

裹覆隔振层的实心桩纵向振动特性研究

邓世邦, 罗威力

(广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510000)

摘 要: 为分析实心桩裹覆隔振材料后的纵向振动特性, 基于 Rayleigh-love 杆件模型和 Novak 平面应变理论, 综合考虑桩周振动传播介质的径向和纵向非均匀性以及桩身横向惯性效应, 建立了桩周振动传播介质-实心桩耦合作用纵向动力阻抗解析模型。利用 Laplace 变换、复刚度传递和阻抗函数传递法, 得到黏性阻尼介质中任意竖向荷载作用下实心桩桩顶动力阻抗的解析解答, 并与已有解析解答对比验证其合理性。通过现场试验发现, 桩顶刚度幅值的大小对桩顶动力响应有明显影响, 两者之间高度相关。在此基础上, 研究了橡胶隔振层不同厚度和纵向深度以及隔振层材料种类变化对实心桩桩顶动力阻抗的影响。结果表明, 在 1~80 Hz 频段内: (1) 随着橡胶隔振层厚度的增加 (减小), 动刚度幅值曲线会向低频 (高频) 移动, 但整体上厚度变化对特征频率和动刚度幅值的影响较小; (2) 随着橡胶隔振层纵向深度的增加 (减小), 动刚度幅值曲线的振荡幅度和振荡频率也会随之明显提高 (降低); (3) 当采用剪切模量小于桩周土体的隔振材料时, 随着剪切模量的减小, 动刚度幅值曲线的振荡幅度和振荡频率也会随之提高; (4) 当采用剪切模量大于桩周土体的隔振材料时, 随着剪切模量的增大, 动刚度幅值曲线的振荡属性基本消失, 且整体会出现小幅抬升。

关 键 词: 桩基础; 地铁振动; 隔振; 复刚度传递; 动力阻抗

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 10-3081-14

Vertical vibration characteristics of solid pile with vibration isolation layer

DENG Shi-bang, LUO Wei-li

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510000, China)

Abstract: To analyze the vertical vibration characteristics of a solid pile with vibration isolation layer, a vertical dynamic impedance analytical model of the vibration propagation medium and the solid pile was established. The model was based on the Rayleigh-love rod model and Novak plane strain theory, considering the radial and longitudinal non-uniformity of the vibration propagation medium around the pile and the lateral inertia effect of the pile. Utilizing the Laplace transfer method, complex stiffness transfer method, and impedance function transfer method, the analytical solution of dynamic impedance at the solid pile head under arbitrary vertical load in a viscous damping medium was derived. The rationality of this solution was verified by comparing with the existing analytical solution. It is found that the amplitude of the pile head dynamic stiffness has an obvious influence on the dynamic response at the pile head, indicating a high correlation. Further, the effects of different thicknesses and longitudinal depths of the rubber layer and different types of vibration isolation material on the pile head dynamic stiffness are investigated. The results show that in the frequency range of 1-80 Hz: (1) The dynamic stiffness curve shifts to a lower (higher) frequency as the rubber layer thickness increases (decreases), with the thickness variation having an insignificant effect on the feature frequency and the dynamic stiffness; (2) The amplitude and oscillation frequency of the dynamic stiffness curve increase (decrease) significantly as the rubber layer longitudinal depth increases (decreases); (3) When the vibration isolation material is softer than the surrounding soil, the amplitude and oscillation frequency of the dynamic stiffness curve increase as the shear modulus of the vibration isolation material decreases; (4) When the vibration isolation material is harder than the surrounding soil, the amplitude of the dynamic stiffness curve slightly increases as the shear modulus of the vibration isolation material increases, and the oscillatory property disappears.

Keywords: pile foundation; metro-induced vibration; vibration isolation; complex stiffness transfer; dynamic impedance

收稿日期: 2023-11-17

录用日期: 2024-02-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.52178323); 广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金项目面上项目 (No.2023A1515012865)。

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (52178323) and the Natural Science Foundation General Program of Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2023A1515012865).

第一作者简介: 邓世邦, 男, 1999 年生, 硕士研究生, 主要从事地铁列车运营产生的振动与二次辐射噪声监测、预测与评估, 减振降噪措施的研究工作。E-mail: 13128213620@163.com

通讯作者: 罗威力, 男, 1986 年生, 博士, 副教授, 主要从事地铁列车运营产生的振动与二次辐射噪声监测、预测与评估, 振震双控技术等方面的研究工作。E-mail: wlluo@gzhu.edu.cn

1 引言

随着城市地铁交通线网日益扩张,地铁运行诱发邻近建筑物的振动问题愈发起引起关注,为避免地铁振动对居民日常生活产生影响,一般可从振源^[1-3]、传播路径^[4-6]和建筑物受体^[7-9]等 3 个方面采取减振措施。对于基础形式为实心桩的地铁上覆建筑,在桩身外侧裹覆隔振材料^[10],可视为一种创新的传播路径隔振措施,其原理是通过增大传播路径中的波阻抗比^[11-13]从而减弱振动的传播。但是该措施在改变振动传播特性的同时也会对桩自身的纵向振动特性造成影响,而后者又与桩的动力响应有着密切的关系,因此,有必要对裹覆隔振层的实心桩纵向振动特性展开研究。

多年来,众多学者为探讨桩周土体性质改变对桩的纵向振动特性的影响,提出了一系列的解析模型及分析结果。Yu 等^[14]基于虚土桩模型,从理论上研究了泥沙对大直径嵌岩桩竖向动力阻抗的影响,发现桩对竖向振动的抵抗能力会随着泥沙的剪切波速提高而增强。吴文兵等^[15]的分析结果表明岩层剪切波速的增大可以提高嵌岩桩低频范围的动刚度。杨晓^[16]、高远^[17]等均指出桩周土层的软化可以增大饱和黏弹性土层中端承桩的动刚度。崔春义等^[18]分析了径向成层非均质土体中桩基的纵向振动特性,发现桩顶动刚度的幅值会随着桩周土体的软化而提高。随后,Cai 等^[19]采用径向非均质土中的虚土桩模型亦得到了和崔春义等^[18]相同的结论。Zheng 等^[20]还指出土体刚度的变化也是影响桩顶动刚度的重要因素之一。

