

地基中混凝土排桩主动隔振研究

刘晶磊^{1,2}, 陈岩¹, 陈丰泽¹, 李秀欣¹, 梅名彰¹, 尹姜夔^{3,4}

(1. 河北建筑工程学院, 河北 张家口 075000; 2. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000;
3. 道路与铁道工程安全保障部共建教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 河北 石家庄 050043;
4. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:为了探究地基中设置混凝土排桩后,排桩的各参数变化对近场主动隔振的影响规律,在有限元软件中建立与试验场地一致的三维有限元模型,通过计算与分析验证了有限元计算结果的有效性;参考TB 10621—2014《高速铁路设计规范》建立了足尺寸的有限元模型,分析在列车荷载作用下排桩的各参数变化对隔振效果的具体影响规律。研究表明:桩长参数对隔振效果影响较为明显,随着参数增大,隔振效果越理想,当桩长参数为10.5以后,继续增加比值,隔振效果提升不显著;随着桩间距参数越大,隔振效果越不理想,较小的桩间距可获得理想的隔振效果;埋深参数对隔振效果影响显著,参数越大,隔振效果越不理想,当参数为3.5时,隔振效果已很不理想,较浅埋深能获得较理想的隔振效果。

关键词:混凝土排桩;主动隔振;有限元;列车荷载

中图分类号: TU435

文献标识码: A

Research on active vibration isolation of concrete piles in foundation

LIU Jinglei^{1,2}, CHEN Yan¹, CHEN Fengze¹, LI Xiuxin¹, MEI Mingzhang¹, YIN Jiangman^{3,4}

(1. Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China; 2. Hebei Key Laboratory of Diagnosis, Reconstruction and Anti-disaster of Civil Engineering, Zhangjiakou 075000, China; 3. Key Laboratory of Road and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education (Shijiazhuang Tiedao University), Shijiazhuang 050043, China; 4. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to explore the influence of the parameter changes of piles on the near-field active vibration isolation after the concrete row piles were installed in the foundation, a three-dimensional finite element model consistent with the test site was established in the finite element software, and the finite element model was verified by calculation and analysis. The calculation results were verified and full-size finite element model was established with reference to the TB 10621—2014 Code for design of high-speed railway, and the specific influence of the parameter changes of row piles on the vibration isolation effect under the action of the train load was analyzed. The analysis results show that the effect of the pile length parameter on the vibration isolation effect is obvious. As the parameter increases, the vibration isolation effect is more ideal. When the pile length parameter is 10.5, the ratio will continue to increase, and the vibration isolation effect will not improve significantly. The larger the parameter is, the less ideal the vibration isolation effect is, and the smaller pile spacing can achieve the ideal vibration isolation effect. The burial depth parameter has a significant impact on the vibration isolation effect, the larger the parameter, the less ideal the vibration isolation effect. When the parameter is 3.5, the vibration isolation effect will be unsatisfactory, and a shallower burial depth can obtain a better vibration isolation effect.

Key words: row of concrete piles; active vibration isolation; finite element; train load

收稿日期: 2023-04-04; 修回日期: 2023-07-07

基金项目: 2023年张家口市市级科技计划财政资助项目(2311007A)

作者简介: 刘晶磊(1981—),男,教授,博士,主要从事土的动力特性及高速铁路路基隔振研究。E-mail: kingbest_1118@163.com

0 引言

2008年以来,我国高速铁路进入了快速发展时期,随着行车数量和行车时间的增加,高速铁路产生的振动问题日益突出。这种振动不仅会危害周边建筑的安全性,还会危害沿线居民的生理健康^[1]。为了减少这种不利影响,可选择在地基中设置屏障来隔振。

根据屏障类型可分为连续性屏障和非连续性屏障,非连续性屏障排桩具有诸多难以替代的隔振优点,因此在隔振工程中备受好评^[2]。学者 KATTIS 等^[3]引入理论公式研究排桩隔振,研究得到排桩的桩间距对隔振效果影响较显著的结论。刘晶磊等^[4]采用室内模型试验,以加速度级数为评估基准,对多个具有代表性的连续隔振屏障进行了室内模拟试验,并对其隔振效果进行了分析。陈青生等^[5]采用有限元方法,对不同工况下的多种新型空槽进行了数值模拟,发现随着空槽排列数量的增多,各断面形式的空槽隔振性能均有所提高。COULIER 等^[6]通过实测研究灌浆柱对隔振效果的影响情况,结果为灌浆柱的隔振效果随着振动频率的增大而变好。刘晶磊等^[7]通过室外试验对排桩隔振进行研究,研究得到桩长的增加利于隔振效果的提升。AI 等^[8]以数值分析和有限元相结合的方法分析排桩隔振,分析得到排桩在软土地基中隔振效果好,桩间距的变化对隔振效果影响显著。王通等^[9]对不同形式的隔振屏障进行了分析,得出了在所有的隔振措施中,空槽的隔振效果最佳,而砂土填塞的隔振效果最差。

