

文章编号: 1000-7598 (2011) 04-1131-07

层状地基中空沟对交通荷载的竖向隔振分析

熊 浩^{1,2}, 高广运², 王小岗¹

(1. 台州学院 建筑工程学院, 浙江 台州 318000; 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: 空沟是一种常用的连续隔振屏障, 可以有效地降低人工振动。以位移为变量的二维格子法在波动问题计算中具有有良好的适应性、高效性, 兼备有限元与差分法的一些优点, 应用该法针对层状地基中作用于路堤上的交通荷载引起振动的空沟竖向隔振问题进行了参数研究, 分别考虑了上软下硬地基和上硬下软地基两种情况。研究结果表明: 空沟宽度对隔振效果的影响较小; 空沟深度与空沟的位置是影响隔振效果的关键因素, 它们相互关联, 其取值应综合考虑; 在上述两类层状地基中, 若空沟深度与上层土的厚度接近或相等均对竖向隔振不利; 路堤高度越大对竖向隔振效果越不利。

关 键 词: 格子法; 层状地基; 空沟; 交通荷载; 隔振

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Analysis of isolating vertical vibration from traffic loads by open trench in layered ground

XIONG Hao^{1,2}, GAO Guang-yun², WANG Xiao-gang¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Taizhou University, Taizhou, Zhejiang 318000, China;

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

Abstract: Open trenches are continuous barrier, which are widely installed for efficiently reducing man made vibration. The 2D grid method using displacements variables is flexible and efficient to calculate wave propagation problems, combining the merits of finite elements method and finite difference method. Using the method, the parametric study is conducted herein for vertical vibration isolation by open trenches in layered ground under traffic loading acting on the top of an embankment. The rigid upper layer with soft lower layer ground model and soft upper layer with rigid lower layer ground model are considered respectively. The results show that the width of the open trench has little influence on the screening effectiveness. The depth and location of the open trench are most crucial for the screening effectiveness and they associate each other; so the value of them should be determined comprehensively. The depth of the open trench is equal or close to the thickness of the upper layer is detrimental to the vertical vibration isolation. Higher embankment can give rise to bad influence for vibration isolation in vertical direction.

Key words: grid method; layered ground; open trench; traffic load; vibration isolation

1 引 言

随着高速公路、铁路建设步伐的加快, 各种交通荷载所引起的振动对周围环境的影响愈显突出。目前, 列车运行所引起的振动问题得到了广泛的关注和研究。Sheng^[1]等采用半解析的方法研究了简谐荷载作用下分层土体的振动响应, 对比分析了轨道和地基土层厚度对体系振动的影响。Krylov^[2]建立了解析计算模型, 分析高速列车引起的地面振动放大现象。Jones 与 Petyt^[3]利用有限元、Yang^[4]采用有

限元-无限元耦合分别分析了层状地基地表振动问题。Paolucci 等^[5]、Takemiya 等^[6]、Ju 等^[7]、高广运等^[8]分别采用谱单元法、有限元法和薄层法对列车引起的振动和隔振问题进行了分析。除理论分析研究外, 高广运等^[9]、陈建国等^[10]对高速磁浮列车所引起振动的实测数据进行了分析。这些学者的研究在交通振动机制、振动传播规律和隔振方面取得了一定的成果。

近年来, 很多学者对公路交通中的车辆荷载所引的振动问题及其隔振也进行了研究。邓亚虹等^[11]

收稿日期: 2010-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50678128, 50878155, 50538010, 50678108)。

第一作者简介: 熊浩, 男, 1978 年生, 博士, 讲师, 主要从事土动力学的研究。E-mail: grandpollux@163.com

采用时域有限元法对车辆荷载引起振动的空沟隔振问题进行了数值分析,但没有考虑路堤的影响。卢正等^[12]利用传递矩阵法研究了交通荷载作用下分层地基的三维动力响应问题。

格子法^[13-14]是一种高效的数值方法,融合了有限元法可适应复杂形状边界和差分法无需计算刚度矩阵的特点,被广泛用于各种波动问题的研究中。本文基于以位移为变量的弹性波动方程,给出了二维格子法的计算方法。据此,分析研究了层状地基中空沟对路堤上运行的交通荷载所引起的竖向振动隔振规律。

