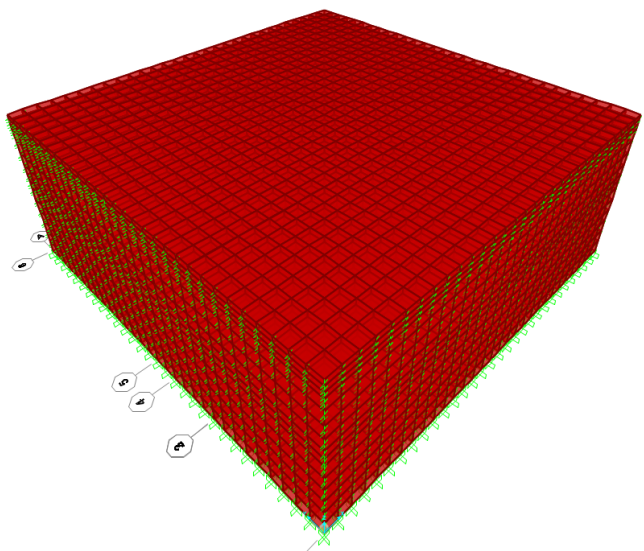


Figure 1. Finite element model of soil structure
图 1. 土结构有限元模型

3. 隔振屏障位置优化分析

为研究隔振屏障设置位置对其隔振性能的影响，在固定振源加载点与响应监测点位置的前提下，模拟计算了屏障距离振源分别为 5 m、10 m、15 m、20 m、30 m 五种工况。采用谐响应分析法，该荷载形式常用于评估结构或土体在稳态周期荷载下的频响特性。激励频率范围为 1~50 Hz，幅值为 100 kN 的三向同步荷载。提取各工况下监测点的三向加速度响应，经处理后绘制加速度 - 频率曲线，如图 2 所示。

根据图 2 的分析结果可知

当振源频率低于 30 Hz 时，屏障距振源 10 m 和 15 m 的工况下，监测点垂直于隔振沟方向(Y 向)及竖向(Z 向)的加速度响应较大，其余工况下三向加速度响应差异不显著。

当振源频率处于 30~50 Hz 范围内时，屏障距振源 5 m 和 10 m 的工况下，监测点平行于屏障方向(X 向)及竖向(Z 向)的加速度响应较大，而屏障距振源 20 m 时，垂直于隔振沟方向的加速度响应较大。

