

屏蔽区振动放大异常现象的理论分析

Theoretical analysis of unusual vibration amplification in barrier protected zone

高广运¹, 岳中琦², 谭国焕², 邱 畅¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 香港大学 土木工程系, 香港)

摘要: 屏障隔振是一种常见的工程方法, 用以阻碍或改变外围振动波向受保护区(或屏蔽区)的传播, 从而减小屏蔽区的地面振动。然而实际观察结果却发现, 在某些情况下屏蔽区的振动呈放大现象, 本文对此异常现象进行了理论分析。假设屏障是埋入地下的无限大弹性板, 研究了该弹性板在受到纵波作用下的振动响应, 提出了屏障和土体系统共振频率和次生振源新概念, 给出了简单的共振频率计算公式, 并分析了 Barkan(1948)的试验结果, 从而对屏蔽区振动放大的异常现象给出满意的解释。

关键词: 地面屏障; 隔振; 屏蔽区振动放大; 屏障系统共振频率

中图分类号: TU 352

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)05-0565-04

作者简介: 高广运(1961-), 男, 安徽阜阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程的教学和科研工作。

GAO Guang-yun¹, YUE Zhong-qi², Tham L. G.², QIU Chang¹

(1. The Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. The Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: Ground barrier systems are widely used for vibration control in geotechnical engineering. They usually impede and change wave propagating in ground to reduce or eliminate the vibration in protected zones. However, some barrier systems are not effective. Observations show that in some cases, the vibrations in protected zones can be amplified. This paper presents a theoretical analysis of such unusual phenomenon. In the analysis, the barrier system is assumed to be an infinite elastic plate embedded in elastic soils. The dynamic response of the impeded plate under an incident P-wave is examined. The paper proposes the resonant frequency of the barrier-soil system and the induced source of vibration, and gives a simple equation to calculate the resonant frequency and applied it to analyze the test results presented by Barkan(1948). Results show that the unusual phenomenon of the vibration amplification in protected zone can be explained by the new concept.

Key words: ground barriers; vibration isolation; vibration amplification in protected zone; resonant frequency of barrier system

1 引言*

减小振动公害在岩土环境工程学中占有重要的位置。在我国, 由振动引起的纠纷日益增多, 这一问题也成为工程界面临的重要课题之一。应用屏障是防止和减轻地面振动的有效措施之一, 与其他隔振方法相比, 具有造价低、可作为结构一部分且不易损坏等优点。屏障隔振系统可分为连续屏障和非连续屏障两类^[1,2], 连续屏障指屏障是连续的整体, 如开口空沟或用泥浆、锯屑、砂子等填充的沟或混凝土刚性墙等; 非连续屏障指屏障由间断的屏障单体组成, 如排桩或排孔等。

以往应用屏障隔振, 并非都能成功, 失效的原因可能是对屏障与波能各种复杂的相关关系了解不够。Barkan 报道了应用非连续板桩屏障隔振现场原型试验, 但试验测试结果表明^[3]: 在某些情况下屏蔽区的振动呈放大现象。Haupt^[4], Goucher 等^[5]都曾报道混凝土心墙屏障试验和密布封口钢管桩隔振体系的工程测试结果: 在有效的隔振频率和隔振范围内, 屏障保护区的振动呈放大现象, 即所谓的屏障隔振系统失效。虽然这一异常现象极具理论和实用价值, 但文献调查表明, 在国内外公开发表的科技期刊杂志上还没有见到

对它的理论研究。受保护区振动放大是屏障隔振中应避免产生的异常现象, 在以往屏障隔振的模型试验、原型试验和工程实测中均有报道。高广运和杨先健曾提出屏障的共振效应是最主要原因^[6,7], 这很可能就是一些考虑弹性波的散射和衍射而精心设计的地面屏障工程失效的一个重要原因, 本文对此进行了理论分析。

