

基于 Arias 烈度、梯度场概念下连续型屏障的 隔振效果研究

张 希¹, 林本海¹, 罗威力¹, 覃娇芬²

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广东理工学院建设学院, 广东 肇庆 526100)

摘要: 为反映振动信息的三要素:幅值、频谱、持时,引入地震学科的 Arias 烈度参数,用于研究连续型屏障几何要素改变对隔振效果的影响;同时,为突出屏障隔振效果的整体性,即从空间“场”的角度出发,提出基于一般数值模型的场数据的获得方法。并以此为基础,编制程序计算 Arias 烈度比值场与梯度场,以比值场与梯度场的变化揭示其隔振作用。结果表明:屏障深度变化基本不会改变 Arias 烈度比值场的分布形态,它以屏障中心位置为中心,呈现似环形分布,梯度值在近屏障处变化剧烈,远处则变化较缓;屏障长度变化会改变 Arias 烈度比值场的分布形态,在屏障延伸位置处会出现“第二中心”分布,梯度场在“第二中心”位置处变化剧烈,远处变化也较缓;屏障宽度变化对 Arias 烈度比值场与梯度场影响不大。

关键词: 屏障隔振; Arias 烈度; 烈度比值场; 梯度场; 势场

中图分类号: TU352.1; TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)06-1493-08

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.06.021

引 言

随着城市化建设的飞速发展,交通荷载引起的振动污染愈发严重影响城市人居环境。因此,隔振的相关研究引起了学术与工程界的广泛关注。

在实际工程中,在振动波传播途径上,设置屏障是一种可靠、成本较低的方法。因此,国内外学者对其进行了大量的研究。

郭玉斌等^[1]采用数值与试验方法,研究了地屏障对建筑楼板的隔振效果,结果表明:楼板的动力响应与其本身有着密切的关系,而屏障的材料、埋深等因素对隔振效果也具有明显的影响。田抒平等^[2]采用半理论半解析与试验方法,对 Duxseal 填充 WIB 隔振系统的隔振效果进行了研究,结果表明:相对于传统 WIB 屏障,Duxseal-WIB 系统的隔振效果较好且表现稳定。张富有等^[3]采用数值方法,对 PCC 桩的隔振效果进行了研究,结果表明:和同直径的实心桩相比,PCC 桩能达到相同的隔振效果,且造价相对较低。刘晶磊等^[4]采用试验方法,对单排非连续屏障的隔振效果进行了研究,结果表明:混凝土桩>空心混凝土桩>空井≈PVC 空井(按隔振效果排列)。孙立强等^[5]采用试验方法,对空沟、碎石填充

沟、混凝土排桩的隔振效果进行了研究,结果表明:空沟>混凝土排桩>碎石填充沟(按隔振效果排列)。郑国琛等^[6]采用数值方法,对组合屏障的隔振效果进行了研究,结果表明:采用合理的组合屏障,能在特定的频段内将地铁引起的环境振动降低至合理的范围内。丁智等^[7]采用数值方法,在双线运营的地铁中对屏障的隔振效果进行了研究,结果表明:即便是填充沟也可获得较好的隔振效果。

Álamo 等^[8]采用数值方法,研究了下层基岩对排桩隔振效果的影响,结果表明:当排桩嵌入基岩时,整体隔振效果优于未嵌入时。Pu 等^[9]采用数值方法对周期性排桩的隔振效果进行谐波分析,并提出衰减域的评价概念,结果表明:桩间距的增加可以使衰减域向低频移动;桩径的增加则可使其宽度变大;若桩长超出一倍的瑞利波长时,对隔振效果影响不大。Lu 等^[10]采用数值方法,对联结周期排桩的隔振效果进行研究,结果表明:与传统的排桩相比,这种桩具有更好的隔振效果。Huang 等^[11]采用数值方法,并基于频率间隙带(BFG)的概念,对排桩的隔振效果进行了研究,结果表明:在 BFG 的作用范围内,振动强度可大大减小;增加排桩数或选择不同的组合方式可以获得更宽的 BFG。Coulier 等^[12]通过数值和试验方法,研究了旋喷桩对振动波的阻隔

收稿日期: 2021-06-17; **修订日期:** 2021-08-31

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51808147);广东省普通高校青年创新人才项目(2018KQNCX313);广州大学研究生“基础创新”项目(2018GDJC-D14)。

效应,结果表明:对于 8 Hz 以上的频率分量,其衰减量可达 5 dB;对于接近 30 Hz 的频率分量,其衰减峰值可达 12 dB。

虽先前的研究取得了不少的成果,但笔者认为振动波的干扰作用与多方面因素相关;同时,为深入揭示屏障的隔振作用,研究也可侧重于不同角度。故可从以下问题进行深入研究:

(1)描述隔振效果的指标问题。较多的研究采用响应点的加速度、速度或位移变化来描述隔振效果,但是,振动信息的表达是多方面的。一般而言,振动信息具有三要素:幅值、频谱、持时,其分别表示:1)振动强弱;2)频域内不同频率分量的组合信息;3)时域内振动强度大于一定值的持续时间。若要全面描述隔振效果,所采用的指标应能包含以上三个信息。

