

# 废轮胎隔振墙对地铁振动的隔振性能影响分析

金 峤,吴梦娇,孙 丽

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 研究在振动传播土层中设置废弃橡胶轮胎隔振墙的隔振效果,降低地铁列车运行引发的环境振动对沿线建筑物的振动干扰。**方法** 基于 ABAQUS 平台建立“土体-隧道-隔振墙”模型,列车激励荷载以简谐激励函数来表示,并编制 VDLOAD 子程序实现移动荷载的施加,模拟地铁列车运行的振动荷载效应,研究废弃橡胶轮胎隔振墙在不同宽度、深度、长度、位置、排数以及填充材料等影响因素下的隔振性能。**结果** 隔振墙的墙深达到或超过隧道埋深时,隔振效果更好;隔振墙厚度对隔振效果影响较小;隔振墙长度取 100 m 或 10 倍隔振墙与振源间距时,隔振功能才能得以发挥;隔振墙与振源的最优间距应设置为隧道埋深的 1.25 ~ 1.875 倍;隔振墙排数越多,隔振效果越好;由刚性填充材料组成的隔振墙更适合应用在软土地带中,由柔性填充材料组成的隔振墙更适用于硬土地带中。**结论** 在解决地铁沿线环境振动干扰问题时,采用在被扰结构物与轨道振源之间设置废旧轮胎隔振墙的方法,能够阻隔地铁轨道振动的传播路径,从而达到减轻、隔绝不良环境振动的目的,且该方法具有环境危害小、工程实用性和可行性高、经济性好等特点。

**关键词** 地铁振动;有限元分析;减隔振措施;隔振墙

中图分类号 TU973

文献标志码 A

## Isolation Performance Analysis of Waste Tire Wall on Vibration Caused by Subway Trains

JIN Qiao, WU Mengjiao, SUN Li

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to reduce the vibration interference of environmental vibration induced by subway train operation to buildings along the line, the vibration isolation effect of setting waste rubber tire vibration isolation wall (WRTVIW) in vibrating soil layers is studied. Based on the ABAQUS platform, the ‘Soil-Tunnel-WRTVIW’ model is established. The train excitation load is expressed by the simple harmonic excitation function, and the VDLOAD subroutine is compiled to realize the application of moving load, which can simulate the vibration load effect of subway

收稿日期:2022-09-08

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFC1504303)

作者简介:金峤(1975—),男,副教授,博士,主要从事建筑结构振动舒适度等方面研究。

train operation. By these methods, the vibration isolation performance of the WRTVIW under different influence factors, such as wall thickness, wall depth, wall length, wall position, row number and filling material properties, is studied. The simulation results show that: When the wall depth reaches or exceeds the buried depth of tunnel, the vibration isolation effect is better; Thickness of the WRTVIW has little impact on the vibration isolation effect; When length of the WRTVIW is 100 m or 10 times the distance between the vibration isolation wall and the vibration source, the vibration isolation function can be exerted; The optimal spacing between the WRTVIW and the vibration source should be set to 1.25 ~ 1.875 times the buried depth of tunnel; The more rows of the WRTVIW, the better the vibration isolation effect; The WRTVIW composed of rigid filling materials is more suitable for soft soil sites, while the one composed of flexible filling materials is more suitable for hard soil sites. It concludes that, when solving the problem of environmental vibration interference along the subway, the method of setting the WRTVIW between the vibration-proof structure and the track vibration source can block the propagation path of the subway track vibration, so as to achieve the purpose of reducing and isolating the harmful environmental vibration. Meanwhile, this method has the characteristics of minimal environmental hazards, high engineering practicability and feasibility, and good economy.

**Key words:** subway vibration; finite element analysis; vibration isolation measures; vibration isolation wall

随着现代化建设不断深入,地铁在带动城市经济发展、改善城市居民生活质量、增大城市发展潜力以及推动旅游产业升级等方面具有特殊的地位和作用。但另一方面,地铁运行时列车的振动也容易引发邻近建筑物振动适用性问题,对建筑内人员或仪器产生振动干扰。因此,由地铁运行诱发的环境振动问题逐渐引起了人们的重视,减隔振技术已成为解决此类问题的重要研究方向之一。

针对地铁列车诱发建筑结构的振动机理及传播规律问题,基本的振动传递轨径也已清晰<sup>[1]</sup>,但由于振动传播介质的类型迥异且物理性质复杂,整体研究工作所面临的困难仍较多。目前,关于振动的产生机理问题,国内外学者<sup>[2-3]</sup>普遍认为,列车振动荷载主要与磨损造成的轨道不平顺、钢轨表面不平顺有关。

