

地表交通荷载引起邻近浅埋隧道振动评价研究

曹志刚¹, 唐浩¹, 袁宗浩², 蔡袁强^{1,2}, 章李刚³, 刘燕平³

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江工业大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310023;
3. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为研究地表交通荷载引起邻近浅埋隧道振动问题, 建立地表移动荷载下三维弹性半空间中隧道振动分析模型。隧道衬砌模拟为中空圆柱体, 隧道周围土体模拟为含有圆柱形空腔的黏弹性半空间。地表车辆荷载简化为 4 个均布矩形荷载, 矩形荷载可以分解为关于隧道轴线正对称和反对称 2 种荷载分量。含有圆柱形孔洞的地基中位移场分解为下行平面波引起的位移场和外行圆柱波引起的位移场, 通过波场转换可对地表和衬砌-土体接触处的边界条件进行描述, 在频域中获得控制方程基本解, 然后利用快速 Fourier 变换获得时域结果求得。地表车辆荷载下邻近隧道的振动响应可由正对称和反对称荷载工况下的结果叠加得到。计算结果表明: 隧道两侧车辆荷载在隧道处引起径向动应力最大值分布在以竖向为中心的 $-45^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 范围; 增加隧道埋深或车辆距隧道的水平距离, 可显著减小隧道的振动速度响应和应力响应; 一定隧道埋深下, 车辆荷载与浅埋隧道的水平距离达到最小安全距离时隧道振动可以满足相关振动规范的要求, 且该安全距离跟车辆速度在研究范围内呈线性关系。

关键词: 隧道工程; 地表交通荷载; 浅埋隧道; 振动评价

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2019)08-1696-11

Evaluation of shallow tunnel vibration caused by adjacent surface traffic loads

CAO Zhigang¹, TANG Hao¹, YUAN Zonghao², CAI Yuanqiang^{1,2}, ZHANG Ligang³, LIU Yanping³

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;
3. Zhejiang Huayun Electric Power Engineering Design Consulting Limited, Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

Abstract: In order to study the vibration of shallow tunnels caused by adjacent surface traffic loads, a three-dimensional vibration prediction model for shallowly-buried tunnels generated by a moving surface loading was established, where the lining is simulated as a circular cavity and the ground around the tunnel is modeled as a viscoelastic half-space with a circular cavity. The vehicle load is represented by four rectangular pressures, which can be decomposed into symmetric and antisymmetric components with respect to the tunnel axis. The displacement field of the ground with a circular cavity is decomposed into the displacement fields respectively caused by the down-going plane wave and the outgoing cylindrical wave. The boundary conditions of soil-tunnel interface and ground surface are described through the transformation of plane and cylindrical waves, and the governing equations obtained from the frequency domain can be solved based on the time domain calculated by quick Fourier transform. The vibration of the tunnel under the moving surface vehicle nearby can be obtained by superimposing the results in the symmetric and antisymmetric loading cases. The calculation results show that the

收稿日期: 2019-01-24; **修回日期:** 2019-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0800200); 国家自然科学基金资助项目(51578500, 51708503)

Supported by the National Key R&D Program of China(Grant No. 2016YFC0800200) and National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51578500 and 51708503)

作者简介: 曹志刚(1983-), 男, 2006年毕业于湖南大学土木工程专业, 现任副教授、博士生导师, 主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: caozhigang2011@zju.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0063

maximum radial dynamic stress caused by the vehicle load is distributed between -45° and 45° around the vertical direction. Increasing the tunnel depth or the horizontal distance between the vehicle and the tunnel can significantly reduce the vibration velocity and stress response of the tunnel. Under a certain tunnel depth, the tunnel vibration can meet the requirement of specifications when the distance between the vehicle load and the shallow tunnel exceeds the minimum safety distance, and the safety distance has a linear relationship with the vehicle speed in the studied range.

Key words: tunneling engineering; surface traffic load; shallow tunnel; vibration evaluation

1 引言

地下交通设施是一种有效解决城市交通拥挤的重要措施。大多数地下交通设施处于城市密集区, 交通运行时不可避免地产生产生振动, M. Smith 等^[1]表明交通荷载产生的振动会给沿线居民带来压力大、睡眠不足等问题, 同时交通荷载产生的振动也会影响精密仪器的使用。另一方面, 地面的交通荷载对隧道施工和运营阶段产生动态冲击, 使隧道在建造和运营过程中产生较大的振动。

为了预测地铁运行引起的环境振动问题, 学者们提出了不同的数值方法和解析方法。通过假设隧道土体在隧道纵向具有不变的几何和材料特性, H. H. Hung 等^[2]采用 2.5 维有限元/无限元, 对地下移动荷载引起的地基振动进行了研究, 并考虑了轮轨不平顺引起的动力荷载。X. C. Bian 等^[3]利用黏性人工边界的 2.5 维有限元模型也对该问题进行了参数分析。随后, S. François 等^[4]利用一种基于格林函数的 2.5 维有限元 - 边界元耦合方法计算地下移动荷载作用下多层半空间的位移响应。D. Clouteau 等^[5]利用隧道几何纵向的周期性, 通过使用 Floquet 变换离散化周期结构基本元, 提出了一个用于预测地铁列车引起的相邻建筑物振动的方法。此后, H. Chebli 等^[6]也采用了与 D. Clouteau 等^[5]相同的方法建立 3D 周期模型来研究该问题。谢伟平和孙洪刚^[7]基于有限元法分析了地铁运行引起的土的波动特性对列车荷载进行了简化并且考虑了地基土不同性质的影响。和振兴等^[8]将轨道、隧道结构和列车荷载简化后建立三维有限元动力分析模型, 计算了列车引起的地面振动。张波等^[9]基于弹性波理论, 采用有限元方法分析了岩石介质中地铁列车运行引起的环境振动响应。解析法与数值方法相比, 不用引入人工边界, 计算速度快且较为稳定。A. V. Metrikine 和 A. C. W. M. Vrouwenvelder^[10]将地铁简化为埋置于黏弹性地层中的欧拉梁, 研究并对比了移动常荷

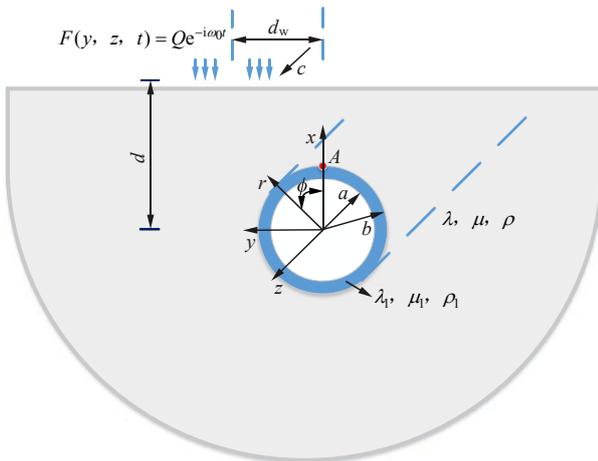
载、简谐荷载和随机荷载作用下的地表位移响应。J. A. Forrest 和 H. E. M. Hunt^[11]基于柱坐标系下的弹性理论和壳体理论, 提出了一种 pipe-in-pipe 模型, 包括一个由土壤包围的隧道的无限长壳模型, 以计算地下移动列车引起的地基振动。在此基础上, 曾晨等^[12]提出了饱和土中三维全空间圆形衬砌隧道振动模型, 研究了简谐荷载作用下地基土的动力响应特性; Z. Yuan 等^[13]提出了一种计算全空间中双圆隧道振动的方法, 研究了 2 个隧道的距离和与水平面形成的夹角对振动传播的影响。

为了不影响地面交通, 城市地铁线路等交通设施的修建通常采用暗挖法施工, 地面交通荷载往往会对浅埋隧道造成冲击, 对隧道造成振动干扰, 甚至在施工过程中危及隧道安全。I. N. Sneddon 等^[14-17]开展了一系列关于地面交通荷载引起地基振动方面研究, 目前关于地面交通荷载引起的地基与地下结构动力相互作用的研究较少。已有研究表明, 地表移动荷载对地下浅埋隧洞振动响应有着重要影响^[18], 但其研究中未考虑隧道衬砌结构, 且移动荷载固定在隧道正上方。因此, 有必要开展地表交通荷载引起的地基与地下结构动力相互作用机制研究, 进一步考虑地面荷载速度、距离以及衬砌结构等因素, 以更为准确评估地表交通荷载引起地下结构振动响应水平。

