

空沟对弹性波散射的时域分析:平面 SV 波入射

周凤玺^{1,2}, 梁玉旺¹, 朱顺望¹

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 基于土-结构相互作用理论, 利用比例边界有限元法, 将含有空沟地形条件的场地分解为近场系统和无穷远场系统。利用四叉树对近场计算区域进行网格精细化离散, 并利用位移单位-脉冲响应矩阵来表示近场和远场交界面上的相互作用力, 从而将斜入射的平面 SV 波转化为作用在近场系统边界上的等效节点力来模拟入射波对近场系统的激励作用, 建立了时域-空间域弹性波传播问题的数值模型, 通过数值算例验证了方法的有效性, 分析了入射角和空沟深度等参数对隔振效果的影响。结果表明: 隔振效果随着入射角的增大而增大; 当入射角较大时, 通过进一步增大空沟深度, 可使得空沟发挥出更优的隔振效果。

关键词: 空沟; 平面 SV 波; 散射; 隔振效果; 比例边界有限元

中图分类号: TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)06-1494-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.06.004

引言

地基振动控制已经成为岩土工程领域亟待解决的课题之一。在地面设置屏障(空沟和填充沟^[1-3]、排桩^[4-8]、波阻板^[9-12])能够减弱振动波向被保护区传播, 且地面屏障具有造价低、施工方便、不影响建筑物和波源等优点。空沟被认为是隔振效率最高的屏障, 被广泛应用于隔振工程中。国内外学者对空沟的隔振效果也进行了大量的试验研究和理论分析。在试验方面: Woods^[3]关于近场和远场中空沟隔振问题进行了一系列现场原位试验, 提出用振幅衰减比来评价屏障的隔振效果。Ahmad 等^[13]和 Klein 等^[14]通过现场试验对空沟尺寸和位置对隔振性能的影响进行了研究, 为隔振设计提出了一些指导原则。之后, Ulgen 等^[2], Celebi 等^[15], Murillo 等^[16]研究了激振荷载作用下荷载频率、土层参数、屏障尺寸等参数对空沟和填充沟隔振规律的影响。在数值模拟方面: Saikia 等^[17]利用有限元程序 PLAXIS 对简谐波荷载作用下的空沟隔振问题进行了数值分析。Shrivastava 等^[18]通过三维有限元模型研究了空沟和填充沟几何尺寸对 Rayleigh 波的隔离效果的影响。基于边界元法, Emad 等^[19]分析了任意形状二维浅沟的隔振效果, 发现只有在中频范围内浅沟可以减

少 25% 的地基扰动, 且空沟形状对隔振效果的影响较小。巴振宁等^[20-21]采用 2.5 维间接边界元方法 (IBEM) 研究了空沟对层状饱和地基中列车移动荷载的隔振性能。Andersen 等^[22]和 Adam 等^[23]则借助边界元-有限元耦合法分析了列车荷载作用下空沟尺寸和位置对隔振效果的影响。结合薄层法和边界元法, 文献[24-25]分析了二维和三维黏弹性层状地基中空沟的隔振效果, 结果表明地基分层参数对空沟隔振效果的影响显著。Hamidi 等^[26]通过对连续打桩过程中的地面振动进行有限元建模, 分析了空沟深度和宽度等关键参数对隔振效果的影响。Zhou 等^[27]通过完美匹配层来模拟无穷远辐射边界条件, 利用二维频域有限元方法研究了空沟-波阻板的隔振性能。在理论分析方面: 徐平等^[28]和周凤玺等^[29]基于复变函数理论和保角映射方法, 通过波函数展开法分别给出了单空沟和多空沟对平面 SH 波隔离的理论解答。

综上, 针对空沟隔振的研究主要集中在对不同荷载以及不同地层等条件下的相关分析, 但是关于空沟对弹性波隔离的时域分析鲜有研究。比例边界有限元法是在无限域弹性动力学问题模拟研究的过程中逐步发展起来的数值模拟方法^[30-31], 它只需离散边界而径向严格解析, 不需要基本解且能自动满足无穷远处辐射边界条件。该方法目前在研究半无

收稿日期: 2022-05-09; **修订日期:** 2022-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978320, 11962016); 甘肃省基础研究创新群体项目(20JR5RA478); 兰州理工大学红柳杰出青年人才资助计划(062007); 甘肃省优秀研究生“创新之星”项目(2022CXZX-454)。

限空间中弹性波散射问题方面已有很多应用^[32-34]。本文基于比例边界有限元方法(Scaled Boundary Finite Element Method, SBFEM),通过土-结构相互作用原理将含有空沟的场地问题分解为近场系统和无限远场系统;将无穷远处斜入射的平面 SV 波转化为作用在近场系统边界上的等效节点力,利用四叉树对近场计算区域进行网格精细化离散,建立了时域-空间域中弹性波传播问题的数值模型。分析了空沟对不同入射角平面 SV 波的隔离效果。

1 比例边界有限元法基本公式

采用 SBFEM 建立空沟对弹性波隔振问题的计算模型如图 1 所示。将问题域(图 1(a))分解为有界近场系统和无限远场系统(图 1(b))。通过近/远场交界面处的相互作用力 $R_b^\infty(t)$ 将两个部分联系起来。