2 屏蔽区振动放大现象理论分析

图 1(a) 说明了隔振屏障产生共振的条件。假设屏障是一埋入地下的弹性薄板, 当某一频率的弹性波以一定角度投影在弹性板上, 发现屏障和周围介质之间存在一固有频率, 当入射波的频率和入射角度同此固有频率达成某一关系时, 屏障将发生共振, 从而形成次生振源, 激发屏障固有振动, 同时向屏蔽区辐射大于入射波强度的透射波, 这就是屏障隔振的共振效应。这时屏障不但不起隔振作用, 反而形成第二振源增大屏蔽区振动。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50178056); 高等学校骨干教师计划资助项目; 863 计划高速磁浮交通技术重大专项经费资助项目

收稿日期: 2001-12-11

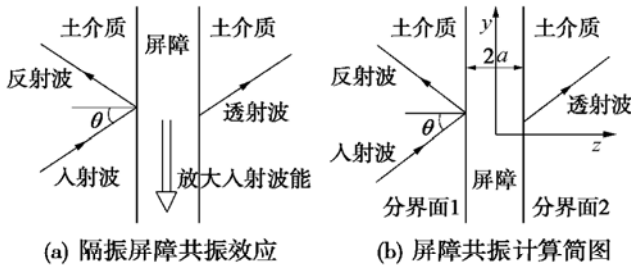


图1 隔振屏障的共振效应和计算简图

Fig. 1 Resonance effect of barrier for isolating vibration and calculating sketch of resonating barrier

图1(b)为理论分析计算简图。对于土介质—屏障—土介质构成的层状体,考虑入射角为 θ 的平面简谐P波。假设屏障两侧土介质均为具有相同性质的均质各向同性半无限弹性体,隔振屏障为均质各向同性无限弹性薄板。由于P波在分界面1处发生反射和折射,并且反射波与折射波均包含两种波型——SV波和P波,而折射波在分界面2处又会产生反射和折射,因此对于图1(b)所示的层状体系,P波的入射将产生复杂的波场。为简化计算,这里忽略SV波,以求P波单独作用于屏障时的精确解。有关SV波的影响将另文讨论。文献[8,9]结果表明,仅考虑P波与同时计入SV波时,屏蔽区波动规律相同。

2.1 入射P波作用下屏障振动位移

(1) 屏障表面波动应力

a) 如图1(b)所示,平面简谐P波作用于屏障时,入射波场、反射波场和透射波场引起的屏障表面波动应力 p_1, p_2 和 p_3 可分别表示为

$$p_1 = p_{10} \exp[i(\omega t - k_0((z+a)\cos\theta + y\sin\theta))] \quad (1)$$

$$p_2 = p_{20} \exp[i(\omega t - k_0(-(z+a)\cos\theta + y\sin\theta))] \quad (2)$$

$$p_3 = p_{30} \exp[i(\omega t - k_0((z-a)\cos\theta + y\sin\theta))] \quad (3)$$

式中 k_0 为土介质中纵波波数, $k_0 = \omega/c_{sp}$; ω 为振动圆频率; c_{sp} 为土介质的纵波波速; θ 为入射角; a 为屏障的半宽。

b) 如图1(b)所示,作用于屏障边界1上的力可由式(1)和式(2)确定:

$$(p_1 + p_2)_{z=-a} = (p_{10} + p_{20}) \exp[i(\omega t - k_0 y \sin\theta)] \quad (4)$$

而作用在屏障边界2上的力可由式(3)确定:

$$(p_3)_{z=a} = p_{30} \exp[i(\omega t - k_0 y \sin\theta)] \quad (5)$$

c) 如图2示,作用于屏障两边界面上的力可分解为对称部分 p_c 和反对称部分 p_a ,则

$$p_c = \frac{1}{2}(p_{10} + p_{20} + p_{30}) \exp[i(\omega t - k_0 y \sin\theta)] \quad (6)$$

$$p_a = \frac{1}{2}(p_{10} + p_{20} - p_{30}) \exp[i(\omega t - k_0 y \sin\theta)]$$

