

刘尊景, 周奇辉, 孙苗苗, 等. 类矩形地铁盾构隧道运营时的隔振性能分析[J]. 华南地震, 2022, 42(3): 78–84. [LIU Zunjing, ZHOU Qihui, SUN Miaomiao, et al. Analysis of Vibration Isolation Performance of Quasi-rectangular Metro Shield Tunnel in Operation[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(3): 78–84]

## 类矩形地铁盾构隧道运营时的隔振性能分析

刘尊景<sup>1,4</sup>, 周奇辉<sup>1</sup>, 孙苗苗<sup>2,5</sup>, 丁智<sup>2,5</sup>, 黄灿<sup>2</sup>, 黄涨功<sup>3</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122; 2. 浙大城市学院工程学院, 杭州 310015;  
3. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058; 4. 浙江省智慧交通工程技术研究中心, 杭州 311122;  
5. 浙江省城市盾构隧道安全建造与智能养护重点实验室, 杭州 310015.)

**摘要:** 为了研究类矩形盾构隧道运营时的隔振设施的性能和效果, 将以2.5维有限元方法设置隔振桩和隔振沟两种隔振措施的模型比较分析在运营时空沟、填充沟、长短桩、刚柔桩以及复合屏障等措施对类矩形盾构隧道的隔振效果。研究表明: 采用长短桩进行隔振时, 增加短桩的长度可增加隔振效果; 刚柔桩的隔振效果较好, 可在振动强度最大处进行减振; 使用空沟+桩应尽量设置在被保护建筑物前; 填充沟+桩的新型复合隔振措施对地基整体均有隔振效果, 隔振效果最佳位置位于沟中心处。研究结果可为今后类矩形盾构隧道运营的隔振措施设计进行参考。

**关键词:** 2.5有限元法; 类矩形盾构隧道; 隔振桩; 隔振沟; 材料

**中图分类号:** U455.43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-8662(2022)03-0078-07

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2022.03.10

## Analysis of Vibration Isolation Performance of Quasi-rectangular Metro Shield Tunnel in Operation

LIU Zunjing<sup>1</sup>, ZHOU Qihui<sup>1</sup>, SUN Miaomiao<sup>2</sup>, DING Zhi<sup>2</sup>,  
HUANG Can<sup>2</sup>, HUANG Zhanggong<sup>3</sup>

(1. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China; 2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. Engineering Research Center of Smart Rail Transportation, Hangzhou 311122, China; 5. Key Laboratory for Safe Construction and Intelligent Maintenance of Shield Tunnels in Key Cities of Zhejiang Province, Hangzhou 310015, China)

**Abstract:** In order to study the performance and effect of vibration isolation facilities during the operation of rectangular shield tunnels, this paper compares the vibration isolation effects of two kinds of vibration isolation measures of vibration isolation pile and vibration isolation ditch set up by 2.5-dimensional finite element method in the operation of space-time trenches, filled ditches, long and short piles, rigid and flexible piles and composite barriers. The results show that when the long and short piles are used for vibration isolation, increasing the length

**收稿日期:** 2022-05-10

**基金项目:** 浙江省重点研发计划项目(2020C01102)

**作者简介:** 刘尊景(1986-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事岩土与隧道工程设计、地铁保护和隧道修复加固相关工作。

**E-mail:** liu\_zj@hdec.com

**通信作者:** 孙苗苗(1984-), 女, 博士, 副教授, 主要从事轨道交通隔振和土动力学的研究。

**E-mail:** sunmm@zucc.edu.cn

of the short piles can increase the vibration isolation effect; the rigid-flex pile has a better vibration isolation effect, and it can be set at the place where the vibration intensity is greatest; the use of empty trenches + piles should be placed in front of the protected building as far as possible; the new composite vibration isolation measure of filling trench + pile has an isolation effect on the whole foundation, and the best position of vibration isolation effect is located in the center of the ditch. The research results can be used as a reference for the design of vibration isolation measures for future operation of rectangular shield tunnels.