(2)描述隔振效果的角度问题。首先,较多的研究往往考虑若干目标点的动力反应,然而在实际工程中,屏障的作用是一个区域。因此,为全面地描述其影响,应考虑作用场;其次,加速度、速度、位移是作用结果,而非原因。事实上,隔振问题的本质是通过屏障的施加,从而阻碍振动能量的传播,即改变振动波的衰减“势场”,而“势”的变化最终改变了相关物理量在时间与空间上的分布。因此,为从本质上描述屏障的隔振作用,应从“势”的角度出发。

为此,笔者提出以下研究要点:

(1)描述隔振效果的指标问题。为反映三要素的影响,引入地震学科中表征地面震动烈度的 Arias 烈度予以评价,该参数包含三要素信息^[13],且与地震发生破坏的可能性具有良好的相关性^[14]。同时,就振动引起的干扰而言,地震动与交通荷载大体上是一致的。所不同是:1)地震波的振源深度一般较深,而交通荷载的振源较浅;2)地震波的控制频率一般以低频为主,而交通荷载的振动波则以中高频为主;3)引起破坏的地震波以水平向为主,而引起干扰的交通荷载振动波则以垂直向为主;4)地震强度较大,致使建筑进入弹塑性阶段,甚至破坏,而轨道交通的振动波,一般使建筑物处于弹性阶段。总之,其相同之处大于相异,因此,采用该描述指标应当较为全面。

(2)描述隔振效果的角度问题。标量函数的梯度场往往反映函数于空间变化的“驱动势”,因此,为了从“势场”的角度描述屏障的隔振效果,可从相关物理量的梯度场出发。在此,该物理量需反映:1)幅值、频谱、持时三要素的影响;2)屏障工况变化的影响(有无屏障、屏障几何尺寸改变),故可将其设定为 Arias 烈度比值。最后,从梯度场的相关变化,研究连续型屏障的隔振效果。

1 数值模型及相关计算方法

1.1 岩土条件及模型

岩土条件:场地土为硬质土,屏障采用混凝土浇筑,其力学参数部分参考了 Persson 等^[15]的研究,如表 1 所示。

表 1 土体力学参数^[15]

Tab. 1 Mechanical properties of the soil^[15]

参数	密度 ρ / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量 E / MPa	泊松比 μ	阻尼比 D
场地土	1900	300	0.3	0.1
混凝土	2400	30000	0.25	0.05

几何条件:振源、桩体、隔振场的平面尺寸如图 1 所示,其中 $\lambda_R=4.8\text{ m}$ 是频率分量为 50 Hz 的 Rayleigh 波的波长。

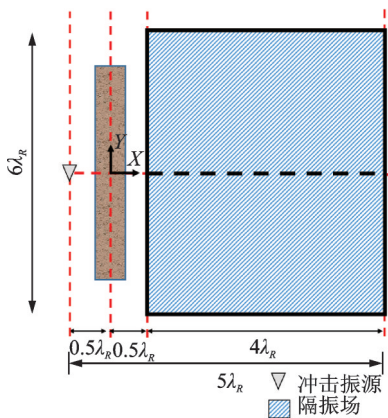


图 1 场地及屏障尺寸示意图
Fig. 1 Size of field and barrier

数值模型建立时,需考虑如下影响:(1)为保证计算准确性,需减少模型的边界反射;(2)为尽可能提高求解效率和可能性,求解规模不宜过大。

因此,基于上述第(1)条要求,模型的尺寸不能太小,足尺的模型可将振动波充分衰减,从而减小边界反射;基于上述第(2)条要求,则模型的单元尺寸不能完全相同,从而优化计算资源。考虑到轨道交通产生的干扰频率一般不超过 100 Hz,故本文考虑的频率最大值为 100 Hz。为捕捉在该频率下地表的相关波动信息,模型计算单元尺寸不得大于其剪切波长的 1/5。又因高频波在传播中衰减较快,而低频波较慢,故在模型近场位置,单元划分可以较密,远场则可以较疏。

根据以上分析,在空间直角坐标系中建立模型,X 向(平行屏障宽度方向)为 780 m, Y 向(平行屏障长度

方向)为680 m,Z向(平行屏障深度方向)为340 m。其中,单元尺寸密区由60 m×60 m×60 m的正方体与整体做布尔减运算得到,余下则为疏区。同时,为获得更好的边界吸波特性,在边界上也施加了黏弹性边界。最后,注意到模型关于X轴对称,因此可以取该模型的一半计算,从而大幅减小求解规模,如图2所示。

