

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1315

Duxseal 隔振性能数值分析与现场试验研究

田抒平^{1,2}, 高 盟^{1,2}, 王 滢^{1,2}, 陈青生³

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;
3. 新加坡国立大学 土木与环境工程系, 新加坡 119077)

摘 要: 将一种称为 Duxseal 的工业填料用于自由场主动隔振, 发展了一种带孔波阻板 (WIB) 填充 Duxseal 的隔振方法, 即 Duxseal-WIB 隔振系统。采用薄层法基本解答作为格林函数的三维半解析边界元法, 分析了 Duxseal 的隔振效果及性能, 并对提出的 Duxseal-WIB 隔振系统进行了现场试验。结果表明, 采用 Duxseal 作为主动隔振屏障可以有效起到振动隔振作用, 对距离振源较远处地表位移的隔振效果优于距离振源较近处; 土质参数的变化对 Duxseal 的隔振效果具有显著的影响; 在一定范围内增加 Duxseal 直径、厚度或埋深均可有效提高其隔振效果, 其中 Duxseal 顶面距地表埋深的影响尤为显著; 此外, 与传统 WIB 对比, Duxseal-WIB 隔振效果较高且相对平稳, 在列车运行 250 km/h 条件下, 距离振源中心 12 m 处测振点 X、Y、Z 向的地表隔振可分别达到 40%、39% 和 51%。

关 键 词: Duxseal; Duxseal-WIB; 主动隔振; 地表位移振幅; 振幅衰减系数

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 05-1770-11

Numerical analysis and field experiment on vibration isolation for Duxseal

TIAN Shu-ping^{1,2}, GAO Meng^{1,2}, WANG Ying^{1,2}, CHEN Qing-sheng³

(1. Shandong Province Key Laboratory of Civil Engineering & Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Institute of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore 119077, Singapore)

Abstract: Thanks to the excellent damping capacity of Duxseal, a newly designed active isolating barrier-Duxseal-WIB is proposed to be used for vibration screening. This barrier is a special type of WIB (wave impeding block) with cylindrical holes and the holes are filled with Duxseal. To investigate the isolation characteristics of Duxseal, numerical studies are firstly performed using a three-dimensional semi-analytical boundary element method (BEM) combined with a thin layer method. Then, the vibration screening effectiveness of the proposed isolating barrier-Duxseal-WIB is verified by field tests. The results show that Duxseal can effectively reduce ground vibrations as an active barrier in the free field, and the effectiveness of vibration isolation at distances far away from the vibration source is relatively better than that near the vibration source. The values of soil parameters have a significant influence on the isolation effectiveness of Duxseal. The isolation effectiveness increases with the increase in diameter, thickness and embedded depth of Duxseal material within a certain range, and the embedded depth is the most critical factor affecting the isolation effectiveness of Duxseal. In addition, the isolation effectiveness at a distance away from the center of the vibration source is higher for Duxseal-WIB than traditional WIB. When we consider a distance of 12 m away from the vibration source as the representative measuring point, the vibration screenings of Duxseal-WIB along the X, Y, and Z directions achieve vibration isolation values of approximately 40%, 39%, and 51%, respectively, under a moving load at a high speed of 250 km/h.

Keywords: Duxseal; Duxseal-WIB; active isolation; ground displacement amplitude; amplitude attenuation ratio

1 引 言

交通荷载、机器运行以及工程施工等人类活动

作用在基础表面常常产生强烈振动, 振动波经由土体介质向周边地基及地层表面传播, 对周边造成环境振动污染^[1-3], 不可避免地影响人类正常生

收稿日期: 2019-07-28

修回日期: 2019-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51808324); 山东省自然科学基金项目 (No. ZR201702160391)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51808324) and the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR201702160391).

第一作者简介: 田抒平, 女, 1995 年生, 硕士研究生, 从事岩土动力学方向的研究。E-mail: Tianshuping95@163.com

通讯作者: 王滢, 女, 1979 年生, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事土动力学及岩土工程抗震教学和科研工作。E-mail: hopeywwgy@hotmail.com

活,尤其是邻近建筑物的结构安全、精密仪器设备的生产和使用。随着城市建设和社会经济的发展,环境振动污染日益严重和频繁,已经受到了国内外学者的广泛关注。因此,研究人类活动引起的环境振动隔振具有重要的工程应用价值。

根据屏障与激振源的距离,现有的隔振技术可以分为远场被动隔振和近场主动隔振。被动隔振的屏障通常设立在重要建筑或精密仪器等周围,通过减小振动能量输入达到隔振效果。徐平等^[4]假定土体为各向同性均质弹性介质,采用波函数展开法,得到单排非连续弹性和刚性空心管桩屏障对平面 SV 波散射系数的理论解。Cai 等^[5]基于柱坐标系统和 Graff 加法转换定理,引入 Biot 理论,将弹性土体发展为饱和土体,研究单排实心桩对全空间均质饱和土体中倾斜入射弹性波的阻隔效果。Lu 等^[6]和徐满清^[7]基于虚拟桩法,求解弹性和饱和土体地基中多排桩对移动荷载引起振动的被动隔振效果。时刚等^[8]采用以薄层法基本解作为动力 Green 函数的半解析边界元法,分析饱和和均质地基中二维填充沟远场被动隔振问题。被动隔振对象单一,隔振范围较小。与被动隔振相比,主动隔振则通常围绕振源设立屏障,减小振动能量输出,从而达到振动隔振效果。

当前,众多学者已针对多种主动隔振措施,如填充沟、空沟和波阻板(WIB)等进行了大量研究。Woods^[9]首先进行一系列现场全尺寸试验,研究填充沟的隔振效果,并给出衡量屏障隔振效果的参数。基于现场试验,Ahmad 等^[10]采用三维边界元法,分析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,提出空沟和填充沟的隔振设计原则。Chouw^[11]和 Schmid^[12]等提出在地基中人工设置一个有限尺寸的硬夹层,以模拟人工基岩进行隔振,并称其为波阻板。基于此,高广运等^[13-14]利用半解析边界元法,分别对竖向激振荷载作用下弹性和饱和地基中 WIB 主动隔振进行详细参数研究。此外,基于功能梯度材料特点,马强等^[15]提出以功能梯度波阻板作为隔振屏障的一类新型的地基振动控制体系。

虽然上述桩、隔振沟、WIB 等传统隔振技术和方法均有一定的隔振效果,但都有一定的适用范围和局限性。因此,各种各样的隔振技术日益发展起来。Coe 等^[16]引入“吸收边界”的概念,首次在动力离心机模型箱内壁采用 Duxseal 作为边界材料吸收振动反射能,发现其优异的阻尼性能。Pak 等^[17]采用内壁附有 Duxseal 材料的大型土工离心机模型

容器和箱内振动台系统进行自由场地震模拟,试验证明,Duxseal 的确具有吸收振动能量的特性。基于此,田抒平等^[18]将 Duxseal 用于自由场主动隔振,采用二维半解析边界元法,分析均质弹性地基中埋置 Duxseal 的隔振效果。然而,天然地基大多是不均匀的,通常都具有成层性。

本文在文献[18]的基础上,采用薄层法格林函数建立的三维半解析边界元法,分别计算竖向简谐激振作用下工况 1(上硬下软层状地基)和工况 2(上软下硬层状地基)中不同 Duxseal 归一化直径、厚度和埋深时地表位移振幅衰减系数,分析 Duxseal 在不同土质参数中的振动隔振规律。依据 Duxseal 良好的隔振特性,以及 Duxseal 和 WIB 隔振规律的互补性,提出了一种带孔 WIB 填充 Duxseal 的隔振方法(Duxseal-WIB 联合隔振系统),在高速铁路试验段对其隔振效果进行现场实测,并与传统 WIB 隔振效果进行对比。

