

丁智,张霄,吴敏慧,等.双线地铁运营隔振沟屏障性能研究[J].地震工程学报,2019,41(1):9-15.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.009

DING Zhi,ZHANG Xiao,WU Minhui,et al.Vibration Isolation Effect of Isolation Trenches during Double-Line Subway Operation[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(1):9-15.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.009

双线地铁运营隔振沟屏障性能研究

丁智^{1,4},张霄¹,吴敏慧²,李丹薇³,陈雷越⁴

(1.安徽理工大学 土木建筑学院,安徽 淮南 232001; 2.杭州市公路管理局,浙江 杭州 310030;
3.大象建筑设计有限公司,浙江 杭州 310012; 4.浙江大学城市学院 土木工程系,浙江 杭州 310015)

摘要:为研究双线地铁运营时隔振沟的减振效果,基于2.5维有限元法建立双线地铁列车-轨道-地基土体耦合分析模型。模型克服现有研究将轨道结构简化为弹性地基欧拉梁的缺陷,引入实际钢轨动力学参数,实现双线地铁列车荷载下隔振沟对周围地基的隔振效果分析,比较空沟、填充沟两种不同隔振措施的减振特性,并对填充沟隔振影响因素进行系统的参数分析。研究结果表明:双线运营地铁荷载下,空沟隔振作用体现在沟后范围内,填充沟减振范围更广且效果更好,相比空沟更具工程实用性;填充沟在沟深较小时也能发挥良好的减振作用,增大沟深、沟宽均可有效提高减振效果。研究成果可为今后双线地铁隔振设计与施工提供有益参考。

关键词:2.5维有限元法;双线地铁;隔振沟;减振

中图分类号:U231

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2019)01-0009-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.009

Vibration Isolation Effect of Isolation Trenches during Double-Line Subway Operation

DING Zhi¹, ZHANG Xiao¹, WU Minhui², LI Danwei³, CHEN Leiyue⁴

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

2.Hangzhou Municipal Highway Administration, Hangzhou 310030, Zhejiang, China;

3.Green Oriental Architects, Hangzhou 310012, Zhejiang, China;

4.Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, Zhejiang, China)

Abstract: A coupled model of a double-line subway train-track-foundation soil was established on the basis of 2.5D FEM to study the vibration isolation effect of the isolation trench during double-line subway operation. The model addresses the problems introduced by the simplification of track structures into an Euler beam on an elastic foundation and introduces the dynamic parameters of the actual rail. The model was used to analyze the vibration isolation effect of the isolation trench on the surrounding foundation under double-line subway train load. The vibration damping characteristics of open and in-filled trenches were compared, and the trench factors that influence isola-

收稿日期:2018-09-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51508506);浙江省自然科学基金项目(LQ16E080008);杭州市科技计划项目(20160533B94、20172016A06)

第一作者简介:丁智(1983-),男,安徽铜陵人,博士,副教授,主要从事地铁施工及运营对周边环境影响方面的研究与教学工作。

E-mail:dingz@zucc.edu.cn.

tion were systematically analyzed. Results showed that under the double-line subway load, the in-filled trench had better isolation and engineering practicality than the open trench. The in-filled trench can exert a good damping effect even with a reduced ditch depth. In addition, the isolation effect can be improved by increasing the depth and width of the in-filled trench. The results of the present work can provide useful reference for the vibration isolation design and construction of double-line subways in the future.

Keywords: 2.5D FEM; double-line subway; isolation trench; vibration reduction

0 引言

振动早已是国际公认的七大环境公害之一,尤其是地铁建设迅速发展的今天,近距离多线、交叠隧道等日益复杂的地铁网络逐渐投入运营,列车运行引起的地基振动会干扰人们的工作和生活,导致精密仪器设备读数不准或精度下降,甚至危及古建筑安全,引起房屋开裂。地铁列车运行引发的地基振动研究及有效隔振措施的选用探讨,已引起广大学者、工程人员的高度重视,如何快速、准确地分析地铁运行引发的近距离隧道振动响应特征并提出有效隔振措施,是工程界一大亟待解决的问题^[1-2]。

