

空沟对列车运行引起的地基振动隔振效果研究

曹志刚, 蔡袁强, 徐长节

(浙江大学 软弱土与环境工程教育部重点实验室, 杭州 310058)

摘 要: 为研究空沟对高速列车引起地基振动的隔振效果, 在已有研究基础上改进出一种新的解析研究模型。模型中首次运用了饱和半空间模型来研究地基上隔振沟对高速列车的隔振效果; 隔振沟则通过在饱和半空间土体上设置 3 个合适宽度、截面为矩形的弹性层来模拟; 中间矩形弹性层为路堤, 路堤上方放置了枕木与轨道。枕木与轨道分别通过纵向异性 Kirchhoff 薄板与 Euler 梁来模拟, 饱和土地基采用 Biot 多孔饱和介质理论来描述。控制方程通过傅立叶变换与傅立叶级数展开, 在变换域中进行求解。研究表明, 随着列车运行速度的提高, 空沟的隔振效果明显提高; 饱和土体固-液相的耦合作用对隔振沟的隔振效果的影响明显, 尤其当列车运行速度超过土体表面 Rayleigh 波速时, 随着土体渗透系数的增加, 空沟隔振效果显著降低。此外, 列车运行速度超过土体表面波速时, 饱和土地基上空沟的隔振效果明显优于相应单相弹性地基上空沟的隔振效果。

关 键 词: 多孔弹性半空间; Biot 理论; 空沟; 地基振动; 解析解

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Screening efficiency of open trenches to train-induced ground vibration

CAO Zhi-gang, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie

(MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to investigate the screening efficiency of open trenches to the train-induced ground vibration, a new analytical model is proposed based on existing researches. The ground is firstly modeled as a fully saturated poroelastic half-space in the research of vibration isolation to moving trains. The trenches are obtained by placing three rectangular elastic layers with appropriate widths on the poroelastic half-space. The middle elastic layer is treated as the embankment, upon which the rails and the sleepers are placed. The sleepers and the rails are modeled as transversely isotropic Kirchhoff plate and Euler-Bernoulli beams respectively. Biot's theory is applied to characterize the poroelastic half-space. By Fourier transforms and Fourier series, the governing equations are solved in the transformed domain. The investigation reveals that, the screening effects of open trenches improve as the train speed increases. The effects of coupling between the soil skeleton and pore water on the screening efficiency is apparent, especially when the train speed exceeds the Rayleigh wave speed of the half-space; the screening efficiency of open trenches decreases obviously as the permeability of the ground increases. In addition, the screening efficiency of the trench on poroelastic half-space is much better than that on elastic half-space to the train-induced ground vibration for the supercritical-train-speed case.

Key words: poroelastic half-space; Biot's theory; open trench; ground vibration; analytical solution

1 引 言

随着轨道交通运输的发展, 修建在人口密集区的轨道交通路线日益增加, 列车运行引发的环境振动问题, 已经引发了公众的强烈反应, 对沿线居民生活以及周边建筑造成了较大干扰。列车引起地基振动问题及隔振措施也成为学者们研究的热点之一。

目前, 已有许多学者对列车引起的周边环境振动问题开展了研究^[1-5]。研究表明, 当列车运行速度较高时, 将引起周边环境的强烈振动, 尤其当列车运行速度接近地基表面波速时, 将引起列车与地基的共振, 往往需要隔振措施来降低振动对周边环境的影响。对于隔振措施的研究, 李志毅等^[6]基于瑞利波散射的积分方程法, 研究了瑞利波作用下弹性土体中多排桩屏障远场隔振效果。丁光亚等^[7]进

一步研究了饱和土体中弹性桩对平面 S 波的屏蔽问题。李宁等^[8]通过数值与试验方法研究了水平激振下波阻板主动隔振研究。针对高速列车引起的地基振动的隔振研究,一些学者通过有限元-边界元方法,综合研究了临界速度以下时,多种隔振措施对列车引起地基振动的隔振效果,其中包括空沟、填充沟和波阻板等^[9-10]。Hung 等^[11]采用有限元/无限元方法分别研究了在列车运行速度低于和高于地基表面波速时,隔振沟对列车引起地基振动的隔振效果。冯牧等^[12]通过有限元方法结合现场测试,分析了隔振沟对地铁周边建筑的隔振效果,并对隔振沟各参数进行了分析。谭燕等^[13]与谢伟平等^[14]建立了列车-隧道-地基的数值计算模型,分析了波阻块对地铁荷载引发低频振动的隔振效果。Karlstrom 等^[15]首次建立了隔振沟解析研究模型,运用解析方法研究了单相弹性地基上隔振沟对列车引起地基振动的隔振效果。

以上对于列车引起地基振动的隔振研究中,往往把地基简化为单相弹性介质。然而,在沿海地下水位较高地区,把地基视为饱和两相介质更接近于实际情况。单相弹性介质模型不能描述高速列车荷载作用下饱和土体中的水-土耦合作用。事实上,研究表明,当列车运行速度接近地基表面波速时,单相弹性介质模型将带来较大误差^[3-4]。因此,为避免理论模型带来的误差,在列车引起地基振动的隔振研究中同样有必要采用与实际情况更为接近的饱和土体模型。徐斌等^[16]和高广运等^[17]分别用边界元方法与 2.5D 有限元方法研究了饱和土地基中隔振沟的隔振效果,但在他们的研究中未考虑轨道系统的作用或将轨道系统简化为等效梁模型,目前,饱和土地基上隔振沟对列车的隔振效果的研究还未见报导。

本文首次针对高速列车引起地基振动建立了饱和土地基上隔振沟解析分析模型,控制方程通过傅立叶(Fourier)变换结合 Fourier 级数展开进行求解。通过数值计算,分析了隔振沟对列车引起地基振动的隔振效果,并对比了饱和土地基上隔振沟与弹性土地基上隔振沟隔振效果的差异。同时,进一步分析了饱和土地基中渗透系数对隔振沟隔振效果的影响。

2 控制方程及求解

隔振沟分析模型以及轨道系统详图如图 1 所示。

2.1 路堤弹性层控制方程

地基模拟为饱和土体半空间,隔振沟通过在饱

和土体上设置 3 个合适宽度矩形弹性层来模拟^[15]。钢轨与枕木设置在路堤弹性层(e1)上,并分别通过 Euler 梁与纵向异性 Kirchhoff 薄板来模拟。对于弹性路堤层与隔振沟外侧土堤,弹性动力学方程如下:

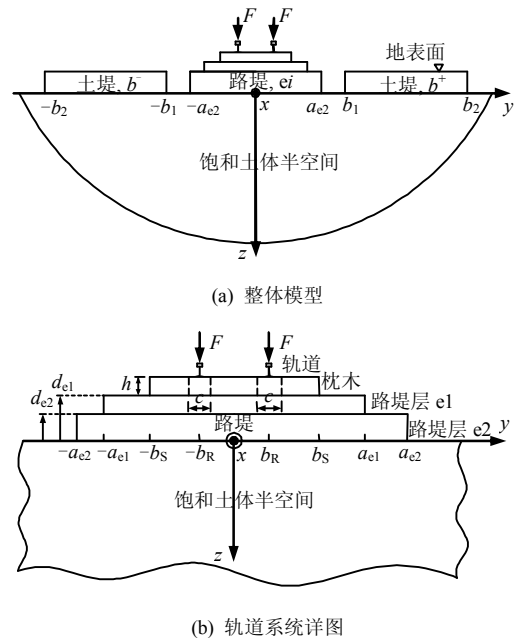


图 1 隔振沟分析模型

Fig.1 The analytical model of the trench

$$(\lambda_j + 2\mu_j)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_j) - \mu_j \nabla \times (\nabla \times \mathbf{u}_j) = \rho_j \ddot{\mathbf{u}}_j \quad (1)$$

