

地铁运行下环境隔振措施研究

张学朋^{1,3}, 王刚^{1,2,3}, 张培森^{1,3}, 蒋宇静^{1,3}

1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点试验室培育基地, 山东 青岛 266590;
2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;
3. 山东科技大学 山东省矿山灾害预防控制重点实验室, 山东 青岛 266590

摘要:以青岛地铁为研究背景,采用有限差分软件FLAC^{3D}对地铁运营导致环境振动的传播规律进行了系统研究。重点从振动的传播路径、受振建筑物两方面提出连续屏障和砂垫层隔振两种措施,并采用FLAC^{3D}模拟各自隔振效果。研究表明:对于连续屏障隔振,明沟的隔振效果优于有填充物屏障的隔振效果;振幅衰减系数变化规律表明填充物的弹性模量是影响屏障隔振效果的主控因素,屏障深度和厚度次之;砂垫层具有较好的隔振效果,且其厚度和弹性模量对隔振效果的影响都较显著。

关键词:地铁;自由场地;建筑物;振动特性;隔振

中图分类号:U231;TU311.3

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)05-0040-07

Research on Subway-induced Environmental Vibration Isolation Method

Zhang Xuepeng^{1,3}, Wang Gang^{1,2,3}, Zhang Peisen^{1,3}, Jiang Yujing^{1,3}

1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
3. Shandong Provincial Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China

Abstract: Based on Qingdao Subway, this paper made a systematic research on the subway-induced vibration propagation behavior of surrounding ground and buildings with the help of FLAC^{3D}. By focusing on the vibration propagation path and vibration-affected building structures, two vibration isolation methods, namely continuous barrier and sand cushion, were proposed, whose vibration isolation effects were studied respectively by numerical simulation. Results show that for the continuous barrier, the vibration isolation effect of open ditch is much better than that of filled barrier. And the varying pattern of amplitude attenuation coefficient reveals that elastic modulus of barrier filling is the most important factor affecting the vibration isolation effect, with the barrier depth and thickness second to it. However, for the sand cushion, it provides preferable vibration isolation and both its thickness and elastic modulus have remarkable influence on vibration isolation effect.

Key words: subway; free field; building structures; vibration behavior; vibration isolation

收稿日期:2014-04-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51279097,51379117);国家重点基础研究发展计划("973计划")项目(2012CB723104);山东科技大学研究生创新基金项目(YC140357)

作者简介:张学朋(1989—),男,山东滨州人,博士研究生,主要从事岩土体失稳非线性力学方面的研究。

王刚(1976—),男,山东阳谷人,副教授,博士,主要从事岩石力学与工程方面的科研与教学工作,本文通信作者。

E-mail:wanggang1110@gmail.com

地铁运营引起的环境振动问题已经引起人们的普遍关注。此类振动虽然不会造成建筑物结构的严重破坏,但是过量的振动将会对建筑物及居民的居住环境产生影响,轻微的会出现墙皮剥落、墙壁龟裂、地板裂缝,严重的则导致基础变形或下沉^[1]。目前,国际上已经把振动列为七大环境公害之一^[2]。因此,开展地铁运营致使环境振动及其隔振措施的探索研究具有普遍的理论 and 现实意义。

预测地铁运行所致环境振动是一项非常复杂的工作,需要建立包含列车、轨道、隧道、地层和建筑物为一体的系统模型^[3]。传统研究方法主要为现场测试和理论分析^[4-7],然而地铁所处环境的不同使得上述方法的实施受到很大限制。随着计算机应用的发展,采用数值模拟方法分析预测地铁运营所致环境振动已成为一种方便可行的方法^[3,8]。

作为缓解交通压力的重要措施之一,青岛地铁正在兴建中,而地铁运营后对周边环境的影响是值得关注的问题。本研究基于有限差分算法,采用 FLAC^{3D} 模拟研究地铁运行下环境的振动特性,并在此基础上提出连续屏障和砂垫层隔振措施,采用 FLAC^{3D} 模拟其隔振效果。

