

# 地铁致某近代建筑振动分析及减隔振措施研究

杨维国, 李 昊, 郝景凯

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 地铁运行引起的振动通过土层传播, 会对邻近建筑物产生不利影响。以某地铁沿线近代历史保护建筑为背景, 依据建筑结构参数及土层实测数据建立“隧道-土体-保护建筑”精细化三维数值模型, 并结合振动响应预测分析方法对地铁运行时建筑物振动响应进行评估。从振源减振及过程阻振两方面对其减振效果进行量化分析和参数优化研究。结果表明: 在未采取减隔振措施的情况建筑物振动超限, 优化轨道类型的减振效果最为显著, 使用弹性长枕轨道时结构 Z 振级可降低 8.2~11.2 dB; 使用钢弹簧浮置板轨道可使结构 Z 振级降低 14.9~18.9 dB。过程阻振措施中, 隔振墙的隔振性能对墙体材料特性最为敏感, 深度及厚度其次; 其中 EPE 泡沫材质墙体隔振效果最优, 可使结构 Z 振级降低 10.6~11.5 dB, 水平速度峰值约 75%; 增加隔振墙厚度及埋深在一定程度上提升了隔振性能, 但隔振效果增量不显著。提出了一种快速计算隔振墙隔振效果的预测方法, 该研究可为类似工程的振动分析以及减隔振措施设计提供参考依据。

**关键词:** 振动分析; 振源减振; 过程阻振; 隔振墙; 隔振效果

**中图分类号:** TB533+.2; U231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)01-0147-12

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.01.016

## 引 言

近年来, 由于地铁建设规模的逐渐增大, 地铁线路越来越靠近建筑物, 这不可避免地对地铁沿线建筑的结构安全性和性能产生较大影响<sup>[1-2]</sup>。随着人们振动防护意识的提高, 对古代建筑的保护力度不断增大, 振动控制标准也日趋严格<sup>[3-5]</sup>。现代建筑也由于建设水平的不断提高, 可以在设计阶段采取各种隔振措施如添加隔振垫层、加厚建筑物底板及设置隔振支座等以抵消振动的影响。然而对于近代历史建筑, 由于其自身的局限性只能采取振源减振、过程阻振的减隔振措施, 目前相关的研究保护工作尚未深入。

常用的振源减振措施包括车辆、轨道和隧道结构减振等。如采用轻型化的车型、使用“整体化”道床来降低路基的振动加速度, 典型的轨道减振常采用梯形轨枕, 钢弹簧浮置板<sup>[6-8]</sup>等。Wilson 等<sup>[9]</sup>通过对钢轨动力吸振器的研究发现, 吸振器能够在宽频域内起到阻尼作用, 使钢轨竖向振级降低 7~10 dB。金浩等<sup>[10]</sup>结合 Bloch 定理, 建立了钢轨元胞模型, 并且对比了剪切型减振器钢轨相对于普通钢轨在竖向振级的衰减情况。当振源减振不能满足规定标准、或者振源无法采取减振措施时, 可在振源与受振体

之间采取隔振措施进行过程阻振<sup>[11-12]</sup>。姚锦宝等<sup>[13]</sup>通过对比空沟外侧在有无隔振沟条件下的振幅值, 发现隔振沟对瑞利波的隔振效果较好, 空沟外侧的土体振动随着空沟深度的增加衰减得更多。刘晶磊等<sup>[14]</sup>研究了隔振沟槽深度、宽度及其位置等几何参数对隔振效果的影响, 结果表明沟槽的深度和振源距离是影响隔振效果的重要因素, 沟槽宽度对隔振效果影响相对较小。此外, 学者也针对隔振排桩的减振效果进行了研究, 文献<sup>[15-16]</sup>对多排桩屏障被动隔振进行了一系列的现场试验和模拟分析, 分析并提出了多排桩的参数对隔振效果的影响。孙军等<sup>[17]</sup>通过现场实测比较了多排桩与蜂巢桩的不同减振效果。

以上研究成果中, 大多将研究目标锁定在单参数对隔振效果的影响, 较少对多参数进行量化分析。此外针对近代历史建筑, 不同措施减振效果的综合对比分析也比较少。

## 1 地铁致建筑物振动响应分析方法

有限元数值方法可对未建成地铁及建筑结构的动力响应特性进行预测分析, 这就需要建立高效精确的计算分析模型。基于此, 本文给出了一个数值

**收稿日期:** 2021-07-15; **修订日期:** 2021-09-22

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1521000); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020YJS120, 2020JBZ110)。

建模与分布实测验证相结合的地铁致结构振动响应预测方法和流程,如图1所示。

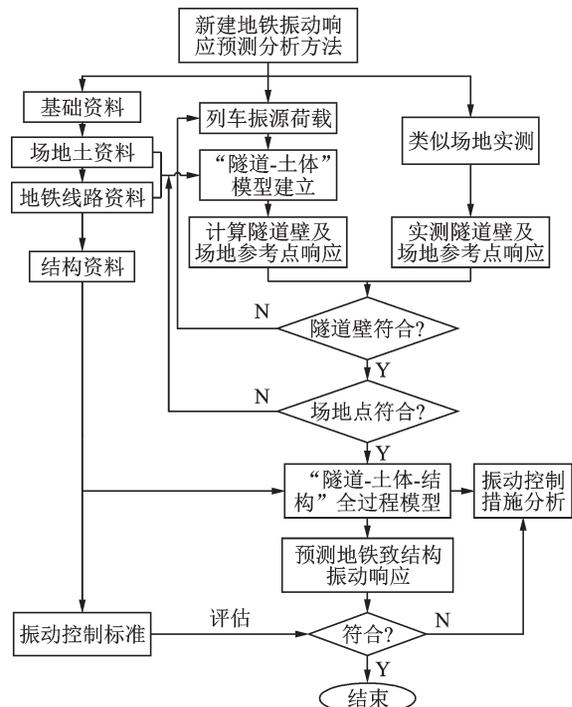


图1 预测分析方法流程图

Fig. 1 Flow chart of prediction method

首先对拟建地铁及附近建筑物场地土条件进行勘测,结合相关线路资料建立精细化“隧道-土体”有限元模型。通过类似场地实测得到相同隧道形式,及在列车运行条件下隧道壁及场地内反映地铁振动随距离衰减规律参考点的振动响应,并基于实测数据对数值模型参数进行校核和优化。在最终保证隧道壁及地表振动响应情况与实测结果吻合良好的前提下,进而添加建筑物模型以开展结构振动的预测分析。在此基础上,通过多工况对比计算,分析振源减振及过程阻振控制措施对建筑物的减隔振效果及相关参数的影响规律。

本方法基于实测场地土地表振动数据,通过对比验证可在一定程度上减少“振源-土体”传播路径上的计算误差。同时,由于误差对建筑物结构建模的影响因素较少,因此可以较精确预测地铁建成后对既有保护建筑振动响应的影响,并开展后续振动控制措施的分析研究。

## 2 结构振动响应分析

### 2.1 线路及建筑结构概况

某近代国家级历史保护建筑群建于20世纪40年代,是典型的苏式砖混结构,该建筑群附近拟修建一条双线双洞地铁线路,采用土压平衡盾构法施工,区间隧道埋深17~24 m,隧道上壁顶部距离地面约

17.7 m,轨面埋深约23.2 m。建筑群中,离地铁最近的10号楼建筑西侧墙体边缘距离轨道左线的水平距离仅为8.8 m,距隧道中心距离为16 m。建筑地面高度约14.5 m,采用灰土地基,基础形式为条形基础,埋深2.1 m。建筑物与地铁线路空间关系如图2所示。