式中: λ_j 、 μ_j 为弹性层 Lamé 常数; ρ_j 为弹性层密度; $\mathbf{u}_j$ 为位移向量, $j = e1, e2$ 时表示路堤层, $j = b^+, b^-$ 表示隔振沟外侧土堤, $\nabla = \{\partial_x, \partial_y, \partial_z\}$, 为梯度算子。

在法向为 e_k ($k=x, y, z$) 的平面上的应力表示为

$$\sigma_j^{(e_k)} = \lambda_j e_k \nabla \cdot \mathbf{u}_j + 2\mu_j \partial_k \mathbf{u}_j + \mu_j e_k \times (\nabla \times \mathbf{u}_j) \quad (2)$$

路堤层间为位移与应力连续接触,在 $z = d_{e2}$ 处的边界条件表示如下:

$$\mathbf{u}_{e2} = \mathbf{u}_{e1} \quad |y| < a_{e1} \quad (3)$$

$$\sigma_{e2}^{(e_z)} = \begin{cases} \sigma_{e1}^{(e_z)} & |y| < a_{e1}, \\ 0 & a_{e1} \leq |y| < a_{e2} \end{cases} \quad (4)$$

在 $z = 0$ 处,位移与应力接触条件表示为

$$\mathbf{u} = \begin{cases} \mathbf{u}_{e2} & |y| < a_{e2}, \\ \mathbf{u}_{b^+} & b_1 < |y| < b_2, \end{cases} \quad (5)$$

$$\sigma^{(e_z)} = \begin{cases} \sigma_{e2}^{(e_z)} & |y| < a_{e2} \\ \sigma_{b^+}^{(e_z)} & b_1 < |y| < b_2 \\ 0 & a_{e2} < |y| < b_1 \text{ 及 } |y| > b_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{u}$ 、 $\boldsymbol{\sigma}^{(e_s)}$ 为饱和土体半空间位移与应力向量。使路堤位移场能在 y 方向进行级数展开, 路堤的侧面边界条件设置成以下特殊形式:

$$\left. \begin{aligned} v_{ei} &= 0, & -d_{ei} < z < -d_{ei+1} \\ \sigma_{xyei} &= 0, & -d_{ei} < z < -d_{ei+1} \\ \sigma_{zyei} &= 0, & -d_{ei} < z < -d_{ei+1} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

定义 $d_{e3} = 0$ 。以上边界条件中, $\sigma_{xyei} = 0$, $\sigma_{zyei} = 0$ 应力为自然边界条件, 但 $v_e = 0$ 是为了计算需要而设置的人工边界条件。以上边界条件在只考虑竖向荷载时, 可以很好地模拟路堤的位移响应情况^[15]。

在路堤上表面, 设置了枕木与两根钢轨。钢轨在横向与竖向都采用 Euler-Bernoulli 控制方程来描述钢轨的动力特性, 而纵向则采用杆方程来描述。枕木采用纵向异性 Kirchhoff 板模型^[18]。钢轨横截面积为 A_R , 弹性模量为 E_R , 对 y 轴与 x 轴的转动惯量分别为 I_{yR} 、 I_{zR} , 轨道宽度为 c 。枕木板密度为 ρ_S , x 方向弹性模量为 E_{Sx} , 与 x 方向垂直的 k 方向弹性模量为 E_{Sk} , y - z 平面内泊松比为 ν_{yz} , x - k 平面内泊松比为 ν_{xk} 。路堤上表面($z = -d_{e1}$)应力满足以下边界条件:

$$\sigma_{zze1} = \begin{cases} J_1 \ddot{w}_{e1} + J_2 \partial_x^4 w_{e1} + J_3 \partial_x^2 \partial_y^2 w_{e1} + J_4 \partial_y^4 w_{e1}, \\ |y| < b_S, |y| \notin [b_R \pm c/2] \\ I_1 \ddot{w}_{e1} + I_2 \partial_x^4 w_{e1} + I_3 \partial_x^2 \partial_y^2 w_{e1} + I_4 \partial_y^4 w_{e1} - F/c, \\ |y| \in [b_R \pm c/2] \\ 0, \quad b_S \leq |y| \leq a_{e1} \end{cases} \quad (8)$$

$$\sigma_{zye1} = \begin{cases} (\rho_R A_R \ddot{v}_{e1} + E_R I_{zR} \partial_x^4 v_{e1})/c, & |y| \in [b_R \pm c/2] \\ 0, & |y| \notin [b_R \pm c/2] \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{其中: } I_1 = J_1 + \frac{\rho_R A_R}{c}, J_1 = \rho_S h$$

$$I_4 = J_4 = \frac{h^3}{12} \left(\frac{E_{Sk} E_{Sx}}{E_{Sx} - E_{Sk} \nu_{Sxk}^2} \right)$$

$$I_2 = J_2 + \frac{E_R I_{yR}}{c}, J_2 = \frac{h^3}{12} \left(\frac{E_{Sx}^2}{E_{Sx} - E_{Sk} \nu_{Sxk}^2} \right)$$

通过杆方程来考虑钢轨对路堤表面纵向剪应力的影响:

$$\sigma_{xze1} = \begin{cases} (\rho_R A_R \ddot{u}_R - E_R A_R \partial_x^2 u_R)/c, & |y| \in [b_R \pm c/2] \\ 0, & |y| \notin [b_R \pm c/2] \end{cases} \quad (10)$$

土堤上表面应力自由边界条件为

$$\sigma_{b^{\pm}}^{(e_s)} = 0, \quad b_1 < |y| < b_2 \quad (11)$$

为了对位移进行 Fourier 级数展开, 土堤侧面采用相似的边界条件:

$$\left. \begin{aligned} v_{b^{\pm}} &= 0, & -d_b < z < 0 \\ \partial_y u_{b^{\pm}} &= 0, & -d_b < z < 0 \\ \partial_y w_{b^{\pm}} &= 0, & -d_b < z < 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

对于方程 (1) 的求解, 把位移场分解为 3 个标量势函数, 表示如下:

$$\mathbf{u}_j = \nabla \varphi_j + \nabla \times (\mathbf{e}_z \psi_{SHj}) + \nabla \times \nabla \times (\mathbf{e}_z \psi_{SVj}) \quad (13)$$