近年来,减隔振技术在地铁车致环境振动领域的研究和应用日益繁盛。通过对地铁振动源的产生、沿土层传播以及对建筑物产生干扰这一振动传播链条的系列化监测、模拟和分析,减隔振技术可以从振动源、传播途径、受振结构三个切入点采取灵活多样的制

振、抑振措施。在振源减振方面的主要措施<sup>[4-5]</sup>:在轨道结构、钢轨表面平顺度、车轮外形、车轮材料等方面改进生产安装工艺;将普通轨道结构改成加装了弹簧支座的浮置板轨道结构。对受振结构所采取的减隔振措施<sup>[6-7]</sup>:对整体建筑结构采用基础隔振支座;对局部建筑结构采用浮筑楼板、房中房等技术;对精密仪器设置空气弹簧隔振台等措施。

基于地铁车致环境振动的振动传播特点,针对传播途径的土体振动阻隔技术是较为经济实用的方法,可以规避振源减振和受振结构减隔振所衍生出的各种实际问题。L. Andersen<sup>[8]</sup>在空沟基础上,得出在其边界设置板桩可以提高隔振效果。屈阳等<sup>[9]</sup>以合肥地铁沿线实验室为背景,研究了隔振墙、隔振桩、隔振沟三种措施的隔振效果,研究表明,隔振墙效果不如隔振沟,但优于隔振桩,且隔振墙要受位置、深度、宽度等因素的影响。栗润德等<sup>[10]</sup>在研究隔振墙的填充材料时发现:填充材料的动力性能显著影响隔振效果;柔性材料隔离高频更有效,刚性材料隔离低频更有效。

随着汽车工业的迅猛发展,我国每年产生的废旧轮胎以 8% ~ 10% 的速度急剧增加,已成为一种新型污染,而各种以废旧轮胎为基材的技术革新<sup>[11-13]</sup>也已进入科研探索和工程实践之中。基于此,笔者将废旧轮胎隔振墙引入地铁车致环境振动的研究领域,以 ABAQUS 有限元软件为分析平台,建立“土体-隧道-隔振墙”模型,研究隔振墙空间位置、几何尺寸、组成材质在不同场地土条件下对隔振效果的影响,以期为地铁沿线建筑结构环境损害防治问题提供一种可行的方案。

1 有限元模拟方法

1.1 “土体-隧道-隔振墙”模型

1.1.1 模型尺寸

“土体-隧道-隔振墙”模型采用 C3D8R 单元类型,共 48 000 个单元,模型整体长×宽×高为 200 m×200 m×60 m,隧道的内衬为 0.3 m,隧道直径为 6 m,隧道埋深为 8 m;隔振墙沿平行于地铁隧道轴向的一侧布置,长度为  $L_0$ ,其与隧道轨道中心的地表投影线之间的水平距离为  $s$ ,整体模型在该方向上的总长度为  $L$ ,具体位置关系参见图 1 所示。在隔振墙长度中心点的横向垂直断面上,沿地表由近及远地设置 11 个拾振点(点号从  $0^\# \sim 10^\#$ ),其振动响应被用以考察隔振墙的隔振效果。其中, $0^\# \sim 5^\#$  点的水平间隔距离为 2 m, $5^\# \sim 7^\#$  点的水平间隔距离为 5 m, $7^\# \sim 10^\#$  点的水平间隔距离为 10 m,详见图 2 所示。