目前常用的列车振动隔振方法主要有设置屏障隔振、隔振型扣件或在轨道下方设置波阻板及采用浮置板道床等措施。屏障隔振分连续屏障和非连续屏障,前者主要有隔振沟、钢筋混凝土墙、膨润土泥浆等,后者主要是混凝土排桩等。在列车减振隔振研究中,主要是通过对地铁隧道道床、衬砌壁、地面及周围建筑等的振动情况进行监测或有限元数值分析,比较各种轨道形式及减振措施的减振效果。耿传智等^[3]采用三维有限元模拟的方式,建立了地铁弹性扣件轨道有限元模型,对地铁中采用的一般弹性、粘结板式弹性和轨道减振器三种扣件型式进行落轴冲击响应仿真分析,对比分析各自减振性能;涂勤明等^[4]利用三维有限元进行数值模拟,比较分析整体轨道、弹性支撑块轨道及钢弹簧浮置板轨道三种轨道型式的减振效果;张莉等^[5]、丁智等^[6]对地铁列车运行引起轨道、衬砌管片及地面的振动加速度进行监测,重点分析了不同轨道形式下轨道的隔振效果;袁宗浩等^[7]运用 2.5 维有限元方法,建立了衬砌-饱和土地基模型,计算分析了地铁列车荷载作用下轨道系统及饱和土体动力响应问题并对浮置板的减振效果进行了系统研究。陈功奇等^[8]、高广运等^[9]分析了列车低速和高速运行条件下饱和土地基中不同隔振措施的隔振效果,并将其计算结果与弹性地基中的隔振效果进行对比分析。Thompson 等^[10]针对地基下卧软土层深度、隔振栏厚度对隔振

影响进行了计算分析。但陈功奇、高广运、Thompson 等研究都是针对高速铁路隔振研究,而隔振屏障对双线地铁运营减振效果的研究尚未见报道^[2]。

本文基于 2.5 维有限元方法,主要对连续隔振屏障-隔振沟进行了减振有效性分析,建立双线地铁隧道-隔振沟 2.5 维有限元模型进行数值模拟,模型采用弹性土模拟,下方为刚性地基。为更加贴合实际工程,本文克服了将轨道简化为地基上 Euler 梁的缺陷,引用实际的铁轨动力参数进行模拟分析,并与无隔振措施的数值分析结果对比,研究了空沟、填充沟两种措施的减振效果,进一步对填充沟隔振效果进行了参数化分析,致力于为实际工程中隔振措施的选取提供一定理论参考。

1 地铁轨道与地基模型

1.1 地基的 2.5 维有限元表达式

根据 Navier 方程,三维土体的动力方程在频域中可表示为:

$$\mu^c u_{i,jj}^t + (\lambda^c + \mu^c) u_{ji}^t + \omega^2 \rho u_i^t + f_i^t = 0 \quad (1)$$

其中: λ^c 、 μ^c 为复系数的 Lamé 常数, $\lambda^c = (1 + 2i\beta)\lambda$, $\mu^c = (1 + 2i\beta)\mu$, β 为土体阻尼系数。 u 为振动位移,上标 t 表示频率领域中的变量。对式(1)在列车运行方向进行波数变换,运用虚功原理,可得^[11]:

$$\int_s \delta \varepsilon'^* \sigma' dS = \int_s \omega^2 \rho \delta u'^* u' dS + \int_s \delta u'^* f' dS \quad (2)$$

其中: $\delta u'^*$ 为假想位移, $\delta \varepsilon'^*$ 为假想位移相对应的假想应变,“*”表示共轭复数。引入形函数 N 后,即可得到在频域中的离散方程^[12]:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (3)$$

其中: \mathbf{M} 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{F} 分别为质量矩阵、刚度矩阵和等效节点力矢量;其中, $|\mathbf{J}|$ 为 Jacobi 矩阵行列式; \mathbf{B} 和 \mathbf{D} 分别为应变矩阵和弹性矩阵。

$$\mathbf{M} = \sum_e \rho^e \iint \mathbf{N}^T \mathbf{N} |\mathbf{J}| d\eta d\xi \quad (4)$$

$$\mathbf{K} = \sum_e \iint (\mathbf{B}^* \mathbf{N})^T \mathbf{D} (\mathbf{B} \mathbf{N}) |\mathbf{J}| d\eta d\xi \quad (5)$$

$$\mathbf{F} = \sum_e \iint \mathbf{N}^T \mathbf{f} |\mathbf{J}| d\eta d\xi \quad (6)$$

