

水位变化对多空沟屏障远场隔振效果的影响研究

李建平^{1,2}, 张晓磊^{1,2}, 冯世进^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 受季节性降雨的影响, 雨季和旱季存在明显的水位波动。为分析地下水位升降对多空沟隔振效果的影响, 建立了上覆单相弹性层饱和地基中空沟有限元分析模型。模型中考虑了沟中水的作用, 算例分析了等沟深和不等沟深多沟屏障、沟壁倾斜多沟屏障和连续起伏地形屏障在不同水位下的远场隔振效果。计算结果与相应单相弹性地基进行对比, 结果表明: 土体渗透性低时, 多数水位下不利于多沟屏障隔振; 沟深为 $0.3L_R$ (L_R 为 R 波波长) 的三沟屏障通常可获得较理想的隔振效果 (75% 隔振率), 但屏障在隔振效果最差的共振水位 ($0.6L_R$) 下, 空沟须贯穿上覆干土层才可获得 75% 隔振率; 递减沟深屏障可有效降低上覆土层共振的不利影响; 沟深较浅时, 沟壁倾角越大, 多沟的隔振效果越好, 但对较深多沟的影响小; 连续起伏的地形景观可作为一种有效的绿色隔振屏障。

关 键 词: 地下水位; 饱和地基; 多空沟屏障; 隔振效果; COMSOL 软件

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 09-3131-09

Research on the effect of the moving water table on passive isolation effectiveness using a multiple open trench barrier

LI Jian-ping^{1,2}, ZHANG Xiao-lei^{1,2}, FENG Shi-jin^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Groundwater table might significantly fluctuate due to seasonal rainfall. In order to investigate the effect of the moving water table on the screening performance of multiple open trench barriers, a finite element model is developed to describe wave propagation in a layered ground, which is modeled as a dry layer resting on a saturated substratum. The effect of infiltrated water in trenches is considered in this model, and the vibration isolation efficiencies of multi-trench barriers with equal and unequal trench depth, multi-trench barriers with inclined trench wall and continuous undulating terrain barriers at different water levels are analyzed as comparable cases. Comparing with the corresponding single-phase elastic foundation, the numerical results show that a low permeability coefficient of the saturated substratum might have a significantly adverse effect on the vibration isolation efficiency for most of water tables. A triple trench barrier with a depth of $0.3L_R$ (L_R is Rayleigh wavelength) usually can achieve a satisfactory screening efficiency (i.e. 75% reduction), while the depth should be at least $0.6L_R$ at the critical water table, where the worst isolation efficiency occurs. A multiple trench barrier with decremental depth can effectively reduce the adverse effect of the resonance. The larger sloping sides are, the better isolation effect of a barrier is for the shallow trenches, while it is not important for deep ones. Moreover, a rolling terrain landscape can be an environment-friendly isolation measure, which would achieve a great vibration isolation efficiency.

Keywords: groundwater table; saturated soil; multiple open trench barriers; isolation effectiveness; COMSOL software

1 引 言

随着经济的发展, 各种人工振动污染日趋频繁, 对居民生活、周边建筑及精密仪器的影响越来越严

重。国际上已将振动列为“七大公害”之一, 因此, 对振动污染的治理迫在眉睫。在地基中设置隔振屏障是一种行之有效的治理方法。屏障隔振具有造价低、施工方便、不影响振源及受振建筑等优点, 因

收稿日期: 2019-11-17

修回日期: 2020-03-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 青年科学家项目 (No.2014CB049101)。

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2014CB049101).

第一作者简介: 李建平, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事轨道交通诱发的环境振动及其控制等工作。E-mail: 1610149@tongji.edu.cn

通讯作者: 张晓磊, 男, 1987 年生, 博士, 主要从事轨道交通诱发的环境振动及其控制等工作。E-mail: Xiaolei_Zhang@tongji.edu.cn

而被广泛应用于工程实际中。然而调查发现,对振动污染的投诉与季节相关,因为地下水位随季节交替而起伏^[1],水位变化将改变土体特性,如改变土体分层、降低土体刚度、提高土体密度等,进而改变地面的振动水平。鉴于此,有必要研究水位变化对屏障隔振效果的影响。

在各种隔振屏障中,空沟通常被认为是最有效的隔振措施。空沟的隔振效率主要依赖于 Rayleigh 波(R波)波长 L_R 。研究表明,沟深达到 $0.6L_R$ 以上时,空沟可获得理想的隔振效果(75%隔振率)^[2-3]。但考虑到土体稳定性及工程造价等问题,沟深设置一般较浅。而对于波长较长的入射波,浅沟很难起到有效的隔振作用,此时,多沟隔振屏障是一种有效的应对措施。因为达到相同隔振效率时,多沟屏障所需沟深远小于单沟^[4-6]。Younesian 等^[4]采用数值方法分析了单相场地中多沟屏障对列车荷载引起地面振动的屏蔽效果,结果表明,沟深是最重要的影响参数,而沟宽、沟间距和屏障位置的影响均较小;Hwang 等^[5]进行了3个浅沟屏障冲击荷载的隔振效果试验研究,但是由于沟深较小,并没有获得明显的隔振效果。另一方面,由于填充沟可以有效解决沟壁稳定性问题,目前也有学者对多个填充沟的隔振效果开展研究^[6-7]。