式中: φ_j 、 ψ_{SHj} 、 ψ_{SVj} 分别为 P 波, SH 波以及 SV 波的势函数。为求解路堤控制方程, 对时间 t 与 x 坐标采用 Fourier 变换, 对应于变换域里的变量表示为 ω 和 q , 变换域里变量在顶部采用“ $\wedge$ ”表示; 而在 y 方向, 对以上 3 个势函数采用三角级数展开:

$$\hat{\varphi}_j = \sum_{m=0}^{\infty} (D_{1m}^j \sin(h_{jm}^p L_j(z)) + E_{1m}^j \cos(h_{jm}^p L_j(z))) \cos(p_{jm} T_j(y)) \quad (14)$$

$$\hat{\psi}_{SHj} = \sum_{m=1}^{\infty} (D_{2m}^j \sin(h_{jm}^s L_j(z)) + E_{2m}^j \cos(h_{jm}^s L_j(z))) \sin(p_{jm} T_j(y)) \quad (15)$$

$$\hat{\psi}_{SVj} = \sum_{m=0}^{\infty} (E_{3m}^j \sin(h_{jm}^s L_j(z)) - D_{3m}^j \cos(h_{jm}^s L_j(z))) \cos(p_{jm} T_j(y)) \quad (16)$$

式中: D_{nm}^j 、 E_{nm}^j 为待定常数, $n=1,2,3$ 分别为 P 波、SH 波和 SV 波的幅值。由于 $\mathbf{u}_j$ 关于 x 轴对称, 故两边土堤中的待定常数相等, 只需考虑一边即可 (本文考虑右边土堤 b^+)。其中, $k_j^p = \omega/c_j^p$, $k_j^s = \omega/c_j^s$, c_j^p 、 c_j^s 为路堤中的压缩波与剪切波波速, 由 $c_j^p = ((\lambda_j + 2\mu_j)/\rho_j)^{1/2}$, $c_j^s = ((\lambda_j + \mu_j)/\rho_j)^{1/2}$ 求得。 $h_{jm}^p = (k_j^{p2} - q^2 - p_{jm}^2)^{1/2}$, $h_{jm}^s = (k_j^{s2} - q^2 - p_{jm}^2)^{1/2}$ 且满足条件 $\text{Im } h_{jm}^p \geq 0$, $\text{Im } h_{jm}^s \geq 0$ 。区域的不同, 三角级数中变量 $L_j(z)$ 、 $T_j(y)$ 、 P_{jm} 也不同, 详见表 1。

由方程 (13) 可得, 路堤以及隔振沟外侧土堤的位移表达式为

$$\hat{u}_j = \sum_{m=0}^{\infty} \hat{u}_{jm}(z) \cos(p_{jm} T_j(y)) \quad (17)$$

$$\hat{v}_j = \sum_{m=1}^{\infty} \hat{v}_{jm}(z) \sin(p_{jm} T_j(y)) \quad (18)$$

$$\hat{w}_j = \sum_{m=0}^{\infty} \hat{w}_{jm}(z) \cos(p_{jm} T_j(y)) \quad (19)$$

其中:

$$\hat{u}_{jm}(z) = \sum_{n=1}^3 \alpha_{nm}^j (D_{nm}^j \sin(k_{nm}^j L_j(z)) + E_{nm}^j \cos(k_{nm}^j L_j(z))) \quad (20)$$

$$\hat{v}_{jm}(z) = \sum_{n=1}^3 \beta_{nm}^j (D_{nm}^j \sin(k_{nm}^j L_j(z)) + E_{nm}^j \cos(k_{nm}^j L_j(z))) \quad (21)$$

$$\hat{w}_{jm}(z) = \sum_{n=1}^3 \gamma_{nm}^j (D_{nm}^j \cos(k_{nm}^j L_j(z)) - E_{nm}^j \sin(k_{nm}^j L_j(z))) \quad (22)$$

系数 α_{nm} 、 β_{nm} 、 γ_{nm} 、 k_{nm} 见表 2, 其中 i 为虚数单位。

表 1 路堤弹性层三角系数表 ($j=e1, e2, b^{\pm}$)

Table 1 Trigonometric arguments in the embankments and banks

j	p_{jm}	$T_j(y)$	$L_j(z)$
ei	$\frac{m\pi}{a_i}$	y	$z+d_{ei+1}$
b^-	$\frac{m\pi}{b_1-b_2}$	$y+b_1$	z
b^+	$\frac{m\pi}{b_2-b_1}$	$y-b_1$	z

表 2 路堤弹性层位移系数表 ($j=e1, e2, b^{\pm}$)

Table 2 Displacement coefficients in the elastic layers

n	α_{nm}^j	β_{nm}^j	γ_{nm}^j	k_{nm}^j
1	iq	$-p_{jm}$	h_{jm}^p	h_{jm}^j
2	p_{jm}	$-iq$	0	h_{jm}^s
3	$iq h_{jm}^s$	$-p_{jm} h_{jm}^s$	$-(p_{jm}^2 + q^2)$	h_{jm}^s

由方程 (2) 可得路堤的应力表达式为

$$\hat{\sigma}_{xj} = \sum_{m=0}^{\infty} \hat{\sigma}_{xjm}(z) \cos(p_{jm} T_j(y)) \quad (23)$$

$$\hat{\sigma}_{yj} = \sum_{m=0}^{\infty} \hat{\sigma}_{yjm}(z) \sin(p_{jm} T_j(y)) \quad (24)$$

$$\hat{\sigma}_{zj} = \sum_{m=0}^{\infty} \hat{\sigma}_{zjm}(z) \cos(p_{jm} T_j(y)) \quad (25)$$

其中:

$$\hat{\sigma}_{xjm}(z) = \sum_{n=1}^3 \mu_j \xi_{nm}^j (D_{nm}^j \cos(k_{nm}^j L_j(z)) - E_{nm}^j \sin(k_{nm}^j L_j(z))) \quad (26)$$

$$\hat{\sigma}_{yjm}(z) = \sum_{n=1}^3 \mu_j \zeta_{nm}^j (D_{nm}^j \cos(k_{nm}^j L_j(z)) - E_{nm}^j \sin(k_{nm}^j L_j(z))) \quad (27)$$

$$\hat{\sigma}_{zjm}(z) = \sum_{n=1}^3 \mu_j \eta_{nm}^j (D_{nm}^j \sin(k_{nm}^j L_j(z)) + E_{nm}^j \cos(k_{nm}^j L_j(z))) \quad (28)$$

上式中的系数 ξ_{nm}^j 、 ζ_{nm}^j 、 η_{nm}^j 的表达式为

$$\xi_{nm}^j = k_{nm}^j \alpha_{nm}^j + iq \gamma_{nm}^j, \quad \zeta_{nm}^j = k_{nm}^j \beta_{nm}^j - p_{jm} \gamma_{nm}^j$$

$$\eta_{nm}^j = ((k_j^s / k_j^p)^2 - 2)(iq \alpha_{nm}^j + p_{jm} \beta_{nm}^j) - (k_j^s / k_j^p)^2 k_{nm}^j \gamma_{nm}^j$$

2.2 饱和土地基控制方程

对于路堤下饱和土地基, 引入 Biot 波动理论^[19-20]:

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \alpha^2 M + \mu) u_{j,ji} + \alpha M w_{j,ji} = \rho \ddot{u}_i + \rho_f \ddot{w}_i \quad (29)$$

$$\alpha M u_{j,ji} + M w_{j,ji} = \rho_f \ddot{u}_i + m_1 \ddot{w}_i + b \dot{w}_i \quad (30)$$

式中: u_i 、 w_i ($i=x, y, z$) 为固相位移分量以及液相相对于固相的位移分量; u_i 、 w_i 上的点代表对时间 t 求偏导数。 λ 、 μ 为饱和土体 Lamé 常数; α 、 M 为表征土颗粒和孔隙流体压缩性的常数; 假定土体颗粒不可压缩, 取 $\alpha=1$, $M=K_f/n$, K_f 为流体的体积模量; b 为反映流-固相对位移时内摩擦力的物理量; $\rho=n\rho_f+(1-n)\rho_s$, ρ_f 为流体的质量密度, ρ_s 为土体骨架的质量密度, n 为土体的孔隙率; $m_1=\rho_f/n$ 。

土体的应力-应变关系为

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i}) - \alpha \delta_{ij} p_f \quad (31)$$

渗流连续方程为

$$-\dot{p}_f = M \dot{w}_{i,i} + \alpha M \dot{u}_{i,i} \quad (32)$$

通过 Fourier 变换求解以上方程, 其中与 y 对应的变换域里变量用 p 表示, 变换后变量上面用“ $\sim$ ”表示, 可求得

$$\bar{p} = A e^{-\gamma_1 z} + B e^{-\gamma_2 z} \quad (33)$$

$$\bar{u}_x = -\frac{i}{q} \{ [\chi_1 + a_1(q^2 - L_1^2)] A e^{-\gamma_1 z} + [\chi_2 + a_2(q^2 - L_2^2)] B e^{-\gamma_2 z} + (C \gamma_3 + D p) e^{-\gamma_3 z} \} \quad (34)$$

$$\bar{u}_y = -ip(a_1 A e^{-\gamma_1 z} + a_2 B e^{-\gamma_2 z}) + i D e^{-\gamma_3 z} \quad (35)$$

$$\bar{u}_z = \gamma_1 a_1 A e^{-\gamma_1 z} + \gamma_2 a_2 B e^{-\gamma_2 z} + C e^{-\gamma_3 z} \quad (36)$$

由式 (31) 得土体应力表达式为

$$\bar{\sigma}_{xz} = \frac{\mu i}{q} [\gamma_1 g_1 A e^{-\gamma_1 z} + \gamma_2 g_2 B e^{-\gamma_2 z} + (C \gamma_3^2 + C q^2 + D \gamma_3 p) e^{-\gamma_3 z}] \quad (37)$$

$$\bar{\sigma}_{yz} = \mu i [2 p \gamma_1 a_1 A e^{-\gamma_1 z} + 2 p \gamma_2 a_2 B e^{-\gamma_2 z} + (C p - D \gamma_3) e^{-\gamma_3 z}] \quad (38)$$

$$\bar{\sigma}_{zz} = g_3 A e^{-\gamma_1 z} + g_4 B e^{-\gamma_2 z} - 2\mu\gamma_3 C e^{-\gamma_3 z} \quad (39)$$

以上等式中, A 、 B 、 C 和 D 为待定系数, 求解过程详见文献[3], 其他参数表示如下:

$$\gamma_i = \sqrt{q^2 + p^2 - L_i^2}, \quad i=1,2 \quad (40)$$

$$\gamma_3 = \sqrt{q^2 + p^2 + S^2 / \mu} \quad (41)$$

$$L_1^2 = \frac{\beta_1 + \sqrt{\beta_1^2 - 4\beta_2}}{2}, \quad L_2^2 = \frac{\beta_1 - \sqrt{\beta_1^2 - 4\beta_2}}{2} \quad (42)$$

$$S^2 = (\rho - \rho_f \vartheta) \omega^2 \quad (43)$$

式中: L_1 、 L_2 、 S 分别为对应于第 1、2 类 P 波和 S 波波数。

$$\beta_1 = \frac{(\lambda + 2\mu + \alpha^2 M)(m_1 \omega^2 - i b \omega) - 2\alpha M \rho_f \omega^2 + \rho M \omega^2}{(\lambda + 2\mu)M} \quad (44)$$

$$\beta_2 = \frac{(m_1 \omega^2 - i b \omega) \rho \omega^2 - \rho_f^2 \omega^4}{(\lambda + 2\mu)M} \quad (45)$$

$$\chi_i = \frac{\vartheta M L_i^2 - \rho_f \omega^2}{\rho_f \omega^2 (\alpha - \vartheta) M}, \quad i=1,2 \quad (46)$$

$$a_i = \frac{(\lambda + \mu) \chi_i - \alpha + \vartheta}{S^2 - \mu L_i^2}, \quad i=1,2 \quad (47)$$

$$\vartheta = \rho_f \omega^2 / (m_1 \omega^2 - i b \omega) \quad (48)$$

$$g_i = \chi_i + a_i (2p^2 - L_i^2), \quad i=1,2 \quad (49)$$

$$g_3 = \lambda \chi_1 - 2\mu \gamma_1^2 a_1 - \alpha \quad (50)$$

$$g_4 = \lambda \chi_2 - 2\mu \gamma_2^2 a_2 - \alpha \quad (51)$$

2.3 路堤与饱和土地基控制方程联合求解

由 $z=0$ 应力边界条件 (式 6) 对 y 进行 Fourier 变换可得以下 3 个方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\mu i}{q} \{ \gamma_1 g_1 A + \gamma_2 g_2 B + [C(\gamma_3^2 + q^2) + D\gamma_3 p] \} = \\ & \sum_{m=0}^{\infty} \hat{\sigma}_{xze2m}(0) f_{e2m}^{(-a_{e2}, a_{e2})}(p) + \\ & \sum_{m=0}^{\infty} \hat{\sigma}_{xzb^+m}(0) f_{b^+m}^{(-b_2, -b_1)}(p) + \sum_{m=0}^{\infty} \hat{\sigma}_{xzb^+m}(0) f_{b^+m}^{(b_1, b_2)}(p) \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} & \mu i [2p\gamma_1 a_1 A e^{-\gamma_1 z} + 2p\gamma_2 a_2 B e^{-\gamma_2 z} + (Cp - D\gamma_3) e^{-\gamma_3 z}] = \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \hat{\sigma}_{yze2m}(0) g_{e2m}^{(-a_{e2}, a_{e2})}(p) + \sum_{m=1}^{\infty} \hat{\sigma}_{yze2m}(0) g_{e2m}^{(-b_2, -b_1)}(p) + \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \hat{\sigma}_{yze2m}(0) g_{e2m}^{(b_1, b_2)}(p) \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} & g_3 A e^{-\gamma_1 z} + g_4 B e^{-\gamma_2 z} - 2\mu\gamma_3 C e^{-\gamma_3 z} = \\ & \sum_{m=0}^{\infty} \hat{\sigma}_{zze2m}(0) f_{e2m}^{(-a_{e2}, a_{e2})}(p) + \\ & \sum_{m=0}^{\infty} \hat{\sigma}_{zze2m}(0) f_{e2m}^{(-b_2, -b_1)}(p) + \sum_{m=0}^{\infty} \hat{\sigma}_{zze2m}(0) f_{e2m}^{(b_1, b_2)}(p) \end{aligned} \quad (54)$$