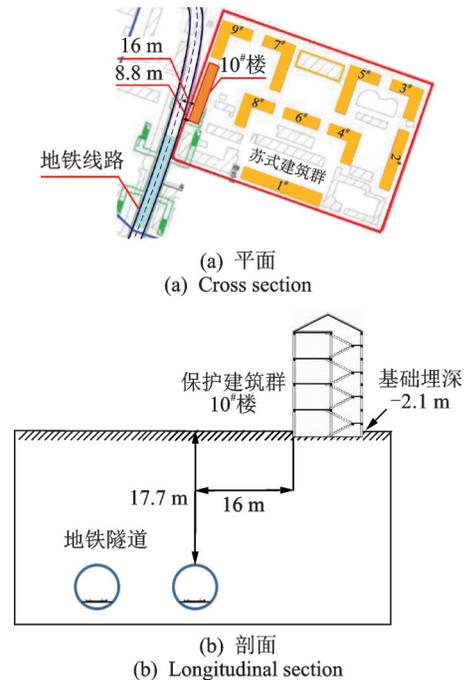


图2 建筑物及地铁空间位置关系

Fig. 2 Locations of architecture and metro

### 2.2 有限元分析模型

#### 2.2.1 土层动力学参数

通过现场地质勘测获得土体动力学参数,为了建模和计算方便,在实测地勘基础上将土层进行简化,从上至下依次分层。分析模型中各简化土层的物理指标如表1所示。

表1 土体动力学参数

Tab. 1 Soil dynamics parameters

土层	厚度/ m	弹模/ MPa	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	泊松 比	剪切 波速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	粘聚力/ kPa	内摩 擦角/ ( $^{\circ}$ )
杂填土	2.10	95	1.75	0.18	120	22.6	12.3
粉黏土	12.75	228	1.97	0.29	211	25.7	18.3
黏土	12.00	362	1.95	0.31	240	19.2	23.3
卵石	12.00	641	2.20	0.22	260	0	37.1
泥岩	9.00	471	1.98	0.17	420	38.9	20.7

#### 2.2.2 网格尺寸及单元参数选取

相关研究表明<sup>[18]</sup>,单元的边长在距离荷载作用点 $0.5\lambda$ ( $\lambda$ 为土层剪切波长)处,最大取值为 $\lambda_s/12$ ,而在距离荷载作用点超过 $0.5\lambda$ 处,单元的边长只需

要小于 $\lambda/6$ ,即可获得较为理想的计算精度。根据上述研究,模型网格尺寸取1~3 m长度范围,整体模型尺寸为X向121 m,Y向105 m,Z向48 m,振动随着距离的增加不断衰减,高频振动逐渐减弱,为方便计算,模型中振源附近网格尺寸较小,随着距离的增加网格逐渐稀疏,最大网格尺寸为3 m×3 m×3 m。振动波在混凝土结构传播速度为2400 m/s,考虑地铁振动频率分布范围在100 Hz范围内,因此振动波在建筑结构中传递的最小剪切波长为24 m,在网格划分时梁、板、柱的单元尺寸要小于3 m,经过多次尝试,模型中所有板单元的网格划分单元尺寸取为1 m,梁、柱的网格划分单元尺寸取为0.5 m。

土体及结构基础通过8节点的三维实体单元solid185模拟,隧道衬砌及结构楼板使用4节点的壳单元shell63模拟。地铁列车运行引起的建筑结构振动量级很小,相应的土层变形也很小,此时地层完全处于弹性变形阶段。在变形较小的条件下,结构基础与周围土层之间始终保持接触,不会出现相互分离的情况。因此通过共用节点的方式模拟土体与建筑结构基础之间的接触。结构梁和柱采用2节点三维线性梁单元beam188模拟,具有承受轴向拉压力及受弯的能力。楼板及墙体采用4节点三维弹性壳单元shell181模拟,每个节点均包含3个X,Y,Z方向的位移及转角自由度。隧道衬砌及轨道板采用C40混凝土,弹性模量为32.5 GPa,衬砌厚度为0.3 m;建筑楼板、梁、柱均采用C30混凝土,弹性模量为30 GPa,基于上述参数建立的整体有限元模型如图3(a)所示。

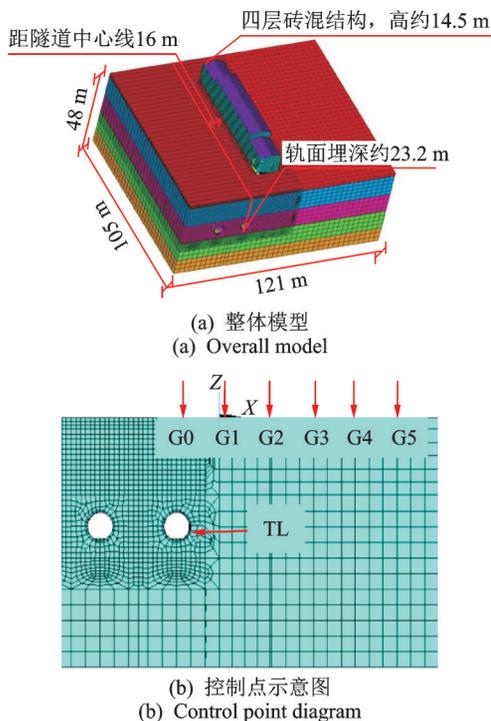


图3 整体三维有限元模型

Fig. 3 Three-dimensional model of finite element

### 2.2.3 边界条件处理

在模型尺寸合理前提下,为使计算结果更加精确,拟采用黏弹性人工边界。根据刘晶波等<sup>[19]</sup>提出的等效边界实体单元来替代空间分布的“弹簧-阻尼”原件理论,三维一致黏弹性人工边界单元的等效剪切模量 $\tilde{G}$ 和等效弹性模量 $\tilde{E}$ 分别为:

$$\tilde{G} = hK_{BT} = \alpha_T h \frac{G}{R} \quad (1)$$

$$\tilde{E} = \frac{(1 + \bar{\nu})(1 - 2\bar{\nu})}{1 - \bar{\nu}} hK_{BN} = \alpha_N h \frac{G(1 + \bar{\nu})(1 - 2\bar{\nu})}{R(1 - \bar{\nu})} \quad (2)$$

$$\bar{\nu} = \begin{cases} \frac{\partial - 2}{2(\partial - 1)}, & \partial \geq 2 \\ 0, & \partial < 2 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $G$ 和 $\tilde{G}$ 为介质剪切模量及等效剪切模量, $\tilde{E}$ 为等效弹性模量, $R$ 为振源至人工边界点的距离, $K_{BN}$ 和 $K_{BT}$ 为弹簧法向刚度和切向刚度, $h$ 为边界单元的厚度, $\bar{\nu}$ 为等效泊松比, $\partial$ 为法向修正系数 $\alpha_N$ 和切向修正系数 $\alpha_T$ 的比值,本文相关参数取值如表2所示。

表2 切向和法向修正系数

Tab. 2 Tangential and normal correction factors

人工边界参数	取值范围	推荐系数
$\alpha_T$	0.5~1.0	0.67
$\alpha_N$	1.0~2.0	1.33

### 2.2.4 阻尼特性

采用Rayleigh阻尼定义有限元模型的阻尼特性,假定系统的阻尼矩阵是质量矩阵以及刚度矩阵的线性组合,即:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4)$$