以上对沟屏障的研究中,往往将地基简化为单相弹性介质;然而,在地下水位较高的地区,考虑地下水的饱和地基更接近于实际。时刚等^[8]对比了完全弹性半空间与饱和场地中沟屏障的隔振效果,得出弹性地基中空沟隔振效果好于饱和地基的结论。高广运等^[9]通过对饱和地基中列车运行引起的地面振动进行隔振分析,指出弹性地基和饱和地基上设置沟屏障的隔振效果相差不大。Cao 等^[10]通过研究移动荷载作用下饱和土地基中空沟的隔振效果,指出荷载移动速度接近瑞利波速时饱和土中的隔振效果明显比弹性地基更好;但由于模型限制,该方法只能考虑水位与沟底平齐的工况。可见,对比饱和地基与弹性地基中沟屏障的隔振效果,其结论不尽相同。袁万等^[11]进一步分析认为,相比于弹性地基,空沟在均质地基中的隔振效果不佳,而在分层饱和地基中隔振效果较好。另外,徐斌^[12]、巴振宁^[13]、Bordón^[14]等也对空沟在饱和地基中的隔振性能进行了研究。

值得注意的是,上述饱和地基中,沟屏障的研究并未考虑地下水位变化的情况,然而实际上,受季节性降雨的影响,雨季和旱季存在明显的水位波动,如达渝高速公路 K144 滑坡区地下水的监测发

现,水位变化高达 4 m ^[15];在某沙土地区,春季和秋季的地下水位涨幅也达到 2 m ^[1]。袁万等^[11]分析了移动荷载作用下3种饱和土模型中空沟的隔振效果,发现随着水位降低,空沟的隔振效果变好,但水位低于沟深后,其影响趋于稳定。当地下水位高于空沟底部时,地下水将渗入到空沟中。然而,上述分析中未考虑沟中水对空沟隔振效果的影响。实际上,水作为一种传播介质,将会传播压缩波(P波),从而降低空沟的隔振效果^[16-17]。因此,有必要研究不同水位下沟屏障隔振效果的差异。

本文基于弹性介质、Biot 饱和多孔介质和理想液体的动力控制方程,建立上覆单相弹性层饱和和地基中空沟有限元模型,模型中考虑了沟中水的作用,研究了地下水位波动对多空沟屏障远场隔振效果的影响,分析了不同水位下饱和土渗透系数、屏障几何参数对多空沟隔振效果的影响,且进一步分析了若干异形多沟屏障的隔振效果。

2 模型与计算方法

2.1 基本理论

如图1所示上覆单相弹性层饱和和地基模型,上覆单相层的物理力学参数包括 Lamé 常数 λ^e 、 μ^e 和密度 ρ^e ;饱和土具有与上覆单相层相同的 Lamé 常数和密度,即 $\lambda = \lambda^e$, $\mu = \mu^e$, $\rho^e = (1-n)\rho_s$, 其中 ρ_s 为土颗粒密度, n 为饱和土孔隙率。当地下水位上升时,淹没部分采用饱和土的材料参数。当地下水位高于空沟底部时,地下水将渗入到沟中,且沟中水位与地下水位同时变化。本文采用频域有限元法进行模拟,下面将简要介绍单相弹性介质、饱和多孔介质及理想液体在频域下的波动方程。

2.1.1 弹性波动方程

上覆单相土层的弹性波动方程为

$$(\lambda^e + \mu^e) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}^e) + \mu^e \nabla^2 \mathbf{u}^e = \rho^e \omega^2 \mathbf{u}^e \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}^e$ 为上覆单相层的位移矢量; ω 为圆频率; ∇ 为梯度算子。

2.1.2 Biot 波动方程

在有限元软件 COMSOL 中,采用 Biot 方程的 $\mathbf{u}$ - p 形式来模拟多孔介质中振动波的传播。分别定义 $\mathbf{u}$ 和 p_f 为饱和土骨架的位移矢量和孔隙压力,则饱和多孔介质在频域内的波动方程为^[18]

$$\left. \begin{aligned} \mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \omega^2 (\rho - \rho_f^2 / \gamma) \mathbf{u} - \\ (\alpha - \rho_f / \gamma) \nabla p_f = 0 \\ \nabla^2 p_f + (\omega^2 \gamma / M) p_f + \omega^2 (\alpha \gamma - \rho_f) \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $\rho = n\rho_f + (1-n)\rho_s$ ，为饱和土总密度； ρ_f 为流体密度； M 和 α 为第一、第二 Biot 系数，用以表征孔隙流体和土颗粒压缩性的常数； $\gamma = \tau_\infty \rho_f / n + \eta / (i\omega\kappa)$ ； τ_∞ 为饱和土孔道迂曲度； κ 为水力渗透系数（ m^2 ）； η 为流体动力黏度，对于水可取 $\eta = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