**Keywords:** 2.5 finite element method; Quasi-rectangular shield tunnel; Vibration isolation piles; Vibration isolate ditch; Materials

## 0 引言

随着城市现代化进程的加快,越来越多的地下资源被利用,城市的地下空间逐渐形成了复杂的轨道交通网络,列车在其间行驶时,将对地基产生巨大压力。为了保证地基的稳定性及安全性,列车运行的隔振措施变得尤为重要。因此,对列车运行隔振措施的研究逐渐成为大量学者研究的热点。

传统的2维模型忽略其沿轨道方向的影响,导致计算结果极其不精确;而3维模型庞大的计算量,导致了其计算效率极低;但是2.5维模型既考虑了轨道方向的影响也减小了计算量,兼顾效率和精度。因此,2.5有限元法被应用于工程各个范围,且涉及领域较为广泛。丁智等<sup>[1]</sup>运用2.5维有限元法,在弹性土地基、饱和土地基两个不同方向,总结分析列车振动及隔振问题的应用思路。高广运等<sup>[2-6]</sup>利用2.5有限元法对高铁弹塑性地基振动与变形、高铁荷载下准饱和和分层地基环境振动特性、饱和地基列车运行引起的地面振动分别详细解析和研究。朱志辉等<sup>[7]</sup>以2.5维有限元法和虚拟激励法作为基础,对地铁交通场地随机振动特征进行研究。徐鑫宇<sup>[8]</sup>基于2.5维有限元分析理论与方法,系统地研究了冻土铁路路基在列车移动荷载作用下冻土中振动的传播规律。葛鹏彬<sup>[9]</sup>讨论了移动列车荷载引致半空间的稳态动力响应问题,并在此问题探讨基础上将2.5D理论解和数值解进行对比验证。Bian XC<sup>[10]</sup>在2.5有限元法的基础上研究出列车—轨道—地面动态相互作用的分析模型,用于预测垂直轨道不规则引起的地面振动。Yang YB等<sup>[11]</sup>对土隧道系统整体,运用2D和2.5D有限/无限元法对移动列车载荷的反应进行了对比探讨。

传统圆形盾构隧道地下空间、内部空间利用效率低;安全埋置深度深,穿越狭窄街区能力弱。而类矩形盾构隧道工法则相反,且对比于双圆盾构隧道在施工阶段容易控制背土、积浆和沉降等

问题类矩形盾构隧道工法具有很高的空间利用率,且施工扰动很小,所以类矩形盾构隧道工法成为目前国内研究的热点。柳献等<sup>[12-18]</sup>通过对类矩形盾构隧道结构极限承载力及其结构破坏原因,最终得出确切的类矩形盾构隧道结构设计参数。司金标<sup>[19]</sup>等根据现场实测地表变形、土体分层沉降数据并进行具体分析,进而得出了类矩形盾构隧道施工引起地层竖向变形的基本规律。张治国等<sup>[20]</sup>探讨了类矩形盾构隧道开挖引起邻近地下管线变形,并利用实测数据和数值模拟对土体变形进行了对比验证。黄亮等<sup>[21]</sup>建立类矩形盾构隧道纵向等效连续化模型,推导得到类矩形盾构隧道的等效抗弯刚度解析解。张啟乐<sup>[22]</sup>等分别建立类矩形盾构隧道和圆形隧道有限元模型,并对两种隧道结构的振动特性作了对比分析。

除了类矩形盾构的研究之外,很多学者已经取得了隔振措施研究的一些成果。Barbosa等<sup>[23]</sup>针对填充材料这一参数,研究其对于隔振沟隔振的效果影响。蔡袁强等<sup>[24]</sup>通过填充沟对地铁运营引起地基振动隔振效果研究,分析了填充沟对地基振动所产生的隔振效果。张捷<sup>[25]</sup>通过高速列车车内低噪声设计方法及试验研究,对车体结构的隔声和隔振优化进行了较为系统的研究。Cao ZG等<sup>[26]</sup>提出了一种用于地下铁路地面振动的计算高效的半分析解决方案,用于研究散射表面和移动地面地下水位水力边界条件对地面振动的影响。Feng SJ等<sup>[27]</sup>提出了一种三维半分析方法,用于研究具有软饱和层层的地面分层的动态响应。Shen Y等<sup>[28]</sup>研究了高速列车载荷引起的循环主应力旋转下软粘土亚等级的沉降规律。

上述对2.5维有限元的应用和隔振措施效果的研究都逐渐完善,然而针对类矩形盾构隧道的隔振措施分类研究尚少,并且少有将2.5维有限元方法应用到类矩形盾构隧道的研究中。而本文结合以上研究方法与研究方向,在2.5维有限元模型的基础上,针对列车运行时的振动问题,对不同隔

振措施进行了建模计算。其中有长短桩、刚柔桩、空沟+桩等四种隔振措施，并与无隔振措施进行比较。同时，综合考虑四种隔振措施参数，并分析其减振效果，希望能够找出隔振效果较好的措施为以后的实用工程提供一定的理论参考。