除了按照隔振屏障的连续性来划分之外,还可以按照隔振屏障与振源之间的距离来划分,即离振源远的为远场被动隔振,离振源近的为近场主动隔振^[10]。在主动隔振研究方面,GAO 等^[11]通过数值分析和试验研究波阻板的主动隔振,研究表明:波阻板在降低地面振动方面有良好的性能,减小波阻板的埋深是提高隔振效果比较有效的措施。GAO 等^[12]通过试验对波阻板填充阻尼材料的主动隔振展开研究,研究结果表明:波阻板填充阻尼材料后有良好的隔振效果,其隔振效果优于传统波阻板。宋永山等^[13]通过构建“高速铁路-准饱和地基-波阻板(WIBs)”(WIBs)隔振模型,分析了在高速铁路运动荷载下,不同饱和度对准饱和地基中波阻板隔振特性的影响。王滢等^[14]根据饱和地基 2.5D 有限元理论,建立轨道-地基-屏障-建筑结构模型,计算分析后得出填充沟和矩形管波阻板不论列车运行速度高低都有较好的隔振作用。

以上学者集中于对排桩被动隔振、波阻板主动隔振等相关研究,主要是从试验、理论公式以及有限元数值计算等方法入手,对采用有限元法研究地基中设置混凝土排桩的主动隔振研究较少。对此,本文基于多物理场仿真有限元软件 COMSOL 建立轨道-路基-地基三维有限元模型,开展在列车荷载作用下混凝土排桩的近场主动隔振研究,为在排桩主动隔振提供了一定的参考。

1 有限元模型有效性验证

1.1 试验测试

为验证有限元模型计算隔振效果的有效性,进行室外试验。试验场地长、宽、深分别为 4、4、2 m,场地远离铁路、公路和工厂等。

试验场地的土是均匀的砂性土,在进行试验的时候,将砂土的含水率控制在 12%到 13%之间,密度在 $1.70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 和 $1.80 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ^[15]之间。所使用的仪器是由控制系统、激振器和传感器等构成的 WS-Z30 型振台控制系统。部分仪表的示意图如图 1(a)所示,其中,激励装置作为振动源使用,而传感器则是用于测量垂直于地面的加速度。

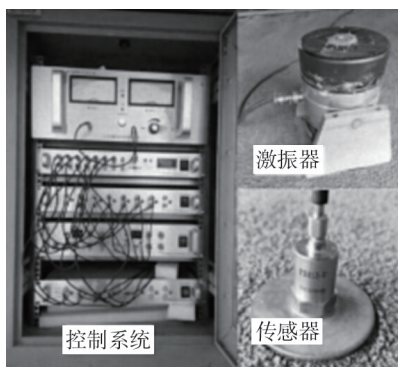
测试用的混凝土桩的强度是 C30,在进行测试的时候,排桩的布桩示意图和具体尺寸大小如图 1(b)所示,使用 9 根 70 cm 的桩,横截面边长为 10 cm 的正方形桩,桩间距为 20 cm,振源频率 40 Hz,采样频率为 5000 次/s,采样时间为 3 s。激振器与传感器的布置细节,如图 1(c)所示。在试验中,采用了 6 个加速度控制点,它们等间隔地设置在一条轴线上,激振器的中心和第一个控制点之间的距离是 30 cm,其他的控制点间隔是 10 cm,所以最远的控制点距振源的距离是 80 cm。

1.2 隔振效果评价指标

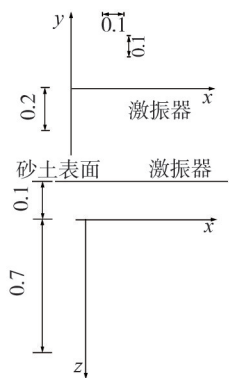
以振幅降低比 A_r 来评价隔振效果优劣,相应的 A_r 的表达式为

$$A_r = a_1 / a_0 \quad (1)$$

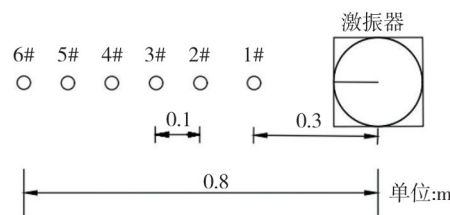
式中: a_1 为设置排桩后的加速度幅值; a_0 为未设置排桩的加速度幅值。显然, A_r 值较小,隔振效果较理想。



(a) 部分仪器



(b) 排桩示意图



(c) 传感器布置示意图

图1 试验布置图

Fig.1 Test layout

1.3 有限元计算

在有限元 COMSOL 中,建立与试验场地 1:1 的有限元模型。在用有限元研究振动问题时,往往通过设置边界条件的方式来消除有限元边界对振动波的回弹影响,常见的边界条件有黏弹性边界和无限元边界等^[16],本文采用无限元边界,无限元边界的设定尺寸为 1 m,如图 2 所示,有限元模型所用的材料参数如表 1 所示。

周凤玺等^[17]在用有限元方法研究隔振时,所加荷载幅值为 1 kN 的简谐荷载,对此,本文所加荷载如式(2)、式(3)所示:

$$F(\omega) = P_0 e^{i\omega t} \tag{2}$$

$$\omega = 2\pi f \tag{3}$$

式中: P_0 为荷载幅值,取 1 kN; i 为虚数单位; f 为振动频率。

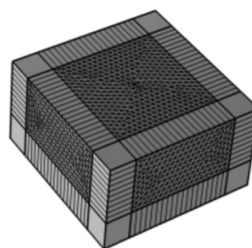


图2 有限元模型示意

Fig.2 Schematic diagram of finite element model

表1 模型材料参数

Table 1 Model material parameters

类型	密度/(kg/m ³)	弹性模量/(×10 ⁷ Pa)	泊松比
土体	1900	2.00	0.3
桩	2200	2.00	0.2

1.4 试验与有限元结果对比

频率 f 为 10 Hz 试验测试结果与有限元计算结果所得的 A_r 值的对比图,如图 3 所示。由图可知,在 0.4 m 处,有限元和试验所得的 A_r 值均最小,然后随着与振源距离的增加,有限元和试验所得 A_r 值都在增大。在 0.8 m 处,有限元和试验所得 A_r 值达到峰值,试验所得 A_r 值高于有限元得到的 A_r 值,二者都趋近于 1,且都小于 1。可见,二者变化趋势与规律是一致的,试验所得 A_r 值一直高于有限元所得 A_r 值,且二者的差值并不大,比较结果未超过 10%,误差可以接受。由此可得,有限元模型的计算结果能反映真实的隔振效果变化规律,有限元 COMSOL 的有效性得到证实。