式中 $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为质量和刚度阻尼系数。根据振型正交条件,待定系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 与振型阻尼比之间满足关系:

$$\xi = \frac{\alpha \omega_1}{2} + \frac{\beta \omega_1}{2} \quad (5)$$

取两个振型频率 $\omega_i$ 和 $\omega_j$ ,与其对应的振型阻尼比为 $\xi_i$ 和 $\xi_j$ ,分别将其代入式(5)并求解,可得到式(4)中的阻尼系数 $\alpha$ 和 $\beta$ :

$$\alpha = \frac{2(\xi_i \omega_j - \xi_j \omega_i)}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)} \omega_i \omega_j \quad (6)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_j \omega_i - \xi_i \omega_j)}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)} \quad (7)$$

综合考虑阻尼的影响,本文选取整体模型的阻尼比为0.03, $\omega_i$ 和 $\omega_j$ 分别取两个地铁振动所关心的频段的端点值10 Hz与80 Hz<sup>[20]</sup>,通过式(6)和(7)得

出阻尼系数  $\alpha=0.53, \beta=6.67 \times 10^{-4}$ 。

2.2.5 列车荷载模型及输入

本文中地铁车型为B1型车,设计时速为80 km/h,在计算时考虑采用4节车厢模型,每节车厢包括了1列列车车体、2个列车转向架以及4组列车轮对。其中每个车体以及每个转向架均具有Y,Z,RX,RY,RZ共五个方向的自由度,每对轮对具有Y方向的自由度<sup>[21]</sup>,以车辆初始静力平衡位置为坐标原点,其中顺轨向为X向,竖直垂轨向为Z向。车辆及轨道动力学模型如图4所示,其车辆动力参数如表3所示<sup>[6]</sup>。

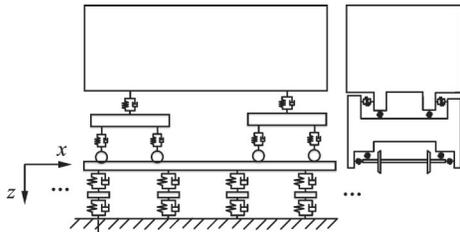


图4 车辆-轨道动力学模型

Fig. 4 Dynamics model of train-track system

表3 车辆动力学参数

Tab. 3 Dynamics parameters of track

参数名称	取值	参数名称	取值
车体质量/kg	27000	一系横/纵向刚度/(kN·m <sup>-1</sup> )	1517
转向架质量/kg	2972	一系垂/横/纵向阻尼/(kN·s·m <sup>-1</sup> )	15
轮对质量/kg	2972	二系垂向刚度/(kN·m <sup>-1</sup> )	245
车轮直径/m	0.84	二系横/纵向刚度/(kN·m <sup>-1</sup> )	118
一系横/纵向刚度/(kN·m <sup>-1</sup> )	1517	二系垂/横/纵向阻尼/(kN·s·m <sup>-1</sup> )	35

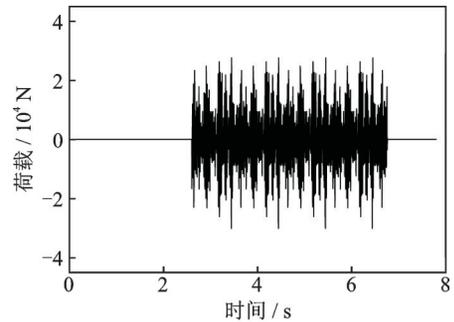
轨道结构采用广义梁单元理论<sup>[22]</sup>,不同轨道形式考虑轨道板及钢轨、扣件、弹性垫层等因素的影响,与车辆系统作为2个分体(图4)。基于Hertz非线性接触理论<sup>[22]</sup>确定轮轨之间的相互作用,并通过轨道随机不平顺谱<sup>[23]</sup>使得车辆和轨道系统产生振动。利用作者所在单位自编分析软件DRVB,该分析软件将车辆与轨道等效为多自由度的连续体,假定车辆横向与竖向不发生耦合运动,采用Newmark数值积分进行迭代计算。输入实际地铁列车(4节编组的标准B1型地铁列车)及轨道参数可计算得到不同道床基础条件下作用于基底的列车荷载,轨道详细参数如表4所示<sup>[24]</sup>。

B1型车在连续时刻下沿普通道床运行方向的移动荷载如图5(a)所示,将其用作施加于轨道基底作为振源激励。采用瞬态动力分析,沿隧道方向每间隔3 m设置连续的加载点,加载示意如图5(b)所示,共35个加载点。计算时间积分步长取1/256 s,

表4 轨道参数

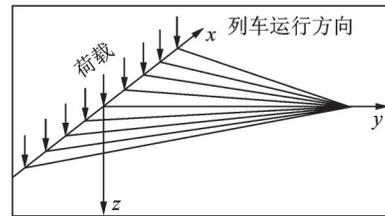
Tab. 4 Parameters of track

参数名称	取值	参数名称	取值
钢轨质量/(kg·m <sup>-1</sup> )	121	浮置板抗弯模量/(N·m <sup>2</sup> )	4.1×10 <sup>8</sup>
钢轨弹模/(N·m <sup>-12</sup> )	2.1×10 <sup>11</sup>	浮置板长度/m	30
钢轨截面惯性矩/m <sup>4</sup>	6.4×10 <sup>5</sup>	钢弹簧刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	5.3×10 <sup>6</sup>
扣件刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	6×10 <sup>7</sup>	钢弹簧阻尼/(N·s·m <sup>-1</sup> )	2.5×10 <sup>4</sup>
扣件阻尼/(N·s·m <sup>-1</sup> )	3×10 <sup>4</sup>	长枕质量/kg	310
扣件间距/m	0.6	弹性垫层刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	2×10 <sup>7</sup>
浮置板质量/(kg·m <sup>-1</sup> )	2500	弹性垫层阻尼/(N·s·m <sup>-1</sup> )	6×10 <sup>4</sup>



(a) 第18加载点荷载时程

(a) Time history of the 18th loading point



(b) 加载示意图

(b) Loading location

图5 列车荷载时程及加载示意图

Fig. 5 Load-time curve and loading location

可获取128 Hz的振动频率计算结果,满足振动频率计算精度要求。

2.3 振源及场地实测验证

基于地铁线路设计参数(双线双洞),列车车型(B1型),运行速度(80 km/h),隧道形式(马蹄形)及地质条件等因素,选取某类似地段地铁线路进行测试,分析实际列车运行时隧道壁及地面振动响应,为模型验证提供依据。其中隧道内选取高于轨面1.25 m处的隧道壁测点,如图6所示。地面上距隧道水平距离10~60 m处均匀布置6个测点,分别对应模型中G0~G5共6个提取点,各测点间距10 m。测试采用北京东方振动和噪声技术研究所出厂的INV3018高精度采集仪,加速度传感器为中国地震

局工程力学研究所出厂的 941B 型超低频拾振器,采样频率取为 512 Hz。由于轨道交通运行引起的振动以竖向振动为主,因此各测点均采集竖向振动加速度响应。共测 10 个车次,隧道壁典型竖向加速度时程如图 7 所示。