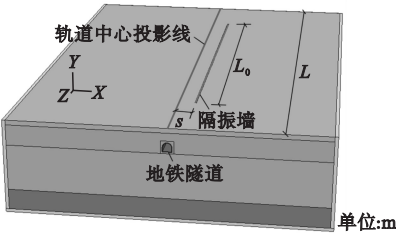


图 1 “土体-隧道-隔振墙”模型

Fig. 1 The model of soil-tunnel-vibration isolation wall

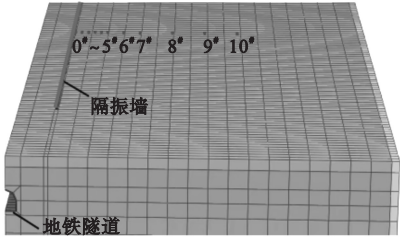


图 2 拾振点位置图

Fig. 2 The location of detection points

废旧轮胎隔振墙采用砂砾石或泡沫塑料填充轮胎的垂直排列形式(见图 3),墙深设为  $h$ ,墙厚设为  $d$ 。材料参数源自文献[14],具体见表 1。

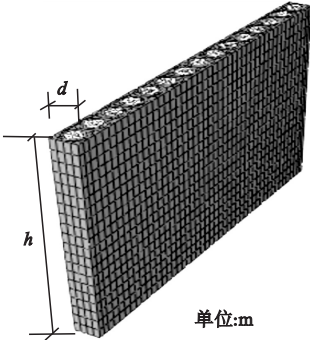


图 3 废弃橡胶轮胎隔振墙模型构造图

Fig. 3 Model diagram of the vibration isolation wall

表 1 隔振墙参数

Table 1 The parameters of vibration isolation wall

填充物	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	剪切波速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
橡胶	150	0.35	1 500	32
砂砾石	200	0.3	1 800	219
泡沫塑料	12	0.4	80	129

1.1.2 场地参数

鉴于实际的场地土土体组成成分复杂,土层厚度及层数也因时因地而异,为了便于分析,笔者将实际土层结构简化为四层,并将各层土的厚度固定。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)的场地土类别的确定方法,共设计了 4 种场地土土层参数,分别对应于 I 类硬土、II 类中硬土、III 类中软土和 VI 类软土等场地类别,具体参数情况见表 2。

表2 土层参数

Table 2 The parameters of soil layer

场地类别	土层	土层深度/m	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	剪切波速/(m·s <sup>-1</sup> )
Ⅰ类	覆土	0~3	1 800	110	0.35	25	165
	卵石	3~16	1 800	180	0.30	37	208
	砾石	16~45	1 810	200	0.30	39	219
	花岗岩	45~60	2 400	240	0.25	39	225
	杂填土	0~3	1 760	18	0.35	25	68
Ⅱ类	粗砂	3~16	1 800	80	0.30	37	138.7
	卵石	16~45	1 800	180	0.30	37	208
	砾石	45~60	1 810	200	0.30	39	219
	填土	0~3	1 750	18	0.35	15	65
	粉质黏土	3~16	1 800	20	0.30	25	65.4
Ⅲ类	粗砂	16~45	1 800	80	0.30	37	138.7
	砾石	45~60	1 810	200	0.30	39	219
	填土	0~3	1 750	18	0.35	15	65
Ⅵ类	粉质黏土	3~16	1 800	20	0.30	25	65.4
	淤泥质	16~45	1 800	20	0.30	37	70
	砾石	45~60	1 810	200	0.30	39	219

1.1.3 阻尼计算

对于文中Ⅰ类(硬土)、Ⅱ类(中硬土)、Ⅲ类(中软土)及Ⅵ类(软土)场地类别,阻尼比 $\zeta$ 分别取经验值0.03、0.05、0.07、0.08<sup>[15]</sup>。这样通过设定满足阻尼比的两个频率值( $\alpha,\beta$ ),可算出与四种场地相对应的 $\alpha,\beta$ 值,进而得到其瑞利阻尼。

1.1.4 边界条件

模型两侧设置无限边界如图4所示。通过采用ABAQUS软件中内置的无限单元(单元类型:CIN3D8,单元数目:5440),笔者对于所关注振动方向直接相关的土体模型侧面及底面设置了无限元人工边界,以规避边界波反射对振动结果的影响。



图4 模型两侧设置无限边界

Fig. 4 The unlimited boundaries on sides of the model

1.2 地铁列车振动荷载的模拟

选取北京地铁四号线地铁列车,型号是SFM05,标准B型车,共6节编组车厢,每单节车厢由2个转向架、4组轮对组成。列车参数:单节车辆长19.52 m,车厢宽3 m,转向架中心距15 m,转向架质量3 600 kg,轮对质量1 700 kg,机车轴重 $P_c$ 为162 kN,固定轴距为2.3 m,车厢轴重为120 kN,列车簧下质量390 kg,额定电压DC 1 500 V。

根据文献[16-17]的研究,列车的激励荷载可以用简谐激振函数来表示:

$$P(t) = k_1 k_2 (P_0 + P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t + P_3 \sin \omega_3 t)$$

(1)

式中: $k_1,k_2$ 分别为叠加系数和分散系数,可分别根据列车的类型、轴重、车厢长度、行驶速度、铁轨和轨枕类型等参数进行确定( $k_1$ 取1.3, $k_2$ 取0.7); $P_0$ 为车轮的静载; $P_1,P_2,P_3$ 分别为考虑行车平稳性、附加荷载及轨面波形磨耗效应等三种控制条件下的低频、中频、高频振动荷载。 $P_i$ 与列车的簧下质量有关,其表达式为 $P_i = M_0 \alpha_i \omega_i^2, i = 1, 2, 3$ ,其中,



