

DOI: 10.11779/CJGE201705009

空沟对层状饱和地基中列车移动荷载的隔振性能研究

巴振宁^{1, 2}, 梁建文^{*1, 2}, 王靖雅³

(1. 天津大学土木系, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与新材料教育部重点实验室, 天津 300072; 3. 山西农业大学土木系, 山西 晋中 030800)

摘要: 基于 Biot 流体饱和多孔介质理论, 建立含空沟层状饱和地基-轨道耦合动力系统, 研究了空沟对移动列车荷载引起层状饱和地基振动的隔振问题。方法首先将系统分解为含空沟层状饱和地基和轨道两个子结构, 然后采用 2.5 维间接边界元方法 (IBEM) 求解含空沟层状饱和地基在移动均布竖向线荷载作用下的动力响应, 同时求解轨道在移动列车荷载和均布竖向线荷载共同作用下的动力响应, 最后通过令轨道竖向位移与层状饱和地基表面轨道中心处竖向位移相等实现两者的耦合。文中通过与已有结果的比较验证了方法的正确性, 并以均质饱和地基和饱和基岩上单一饱和土层地基为模型进行了数值计算分析, 研究了饱和地基参数和隔振沟参数对隔振效果的影响。数值结果表明, 层状饱和地基中空沟的隔振效果优于均质饱和地基中空沟的隔振效果; 且饱和地基中空沟的隔振效果优于相应单相弹性地基中空沟的隔振效果; 另外, 空沟深度、饱和土孔隙率和基岩与饱和土层刚度比等也对空沟的隔振效果有着重要影响。

关键词: 隔振沟; 层状饱和地基; 列车移动荷载; 轨道; 2.5 维间接边界元

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)05-0848-11

作者简介: 巴振宁(1980-), 男, 副教授, 主要从事土动力学和地震工程研究。E-mail: bazhenning_001@163.com.

Isolation effect of an open trench against train-induced vibrations in a saturated layered ground

BA Zhen-ning^{1, 2}, LIANG Jian-wen^{1, 2}, WANG Jing-ya³

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coastal Structures in Civil Engineering and Safety of Ministry of Education, Tianjin 300072, China; 3. Department of Civil Engineering, Shanxi Agriculture University, Jinzhong 030800, China)

Abstract: Based on the Biot's theory of the two-phased poroelasticity medium, a coupled model for a saturated layered ground containing an open trench and track is developed, and the effect of the open trench on reducing the vibration generated by a moving train is investigated. Firstly, the whole model is decomposed into two substructures, which are the saturated ground containing open trench and the track. Then, the dynamic responses of the saturated ground induced by the moving line-distributed vertical loads are calculated by using the 2.5D indirect boundary element method (IBEM), and simultaneously the dynamic responses of the track under the moving train loads and distributed loads are solved. Finally, the layered ground and the track are assembled according to the equivalence between the deformation of the track and the vertical displacement of the layered ground on the center point of the track. The validity of the proposed method is confirmed by comparing its results with the published ones. Numerical calculations are performed by taking uniform saturated half-space and a single saturated layer resting on the saturated half-space as models, and the effects of the parameters of the ground and the trench are studied. The numerical results show that the isolation effect of the trench on the layered saturated ground is better than that on the uniform saturated ground. The isolation effect of the trench on the saturated ground is better than that on the corresponding elastic ground. In addition, The trench depth, the porosity of saturated layer and the stiffness ratio of bedrock to saturated layer have significant influences on the isolation effect of the trench.

Key words: isolation trench; layered saturated ground; moving train load; track; 2.5D indirect boundary element method

0 引言

随着铁路的大规模建设及列车运行速度的大幅提升, 列车运行引起的环境振动日益严重和普遍。列车运行引起的地基振动会干扰人们的工作和生活, 导致

精密仪器设备读数不准或精度下降, 甚至危及古建筑

基金项目: 天津市自然科学基金项目(一般项目)(16JCYBJC21600)

收稿日期: 2016-02-28

*通讯作者(E-mail: liang@tju.edu.cn)

安全, 引起房屋开裂。因而, 相关屏障隔振研究是重要研究课题, 研究将有利于解决列车运行引起地基振动过大问题, 同时可为屏障设计提供理论指导。

目前, 国内外学者已对单相弹性地基中屏障隔振开展了较多研究, Woods^[1]于1968年通过大量试验, 总结出了屏障隔振设计的基本准则, 并提出了采用振幅衰减系数来衡量隔振效果。随后, 许多学者^[2-15]通过试验及数值模拟方法对均质和层状弹性地基中屏障隔振问题进行了研究。然而, 滨海地区土体多是饱和的, 采用流体饱和多孔介质模型对其进行描述更为符合实际情况, 同时根据笔者在工程波动方面研究, 发现饱和地基动力响应与单相弹性地基模型有着明显的差别^[16-17]。因此, 开展饱和地基中列车运行引起振动的屏障隔振研究是十分必要的。

然而, 由于饱和多孔介质波动理论的复杂性, 目前饱和地基中屏障隔振研究还较少, 时刚等^[18-19]建立了为薄层法基本解的饱和介质半解析边界元法, 分别对二维空沟和填充沟远场隔振问题进行了研究。高广运等^[20]采用2.5维有限元法, 建立了列车-轨道-半空间地基-屏障隔振模型, 分析了不同隔振措施的隔振效果。时刚等^[21]采用边界元法研究了单相弹性和两相饱和地基中连续屏障的远场隔振效果。Cao等^[22]采用半解析方法研究了移动荷载作用下饱和土地基中空沟的隔振效果。徐斌等^[23]采用2.5维间接边界元法研究了空沟对移动荷载引起饱和地基振动的隔振效果。曹志刚等^[24]对饱和地基与弹性地基上空沟的隔振效果进行了对比分析。朱兵见等^[25]采用有限元和无限元耦合方法研究了饱和地基中空沟隔振问题。

以上关于饱和地基隔振方面的研究采用的均为均匀半空间模型。然而, 真实地基多以层状形式呈现, 且根据作者及相关学者在工程波动方面的研究发现, 成层地基由于考虑了地基自身的动力特性, 与均匀半空间地基模型有着本质的差别^[26-28], 同时已有研究已表明饱和土与单相土中隔振效果也存在明显差异^[22]。目前关于层状饱和地基中屏障隔振问题还鲜有研究, 据作者所知, 仅有袁万等^[29]采用2.5维有限元法求解了层状饱和地基中空沟的隔振问题, 研究了均质饱和

地基、分层饱和地基和上覆单相弹性层饱和地基3种地基模型中空沟的隔振效果, 但其研究中并未将轨道纳入求解模型中, 且仅针对地基位移响应进行了分析。

本文基于Biot流体饱和多孔介质理论, 建立了含空沟层状饱和地基-轨道耦合模型, 研究了层状饱和地基中空沟对列车运行产生振动的隔振问题。考虑到边界元方法较有限元方法在处理半无限地基波动问题方面, 具有降维、自动满足辐射条件且不存在高频弥散的优点, 文中采用间接边界元方法(IBM)对问题进行了求解。文章首先对计算模型和方法进行介绍; 然后验证了方法的正确性, 并进行了数值计算分析; 最后, 给出了一些有益的结论。

1 模型与计算方法

如图1所示, 截面形状沿列车移动方向保持不变的轨道铺设于层状饱和地基之上。轨道模拟为弯曲刚度为 EI 的欧拉梁, 单位质量为 m_b , 宽度为 B ($B=2\Delta$)。层状饱和地基由 N 层水平饱和土层和其下饱和基岩半空间组成, 饱和土层和基岩半空间介质均由Biot流体饱和多孔介质模型来描述。假定轨道结构与地基材料参数沿轨道方向保持不变。地基中距离轨道中心 D 处有一与轨道平行的空沟, 空沟宽度为 W , 深度为 H 。

具体求解时, 首先将整个模型分解为轨道和含空沟层状饱和地基两部分(如图1所示); 然后假定轨道与地基之间的相互作用力为移动均布竖向荷载, 分别进行含空沟层状饱和地基在移动均布荷载作用下的动力响应求解, 和轨道在移动列车荷载和均布荷载共同作用下动力响应求解; 最后通过令轨道位移与层状饱和地基表面轨道中心处土骨架竖向位移相等实现轨道与地基的耦合, 进而求得相互作用力。轨道在移动荷载作用下的动力响应较为简单, 问题关键在于含空沟层状饱和地基在移动均布线荷载作用下响应求解。

1.1 移动均布线荷载下含空沟层状饱和地基动力响应

移动荷载作用下含空沟层状饱和地基动力响应虽为三维, 但由于荷载移动速度恒定, 使得地基在与移动方向垂直任意两个截面处的响应完全相同, 仅因位

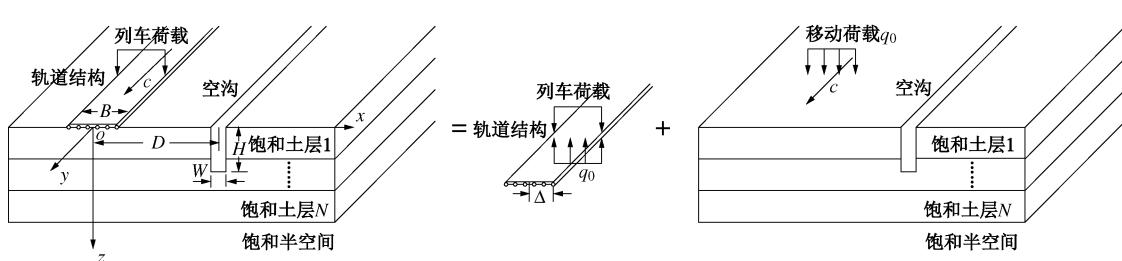


图1 含空沟层状饱和地基-轨道耦合求解模型

Fig. 1 Coupling model for track-layered saturated foundation containing an open trench