近场系统的 SBFEM 动态刚度矩阵方程为^[31-32]:

$$\begin{aligned} & [S(\omega) - E^1](E^0)^{-1}[S(\omega) - (E^1)^T] + \\ & \omega S(\omega)_{,\omega} - E^2 + \omega^2 M^0 = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ω 为圆频率; $S(\omega)$ 为动态刚度; E^0, E^1, E^2 和 M^0 为有限元组装元素的系数矩阵,详细表达式如下:

$$E^0 = \int_{-1}^{+1} (B^1(\eta))^T D(\eta) B^1(\eta) |J(\eta)| d\eta \quad (2a)$$

$$E^1 = \int_{-1}^{+1} (B^2(\eta))^T D(\eta) B^1(\eta) |J(\eta)| d\eta \quad (2b)$$

$$E^2 = \int_{-1}^{+1} (B^2(\eta))^T D(\eta) B^2(\eta) |J(\eta)| d\eta \quad (2c)$$

$$M^0 = \int_{-1}^{+1} (N(\eta))^T \rho(\eta) N(\eta) |J(\eta)| d\eta \quad (2d)$$

式中 B, D 和 J 分别为应变位移转换矩阵、材料本构矩阵和雅可比矩阵; $N(\eta)$ 为 SBFEM 单元边界形函数; $\rho(\eta)$ 为质量密度; η 为 SBFEM 的环向坐标。

远场系统的 SBFEM 动态刚度矩阵方程可类似地表达为^[31-32]:

$$\begin{aligned} & [S^\infty(\omega) + E^1](E^0)^{-1}[S^\infty(\omega) + (E^1)^T] - \\ & \omega S^\infty(\omega)_{,\omega} - E^2 + \omega^2 M^0 = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

近场系统的时域运动方程^[31-32]如下式所示:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sb} \\ M_{bs} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s^i(t) \\ \ddot{u}_b^i(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s^i(t) \\ \dot{u}_b^i(t) \end{Bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^i(t) \\ u_b^i(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s^i(t) \\ F_b^i(t) - R_b^\infty(t) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 M, K 和 C 分别为近场系统的质量矩阵、静力刚度矩阵和阻尼矩阵,其中,下标“s”表示近场域内部的节点,下标“b”表示近/远场交界面上的节点; $u^i(t), \dot{u}^i(t)$ 和 $\ddot{u}^i(t)$ 分别为节点的总位移、总速度和总加速度,其中 $u^i(t)$ 由散射位移场 $u^s(t)$ 和自由位移场 $u^f(t)$ 组成; $F^i(t)$ 为总的力场。可采用 Newmark- β 法对方程(4)进行求解:

$$u^i(t) = u^f(t) + u^s(t) \quad (5)$$

$$F^i(t) = F^f(t) + F^s(t) \quad (6)$$

式中 $F^s(t)$ 和 $F^f(t)$ 分别为由散射位移场 $u^s(t)$ 和自由位移场 $u^f(t)$ 引起的力场。

$$F_b^s(t) = - \int_0^t S^\infty(\tau) u_b^s(t-\tau) d\tau \quad (7)$$

式中 t 和 τ 分别为持续时间和离散时间。

将式(7)代入式(6)进一步得:

$$\begin{aligned} F_b^i(t) &= F_b^f(t) - \int_0^t S^\infty(\tau) u_b^s(t-\tau) d\tau = \\ & F_b^f(t) - \int_0^t S^\infty(\tau) u_b^f(t-\tau) d\tau - \\ & \int_0^t S^\infty(\tau) u_b^i(t-\tau) d\tau \end{aligned} \quad (8)$$

近/远场交界面上的相互作用力可表示为:

$$R_b^\infty(t) = \int_0^t S^\infty(\tau) u_b^i(t-\tau) d\tau \quad (9)$$

式(7)~(9)中关于时间的卷积积分详细计算见文献[31,35]。

2 平面 SV 波的输入

考虑平面 SV 波以入射角 θ_1 入射半平面,当入

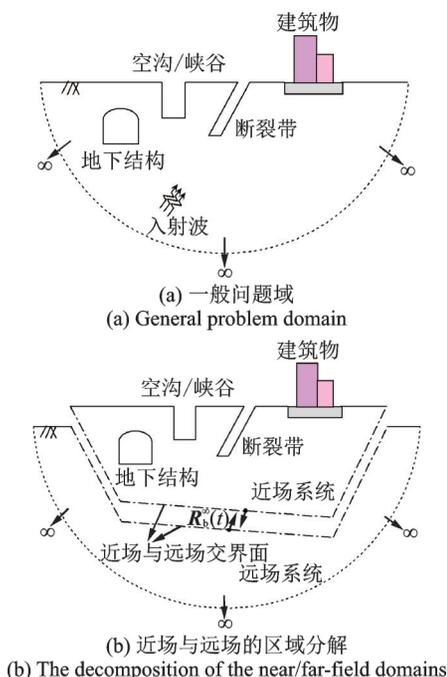


图 1 弹性波入射半空间计算模型

Fig. 1 Calculation model of elastic wave incident half space

射角 θ_1 小于临界角 θ_c 时,入射波遇到自由表面会产生反射 SV 波和反射 P 波;当入射角 θ_1 大于临界角 θ_c 时,入射波遇到自由表面仅产生反射 SV 波^[36],如图 2(a)所示。