2 边界积分方程

设在体力 f_i 和面力 m_i 作用下,体积为 V 的弹性体内将产生位移场 u_i ,又设同一弹性体在另一组体力 f'_i 和面力 m'_i 作用下将产生位移场 u'_i ,频域内动力 Betti-Rayleigh 互等定理证明有如下积分等式存在:

$$\int_S m_i u'_i dS + \int_V f_i u'_i dV = \int_S m'_i u_i dS + \int_V f'_i u_i dV \quad (1)$$

式中: $i = x, y, z$; S 为弹性体边界面积。

当边界上的场点 p 和源点 q 趋近时,即相距 $r \rightarrow 0$,位移和力的 Kelvin 基本解 u_{ij}^* 和 m_{ij}^* 分别具有一次和二次奇异性,同时在源点 q 上作用有集中力,因此需以源点 q 为中心、 ε 为半径作圆弧段去掉奇点,记此圆弧段与弹性体相交部分面积为 S_ε ,根据 Betti-Rayleigh 互等定理,有积分等式为

$$\begin{aligned} \int_S m_i u_{ij}^* dS + \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{S_\varepsilon} m_i u_{ij}^* dS + \int_V f_i u_{ij}^* dV = \\ \int_S m_{ij}^* u_i dS + \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{S_\varepsilon} m_{ij}^* u_i dS + \int_V f_i^* u_i dV \end{aligned} \quad (2)$$

式中: f_i^* 为 Kelvin 解对应的体力分量; $j = x, y, z$ 。

式(2)中 3 个积分可以积出:

$$\int_V f_i^* u_i dV = 0 \quad (3)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{S_\varepsilon} m_i u_{ij}^* dS = 0 \quad (4)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{S_\varepsilon} m_{ij}^* u_i dS = C_{ij} u_i(q) \quad (5)$$

式中: C_{ij} 为边界积分方程的自由项分量。

将式 (3) ~ (5) 代入式 (2), 可得频域内弹性动力学的边界积分方程为

$$Cu_i(q) + \int_S m_{ij}^*(p, q) u_i(p) dS = \int_S u_{ij}^*(p, q) m_i(p) dS + \int_V u_{ij}^*(p, q) f_i(p) dV \quad (6)$$

式中: C 为边界积分方程的自由项, 这里假设源点 q 处界面光滑, 取 $C=1/2$ 。

为简便计算, 忽略体力。在边界积分方程中, 位移分量是边界上坐标点的连续函数, 面力分量可以是边界上坐标点的不连续函数。为避开求解位移和面力分量函数表达式的困难, 对边界积分方程进行离散, 将式 (6) 改写为离散后的矩阵形式:

$$\frac{1}{2}\{u\} = [u^*]\{m'\} - [m^*]\{u\} \quad (7)$$

式中: $[u^*]$ 和 $[m^*]$ 分别为边界单元位移和面力影响系数矩阵; $\{u\}$ 和 $\{m'\}$ 分别为边界单元位移和面力矢量。

将弹性体的全部边界节点按顺序从 1, 2, ..., n , ..., N 编号, 节点 n 对应的面力和位移分量分别记为 m_i^n 和 u_i^n 。依据式 (7) 建立边界节点位移分量和面力分量之间的代数式关系:

$$\begin{bmatrix} h_{11}^1 & h_{12}^1 & h_{13}^1 & \cdots & h_{1,3N-2}^1 & h_{1,3N-1}^1 & h_{1,3N}^1 \\ h_{21}^1 & h_{22}^1 & h_{23}^1 & \cdots & h_{2,3N-2}^1 & h_{2,3N-1}^1 & h_{2,3N}^1 \\ h_{31}^1 & h_{32}^1 & h_{33}^1 & \cdots & h_{3,3N-2}^1 & h_{3,3N-1}^1 & h_{3,3N}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{11}^N & h_{12}^N & h_{13}^N & \cdots & h_{1,3N-2}^N & h_{1,3N-1}^N & h_{1,3N}^N \\ h_{21}^N & h_{22}^N & h_{23}^N & \cdots & h_{2,3N-2}^N & h_{2,3N-1}^N & h_{2,3N}^N \\ h_{31}^N & h_{32}^N & h_{33}^N & \cdots & h_{3,3N-2}^N & h_{3,3N-1}^N & h_{3,3N}^N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x^1 \\ u_y^1 \\ u_z^1 \\ \vdots \\ u_x^N \\ u_y^N \\ u_z^N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}^1 & g_{12}^1 & g_{13}^1 & \cdots & g_{1,3N-2}^1 & g_{1,3N-1}^1 & g_{1,3N}^1 \\ g_{21}^1 & g_{22}^1 & g_{23}^1 & \cdots & g_{2,3N-2}^1 & g_{2,3N-1}^1 & g_{2,3N}^1 \\ g_{31}^1 & g_{32}^1 & g_{33}^1 & \cdots & g_{3,3N-2}^1 & g_{3,3N-1}^1 & g_{3,3N}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{11}^N & g_{12}^N & g_{13}^N & \cdots & g_{1,3N-2}^N & g_{1,3N-1}^N & g_{1,3N}^N \\ g_{21}^N & g_{22}^N & g_{23}^N & \cdots & g_{2,3N-2}^N & g_{2,3N-1}^N & g_{2,3N}^N \\ g_{31}^N & g_{32}^N & g_{33}^N & \cdots & g_{3,3N-2}^N & g_{3,3N-1}^N & g_{3,3N}^N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} m_x^1 \\ m_y^1 \\ m_z^1 \\ \vdots \\ m_x^N \\ m_y^N \\ m_z^N \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式中: $h_{1,3N}^N, h_{2,3N}^N, \cdots, h_{3,3N}^N$ 为位移分量 u_x^N, u_y^N 和 u_z^N 的积分系数; $g_{1,3N}^N, g_{2,3N}^N, \cdots, g_{3,3N}^N$ 为面力分量 m_x^N, m_y^N 和 m_z^N 的积分系数。

求解式 (8), 确定全部边界节点的位移和力分量。利用离散后的动力 Somigliana 积分, 即可得到域内任意点的位移 u_d :

$$\{u_d\} = [u^*]\{m'\} - [m^*]\{u\} \quad (9)$$

3 计算结果分析

本文采用文献[13]建立的三维半解析边界元法及其计算程序分析竖向简谐激振作用下 Duxseal 隔振性能, 计算简图如图 1 所示。竖向简谐激振作用在基础表面中点处, 激振频率 $f=16$ Hz, 在基础下方的层状弹性地基中埋置 Duxseal 屏障进行隔振。这里将基础考虑为无质量刚性基础, 归一化宽度 $B=0.2$ 。