在研究桩的纵向振动特性的基础上,一部分文献也分析了桩周土体性质改变对桩的纵向动力响应的影响。Wu 等^[21]研究了在竖向简谐荷载作用下黏弹性土层中端承桩的动力响应,结果表明,桩周土体密度的增大会导致桩侧摩阻力和辐射阻尼的提高,从而降低动力响应的幅值。Wu 等^[22]还指出在横向各向同性的层状土中,桩的动力响应幅值会随着桩周土体竖向剪切模量的增大而逐渐减小。李振亚等^[23]研究了考虑横向惯性效应时非均质土中大直径桩的纵向振动特性,结果表明,桩周土体的软化会导致低频动力响应的增大,而对高频动力响应的影响较小。Cui 等^[24]分析了饱和黏弹性土中浮动桩的竖向振动,提出桩端土和桩周土剪切模量的增大,可以减弱动力响应的共振幅值。对于层状非饱和土中的桩基,其竖向振动响应在下层土体硬化的条件下,也会由于桩侧土对桩基制约的加强而降低^[25]。

上述研究结果均表明,桩侧土体性质的改变会对桩顶动刚度和动力响应造成不同程度的影响,为综合考虑在桩侧裹覆隔振材料导致桩周振动传播介质的径向和纵向非均匀性以及考虑桩身横向惯性效应,本文采用 Rayleigh-love 杆件模型^[26-27]和 Novak 平面应变理论^[28],建立桩周振动传播介质-实心桩耦合作用纵向动力阻抗解析模型,利用 Laplace 变换、纵向剪切复刚度传递和阻抗函数传递,得到黏性阻尼介质中任意荷载作用下实心桩桩顶动力阻抗的解析解答。结合现场试验,分析了地铁振动引起的桩顶动力响应与桩顶动刚度之间的关系,在确保解析模型结果有效性的基础上,通过参数化分析研究了橡胶隔振层的厚度和纵向深度以及隔振层材料种类变化对实心桩桩顶动刚度的影响。

2 力学模型及定解问题建立

2.1 力学简化模型及基本假设

力学简化模型如图 1 所示,根据土体水平成层特性,将纵向总长度为 H 的桩周振动传播介质-实心桩耦合作用系统沿纵向划分为 m 个层段,各层段编号自桩端底部至桩顶依次定义为 $1, 2, \dots, i, \dots, m$,各层段对应厚度分别为 $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_m$,各层段顶面埋深分别为 $h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_m$ 。实心桩桩端底部支承的黏性阻尼系数和刚度系数分别为 δ^p 、 k^p 。将第 i 层段外部半无限区域以内厚度为 b_i 的桩周振动传播介质(土体或隔振材料)沿径向划分为 n 个圈层,各圈层对应半径分别为 $r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ij}, \dots, r_{i(n+1)}$ 。

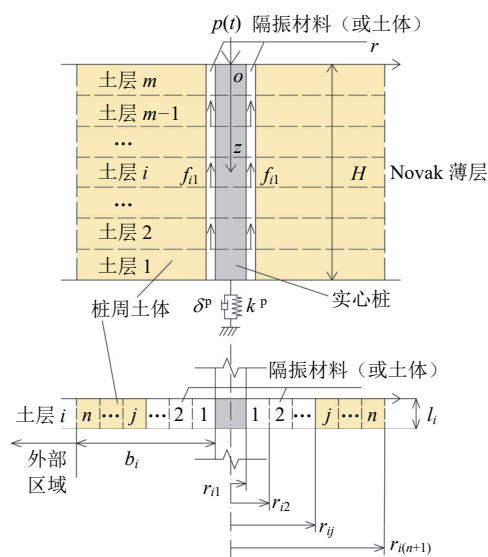


图 1 桩周振动传播介质-实心桩耦合作用力学简化模型
Fig.1 Simplified mechanical model of vibration propagation medium-solid pile coupled system

模型的基本假设如下:

(1) 桩周振动传播介质(土体或隔振材料)为均质、各向同性的黏弹性体,材料阻尼采用黏性阻尼。

(2) 桩周土体沿纵向水平成层,实心桩底部为黏弹性支承。

(3) 桩周振动传播介质-实心桩耦合作用系统满足线弹性和小变形条件^[29]。

(4) 由于隔振材料在施工工艺上采用粘结或焊接形式固定于钢筋笼外侧,与实心桩之间无相对位移,同时在外围土体侧向压力作用下,隔振材料与土体紧密贴合,从而可假设实心桩与桩周振动传播介质(土体或隔振材料)接触界面处以及振动传播介质内部满足位移协调和力平衡条件^[30-32]。

2.2 定解问题

基于 Novak 平面应变条件,建立桩周振动传播介质纵向振动控制方程:

$$G_{ij} \frac{\partial^2 u_{ij}(r, t)}{\partial r^2} + \eta_{ij} \frac{\partial^3 u_{ij}(r, t)}{\partial t \partial r^2} + \frac{G_{ij}}{r} \cdot \frac{\partial u_{ij}(r, t)}{\partial r} + \frac{\eta_{ij}}{r} \frac{\partial^2 u_{ij}(r, t)}{\partial t \partial r} = \rho_{ij} \frac{\partial^2 u_{ij}(r, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: u_{ij} 、 G_{ij} 、 η_{ij} 和 ρ_{ij} 分别为第 i 层段第 j 圈层桩周振动传播介质的位移、剪切模量、黏性阻尼系数和密度。

设第 i 层段实心桩桩身位移为 u_i^p , 则桩段的纵向振动控制方程为

$$E_i^p A_i^p \frac{\partial^2 u_i^p(z, t)}{\partial z^2} - \rho_i^p A_i^p \left[\frac{\partial^2 u_i^p(z, t)}{\partial t^2} + (v_i^p R_i^p)^2 \frac{\partial^4 u_i^p(z, t)}{\partial z^2 \partial t^2} \right] - 2\pi r_{i1} f_{i1}(z, t) = 0 \quad (2)$$

式中: ρ_i^p 、 E_i^p 、 v_i^p 、 R_i^p 、 A_i^p 分别为第 i 层段桩的密度、弹性模量、泊松比、横向截面半径和横向截面积; f_{i1} 为第 i 层段桩周振动传播介质对桩身产生的切应力。