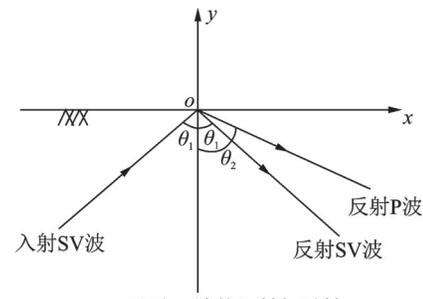
由图 2(b),观测点 P 处的自由场运动可表达为:

$$u_x^i(x, y, t) = u_{sv}^i(x, y, t) \sin \theta_1 + \frac{A_2}{A_1} u_{sv}^{re}(x, y, t) \sin \theta_1 + \frac{B_2}{A_1} \frac{c_p}{c_s} u_p^{re}(x, y, t) \cos \theta_2 \quad (10a)$$

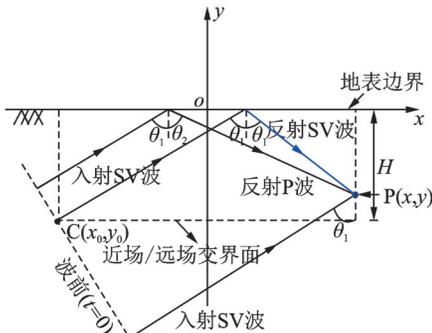
$$u_y^i(x, y, t) = u_{sv}^i(x, y, t) \cos \theta_1 - \frac{A_2}{A_1} u_{sv}^{re}(x, y, t) \cos \theta_1 + \frac{B_2}{A_1} \frac{c_p}{c_s} u_p^{re}(x, y, t) \sin \theta_2 \quad (10b)$$

式中 $u_{sv}^i(x, y, t)$, $u_{sv}^{re}(x, y, t)$ 和 $u_p^{re}(x, y, t)$ 分别为入射 SV 波、反射 SV 波和反射 P 波在任意观测点 P 处的分量; $\frac{A_2}{A_1}$ 和 $\frac{B_2}{A_1}$ 分别为反射 SV 波和反射 P 波的相对幅值; c_p 和 c_s 分别为 P 波和 SV 波的波速; θ_1 和 θ_2 分别表示入射/反射 SV 波的夹角和反射 P 波的夹角。

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\sin(2\theta_1) \sin(2\theta_2) - k^2 \cos^2(2\theta_2)}{\sin(2\theta_1) \sin(2\theta_2) + k^2 \cos^2(2\theta_2)} \quad (11a)$$



(a) 平面 SV 波的入射与反射
(a) Incidence and reflection of plane SV wave



(b) 平面 SV 波在近/远场交界面上的激励作用
(b) Incentive effect of plane SV wave at near/far-field interface

图 2 平面 SV 波入射半空间示意图

Fig. 2 Schematic diagram of plane SV wave incident half space

$$\frac{B_2}{A_1} = \frac{-\sin(2\theta_1) \cos(2\theta_2)}{\sin(2\theta_1) \sin(2\theta_2) + k^2 \cos^2(2\theta_2)} \quad (11b)$$

$$k = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_p}{c_s} = 2 \left(\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11c)$$

$$\theta_2 = \arcsin \left(\frac{\sin \theta_1}{k} \right) \quad (11d)$$

式中 ν 为半空间土体介质的泊松比。

假定入射平面 SV 波波前到达 $C(x_0, y_0)$ 点的时刻为 $t=0$, 则入射 SV 波、反射 SV 波和反射 P 波在交界面上任意观测点 $P(x, y)$ 处的分量 $u_{sv}^i(x, y, t)$, $u_{sv}^{re}(x, y, t)$ 和 $u_p^{re}(x, y, t)$ 可分别表达为关于时程响应 $g(t)$ 的激励函数^[32-33, 37]:

$$u_{sv}^i(x, y, t) = g(t - \Delta t_1) \quad (12a)$$

$$u_{sv}^{re}(x, y, t) = g(t - \Delta t_2) \quad (12b)$$

$$u_p^{re}(x, y, t) = g(t - \Delta t_3) \quad (12c)$$

式中 Δt 表示入射波或反射波到达点 $P(x, y)$ 的延迟响应时间。

$$\Delta t_1 = \frac{(x - x_0) \sin \theta_1 + (y - y_0) \cos \theta_1}{c_s} \quad (13a)$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 + \frac{2(H - y - y_0) \cos \theta_1}{c_s} \quad (13b)$$

$$\Delta t_3 = \Delta t_1 + \frac{\cos(\theta_1 + \theta_2)}{c_p \cos \theta_2} (H - y - y_0) + \frac{H - y - y_0}{c_s \cos \theta_2} \quad (13c)$$

式中 H 为近场区域的高度。

由弹性力学中胡克定律几何方程, 可得到应力-位移的关系:

$$\sigma(x, y) = D \epsilon(x, y) \quad (14)$$

式中 $\sigma(x, y)$ 为应力张量; D 为半空间土体介质的本构矩阵; $\epsilon(x, y) = L(u)$ 为应变张量, 其中, L 为微分算子, u 为位移张量。

