

混凝土 U 型槽隔振屏障对振动波传播的影响研究

孙海宽¹ 沙晓东² 崔民晓¹ 张明宪² 张 扬²

1. 石家庄正太建设发展有限公司, 河北 石家庄 050000

2. 石家庄市建筑设计院有限责任公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]为研究混凝土 U 型槽对地基振动传播的隔离效果, 文中建立二维有限元数值模型, 以频响函数 FRF 作为评价指标, 分析不同填充材料、槽宽和槽深对 U 型槽隔振性能的影响。通过对比有、无屏障条件下的响应幅值来评价 U 型槽的隔振效果。结果表明, 混凝土 U 型槽能够有效削弱地基中高频段振动传播, 尤其是频率增大至 30Hz 后, FRF 明显降低, 隔振效果显著增强; 不同填充材料下 FRF 曲线整体变化趋势相近; 槽宽和槽深对隔振效果的影响具有频率选择性, 适当的几何尺寸有利于提高主要频段内的振动衰减效果, 但过大槽宽或过深槽体并不能有效改善隔振性能。研究结果可为铁路路基及邻近建筑振动控制中沟槽类隔振结构的设计与优化提供参考。

[关键词]混凝土 U 型槽; 隔振性能; 频率响应; 地基振动

DOI: 10.33142/ucp.v3i2.19989

中图分类号: TU74

文献标识码: A

Study on the Influence of Concrete U-shaped Groove Isolation Barrier on Vibration Wave Propagation

SUN Haikuan¹, SHA Xiaodong², CUI Minxiao¹, ZHANG Mingxian², ZHANG Yang²

1. Shijiazhuang Zhengtai Construction Development Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

2. Shijiazhuang Architectural Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: In order to study the isolation effect of concrete U-shaped groove on the propagation of foundation vibration, a two-dimensional finite element numerical model is established in this paper, and the frequency response function FRF is used as the evaluation index to analyze the influence of different filling materials, groove width, and groove depth on the isolation performance of U-shaped groove. Evaluate the vibration isolation effect of U-shaped grooves by comparing the response amplitudes with and without barriers. The results show that the concrete U-shaped groove can effectively weaken the propagation of high-frequency vibration in the foundation, especially when the frequency increases to 30 Hz, the FRF decreases significantly and the isolation effect is significantly enhanced; The overall trend of FRF curves under different filling materials is similar; The influence of slot width and slot depth on the isolation effect has frequency selectivity. Appropriate geometric dimensions are beneficial for improving the vibration attenuation effect in the main frequency band, but excessive slot width or depth cannot effectively improve the isolation performance. The research results can provide reference for the design and optimization of groove type vibration isolation structures in railway subgrade and adjacent building vibration control.

Keywords: concrete U-shaped groove; vibration isolation performance; frequency response; foundation vibration

引言

连续型隔振屏障是控制地基振动传播的重要措施之一, 常见形式包括空沟、填充沟及刚性槽体等。其基本原理是在振动传播路径中设置波阻抗差异明显的结构, 使入射波在屏障界面处发生反射、散射、绕射和能量耗散, 从而削弱振动向保护区域的传播。相比单纯依靠增大传播距离或提高路基刚度的减振方式, 沟槽类屏障具有结构形式

明确、布置灵活和隔振效果直观等优点, 在铁路、地铁及邻近建筑振动控制中具有较好的应用潜力。因此, 研究不同填充状态下沟槽屏障的振动衰减规律, 对优化隔振结构设计具有重要意义。

围绕沟槽类隔振屏障的隔振性能, 已有学者开展了较多研究。Woods^[1]通过现场试验指出, 空沟深度达到一定比例的瑞利波波波长后, 可取得明显减振效果, 说明沟深是