2.3 边界条件

(1) 桩周振动传播介质

外部半无限区域无穷远处土体位移为 0, 有

$$\lim_{r \rightarrow \infty} u_{i(n+1)}(r, t) = 0 \quad (3)$$

根据基本假设(4),在桩侧和振动传播介质接触界面处,有

$$u_{i1}(r_{i1}, t) = u_i^p(r_{i1}, t) \quad (4)$$

$$f_{i1} = -\tau_{i1}(r) \Big|_{r=r_{i1}} \quad (5)$$

式中: τ_{i1} 为第 i 层段第 1 圈层桩周振动传播介质内边界处的竖向剪切应力。

(2) 实心桩

桩顶作用任意竖向荷载 $p(t)$ 时,由力平衡条件得

$$\left[E_m^p A_m^p \frac{\partial u_m^p(z, t)}{\partial z} - \rho_m^p A_m^p (v_m^p R_m^p)^2 \cdot \frac{\partial^3 u_m^p(z, t)}{\partial z \partial t^2} \right] \Big|_{z=0} = -p(t) \quad (6)$$

桩端底部的黏弹性支承为

$$\left\{ E_1^p A_1^p \frac{\partial u_1^p(z, t)}{\partial z} - \rho_1^p A_1^p (v_1^p R_1^p)^2 \frac{\partial^3 u_1^p(z, t)}{\partial z \partial t^2} + \left[k^p u_1^p(z, t) + \delta^p \frac{\partial u_1^p(z, t)}{\partial t} \right] \right\} \Big|_{z=H} = 0 \quad (7)$$

3 定解问题求解及解析解验证

3.1 桩周振动传播介质(土体或隔振材料)

对式(1)作 Laplace 变换,可得

$$G_{ij} \frac{\partial^2 U_{ij}(r, s)}{\partial r^2} + \eta_{ij} s \frac{\partial^2 U_{ij}(r, s)}{\partial r^2} + \frac{G_{ij}}{r} \cdot \frac{\partial U_{ij}(r, s)}{\partial r} + \frac{\eta_{ij}}{r} s \frac{\partial U_{ij}(r, s)}{\partial r} = \rho_{ij} s^2 U_{ij}(r, s) \quad (8)$$

式中: $U_{ij}(r, s)$ 为 $u_{ij}(r, t)$ 的 Laplace 变换; s 为 Laplace 变换常数。

对式(8)进一步整理,可得

$$\frac{\partial^2 U_{ij}(r, s)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_{ij}(r, s)}{\partial r} = (q_{ij})^2 U_{ij}(r, s) \quad (9)$$

式中: $q_{ij} = \sqrt{\frac{\rho_{ij} s^2}{G_{ij} + \eta_{ij} s}}$ 。

式(9) Bessel 方程的通解为

$$U_{ij}(r, s) = A_{ij} I_0(q_{ij} r) + B_{ij} K_0(q_{ij} r) \quad (10)$$

式中: $I_0(q_{ij} r)$ 、 $K_0(q_{ij} r)$ 分别为零阶第一类、第二类修正 Bessel 函数; A_{ij} 、 B_{ij} 为待定系数。

将式(3)代入式(10),得

$$U_{i(n+1)}(r_{i(n+1)}, s) = B_{i(n+1)} K_0(q_{i(n+1)} r_{i(n+1)}) \quad (11)$$

则第 i 层段外部半无限区域土体中任意点的竖向剪切应力为

$$\tau_{i(n+1)} = (G_{i(n+1)} + \eta_{i(n+1)} s) \frac{\partial}{\partial r} U_{i(n+1)}(r_{i(n+1)}, s) = -(G_{i(n+1)} + \eta_{i(n+1)} s) q_{i(n+1)} B_{i(n+1)} K_1(q_{i(n+1)} r_{i(n+1)}) \quad (12)$$

由式 (12) 可得, 在第 i 层段第 n 圈层桩周振动传播介质外边界处的竖向剪切刚度 $T_{i(n+1)}$ 为

$$T_{i(n+1)} = -\frac{2\pi r_{i(n+1)} \tau_{i(n+1)}(r_{i(n+1)})}{U_{i(n+1)}(r_{i(n+1)}, s)} = 2\pi r_{i(n+1)} \cdot (G_{i(n+1)} + \eta_{i(n+1)} s) q_{i(n+1)} \frac{K_1(q_{i(n+1)} r_{i(n+1)})}{K_0(q_{i(n+1)} r_{i(n+1)})} \quad (13)$$

同样在第 i 层段第 j 圈层桩周振动传播介质中, 任意点处对应竖向剪切应力为

$$\tau_{ij} = (G_{ij} + \eta_{ij} s) \frac{\partial}{\partial r} U_{ij}(r_{ij}, s) = -(G_{ij} + \eta_{ij} s) \cdot q_{ij} [B_{ij} K_1(q_{ij} r_{ij}) - A_{ij} I_1(q_{ij} r_{ij})] \quad (14)$$

则第 j 圈层中内、外边界处的竖向剪切刚度表达式为

$$T_{ij} = -\frac{2\pi r_{ij} \tau_{ij}(r_{ij})}{U_{ij}(r_{ij}, s)} = 2\pi r_{ij} (G_{ij} + \eta_{ij} s) \cdot q_{ij} \frac{B_{ij} K_1(q_{ij} r_{ij}) - A_{ij} I_1(q_{ij} r_{ij})}{B_{ij} K_0(q_{ij} r_{ij}) + A_{ij} I_0(q_{ij} r_{ij})} \quad (15)$$

$$T_{i(j+1)} = -\frac{2\pi r_{i(j+1)} \tau_{i(j+1)}(r_{i(j+1)})}{U_{i(j+1)}(r_{i(j+1)}, s)} = 2\pi r_{i(j+1)} \cdot (G_{ij} + \eta_{ij} s) q_{ij} \frac{B_{ij} K_1(q_{ij} r_{i(j+1)}) - A_{ij} I_1(q_{ij} r_{i(j+1)})}{B_{ij} K_0(q_{ij} r_{i(j+1)}) + A_{ij} I_0(q_{ij} r_{i(j+1)})} \quad (16)$$

由各圈层的连续性可得第 i 层段第 j 圈层桩周振动传播介质内外边界剪切刚度递推公式为

$$T_{ij} = 2\pi r_{ij} (G_{ij} + \eta_{ij} s) q_{ij} \frac{M_{ij} + E_{ij} T_{i(j+1)}}{N_{ij} + F_{ij} T_{i(j+1)}} \quad (17)$$

