

# Numerical Research on the Ground Vibration Isolation Effects via Different Barrier Materials

Hui Qi<sup>1</sup>, Hui Li<sup>2</sup>, Chao Hu<sup>1</sup>, Haoran Chi<sup>2</sup>, Zhanyong Yao<sup>2</sup>, Hongguang Jiang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Qilu Transportation Development Group, Jinan Shandong

<sup>2</sup>School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

Email: \*hongguang\_jiang@sdu.edu.cn

Received: Dec. 30<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jan. 9<sup>th</sup>, 2020; published: Jan. 19<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Dynamic compaction technology is a common technique of foundation reinforcement in highway engineering. However, the adverse effect of dynamic compaction on the surrounding structure seriously restricts the application of dynamic compaction technology. In this paper, numerical simulation method was used to analyze the vibration isolation effect of air cushion and lightweight treated soil, and optimized the technical parameters of the two kinds of vibration isolation materials. Numerical simulation showed that the optimum vibration isolation depths of these two materials were 6 m and 9 m for vibration frequency of 20 Hz and 10 Hz. Considering the dynamic compaction with the characteristic frequency of 10 Hz, the suggested vibration isolation depth was 9 m. The vibration isolation efficiencies of the two vibration isolation materials were 73% and 39% in the horizontal direction, and 68% and 35% in the vertical direction, respectively. The elastic modulus of air cushion had minor effect on the vibration isolation efficiency. The density and elastic modulus of lightweight treated soil had significant impacts on the vibration isolation efficiency.

## Keywords

Dynamic Compaction Vibration, Numerical Simulation, Vibration Isolation Efficiency, Air Cushion, Lightweight Treated Soil

---

# 屏障填充材料对地基振动隔振效果的数值模拟研究

齐辉<sup>1</sup>, 李慧<sup>2</sup>, 胡超<sup>1</sup>, 迟浩然<sup>2</sup>, 姚占勇<sup>2</sup>, 蒋红光<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>齐鲁交通发展集团有限公司, 山东 济南

\*通讯作者。

<sup>2</sup>山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南  
Email: hongguang\_jiang@sdu.edu.cn

收稿日期: 2019年12月30日; 录用日期: 2020年1月9日; 发布日期: 2020年1月19日

## 摘要

强夯是高速公路工程中常用的地基加固技术, 然而强夯对周围结构产生的振动影响, 严重制约了强夯技术的工程应用。本文采用数值模拟的方法, 分析了气垫和泡沫轻质土的隔振效果, 优化了两种隔振材料的技术参数。气垫、泡沫轻质土的隔振数值模拟表明, 振动频率为20 Hz和10 Hz时, 隔振深度为6 m和9 m, 两种材料到达最佳隔振效果。考虑到强夯特征振频, 优选振动频率为10 Hz, 隔振深度为9 m。在10 Hz振频和9 m埋深下, 两种隔振材料的水平隔振效率分别为73%、39%, 竖向隔振效率分别为68%、35%。气垫隔振材料的弹性模量(即气压)对于隔振效率基本没有影响; 泡沫轻质土的密度、弹性模量对隔振效率具有较显著的影响。

## 关键词

强夯振动, 数值模拟, 隔振效率, 气垫, 轻质土

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

强夯法作为一种经济、高效的地基加固技术, 在工程界广泛应用。然而施工过程中产生的振动会对周围附属设施、旧路结构等产生不利影响, 严重制约了强夯技术在振动敏感区的应用。

目前, 开挖隔振沟是解决强夯施工对周围设施和建筑物振动影响的最为便捷有效的方法, 国内外许多学者通过室内模型试验、现场足尺试验等方法对其进行了深入的研究。Barkan [1]进行了隔振沟的现场试验, 结果表明隔振效率随沟槽深度、沟槽长度、振动频率的增加而提高。刘晶磊[2]等通过室内试验开挖不同深度、宽度的隔振沟槽, 认为隔振沟槽的深度对于隔振效果的影响最大, 隔振沟槽与振源的位置以及隔振沟槽的宽度对于隔振效率也有一定的影响。

在开挖的沟槽中加入柔性填充材料, 可以起到稳定支撑沟槽侧壁的作用, 防止出现沟槽坍塌的情况。Murillol [3]等人运用离心机法对发泡聚苯乙烯(EPS)隔振屏障的宽度、深度和相对于振源的位置进行了全面研究。Massarsch [4]研发了一种由混凝土板夹气垫的新型隔振屏障, 通过室内模型试验发现, 振动能量通过隔振屏障的刚性表面层传递, 降低了隔振效率。Ju [5]等人提出了运用数值分析软件建立有限元模型对空沟中填充水(水沟)进行隔振效果分析。金壮[6]通过室内强夯模型试验研究了木板夹充气轮胎作为新型隔振板, 分析了影响该隔振板隔振效率的因素, 试验结果表明, 隔振板的长度对于隔振效率的影响最大, 隔振板的深度次之, 而其厚度、气压以及气囊的个数对于隔振效率基本没有影响。Mahdavisefat [7]等人运用激振器对橡胶颗粒含量为10%、20%、30%的橡胶砂(SRM)隔振材料进行了现场足尺试验, 试验结果表明, 30%橡胶颗粒掺量的SRM隔振材料的隔振效率与空沟隔振相当, 同时, 沟槽的深度对于隔振效率有显著的影响。刚性隔振材料相对于柔性隔振材料而言, 具有抗压强度大、弹性模量高等特点, 因