1 评价指标

振动特性采用加速度振级来表征^[9],按下式计算:

$$VAL = 20 \lg(a/a_0) \quad (1)$$

其中: a 为振动加速度有效值, m/s^2 ; a_0 为基准加速度, $a_0 = 10^{-6} m/s^2$ 。

屏障隔振效果采用振幅衰减系数来表征^[10],按下式计算:

$$Ar = A_2/A_1 \quad (2)$$

式中: A_1, A_2 分别为隔振前、后地面某点的竖向振幅;当 $Ar < 1$ 时才有隔振效果,数值越小表明隔振效果越明显^[11]。

2 地铁运营致使环境振动研究

2.1 计算模型及参数选择

地面受地铁振动荷载产生较小应变,一般 $\epsilon < 10^{-4}$ ^[12],可以按弹性介质考虑,且本问题符合平面应变假定,因此选用二维模型。地铁列车振动荷载采用刘维宁等^[7]建立的荷载模型,图 1 所示为时速 72 km/h 时 4 s 内的动力时程曲线。

建立模型时,为了减少计算量并且考虑隧道上方地面两侧同时存在建筑物的情况,建立沿隧道中心线的对称模型,模型尺寸为:长 100 m,高 60 m,隧道直径 6 m,建筑物楼层数选取 9 层并且带有一层地下室,层高选取 3 m,地下室高 4 m。

Kuhlemeyer 和 Lysmer 研究表明^[13],要想精确描述模型中波的传播,那么网格的尺寸必须要小于输入波形最高频率对应波长的 1/8 到 1/10,即:

$$\Delta l \leq \left(\frac{1}{8} \sim \frac{1}{10} \right) \lambda \quad (3)$$

式中: λ 是最高频率对应的波长。而波长又依赖于频率,波长和频率之间的关系式为:

$$\lambda_s = \frac{2\pi c_s}{\omega} = \frac{2\pi c_s}{2\pi f} = \frac{c_s}{f} \quad (4)$$

其中: λ_s 为所考虑振波的剪切波波长; c_s 为介质的剪切波波速; ω 为振源的频率; f 为振源的周期频率。

取剪切波速 $c_s = 250 m/s$,列车荷载振动频率为 30 Hz,代入式(4),得剪切波长 $\lambda_s = 8.333 m$ 。则有 $0.833 m \leq \Delta l \leq 1.042 m$ 。因此,本模型中单元尺寸距离隧道较远处取 1 m,隧道周围选取 0.5 m。自由场地模型和地基-建筑物模型如图 2 示。地层参数如表 1 示。

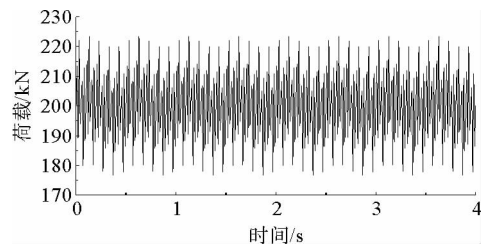


图 1 动力时程曲线

Fig. 1 Curve of dynamic force history versus

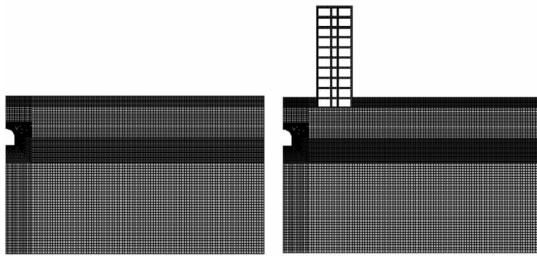


图 2 自由场地及地基-建筑物模型

Fig. 2 Numerical model of free ground and ground-construction and vibration level above the tunnel

表 1 土层参数

Tab. 1 Parameters of soil

项目	厚度/m	密度/(t/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
填土层	4	1.95	0.048	0.30
强风化花岗岩	15	1.81	10.000	0.30
中风化花岗岩	10	2.00	30.000	0.30
弱风化花岗岩	31	2.20	50.000	0.25
混凝土		2.50	35.500	0.20

数值计算中模型范围设置越大,分析结果就越好,但较大模型范围会导致巨大计算量。FLAC^{3D}中提供了静止(粘性)边界和自由场边界两种边界条件来减少模型边界上波的反射。静态边界对于入射角大于 30° 的入射波基本能够完全吸收,并且静态边界可以加在整体坐标系上,也可以加载在倾斜边界的法向和切向上。因此,本研究选用静态边界条件来消除模型边界上波的反射影响。