式中: $M_{ij} = 2\pi r_{i(j+1)} (G_{ij} + \eta_{ij} s) q_{ij} \cdot$

$$[K_1(q_{ij} r_{ij}) I_1(q_{ij} r_{i(j+1)}) - K_1(q_{ij} r_{i(j+1)}) I_1(q_{ij} r_{ij})];$$

$$N_{ij} = 2\pi r_{i(j+1)} (G_{ij} + \eta_{ij} s) q_{ij} \cdot$$

$$[K_0(q_{ij} r_{ij}) I_1(q_{ij} r_{i(j+1)}) + K_1(q_{ij} r_{i(j+1)}) I_0(q_{ij} r_{ij})];$$

$$E_{ij} = K_0(q_{ij} r_{i(j+1)}) I_1(q_{ij} r_{ij}) + K_1(q_{ij} r_{ij}) I_0(q_{ij} r_{i(j+1)});$$

$$F_{ij} = K_0(q_{ij} r_{ij}) I_0(q_{ij} r_{i(j+1)}) - K_0(q_{ij} r_{i(j+1)}) I_0(q_{ij} r_{ij}).$$

结合式 (13)、(17) 可得到第 i 层段实心桩与桩周振动传播介质 (土体或隔振材料) 接触界面处的剪切刚度 T_{i1} 。

3.2 实心桩

对式 (2) 进行 Laplace 变换, 并代入 T_{i1} 进一步整理可得

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} U_i^p(z, s) - \alpha_i^2 U_i^p(z, s) = 0 \quad (18)$$

式中: $U_i^p(z, s)$ 为 $u_i^p(z, t)$ 的 Laplace 变换;

$$\alpha_i^2 = \frac{\rho_i^p A_i^p s^2 + T_{i1}}{A_i^p [E_i^p - \rho_i^p (\nu_i^p R_i^p s)^2]}.$$

由式 (18) 可求得其通解为

$$U_i^p(z, s) = C_i^p e^{\bar{\alpha}_i z / l_i} + D_i^p e^{-\bar{\alpha}_i z / l_i} \quad (19)$$

式中: $\bar{\alpha}_i = \alpha_i l_i$; C_i^p 、 D_i^p 均为待定系数。

由此可求得第 1 层段桩体底部的位移阻抗函数 Z_0^p 解析表达式为

$$Z_0^p \Big|_{z=H} = \frac{-E_1^p A_1^p \frac{\partial}{\partial z} U_1^p(z, s)}{U_1^p(z, s)} \Big|_{z=H} = \quad (20)$$

$$\frac{E_1^p A_1^p \bar{\alpha}_1 (D_1^p e^{-\bar{\alpha}_1 H / l_1} - C_1^p e^{\bar{\alpha}_1 H / l_1})}{(D_1^p e^{-\bar{\alpha}_1 H / l_1} + C_1^p e^{\bar{\alpha}_1 H / l_1}) l_1} = A_1^p (k^p + \delta^p s)$$

第 1 层段桩段顶面 ($z = h_1$) 处的位移阻抗函数 Z_1^p 解析表达式为

$$Z_1^p \Big|_{z=h_1} = \frac{-E_1^p A_1^p \frac{\partial}{\partial z} U_1^p(z, s)}{U_1^p(z, s)} \Big|_{z=h_1} = \frac{E_1^p A_1^p \bar{\alpha}_1 (D_1^p e^{-\bar{\alpha}_1 h_1 / l_1} - C_1^p e^{\bar{\alpha}_1 h_1 / l_1})}{(D_1^p e^{-\bar{\alpha}_1 h_1 / l_1} + C_1^p e^{\bar{\alpha}_1 h_1 / l_1}) l_1} \quad (21)$$

结合式 (20)、(21) 可得桩段阻抗函数的递推公式为

$$Z_1^p = -\frac{E_1^p A_1^p \bar{\alpha}_1 (\beta_1 e^{\bar{\alpha}_1 h_1 / l_1} - e^{-\bar{\alpha}_1 h_1 / l_1})}{(\beta_1 e^{\bar{\alpha}_1 h_1 / l_1} + e^{-\bar{\alpha}_1 h_1 / l_1}) l_1} \quad (22)$$

式中: $\beta_1 = \frac{E_1^p A_1^p \bar{\alpha}_1 - Z_0^p l_1}{E_1^p A_1^p \bar{\alpha}_1 + Z_0^p l_1} e^{-2\bar{\alpha}_1 h_0 / l_1}$ 。

由阻抗函数的传递性可得第 i 桩段顶部界面处的位移阻抗函数为

$$Z_i^p = -\frac{E_i^p A_i^p \bar{\alpha}_i (\beta_i e^{\bar{\alpha}_i h_i / l_i} - e^{-\bar{\alpha}_i h_i / l_i})}{(\beta_i e^{\bar{\alpha}_i h_i / l_i} + e^{-\bar{\alpha}_i h_i / l_i}) l_i} \quad (23)$$

$$\beta_i = \frac{E_i^p A_i^p \bar{\alpha}_i - Z_{i-1}^p l_i}{E_i^p A_i^p \bar{\alpha}_i + Z_{i-1}^p l_i} e^{-2\bar{\alpha}_i h_{i-1} / l_i}$$

同理, 利用递推公式即可推导出桩顶阻抗函数为

$$Z_m^p \Big|_{z=h_m=0} = -\frac{E_m^p A_m^p \bar{\alpha}_m (\beta_m - 1)}{(\beta_m + 1) l_m} = -\frac{E_m^p A_m^p}{l_m} Z_m^{p'} \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_m &= \frac{E_m^p A_m^p \bar{\alpha}_m - Z_{m-1}^p l_m}{E_m^p A_m^p \bar{\alpha}_m + Z_{m-1}^p l_m} e^{-2\bar{\alpha}_m h_{m-1}/l_m} \\ Z_m^{p'} &= \frac{\bar{\alpha}_m (\beta_m - 1)}{(\beta_m + 1)} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中： β_m 、 $Z_m^{p'}$ 为无量纲桩顶阻抗，令 $Z_m^{p'} = K_r + iK_i$ ， K_r 为桩顶动刚度， K_i 为桩顶动阻尼， $i = \sqrt{-1}$ 。