此材料可以作为永久性的隔振结构。Javier [8]等人对排桩作为弹性波隔振屏障的有效性进行了理论研究,发现如果振动波长是桩半径的 2~8 倍,排桩屏障具有良好的隔振效果。Avils [9]等人继续深入研究了影响排桩隔振性能的主要因素,并优化得出了排桩的直径必须大于 0.25 倍的波长,长度必须大于 2 倍的波长才能满足隔振效率在 50%以上。Yang [10]研究了筒仓以及桩护栏对于地面振动的隔振效果,通过工程样机测量以及理论分析的结果表明,在常规频率的振动下,筒仓和桩护栏的直径大于等于 1/6 倍的波长且屏障深度到达 0.6 倍的波长时,两者的隔振效果较好。高广运[11][12]等人首次提出了“非连续波障”的隔振技术方案,即采用非连续性的钢筋混凝土、泡沫塑料排桩、圆形空井等工程常用材料进行隔振性能试验。

开挖隔振沟作为减少强夯振动影响的常用方法仍存在许多不足,例如隔振沟的开挖深度和稳定性受到土体性质、地下水位高度、场地尺寸等条件的影响,造成隔振效果无法保证。实际工程中,经常将碎石、粉煤灰等工程材料填入隔振沟以提高其稳定性,但采用该方法会造成强夯的能量波穿过隔振沟,仍然不能到达令人满意的隔振效果。本文通过数值模拟分析隔振材料在不同深度、振动速度以及频率作用下的隔振效果,并进一步优化隔振材料的几何结构、材料属性等,为后续的强夯隔振装置的设计及隔振技术的研发提供了重要借鉴意义。

## 2. 数值模型建立

Drucker-Prager 模型可以表征土体的应力 - 应变的弹塑性变化过程,目前该模型已经大量应用于土体的动力和静力学问题[13][14][15]。D-P 模型采用如图 1 所示的  $p$ - $q$  ( $p$  为主应力,  $q$  为偏应力)坐标系。其中,该模型的屈服面函数如下式(1):

$$F_s = q - p \tan \beta - d = 0 \quad (1)$$

式中:  $\beta$  为屈服面在  $p$ - $q$  坐标系上的倾斜角,与摩擦角  $\varphi$  有关;

$d$  为屈服面在  $p = 0$  时的取值,可按照以下的公式确定:

$d = (1 - 1/3 \tan \beta) \sigma_c$ , 其中  $\sigma_c$  为单轴抗压强度;

$d = (1 + 1/3 \tan \beta) \sigma_t$ , 其中  $\sigma_t$  为单轴抗拉强度。

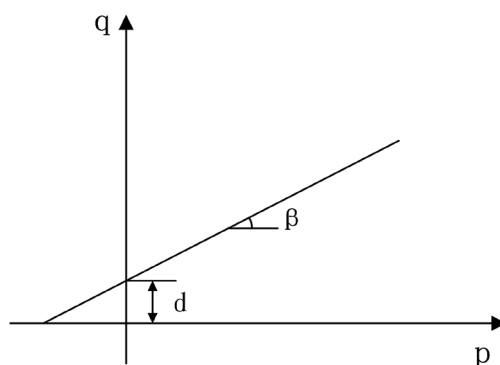


Figure 1. Drucker-Prager constitutive model

图 1. Drucker-Prager 本构模型

地基土体分为两层,分别为 10.2 m 的粉质黏土层和 9.8 m 的粉土层,其参数如表 1 所示。D-P 模型下的土体参数如表 2 所示。

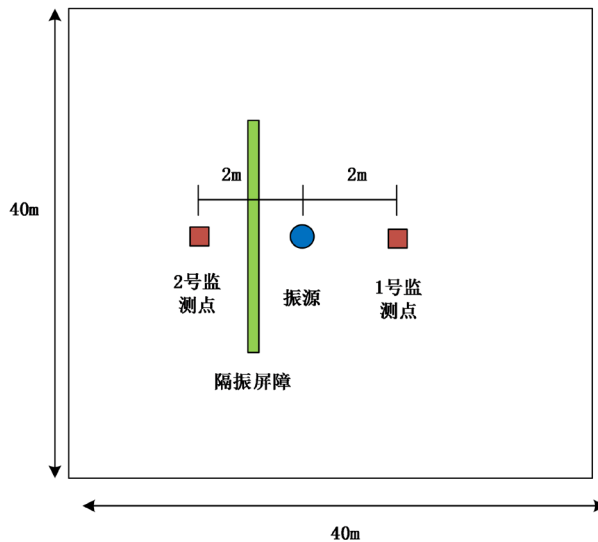
模型的尺寸为长 40 m × 宽 40 m × 深 20 m,尺寸图如图 2 所示,网格划分图如图 3 所示。