其中:

$$f_{jm}^{(a,b)}(p) = \int_a^b \cos(p_{jm} T_j(y)) e^{-ipy} dy \quad (55)$$

$$g_{jm}^{(a,b)}(p) = \int_a^b \sin(p_{jm} T_j(y)) e^{-ipy} dy \quad (56)$$

假定在 $z=0$ 处为透水边界条件, 补充边界条件:

$$A + B = 0 \quad (57)$$

由式 (52)~(54)、(57) 可得, 与 p 相关的参数 A 、 B 、 C 和 D 可以由与 p 无关的 D_{nm}^j 和 E_{nm}^j 表示出来。

为求解参数 D_{nm}^j 和 E_{nm}^j , 对路堤 e2 与半空间位移连续条件 (式 5) 进行 Fourier 级数逆变换。由三角级数的正交性可得下方程:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} -\frac{i}{q} \{ [\chi_1 + a_1(q^2 - L_1^2)] A + [\chi_2 + a_2(q^2 - L_2^2)] B + \\ & (C\gamma_3 + Dp) \} f_{m'}'(p) dp = \frac{2a_{e2}}{\varepsilon_{m'}} \hat{u}_{m'}(0), \quad m'=0,1,\dots \end{aligned} \quad (58)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [-ip(a_1 A + a_2 B) + iD] g_{m'}'(p) dp = -a_{e2} \hat{v}_{m'}(0), \\ & m'=1,2,\dots \end{aligned} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} (\gamma_1 a_1 A + \gamma_2 a_2 B + C) f_{m'}'(p) dp = \frac{2a_{e2}}{\varepsilon_{m'}} \hat{w}_{m'}(0), \\ & m'=0,1,\dots \end{aligned} \quad (60)$$

其中:

$$f_{jm}^{(a,b)}(p) = \int_a^b \cos(p_{jm} T_j(y)) e^{-ipy} dy \quad (61)$$

$$g_{jm}^{(a,b)}(p) = \int_a^b \sin(p_{jm} T_j(y)) e^{-ipy} dy \quad (62)$$

$\varepsilon_{m'}$ 为 Neumann 算子, 当 $m'=0$ 时, $\varepsilon_0=1$, 当

$m' \geq 1$ 时, $\varepsilon_{m'} = 2$ 。 b^+ 土堤与半空间位移连续条件为

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} -\frac{i}{q} \{ [\chi_1 + a_1(q^2 - L_1^2)]A + [\chi_2 + a_2(q^2 - L_2^2)]B + (C\gamma_3 + Dp) \} f_{b^+m'}^{(b_1, b_2)}(p) dp = \frac{b_2 - b_1}{\varepsilon_{m'}} \hat{u}_{b^+m'}(0), \quad m' = 0, 1, \dots \quad (63)$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [-ip(a_1A + a_2B) + iD] g_{b^+m'}^{(b_1, b_2)}(p) dp = -\frac{b_2 - b_1}{2} \hat{v}_{b^+m'}(0), \quad m' = 1, 2, \dots \quad (64)$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} (\gamma_1 a_1 A + \gamma_2 a_2 B + C) f_{b^+m'}^{(b_1, b_2)}(p) dp = \frac{b_2 - b_1}{\varepsilon_{m'}} \hat{w}_{b^+m'}(0), \quad m' = 0, 1, \dots \quad (65)$$

对于路堤 $e2$, $e1$ 间的位移连续条件, 在 $2a_{e1}$ 范围进行 Fourier 级数逆变换, 由三角函数正交性可得

$$\frac{2a_{e1}}{\varepsilon_{m'}} \hat{u}_{e1m'}(-d_{e2}) = \sum_{m=0}^{\infty} \hat{u}_{e2m'}(-d_{e2}) \phi_{m,m'}^{(e2, e1), a_{e1}}, \quad m' = 0, 1, \dots \quad (66)$$

$$a_{e1} \hat{v}_{e1m'}(-d_{e2}) = \sum_{m=0}^{\infty} \hat{v}_{e2m'}(-d_{e2}) \chi_{m,m'}^{(e2, e1), a_{e1}}, \quad m' = 1, 2, \dots \quad (67)$$

$$\frac{2a_{e1}}{\varepsilon_{m'}} \hat{w}_{e1m'}(-d_{e2}) = \sum_{m=0}^{\infty} \hat{w}_{e2m'}(-d_{e2}) \phi_{m,m'}^{(e2, e1), a_{e1}}, \quad m' = 0, 1, \dots \quad (68)$$

其中:

$$\phi_{m,m'}^{(j^I, j^{II}), a} = \int_{-a}^a \cos p_{j^I m} y \cos p_{j^{II} m'} y dy \quad (69)$$

$$\chi_{m,m'}^{(j^I, j^{II}), a} = \int_{-a}^a \sin p_{j^I m} y \sin p_{j^{II} m'} y dy \quad (70)$$

对于路堤层间的应力连续条件, 在 $2a_{e2}$ 范围进行 Fourier 级数逆变换得

$$\frac{2a_{e2}}{\varepsilon_{m'}} \hat{\sigma}_{xze2m'}(-d_{e2}) = \sum_{m=0}^{\infty} \hat{\sigma}_{xze1m'}(-d_{e2}) \phi_{m,m'}^{(e1, e2), a_{e1}}, \quad m' = 0, 1, \dots \quad (71)$$

$$a_{e2} \hat{\sigma}_{yze2m'}(-d_{e2}) = \sum_{m=1}^{\infty} \hat{\sigma}_{yze1m'}(-d_{e2}) \chi_{m,m'}^{(e1, e2), a_{e1}}, \quad m' = 1, 2, \dots \quad (72)$$

$$\frac{2a_{e2}}{\varepsilon_{m'}} \hat{\sigma}_{zze2m'}(-d_{e2}) = \sum_{m=0}^{\infty} \hat{\sigma}_{zze1m'}(-d_{e2}) \phi_{m,m'}^{(e1, e2), a_{e1}}, \quad m' = 0, 1, \dots \quad (73)$$

$e1$ 上表面的应力边界条件, 通过在 $2a_{e1}$ 范围内进行 Fourier 级数逆变换后表示如下:

$$\hat{\sigma}_{zze1m'}(-d_{e1}) \frac{2a_{e1}}{\varepsilon_{m'}} = \sum_{m=0}^{\infty} (K_{zR} \Gamma_{m,m'} + K_{zS} \phi_{m,m'}^{(e1, e1), b_S}) \hat{w}_{e1m'}(-d_{e1}) - \frac{\hat{F}}{c} \Gamma_{0,m'}, \quad m' = 0, 1, \dots \quad (74)$$

$$\hat{\sigma}_{yze1m'}(-d_{e1}) a_{e1} = \sum_{m=1}^{\infty} K_{yR} \hat{v}_{e1m'}(-d_{e1}) \Omega_{m,m'}, \quad m' = 1, 2, \dots \quad (75)$$

$$\hat{\sigma}_{xze1m'}(-d_{e1}) \frac{2a_{e1}}{\varepsilon_{m'}} = \sum_{m=0}^{\infty} K_{xR} \hat{u}_{e1m'}(-d_{e1}) \Gamma_{m,m'}, \quad m' = 0, 1, \dots \quad (76)$$