影响隔振性能的重要因素。孙立强等^[2]采用大比例尺试验,对比了空沟、碎石填充沟和排桩的减振效果,验证了不同屏障形式对振动传播的控制作用。Alzawi 和 El Naggar^[3]结合全尺寸试验与数值模拟,比较了空沟和泡沫填充沟的隔振效果,指出柔性填充材料能够改变沟槽屏障的振动衰减能力。Celebi 等^[4]通过现场测试和数值分析研究了土体与隔振屏障之间的动力相互作用。李亮忠等^[5]基于有限元方法分析了沟屏障在高速列车振动隔离中的作用,认为沟深、沟宽及土体性质均会影响隔振效果。Ulgen 和 Toygar^[6]对空沟、充水沟和土工泡沫填充沟进行了场地试验,发现填充状态、激励频率和测点位置对振动衰减规律具有显著影响。Beskos 等^[7]和 Dasgupta 等^[8]采用边界元法研究了空沟和填充沟的波动隔离问题,并提出了相应的屏障设计准则。任康乐等^[9]研究了空沟—波阻板联合隔振体系对地铁振动的控制作用,表明合理组合结构能够提高振动衰减能力。Yarmohammadi 等^[10]将有限元法与遗传算法结合,对沟槽屏障的位置和深度进行了优化分析。余俊等^[11]通过数值模拟研究了排沟对爆破振动表面波传播的影响,揭示了沟槽布置方式对振动衰减的作用。Yao 等^[12]从波传播角度分析了 Rayleigh 波在填充沟与土体界面处的反射和透射特征,指出填充材料密度和弹性模量是影响波动传播的重要参数。Feng 等^[13]提出在埋置波屏障顶部设置延伸板的改进结构,结果表明结构形式优化能够进一步提升填充沟的减振效果。由此可见,现有研究已从现场试验发展到理论分析、数值模拟和参数优化相结合的阶段,研究内容也由空沟逐渐扩展到填充沟、组合屏障及不同材料填充屏障。然而,已有研究多集中于普通空沟或单一填充沟,对刚性槽体约束下不同填充材料的隔振差异关注不足。混凝土 U 型槽具有侧壁刚度较高、结构稳定性较好和工程成槽性较强等特点,其内部填充状态会直接影响屏障与周围土体之间的动力相互作用。不同填充材料的密度、刚度和耗能特性差异较大,进而会改变振动传播和衰减规律。

基于此,本文设置空腔、EPS 泡沫、橡胶和原状土材料四种填充工况,分析不同填充材料对混凝土 U 型槽隔振性能的影响,并通过振动响应和频率响应特征对比,揭示填充材料参数对隔振效果的作用机制,为铁路路基振动控制中沟槽类屏障的材料选择和结构优化提供参考。

1 研究内容

本文以混凝土 U 型槽隔振结构为研究对象,建立二维数值计算模型,分析不同填充材料及结构参数对地基振动传播规律的影响。模型由原状土体、混凝土 U 型槽及槽内填充区域组成,通过在振源侧施加动力荷载,并

在隔振结构另一侧设置测点,提取不同工况下的振动响应。采用频响函数[FRF=20lg(a₁/a₀)]评价 U 型槽的隔振性能,其中 a₁ 和 a₀ 分别表示有屏障和无屏障条件下的加速度幅值。通过对比不同工况下测点处 FRF 曲线的变化规律,分析 U 型槽对地基振动的衰减效果。根据 FRF 与幅值衰减率之间的关系,将-10.46dB(70%)和-20dB(90%)作为衰减的参考标准,用于划分有效衰减区和强衰减区。

在参数分析方面,本文首先研究不同填充材料对 U 型槽隔振性能的影响,分别设置空腔、EPS 泡沫、橡胶和原状土四种填充工况^[14-16],比较不同介质下 FRF 曲线的差异,具体材料参数见表 1。以空腔混凝土 U 型槽为例,通过改变 U 型槽宽度,研究槽宽变化对隔振效果的影响,探讨不同槽宽条件下振动反射、散射及绕射效应的变化规律。进一步改变 U 型槽深度,分析槽深对振动衰减能力的影响,揭示槽深与振动波波长之间的匹配关系及其对不同频段隔振效果的作用。通过上述研究,本文系统分析了填充材料、槽宽和槽深对混凝土 U 型槽隔振性能的影响规律,明确不同参数条件下的主要隔振频段及衰减特征,为沟槽类隔振结构在铁路路基振动控制中的设计与优化提供依据。

表 1 填充材料参数

材料种类	密度 (kg/m ³)	弹性模量 (MPa)	泊松比
空腔	—	—	—
EPS 泡沫	10	2.63	0.1
橡胶	1300	0.1175	0.47
原状土	1710	25	0.25