p_c 和 p_a 是屏障振动时的应力边界条件,结合屏障的动力平衡方程即可求出屏障的位移。

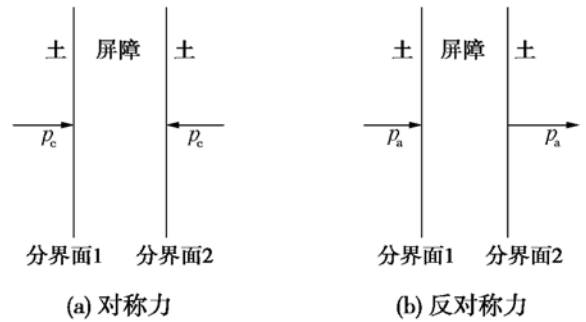


图2 作用在分界面上的对称力和反对称力

Fig. 2 Symmetrical and unsymmetrical force acting on the interfaces of barrier and subsoil

(2) 屏障动力平衡方程及其通解

a) 如图1(b)示,屏障振动仅发生在 y, z 平面,属于平面应变问题,其动力平衡方程为

$$\begin{cases} (\lambda_b + G_b) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + G_b \nabla^2 v = \rho_b \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ (\lambda_b + G_b) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + G_b \nabla^2 w = \rho_b \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\varepsilon = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; ρ_b, λ_b 和 G_b 分别为屏障质量密度、拉梅常数和剪切模量; v 和 w 分别为屏障沿 y 和 z 方向的位移。

b) 为求解方程(7),引入 φ 和 ψ 两个势函数,则 v 和 w 可用 φ 和 ψ 表示:

$$\begin{cases} v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \\ w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \end{cases} \quad (8)$$

代入式(7),可得关于 φ 和 ψ 的两个独立方程:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = \frac{1}{c_{bp}^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \psi = \frac{1}{c_{bs}^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中 c_{bp} 为屏障纵波波速; c_{bs} 为屏障横波波速。

c) 方程(9)的解可表示为如下形式:

$$\begin{cases} \varphi(y, z, t) = f_1(z) \exp[i(\omega t - k_0 y \sin\theta)] \\ \psi(y, z, t) = f_2(z) \exp[i(\omega t - k_0 y \sin\theta)] \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),可得下列方程:

$$\begin{cases} f_1''(z) - \alpha_1^2 f_1(z) = 0 \\ f_2''(z) - \alpha_2^2 f_2(z) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中

$$\alpha_1 = \frac{\omega}{c_{bp}} \sqrt{\left| \frac{c_{bp}}{c_{sp}} \sin\theta \right|^2 - 1}; \quad \alpha_2 = \frac{\omega}{c_{bs}} \sqrt{\left| \frac{c_{bs}}{c_{sp}} \sin\theta \right|^2 - 1}.$$

d) 解方程(11)可以得到:

$$\begin{cases} \varphi = (C_1 e^{\alpha_1 z} + C_2 e^{-\alpha_1 z}) \exp[i(\omega t - k_0 y \sin\theta)] \\ \psi = (C_3 e^{\alpha_2 z} + C_4 e^{-\alpha_2 z}) \exp[i(\omega t - k_0 y \sin\theta)] \end{cases} \quad (12)$$

e) 将式(12)代入式(8), 可得屏障的位移表达式:

$$\begin{cases} v = - [(C_1 e^{a_1 z} + C_2 e^{-a_1 z}) i k_0 \sin \theta + (C_3 e^{a_2 z} - C_4 e^{-a_2 z}) a_2] \exp[i(\omega t - k_0 y \sin \theta)] \\ w = [(C_1 e^{a_1 z} - C_2 e^{-a_1 z}) a_1 - (C_3 e^{a_2 z} + C_4 e^{-a_2 z}) i k_0 \sin \theta] \exp[i(\omega t - k_0 y \sin \theta)] \end{cases} \quad (13)$$

f) 根据应力应变关系, 得屏障法向和切向应力:

$$\begin{cases} \sigma_z = [(C_1 e^{a_1 z} + C_2 e^{-a_1 z}) a_1 - (C_3 e^{a_2 z} - C_4 e^{-a_2 z}) a_2] \exp[i(\omega t - k_0 y \sin \theta)] \\ \tau_{yz} = - [(C_1 e^{a_1 z} - C_2 e^{-a_1 z}) a_3 + (C_3 e^{a_2 z} + C_4 e^{-a_2 z}) a_4] \exp[i(\omega t - k_0 y \sin \theta)] \end{cases} \quad (14)$$