2.1.3 理想液体波动方程

沟中水假定为理想液体，则其在频域内的波动方程为

$$\nabla^2 p_w + (\omega^2 / c^2) p_w = 0 \quad (3)$$

式中： p_w 为流体压力； $c = \sqrt{(K_f / \rho_f)}$ ，为流体压缩波速； K_f 为水的体积模量， $K_f = 2.19 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。

2.1.4 边界条件

假定土体透水性强，地下水位可自由升降，沟内外的水位变化保持一致，因此，上覆单相土层与沟中水不存在接触面，模型中存在两类接触面：上覆单相土层和饱和下卧层之间的接触、沟中水和饱和土之间的接触；接触边界条件归纳于表 1。

表 1 界面连续条件

Table 1 Interface continuous conditions		
土体名称	单相弹性层	沟中水
饱和土	$\mathbf{n} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}^c$	$\mathbf{n}(i\omega)^2 \boldsymbol{\sigma} = -n(\nabla p_w / \gamma)$
	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{u}^c$	
	$\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}^c$	$\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} = -p_w$
	$\mathbf{m} \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{m} \cdot \boldsymbol{\sigma}^c$	$\mathbf{m} \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0$
	$p_f = 0$	$p_f = p_w$

注： $\mathbf{n}$ 和 $\mathbf{m}$ 分别为界面处法向和切向单位向量。

2.2 固相-两相-液相耦合有限元模型

利用 COMSOL 建立如图 1 所示二维平面对称模型，模型大小为 $60 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ ，采用四边形网格划分，单元大小取为 $0.1L_R$ ，吸收边界采用完美匹配

层^[19]。

频率 $f = 36.5 \text{ Hz}$ 、荷载幅值 $P_0 = 1 \text{ kN}$ 的简谐荷载 $P(\omega)$ 作用于宽度 $t = 0.75 \text{ m}$ 的基础上，基础质量可忽略不计^[3]。各土层参数如表 2 所示，其中，材料阻尼的施加通过采用 Lamé 常数的复数形式来实现，即 $\lambda_d = (1 + i\xi)\lambda$ ， $\mu_d = (1 + i\xi)\mu$ ，式中 ξ 为阻尼系数。基于所选土体参数，可得单相层的 P 波、S 波和 R 波的波速分别为： $V_P = 257.2 \text{ m/s}$ ， $V_S = 117.2 \text{ m/s}$ ， $V_R = 109.9 \text{ m/s}$ ；再根据荷载频率可得 R 波波长 $L_R = V_R / f = 3.0 \text{ m}$ 。

由于空沟远场隔振问题主要针对面波，为研究方便，采用上覆单相层 R 波波长 L_R 对各几何参数进行无量纲处理。无量纲屏障距离、沟后测量距离、水位、沟间距、空沟深度和宽度依次为： $R = r/L_R$ 、 $S = s/L_R$ 、 $H_w = h_w/L_R$ 、 $B = b/L_R$ 、 $D = d/L_R$ 、 $W = w/L_R$ 。若无特别说明，本文中各几何参数分别取为： $R = 5.0$ 、 $S = 5.0$ 、 $B = 1.0$ 、 $D = 0.3$ 、 $W = 0.1$ 和沟个数 $Q = 3$ 。这种无量纲分析方法不计频率影响，适用性更强^[3, 19-20]。

根据沟中水的形成假设，仅当地下水位高于空沟底部时（即 $H_w < D$ ），模型中将建立沟中水模块。

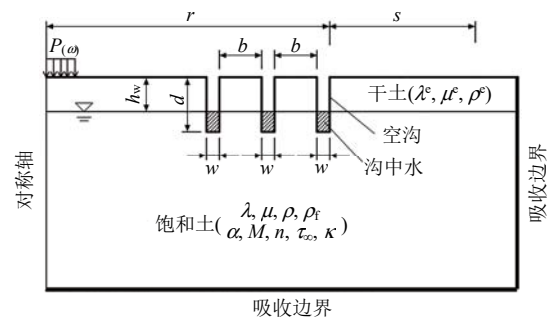


图 1 多空沟隔振示意图

Fig.1 Typical model of a multiple trench barrier

表 2 饱和土的物理力学性质

Table 2 Mechanical parameters of saturated soil

参数	$\lambda/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$\mu/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$\rho_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho_f/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	n	$M/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	α	κ/m^2	τ_∞	ξ
量值	6.2×10^7	2.2×10^7	2 670	1 000	0.4	5.1×10^9	0.99	10^{-13}	1.2	0.05

2.3 模型验证

2.3.1 饱和半空间中的竖向位移验证

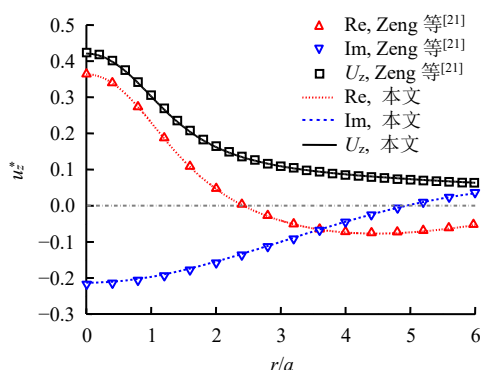
首先对本文饱和多孔介质模型进行验证，饱和半空间土体中埋置一个刚性圆盘，在简谐荷载作用下获得自由表面的竖向位移（实部 Re 、虚部 Im 和幅值 U_z ）。采用二维模型进行模拟，上覆单相层厚度取很小值（ 0.1 m ），将数值结果与解析解^[21]进行