其中:

$$K_{zR} = -\frac{A_R \rho_R}{c} \omega^2 + \frac{E_R I_{yR}}{c} q^4$$

$$K_{yR} = -\frac{A_R \rho_R}{c} \omega^2 + \frac{E_R I_{zR}}{c} q^4$$

$$K_{zS} = -J_1 \omega^2 + J_2 q^4 + J_3 q^2 p_{e1m}^2 + J_4 p_{e1m}^4$$

$$K_{xR} = -\frac{A_R \rho_R}{c} \omega^2 + \frac{E_R A_R}{c} q^2$$

$\Gamma_{m,m'}$ 、 $\Omega_{m,m'}$ 、 $\Delta_{m,m'}$ 可以由以下积分式求得

$$\Gamma_{m,m'} = \int_{-b_R - c/2}^{-b_R + c/2} \cos p_m y \cos p_{m'} y dy + \int_{b_R - c/2}^{b_R + c/2} \cos p_m y \cos p_{m'} y dy \quad (77)$$

$$\Omega_{m,m'} = \int_{-b_R - c/2}^{-b_R + c/2} \sin p_m y \sin p_{m'} y dy + \int_{b_R - c/2}^{b_R + c/2} \sin p_m y \sin p_{m'} y dy \quad (78)$$

变换域内的荷载表达式如下:

$$\hat{F} = 2\pi F_0 \delta(\omega + qV) \quad (79)$$

式中: F_0 为轴荷载幅值; V 为荷载移动速度。

b^+ 土堤上表面的应力边界条件表示如下:

$$\hat{\sigma}_{z zb^+m'}(-d_b) = 0, \quad m' = 0, 1, \dots \quad (80)$$

$$\hat{\sigma}_{y zb^+m'}(-d_b) = 0, \quad m' = 1, 2, \dots \quad (81)$$

$$\hat{\sigma}_{x zb^+m'}(-d_b) = 0, \quad m' = 0, 1, \dots \quad (82)$$

式 (58)~(60)、(63)~(68)、(71)~(76)、(80)~(82) 可用来求解待定常数 D_{nm}^j 和 E_{nm}^j 。饱和半空间的待定常数 A 、 B 、 C 和 D 可通过式 (52)~(54) 来求得。通过边界条件求解这些待定常数, 即完成了对本模型的求解。

3 数值计算及讨论

通过数值计算, 本文分析了饱和土体半空间上隔振沟的隔振效果。轨道与枕木计算参数见表 3, 路堤弹性层参数见表 4, 这些参数从文献[15]选取。饱和土体参数从文献[4]选取, 见表 5。单轮对轴荷载取为 200 kN。通过试算, 计算阶数 m 最大值 5, 土堤宽度 b_2 取 50 m 能较好地满足计算精度与速度

要求。

为验证本文模型的正确性, 在图 2 中给出了本文结果与文献[15]计算结果的对比。将本文模型退化为单相介质土体(ρ_f 、 b 、 m_1 、 M 、 α 取 10^{-4}), 图 2 给出了列车运行速度为 200 km/h 时, 地表中心线处速度谱幅值。从图中可以看出, 二者结果吻合较好, 验证了本文方法的正确性。

表 3 路堤弹性层参数 ($j=e1, e2, b^{\pm}$)

Table 3 Parameters for the embankment and banks

$\lambda_j / (\text{MN/m}^2)$	$\mu_j / (\text{MN/m}^2)$	$\rho_j / (\text{g/cm}^3)$	δ_j	a_{e2} / m	a_{e1} / m	b_s / m	d_{e2} / m	d_{e1} / m	b_1 / m
87	6.48	1.80	0.13	7	2	1.26	3	4.4	9

表 4 钢轨与枕木参数

Table 4 Parameters for the rails and sleepers

$E_R / (\text{GN/m}^2)$	$\rho_R / (\text{g/cm}^3)$	I_{JR} / cm^4	I_{LR} / cm^4	$2b_R / \text{m}$	$\rho_s / (\text{g/cm}^3)$	$E_{Sk} / (\text{GN/m})$	$E_{Sr} / (\text{N/m}^2)$	c / m	v_{Syx}	v_{Sxk}
2.1×10^2	7.85	3 055	516.4	1.5	0.64	38.45	0	15	0.2	0.2

表 5 饱和土体参数

Table 5 Parameters for the poroelastic half-space

$\mu / (\text{MN/m}^2)$	ν	$\rho_f / (\text{g/cm}^3)$	$\rho_{sl} / (\text{g/cm}^3)$	n	$b / (\text{N} \cdot \text{s/m}^4)$	D	α	$M / (\text{MN/m}^2)$
6	0.35	1.00	1.82	0.4	1×10^9	0.05	3	720

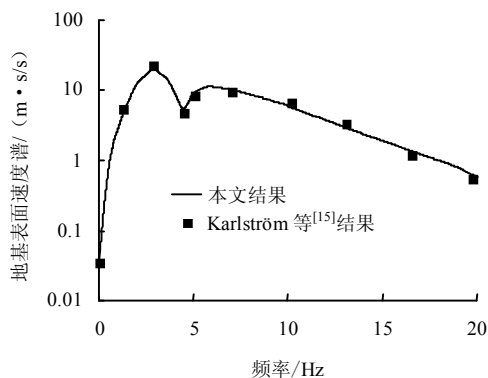


图 2 本文与 Karlström 等^[15]的结果比较
Fig.2 Comparison between present work and Karlström's work

图 3 给出了列车运行速度为 70 km/h 时, 隔振沟内外两侧地基表面的速度谱幅值。在空沟内侧 $y=7$ m 处, 如图 3 (a) 所示, 可以看到, 隔振沟不仅没有隔振效果, 相反还使得隔振沟内各频率成分的振动幅值增大, 加剧了隔振沟内侧的振动响应, 这种现象的产生是因为隔振沟反射回来的波与入射波在沟壁处干涉产生了叠加效应。在隔振沟外侧 $y=9$ m 处, 如图 3 (b) 所示, 隔振沟有一定的隔振效果, 但不明显, 这是因为列车运行速度较低时, 所

引起的振动成分主要分布在低频范围 (小于 4 Hz), 振动波波波长较长, 比较容易绕过隔振沟到达沟的另一侧。

图 4 给出了当列车运行速度为 210 km/h 时, 地基表面的速度谱幅值。从中可以看出, 随着列车运行速度的增快, 速度谱分布在更高的频率范围, 但主要还在 15 Hz 以内。在隔振沟内侧 $y=7$ m 处, 隔振沟同样没有隔振效果, 且振动存在放大现象。但在沟后 $y=9$ m 处, 如图 4 (b) 所示, 隔振沟在此列车运行速度下可以取得明显的隔振效果。随着列车运行速度的增加, 列车引起的地基振动分布在更高的频率范围, 高频振动波波波长较短, 很难绕过隔振沟到达沟的另一侧 (尤其对频率大于 5 Hz 的振动成分), 所以, 在这种情况下空沟能取得明显的隔振效果。