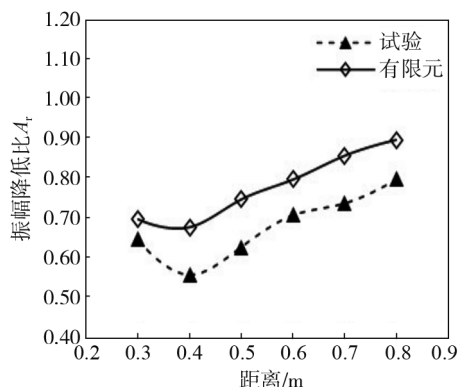


图3 结果对比曲线

Fig.3 Comparison curves of results

2 有限元实际尺寸模型的建立

2.1 有限元模型尺寸的设定

轨道和路基参考 TB 10621—2014《高速铁路设计规范》^[18],相应的横断面示意图如图 4(a)所示。其中 B 为轨道轨距,高铁中轨距 B 取 1.435 m。本文所用的多物理场仿真有限元软件 COMSOL,具有高效的非线性微分求解能力和多场耦合分析能力,有较完善的理论基础,同时兼具功能性、灵活性于一体,该软件广泛应用于土木工程各研究领域。该软件拥有强大的网格划分能力,网格划分完全可以根据实际不同的需求进行标准、细化、特细化等,当然,该软件还支持自主划分网格,极大的保证了计算精度的要求。在软件计算完后,研究者可借助软件自身强大的后处理功能进行数据分析与数据提取等,同时还可以绘制需要的一维、二维以及三维图等,对于研究者来说,极大地方便了对数据的处理与进一步分析。

三维模型中有限元部分使用四面体网格,无限元部分使用扫掠网格。用有限元方法进行数值计算时,有限元中网格划分的大小对计算精度往往有显著影响,考虑到实际地基是无限大的情况,将有限元模型四周取 5 m,设定为无限元边界,以此来消除有限边界振动波回弹对隔振研究的不利影响,相应的三维模型如图 4(b)所示。

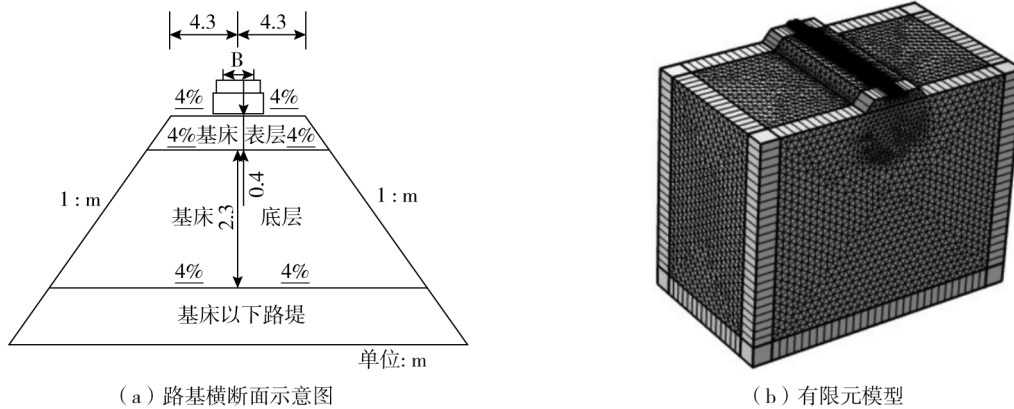


图 4 部分模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of part of the model

2.2 有限元模型材料参数

本文采用线弹性对有限元进行分析,所用阻尼为瑞利阻尼,材料的阻尼设定参考文献[19],具体如表 2 所示。其他相关的材料参数参考文献[20],其他材料具体参数如表 3 所示。

表 2 材料阻尼设定

Table 2 Setting of material damping

模型设置材料	质量阻尼系数 α	刚度阻尼系数 β
地基土	0.406	0.072
混凝土排桩	0.112	0.020

表 3 材料计算参数

Table 3 Material calculation parameters

类型	密度/(kg/m^3)	弹性模量/Pa	泊松比
基床表层	2000	1.8×10^8	0.250
基床底层	1950	1.1×10^8	0.250
桩基床底层下部土体	1800	2.0×10^7	0.350
轨道板	2500	3.5×10^{10}	0.167
钢轨	7800	2.0×10^{11}	0.300
底座(支承层)	2500	2.7×10^{10}	0.167
路堤	1950	6.0×10^7	0.250
桩	2200	2.2×10^{10}	0.200

