

引用本文:姚占勇,孙梦林,孔 军,等:橡胶气囊在地基强夯加固中的隔振效果及隔振参数优化[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(1):111-119.  
YAO Zhan-yong, SUN Meng-lin, KONG Jun, et al. Vibration Isolation Effect and Parameter Optimization of Rubber Gasbag in Foundation  
Dynamic Compaction[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1): 111-119.

DOI:10.19815/j.jace.2018.11055

## 橡胶气囊在地基强夯加固中的隔振效果及 隔振参数优化

姚占勇<sup>1</sup>, 孙梦林<sup>1</sup>, 孔 军<sup>2</sup>, 彭俊强<sup>2</sup>, 蒋红光<sup>1</sup>, 李 慧<sup>1</sup>

(1. 山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250002; 2. 齐鲁交通发展集团有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:**通过强夯室内模型试验研究橡胶气囊的隔振效果并对其隔振参数进行优化;采用单因素分析方法,依次开展不同隔振宽度、隔振距离、隔振长度、隔振深度的橡胶气囊室内模型试验;通过检测隔振板两侧质点振动最大加速度分析橡胶气囊隔振板的隔振效率,研究不同隔振参数对橡胶气囊隔振效率的影响规律。结果表明:1 500 kN·m 夯击能下橡胶气囊具有良好的隔振效果;隔振宽度对橡胶气囊的隔振效果基本没有影响;当振源与两传感器测点的距离相同时,隔振距离对橡胶气囊的隔振效果也基本没有影响;隔振长度在 12 m 范围内和隔振深度在 6 m 范围内对橡胶气囊的隔振效果影响较大,且二者超出各自范围后隔振效果增加不显著;隔振深度对橡胶气囊隔振效率的影响程度要高于隔振长度对橡胶气囊隔振效率的影响程度;1 500 kN·m 夯击能下橡胶气囊隔振的最佳隔振参数为隔振长度 12 m,隔振深度 6 m,隔振宽度和隔振距离根据现场条件确定;通过强夯现场试验验证了 1 500 kN·m 夯击能下橡胶气囊的隔振效果优于碎石填充沟的隔振效果,且橡胶气囊的隔振效率约为空沟隔振效率的 95% 左右;相关成果可为地基强夯加固振动控制技术的应用提供参考。

**关键词:**地基;橡胶气囊;强夯;隔振效率;参数优化

中图分类号: TU476

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)01-0111-09

## Vibration Isolation Effect and Parameter Optimization of Rubber Gasbag in Foundation Dynamic Compaction

YAO Zhan-yong<sup>1</sup>, SUN Meng-lin<sup>1</sup>, KONG Jun<sup>2</sup>, PENG Jun-qiang<sup>2</sup>,  
JIANG Hong-guang<sup>1</sup>, LI Hui<sup>1</sup>

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China;

2. Qilu Transportation Development Group, Jinan 250101, Shandong, China)

**Abstract:** The vibration isolation effect of rubber airbag was studied by indoor model test of dynamic compaction and the vibration isolation parameters were optimized. The single-factor analysis method was used to carry out the indoor rubber airbag model tests of different vibration isolation width, vibration isolation distance, vibration isolation length and vibration isolation depth. The vibration isolation efficiency of rubber airbag was analyzed by detecting the maximum acceleration of particle vibration on both sides of the vibration isolation plate. The influence of

different isolation parameters on the isolation efficiency of rubber airbag was studied. The results show that the rubber airbag has good vibration isolation effect under the ramming energy of 1 500 kN · m. The vibration isolation width has no effect on the vibration isolation effect of rubber airbag. When the distance between the vibration source and the measuring points of the two sensors is the same, the vibration isolation distance has no effect on the vibration isolation effect of rubber airbag. The vibration isolation effect of rubber airbag is greatly influenced by the vibration isolation length within 12 m and the vibration isolation depth within 6 m, and the vibration isolation effect does not increase significantly after the two parameters go beyond their respective ranges. The effect of vibration isolation depth on the vibration isolation efficiency of rubber airbag is higher than that of vibration isolation length. Under the ramming energy of 1 500 kN · m, the optimal vibration isolation parameters of rubber airbag are the vibration isolation length is 12 m, the vibration isolation depth is 6 m. The vibration isolation width and vibration isolation distance can be determined according to field conditions. The field test of dynamic compaction verifies that the vibration isolation effect of rubber airbag under the ramming energy of 1 500 kN · m is better than that of gravel filled ditch, and the vibration isolation efficiency of rubber airbag is about 95% of that of hollow ditch. The related results can provide reference for the application of vibration control technology of foundation dynamic compaction.