对比，如图 2(a)所示，归一化竖向位移 $u_z^* = \mu u_z / (P_0 a)$ ，其中， u_z 为竖向位移， a 为圆盘半径，可见两者吻合很好。

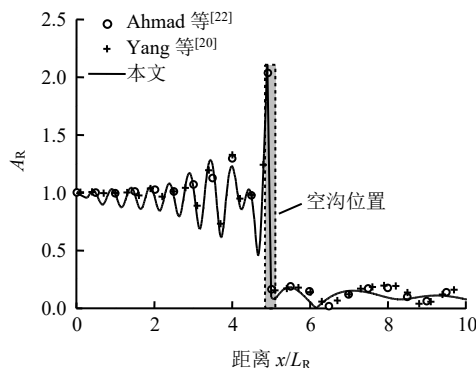
2.3.2 退化单相弹性层中的空沟隔振验证

由于以往饱和场地中空沟隔振模型均未考虑沟中水的影响，没有合适的模型用于本文模型的验证，因此，采用退化模型对单相弹性场地中空沟隔振效

果进行验证。将孔隙流体相关参数 (ρ_f 、 M 、 α 和 κ) 的值设为足够小, 则多孔介质可退化为拟弹性介质, 沟中水可退化为空气。基于退化的土体参数, 假设沟深 $d = 1.0L_R$ 、沟宽 $w = 0.1L_R$ 的空沟位于距振源 $r = 5L_R$ 处, 利用本文模型计算出沿自由表面的竖向位移幅值减小系数 A_R (A_R 定义为隔振后与隔振前的位移幅值之比), 将计算结果与已有文献[20, 22]进行对比, 如图 2(b)所示 (x 为测点与振源距离), 可见两者吻合较好。由上述两验证算例表明本文模型的正确性。



(a) 饱和半空间模型验证



(b) 退化模型的空沟验证

图 2 模型验证

Fig.2 Verification of model

3 等沟深多沟屏障

由于屏障后的 A_R 是不均等的, 为便于评价, 引入平均振幅减小系数 AA_R , 定义为

$$AA_R = \frac{1}{S} \int A_R(x) dx \quad (4)$$

显然, AA_R 值越小, 隔振效果越好。

3.1 水位变化的影响

由图 3 可知, 随着水位降低, 平均幅值减小系数 AA_R 先快速增大到最大值, 然后迅速减小, 再逐

渐趋近于某一稳定值; 这些稳定值由相同沟屏障在单相地基中的隔振效果决定; 同时, 不同沟深情况下, 最大 AA_R 值均发生在 $H_w = 0.6 \sim 0.7$ 之间。另外, 临界水位深度高达 $10L_R$, 水位在临界水位以下时, 地下水对多空沟隔振效果的影响很小, 可忽略不计。当地下水位在临界水位以上时, 地下水的存在通常不利于多空沟屏障隔振, 但水位很高且沟较浅时 (如 $D = 0.3$ 且 $H_w \leq 0.4$ 时), 也可能有利于多空沟隔振。

对比两种不同沟深的远场隔振效果, 可以发现, 在多数水位下深沟 ($D = 0.5$) 的隔振效果较浅沟 ($D = 0.3$) 好; 但无量纲水位 $H_w < 0.5$ 时, 浅沟的隔振效果更好, 这可能是因为深沟中的水可传播 P 波至屏障后方, 导致沟后幅值增大。这表明, 若忽略沟中水的影响可能会高估多空沟的隔振效果, 因此在计算模型中宜考虑沟中水。

特别地, 在 $H_w = 0.6 \sim 0.7$ 时, 多空沟的隔振效果最差, 这是由于该水位下, 上覆单相层发生了共振现象, 产生共振的原因将在 3.2 节详述; 同时, D 分别为 0.3 和 0.5 的隔振效率分别约为 40% ($AA_R \approx 0.6$) 和 60% ($AA_R \approx 0.4$), 这远低于空沟的理想隔振要求 (75% 隔振率)。因此, 在进行多空沟设计时, 应特别注意上覆土层发生共振时, 屏障失效的问题。

由于高水位 ($H_w \leq 1.0$) 下, 地下水对多空沟隔振效率的影响很大, 而 $H_w > 1.0$ 时, AA_R 值逐渐降低至单相地基中的空沟隔振效率; 因此, 以下分析中主要讨论 $H_w \leq 1.0$ 的情况, 其中, $H_w = 1.0$ 时的工况可作为水位在沟深以下的代表工况。