接下来本文引入振动降低水平因子来评价隔振沟的隔振效果, 定义为

$$\text{振动降低水平/dB} = -20 \lg(V_1 / V_2) \quad (83)$$

式中: V_1 为设置隔振沟后地基表面的振动速度响应; V_2 为相应的未设置隔振沟时地基表面的速度响应。振动降低水平值越大, 说明隔振效果越好。

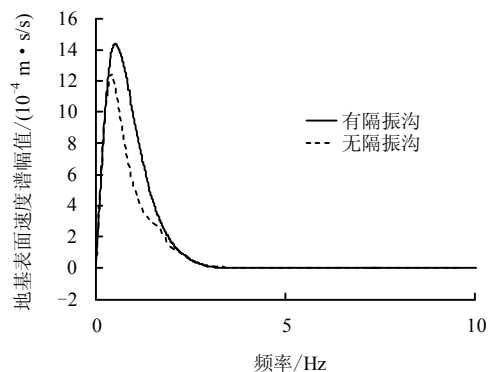
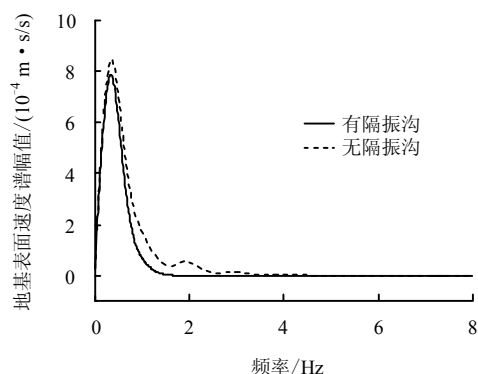
(a) $y=7\text{ m}$ (b) $y=9\text{ m}$

图3 列车运行速度为 70 km/h 时, 地基表面速度谱
Fig.3 Velocity spectrum of the ground surface for 70 km/h

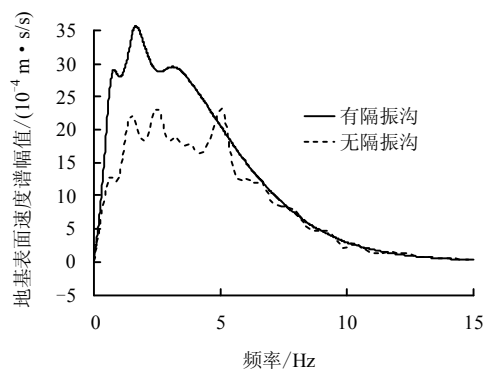
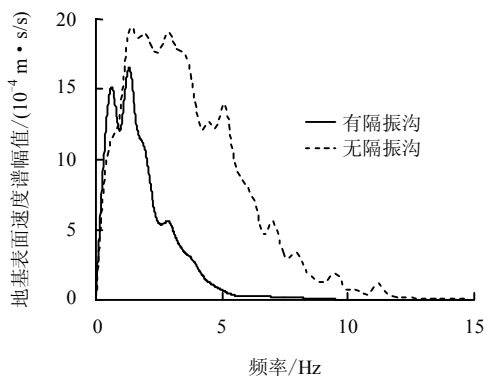
(a) $y=7\text{ m}$ (b) $y=9\text{ m}$

图4 列车运行速度为 210 km/h 时, 地基表面速度谱
Fig.4 Velocity spectrum of the ground surface for 210 km/h

图5表示隔振沟的隔振效果随 y 的变化情况。为对比研究, 图中也给出了单相弹性地基上隔振沟的隔振效果随距离的变化情况。从图中可以看出, 在隔振沟内侧振动存在明显放大现象, 隔振沟以内一些区域有振动增强现象, 一些区域有振动减弱现象; 这是由于列车在地基中激发的波在遇到隔振沟时, 部分波会被反射回来, 与入射波形成增强干涉或相消干涉。在图5(a)中, 当列车运行速度为 70 km/h 时, 隔振沟以后区域可以取得一定的隔振效果。随着与轨道中心线距离的增加, 隔振沟隔振效果降低。另需指出的是, 在该列车运行速度下, 饱和地基上隔振沟与弹性土地基上隔振沟的隔振效果相差不大。

在图5(b)中, 当列车运行速度为 210 km/h 时, 隔振沟隔振效果明显提高, 在隔振沟外侧可达到 10 dB 左右, 且隔振效果随着距离的增加而降低。同时在图中可以清楚看到, 在该列车运行速度下, 饱和地基上隔振沟与弹性土地基上隔振沟的隔振效果差别明显, 饱和地基上隔振沟的隔振效果相比弹性地基上隔振沟要好 1.5 dB 左右。在这种情况下, 采用弹性土地基模型将明显低估隔振沟的隔振效果。

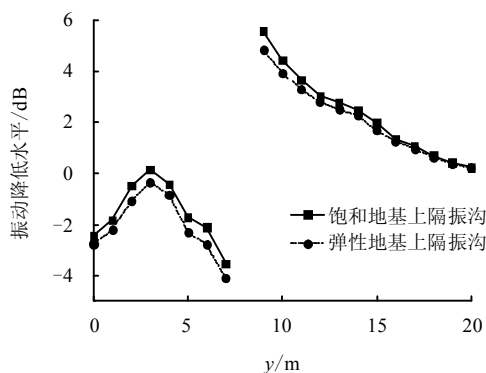
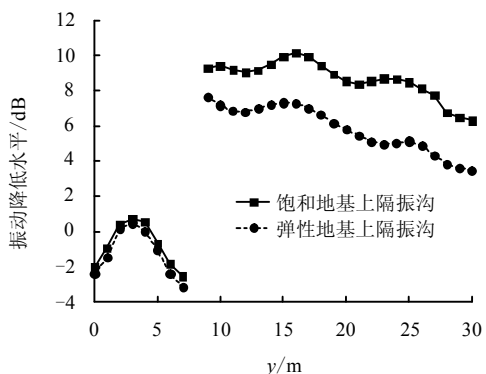
(a) $V=70\text{ km/h}$ (b) $V=210\text{ km/h}$

图5 隔振沟隔振效果随距离 y 的变化
Fig.5 Screening effects of the trench against y

图6表示饱和土体中反映土体流固相黏滞作用的参数 b 对隔振沟隔振效果的影响。由图可见,随着参数 b 的增大(土体渗透系数减小),隔振沟的隔振效果明显增加。另外, b 取值为 $10^7 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^4$ 时与取 $10^8 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^4$ 隔振效果比较接近,而取 $10^9 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^4$ 时与取 $10^{10} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^4$ 隔振效果比较接近;因为 b 的前两种取值对应于渗透系数较大的砂性土,而后两种取值对应于另一类渗透系数较小的黏性土,由此可得,隔振沟在渗透系数小的黏性土上的隔振效果好于渗透系数较大的砂性土隔振效果。