图 6 振源现场实测图

Fig. 6 Field measurement of vibration source

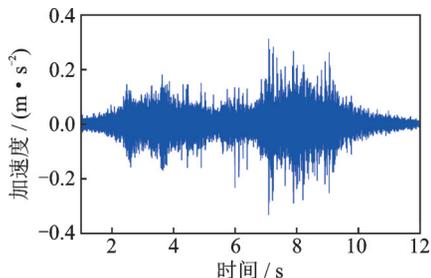


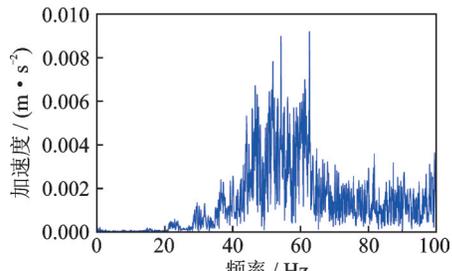
图 7 实测隧道壁加速度时程

Fig. 7 Measured acceleration time history of tunnel wall

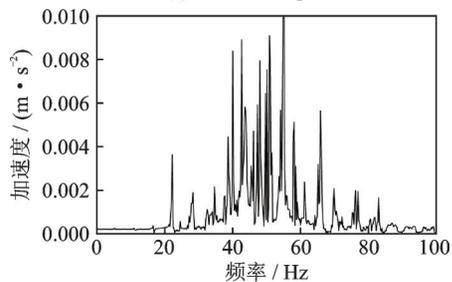
在模型中施加列车荷载,提取隧道右壁距地面 1.25 m 处点 TL,隧道正上方地面处点 G0,地面上距隧道水平距离 10~60 m 处 G0~G5 测点(见图 3(b))的加速度时程。图 8 分别给出了实测及模拟得出的隧道壁加速度频谱对比。从图中可以看出,两者的隧道壁振动频率均主要集中在 40~70 Hz 区间,峰值频率位于 60 Hz 附近。参考《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)<sup>[25]</sup> 振动评价标准,地铁列车运行引起的环境振动采用铅垂向最大 Z 振级 VL<sub>Z</sub> 作为评价指标。将时程分析结果进行傅里叶变换,得到各频段下土体分频振动加速度级,并对其进行综合计权修正得到各提取点的振动量级,如下式所示:

$$VL_z = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^n 10^{20 \lg \frac{a_{ms}}{a_0} + a_i / 10} \right) \quad (8)$$

式中  $a_{ms}$  为加速度有效值,  $a_0$  为基准加速度值,取  $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ ,  $a_i$  为各中心频率下的计权因子。将有限元计算得出的隧道壁振级与《地铁噪声与振动控制规范》(DB11/T 838—2019)<sup>[26]</sup> 中附录所列振源强度参考值以及某类似地铁线路实测得到的隧道壁振级<sup>[27]</sup> 进行对比,如表 5 所示。



(a) 实测频谱图  
(a) Measured spectrum



(b) 模拟频谱图  
(b) FEM Spectrum

图 8 隧道壁加速度频谱对比

Fig. 8 Comparison of acceleration spectrum of tunnel wall

表 5 隧道壁振级对比

Tab. 5 Vibration levels comparison of tunnel wall

数据类型	道床类型	地铁线路 (北京市)	Z 振 级/dB	加速度峰 值/(m·s <sup>-2</sup> )
实测均值	普通道床	14 号线	84.9	0.31
文[26]中振源 强度参考值	普通道床	5,6,10,14 号线	78.8~ 87.5	—
数值计算	普通道床	—	85.3	0.33

从表 5 中可以看出,实测隧道壁振级为 84.9 dB,规范中所给出的参考值在 78.8~87.5 dB 之间。本文施加模拟普通道床轨道的荷载计算得到的隧道壁振级为 85.4 dB,与实测结果及规范给出的参考值基本一致。地面点加速度响应对比结果如表 6 所示。可知,现场实测的加速度峰值与有限元计算得到的竖向加速度峰值误差均在 10% 以内,且随着距离的增加,实测及有限元计算所得振级衰减规律

表 6 现场实测与有限元计算结果对比

Tab. 6 Field measurement and finite element calculation results

测点	与隧道中 心线距离/ m	竖向加速度峰 值/(m·s <sup>-2</sup> )		误差/ %	竖向振动加速 度级/dB	
		实测	模拟		实测	模拟
G0	0	0.075	0.081	8.0	78.1	78.7
G1	10	0.063	0.068	7.9	76.3	76.9
G2	20	0.050	0.054	8.0	74.5	75.1
G3	30	0.032	0.034	6.3	70.5	70.9
G4	40	0.021	0.023	9.5	68.4	69.1
G5	50	0.019	0.020	5.2	66.5	66.7

相近,表明本文所采用的列车荷载、激励的输入方式以及建立的有限元模型均符合实际情况,基于该模型可开展后续分析。

### 3 振源减振效果分析

#### 3.1 振动控制标准

为评估地铁运行所致建筑物振动响应,依据《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)<sup>[25]</sup>和《古建筑防工业振动技术规范》(GB/T 50452—2008)<sup>[28]</sup>,综合考虑各个评价指标,采取表7作为本建筑的振动控制标准。

表 7 建筑振动控制标准

Tab. 7 Standard for vibration control of buildings

保护等级	竖向 Z 振级/dB	水平向速度/(mm·s <sup>-1</sup> )
全国重点文物保护单位	67	0.2

#### 3.2 减振道床

地铁线路临近敏感建筑区段拟采用多种振源减振措施以降低列车振动影响,包括设置各型减振道床等。为了分析减振道床对建筑物振动响应的影响,采用钢弹簧浮置板道床及弹性长枕道床时的振源荷载,如图9所示。将荷载施加于模型中,加载位置同前一致。建筑物提取点如图10所示,Z1,Z2,

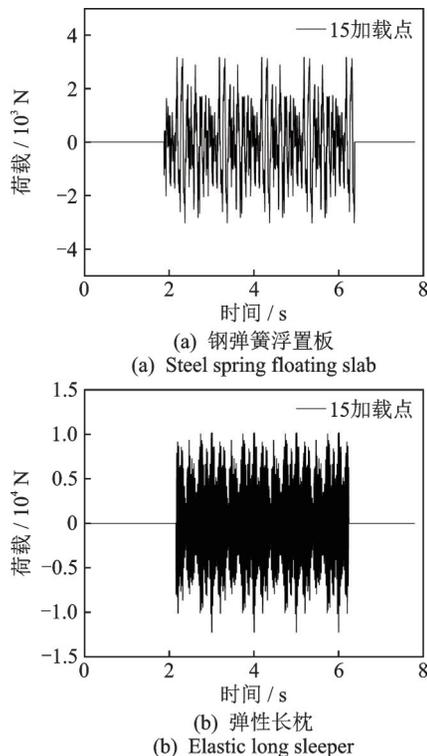


图 9 不同道床类型下的荷载时程

Fig. 9 Load-time history under different ballast bed

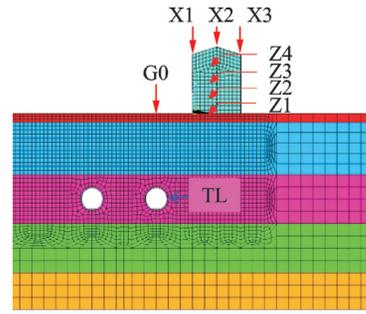


图 10 控制点的空间分布图

Fig. 10 Spatial distribution of extracted points

Z3,Z4 四个竖向加速度提取点分别为楼体长度方向中部房间区域 1F,2F,3F,4F 左侧的楼板中心的点,G0 距离上部结构左侧墙体边缘 9 m。结构顶部三个水平向速度提取点 X1,X2,X3 分别位于上部结构-楼体长度方向中部左墙壁上顶点,中间墙壁上顶点以及右墙壁上顶点。

不同道床类型下典型楼层加速度时程如图 11 所示。将加速度时程结果通过傅里叶变换进行频域分析,以 Z1 层为例,其 1/3 倍频程谱如图 12 所示。从图中可以看出,浮置板轨道对结构 1~5 Hz 频段竖向振动基本不起作用,对 5~12.8 Hz 的振动产生放大效应,放大效果为 2~8 dB,而对 12.8 Hz 以上频段起到减振作用,最大减振在 32 dB 以上。弹性长枕轨道在 1~8 Hz 的低频段减振效果不显著,而随着频段的升高减振效果越显著,最大减振在 80 Hz 频段,减振效果约 23 dB。