**Table 1.** Subsoil parameters  
**表 1.** 地基土体参数

| 土体   | 层厚(m) | 容重(kN/m <sup>3</sup> ) | 粘聚力(kPa) | 内摩擦角(°) | 泊松比  | 弹性模量 E (MPa) |
|------|-------|------------------------|----------|---------|------|--------------|
| 粉质黏土 | 9.8   | 18.7                   | 52.0     | 7.6     | 0.35 | 2.6107       |
| 粉土   | 10.2  | 19.4                   | 37.0     | 14.4    | 0.33 | 3.9348       |

**Table 2.** Model parameter  
**表 2.** D-P 模型参数

| 土体   | k     | $\beta$ | $\Psi$ |
|------|-------|---------|--------|
| 粉土   | 0.847 | 28.47°  | 28.47  |
| 粉质黏土 | 0.916 | 15.47°  | 15.47  |



**Figure 2.** Size of numerical calculation model  
**图 2.** 数值计算模型尺寸

荷载形式采用正弦波，该波形能够稳定地模拟出不同振动频率下的谐波，考虑到轨道交通、交通荷载以及强夯施工等产生的振动频率，故振动频率选取 1 Hz、5 Hz、10 Hz、20 Hz、30 Hz、40Hz。金壮[6]在其研究的文献当中指出，隔振长度在 15 m 以上时，则隔振材料的性能不受隔振长度的影响，且装置厚度对隔振效率的影响可忽略不计。Mahdavisefat [7]等研究发现，振源与隔振材料的距离对于隔振材料性能的影响较小。本文旨在研究隔振材料的几何尺寸(隔振深度)、材料性能(密度、弹性模量)以及振频对于隔振效率的影响，为了减小计算的工作量，隔振长度定为 20 m，隔振宽度为 0.1 m，隔振材料距振源为 3 m，具体的数值模拟工况如表 3 所示。

不同隔振材料之间的隔振性能需要进行直观的评价，因此，现定义隔振效率公式如下式(2)：

$$\eta = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $\eta$ ——隔振效率(%)； $V_0$ ——1 号监测点的峰值振动速度(m/s)； $V_1$ ——2 号监测点的峰值振动速度(m/s)。

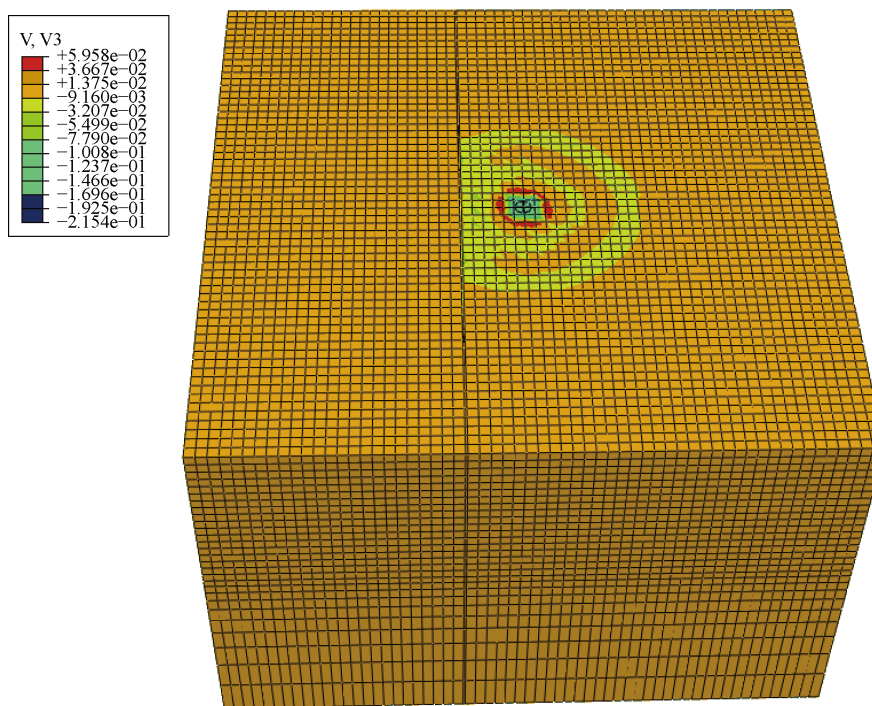


Figure 3. Mesh generation of numerical calculation model

图 3. 计算模型网格划分

Table 3. Conditions of numerical simulation

表 3. 数值模拟工况

| 工况 | 密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量(MPa) | 隔振深度(m) | 频率(Hz)  |
|----|------------------------|-----------|---------|---------|
| 1  | 0                      | 0         | 3       | 1~40 Hz |
| 2  | 0                      | 0         | 6       | 1~40 Hz |
| 3  | 0                      | 0         | 9       | 1~40 Hz |
| 4  | 31                     | 0.063     | 3       | 1~40 Hz |
| 5  | 31                     | 0.063     | 6       | 1~40 Hz |
| 6  | 31                     | 0.063     | 9       | 1~40 Hz |
| 7  | 900                    | 580       | 3       | 1~40 Hz |
| 8  | 900                    | 580       | 6       | 1~40 Hz |
| 9  | 900                    | 580       | 9       | 1~40 Hz |
| 10 | 31                     | 0.041     | h       | f       |
| 11 | 31                     | 0.063     | h       | f       |
| 12 | 31                     | 0.097     | h       | f       |
| 13 | 700                    | 580       | h       | f       |
| 14 | 900                    | 580       | h       | f       |
| 15 | 1100                   | 580       | h       | f       |
| 16 | $\rho$                 | 348       | h       | f       |
| 17 | $\rho$                 | 580       | h       | f       |
| 18 | $\rho$                 | 1187      | h       | f       |

