DOI：10.16285/j.rsm.2021.0655

陶粒、砂填充连续与非连续屏障隔振效果的全尺试验与数值研究

张　希[1]，罗威力[1]，林本海[1]，覃娇芬[2]，罗信伟[3]

（1. 广州大学 土木工程学院，广东 广州 510000；2. 广东理工学院 建设学院，广东 肇庆 526000；
3. 广东省城市轨道交通工程建造新技术企业重点实验室，广东 广州 510000）

摘　要：采用全尺试验方法，研究不同材料（陶粒、砂）填充不同类型屏障（连续型、非连续型）的隔振效果。同时，为弥补试验研究的不足，辅以数值研究。为此，在试验研究开展之前，在原场地上进行了面波多通道分析（multi channel analysis of surface waves，简称 MASW）试验，以便获得场地的动力学特性，作为数值研究的基础。随后，开展试验工作以便获得场地固定点的传递函数与衰减分贝；并使用数值方法，编制程序计算加速度分量的空间分布场。综合以上两种方法后发现，隔振材料影响在低频处，两者差异不甚明显；在中频处，两者差异开始显现。陶粒的隔振表现接近空沟；在高频处，因土体的阻尼作用明显，材料影响难以表现。综上所述，陶粒的隔振效果远优于砂，整体表现接近空沟。屏障类型影响：当频率为 30 Hz 时，屏障的作用甚微，分量的空间分布形态以振源为圆心，呈环形分布；频率为 50 Hz 时，环形分布被屏障打破，其形态由环形变为椭圆形，而短边则指向波阵面方向，令一定强度的分量拒止于屏障的后区域；频率为 80 Hz 时，土体阻尼作用明显，以致两者差异不甚明显。综上，连续型屏障的隔振效果远优于非连续屏障。材料与屏障类型使用建议：若采用一般性的材料，考虑成本等因素，使用两者皆可；但采用高阻尼材料，考虑隔振效果等因素，则连续型屏障更优。

关　键　词：全尺试验；陶粒；连续型（非连续）屏障；频率实部–空间分布

中图分类号：TH212；TH213.3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000－7598 (2022) 增刊 1－0567－13

Full-scale test and numerical investigation on vibration isolation effect of continuous and discontinuous barriers filled with ceramsite and sand

ZHANG Xi[1]，　LUO Wei-li[1]，　LIN Ben-hai[1]，　QIN Jiao-fen[2]，　LUO Xin-wei[3]

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510000, China; 2. School of Construction, Guangdong Polytechnic College, Zhaoqing, Guangdong 526000, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New Construction Technology for Urban Rail Transit Engineering, Guangzhou, Guangdong 510000, China)

Abstract: In this paper, the full-scale test method is used to study the vibration isolation effect of different types of barriers (continuous and discontinuous) filled with different materials (ceramsite and sand). Meanwhile, to expand the experimental research, numerical research is supplemented. Therefore, to obtain the dynamic characteristics of the site as the basis of numerical research, the surface wave spectrum analysis (MASW) test was carried out on the original site before the experimental research. Then, to acquire the transfer function and attenuation decibels of the fixed point of the site by experimental research, the program is compiled to calculate the spatial distribution field of acceleration component through numerical method. After combining the above two methods, it is found that: Influence of vibration isolation material: at low frequency, the difference between them is not very obvious; at the intermediate frequency, the difference between the two begins to appear and the vibration isolation performance of ceramsite is close to that of open trench; at high frequency, the influence of material is difficult to show due to the obvious damping effect of soil. In conclusion, the vibration isolation effect of ceramsite is much better than that of sand, and the overall performance is close to the open trench. Influence of barrier type: when the frequency is 30 Hz, the barrier has little effect, and the spatial distribution of

收稿日期：2021-04-29　　修回日期：2022-04-28
基金项目：国家自然科学基金青年基金（No.51808147）；广东省普通高校青年创新人才项目（No.2018KQNCX313）；广州大学研究生“基础创新”项目基金（No.2018GDJC-D14）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China Youth Fund(51808147), the Young Innovative Talents Project of Colleges and Universities in Guangdong Province(2018KQNCX313) and the "Basic Innovation" Project Fund for Postgraduates of Guangzhou University(2018GDJC-D14).
第一作者简介：张希，男，1986年生，博士研究生，主要从事土动力学的科研工作。E-mail: 653651960@163.com
通讯作者：林本海，男，1964 年生，博士，教授，主要从事岩土工程的教学与科研工作。E-mail: linbenhai@163.com

components takes the vibration source as the center, showing a circular distribution; When the frequency is 50 Hz, the annular distribution is broken by the barrier and its shape changes from annular to oval, while the short side points to the direction of the wave front, so that the component of a certain intensity is rejected in the rear area of the barrier; When the frequency is 80 Hz, the soil damping effect is obvious, so that the difference between them is not obvious. In conclusion, the vibration isolation effect of continuous barrier is much better than that of discontinuous barrier. Suggestions on the use of materials and barrier types: if general materials are used, both continuous and discontinuous barriers can be used considering factors such as cost. However, using high damping materials and considering the effect of vibration isolation, the continuous barrier is better.

Keywords: full-scale test; ceramsite; continuous(discontinuous) barrier; spatial distribution of frequency real part

1 引 言

随着城市轨道交通的大力发展，其振动引起的干扰，越来越多地引起了学术界和工程界的广泛关注。比如：①影响城市人居环境；②引起沿线保护建筑的损伤；③破坏周围精密仪器的使用环境等。

为减小上述不利影响，在实际隔振工程中，一般可在其传播途径上设置屏障，以减小振动强度。根据屏障的组成形式可分为两类：①连续型屏障，②非连续型屏障。连续型屏障具有隔振效果好，易于施工的特点，而非连续型屏障则具有造价经济，布置灵活的特点。因此，国内外学者进行了大量的研究。

田抒平等[1]采用试验与数值方法，对 Duxseal 填充 WIB 隔振系统的隔振效果进行了研究。结果表明：相对于传统 WIB 屏障，Duxseal-WIB 系统的隔振效果较好且表现稳定；邬玉斌等[2]采用试验与数值方法，对地铁振动条件下，排桩的隔振效果进行了研究。结果表明：排桩布设形式、深度对隔振效果的影响是较为明显的；孟玉山等[3]采用试验方法，研究了线性荷载条件下，排桩和空沟，其减振范围的分布情况。结果表明：排桩亦可获得整体性的隔振效果，而空沟的影响范围要大于排桩；刘晶磊等[4]采用试验方法，对环形沟槽的隔振效果进行了研究。结果表明：其深度与瑞利波波长的比值为 0.54～0.77、其宽度与波长的比值为 0.23～0.33、振源距离与波长的比值为 1.18～1.52，沟槽可以取得良好的隔振效果；刘晶磊等[5]采用试验方法，对一系列非连续屏障的隔振效果进行了研究。结果表明：实心混凝土桩效果最优，空心混凝土桩次之，PVC 空井最劣。张立群等[6]采用试验方法，研究了空屏障减隔振作用对路基本体的影响。结果表明：屏障深度改变是影响路基振动加剧的主要因素，而宽度影响则不明显。

Ma 等[7]采用试验与数值方法，研究了陇海铁路线上某粮仓的隔振措施方案。结果表明：采用非连续屏障即可获得预定的隔振目标，在考虑经济性的前提下，交错布置的双排桩方案可能最优；Liu 等[8]采用试验方法，研究了在砂土中设置空屏障与排桩的隔振效果。结果表明：空屏障的隔振效果要优于排桩。当屏障深度与荷载激励频率一定时，空屏障对应的幅值衰减率下降了 0.069，而桩的则仅减小了 0.032；Yu[9]采用试验方法，研究了砂桩与其间距对隔振效果的影响。结果表明：桩体对振动波有着明显的衰减作用，且隔振效果随着间距的减小而增大；Mahdavisefat 等[10]采用试验方法，对不同配比条件下，橡胶−砂混合物的隔振性能进行了研究。结果表明：橡胶砂作为高能量吸收材料，当其填充屏障时，可以获得近似空沟的效果；Chen[11]采用试验方法，对钢筋混凝土板、非连续排井和排桩屏障的隔振效果进行了研究。结果表明：将钢筋混凝土板用于隔振，将获得良好的效果，而非连续排井和排桩的效果则基本相同；Dijckmans 等[12]采用试验与数值方法，研究了钢板桩的隔振效果。结果表明：板桩对 4 Hz 以下的频率分量几乎无作用，而对于其他频率段，其效果随着频率的增加而增加，而随着桩后距离的增加而减少；Toygar[13]采用试验方法，对空沟、砂和橡胶填充屏障的隔振效果进行了研究。结果表明：空沟的隔振效果最好，橡胶屏障次之，砂屏障最劣。不同材料的隔振效果差异较大。但随着距离的增加，其效果差异则逐渐消失；Coulier 等[14]采用试验和数值方法，研究了旋喷桩对列车振动波的阻隔作用。结果表明：对于 8 Hz 以上的频率分量，其衰减量可达 5 dB；对于 30 Hz 的频率分量，其衰减峰值可达 12 dB。