2.3 列车荷载及荷载施加

列车作用在轨道上的荷载包括列车的自重荷载和列车行驶时产生的振动荷载,而不平顺是导致车辆-轨道耦合系统产生的根源。通常来说,轨道不平顺可大致分为高低、方向、水平和轨距等类型的平顺,相应的列车荷载的时程曲线可通过计算得到。列车荷载的表示方式可分为定点激励和定向激励,定点激励就是将扣件支点处的作用力作为列车荷载,定向激励就是轮轨之间的直接作用力,定点激励能方便地施加在有限元模型上^[21]。本文采用定点激励方式施加荷载,所加荷载为根据车辆-轨道耦合系统^[22]计算荷载,相应的左侧轨道加载的部分时程曲线如图5(a)所示,右侧轨道加载的部分时程曲线如图5(b)所示。

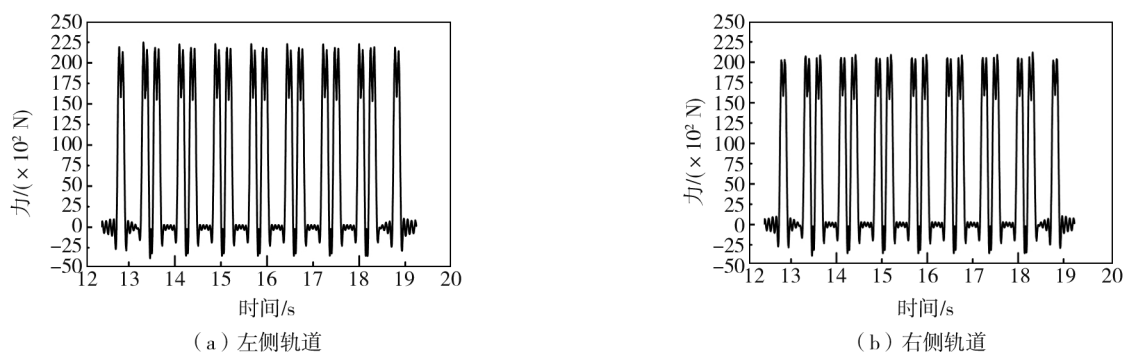


图5 轨道荷载时程曲线

Fig. 5 Time history curves of the track load

2.4 参数定义

高广运等^[23]在分析波阻板的主动隔振时,将参数取为轨道宽的倍数,本文将各参数进行处理。

1) 桩长参数 L

$$L = l / B \quad (4)$$

式中: l 为桩的长度; B 为轨道轨距。

2) 埋深参数 H

$$H = h / B \quad (5)$$

式中: h 为桩的埋深; B 为轨道轨距。

3) 桩间距参数 D

$$D = d / B \quad (6)$$

式中: d 为桩的间距; B 为轨道轨距。

4) 排间距参数 S

$$S = s / B \quad (7)$$

式中: s 为桩的排间距; B 为轨道轨距。

2.5 边界条件的设定

目前,有限元研究中对边界条件的处理有多种方法,常用的方法有黏弹性边界、完美匹配层和无限元等,黏弹性边界和完美匹配层为吸收振动波的边界条件,考虑到实际地基是无限大的情况,无限元边界更符合振动在地基中向无限远处传播的特性^[24-25],对此,本文采用无限元边界条件来消除振动波回弹对结果的不利影响。

3 排桩各因素对主动隔振的影响

3.1 桩长对隔振效果的影响分析

为了探究在路基以下的地基中布置的混凝土排桩,对铁路沿线近场主动隔振的具体影响,做了排桩布置,如图6所示。图中 n 为省略的排桩数, d 为桩间距, s 为排间距, h 为埋深,即排桩到路堤的距离, l 为桩长,考虑到整个模型具有对称性,分析时只需选择任意一侧即可。

在研究桩长对隔振效果影响时,取排间距 $s = 2.5$ m,桩间距 $d = 3.0$ m;埋深 $h = 1.0$ m;桩长 l 设定为5.0、10.0、15.0、20.0 m,相应的具体参数变化如表4所示。

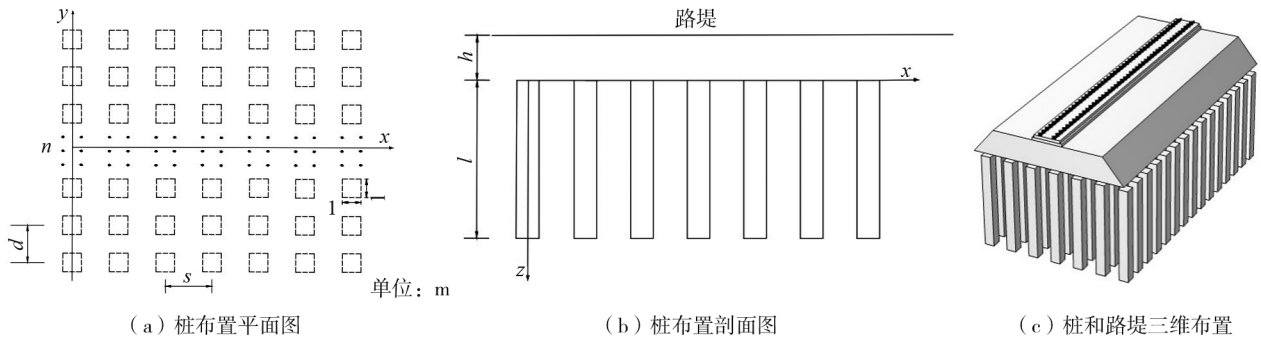


图 6 排桩布置示意图

Fig.6 Schematic diagram of row pile layout

距路基边坡处 2 m,沿轨道方向 15 m 处的加速度时程曲线,如图 7(a)所示。距路基边坡处 20 m,沿轨道中心 15 m 处的加速度时程曲线如图 7(b)所示。图 7(c)是图 7(a)经过傅立叶变化的加速度频谱,图 7(d)为图 7(b)所对应的加速度频谱。