3.3 解析解合理性验证

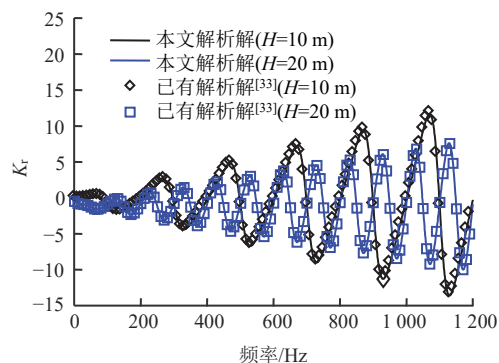
为验证本文解析模型结果的合理性，不考虑桩的横向效应($v_i^p = 0$)，对比了桩长 H 分别为 10 m 和 20 m 时，最内层桩侧土体分别出现软化（土体剪切波速 V_{sm} 由 100 m/s 减小至 90 m/s）和硬化（土体剪切波速 V_{sm} 由 100 m/s 增加至 110 m/s）时，本文解析解与已有解析模型解答^[33]的差异，其余计算参数与文献^[33]一致。如图 2 所示，结果表明本文解析解与已有解析模型结果吻合良好。

4 工程实例

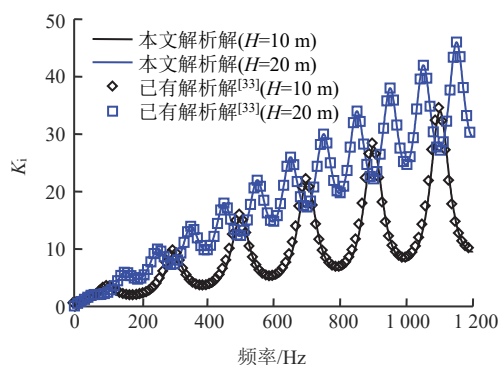
4.1 工程概况

广州市某地铁上覆建筑项目拟建造一栋 36 层高的住宅楼，由于该建筑的桩基础与广州地铁 3 号线隧道外壁的最短直线距离仅为 3 m，为减少地铁引起振动从桩身传入上部建筑，对一根桩长为 40 m、桩径为 2 m 的工程桩裹覆了一层纵向深度为 18 m、厚度为 35 mm 橡胶隔振层（如图 3 所示）。在对该隔振桩的纵向振动特性展开研究之前，采用多通道表面波谱法（multi-channel analysis of surface waves method，简称 MASW 法），确定了试验场地内的土层动力特性。

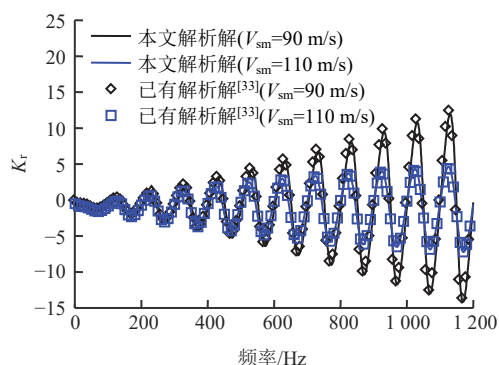
如图 4 所示，MASW 试验设备分为振击设备和数据采集系统。振击设备采用 KSI 公司的 728A200 大型力锤，灵敏度为 25 mV/kN，重量为 5.5 kg，并内置力传感器测量力锤锤击力。数据采集系统采用 DH5981 分布式网络动态信号分析仪和 KD1500L 低频压电加速度传感器，其中 KD1500L 低频压电式加速度传感器的量程为 $\pm 2 \text{ m/s}^2$ ，频率范围为 0.5~1 000 Hz，灵敏度为 500 mV/(m·s²)，采样频率为 1 000 Hz。图 5 分别展示了试验场地的频域-相速度谱^[34]和吻合较好的频散曲线对比结果^[35]，并基于试验频散曲线在频域-波速域内反演了土体的动力学参数^[36]。结果如表 1 所示，试验场地表面有一层 1.97 m 厚剪切波速为 142.93 m/s 的松软土体，其余均为剪切波速达 1 000 m/s 的硬质土体。



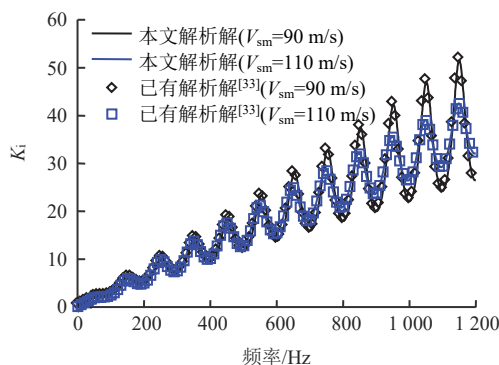
(a) 不同桩长时桩顶动刚度



(b) 不同桩长时桩顶动阻尼



(c) 不同土体剪切波速时桩顶动刚度



(d) 不同土体剪切波速时桩顶动阻尼

图 2 本文解析解与已有解析解答^[33]对比

Fig.2 Comparison of present solution with Wang's solution^[33]

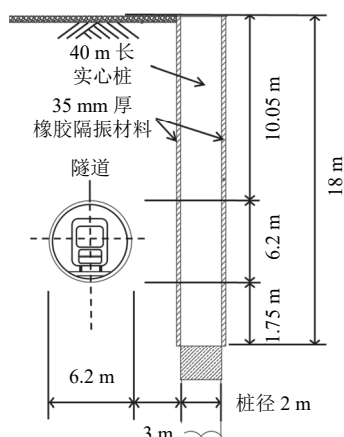


图3 工程桩与地铁隧道的几何尺寸及相对位置
Fig.3 Geometric sizes and relative positions of pile and metro tunnel