自由场运动在近/远场交界面上产生的等效节点力可由交界面上的单元形函数和表面牵引力确定^[32-33]:

$$F_b^f(t) = \int N^T t_b^f ds \quad (15a)$$

$$t_b^f = \sigma^f \cdot n \quad (15b)$$

$$\sigma^f = \begin{bmatrix} \sigma_x^f & \tau_{xy}^f \\ \tau_{xy}^f & \sigma_y^f \end{bmatrix} \quad (15c)$$

$$n = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix} \quad (15d)$$

式中 N 为近/远场交界面上单元的形函数; t_b^f 为单元表面牵引力; ds 为单元表面; n 为单元节点的外法

向量。将式(10)代入式(14)可得自由场应力张量 σ^f 。

3 算例分析

通过比例边界有限元法,实现了 SV 波在半无限空间中的输入问题。本节将给出两个数值算例,第一个算例研究了入射平面 SV 波在自由场(不含空沟)中的运动位移情况,便于与文献[36]的解析解进行对比,以验证本文方法及编程计算的正确性;第二个算例研究了空沟(沟宽为 w ,沟深为 h)对弹性波的散射,用以分析平面 SV 波入射下空沟对弹性波的隔振效果。

3.1 自由场

将近场区域截取为矩形,其宽度为 100 m,高度为 50 m,自由场的近场区域通过四叉树网格离散,网格大小为 $0.625\text{ m} < \lambda_f/10$ (λ_f 为主剪切波波长),如图 3(a)所示。该区域能够保证观察到平面 SV 波入射下弹性波入射和反射的运动过程。假定半空间为均匀的、各向同性的弹性介质,其物理属性如表 1 所示。

选用 Ricker 子波作为时程响应函数:

$$g(t) = A_{\max} \left\{ 1 - 2[\pi f(t - t_0)]^2 \right\} \cdot \exp\left\{ -[\pi f(t - t_0)]^2 \right\} \quad (16)$$

式中 A_{\max} , f 和 t_0 分别为时程最大幅值、傅里叶谱主

频率和位移达到峰值的时间,并分别取值为 $A_{\max} = 0.001\text{ m}$, $f = 10\text{ Hz}$ 和 $t_0 = 0.5\text{ s}$,则主剪切波波长为 $\lambda_f = 9.2\text{ m}$ 。函数 $g(t)$ 的位移时程和频率如图 4 所示。

表 1 弹性半空间的物理属性

Tab. 1 Physical properties of the elastic half-space

杨氏模量 E/MPa	质量密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 ν	剪切波速 $c_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	压缩波速 $c_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
580800	2600	0.32	92	120

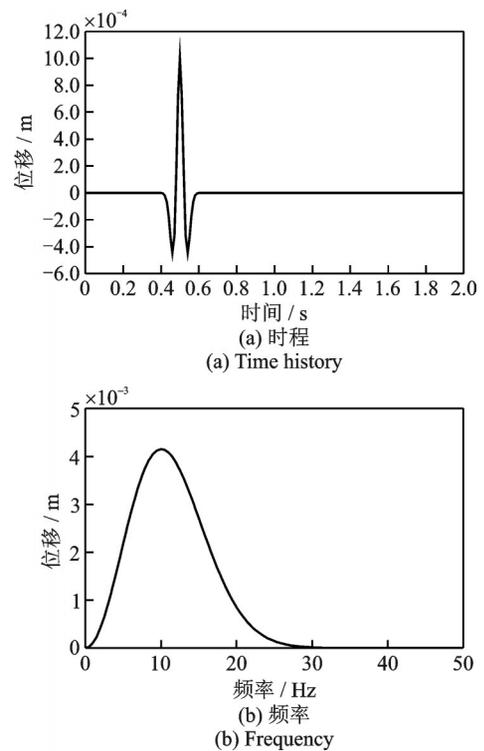


图 4 脉冲激励的时程响应和频率响应

Fig. 4 Time history response and frequency response of impulse excitation

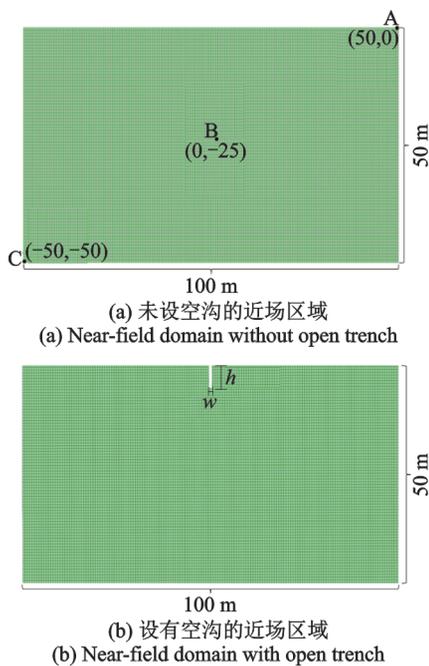


图 3 近场区域四叉树网格离散

取入射角 $\theta_i = 20^\circ$,由图 5 给出了平面 SV 波入射自由场时水平位移随时间变化的情况。从图 5 中可以明显看出,输入平面 SV 波的入射角经测量为 20° ,当入射波遇到地表边界时产生了反射 SV 波和反射 P 波,并且反射 SV 波的反射角测量值为 20° ,反射 P 波的反射角测量值为 26.5° ,与式(11)的计算结果一致。说明本方法可以有效地模拟弹性波在半无限空间中的传播。