由图 7(a)和(b)可知,随着桩长参数的增加,测试点加速度随之衰减,排桩隔振效果得到提升,可见,排桩的桩长参数的变化会影响整个排桩的隔振效果,设置一个较为合理的桩长参数利于测试点振动的降低。

由图 7(c)和(d)可知,从加速度频谱的角度来看,频谱峰值主要集中在 1~9 Hz 之间,峰值的最大值在 3.5~4.0 Hz 之间,9~30 Hz 之间频谱浮动趋于平缓。排桩参数的增加有降低频谱峰值的作用,整体来看,设置合理的桩长参数对 1~9 Hz 振动有显著的降低。由此可得,合理设置混凝土排桩参数,对列车引发的 1~9 Hz 的振动有好的隔振效果。

表 4 桩长参数

Table 4 Pile length parameters

工况	S	D	H	L
无隔振	—	—	—	—
工况 1	1.7	2.1	0.70	3.5
工况 2	1.7	2.1	0.70	7.0
工况 3	1.7	2.1	0.70	10.5
工况 4	1.7	2.1	0.70	13.9

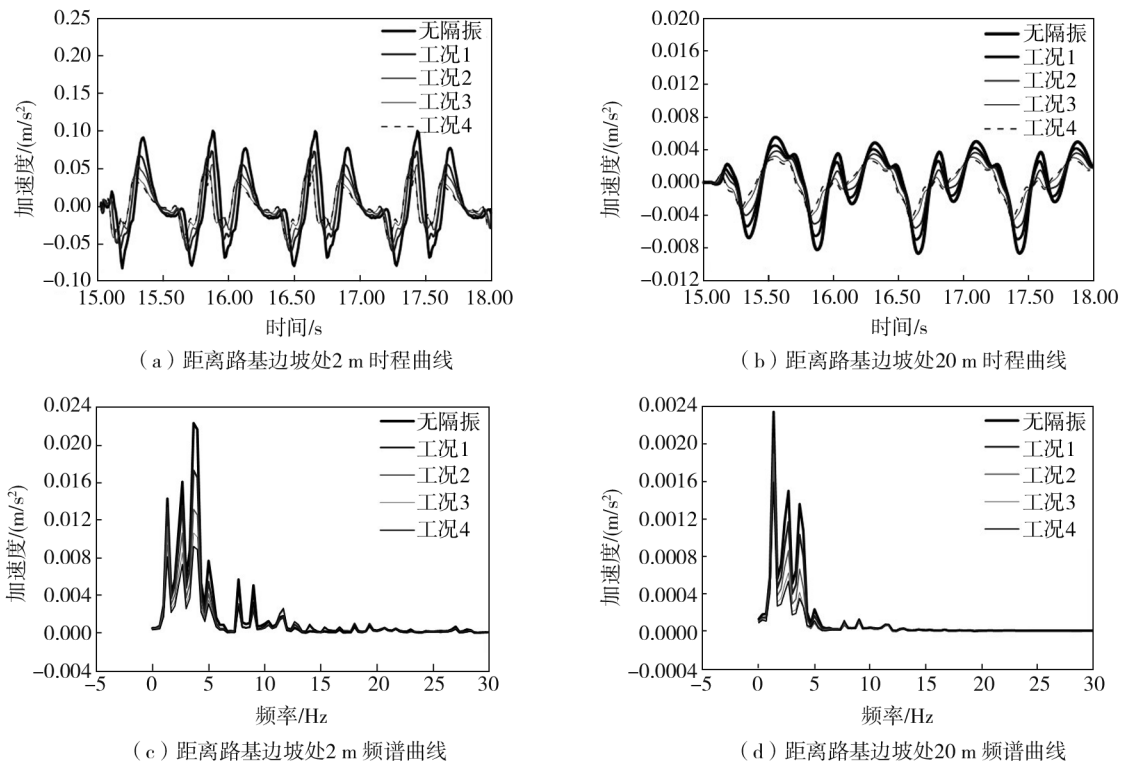


图 7 加速度结果对比曲线

Fig.7 Comparison curves of acceleration results

无隔振和工况 1~工况 4 加速度峰值随距离变化的曲线如图 8(a)所示,工况 1~工况 4 的 A_1 值变化曲线如图 8(b)所示。

由图 8(a)可知,无隔振和设置屏障隔振的加速度峰值随着到轨道中心距离的增加,均是逐渐减小,可以发现:距离轨道中心 2~10 m 衰减较快,10~20 m 衰减较缓,可见,即使在无隔振情况下,随着距离的增加振动会自然衰减,但排桩的设置会使得加速度峰值在振动开始处骤减,桩长参数的增加,会使得这种衰减幅度进一步加大,这对于整个铁路沿线的振动衰减具有极大的益处。

由图 8(b)可知,桩长参数 L 变化对整个铁路沿线的隔振效果影响显著。随着桩长参数 L 的变大,整个铁路沿线的隔振效果均增加。桩长参数 L 由 3.5 增加到 10.5 时,整个铁路沿线隔振效果提升较多;桩长参数 L 为 10.5 时,隔振效果在 54%~40%之间;之后继续增加桩长参数 L 到 13.9,整个铁路沿线的隔振效果提升不是很多。