综上所述，之前的研究虽取得不少成果，但笔者认为全尺试验研究相对较少，隔振屏障的相关研究还可从以下方面进行深入：

（1）试验研究方法问题：试验研究中，采用缩尺试验较为常见，其基于“相似理论”即保证试验过程中对应时刻的某些局部物理量成比例。因此，它不能完全反映真实物理对象在试验过程中的行为，其必存在一定程度的失真。为规避以上问题，本文采用全尺试验方法进行相关研究。

（2）研究对象问题：在隔振的相关研究中，一般采用混凝土、碎石等重质材料，而对于轻质材料则相对较少。考虑到陶粒具有轻质、高阻尼的特点。同时，有研究证实[15]，它具有良好的抗震与吸能特性。但是，将此材料应用于隔振研究与实际工程，却鲜见报道。为此，本文采用陶粒填充连续与非连续屏障，同时设置砂作为对照，并对它们的隔振效果进行研究。

2　场地条件的确定

本文在原场地上进行了 MASW 试验，从而获得场地土的动力学特性（剪切波速与分层厚度），为数值模拟提供数据基础，以便开展相关研究。

2.1　试验场地

试验场地位于广州大学西北角落的绿地上，其纵向长度为 70 m，横向宽度为 30 m。同时，周围无建筑物且远离高速公路。环境干扰因素可以忽略，具有良好的试验条件，如图 1 所示。



图 1　场地环境
Fig.1　Site environment

2.2　试验设备

振击设备采用 KSI 公司开发的 728A200 大型力锤。其具体技术指标如下，量程：+/−200 kN；灵敏度：25 mV/kN；最大输入：400 kN；传感器共振频率：45 kHz。

数据采集使用华东测试 DH5981 动态信号采集器。其技术指标包括，通道数：32 通道/台；A/D 转换器：24 bit&A/D；采样：32 通道同步，最高采样速率 128 kHz。加速度计采用东华 DH105 压电式传感器，其技术指标包括，灵敏度：200 pC/ms^{-2}；最大测量值：±50 m/s^2；横向灵敏度比：＜5%；安装方式：M6 螺纹孔。

相关设备如图 2 所示。

2.3　测点布置

为获得地面的加速度时程数据，传感器通过螺纹固定于铝土钉上，而土钉则嵌入土中进行工作；为获得振动波在空间内的传播信息，在波传播方向上布置一定数量的加速度计，通过不同位置的振动波信息，反映在自由场状态下，其动力特性。在本次试验中，拟定布置加速度计 30 个，相邻间隔为 1 m，空间采样频率为 1 m^{-1}, 如图 3 所示。

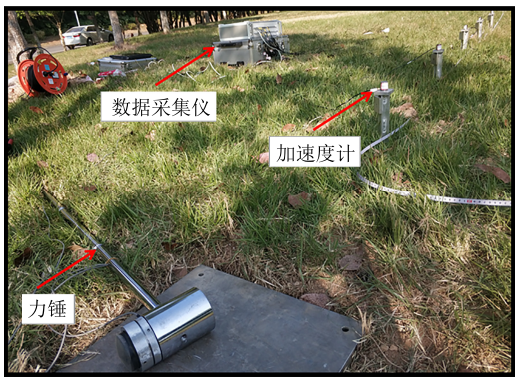


图 2　试验设备
Fig.2　Experiment equipment

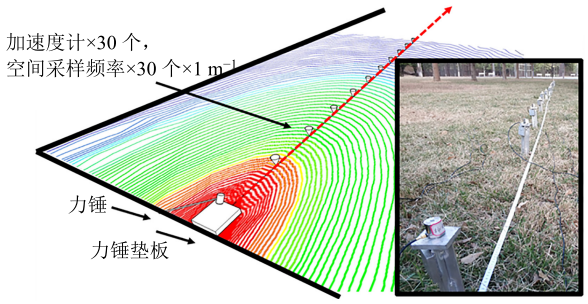


图 3　加速度计的布置
Fig.3　Arrangement of accelerometers

2.4　试验数据

因试验存在随机误差，拟定重复试验 100 次、并将数据平均处理，以减小仪器、环境噪音、人为等因素的影响。因轨道交通产生骚扰的振动频率一般不大于 100 Hz，最终设定采样频率为 500 Hz。

因远场的振动波衰减较快，噪声与信号逐渐接近并难以区分（信噪比下降）。为减小以上影响，将其传递函数予以平均实现。方法如下：

$$\hat{H}_{oj}(r,\omega)=\frac{\overline{\hat{S}_J(\omega)}}{\overline{\hat{S}_o(\omega)}}=\frac{(N^{-1})\sum_{i=1}^{N}\hat{a}_j^i(\omega)\hat{F}_o^{i*}(\omega)}{(N^{-1})\sum_{i=1}^{N}\hat{F}_o^i(\omega)\hat{F}_o^{i*}(\omega)} \quad (1)$$

式中：$\hat{H}_{oj}(r,\omega)$ 为 j 处采样点的平均传递函数；$\overline{\hat{S}_J(\omega)}$ 为 j 处采样点与锤击点的互功率谱均值；$\overline{\hat{S}_o(\omega)}$ 为锤击点的自功率谱均值；$\hat{a}_j^i(\omega)$ 为第 i 次试验、j 处采样点的加速度频域；$\hat{a}_j^{i*}(\omega)$ 为 $\hat{a}_j^i(\omega)$ 的共轭复数；$\hat{F}_o^i(\omega)$ 为在锤击点，第 i 次试验的力频域；$\hat{F}_o^{i*}(\omega)$ 为 $\hat{F}_o^i(\omega)$ 的共轭复数；N 为击发次数。

计算结果如图 4 所示，可以看出低频分量具有良好的传递特性，其中 50 Hz 的分量较为突出，而高频则衰减较快。

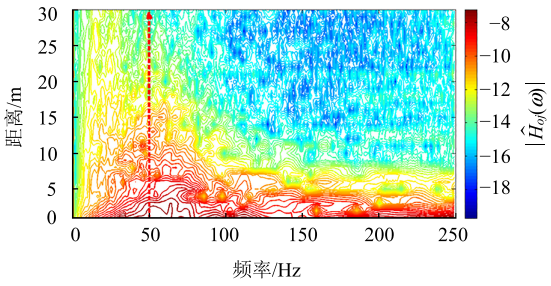


图 4 场地传递函数

Fig.4 Transfer function of field

f-k 分析[16]即基于土体在频域−波数谱内的响应，并以此确定频散曲线。一般而言，将频域−空间转化为频域−波数域的方法有很多种，其中 Slant-Stack 算法是比较常用的方法[17]：通过离散 Fourier 近似变换，将空间 r 变换至波数 k_r。因该问题属于圆柱对称的波场问题，故可将 Fourier 变换更替为 Hankel 变换，即 Forbriger[18]算法，在柱坐标系与频域−波数域内，存在：

$$\tilde{H}_{oj}(k_r,\omega)=\frac{1}{2}\int_0^{r_{\max}}\hat{H}_{oj}(r,\omega)H_0^{(1)}(k_r r)r\mathrm{d}r \tag{2}$$

式中：$\tilde{H}_{oj}(r,\omega)$ 为传递函数；k_r 为波数；$H_0^{(1)}(k_r r)$ 为第 1 类零阶 Hankel 函数。

为了获得径向波数，则须进行一定量的采样。因此，可通过 $k_r=\omega/C_r$ 的线性关系（C_r 为波速），将传递函数 $\tilde{H}_{oj}(k_r,\omega)$ 取代为 $\tilde{H}_{oj}(C_r,\omega)$。同时，将该关系适用于传播线上的任意位置，获得空间采样数据。最后为了达到可视化的目的，可通过下式将 $\tilde{H}_{oj}(C_r,\omega)$ 进行归一化处理：

$$\tilde{H}_{oj}^{\mathrm{norm}}(C_r,\omega)=\frac{\tilde{H}_{oj}(C_r,\omega)}{\max\left|\tilde{H}_{oj}(C_r,\omega)\right|} \tag{3}$$