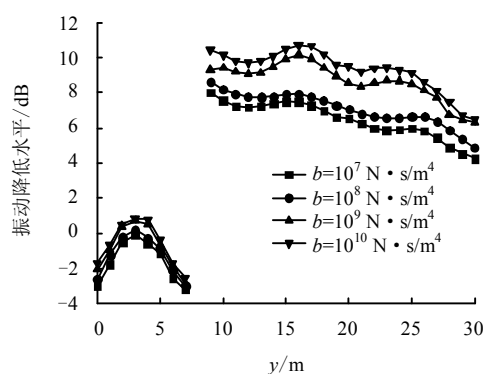


图6 参数 b 对隔振沟效果的影响

Fig.6 Effects of b on the screening efficiency of the trench

4 结 论

(1) 列车低速运行时,隔振沟隔振效果不明显。但列车高速运行情况下,隔振沟能取得明显的隔振效果,尤其对频率大于5 Hz的振动成分。

(2) 列车低速运行时,弹性地基上隔振沟隔振效果与饱和土地基上隔振沟隔振效果接近,随着列车运行速度的增大,二者差距增大。当列车运行速度超过土体表面波速时,单相弹性地基模型将明显低估隔振沟的隔振效果。

(3) 随着下卧土体渗透系数的增加,隔振沟对地基振动的隔振效果降低。

参 考 文 献

[1] KRYLOV V V. Generation of ground vibrations by superfast trains[J]. *Applied Acoustics*, 1995, 44(2): 149—164.
[2] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J. A theoretical model for ground vibration from trains generated by vertical track irregularities[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 272(3—5): 937—965.
[3] 金波. 高速荷载下多孔饱和地基的动力响应[J]. 力学

季刊, 2004, 25(2): 168—174.

JIN Bo. Dynamic response of a poroelastic half space generated by high speed load[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2004, 25(2): 168—174.

[4] 蔡袁强, 孙宏磊, 徐长节. 轨道刚度对路轨系统及饱和地基的动力响应的影响[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(12): 1787—1793.

CAI Yuan-qiang, SUN Hong-lei, XU Chang-jie. Effect of rail rigidity on track-ground vibrations due to a high-speed train[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(12): 1787—1793.

[5] 陈建国, 夏禾, 陈树礼, 等. 列车运行引起的周围地面振动规律研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(1): 98—103.

CHEN Jian-guo, XIA He, CHEN Shu-li, et al. Investigation on running-train-induced ground vibrations near railway[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(1): 98—103.

[6] 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.

[7] 丁光亚, 蔡袁强, 徐长节. 饱和土中刚性排桩对平面SV波的隔离分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(3): 849—854.

DING Guang-ya, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie. Analysis of vibration isolation of a row of rigid piles to plane SV waves in saturated soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(3): 849—854.

[8] 李宁, 高广运, 郑建国. 水平激振下波阻板主动隔振试验与数值计算[J]. *地下空间与工程学报*, 2010, 6(1): 90—95.

LI Ning, GAO Guang-yun, ZHENG Jian-guo. Field experimental and numerical study of active vibration isolation by WIB under horizontal loading[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, 6(1): 90—95.

[9] ADAM M, VON ESTORFF O. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches[J]. *Computers and Structures*, 2005, 83(1): 11—24.

[10] 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.
- [11] HUNG H H, YANG Y B, CHANG D W. Wave Barriers for reduction of train-induced vibrations in soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 2004, 130(12): 1283—1291.
- [12] 冯牧, 雷晓燕. 列车引发建筑物振动试验及数值隔振研究[J]. 噪声与振动控制, 2009, (5): 80—87.
- FENG Mu, LEI Xiao-yan. Field Test of train-induced building vibrations and investigation of numerical isolation[J]. **Sound and Vibration Control**, 2009, (5): 80—87.
- [13] 谭燕, 何程, 高俊涛. 地铁引发的低频振动的隔振效果分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(5): 106—108.
- TAN Yan, HE Zeng, GAO Jun-tao. Mitigation analysis of subway-induced low-frequency vibrations[J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2009, 37(5): 106—108
- [14] 谢伟平, 高俊涛, 毛云. WIB 用于地铁引发低频振动的减振分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2009, 26(2): 1—4.
- XIE Wei-ping, GAO Jun-tao, MAO Yun. WIB for mitigation analysis of subway-induced low frequency vibration[J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)**, 2009, 26(2): 1—4.
- [15] KARLSTRÖM A, BOSTRÖM A. Efficiency of trenches along railways for trains moving at sub- or supersonic speeds[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2007, 27(7): 625—641.
- [16] 徐斌, 雷晓燕, 徐满清, 等. 饱和土体中空沟对移动荷载被动隔振的 2.5D 边界元法分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1079—1086.
- XU Bin, LEI Xiao-yan, XU Man-qing, et al. Analysis of effectiveness of passive isolation for vibration due to moving loads on saturated soil by using open trench with 2.5D boundary element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 1079—1086.
- [17] 高广运, 何俊峰, 李宁, 等. 饱和地基上列车运行的地面振动隔振分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2191—2198.
- GAO Guang-yun, HE Jun-feng, LI Ning, et al. Analysis of isolating ground vibration induced by trains running on saturated ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 2191—2198.
- [18] AMBARTSUNYAN S A. Theory of Anisotropic plates: strength, stability, vibration[M]. [S. l.]: Technomic Publication Company, 1970.
- [19] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. low-frequency range[J]. **Journal of Acoustic Society of America**, 1956, 28(2): 168—191.
- [20] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. high-frequency range[J]. **Journal of Acoustic Society of America**, 1956, 28(2): 168—191.

上接第 2372 页

- [8] 李秀珍. 滑坡灾害的时间预测预报研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2004.
- [9] 董辉, 傅鹤林, 冷伍明. 滑坡变形的支持向量机非线性组合预测[J]. 铁道学报, 2007, 29(1): 132—136.
- DONG Hui, FU He-lin, LENG Wu-ming. Nonlinear combination predicting based on support vector machines for landslide deformation[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2007, 29(1): 132—136.
- [10] 赵洪波. 基于进化支持向量机的滑动面参数识别[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 541—544.
- ZHAO Hong-bo. Parameters recognition of slide surface using genetic-support vector machine[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(4): 541—544.
- [11] CHIH-CHUNG CHANG, CHIH-JEN LIN. A library for Support Vector Machines[EB/OL]. Taiwan: National Taiwan University, 2001. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.
- [12] GUNN S R. Support Vector Machines for Classification and Regression[R]. Southampton: University of Southampton, 1997.
- [13] 殷坤龙, 姜清辉, 汪洋. 滑坡运动过程仿真分析[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2002, 27(5): 632—635.
- YIN Kun-long, JIANG Qing-hui, WANG Yang. Simulation of landslide movement process by discontinuous deformation analysis[J]. **Earth Science — Journal of China University of Geosciences**, 2002, 27(5): 632—635.
- [14] 薛果夫, 吕贵芳, 任江. 新滩滑坡研究[C]//中国典型滑坡. 北京: 科学出版社, 1988: 200—210.
- [15] 董辉, 傅鹤林, 冷伍明. 滑坡位移时序预测的核函数构造[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1087—1092.
- DONG Hui, FU He-lin, LENG Wu-ming. Kernel design for displacement time series of landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(4): 1087—1092.