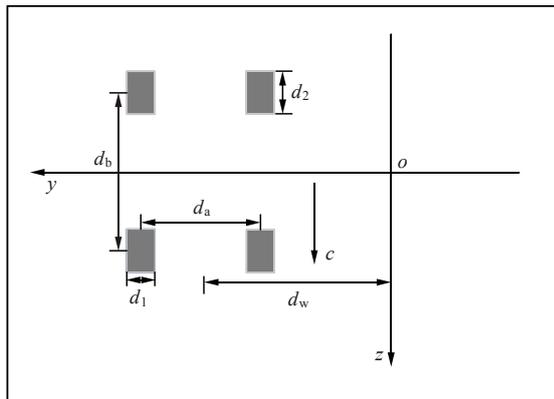
本文将隧道模拟为黏弹性空心圆柱体, 将隧道周围的土体模拟为带圆柱孔的黏弹性半空间, 地面交通荷载模拟为真实车辆荷载。通过半解析的方法研究了地表交通荷载引起的地下隧道振动问题。分析了不同速度下的车辆荷载与隧道轴线水平距离的变化对不同埋深的浅埋隧道动应力分布的影响和变化规律。结合有关振动标准, 给出了在不同速度下, 地表车辆与浅埋隧道的最小安全距离。

2 控制方程及求解

图 1 在直角坐标系和柱坐标系中给出了包含弹



(a) 半空间隧道模型



(b) 车辆荷载

图1 理论模型

Fig.1 Theoretical model

性半空间和空心圆柱体隧道的理论模型。半空间和衬砌结构被建模为各向同性黏弹性材料，土体密度为 ρ ，Lamé常数为 λ 和 μ 。衬砌结构被建模为具有内半径 a 和外半径 b 的空心圆柱体。衬砌的密度为 ρ_1 ，Lamé常数 λ_1 和 μ_1 ，地表荷载的自振频率为 f_0 、速度为 c ，荷载与隧道轴线之间的距离为 d_w ($x = d, y = d_w$)，并沿 z 方向移动。

对于各向同性黏弹性半空间，控制方程为

$$(\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) - \mu\nabla \times (\nabla \times \mathbf{u}) = -\rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

式中： \mathbf{u} 为土体位移向量， ∇ 为拉普拉斯算子， \mathbf{u} 上的点表示相对于时间 t 的微分。

法向量为 \mathbf{e}_x 的半平面上的应力向量为

$$t^{(e_x)}(\mathbf{u}) = \mathbf{e}_x \lambda \nabla \cdot \mathbf{u} + \mu \partial_x \mathbf{u} + \mu \nabla u_x \quad (2)$$

式中： \mathbf{e}_x 为直角坐标系中 x 方向的单位向量。

法向量为 \mathbf{e}_r 的柱面上的应力向量为

$$t^{(e_r)}(\mathbf{u}) = \mathbf{e}_r \lambda \nabla \cdot \mathbf{u} + 2\mu \partial_r \mathbf{u} + \mu \mathbf{e}_r \times (\nabla \times \mathbf{u}) \quad (3)$$

式中： \mathbf{e}_r 为柱坐标系中 r 方向的单位向量。

为方便推导，将作用在地表的车辆荷载分解为如图2所示的关于隧道轴线正对称和反对称的2个

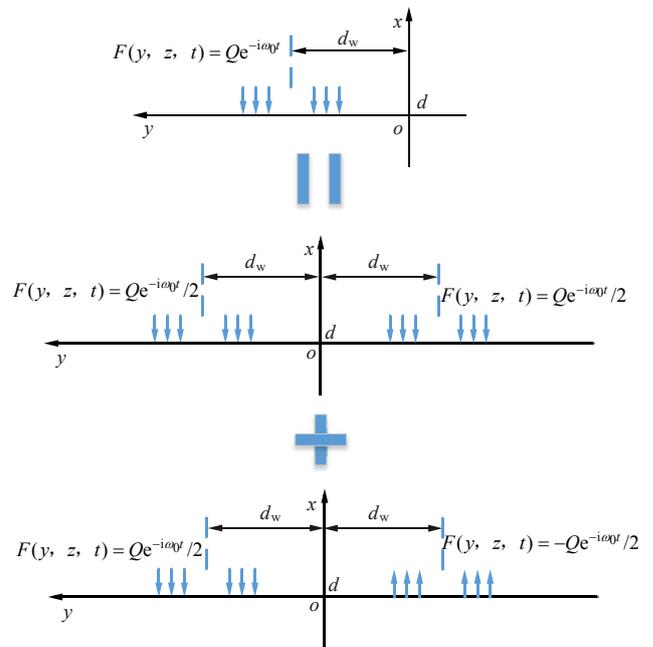


图2 荷载分解

Fig.2 Load decomposition

荷载工况。

2.1 正对称荷载下的求解

半空间有空腔的位移场由下行平面波引起的位移与外行圆柱波引起的位移组成。总位移场可以写成^[19]：

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2 \quad (4)$$

式中： \mathbf{u}_1 为下行波引起的位移分量， \mathbf{u}_2 为外行波引起的位移分量。

位移向量 \mathbf{u}_1 和 \mathbf{u}_2 可以分解为3个标量势函数^[20]：

$$\mathbf{u}_1 = \nabla \varphi_1 + \nabla \times (\mathbf{e}_z \varphi_2) + \nabla \times \nabla \times (\mathbf{e}_z \varphi_3) \quad (5a)$$

$$\mathbf{u}_2 = \nabla \chi_1 + \nabla \times (\mathbf{e}_z \chi_2) + \nabla \times \nabla \times (\mathbf{e}_z \chi_3) \quad (5b)$$

式中： φ_j 为下行波的势函数， χ_j 为外行波的势函数，下标 $j = 1$ 时表示P波， $j = 2$ 时表示SH波， $j = 3$ 时表示SV波。

对时间 t 的Fourier变换对定义如下：

$$F(y, z, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(y, z, t) e^{i\omega t} dt \quad (6a)$$

$$f(y, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(y, z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (6b)$$

对于空间坐标 y 和 z 的Fourier变换对定义为

$$F(p, q, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(y, z, t) e^{-i(py+qz)} dydz \quad (7a)$$

$$f(y, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(p, q, t) e^{i(py+qz)} dpdq \quad (7b)$$

由于本文只考虑了简谐荷载，为简便起见，下

述求解过程中所有的 $e^{i\omega t}$ 因子均被省略。

下行波的势函数对时间 t 以及空间坐标 y 和 z 进行 Fourier 变换可表示为^[19]

$$\hat{\varphi}_1^- = A_1 e^{i(qz-h_p x)} \cos(py) \quad (8)$$

$$\hat{\varphi}_2^- = A_2 e^{i(qz-h_s x)} \sin(py) \quad (9)$$

$$\hat{\varphi}_3^- = A_3 e^{i(qz-h_p x)} \cos(py) \quad (10)$$

式中：势函数上的“ \wedge ”表示在频域-波数域(ω - q - p)中求解； A_j 为根据边界条件确定的未知量； $k_{s,p} = \omega / c_{s,p}$ 为剪切波和压缩波波数， $c_s = \sqrt{\mu / \rho}$ 和 $c_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$ 为剪切波和压缩波波速； $h_{s,p} = \sqrt{k_{s,p}^2 - q^2 - p^2}$ 为 x 方向的波数， p 和 q 分别为 y 和 z 方向的波数；上行波 $\hat{\varphi}_j^+$ ($j = 1, 2, 3$) 的势函数可以用 $h_{s,p}$ 替换式(8)~(10)中的 $-h_{s,p}$ 获得。