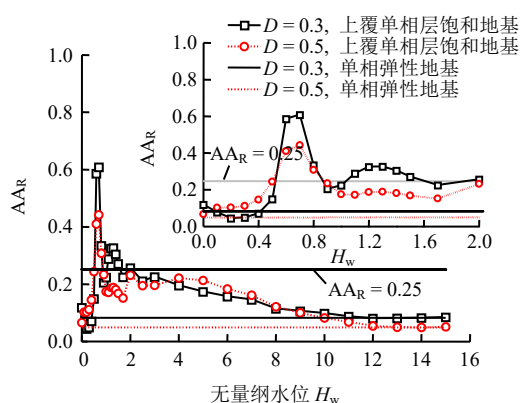


图 3 水位变化对多沟隔振效果的影响

Fig.3 Effects of water table change on isolation efficiency using multiple trenches

3.2 饱和土渗透系数的影响

图 4 给出了饱和土的渗透系数对多空沟远场隔振效果的影响。由图可知, 渗透系数较大 ($\kappa \geq 10^{-9} \text{ m}^2$) 时, 地下水的影响很小, 此时可简化为单

相半空间模型进行计算;而当渗透系数较小 ($\kappa < 10^{-9} \text{ m}^2$) 时,地下水的影响较大,特别在 $H_w = 0.6$ 时, AA_R 值随 κ 的减小而迅速增大并逐渐趋于稳定。这是因为随着渗透系数的减小,饱和土体逐渐从排水两相介质转变为等效不排水单相介质,土体表现出的动力特性也从高频行为转变为低频行为^[23];其中,等效单相介质可理解为饱和土中孔隙水结成冰的混合单相土体,其等效 Lamé 常数 $\lambda_{eq} = \lambda$, $\mu_{eq} = \mu + K_f/n$,由此可得等效单相土体的等效 P 波波速 $V_{p,eq} = 1\,669.6 \text{ m/s}$ 。此时,上覆单相层 ($V_p = 257.2 \text{ m/s}$) 与下卧等效土体之间的 P 波波速差异很大, P 波将在界面处发生大量反射,而反射 P 波又与入射波相互干涉,最终水位深度 $h_c = V_p/(4f)$ 时,上覆单相土层产生共振现象^[1, 23]。对于给定的荷载频率 $f = 36.5 \text{ Hz}$,可求得共振水位 $h_c = 1.8 \text{ m}$,即 $H_c = 0.6$ 。

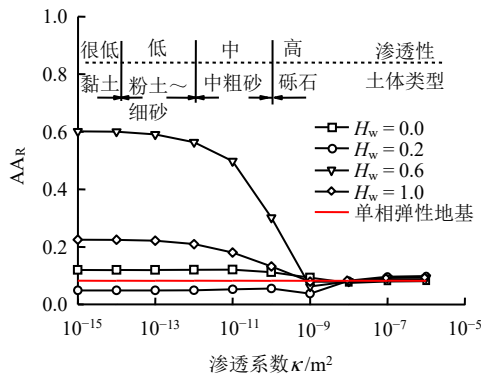


图4 渗透系数对多空沟隔振效果的影响
Fig.4 Effects of hydraulic permeability coefficient on isolation efficiency using multiple trenches

通常,不同土体对应的渗透系数不同,本文采用荷载频率 $f = 36.5 \text{ Hz}$ 的情况下,对于表现为高频行为的土体(如砾石),地下水的存在对沟屏障的隔振效果影响不大,此时可用单相地基模型进行分析;而对于表现为低频行为的土体(如砂土、粉砂等),地下水对屏障的隔振效果影响很大,并且通常具有不利影响,应引起足够重视。本文采用较低的渗透系数 $\kappa = 10^{-13} \text{ m}^2$ 进行分析,探究表现为低频行为的饱和地基中多空沟屏障的远场隔振效果。

3.3 空沟个数及其几何尺寸的影响

由于沟宽的影响较小^[2-3, 6],因此沟宽设为恒定值 $W = 0.1$ 。

3.3.1 空沟个数

从图5可以看出,在多数水位情况下沟个数 $Q \leq 3$ 时, AA_R 值随着沟个数的增加而迅速减小至最小值;再继续增加沟个数,并不能提高屏障的隔振效率,反而具有一定的不利影响。这表明上覆单

相层饱和地基中,三沟屏障可作为优选方案。作为对比,单相弹性地基中建议采用双沟屏障,因为 $Q = 2$ 时 AA_R 值基本达到最低值。特别地,对于共振水位 H_c ($H_c = 0.6$),增加沟个数并不能有效地消除上覆土层共振的不利影响,隔振效果较差。

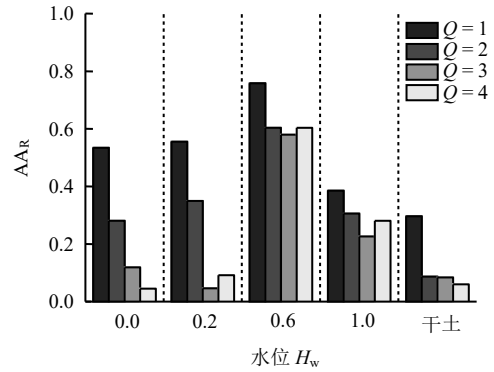


图5 沟个数对多空沟隔振效果的影响
Fig.5 Effects of the number of trenches on isolation efficiency using multiple trenches