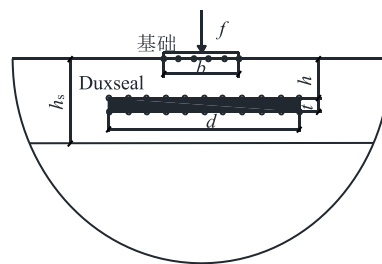


图 1 Duxseal 隔振示意图

Fig.1 Vibration isolation model for Duxseal

选取工况 1 (上硬下软) 和工况 2 (上软下硬) 两种层状半空间模型, 对土层性质和 Duxseal 直径、厚度及顶面距地表埋深对隔振效果的影响进行详细分析。其中, 工况 1 为由表层的土层 2 和下部的土层 1 构成的上硬下软双层弹性地基模型; 工况 2 为由表层的土层 2 和下部的土层 3 构成的上软下硬双层弹性地基模型。工况 1 相对于工况 2 地基土质整体状态较软。Duxseal 和土层参数取值列于表 1。其中, 层状地基土层参数取值依据文献[13], Duxseal 参数取值依据文献[19]。计算时, 采用表层土剪切模量对应的 Rayleigh 波波长 ($\lambda_r = 10$ m) 对相关几何尺寸进行归一化: 表层土的归一化厚度 $H_s = h_s / \lambda_r$ (h_s 为表层土厚度); 基础的归一化宽度 $B = b / \lambda_r$ (b 为基础宽度); Duxseal 的归一化直径和厚度分别为 $D = d / \lambda_r$ (d 为 Duxseal 直径)、 $T = t / \lambda_r$ (t 为 Duxseal 厚度); Duxseal 顶面距地表的归一化埋深 $H = h / \lambda_r$ (h 为埋深)。

表 1 Duxseal 及土体计算参数取值
Table 1 Calculation parameters for Duxseal and soil

地基	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量		黏滞阻尼比
		泊松比	/ MPa	
Duxseal	1 650	8.00	0.46	$0.18 - 0.0003 \times (\sigma_{\text{mean}} / 0.001 \text{ MPa})$
土层 1	1 522	59.04	0.44	0.05
土层 2	1 800	140.98	0.33	0.05
土层 3	2 000	357.60	0.49	0.05

注: σ_{mean} 为平均有效应力。

对于隔振效果的评价, Woods^[9]提出用振幅衰减系数 A_R 来衡量。其中, A_R 定义为设置屏障后与未设置屏障时振动幅值之比。若 $A_R = 0$, 意味着 Duxseal 的隔振效果达到 100%; 若 $A_R = 1$, 则表明设置 Duxseal 屏障无任何隔振效果。

为衡量整体隔振效果, 这里引入平均振幅衰减系数 $\overline{A_R}$ ^[20], 定义为

$$\overline{A_R} = \frac{1}{A} \int A_R dA \quad (10)$$

式中: A 为测线长度, 即测振范围净长度。

当 $\overline{A_R} = 0$, 意味着 Duxseal 的整体隔振率达到 100%; 若 $\overline{A_R} = 1$, 则表明设置 Duxseal 屏障整体无任何隔振效果。

3.1 工况 1 Duxseal 主动隔振分析

图 2 为竖向激振作用下工况 1 ($H_s = 1$) 中 Duxseal 顶面距地表归一化埋深 $H = 0.60$ 、归一化厚度 $T = 0.12$ 时, 对距振源 1~40 m 范围内地表位移整体隔振率随 Duxseal 归一化直径 D 变化曲线。选取 D 分别为 0.5、1.0、1.2、1.4、1.6 作为代表, 分析 Duxseal 对距离振源 1~40 m 范围内的振动隔振规律。图 3 为不同 D 下地表径向位移振幅衰减系数 A_{RR} 和竖向位移振幅衰减系数 A_{RV} 随距振源距离变化曲线。

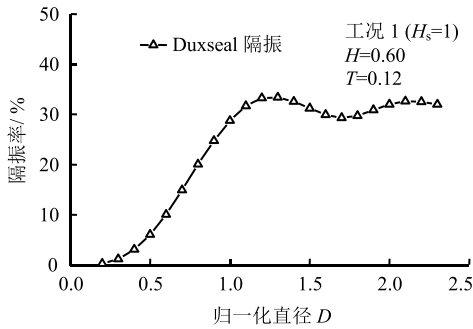
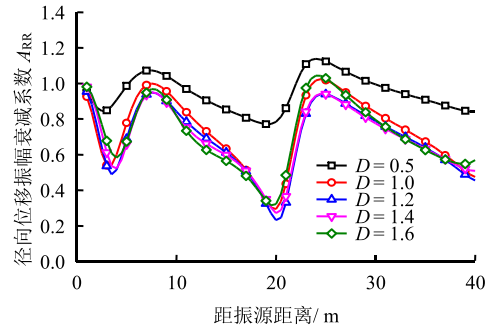


图 2 工况 1 地表位移隔振率随 D 变化曲线

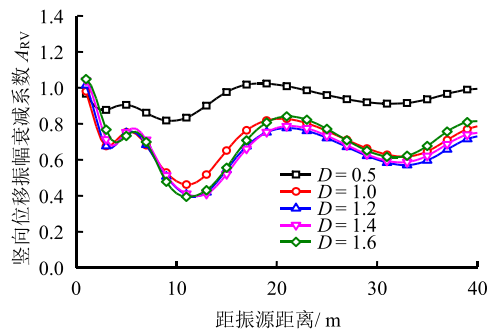
Fig.2 Curve of isolation rate of ground displacement versus D under working condition 1

由图 2 可知, 设置 Duxseal 可以有效减缓工况 1 的地表振动。当 $D = 1.2$ 时, 对地表位移的隔振率达到峰值, 约为 33.24%。同时可知, 当 $0.5 < D \leq 1.2$ 时, 随着 D 的增加, 对地表位移的隔振率近似线性迅速增加至峰值; 当 $D > 1.2$ 时, 对地表位移的隔振率随着 D 的增加呈波动状缓慢衰减。从图 3 可以看出, Duxseal 对距离振源较远处地表位移隔振效果相对较近处较好; 径向位移振幅衰减系数随距离振源距离增加变化曲线相比竖向位移较为复杂。此外, 当 $D \leq 1.0$ 或 $D \geq 1.6$ 时, 地表位移存在一定范围的

振幅放大区, 其中径向位移振幅放大现象尤为显著。



(a) 径向位移



(b) 竖向位移

图 3 工况 1 不同 D 时地表位移振幅衰减系数 A_{RR} 、 A_{RV} 随距离变化曲线

Fig.3 Curves of A_{RR} and A_{RV} of ground displacement versus distance for various D s under working condition 1

考虑到波的传播理论, 在振源下面埋置 Duxseal 时, Duxseal 起到次生波源作用, 在其表面产生波长更短的次生波, 波长变短, 加速波的衰减, 地表位移振幅减小; 同时, 部分弹性波在遇到基础下方 Duxseal 后会发生散射, 导致部分地表位移振幅存在放大现象。

图 4 为竖向激振作用下工况 1 ($H_s = 1$) 中 $H = 0.60$ 、 $D = 1.2$ 时, 对距振源 1~40 m 范围内地表位移整体隔振率随 T 变化曲线。选取 T 分别为 0.02、0.08、0.10、0.12、0.14、0.16 作为代表, 分析 Duxseal 对距离振源 1~40 m 范围内的隔振规律。图 5 为不同 T 时, 地表径向位移振幅衰减系数 A_{RR} 和竖向位移振幅衰减系数 A_{RV} 随距振源距离变化曲线。

由图 4 可知, 当 $T = 0.14$ 时, 对地表位移的隔振率达到第 1 次峰值, 约为 34.15%; 当 $T = 0.34$ 时, Duxseal 对地表位移的隔振率达到第 2 次峰值, 约为 36.33%。同时可知, 当 $T < 0.01$ 时, Duxseal 对地表位移造成振幅放大现象, 表现为隔振率为负数; 当 $0.01 \leq T \leq 0.14$ 时, 随着 T 的增加, Duxseal 逐渐起到隔振作用, 随后近似线性迅速增加至峰值; 当