2 有限元模型建立

为研究混凝土 U 型槽对地基振动传播的隔离效果,本文建立二维有限元数值模型,如图 1 所示。模型由土体、混凝土 U 型槽及槽内填充区域组成。U 型槽设置于激振点 A 与测点 B 之间,用于模拟振动波在传播路径中遇到沟槽类隔振屏障后的传播及衰减过程。根据已有研究,屏障排数增加能够提高隔振效果,但当排数达到 4 排后,继续增加排数带来的提升有限。因此,从隔振效果与工程经济性综合考虑,采用 4 排 U 型槽屏障作为研究对象。在模型两侧和底部添加低反射边界条件,以削弱边界反射对计算结果的影响,使波动传播更接近半无限地基条件。模型参数见表 2。

表 2 有限元模型几何参数

l ₁ (m)	l ₂ (m)	l ₃ (m)	l ₄ (m)	l ₅ (m)	l ₆ (m)	a (m)	c (m)
30	15	5	10	2	6	2	1

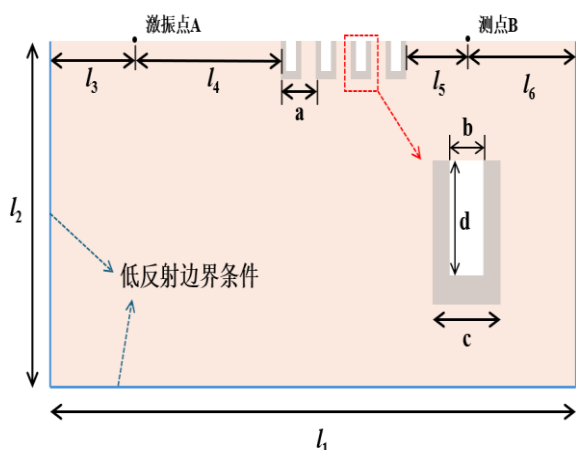


图1 有限元模型示意图

3 参数分析

相关研究表明,轨道交通运营过程中产生的地基振动主频主要集中在 1~100Hz 范围内。基于此,本文将 1~100Hz 作为主要研究频段,并以频响函数 FRF 作为隔振性能评价指标。首先,设置空腔、EPS 泡沫填充、橡胶填充和原状土填充四种工况,分析不同槽内介质对混凝土 U 型槽隔振效果的影响;在此基础上,以空腔混凝土 U 型槽为对象,进一步研究槽宽和槽深变化对其隔振性能的影响。

3.1 不同材料填充对隔振性能的影响

为研究槽内填充材料对混凝土 U 型槽隔振性能的影响,本文设置空腔、EPS 泡沫填充、橡胶填充和原状土填充四种工况,并对比各工况下的 FRF 曲线变化规律。由图 2 可知,不同填充材料下的 FRF 曲线整体变化趋势基本一致。在 0~25Hz 范围内,不同材料对应曲线差异较小,FRF 值由 0dB 下降至-10dB 左右,表明该频段内 U 型槽的隔振作用有限。这主要是由于低频振动波长较长,槽体尺寸相对较小,振动波易绕过槽体继续传播。当频率增至 30Hz 以后,各工况的 FRF 值迅速下降,并在 35~45Hz 范围内进入明显衰减区。此时 FRF 值基本低于-20dB,衰减率大于 90%,说明 U 型槽在中频段具有较好的隔振效果。

其中, EPS 泡沫、橡胶和原状土的 FRF 曲线较为接近,表明轻质低刚度材料虽然会改变槽内波阻抗,但对整体隔振性能的影响并不显著。在 40~60Hz 范围内,空腔工况的 FRF 曲线在局部频段低于其他工况,表明其在该频段内具有较好的衰减效果,但这种差异主要集中在有限频率范围内,说明填充材料对隔振性能的影响具有一定频率选择性。而在 60~70Hz 附近,各曲线均出现不同程度升高,说明该频段的隔振性能较差。75Hz 以后,各工况的 FRF 值再次降低并基本维持在-35dB 左右,说明 U 型

槽对高频振动仍具有较强的隔振作用。由此可见,不同填充材料下 U 型槽均能在中高频范围内形成较明显的隔振效果。相比填充材料差异,混凝土 U 型槽自身的阻隔作用对振动衰减起主要控制作用。