分析其原因,振动波的能量主要集中在地基的一定深度内,桩长参数的增加会使得排桩对振动波的阻隔作用增强,但当桩长参数达到一定深度后,继续增加桩长参数,其阻隔作用提升不是很多,进而出现图中现象。在工程隔振中,设置较长的桩长意味着工程成本的增加,对此,建议根据工程实际的需要,设置合理的桩长。

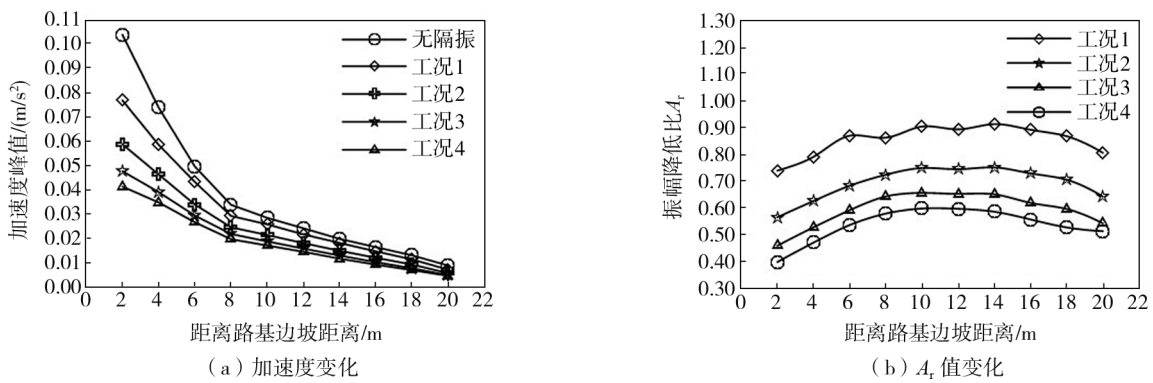


图 8 桩长对隔振效果的影响

Fig. 8 Influence of pile length on vibration isolation effect

3.2 桩间距对隔振效果的影响分析

为了探究桩间距变化对隔振效果的影响规律,取排间距 $s=2.5$ m,桩长 $l=10.0$ m,埋深 $h=1.0$ m,桩间距 d 设定为 2.0、3.0、4.0、5.0 m,具体参数变化如表 5 所示。

表 5 桩间距参数
Table 5 Pile spacing parameters

工况	排间距	桩长	埋深	桩间距
无隔振	—	—	—	—
工况 5	1.7	7.0	0.7	1.4
工况 6	1.7	7.0	0.7	2.1
工况 7	1.7	7.0	0.7	2.8
工况 8	1.7	7.0	0.7	3.5

加速度峰值随距离变化的曲线如图 9(a)所示。由图 9(a)可知,随着桩间距参数的变化,铁路沿线加速度值是变化的,但变化的数值幅度不是很大,对此,进一步分析桩间距参数变化对 A_r 值的影响规律,具体变化如图 9(b)所示。

由图 9(b)可知,隔振效果变化规律明显,主要表现在桩间距参数 $D=1.4$ 时,铁路沿线隔振效果较好,之后随着桩间距参数 D 的继续变大,整个铁路沿线的隔振效果随之变差。分析其原因,桩间距参数的增加会使得在相同面积情况下,排桩的桩数减小,进而对振动波的阻隔减弱,然后出现了图中现象。由此可得,紧密布置的排桩要比稀疏布置排桩的隔振效果要好,在工程隔振中,建议适当减小排桩之间的桩间距,以此获得理想的隔振效果。

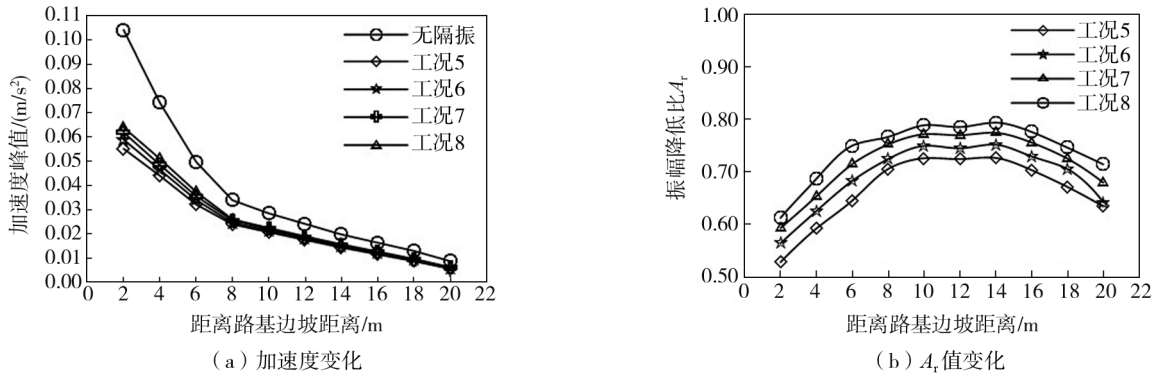


图 9 桩间距对隔振效果影响

Fig. 9 Influence of pile spacing on vibration isolation effect

3.3 埋深对隔振效果的影响分析

为了探究埋深对隔振效果的具体影响,取排间距 $s = 2.5 \text{ m}$, 桩长 $l = 10.0 \text{ m}$, 桩间距 $d = 3.0 \text{ m}$, 埋深 H 设定为 1.0、3.0、5.0、7.0 m, 具体参数变化如表 6 所示。