$T > 0.14$ 时, 对地表位移的隔振率随着 T 的增加呈波动状缓慢衰减。从图 5 中可以看出, 当 $T \leq 0.08$, 地表径向位移存在一定区域的振幅放大现象; 而竖向位移振幅衰减系数在距离振源 1~40 m 范围内几乎全部小于 1, 隔振效果相对均匀。

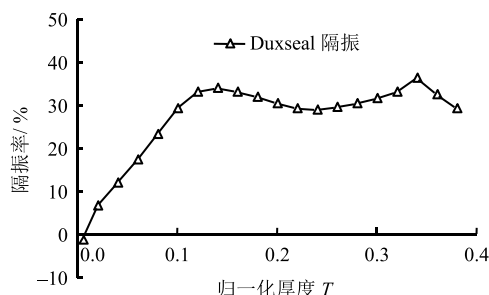
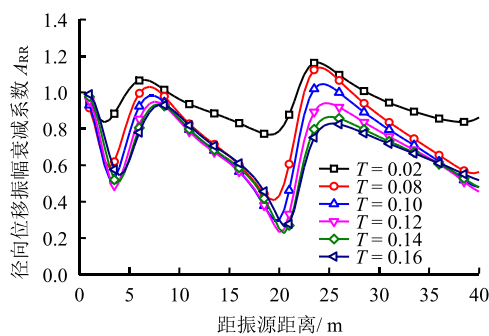
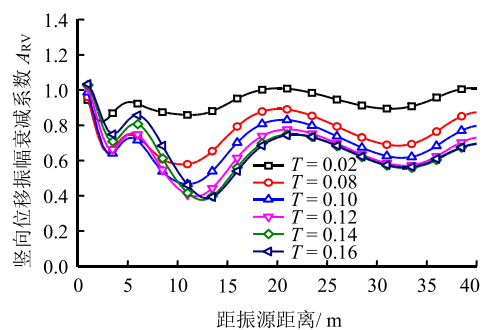


图 4 工况 1 地表位移隔振率随 T 变化曲线

Fig.4 Curve of isolation rate of ground displacement versus T under working condition 1



(a) 径向位移



(b) 竖向位移

图 5 工况 1 不同 T 时地表位移振幅衰减系数 A_{RR} 、 A_{RV} 随距离变化曲线

Fig.5 Curves of A_{RR} and A_{RV} of ground displacement versus distance for various T_s under working condition 1

图 6 为竖向激励作用下, 工况 1 ($H_s = 1$) 中 $T = 0.12$ 、 $D = 1.2$ 时, 对距振源 1~40 m 范围内地表位移整体隔振率随 H 变化曲线。考虑到隔振效果, 选取 H 分别为 0.45、0.50、0.55、0.60、0.65 作为代表, 分析 Duxseal 对距离振源 1~40 m 范围内的隔振规律。图 7 为不同 H 时地表径向位移振幅衰减系数

A_{RR} 和竖向位移振幅衰减系数 A_{RV} 随距振源距离变化曲线。

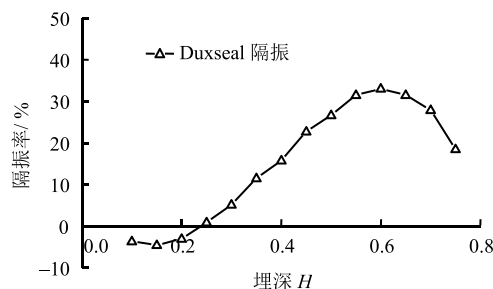
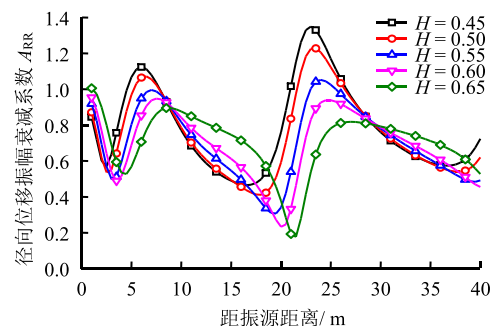
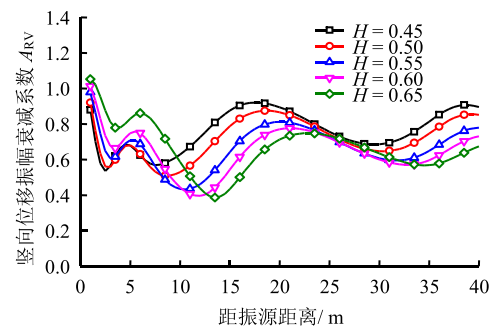


图 6 工况 1 地表位移隔振率随 H 变化曲线

Fig.6 Variation curve of isolation rate of ground displacement with H under working condition 1



(a) 径向位移



(b) 竖向位移

图 7 工况 1 不同 H 时地表位移振幅衰减系数 A_{RR} 、 A_{RV} 随距离变化曲线

Fig.7 Variation curves of A_{RR} and A_{RV} of ground displacement along distance for various H under working condition 1

由图 6 可知, 当 $H = 0.60$ 时, 对地表位移的隔振率达到峰值, 约为 33.24%。同时可以得知, 当 $H < 0.24$ 时, Duxseal 对地表位移造成振幅放大现象, 表现为隔振率为负数; 当 $0.24 \leq H \leq 0.60$ 时, 随着 H 的增加, 对地表位移逐渐起到隔振作用, 随后近似线性迅速增加至峰值; 当 $H > 0.60$ 时, 对地表位移的隔振率随 H 的增加迅速衰减。由图 7 可以看出, 埋深对隔振效果具有显著影响。当 $H \leq 0.55$, 地表径向位移均存在一定范围的振幅放大区, 其中

在距离振源 22~27 m 范围内尤为明显;而竖向位移振幅衰减系数在距离振源 1~40 m 范围内几乎全部小于 1, 隔振效果相对均匀。

3.2 工况 2 Duxseal 主动隔振分析

图 8 为竖向激振作用下工况 2 ($H_s = 1$) 中 $H = 0.55$ 、 $T = 0.12$ 时, 对距振源 1~40 m 范围内地表位移整体隔振率随 D 变化曲线。选取 D 分别为 0.5、1.0、1.2、1.4、1.6、2.3 作为代表, 分析 Duxseal 对距离振源 1~40 m 范围内的隔振规律。图 9 为不同 D 时, 地表径向位移振幅衰减系数 A_{RR} 和竖向位移振幅衰减系数 A_{RV} 随距振源距离变化曲线。

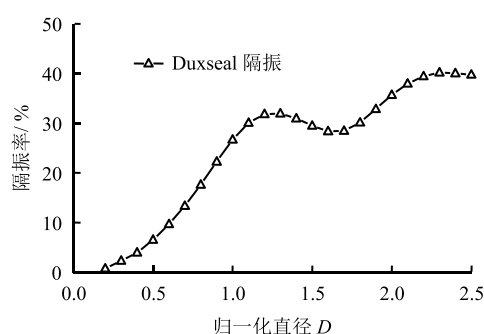
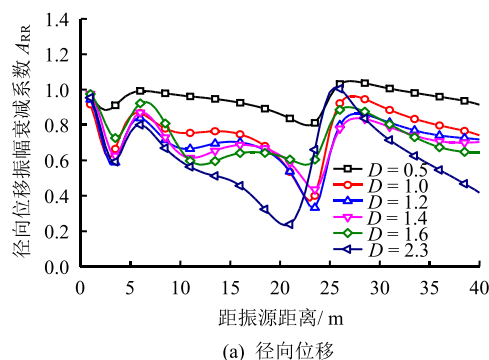
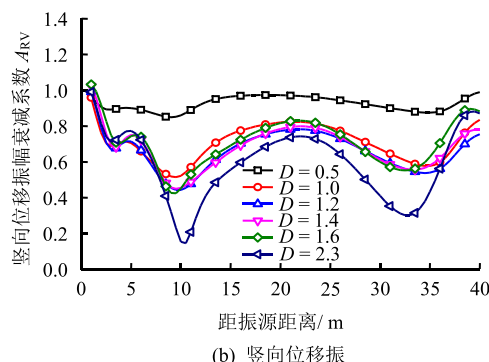