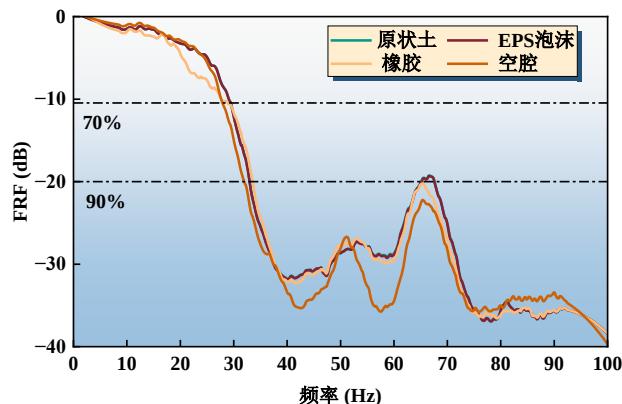


图2 不同填充材料下混凝土 U 型槽隔振性能 FRF 曲线对比

3.2 U 型槽的宽度对隔振性能的影响

为研究槽宽对空腔混凝土 U 型槽隔振性能的影响,在保持其他参数不变的条件下,选取宽度为 0.2m、0.4m、0.6m 和 0.8m 的 U 型槽进行对比分析。由图 3 可见,在 0~25Hz 范围内,各工况 FRF 曲线基本重合,且 FRF 值较高,说明槽宽变化对低频振动隔离作用有限,槽体宽度变化难以显著改变波的传播路径;当频率增至 30Hz 左右时,各工况的 FRF 值均快速下降,说明 U 型槽隔振作用逐渐增强;在 35~50Hz 范围内,槽宽对隔振效果的影响较为明显,其中,槽宽为 0.2m 和 0.4m 时,FRF 值降至-30dB 以下,表现出较强的衰减效果,而槽宽为 0.8m 时,FRF 值整体相对较高,继续增大槽宽并未进一步改善该频段的隔振性能。在 55~70Hz 范围内,各工况的隔振性能均降低,且峰值大小和位置存在差异,其中, 0.8m 工况 FRF 值相对较高,隔振效果较弱,其余三种槽宽工况仍保持较低水平。结果表明,槽宽增大对隔振性能的影响并非单调增强,主要原因是过大的槽宽可能改变槽体周围波场分布,使部分频段出现透射增强或局部响应放大。当频率增至 75Hz 以后,各工况的 FRF 值再次下降;尤其是在 80~100Hz 范围内,多数曲线低于-30dB,且不同槽宽曲线差异减小,说明高频条件下 U 型槽整体阻隔作用更加明显,槽宽变化的影响相对减弱。

为进一步说明不同频段下 U 型槽对波场分布的影响,选取不同频率下的加速度响应云图进行对比分析。如图 4 所示,图 4 (a) 为 19Hz 时的加速度响应云图,此时振动波在屏障后方仍能继续传播,未形成明显的振动衰减区,与低频段 FRF 值较高的结果一致。图 4 (b) 为 42Hz 时

的加速度响应云图,可以看出振动波传播至 U 型槽附近后受到明显阻碍,屏障后方加速度响应明显降低,并形成较清晰的衰减区,说明该频率下 U 型槽能够有效抑制振动向远场传播。综上所述,适当槽宽有利于提高主要隔振频段内的衰减效果,但槽宽过大可能会降低整体隔振性能。