由于阻尼的选取对计算结果会产生很大的影响,因此对于动力问题,需要在数值模拟中重现自然系统在动荷载作用下的阻尼大小。目前,FLAC^{3D}动力计算提供了三种阻尼形式供用户选择,分别是瑞利阻尼、局部阻尼和滞后阻尼。本研究选用工程模拟中常用的瑞利阻尼进行计算。

瑞利阻尼最初应用于结构和弹性体的动力计算中,以减弱系统的自然振动模式的振幅。动力方程中的阻尼矩阵 C 与刚度矩阵 K 和质量矩阵 M 有关^[14]:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (5)$$

其中: α 为与质量成比例的阻尼常数; β 为与刚度成比例的阻尼常数。根据经验方法,选取岩土体的阻尼比参数为 0.5%,从而选取 $\alpha = 0.03, \beta = 0.02$ 。

2.2 地铁运行下的地基及建筑物振动特性研究

1) 自由地基振动特性分析

地表及隧道正上方地基土各监测点的竖向峰值加速度、振级变化曲线如图 3 和图 4 所示。

由图 3 可知:随距隧道中心距离的增加,自由场地振动响应呈明显衰减趋势,0~50 m 范围内,振级衰减量在 40~50 dB;0~25 m 内,曲线变化比较明显,振动响应变化较快,大于 25 m,曲线变平坦,振动响应衰减速率变缓;距隧道中心 20 m 范围内,在选取的速度范围之内,振级全部达到 65 dB 以上;车速为 100 km/h 和 110 km/h 时,距隧道中心 25 m 范围内振级超过 65 dB,超过我国《城市区域环境振动标准》^[9] 的有关规定,实际工程中应该在此范围内加以标注说明。由图 4 可知:在隧道正上方的土层中,随距隧道中心距离的增加,竖向峰值加速度呈现衰减趋势,在隧道正上方地表处达到最小值;在距离地表 10 m 处存在一个振动响应放大区。

2) 地基-建筑物振动特性分析

以列车速度 72 km/h,隧道埋深 14 m 为例,图 5 给出了建筑物各楼层振动响应随隧道中心与建筑物之间距离不同的变化趋势。

由图 5 可知:竖向峰值加速度及振级随楼层高度增加呈现非线性增加。需要注意的是,个别楼层间峰值加速度和振级存在随着楼层高度增加而减小的现象,这主要是与模型施加的荷载有关,实际工程中不可能只存在竖向荷载,还存在水平方向的荷载,因而呈现的规律与实际振级随楼层单调增加的趋势有所差别;地下室中振动响应明显大于地上建筑物各楼层的振动响应;距隧道中心 20 m 范围内,建筑物各楼层振级大于 65 dB,超过我国《城市区域环境振动标准》的有关规定;距离超过 20 m 后,只有地下一层振级超过 65 dB。

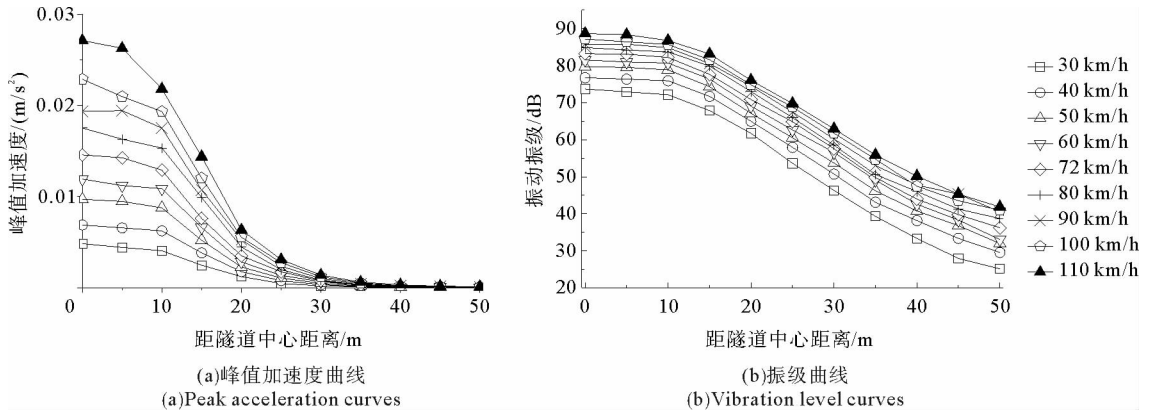


图3 地表竖向峰值加速度及振级衰减曲线

Fig. 3 Attenuation curve of surface vertical peak acceleration and vibration level