$M_0$  为列车的簧下质量;  $\alpha_i$  是对应不同条件下的矢高(几何不平顺);  $\omega_i = 2\pi v/\lambda_i$  ( $v$  为列车车速,  $\lambda_i$  为三种控制条件下选取的波长)。

借鉴国外高速铁路轨道不平顺的管理标准<sup>[18]</sup>, 同时考虑到我国城市轨道交通的短波不平顺性较差<sup>[19]</sup>的实际情况, 笔者采用以下三组轨道波长与矢高组合: ①  $\lambda_1 = 10$  m,  $\alpha_1 = 5.0$  mm; ②  $\lambda_2 = 1.0$  m,  $\alpha_2 = 0.5$  mm; ③  $\lambda_3 = 0.2$  m,  $\alpha_3 = 0.1$  mm。设定地铁列车车速为 80 km/h, 则由式(1)得到地铁列车振动荷载的时程曲线如图 5 所示。

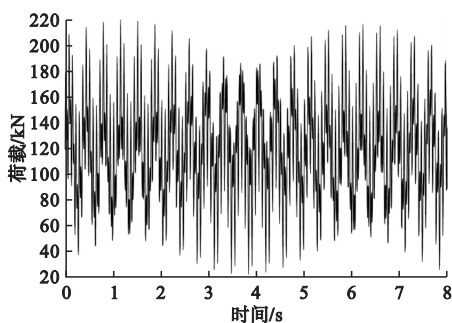


图 5 地铁振动荷载时程曲线

Fig. 5 The time history curve of subway vibration

在所建立的“土体-隧道-隔振墙”有限元模型中, 通过 Fortran 语言编程, 利用 VDLOAD 子程序在指定隧道路径的相应单元上实现列车振动荷载的定速移动, 从而模拟列车振动荷载的施加。

## 2 隔振墙减振评价指标

在所建立的“土体-隧道-隔振墙”模型中, 根据在地铁车致环境振动激励下已设定 11 个地表拾振点的振动响应, 能够对隔振墙的环境振动抑振能力和制振效果进行分析和评估。笔者主要采用插入损失为环境振动评价指标:

插入损失<sup>[20]</sup>是常用的评价减振效果的物理量:

$$L = 20 \lg \frac{a_{1,rms}}{a_{2,rms}} = 20 \lg \frac{a_{1,rms}}{a_0} - 20 \lg \frac{a_{2,rms}}{a_0} =$$

$$VAL_1 - VAL_2. \quad (2)$$

式中:  $L$  为插入损失, dB;  $VAL_i$  为振动加速度

级, dB,  $i = 1, 2$ ;  $a_{1,rms}$  为未采用减隔振措施时的均方根振动响应,  $m/s^2$ ;  $a_{2,rms}$  为采用减隔振措施时的均方根振动响应,  $m/s^2$ ;  $a_0$  为基准加速度, 一般取  $1.0 \times 10^{-6} m/s^2$ 。

插入损失可等效为采用减隔振措施前后的振动加速度级之差。若插入损失为正, 则表示系统隔振措施有效; 若插入损失为负, 则表示系统隔振措施无效。

## 3 隔振墙参数对减振性能的影响

笔者主要从 4 个参数变化来探讨其对隔振墙减振性能的影响: ①隔振墙自身几何尺寸(墙深  $h$ 、墙厚  $d$  及墙长  $L_0$ , 见图 1 和图 3); ②隔振墙位置  $s$  (这里指隔振墙与隧道轨道中心的地表投影线之间的水平距离, 见图 1); ③隔振墙设置排数; ④隔振墙填充物性质。

采用插入损失为评价指标对隔振墙的隔振效果进行评价, 为方便分析, 当研究某单一参量的影响时, 其他参量取值情况: 土为 II 类场地, 隔振墙的墙深、墙厚、墙长分别为 16 m、1 m、200 m, 隔振墙位置  $s = 10$  m, 隔振墙设置一排, 隔振墙填充物为刚性材料(砂砾石)。

### 3.1 隔振墙墙深的影响

设计 4 种隔振墙的墙深  $h$  分别为 8 m、12 m、16 m 和 20 m, 其他参量按默认值取值。图 6 为地铁列车振动荷载作用下, 各拾振点水平向、竖向的插入损失(横坐标为各拾振点与隔振墙之间的水平距离)。