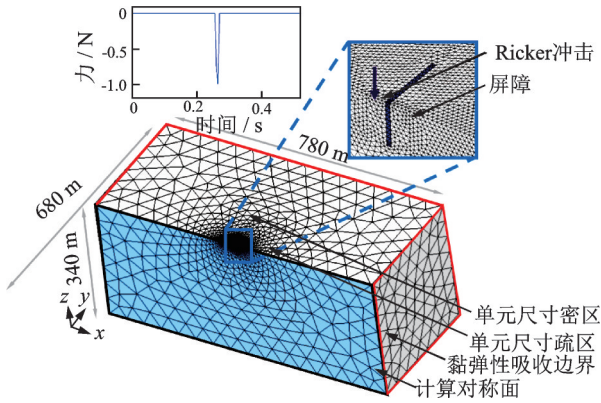


图2 数值模型

Fig. 2 Numerical model

综上所述,该模型具有捕捉动力信息、吸波衰减,同时兼顾求解效率的特性。

1.2 Ricker冲击荷载

动力荷载采用冲击荷载,从数值计算的角度,设定其为单位力衰减小波较为合适,因此荷载可用正弦脉冲信号平方的半周期表达,即Ricker冲击^[16]:

$$F_z(t) = A \sin^2\left(\frac{2\pi t}{T_D}\right) [u(t-t_s) - u(t-t_s - \frac{T_D}{2})] \quad (1)$$

式中 A 为幅值,设定为单位力,故 $A=1$ N; T_D 为特征周期,为使离散的时间能充分捕捉荷载的脉冲信息,应有 $1/F_s \leq T_D/4$, F_s 为采样频率,本文中为 200 Hz,故 T_D 可取 0.03 s; t_s 为峰值时间, $t_s=0.256$ s; $u(t)$ 为单位阶跃函数:若 $t < 0$, $u(t)=0$,若 $t \geq 0$, $u(t)=1$;则冲击荷载的时域与频域如图

$$\mathbf{r} = \left[\frac{\partial V}{\partial x} / \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right|, \frac{\partial V}{\partial y} / \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right|, \frac{\partial V}{\partial z} / \left| \frac{\partial V}{\partial z} \right|, \frac{\partial V}{\partial t} / \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| \right]_{P_0}^T \quad (6)$$

式中 a 为时域加速度; x, y, z, t 为三方向维度与时间; $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}, \mathbf{l}$ 为与之对应的方向向量。其中,方向向量是一组单位正交基。

1.4 梯度场基础数据的获取方法

为不失一般性,假定已存在三维数值模型,同时以四面体自由划分(因四面体单元具有良好的几何适用性,方便复杂模型的划分)。将场的范围在模型中确定,若直接使用场内节点的数据进行梯度的相

关计算,往往是困难的,甚至不可能。这是因为由节点的位置所组成的网络一般是非正交的,是不能进行梯度数值求解的。

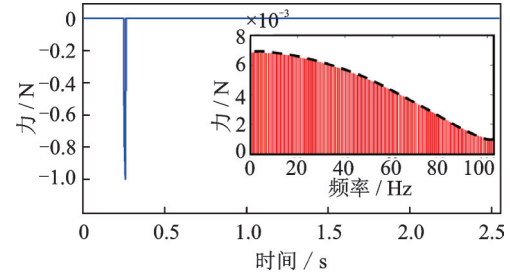


图3 冲击荷载的时域与频域图

Fig. 3 Time and frequency domain of the Ricker load

1.3 Arias烈度及梯度

对于任一点 Arias 烈度(I_A)可以表示为:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_{-\infty}^{+\infty} a(t)^2 dt \quad (2)$$

而在空间中,Arias烈度的分布场是三维坐标与时间维度的函数,可以表示为:

$$I_A = V(x, y, z, t) \quad (3)$$

根据相关理论,并将其扩展至空间-时域的四维空间中。若函数在定义域内具有 N 阶导数,其梯度可以表达为:

$$\text{gird } I_A = \left\{ \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial t} \right\} = \left\{ \frac{\partial V}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{k} + \frac{\partial V}{\partial t} \mathbf{l} \right\} \quad (4)$$

则时空内的任意一点 $P_0(x_{P_0}, y_{P_0}, z_{P_0}, t_{P_0})$ 对应的梯度为:

$$\nabla a_{(P_0)} = \left\{ \frac{\partial V}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{k} + \frac{\partial V}{\partial t} \mathbf{l} \right\}_{P_0} \quad (5)$$

与梯度方向一致对应的单位向量为:

关计算,往往是困难的,甚至不可能。这是因为由节点的位置所组成的网络一般是非正交的,是不能进行梯度数值求解的。

为解决以上问题,可采用的方法是:将场内的节点提出,并根据原有实体单元的部分节点信息组成新的平面单元,如图4所示。可使用正交的网格进行布置(本文的网格主方向与X轴、Y轴一致),以便获得位置节点(图中蓝色节点),并通过相应插值方法获得相关数据。详细计算方法如下:

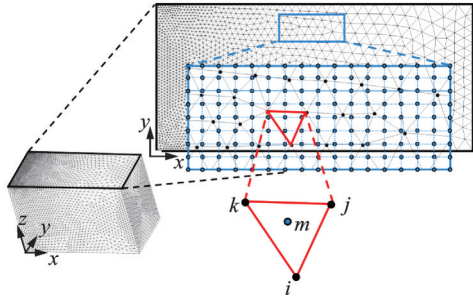


图4 场数据的获取

Fig. 4 Access to field data

若令场加速度矩阵为 $\mathbf{a}$,则它应为 $m \times n$ 的二维矩阵,行方向为 X 向(同一列的点 Y 坐标相同),列方

$$\mathbf{C} = [C_{X0} \ C_{XX} \ C_{XY} \ C_{Y0} \ C_{YX} \ C_{YY} \ C_{Z0} \ C_{ZX} \ C_{ZY}]^T \quad (10)$$

若将 i, j, k 三节点处的 Z 方向的加速度单独写出:

$$\begin{bmatrix} a_{i(Z)} \\ a_{j(Z)} \\ a_{k(Z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{Z0} \\ C_{ZX} \\ C_{ZY} \end{bmatrix} \quad (11)$$

缩写为:

$$\mathbf{a}_{(Z)} = [\mathbf{CD}] \mathbf{C}_Z \quad (12)$$

于是:

$$\mathbf{C}_Z = [\mathbf{CD}]^{-1} \mathbf{a}_{(Z)} \quad (13)$$

展开为:

$$\begin{bmatrix} C_{Z0} \\ C_{ZX} \\ C_{ZY} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \det \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \right\}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_j y_k - y_j x_k & y_i x_k - x_i y_k & x_i y_j - y_i x_j \\ y_j - y_k & y_k - y_i & y_i - y_j \\ x_k - x_j & x_i - x_k & x_j - x_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{Z0} \\ C_{ZX} \\ C_{ZY} \end{bmatrix} \quad (14)$$

同理,其他方向的可以写为:

$$\mathbf{C}_X = [\mathbf{CD}]^{-1} \mathbf{a}_{(X)} \quad (15)$$

$$\mathbf{C}_Y = [\mathbf{CD}]^{-1} \mathbf{a}_{(Y)} \quad (16)$$

式中 $\boldsymbol{\psi}$ 为形矩阵; $\mathbf{C}$ 为系数矩阵; C_{X0}, C_{XX}, C_{XY} 分别表示: X 方向加速度插值常数 $X0$, X 方向加速度插值系数 XX , X 方向加速度插值系数 XY ; $[\mathbf{CD}]$ 为几何矩阵; x_i, y_i 分别表示 i 号节点的 X 与 Y 坐标;其余物理意义依此类推。

因此,可由式(14),(15)和(16)计算系数矩阵,然后代入式(7),则可计算相应方向的加速度矩阵;获得场内部点的加速度值后,根据公式(2)计算Arias烈度;最终获得可以进行梯度场数值求解的数据。

向为 Y 向(同一列的点 X 坐标相同)。注意到网格交点可能位于单元内部,其值可采用插值函数计算,如下式:

$$\mathbf{a} = \boldsymbol{\psi} \mathbf{C} \quad (7)$$

展开为:

$$\mathbf{a} = [a_X \ a_Y \ a_Z]^T \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.5 梯度场的数值求解

因Arias烈度矩阵 $\mathbf{I}$ 中行与列方向正交,它们分别与 X, Y 轴方向平行,故存在:

$$\frac{\partial(I_{m'n'})}{\partial x} = \frac{I_{m'(n'+1)} - I_{m'(n'-1)}}{2(x_{m'(n'+1)} - x_{m'(n'-1)})} \quad (17)$$

$$\frac{\partial(I_{m'n'})}{\partial y} = \frac{I_{(m+1)'n'} - I_{(m-1)'n'}}{2(y_{(m+1)'n'} - y_{(m-1)'n'})} \quad (18)$$

$$\nabla I_{(P_0)} = \left\{ \frac{\partial(I_{m'n'})}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial(I_{m'n'})}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial I}{\partial z} \mathbf{k} \right\}_{P_0} \quad (19)$$

式中 $I_{m'(n'+1)}$ 表示矩阵 $\mathbf{I}$ 中的 m' 行 $n'+1$ 列,其余表达式意义与之类似。

2 计算分析结果

为更好地说明屏障几何条件变化对Arias烈度及其梯度场的影响,本小节内容分两部分:

(1)场地特性,即在自由场条件下研究:1)振动波各频率分量随传播距离的变化;2)Arias烈度值的空间分布。

(2)屏障深度、长度和宽度变化对Arias比值与梯度场的影响,从而揭示其几何变化对振动烈度衰减“势”的作用(为形象和简要说明,本文中加速度取 Z 方向;梯度正方向约定为数值减小的方向,因此,该“力势”为衰减力势。)

2.1 自由场特性

场地在无屏障的条件下,地表振动波沿 X 轴正方传播,1~100 Hz的频率分量在传播方向上的变化如图5所示。可以看出高频部分衰减较快,低频部分则衰减较慢,10 Hz左右的分量传播距离较远。