3.3.2 空沟间距

图6给出了不同沟间距情况下多空沟隔振效果的变化规律。由图可知,单相地基中,沟间距 B 对多沟的影响很小,这与已有文献结果^[4]相似;与之不同的是,存在地下水时,多空沟的隔振效果随沟间距的增大而呈现较大波动,并且在多数水位下(除 H_c), AA_R 值在 $B = 1.0$ 时取得极小值,这可能是由于 $B < 1.0$ 时,较多的 R 波将从相邻沟之间绕射至屏障后方,而 $B > 1.0$ 时,相邻沟之间的耦合隔振作用减弱。共振水位下, AA_R 值也呈现一定的周期性变化。实际工程中,沟间距可建议取为 $1.0L_R$ 。

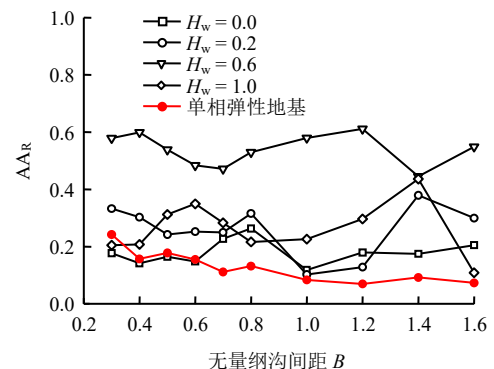


图6 沟间距对多空沟隔振效果的影响
Fig.6 Effects of the trench spacing on isolation efficiency using multiple trenches

3.3.3 沟深

从图7可知,类似于多沟屏障在单相地基中的情况,在多数水位(除 H_c 外)下,无量纲沟深 D

达到 0.3 时, 即可获得较好的隔振效果, 隔振效率达到 75% ($AA_R = 0.25$) 以上。而无量纲共振水位 H_c 下, AA_R 值随着沟深的增大而逐渐减小, 当 $D \geq 0.6$ 时, AA_R 值小于 0.25。由此可见, 共振水位下, 采用较深的多沟屏障可有效消除上覆土层共振的不利影响, 当空沟贯穿干土层 (即 $D \geq H_c$) 时, 可获得较理想的隔振效果 (75% 以上的隔振率)。

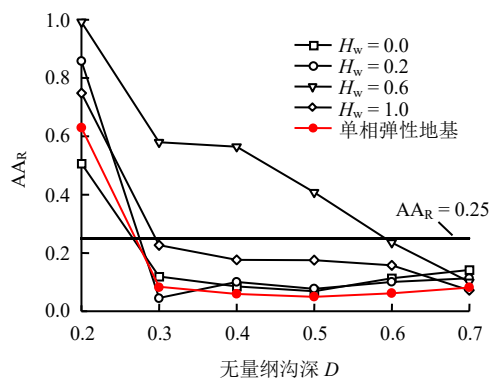


图 7 沟深对多沟隔振效果的影响

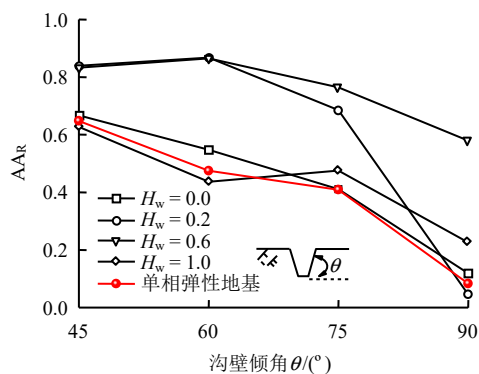
Fig.7 Effects of the trench depth on isolation efficiency using multiple trenches

4 异形多沟屏障

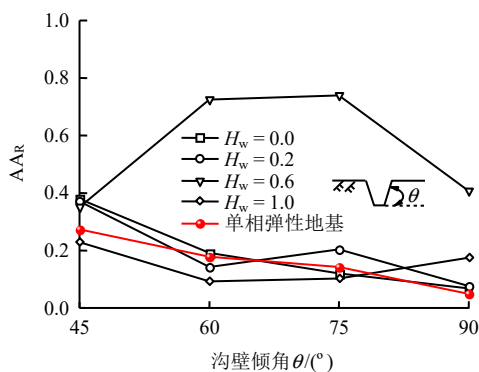
第 3 节分析了不同地下水情况下等沟深矩形多沟屏障的远场隔振效果, 而实际工程中, 考虑沟壁稳定性问题, 对沟壁进行放坡。由于场地限制, 各空沟的深度可能不尽相同。另外, 为增加屏障的实用性, 可考虑将多沟屏障与排水沟或景观设计相结合, 如设计成连续起伏的地形景观, 形成绿色屏障。本节将针对这些屏障进行远场隔振分析。