由图 6 可知, 隔振墙墙深的增加, 能够提高隔振墙对地铁车致环境振动的阻隔作用; 隔振墙墙深从 8 m 增加到 20 m, 水平插入损失极值由 1.80 dB 提高到 3.00 dB, 竖向插入损失极值由 2.50 dB 提高到 5.80 dB; 在隔振墙后 0~4 m 区域, 存在一个振动扰动区, 使得该区域内的插入损失指标有一个突变式的减小; 隔振墙墙深达到或超过隧道埋深时, 墙

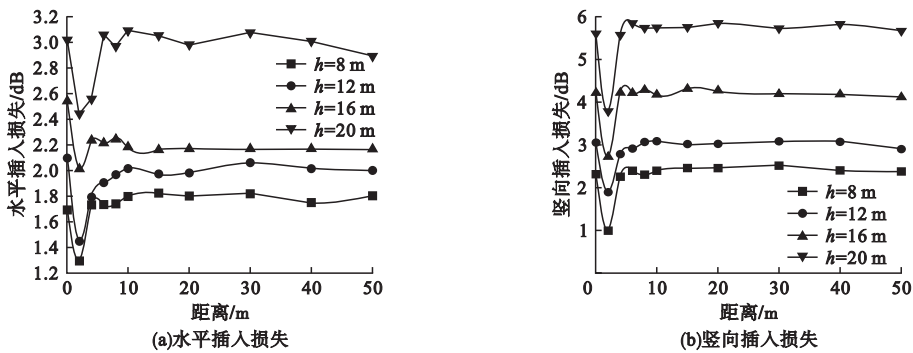


图6 不同墙深下的插入损失

Fig. 6 The insertion loss with different wall depths

深的增加对隔振效果的提升作用更为显著。

3.2 隔振墙墙厚的影响

设计4种隔振墙,墙厚 $d$ 分别为1 m、

1.5 m、2 m和2.5 m,其他参量按默认值取值。图7为各拾振点水平向、竖向的插入损失情况。

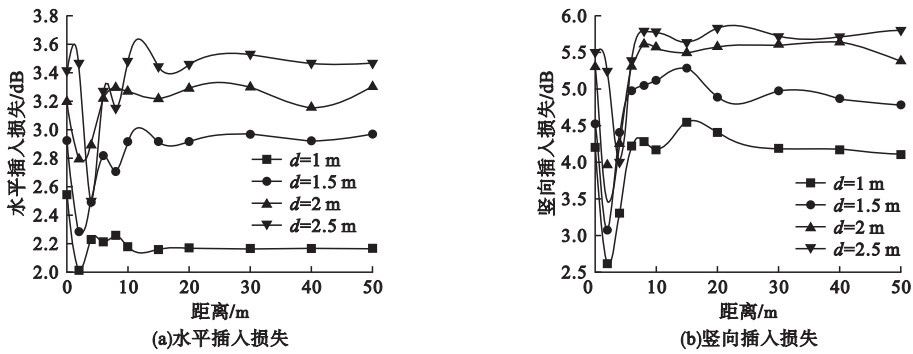


图7 不同墙厚下的插入损失

Fig. 7 The insertion loss with different wall thicknesses

由图7可知,隔振墙厚度从1 m增加到2.5 m,水平插入损失极值由1.80 dB提高到3.48 dB,竖向插入损失极值由4.54 dB提高到5.81 dB;隔振墙的厚度变化会对振动的传递产生有益影响,但效率相差不多。