置不同而存在一时间差。此问题实质上是二维结构的三维响应问题(2.5 维问题)。本文即建立 2.5 维间接边界元方法进行求解, 取垂直轨道的任一截面进行离散, 得到截面处响应, 然后依据荷载移动速度和其余截面位置偏移相应时间差, 得到其他截面处动力响应。

为方便求解, 将总波场分解为自由波场和散射波场。自由波场定义为层状饱和地基(无空沟存在)在移动荷载作用下的动力响应, 采用直接刚度法求解; 散射波场定义为由于空沟的存在产生的附加波场, 通过在空沟边界上施加一组虚拟移动均布线荷载(包括孔隙水压)来模拟, 移动荷载(孔隙水压)的密度可通过空沟表面零应力边界条件和透水条件求得。最后叠加自由和散射波场得到总波场, 即可求得含空沟层状饱和地基在移动均布荷载作用下的动力响应。

(1) Biot 两相流体饱和多孔介质理论

采用 Biot 流体饱和多孔介质模型来表述饱和土体, 以位移形式表示的稳态动力平衡方程^[30-31]为

$$\begin{aligned} G\nabla^2\mathbf{U} + (\lambda_c + G)\text{grad}(\text{div}\mathbf{U}) + \\ \alpha M\text{grad}(\text{div}\mathbf{U}) + M\text{grad}(\text{div}\mathbf{w}) = \rho_f\ddot{\mathbf{U}} + m\ddot{\mathbf{W}} + b\dot{\mathbf{w}} \quad , \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\alpha M\text{grad}(\text{div}\mathbf{U}) + M\text{grad}(\text{div}\mathbf{w}) = \rho_f\ddot{\mathbf{U}} + m\ddot{\mathbf{W}} + b\dot{\mathbf{w}} \quad (1b)$$

式中 $\mathbf{U} = \{U_x, U_y, U_z\}^T$ 和 $\mathbf{w} = n(\mathbf{W} - \mathbf{U}) = \{w_x, w_y, w_z\}^T$ 分别为土骨架的位移矢量和流体相对于土骨架的位移矢量; $\mathbf{W} = \{W_x, W_y, W_z\}^T$ 为流体位移矢量; n 为孔隙率; $\rho = (1-n)\rho_s + n\rho_f$ 为饱和土的总密度, ρ_s 和 ρ_f 为土骨架和流体的质量密度; b 为反应黏性耦合的系数; $m = \rho_{22}/n^2 = (n\rho_f + \rho_a)/n^2$, ρ_a 为固相和液相的耦合质量密度; G 和 λ 为土骨架的两个拉梅常数, $\lambda_c = \lambda + \alpha^2 M$; α 和 M 为 Biot 常数。

(2) 自由波场求解

假定沿 y 轴方向移动的均布竖向线荷载在 x 轴方向分布宽度为 2Δ (轨道宽度), 密度为 q_0 , 则在时间-空间域内可表示为

$$q(x, y, t) = q_0\delta(y - ct) \quad |x| \leq \Delta \quad , \quad (2)$$

式中, c 为移动速度, δ 狄拉克函数。对式(2)进行傅里叶变换得到频率-波数域中的形式:

$$\begin{aligned} \tilde{q}(k_x, k_y, \omega) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\Delta}^{\Delta} q_0 \exp(ik_x x + ik_y y - i\omega t) dx dy dt \\ &= \frac{\sin(k_x \Delta)}{\pi k_x} \frac{1}{(2\pi)^2 c} \delta(k_y - \omega/c) \quad . \end{aligned} \quad (3)$$

式中 k_x 和 k_y 分别为沿 x 轴和 y 轴方向波数; ω 为圆频率; i 为虚数单位; 上标“-”和“~”分别表示波数和频域内参数。地基离散动力平衡方程可表示^[26]为

$$\begin{aligned} \{\tilde{\bar{U}}_{x0}, \tilde{\bar{U}}_{y0}, i\tilde{\bar{U}}_{z0}, i\tilde{\bar{w}}_{z0}, \dots, \tilde{\bar{U}}_{xN}, \tilde{\bar{U}}_{yN}, i\tilde{\bar{U}}_{zN}, i\tilde{\bar{w}}_{zN}\}^T \\ = [S_{\text{PI-P2-SV-SH}}]^{-1} \{\tilde{\bar{R}}_{x1}, \tilde{\bar{R}}_{y1}, i\tilde{\bar{R}}_{z1}, i\tilde{\bar{R}}_{f1}, \dots, \tilde{\bar{R}}_{xN}, \tilde{\bar{R}}_{yN}, i\tilde{\bar{R}}_{zN}, i\tilde{\bar{R}}_{fN}\}^T \quad , \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\{\tilde{\bar{U}}_{x0}, \tilde{\bar{U}}_{y0}, i\tilde{\bar{U}}_{z0}, i\tilde{\bar{w}}_{z0}, \dots, \tilde{\bar{U}}_{xN}, \tilde{\bar{U}}_{yN}, i\tilde{\bar{U}}_{zN}, i\tilde{\bar{w}}_{zN}\}^T$ 为土层交界面处的位移(包括流体相对于土骨架位移)向量, $\{\tilde{\bar{R}}_{x1}, \tilde{\bar{R}}_{y1}, i\tilde{\bar{R}}_{z1}, i\tilde{\bar{R}}_{f1}, \dots, \tilde{\bar{R}}_{xN}, \tilde{\bar{R}}_{yN}, i\tilde{\bar{R}}_{zN}, i\tilde{\bar{R}}_{fN}\}^T$ 为土层交界面处的力(包括孔隙水压)向量, $[S_{\text{PI-P2-SV-SH}}]$ 为层状饱和地基的整体三维动力刚度矩阵, 其具体求解过程可参考文献[16]。式(4)表示的方法即为直接刚度法, 也即直接对刚度矩阵求逆求得问题的解。层状饱和地基仅作用竖向荷载时, 若地表完全透水, 地表孔隙水压为零, 则各饱和土层交界面上力(包括孔隙水压)和位移(包括流体相对于土骨架位移)满足离散动力平衡方程(5a); 若地表完全不透水, 地表流体相对于土骨架的位移为零(流量为零), 则各饱和土层交界面上力(包括孔隙水压)和位移(包括流体相对于土骨架位移)满足离散动力平衡方程(5b)。

$$\begin{aligned} \{\tilde{\bar{U}}_{x0}, \tilde{\bar{U}}_{y0}, i\tilde{\bar{U}}_{z0}, i\tilde{\bar{w}}_{z0}, \dots, \tilde{\bar{U}}_{xN}, \tilde{\bar{U}}_{yN}, i\tilde{\bar{U}}_{zN}, i\tilde{\bar{w}}_{zN}\}^T \\ = [S_{\text{PI-P2-SV-SH}}]^{-1} \{0, 0, i\tilde{q}, 0, \dots, 0, 0, 0, 0\}^T \quad , \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} \{\tilde{\bar{U}}_{x0}, \tilde{\bar{U}}_{y0}, i\tilde{\bar{U}}_{z0}, 0, \dots, \tilde{\bar{U}}_{xN}, \tilde{\bar{U}}_{yN}, i\tilde{\bar{U}}_{zN}, i\tilde{\bar{w}}_{zN}\}^T \\ = [S_{\text{PI-P2-SV-SH}}]^{-1} \{0, 0, i\tilde{q}, i\tilde{q}_{f0}, \dots, 0, 0, 0, 0\}^T \quad . \end{aligned} \quad (5b)$$

将式(3)代入式(5a)、(5b), 可求得各饱和土层交界面处的位移(包括流体相对于土骨架位移), 进而通过各土层中上下行波的幅值与各土层交界面处位移的关系求得各土层中上下行波的幅值, 最后由位移(包括流体相对于土骨架位移)和牵引力(包括孔隙水压)等响应与上下行波幅值之间的关系, 即可求得频率-波数域内位移(包括流体相对于土骨架位移) $\{\tilde{\bar{U}}_x^f, \tilde{\bar{U}}_y^f, \tilde{\bar{U}}_z^f, \tilde{\bar{w}}_n^f\}^T$ 和牵引力(包括孔隙水压) $\{\tilde{\bar{t}}_x^f, \tilde{\bar{t}}_y^f, \tilde{\bar{t}}_z^f, \tilde{\bar{t}}_f^f\}^T$,