2.2 列车荷载的频域-波数域表达式

地铁列车荷载由一系列列车轴重荷载组成,如图 1 所示。

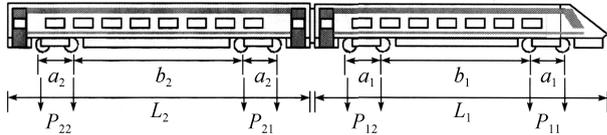


图 1 列车荷载模型
Fig.1 Train load model

列车轴重荷载经轨道方向和时间的 Fourier 变换后,得到列车荷载频域波数域表达如下:

$$\hat{f}(k, \omega) = 2\pi(\omega - 2\pi f_0 - kc)\chi(k) \quad (7)$$

$$\chi(k) = \sum_1^{N_T} P_n [1 + e^{i\omega_a k} + e^{i(\omega_a + \omega_b)k} + e^{i(2\omega_a + \omega_b)k}] e^{ik(\sum_{s=0}^{N_T-1} L_S - L_D)} \quad (8)$$

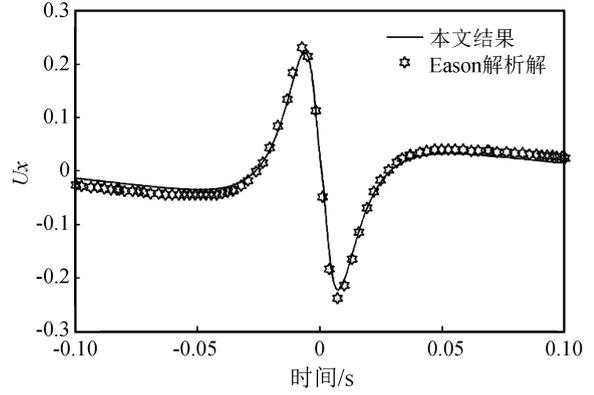
式中: δ 为 Dirac 函数; N_T 为列车车厢数量; f_0 为荷载自振频率; c 为地铁列车运行速度; P_n 为地铁列车的轴重(包括机车轴重 P_E 和普通车轴重 P_C); L_S 为列车长度(包括拖车长度 L_E 和动车长度 L_C); ω_a 为相邻两组轮对之间的距离, ω_b 为第二组和第三组轮对之间的距离; L_D 为列车荷载到观察点之间的距离。

2 数值模型验证

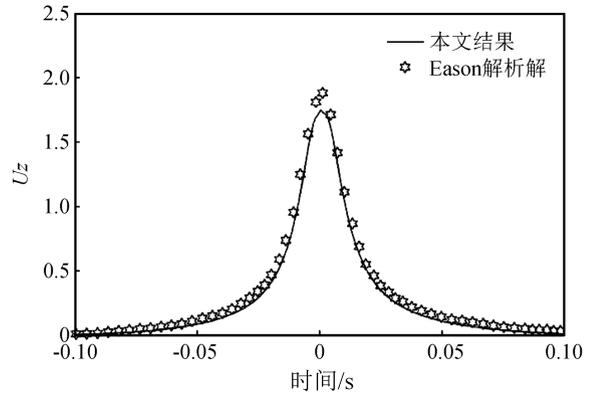
2.1 点荷载下的模型验证

为了验证本文 2.5 维有限元地基模型与计算程序的准确性,选取与 Eason^[13] 相同的均匀弹性半空间地基参数,将分析所得结果与 Eason 解析结果作对比。图 2 为移动点荷载验证模型示意图,模型采用 20 m 厚的均匀弹性土层,其下方为刚性基岩。该土层密度为 2 000 kg/m³,阻尼比为 0.01,泊松比为 0.25,土体剪切波速为 100 m/s。地面上作用着沿 x 轴方向以 70 m/s 移动的点荷载,观察点

位于地面荷载作用竖向下 1 m 处。最终计算结果乘以 $2\pi\rho v_s/P$ 进行归一化。本文数值模拟结果与解析结果对比如图 3 所示,图 3(a)为观测点水平位移响应情况,图 3(b)为观测点竖向位移响应情况。可以看到本文数值模拟值与解析解计算吻合良好。



(a) 水平位移响应



(b) 竖向位移响应

图 3 移动点荷载下方 1 m 处的地基振动位移
Fig.3 Foundation vibration displacement at 1 m below moving point load

2.2 列车荷载下的模型验证

以往 2.5 维有限元法计算列车荷载产生的振动响应研究中,往往把轨道系统简化为铺设在道床上的复合欧拉梁进行分析。本文首次建立 2.5 维实际轨道模型的有限元模型,并对模型赋值实际钢轨的动力学物理参数。为了验证本文地铁列车-轨道系统-地基土体耦合模型的准确性,建立与边学成^[14] 相同的地铁列车荷载下分层地基模型,如图 4 所示。隧道系统和地基模型的物理参数列于表 1,模型尺寸为 25 m×100 m,下方刚性地基上有 4 层土体,地铁隧道埋深 11.5 m,内、外半径分别是 2.15 m、2.65 m,采用三角形有限单元划分后总节点数为 2 438,单元数为 4 235,模型两侧 10 m 范围内各设