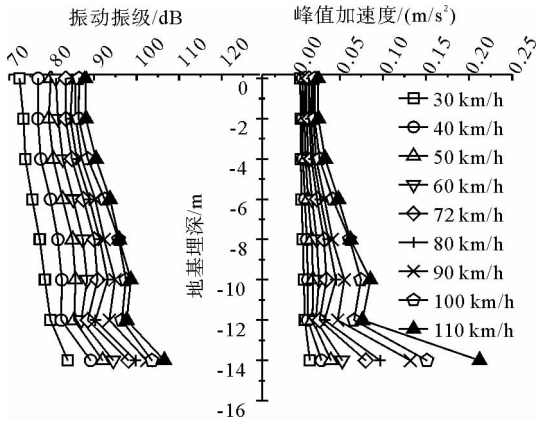


图4 隧道正上方峰值加速度及振级变化曲线
Fig. 4 Curve of vertical peak acceleration and vibration level above the tunnel

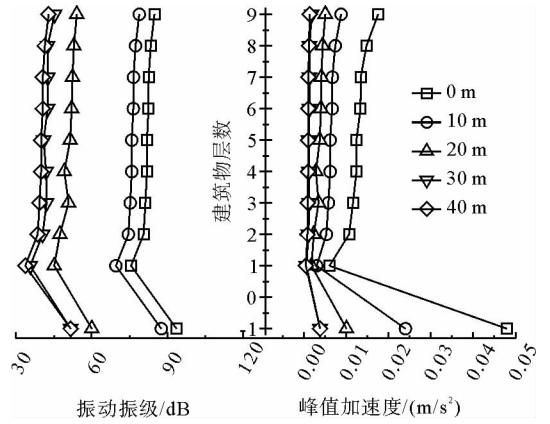


图5 竖向峰值加速度及振级随楼层增加变化曲线
Fig. 5 Curve of vertical peak acceleration and vibration level with the floor

3 连续屏障和砂垫层隔振研究

3.1 计算模型及计算工况

为研究连续屏障及砂垫层的隔振效果,分别建立图 6(a)、6(c)所示的模型,模型的大小、单元大小、其土层的分布和物理参数同自由场地模型,屏障距离隧道中心 20 m,砂垫层在填土层下方。图 6(b)、6(d)所示在连续屏障模型和砂垫层模型中选取的监测点。连续屏障隔振研究将屏障长度、厚度和填充物弹性模量作为参数来考察隔振效果,如表 2 所示;砂垫层隔振研究将砂垫层厚度和弹性模量作为参数来考察隔振效果,如表 3 所示。

3.2 隔振效果分析

3.2.1 连续屏障隔振效果分析

图 7、图 8 为屏障深度对其隔振效果影响分析曲线。由图可知:屏障所在位置后方 5 m 处,振动响应出现明显降低,屏障深度为 14 m 和 20 m 时振级分别降低约 5 dB 和 6 dB,相应振幅衰减系数分别为 0.557 62 和 0.487 55。由上述分析可知,随着屏障深度增加,隔振效果加强;但已有资料表明^[15],当屏障深度达到隧道底板以下时,再增加深度,隔振效果并不明显增加。