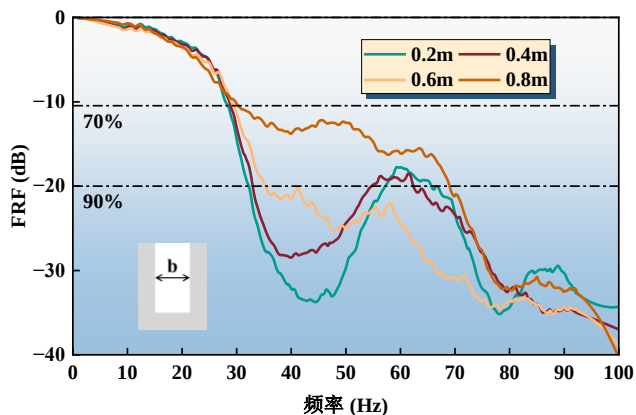


图3 不同槽宽条件下 U 型槽隔振性能 FRF 曲线对比

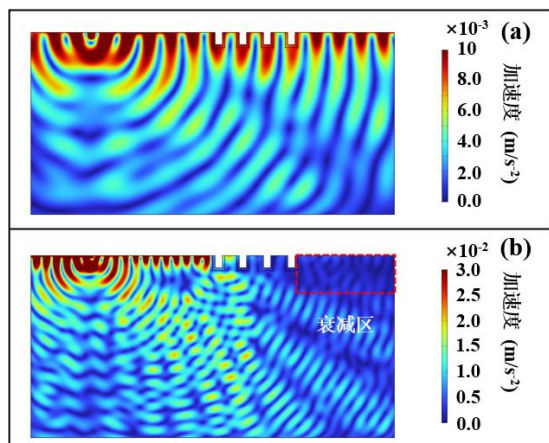


图4 不同频率下地基的加速度响应云图 (a) 19Hz (b) 42Hz

3.3 U 型槽的深度对隔振性能的影响

为研究槽深对空腔混凝土 U 型槽隔振性能的影响,保持其他参数不变,分别选取深度为 0.7m、0.8m、0.9m 和 1.0m 的工况进行计算。由图 5 可知,在 0~30Hz 频段,槽深变化对低频振动隔离效果影响较小。其原因在于 U 型槽深度相对于波长仍然较小,振动波通过槽底绕射传播,增加槽深难以削弱振动。在 35~50Hz 范围内,各工况的 FRF 值均快速下降并进入衰减区。其中,0.7m 和 0.8m 工况在 40~50Hz 附近 FRF 值相对较低,局部隔振效果较好;而 0.9m 和 1.0m 工况在该频段的 FRF 值略高。这说明 U 型槽隔振效果不仅与槽深有关,还与振动波波长、槽深与波长之比、波的反射和绕射路径等因素密切相关。在 55~70Hz 范围内,各槽深曲线均出现一定程度上升,表明该频段的隔振性能降低,特别是 0.9m 和 1.0m 工况在 60Hz

时 FRF 回升较明显,说明较深槽体在某些频率下可能引起局部波场重分布,使测点 B 响应增强。当频率达到 75Hz 以后,各工况 FRF 再次明显下降,并在 80Hz 附近达到较低水平,表明 U 型槽对高频振动具有较强的隔离作用。在 90~100Hz 范围内,1.0m 深度工况 FRF 进一步降低,表现出较好的高频隔振效果;而 0.9m 工况在该频段存在一定回升。

为进一步说明不同频率下 U 型槽对波场传播的影响,选取不同频率下的加速度响应云图进行对比分析。如图 6 (a) 所示,当频率为 17Hz 时,振动波在传播至 U 型槽后仍可通过槽底及周围土体继续向屏障后方传播,屏障后方未形成明显的衰减区,说明低频条件下 U 型槽对振动传播的阻断作用较弱。如图 6 (b) 所示,当频率为 44Hz 时,振动波在 U 型槽附近发生明显反射、散射和绕射,屏障后方加速度响应明显降低,并形成较清晰的衰减区。这与图 5 中的结论一致。