综合整个 1~50 Hz 频段来看, 隔振屏障布置在距振源 30 m 的位置时, 三向加速度响应总体上处于较低水平, 表现出最优的整体隔振效率。

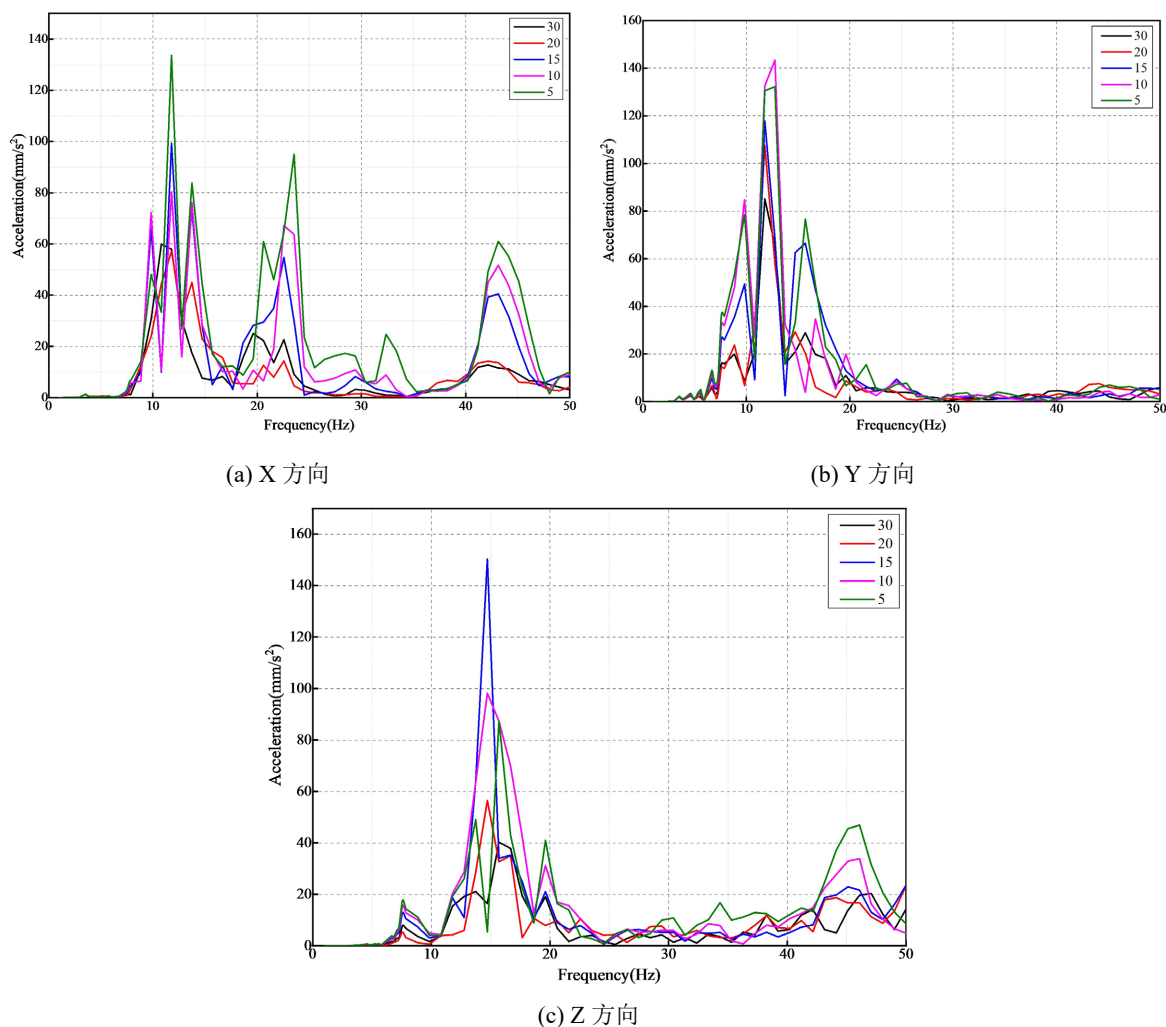


Figure 2. Three-direction acceleration-frequency domain diagram of response points when vibration isolation barrier positions are different

图 2. 隔振屏障位置不同时响应点地面三向加速度-频域图

4. 隔振屏障多方案对比分析

4.1. 隔振屏障多方案简介

实际工程中, 隔振屏障方案的选取需综合考虑施工条件、难度、周期、成本及隔振效率等多重因素。为对比不同形式屏障的隔振效率, 本文设计了连续隔振沟方案与双排“梅花型”布置的隔振孔方案。两种方案的有限元模型平面布置如图 3 所示。为提升计算效率, 隔振沟宽度设为 1 m, 深度为 30 m; 隔振孔直径 1 m, 孔间距 5 m, 排间距 0.5 m, 两种屏障的总长度均为 60 m。采用弹性动力时程分析法, 时程分析能更真实地反映瞬态振动波在土体中的传播与屏障的时域隔振效果, 荷载施加于地面距屏障 30 m 处。荷载为一组施工现场监测的三向振动时程, 持续时间为 10 s, 时间步长为 0.01 s, 荷载为三向同步施加。