图 8 工况 2 地表位移隔振率随 D 变化曲线

Fig.8 Curve of isolation rate of ground displacement versus D under working condition 2



(a) 径向位移



(b) 竖向位移

图 9 工况 2 不同 D 时地表位移振幅衰减系数 A_{RR} 、 A_{RV} 随距离变化曲线

Fig.9 Curves of A_{RR} and A_{RV} of ground displacement versus distance for various D s under working condition 2

由图 8 可知, 设置 Duxseal 可以有效减小工况 2 地表位移振幅。当 $D = 1.2$ 时, 对地表位移的隔振率达到第 1 次峰值, 约为 31.94%; 当 $D = 2.3$ 时, 对地表位移的隔振率达到第 2 次峰值, 约为 40.16%。同时可以得知, 当 $D \leq 1.2$ 时, 随着 D 的增加, 对地表位移的隔振率迅速提高至峰值; 当 $1.2 < D \leq 1.6$ 时, 对地表位移的隔振率随着 D 的增加缓慢衰减; 当 $1.6 < D < 2.3$ 时, 对地表位移的隔振率随着 D 的增加而回升, 并显著提高。从图 9 中可以看出, 与工况 1 隔振特性相似, Duxseal 对工况 2 距振源较远处地表位移的隔振效果相比距振源较近处较好; 此外, 地表径向和竖向位移几乎不存在的振幅放大现象, 隔振效果相对工况 1 较为均匀。

对比图 2 与图 8 可以看出, T 和 H 一定时, Duxseal 对工况 2 的最优隔振率优于工况 1; 然而, 当 $0.5 < D < 1.8$ 时, Duxseal 对工况 1 地表位移的隔振率优于工况 2。需要注意的是, 考虑到埋深对隔振效果的影响显著, 对比分析工况 1 与工况 2 中 D 、 T 对其隔振效果的影响时, 依据土质参数, 相同条件中工况 1 中 H 的取值为 0.60, 工况 2 中取值为 0.55。

图 10 为竖向激振作用下工况 2 ($H_s = 1$) 中 $H = 0.55$ 、 $D = 1.2$ 时, 对距振源 1~40 m 范围内地表位移整体隔振率随 T 变化曲线。选取 T 分别为 0.02、0.08、0.10、0.12、0.14、0.16 作为代表, 分析 Duxseal 对距离振源 1~40 m 的隔振规律。图 11 为不同 T 时, 地表径向位移振幅衰减系数 A_{RR} 和竖向位移振幅衰减系数 A_{RV} 随距振源距离变化曲线。

由图 10 可知, 当 $T = 0.12$ 时, 对地表位移的隔振率达到第 1 次峰值, 约为 31.79%; 当 $T = 0.36$ 时, Duxseal 对地表位移的隔振率达到第 2 次峰值, 约为 37.61%。同时可以得知, 当 $T < 0.015$ 时, Duxseal 对地表位移造成振幅放大现象, 表现为隔振率为负数; 当 $0.015 \leq T < 0.12$ 时, 随着 T 的增加, 对地表

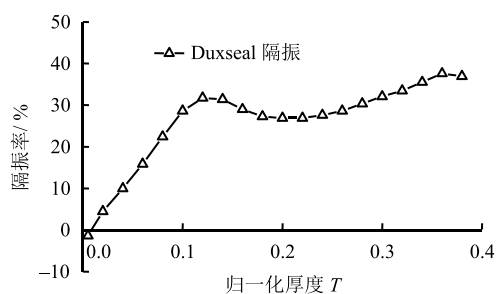
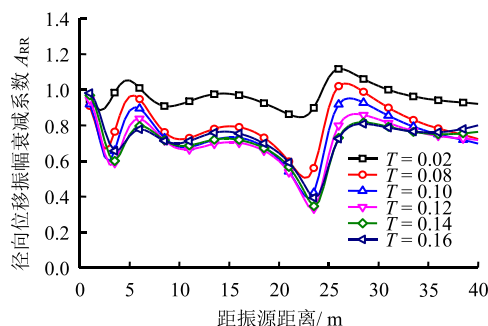
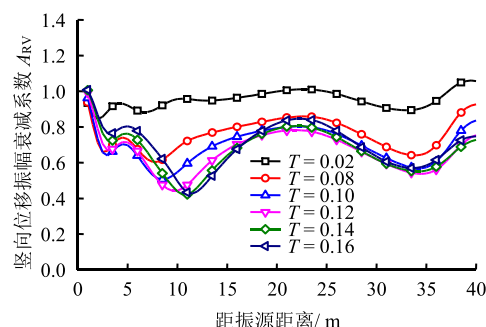


图 10 工况 2 地表位移隔振率随 T 变化曲线

Fig.10 Curve of isolation rate of ground displacement versus T under working condition 2



(a) 径向位移



(b) 竖向位移

图 11 工况 2 不同 T 时地表位移振幅衰减系数 A_{RR} 、 A_{RV} 随距离变化曲线

Fig.11 Curves of A_{RR} and A_{RV} of ground displacement versus distance for various T_s under working condition 2

位移逐渐起到隔振作用, 并近似线性迅速增加; 当 $0.20 \leq T < 0.36$ 时, 对地表位移的隔振率随着 T 的增加而回升, 并缓慢提高。从图 11 可以看出, 与工况 1 隔振特性相似, 当 $T \leq 0.08$, 工况 2 地表径向位移存在一定范围的振幅放大区, 而竖向位移振幅衰减系数在距离振源 1~40 m 范围内几乎全部小于 1, 隔振效果相对均匀。

对比图 4 和图 10 可以看出, D 、 H 一定时, Duxseal 对工况 2 的最优隔振率大于工况 1; 然而, 当 $T < 0.28$ 时, Duxseal 对工况 1 地表位移的隔振率优于工况 2。

图 12 为竖向激振作用下工况 2 ($H_s = 1$) 中 $T = 0.12$ 、 $D = 1.2$ 时, 对距振源 1~40 m 范围内地表位移整体隔振率随 H 变化曲线。选取 H 分别为 0.40、0.45、0.50、0.55、0.60 作为代表, 分析 Duxseal 对距离振源 1~40 m 的隔振规律。图 13 为不同 H 时, 地表径向位移振幅衰减系数 A_{RR} 和竖向位移振幅衰减系数 A_{RV} 随距振源距离变化曲线。

由图 12 可知, 当 $H = 0.55$ 时, 对地表位移的隔振率达到峰值, 约为 31.79%。同时可以得知, 当 $H < 0.23$ 时, Duxseal 对地表位移造成振幅放大现象, 表现为隔振率为负数; 当 $0.23 \leq H \leq 0.55$ 时,