为进一步验证本文计算精度的可靠性,取平面 SV 波入射角为 20° ,以图 3(a)中的点 A, B 和 C 作为观测点,绘制水平位移时程响应图如图 6 所示,并与文献[36]进行对比。从图 6 中可以明显看出,两者计算结果非常吻合,说明本文方法精度满足计算要求。

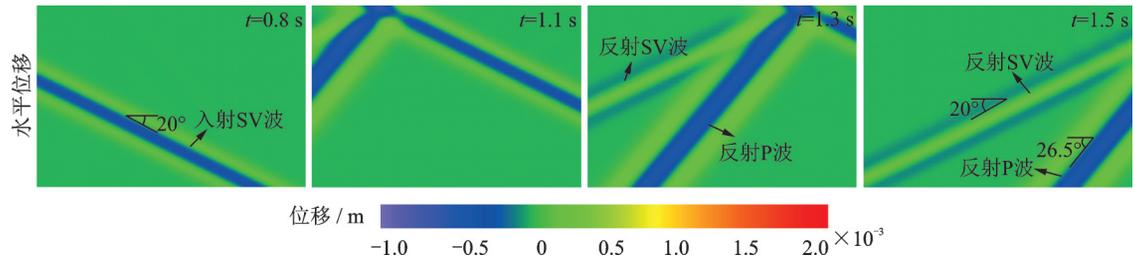


图5 平面SV波入射自由场时的位移云图

Fig. 5 Displacement cloud diagram of plane SV wave incident in free field

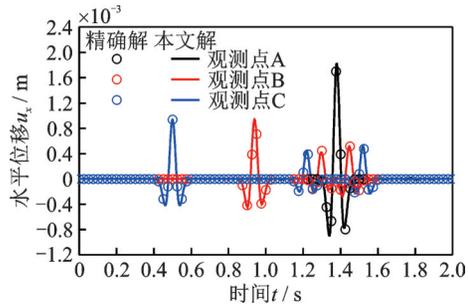


图6 半空间中观测点A、B和C处的位移响应

Fig. 6 Displacement response at observation points A, B and C in half space

3.2 空沟对弹性波的散射

同样假定半无限空间为均匀的、各向同性的弹性介质,介质的物理属性如表1所示。将近场区域截取为宽度为100 m、高度为50 m的矩形,以保证能够观察到空沟对弹性波的隔离情况。近场区域的网格离散如图3(b)所示,其中网格大小为 $0.625 \text{ m} < \lambda_t/10$ 。为了说明空沟对弹性波的隔振情况,取空沟宽度 $w=1 \text{ m}$,深度 $h=8 \text{ m}$,入射角 $\theta_1=20^\circ$,不同时刻的水平位移响应云图如图7所示。从图7中可以看出,当弹性波遇到空沟边界时,空沟前侧的位移被放大($t=1.15 \text{ s}$);随着弹性波的进一步

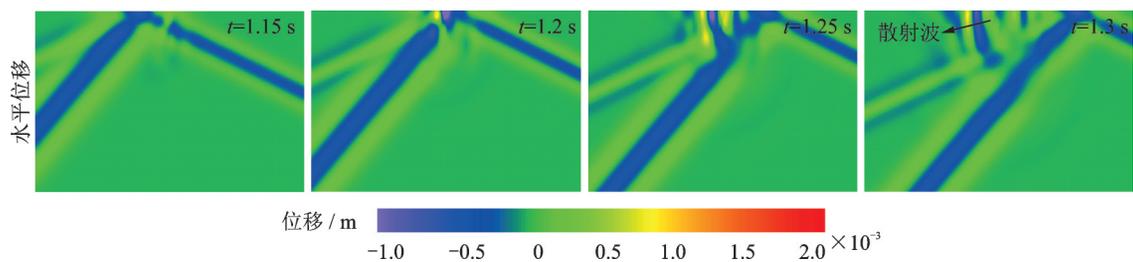


图7 不同时刻的水平位移响应云图

Fig. 7 Cloud diagram of horizontal displacement response at different time

3.2.2 空沟深度的影响

不同 θ_1 取值下,空沟深度对隔振性能的影响规律如图9所示。从图9中可以看出,当入射角 $\theta_1=0^\circ$ 时,靠近空沟周边位置处的位移放大现象随着深度的增大而增大,这是因为深度越大,空沟对弹性波的

传播,空沟前侧有左行波产生($t=1.3 \text{ s}$),这是由于空沟对弹性波的散射、反射等作用所致,这种作用会减弱弹性波的传播,从而达到对弹性波的隔振作用。

为了进一步分析不同入射角和空沟深度对隔振性能影响,将其他参数归一化到空沟宽度,并引入位移衰减比 A_R 来评价空沟的隔振效果:

$$A_R = \left| \frac{\text{设置屏障后观测点最大水平位移响应}}{\text{未设置屏障时观测点最大水平位移响应}} \right| \quad (17)$$