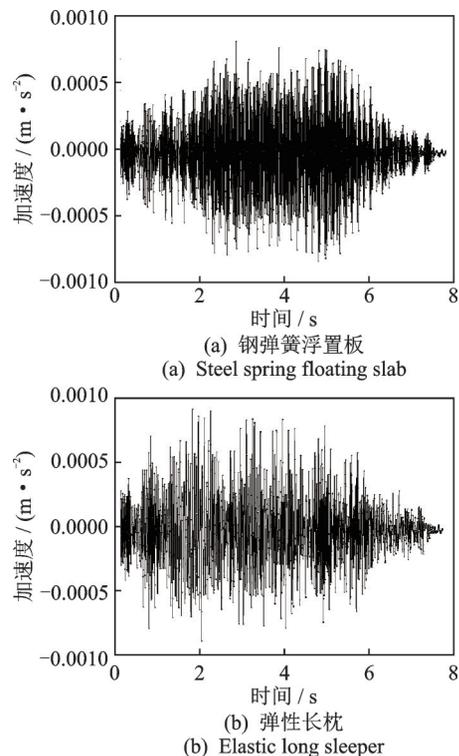


图 11 Z1 楼层加速度时程

Fig. 11 Acceleration time history of Z1 floor

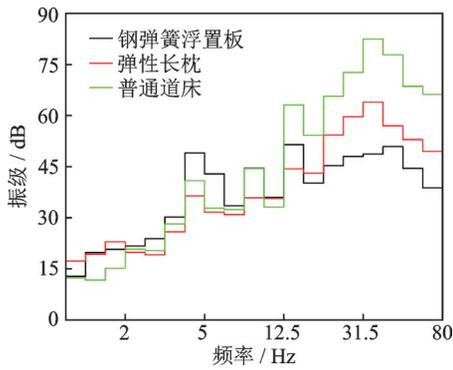


图 12 Z1层 1/3倍频程

Fig. 12 1/3 octave vibration level of Z1 layer

各楼层振动加速度峰值  $PGA$  以及  $Z$  振级  $VL_z$  如表 8 所示。通过与普通道床轨道对比可知,当采用弹性长枕时,建筑物  $Z$  振级最大值位于地面一层,为 66.2 dB,各楼层  $Z$  振级减小约 8.2~11.2 dB,加速度峰值减小约 0.023~0.059  $m/s^2$ ;当采用钢弹簧浮置板道床时,Z1~Z4 加速度  $Z$  振级为 58.1~54.2 dB,减小约 14.9~18.9 dB。可见升级轨道类型对各建筑楼层具有明显的减振效果,而钢弹簧浮置板轨道减振效果优于弹性长枕。

表 8 不同轨道类型下结构振动响应

Tab. 8 Vibration response of different track types

测点	普通道床		弹性长枕		钢弹簧浮置板	
	$VL_z/$ dB	$PGA/$ ( $mm \cdot s^{-2}$ )	$VL_z/$ dB	$PGA/$ ( $mm \cdot s^{-2}$ )	$VL_z/$ dB	$PGA/$ ( $mm \cdot s^{-2}$ )
Z1	76.4	68.3	66.2	8.4	58.1	0.83
Z2	75.2	46.8	63.7	6.8	56	0.72
Z3	71.9	49.2	61.1	8.2	55.2	0.65
Z4	69.8	27.4	60.9	3.7	54.2	0.58

表 9 为不同轨道类型下的各测点的水平向速度响应峰值。通过对比可知,当采用弹性长枕时,结构提取点 X1, X2, X3 的水平向速度减小约 0.38~0.45  $mm/s$ 。当采用钢弹簧浮置板道床时,水平向速度减小约 0.48~0.50  $mm/s$ 。从以上分析可知,采用弹性长枕时建筑物各楼层竖向  $Z$  振级及水平向速度峰值均基本符合振动控制标准,采用钢弹簧浮置板轨道时建筑物振动响应已远小于标准,因此升级轨道类型是一种有效的减振措施。

表 9 各测点水平速度响应峰值

Tab. 9 The peak horizontal velocity of each point

轨道类型	速度响应峰值/( $mm \cdot s^{-1}$ )		
	X1	X2	X3
普通道床	0.61	0.62	0.61
弹性长枕	0.17	0.18	0.18
钢弹簧浮置板	0.11	0.12	0.13

## 4 地下连续墙减振效果分析

### 4.1 参数设计

当振源减振不适用或不能达到预期效果,且鉴于历史保护建筑自身隔振的局限性,可通过设置隔振墙等屏障进行过程阻振。隔振墙布置简便且有着较好的隔振性能,可灵活应用于实际工程。为研究隔振墙对建筑物振动响应的影响,分别对不同深度、厚度以及材料属性的隔振墙进行隔振效果计算分析。隔振墙设置于轨道与建筑物中间,沿隧道纵向宽度与建筑物齐平,距离上部结构左侧墙体边缘约 4 m,如图 13 所示,隔振墙计算工况如表 10 所示。

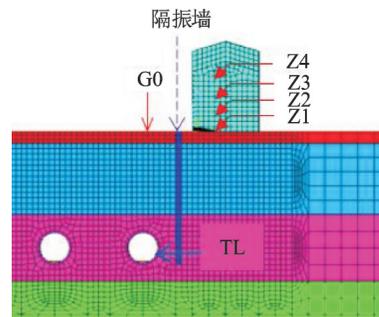


图 13 隔振墙示意图

Fig. 13 Location of vibration isolation wall

表 10 隔振墙计算工况表

Tab. 10 The calculation condition of vibration isolation wall

工况	厚度/m	深度/m	材料
0	-	-	无隔振
1	0.8	17.7	C30
2	0.8	23.9	C30
3	0.8	26.8	C30
4	0.4	23.9	C30
5	1.2	23.9	C30
6	0.8	23.9	粉煤灰
7	0.8	23.9	EPE 泡沫

### 4.2 墙体深度影响分析

选取厚度为 0.8 m 的 C30 混凝土隔振墙,对不同深度的减振效果进行分析,四种工况(工况 1~4)对应的隔振墙深度分别为 0, 17.7, 23.9, 26.8 m。楼层典型加速度时程如图 14 所示,加速度峰值以及  $Z$  振级如图 15 所示。

通过对比可知,当隔振墙深为 17.7 m 时,Z1~Z4 加速度振级为 73.3~66.9 dB。各楼层振级减小 1.4~1.8 dB,振动加速度峰值减小约 0.008~0.018  $m/s^2$ ;当隔振墙深为 26.8 m 时,各楼层振级减小 6.4~7.2 dB,振动加速度峰值减小 0.021~