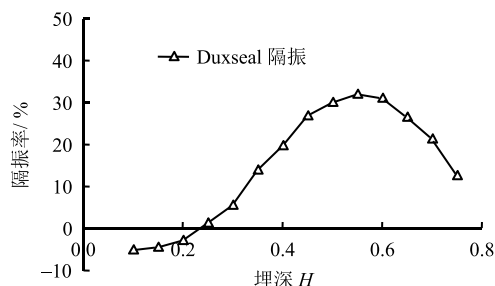
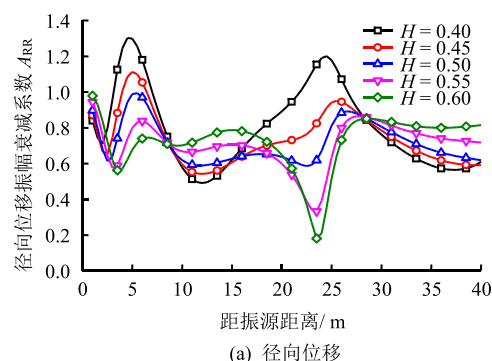
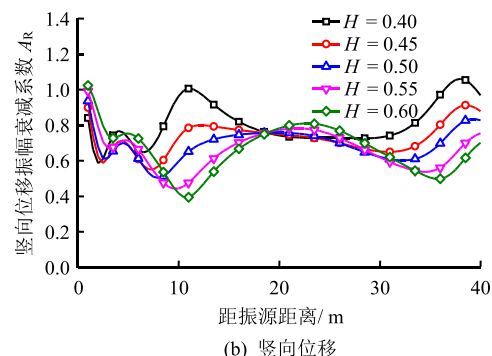


图 12 工况 2 地表位移隔振率随 H 变化曲线

Fig.12 Curve of isolation rate of ground displacement versus H under working condition 2



(a) 径向位移



(b) 竖向位移

图 13 工况 2 不同 H 时地表位移振幅衰减 A_{RR} 、 A_{RV} 系数随距离变化曲线

Fig.13 Curves of A_{RR} and A_{RV} of ground displacement versus distance for various H_s under working condition 2

随着 H 的增加, 对地表位移逐渐起到隔振作用, 随后近似线性迅速增加至峰值; 当 $H > 0.55$ 时, 对地表位移的隔振率随着 H 的增加迅速衰减。从图 13 中可以看出, 与工况 1 相似, 埋深对工况 2 地表位移的隔振效果具有显著影响。当 $H < 0.50$, 地表径向位移均存在一定范围的振幅放大区, 在距振源 4~8 m 及 22~28 m 范围内尤为明显; 而竖向位移振幅衰减系数在距离振源 1~40 m 范围内几乎全部小于 1, 隔振效果相对均匀。

对比图 6 和图 12 可以看出, D 、 T 一定时, Duxseal 对工况 1 地表位移的最优隔振率大于工况 2; 然而, 当 $H \leq 0.55$ 时, Duxseal 对工况 2 地表位移的隔振率要优于工况 1。

4 工程实例

为进一步研究 Duxseal 的隔振效果和减小成本,依据数值计算结果以及 Duxseal 与 WIB 隔振特

性的互补性,发展了一种带孔波阻板填充 Duxseal 的隔振方法,并用于某高铁试验段,如图 14 所示。其中,隔振系统埋置在基床中,其横截面尺寸为 8×0.75 m。

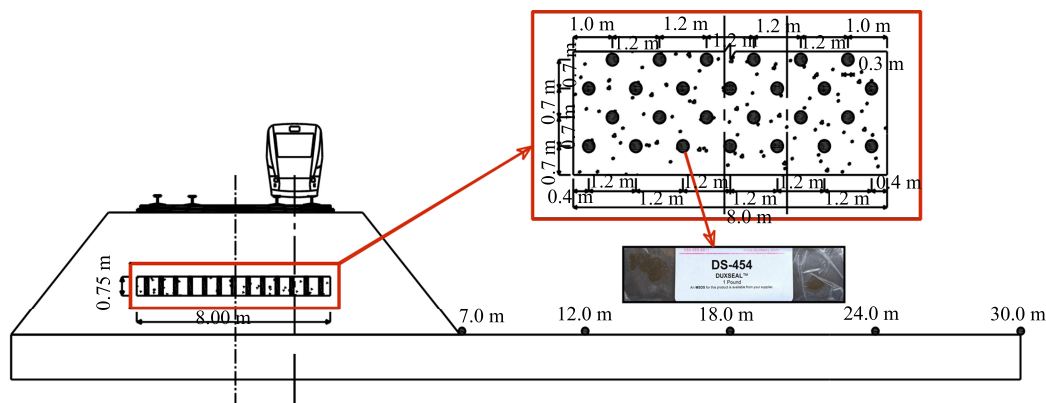


图 14 Duxseal-WIB 隔振图

Fig.14 Schematic of the Duxseal-WIB isolation system

4.1 试验过程

选取 3 个邻近场地(场地 3、4 和 5)进行现场测振:①场地 3:自由式路基;②场地 4:基床中埋置 Duxseal-WIB 隔振系统;③场地 5:基床中埋置相同尺寸的 WIB 隔振屏障。测振点布置见图 14。测振仪采用意大利振动测试仪 Tromino,可以测量 $0.1 \sim 1\,024.0$ Hz 范围内的振动,采样频率为 256.0 Hz,列车运行速度 250 km/h。表 2 和表 3 分别给出了高速铁路试验段路基和地基的物理力学参数。

表 2 路基主要物理力学参数

Table 2 Properties of the embankment in three test sites

土层	厚度 / m	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模型 / MPa	泊松比
基床表层	0.40	1 900	130	0.32
基床底层	2.30	1 940	95	0.35
路基本体	2.15	1 910	48	0.31

表 3 地基主要物理力学参数

Table 3 Properties of the foundation in three test sites

土层	厚度 / m	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模型 / MPa	泊松比
1	2.8	1 850	20	0.32
2	1.2	1 893	28	0.31
3	3.5	1 958	33	0.29
4	1.2	1 894	45	0.31
5	6.5	1 987	50	0.29
6	4.8	2 000	60	0.25

4.2 实测结果分析

图 15(a)、15(b)分别为基床埋置 Duxseal-WIB 和 WIB 时地面加速度振幅衰减系数随距离变化曲线。

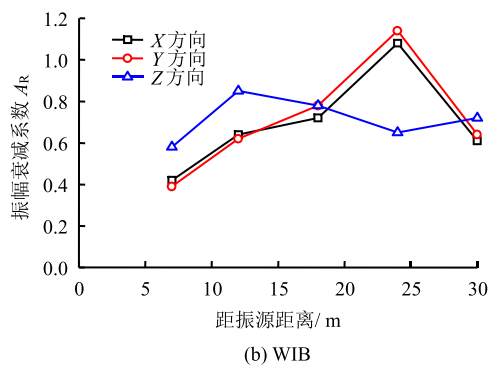
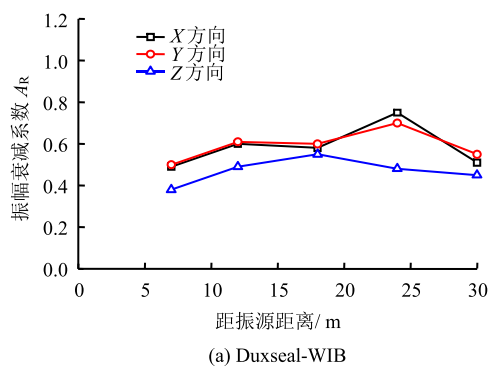