其中, A_R 值小于1时说明有隔振效果,且 A_R 值越小隔振效果越好。

3.2.1 入射角的影响

不同 h/w 取值下,入射角对隔振性能的影响规律如图8所示。从图8中可以看出,当入射角 $\theta_1=0^\circ$ 时,即入射波垂直于地表面入射,由于空沟对弹性波的散射作用,靠近空沟周边位置处的位移被放大,空沟没有隔振效果;空沟对入射角较大的弹性波更容易起到反射和散射等作用,因此,随着入射角的增大,靠近空沟前侧位置处的位移放大现象越来越明显,同时空沟后侧位移响应明显减小了。说明空沟对入射角较大的弹性波有更好的隔振效果。

散射效率越高;靠近空沟前侧周边位置处振幅衰减比 A_R 随着深度的增大而明显增大,空沟后侧的振幅衰减比 A_R 随着深度的增大而明显减小,即隔振效果更好,这是因为深度越大,弹性波越容易被空沟所阻隔。

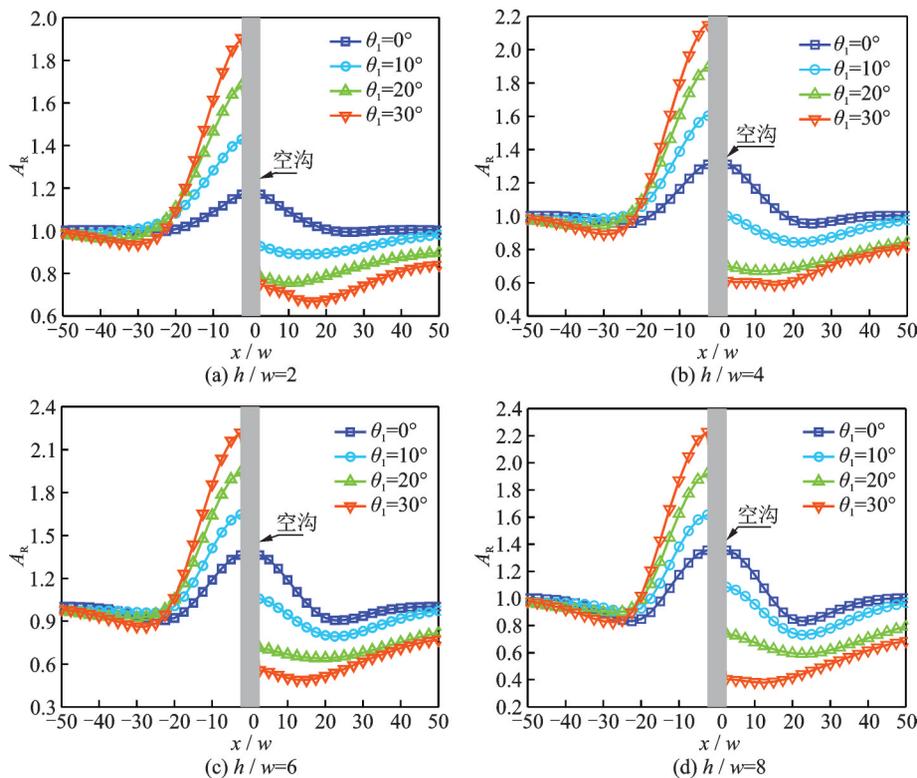


图 8 入射角对空沟隔振性能的影响

Fig. 8 Effect of incidence angle on the vibration isolation performance of the open trench

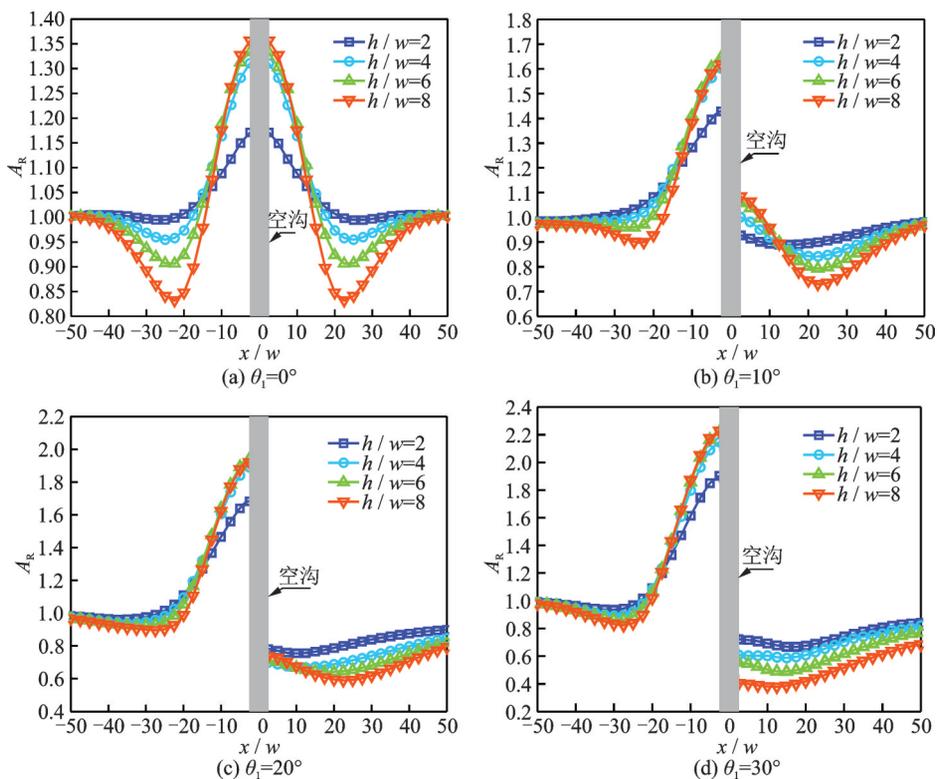


图 9 深度对空沟隔振性能的影响

Fig. 9 Effect of depth on the vibration isolation performance of the open trench

4 结 论

本文基于 SBFEM 理论,将问题域划分为近场

系统和无限远场系统,利用四叉树对近场计算区域进行网格精细化离散;利用位移单位-脉冲响应矩阵表示近场和远场交界面上的相互作用力;将无穷远处斜入射的平面 SV 波转化为作用在近场系统边界