2 二维格子法计算理论

2.1 计算公式

在笛卡尔坐标系中,不计体力,均质弹性介质中弹性波传播控制方程为

$$\left. \begin{aligned} \rho \ddot{\mathbf{u}}_i &= \sigma_{ij,j} \\ \sigma_{ij} &= \lambda \mathbf{u}_{i,i} \delta_{ij} + \mu (\mathbf{u}_{i,j} + \mathbf{u}_{j,i}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $i, j=1, 2$; ρ 为弹性介质的密度; μ 和 λ 代表介质的 Lamé 系数; σ_{ij} 为应力张量; $\mathbf{u}_i$ 为位移, δ_{ij} 为克罗内克符号; $\ddot{\mathbf{u}}_i$ 上双点表示对时间的导数。

将计算区域以三角形或四边形网格进行离散,局部网格如图 1 所示。图中的实线是离散时所生成的网格线,实心点 $j, k, l \dots$ 是网格线顶点,图中的虚线是各段实线中点与网格中心点的连线,四边形网格中空心点(如点 1、2、3...)是各段虚线的中点,而三角形网格中的空心点(如点 7)是三角形中心点, M_a 与 M_b 为节点标号。

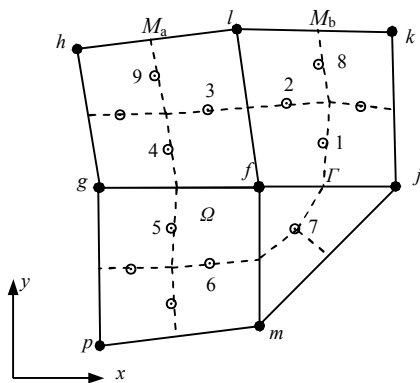


图 1 局部网格示意图

Fig.1 Sketch of local mesh

假定图 1 中节点 f 周围虚线所围的区域为 Ω , 其边界 1-2-3-4-5-6-7 记为 Γ 。在 Ω 上对式 (1) 运

动方程积分,并应用高斯定理,可得

$$\iint_{\Omega} \rho \ddot{\mathbf{u}}_i d\Omega = \oint_{\Gamma} \sigma_{ij} n_j ds \quad (2)$$

式中: n_j 为边界 Γ 的外法线方向余弦。

式 (2) 中等号右侧的线积分可采用高斯积分公式进行数值计算,其积分结果记为 $\mathbf{Q}_i$ 。在上述离散网格中应用集中质量模型,区域 Ω 质量集中于节点 f , 故式 (2) 中等号左侧可以化简为 $M_f \ddot{\mathbf{u}}_i$, 其中 M_f 是区域 Ω 内的总质量, 于是

$$M_f \ddot{\mathbf{u}}_i = \mathbf{Q}_i \quad (3)$$

对于三角形网格,以图 1 中三角形 fmg 为例,其中心点处的位移空间一阶导数计算公式为^[12]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial x} &\approx -\frac{1}{A} [b_f(\mathbf{u}_i)_f + b_m(\mathbf{u}_i)_m + b_j(\mathbf{u}_i)_j] \\ \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial y} &\approx \frac{1}{A} [c_f(\mathbf{u}_i)_f + c_m(\mathbf{u}_i)_m + c_j(\mathbf{u}_i)_j] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: A 为三角形 fmg 的面积; $(\mathbf{u}_i)_f$ 、 $(\mathbf{u}_i)_m$ 和 $(\mathbf{u}_i)_j$ 为 3 个顶点 f 、 m 、 j 处的位移值; $b_f = (y_j - y_m)/2$, $c_f = (x_j - x_m)/2$, ($f \rightarrow m \rightarrow j \rightarrow t$), 通过下标轮换可以类似地计算出 b_m 、 c_m 、 b_j 、 c_j ; (x_j, y_j) 、 (x_m, y_m) 分别是节点 j 、 m 的坐标。而对于四边形网格而言,则可以利用任意四边形网格差分算子^[13]计算位移在域内任意点处的空间一阶导数值。

2.2 计算步骤

在网格实线各个节点上定义当前时刻 $n\Delta t$ 的位移分量 u_x^n 、 u_y^n 。根据单元形状的不同,采用不同的计算公式分别计算网格中各个空心点处位移对 x 、 y 的一阶导数。将导数值代入式 (1) 本构方程中,可得各个空心点处在该时刻的应力值 σ_x^n 、 σ_y^n 、 τ_{xy}^n 。

再将上述应力值代入式 (2) 等号右侧,采用数值方法计算线积分值 $\mathbf{Q}_i$ 。在式 (3) 中对关于时间的二阶导数采用中心差分公式计算

$$\frac{u_i^{n+1} - 2u_i^n + u_i^{n-1}}{(\Delta t)^2} = \frac{\mathbf{Q}_i}{M_f} \quad (5)$$