### 3. 模型可靠性验证

为了验证所建模型的可靠性, 选取现场振动监测的场地进行数值模拟计算, 并将数值模拟所得的试验结果与实测结果进行对比, 以此验证模型的可靠性。

验证模型的几何尺寸参照工程现场建立, 如图 4 所示, 监测点参照图 5 布置, 记录水平向、竖直向振动速度, 考虑到 6 号拾振器是在放置于测试车辆中, 在模型计算中去除该监测点位。选取的荷载形式为三角形荷载, 如图 6 所示, 其中, 夯击能为 1500 kN·m, 夯锤与地面接触时间为 0.0639 s, 最大接触力为 2.2 MPa [16]。



Figure 4. Model diagram  
图 4. 模型图

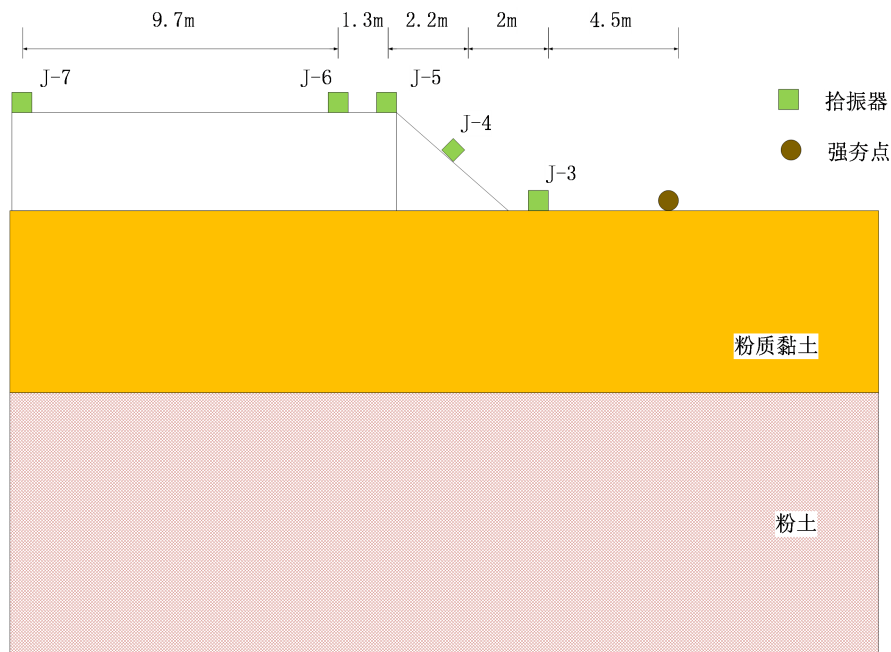


Figure 5. Layout of monitoring points  
图 5. 现场监测点布置图

如表 4 所示, 数值模拟的计算结果与现场试验的实测结果相差约 8.9%, 两者结果较为接近。由此可见, 数值模拟所选取的 D-P 模型能够较好的模拟出工程现场的实际情况。因此, 采用 D-P 模型的数值模拟的计算方法具有良好的可靠性。

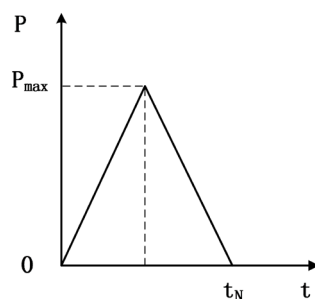


Figure 6. Dynamic compaction impact load diagram

图 6. 强夯冲击荷载示意图

Table 4. Comparison between numerical simulation calculation value and actual value

表 4. 数值模拟计算值与实测值对比表

| 监测点 | 距离振源位置(m) | 实测值(m/s) | 计算值(m/s) | 差值     |
|-----|-----------|----------|----------|--------|
| 3H  | 4.5       | 0.0458   | 0.0439   | 3.98%  |
| 3V  | 4.5       | 0.0735   | 0.6882   | 6.38%  |
| 4H  | 6.5       | 0.0324   | 0.0294   | 9.14%  |
| 4V  | 6.5       | 0.0439   | 0.0405   | 7.68%  |
| 5H  | 8.7       | 0.0291   | 0.0260   | 10.64% |
| 5V  | 8.7       | 0.0038   | 0.0033   | 13.29% |
| 7H  | 19.7      | 0.0143   | 0.0129   | 9.48%  |
| 7V  | 19.7      | 0.0033   | 0.0029   | 10.57% |