图 15 加速度振幅衰减系数随距离变化曲线

Fig.15 The curves of amplitude attenuation ratio A_R of ground acceleration versus distance

对比图 15(a)、15(b)可以看出,相比传统 WIB, Duxseal-WIB 隔振效果较高;随着距离振源中心距离的增加, Duxseal-WIB 隔振效果相对平稳。此外,由图 15(a)可知, Duxseal-WIB 对 Z 方向的隔振效果明显优于 X 和 Y 方向。

为进一步研究 Duxseal-WIB 的隔振特性,选取距离振源中心 12 m 处的测振点作为代表点进行详细分析。图 16~18 分别为列车运行 250 km/h 条件下基床中有无埋置 Duxseal-WIB 时测振点 X 向、 Y 向和 Z 向振动加速度时程曲线。

由图 16~18 可知,相较于无任何隔振措施的情况下,基床中埋置 Duxseal-WIB 隔振系统地表 X 向、 Y 向和 Z 向振动加速度幅值均减小, Duxseal-WIB 在自由场中具有显著隔振效果。未采取隔振措施路段 X 、 Y 和 Z 方向最大加速度分别约为 $3.32 \times 10^{-2} g$ 、 $3.54 \times 10^{-2} g$ 和 $4.37 \times 10^{-2} g$;埋置 Duxseal-WIB 隔振屏障路段 X 、 Y 和 Z 方向最大加速度分别约为 $1.98 \times 10^{-2} g$ 、 $2.16 \times 10^{-2} g$ 和 $2.15 \times 10^{-2} g$;即 X 、 Y 和 Z 方向隔振效果可分别达 40%、39%和 51%。在振源能量相同条件下,振动能量的吸收与周围介质的特性有关, Duxseal-WIB 隔振系统加快了振动波传播衰减速度。

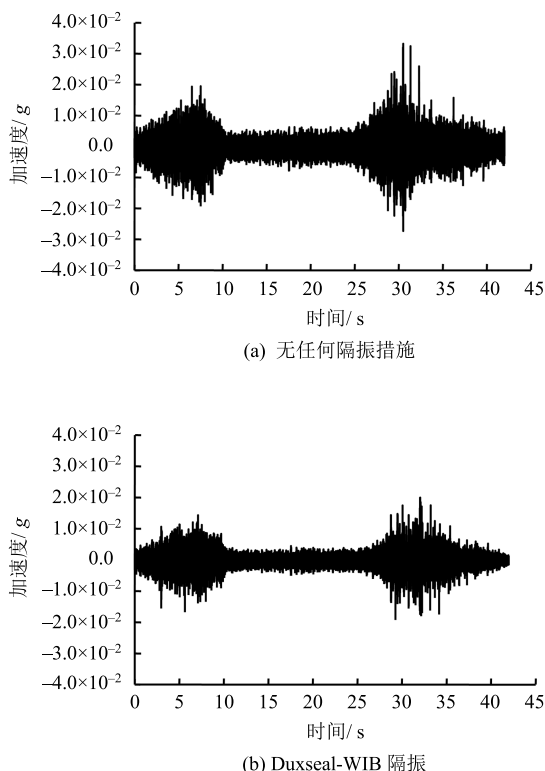


图 16 有无埋置 Duxseal-WIB 时 X 向振动加速度时程曲线
Fig.16 Time histories of vibration acceleration on X direction in the absence or presence of Duxseal-WIB

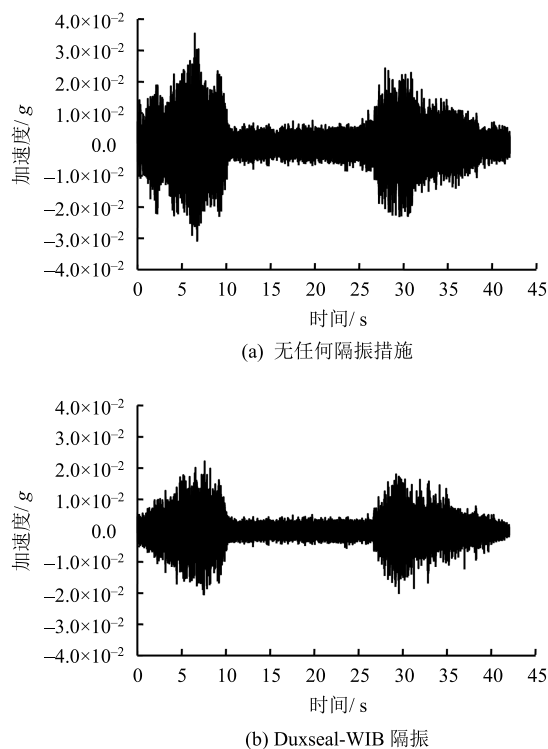


图 17 有无埋置 Duxseal-WIB 时 Y 向振动加速度时程曲线
Fig.17 Time histories of vibration acceleration on Y direction in the absence or presence of Duxseal-WIB

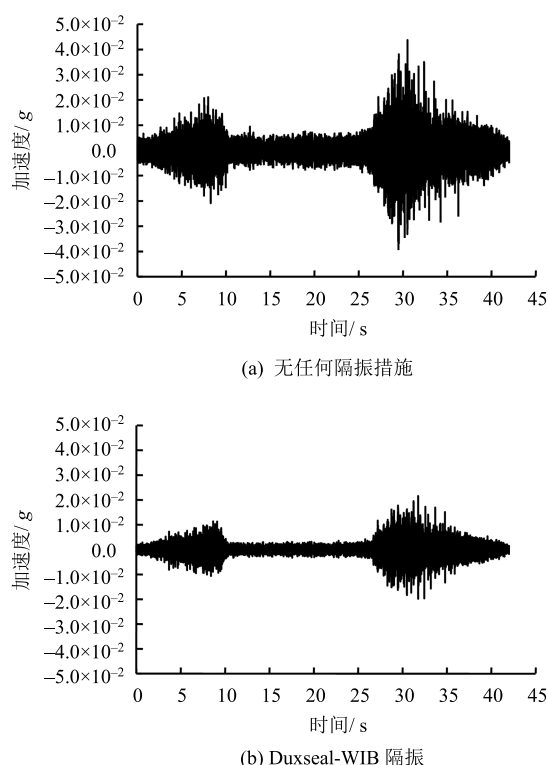


图 18 有无埋置 Duxseal-WIB 时 Z 向振动加速度时程曲线
Fig.18 Time histories of vibration acceleration on Z direction in the absence or presence of Duxseal-WIB

5 结 论

将 Duxseal 作为主动隔振屏障,采用三维半解

析边界元法, 分析 Duxseal 直径、厚度和顶面距地表埋深对工况 1 和工况 2 的隔振效果。基于 Duxseal 的隔振特性, 本文提出了一种带孔 WIB 填充 Duxseal 的隔振方法, 并在高速铁路试验段对其隔振效果进行现场实测。结论如下:

(1) 竖向激振作用下, 采用 Duxseal 作为主动隔振屏障能够有效减小地表位移振幅衰减系数, Duxseal 对距离振源较远处地表位移的隔振效果优于距离振源较近处。

(2) Duxseal 埋置直径、厚度、距地表埋深均对其隔振效果有较大影响, 在一定范围内增加直径、厚度或埋深, 均可有效提高 Duxseal 的隔振效果。此外, 值得注意的是, Duxseal 顶面距地表埋深对其隔振效果的影响尤为显著。

(3) 土质参数的变化对 Duxseal 的隔振效果具有显著的影响。因此, 采用 Duxseal 作为隔振屏障时, 需要考虑土质参数设计 Duxseal 的埋置尺寸。