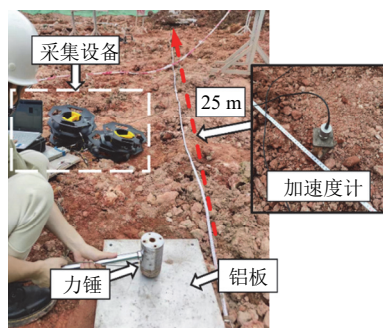
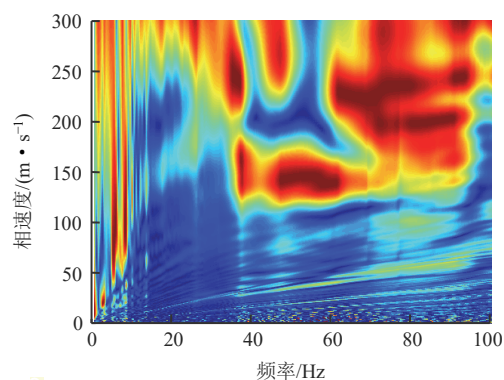
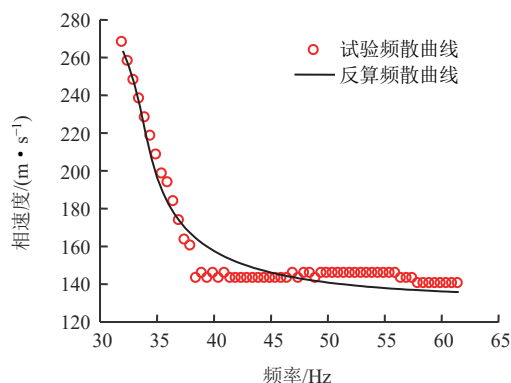


图4 土层动力学参数试验现场
Fig.4 Test site of mechanical material properties of soil



(a) 试验场地的频域-相速度谱



(b) 试验与反算的频散曲线对比

图5 MASW 试验结果
Fig.5 MASW test results

表1 土层动力学参数

Table 1 Dynamic characteristics of soil at test site

土层	土层厚度 h /m	剪切波速 $C_s/(m \cdot s^{-1})$	压缩波速 $C_p/(m \cdot s^{-1})$	阻尼比 D	密度 ρ /($kg \cdot m^{-3}$)
1	1.97	142.93	285.86	0.05	1 900
2	∞	1 000.00	2 000.00	0.05	1 900

4.2 实测桩顶动刚度

如图6所示,为获取隔振桩的实测桩顶动刚度,采用与4.1节中MASW试验相同的试验设备,在隔振桩的桩顶中心位置布置了1个加速度传感器后,通过力锤敲击桩顶中心区域,共记录了50组锤击力和竖向加速度数据,其中一组具代表性数据的时域与频域结果如图7所示。结果表明,锤击力的幅值达到了3 500 kN,同时在0~200 Hz频率范围内随着频率的提高而递减;力锤敲击引起的桩顶竖向加速度幅值达到了0.1 m/s²,并观察到有两个峰值频率分别出现在46.9、135.3 Hz。



图6 实测桩顶动刚度试验现场
Fig.6 Test site of pile head dynamic stiffness

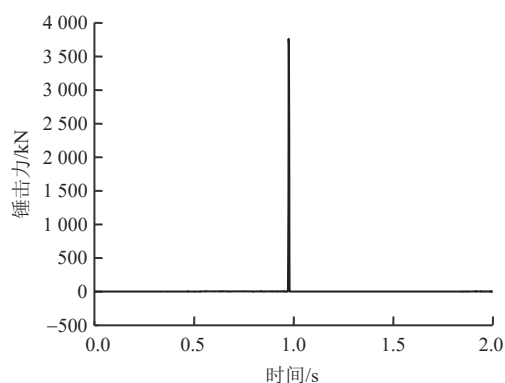
实测力锤锤击力及桩顶竖向加速度数据分别进行傅里叶变换后,由式(26)可计算得到频域下的实测桩顶动刚度 $\hat{K}(\omega)$:

$$\hat{K}(\omega) = \frac{\hat{F}(\omega)}{\hat{x}(\omega)} \quad (26)$$

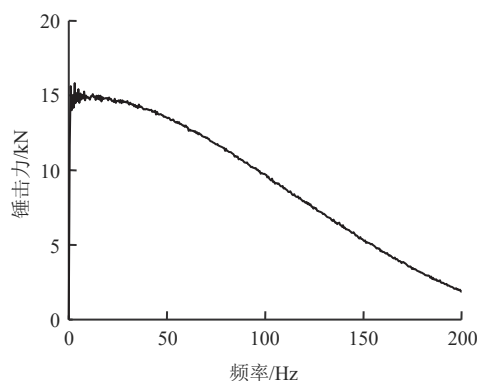
式中: $\hat{F}(\omega)$ 为频域下的锤击力; $\hat{x}(\omega) = -\omega^{-2}\hat{a}(\omega)$, $\hat{x}(\omega)$ 和 $\hat{a}(\omega)$ 分别为频域下的桩顶位移和加速度; ω 为圆频率。

图8展示了由50组敲击数据得到的实测桩顶动刚度包络值与平均值,由于实测数据在1~20 Hz的相干系数^[37]均小于0.5,图中仅展示20~200 Hz的实测动刚度幅值。结果显示,动刚度幅值曲线在20~200 Hz频率范围内具有依次衰减和增大的振荡属性,并分别在46.9、135.3 Hz取得极小值,在

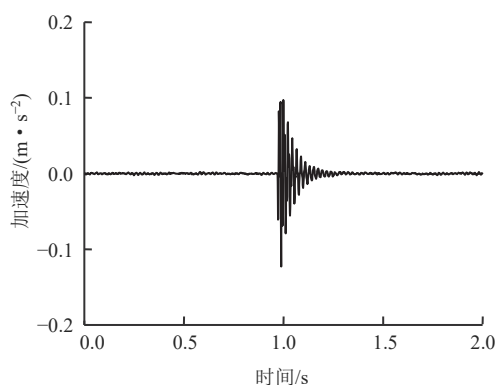
86.9、176.8 Hz 取得极大值, 同时随着频率的增加, 振荡的幅度逐渐减小, 因此在 46.9、86.9 Hz 取得的同时亦是动刚度幅值的最小和最大值。