Arias烈度在场地内的分布如图6所示。可以

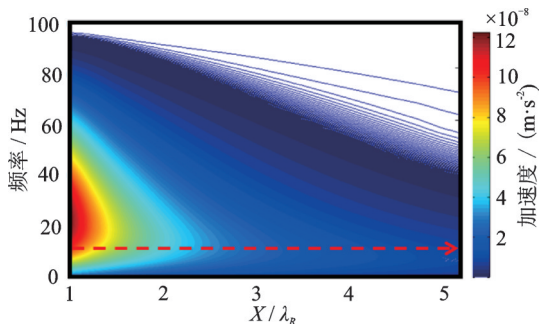


图5 场地的传递特征(自由场)

Fig. 5 Transfer characteristics of field (free field)

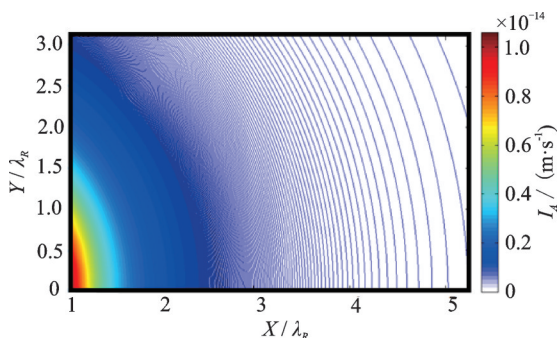


图6 Arias烈度场(自由场)

Fig. 6 Intensity of the Arias field (free field)

明显看出它在空间中是呈环形分布的,近源处烈度大,而随着传播距离的增加,其烈度出现非线性的减小。

从上述两者的表现而言:数值计算的结果与土体客观的动力学行为是不相违的。

2.2 屏障深度影响

研究深度变化影响时,固定长度为 λ_R ;宽度为 $0.1\lambda_R$;深度变化分别为: $\lambda_R, 1.5\lambda_R, 2\lambda_R, 2.5\lambda_R$ 。计算不同深度条件下对应的Arias烈度值分布,并以 λ_R 对应的值为基准,将 $1.5\lambda_R, 2\lambda_R, 2.5\lambda_R$ 的计算结果相比较,结果如图7所示。(图约定:颜色表示梯度强弱,等值线则表示Arias烈度比。后文与此相同。)

(1) $1.5\lambda_R/\lambda_R$ 。1)Arias烈度比:在近场,比值出现一定的衰减,衰减幅值至27%左右;隔振作用集中在屏障附近,以其中心为圆心,烈度比等值线呈现似环形分布。在中场,隔振作用相对减弱。至远场,几乎无隔振作用。2)梯度:在近场,其值变化较为剧烈,最大值可达0.062左右,并由屏障外部指向内部;在中场,存在明显的数值“洼地”,梯度则指向“洼地”方向,并呈现出似环形分布;至远场,梯度则整体上指向X轴的负方向,且局部上无明显变化。

(2) $2\lambda_R/\lambda_R$ 。1)Arias烈度比:在近场,比值出现明显的衰减,其衰减幅值至47%左右,并集中在屏障周围;在中场,隔振作用继续减弱;至远场,几乎无隔振作用。2)梯度:在近场,其值变化剧烈,最大值

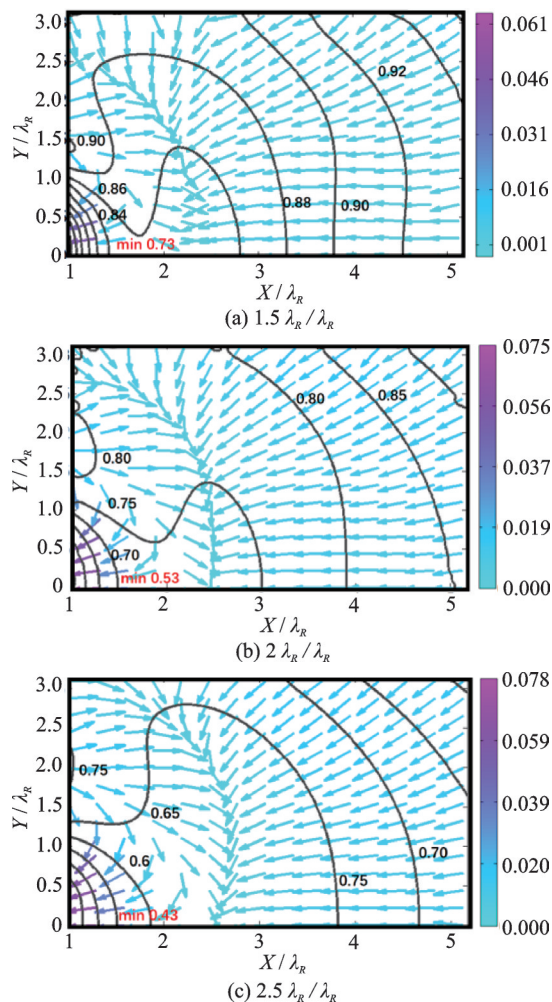


图7 深度影响

Fig. 7 Influence of depth

可达0.075左右;同时,振动衰减随空间变化增强,说明衰减的驱动“力势”变强。中场与远场变化规律与 $1.5\lambda_R/\lambda_R$ 条件下的表现类似。