1 计算模型及参数设置

本节假设了隔振桩和隔振沟两种隔振措施模型：第一种模型见于图1，整体模型的尺寸选择32 m×100 m的模型，土、桩与混凝土均采用摩尔库伦本构模型，刚性地基建于下方。模型内采用地铁隧道的埋入深度为10 m，类矩形盾构隧道的组成结构大体为四段圆弧，上下两段圆弧外径 $R_1=18.6$  m，内径 $R_2=18.2$  m，左右两段圆弧外径 $R_3=3.05$  m，内径 $R_4=2.6$  m，衬砌采用厚度为0.45 m，中隔柱厚度为0.4 m，各需设置0.2的阻尼比于模型的两侧10 m内以减弱两侧边界反射波的干扰。类矩形地铁线路的两侧放置长短桩（刚柔桩），长桩取宽 $L=1$  m，深 $d=10$  m；短桩取宽 $L=1$  m，分别取 $d=2$  m、 $d=4$  m、 $d=6$  m、 $d=8$  m、 $d=10$  m的桩深用于对比。地表中心线和桩中心线相距15 m，表1和表2为隧道整体系统与地基参数、地铁列车尺寸及荷载参数的相关信息。本分析中都考虑同时运行两列列车的情况，选取20 m/s为本分析车速。

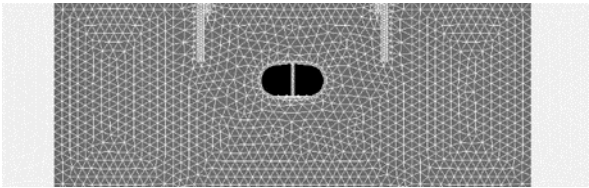


图1 设置长短桩的2.5维有限元模型  
Fig.1 The 2.5-dimensional finite element model  
of long and short piles

在图1的模型的基础上建立第二种计算模型，为隔振加入空沟(填充沟)于隔振桩旁，见图2。长短桩宽 $L=1$  m，深 $d=10$  m；空沟(填充沟)宽 $L=2$  m，分别取 $d=2$  m、 $d=4$  m、 $d=6$  m、 $d=8$  m、 $d=10$  m的沟深用于对比，桩中心线和地铁线路中心线相距14.5 m。填充沟的材料参数见表3。

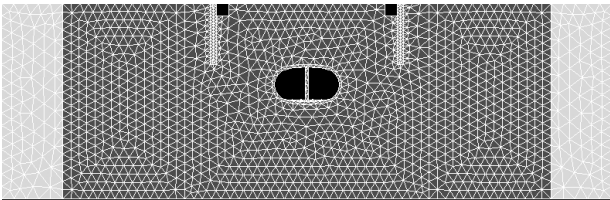


图2 设置空沟+桩的2.5维有限元模型  
Fig.2 The 2.5-dimensional finite element model  
of empty trenches+piles

表1 隧道系统与地基参数

Table 1 Tunnel system and foundation parameters

材料	剪切波速 $V_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 $\nu$	阻尼比 $\beta$
土层	80	1800	0.25	0.05
钢轨	3200	7830	0.30	0.01
衬砌	2500	2500	0.15	0.02

表2 地铁列车尺寸及荷载参数

Table 2 Dimensions and load parameters of subway train

拖车重量/ $t$	动车重量/ $t$	相邻两组轮对间距 $w_a/\text{m}$	第二组和第三组轮 对间距 $w_b/\text{m}$	机车长度 $L_e/\text{m}$	普通车厢长度 $L_c/\text{m}$
44.56	49.76	2.30	10.30	20.23	19.00

表3 填充沟混凝土参数

Table 3 Parameters of filled ditch concrete

材料	剪切波速 $V_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 $\nu$	阻尼比 $\beta$
混凝土	2500	2500	0.15	0.02



为了将加隔振措施状态与无隔振状态的两种地表振动强度用于对比,本文引入 Woods<sup>[29]</sup>提出的振幅衰减比  $A_R$  用于评论:

$$A_R = \frac{P_1}{P_2} \quad (1)$$

式(1)中,  $P_1$  为某一时刻于设立的隔振措施后方的计算点处地表位移振幅,  $P_2$  为相同时刻、相同位置其对应的无隔振时响应幅值。

## 2 列车隔振屏障种类

为了整体研究有桩、空沟、填充沟三种隔振措施的效果与无隔振措施的效果的不同地表振动强度的差别,将三种隔振措施的宽度均设置为 1 m,边界分别位于  $x=14.5$  m 和  $x=15.5$  m 处,桩体为柔性桩。由图 3 可见,在地表中心位置,四种不同状态的地表振动强度均出现最大值。填充沟和桩均在设立隔振措施之前表现出较强的隔振效果,而空沟在沟前时振动被其放大,在沟后隔振效果才表现出来,但也与无隔振措施的地表振动响应水准相差不多。