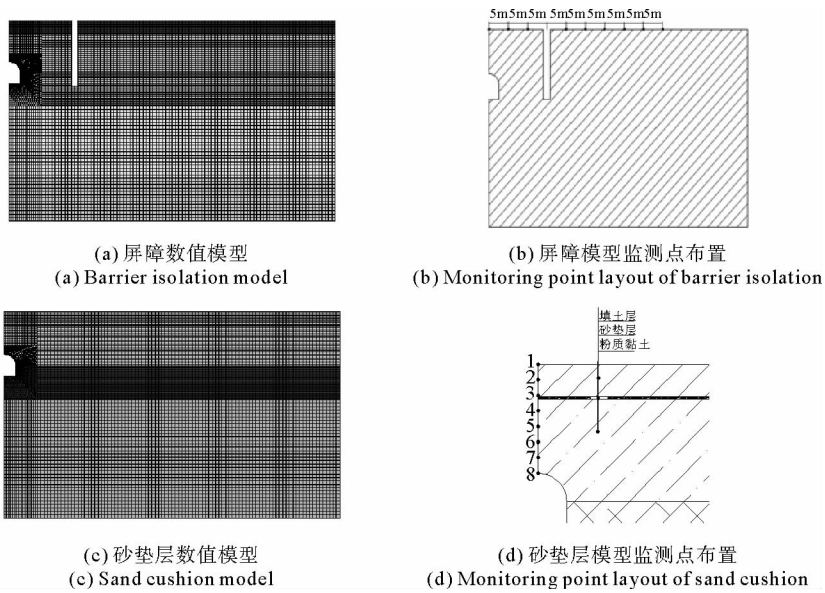


图 6 屏障隔振和砂垫层模型及其相应监测点布置

Fig. 6 Model of barrier isolation and sand cushion and its corresponding monitoring points

表 2 连续屏障计算工况一览表

Tab. 2 Conditions list of continuous barrier

工况编号	30	31	32	33	34	35
屏障厚度/m		1	1	1	2	1
屏障深度/m		14	20	14	20	14
弹性模量/MPa		30	30	3	30	0
备注	无屏障			泡沫		明沟

表 3 砂垫层计算工况一览表

Tab. 3 Conditions list of sand cushion

工况编号	36	37	38	39	40	41	42
砂垫层厚度/m	300	300	300	500	500	500	
剪切波速/(m/s)	100	150	200	100	150	200	
弹性模量/MPa	50	110	200	50	110	200	
备注							无砂垫层

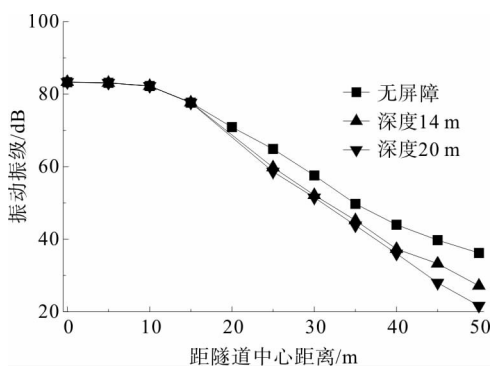


Fig. 7 Vibration level curve comparison of condition 30-32

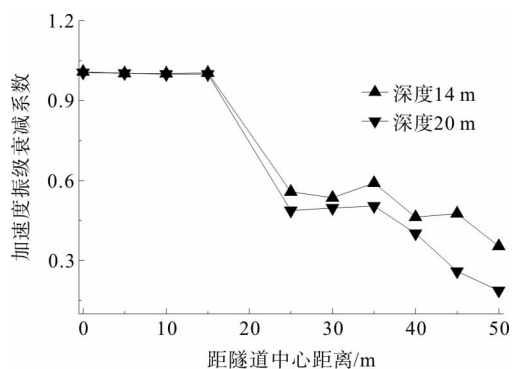


Fig. 8 Curve of acceleration amplitude attenuation coefficient

图 9、图 10 为屏障厚度对其隔振效果的影响分析曲线。可见,屏障的存在起到了隔振的效果;但厚度为 1 m 和 2 m 时屏障后方 5 m 处振级分别降低 7 dB 和 8 dB,振幅衰减系数分别为 0.487 55 和 0.424 45,两者相差很小。由此可知,增加屏障厚度对增强屏障隔振效果没有显著作用。因此,在实际工程中,不应该将屏障厚度作为主要因素来考虑,只要尺寸满足工程需求即可。