式中: 上标 n 代表 $n\Delta t$ 时刻; $n+1$ 代表 $(n+1)\Delta t$ 时刻, $n-1$ 代表 $(n-1)\Delta t$ 时刻; Δt 为计算时间步长。根据式 (5) 可解 $(n+1)\Delta t$ 时刻的位移量 u_i^{n+1} 。可知,从 $n\Delta t$ 的位移场可确定 $(n+1)\Delta t$ 时刻的位移场。类似地,可计算出此后各个时刻的位移场,直到设定的计算时间终点为止。

为了保证计算的稳定,时间步长 Δt 与空间最小网格边长 h 应满足稳定条件^[13]: $\Delta t \leq h/v_p$, v_p 为纵

波的波速。

2.3 边界条件

在时域内模拟波动的传播问题,需要处理的边界主要有两类,一类是自由面边界;另一类是人工边界。

假定图1中 h 、 l 、 k 是自由表面边界上的节点。在 l 点处,在围线 l - M_a -9-3-2-8- M_b 所围区域内建立类似式(3)的平衡方程如下:

$$M_l \ddot{u}_l = \int_{M_b-l-M_a} \sigma_{ij} n_j ds + \int_{M_a-9-3-2-8-M_b} \sigma_{ij} n_j ds \quad (6)$$

式中: M_l 为上述围线所围区域的质量。式(6)中线积分分为两部分,其中 M_a -9-3-2-8- M_b 线段上的积分计算方法与前述式(2)中的线积分计算完全相同。而 M_b - l - M_a 线段上的积分事实上就等于作用于表面边界上的已知外荷载。由此可见,在自由边界上,边界条件可以方便地引入到计算中,而无需特殊处理。

计算区域边界上的人工边界条件亦无特殊要求,可使用各种透射边界,如多次透射边界条件^[15]。

2.4 算例验证

采用对比经典 Lamb 问题解析法的方法验证本文的计算方法。假定半无限均质地基的密度为 $\rho=2.25 \text{ g/cm}^3$,其 Lamé 系数 $\mu=1.048 \text{ GPa}$, $\lambda=1.863 \text{ GPa}$;计算区域为 $2000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 的矩形区域,采用边长为 5 m 的正方形网格,时间步长取为 0.002 s ;振源为一垂直作用在地表中心点的集中荷载, $f(t)=\exp[-200(t-0.178)^2]$ 。图2给出了地表处距垂直力源距离为 500 m 的点水平位移的解析解和本文数值计算结果,由图可知,采用上述计算方法及人工边界条件所得的数值结果与解析解答吻合较好,可见本文方法的正确性。

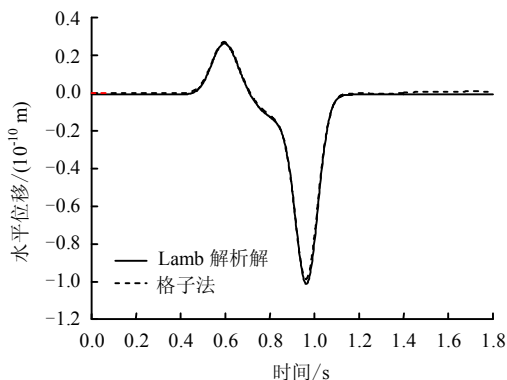


图2 水平位移分量的解析解与数值解的比较

Fig.2 Comparison between analytical and numerical solutions of horizontal displacement components

上述程序计算时,其内存消耗约为 0.5 M 。从计算时内存消耗来看,其效率优于一般 FEM 程序。

3 空沟对交通荷载的隔振分析

图3是某公路使用空沟隔振的示意图。路面的宽度 $b=12 \text{ m}$,在路面的两侧分别设置宽度为 1.5 m 的硬质路肩,行车道总宽度为 9 m 。路堤的高度为 $t(\text{m})$,采用与下部地基土相同的均质土材料进行填筑,路堤填筑的坡比为 $1:1.5$ 。路面层忽略不计。在路堤右侧,距路面中心长度为 $r(\text{m})$ 处设置了一道空沟,以达到降低空沟外侧一定范围内地表面振动的目的,隔振范围自空沟外侧起,延伸宽度为 $s(\text{m})$,空沟宽度为 $w(\text{m})$,深度为 $d(\text{m})$,上层土厚为 $h_1(\text{m})$ 。