## 4. 结果分析

### 4.1. 隔振深度及振动频率对隔振效果的影响分析

根据表 3 计算工况,记录稳定周期下隔振后的监测点(2 号监测点)的水平、竖向振动速度,根据不同的隔振方式,将振动速度试验结果整理得到表 5、表 6、表 7。

如表 5、表 6、表 7 所示,三种隔振方式在不同埋设深度和振频条件下的振动速度呈现出规律性的变化。其中,同一埋设深度下,随着振动频率的提高,振动速度也随着提高。空沟对振动速度的衰减作用最佳,气垫次之,泡沫轻质土明显低于前两者。通过与 1 号监测点的振动速度进行对比和计算,三种隔振材料的隔振效率如图 7 所示。

由图 7 可知,三种隔振方式的隔振效率依次为,空沟、气垫、泡沫轻质土。随着埋设深度的增加,三者的隔振效率都明显提高。在 6 m、9 m 的埋设深度下,随着振频的增加,隔振效率会出现较为明显的拐点,说明该频率是当前埋设深度下隔振材料的最优隔振频率,与 Mahdavisefat 和孔腾飞等人[7] [17]的研究成果相吻合。考虑到强夯冲击所产生的频率为 4~13 Hz,故选取 9 m 作为埋设深度。在此埋设深度,振频达到 5 Hz 时,隔振材料便开始发挥作用,振频在 10 Hz 时,气垫隔振材料的水平、竖向隔振效率分别达到 73%、68%,泡沫轻质土的水平、竖向隔振效率分别到达 39%、35%,两者充分发挥隔振性能,因此优选 9 m 埋深作为强夯隔振深度。

**Table 5.** Empty ditch test results  
**表 5.** 空沟结果

| 工况 | 密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量(MPa) | 隔振深度(m) | 频率(Hz) | 水平速度(m/s) | 竖向速度(m/s) |
|----|------------------------|-----------|---------|--------|-----------|-----------|
| 1  |                        |           |         | 1 Hz   | 0.00550   | 0.00539   |
| 2  |                        |           |         | 5 Hz   | 0.00556   | 0.00536   |
| 3  |                        |           |         | 10 Hz  | 0.00516   | 0.00519   |
| 4  | 0                      | 0         |         | 20 Hz  | 0.00685   | 0.0049    |
| 5  |                        |           |         | 30 Hz  | 0.00554   | 0.00489   |
| 6  |                        |           |         | 40 Hz  | 0.00378   | 0.00419   |
| 7  |                        |           |         | 1 Hz   | 0.00522   | 0.00533   |
| 8  |                        |           |         | 5 Hz   | 0.00491   | 0.00527   |
| 9  |                        |           |         | 10 Hz  | 0.00431   | 0.00423   |
| 10 | 0                      | 0         |         | 20 Hz  | 0.00438   | 0.00355   |
| 11 |                        |           |         | 30 Hz  | 0.00407   | 0.00398   |
| 12 |                        |           |         | 40 Hz  | 0.00289   | 0.00386   |
| 13 |                        |           |         | 1 Hz   | 0.00480   | 0.00491   |
| 14 |                        |           |         | 5 Hz   | 0.00346   | 0.00386   |
| 15 |                        |           |         | 10 Hz  | 0.00237   | 0.00267   |
| 16 | 0                      | 0         |         | 20 Hz  | 0.00346   | 0.00293   |
| 17 |                        |           |         | 30 Hz  | 0.00321   | 0.00330   |
| 18 |                        |           |         | 40 Hz  | 0.00223   | 0.00313   |

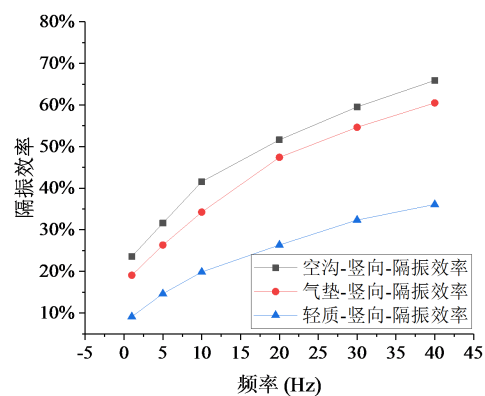
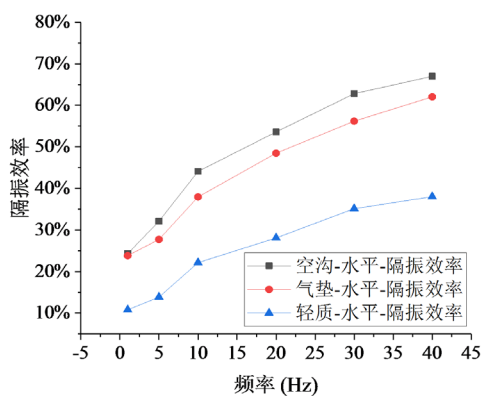
**Table 6.** Air cushion test results  
**表 6.** 气垫材料结果