下行波引起的位移可以通过将式(8)~(10)代入式(5a)中获得

$$\hat{u}_1 = \nabla \hat{\varphi}_1^- + \nabla \times (e_z \hat{\varphi}_2^-) + \nabla \times \nabla \times (e_z \hat{\varphi}_3^-) =$$

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{1x}^- \\ \hat{U}_{1y}^- \\ \hat{U}_{1z}^- \end{bmatrix} A = \hat{U}_1^- A \quad (11)$$

其中，

$$A = [A_1, A_2, A_3]^T$$

$$\hat{U}_{1x}^- = \cos(py)(-ih_p e^{-ih_p x}, p e^{-ih_s x}, q h_s e^{-ih_s x}) e^{iqz}$$

$$\hat{U}_{1y}^- = \sin(py)(-p e^{-ih_p x}, ih_s e^{-ih_s x}, -iq p e^{-ih_s x}) e^{iqz}$$

$$\hat{U}_{1z}^- = \cos(py)[iq e^{-ih_p x}, 0, (k_s^2 - q^2) e^{-ih_s x}] e^{iqz}$$

通过将式(11)代入式(2)，可以得到由于下行波引起的应力向量：

$$\hat{\sigma}_1 = \begin{bmatrix} \hat{T}_{1x}^- \\ \hat{T}_{1y}^- \\ \hat{T}_{1z}^- \end{bmatrix} A = \hat{T}_1^- A \quad (12)$$

其中，

$$\hat{T}_{1x}^- = \mu \cos(py)[(2k_p^2 - k_s^2 - 2h_p^2) e^{-ih_p x}, -2iph_s e^{-ih_s x}, -2iqh_s^2 e^{-ih_s x}] e^{iqz}$$

$$\hat{T}_{1y}^- = \mu \sin(py)[2iph_p e^{-ih_p x}, (h_s^2 - p^2) e^{-ih_s x}, -2qph_s e^{-ih_s x}] e^{iqz}$$

$$\hat{T}_{1z}^- = \mu \cos(py)[2qh_p e^{-ih_p x}, iqpe^{-ih_s x}, -ih_s(k_s^2 - 2q^2) e^{-ih_s x}] e^{iqz}$$

外行波的势函数对时间 t 以及空间坐标 y 和 z 进行 Fourier 变换可表示为^[19]

$$\mathcal{H}_1^{\phi} = \sum_{m=0}^{\infty} \mathcal{H}_{1m}^{\phi} = \sum_{m=0}^{\infty} B_{1m} H_m^{(1)}(g_p r) \cos(m\varphi) e^{iqz} \quad (13)$$

$$\mathcal{H}_2^{\phi} = \sum_{m=0}^{\infty} \mathcal{H}_{2m}^{\phi} = \sum_{m=0}^{\infty} B_{2m} H_m^{(1)}(g_s r) \sin(m\varphi) e^{iqz} \quad (14)$$

$$\mathcal{H}_3^{\phi} = \sum_{m=0}^{\infty} \mathcal{H}_{3m}^{\phi} = \sum_{m=0}^{\infty} B_{3m} H_m^{(1)}(g_s r) \cos(m\varphi) e^{iqz} \quad (15)$$

式中：势函数上的“ \sim ”表示在频域-波数域(ω - q)中求解； $H_m^{(1)}$ 为第一类 Hankel 函数， $m = 0, 1, \dots$ ； $g_{s,p} = \sqrt{k_{s,p}^2 - q^2}$ 为 r 方向的波数；“ $'$ ”表示求导符号。用 Bessel 函数 $J_m^{(1)}$ 替换式(13)~(15)中的第一类 Hankel 函数 $H_m^{(1)}$ 可以得到非奇异波 \mathcal{H}_j^{ϕ} ($j = 1, 2, 3$)。

外行波引起的位移可以通过将式(13)~(15)代入式(5b)中可得

$$\hat{u}_2 = \sum_{m=0}^{\infty} (\nabla \mathcal{H}_{1m}^{\phi} + \nabla \times (e_z \mathcal{H}_{2m}^{\phi}) + \nabla \times \nabla \times (e_z \mathcal{H}_{3m}^{\phi})) = \sum_{m=0}^{\infty} \begin{bmatrix} \hat{U}_{2r}^{\phi} \\ \hat{U}_{2\varphi}^{\phi} \\ \hat{U}_{2z}^{\phi} \end{bmatrix} B_m = \sum_{m=0}^{\infty} \hat{U}_2^{\phi} B_m \quad (16)$$

其中，

$$B_m = [B_{1m}, B_{2m}, B_{3m}]^T$$

$$\hat{U}_{2r}^{\phi} = \cos m\varphi [g_p H_m^{(1)'}(g_p r), \frac{m}{r} H_m^{(1)}(g_s r),$$

$$iqg_s H_m^{(1)'}(g_s r)] e^{iqz}$$

$$\hat{U}_{2\varphi}^{\phi} = -\sin m\varphi \left[\frac{m}{r} H_m^{(1)}(g_p r), g_s H_m^{(1)'}(g_s r),$$

$$\frac{imq}{r} H_m^{(1)}(g_s r) \right] e^{iqz}$$

$$\hat{U}_{2z}^{\phi} = \cos m\varphi [iq H_m^{(1)}(g_p r), 0, g_s^2 H_m^{(1)}(g_s r)] e^{iqz}$$

通过将式(16)代入式(3)，可以得到由于外行波引起的应力向量：

$$\hat{\sigma}_2 = \sum_{m=0}^{\infty} \begin{bmatrix} \hat{T}_{2r}^{\phi} \\ \hat{T}_{2\varphi}^{\phi} \\ \hat{T}_{2z}^{\phi} \end{bmatrix} B_m = \sum_{m=0}^{\infty} \hat{T}_2^{\phi} B_m \quad (17)$$

其中，

$$\hat{T}_{2r}^{\phi} = \mu \cos m\varphi [(2k_p^2 - k_s^2) H_m^{(1)}(g_p r) + 2g_p^2 H_m^{(1)''}(g_p r),$$

$$\frac{2mg_s}{r} H_m^{(1)'}(g_s r) - \frac{2m}{r^2} H_m^{(1)}(g_s r), 2iqg_s^2 H_m^{(1)''}(g_s r)] e^{iqz}$$

$$\hat{T}_{2\varphi}^{\phi} = \mu \sin m\varphi \left\{ 2m \left[\frac{1}{r^2} H_m^{(1)}(g_p r) - \frac{g_p}{r} H_m^{(1)'}(g_p r) \right],$$

$$-g_s^2 [2H_m^{(1)''}(g_s r) + H_m^{(1)'}(g_s r)],$$

$$2imq \left[\frac{1}{r^2} H_m^{(1)}(g_s r) - \frac{g_s}{r} H_m^{(1)'}(g_s r) \right] \right\} e^{iqz}$$

$$\hat{T}_{2z}^{\phi} = \mu \cos m\varphi \left[2iqg_p H_m^{(1)'}(g_p r), \frac{imq}{r} H_m^{(1)}(g_s r), g_s(k_s^2 - 2q^2) H_m^{(1)'}(g_s r) \right] e^{iqz}$$

为在直角坐标系下表示地表边界条件，需要将外形波转换为上行波。将第一类 Hankel 函数扩展为一系列指数函数：

$$H_m^{(1)}(g_s r) \sin(m\varphi) = \frac{2i^{-m}}{\pi} \int_0^{\infty} \left[e^{ih_s x} \sin(py) \sin\left(m\alpha_s \frac{1}{h_s}\right) \right] dp \tag{18a}$$

$$H_m^{(1)}(g_{s,p} r) \cos(m\varphi) = \frac{2i^{-m}}{\pi} \int_0^{\infty} \left[e^{ih_{s,p} x} \cos(py) \cdot \cos\left(m\alpha_{s,p} \frac{1}{h_{s,p}}\right) \right] dp \tag{18b}$$

将式(18)代入式(13)~(15)可得

$$\hat{\mathcal{R}}_{jm}^{\phi} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \hat{\varphi}_j^+ M_{jm}(p) \frac{1}{h_j} dp \tag{19}$$