3.3 隔振墙长度的影响

设计4种隔振墙长度 $L_0$ 分别为50 m, 100 m,150 m,200 m,其他参量按默认值取值。图8别为各拾振点水平向、竖向的插入损失情况。

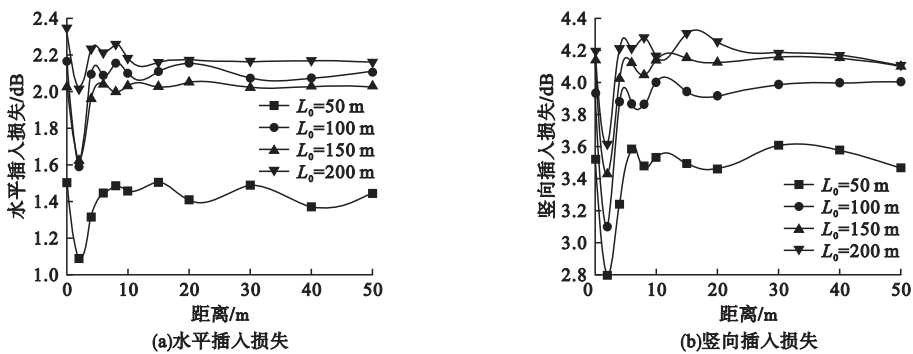


图8 不同墙长下的插入损失

Fig. 8 The insertion loss with different wall lengths

由图 8 可知,隔振墙长度从 50 m 增加到 200 m,水平插入损失极值由 1.50 dB 提高到 2.34 dB,竖向插入损失极值由 3.57 dB 提高到 4.31 dB;当隔振墙长度取 100 m 及以上时(即为隔振墙位置  $s$  的 10 倍以上),隔振效果能够提升到一个较高的水平,可以认为 100 m

或 10 倍隔振墙位置是隔振墙长度的门槛值。

**3.4 隔振墙位置的影响**

设计 4 种隔振墙位置  $s$  分别为 5 m、10 m、15 m 和 20 m,其他参量按默认值取值。图 9 为各拾振点水平向、竖向的插入损失情况。

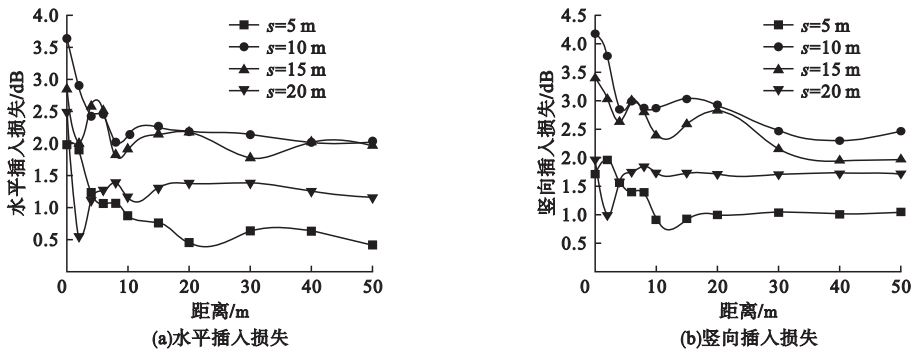


图 9 不同位置下的插入损失

Fig. 9 The insertion loss at different positions

由图 9 可知,隔振墙位置从 5 m 增加到 20 m,水平插入损失极值由 1.98 dB 提高到 3.63 dB,竖向插入损失极值由 1.95 dB 提高到 4.18 dB;隔振墙的最佳设置位置为与隧道轨道中心的水平距离在 10 ~ 15 m 内,为隧

道埋深的 1.25 ~ 1.875 倍。

**3.5 隔振墙排数的影响**

设计四种隔振墙排数分别为 1 排、2 排、3 排,间隔 5m,其他参量按默认值取值。图 10 为各拾振点水平向、竖向的插入损失情况。

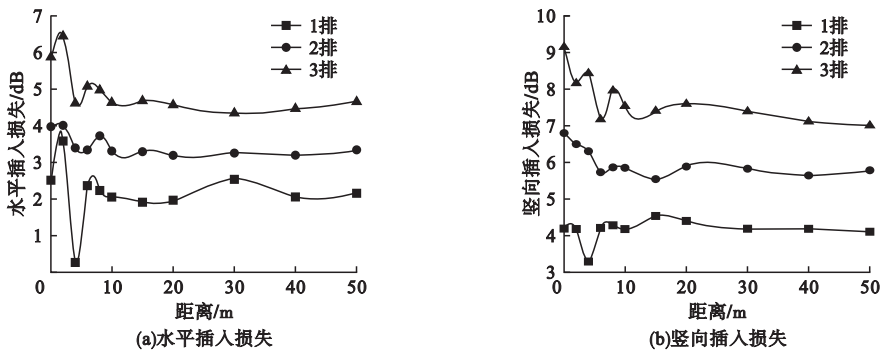


图 10 不同排数下的插入损失

Fig. 10 The insertion loss with different rows

由图 10 可知,隔振墙位置从 1 排增加到 3 排,水平插入损失极值由 3.60 dB 提高到 6.46 dB,竖向插入损失极值由 4.50 dB 提高到 9.12 dB;在土体中设置多排的废弃轮胎隔振墙,隔振效果较为明显,隔振效率较高。