| 工况 | 密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量(MPa) | 隔振深度(m) | 频率(Hz) | 水平速度(m/s) | 竖向速度(m/s) |
|----|------------------------|-----------|---------|--------|-----------|-----------|
| 1  |                        |           |         | 1 Hz   | 0.00554   | 0.00571   |
| 2  |                        |           |         | 5 Hz   | 0.00593   | 0.00577   |
| 3  |                        |           |         | 10 Hz  | 0.00573   | 0.00584   |
| 4  | 31                     | 0.0063    |         | 20 Hz  | 0.00760   | 0.00533   |
| 5  |                        |           |         | 30 Hz  | 0.00653   | 0.00548   |
| 6  |                        |           |         | 40 Hz  | 0.00434   | 0.00486   |
| 7  |                        |           |         | 1 Hz   | 0.00544   | 0.00530   |
| 8  |                        |           |         | 5 Hz   | 0.00527   | 0.00517   |
| 9  |                        |           |         | 10 Hz  | 0.00469   | 0.00467   |
| 10 | 31                     | 0.0063    |         | 20 Hz  | 0.00512   | 0.00387   |
| 11 |                        |           |         | 30 Hz  | 0.00479   | 0.00438   |
| 12 |                        |           |         | 40 Hz  | 0.00351   | 0.00419   |
| 13 |                        |           |         | 1 Hz   | 0.00500   | 0.00503   |
| 14 |                        |           |         | 5 Hz   | 0.00410   | 0.00441   |
| 15 |                        |           |         | 10 Hz  | 0.00249   | 0.00280   |
| 16 | 31                     | 0.0063    |         | 20 Hz  | 0.00377   | 0.00314   |
| 17 |                        |           |         | 30 Hz  | 0.00368   | 0.00359   |
| 18 |                        |           |         | 40 Hz  | 0.00278   | 0.00360   |

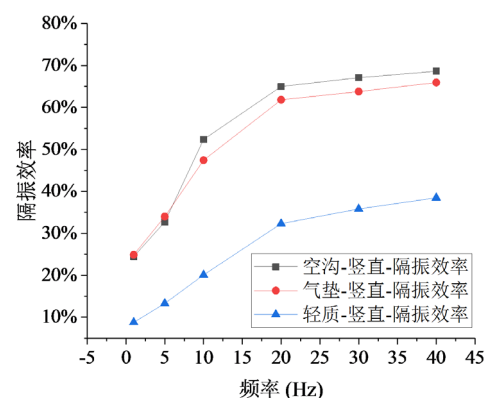
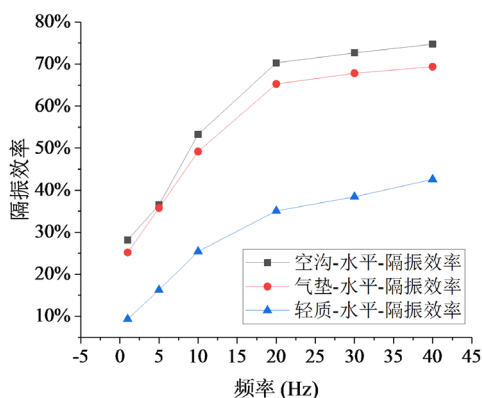


**Table 7.** Test results of lightweight treated soil  
**表 7.** 泡沫轻质土结果

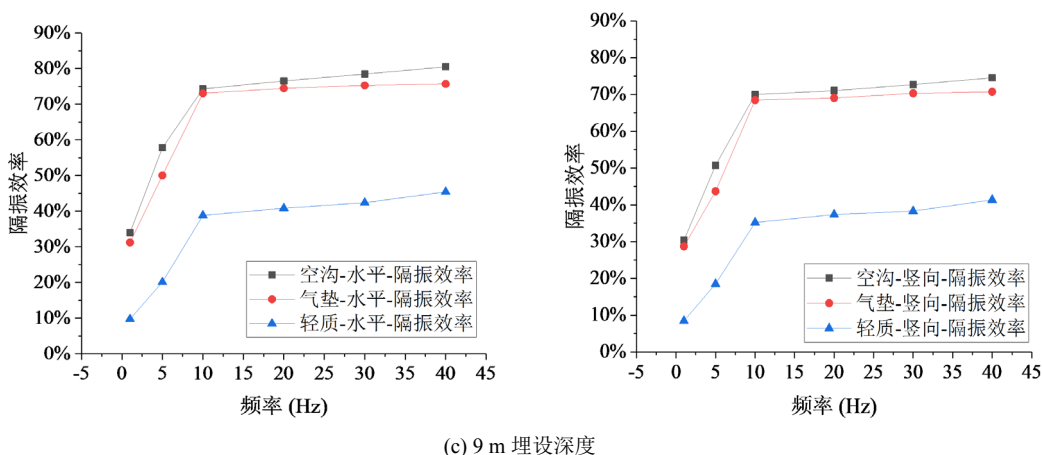
| 工况 | 密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量(MPa) | 隔振深度(m) | 频率(Hz) | 水平速度(m/s) | 竖向速度(m/s) |
|----|------------------------|-----------|---------|--------|-----------|-----------|
| 1  | 900                    | 580       |         | 1 Hz   | 0.00649   | 0.00641   |
| 2  |                        |           |         | 5 Hz   | 0.00706   | 0.00669   |
| 3  |                        |           |         | 10 Hz  | 0.00718   | 0.00712   |
| 4  |                        |           |         | 20 Hz  | 0.01061   | 0.00747   |
| 5  |                        |           |         | 30 Hz  | 0.00966   | 0.00817   |
| 6  |                        |           |         | 40 Hz  | 0.00710   | 0.00786   |
| 7  | 900                    | 580       |         | 1 Hz   | 0.00659   | 0.00643   |
| 8  |                        |           |         | 5 Hz   | 0.00687   | 0.00679   |
| 9  |                        |           |         | 10 Hz  | 0.00688   | 0.00710   |
| 10 |                        |           |         | 20 Hz  | 0.00958   | 0.00686   |
| 11 |                        |           |         | 30 Hz  | 0.00917   | 0.00775   |
| 12 |                        |           |         | 40 Hz  | 0.00657   | 0.00757   |
| 13 | 900                    | 580       |         | 1 Hz   | 0.00656   | 0.00646   |
| 14 |                        |           |         | 5 Hz   | 0.00655   | 0.00639   |
| 15 |                        |           |         | 10 Hz  | 0.00565   | 0.00576   |
| 16 |                        |           |         | 20 Hz  | 0.00873   | 0.00635   |
| 17 |                        |           |         | 30 Hz  | 0.00858   | 0.00745   |
| 18 |                        |           |         | 40 Hz  | 0.00625   | 0.00721   |