4.1 沟壁倾斜的多沟屏障

图 8 给出了不同沟深情况下沟壁倾角 θ 对多空沟远场隔振效果的影响。由图 8(a)可知, 对不同水位或单相地基中, 较浅多沟 ($D = 0.3$) 的隔振效率随 θ 减小而降低; 对比图 9(a)和 9(b)发现, 这是因为对于浅沟, 较小的沟壁倾角不利于面波转换为体波 (图 9 中箭头定性标注了入射波通过屏障时的主要振动波能量传播方向)。而对于较深多沟 ($D = 0.5$), 多数水位下 (除 H_c), 沟壁倾角的影响较小 (如图 8(b)、9(c)所示); 这是因为较深的沟迫使多数面波从沟底绕射时转换成了体波; 在共振水位下, 倾角 $60^\circ < \theta < 75^\circ$ 时屏障隔振效果较差。以往研究^[24]表明, 沟壁倾角对空沟隔振效果的影响小; 然而, 上述分析表明, 沟壁倾角的影响与沟深相关, 当沟深较浅时, 减小沟壁倾角不利于空沟隔振。



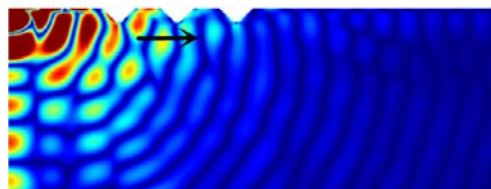
(a) $D = 0.3$



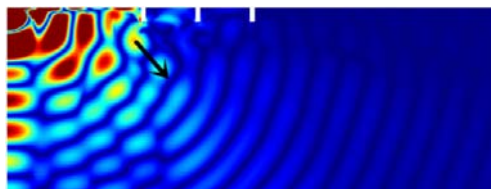
(b) $D = 0.5$

图 8 沟壁倾角对多沟隔振效果的影响

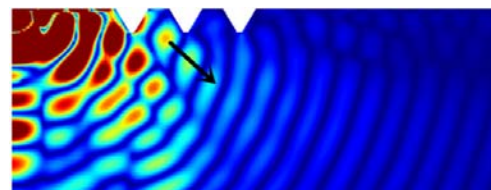
Fig.8 Effects of the angle of sloping sides on isolation efficiency using multiple trenches



(a) $D = 0.3, \theta = 45^\circ$



(b) $D = 0.3, \theta = 90^\circ$



(c) $D = 0.5; \theta = 60^\circ$

图 9 多沟屏障附近的应力云图

Fig.9 Stress contour near multiple trench barriers

4.2 不等沟深的多沟屏障

以往针对多沟的研究多是基于沟深相等的情况^[4-5],但是实际工程中考虑造价、施工及场地条件等方面,设计不等沟深的多沟屏障可能取得更高的性价比。如图10中示意图,本节分析了两类不等沟深多沟屏障(工况1和工况2分别为沟深递增和递减的多沟屏障)的隔振效果,同时,等沟深多沟屏障作为对比工况,记为工况0。为便于比较分析,保持总开挖面积 A ($A = 3 \times 0.1 \times (D_1 + D_2 + D_3) = 0.12$)和第2个沟深($D_2 = 0.4$)的值不变,只改变第一和第3个沟的深度(D_1 、 D_3),且设相邻沟深之间的差值 $\Delta D = D_{m+1} - D_m$ ($m = 1, 2$)相等,那么令 $\Delta D = 0$ 时为工况0, $\Delta D > 0$ 时为工况1, $\Delta D < 0$ 时为工况2。

从图10可以看出,多数水位(除 H_c)及单相地基中,随着绝对值 $|\Delta D|$ 的增大, AA_R 值表现为增大趋势,说明此时不等沟深具有一定的不利影响,但影响不大。而对于共振水位 H_c ,工况2的 AA_R 值随着 ΔD 的减小而显著减小,当 $\Delta D = -0.3$ 时, AA_R 值减小至0.21,说明沟深递减的多沟屏障可有效消除上覆土层共振的不利影响,并获得较好的隔振效率($AA_R < 0.25$);但工况1的 AA_R 值变化不大。因此,在有可能发生上覆土层共振的高水位地区,选用沟深递减的多沟屏障具有更高的性价比。

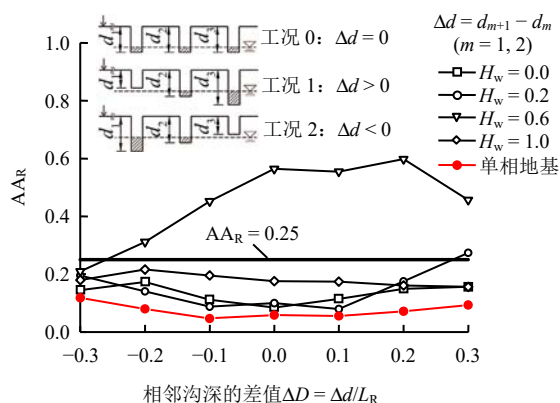


图10 不等沟深多沟屏障的隔振效果

Fig.10 Isolation efficiency of multiple trenches with unequal trench depths

4.3 起伏地形屏障

为增加屏障的实用性,考虑将多沟屏障与排水沟或景观设计相结合,如设计成连续起伏的地形景观。为此,考察如图11所示几何尺寸的连续起伏地形屏障在不同频率下的隔振效果,并将其与单个屏障的工况进行对比。