式中 $a_1 = (\lambda_b + 2G_b) a_1^2 - \lambda_b k_0^2 \sin^2 \theta$; $a_2 = 2iG_b a_2 k_0 \sin \theta$; $a_3 = 2iG_b a_1 k_0 \sin \theta$; $a_4 = (a_2^2 + k_0^2 \sin^2 \theta) G_b$; C_1, C_2, C_3 和 C_4 为待定系数, 需根据边界条件确定。

以上得到了屏障振动动力平衡方程的通解, 结合边界条件即可求出屏障的振动位移。

(3) 屏障表面振动位移

图 2 表示入射波、反射波和透射波对屏障的作用, 可分解为作用于分界面 1 和分界面 2 上的对称力 p_c 和反对称力 p_a , 屏障隔振感兴趣的是反对称力 p_a 作用下屏障的位移。

反对称力 p_a 作用时, 屏障振动的边界条件为: 当 $z = -a$ 时, $\sigma_z = -p_a, \tau_{yz} = 0$; 当 $z = a$ 时, $\sigma_z = p_a, \tau_{yz} = 0$ 。将边界条件代入式(14)可以确定待定系数 C_1, C_2, C_3 和 C_4 , 进而由式(13)求出屏障表面位移。入射 P 波时屏障表面在 z 方向的位移 w_a 为

$$w_a = \frac{p_a}{\rho_b a \omega^2} \cdot \frac{k_2}{4 \sqrt{\gamma-1} \tanh(k_2 \sqrt{\gamma-1}) - \frac{(2\gamma-1)^2}{\sqrt{\gamma-1} d^2} \tanh(k_2 \sqrt{\gamma-1} d^2)} \quad (15)$$

式中 $\gamma = [(c_{bp}/c_{sp}) \sin \theta]^2$; k_2 为波数, $k_2 = \omega a / c_{bp}$; $d^2 = (1 - 2\mu_b)/(2 - 2\mu_b)$, μ_b 为屏障的泊松比。

将式(15)中的正切项按级数展开, 保留其前面两项, 可得到屏障振动时表面位移的表达式:

$$w_a = \frac{2p_a}{m_b \omega^2} \cdot \frac{1}{\frac{D \omega^2}{m_b c_{sp}^4} \sin^4 \theta - 1}, z = \pm a \quad (16)$$

式中 D 为屏障弯曲刚度, $D = 2E_b a^3 / [3(1 - \mu_b^2)]$; m_b 为屏障单位面积质量, $m_b = 2\rho_b a$; E_b 为屏障弹性模量。

2.2 屏障系统共振频率

产生共振效应时, 屏障表面振动位移取极大值, 即式(16)中分母为 0, 即

$$\frac{D \omega^2}{m_b c_{sp}^4} \sin^4 \theta = 1 \quad (17)$$

屏障纵波波速 $c_{bp} = \sqrt{E_b / [\rho_b(1 - \mu_b^2)]}$, 由式(17)得

$\omega = \frac{\sqrt{3}}{ac_{bp}} \left| \frac{c_{sp}}{\sin \theta} \right|^2$, 据此得屏障系统共振频率 f 为

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{c_{sp}^2}{2ac_{bp} \sin^2 \theta} \quad (18)$$

由式(18)可知, 屏障系统共振频率取决于屏障厚度、屏障和介质波速及入射波角($2a$ 为屏障厚度)。

当入射角 $\theta = 90^\circ$ 时, 得屏障系统临界共振频率为

$$f_{cr} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{c_{sp}^2}{2ac_{bp}} \quad (19)$$