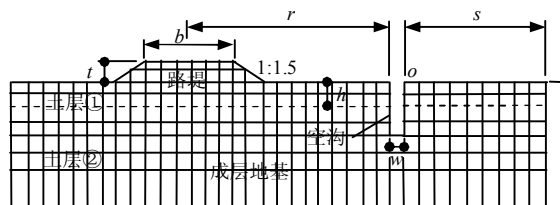


图3 公路使用空沟隔振示意图

Fig.3 Sketch of a road with open trench for isolating vibration from traffic loads

使用半波正弦来模拟交通荷载,假定它均匀分布作用于行车道内。半正弦波力源的表达式为

$$f(t) = Q_0 \sin(2\pi f_0 t) \quad (7)$$

式中:荷载幅值 $Q_0=700 \text{ kPa}$; f_0 为频率。

层状地基考虑两种模型,其中:场地1是土层①为A类土、土层②为B类土的上软下硬双层地基模型;场地2是土层①为B类土、土层②为C类土的上硬下软双层地基。地基土的物理力学特性参数见表1。对于场地1,力源中心频率 $f_0=12 \text{ Hz}$;对于场地2,中心频率 $f_0=16 \text{ Hz}$ 。

采用表层土的 Rayleigh 波波长 λ_R 对相关几何参数无量纲化处理。表层土厚度、沟宽、沟深、空沟至路堤中心距和路堤高度的无量纲长度分别为:

$H_1 = h_1 / \lambda_R$, $W_d = w / \lambda_R$, $D_p = d / \lambda_R$, $R = r / \lambda_R$, $T = t / \lambda_R$ 。长度 s 取 $5 \lambda_R$ 。使用这种无量纲化处理方法,可不计频率的影响,便于分析。

表1 地基土的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of ground soils

土层	密度 /(g/cm ³)	剪切模量 /MPa	Lamé 系数 λ /MPa	泊松比 ν
A	1.85	16.93	60.03	0.39
B	1.80	53.00	102.90	0.33
C	1.50	31.50	231.00	0.44

Shrivastavaa^[16]在研究空沟的 Rayleigh 波隔振效果时定义了最大位移幅值系数:

$$A_R = \frac{\text{有沟槽时的最大位移幅值}}{\text{无沟槽时的最大位移幅值}} \quad (8)$$

由上式可知, A_R 是对计算点处位移响应最大衰减程度的度量。对于线宽度 l 内的总体隔振效果, 可用此范围内的平均最大位移幅值系数来衡量

$$\bar{A}_R = \frac{1}{l} \int_l A_R dl \quad (9)$$

式中: $\bar{A}_R$ 是线宽度 l 内某点的最大位移幅值系数。

3.1 上软下硬地基

3.1.1 空沟宽度的影响

当 $H_1=0.8$, $T=0.267$, $R=2.0$, $D_p=0.8\sim 1.5$ 时, 图 4 表示竖向平均最大位移幅值衰减系数 $\bar{A}_R$ 随 W_d 的变化曲线。

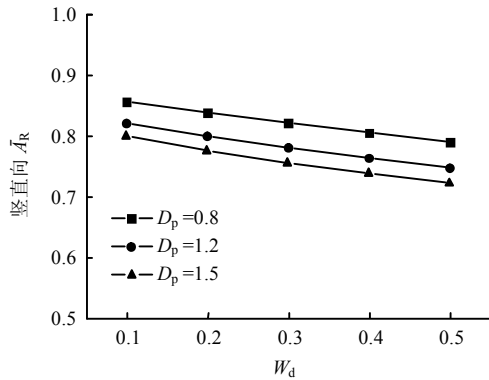


图 4 竖向 $\bar{A}_R$ 随 W_d 变化

Fig.4 Curves of $\bar{A}_R$ in vertical direction vs. varying W_d

由图可知, $\bar{A}_R$ 随 W_d 呈下降趋势, 表明沟宽对竖向隔振效果有一定程度的影响, 随沟宽增加, 竖向隔振效果略有增强。

3.1.2 空沟深度的影响

当 $H_1=0.8$, $T=0.267$, $R=2.0\sim 4.0$, $W_d=0.1$ 时, 图 5 给出了竖向平均最大位移幅值衰减系数 $\bar{A}_R$ 随 D_p 的变化曲线。