其中，

$$M_{jm}(p) = \begin{cases} i^{-m} \sin(m\alpha_j) & (j=1) \\ i^{-m} \cos(m\alpha_j) & (j=2, 3) \end{cases}$$

$$h_j = h_s, \quad \alpha_j = \alpha_s \quad (j=1, 2)$$

$$h_j = h_p, \quad \alpha_j = \alpha_p \quad (j=3)$$

基于式(19)，半空间中的位移向量可表示为

$$\mathbf{u} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} (\hat{u}_1 + \hat{u}_2) dq dp = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} (\hat{U}_1^- \mathbf{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \hat{U}_1^+ \mathbf{B}_m \mathbf{M}_m) dq dp \tag{20}$$

其中，

$$\mathbf{M}_m = [M_{1m}, M_{2m}, M_{3m}]$$

式中： \hat{U}_1^+ 为上行平面波的位移，可以通过用 $h_{s,p}$ 替换 \hat{U}_1^- 中的 $-h_{s,p}$ 来获得。

作用在地面上的正对称形式的车辆荷载：

$$F(y, z, t) = \begin{cases} \frac{Q}{2} e^{-i\omega_0 t} & \left(d_w + \frac{d_a - d_1}{2} \leq |y| \leq d_w + \frac{d_a + d_1}{2} \right. \\ & \text{和 } d_w + \frac{-d_a - d_1}{2} \leq |y| \leq d_w + \frac{-d_a + d_1}{2} \\ & \left. \text{且 } \frac{d_b - d_2}{2} \leq |z - ct| \leq \frac{d_b + d_2}{2} \right) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{21}$$

式中： $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为荷载的角频率

在频域中可展开为关于 q 的积分形式，如下：

$$F(y, z, \omega) = e_x \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{F}(p, q, \omega) e^{iqz} dq \right) e^{ipy} dp = e_x \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{F}(p, q, \omega) e^{iqz} dq \right) (\cos py + i \sin py) dp = 2e_x \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \mathbf{F}(p, q, \omega) \cos py e^{iqz} dp dq \tag{22}$$

式中： $\mathbf{F}(p, q, \omega)$ 为对正对称的地表车辆荷载进行三重 Fourier 变换的结果，其中，

$$\mathbf{F}(p, q, \omega) = \begin{cases} \frac{4Q \cos pd_w}{\pi^2 pqc} \psi_1 \psi_2 \delta\left(q - \frac{\omega - \omega_0}{c}\right) & (pq \neq 0) \\ \frac{Qd_1 d_2}{\pi^2 c} \delta\left(-\frac{\omega - \omega_0}{c}\right) & (p=0, q=0) \end{cases} \tag{23}$$

其中，

$$\psi_1 = \cos \frac{pd_a}{2} \sin \frac{pd_1}{2}, \quad \psi_2 = \cos \frac{qd_b}{2} \sin \frac{qd_2}{2}$$

基于式(20)和(22)，地基表面($x=d$)的应力边界条件可表示为

$$\left(\hat{T}_1^- \mathbf{A} + \sum_{m=0}^{\infty} \hat{T}_1^+ \mathbf{B}_m \mathbf{M}_m \right)_{(x=d, y=0)} = -e_x \frac{1}{2\pi^2} \tilde{q}(p, q, \omega) \tag{24}$$

式中： \hat{T}_1^+ 表示上行平面波的应力，可以通过用 $h_{s,p}$ 替换 \hat{T}_1^- 中的 $-h_{s,p}$ 来获得。

对式(24)进行化简，可将 A_j 用 B_{jm} 来表示：

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \frac{2}{\pi} \sum_{m'=0}^{\infty} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{B_{1m'} M_{1m'}}{h_1} \\ \frac{B_{2m'} M_{2m'}}{h_2} \\ \frac{B_{3m'} M_{3m'}}{h_3} \end{bmatrix} - \frac{N}{\mu} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ A_3 \end{bmatrix} \tag{25}$$

式中： $R_{j'j''} = -\frac{r_{j'j''}}{A_j}$ ， $m' = 0, 1, \dots, j' = 1, 2, 3$ ，

$N = \frac{1}{2\pi c} \delta\left(q - \frac{\omega - 2\pi f_0}{c}\right)$ 。 $R_{j'j''}$ 和 A_j 的具体参数表达式如下：

$$e_p = e^{ih_p x}$$

$$e_s = e^{ih_s x}$$

$$r_{11} = e_p^2 [\hat{\sigma}_{x1}^{1-} (\hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-} - \hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-}) + \hat{\sigma}_{x2}^{1-} (\hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-} - \hat{\sigma}_{y1}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-}) + \hat{\sigma}_{x3}^{1-} (\hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-} - \hat{\sigma}_{y1}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-})]$$

$$r_{12} = 2e_p e_s \hat{\sigma}_{x2}^{1-} (\hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-} - \hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-})$$

$$r_{13} = 2e_p e_s \hat{\sigma}_{x3}^{1-} (\hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-} - \hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-})$$

$$r_{21} = 2e_p e_s \hat{\sigma}_{x1}^{1-} (\hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-} - \hat{\sigma}_{y1}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-})$$

$$r_{22} = e_s^2 [\hat{\sigma}_{x1}^{1-} (\hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-} - \hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-}) + \hat{\sigma}_{x2}^{1-} (\hat{\sigma}_{y1}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-} - \hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-}) + \hat{\sigma}_{x3}^{1-} (\hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-} - \hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-})]$$

$$\begin{aligned}
 r_{23} &= 2e_s^2 \hat{\sigma}_{x3}^{1-} (\hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-} - \hat{\sigma}_{y1}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-}) \\
 r_{31} &= 2e_p e_s \hat{\sigma}_{x1}^{1-} (\hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-} - \hat{\sigma}_{y1}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-}) \\
 r_{32} &= 2e_s^2 \hat{\sigma}_{x2}^{1-} (\hat{\sigma}_{y1}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-} - \hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-}) \\
 r_{33} &= e_s^2 [\hat{\sigma}_{x1}^{1-} (\hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-} - \hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-}) + \hat{\sigma}_{x2}^{1-} (\hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-} - \\
 &\quad \hat{\sigma}_{y1}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-}) + \hat{\sigma}_{x3}^{1-} (\hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-} - \hat{\sigma}_{y1}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-})] \\
 A_1 &= -A_2 = A_3 = \hat{\sigma}_{x1}^{1-} (\hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-} - \hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-}) + \hat{\sigma}_{x2}^{1-} (\hat{\sigma}_{y1}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-} - \\
 &\quad \hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-}) + \hat{\sigma}_{x3}^{1-} (\hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-} - \hat{\sigma}_{y1}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-}) \\
 \xi_1 &= e_p (\hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-} - \hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-}) \\
 \xi_2 &= e_s (\hat{\sigma}_{y3}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-} - \hat{\sigma}_{y1}^{1-} \hat{\sigma}_{z3}^{1-}) \\
 \xi_3 &= e_s (\hat{\sigma}_{y2}^{1-} \hat{\sigma}_{z1}^{1-} - \hat{\sigma}_{y1}^{1-} \hat{\sigma}_{z2}^{1-})
 \end{aligned}$$

为在柱坐标系下表示衬砌表面边界条件，下行平面波应转化为柱面波，平面波到柱面波的基本变换是：

$$e^{-i h_s x} \sin(py) = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m i^{-m} J_m(g_s r) \sin(m\alpha_s) \sin(m\varphi) \quad (26a)$$

$$e^{-i h_s p x} \cos(py) = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m i^{-m} J_m(g_s, p r) \cos(m\alpha_s, p) \cos(m\varphi) \quad (26b)$$

式中：当 $m = 0$ 时， $\varepsilon_0 = 2$ ；当 $m \geq 1$ 时， $\varepsilon_m = 1$ 。

通过将式(26)代入式(8)~(10)，下行波可表示为

$$\hat{\varphi}_j^-(q, p, x) = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m \mathcal{H}_{jm}^0(q, r) M_{jm}(p) \quad (27)$$