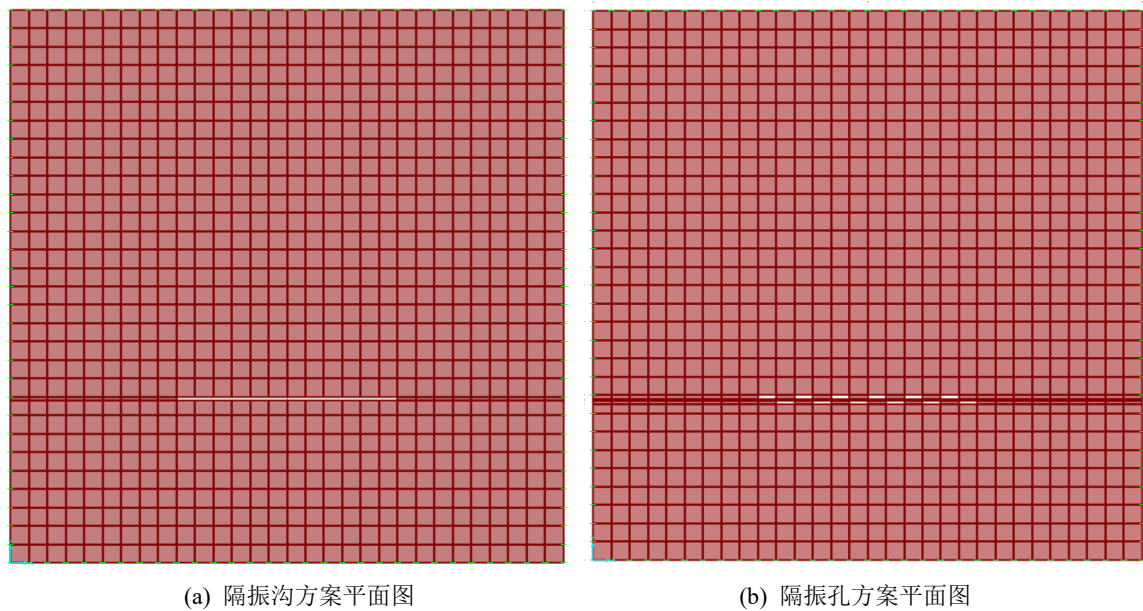


Figure 3. Floor plans of different vibration isolation barrier models

图 3. 不同方案隔振屏障模型平面图

4.2. 多方案隔振效率分析

针对两种方案的计算结果,沿模型中心线(Y 轴)在屏障前后共提取 5 个特征点的三向振动加速度时程响应,测点布置如图 4 所示。其中 1#点位于振源加载点附近,2#、3#点位于振源与屏障之间,4#、5#点位于屏障后较远区域,用于评估屏障的隔振效果。

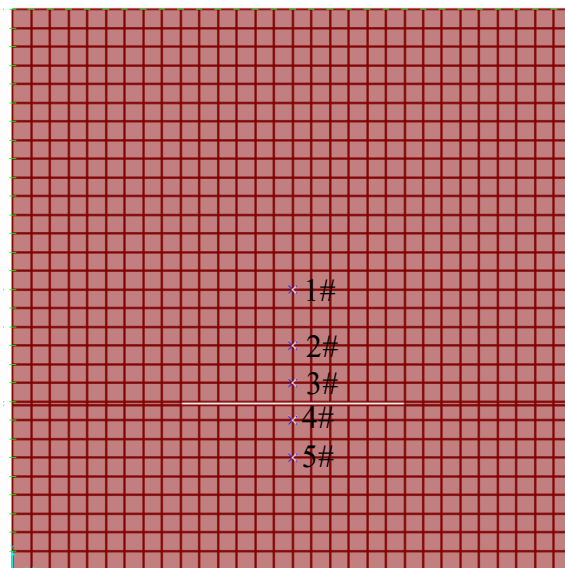


Figure 4. Analysis response extraction plan of vibration isolation barriers with different schemes

图 4. 不同方案隔振屏障分析响应提取平面图

分别统计两种方案下 5 个节点加速度响应的最大值与有效值,如表 2~4 所示,据此对比其隔振效率。

Table 2. Statistical table of X-direction time domain indicators for 5 nodes of two schemes
表 2. 两种方案 5 个节点 X 向时域指标统计表

节点号		1	2	3	4	5
隔振沟	最大值(mm/s ²)	69.632	5.547	3.255	0.271	0.191
	有效值(mm/s ²)	26.633	1.767	1.250	0.077	0.052
隔振孔	最大值(mm/s ²)	69.599	5.459	3.098	0.508	0.312
	有效值(mm/s ²)	26.652	1.788	1.184	0.162	0.096