**Key words:** foundation; rubber airbag; dynamic compaction; vibration isolation efficiency; parameter optimization

## 0 引 言

强夯是一种施工方便的地基加固技术,因其处治地基经济高效,一经推广便受到了工程界的广泛关注<sup>[1]</sup>。地基强夯引起的振动会对周围建筑物及附属设施等产生不良影响,因此地基强夯控制问题是制约地基强夯加固广泛应用的关键因素。

强夯加固地基就是利用巨大的夯击能,在地基中产生冲击波和动应力,对地基土进行挤密,提高土的强度并降低压缩性<sup>[2]</sup>。强夯与地基的相互作用实际上应视作应力波在地基中的传播。在夯锤作用于地面的瞬时,冲击波产生并向外传播。强夯振动能量在介质中扩散形成的波根据其性质不同可分为体波和面波 2 种<sup>[2]</sup>。体波又分为横波和纵波,纵波能在固体和液体中传播,横波仅能在固体中传播。面波仅限于地基表面传播。对地基及周围建筑物产生松动影响的主要是横波和面波<sup>[1]</sup>。因此,强夯隔振主要是阻隔有害波横波和面波的传播。

振动控制的方法主要有降低振源强度、隔断传播途径和保护建筑物等,相应的工程技术一般为振源减振、设置隔振屏障和进行结构隔振等。在屏障隔振方面,根据屏障的连续与否,可将其分为连续性屏障和非连续性屏障。常见的连续性屏障有空沟、填充沟、地下连续墙等形式;非连续性屏障则有孔

列、粉煤灰桩、混凝土排桩等形式。工程实践表明:空沟的隔振效果最好,空沟越深,隔振效果越好,但空沟的开挖深度受限制<sup>[3-7]</sup>。

隔振参数方面的研究主要通过数值模拟的方法来分析空沟或填充沟的隔振长度、隔振深度、隔振宽度、隔振距离对隔振效率的影响,如刘奉喜等<sup>[8]</sup>运用数值模拟建立了二维路基-地基土动力学模型,证明了隔振沟主动隔振的隔振效果较好,发现当隔振距离为 3 m 时隔振效果最好。邓亚虹等<sup>[9]</sup>研究认为隔振深度是决定隔振沟隔振效果的首要因素,其次是隔振距离,影响最小的是隔振宽度。杨先健等<sup>[10-12]</sup>认为适宜的单体屏障间距、合理的屏障深度和长度都可以优化隔振效果。许多学者<sup>[7,13-24]</sup>通过数值分析的方法,证明影响隔振效果的因素主要是隔振长度和隔振深度,隔振距离和隔振宽度的影响可以忽略。

目前对隔振措施及隔振参数的研究很多,研究的隔振措施主要是空沟及填充沟,隔振参数主要是隔振长度、隔振深度、隔振宽度、隔振距离,主要手段是数值模拟结合理论分析。本文针对现有隔振参数研究缺少室内试验及现场试验验证的问题,并基于强夯振动产生的有害波均不能在气体中传播这一机理,设计了一种由 PVC 塑料软板和橡胶气囊构成的新型隔振板,采用单因素分析方法分别分析隔振宽度、隔振距离、隔振长度、隔振深度对隔振效果的影

响,并优化隔振长度和隔振深度 2 个隔振参数。

1 橡胶气囊隔振的室内模型试验

建立室内地基强夯橡胶气囊隔振试验模型,通过室内模型试验,分析橡胶气囊的隔振效果,以及隔振参数对隔振效果的影响,并优化隔振参数。

1.1 试验参数、设备及模型组成

1.1.1 试验参数

根据第二相似定理<sup>[25]</sup>:首先假设某一种现象可以通过含有  $m$  个物理量的函数关系式表达和说明,如果这  $m$  个物理量可以同时被  $n$  种基本量纲表示出来,那么便能得到  $m-n$  个相似判据,用函数关系式可以将上述关系表示为

$$f(X_1,X_2,\cdots,X_m)=0 \tag{1}$$

根据相似定理,选取上述方程中的物理量。本文以粉土为研究对象,影响强夯振动效果的物理量为夯锤落距  $h$ 、粉土的干重度  $\gamma_d$ 、夯击能  $E$ 、锤质量  $M$ 、夯锤底面直径  $D$ 、夯锤作用时间  $T$ 、夯击次数  $N$ 、夯锤下落速度  $v$ 、夯锤下落加速度  $a$ 。

函数形式表示为

$$f(E,M,D,T,N,\gamma_d,h,v,a)=0 \tag{2}$$

式(2)中共有 9 个物理量,其中  $M,D,T$  为基本量纲,根据相似第三定理对其余 6 个物理量进行量纲分析,得到 6 个量纲一的量  $\pi_1\sim\pi_6$ ,即

$$\pi_1=\frac{\gamma_d D^3}{M} \tag{3}$$

$$\pi_2=\frac{h}{D} \tag{4}$$

$$\pi_3=\frac{VT}{D} \tag{5}$$

$$\pi_4=\frac{aT^2}{D} \tag{6}$$

$$\pi_5=\frac{E}{MD} \tag{7}$$

$$\pi_6=N \tag{8}$$

根据相似原理,可以得到相似指标  $G_E,C_M,C_D,C_N,C_{\gamma_d},C_T,C_h,C_v,C_a$  满足

$$\frac{C_E}{C_M C_D}=1 \tag{9}$$

$$C_N=1 \tag{10}$$

$$\frac{C_{\gamma_d} C_D^3}{C_M}=1 \tag{11}$$

$$\frac{C_h}{C_D}=1 \tag{12}$$

$$\frac{C_v C_T}{C_D}=1 \tag{13}$$

$$\frac{C_a C_T^2}{C_D}=1 \tag{14}$$

为了便于与工程实际相比较,根据工程中粉土地基常用的强夯施工工艺参数,确定夯锤质量和夯锤底面直径的相似系数,可以得到夯击能的相似系数和土体干重度的相似系数。试验中各参数的相似系数设计值如式(15)~(19)所示。