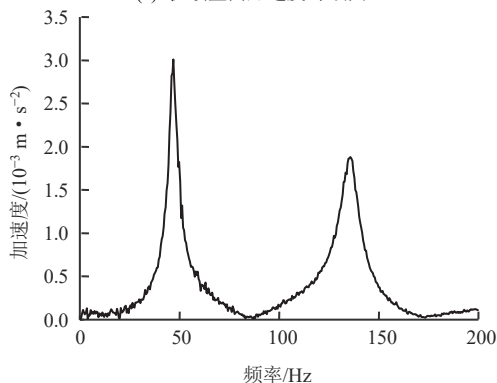
(a) 实测力锤锤击力时域图



(b) 实测力锤锤击力频域图



(c) 桩顶竖向加速度时域图



(d) 桩顶竖向加速度频域图

图 7 桩顶敲击试验结果

Fig.7 Test results of hammer impact at pile head

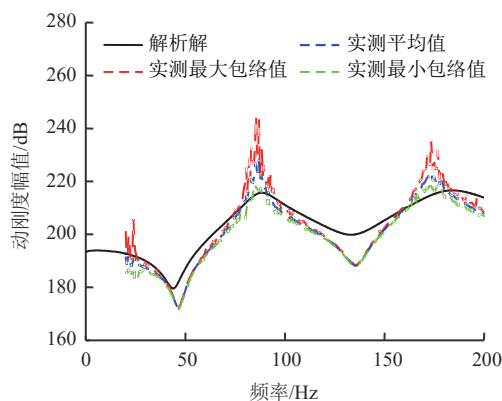


图 8 实测桩顶动刚度与解析解

Fig.8 Experimental pile head dynamic stiffness and analytical solution

图 8 还对比了隔振桩的实测结果与解析解的差异。解析模型的计算参数取值如下: 已有研究^[38-39]结果表明, 当内部振动传播介质划分为 20 个径向圈层以上时, 圈层数量对计算结果的影响可以忽略不计, 因此, 后续计算中解析模型的径向圈层数 n 均设置为 20, 同时为划分纵向深度不一的两层土体和隔振层, 将纵向层段数 m 设置为 3, 土层动力学参数按表 1 取值, 实心桩及橡胶隔振层几何参数按图 3 取值, 实心桩采用的是 C50 混凝土, 橡胶隔振材料的密度由生产厂家提供为 930 kg/m^3 , 其剪切波速和纵波波速由非金属超声检测仪^[40]测得分别为 20.5、67.9 m/s, 其余参数取值为 $b_i=1.0 \text{ m}$, $k^p=3.6 \times 10^9 \text{ N/m}^3$, $\delta^p=2.9 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$, $\eta_{ij}=1 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ 。

考虑到本文的解析模型是基于对现实复杂的本构关系作出简化(如假设土体水平成层)而建立的, 认为当误差范围在 10% 以内时可以满足实际的工程要求^[41]。表 2 中的误差分析结果显示, 在 20~200 Hz 频段内, 所有特征频率的实测结果与解析解之间的误差均符合上述误差范围要求, 说明当前取用的模型参数可以较好地模拟隔振桩的纵向振动特性。

表 2 特征频率误差分析

Table 2 Error analysis of feature frequencies

0~200 Hz	实测结果 /Hz	解析解 /Hz	误差 /%
第一共振频率	46.9	43.9	6.4
第一反共振频率	86.9	88.4	1.7
第二共振频率	135.3	133.3	1.5
第二反共振频率	176.8	184.2	4.0

4.3 实测地铁引起的桩顶及地表动力响应

如图 9 所示, 为研究桩顶动刚度与桩顶动力响应之间的关系, 同时记录了共 20 组由地铁振动引起

的隔振桩桩顶和邻近地表（对照组）的竖向加速度数据，其中一组结果如图 10 所示。图中显示，地表的竖向加速度峰值达到了 0.13 m/s^2 ，且在 $100 \sim 150 \text{ Hz}$ 频率范围内观察到一个明显的振动主频，该频率通常与列车速度和轮轨间距等因素相关^[42-44]。相较于地表位置，桩顶的竖向加速度峰值为 0.05 m/s^2 ，减小了 61.5%，此外在 $40 \sim 50 \text{ Hz}$ 频率范围内观察到一个不相应存在于地表位置的振动主频，而其余频段内的加速度幅值均小于地表。由于两个测点与隧道的相对位置较接近，土体的几何阻尼^[45]无明显差异，而土体的材料阻尼^[46-47]无法有效衰减低频振动，结合图 8 中桩顶动刚度在 46.9 Hz 取得最小值，可认为在 $40 \sim 50 \text{ Hz}$ 频率范围内观察到振动主频的产生与隔振桩自身的纵向振动特性相关，即相对低的动刚度幅值导致桩顶在相应频率下发生共振。

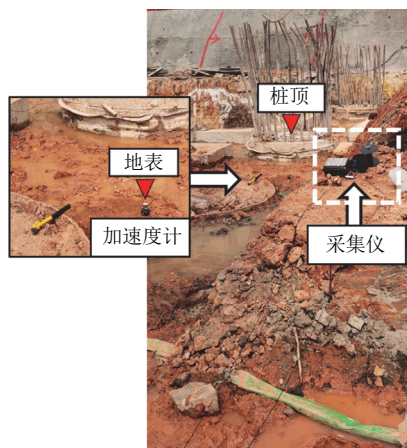


图 9 实测地铁振动试验现场
Fig.9 Test site of metro-induced vibrations

进一步地，由式 (27) 可求得由地铁振动引起的桩顶与地表位置的竖向加速度响应比 $\hat{H}(\omega)$ ：

$$\hat{H}(\omega) = \frac{\hat{a}_p(\omega)}{\hat{a}_s(\omega)} \quad (27)$$

式中： $\hat{a}_p(\omega)$ 和 $\hat{a}_s(\omega)$ 分别为频域下桩顶和地表的竖向加速度。当 $|\hat{H}| < 1$ 说明桩顶的动力响应小于地面振动。20 组实测响应比的包络值与平均值如图 11 所示。在 $0 \sim 200 \text{ Hz}$ 频率范围内，对应隔振桩顶动刚度的共振与反共振频率，可以观察到实测响应比幅值曲线在 $28 \sim 56 \text{ Hz}$ 和 $100 \sim 150 \text{ Hz}$ 频段内表现为两段明显的波峰，而在 $56 \sim 100 \text{ Hz}$ 和 $150 \sim 200 \text{ Hz}$ 频段内则表现为两段明显的波谷。图中实测响应比最小包络值均小于 1，甚至在共振频率 46.9 Hz 处实测响应比幅值也仅为 0.84，说明隔振桩在该频率下发生共振时，桩顶的动力响应依然可能小于邻近的