(a) 3 m 埋设深度



(b) 6 m 埋设深度



**Figure 7.** Isolation efficiency of different embedded depth and vibration frequency  
**图 7.** 不同埋设深度和振频的隔振效率

#### 4.2. 材料密度及模量对隔振效果的影响分析

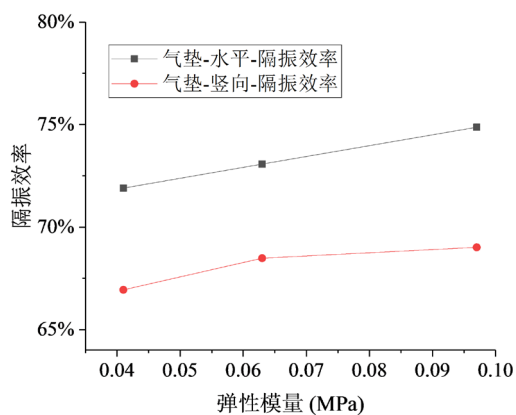
探究隔振材料的密度和弹性模量对隔振效率的影响。将优选得到的 9 m 埋设深度和 10 Hz 振动频率带入到数值模拟计算中，结果如表 8 所示。

**Table 8.** Vibration velocity after vibration isolation of different material properties  
**表 8.** 不同材料属性隔振后的振动速度

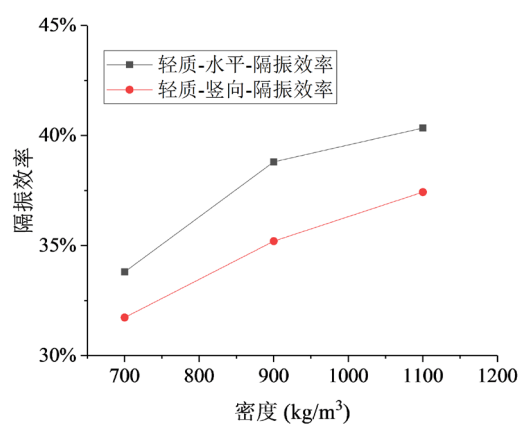
| 工况     | 密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量(MPa) | 隔振深度(m) | 频率(Hz) | 水平速度(m/s) | 竖向速度(m/s) |
|--------|------------------------|-----------|---------|--------|-----------|-----------|
| 1 (气垫) | 31                     | 0.041     | 9       | 10     | 0.00259   | 0.00294   |
| 2 (气垫) | 31                     | 0.063     | 9       | 10     | 0.00249   | 0.00280   |
| 3 (气垫) | 31                     | 0.097     | 9       | 10     | 0.00248   | 0.00285   |
| 4 (轻质) | 700                    | 580       | 9       | 10     | 0.00591   | 0.00587   |
| 5 (轻质) | 900                    | 580       | 9       | 10     | 0.00565   | 0.00576   |
| 6 (轻质) | 1100                   | 580       | 9       | 10     | 0.00551   | 0.00566   |
| 7 (轻质) | 1100                   | 348       | 9       | 10     | 0.00608   | 0.00599   |
| 8 (轻质) | 1100                   | 1187      | 9       | 10     | 0.00393   | 0.00422   |

由表 8 可知，对于气垫隔振，不同弹性模量的气垫隔振材料对监测点的水平、竖向振动速度的影响较小；对于泡沫轻质土隔振，随着泡沫轻质土弹性模量的增大，监测点的振动速度衰减也随之增大，而改变材料的密度对速度衰减影响较小。不同密度、弹性模量的气垫和泡沫轻质土的隔振效率如图 8 所示。