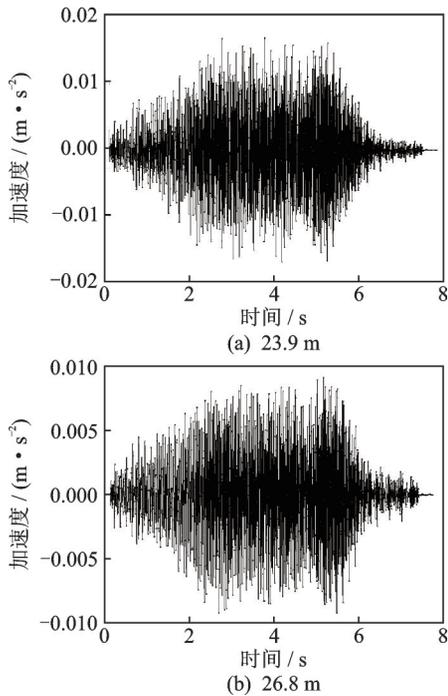


图14 Z2振动加速度时程

Fig. 14 Vibration response of Z2

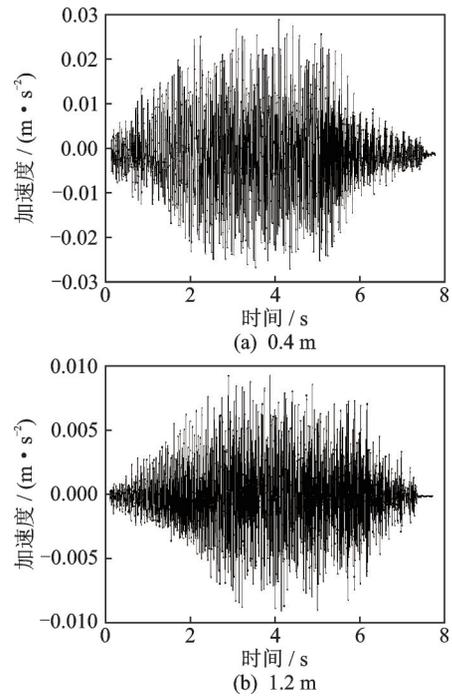


图16 Z2振动加速度时程

Fig. 16 Vibration response of Z2

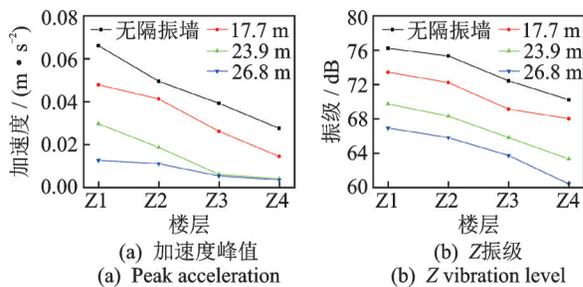


图15 不同隔振墙深度各楼层振动响应

Fig. 15 Vibration response at different depths of wall

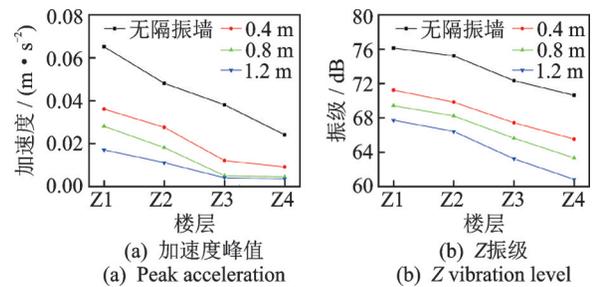


图17 不同隔振墙厚度时各楼层振动响应

Fig. 17 Vibration response at different thickness of wall

$0.053 \text{ m/s}^2$ 。随着隔振墙深度的增加,建筑物加速度峰值以及Z振级降低量越大,隔振墙的隔振效果越好。

其原因是因为隔振墙后的各点距离隔振墙近,绕射过隔振墙的波还未与透射的波发生干涉,波没有产生叠加现象,隔振效果显著。随着隔振墙深度的增加,绕射过墙体的波逐渐减少,波随着隔振墙导入地层深处。而当隔振墙深度达到隧道底埋深后,随着深度的增加,隔振效果的增量幅度有所减弱。因此考虑到工程成本因素,建议隔振墙的深度在实际应用中可选择与隧道底部齐平即可,并根据具体隔振需求进行加深设计。

#### 4.3 墙体厚度影响分析

选取深度为23.9 m的C30混凝土隔振墙,不同隔振墙厚度下,楼层典型加速度时程如图16所示,加速度峰值以及Z振级如图17所示。

通过对比可知,当隔振墙厚为0.4 m时,Z1~Z4

加速度振级为71.4~64.5 dB。各楼层Z振级较无隔振墙情况下减小4.6~5.7 dB,振动加速度峰值减小 $0.017\sim 0.03 \text{ m/s}^2$ ;当隔振墙厚为1.2 m时,各楼层加速度振级为67.6~60.4 dB,减小量8.7~9 dB,加速度峰值减小 $0.022\sim 0.048 \text{ m/s}^2$ 。

随着隔振墙厚度的减小,各楼层Z振级以及加速度峰值随着透射波的增加略有升高;当隔振墙厚度增加时,墙前反射的波也增加,墙后透射的波将减少,楼层各点振级以及加速度峰值略有降低。增加墙体厚度在一定程度上可提升隔振性能,但是墙体厚度的增加会导致成本的增加,因此应用中应根据实际情况选择适当的墙体厚度。

#### 4.4 墙体材料影响分析

选取厚度为0.8 m,深度为23.9 m的隔振墙,分别对使用C30混凝土、粉煤灰、EPE发泡材料的隔振墙进行隔振效果分析,材料参数如表11所示。其中聚乙烯发泡棉EPE是一种常见的柔性泡沫材料,

表 11 隔振墙材料参数

材料类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比
C30 混凝土	2360	30000	0.2
粉煤灰	1224	57	0.3
EPE 泡沫	46	12.9	0.38

具有质量轻、可塑性能佳、韧性强、化学性能稳定及易施工等诸多优点,在国外已有轨道交通隔振应用案例。

以 Z1 层为例,其 1/3 倍频程谱及各频段减振量如图 18 所示。从图中可以看出 C30 混凝土隔振墙对 0~25 Hz 低频段基本不产生减振效果,对 25~80 Hz 频段减振效果良好,且随着频段的升高减振效果越显著。采用粉煤灰及 EPE 泡沫材料隔振墙,其有效减振频段较 C30 混凝土隔振墙更广、减振量更大,结构楼板处振级衰减量最大值达 18 dB。

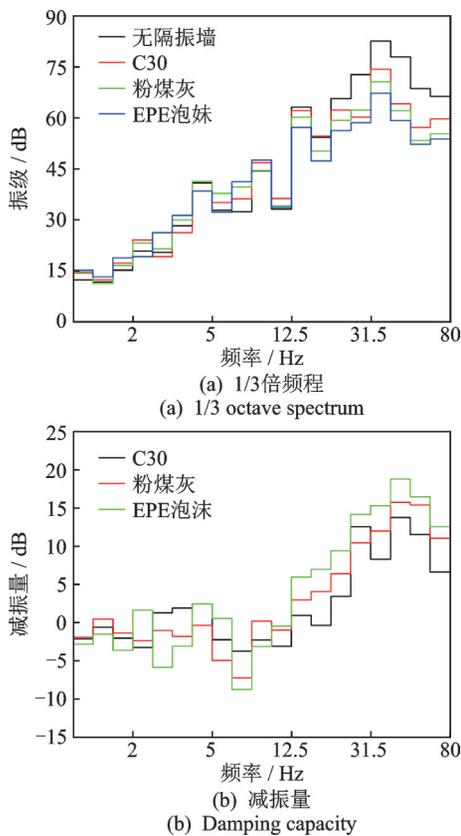


图 18 Frequency division vibration response of Z1 layer

典型楼层加速度响应如图 19 所示。通过对比可知,隔振墙的隔振性能对材料选择较为敏感,混凝土隔振墙的隔振性能不及粉煤灰隔振墙,而 EPE 泡沫材料隔振墙隔振性能最好。当使用粉煤灰材质隔振墙时,可使建筑各楼层加速度振级减小 7.8~9.2 dB,加速度峰值减小 0.02~0.043 m/s<sup>2</sup>;当隔振墙为泡沫材质时,各楼层振级减小 10.6~11.5 dB,加速