基于式(27)，可以用未知变量 B_m 在柱坐标系中描述位移场：

$$u(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_0^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (\varepsilon_m \hat{U}_2^{(p)}) A M_m + \hat{U}_2^{(q)} B_m \right] dq \quad (28)$$

式中： $\hat{U}_2^{(p)}$ 为非奇异波的位移分量，可以通过用 Bessel 函数替换 $\hat{U}_2^{(q)}$ 中的 Hankel 函数来获得。

将式(25)代入式(28)，可得到在柱坐标下表示的半空间中的总位移：

$$u(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\sum_{m'=0}^{\infty} \Omega_{m'} B_{m'} - \hat{U}_2^{(p)} T_m + \hat{U}_2^{(q)} B_m \right) dq \quad (29)$$

其中，

$$\begin{aligned}
 \Omega_{m'} &= \hat{U}_2^{(p)} \mathcal{Q}_{mm'} \\
 \mathcal{Q}_{mm'} &= \begin{bmatrix} Q_{11mm'} & Q_{12mm'} & Q_{13mm'} \\ Q_{21mm'} & Q_{22mm'} & Q_{23mm'} \\ Q_{31mm'} & Q_{32mm'} & Q_{33mm'} \end{bmatrix} \\
 Q_{ij'mm'} &= \varepsilon_m \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_{ij'}(q, p) M_{j'm'}(p) \frac{1}{h_{j'}} M_{jm}(p) dp \\
 T_m &= [T_{1m}, T_{2m}, T_{3m}]^T \\
 T_{jm}(q) &= \varepsilon_m \int_0^{\infty} \frac{\xi_j N}{\Delta_j \mu} M_{jm}(p) dp
 \end{aligned}$$

衬砌结构中的总位移场为

$$u_t(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (\hat{U}_2^{(p(0)}) C_m + \hat{U}_2^{(q)} D_m) dq \quad (30)$$

其中，

$$C_m = [C_{1m}, C_{2m}, C_{3m}]^T$$

$$D_m = [D_{1m}, D_{2m}, D_{3m}]^T$$

式中： C_m, D_m 为未知量；上标 t 表示衬砌结构的材料参数，即采用 ρ, λ, μ 。

衬砌内表面的应力分量为 0 的自由边界条件为

$$(\hat{T}_2^{(p(0)}) C_m + \hat{T}_2^{(q)} D_m)_{(r=a)} = 0 \quad (31)$$

衬砌 - 土体界面 ($r = b$) 位移连续的条件为

$$\begin{aligned}
 \left(\sum_{m'=0}^{\infty} \Omega_{m'} B_{m'} - \hat{U}_2^{(p)} T_m + \hat{U}_2^{(q)} B_m \right)_{r=b} = \\
 (\hat{U}_2^{(p(0)}) C_m + \hat{U}_2^{(q)} D_m)_{r=b} \quad (32)
 \end{aligned}$$

衬砌 - 土体界面 ($r = b$) 应力连续的条件为

$$\begin{aligned}
 \left(\sum_{m'=0}^{\infty} N_{m'} B_{m'} - \hat{T}_2^{(p)} T_m + \hat{T}_2^{(q)} B_m \right)_{r=b} = \\
 (\hat{T}_2^{(p(0)}) C_m + \hat{T}_2^{(q)} D_m)_{r=b} \quad (33)
 \end{aligned}$$

其中，

$$N_{m'} = \hat{T}_2^{(p)} \mathcal{Q}_{mm'}$$

对于每一个 m ，都存在 3 组方程(式(31)~(33)) 可用于求解 B_m, C_m 和 D_m 。未知系数 A_j 可通过将 B_{jm} 代入式(25)中求得。上述未知数全部求得后，可由式(20)或(29)计算衬砌 - 半空间体系频域内位移响应，并通过 Fourier 变换对角频率 ω 进行积分可得到响应的时域解。

2.2 反对称荷载下的求解

反对称荷载作用下的求解过程与正对称的情况类似，初始条件中只有下行波势函数的表达式、外形波势函数表达式以及荷载的表达式与正对称的情况不同。

其中下行波势函数的表达式：

$$\hat{\varphi}_{1A}^- = A_{1A} e^{i(qz - h_p x)} \sin(py) \quad (34)$$

$$\hat{\varphi}_{2A}^- = A_{2A} e^{i(qz - h_k x)} \cos(py) \quad (35)$$

$$\hat{\varphi}_{3A}^- = A_{3A} e^{i(qz - h_s x)} \sin(py) \quad (36)$$

外行波势函数的表达式：

$$\mathcal{H}_{1A}^+ = \sum_{m=0}^{\infty} \mathcal{H}_{1Am}^+ = \sum_{m=0}^{\infty} B_{1Am} H_m^{(1)}(g_p r) \sin(m\varphi) e^{iqz} \quad (37)$$

$$\mathcal{H}_{2A}^+ = \sum_{m=0}^{\infty} \mathcal{H}_{2Am}^+ = \sum_{m=0}^{\infty} B_{2Am} H_m^{(1)}(g_s r) \cos(m\varphi) e^{iqz} \quad (38)$$

$$\mathcal{W}_{3A}^* = \sum_{m=0}^{\infty} \mathcal{W}_{3Am}^* = \sum_{m=0}^{\infty} B_{3Am} H_m^{(1)}(g_s r) \sin(m\varphi) e^{iqz} \quad (39)$$

反对称的车辆荷载的表达式:

$$F_A(y, z, t) = \begin{cases} \frac{Q}{2} e^{-i\omega_0 t} \left(d_w + \frac{d_a - d_1}{2} \leq y \leq d_w + \frac{d_a + d_1}{2} \right. \\ \quad \text{和 } d_w + \frac{-d_a - d_1}{2} \leq y \leq d_w + \frac{-d_a + d_1}{2} \\ \quad \left. \text{且 } \frac{d_b - d_2}{2} \leq |z - ct| \leq \frac{d_b + d_2}{2} \right) \\ -\frac{Q}{2} e^{-i\omega_0 t} \left(-d_w - \frac{d_a + d_1}{2} \leq y \leq -d_w + \frac{d_a + d_1}{2} \right. \\ \quad \text{和 } -d_w - \frac{-d_a + d_1}{2} \leq y \leq -d_w + \frac{d_a + d_1}{2} \\ \quad \left. \text{且 } \frac{d_b - d_2}{2} \leq |z - ct| \leq \frac{d_b + d_2}{2} \right) \\ 0 \quad (\text{其他}) \end{cases} \quad (40)$$

本文对此部分的推导不再进行过多的表述, 将反对称的车辆荷载作用下产生的响应结果与正对称的车辆荷载作用产生的响应结果进行叠加, 即可得到所求的车辆荷载作用下衬砌-半空间体系内动态响应结果。

3 数值计算结果

3.1 模型验证

为验证本文建立模型的正确性, 图3将采用文本研究方法得到的结果与 H. H. Hung 和 Y. B. Yang^[21]进行对比。H. H. Hung 和 Y. B. Yang^[21]采用半解析法研究了黏弹性半空间在不同荷载速度的移动点荷载作用下的动态响应, 其研究结果以无量纲的形式呈现($u^* = (4\pi G / P)u$, 其中 P 为荷载幅值)。本文通过把隧道的半径缩小至 $a = 0.1$ m(隧道衬砌的材料参数与土体材料参数保持一致), 将隧道埋深令为 $d = 20$ m 模拟弹性半空间。采用与 H. H. Hung 和 Y. B. Yang^[21]相同的参数, 计算对比了在 $c = 90$ m/s, 自振频率 $f_0 = 0$ Hz 的恒定点荷载作用下, 土体分别在竖向和荷载移动方向上的位移响应。由图3可见, 本文计算结果与 H. H. Hung 和 Y. B. Yang^[21]的研究结果吻合, 从而验证了本文所提出的模型的正确性。

3.2 数值计算结果

本文建立的土体模型和车辆模型如图1所示, 其中车辆荷载选用 20 t 的卡车, 参数列于表1, 车

辆荷载的自振频率 $f_0 = 5$ Hz。半空间土体材料参数列于表2, 衬砌材料参数列于表3。本文隧道衬砌内径选为 $r = 4.75$ m, 外径选为 $r = 5$ m。如果没有特别的说明, 隧道埋深选为 $d = 10$ m。