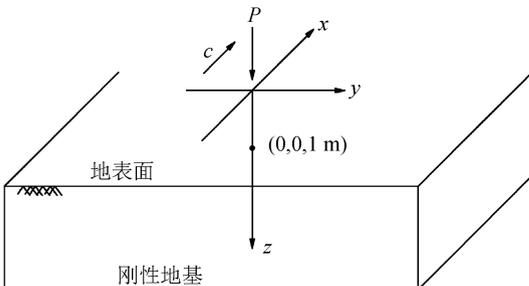


图 2 点荷载验证模型

Fig.2 Point load verification model

置 0.2 的阻尼比以减少边界反射波影响。隧道局部和钢轨有限元模型如图 5 所示,列车荷载直接作用在钢轨上,钢轨轨距采用标准宽度 1 435 mm。观察点位于图中坐标 (0, 20 m) 处。列车车速 $c = 17.5$ m/s,考虑平稳移动自振频率为 0,每节车厢长度 $L = 16$ m,同节车厢轮轴间隔为 $\omega_a = 1.9$ m, $\omega_b = 9.1$ m,每节车厢重 25 t。设地铁列车轮轴荷载到达观察点所在地基竖向平面的时刻为 0。

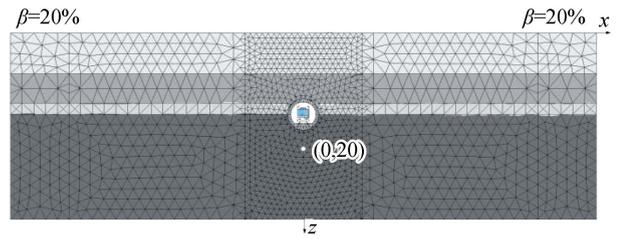


图 4 地铁荷载验证整体地基模型

Fig.4 Overall foundation model for metro load verification

表 1 隧道系统与分层地基参数

Table 1 Parameters of tunnel system and layered foundation

材料	层厚 H/m	剪切波速 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	泊松比 ν	阻尼比 $\beta/\%$
衬砌	0.25	3 500.0	2 300	0.167	0.5
钢轨	/	3 200.0	7 830	0.300	1.0
土体第 1 层	7.0	125.0	1 420	0.485	5.0
土体第 2 层	5.0	380.0	2 000	0.485	3.3
土体第 3 层	2.0	470.0	1 800	0.478	2.0
土体第 4 层	11.0	500.0	2 000	0.458	2.0

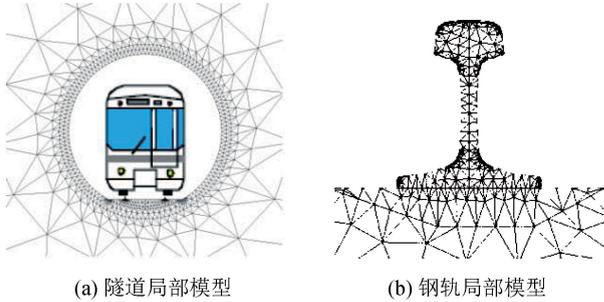


图 5 地铁荷载验证局部模型

Fig.5 Local model for metro load verification

数值计算结果与边学成结果对比,如图 6 所示。考虑到对荷载-轨道相互作用的计算方法不同,二者计算结果存在峰值差异,边学成采用了欧拉梁理论模拟计算,而本文建立了实际钢轨模型,列车荷载直接作用在钢轨有限元模型上,故所得加速度峰值较边学成结果偏大。二者总体计算结果中加速度变化趋势基本相同,且数量级一致,可以验证本文数值模型和计算程序的准确性。

3 隔振沟的减振效果

3.1 计算模型及参数设置

双线地铁计算模型如图 7 所示,整体模型尺寸为 $32 m \times 100 m$,采用均一弹性土模拟,下方为刚性地基。地铁隧道埋深 10 m,内、外半径分别是 2.75 m、3.10 m,两隧道中心距 15 m。模型两侧 10 m 范围内仍然各设置 0.2 的阻尼比以减少边界反射波影响。隔振沟设置在双线地铁线路两侧,沟中心线距相邻隧道中心线为 12 m,相距地铁线路中心线 19.5 m,沟宽