(4) 提出了一种带孔 WIB 填充 Duxseal 的隔振方法。在列车运行速度为 250 km/h 条件下, 该隔振系统对距离轨道中心 12 m 处的 X 向、 Y 向和 Z 向的地表振动隔振可分别达到 40%、39% 和 51%。

参 考 文 献

- [1] FENG S J, ZHANG X L, WANG L, et al. In-situ experimental study on high speed train induced ground vibrations with the ballast-less track[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2017, 102: 195-214.
- [2] 李盼盼, 王家鼎, 谷天峰, 等. 强夯振动加速度的量测及现场试验研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(1): 166-170.
LI Pan-pan, WANG Jia-ding, GU Tian-feng, et al. Measurement and field test research on vibration acceleration of dynamic compaction[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2018, 40(1): 166-170.
- [3] 董连成, 徐祺, 师黎静, 等. 多年冻土区青藏铁路列车荷载作用下路基振动响应研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(6): 1153-1160.
DONG Lian-cheng, XU Zhen, SHI Li-jing, et al. Vibration response analysis of embankments in permafrost regions along the Qinghai-Tibet railway subjected to train loads[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2018, 40(6): 1153-1160.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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 porous media[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2009, 46(21): 3771-3781.
- [7] 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.
- [8] 时刚, 郭院成, 高广运. 饱和地基中二维填充沟远场被动隔振研究[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.
- [9] WOODS R D. Screening of surface waves in soils[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1968, 94(4): 951-979.
- [10] AHMAD S, AL-HUSSAINI T M. Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1991, 117(1): 67-88.
- [11] CHOUW N, LE R, SCHIMID G. An approach to reduce foundation vibrations and soil waves using dynamic transmitting behavior of a soil layer[J]. **Bauingenieur**, 1991, 66: 215-221.
- [12] SCHMID G, CHOUW N, LE R. Shielding of structures from soil vibrations[C]//Proceedings of Soil Dynamics and Earthquake Engineering V. Boston: Computational Mechanics Publications, 1991: 651-662.
- [13] 高广运, 冯世进, 李伟, 等. 三维层状地基竖向激振波阻板主动隔振分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 471-476.
GAO Guang-yun, FENG Shi-jin, LI Wei, et al. 3D analysis of active vibration isolation with wave impeding block in layered ground under vertical loading[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(4): 471-476.
- [14] GAO G Y, CHEN J, GU X Q, et al. Numerical study on the active vibration isolation by wave impeding block in saturated soils under vertical loading[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2017, 93: 99-112.
- [15] 马强, 周凤玺, 刘杰. 梯度波阻板的地基振动控制研究[J]. **力学学报**, 2017, 49(6): 1360-1369.
- MA Qiang, ZHOU Feng-xi, LIU Jie. Analysis of ground vibration control by graded wave impeding[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2017, 49(6): 1360-1369.
- [16] COE C J, PREVOST J H, SCANLAN R H. Dynamic stress wave reflections/attenuation: earthquake simulation in centrifuge soil models[J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1985, 13(1): 109-128.
- [17] PAK R Y S, SOUDKHAH M, ABEDZADEH F. Experimental synthesis of seismic horizontal free-field motion of soil in finite-domain simulations with absorbing boundary[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2011, 31(11): 1529-1539.
- [18] 田抒平, 高盟, 王滢, 等. 二维均质弹性地基 Duxseal 材料主动隔振研究[J]. **振动工程学报**, 2019, 32(4): 701-711.
- TIAN Shu-ping, GAO Meng, WANG Ying, et al. Two dimensional analysis of Duxseal material as active vibration isolation in homogeneous elastic foundation[J]. **Journal of Vibration Engineering**, 2019, 32(4): 701-711.
- [19] CHAKRABORTTY P, POPESCU R. Numerical simulation of centrifuge tests on homogeneous and heterogeneous soil models[J]. **Computers and Geotechnics**, 2012, 41(4): 95-105.
- [20] 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.

(接第 1634 页)

《岩土力学》2018 年第 12 期被 EI 收录论文 (45 篇, 收录率 100 %) (2)

序号	论文题名	作者	页码
21	整体刚性面板加筋土挡墙基频影响因素计算分析	徐 鹏, 蒋关鲁, 胡耀芳, 等	4475—4481
22	隧道大变形机制及处治关键技术模型试验研究	杨忠民, 高永涛, 吴顺川, 等	4482—4492
23	裂隙充填影响巴西圆盘抗拉力学特性试验研究	滕尚永, 杨圣奇, 黄彦华, 等	4493—4507
24	降压开采过程中含水合物沉积物的力学特性研究	吴 起, 卢静生, 李栋梁, 等	4508—4516
25	路堤荷载下地基的侧向变形计算分析	刘光秀, 李玉根, 曹艳妮	4517—4526
26	基于 SPH 方法的非饱和多孔介质相变耦合研究	饶登宇, 白 冰, 陈佩佩	4527—4536
27	高轴压和围压共同作用下砂卡岩受频繁动态扰动时的动力学特性	王 春, 唐礼忠, 程露萍, 等	4537—4546
28	基于有效应力法的静压桩时变承载力研究	李 林, 李镜培, 赵高文, 等	4547—4553
29	刚性桩复合地基中性面深度与桩土应力比计算	姜文雨, 刘 一	4554—4560
30	厚覆盖层暂态饱和边坡稳定性分析方法	蒋中明, 李小凡, 袁 涛, 等	4561—4568
31	考虑预应力损失桩-锚结构内力计算的加权残值法	陈昌富, 曾松林, 刘一俊	4569—4576
32	D-P 随机损伤本构模型及其在预防陷落柱突水中的应用	李 浩, 白海波, 武建军, 等	4577—4587
33	基于褶皱几何参数统计规律的渗漏量评估方法	陈 成, 詹良通, 徐文杰, 等	4588—4596
34	强风化岩中挖孔基础抗拔试验及荷载位移曲线模型参数研究	崔 强, 程永锋, 鲁先龙, 等	4597—4604
35	地表临时堆载诱发下既有盾构隧道纵向变形分析	康 成, 梅国雄, 梁荣柱, 等	4605—4616
36	考虑 Hansbo 渗流的二维 Biot 固结有限元分析	刘忠玉, 张家超, 郑占垒, 等	4617—4626
37	基于交变移动本构模型的粗粒土动力特性数值解析	任非凡, 何江洋, 王 冠, 等	4627—4641
38	颗粒离散元岩石模型的颗粒尺寸效应研究	宿 辉, 杨家琦, 胡宝文, 等	4642—4650
39	纵向非一致地震激励下管-土结构响应的简化分析模型	韩俊艳, 杜修力, 侯本伟, 等	4651—4658
40	弹性介质分向插值无限元	熊 浩, 邱战洪, 王小岗	4659—4664
41	黏弹性介质中平、柱面波动传播的应力场及应用探讨	王 瑞, 胡志平, 张亚国, 等	4665—4672
42	间接测量数据条件下岩土参数空间变异性定量分析方法对比研究	田 密, 张 帆, 李丽华	4673—4680
43	粒状介质三维复杂应力加载离散元数值试验方法	薛 龙, 王 睿, 张建民	4681—4690
44	基于块石形状数据库的土石混合体模型随机生成方法	赵鑫曜, 陈建功, 张海权, 等	4691—4697
45	液化后砂土流体特性测试装置的研发及试验研究	周恩全, 朱晓冬, 陆建飞, 等	4698—4706