式中：$\tilde{H}_{oj}(C_r,\omega)$ 为频域−相速度谱；$\tilde{H}_{oj}^{\mathrm{norm}}(C_r,\omega)$ 为归一化的频域−相速度谱。试验对应的 $\tilde{H}_{oj}^{\mathrm{norm}}(C_r,\omega)$ 图像如图 5 所示，即归一化后的频域−相速度谱。而频散曲线 $C_R^E(\omega)$ 则可以通过谱中的峰值予以确定。计算结果如图 5 所示。

土体剪切波速的分布信息，可以通过试验获得的耗散曲线予以确定，即通过耗散曲线的形态，反向确定土体剪切波速在深度方向上的分布。而求解算法与初始条件的确定，很大程度上取决于问题的具体情况和对它的理解[19]。在此，可以通过设定目标函数[20]，并采用 Newton 置信域局部优化算法[21]予以实现。计算结果如图 6 所示。

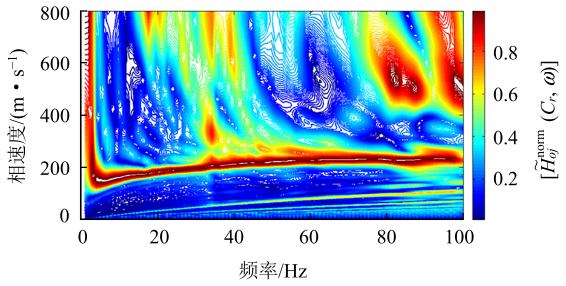


图 5 频域−相速度谱

Fig.5 Frequency domain-phase velocity spectrum

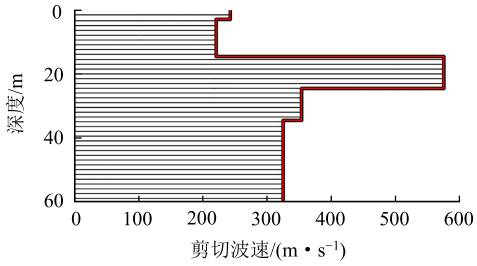


图 6 剪切波速的深度分布

Fig.6 Depth distribution of shear wave velocity

3 试验研究

3.1 试验方案与空间布置

连续型屏障的尺寸为：长 6.0 m、宽 0.7 m、深度 1.5 m；非连续屏障桩尺寸为：长 0.8 m、宽 0.7 m、桩净距 0.5 m、深度 1.5 m。试验的布置方案、平面与现场照片如图 7～9 所示。

装填试验材料后，使用力锤敲击垫板，并记录各加速度计的振动信号。为减小随机误差，每次试验重复 10 次。试验中设定的采样频率为 200 Hz。

3.2 材料参数

试验砂为建筑标准中砂，来源于广州某建筑材料厂。其细度模数在 2.8 左右，粒径范围为 0.25～0.50 mm，干燥状态下密度约 1 450 kg/m^3。试验陶

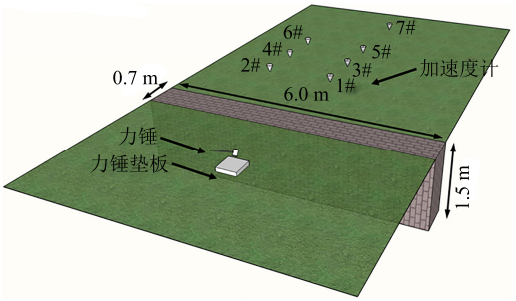


图 7 试验方案轴测示意图（连续型屏障）

Fig.7 Sketch of test plan(continuous barrier)

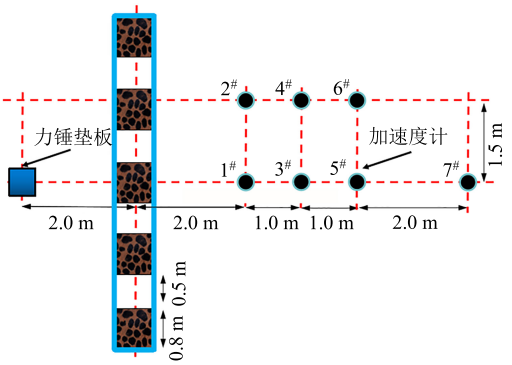


图 8　屏障平面尺寸示意图（连续型&非连续屏障）
Fig.8　Sketch of barrier plan (continuous & discontinuous barrier)



(a) 陶粒填充连续型



(b) 陶粒填充非连续型

图 9　试验现场图
Fig.9　Test site

粒为泥黏土陶粒（执行《轻集料及其试验方法》（GB/T 17431.1—2010）[22]，来源于佛山某烧制厂。其颗粒小大较为均一，形状多为类椭圆体，粒径范围为 20～35 mm（市场亦称大陶粒），干燥状态下密度约为 450 kg/m^3，自然堆积状态下孔隙率约为 38%左右，如图 10 所示。土层与陶粒相关参数由 MASW 法、数值对照试验数进行试算获得，结果如表 1 所示。

3.3　传递函数（定性研究）

注意到，试验中的冲击荷载是人为施加的，每次测定的数据皆不相同。因此，不同次别的数据是不能直接比较的。而传递函数只与场地本身的动力特性相关，与冲击荷载、加速计反应无关。因此，可以采用式（1）计算各加速度计的平均传递函数，予以实现对比研究。其相关计算结果如图 11～17 所示。



(a) 砂



(b) 陶粒

图 10　试验用砂与陶粒
Fig.10　Sand and ceramsite of test

表 1　计算参数
Table 1　Calculation parameters

材料	厚度 h/m	剪切波速 C_s/(m·s^{-1})	泊松比μ	密度 /(kg·m^{-3})	阻尼比 D
1 土层	2.9	242.9	0.30	1 750	0.17
2 土层	2.1	221.1	0.35	1 950	0.13
砂	—	113.6	0.30	1 450	0.21
陶粒	—	68.2	0.35	450	0.29