表1 移动车辆荷载参数

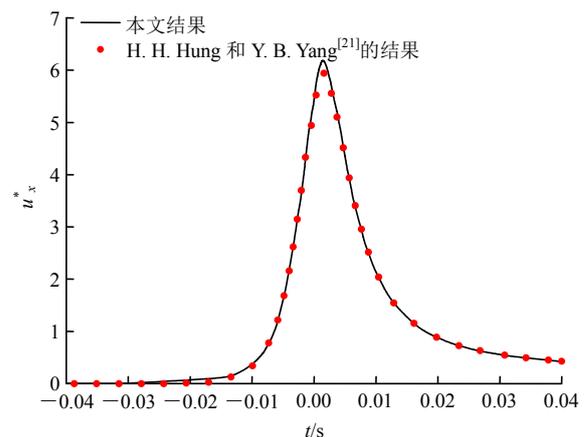
$Q/(10^5 \text{ Pa})$	d_1/m	d_2/m	d_a/m	d_b/m
5	0.2	0.5	1.9	4.5

表2 半空间土体材料参数

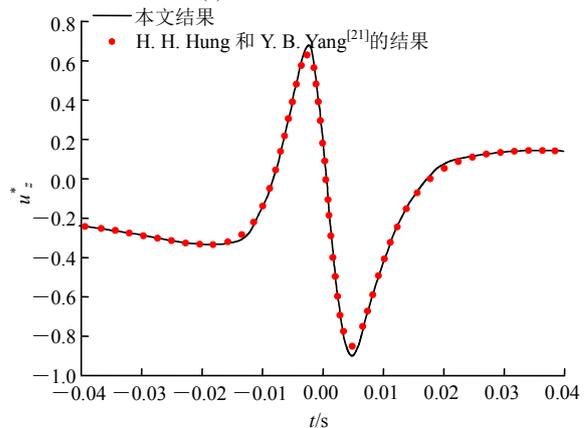
半空间 Lamé 常数 $\mu/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	半空间 Lamé 常数 $\lambda/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	半空间土体密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	半空间黏滞阻尼比 δ
1.2×10^7	3.7×10^7	1 900	0.05

表3 隧道衬砌材料参数

衬砌 Lamé 常数 $\mu/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	衬砌 Lamé 常数 $\lambda/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	衬砌土体密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	衬砌黏滞阻尼比 δ
1.9×10^{10}	2.88×10^{10}	2 400	0.02



(a) 验证土体竖向位移



(b) 验证土体荷载移动方向位移

图3 本文计算结果与 H. H. Hung 和 Y. B. Yang^[21]计算结果对比

Fig.3 Comparisons between the results by the presented model and H. H. Hung and Y. B. Yang^[21]

图 4 给出了车辆荷载与隧道轴线的距离 $d_w = 0$ m 时，分别在 $c = 40, 70$ 和 100 km/h 下，隧道衬砌拱顶 A 点的竖向振动速度的时程曲线和频程曲线。由图 4(a)可知，在车辆速度为 $c = 40, 70$ 和 100 km/h 情况下，隧道拱顶的最大竖向振速分别为 $1.48 \times 10^{-2}, 1.57 \times 10^{-2}$ 和 1.75×10^{-2} m/s。可见对于有衬砌隧道，当车辆荷载与与隧道轴线的水平距离 $d_w = 0$ m 时，隧道拱顶的竖向振速响应随荷载速度的增加而增加。图 4 中隧道衬砌拱顶的竖向振速响应峰值没有出现在车辆荷载中心恰好经过观察点时，这可能是由于车辆荷载的分布较为分散。从图 4(b)给出的竖向振速响应频谱可以发现，竖向振速频谱集中在荷载自振频率 $f_0 = 5$ Hz 附近，其中由于 Doppler 效应的存在，竖向振速响应的频谱分布范围随着荷载速度的增加而增加。

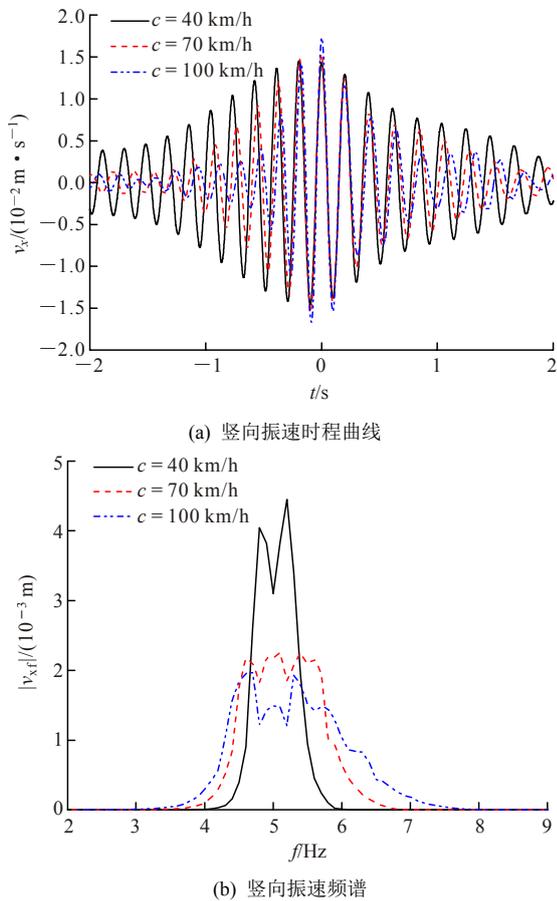


图 4 地表车辆荷载作用下隧道拱顶竖向振速响应
Fig.4 Response of the vertical velocity of the tunnel vault under moving surface vehicle loads

图 5 给出了极坐标下，当车辆速度为 $c = 100$ km/h，车辆与隧道轴线的水平距离分别为 $d_w = 0, 3, 9$ m 以及 $d_w = 15$ m 时，隧道观察平面的径向动应力响应分布情况(选取 $t = -1 \sim 1$ s, $z = 0$ m 处平面内衬砌 - 土体接触面上的径向应力响应幅值)，由图 6 可

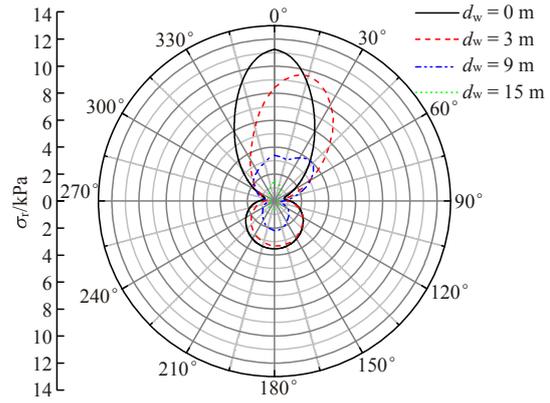
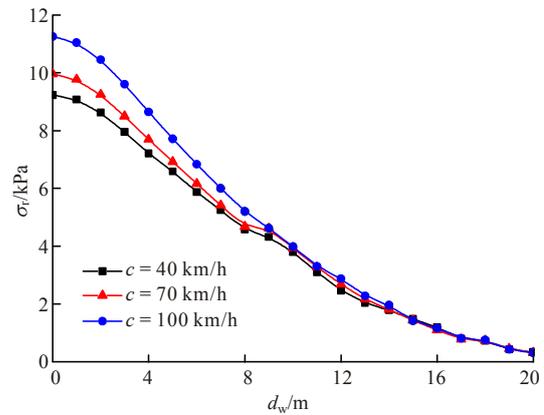
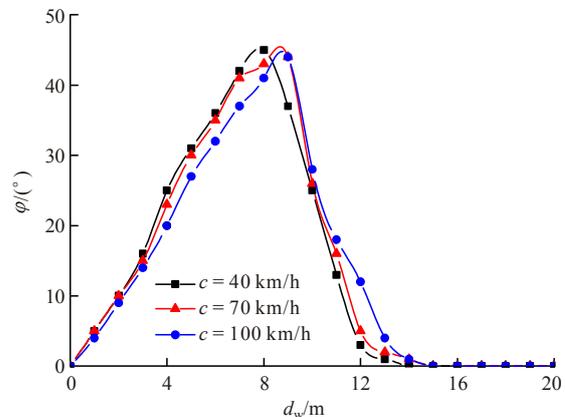