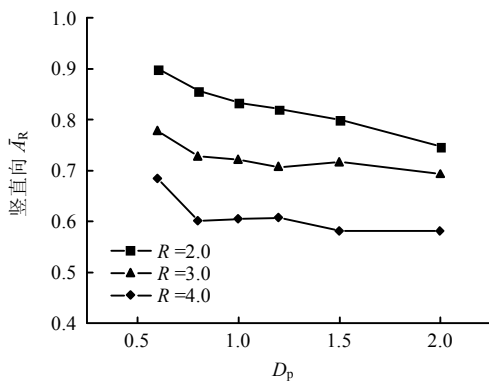


图 5 竖向 $\bar{A}_R$ 随 D_p 变化

Fig.5 Curves of $\bar{A}_R$ in vertical direction vs. varying D_p

由图可知, 当 $R=2.0$ 时, 增加沟深 D_p , 可以有效地增强其隔振效果。但对于 $R=3.0$ 或 4.0 的情况, 增加 D_p 不能使隔振效果持续增强, 当 D_p 取值为 $0.8\sim 1.0$ 时, 增加沟深, 竖向隔振效果基本不变。比较图中的 3 条曲线可知, 随着 R 的增加, 曲线整体位置逐渐下降, 隔振效果增强。表明空沟位置若能远离路堤将有助于增加竖向隔振效果。

由此可见, 上软下硬地基中的沟深 D_p 对水平向隔振的影响较大, 并且沟深 D_p 对竖向隔振效果的影响还与 R 有关。

3.1.3 空沟位置的影响

当 $H_1=0.8$, $T=0.267$, $D_p=0.8\sim 1.2$, $W_d=0.1$ 时, 图 6 给出了竖向平均最大位移幅值衰减系数 $\bar{A}_R$ 随 R 的变化曲线。

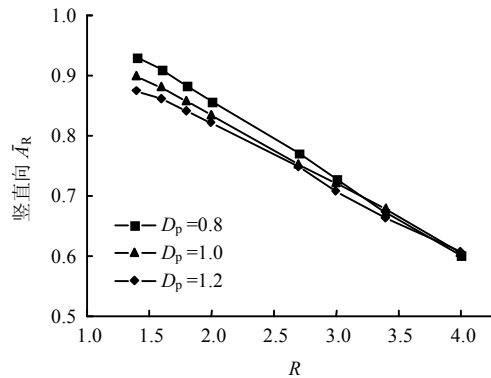


图 6 竖向 $\bar{A}_R$ 随 R 变化

Fig.6 Curves of $\bar{A}_R$ in vertical direction vs. varying R

由图 6 可知, 空沟深度虽有不同, 但曲线变化趋势基本相同, 即随 R 的增加, $\bar{A}_R$ 呈明显地下降趋势, 其隔振效果显著增强。

3.1.4 路堤高度的影响

当 $H_1=0.8$, $R=3.0$, $D_p=0.8\sim 1.5$, $W_d=0.1$ 时, 图 7 给出了竖向平均最大位移幅值系数 $\bar{A}_R$ 随 T 的变化曲线。

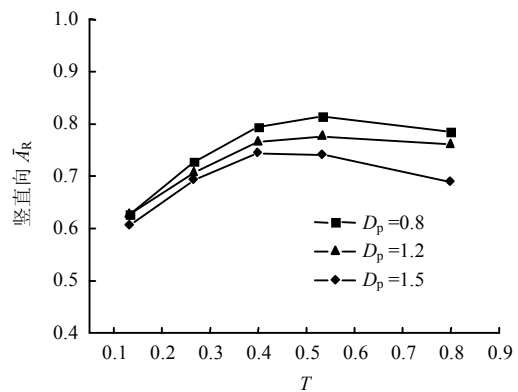


图 7 竖向 $\bar{A}_R$ 随 T 变化

Fig.7 Curves of $\bar{A}_R$ in vertical direction vs. varying T

由图可知,增加路堤高度 T , 竖向平均最大位移幅值衰减系数 $\bar{A}_R$ 先增大, 隔振效果下降; 当 T 值大于 0.53 时, 曲线则开始呈下降趋势, 隔振效果略有增加。由此可见, 在上软下硬地基中, 低矮路堤更有利于空沟竖向隔振。

3.1.5 上层土厚度的影响

当 $R=3.0$, $D_p=1.0$, $W_d=0.1$, $T=0.267$ 时, 图 8 给出了竖向平均最大位移幅值衰减系数 $\bar{A}_R$ 随 H_1 的变化曲线。