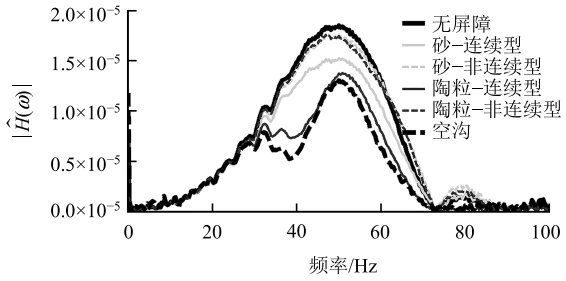


图 11　1#加速度计传递函数
Fig.11　Transfer function of #1 accelerometer

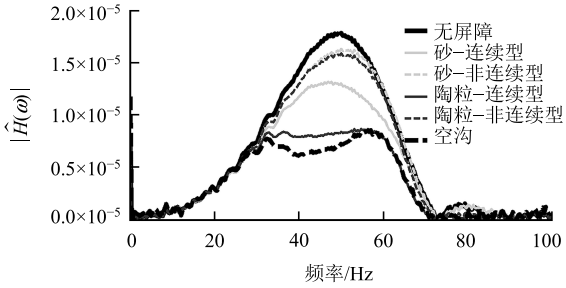


图 12　2#加速度计传递函数
Fig.12　Transfer function of #2 accelerometer

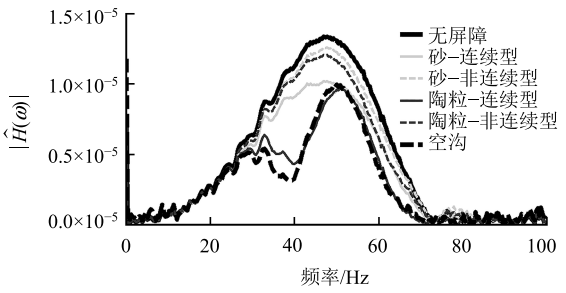


图 13 3#加速度计传递函数

Fig.13 Transfer function of #3 accelerometer

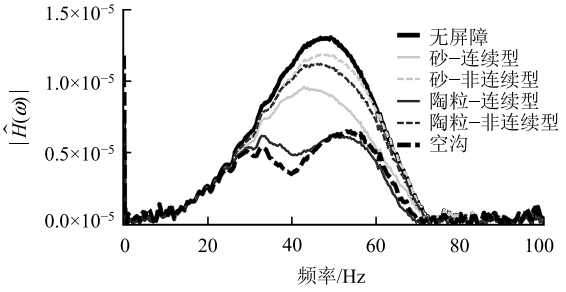


图 14 4#加速度计传递函数

Fig.14 Transfer function of #4 accelerometer

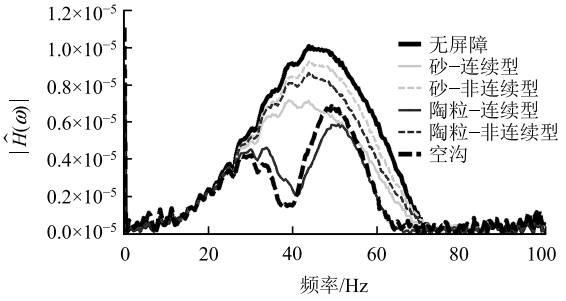


图 15 5#加速度计传递函数

Fig.15 Transfer function of #5 accelerometer

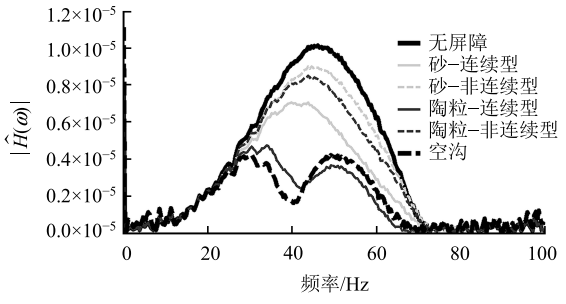


图 16 6#加速度计传递函数

Fig.16 Transfer function of #6 accelerometer

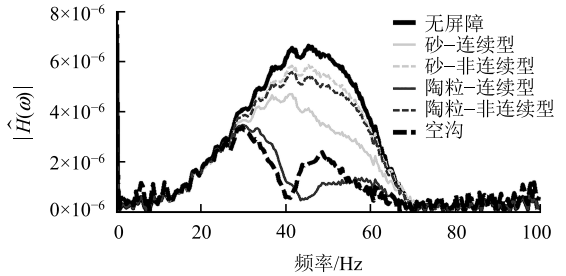


图 17 7#加速度计传递函数

Fig.17 Transfer function of #7 accelerometer

从图 11～17 可以明显看出材料、屏障类型对隔振效果的影响。下面将从以下两方面描述：①材料影响（固定连续屏障）；②屏障类型影响（固定陶粒材料）。

（1）就材料影响而言：在低频处，因低频分量的波长较长，容易出现绕射现象，屏障的隔振作用不甚明显。从 $\hat{H}(\omega)$ 曲线上看，陶粒与砂几乎与无屏障曲线重合。在中频处，分量的波长减小，屏障的作用开始出现，不同材料的的差异则开始显现：陶粒与砂的曲线出现了不同延申方向，砂向无屏障靠近；而陶粒则向空沟靠近。陶粒因高阻尼的特性（在振动波的作用下，可以出现明显的颤动与摩擦），其隔振表现接近空沟，甚至在某些频率段上，其优于空沟。在高频处，两者差异开始减小，并归于 0。这是因为高频分量对土体的阻尼异常敏感，衰减较快从而隐没隔振材料的影响，以致很难区分它们的表现。整体而言，陶粒的隔振效果是明显优于砂的。而且，其整体表现接近于空沟。

（2）就屏障类型影响而言：在低频处，与材料影响类似，两者差异不甚明显，连续型与非连续屏障对低频波的作用不大；在中频处，两者差异开始显现。且随着频率的增长，差异则逐渐明显。在此频率段内，若其他条件固定，则屏障的几何状态（尺寸）对振动波的衰减作用，将起到控制作用。同时，因非连续屏障存在桩间土，振动波以此通过，致使其隔振效果降低。因此，连续型屏障的隔振效果更好；在高频处，因为高分量在土体传播过程中，衰减较快，土体衰减起到控制作用，致使两者差异减小为零。整体而言，非连续屏障的隔振效果明显劣于连续型的。

3.4 衰减分贝（定量研究）

在传递函数的数据基础上，进行 1/3 倍频化，并计算衰减分贝，计算方法如下：

$$R = 10\lg\left[\frac{\text{Octave}\left|\hat{H}_{oj}(\omega)_{\text{free}}\right|}{\text{Octave}\left|\hat{H}_{oj}(\omega)_{\text{all}}\right|}\right] \tag{4}$$

式中：R 为衰减分贝；Octave 为将频域数据进行 1/3 倍频化；$\hat{H}_{oj}(\omega)_{\text{all}}$ 为各材料填充各屏障类型条件下的传递函数；$\hat{H}_{oj}(\omega)_{\text{free}}$ 为无屏障的传递函数。结果如图 18～24 所示。

虽然，从频域与传递函数图像上看，其在低频与高频部分存在一定的噪音，但数据 1/3 倍频化后，该部分所占比例不高，数据的整体表现规整，与传递函数显示的规律一致。以下将从：①材料影响（固定连续屏障）；②屏障类型影响（固定陶粒材料），

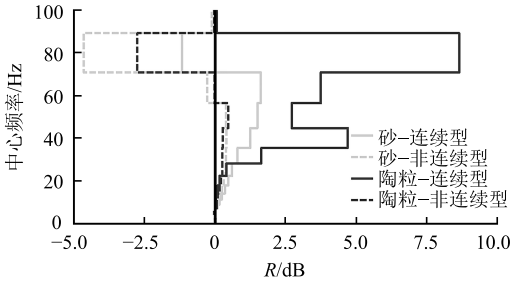


图 18　1#加速度计衰减分贝

Fig.18　Attenuation decibels of #1 accelerometer

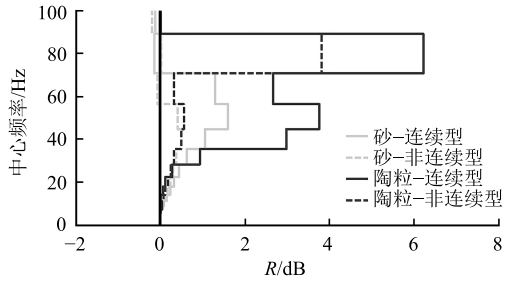


图 19　2#加速度计衰减分贝

Fig.19　Attenuation decibels of #2 accelerometer

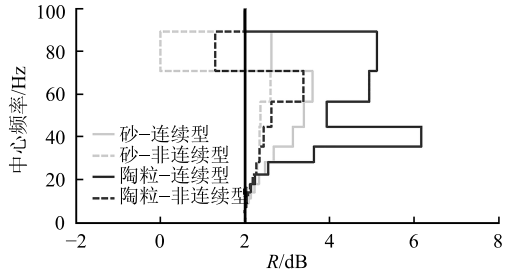


图 20　3#加速度计衰减分贝

Fig.20　Attenuation decibels of #3 accelerometer

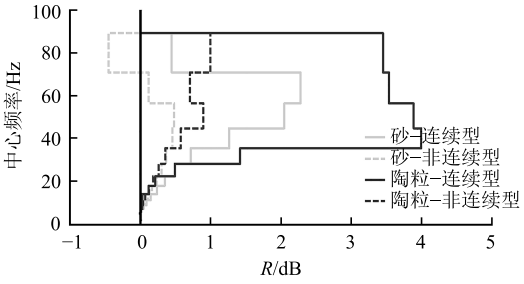


图 21　4#加速度计衰减分贝

Fig.21　Attenuation decibels of #4 accelerometer

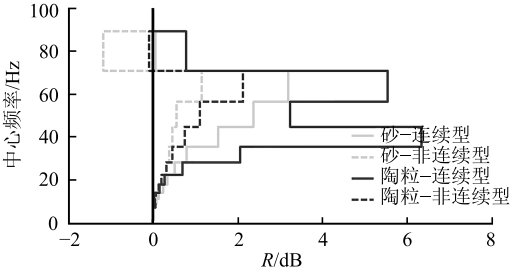


图 22　5#加速度计衰减分贝

Fig.22　Attenuation decibels of #5 accelerometer

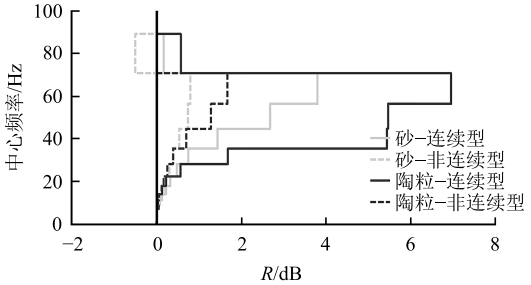


图 23　6#加速度计衰减分贝

Fig.23　Attenuation decibels of #6 accelerometer

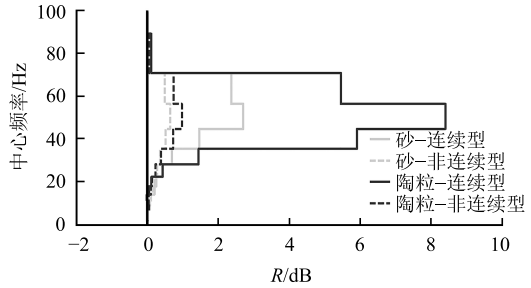


图 24　7#加速度计衰减分贝

Fig.24　Attenuation decibels of #7 accelerometer

此两方面，采用衰减分贝进行定量研究。

（1）就材料影响而言：

在低频段（1～30 Hz）。如 3.3 节所述，低频长波容易绕射，不同材料的隔振效果较难发挥；其衰减甚微，分贝值均在 2.0 dB 以下。其中，陶粒的最大衰减分贝为 1.993 2 dB，而砂的仅为 0.809 3 dB。