1 m,沟深 8.5 m。隧道系统与地基参数、地铁列车尺寸及荷载参数均与第 2 节中一致。分析中均考虑振动响应最大的两列地铁同时运营的工况,车速为正常运营的 20 m/s。这里考虑了两种隔振沟的隔振效果与无隔振措施工况进行对比,一种是空沟隔振,另一种是混凝土填充沟隔振,填充材料具体参数列于表 2。

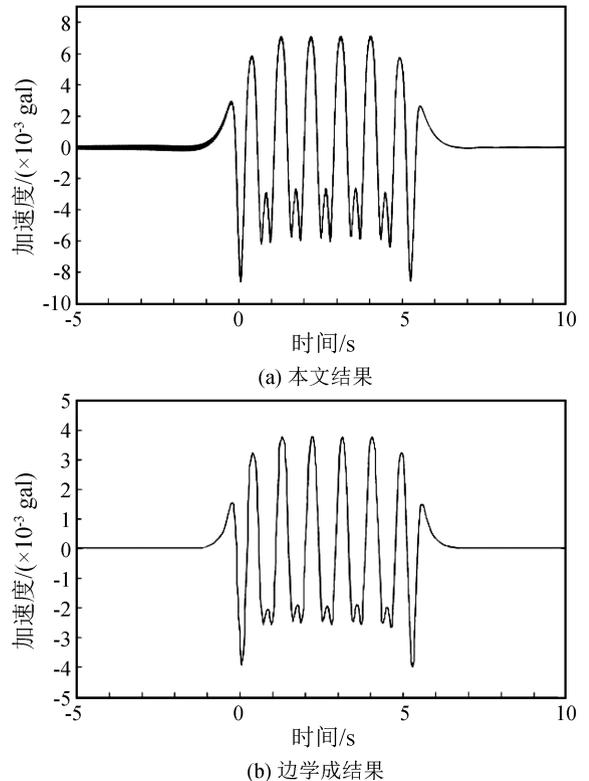


图 6 观察点 (0, 20) 处加速度响应的时间历程

Fig.6 Time history curves of acceleration response at the observation point (0, 20)

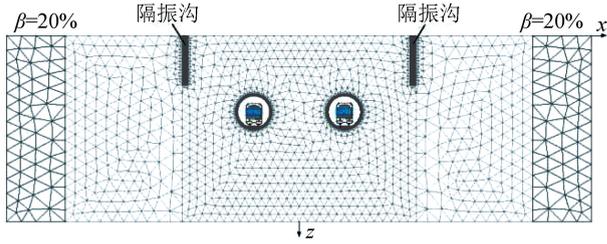


图 7 设置隔振沟的 2.5 维有限元模型

Fig.7 2.5D FEM model with vibration isolation trench

表 2 填充沟混凝土参数

Table 2 Concrete parameters of in-filled trench

材料	剪切波速 v_s /($m \cdot s^{-1}$)	密度 ρ /($kg \cdot m^{-3}$)	泊松比 ν	阻尼比 β
混凝土	2 500	2 500	0.15	0.02

为深入分析隔振效果,引入 Woods^[15] 提出的振幅衰减比 A_R 进行评价:

$$A_R = \frac{P_1}{P_2} \quad (9)$$

其中: P_1 为设置隔振措施后某一时刻计算点处的地表位移振幅; P_2 为无隔振时同一时刻、位置相应的响应幅值。

3.2 隔振沟减振效果分析

图 8、9 分别给出了采用不同隔振措施时地面竖向动力响应的最大位移变化和最大竖向速度衰减曲线。隔振沟宽 1 m,中心线位于 $x = 19.5$ m 处,沟边界分别位于 $x = 19$ m 和 $x = 20$ m 处。可以得出,无论是否设置隔振措施,地表竖向振动位移和速度振级最大值均出现在地铁线路中心地表处,且竖向振动速度振级相同。地表土体位移在设置填充沟时有所减小,空沟则无明显变化。在设置隔振沟前(即 $x < 19$ m 时),填充沟已表现出较为明显的隔振效果,