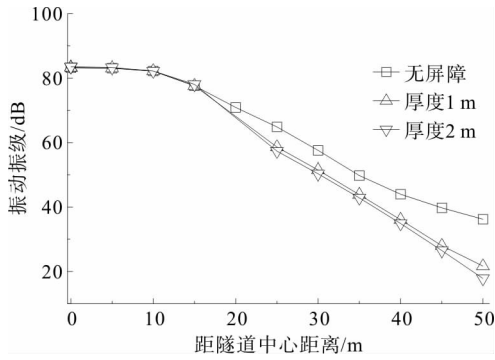


图9 工况30、32和35振级曲线对比

Fig. 9 Vibration level curve comparison of condition 30, 32 and 35

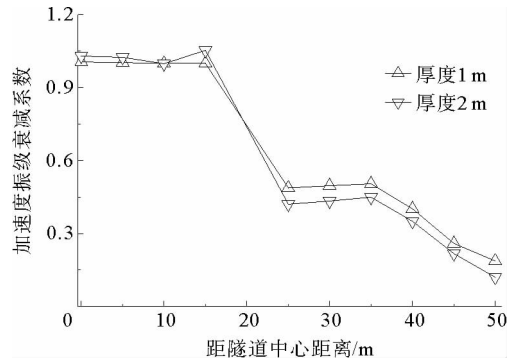


图10 加速度振幅衰减系数变化曲线

Fig. 10 Curve of acceleration amplitude attenuation coefficient

图11、图12为屏障填充物弹性模量对其隔振效果的影响分析曲线。由图11可知,当有填充材料时,屏障有一定隔振作用,振级在弹性模量为30,3 MPa时分别降低约5 dB和7 dB,虽然两者衰减量相差不大,但是可见采用泡沫充填隔振要优于混凝土充填隔振;采用明沟时,振级衰减量明显增加,达到16 dB,隔振效果显著,这一优势在振幅衰减系数变化曲线上(图12)更易看出。虽然明沟的隔振效果明显,但只是在屏障后方的15 m范围内,15 m之后的隔振效果与采用充填物隔振相差不大,并且屏障前方振动响应有增大现象,增大1 dB左右。由上述分析可知,明沟隔振优于填充屏障隔振,但对于明沟来说,其稳定性又是另一值得考虑的问题。

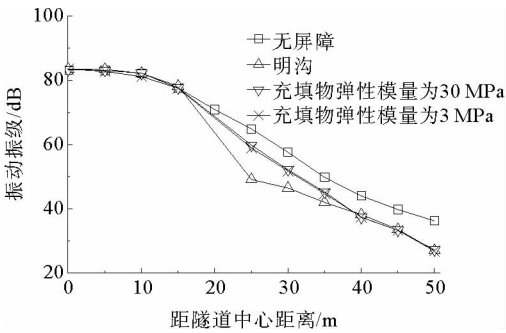


图11 工况30、31、34和36振级曲线对比

Fig. 11 Vibration level curve comparison of condition 30, 31, 34 and 35

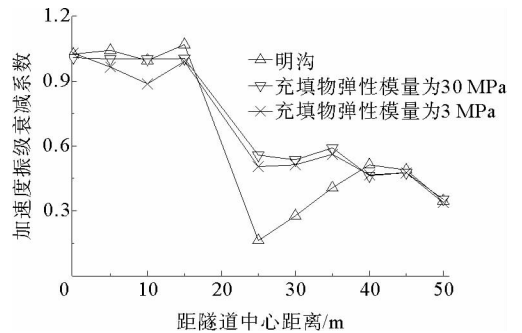


图12 加速度振幅衰减系数变化曲线

Fig. 12 Curve of acceleration amplitude attenuation coefficient

分析比较三种因素对隔振效果的影响程度可知:影响连续屏障的首要因素是填充物的弹性模量,其次是屏障的深度,再次是屏障的厚度。

3.2.2 砂垫层隔振效果分析

在多层介质模型中,随着各层介质材料参数的不同,透射、反射的能量量值也不同,材料的阻尼吸收系数也不同,从而达到减振的目的;因此,对砂垫层隔振效果进行计算说明。关于砂垫层本构关系的模拟,资料表明地铁振动引起的土壤的应变小于 10^{-4} ,考虑到振动的强度不大,砂垫层和隧道在垂直方向上有8~9 m的距离,所以按弹性材料来处理^[1]。

由于工况较多,取一种工况(工况36)分析砂垫层隔振效果。图13为工况36竖向峰值加速度及相应振级变化曲线。从单一工况来看,砂垫层隔振效果较为明显,介于隧道和砂垫层之间监测点的振动响应基本没有变化,砂垫层模型中还存在振动响应增大现象,这是由弹性波反射造成的;砂垫层上方监测点的振动响应