在中频段（30～80 Hz）。随着振动波长变短，屏障作用开始显现，分贝梯线开始上升。在该频段上，两者皆达各峰值。同时，陶粒的增长幅度是明显大于砂的。其中，陶粒的衰减分贝可达 9.322 4 dB，而砂仅为 3.801 0 dB。

在高频段（80～100 Hz）。随着频率的提升，土体阻尼开始显现，高频分量在传播过程中几乎完全衰减。致使梯线开始下降，两者衰减分贝差异不甚明显，皆在 0.0 dB 左右。

整体而言，陶粒的隔振效果约为砂的两倍。

（2）屏障类型影响而言：

在低频段（1～30 Hz）。其衰减甚微，分贝值均在 2.0 dB 以下。其中，连续型的最大衰减分贝为 1.993 2 dB，而非连续型的仅为 0.452 5 dB。

在中频段（30～80 Hz）。其衰减明显，分贝梯线开始上升。在该频段上，两者皆达各峰值。其中，连续型的衰减分贝可达 9.322 4 dB，而非连续型仅为 3.814 8 dB。

在高频段（80～100 Hz）。其衰减甚微，梯线开始下降，两者衰减分贝差异不甚明显，皆在 0.0 dB

左右。

整体而言，连续型屏障的隔振效果约为非连续型的两倍有余。

4 数值研究

4.1 模型建立

数值研究采用 3D-PML（perfectly matched layer）程序计算。考虑到：体波的衰减速度较快、PML 边界层吸波效率良好、求解效率等因素。计算采用两层土，并在笛卡尔坐标系中建立数值模型。为将模型尺寸与土体波动相关，采用波长归一化的方法予以描述：λ_R = 5.0 m 是频率分量为 50 Hz 的 Rayleigh 波波长，模型 X 方向长 $3\lambda_R$；Y 方向长 $1.5\lambda_R$；Z 方向长 $1.0\lambda_R$，冲击荷载和加速计布置与试验中一致。如图 25 所示。

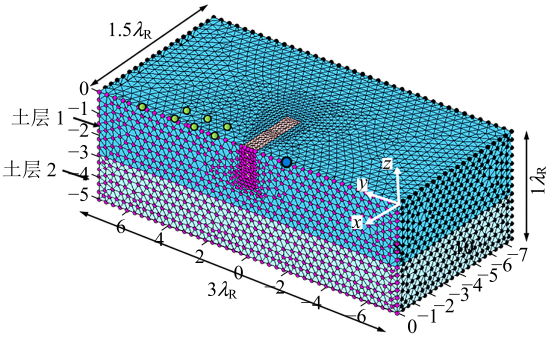


图 25 3D-PML 数值计算模型

Fig.25 3D-PML numerical calculation model

4.2 Ricker 冲击

从数值计算的角度来说，设定其为单位幅值衰减小波较为合适。因此，荷载可用正弦脉冲信号平方的半周期予以表达[23]，即 Ricker 冲击，如下式：

$$F_{\mathrm{Rick}}(t)=A\sin^2\left(\frac{2\pi t}{T_{\mathrm{D}}}\right)\left[u(t-t_{\mathrm{s}})-u\left(t-t_{\mathrm{s}}-\frac{T_{\mathrm{D}}}{2}\right)\right] \quad (5)$$

式中：$F_{\mathrm{Rick}}(t)$ 为冲击在时域内的表达；A 为幅值，设 A = 1 N 为单位力；T_{D} 为特征周期，为使离散的时间能充分捕捉荷载的脉冲信息，应有 $1/F_{\mathrm{S}}\leqslant T_{\mathrm{D}}/4$，$F_{\mathrm{S}}$ 为采样频率，本文中为 200 Hz，故 T_{D} 可取 0.02 s；t_{s} 为时间转换，t_{s} = 2.56 s；$u(t)$为单位阶跃函数：若 t<0，$u(t)$ = 0，若 $t\geqslant 0$，$u(t)$ = 1；其时域与频域如图 26、27 所示。