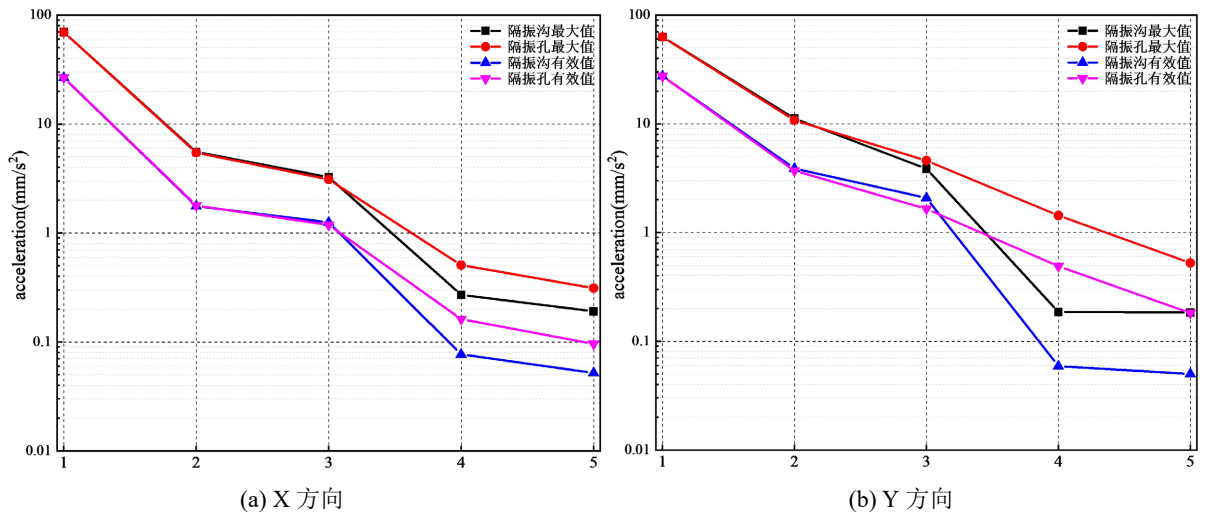
Table 3. Statistical table of Y-direction time domain indicators for 5 nodes of two schemes
表 3. 两种方案 5 个节点 Y 向时域指标统计表

节点号		1	2	3	4	5
隔振沟	最大值(mm/s ²)	62.881	11.172	3.858	0.186	0.184
	有效值(mm/s ²)	27.379	3.875	2.080	0.059	0.050
隔振孔	最大值(mm/s ²)	62.845	10.777	4.585	1.434	0.526
	有效值(mm/s ²)	27.379	3.697	1.651	0.489	0.182

Table 4. Statistical table of Z-direction time domain indicators for 5 nodes of two schemes
表 4. 两种方案 5 个节点 Z 向时域指标统计表

节点号		1	2	3	4	5
隔振沟	最大值(mm/s ²)	73.024	10.164	7.958	0.180	0.195
	有效值(mm/s ²)	32.038	3.570	2.771	0.050	0.055
隔振孔	最大值(mm/s ²)	73.167	10.033	6.848	0.855	0.787
	有效值(mm/s ²)	32.182	3.528	2.635	0.294	0.216

由表 2~4、图 5 可得：
两种方案隔振屏障前与隔振屏障后场地三向振动响应衰减明显，说明两种方案隔振屏障都具有很好的隔振效率；隔振沟设计方案沟后 4#、5#两点三向振动响应明显低于“梅花型”隔振孔设计方案。



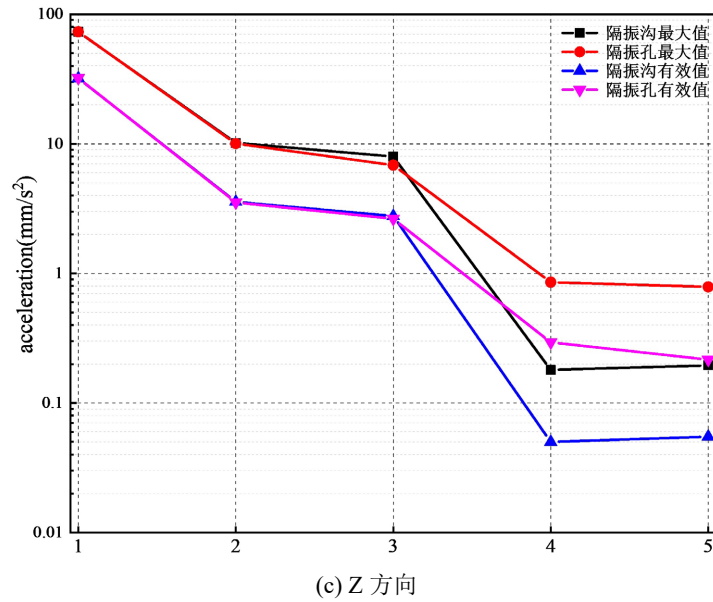


Figure 5. Comparison of the effective value and maximum value of the acceleration response of the node behind the vibration isolation barrier between the two schemes

图 5. 两种方案隔振屏障后节点加速度响应有效值和最大值对比图

从两种方案屏障隔振效率分析：连续隔振沟构成了一个完整的波阻抗不连续面，能有效地反射、散射入射波，并迫使波发生绕射和模式转换，能量衰减路径明确且充分。双排梅花型隔振孔属于离散屏障，虽然交错布置能增加波的散射面积，但孔与孔之间的土柱仍为振动波提供了传播路径，波可以通过衍射和通过土柱传播的方式越过屏障，导致其远场隔振效果不如连续屏障彻底。本研究结果表明，在相同长度和大致相当的工程体积下，连续性的完整截断优于离散式的部分截断。