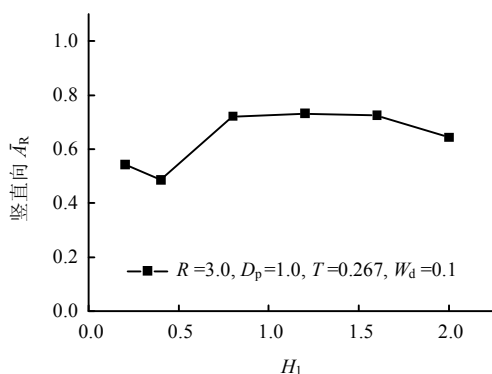


图 8 竖向 $\bar{A}_R$ 随 H_1 变化

Fig.8 Curve of $\bar{A}_R$ in vertical direction vs. varying H_1

由图可知, 当 H_1 约为 1.0 时, 竖向平均最大位移幅值系数 $\bar{A}_R$ 接近最大值。这表明, 当上层土厚度 H_1 与空沟深度 D_p 接近时, 隔振效果较差。由此可见, 在上软下硬地基中, 空沟的设计深度 D_p 应尽可能避免等于或接近上部土层厚度。

3.2 上硬下软地基

3.2.1 空沟宽度的影响

当 $R=3.0$, $D_p=0.8 \sim 1.5$, $T=0.2$, $H_1=0.5$ 时, 图 9 给出了竖向平均最大位移幅值衰减系数 $\bar{A}_R$ 随 W_d 的变化曲线。

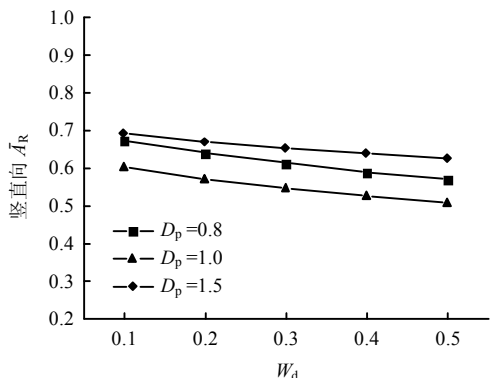


图 9 竖向 $\bar{A}_R$ 随 W_d 变化

Fig.9 Curves of $\bar{A}_R$ in vertical direction vs. varying W_d

由图可知, 上硬下软地基中的沟宽对隔振效果影响较小, 随着沟宽的增加, 竖向平均最大位移幅值衰减系数 $\bar{A}_R$ 逐步减小, 但减小程度有限。此情况与前述上软下硬地基中的隔振的情况类似。

3.2.2 空沟深度的影响

当 $W_d=0.1$, $R=1.5 \sim 3.5$, $T=0.2$, $H_1=0.5$ 时, 图 10 表示了竖向平均最大位移幅值衰减系数 $\bar{A}_R$ 随深度 D_p 的变化曲线。

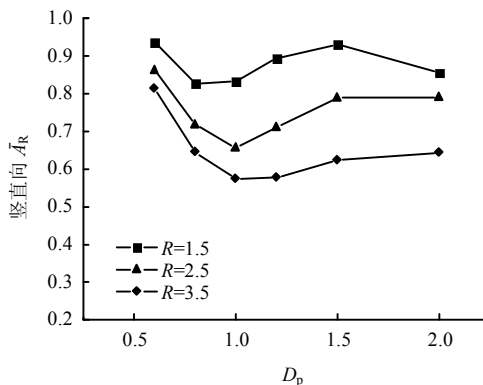


图 10 竖向 $\bar{A}_R$ 随 D_p 变化

Fig.10 Curves of $\bar{A}_R$ in vertical direction vs. varying D_p

由图可知, 沟深 D_p 增加, 对隔振效果的影响与距离 R 密切相关, R 越大, $D_p > 1.0$ 时的曲线越平缓, 且位置越低, 其隔振效果越佳。由图可知, 当深度 $D_p=1.0$ 时, 竖向隔振效果均接近最佳水平。此后, 继续增加沟深 D_p , 隔振效果开始下降。因此, 就竖向隔振而言, 在上硬下软地中, 建议取 $D_p=1.0$ 为宜。

3.2.3 空沟位置的影响

当 $W_d=0.1$, $D_p=0.8 \sim 1.5$, $T=0.2$, $H_1=0.5$ 时, 图 11 给出了竖向平均最大位移幅值系数 $\bar{A}_R$ 随 R 的变化曲线。