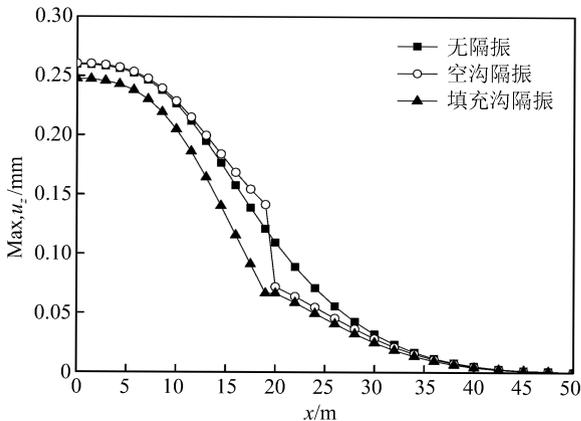


图 8 不同隔振措施下的地面竖向位移变化曲线

Fig.8 Ground vertical displacement curves under different vibration isolation measures

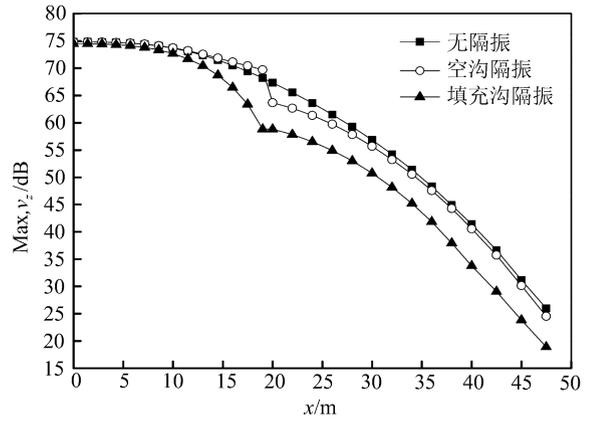


图 9 不同隔振措施下的地面竖向速度衰减曲线

Fig.9 Ground vertical velocity attenuation curves under different vibration isolation measures

而设置空沟时则与无隔振时的地表振动响应水平相近,甚至出现振动放大区;在设置隔振沟后(即 $x > 20$ m 时),空沟隔振效果突然变好,竖向位移曲线与填充沟趋于一致,而振动强度则仍然与填充沟隔振相差较大,衰减情况与无隔振措施趋于一致。

图 10 给出了空沟和填充沟隔振效果随空间位置变化曲线。空沟隔振效果在设置隔振沟后($x > 20$ m)时才能发挥左右,且在沟前($x < 19$ m)的 A_R 值大于 1,存在振动放大现象,故采用空沟隔振时,建筑物等要注意避免建造在沟前,最佳隔振区位于沟后 10 m 范围内。而填充沟的 A_R 值均小于 1,在整个地基范围内均有隔振效果,隔振沟附近区域隔振效果最好,最佳隔振区位于沟前 5 m,沟后 10 m 范围内,总体隔振效果均明显优于空沟隔振。结合图 8~10,隔振沟沟后远场区域($x > 40$ m),隔振沟隔振效果已减弱,但由于地基土体的滤波作用造成

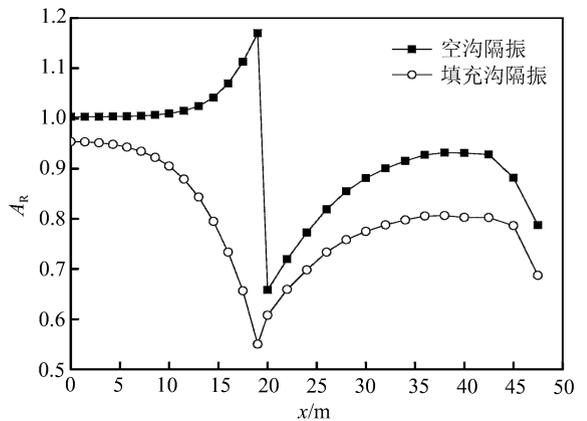


图 10 隔振沟对地面竖向动力响应的隔振效果

Fig.10 Vibration isolation effect of isolation trench on ground vertical dynamic response