上的等效节点力,建立了半无限空间中空沟对弹性波隔离问题的数值模型。通过数值计算,得出了以下结论:

(1)入射角对隔振效果的影响非常明显,随着入射角增大,空沟隔振效果越来越好。

(2)当入射角较小时,可以通过增大空沟深度来提高空沟的隔振效果。

(3)随着深度的增大,越靠近空沟周边位置处位移放大现象越明显,实际工程中应根据隔振需求开挖合理的深度,以减少护壁耗资。

参考文献:

- [1] Beskos D E, Dasgupta B, Vardoulakis I G. Vibration isolation using open or filled trenches, Part 1: 2-D homogeneous soil[J]. *Computational Mechanics*, 1986, 1(1): 43-63.
- [2] Ulgen D, Toygar O. Screening effectiveness of open and in-filled wave barriers: a full-scale experimental study[J]. *Construction & Building Materials*, 2015, 86(4): 12-20.
- [3] Woods R D. Screening of surface wave in soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division*, 1968, 94(4): 951-979.
- [4] 巴振宁,刘世朋,吴孟桃,等.周期分布桩体对平面SH波隔振效应的解析求解[J].*岩土力学*, 2020, 41(9): 2861-2868.
BA Zhenning, LIU Shipeng, WU Mengtao, et al. Analytical solution for isolation effect of plane SH waves by periodically distributed piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(9): 2861-2868.
- [5] 高广运,杨先健,王贻荪,等.排桩隔振的理论与应用[J].*建筑结构学报*, 1997, 18(4): 58-69.
GAO Guangyun, YANG Xianjian, WANG Yisun, et al. Theory and application of vibration isolation by piles in rows[J]. *Journal of Building Structures*, 1997, 18(4): 58-69.
- [6] 刘中宪,王少杰.非连续群桩屏障对平面P、SV波的隔离效应:二维宽频带间接边界积分方程法模拟[J].*岩土力学*, 2016, 37(4): 1195-1207.
LIU Zhongxian, WANG Shaojie. Isolation effect of discontinuous pile-group barriers on plane P and SV waves: simulation based on 2D broadband indirect boundary integration equation method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(4): 1195-1207.
- [7] 夏唐代,孙苗苗,华伟南.双排弹性桩隔振屏障对平面SH波的多重散射[J].*世界地震工程*, 2011, 27(1): 142-147.
XIA Tangdai, SUN Miaomiao, HUA Weinan. Multiple scattering of plane SH waves by double-row of elastic pile as barriers for vibration isolation[J]. *World Earthquake Engineering*, 2011, 27(1): 142-147.
- [8] Álamo G M, Bordón J D R, Aznarez 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] 高广运,冯世进,李伟,等.二维层状地基波阻板隔振分析[J].*振动工程学报*, 2007, 20(2): 174-179.
GAO Guangyun, FENG Shijin, LI Wei, et al. 2-D analysis of vibration isolation by wave impeding block in layered ground[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2007, 20(2): 174-179.
- [10] 高广运,李伟.二维地基波阻板隔振分析[J].*地震工程与工程振动*, 2005, 25(2): 130-135.
GAO Guangyun, LI Wei. 2-D analysis of ground vibration isolation using wave impeding block[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2005, 25(2): 130-135.
- [11] 周凤玺,郑琦.二维地基波阻板隔振的复变函数解[J].*振动与冲击*, 2019, 38(12): 162-167.
ZHOU Fengxi, ZHENG Qi. Complex variable function solution of vibration isolation for two-dimension foundation wave impeding block[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(12): 162-167.
- [12] Ma Q, Zhou F X, Zhang W Y. Vibration isolation of saturated foundations by functionally graded wave impeding block under a moving load[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, 41: 108.
- [13] Ahmad S, Al-Hussaini T M. Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 117(1): 67-88.
- [14] Klein R, Antes H, Houédec D L. Efficient 3D modeling of vibration isolation by open trenches[J]. *Computers & Structures*, 1997, 64(1-4): 809-817.
- [15] Celebi E, Firat S, Beyhan G, et al. Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(5): 824-833.
- [16] Murillo C, Thorel L, Caicedo B. Ground vibration isolation with geofabric barriers: centrifuge modeling[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27(6): 423-434.
- [17] Saikia A, Das U K. Analysis and design of open trench barriers in screening steady-state surface vibrations[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*,