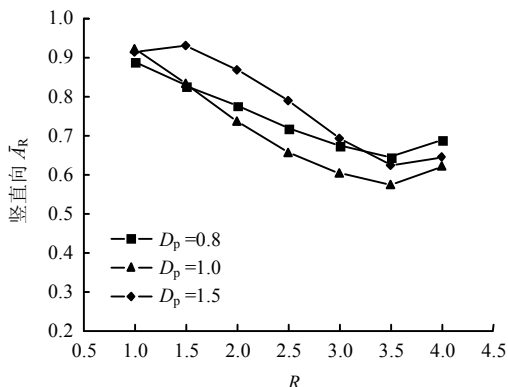


图 11 竖向 $\bar{A}_R$ 随 R 变化

Fig.11 Curves of $\bar{A}_R$ in vertical direction vs. varying R

由图中曲线可知, 当距离 $R \leq 3.5$ 时, 增加 R 值, 曲线均呈下降趋势, 竖向隔振效果增强; 当 $R > 3.5$ 后, 竖向曲线开始上升, 隔振效果开始下降。表明就竖向隔振而言, 若空沟远离路堤设置将取得较好隔振效果, 但 R 值也不宜大于 3.5。

3.2.4 路堤高度的影响

当 $W_d=0.1$ 、 $D_p=0.8 \sim 1.5$ 、 $R=3.0$ 、 $H_1=0.5$ 时, 图 12 给出了竖向平均最大位移幅值衰减系数 $\bar{A}_R$ 随 T 的变化曲线。

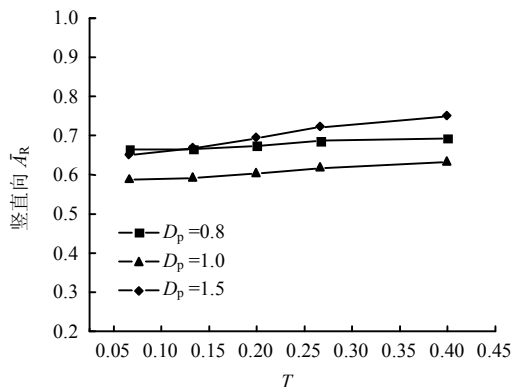


图 12 竖向 $\bar{A}_R$ 随 T 变化

Fig.12 Curves of $\bar{A}_R$ in vertical direction vs. varying T

由图可知, 竖向平均最大位移幅值衰减系数 $\bar{A}_R$ 随路堤高度 T 的增大而略有增加, 这表明高路堤不利于空沟竖向隔振。对比前述上软下硬地基中同类情形可以发现, 低矮路堤更利于提升空沟竖向隔振效果这个规律是一致的。

3.2.5 上层土厚度的影响

当 $W_d=0.1$ 、 $D_p=1.0$ 、 $R=3.0$ 、 $T=0.2$ 而上层土厚度变化时, 图 13 给出了竖向平均最大位移幅值衰减系数 $\bar{A}_R$ 随 H_1 的变化曲线。

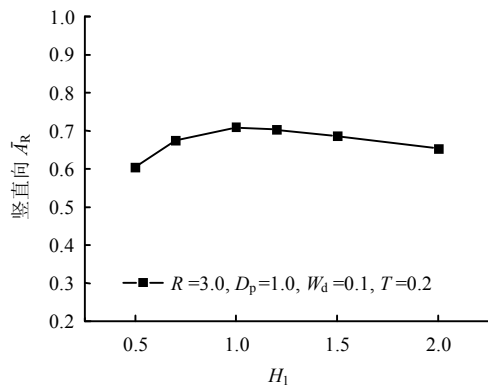


图 13 竖向 $\bar{A}_R$ 随 H_1 变化

Fig.13 Curve of $\bar{A}_R$ in vertical direction vs. varying H_1

由图可知, 当 $H_1=1.0$ 时, 竖向平均最大位移幅值衰减系数 $\bar{A}_R$ 达最大值, 表明若沟深 D_p 与上层

土体的厚度 H_1 相同时, 对竖向隔振不利。这一结果也与前述上软下硬地基的情况类似。

4 结 论

本文应用二维基于位移的格子法, 分析了上软下硬、上硬下软层状地基中的空沟对由交通荷载所引起振动的竖向隔振问题。重点分析了空沟宽度、深度、位置、路堤高度和表层土厚度的变化对隔振效果的影响, 主要结论如下:

(1) 在层状地基中, 空沟的宽度 W_d 对于竖向隔振效果影响较小, 不是主要的影响因素。从经济角度出发, 其取较小值为宜。

(2) 空沟深度 D_p 对隔振效果有显著的影响, 并与振源距 R 有关。在上软下硬地基中, 当 R 取 3.0~4.0 时, 沟深 D_p 取 0.8~1.0 时, 竖向隔振效果可达最佳, 此后, 继续增大 D_p 基本不增加竖向隔振效果; 而在上硬下软地基中, 沟深 D_p 宜取 1.0。