的振动衰减,该区域属于安全范围,振动影响较小,故本文对沟后远场区隔振效果不做赘述。

4 填充沟隔振的参数化分析

4.1 填充沟深度的影响

为探究填充沟沟深对减振性能的影响,分别选取沟深 d 为 5 m, 8.5 m, 12 m 三种工况进行 2.5 维有限元数值模拟,填充沟中心线位于 $x = 19.5$ m 处。图 11 给出了不同沟深下填充沟隔振效果随空间位置变化情况。由图可以看出,随沟深增大填充沟总体隔振效果变好。在设置隔振沟前,随填充沟深度变化,振幅衰减比 A_R 随空间位置变化规律基本表现一致,距离填充沟中心越近,隔振效果越好,填充沟中心位置振幅衰减最大,当沟深 $d = 12$ m 时, A_R 在 0.5 以下,减弱了原本振动强度的 50% 以上,而沟深 $d = 5$ m 时,填充沟最大减振幅值也接近 60%,说明填充沟在沟深较小时也能发挥较好的地基减振作用。而在设置隔振沟后, A_R 值变化随沟深改变有所不同,但仍基本保持在小于 1 的范围内,沟后近场区域隔振效果随深度增大而增大,所计算工况中振幅衰减比 A_R 差值最大可达 15%,隔振沟中心处差值最大在 10% 以上,说明增大填充沟沟深对地基减振效果改善明显,这与 Barbosa 等^[16]采用 2.5 维有限元-边界元耦合模型得到的研究成果类似,有效证明了本文模型的合理性。

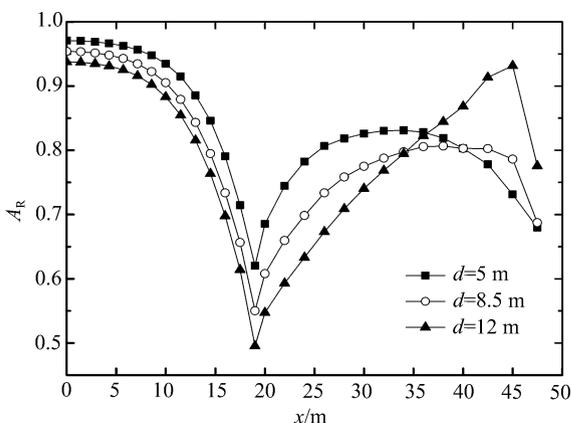


图 11 不同深度下的填充沟隔振效果

Fig.11 Vibration isolation effect of in-filled trench at different depths

4.2 填充沟宽度的影响

分别选取沟宽 w 为 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m 三种工况,填充沟中心线位于 $x = 19.5$ m 处,计算结果如图 12 所示。由图可知,在设置隔振沟前,填充沟隔

振效果随沟宽变化不大;在沟后近场范围内,填充沟减振效果差异随空间位置 x 增大表现趋于明显, $w = 1.0$ 与 $w = 2.0$ m 振幅衰减比 A_R 差值最大可达 20%,说明沟宽对填充沟减振效果的影响主要体现在沟后。总体填充沟隔振效果随填充沟宽度变大得到较大的改善,条件允许的情况下工程中可适当增大填充沟宽度以获得更好的减振降噪效果,这与陈功奇等^[8]的研究结论相符。

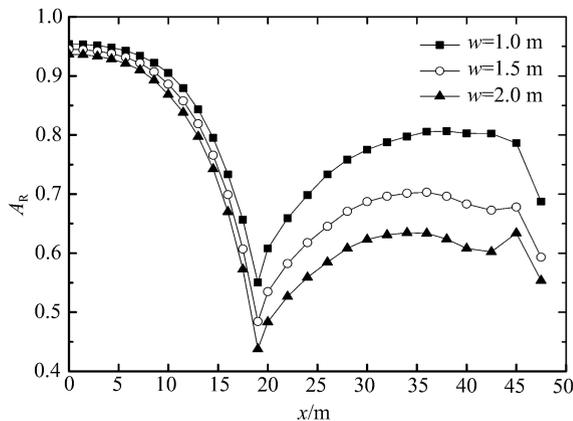


图 12 不同宽度下的填充沟隔振效果

Fig.12 Vibration isolation effect of in-filled trench with different widths

5 结论

本文对空沟、填充沟的隔振有效性进行了系统的研究,探究了不同隔振沟的隔振效果,并对填充沟减振影响因素进行了参数化分析。研究中得出的主要结论可以概括如下:

(1) 无论是否设置隔振措施,地表振动强度最大位置均在地铁线路正上方地表处出现。采用空沟隔振时,建筑物等要注意避免建造在沟前,最佳隔振区位于沟后 10 m 范围内。实际工程中,空沟易受地下水等的影响,工程稳定性、实用性不强。

(2) 填充沟在整个地基范围内均有隔振效果,最佳隔振区位于沟前 5 m,沟后 10 m 范围内,对隔振要求填充沟总体隔振效果在解析模型范围内均明显优于空沟隔振。隔振沟沟后超出最佳隔振范围时,动力响应影响较小,仍属于振动安全区域,可以建造楼房等设施。