4.3 传递函数（定性研究）

数值计算的结果如图 28～34 所示。

从图 28～34 可以看出：数值计算与试验结果是较为接近的，但局部细节稍有不同。同时，因试验不可避免存在反射与噪音，其曲线锯齿现象明显；

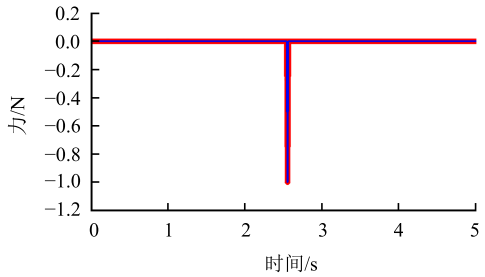


图 26 Ricker 冲击的时域

Fig.26 Time domain of Ricker load

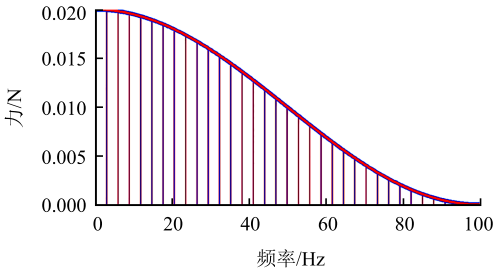


图 27 Ricker 冲击的频域

Fig.27 Frequency domain of Ricker load

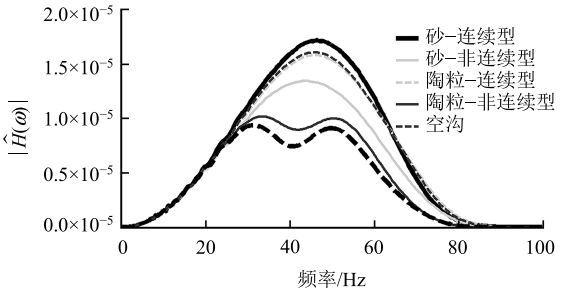


图 28 1#加速度计传递函数

Fig.28 Transfer function of #1 accelerometer

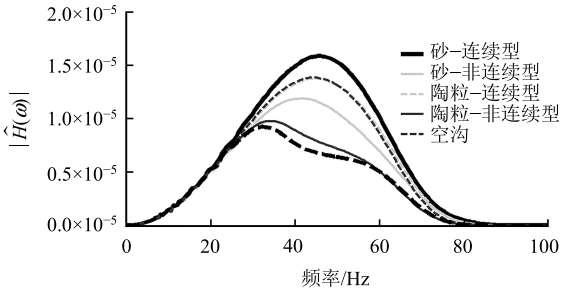


图 29 2#加速度计传递函数

Fig.29 Transfer function of #2 accelerometer

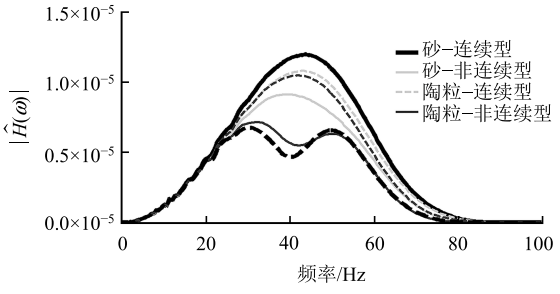


图 30 3#加速度计传递函数

Fig.30 Transfer function of #3 accelerometer

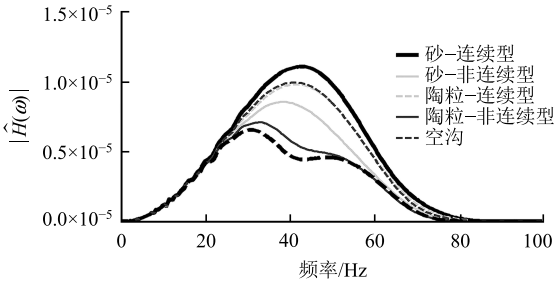


图 31　4#加速度计传递函数

Fig.31　Transfer function of #4 accelerometer

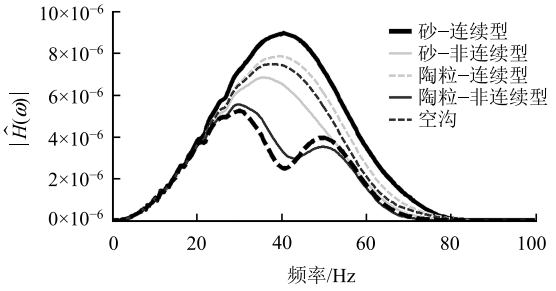


图 32　5#加速度计传递函数

Fig.32　Transfer function of #5 accelerometer

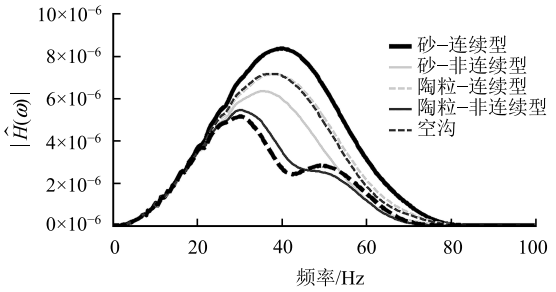


图 33　6#加速度计传递函数

Fig.33　Transfer function of #6 accelerometer

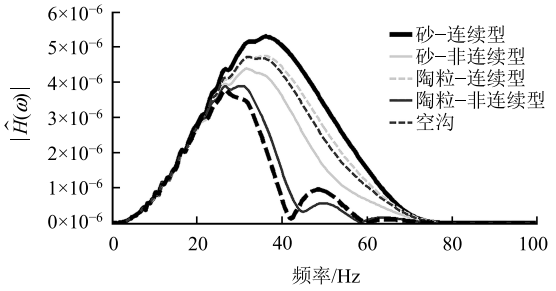


图 34　7#加速度计传递函数

Fig.34　Transfer function of #7 accelerometer

然数值研究则不存在该种问题，因此曲线较为光滑。总之，各 $\hat{H}(\omega)$ 曲线的大体走势是基本相同的，表现出的规律并不相违。

其规律与试验结论类似，在此不再赘述。

4.4　衰减分贝（定量研究）

数值计算的衰减分贝如图 35～41 所示。

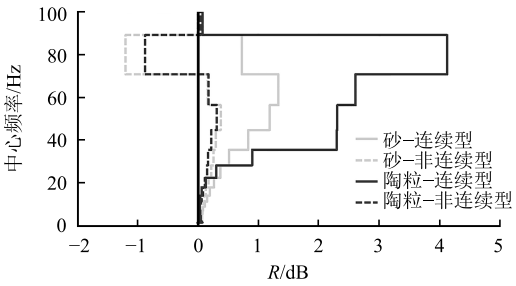


图 35　1#加速度计衰减分贝

Fig.35　Attenuation decibels of #1 accelerometer

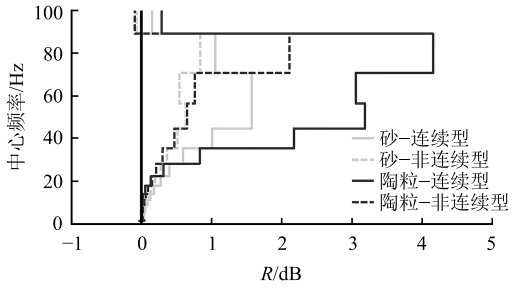


图 36　2#加速度计衰减分贝

Fig.36　Attenuation decibels of #2 accelerometer

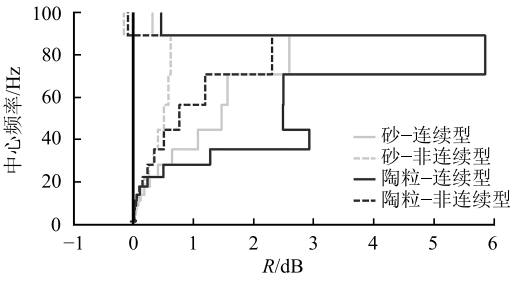


图 37　3#加速度计衰减分贝

Fig.37　Attenuation decibels of #3 accelerometer

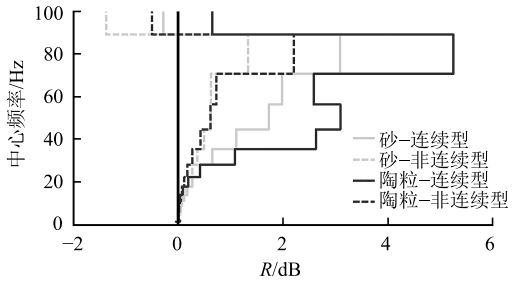


图 38　4#加速度计衰减分贝

Fig.38　Attenuation decibels of #4 accelerometer

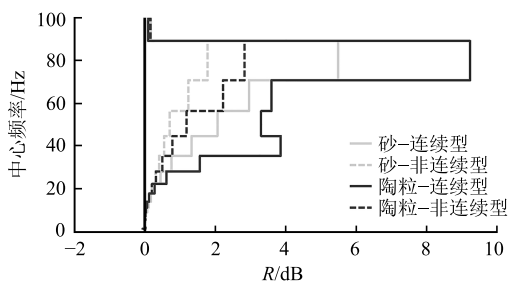


图 39　5#加速度计衰减分贝

Fig.39　Attenuation decibels of #5 accelerometer

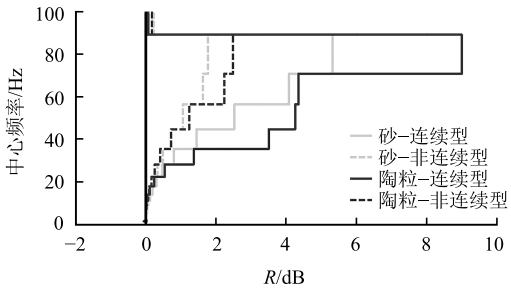


图 40 6#加速度计衰减分贝

Fig.40 Attenuation decibels of #6 accelerometer

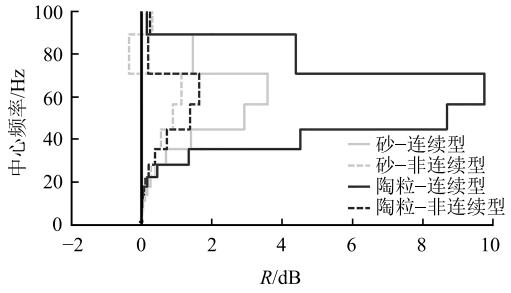


图 41 7#加速度计衰减分贝

Fig.41 Attenuation decibels of #7 accelerometer

数值研究部分的衰减分贝与试验部分大体是一致的。

（1）就材料影响而言：

在低频段（1～30 Hz）。其衰减甚微，分贝值均在 1.5 dB 以下。其中，陶粒的最大衰减分贝可为 1.563 4 dB，而砂的仅为 0.798 1 dB。

在中频段（30～80 Hz）。分贝梯线开始上升。在频段上，两者皆达各峰值。同时，陶粒的增长幅度是明显大于砂的。其中，陶粒的衰减分贝可达 9.755 1 dB，而砂仅为 5.491 2 dB。

在高频段（80～100 Hz）。随着频率的提升，土体阻尼开始显现，高频分量在传播过程中几乎完全衰减。致使梯线开始下降，两者衰减分贝差异不甚明显，皆在 0.0 dB 左右。

整体而言，陶粒的隔振效果约为砂的两倍。

（2）就屏障类型影响而言：

在低频段（1～30 Hz）。其衰减甚微，分贝值均在 2.0 dB 以下。其中，连续型的最大衰减分贝为 1.563 4 dB，而非连续型的仅为 0.507 0 dB。

在中频段（30～80 Hz）。其衰减明显，分贝梯线开始上升。在该频段上，两者皆达各峰值。其中，连续型的衰减分贝可达 9.755 1 dB，而非连续型仅为 2.843 0 dB。