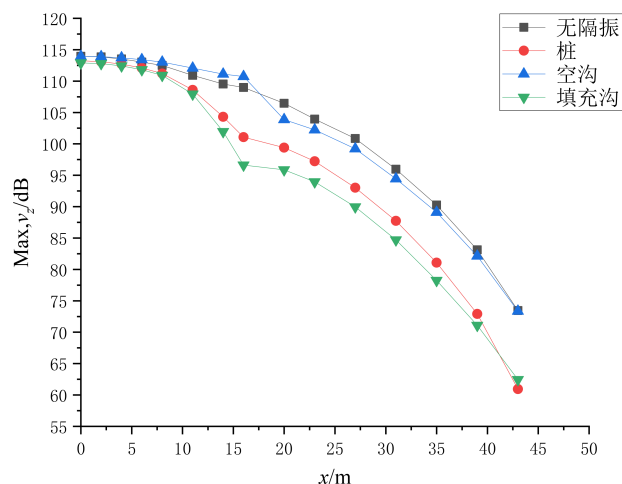


图3 不同隔振措施下的地表振动强度衰减曲线  
Fig.3 Attenuation curves of surface vibration intensity under different vibration isolation measures

图4为随着水平位置变化,柔性桩、空沟和填充沟三种隔振措施分别产生的隔振效果曲线。由图可得,设在沟前的空沟不仅对减振没有影响,甚至有振动放大现象,设在空沟后近处有一定的效果,却并不显著。因此,在使用空沟作为隔振措施时,应禁止在沟前施工建造建筑物。然而,桩和填沟的

整体  $A_R$  值均小于 1, 具有较强的隔振效果。同时,隔振措施越靠近中心,隔振效果越好。隔振效果在隔振措施中心 5 m 以内达到最佳。总体来说,空沟的隔振效果最差,填充沟的隔振效果最佳。从图 3、图 4 中能够得到,距离隔振措施中心位置越远隔振效果越差。然而,由于振动衰减引起的地基土的过滤效果,这个区域保持在安全范围内,振动造成的影响很小。因此,后文将不详细分析沟后远区的隔振效果。

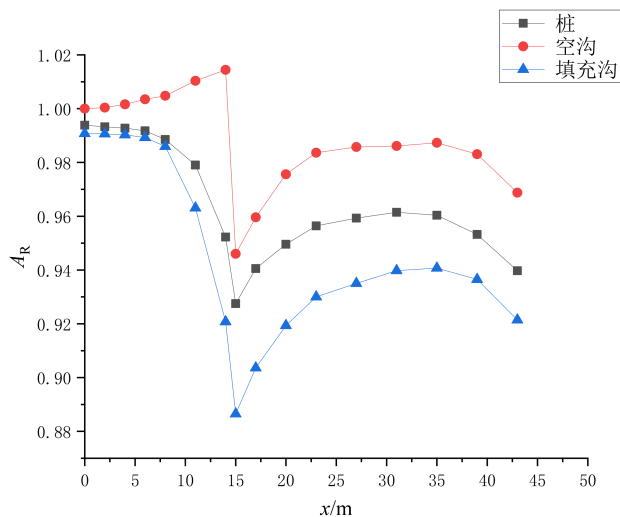


图4 三种隔振措施隔振效果(柔性桩)

Fig.4 Isolation effects of three vibration isolation measures (flexible pile)

## 3 隔振的参数化分析

### 3.1 长短桩深度影响

长短桩对隔振效果的影响见图 5, 选取了短桩深度分别为  $d=2$  m,  $d=4$  m,  $d=6$  m,  $d=8$  m,  $d=10$  m 五种情况,  $x=15$  m 处为桩中心线。据图 5 可见,随着桩长增加,长桩和短桩整体隔振效果增强。在桩前,振幅衰减比  $A_R$  随着水平距离的增加而减小,这取决于长短桩桩深的变化。长桩和短桩的中心位置可以更接近,达到隔振增强的效果。在中心位置,长桩和短桩的振幅衰减最强,而位于桩后,隔振效果较中心位置减弱。桩长度为  $d=10$  m 时可减弱原来振动强度的 23%, 桩后 15 m 以内是隔振效果较好的范围,而 15 m 后的范围隔振效果逐渐弱于 15 m 内的范围。振幅衰减比在桩后也几乎不大于 1, 隔振效果随着沟深度的增加而增强,因此可将适当增加长短桩的长度应用于工程实例中。