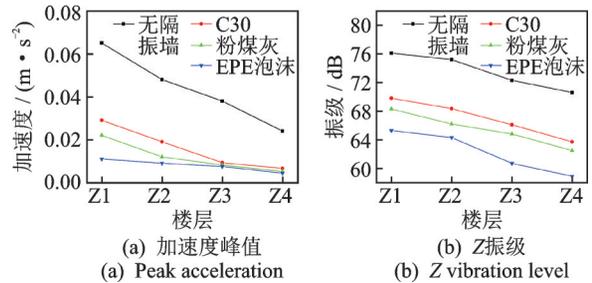


图 19 Vibration response of each floor with different wall materials

度峰值减小 0.023~0.055 m/s<sup>2</sup>。分析结果表明,由于不同隔振材料阻抗性能各异,当隔振墙材料物理特性同场地土差异性越大,即隔振墙材料弹性模量及密度越小时隔振效果越好。

#### 4.5 建筑物水平速度响应

各工况下的建筑物参考点速度响应峰值如图 20 所示。从图中可以看出,当不采取任何隔振措施时(工况 0),建筑物速度响应峰值显著超限,最大值达到 0.62 mm/s。增加隔振墙深度及厚度均可一定程度上降低建筑物水平振动,而改变隔振墙材料属性对速度峰值影响最为显著。当隔振墙为粉煤灰材质时(工况 6),承重结构最高处的三个提取点 X1, X2, X3 的水平向速度峰值减小 0.44~0.49 mm/s;当隔振墙为 EPE 泡沫材质时(工况 7),建筑物水平向速度峰值减小 0.45~0.51 mm/s,减振效果显著。且采用粉煤灰材质及 EPE 泡沫材质隔振墙时,建筑物速度峰值满足振动控制标准。

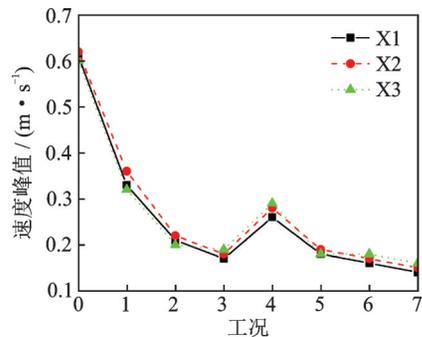


图 20 不同工况下速度响应峰值

#### 4.6 地下连续墙减振效果预测方法

基于前述分析结果,以设置隔振墙前后铅垂向 Z 振级最大值 VL<sub>z,max</sub> 之差为效果评价指标,即:

$$\Delta VL_R = VL_{z,max,u} - VL_{z,max,i} \quad (9)$$

式中  $\Delta VL_R$  为减振效果, VL<sub>z,max,u</sub> 及 VL<sub>z,max,i</sub> 分别为隔振墙设置前后的铅垂向 Z 振级最大值。

考虑使用 C30 混凝土地下连续墙体深度、厚度的影响,选取了线型相近的非线性 Boltzmann 方程对不同隔振墙性能参数下的减振量进行回归拟合分析,其中普通道床下的拟合曲线如图 21 所示。

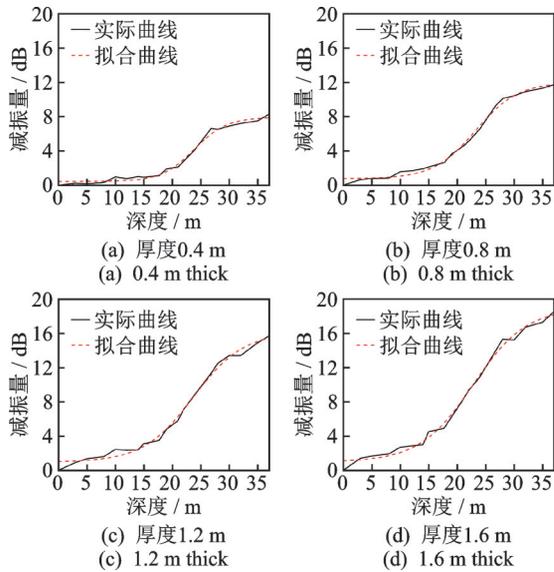


图 21 不同隔振墙性能参数下隔振量拟合曲线

Fig. 21 Fitting curve of vibration isolation under different parameters of wall

根据上述拟合结果并综合轨道条件因素影响,结合 Boltzmann 方程提出适用于轨道交通所致振动的地下连续墙减振量预测方法,预测公式如下式所示:

$$R_v = \left( \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{D - X_0}{dx}}} + A_2 \right) \times K_R \quad (10)$$

$$A_1 = -0.04 + 1.29T - 0.38T^2 \quad (11)$$

$$A_2 = 2.95 + 12.96T - 1.79T^2 \quad (12)$$

$$X_0 = 23.69 + 0.22T - 0.43T^2 \quad (13)$$

$$dx = 1.89 + 2.57T - 0.41T^2 \quad (14)$$

式中  $R_v$  为设置地下连续墙后建筑物内部隔振量,  $K_R$  为道床修正系数,结合 3.2 节分析,当使用普通道床时取为 1;当使用弹性长枕道床时取为 0.85;当使用钢弹簧浮置板道床时取为 0.75;采用其他减振道床或扣件时可依据其减振性能参考上述减振道床的建议值来合理选取。 $A_1, A_2, X_0, dx$  分别为与墙体厚度  $T$  相关的计算常数; $D$  为隔振墙深度。

针对本文依托工程通过上述预测公式计算得到的地下连续墙减振量如表 12 所示。

表 12 地下连续墙减振量级

Tab. 12 Vibration reduction of diaphragm wall

轨道类型	普通道床	普通道床	普通道床
墙体深度/m	17.7	23.9	26.8
墙体厚度/m	0.8	0.8	0.8
减振量/dB	2.75	6.70	8.80

## 5 结 论

(1) 计算结果表明:在未采取减隔振措施时,建筑物振动显著超限。振源减振措施中,当采用钢弹簧浮置板时可使建筑各楼层振级降低 14.9~18.9 dB,结构最高点水平向速度降低 0.5 mm/s,已经远低于振动限值。因此对于地铁线路附近敏感区段建筑物,升级轨道类型是一种比较有效的振动控制方案。

(2) 增加隔振墙厚度在一定程度上可提升减振性能,但效果不显著。隔振墙的深度也对减振效果有影响,隔振墙越深,减振效果越好。达到隧道底埋深后,随着深度的增加,减振效果增量幅度变小。

(3) 隔振墙体材料属性对减振性能影响较大,粉煤灰材质墙体减振性能要优于 C30 混凝土墙体,而泡沫材料墙体减振性能最好。在使用 EPE 泡沫材料时,建筑物各楼层振级可降低约 10.6~11.5 dB,水平速度降低约 75%。故当采用隔振墙作为减振措施时,可优先使用泡沫类材质墙体。

(4) 基于参数分析研究,总结出一套应用于地铁所致结构振动的地下连续墙减振效果预测方法,该方法可为之后的类似工程案例提供实际参考价值。

## 参考文献:

- [1] Antonio G, Francesco P. A model for the mechanical behaviour of the railway track in the lateral plane[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 146-147: 303-318.
- [2] 郑国琛, 祁皓. 地铁引发邻近建筑物振动及控制研究评述[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(5): 93-102. Zheng Guo-chen, Qi Ai. State-of-the-art on vibration law and control of buildings adjacent to metro[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 38(5): 93-102.
- [3] Zhang Y S, Zhang N. Model for predicting the vibrations of historical timber buildings due to traffic loads and its experimental validation[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2019, 38(2): 1-13.
- [4] Miguel A G, David M V, Luis A I. Monitoring and identification of vibration frequencies on a portion of México City Metro Line 12[J]. Advances in Civil Engineering, 2019(1): 1-13.
- [5] 马蒙, 刘维宁, 丁德云. 地铁列车引起的振动对西安钟楼的影响[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(4): 88-92.