图 5 地表车辆荷载作用下隧道径向应力响应

Fig.5 Response of the radial stress under moving surface vehicle loads



(a) 径向应力最大值随 d_w 变化



(b) 径向应力最大值位置随 d_w 变化

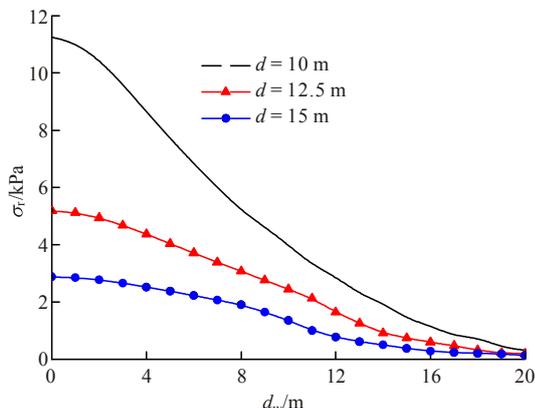
图 6 不同荷载速度下隧道径向应力最大值随 d_w 变化
Fig.6 Variation of the maximum radial stress of the tunnel with d_w under different load velocities

知，当 $d_w = 0$ m 时，车辆荷载在隧道拱顶产生的径向动应力最大；当 $d_w = 3$ m 时，隧道径向动应力最大值出现在 15° 附近，并且在 $14^\circ \sim 90^\circ$ 范围内产生的径向动应力大于 $d_w = 0$ m 时在该处产生的径向动应力；当 $d_w = 9$ m 时，隧道径向动应力最大值出现在 45° 附近，由于拱顶距地表较近，在隧道拱顶附近也产生了较大的径向动应力；当 $d_w = 15$ m 时，

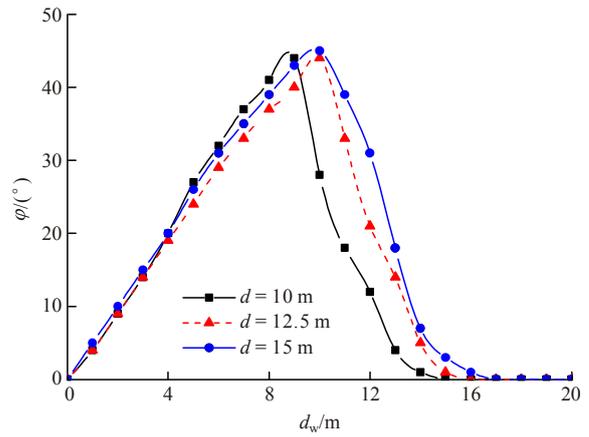
隧道的最大径向应力接近于拱顶处，但其值与于 $d_w = 0$ m 时相比，减小了 87%左右。

为研究隧道两侧车辆在隧道处引起径向动应力，图 6 给出了 40, 70 和 100 km/h 的车辆速度下，隧道径向动应力最大值以及隧道径向动应力最大值所在的位置随车辆与隧道水平距离变化的曲线，由于模型的对称性，只给出了隧道一侧的计算结果。由图 6(a)可知，当车辆与隧道轴线的水平距离为 $d_w = 0$ m 时，隧道产生的径向动应力最大值分别为：9.2, 9.9 和 11.2 kPa，可见 $d_w = 0$ m 时，在车辆荷载正常行驶速度范围内，隧道的径向动应力响应最大值会随着车辆移动速度的增加而增加。但随着 d_w 的增加，车辆移动速度对隧道径向动应力最大值的影响逐渐减小，当 $d_w = 10$ m 时，荷载移动速度对于隧道径向动应力最大值几乎没有影响。由图 6(b)可知，随着 d_w 的增加，隧道径向动应力最大值将向车辆偏离隧道轴线的一侧发生偏移，偏移的角度最大可达到 45° 左右。达到偏移的最大角度之前，在相同 d_w 下，荷载速度越小，偏移的角度越大。在达到最大偏移角度后，隧道的最大径向应力将迅速往隧道轴线方向移动。当 d_w 超过 14 m 时，最大径向应力出现在拱顶附近。

图 7 给出了当荷载速度为 $c = 100$ km/h，隧道埋深分别为 $d = 10, 12.5$ 和 15 m 时，隧道径向动应力最大值以及隧道径向动应力最大值所在的位置随车辆与隧道水平距离变化的曲线。如图 7(a)所示，当车辆与隧道轴线的水平距离为 $d_w = 0$ m 时，隧道埋深为 10 m 时，隧道的最大径向动应力响应为 11.2 kPa，是隧道埋深为 15 m 时的 4 倍，可见增加隧道的埋深可有效地降低隧道的径向动应力响应。随着车辆与隧道轴线水平距离的增加，埋深较大的隧道的径向应力响应减小幅度更为平缓。从图 7(b)可以观察到，在不同的车辆与隧道轴线的水平距离 d_w 下，不同隧道埋深的隧道径向动应力最大值都出现在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内，并且当隧道埋深越小时，随着



(a) 径向应力最大值随 d_w 变化



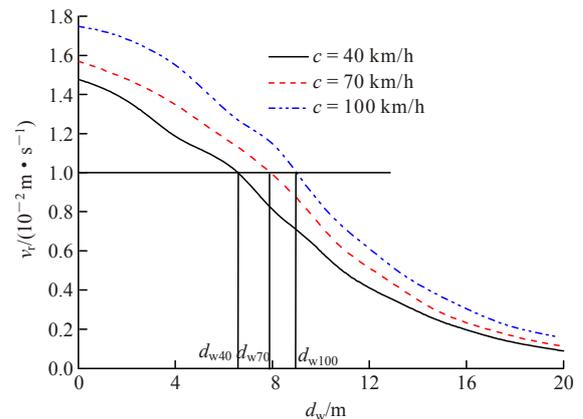
(b) 径向应力最大值位置随 d_w 变化

图 7 不同埋深隧道径向应力最大值随 d_w 变化

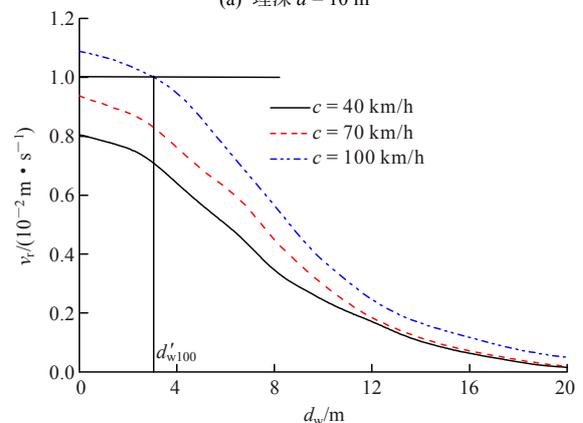
Fig.7 Variation of maximum radial stress of tunnel with d_w under different depths

d_w 的增加，隧道的径向动应力响应最大值将越快到达偏移的最大角度 45° 。

图 8 给出了浅埋隧道埋深为 $d = 10, 12.5$ m，车辆移动速度分别为 $c = 40, 70$ 和 100 km/h 时，隧道径向速度最大值随车辆与隧道轴线水平距