5. 结论与建议

本文通过建立三维有限元模型，系统研究了隔振屏障的布置位置及其结构形式对隔振效果的影响，研究表明：

隔振屏障的位置对其隔振效率具有显著影响。在 1~50 Hz 的宽频激励下，屏障并非距振源越近或越远效果越好。当屏障布置在距振源约 30 m 处时，能在所关注的频段内取得相对最优的综合隔振性能。这强调了在实际工程中进行位置优化分析的必要性。

连续隔振沟与双排梅花型隔振孔均能有效衰减振动。但从实际隔振效率来看，连续隔振沟方案优于双排隔振孔方案，尤其在需要严格控制远场振动水平的场合。

工程选型需综合考虑隔振目标、施工条件、成本及环境影响。当对振动控制要求极高时，应优先考虑连续隔振沟；若受限于施工空间、地下管线或成本等因素，双排隔振孔作为一种离散化屏障，仍可提供显著的隔振效果，具备良好的工程适用性与灵活性。

本研究为隔振屏障的优化设计提供了定量分析依据，后续研究可进一步考虑土体的非线性、分层异性以及屏障尺寸、填充材料等参数的影响。

基金项目

本文研究得到国机集团科学技术研究院有限公司青年基金项目“超大型模拟振动台基础振动控制关键技术研究与应用(SINOMAST-QNJJ-2023-05)”的资助。

参考文献

- [1] 郭冬冬. 多排新型沟屏障隔振效果研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
- [2] 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.
- [3] 金波. 高速荷载下多孔饱和地基的动力响应[J]. 力学季刊, 2004, 25(2): 168-174.
- [4] 蔡袁强, 孙宏磊, 徐长节. 轨道刚度对路轨系统及饱和地基动力响应的影响[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1787-1793.
- [5] 陈建国, 夏禾, 肖军华, 等. 列车运行对周围地面振动影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3113-3118.
- [6] 叶茂, 曹保兴, 郑志华, 等. 列车动荷载下某古遗址隔振沟的减振效果研究[J]. 应用力学学报, 2015, 32(4): 682-688, 711.
- [7] 皮音培, 叶茂, 金晶, 等. 列车诱发环境振动在某古遗址内的分布规律研究[J]. 应用力学学报, 2014, 31(2): 224-229, 310.
- [8] 李植伟, 耿民, 王俊杰, 等. 隔震沟对爆炸作用下地面质点振动速度影响研究[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(12): 59-67.
- [9] 黄应州, 高亮. 防振沟对铁路引发振动的阻隔作用[J]. 铁道建筑, 2005, 10(2): 76-77.
- [10] 张云鹏, 武旭. 露天矿邻近边坡爆破减震沟减震效应分析[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(2): 25-28.
- [11] 胡八一, 陈石勇, 谷岩, 等. 隔振沟对爆炸塔周边地表振动的影响[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(6): 647-652.
- [12] 薛松领, 常军, 张也. 隔震沟设计及在实际工程中的应用[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2016, 29(4): 22-25.
- [13] Ahmad, S. and Al-Hussaini, T.M. (1991) Simplified Design for Vibration Screening by Open and In-filled Trenches. *Journal of Geotechnical Engineering*, **117**, 67-88. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1991\)117:1\(67\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1991)117:1(67))
- [14] May, T.W. and Bolt, B.A. (1982) The Effectiveness of Trenches in Reducing Seismic Motion. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **10**, 195-210. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290100203>
- [15] 蔡袁强, 郑晴晴, 王鹏. 周期性排桩屏障隔振性能研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1789-1796.
- [16] Ba, Z., Liang, J. and Lee, V.W. (2019) Three-Dimensional Scattering of Plane P, SV and Rayleigh Waves by a Hemispherical Alluvial Valley in a Saturated Poroeleastic Half-Space. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **116**, 161-178.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [18] Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. (1969) Finite Dynamic Model for Infinite Media. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **95**, 859-877. <https://doi.org/10.1061/jmcea3.0001144>
- [19] Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- [20] 刘晶波, 杜义欣, 闫秋实. 粘弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[C]//防灾减灾工程学报. 2007: 37-42.