$$C_M=\frac{M_M}{M_Y}=1:1\,000 \tag{15}$$

$$C_D=\frac{D_M}{D_Y}=1:10 \tag{16}$$

$$C_T=\frac{T_M}{T_Y}=1:1 \tag{17}$$

$$C_{\gamma_d}=\frac{\gamma_{dM}}{\gamma_{dY}}=1:1 \tag{18}$$

$$C_E=\frac{E_M}{E_Y}=1:10\,000 \tag{19}$$

式中: $M_M,M_Y$  分别为模型和原型的夯锤质量; $D_M,D_Y$  分别为模型和原型的夯锤直径; $T_M,T_Y$  分别为模型和原型的夯锤作用时间; $\gamma_{dM},\gamma_{dY}$  分别为模型和原型的粉土干重度; $E_M,E_Y$  分别为模型和原型的夯击能。

由式(15)~(19)可知,模型夯锤的质量缩小至原型的 1/1 000,圆柱形夯锤的直径缩小至 1/10,夯击能缩小至 1/10 000,而土的干重度没有变化,所以在试验中选用现场的粉土。试验采用质量为 20 kg 的夯锤,落距为 0.75 m,来模拟实际 1 500 kN·m 工况下的夯击能。夯锤参数如表 1 所示。

表 1 夯锤参数

Tab. 1 Rammer Parameters

参数	直径/cm	质量/kg	高度/cm
数值	25	20	2.6

1.1.2 试验设备

试验设备如表 2 所示。

表 2 试验设备

Tab. 2 Test Equipment

试验设备	名称
隔振材料	新型隔振板(PVC 软板、橡胶气囊)
加载设备	20 kg 级的夯锤
压实设备	TRD-80 电动冲击夯
试验模型用土	粉土
辅助设备	细绳、卷尺、铁锹、钢筋、打气筒等
试验信息采集仪器	WS-USB 数据采集仪、传感器、信号输入线等

1.1.3 试验模型的组成

室内试验模型如图 1 所示,是由 2 块 PVC 软塑料板作为隔振单板,中间填充若干长条状的橡胶气

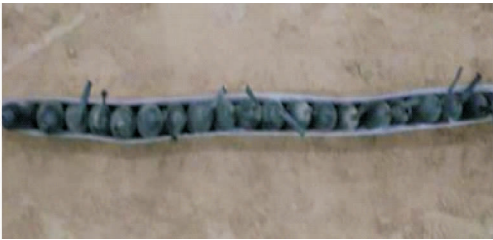


图 1 隔振板示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Vibration Isolation Plate

囊构成。PVC 具有较高的抗拉弯、抗压、抗冲击能力和良好的耐磨性能,价格便宜,化学性质较为稳定。橡胶具有优良的物理化学特性,如较好的弹性、绝缘性、防水性以及可塑性等。

1.2 室内模型试验的几何设计及测点布置

为尽可能避免模型的尺寸效应,综合考虑各种因素,本次试验选用 5 m×3 m×2.5 m 的基坑进行强夯隔振的室内模型试验,几何设计及测点布置如图 2,3 所示。

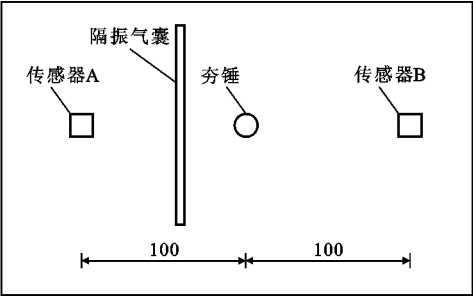


图 2 试验模型几何布置(单位:cm)

Fig. 2 Geometric Arrangement of Test Model (Unit:cm)



图 3 总体布置

Fig. 3 General Arrangement

加速度传感器 A 到夯锤中心的距离为 100 cm;加速度传感器 B 到夯锤中心的距离为 100 cm;加速度传感器 A,B 关于夯锤中心对称分布。传感器 A 测得通道 1 最大振动加速度;传感器 B 测得通道 2 最大振动加速度。

1.3 试验实施方案

本次试验采用质量为 20 kg 的夯锤,落距为 0.75 m,来模拟实际 1 500 kN·m 的夯击能。为保证土体的压实度,对路基进行分层填筑并压实,一层填筑的厚度大概是 20 cm,压实完成后再进行下一层的填筑,共填筑 10 层,采用 TRD-80 电动冲击夯分层夯实。为了消除前期夯击的影响,每夯完一击,就对夯击区域内的土挖开重填。

1.4 室内模拟试验方案

采用单因素分析的方法,依次开展不同隔振宽度、隔振距离、隔振长度、隔振深度的橡胶气囊隔振试验,通过检测隔振板两侧质点振动最大加速度分析橡胶气囊隔振板的隔振效率,研究不同隔振参数对橡胶气囊隔振效率的影响规律。