(a) 埋深 $d = 10$ m



(b) 埋深 $d = 12.5$ m

图 8 隧道最大径向速度响应随 d_w 变化

Fig.8 Variation of the maximum radial velocity of the tunnel with d_w

离变化的曲线。由于目前还未有地表交通荷载引起地下建构筑物振动限制规范, 本研究根据 ISO 规范^[22]规定的移动交通引起的表面建筑的允许振动水平, 采用 1.0×10^{-2} m/s 的振动极限。如图 8 所示, 对于一定埋深的隧道而言, 车辆与隧道轴线水平距离较小时, 隧道的振动超过了振动极限 1.0×10^{-2} m/s, 此时为了保证隧道施工运营的安全, 使车辆与隧道保持一定水平距离是有必要的。当隧道埋深 $d = 10$ m 时, 对于车辆速度为 40 km/h, 车辆与隧道轴线的最小安全距离约为 $d_{w40} = 6.6$ m, 对于车辆荷载速度为 70 km/h, 最小安全距离约为 $d_{w70} = 7.8$ m; 对于车辆荷载速度为 100 km/h, 最小安全距离约为 $d_{w100} = 8.9$ m; 当隧道埋深 $d = 12.5$ m 时, 对于车辆荷载速度为 40, 70 km/h, 荷载产生的最大速度响应低于限制, 对于车辆速度为 100 km/h, 最小安全距离约为 $d'_{w100} = 3.0$ m, 由此可见, 增加隧道的埋深可以大幅度减小车辆荷载与隧道之间的最小安全距离。

图 9 给出了浅埋隧道埋深 $d = 10$ m 时, 车辆与浅埋隧道的最小安全距离随荷载速度的变化情况。由图 9 可知, 最小安全距离随着荷载速度的增长呈现线形增长。这表明随着荷载速度的增加, 地表移动荷载的影响区域得到了增加。

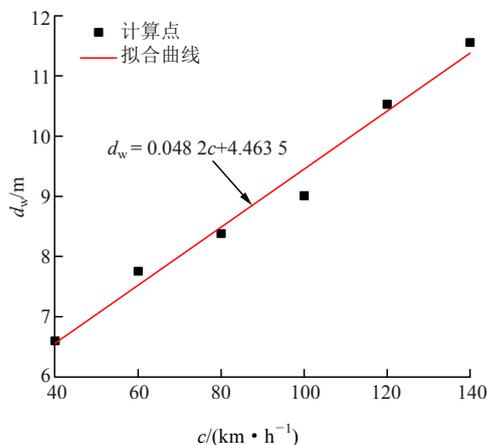


图 9 最小安全距离随车辆荷载移动速度

Fig.9 Variation of the minimum safety distance with the load velocity

4 结 论

为研究地面交通荷载对地下隧道的影响, 建立地表交通荷载下三维弹性半空间中隧道振动分析模型, 分析了地表车辆荷载引起的浅埋隧道振动响应, 并得到以下结论:

(1) 在 40~100 km/h 内, 隧道径向动应力随车

辆速度增加而增加; 随着车辆与隧道水平距离以及隧道埋深增加, 隧道振动响应大大降低。

(2) 隧道最大动应力响应位置向车辆侧发生偏移, 当车辆与隧道达到一定水平距离时, 隧道径向动应力最大值的位置将会往拱顶方向移动, 隧道两侧车辆荷载在隧道处引起径向动应力最大值分布在以竖向为中心的 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 。

(3) 浅埋隧道要满足相关振动规范要求需与地表车辆达到一定水平安全距离, 且该安全距离在研究范围内与地表车速呈线性关系。

参考文献(References):

- [1] SMITH M, CROY I, OGREN M, et al. On the influence of freight trains on humans: a laboratory investigation of the impact of nocturnal low frequency vibration and noise on sleep and heart rate[J]. Plos One, 2013, 8(2): e55829.
- [2] HUNG H H, CHEN G H, YANG Y B. Effect of railway roughness on soil vibrations due to moving trains by 2.5D finite/infinite element approach[J]. Engineering Structures, 2013, 57: 254 - 266.
- [3] BIAN X C, JIN W F, JIANG H G. Ground-borne vibrations due to dynamic loadings from moving trains in subway tunnels[J]. Journal of Zhejiang University—Science A(Applied Physics and Engineering), 2012, 13(11): 870 - 876.
- [4] FRANÇOIS S, SCHEVENELS M, GALVÍN P, et al. A 2.5D coupled FE-BE methodology for the dynamic interaction between longitudinally invariant structures and a layered half-space[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199(23): 1 536 - 1 548.
- [5] CLOUTEAU D, ARNST M, AL-HUSSAINI T M, et al. Freefield vibrations due to dynamic loading on a tunnel embedded in a stratified medium[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 283(1): 173 - 199.
- [6] CHEBLI H, OTHMAN R, CLOUTEAU D, et al. 3D periodic BE-FE model for various transportation structures interacting with soil[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(1): 22 - 32.
- [7] 谢伟平, 孙洪刚. 地铁运行时引起的土的波动分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1 180 - 1 184.(XIE Weiping, SUN Honggang. FEM analysis on wave propagation in soils induced by high speed train loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1 180 - 1 184.(in Chinese))
- [8] 和振兴, 翟婉明, 罗 震. 地铁列车引起的地面振动[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(2): 218 - 221.(HE Zhenxing, ZHAI Wanming, LUO Zhen. Ground vibration caused by moving metro trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(2): 218 - 221.(in Chinese))

- [9] 张波, 李术才, 张敦福, 等. 岩石介质中地铁列车运行引起的环境振动响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 34(增1): 1 366 - 1 379.(ZHANG Bo, LI Shucai, ZHANG Dunfu, et al. Research on rock environments vibration response induced by metro trains in rock media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 34(Supp.1): 1 366 - 1 379. (in Chinese))
- [10] METRIKINE A V, VROUWENVELDER A C W M. Surface ground vibration due to a moving train in a tunnel: two-dimension model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 234(1): 43 - 66.
- [11] FORREST J A, HUNT H E M. A three-dimensional tunnel model for calculation of train-induced ground vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(4): 678 - 705.
- [12] 曾晨, 孙宏磊, 蔡袁强, 等. 简谐荷载作用下饱和土体中圆形衬砌隧道三维动力响应分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1 147 - 1 156. (ZENG Chen, SUN Honglei, CAI Yuanqiang, et al. Analysis of three-dimensional dynamic response of a circular lining tunnel in saturated soil to harmonic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1 147 - 1 156.(in Chinese))
- [13] YUAN Z, BOSTRÖM A, CAI Y, et al. Analytical solution for calculating vibrations from twin circular tunnels[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 117: 312 - 327.
- [14] SNEDDON I N. The stress produced by a pulse of pressure moving along the surface of a semi-infinite solid[J]. Rendiconti Del Circolo Matematico Di Palermo, 1952, 1(1): 57 - 62.
- [15] EASON G. The stresses produced in a semi-infinite solid by a moving surface force[J]. International Journal of Engineering Science, 1965, 2(6): 581 - 609.
- [16] 刘干斌, 汪鹏程, 姚海林, 等. 矩形运动荷载作用下软土地基的三维振动研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1 658 - 1 662.(LIU Ganbin, WANG Pencheng, YAO Hailin, et al. 3D ground vibration of a soft subgrade in the vicinity of a moving rectangular load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1 658 - 1 662.(in Chinese))
- [17] CAI Y, SUN H, XU C. Steady state responses of poroelastic half-space soil medium to a moving rectangular load[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(22/23): 7 183 - 7 196.
- [18] 曹志刚, 孙思, 袁宗浩, 等. 地表移动荷载对既有地下隧洞动力影响解析研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2 262 - 2 273.(CAO Zhigang, SUN Si, YUAN Zhonghao, et al. Analytical investigation of dynamic impact of moving surface loads on underground tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(12): 2 262 - 2 273.(in Chinese))
- [19] YUAN Z, CAO Z, BOSTRÖM A, et al. The influence of pore-fluid in the soil on ground vibrations from a tunnel embedded in a layered half-space[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 419: 227 - 248.
- [20] 杨桂通, 张善元. 弹性动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988: 72 - 75.(YANG Guitong, ZHANG Shanyuan. Elastic dynamics[M]. Beijing: Chinese Railway Press, 1988: 72 - 75.(in Chinese))
- [21] HUNG H H, YANG Y B. Elastic waves in visco-elastic half-space generated by various vehicle loads[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2001, 21(1): 1 - 17.
- [22] International Organization for Standardization. ISO 04866 Mechanical vibration and shock —vibration of fixed structures—guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures[S]. Switzerland: IHS Markit, 2010.