由此可见,增加 U 型槽深度总体上有利于提高隔振性能,尤其在部分中高频范围内能够增强对振动波的阻断作用。

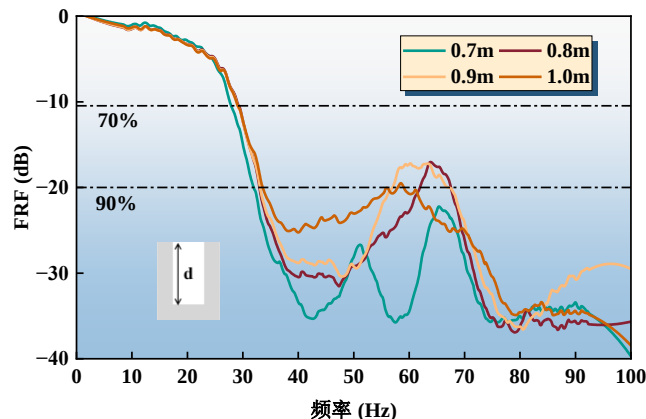


图5 槽深变化对 U 型槽隔振性能影响的 FRF 对比曲线

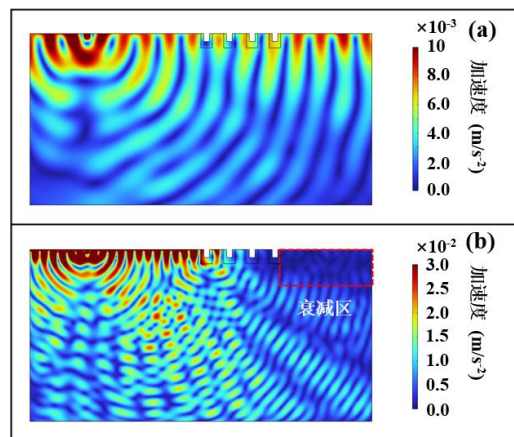


图6 不同频率下地基的加速度响应分布云图 (a) 17Hz (b) 44Hz

4 结论

本文以混凝土 U 型槽隔振结构为研究对象,建立二维有限元模型,并采用频响函数 FRF 对不同参数条件下的隔振性能进行分析,得到以下结论。

混凝土 U 型槽对地基振动具有较好的隔离作用,但是 U 型槽对低频振动的隔振效果有限;当频率增大至 30Hz 以后,FRF 值明显降低,衰减率超过 70%,表明该结构在中高频范围内能够有效抑制振动传播。

不同填充材料会影响 U 型槽的隔振效果,但整体差异不显著。相比 EPS 泡沫、橡胶和原状土填充工况,空腔混凝土 U 型槽在多数频段内表现出较好的振动衰减效果。

空腔混凝土 U 型槽的槽宽和槽深主要影响中高频段隔振效果,而对低频振动的改善作用有限。适当槽宽和槽深能够增强部分频段的振动衰减能力,但 FRF 曲线并未随槽宽或槽深增大而持续降低,说明 U 型槽隔振性能受波长、槽体尺寸及波场干涉共同影响。

[参考文献]

- [1]Woods RD, Barnett NE, Sagesser R. Holography—A new tool for soil dynamics[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division,1974,100(11):1231-1247.
- [2]孙立强,李嘉,刘彬.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.
- [3]Alzawi A, Hesham El Naggar M. 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.
- [4]Celebi E, Kirtel O. Non-linear 2-D FE modeling for prediction of screening performance of thin-walled trench barriers in mitigation of train-induced ground vibrations[J]. Construction and Building Materials,2013,42(22):122-131.
- [5]李亮忠,邓亚虹,牛得鑫.沟屏障对黄土地区高速列车振动的隔离效果数值模拟[J].地球科学与环境学报,2025,47(3):371-385.
- [6]Ulgen D, Toygar O. Screening effectiveness of open and in-filled wave barriers: A full-scale experimental study[J]. Construction and Building Materials,2015,86(11):12-20.
- [7]Beskos DE, Dasgupta B, Vardoulakis IG. Vibration

isolation using open or filled trenches: Part 1: 2-D homogeneous soil[J]. Computational Mechanics,1986,1(1): 43-63.

[8]Dasgupta B, Beskos DE, Vardoulakis IG. Vibration isolation using open or filled trenches Part 2: 3-D homogeneous soil[J]. Computational Mechanics,1990,6(2): 129-142.

[9]任康乐,曹小林,刘佳.空沟-波阻板联合隔振体系的三维数值分析[J].噪声与振动控制,2025,45(03):256-261.

[10]Yarmohammadi F, Rafiee-Dehkharghani R, Behnia C, et al. Design of wave barriers for mitigation of train-induced vibrations using a coupled genetic-algorithm/finite-element methodology[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2019,121(15):262-275.

[11]余俊,王业顺,李泰澧.周期性排沟对爆破振动表面波的隔振性能研究[J].工程爆破,2025,31(01):121-129.

[12]Yao JB, Zhao RT, Zhang N, et al. Vibration isolation effect study of in-filled trench barriers to train-induced environmental vibrations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2019,125(13):105-106.

[13]Feng SJ, Li JP, Zhang XL, et al. Numerical analysis of buried trench in screening surface vibration[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2019,126(12): 105-106.

[14]Pu X, Meng Q, Shi Z. Experimental studies on surface-wave isolation by periodic wave barriers[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2020,130(16): 106-107.

[15]Liu J, Cao J, Li X, et al. Bandgap characteristics of four component periodic pile barriers in passive vibration isolation[J]. Scientific Reports,2024,14(1):26-27.

[16]Liu J, Cao J, Guo J, et al. Inner-radius-controlled tuning of surface-wave bandgaps in hexagonal locally resonant periodic pile barriers: experiments and complex band-structure modelling[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2026,204(22):110-137.

作者简介:孙海宽(1990—),毕业于山东理工大学城市规划专业,现就职于石家庄正太建设发展有限公司。