根据已有文献数值模拟的结果,空沟的隔振宽度对隔振效率的影响可以忽略<sup>[7,13-24]</sup>。本文试验中,隔振宽度 A 取较小的 2,3,4,5 cm 共 4 种方案。

根据已有的强夯隔振数值模拟研究成果,在 1 500 kN·m 夯击能条件下,采用气囊和空沟主动隔振的隔振长度取 12~15 m,隔振深度取 3.5~4.5 m,隔振距离取 3 m 时隔振效果较为理想<sup>[26-27]</sup>。本文试验取隔振距离为 15,30,45 cm,隔振长度为 80,100,120,140 cm,隔振深度为 20,30,40,50,60,70,80 cm。

试验方案如表 3~6 所示。依次固定其他 3 个隔振参数,分别进行不同隔振宽度、隔振距离、隔振长度、隔振深度的强夯隔振试验。

表 3 隔振宽度试验方案

Tab. 3 Vibration Isolation Width Test Scheme cm

方案编号	隔振长度	隔振深度	隔振宽度	隔振距离
1	120	40	5	30
2	120	40	4	30
3	120	40	3	30
4	120	40	2	30

表 4 隔振距离试验方案

Tab. 4 Vibration Isolation Distance Test Scheme cm

方案编号	隔振长度	隔振深度	隔振宽度	隔振距离
5	120	40	A	15
6	120	40	A	30
7	120	40	A	45

隔振宽度试验方案中,取固定隔振长度为 120 cm,隔振深度为 40 cm,隔振距离为 30 cm,来分析隔振宽度对橡胶气囊隔振效率的影响,从而给出较优隔振宽度 A。

表 5 隔振长度试验方案

Tab. 5 Vibration Isolation Length Test Scheme cm				
方案编号	隔振长度	隔振深度	隔振宽度	隔振距离
8	80	40	A	B
9	100	40	A	B
10	120	40	A	B
11	140	40	A	B

表 6 隔振深度试验方案

Tab. 6 Vibration Isolation Depth Test Scheme cm				
方案编号	隔振长度	隔振深度	隔振宽度	隔振距离
12	C	20	A	B
13	C	30	A	B
14	C	40	A	B
15	C	50	A	B
16	C	60	A	B
17	C	70	A	B
18	C	80	A	B

隔振距离试验方案中,取固定隔振长度为 120 cm,隔振深度为 40 cm,隔振宽度为 A,来分析隔振距离对橡胶气囊隔振效率的影响,从而给出较优隔振距离 B。

隔振长度试验方案中,取固定隔振深度为 40 cm,隔振宽度为 A,隔振距离为 B,来分析隔振长度对橡胶气囊隔振效率的影响,从而给出较优隔振长度 C。

隔振深度试验方案中,取固定隔振宽度为 A,隔振距离为 B,隔振长度为 C,来分析隔振深度对橡胶气囊隔振效率的影响,从而给出较优隔振长度 D。

2 室内模型试验结果分析

根据信号采集系统测得的隔振板两侧测点的最大振动加速度来分析隔振效率的变化。

2.1 隔振宽度对隔振效率的影响

表 7 为隔振宽度对隔振效率的影响规律。将表 7 的试验结果绘成柱状图,如图 4 所示。

表 7 隔振宽度对隔振效率的影响

Tab. 7 Influence of Vibration Isolation Width on Vibration Isolation Efficiency			
方案编号	通道 1 最大振动 加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	通道 2 最大振动 加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	隔振效率/%
1	2.287 7	5.966 3	61.656
2	2.810 1	7.384 4	61.946
3	2.542 1	6.184 8	61.446
4	2.698 4	6.515 1	58.582

由表 7、图 4 可以看出,随着隔振宽度变化,隔振效率的波动程度较小,隔振效率均在 60%左右,

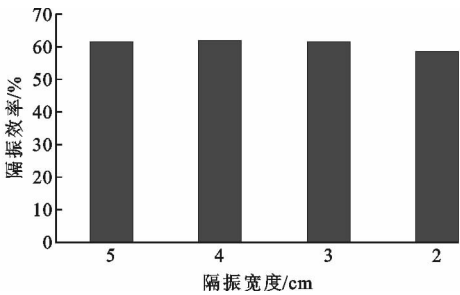


图 4 隔振宽度影响

Fig. 4 Influence of Vibration Isolation Width

在排除试验误差的情况下认为隔振宽度对于隔振效率基本无影响。事实上,横波和面波不能在气体中传播。因此,在隔振参数选取时,通过增加隔振宽度来提高隔振效率的工程意义不大。此后室内模型试验选用 2 cm 作为隔振宽度。