(3) 增大填充沟深度、宽度,填充沟减振效果将得到改善。在设置隔振沟前,沟深与沟宽对隔振效果影响不明显;沟后区域,填充沟宽度对地基减振影响较大。填充沟在沟深较小时也能发挥较好的地基减振作用。

参考文献(References)

- [1] 丁智,李丹薇,谢宗星,等.地铁列车荷载作用下黏弹性地基动力特征分析[J].地震工程学报,2016,38(6):889-895.
DING Zhi, LI Danwei, XIE Zongxing, et al. Dynamic Stress Characteristics of Viscoelastic Foundations under Subway Train Loads[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(6): 889-895.
- [2] 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.
DING Zhi, LI Danwei, WEI Xinjiang. Studies and Prospects of Train Vibration and Vibration Isolation Based on 2.5D Finite-Element Method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 1-11.
- [3] 耿传智,王伟鹏.地铁弹性扣件减振性能的落轴冲击仿真分析[J].振动与冲击,2010,29(3):113-117.
GENG Chuazhi, WANG Weipeng. Simulation on Vibration-Reduction Performance of Different Subway Elastic Fasteners under Wheel Load Drop[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(3): 113-117.
- [4] 涂勤明,雷晓燕,毛顺茂.地铁产生的环境振动及轨道结构减振分析[J].噪声与振动控制,2014,34(4):178-183.
TU Qinming, LEI Xiaoyan, MAO Shunmao. Analyses of Subway Induced Environment Vibration and Vibration Reduction of Rail Track Structure[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(4): 178-183.
- [5] 张莉,刘鹏辉,杨宜谦,等.杭州地铁 1 号线浮置板轨道减振效果对比分析[J].铁道建筑,2013(10):80-83.
ZHANG Li, LIU Penghui, YANG Yiqian, et al. Analysis of Floating Slab Track Vibration Damping Effect by Hangzhou Metro Line 1[J]. Railway Engineering, 2013(10): 80-83.
- [6] 丁智,王永安,顾晓卫,等.软土区地铁不同类型轨道振动测试分析[J].岩土工程学报,2017,39(增刊 2):220-223.
DING Zhi, WANG Yongan, GU Xiaowei, et al. Vibration of Different Types of Tracks of Subway in Soft Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(Suppl 2): 220-223.
- [7] 袁宗浩,蔡袁强,曾晨.地铁列车荷载作用下轨道系统及饱和土体动力响应分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(7):1470-1479.
YUAN Zonghao, CAI Yuanqiang, ZENG Chen. Dynamic Response of Track System and Underground Railway Tunnel in Saturated Soil Subjected to Moving Train Loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1470-1479.
- [8] 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 Gongqi, GAO Guangyun. 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.
- [9] 高广运,何俊锋,李宁,等.饱和地基上列车运行引起的地面振动隔振分析[J].岩土力学,2011,32(7):2191-2198.
GAO Guangyun, HE Junfeng, LI Ning, et al. Analysis of Isolating Ground Vibration Induced by Trains Running on Saturated Ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2191-2198.
- [10] THOMPSON D J, JIANG J, TOWARD M G R, et al. Mitigation of Railway-induced Vibration by Using Subgrade Stiffening[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 79: 89-103.
- [11] 边学成,陈云敏.基于 2.5 维有限元方法分析列车荷载产生的地基波动[J].岩石力学与工程学报,2006,25(11):2335-2342.
BIAN Xuecheng, CHEN Yunmin. Ground Vibration Generated by Train Moving Loadings Using 2.5D Finite Element Method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2335-2342.
- [12] 边学成,陈云敏,胡婷.基于 2.5 维有限元方法模拟高速列车产生的地基振动[J].中国科学 G 辑:物理学 力学 天文学,2008,38(5):600-617.
BIAN Xuecheng, CHEN Yunmin, HU Ting. Numerical Simulation of High-speed Train Induced Ground Vibrations Using 2.5D Finite Element Approach[J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy, 2008, 38(5): 600-617.
- [13] EASON G. The Stresses Produced in a Semi-infinite Solid by a Moving Surface Force[J]. International Journal of Engineering Sciences, 1965, 2(6): 581-609.
- [14] 边学成.高速列车运动荷载作用下地基和隧道的动力响应分析[D].杭州:浙江大学,2005.
BIAN Xuecheng. Dynamic Analyses of Ground and Tunnel Responses due to High-speed Train Moving Loads[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [15] 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.
- [16] BARBOSA J, ALVES COSTA P, CALÇADA R. Abatement of Railway Induced Vibrations: Numerical Comparison of Trench Solutions[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2015, 55: 122-139.