其中 $\tilde{\bar{w}}_n^f$ 表示沿单元法线方向流体相对于土骨架位移。更为详细的自由场直接刚度法的求解, 可参考文献[16]。

上述计算过程都是在频率-波数域内进行的, 时间-空间域内的动力响应可通过傅里叶逆变换求得

$$\begin{aligned} f(x, y, z, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(k_x, k_y, z, \omega) \delta(\omega/c - k_y) \cdot \\ &\quad \exp(i\omega t - ik_x x - ik_y y) dk_x dk_y d\omega \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(k_x, \omega/c, z, \omega) \exp(-i\omega/c y) \exp(i\omega t - ik_x x) \cdot \\ &\quad dk_x d\omega \quad , \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\tilde{f}(k_x, k_y, z, \omega)$ 为频率-波数域内的动力响应, $f(x, y, z, t)$ 为时间-空间域内的动力响应。

(3) 散射波场模拟

散射波场通过在空沟边界上施加移动均布线荷载(孔隙水压)产生的动力响应来模拟, 也即求解相应的动力格林函数。考虑到空沟一般为矩形截面, 需要解的格林函数包括作用于水平和竖向线单元(边界

离散为线单元)上的移动均布荷载(孔隙水压)动力格林函数。对于作用于水平线单元的移动均布荷载(孔隙水压)动力格林函数较为简单,与2.1(2)节自由波场求解过程一致,只是将频率-波数域中的均布荷载(孔隙水压)放置于式(4)中荷载(孔隙水压)所在层位置。对于作用于竖线单元上的均布荷载(孔隙水压)格林函数求解相对复杂,下面对该格林函数进行介绍。

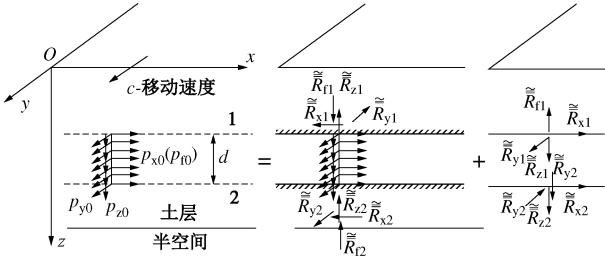


图2 移动均布竖线荷载(孔隙水压)格林函数求解示意图

Fig. 2 Diagram for solving Green's functions for moving uniformly distributed loads (pore pressure) acting on a vertical line

移动均布竖向线荷载或孔隙水压动力格林函数求解的步骤(图2)为:①首先将时间-空间域内的荷载或孔隙水压展开到频率-波数域内;②然后,考虑到荷载仅作用在部分饱和土层上,在荷载作用的上下水平面(边界)引入附加交界面以固定荷载,求解固定层内的动力响应,同时计算满足这样条件的相应反力 $\tilde{\bar{R}}_{x1}$, $\tilde{\bar{R}}_{y1}$, $\tilde{\bar{R}}_{z1}$, $\tilde{\bar{R}}_{f1}$ (顶面沿 x , y 和 z 方向的牵引力和孔隙水压力)和 $\tilde{\bar{R}}_{x2}$, $\tilde{\bar{R}}_{y2}$, $\tilde{\bar{R}}_{z2}$, $\tilde{\bar{R}}_{f2}$ (底面沿 x , y , z 方向的牵引力和孔隙水压力),此分析仅在作用荷载的土层上进行,进一步将反力以相反的方向作用到总体系上,由直接刚度法求解固定端面反力引起的动力响应;③最后叠加固定内响应与固定端面反力响应,可求得总响应,也即移动竖线均布荷载格林影响函数。

如图2所示,沿 x , y , z 方向竖线均布荷载或孔隙水压位于($x-z$)平面内,作用厚度为 d ,沿 y 轴正方向以速度 c 移动。荷载在时间-空间域内可表示为

$$\{p_x, p_y, p_z, p_f\}^T = \{p_{x0}, p_{y0}, p_{z0}, p_{f0}\}^T \delta(x) \delta(y - ct) \quad (7)$$

将荷载进行如式(3)所示的傅里叶变换,得其在频率-波数域中的形式为

$$\left\{\tilde{\bar{p}}_x, \tilde{\bar{p}}_y, \tilde{\bar{p}}_z, \tilde{\bar{p}}_f\right\}^T = \{p_{x0}, p_{y0}, p_{z0}, p_{f0}\}^T \delta(\omega - k_y c) / [(2\pi)^3 c], \quad (8)$$

假定土骨架位移及流体相对于土骨架位移在频率-波数域内的形式为

$$\{U_x, U_y, U_z\}^T = \left\{\tilde{\bar{U}}_x, \tilde{\bar{U}}_y, \tilde{\bar{U}}_z\right\}^T \exp(-ik_x x) \exp(-ik_y y) \exp(i\omega t),$$

(9a)

$$\{w_x, w_y, w_z\}^T = \left\{\tilde{\bar{w}}_x, \tilde{\bar{w}}_y, \tilde{\bar{w}}_z\right\}^T \exp(-ik_x x) \exp(-ik_y y) \exp(i\omega t). \quad (9b)$$

在均布线荷载或孔隙水压作用下,Biot流体饱和多孔介质动力平衡方程(频率-波数域内)为

$$\begin{aligned} G^* \nabla^2 \tilde{\bar{U}} + (\lambda^* + G^*) \text{grad}(\text{div} \tilde{\bar{U}}) + \alpha M \text{grad}(\text{div} \tilde{\bar{U}}) \\ = \rho \omega^2 \tilde{\bar{U}} + \rho_f \omega^2 \tilde{\bar{w}} + \tilde{\bar{P}}_1. \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} \alpha M \text{grad}(\text{div} \tilde{\bar{U}}) + M \text{grad}(\text{div} \tilde{\bar{w}}) \\ = \rho_f \omega^2 \tilde{\bar{U}} + m \omega^2 \tilde{\bar{w}} + i b \omega \tilde{\bar{w}} + \tilde{\bar{P}}_2. \end{aligned} \quad (10b)$$

式中, $\lambda^* = \lambda(1+2i\zeta_s)$ 和 $G^* = G(1+2i\zeta_s)$ 为两个复拉梅常数, ζ_s 为材料的滞回阻尼比。 $\tilde{\bar{P}}_1$ 和 $\tilde{\bar{P}}_2$ 为外荷载向量,对于作用 x , y , z 三个方向的均布荷载时,

$$\tilde{\bar{P}}_1 = \left\{\tilde{\bar{p}}_x, \tilde{\bar{p}}_y, \tilde{\bar{p}}_z\right\}^T, \quad \tilde{\bar{P}}_2 = \{0, 0, 0\}^T. \quad (11a)$$

对于作用孔隙水压时,

$$\tilde{\bar{P}}_1 = \left\{\alpha \tilde{\bar{p}}_1, 0, 0\right\}^T, \quad \tilde{\bar{P}}_2 = \left\{\tilde{\bar{p}}_1, 0, 0\right\}^T. \quad (11b)$$

记方程(10)的特解(以上标“p”表示)幅值为

$$\left\{\tilde{\bar{U}}_x^p, \tilde{\bar{U}}_y^p, \tilde{\bar{U}}_z^p, \tilde{\bar{w}}_x^p, \tilde{\bar{w}}_y^p, \tilde{\bar{w}}_z^p\right\}^T$$

$$= \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}^T \delta(\omega - k_y c) / [(2\pi)^3 c]. \quad (12)$$

将式(12)代入式(10),可得关于系数 a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 和 a_6 的表达式,对于作用三个坐标方向均布荷载和孔隙水压时分别为

$$[A] \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}^T = \{p_{x0}, p_{y0}, p_{z0}, 0, 0, 0\}^T, \quad (13a)$$

$$[A] \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}^T = \{\alpha p_{f0}, 0, 0, p_{f0}, 0, 0\}^T. \quad (13b)$$

其中矩阵[A]中的具体元素在此不再详细列出。

求解式(13a)、(13b)可得系数 a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 和 a_6 ,再将其代入式(12),并令 $z=0$ 和 $z=d$,可得固定土层上下表面处的位移特解 $\tilde{\bar{U}}_{x1}^p$, $\tilde{\bar{U}}_{y1}^p$, $\tilde{\bar{U}}_{z1}^p$, $\tilde{\bar{w}}_{z1}^p$, $\tilde{\bar{U}}_{x2}^p$, $\tilde{\bar{U}}_{y2}^p$, $\tilde{\bar{U}}_{z2}^p$ 和 $\tilde{\bar{w}}_{z2}^p$,进而可得固定层上下表面处的反力特解 $\tilde{\bar{R}}_{x1}^p$, $\tilde{\bar{R}}_{y1}^p$, $\tilde{\bar{R}}_{z1}^p$, $\tilde{\bar{R}}_{f1}^p$, $\tilde{\bar{R}}_{x2}^p$, $\tilde{\bar{R}}_{y2}^p$, $\tilde{\bar{R}}_{z2}^p$ 和 $\tilde{\bar{R}}_{f2}^p$ 。