2.2 隔振距离对隔振效率的影响

表 8 为隔振距离对隔振效率的影响规律。将表 8 的试验结果绘成柱状图,如图 5 所示。由表 8、图 5 可知,在振源与两传感器测点距离相同条件下,通过变化隔振板的位置来改变隔振距离,随着隔振距离的变化,隔振效率没有发生太大的波动,隔振效率均在 60%左右,在排除试验误差的情况下,可以认为隔振距离对隔振效率没有影响。事实上,有害波不能在空气中传播,无论隔振距离如何,只要设置橡胶气囊形成一道空气屏障,就能起到隔振作用,而与隔振距离无关。因此,工程中可以根据施工场地的实际条件来合理设置隔振距离。本次室内模型试验选择隔振距离为 15 cm。

表 8 隔振距离对隔振效率的影响

Tab. 8 Influence of Vibration Isolation Distance on Vibration Isolation Efficiency

方案编号	通道 1 最大振动 加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	通道 2 最大振动 加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	隔振效率/%
5	2.542 1	6.184 8	61.446
6	2.610 4	6.541 6	60.096
7	2.678 6	6.473 5	58.623

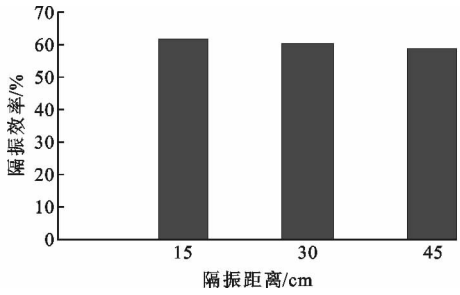


图 5 隔振距离影响

Fig. 5 Influence of Vibration Isolation Distance

2.3 隔振长度对隔振效率的影响

隔振长度对隔振效率的影响规律如表 9 和图 6 所示。由表 9、图 6 可知,随着隔振长度的增加,隔振效率也在增加。当隔振长度从 80 cm 变化至 100 cm 时,隔振效率有了大幅度的提升;当隔振长度从 100 cm 变化至 120 cm 时,隔振效率增加幅度变缓慢,但仍呈现增加的趋势;当隔振长度从 120 cm 变化至 140 cm 时,隔振效率变化较小,趋于平缓。可见存在临界长度,长度大于该值后隔振效果并不能随长度的增加而显著提高。由图 6 可知,120 cm 为隔振长度的临界值。本次试验隔振长度选用 120 cm 作为最佳隔振长度。

表 9 隔振长度对隔振效率的影响规律

Tab. 9 Influence of Vibration Isolation Length on Vibration Isolation Efficiency

方案编号	通道 1 最大振动 加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	通道 2 最大振动 加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	隔振效率/%
8	4.545 0	6.488 2	29.950
9	2.948 1	5.859 4	49.686
10	2.483 0	5.593 2	57.385
11	2.292 2	5.754 6	60.167

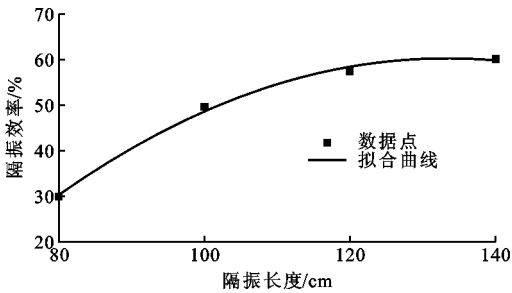


图 6 隔振长度影响

Fig. 6 Influence of Vibration Isolation Length

2.4 隔振深度对隔振效率的影响

隔振深度对隔振效率的影响规律如表 10 和图 7 所示。

表 10 隔振深度对隔振效率的影响

Tab. 10 Influence of Vibration Isolation Depth on Vibration Isolation Efficiency

方案编号	通道 1 最大振动 加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	通道 1 最大振动 加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	隔振效率/%
12	4.683 3	6.862 7	31.757
13	3.374 7	6.073 4	44.436
14	2.483 0	5.593 2	57.385
15	2.083 3	7.090 1	65.337
16	2.310 2	7.320 3	68.441
17	3.100 1	7.577 0	69.000
18	3.095 2	7.710 2	69.488

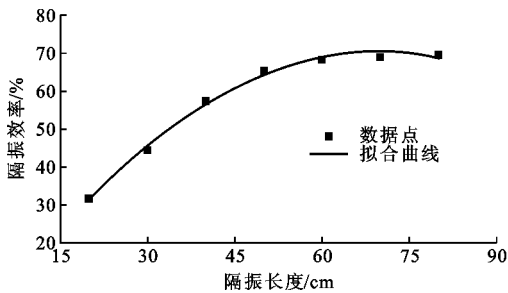


图 7 隔振深度影响

Fig. 7 Influence of Vibration Isolation Depth

由表 10、图 7 可知,随着隔振深度的增加,隔振效率也在增加。当隔振深度从 20 cm 变化至 40 cm 时,隔振效率增加的幅度较大;当隔振深度从 40 cm 变化至 60 cm 时,隔振效率增加的幅度变缓慢;当隔振深度从 60 cm 变化至 80 cm 时,隔振效率增加的幅度趋于平缓。可见存在临界深度,深度大于该值后隔振效果并不能随深度的增加而显著提高。由图 7 可知,60 cm 为隔振深度的临界值。本次试验隔振深度选用 60 cm 作为最佳隔振深度。