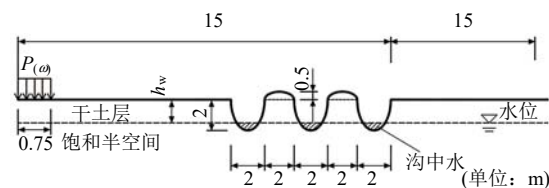


图11 起伏地形模型简图

Fig.11 Typical model of a rolling terrain barrier

从图12可以看出,连续起伏地形屏障的隔振效率远高于单沟屏障,特别是加载频率较低时 ($10 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$);在单相地基及不同水位的场地中,该地形屏障均取得较好的隔振效果,即对于频率 $f \geq 15 \text{ Hz}$ 的荷载,该屏障可减小70%以上的地面振动。另外,由3.2节可知,水位 $h_w = 1.0 \text{ m}$ 和 3.0 m 时,上覆土层分别发生共振的频率 $f = 64.3 \text{ Hz}$ 和 $f = 21.4 \text{ Hz}$ 。由图12发现,多沟屏障可以有效遏制共振的不利影响并获得较高的隔振效率。

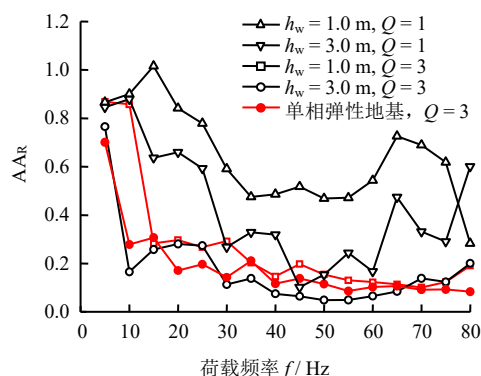


图12 加载频率对起伏地形屏障隔振效果的影响

Fig.12 Effects of loading frequency on isolation efficiency using rolling terrain barrier

5 结论

基于 COMSOL 建立了上覆单相层饱和地基中空沟有限元模型,分析了地下水位变化对多空沟远场隔振效果的影响,进一步提出并考察了多种异形多沟屏障在不同水位下的隔振效果,结论如下:

(1) 下卧饱和土的渗透系数较高时,对多空沟屏障的隔振效果影响不大;而表现为介质低频行为的低渗透性饱和土体,可等效为P波波速更大的混合单相介质。此时,入射波将在水位界面处发生大量发射,并对多沟屏障的隔振效率造成不利影响。

(2) 低渗透系数的土体中,地下水位的存在通常对多空沟屏障的隔振效果不利,特别是在共振水位时(本文中 $H_c = 0.6$),具有最不利影响。地下水

位的极限影响深度可达 10 倍 Rayleigh 波波长 L_R 。

(3) 单相地基中建议采用双沟屏障；而存在地下水时，三沟屏障是优选。通常，沟深 $D = 0.3$ 时，三沟屏障即可获得较理想的隔振效果（75%隔振率）；但对于共振水位 H_c ，空沟须贯穿干土层（即 $D \geq H_c$ ），才可获得 75%隔振率。沟间距建议取为 $1.0L_R$ 。

(4) 沟深较浅时，沟壁倾角越小，多沟屏障的隔振效果越好；而沟深较大时，沟壁倾角的影响很小。沟深递减的多沟屏障可有效降低上覆土层共振的不利影响。连续起伏的地形景观可作为一种有效的绿色隔振屏障。

参考文献

- [1] SCHEVENELS M, DEGRANDEC G, LOMBAERT G. The influence of the depth of the ground water table on free field road traffic-induced vibrations[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2004, 28(5): 395-419.
- [2] WOODS R D. Screening of surface waves in soils[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1968, 94(4): 951-979.
- [3] BESKOS D E, DASGUPTA B, VARDOULAKIS I G. Vibration isolation using open or filled trenches[J]. **Computational Mechanics**, 1986, 1(1): 43-63.
- [4] YOUNESIAN D, SADRI M. Performance analysis of multiple trenches in train-induced wave mitigation[J]. **Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control**, 2014, 33(1): 47-64.
- [5] HWANG J H, TU T Y. Ground vibration due to dynamic compaction[J]. **Soil Dynamic and Earthquake Engineering**, 2006, 26(5): 337-346.
- [6] YARMOHAMMADI F, RAFIEE-DEHKHARGHANI R, BEHNIA C, et al. Design of wave barriers for mitigation of train-induced vibrations using a coupled genetic-algorithm/finite-element methodology[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2019, 121: 262-275.
- [7] SAIKIA A. Numerical study on screening of surface waves using a pair of softer backfilled trenches[J]. **Soil Dynamic and Earthquake Engineering**, 2014, 65: 206-213.
- [8] 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(增刊 2): 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(Suppl.2): 77-80.
- [9] 高广运, 何俊锋, 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.
- [10] CAO Z, CAI Y, BOSTRÖM A, ZHENG J. 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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**, 2016, 39(5): 848-858.
BA Zhen-ning, LIANG Jian-wen, WANG Jing-ya. Isolation effect of an open trench against train-induced vibrations in a saturated layered ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 39(5): 848-858.
- [14] BORDÓN J D R, AZNÁREZ J J, MAESO O. Two-dimensional numerical approach for the vibration isolation analysis of thin walled wave barriers in poroelastic soils[J]. **Computers and Geotechnics**, 2016, 71: 168-179.