为使作用荷载土层固定,特解还必须加上与负的 $\tilde{\bar{U}}_{x1}^p$, $\tilde{\bar{U}}_{y1}^p$, $\tilde{\bar{U}}_{z1}^p$, $\tilde{\bar{w}}_{z1}^p$, $\tilde{\bar{U}}_{x2}^p$, $\tilde{\bar{U}}_{y2}^p$, $\tilde{\bar{U}}_{z2}^p$, $\tilde{\bar{w}}_{z2}^p$ 相应的齐解(以上标“h”表示),与齐解相应的固定端面处反力 $\tilde{\bar{R}}_{x1}^h$, $\tilde{\bar{R}}_{y1}^h$, $\tilde{\bar{R}}_{z1}^h$, $\tilde{\bar{R}}_{f1}^h$, $\tilde{\bar{R}}_{x2}^h$, $\tilde{\bar{R}}_{y2}^h$, $\tilde{\bar{R}}_{z2}^h$ 和 $\tilde{\bar{R}}_{f2}^h$,可由固定土层刚度矩阵 $[S_{P1-P2-SV-SH}^L]$ 求得(刚度矩阵的具体元素可参考文献^[16])

$$\left\{\tilde{\bar{R}}_{x1}^h, \tilde{\bar{R}}_{y1}^h, \tilde{\bar{R}}_{z1}^h, \tilde{\bar{R}}_{f1}^h, \tilde{\bar{R}}_{x2}^h, \tilde{\bar{R}}_{y2}^h, \tilde{\bar{R}}_{z2}^h, \tilde{\bar{R}}_{f2}^h\right\}^T = [S_{P1-P2-SV-SH}^L].$$

$$\left\{-\tilde{\bar{U}}_{x1}^p, -\tilde{\bar{U}}_{y1}^p, -i\tilde{\bar{U}}_{z1}^p, -i\tilde{\bar{w}}_{z1}^p, -\tilde{\bar{U}}_{x2}^p, -\tilde{\bar{U}}_{y2}^p, -i\tilde{\bar{U}}_{z2}^p, -i\tilde{\bar{w}}_{z2}^p\right\}^T. \quad (14)$$

叠加固定端面处特解反力和齐解反力并取负号,

可得作用于层状饱和地基的总外荷载为

$$\left\{\tilde{\bar{R}}_{x1}, \tilde{\bar{R}}_{y1}, \tilde{\bar{R}}_{z1}, \tilde{\bar{R}}_{f1}\right\}^T = -\left\{\tilde{\bar{R}}_{x1}^p, \tilde{\bar{R}}_{y1}^h, \tilde{\bar{R}}_{z1}^p, \tilde{\bar{R}}_{f1}^h, \tilde{\bar{R}}_{z1}^p, \tilde{\bar{R}}_{f1}^h, \tilde{\bar{R}}_{f1}^h\right\}^T, \quad (15a)$$

$$\left\{\tilde{\bar{R}}_{x2}, \tilde{\bar{R}}_{y2}, \tilde{\bar{R}}_{z2}, \tilde{\bar{R}}_{f2}\right\}^T = -\left\{\tilde{\bar{R}}_{x2}^p, \tilde{\bar{R}}_{y2}^h, \tilde{\bar{R}}_{z2}^p, \tilde{\bar{R}}_{f2}^h, \tilde{\bar{R}}_{z2}^p, \tilde{\bar{R}}_{f2}^h, \tilde{\bar{R}}_{f2}^h\right\}^T. \quad (15b)$$

将式(15a)、(15b)固端反力，代入式(4)中荷载(孔隙水压)所在层的位置并求解式(4)，可求得任意饱和层上下表面处位移(包括流体相对于土骨架位移)幅值，进而同1.1(2)节自由波场求解过程一致，可求得层状场地任意点的位移和牵引力(包括孔隙水压)。

同样，上述计算是在频率-波数域内进行的，频率-空间域内的动力响应可通过傅里叶逆变换求得。设 $[\tilde{g}_u(x, y, z)]$ 和 $[\tilde{g}_t(x, y, z)]$ 分别为饱和地基表面透水时，位移和牵引力的动力格林函数矩阵(频率域内)，则层状饱和半空间中任意点的位移(流体相对于土骨架位移)和牵引力(孔隙水压)可表示为

$$\left\{\tilde{U}_x^g, \tilde{U}_y^g, \tilde{U}_z^g, \tilde{w}_n^g\right\}^T = [\tilde{g}_u(x, y, z)] \left\{\tilde{p}_x, \tilde{p}_y, \tilde{p}_z, \tilde{p}_f\right\}^T, \quad (16a)$$

$$\left\{\tilde{t}_x^g, \tilde{t}_y^g, \tilde{t}_z^g, \tilde{t}_f^g\right\}^T = [\tilde{g}_t(x, y, z)] \left\{\tilde{p}_x, \tilde{p}_y, \tilde{p}_z, \tilde{p}_f\right\}^T. \quad (16b)$$

式中，位移向量 $\left\{\tilde{U}_x^g, \tilde{U}_y^g, \tilde{U}_z^g, \tilde{w}_n^g\right\}^T$ 和牵引力向量 $\left\{\tilde{t}_x^g, \tilde{t}_y^g, \tilde{t}_z^g, \tilde{t}_f^g\right\}^T$ 中的上标“g”表示由荷载(孔隙水压)引起动力响应，同样 \tilde{w}_n^g 表示沿单元法线方向流体相对骨架位移； $\tilde{p}_x = (\tilde{p}_{x1}, \tilde{p}_{x2}, \dots, \tilde{p}_{xK})$ 、 $\tilde{p}_y = (\tilde{p}_{y1}, \tilde{p}_{y2}, \dots, \tilde{p}_{yK})$ 、 $\tilde{p}_z = (\tilde{p}_{z1}, \tilde{p}_{z2}, \dots, \tilde{p}_{zK})$ 和 $\tilde{p}_f = (\tilde{p}_{f1}, \tilde{p}_{f2}, \dots, \tilde{p}_{fK})$ 分别为模拟散射波场时施加在空沟边界单元(水平线单元和竖线单元)上的3个坐标方向虚拟移动均布荷载向量和孔隙水压向量，K为离散空沟边界单元的总数。

同理，设 $[\tilde{g}_{uu}(x, y, z)]$ 和 $[\tilde{g}_{ut}(x, y, z)]$ 分别为自由地表不透水时，位移和牵引力的动力格林函数矩阵(频率域内)，则层状饱和半空间中任意点的位移(流体相对于土骨架位移)和牵引力(孔隙水压)可表示为

$$\left\{\tilde{U}_x^g, \tilde{U}_y^g, \tilde{U}_z^g, \tilde{w}_n^g\right\}^T = [\tilde{g}_{uu}(x, y, z)] \left\{\tilde{p}_x, \tilde{p}_y, \tilde{p}_z, \tilde{p}_f\right\}^T, \quad (17a)$$

$$\left\{\tilde{t}_x^g, \tilde{t}_y^g, \tilde{t}_z^g, \tilde{t}_f^g\right\}^T = [\tilde{g}_{ut}(x, y, z)] \left\{\tilde{p}_x, \tilde{p}_y, \tilde{p}_z, \tilde{p}_f\right\}^T. \quad (17b)$$

(4) 边界条件

当层状饱和地基表面及空沟表面均为透水时(透水情况)，空沟表面的边界条件为牵引力为零和孔隙水压为零

$$\int_s [W(s)]^T [\tilde{t}^g(s) + \tilde{t}^f(s)] ds = \mathbf{0} \quad (18)$$

其中， $\tilde{t} = \{t_x, t_y, t_z, t_f\}$ 是由3个坐标方向的牵引力和孔隙水压力组成的向量，上标“g”和“f”分别表示散射场和自由场。 $[W(s)]$ 为权函数矩阵，取为单位矩

阵，使积分在每个单元上独立进行。将式(16b)代入式(8)并求解，可求得虚拟荷载(孔隙水压)向量 $\{\tilde{p}_x, \tilde{p}_y, \tilde{p}_z, \tilde{p}_f\}^T$ ，将其代入式(16a)、(16b)可求得散射波场。最后叠加自由波场和散射波场，可求得任意点的总位移和孔隙水压力

$$\{\tilde{U}_x, \tilde{U}_y, \tilde{U}_z, \tilde{t}_f\}^T = \{\tilde{U}_x^f, \tilde{U}_y^f, \tilde{U}_z^f, \tilde{t}_f^f\}^T + \{\tilde{U}_x^g, \tilde{U}_y^g, \tilde{U}_z^g, \tilde{t}_f^g\}^T. \quad (19)$$

当层状饱和地基表面以及空沟表面均为不透水时(不透水情况)，空沟表面的边界条件为牵引力为零和流体相对于土骨架位移为零(流量为零)。边界条件只需将式(18)中的 $\tilde{t}_f^g(s)$ 和 $\tilde{t}_f^f(s)$ 替换为 $\tilde{w}_n^g(s)$ 和 $\tilde{w}_n^f(s)$ ，然后按照透水边界条件的求解思路，可求得边界为不透水时的散射波场。理论上边界条件还有其他两种情况，分别为地表透水而空沟表面不透水，以及地表不透水而空沟表面透水。这两种情况可按上述思路同理求得，在此不再赘述。上述计算过程是在频域内进行的，时间域内任意点的位移、速度和加速度及孔隙水压力通过傅里叶逆变换求得，如下式所示：

$$\{U, v, a\}^T = \int_{-\infty}^{\infty} \{\tilde{U}, i\omega \tilde{v}, -\omega^2 \tilde{a}\}^T e^{i\omega t} dt, \quad (20a)$$

$$t_f(x, y, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{t}_f(x, y, z, \omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (20b)$$