- Ma Meng, Liu Wei-ning, Ding De-yun. Influence of metro train-induced vibration on Xi'an bell tower [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(4): 88-92.
- [6] 秦冲. 激励方式对地铁浮置板轨道减振性能评价影响研究[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
- Qin Chong. Study on the influence of excitation modes on the evaluation of vibration mitigation performance of floating slab track in metro [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [7] 黄微波, 杨阳, 冯艳珠, 等. 轨道交通振动传播规律与减振措施研究进展 [J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(6): 101-105.
- Huang Wei-bo, Yang Yang, Feng Yan-zhu, et al. Research advances of vibration propagation law and vibration reduction measures of rail transit [J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(6): 101-105.
- [8] Lakusic S, Ahac M. Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas [J]. Technical Gazette, 2012, 19(2): 427-435.
- [9] Wilson H, Wong B, England D. Tuned mass damper for rail noise control [M]. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Japan: Springer, 2012.
- [10] 金浩, 周新, 杨龙才. 剪切型减振器下钢轨振动衰减率及阻尼器调谐分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 193-200.
- Jin Hao, Zhou Xin, Yang Long-cai. Analysis of decay rate of rail using egg fastening system and tuning mechanism of tuning rail damper [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(2): 193-200.
- [11] 李克飞, 刘维宁, 孙晓静, 等. 北京地铁5号线地下线减振措施现场测试与分析 [J]. 铁道学报, 2011, 33(4): 112-118.
- Li Ke-fei, Liu Wei-ning, Sun Xiao-jing, et al. In-situ test of vibration attenuation of underground line of Beijing Metro Line 5 [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(4): 112-118.
- [12] 张雷刚, 刘晶磊, 宋绪国, 等. 高速铁路空沟减隔振效果及影响因素数值分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(7): 1354-1360.
- Zhang Lei-gang, Liu Jing-lei, Song Xu-guo, et al. The numerical analysis of effect and influencing factor of vibration reduction by open trench on high-speed railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(7): 1354-1360.
- [13] 姚锦宝, 胡敬梁. 空沟隔振对瑞利波传播影响的理论研究 [J]. 铁道学报, 2019, 41(10): 123-129.
- Yao Jin-bao, Hu Jing-liang. Theoretical study of effect of open trench vibration isolation on Rayleigh wave propagation [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(10): 123-129.
- [14] 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.
- [15] 高广运, 李佳, 李宁, 等. 三维层状地基排桩远场被动隔振分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(z1): 2934-2943.
- Gao Guang-yun, Li Jia, Li Ning, et al. Three-dimensional analysis of far-field passive vibration isolation for row of piles in layered foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(z1): 2934-2943.
- [16] 李志毅, 高广运, 邱畅, 等. 多排桩屏障远场被动隔振分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3990-3995.
- Li Zhi-yi, Gao Guang-yun, Qiu Chang, et al. Analysis of multi-row of piles as barriers for isolating vibration in far field [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3990-3995.
- [17] 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.
- [18] 王丁丁, 肖周芳, 陈建军, 等. 三维有限元网格尺寸场光滑化的优化模型和算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(12): 2097-2106.
- Wang Dingding, Xiao Zhoufang, Chen Jianjun, et al. An optimization model and algorithm for the smoothing of sizing functions of three-dimensional finite element meshes [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(12): 2097-2106.
- [19] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界 [J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46-51.
- Liu Jing-bo, Wang Zhen-yu, Du Xiu-li, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 46-51.
- [20] 王田友. 地铁运行所致环境振动与建筑物隔振方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008: 34-38.
- Wang Tian-you. Study on environmental vibration caused by railway and vibration isolation method of buildings [D]. Shanghai: Tongji University, 2008: 34-38.

- [21] 石建权. 地铁运行所致成都博物馆振动全过程性能化分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.  
Shi Jian-quan. Performance analysis on whole process of vibration of Chengdu Museum induced by subway running[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [22] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2007.  
Zhai Wan-ming. Vehicle-Track Coupling Dynamics [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007.
- [23] 洪俊青, 刘伟庆, 王曙光. 城市轨道交通临近建筑的隔振分析[J]. 振动与冲击, 2008, 27(11): 37-41.  
Hong Jun-qing, Liu Wei-qing, Wang Shu-guang. Vibration analysis of base-isolated building near urban rail transit [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27 (11): 37-41.
- [24] 马龙祥. 基于无限-周期结构理论的车轨耦合及隧道-地层振动响应分析模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.  
Ma Long-xiang. Study on model of coupled vehicle & track and the analysis model for tunnel-ground vibration response based on the periodic-infinite structure theory [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [25] 城市区域环境振动标准: GB 10070—88[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.  
Standard of environment vibration in urban area: GB 10070—88[S]. Beijing: China Standards Press, 1988.
- [26] 北京市质量技术监督局. 地铁噪声与振动控制规范: DB 11/T 838—2019[S]. 2019.  
Beijing Bureau of Quality and Technical Supervision. Code for application technique of metro noise and vibration control: DB11/T 838—2019[S]. 2019.
- [27] 杨维国. 北京市地铁环境振动预测及控制技术试验报告之北京音乐厅实测报告[R]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
Yang Wei-guo. Experimental report on environmental vibration prediction and control technology of Beijing Subway: measured report of Beijing Concert Hall [R]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [28] 古建筑防工业振动技术规范: GB/T 50452—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
Technical specifications for protection of historic buildings against man-made vibration: GB/T 50452—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

## Vibration analysis of a modern building caused by metro and research on vibration reduction measures

YANG Wei-guo, LI Hao, XI Jing-kai

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The vibration caused by subway will adversely affect the adjacent buildings. Based on the background of a modern historical protection building along the newly-built subway line, a fine three-dimensional finite element model of "tunnel-soil-protection building" is established based on relevant parameters and measured data, and the vibration response of the building during subway operation is analyzed. The damping effect is quantitatively analyzed and the parameters are optimized from two aspects of vibration source damping and process damping. The results show that the vibration of the building exceeds the limit when no vibration reduction and isolation measures are taken. The vibration reduction effect of the optimized track type is the most remarkable. When the elastic long sleeper track is used, the  $Z$  vibration level of the structure can be reduced by 8.2 dB and 11.2 dB, and the  $Z$  vibration level can be reduced by 14.9~18.9 dB by using steel spring floating plate track. Among the vibration isolation measures in the process, the performance of the vibration isolation wall is the most sensitive to the characteristics of the wall material, followed by the depth and thickness. The properties of the wall material have a great influence on the vibration isolation performance, among which the EPE foam wall has the best vibration isolation effect, which can reduce the  $Z$  vibration level of the structure by 10.6 to 11.5 dB, and the peak horizontal velocity is about 75%. Increasing the thickness of the wall can improve the vibration isolation performance to a certain extent, but the vibration isolation effect is not significant. Finally, a fast prediction method for calculating the isolation effect of diaphragm wall is proposed, which can provide a reference for the vibration analysis of similar projects and the design of vibration reduction measures.

**Key words:** vibration analysis; vibration source damping; process vibration isolation; diaphragm wall; vibration isolation effect

作者简介: 杨维国(1973—),男,博士,教授,博士生导师。电话:13621050086;E-mail:wgyang1@bjtu.edu.cn。

通讯作者: 李昊(1993—),男,博士研究生。电话:13810201249;E-mail:18115027@bjtu.edu.cn。