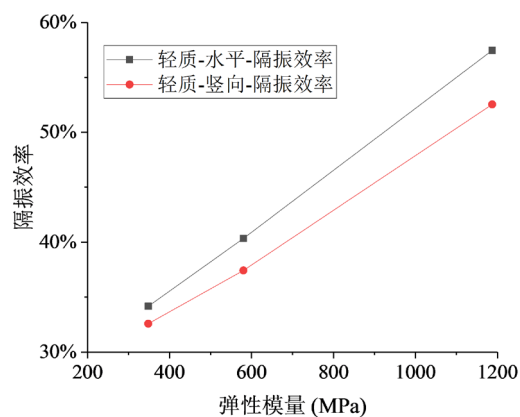
如图 8 所示，气垫材料的弹性模量从 0.041 MPa 提高到 0.097 MPa 时，水平、竖向隔振效率分别提升了 3%、2%，因此，弹性模量(即气压)对材料的隔振效率基本没有影响。泡沫轻质土的密度从 700 kg/m<sup>3</sup> 提高到 1100 kg/m<sup>3</sup> 时，水平、竖向隔振效率提升了 6%、5%，弹性模量从 348 MPa 增加到 1187 MPa 时，水平、竖向隔振效率提升了 23%、20%。因此在实际应用时，应当考虑增加泡沫轻质土的密度和弹性模量，从而提高该材料的隔振效率。



(a) 不同弹性模量的气垫



(b) 不同密度的泡沫轻质土



(c) 不同弹性模量的泡沫轻质土

**Figure 8.** Isolation efficiency of different density and elastic modulus**图 8.** 不同密度和弹性模量的隔振效率

## 5. 结论

1) 通过改变振源的振频和隔振材料的埋深,发现气垫和泡沫轻质土在 6 m 和 9 m 埋深下达到最佳隔振效果。考虑到强夯的特征振频 10 Hz, 优选 9 m 埋深作为强夯隔振深度。该工况下, 两者的水平隔振效率分别为 73%、39%, 竖向隔振效率分别为 68%、35%。

2) 气垫隔振材料的弹性模量(即气压)对于隔振效率基本没有影响。

3) 泡沫轻质土的密度从  $700 \text{ kg/m}^3$  增加到  $1100 \text{ kg/m}^3$ , 水平、竖向隔振效率分别提高了 6%、5%。弹性模量从 348 MPa 增加到 1187 MPa 时, 水平、竖向隔振效率分别提高了 23%、20%。因此, 泡沫轻质土的刚度对隔振效率的提升效果更为显著。

## 参考文献

- [1] Barkan, D.D. (1965) Basic Problems of the Dynamics of Bases and Foundations (Review of the Conference on the Dynamics of Bases and Foundations). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **2**, 376-378. <https://doi.org/10.1007/BF01704871>
- [2] 刘晶磊, 于川情, 刘桓, 赵晓玉, 王奥运. 隔振沟槽几何参数对隔振效果的影响研究[J]. 振动工程学报, 2018, 31(6): 930-940.
- [3] Murillo, C., Thorel, L. and Caicedo, B. (2009) Ground Vibration Isolation with Geofoam Barriers: Centrifuge Modeling. *Geotextiles & Geomembranes*, **27**, 423-434. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2009.03.006>
- [4] Massarsch, R.K. (2005) American Society of Civil Engineers Geo-Frontiers Congress 2005—Austin, Texas, United States (January 24-26, 2005). Soil Dynamics Symposium in Honor of Professor Richard D. Woods—Vibration Isolation Using Gas-Filled Cushions, Geo-Frontiers Congress, 1-20.
- [5] Ju, S.H. and Li, H.C. (2011) 3D Analyses of Open Trench Barriers Filled with Water. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **137**, 1114-1120. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000530](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000530)
- [6] 金壮. 粉土路基强夯质量评价与隔振技术研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2015.
- [7] Mahdavisefat, E., Salehzadeh, H. and Heshmati, A.A. (2017) Full-Scale Experimental Study on Screening Effectiveness of SRM-Filled Trench Barriers. *Géotechnique*, **68**, 869-882. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.007>
- [8] Avilés, J. and Sánchez-Sesma, F.J. (1983) Piles as Barriers for Elastic Waves. *Journal of Geotechnical Engineering*, **109**, 1133-1146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:9\(1133\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:9(1133))
- [9] Avils, J. and Snchezsesma, F.J. (1988) Foundation Isolation from Vibrations Using Piles as Barriers. *Journal of Engineering Mechanics*, **119**, 1854-1870. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1988\)114:11\(1854\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1988)114:11(1854))
- [10] Yang, X.J. (1991) Ground Vibration Isolated by Silo and Pile Barriers. *Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, 11-15 March 1991, 1557-1562.
- [11] 高广运. 非连续屏障地面隔振理论与应用[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1998.
- [12] 高广运, 杨先健, 王贻荪, 吴世明. 排桩隔振的理论与应用[J]. 建筑结构学报, 1997, 18(4): 58-69.
- [13] 黄开勇, 向国威, 叶冠林, 王建华. 柔性隔振墙模型试验数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(S1): 1340-1343.
- [14] Adam, M. and Estorff, O.V. (2005) Reduction of Train-Induced Building Vibrations by Using Open and Filled Trenches. *Computers & Structures*, **83**, 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.08.010>
- [15] 姚占勇, 周冲, 蒋红光, 等. 基于帽盖模型的强夯地基应力-应变特征与有效加固范围分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 969-977.
- [16] 厉超. 粉土地基强夯动力特性及有效加固范围研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2016.
- [17] 孔腾飞. 屏障隔振的设计与隔振效果分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.