在高频段（80～100 Hz）。其衰减甚微，梯线开始下降，两者衰减分贝差异不甚明显，皆在 0.0 dB 左右。

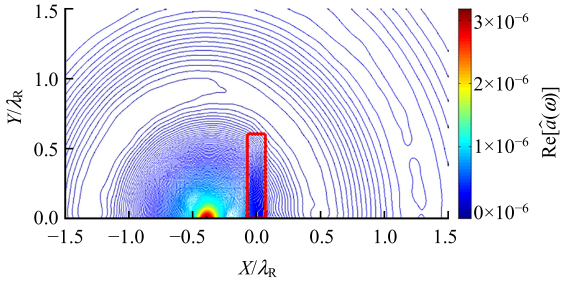
整体而言，连续型屏障的隔振效果约为非连续型的 3 倍有余。

4.5 频率分量的空间分布（定性研究）

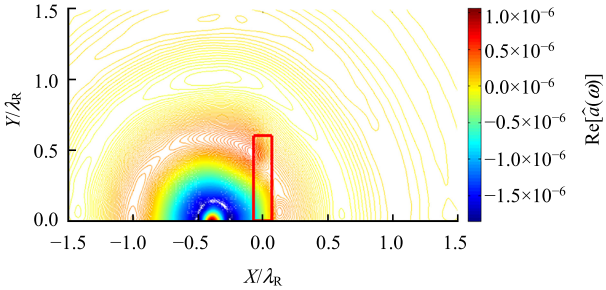
振动波的频率分量在空间中的是呈环形分布的，而屏障的隔振作用体现在：其施加后会打破先前的分布状态，但整体上仍会呈现出波动的形态。为更好的表现出正负相交的波动状态，本小节采用分量的实部表达，计算方法如下：

$$\mathrm{Re}[\hat{a}(\omega)] = A[\hat{a}(\omega)]\cot[(\psi)] \tag{6}$$

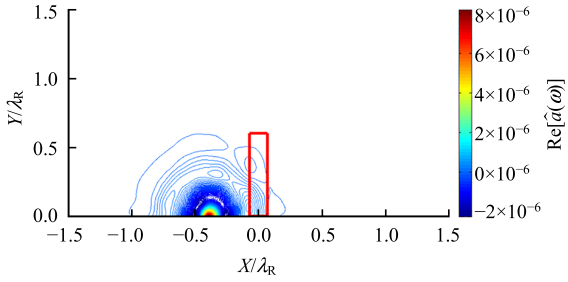
式中：$\mathrm{Re}[\hat{a}(\omega)]$ 频域内的加速度分量的实部；$A[\hat{a}(\omega)]$ 为其的幅值；ψ 为分量相位角。相关计算结果如图 42～45 所示。



(a) 30 Hz



(b) 50 Hz

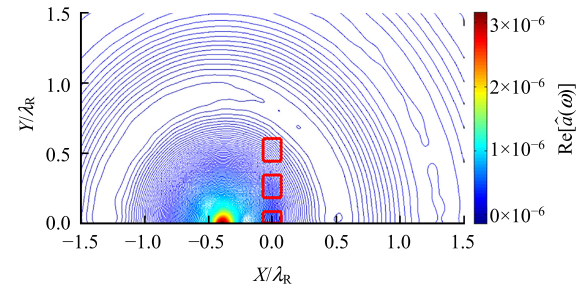


(c) 80 Hz

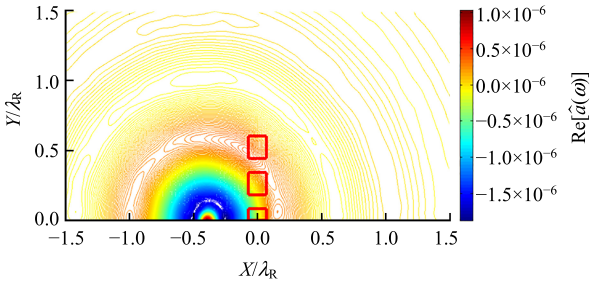
图 42 频率分量的空间分布（砂–连续型）

Fig.42 Spatial distribution of frequency components (sand-continuous type)

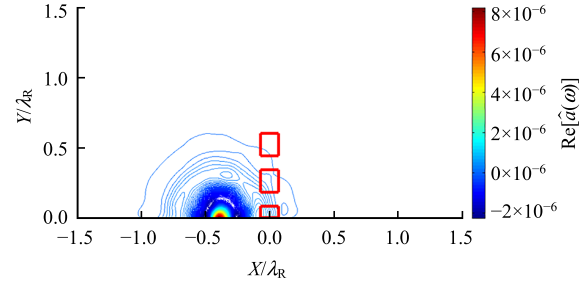
从图 42～45 可以看出：砂、陶粒填充连续、非连续型时，分量的空间分布形式大体上是类似的，



(a) 30 Hz



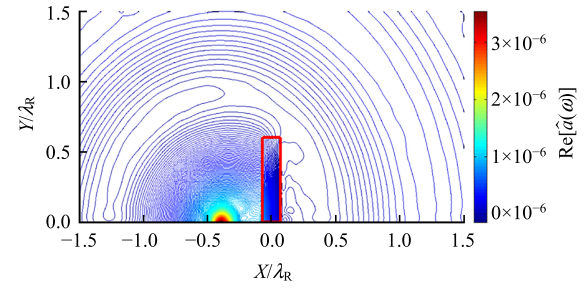
(b) 50 Hz



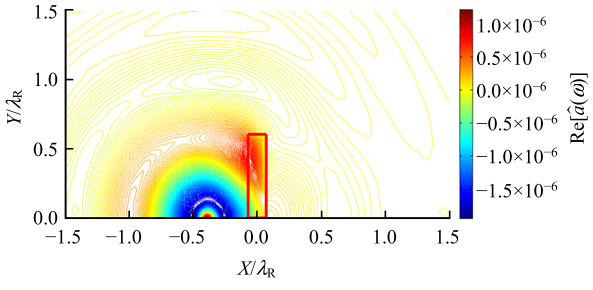
(c) 80 Hz

图 43　频率分量的空间分布（砂–非连续型）

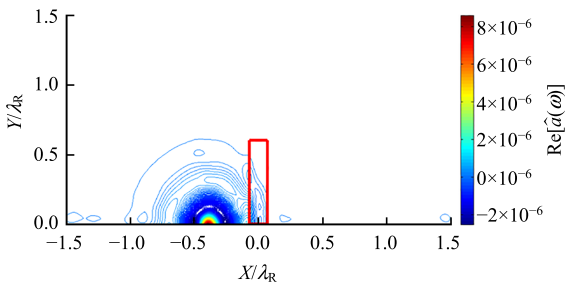
Fig.43　Spatial distribution of frequency components (sand-discontinuous type)



(a) 30 Hz



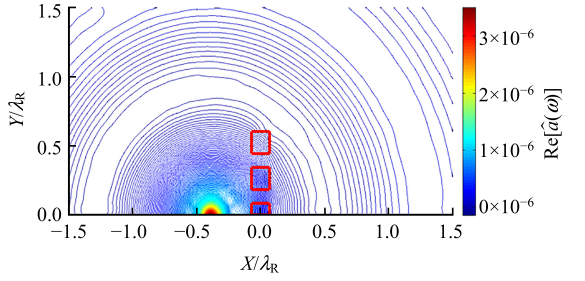
(b) 50 Hz



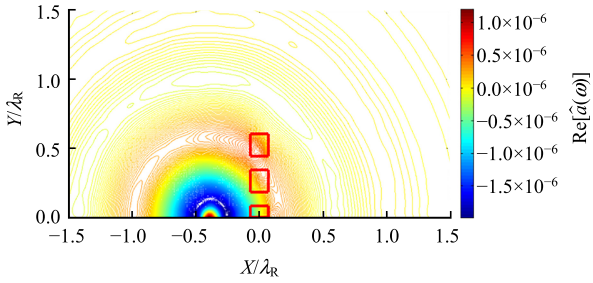
(c) 80 Hz

图 44　频率分量的空间分布（陶粒–连续型）

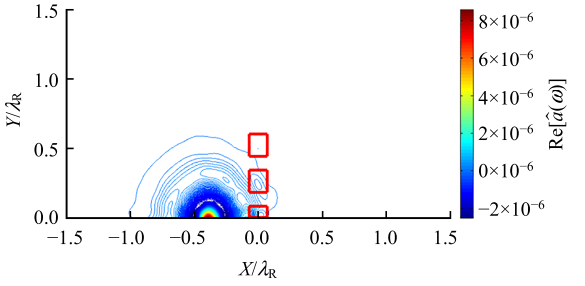
Fig.44　Spatial distribution of frequency components (ceramsite-continuous type)



(a) 30 Hz



(b) 50 Hz



(c) 80 Hz

图 45　频率分量的空间分布（陶粒–非连续型）

Fig.45　Spatial distribution of frequency components (ceramsite-discontinuous type)