(3) $2.5\lambda_R/\lambda_R$ 。1)Arias烈度比:在近场,比值出现非常明显的衰减,其衰减幅值可达57%左右;也集中在屏障附近,其等值线呈现似环形分布。在中场,隔振作用进一步减弱。至远场,几乎无隔振作用。2)梯度:在近场,其值继续增加,最大值可达0.078左右,衰减的驱动“力势”进一步增强;而中场与远场,其变化规律与 $2\lambda_R/\lambda_R$ 条件下的表现类似。

2.3 屏障长度影响

研究长度变化影响时,固定宽度为 $0.1\lambda_R$;深度为 λ_R ;长度变化分别为: $\lambda_R, 1.5\lambda_R, 2\lambda_R, 2.5\lambda_R$ 。其比值计算结果如图8所示。

(1) $1.5\lambda_R/\lambda_R$ 。1)Arias烈度比:在近场,比值出现一定的衰减,其衰减幅值至17%左右;隔振作用集中在屏障附近,以其中心为环心,等值线呈现出不规则的环形分布。在中场,由于屏障长度增加,在其延伸方向上出现了较小的衰减区域。至远场,几乎

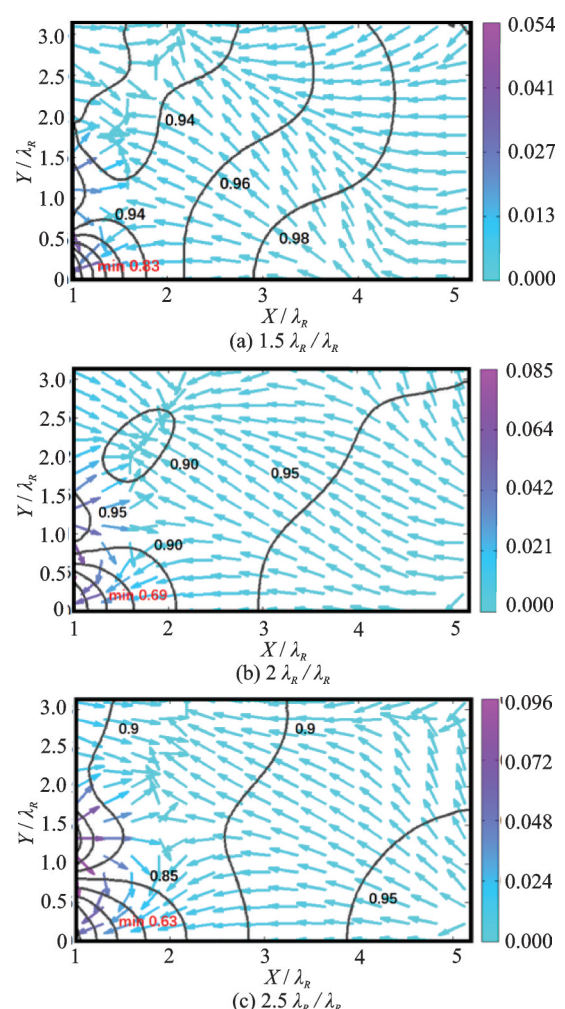


图8 长度影响

Fig. 8 Influence of length

无隔振作用。2)梯度:在近场,其值变化较为剧烈,最大值可达0.054左右,并由屏障外部指向内部;于中场,在长度延伸方向上出现了梯度变化的敏感区;至远场,梯度在整体上指向X轴的负方向,且局部差异很小。

(2) $2\lambda_R/\lambda_R$ 。1)Arias烈度比:在近场,比值出现了较为明显的衰减,其衰减幅值至31%左右;隔振作用集中在屏障附近,与 $1.5\lambda_R/\lambda_R$ 条件下的表现类似,并呈现出不规则的环形分布。在中场,其延伸方向上的衰减区继续变大;至远场,几乎无隔振作用。2)梯度:在近场,其值变化剧烈,最大值可达0.085左右,并由屏障外部指向内部;在中场,在长度延伸方上,梯度变化的敏感区继续增强;至远场,各离散点的梯度方向较为趋同,并指向X轴的负方向。

(3) $2.5\lambda_R/\lambda_R$ 。1)Arias烈度比:在近场,比值出现了非常明显的衰减,其衰减幅值可达37%左右;隔振作用集中在屏障附近,与 $2\lambda_R/\lambda_R$ 条件下的表现类似,也呈现出不规则的环形分布。在中场,由于屏障长度的明显变化,在坐标(1.0,1.25)处,出现了明显的环形等值圈,致使出现“第二中心”分布的态势。

至远场,隔振作用不明显。2)梯度:在近场,由于屏障长度的明显增加,梯度剧变区由屏障中心位置移动至坐标(1.0,1.25)的临近区域,最大值可达0.096左右;中场与远场,变化规律与 $2\lambda_R/\lambda_R$ 条件下的表现类似。