- 2014, 13(3): 545-554.
- [18] Shrivastava R K, Kameswara Rao N S V. Response of soil media due to impulse loads and isolation using trenches[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2002, 22(8): 695-702.
- [19] Emad K, Manolis G D. Shallow trenches and propagation of surface waves[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1985, 111(2): 279-282.
- [20] 巴振宁, 王靖雅, 梁建文. 层状地基中隔振沟对移动列车荷载隔振研究-2.5维IBEM方法[J]. *振动工程学报*, 2016, 29(5): 860-873.
- BA Zhenning, WANG Jingya, LIANG Jianwen. Reduction of train-induced vibrations by using a trench in a layered foundation [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2016, 29(5): 860-873.
- [21] 巴振宁, 梁建文, 王靖雅. 空沟对层状饱和地基中列车移动荷载的隔振性能研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(5): 848-858.
- BA Zhenning, LIANG Jianwen, WANG Jingya. Isolation effect of an open trench against train-induced vibrations in a saturated layered ground [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(5): 848-858.
- [22] Andersen L, Nielsen S R K. Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, 25(7-10): 701-716.
- [23] Adam M, Estorff O V. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches[J]. *Computers & Structures*, 2005, 83(1): 11-24.
- [24] 李伟, 高广运. 二维层状地基空沟主动隔振分析[J]. *地下空间*, 2004, 24(3): 391-394.
- LI Wei, GAO Guangyun. 2D analysis of active vibration isolation using open trench in layered medium [J]. *Underground Space*, 2004, 24(3): 391-394.
- [25] 高广运, 彭争光, 李伟, 等. 三维层状地基空沟主动隔振分析[J]. *西北地震学报*, 2006, 28(3): 210-215.
- GAO Guangyun, PENG Zhengguang, LI Wei, et al. 3-D analysis of active vibration isolation by open trench in layered ground [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2006, 28(3): 210-215.
- [26] Hamidi A, Rooz A F H. Efficiency analysis of open trench for impact pile driving through a single-variable method[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(1): 82-102.
- [27] Zhou F X, Zhou Z X, Ma Q. Study on the vibration isolation performance of an open trench-wave impedance block barrier using perfectly matched layer boundaries [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2022, 28(3-4): 329-338.
- [28] 徐平, 石明生, 郭长江. 空沟对SH波隔离效果的理论解答[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(3): 647-651.
- XU Ping, SHI Mingsheng, GUO Changjiang. Theoretical analysis of isolation effects of an open trench on incident SH waves [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(3): 647-651.
- [29] 周凤玺, 梁玉旺, 刘佳. 多空沟对弹性波的散射及隔振性能分析: SH波入射[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(24): 263-268.
- ZHOU Fengxi, LIANG Yuwang, LIU Jia. Analysis of elastic wave scattering and vibration isolation performance of multiple open trenches: SH incident [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(24): 263-268.
- [30] Song C M, Wolf J P. The scaled boundary finite-element method—alias consistent infinitesimal finite-element cell method—for elastodynamics [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1997, 147(3-4): 329-355.
- [31] Wolf J P. *The Scaled Boundary Finite Element Method* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2003: 79-97.
- [32] Bazayr M H, Song C M. Analysis of transient wave scattering and its applications to site response analysis using the scaled boundary finite-element method [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 98: 191-205.
- [33] Qu Y L, Chen D H, Liu L, et al. A direct time-domain procedure for the seismic analysis of dam-foundation-reservoir systems using the scaled boundary finite element method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 138: 104364.
- [34] 李志远, 李建波, 林皋. 局部复杂场地Rayleigh波传播特性分析的SBFEM模型研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(11): 4242-4250.
- LI Zhiyuan, LI Jianbo, LIN Gao. Research on influence of partial terrain to scattering of Rayleigh wave based on SBFEM [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(11): 4242-4250.
- [35] Wolf J P, Song C M. *Finite-Element Modelling of Unbounded Media* [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1996: 1-8.
- [36] Graff K F. *Wave Motion in Elastic Solids* [M]. London: Oxford University Press, 1975: 331-391.
- [37] Huang J Q, Zhao M, Du X L. Non-linear seismic responses of tunnels within normal fault ground under obliquely incident P waves [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 61: 26-39.

Time-domain analysis of elastic wave scattering caused by an open trench: plane SV wave incidence

ZHOU Feng-xi^{1,2}, LIANG Yu-wang¹, ZHU Shun-wang¹

(1.School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2.Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on the soil-structure interaction theory, the site containing open trench topographic conditions is decomposed into a near-field system and an infinite-field system using the proportional boundary finite element method. The grid refinement discretization of the near-field region is performed by the quadtree decomposition technique, the displacement unit-impulse response matrix is used to represent the interaction forces at the interface between the near-field and far-field intersections. The obliquely incident plane SV wave is transformed into an equivalent nodal force acting on the boundary of the near-field region to simulate the excitation of the incident wave on the near-field system, which leads to a numerical model of the elastic wave propagation problem in the time-space domain. Through the numerical example, the validity of the method is verified and the effects of the parameters such as the incidence angle and the depth of the trench on the vibration isolation effect are analyzed. The results show that the vibration isolation effect increases with the increase of the incidence angle; and when the incidence angle is larger, further increasing the depth of the open trench, will make the open trench has a better vibration isolation effect.

Key words: open trench; plane SV waves; scattering; vibration isolation effect; scaled boundary finite element

作者简介: 周凤玺(1979—),男,博士,教授。E-mail: geolut@163.com。