相异之处更多的表现在幅值小大不同。鉴于此，本小节着重描述陶粒的隔振表现。

填充连续型屏障：频率为 30 Hz 时，分量分布的形态，类似以振源为圆心的环形分布。因低频波

长较长，故屏障的施加仅起到一定的干扰作用，对全局影响不大；频率为 50 Hz 时，以振源为圆心的环形分布被屏障打破，屏障后区域出现衰减，且强度随距离的增加明显呈缓，图中表现为等值线稀疏。而屏障前因波反射作用，则出现了明显的增强区，振动波被屏障挡住，隔振效果明显；频率为 80 Hz 时，因高频分量对土体阻尼作用敏感，从而衰减较快，易隐没填充材料的影响，屏障起到一定的隔振作用，但不甚明显。

填充非连续型屏障：频率为 30 Hz 时，与连续型屏障相似，分量的分布形态类似环形分布，屏障在其施加位置与后区域，仅生产了较小的干扰作用，对全局影响甚微；频率为 50 Hz 时，屏障在近振源处严重干扰了先前的分布状态，使其由环形变为似椭圆形，而短边则指向波阵面方向，令一定强度的振动分量拒止于屏障的后区域，表现出一定的隔振作用。但是，因非连续屏障周期性的间断，一部分振动波可以通过此间隙从而继续传播，隔振效果则远不及连续型；频率为 80 Hz 时，其表现与连续型类似，因土体阻尼作用明显，频率分量则表现出以振源为中心，整体以向内收缩的态势。

5 结 论

（1）就隔振材料（砂与陶粒）而言：在低频处，两者差异不甚明显；在中频处，随着振动波波长的减小，两者差异则开始表现。陶粒因高阻尼性，具有良好的吸能特性，使其隔振表现接近于空沟。甚至，随着频率的增加，其表现在一定范围内优于空沟；在高频处，因土体阻尼的影响，两者表现难以显现。综上简言，陶粒的隔振效果远优于砂，而整体表现接近空沟。

（2）就屏障类型而言（连续与非连续）而言：当频率为 30 Hz 时，两者的分量分布的形态类似环形分布，屏障影响甚微，对全局影响不大；频率为 50 Hz 时，先前的环形分布被打破，其变为似椭圆形，表现出一定的隔振作用。因非连续屏障存在周期性的间断，振动波以此通过继而传播，其隔振效果劣于连续型；频率为 80 Hz 时，土体阻尼作用明显，在此过程中起到控制作用，两者差异不甚明显。综上简言，连续型屏障的隔振效果远优于非连续屏障。

（3）隔振材料与屏障类型使用建议：若采用隔振效果一般的材料，考虑成本等因素，使用连续型与非连续屏障都是可行的；但若使发挥材料的隔振性能，则使用连续型屏障更优。

参 考 文 献

[1] 田抒平, 高盟, 王滢, 等. Duxseal 隔振性能数值分析与现场试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1770-1780.
TIAN Shu-ping, GAO Meng, WANG Ying, et al. Numerical analysis and field experiment on vibration isolation for Duxseal[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(5): 1770-1780.

[2] 邬玉斌, 宋瑞祥, 吴雅南, 等. 排桩对地铁引起的建筑振动噪声控制效果分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 233-243.
WU Yu-bin, SONG Rui-xiang, WU Ya-nan, et al. Analysis of piles on noise reduction of building vibration caused by subway operation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(2): 233-243.

[3] 孟玉山, 赵大威, 刘杰, 等. 线性荷载下排桩, 空沟隔振特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, v.20; No.532(27): 267-276.
MENG Yu-shan, ZHAO Da-wei, LIU jie, et al. Test on vibration isolation characteristics of row piles and hollow trenches under linear loads[J]. **Science Technology and Engineering**, 2020, v.20; No.532(27): 267-276.

[4] 刘晶磊, 于川情, 刘杰. 环形沟槽几何参数对隔振区域影响的试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(20): 266-274.
LIU Jing-lei, YU Chuan-qing, LIU Jie. A test study on the influence of geometric parameters of annular trench on vibration isolation area[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2019, 38(20): 266-274.

[5] 刘晶磊, 冯桂帅, 王建华, 等. 轨道交通单排非连续隔振屏障隔振效果模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(11): 175-201.
LIU Jing-lei, FENG Gui-shuai, WANG Jian-hua, et al. Model tests for effects of rail transit's single row discontinuous vibration isolation barriers[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2018, 37(11): 175-201.

[6] 张立群, 侯恩品, 刘晶磊, 等. 空沟减隔振对路基本体影响效果的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(4): 752-761.
ZHANG Li-qun, HOU En-pin, LIU Jing-lei, et al. Research on the test of the effect of vibration isolation measures of empty groove on the subgrade body[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2017, 14(4): 752-761.

[7] MA Q, LI X, CHENG C, et al. Field measurement, analysis and protection for the vibration response of granary ruins caused by train load[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. [S. l.]: IOP Publishing, 2021.

[8] LIU H, LIU J L, XUE X F, et al. Comparative experimental study on vibration isolation effect of sand ditch and row piles[J]. **Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering**, 2019, 37(2): 24-29.

[9] YU H H. Experimental research on vibration isolation by discontinuous barrier on sand-gravel pile[J]. **Port & Waterway Engineering**, 2018(2): 203-205.

[10] MAHDAVISEFAT E, SALEHZADEH H, HESHMATI A A. Full-scale experimental study on screening effectiveness of SRM-filled trench barriers[J]. **Géotechnique**, 2017, 68(10): 1-43.

[11] CHEN H Y. Model test investigation on vibration isolation barriers applied to subgrade of rail transit[J]. **Railway Standard Design**, 2016, 60(6): 177-181.

[12] DIJCKMANS A, EKBLAD A, SMEKAL A, et al. Efficacy of a sheet pile wall as a wave barrier for railway induced ground vibration[J]. **Soil Dynamics & Earthquake Engineering**, 2016, 84: 55-69.

[13] TOYGAR O. Investigation of vibration isolation performance of trench type wave barriers by field tests[D]. Yüksek Lisans Tezi: Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, 2015.

[14] COULIER P, CUÉLLAR V, DEGRANDE G, et al. Experimental and numerical evaluation of the efficiency of a stiff wave barrier in the soil[C]//Proceedings of the 5th International Conference On Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2015.

[15] 李瑞. 粉煤灰陶粒轻骨料混凝土性能试验研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
LI Rui. The experimental study in performance of fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2015.

[16] GABRIELS P, SNIEDER R, NOLET G. In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves[J]. **Geophysical Prospecting**, 1987, 35(2): 187-196.

[17] McMechan G A, Yedlin M J. Analysis of dispersive waves by wave field transformation[J]. **Geophysics**, 1981, 46(6): 869-874.

[18] FORBRIGER T. Inversion of shallow-seismic wavefields: I. wavefield transformation[J]. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**, 2010, 153(3): 719-734.

[19] SCHEVENELS M, LOMBAERT G, DEGRANDE G, et al. A probabilistic assessment of resolution in the SASW test and its impact on the prediction of ground vibrations[J]. **Geophysical Journal International**, 2008, 172(1): 262-275.

[20] DEGRANDE G, BADSAR S A, Lombaert G, et al. Application of the coupled local minimizers method to the optimization problem in the spectral analysis of surface waves method[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2008, 134(10): 1541-1553.

[21] WRIGHT S, NOCEDAL J. Numerical optimization[J]. **Springer Science**, 1999, 35(67-68): 7.

[22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17431.1－2010 轻集料及其试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB/T 17431.1－2010 Lightweight aggregates and its test methods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

[23] BA DSAR S. In-situ determination of material damping in the soil at small deformation ratios[D]. Brussels: University of Leuven, 2012.

上接第 566 页

[23] 李元亨, 陈国良, 刘修国, 等. 主 TIN 模式下面向拓扑的三维地质块体构建方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1902-1906.
LI Yuan-heng, CHEN Guo-liang, LIU Xiu-guo, et al. The topology-oriented method of building 3D geological block model based on primary TIN[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1902-1906.

[24] 张奇华, 邬爱清. 边坡及洞室岩体的全空间块体拓扑搜索研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2072-2078.
ZHANG Qi-hua, WU Ai-qing. Study on spatial block topological identification of slope and cavern rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2072-2078.

[25] 杨石扣, 任旭华, 张继勋. 基于布尔运算的复杂块体几何形态分析一般方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3576-3582.
YANG Shi-kou, REN Xu-hua, ZHANG Ji-xun. A general method for geometric morphological analysis of complex blocks using Boolean operations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(12): 3576-3582.

[26] FU Xiao-dong, SHENG Qian, WANG Li-wei, et al. Spatial topology identification of the three dimensional complex block system of the rock masses[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2019, 19(12): 04019127.