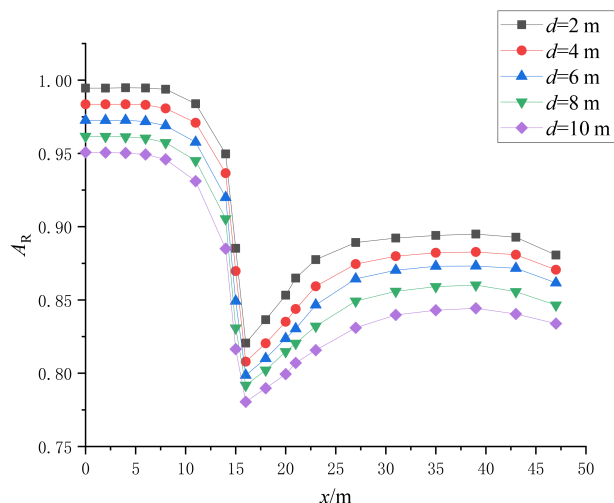


图5 长短桩长度对隔振效果的影响

Fig.5 Effect of length of long and short piles on vibration isolation

### 3.2 刚柔桩深度影响

本小节之所以选择柔性材料桩作为研究对象,是为了探究刚柔桩的减振效果。柔性材料桩的长度分别取  $d=2\text{ m}$ ,  $d=4\text{ m}$ ,  $d=6\text{ m}$ ,  $d=8\text{ m}$ ,  $d=10\text{ m}$  五种情况,  $x=15\text{ m}$  处为桩的中心位置。随水平位置变化,不同柔性桩桩长下刚柔桩隔振效果的状态可以从图6看出。从图6中可以看出,刚性桩和柔性桩的整体隔振效果伴随柔性桩长度的增加趋于较好,而且隔振效果随着距离刚柔桩中心位置越近而越好,刚柔桩中心位置振幅衰减最强,桩后的隔振效果逐渐减弱。桩的长度为  $d=10\text{ m}$  的隔振效果能够减弱原振动强度的28%,同时桩后的  $A_R$  也不超过1,伴随桩长度的增加,隔振效果逐渐变好,所以增加刚柔桩的深度能够对减振起到显著的改善作用。

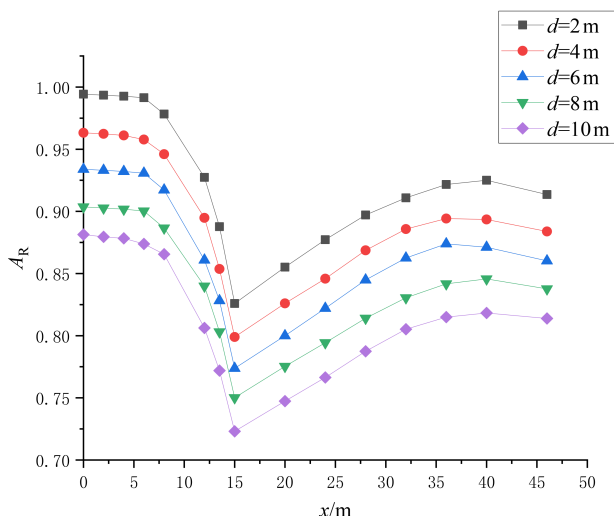


图6 刚柔桩长度对隔振效果的影响

Fig.6 Effect of rigid-flexible pile length on vibration isolation

### 3.3 空沟+桩深度影响

空沟+桩的隔振效果见图7,空沟沟深度设置为  $d=2\text{ m}$ ,  $d=4\text{ m}$ ,  $d=6\text{ m}$ ,  $d=8\text{ m}$ ,  $d=10\text{ m}$  五种情况,选取2 m为空沟宽度,选取侧面的桩径  $h=1\text{ m}$ ,  $x=14.5\text{ m}$  为中心线位置。由图7可知,在设置空沟前的情况下,  $A_R$  均比1大,并且  $A_R$  随水平方向距离的增加而变大,但存在振动放大情况;然而在沟后,  $A_R$  从大于1突然降至0.85左右,说明空沟前隔振效果并不显著,在空沟沟后则效果显著,甚至地表的隔振强度也得到增强。沟后约15m左右为隔振效果最佳处,尽管超过此范围后,隔振效果减弱,但  $A_R$  值并没有超过1,说明此时也可起到一定的减振效果。