2.4 屏障宽度影响

研究宽度影响时,固定长度为 λ_R ,深度为 λ_R ,宽度变化分别为: $0.1\lambda_R, 0.2\lambda_R, 0.3\lambda_R, 0.4\lambda_R$ 。其比值计算结果如图9所示。

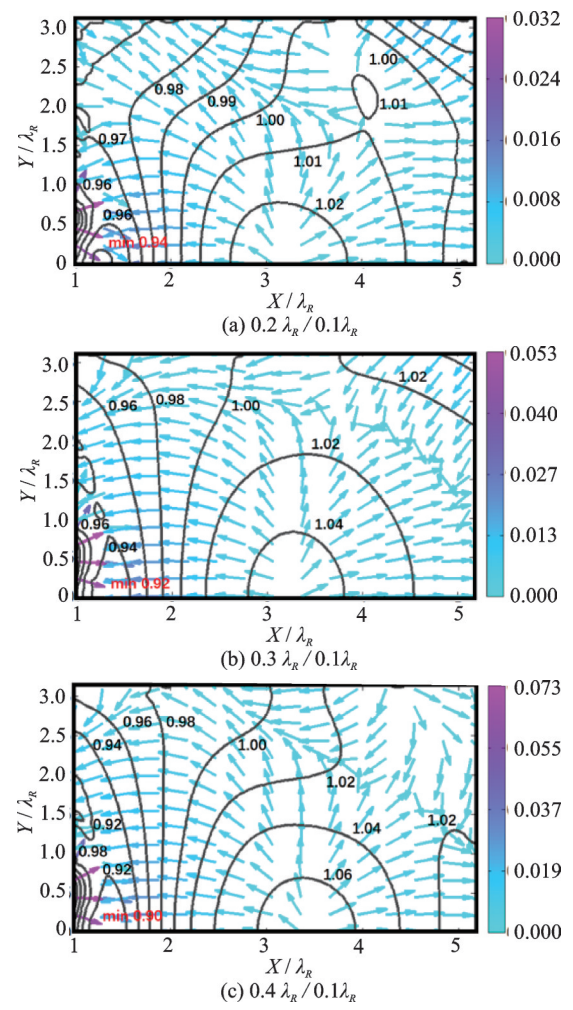


图9 宽度影响

Fig. 9 Influence of width

(1) $0.2\lambda_R/0.1\lambda_R$ 。1)Arias烈度比:在近场,比值会出现微小的衰减,其衰减幅值至6%左右;隔振作用集中在屏障附近,等值线呈现出双环形分布。在中场,衰减作用不大;至远场,位于屏障中心对称线的区域,烈度比值线出现了微小的放大。2)梯度:在近场,其值变化不明显,最大值仅为0.032左右,并由屏障内部指向外部;而中场与远场,相对变化不大。

(2) $0.3\lambda_R/0.1\lambda_R$ 。1)Arias烈度比:在近场,比值

会出现较小的衰减,其衰减幅值至8%左右;在中场与远场,则变化不明显。2)梯度:在近场,其值变化较为剧烈,最大值可达0.053左右;在中场与远场,与 $0.2\lambda_R/0.1\lambda_R$ 条件下的类似。

(3) $0.4\lambda_R/0.1\lambda_R$ 。1)Arias烈度比:在近场,比值会出现衰减,其衰减幅值可达10%左右;在中场与远场,其值变化不明显。2)梯度:在近场,其值变化剧烈,最大值可达0.073左右;在中场与远场,与 $0.3\lambda_R/0.1\lambda_R$ 条件下的类似。

3 结 论

本文以连续型屏障为研究对象,从Arias烈度比值及梯度变化的角度对其隔振效果进行了研究,结论如下:

(1)屏障深度变化影响。其变化基本上不会影响Arias烈度比值线的分布形态,它以屏障为中心,呈似环形分布。深度变化的影响主要体现在烈度比值上,即深度越大振动越弱。其梯度在近场处变化剧烈,远场则几乎无变化,衰减“力势”集中于屏障附近,以其中中心为源,呈发散态势。

(2)屏障长度变化影响。与深度不同,它会影响烈度比值线的分布形态,致使在屏障长度延伸方向上出现“第二中心”分布。其梯度在近场处变化较大,远场则几乎无变化;同时,在屏障的延伸处,也会出现梯度的突变,“力势”变化非常明显。

(3)屏障宽度变化影响。它基本不会影响烈度比值线的分布形态。其梯度变化与深度和长度变化条件下类似,在近场影响明显,远场则弱;“力势”集中于屏障附近,也呈发散态势。

参考文献:

- [1] 郭玉斌,宋瑞祥,何蕾,等.地面列车荷载作用下地屏障对建筑楼板的隔振效果分析[J].振动工程学报,2020,33(2):108-116.
WU Yu-bin, SONG Rui-xiang, HE Lei, et al. Isolation effect of barriers on building floor under the vibration induced by trains of ground line [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(2):108-116.
- [2] 田抒平,高盟,王滢,等. Duxseal隔振性能数值分析与现场试验研究[J].岩土力学,2020,41(5):1770-1780.
TIAN Shu-ping, GAO Meng, WANG Ying, et al. Numerical analysis and field experiment on vibration isolation for Duxseal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5):1770-1780.
- [3] 张富有,惠子华,张松,等.多排现浇薄壁管桩(PCC桩)屏障隔振性能研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(6):1415-1419.
Zhang Fuyou, Hui Zihua, Zhang Song, et al. Study on multi-row cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile(PCC) as passive barriers for ground vibration isolation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(6):1415-1419.
- [4] 刘晶磊,冯桂帅,王建华,等.轨道交通单排非连续隔振屏障隔振效果模型试验研究[J].振动与冲击,2018,37(11):175-183.
LIU Jinglei, FENG Guishuai, WANG Jianhua, et al. Model tests for effects of rail transit's single row discontinuous vibration isolation barriers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(11):175-183.
- [5] 孙立强,李嘉,刘彬,等.空沟、碎石填充沟和排桩隔振效果试验研究[J].地震工程学报,2015,37(2):342-348.
SUN Liqiang, LI Jia, LIU Bin, et al. Experimental study on vibration isolation effects of open trench, gravel filled trench, and piles in a row [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2):342-348.
- [6] 郑国琛,王逢朝,吴应雄,等.组合屏障在地铁沿线环境振动控制中的应用[J].应用基础与工程科学学报,2019,27(5):1115-1124.
ZHENG Guochen, WANG Fengchao, WU Yingxiong, et al. Application of combinatorial isolation barriers in environmental vibration control induced by metro [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(5):1115-1124.
- [7] 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.
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.
- [8] Álamo G M, Bordón J D R, Aznárez J J, et al. The effectiveness of a pile barrier for vibration transmission in a soil stratum over a rigid bedrock [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 110:274-286.
- [9] Pu X, Shi Z. Surface-wave attenuation by periodic pile barriers in layered soils [J]. Construction and Building Materials, 2018, 180:177-187.
- [10] Lu J F, Zhang X, Zhang R. A wavenumber domain boundary element model for the vibration isolation via a new type of pile structure: linked pile rows [J]. Archive of Applied Mechanics, 2014, 84(3):401-420.
- [11] Huang J, Shi Z. Application of periodic theory to rows of piles for horizontal vibration attenuation [J]. International Journal of Geomechanics, 2013, 13(2):132-142.
- [12] Coulier P, Cuéllar V, Degrande G, et al. Experimental and numerical evaluation of the effectiveness of a stiff

- wave barrier in the soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 77: 238-253.
- [13] 李雪婧, 吴健, 高孟潭, 等. 基于阿里亚斯烈度估值的概率性地震危险性分析——以四川丹棱县及其周缘为例[J]. 地震工程学报, 2018, 40(3): 555-561.
- LI Xuejing, WU Jian, GAO Mengtan, et al. Probabilistic seismic hazard analysis based on Arias intensity: a case study in Danling County, Sichuan Province and its surrounding area [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 555-561.
- [14] Foulser-Piggott R, Stafford P J. A predictive model for Arias intensity at multiple sites and consideration of spatial correlations[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(3): 431-451.
- [15] Persson P, Persson K, Sandberg G. Numerical study of reduction in ground vibrations by using barriers[J]. Engineering Structures, 2016, 115: 18-27.
- [16] Ba Dsar S. In-situ determination of material damping in the soil at small deformation ratios[D]. Brussels: University of Leuven, 2012.

Vibration isolation effect of continuous barrier based on the concept of Arias intensity and gradient field

ZHANG Xi¹, LIN Ben-hai¹, LUO Wei-li¹, QIN Jiao-fen²

(1.School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2.School of Construction, Guangdong Polytechnic College, Zhaoqing 526100, China)

Abstract: In order to reflect the amplitude, frequency spectrum and duration of the vibration information, the Arias intensity parameter of seismic discipline is introduced to study the influence of the change of geometric of continuous barrier on the vibration isolation effect. At the same time, in order to highlight the integrity of barrier vibration isolation effect, that is, from the perspective of spatial "field", a method to obtain field data based on general numerical model is proposed. On this basis, the Arias intensity ratio field and gradient field are calculated by program. Then the vibration isolation effect is revealed by the changes of the ratio field and gradient field. The results show that: the change of depth basically does not change the distribution shape of Arias intensity ratio field. It takes the central position of the barrier as the center and presents a near annular distribution. The gradient value changes sharply near the barrier and slowly in the distance. When the length changes, it will change the distribution shape of Arias intensity ratio field, and the "second center" distribution will appear at the extension position of the barrier. The gradient field changes sharply at the "second center" and slowly at a distance. The change of width has little effect on Arias intensity ratio field and gradient field.

Key words: barrier vibration isolation; Arias intensity; intensity ratio field; gradient field; potential field

作者简介: 张 希(1986—),男,博士研究生。电话:13138536353; E-mail: 653651960@qq.com。

通讯作者: 罗威力(1986—),男,副教授。电话:13380045905; E-mail: wlluo@gzhu.edu.cn。