2.5 隔振长度、隔振深度对隔振效率影响的比较

由室内试验结果可知,随着隔振长度和隔振深度的增加,橡胶气囊的隔振效率都有一定的提高,但是超过隔振长度和隔振深度的临界值后,橡胶气囊的隔振效率不再有明显的提高,此时再通过增加隔振长度和隔振深度的方式来提高隔振效率的工程意义不大。根据室内试验的相似系数及图 6、7 两条优化曲线可以得出,在实际工况 1 500 kN·m 夯击能下的最佳隔振组合应是隔振长度为 12 m,隔振深度为 6 m,隔振宽度和隔振距离则根据现场实际情况来选取。

将室内试验中不同隔振长度下和不同隔振深度下隔振效率的结果绘于图 8。由图 8 可知,隔振深度对隔振效率的影响程度要高于隔振长度对隔振效率的影响程度。橡胶气囊隔振板的隔振效果与隔振板的深度有最直接的关系。深度较浅的橡胶气囊隔振板只是将地基表层的面波和浅层的横波隔离,但横波是地基在纵波作用下压缩剪切变形激发的振动,纵波随着深度的增加而衰减,横波也随之衰减,因此只有隔振深度足够大,才能取得良好的隔振效果且满足安全要求。

3 地基强夯橡胶气囊隔振现场试验

3.1 隔振试验方案

为验证室内模型试验中橡胶气囊良好的隔振性

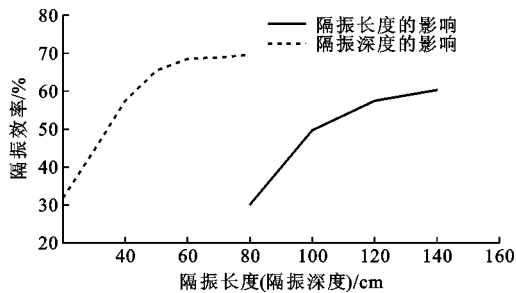


图 8 隔振长度、隔振深度对隔振效率的影响对比  
Fig. 8 Comparison of Influence of Vibration Isolation Length and Isolation Depth on Vibration Isolation Efficiency

能,按照室内模型试验给出的工况 1 500 kN·m 夯击能下的最佳隔振组合:隔振长度为 12 m,隔振深度为 6 m,布置橡胶气囊进行现场试验。根据现场实际情况,取隔振宽度为 0.3 m,隔振距离为 3 m。

此外,为验证橡胶气囊的气压及其在隔振板中排布的疏密程度对隔振效果的影响,在现场试验中选取了橡胶气囊不同的气压及疏密程度,具体气囊布置如图 9 所示。

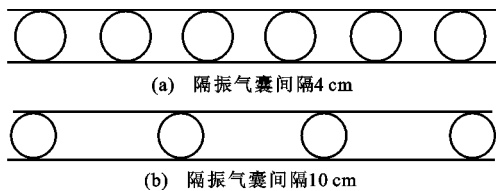


图 9 隔振板气囊布置

Fig. 9 Airbag Arrangement of Vibration Isolation Plate

表 11 现场试验结果

Tab. 11 Field Test Results

方案编号	工况	传感器 1 最大振动加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	传感器 2 最大振动加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	隔振效率/%
1	工况 1:气囊密、气压适中	4.07	11.89	65.8
	工况 2:气囊疏、气压适中	4.25	12.21	65.2
	工况 3:气囊密、气压充足	4.02	11.78	65.9
	工况 4:气囊疏、气压充足	4.17	12.06	65.4
2	回填碎石	6.56	10.96	24.8
3	空沟	3.11	11.57	73.1

杂,干扰因素也较多,现场橡胶气囊隔振试验的隔振效率与室内试验相比有一定的差距。

## 4 结 语

(1)隔振宽度和隔振距离对于橡胶气囊的隔振效率基本没有影响,通过加大隔振宽度和隔振距离来提高隔振效率的工程意义不大。

(2)随着隔振长度、隔振深度的增加,隔振效率也在增加,但二者均存在临界值,长度或深度大于临

图 9(a)为橡胶气囊密集布置,每隔 4 cm 布置 1 个气囊;图 9(b)为橡胶气囊稀疏布置,每隔 10 cm 布置 1 个气囊。气囊气压充足时采用 0.12 MPa,气压适中时采用 0.08 MPa。

具体试验方案如下:

方案 1 设置橡胶气囊隔振板,验证其隔振效果。同时,按照橡胶气囊在隔振板中布置的疏密程度、橡胶气囊气压是否充足分为 4 种工况。工况 1:橡胶气囊密集布置,气压适中。工况 2:橡胶气囊稀疏布置,气压适中。工况 3:橡胶气囊密集布置,气压充足。工况 4:橡胶气囊稀疏布置,气压充足。