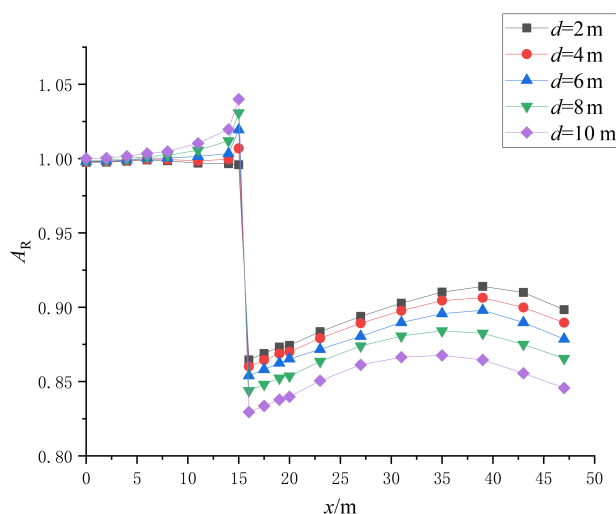


图7 空沟深度对隔振效果的影响

Fig.7 Effect of ditch depth on vibration isolation effect

### 3.4 填充沟+桩深度影响

为了探究填充沟+桩深度的影响,本节在  $L=2\text{ m}$  宽的填充沟的基础上,旁边加上桩作为复合隔振措施,直径为  $h=1\text{ m}$ ,再进行减振实验。填充沟的沟深度取用  $d=2\text{ m}$ ,  $d=4\text{ m}$ ,  $d=6\text{ m}$ ,  $d=8\text{ m}$ ,  $d=10\text{ m}$  五种情况,  $x=14.5\text{ m}$  处为中心位置。随着水平距离的变化,不同填充沟沟深度下的减振效果见图8。从图8中可以看出,沟深度的增加能够增强总体的隔振作用,且伴随填充沟深度变化,振幅衰减与  $A_R$  在设立沟前随空间位置变化规律大体表现一致,且隔振效果最好的位置为隔振沟中心。当沟深度为  $d=10\text{ m}$  时,减弱了原本30%以上的振动强度,  $A_R$  值能够达到0.7以下,而沟深度为  $d=2\text{ m}$  时,减振幅值也近85%,可见采用填充沟+桩的复合式屏障,即使在沟深度较小时也能发挥较强的减振效果。此外可见屏障后,  $A_R$  虽有所上升但均不超过

1, 所以仍然具备减振效果。在所计算工况中的振幅衰减比  $A_R$  最大差值位于隔振沟中心位置处达到 15% 以上, 由此可得, 在填充沟+桩的复合式隔振措施中, 通过增加填充沟沟深是减轻地基振动效果的有效办法。

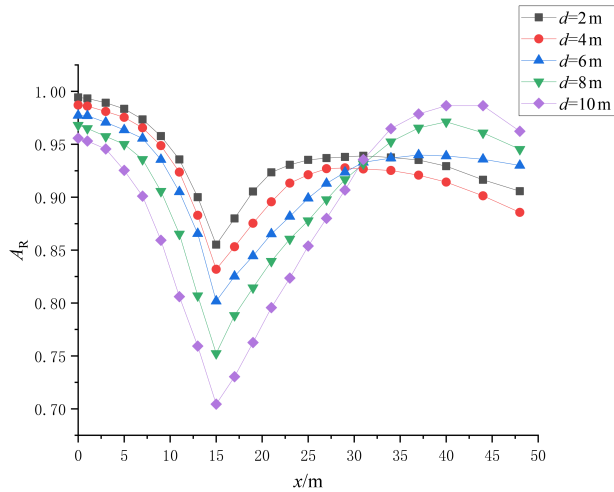


图8 填充沟深度对隔振效果的影响

Fig.8 Effect of filling ditch depth on vibration isolation

### 3.5 刚柔桩弹性模量影响

为研究隔振效果受刚柔桩复合式隔振措施的柔性桩材料的影响情况, 分别取用了柔性桩材料弹性模量为  $E_1=24\ 000\ \text{MPa}$ ,  $E_2=30\ 000\ \text{MPa}$ ,  $E_3=36\ 000\ \text{MPa}$ ,  $E_4=42\ 000\ \text{MPa}$ ,  $E_5=48\ 000\ \text{MPa}$  五种情况进行分析。从图9能够得到取用不同弹性模量的柔性材料, 不改变总体, 随着水平距离的增加, 地表振动强度的衰减率只影响振幅衰减  $A_R$  值。随着弹性模量的增加, 整体隔振效果也随之加强, 在隔振措施设立位于中心, 隔振效果最好。  $E_1$  与  $E_5$  之间  $A_R$  最大变化率为 18%, 证实可通过选择弹性模量较大的柔性桩材料来增强隔振效果。