明显降低,振级衰减量为无砂垫层的 3~4 倍。为更明显对比各工况隔振效果,将工况进行横向对比,选取砂垫层上下界面监测点 3 和 5 进行分析对比,其在工况 36~42 下振级及衰减如表 4 和表 5 所示。由表 5 可以看出,随着砂垫层厚度的增加,振级衰减量增大,砂垫层厚度 300 mm 和 500 mm 时,在同一种弹性模量下,振级衰减量大于 2 dB;在同一厚度砂垫层下,随着垫层弹性模量的增加,振级衰减量逐渐减小。从上述分析可知,砂垫层的隔振效果比较明显。

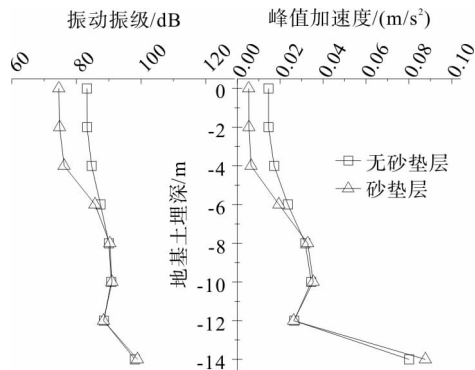


图 13 隧道上方振动响应变化曲线

Fig. 13 Curve of vibration response above tunnel

表 4 3 点和 5 点在各种工况下振级

Tab. 4 Vibration level of point 3 under all conditions dB

监测点	厚度/mm	弹性模量/MPa			工况 42
		50	110	200	
3	300	71.3	73.2	76.2	84.7
	500	67.9	70.1	72.9	
5	300	90.2	90.4	90.3	90.1
	500	88.6	89.7	89.7	

表 5 5 点到 3 点的振级衰减量

Tab. 5 Vibration level attenuation from point 5 to point 3 dB

厚度/mm	弹性模量/MPa			工况 42
	50	110	200	
300	18.9	17.2	14.1	5.4
500	20.7	19.6	16.8	

4 结论

- 1) 自由地基受地铁振动的响应随距隧道中心距离增加呈现衰减趋势;隧道上方地基土的振动响应存在放大区,放大效应与列车运行速度有关;建筑物振动响应随着楼层数增加呈现增加趋势。
- 2) 对于连续屏障隔振,明沟隔振明显优于填充屏障隔振,但对于明沟来说,稳定性又是另一值得考虑的问题;振幅衰减系数变化规律表明填充物的弹性模量是影响屏障隔振效果的主控因素,屏障深度和厚度次之。
- 3) 砂垫层具有较好的隔振效果,且其厚度和弹性模量对隔振效果的影响都较显著。

参考文献:

[1]潘泓,谭泽新. 地铁运行对建筑物的振动影响[J]. 建筑学,2005,21(3):90-91.
Pan Hong, Tan Zexin. Influences on building of vibration induced by subway[J]. Building Science, 2005, 21(3): 90-91.

[2]夏禾,曹艳梅. 轨道交通引起的环境振动问题[J]. 铁道科学与工程,2004,1(1):44-51.
Xia He, Cao Yanmei. Problem of railway traffic induced vibrations of environments[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004, 1(1): 44-51.

[3]冯青松,雷晓燕,伍明辉. 地铁运行列车引起建筑物低频振动的数值分析[J]. 铁道科学与工程学报,2007,4(5):68-72.
Feng Qingsong, Lei Xiaoyan, Wu Minghui. Numerical analysis of building under low-frequency vibrations induced by subway running train[J]. Journal of railway science and engineering, 2007, 4(5): 68-72.

[4]Kurze U J. Tools for measuring, predicting and reducing the environmental impact from railway noise and vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 237-251.

[5]杨英豪,王杰贤. 列车运行时振波在土中的传递[J]. 西安建筑科技大学报,1995,27(3):329-334.
Yang Yinghao, Wang Jiexian. On the transfer of vibro-wave in soil caused by passing trains[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 1995, 27(3): 329-334.

[6]Hao H, Ang T C. Analytical modeling of traffic-induced ground vibrations[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 921-928.

[7]刘维宁,张昫青. 轨道系统在移动荷载作用下的周期解析解[J]. 工程力学,2004(10):100-102.
Liu Weining, Zhang Yunqing. A periodic analytical solution of railway track structure under moving loads[J]. Engineering Mechanics, 2004(10): 100-102.