方案 2 的隔振参数与方案 1 相同,隔振沟回填碎石。

方案 3 的隔振参数与方案 1 相同,采用隔振空沟,由于空沟沟深较大,进行现场试验时应对空沟沟壁进行固定,防止强夯过程中空沟沟壁坍塌。

## 3.2 试验结果汇总

表 11 为现场试验结果汇总,图 10 为方案 1 不同工况的隔振效率。由表 11、图 10 可知,气囊隔振的隔振效果较好,其隔振效率达到空沟隔振效率的 95%左右,且隔振效率明显高于回填碎石的隔振效率。同时,气囊的疏密程度和气囊内气压大小对橡胶气囊的隔振效率基本没有影响,强夯有害波不能在气体中传播,只要隔振板有充气橡胶气囊形成空气屏障就能起到隔振效果,与充气是否充足和气囊疏密无关。由于现场试验条件较室内模型试验复

界值后隔振效果提高不明显。隔振深度对隔振效率的影响程度要高于隔振长度。

(3)在工况 1 500 kN·m 夯击能下的最佳隔振组合应是隔振长度为 12 m,隔振深度为 6 m,隔振宽度和隔振距离根据现场实际情况合理选取。

(4)经现场试验验证,橡胶气囊的隔振效果较好,其隔振效率达到空沟隔振效率的 95%左右,且隔振效率明显高于回填碎石的隔振效率。气囊的疏密程度和气囊内气压大小对橡胶气囊的隔振效率基

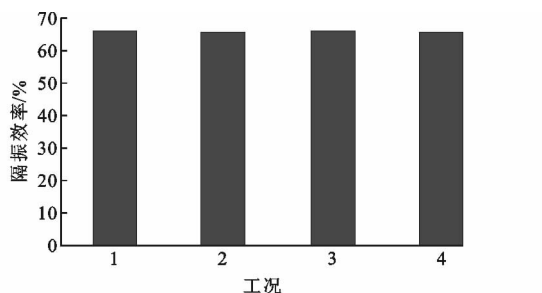


图 10 方案 1 不同工况的隔振效率

Fig. 10 Vibration Isolation Efficiency of Scheme 1 Under Different Conditions

本没有影响。

## 参考文献:

## References:

- [1] 左名麟,朱树森.强夯法地基加固[M].北京:中国铁道出版社,1990.  
ZUO Ming-lin, ZHU Shu-sen. Foundation Reinforcement by Dynamic Compaction [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1990.
- [2] 徐至钧,张亦农.强夯和强夯置换法地基加固[M].北京:机械工业出版社,2004.  
XU Zhi-jun, ZHANG Yi-nong. Foundation Reinforcement by Dynamic Compaction and Dynamic Compaction Replacement Method [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [3] 蔡袁强,王大力,徐长节,等.强夯加固机理及其环境影响的数值分析[J].岩土力学,2005,26(增1):159-162.  
CAI Yuan-qiang, WANG Da-li, XU Chang-jie, et al. Numerical Analysis of Dynamic Compaction and Environmental Effect Caused by the Impacting Vibration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S1): 159-162.
- [4] 袁剑波,时林军,刘建华.红粘土填方路基强夯加固效果检测与分析[J].中外公路,2010,30(5):34-38.  
YUAN Jian-bo, SHI Lin-jun, LIU Jian-hua. Detection and Analysis of Dynamic Consolidation Effect of Red Clay Filling Roadbed [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(5): 34-38.
- [5] MAHDAVISEFAT E, SALEHZADEH H, HESHMATI A A. Full-scale Experimental Study on Screening Effectiveness of SRM-filled Trench Barriers [J]. Geotechnique, 2018, 68(10): 869-882.
- [6] LYSMER J, WAAS G. S Waves in Plane Infinite Structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1972, 98: 85-105.
- [7] ADAM M, VON ESTORFF O. Reduction of Train-induced Building Vibrations by Using Open and Filled

Trenches [J]. Computers & Structures, 2005, 83(1): 11-24.

- [8] 刘奉喜,刘建坤,防建宏,等.多年冻土区铁路隔振沟隔振效果的数值分析[J].中国铁道科学,2003,24(5):48-51.  
LIU Feng-xi, LIU Jian-kun, FANG Jian-hong, et al. Numerical Analysis of the Vibration Isolation Effect of the Railway Vibration Isolating Cutting in Permafrost [J]. China Railway Science, 2003, 24(5): 48-51.
- [9] 邓亚虹,夏唐代,陈敬虞.车辆荷载作用下隔震沟隔震效率影响因素分析[J].岩土力学,2007,28(5):883-887,894.  
DENG Ya-hong, XIA Tang-dai, CHEN Jing-yu. Analysis of Efficiency of Vibration Isolating Groove Subjected to Vehicle Load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 883-887, 894.
- [10] 杨先健.弹性地基板与地面屏障并联隔振设计[J].建筑结构,1994(12):46-52.  
YANG Xian-jian. Parallel Vibration Isolation Design of Elastic Foundation Floor and Ground Barrier [J]. Building Structure, 1994(12): 46-52.
- [11] 陈功奇,高广运.层状地基中填充沟对不平顺列车动荷载的隔振效果研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):144-153.  
CHEN Gong-qi, GAO Guang-yun. Vibration Screening Effect of In-filled Trenches on Train Dynamic Loads of Geometric Irregular Track in Layered Grounds [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 144-153.
- [12] 高广运.非连续屏障地面隔振理论与应用[D].杭州:浙江大学,1998.  
GAO Guang-yun. The Ground Vibration Isolation Theory and Application of the Continuous Barrier [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1998.
- [13] 高广运,杨先健,王贻荪,等.排桩隔振的理论与应用[J].建筑结构学报,1997,18(4):58-69.  
GAO Guang-yun, YANG Xian-jian, WANG Yi-sun, et al. Theory and Application of Vibration Isolation by Piles in Rows [J]. Journal of Building Structures, 1997, 18(4): 58-69.
- [14] 王卫锋,师旭超.低能强夯工程中隔振沟隔振效果分析[J].铜业工程,2007(2):68-70.  
WANG Wei-feng, SHI Xu-chao. Analysis on Vibration Isolation Effect of Vibration Isolation Ditch in Feeble-minded Strong Rammer Project [J]. Copper Engineering, 2007(2): 68-70.
- [15] 陈昆,贾霄,刘彬,等.高速铁路空沟隔振措施隔振效果的有限元分析[J].地震工程学报,2014,36