式中， U 、 v 和 a 分别为土骨架的位移、速度和加速度向量。

1.2 轨道和地基耦合

设轨道与地基相互作用力密度为 q ，单一列车移动荷载为 P ，在 q 和 P 的作用下，轨道振动方程可为

$$EI \frac{\partial^4 \Omega}{\partial y^4} + m_b \frac{\partial^2 \Omega}{\partial t^2} = 2\Delta q \delta(y - ct) + P \delta(y - ct), \quad (21)$$

式中， Ω 为轨道位移，将式(21)转换到频率域中得

$$[EI(\omega/c)^2 - m_b \omega^2] \tilde{\Omega}(k_y = \omega/c, \omega) = 2\Delta q + P, \quad (22)$$

通过令轨道的竖向位移 Ω 等于地基表面轨道中心处的竖向位移，实现轨道和饱和地基的耦合

$$\tilde{q}(k_y = \omega/c, \omega) \tilde{G}_{U_z}(\omega) = \tilde{\Omega}. \quad (23)$$

其中， $\tilde{G}_{U_z}(\omega)$ 为是含空沟层状饱和地基在表面移动均布竖向荷载下的地基动力柔度(频域内)，可由式

(19)求得。该动力柔度表示单位密度移动均布荷载作用于层状饱和地基表面时，荷载中心点处产生土骨架竖向位移。联立式(22)、(23)可求得频率域中轨道地基相互作用力以及轨道位移，进而将虚拟力代回式(4)求得自由波场，再将自由波场代入式(16)或(17)求得散射波场，叠加自由和散射波场求得总波场，最后可由式(20)，求得时间-空间域内响应。

2 方法验证

通过与文献[16]给出高速移动列车荷载作用下层

状饱和地基-轨道耦合系统的动力响应比较验证方法的正确性。本文取沟深 $H=0.01\text{ m}$ (近似于零) 即退化为无空沟的饱和地基(自由波场)。计算中饱和土参数、轨道材料参数和轨道宽度参见考文献[16]。图 3 给出了均质饱和地基表面分别为透水和不透水情况下距离轨道中心 9 m 处土体的动力响应。图中无量纲土骨架竖向位移 $|U_z^*| = |GU_z/P|$, 无量纲速度为 $c^* = c/\sqrt{G/\rho}$ 。从图中可以看出, 本文结果与文献[16]结果非常一致。

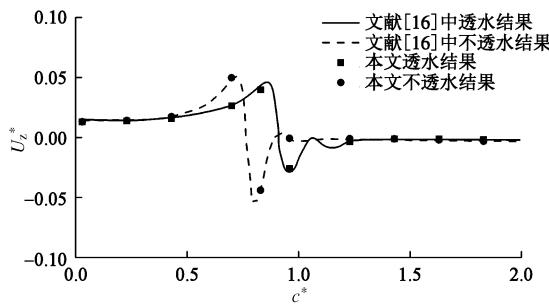


图 3 本文结果与文献[16]结果对比

Fig. 3 Comparison between calculated results and those of Reference [16]

3 算例与分析

3.1 均质饱和地基中隔振规律分析

首先以均质饱和地基中矩形空沟为模型进行研究。饱和土参数见表 1。轨道参数和列车荷载采用文献[32]参数, 轨道宽度 $B=3\text{ m}$, 密度 $m_b=10.8\times 10^3\text{ kg/m}$, 刚度 $EI=200\times 10^6\text{ MN}\cdot\text{m}^2$, 阻尼比 $\zeta=0.1$, 移动列车荷载为单一轮轴竖向荷载, 其值为 160 kN 。列车的移动速度依据饱和土 Rayleigh 波速取为 $c^*=0.6$ (亚音速), $c^*=0.93$ (跨音速) 和 $c^*=1.5$ (超音速) 3 种情况, 其中 $c^*=c/\sqrt{G/\rho}$ 。

(1) 饱和地基中空沟深度对隔振效果的影响

为研究沟深对隔振效果的影响, 图 4 给出了不同沟深和不同列车移动速度下, 沟后观测点土骨架竖向位移和加速度时程。空沟距离轨道中心距离 $D=8\text{ m}$, 空沟宽度 $W=1\text{ m}$, 空沟深度分别取为 $H=0, 3, 5, 7\text{ m}$, 其中 $H=0\text{ m}$ 代表无空沟存在的均质饱和地基(对应自由波场)。观测点位于沟后距离沟中心点 4 m 处。饱和土参数取表 1 中孔隙率为 $n=0.3$ 的情况, 透水状态为不透水情况(地基表面和空沟表面均不透水), 时间为负时表示列车尚未移动至坐标原点。

从图 4 中可以看出, 随着沟深的增加, 位移峰值逐渐减小, 隔振效果越好。列车移动速度越大, 空沟隔振效果越好, 如在低音速且 $H=3\text{ m}$ 时的隔振率仅为 6.03% (对应位移峰值之差除以自由场位移峰值), 而

表 1 均质饱和地基饱和土物理参数

Table 1 Saturated soil parameters of uniform saturated foundation

n	G/Pa	M/Pa	$m/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	α	$\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_f/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	b	泊松比 ν	阻尼比 ζ_s
0.10	37×10^6	43×10^6	55000.00	0.2762	2000	1000	0	0.25	0.05
0.30	37×10^6	618×10^6	7222.22	0.8287	2000	1000	0	0.25	0.05
0.34	37×10^6	1315×10^6	5795.85	0.9392	2000	1000	0	0.25	0.05

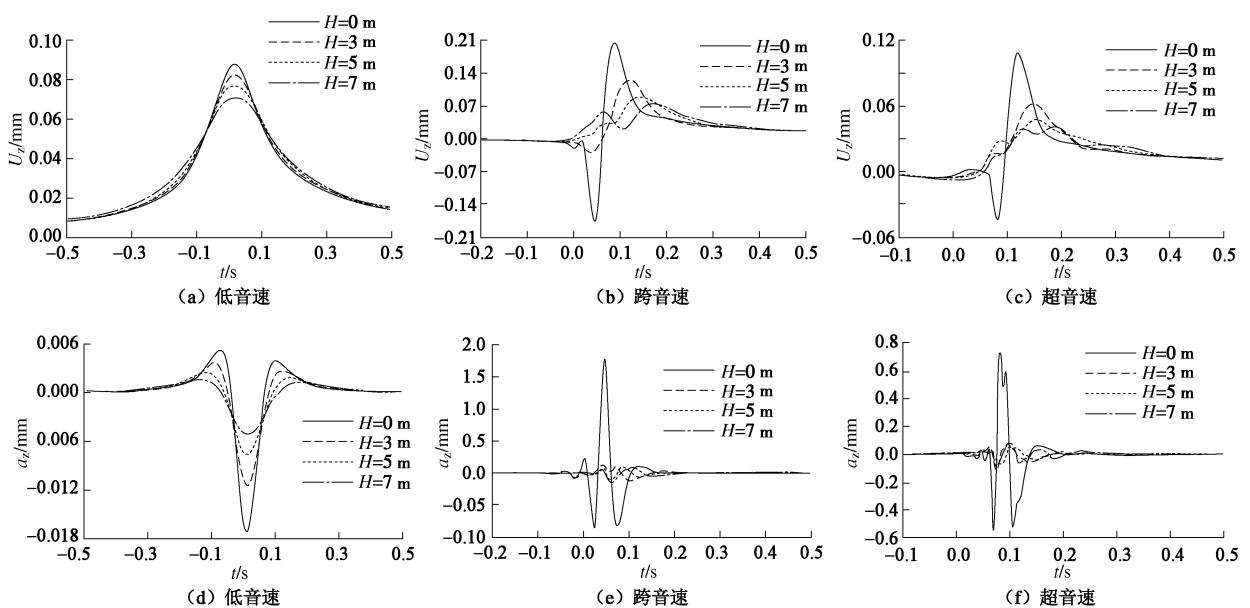


图 4 均质饱和地基中空沟深度对土骨架位移隔振效果的影响

Fig. 4 Isolation effects of trench depth on displacement in a homogenous saturated ground

超音速且 $H=3$ 米时的隔振率达 43.49%。这是因为随着列车移动速度的增加, 地基中富含更多的高频波(短波长波), 空沟对短波长波的传播有更好的阻碍效果, 这也与文献[27]得到的结论是一致的。另外, 由于空沟的存在使得波在地基中的传播路程增加, 因而出现了空沟越深, 位移峰值出现时刻越滞后的现象, 这种现象在跨音速和超音速时尤为明显。

从图 4 中还可以看出, 空沟对加速度的隔振效果要明显好于对位移的隔振效果, 如低音速且 $H=5$ m 时, 空沟对位移和加速度的隔振率分别为 12.29% 和 56.30%, 而超音速且 $H=3$ m 时, 空沟对位移和加速度的隔振率分别为 43.49% 和 83.32%。可以看出, 较浅的空沟深度 ($H=3$ m) 即可对加速度有非常高的隔振效果(尤其对跨音速和超音速时)。考虑到对列车振动的敏感主要来自于竖向加速度, 以上数据表明, 在均质饱和地基中设置空沟对移动列车产生的振动进行隔振是一种非常有效的措施。