(3) 振源距 R 也是影响竖向隔振效果的主要因素。在上述两种层状地基中, R 均应取较大值。

(4) 路堤高度 T 的变化对空沟竖向隔振效果有一定影响。低矮路堤对提升隔振效果较为有利。

(5) 在上述两类层状地基中, 空沟深度 D_p 取值不宜等于或接近表层土厚度。

参 考 文 献

- [1] SHENG X, JONES C, PETYT M. Ground vibration generated by a load moving along a railway track[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 228(1): 129—156.
- [2] KRYLOV V V. Ground vibrations boom from high-speed trains[J]. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 1999, 18(4): 251—283.
- [3] JONES D V, PETYT M. Ground vibrations in the vicinity of a strip load: A two-dimensional half space model[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, 147(1): 155—166.
- [4] YANG Y B, HUNG H H, CHANG D W. Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, 23(4): 263—278.
- [5] PAOLUCCI R, MAFFEIS A, SCANDELLA L, et al. Numerical prediction of low-frequency ground vibrations induced by high-speed trains at Ledsgaard, Sweden[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, 23(6): 425—433.

- [6] TAKEMIYA H. Field vibration mitigation by honeycomb WIB for pile foundations of a high-speed train viaduct[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2004, 24(1): 69—87.
- [7] JU S H, LIN H T. Analysis of train-induced vibrations and vibration reduction schemes above and below critical Rayleigh speeds by finite element method[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2004, 24(12): 993—1002.
- [8] 高广运, 李志毅, 冯世进. 分层地基列车运行引起的地面振动分析[C]//第7届全国土动力学会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2006: 388—392.
- [9] 高广运, 彭争光, 李志毅. 磁悬浮列车产生的地面振动及其对周围环境的影响[J]. **工业建设与设计**, 2005, (4): 7—9.
- GAO Guang-yun, PENG Zheng-guang, LI Zhi-yi. Ground vibration and the influence on environment by magnetic-levitating train[J]. **Construction & Design for Project**, 2005, (4): 7—9.
- [10] 陈建国, 肖军华, 李前进, 等. 提速列车荷载作用下铁路路基动力特性的研究[J]. **岩土力学**, 2009, 30(7): 1944—1950.
- CHEN Jian-guo, XIAO Jun-hua, LI Qian-jin, et al. Dynamic responses of existing-railway subgrade with train speed increasing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 1944—1950.
- [11] 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.
- [12] 卢正, 姚海林, 骆行文, 等. 公路交通荷载作用下分层地基的三维动响应分析[J]. **岩土力学**, 2009, 30(10): 2965—2970.
- LU Zheng, YAO Hai-lin, LUO Xing-wen, et al. 3D dynamic responses of layered ground under vehicle loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 2965—2970.
- [13] 张剑锋. 弹性波数值模拟的非规则网格差分法[J]. **地球物理学报**, 1998, 41(增刊): 357—366.
- ZHANG Jian-feng. Non-orthogonal grid finite-difference method for numerical simulation of elastic wave propagation[J]. **Acta Geophysica Sinica**, 1998, 41(Supp.): 357—366.
- [14] ZHANG J F, LIU T L. P-SV-wave propagation in heterogeneous media: Grid method[J]. **Geophysical Journal International**, 1999, 136(2): 431—438.
- [15] LIAO Z P. Extrapolation non-reflecting boundary conditions[J]. **Wave Motion**, 1996, 24(2): 117—138.
- [16] SHRIVASTAVA R K, KAMESWARA RAO N S V. Response of soil media due to impulse loads and isolation using trenches[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2002, 22(8): 695—702.

上接第 1130 页

- [6] YOU K, PARK Y, LEE J S. Risk analysis for determination of a tunnel support pattern[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2005, 20(5): 479—486.
- [7] LIN C T, WANG M J J. Hybrid fault tree analysis using fuzzy sets[J]. **Reliability Engineering and System Safety**, 1997, 58(3): 205—213.
- [8] 黄宏伟, 闫玉茹, 胡群芳. 复合式土压平衡盾构刀盘失效风险分析[J]. **岩土力学**, 2009, 30(8): 2324—2330.
- HUANG Hong-wei, YAN Yu-ru, HU Qun-fang. Risk analysis of cutter head failure of composite EPS shield[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2324—2330.
- [9] 凌玉华. 层次分析法(AHP)在地铁车站施工方案优选中的应用[J]. **电脑知识与技术**, 2009, 5(16): 4264—4266.
- [10] MOHAMMAD M. Risk analysis in engineering techniques, tools and trends [M]. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- [11] 史定华, 王松瑞. 故障树分析技术方法和理论[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1993.
- [12] 王长峰. 现代项目风险管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [13] 陈国华. 风险工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.