- (3):575-579.
- CHEN Kun, JIA Xiao, LIU Bin, et al. Finite Element Analysis of Reducing the High-speed Railway Vibration Effect on the Environment Using Open Trenches[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3):575-579.
- [16] 淳庆, 潘建伍. 减振沟在强夯施工时的减振效果研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(6):115-120.
- CHUN Qing, PAN Jian-wu. Vibration-isolating Effect of Vibration-isolating Slot in the Process of Dynamic Compaction Construction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(6):115-120.
- [17] 吕秀杰, 龚晓南, 李建国. 强夯法施工参数的分析研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9):1628-1632.
- LU Xiu-jie, GONG Xiao-nan, LI Jian-guo. Research on Parameters of Construction with Dynamic Compaction Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9):1628-1632.
- [18] 王自励, 李娜, 秦星. 高速铁路侧隔振沟不同填充物对减隔振效果的影响分析[J]. 哈尔滨铁道科技, 2018(4):13-15.
- WANG Zi-li, LI Na, QIN Xing. Effect Analysis of Different Fillers on Vibration Isolation Effect of High Speed Railway Side Vibration Isolation Channel[J]. Harbin Railway Technology, 2018(4):13-15.
- [19] 李豫川, 翁泽宇, 唐杰, 等. 柔性基础双层隔振系统隔振效果评价的研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(6):172-177.
- LI Yu-chuan, WENG Ze-yu, TANG Jie, et al. Evaluation of Vibration Isolation Effect of Double-layer Isolation Systems with Flexible Foundations[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(6):172-177.
- [20] 刘晶磊, 于川情, 刘桓, 等. 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.
- LIU Jing-lei, YU Chuan-qing, LIU Huan, et al. Influence of Geometric Parameters of Isolation Trench on Vibration Isolation Effect[J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(6):930-940.
- [21] 朱宁, 马龙祥. 不同型式地铁隔振沟墙隔振性能研究[J]. 工程与建设, 2018, 32(6):799-802.
- ZHU Ning, MA Long-xiang. Study on Vibration Isolation Performance of Different Types of Metro Vibration Isolation Trench Wall[J]. Engineering and Construction, 2018, 32(6):799-802.
- [22] 刘晶磊, 仇健, 冯桂帅, 等. 砂土地基中微型沟槽隔振效果试验研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(4):1516-1522.
- LIU Jing-lei, ZHANG Jian, FENG Gui-shuai, et al. Experimental Observation and Investigation of the Effect of the Miniature Trench Vibration Isolation in the Sand-soil Ground[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(4):1516-1522.
- [23] 孙军, 吴宗臻, 晋杰, 等. 不同隔振屏障对铁路环境振动的隔振效果试验研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(4):147-150.
- SUN Jun, WU Zong-zhen, JIN Jie, et al. Experimental Study on Vibration Isolation Effects of Different Vibration Isolation Barriers Against Environment Vibration Induced by Railway Trains[J]. Railway Engineering, 2018, 58(4):147-150.
- [24] 姚锦宝, 夏禾, 胡敬梁. 空沟对列车运行产生的环境振动隔振效果研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(2):44-51.
- YAO Jin-bao, XIA He, HU Jing-liang. Study on Vibration Isolation Effect of Open Trench on Environmental Vibration Induced by Train Operation[J]. China Railway Science, 2018, 39(2):44-51.
- [25] 宋或. 相似模型试验原理[M]. 北京:人民交通出版社, 2016.
- SONG Yu. EST Principle of Similitude Model[M]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [26] 金壮. 粉土路基强夯质量评价与隔振技术研究[J]. 济南:山东大学, 2015.
- JIN Zhuang. Study on Effect Evaluation of Silt Subgrade Dynamic Compaction and Vibration Isolation Technology[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [27] 张大伟, 郭立英, 乔京生, 等. 强夯加固吹填土地基振动传递机理及减振措施研究[J]. 施工技术, 2011, 40(13):62-64.
- ZHANG Da-wei, GUO Li-ying, QIAO Jing-sheng, et al. Study on Vibration Transfer Mechanism of Dredger Fill Foundation Strengthened by Dynamic Compaction and Vibration Reduction Measures[J]. Construction Technology, 2011, 40(13):62-64.