图 5 又进一步给出了相应的孔隙水压时程。从图中可以看出, 低音速时, 空沟对孔隙水压的隔振非常

有限, 且随着沟深的增加, 隔振效果增加不明显, 这与空沟对位移的隔振规律相似(图 4)。跨音速时, 空沟对孔隙水压有着非常明显的隔振效果, 在沟深 $H=3$ 米时, 隔振率达 73.06%, 这与对加速度的隔振规律较为一致。超音速时, 空沟对孔隙水压的隔振效果则介于低音速和跨音速之间。另外, 从图 5 中还可以看出, 跨音速和超音速时的孔隙水压值显著大于低音速时孔隙水压值, 这是因为列车运行速度高时, 地基中产生更多的高频波, 而高频波会激起更高的孔隙水压。

为分析隔振沟对地基中波不同频率成分的隔振效果, 对应图 4 中竖向位移和加速度, 图 6 给出了不同沟深和不同列车移动速度下, 沟后观测点竖向位移和加速度的傅里叶幅值谱。空沟的参数、饱和土参数以及观测点位置均同图 4, 透水状态仍为不透水情况。从图 6 中可以清晰的看出, 隔振沟对振动高频成分的隔振效果明显好于对低频成分的隔振效果, 也即当隔振沟的深度与振动波长的比值更大时, 隔振沟有着更有效的隔振作用。从图 6 中可以看出, 随着列车移

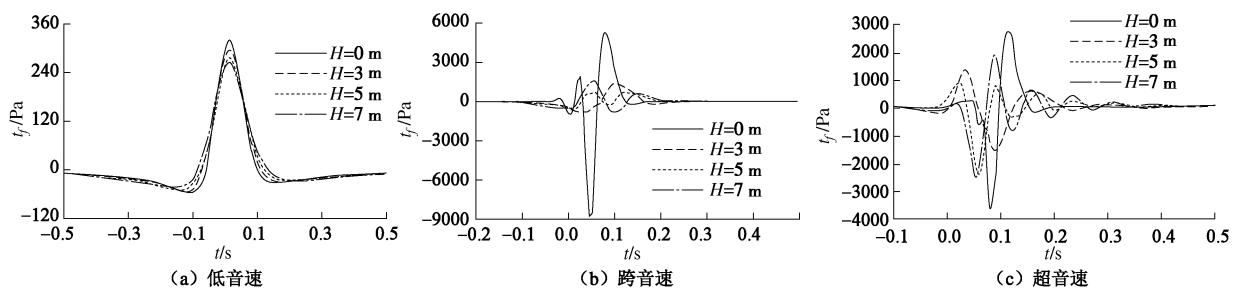


图 5 均质饱和地基中空沟深度对孔隙水压隔振效果的影响

Fig. 5 Isolation effects of trench depth on pore pressure in a homogenous saturated ground

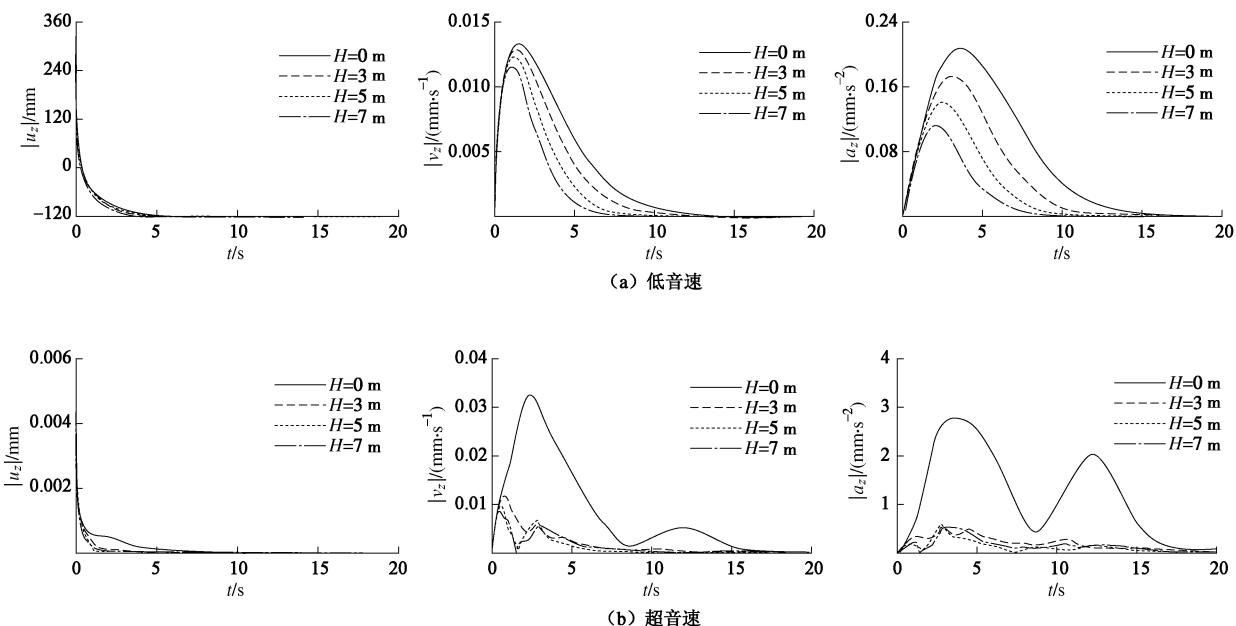


图 6 均质饱和地基中空沟深度对傅里叶幅值谱的影响

Fig. 6 Isolation effects of trench depth on Fourier spectrum in a homogenous saturated ground

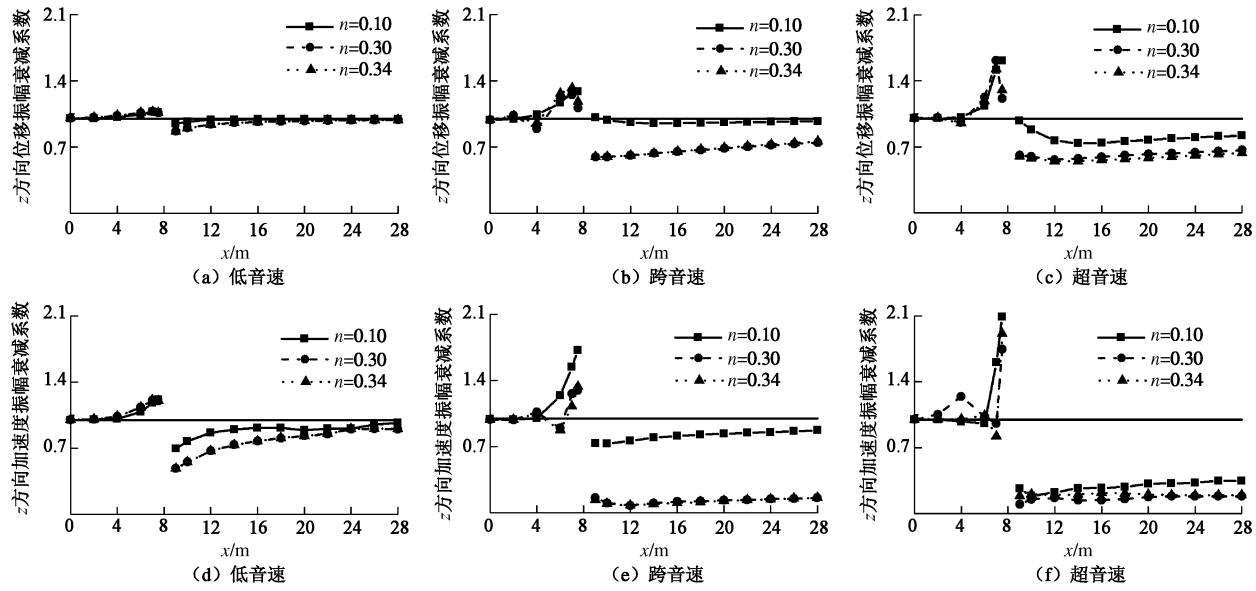


图 7 均质饱和地基中孔隙率对空沟隔振效果的影响

Fig. 7 Influences of porosity on isolation effects in a homogenous saturated foundation

动速度的增大, 观测点的位移和加速度的频谱逐渐向更高频段迁移, 隔振沟也相应表现出了更好的隔振效果, 这也正好解释了图 4, 5 中, 当列车以跨音速和超音速运行时, 隔振沟隔振效果更好的结论。从图 6 中还可以看出, 列车移动速度一定时, 加速度相对于位移的高频成分更多, 这正好解释了图 4 中隔振沟对加速度隔振效果最好, 位移隔振效果相对最弱结论。

(2) 空沟对不同孔隙率饱和土地基的隔振效果

为研究不同孔隙率饱和土地基, 设置空沟时的隔振效果, 图 7 给出了饱和土孔隙率不同时的地表位移和加速度的振幅衰减系数。饱和土孔隙率分别取 $n=0.1$, 0.3 , 0.34 , 与各孔隙率相应的饱和土参数见表 1。空沟距离轨道的距离和空沟的宽度均同图 4, 空沟的深度取为 $H=3$ m。透水状态为不透水情况。振幅衰减系数定义为: 振幅衰减系数 = (设置空沟后观测点动力响应幅值) / (无空沟观测点动力响应幅值)。本文求解振幅衰减系数时, 在 $0 \text{ m} \leq x \leq 28.0 \text{ m}$ 的范围内选取 17 个观测点, 然后针对每一点分别求解有和无空沟时动力响应绝对值的最大值, 然后将两者绝对值最大值相除。