**3.6 隔振墙填充物性质的影响**

设计隔振墙的填充材料分别为刚性材料

(砂砾石)和柔性材料(泡沫塑料)等两种,并考虑 4 类场地土条件,隔振墙的填充材料为刚性材料(砂砾石)、柔性材料(泡沫塑料),其他参量按默认值取值。图 11、图 12 分别为当隔振墙采用刚性、柔性填充材料时,各拾振点在不同场地土条件下水平向、竖向的插入损失情况。

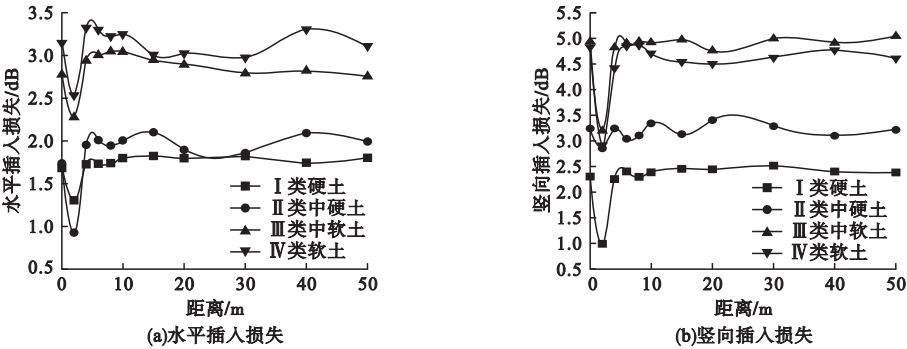


图 11 插入损失(刚性填充材料)

Fig. 11 The insertion loss( rigid filling materials)

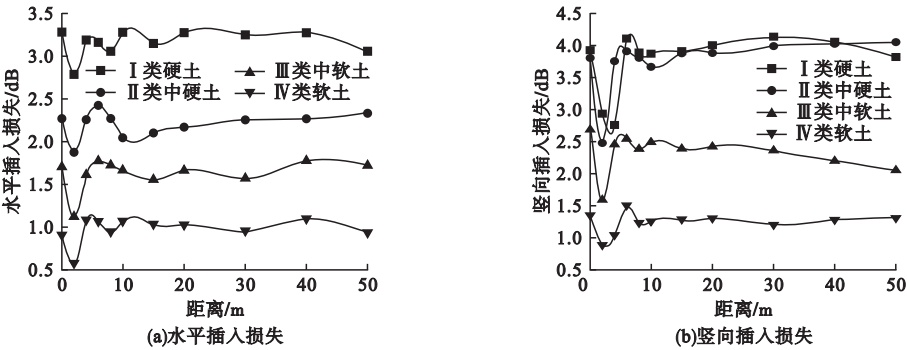


图 12 插入损失(柔性填充材料)

Fig. 12 The insertion loss( flexible filling materials)

由图 11、图 12 可知,在Ⅲ类中软土和Ⅳ类软土地条件下,由刚性填充材料组成的隔振墙对水平向振动和竖向振动的阻隔效果均较好,其水平向、竖向插入损失极值分别达到 3.33 dB 和 4.87 dB。对于由柔性填充材料组成的隔振墙而言,其对水平振动的抑制作用在Ⅰ类硬土地条件下更为显著,最大插入损失极值为 3.27 dB;而对于竖向振动的抑制作用,则在Ⅰ类硬土和Ⅱ类中硬土地条件下均更为有效,最大插入损失极值为 4.10 dB。由刚性填充材料组成的隔振墙更适合应用在软土地中,由柔性填充材料组成的隔振墙更适合用在硬土地中。

4 结 论

(1)隔振墙自身维度对其隔振效果有较大影响,其基本设计原则:墙深应达到或超过隧道埋深;墙厚不必过高考考虑,以 1 m 或 1 倍轮胎直径为度;墙长应大于等 100 m (或

10 倍隔振墙与振源间距)。  
(2)隔振墙的设置位置应考虑地铁隧道埋深,建议与隧道轨道中心的水平距离在 10 ~ 15 m,或为隧道埋深的 1.25 ~ 1.875 倍。  
(3)隔振墙的设置排数对土层中的振动衰减作用较大,建议设置 2 ~ 3 排。  
(4)隔振墙内填充材料的选择应考虑场地土类型,硬土或中硬土地要选择柔性填充,而软土或中软土地则选择刚性填充。

参考文献

[ 1 ] XUE Y, LI S, ZHANG D, et al. Vibration characteristics in subway operation and environmental responses of ancient buildings [J]. Polish journal of environmental studies, 2014, 23(1): 231 - 241.  
[ 2 ] 翟婉明. 轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
( ZHAI Wanming. Orbital coupling dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2007. )  
[ 3 ] BOWE C J, MULLARKEY T P. Wheel-rail contact elements incorporating irregularities [J]. Advances in engineering software, 2005,