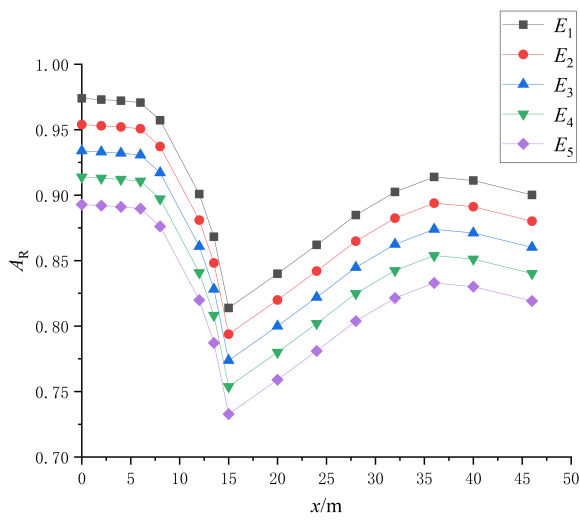


图9 不同材料下的刚柔桩隔振效果

Fig.9 Vibration isolation effect of rigid flexible pile under different materials

### 3.6 填充沟弹性模量影响

为研究隔振效果受填充沟+桩的新型复合式隔振措施中填充材料的影响, 分别采取弹性模量为  $E_1=24\ 000\ \text{MPa}$ ,  $E_2=30\ 000\ \text{MPa}$ ,  $E_3=36\ 000\ \text{MPa}$ ,  $E_4=42\ 000\ \text{MPa}$ ,  $E_5=48\ 000\ \text{MPa}$  的五种填充材料的各种情况进行分析, 随空间位置的变化, 各种不同的弹性模量的填充材料的隔振效果如图10所示。由计算结果图10可以看出, 五种工况随着水平距离的增加, 振动衰减规律大体一致, 随填充沟材料弹性模量的增加, 总体隔振效果变好, 减振效果最好处位于复合隔振屏障的中心位置, 填充沟后的隔振效果逐渐减弱。最终沟后的隔振效果可达原振动强度的 29%, 故在新型复合式隔振措施中, 适当选择提高填充材料的弹性模量可显著提高减振效果。

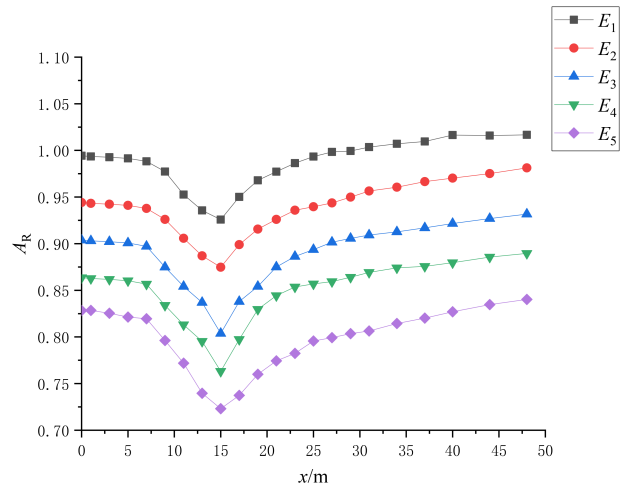


图10 不同材料下的填充沟加桩隔振效果

Fig.10 Vibration isolation effect of filling ditch and pile under different materials

## 4 总结

本文建立于对类矩形盾构隧道地铁列车动力响应进行 2.5 维有限元分析的基础上, 分析了空沟、填沟、长桩与短桩、刚性桩与柔性桩以及复合隔振屏障的隔振效果。主要结论如下:

(1) 在地表中心, 地表的振动强度总取到最大值, 在选用长短桩实行隔振时, 增加短桩的长度可使减振效果增强, 但是就整体效果来说没有其它措施的减振效果好。

(2) 刚柔桩可在振动强度最大处进行减振, 故其减振效果较好。刚柔桩的主要减振范围在沟中心两边 10 m 的范围内, 且增加刚柔桩的深度能够对减振起到显著的改善作用。

(3)使用空沟+桩进行隔振时,空沟后约15 m的隔振效果较好,但沟前存在振动放大现象,因此隔振沟应尽量设置在被保护建筑物前。超过沟后约15 m范围后,隔振效果减弱。