由式(18)和(19)可得

$$f_{cr} = f \sin^2 \theta \quad (20)$$

由式(20)可知, f_{cr} 是屏障可能产生共振的最低频率。对弯曲刚度较大的屏障, 如混凝土芯墙等, f_{cr} 往往出现在低频段; 对于弯曲刚度较小的屏障, 如粉煤灰等, f_{cr} 则出现在高频段。

由于假设屏障为无限大, 因此它所有的振动频率都是固有频率, 也就是在给定频率的简谐力停止作用后所有可能的振动频率。一定角度的入射波沿屏障的振动传播和同一频率时屏障固有振动的传播相同时, 即发生共振现象, 从而引起振动剧增。屏障系统共振时, 振动强烈, 其底部处于自由边界状态, 将激发体波形成次生波源, 此时, 屏障不但不起隔振作用, 反而放大屏障后的振动。

3 屏蔽区振动放大实例分析

应用上述屏障共振频率的概念和计算公式, 可分析已有屏障隔振中屏蔽区的振动放大现象。这里仅以 Barkan(1948) 的现场试验资料为例分析。板桩屏障平面布置如图 3 所示^[3], 场地地层 8 m 以上为饱和砂层, 下为有机质粉土, 再下部又是砂层。密布木板桩屏障沿直线排列, 桩截面尺寸为 0.20 m × 0.20 m, 换算成圆形截面直径为 0.23 m, 相邻桩间一般净距为 0.05 m, 总共打入 44 根桩, 所以整体屏障功能显著。

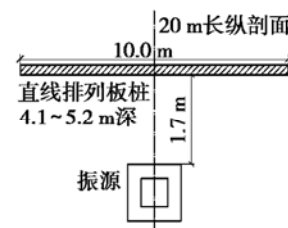


图 3 直线排列板桩平面布置

Fig. 3 Layout of sheet pile arranged in line

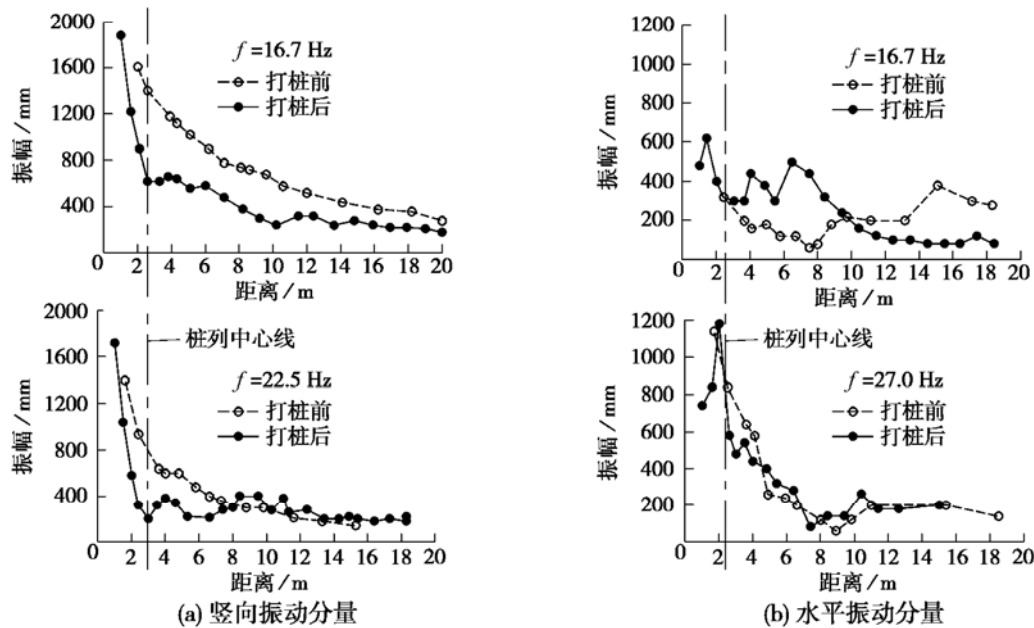


图4 板桩设置前后沿纵向剖面地表竖向振动与水平振动分量

Fig. 4 Vertical and horizontal component of ground vibration with and without sheet piles as barrier