从图 7 中可以看出, 对应不同孔隙率地基, 空沟的隔振效果有着较大的差别。当移动速度为低音速和跨音速时, 孔隙率 $n=0.30$ 和 $n=0.34$ 时的位移和加速度的振幅衰减系数非常接近且明显小于 $n=0.10$ (非常小孔隙率) 情况振幅衰减系数。当移动速度为超音速时, 对应 3 种孔隙率衰减系数差异减小, 但仍可观察到, 小孔隙率 ($n=0.1$) 饱和地基衰减系数相对较小。

另外, 从图 7 中还可以看出, 振幅衰减系数呈沟前放大, 沟后明显降低且逐渐趋近于 1 的趋势, 使得

沟后形成一个明显隔振区域, 这与文献[20]的研究结论类似。再者, 从图 7 中也可更为清晰地看出, 空沟对跨音速和超音速运行的列车有着更好的隔振效果, 以及空沟对速度和加速度有着比位移更好的隔振效果, 同时随着列车移动速度增加, 隔振区域逐渐变大。

(3) 空沟对饱和土地基和干土地基的隔振效果

为研究空沟对饱和土地基与干土地基以及不同界面透水条件饱和土地基隔振效果的差异, 表 2 给出了干土地基、饱和土地基界面完全透水和饱和土地基界面完全不透水时, 设置空沟后振幅衰减系数的比较。对于饱和土地基, 饱和土参数取为表 1 中 $n=0.30$ 对应的参数。对于干土地基, 与文献[27]相似, 通过令饱和土参数 $M=m=\rho_f=\alpha=b=10^{-3}$ (近似为零) 得到。空沟与轨道中心距离、空沟宽度、深度以及振幅衰减系数的定义方法均同图 7。

表 2 干土地基、界面透水和不透水饱和地基隔振率的比较

Table 2 Comparison of isolation effects of dry soil foundation,

drained saturated and undrained saturated foundations (%)

动力响应	土质	低音速	跨音速	超音速
竖向位移	干土	1.57	3.84	19.96
	透水	2.23	15.25	22.70
	不透水	6.03	38.96	43.66
竖向加速度	干土	14.01	33.10	72.12
	透水	17.68	49.77	75.76
	不透水	32.78	92.28	83.32

从表 2 中可以看出, 地基土中是否充满流体(饱和地基和干土地基)以及饱和地基界面的透水条件对空沟的隔振效果均存在一定程度的影响。整体上空沟对饱和地基的隔振效果要好于对干土地基的隔振效果, 对界面不透水的饱和地基的隔振效果要好于对界

表3 饱和基岩(半空间)物理参数

Table 3 Physical parameters of saturated bedrock (half-space)

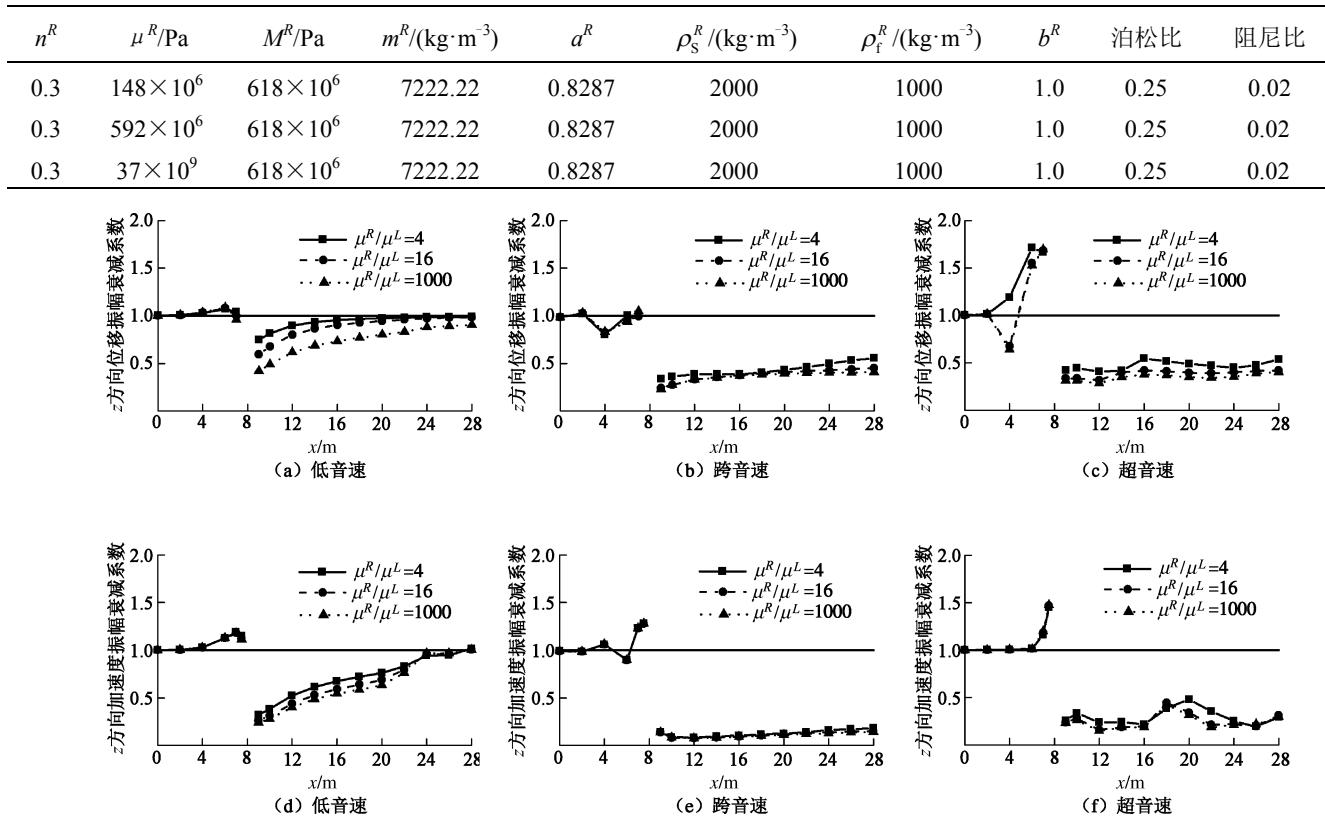


图8 层状饱和地基与均质饱和地基中空沟隔振效果比较

Fig. 8 Comparison of isolation effects of layered saturated foundation and homogeneous saturated foundation

面透水地基的隔振效果。对应跨音速情况, 干土、透水和不透水时, 坚向位移的隔振率分别为 3.84%, 15.25% 和 38.96%, 不透水情况隔振率为干土情况的 10.15 倍, 而加速度的隔振率分别为 33.10%, 49.77% 和 92.28%, 不透水情况隔振率为干土情况的 2.79 倍。同时从表 2 中可以看出, 列车以低音速运行时, 干土、透水和不透水情况对应的坚向位移的隔振率分别为 1.57%, 2.23% 和 6.03%, 隔振效果均较差, 也即空沟隔振不适合用于均匀地基且列车低速运行的情况。

3.2 层状饱和地基中空沟隔振规律分析

为研究层状饱和地基中空沟的隔振效果, 以饱和基岩上单一饱和土层为例, 图 8 给出了不同列车移动速度和不同饱和基岩刚度下土骨架的位移和加速度的振幅衰减曲线。饱和土层参数对应表 1 中 $n=0.3$ 情况, 饱和基岩与饱和土层的剪切模量分别为 $G^R/G^L=4, 16, 1000$ ($G^R/G^L=1000$ 可认为是刚性基岩), 其对应的饱和基岩物理参数见表 3。空沟与轨道中心距离、空沟宽度、深度以及振幅衰减系数的定义方法均同图 7。首先, 比较饱和基岩上单一饱和土层地基(图 8)与均质饱和地基结果(图 4)发现, 空沟对单一饱和土层地基有着更好的隔振效果, 如低音速, 沟后 4 m 观测点土骨架坚向位移, 对应 $G^R/G^L=4, 16, 1000$ 的隔

振率分别为 10.19%, 19.98%, 48.43%, 均大于图 4 中相应隔振率 6.03% (隔振率的计算方法同 3.1. (1) 节)。同时, 基岩刚度越大, 空沟对单一饱和土层地基隔振效果越好。另外, 从图 8 还可以看出, 基岩刚度的变化, 对隔振率的影响在低音速且位移结果中更为明显。

4 结 论

本文建立了含空沟层状饱和地基-轨道耦合模型, 研究了空沟对饱和地基在列车移动荷载作用下的隔振问题。文中分别以均质饱和地基和饱和基岩上单一饱和土层地基为模型, 将列车移动速度考虑为低音速、跨音速和超音速, 讨论了空沟深度和饱和土孔隙率对位移、加速度和孔隙水压隔振效果的影响, 并比较分析了空沟对干土地基与饱和土地基隔振效果以及不同界面透水条件饱和地基隔振效果的差异, 对比分析了单一饱和土层与均质地基隔振效果的差异并讨论了饱和基岩刚度对隔振效果的影响, 主要得到了以下 4 点结论。