- 36(11/12):827-837.
- [4] THOMPSON D. Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control [M]. UK: Oxford, Elsevier Science, 2009.
  - [5] 孙晓静,刘维宁,张宝才. 浮置板轨道结构在城市轨道交通减振降噪上的应用[J]. 中国安全科学学报, 2005(8): 65-69.  
(SUN Xiaojing, LIU Weining, ZHANG Baocai. Application of floating slab track framework for vibration and noise control in urban rail traffic [J]. China safety science journal, 2005(8): 65-69.)
  - [6] 任巍. 地铁振动对博物馆建筑影响及控制措施分析[J]. 博物院, 2021(2): 124-129.  
(REN Wei. Analysis of control measures for metro vibration and its impact on museum building [J]. Museum, 2021(2): 124-129.)
  - [7] FIALA P, DEGRANDE G, AUGUSZTINOVICZ E. Numerical modelling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic [J]. Journal of sound and vibration, 2007, 301(3/4/5): 718-738.
  - [8] ANDERSEN L, NIELSEN S R K. Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway tract [J]. Soil dynamic and earthquake engineering, 2005, 25(27): 701-716.
  - [9] 屈阳. 隔振屏障对地铁列车低频振动隔振效果研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.  
(QU Yang. Study on vibration isolation effect of vibration isolation barrier on low frequency vibration of subway train [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.)
  - [10] 栗润德. 地铁列车引起的地面振动及隔振措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.  
(LI Runde. Research on ground vibration and vibration isolation measures caused by subway train [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.)
  - [11] KHAN R A, SHALABY A. Performance of a road base constructed with shredded rubber tires [C]//The proceeding of annual conference. Montreal, Quebec, Canada: Canadian Society for Civil Engineering, 2002: 2513-2522.
  - [12] 郭永青. 废旧轮胎在土木工程中的应用综述[J]. 科技创新与应用, 2013(2): 175.  
(GUO Yongqing. A review of the application of waste tires in civil engineering [J]. Science and technology innovation and application, 2013, (2): 175.)
  - [13] 李湘洲. 发达国家废旧轮胎回收利用经验及借鉴[J]. 再生资源与循环经济, 2013, 6(3): 40-44.  
(LI Xiangzhou. Experience and reference of waste tire recycling in developed countries [J]. Renewable resources and circular economy, 2013, 6(3): 40-44.)
  - [14] 王凤池, 田裴裴, 冯旭宁, 等. 废弃橡胶轮胎构造地基有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(5): 867-874.  
(WANG Fengchi, TIAN Peipei, FENG Xuning, et al. Finite element analysis of structural foundation of waste rubber tire [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(5): 867-874.)
  - [15] 杨尚福. 不同土体条件下地铁列车引起的环境振动及建筑物二次结构噪声分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.  
(YANG Shangfu. Analysis of environmental vibration and secondary structure noise caused by subway trains under different soil conditions [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.)
  - [16] 梁波, 罗红, 孙常新. 高速铁路振动荷载的模拟研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(4): 89-94.  
(LIANG Bo, LUO Hong, SUN Changxin. Simulation study on vibration load of high-speed railway [J]. Journal of the China railway society, 2006, 28(4): 89-94.)
  - [17] 苏卫东. 重载铁路沿线民房中儿童床及隔振沟减振研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.  
(SU Weidong. Study on vibration damping of children's beds and vibration isolation ditches in private houses along heavy-haul railway [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.)
  - [18] 田国英, 高建敏, 翟婉明. 高速铁路轨道不平顺管理标准的对比分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(3): 64-71.  
(TIAN Guoying, GAO Jianmin, ZHAI Wanming. Comparative analysis of track irregularity management standards for high-speed railways [J]. Journal of the China railway society, 2015, 37(3): 64-71.)
  - [19] 李再伟, 练松良, 李秋玲, 等. 城市轨道交通轨道不平顺谱分析[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(5): 83-87.  
(LI Zaiwei, LIAN Songliang, LI Qiuling, et al. Characteristic analysis of track irregularity spectrum of urban rail transit [J]. Journal of east China jiaotong university, 2011, 28(5): 83-87.)
  - [20] 赵彦辉. 地铁车辆段列车振动对邻近建筑物影响及隔振措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
(ZHAO Yanhui. Study on the influence of train vibration on neighboring buildings in metro depot and vibration isolation measures [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)