加速度峰值随距离变化的曲线如图 10(a) 所示。在工况 9 ~ 工况 12 中 A_r 值随距离变化的曲线, 如图 10(a) 所示。

由图 10(a) 可知, 随着埋深参数 H 的增加, 整个铁路沿线的加速度峰值是增大的, 且越来越接近无隔振时加速度峰值, 埋深参数 H 的增加对于铁路沿线的振动降低是极为不利。

由图 10(b) 可知, 埋深参数变化对隔振效果影响较显著, 随着埋深参数 H 的增加, 其排桩的隔振效果越不理想。当埋深参数为 0.7 时, 排桩对整个铁路沿线的隔振效果较好, 当埋深参数 H 为 3.5 时, 隔振效果已经很不理想, 部分铁路沿线地方已几乎丧失了隔振效果, 继续增加埋深参数, 排桩对沿线隔振效果迅速下降。

分析其原因, 排桩埋深参数的增加, 会使得部分的振动波未经阻隔直接从排桩上方穿过屏障, 当排桩埋深参数达到一定深度后, 会使得排桩对整个铁路沿线的隔振效果丧失。由此可得, 埋深参数 H 的增加对隔振效果的提升是极不利的, 工程隔振中, 应当避免埋深参数 H 增加对隔振效果产生的不利影响, 建议根据工程隔振实际设置较小的埋深, 以获得比较理想的隔振效果。

表 6 埋深参数明细

Table 6 Buried depth parameters

工况	S	L	D	H
无隔振	—	—	—	—
工况 9	1.7	7.0	2.1	0.7
工况 10	1.7	7.0	2.1	2.1
工况 11	1.7	7.0	2.1	3.5
工况 12	1.7	7.0	2.1	4.9

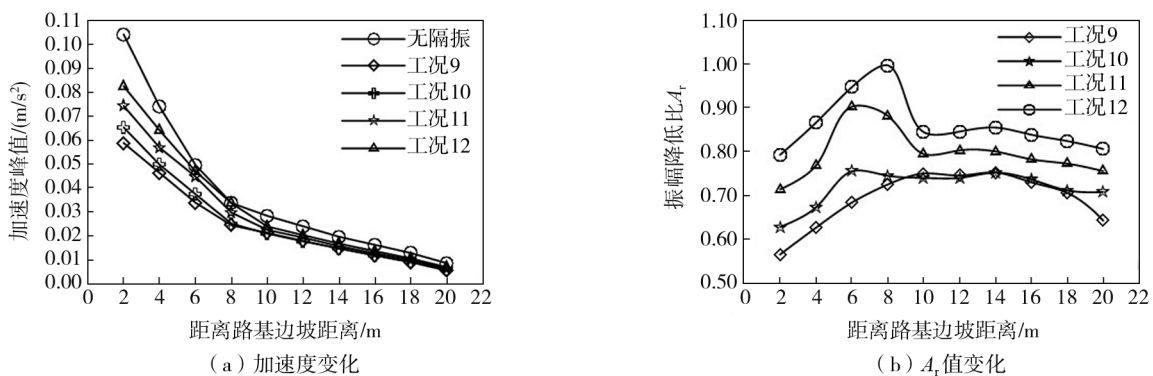


图 10 埋深对隔振效果影响

Fig. 10 Influence of buried depth on vibration isolation effect

4 结论

本文通过有限元数值分析方法建立轨道-路基-地基三维有限元模型, 将模型四周设定为无限元边界, 以振幅降低比作为隔振效果评价指标, 在列车荷载作用下, 对混凝土排桩桩长、桩间距和埋深对主动隔振的影响进行了详细的分析。得出以下结论:

- 1) 合理设置混凝土排桩参数,可较好地解决列车引起的振动问题,可对1~9 Hz的振动有很好的隔振效果。
- 2) 混凝土排桩桩长参数 L 对隔振效果影响显著,参数越大,隔振效果越理想,当桩长参数 L 为10.5,继续增加比值隔振效果提升不显著。
- 3) 桩间距参数 D 对隔振效果存在影响,桩间距参数 D 越大,隔振效果越不理想,较小的桩间距可以获得理想的隔振效果。
- 4) 埋深参数对隔振效果影响显著,随着埋深参数 H 越大,隔振效果越不理想,当埋深参数 H 为3.5时,隔振效果已经很不理想,较浅的埋深可以获得比较理想的隔振效果。

参考文献:

- [1] 章皖凯. 高速列车运行诱发的轨道—路基—地基结构振动及隔振技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
ZHANG Wankai. Vibration of track-subgrade-foundation structure induced by high-speed railway and isolation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese)
- [2] 刘晶磊, 刘桓, 刘鹏泉, 等. 铁路振动作用下双排桩屏障隔振性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(11): 184-190.
LIU Jinglei, LIU Huan, LIU Pengquan, et al. Experimental study on vibration isolation performance of double row pile barrier under railway vibration[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(11): 184-190. (in Chinese)
- [3] KATTIS S E, POLYZOS D, BESKOS D E. Vibration isolation by a row of piles using a 3-D frequency domain BEM[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 46(5): 713-728.
- [4] 刘晶磊, 张瑞恒, 赵晓玉, 等. 轨道交通典型隔振屏障隔振效果模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(1): 231-241.
LIU Jinglei, ZHANG Ruiheng, ZHAO Xiaoyu, et al. The research on the model test on vibration isolation effect of typical vibration isolation bar in rail transit[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(1): 231-241. (in Chinese)
- [5] 陈青生, 郭冬冬, 李杨, 等. 不同排数新型空沟屏障隔振效果研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(2): 65-75.
CHEN Qingsheng, GUO Dongdong, LI Yang, et al. Vibration isolation efficiency of new open trenches with different cross-sectional shapes and different rows number[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(2): 65-75. (in Chinese)
- [6] COULIER P, CUÉLLAR V, DEGRANDE G, et al. Experimental and numerical evaluation of the effectiveness of a stiff wave barrier in the soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 77: 238-253.
- [7] 刘晶磊, 刘航, 薛晓峰, 等. 均质介质中排桩对瑞利波的阻隔试验分析[J]. 地震工程学报, 2020, 42(6): 1579-1589.
LIU Jinglei, LIU Hang, XUE Xiaofeng, et al. Test on the dilution effect on the Rayleigh wave of row piles in homogeneous medium[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1579-1589. (in Chinese)
- [8] AI Z Y, CAO Z. Vibration isolation of row of piles embedded in transverse isotropic multi-layered soils[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 99: 115-129.
- [9] 王通, 刘先峰, 郑立宁, 等. 城市地铁典型隔振措施隔振效果的模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(5): 119-126.
WANG Tong, LIU Xianfeng, ZHENG Lining, et al. Research on the model test on vibration isolation effect of typical vibration isolation measures in urban subway[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(5): 119-126. (in Chinese)
- [10] 刘晶磊, 梅名彰, 王洋, 等. 混凝土排桩主动隔振研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1): 87-94.
LIU Jinglei, MEI Mingzhang, WANG Yang, et al. Research on active vibration isolation of concrete rows[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(1): 87-94. (in Chinese)
- [11] GAO G Y, ZHANG Q W, CHEN J, et al. Field experiments and numerical analysis on the ground vibration isolation of wave impeding block under horizontal and rocking coupled excitations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 507-512.
- [12] GAO M, TIAN S P, WANG Y, et al. Isolation of ground vibration induced by high speed railway by DXWIB: Field investigation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 131: 106039.
- [13] 宋永山, 高盟, 陈青生. 列车荷载作用下准饱和地基波阻板隔振特性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(2): 252-263.
SONG Yongshan, GAO Meng, CHEN Qingsheng. Study on the isolation performance of WIB on nearly-saturated ground under moving load[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(2): 252-263. (in Chinese)
- [14] 王滢, 赵彩清, 高盟, 等. 矩形管波阻板对饱和地基中列车振动的隔振性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(1): 229-238.
WANG Ying, ZHAO Caiqing, GAO Meng, et al. Isolation effect of rectangular hollow wave impeding block against train-induced vibrations in a saturated ground[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(1): 229-238. (in Chinese)
- [15] LIU J L, YU C Q, LI K, et al. Test on the influence of geometric parameters of an annular trench on the vibration isolation area[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 7801085.
- [16] 欧阳浩然. 城轨列车运行引起的沿线地面环境振动分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
OUYANG Haoran. Vibration responses of ground environment along urban rail[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020. (in Chinese)
- [17] 周凤玺, 马强, 周志雄. 二维地基中空沟-波阻板联合隔振屏障分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 4087-4092, 4115.
ZHOU Fengxi, MA Qiang, ZHOU Zhixiong. 2D analysis of vibration-isolation efficiency of an open trench-wave impedance block barrier[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 4087-4092, 4115. (in Chinese)

- [18] TB 10621—2014 高速铁路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
TB 10621—2014 Code for design of high speed railway[S]. Beijing: China Railway Press, 2014. (in Chinese)
- [19] 刘晶磊, 张瑞恒, 冯桂帅, 等. 高速铁路混凝土排桩减隔振效果研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 302-309.
LIU Jinglei, ZHANG Ruiheng, FENG Guishuai, et al. The research on the vibration isolation effect about concrete pile in high speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(2): 302-309. (in Chinese)
- [20] 张瑞恒. 轨道交通非连续隔振屏障效果及优化分析研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2019.
ZHANG Ruiheng. The research on the effect and optimization of discontinuous vibration isolation barrier for rail transit[D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2019. (in Chinese)
- [21] 邱宏亮. 轨道交通引起的结构振动分析及其规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
QIU Hongliang. Numerical evaluation of train-induced structural vibration and propagation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [22] 翟婉明. 车辆-轨道垂向系统的统一模型及其耦合动力学原理[J]. 铁道学报, 1992, 14(3): 10-21.
ZHAI Wanming. The vertical model of vehicle-track system and its coupling dynamics[J]. Journal of the China Railway Society, 1992, 14(3): 10-21. (in Chinese)
- [23] 高广运, 陈功奇, 张博. 列车荷载下竖向非均匀地基波阻板主动隔振分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 57-62.
GAO Guangyun, CHEN Gongqi, ZHANG Bo. Active vibration isolation using WIB in non-uniform ground under train loadings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22): 57-62. (in Chinese)
- [24] 李述涛, 刘晶波, 宝鑫, 等. 采用粘弹性人工边界单元时显式算法稳定性分析[J]. 工程力学, 2020, 37(11): 1-11, 46.
LI Shutao, LIU Jingbo, BAO Xin, et al. Stability analysis of explicit algorithms with viscoelastic artificial boundary elements[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(11): 1-11, 46. (in Chinese)
- [25] ZHOU F X, MA Q, GAO B B. Efficient unsplit perfectly matched layers for finite-element time-domain modeling of elastodynamics[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 142(11): 04016081.