(1) 空沟对列车运行引起饱和地基的振动有着较好的隔振效果, 尤其在列车移动速度为跨音速和超音速时空沟对速度和加速度的隔振效果非常显著。因而, 在饱和地基中设置空沟对移动列车产生的振动进行隔

振是一种非常有效的措施。

(2) 空沟对孔隙率较大的饱和地基有着更好的隔振效果; 空沟对饱和地基的隔振效果优于对干土地基的隔振效果, 且空沟对界面不透水的饱和地基有着更好的隔振效果。

(3) 空沟对单一饱和土层地基的隔振效果优于对均质地基的隔振效果, 且饱和基岩刚度越大, 隔振效果越好。

(4) 值得指出的是, 本文中仅采用数值方法进行了理论分析研究。然而, 开展相关试验研究, 并与试验结果进行对比分析是非常必要的, 笔者将在后续研究中进一步开展相应的试验研究。

参考文献:

- [1] WOODS R D. Screening of surface waves in soils[J]. Am Soc Civil Engr J Soil Mech, 1968, **94**: 407 - 435.
- [2] BESKOS D E, DASGUPTA B, VARDOLAKIS I G. Vibration isolation using open or filled trenches[J]. Computational Mechanics, 1986, **1**(1): 43 - 63.
- [3] 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, 2004, **130**(12): 1283 - 1291.
- [4] ADAM M, VON ESTORFF O. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches[J]. Computers & Structures, 2005, **83**(1): 11 - 24.
- [5] 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): 701 - 716.
- [6] WITH C, BAHREKAZEMI M, BODARE A. Wave barrier of lime-cement columns against train-induced ground-borne vibrations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, **29**(6): 1027 - 1033.
- [7] BANERJEE P K, AHMAD S, CHEN K. Advanced application of BEM to wave barriers in multi-layered three-dimensional soil media[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1988, **16**(7): 1041 - 1060.
- [8] 邓亚虹, 夏唐代, 陈敬虞. 车辆荷载作用下隔震沟隔震效率影响因素分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(5): 883 - 888. (DENG Ya-hong, XIA Tang-dai, CHEN Jing-yu. Analysis of efficiency of vibration isolating groove subjected to vehicle load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(5): 883 - 888. (in Chinese))
- [9] 熊 浩, 高广运, 王小岗. 均质地基中空沟对交通荷载的隔振分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, **42**(8): 2460 - 2468. (XIONG Hao, GAO Guang-yun, WANG Xiao-gang. Analysis of isolating vibration from traffic by open trench in homogenous ground[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, **42**(8): 2460 - 2468. (in Chinese))
- [10] 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 Guang-yun. 2D analysis of active isolation using open trench in layered medium[J]. Underground Space, 2004, **24**(3): 391 - 394. (in Chinese))
- [11] 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 Guang-yun, PENG Zheng-guang, 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. (in Chinese))
- [12] 高广运, 彭争光, 张梦芳, 等. 层状地基空沟被动隔振分析[J]. 西北地震学报, 2009, **31**(2): 115 - 120. (GAO Guang-yun, PENG Zheng-guang, ZHANG Meng-fang, et al. Analysis of vibration isolation using open trench in layered ground[J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, **31**(2): 115 - 120. (in Chinese))
- [13] 高广运, 时 刚, 冯世进, 等. 沟渠式被动地面振动隔栅的三维分析[J]. 中国科学: G辑, 2008, **38**(5): 580 - 591. (GAO Guang-yun, SHI Gang, FENG Shi-jin, et al. 3D analysis of in-filled trench as passive barriers for ground vibration isolation[J]. Science China (Physics, Mechanics & Astronomy), 2008, **38**(5): 580 - 591. (in Chinese))
- [14] 熊 浩, 高广运, 王小岗. 层状地基中空沟对交通荷载的竖向隔振分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(4): 1131 - 1137. (XIONG Hao, GAO Guang-yun, WANG Xiao-gang. Analysis of isolating vertical vibration from traffic loads by open trench in layered ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(4): 1131 - 1137. (in Chinese))
- [15] 陈功奇, 高广运. 层状地基中填充沟对不平顺列车动荷载的隔振效果研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(1): 144 - 153. (CHEN Gong-qi, GAO Guang-yun. Vibration screening effect of in-filled trenches on train dynamic loads of geometric irregular track in layered grounds[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 144 - 153. (in Chinese))
- [16] 巴振宁, 梁建文, 金 威. 高速移动列车荷载作用下层状饱和地基-轨道耦合系统的动力响应[J]. 工程力学, 2015, **32**(11): 189 - 200. (BA Zhen-ning, LIANG Jian-wen, JIN Wei. Dynamic response of coupled system of tracks and layered

- fluid-saturated ground under moving high-speed loads. *Engineering Mechanics*, 2015, **32**(11): 189 - 200. (in Chinese))
- [17] 巴振宁, 金 威, 梁建文. 层状饱和地基-路轨-列车耦合系统轨道不平顺引起振动的分析[J]. 振动与冲击, 2015, **34**(15): 88 - 97. (BA Zhen-ning, JIN Wei, LIANG Jian-wen. Vibration induced by track irregularities for a layered saturated ground-track-vehicle coupled system[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, **34**(15): 88 - 97. (in Chinese))
- [18] 时 刚, 高广运. 饱和地基中二维空沟远场被动隔振研究 [J]. 振动与冲击, 2011, **30**(9): 157 - 162. (SHI Gang, GAO Guang-yun. Two-dimensional analysis of open trench used as passive barriers in saturated soil[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, **30**(9): 157 - 162. (in Chinese))
- [19] 时 刚, 郭院成, 高广运. 饱和地基中二维填充沟远场被动隔振研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(1): 104 - 111. (SHI Gang, GUO Yuan-cheng, GAO Guang-yun. Two-dimensional analysis of in-filled trenches as passive barriers in saturated soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(1): 104 - 111. (in Chinese))
- [20] 高广运, 何俊峰, 李 宁, 等. 饱和地基上列车运行引起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. (in Chinese))
- [21] 时 刚, 高广运, 郭院成. 弹性地基与饱和地基中连续屏障远场隔振的对比分析[J]. 土木工程学报, 2011(S2):77 - 80. (SHI Gang, GAO Guang-yun, GUO Yuan-cheng. Comparative analysis of continuous wave barriers in elastic foundation and saturated foundation[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011(S2):77 - 80. (in Chinese))
- [22] CAO Z, CAI Y, BOSTRÖM A, et al. Semi-analytical analysis of the isolation to moving-load induced ground vibrations by trenches on a poroelastic half-space[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, **331**(4): 947 - 961.
- [23] 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. (in Chinese))
- [24] 曹志刚, 蔡袁强, 徐长节. 空沟对列车运行引起的地基振动隔振效果研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(8): 373 - 2382. (CAO Zhi-gang, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie. Screening efficiency of open trenches to train-induced ground vibration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(8): 373 - 2382. (in Chinese))
- [25] 朱兵见, 熊 浩. 二维饱和地基中空沟主动隔振分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(2): 462 - 467. (ZHU Bing-jian, XIONG Hao. Analysis of active vibration isolation by open trench in two-dimensional saturated ground[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(2): 462 - 467. (in Chinese))
- [26] 巴振宁, 梁建文, 金 威. 高速移动列车荷载作用下成层地基-轨道耦合系统的动力响应[J]. 土木工程学报, 2014, **47**(11): 108 - 119. (BA Zhen-ning, LIANG Jian-wen, JIN Wei. Dynamic responses of layered ground-track coupled system under the moving loads from high-speed train[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, **47**(11): 108 - 119. (in Chinese))
- [27] LIANG J W, YOU H B, LEE V W. Scattering of SV waves by a canyon in a fluid-saturated, poroelastic layered half-space, modeled using the indirect boundary element method[J]. *Soil Dyn and Earthquake Engrg*, 2006, **26**: 611 - 625.
- [28] LIANG J W, FU J, TODOROVSKA M I, et al. In-plane soil-structure interaction in layered, fluid-saturated, poroelastic half-space: I structural response[J]. *Soil Dyn and Earthquake Engrg*, 2016, **81**: 84 - 111
- [29] 袁 万, 蔡袁强, 史 吏, 等. 基于 2.5 维有限元饱和土地基中空沟隔振性能研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 2111 - 2118. (YUAN Wan, CAI Yuan-qiang, SHI Li, et al. Study of vibration-isolation efficiency of open trench in saturated ground by 2.5D finite element method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(7): 2111 - 2118. (in Chinese))
- [30] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid - saturated porous solid: I low-frequency range[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, **28**(2): 168 - 178.
- [31] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid - saturated porous solid: II higher frequency range[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, **28**(2): 179 - 191.
- [32] 边学成, 陈云敏, 胡 婷. 基于 2.5 维有限元方法模拟高速列车产生的地基振动[J]. 中国科学, 2008, **38**(5): 600 - 617. (BIAN Xue-cheng, CHEN Yun-min, HU Ting. Numerical simulation of high-speed train induced ground vibrations using 2.5D finite element approach[J]. *Science China (Physics, Mechanics & Astronomy)*, 2008, **38**(5): 600 - 617. (in Chinese))