(4)填充沟+桩新型复合隔振措施的减振效果涵盖整个地基,且沟中心处隔振效果最优。随着沟深和材料弹性模量的增加,减振的效果增强,且总体隔振效果强于空沟。

## 参考文献

- [1] 丁智,李丹薇,魏新江.基于2.5维有限元方法的列车振动及隔振研究与展望[J].现代隧道技术,2016,53(6):1-11.
- [2] 高广运,张继严,谢伟,等.高铁弹塑性地基振动与变形的2.5维有限元算法[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(11):37-45.
- [3] 李佳,高广运,赵宏.基于2.5维有限元法分析横观各向同性地基上列车运行引起的地面振动[J].岩石力学与工程学报,2013,32(01):78-87.
- [4] 高广运,张其唯,毕俊伟.高铁荷载下准饱和分层地基环境振动特性研究[J].噪声与振动控制,2020,40(3):181-187.
- [5] 高广运,姚峭峰,杨成斌.2.5D有限元分析列车荷载引起非饱和土地面振动[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(06):95-103.
- [6] 高广运,何俊锋,杨成斌,等.2.5维有限元分析饱和地基列车运行引起的地面振动[J].岩土工程学报,2011,33(02):234-241.
- [7] 朱志辉,刘禹兵,王力东等.基于2.5维有限元法和虚拟激励法的地铁交通场地随机振动分析[J].中国铁道科学,2020,41(04):29-39.
- [8] 徐鑫宇.基于2.5维有限元冻土地列车振动响应和近场隔振研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [9] 葛鹏彬.2.5维有限/无限元法分析列车诱发的振动对建筑的影响[D].重庆:重庆大学,2018.
- [10] Bian X C, Chao C, Jin W F, et al. A 2.5D finite element approach for predicting ground vibrations generated by vertical track irregularities[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2011,12(12):885-894.
- [11] Yang Y B, Liang X, Hung H H, et al. Comparative study of 2D and 2.5D responses of long underground tunnels to moving train loads[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017,97: 86-100.
- [12] 柳献,赵子蓬,叶宇航,等.类矩形盾构隧道结构极限承载力分析[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(09):1283-1295.
- [13] 叶宇航,柳献,刘震,等.类矩形盾构隧道衬砌结构设计模型研究[J].西南交通大学学报,2019,54(6):1187-1195.
- [14] 柳献,叶宇航,刘震,等.类矩形盾构隧道结构整体安全性试验与分析[J].中国公路学报,2017,30(08):164-173.
- [15] 柳献,张晨光,张宸.地铁盾构隧道纵向接缝承载能力试验研究与解析分析[J].土木工程学报,2016,49(10):110-122.
- [16] 朱雁飞,刘震,叶宇航,等.类矩形盾构隧道结构计算方法研究[J].现代隧道技术,2016,53(S1):128-135.
- [17] 柳献,黄晓冬.通缝拼装盾构隧道衬砌结构抗倒塌性能的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S2):3703-3714.
- [18] 毕湘利,柳献,王秀志,等.通缝拼装盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J].土木工程学报,2014,47(10):117-127.
- [19] 司金标,朱瑶宏,季昌,等.软土层中类矩形盾构掘进施工引起地层竖向变形实测与分析[J].岩石力学与工程学报,2017,36(6):1551-1559.
- [20] 张治国,师敏之,张成平,等.类矩形盾构隧道开挖引起邻近地下管线变形研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):852-864.
- [21] 黄亮,梁荣柱,吴小建,等.类矩形盾构隧道纵向抗弯刚度分析[J].岩土工程学报,2019,41(11):2094-2102.
- [22] 张啟乐,冯立力,王建立,等.类矩形盾构隧道与圆形盾构隧道振动特性对比分析[J].城市轨道交通研究,2019,22(3):41-45.
- [23] Barbosa J, Pedro A C, Rui C. Abatement of railway induced vibrations: numerical comparison of trench solutions[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2015, 55: 122-139.
- [24] 蔡袁强,江乾明,曹志刚,等.填充沟对地铁运营引起地基振动隔振效果研究[J].岩土工程学报,2020,42(08):1384-1392.
- [25] 张捷.高速列车车内低噪声设计方法及试验研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [26] Cao Z G, Cai Y Q, Yuan Z H, et al. The influence of pore-fluid in the soil on ground vibrations from a tunnel embedded in a layered half-space[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018,419:227-248.
- [27] Feng S J, Li Y C, Chen, Z L, et al. Three-dimensional dynamic response of ground with a poroviscoelastic interlayer to a harmonic moving rectangular load[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2017,41(7):1055-1076.
- [28] Shen Y, Xu H O, Tao M G, et al. Settlement of soft clay subgrade under coupled effects of vibration frequency and dynamic stress ratio caused by high-speed train loads[J]. Soil mechanics and foundation engineering, 2017, 54(2): 87-96.
- [29] Woods R D. Screening of surface waves in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineering, 1968,94(4): 951-979.