试验表明,某些情况下桩列后的振动不但没有较设置桩列前减小,反而增大了。图4为桩列打入前后沿垂直桩列中心纵向剖面振动测试结果^[3],可见水平振动放大较竖向严重。工程上,水平振动分量的危害较竖向振动分量。

用式(18)计算。取桩列屏障系统平均入土深度为4.7 m,按其中点埋深(2.35 m)与振源距离,计算入射角 $\theta = 50^\circ$,取 $c_{sp} = 160 \text{ m/s}$ 。一般木材顺纹弹性模量取 $E_b = 11 \times 10^3 \text{ MPa}$, $\rho = 0.510 \text{ kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$,则计算得 $c_{bp} = 4740 \text{ m/s}$ 。考虑打桩后部分土被挤密,换算成圆形截面桩列屏障,以桩列直径0.3 m为屏障厚度,求得屏障隔振系统共振频率 $f = 16.9 \text{ Hz}$ 。当不考虑部分挤密土的隔振作用,以桩直径 $2a = 0.23 \text{ m}$ 计算时, $f = 22.0 \text{ Hz}$ 。据文献[3]实测结果,屏障区振动放大发生在13.5~31.5 Hz的频率范围。

4 结 论

(1)发现屏障和周围介质之间存在一个固有频率——屏障系统共振频率,当入射波的频率和入射角度同此固有频率达成某一关系时,屏障将发生共振。提出了屏障系统共振频率和次生振源新概念。共振激发屏障固有振动,同时向屏蔽区辐射大于入射波强度的透射波,这时屏障不但不起隔振作用,反而形成第二振源增大屏蔽区地面振动。

(2)分析表明,屏障系统共振频率取决于屏障厚度、屏障和土介质波速及入射波角。

(3)屏障系统临界共振频率是屏障可能产生共振的最低频率,对弯曲刚度较大的屏障,多出现在低频

段;对于弯曲刚度较小的屏障,则出现在高频段。

(4)屏障隔振设计应避免屏障系统产生共振,一般控制入射频率小于屏障系统临界共振频率,必要时可将屏障设计成一定倾角,以调整入射波的角度。

(5)根据本文的理论结果,分析和解释了屏蔽区振动放大实例——Barkan的试验结果。

参考文献:

- [1] 高广运. 非连续屏障地面隔振理论与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
- [2] 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.
- [3] Barkan D D. Dynamics of Bases and Foundations[M]. New York: Mc Graw-Hill Book Co Inc, 1962.
- [4] Haupt W A. Model tests on screening of surface waves[A]. Proc of 10th Int Conf of Soil Mechanics and Found Engrg[C]. Stockholm, 1981. 215-222.
- [5] Goucher R, Smith D. Vibration measurement techniques advanced test and manufacturing facilities[J]. Vibration Control in Microelectronics, Optics and Metrology, SPIE, 1991, 1619: 272-283.
- [6] 高广运. 非连续屏障隔振的理论分析和试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 1991.
- [7] Yang X J. Ground vibration isolated by silo and pile barriers [A]. 2nd Int Conf on Recent Advances in Geot Earthq Engrg and Soil Dyn[C]. St Louis, 1991. 1557-1562.
- [8] Aviles J, Sanchez-Sesma F J. Piles as barriers for elastic waves [J]. J Geot Engrg Div, ASCE, 1983, 109(9): 1133-1146.
- [9] Aviles J, Sanchez-Sesma F J. Foundation isolation from vibration using piles as barriers[J]. J Engrg Mechanics Div, ASCE, 1988, 114(11): 1854-1870.