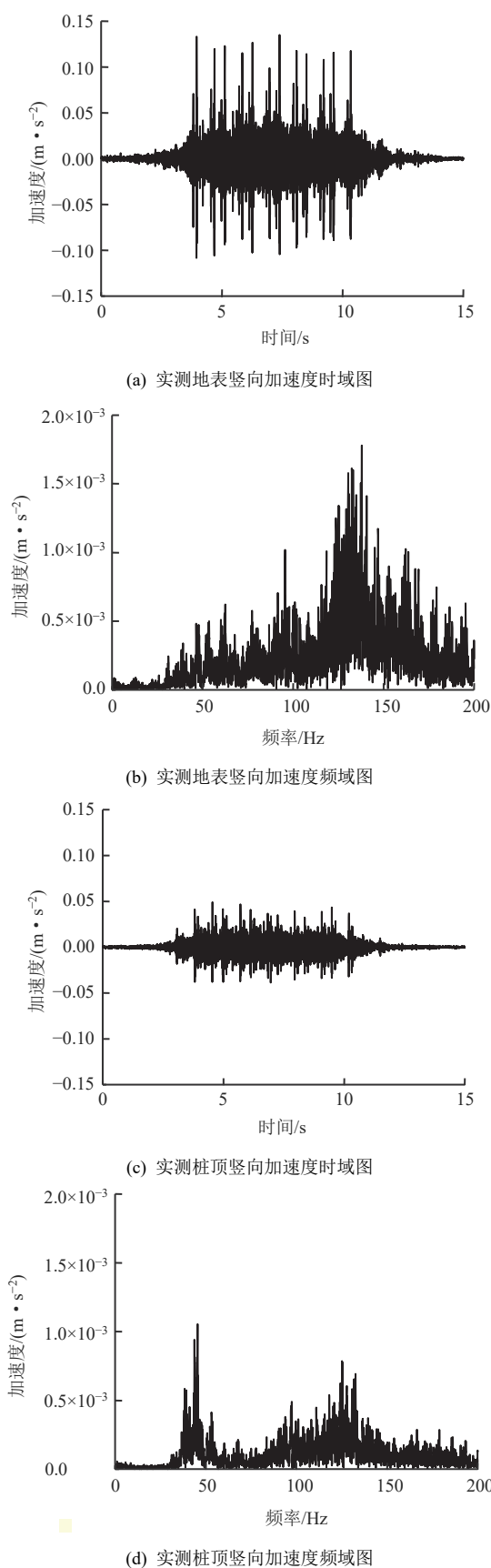


图 10 实测地铁振动引起的桩顶及地表动力响应
Fig.10 Experimental pile head and soil dynamic responses induced by metro train

地面振动。同样在反共振频率 86.9 Hz 处，实测响

应比幅值也可以达到 1.34, 此时桩顶的动力响应大于邻近的地面振动。这种现象表明地铁振动引起桩顶动力响应的幅值并不完全取决于桩顶动刚度幅值的大小, 还与振源特性^[48-49]以及振动的传播特性^[50-52]等因素相关。因此, 鉴于本文解析模型无法预测地铁振动引起的桩顶动力响应, 后续的参数化分析将集中讨论隔振层对实心桩桩顶动刚度的影响。

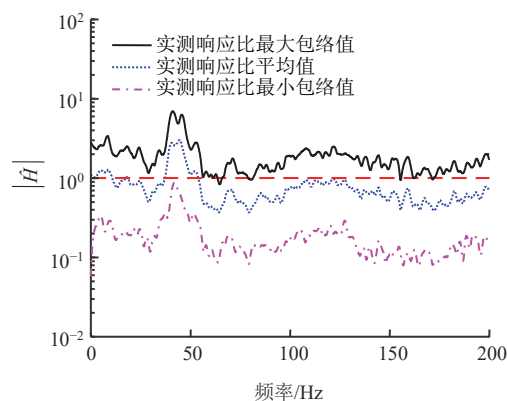


图 11 实测地铁振动引起的动力响应比

Fig.11 Dynamic response ratio induced by metro train

4.4 参数化分析

在符合工程实际的合理范围内, 本节分别通过改变橡胶隔振层的厚度和纵向深度以及隔振层材料的种类对实心桩桩顶动刚度的变化展开参数化分析。根据《城市区域环境振动测量方法》(GB 10071—88)^[53]与《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)^[54]对振动的测量与评价标准, 后续内容将集中对 1~80 Hz 频率范围内的桩顶动刚度幅值进行讨论。

4.4.1 橡胶隔振层厚度变化

为保证桩基础在土体中的稳定性, 柔性橡胶隔振层的厚度不宜过厚, 因此在已有 35 mm 厚度和 18 m 纵深的基础上, 保持深度不变, 增设了 4 种不同厚度的计算工况。如图 12 所示, 动刚度幅值曲线在 1~80 Hz 频段内表现为先衰减后增大, 并且整体随着橡胶隔振层厚度的增加(减小)向低频(高频)移动。通过对比 15、55 mm 计算工况的结果, 观察到随着橡胶层厚度的增加, 实心桩的共振频率从 47.1 Hz 减小至 42.8 Hz, 而动刚度幅值也从 180.5 dB 减小至 179.4 dB。此外, 动刚度整体向低频移动后导致了动刚度幅值在 1~45.3 Hz 和 45.3~80 Hz 频段内相较于移动前分别表现为减弱和提高。

4.4.2 橡胶隔振层纵向深度变化

由于橡胶隔振层需要结合钢筋笼进行安装, 因此, 隔振层的最大裹覆深度取决于桩身长度, 在已

有 35 mm 厚度和 18 m 纵深的基础上, 保持厚度不变, 增设了 4 种不同纵向深度的计算工况。如图 13 所示, 在 1~80 Hz 频段内随着橡胶隔振层纵向深度的增加(减小), 动刚度幅值曲线的特征频率明显地向低频(高频)移动, 且曲线的振荡幅度和振荡频率也随之增加(降低)。通过对比 4.5、40 m 计算工况的结果, 随着橡胶层纵深的增加, 可观察到的实心桩特征频率数量由 0 最终增加至 4 个。通过对比 9、40 m 计算工况下的第一共振频率, 观察到其频率值从 72.6 Hz 减小至 15.6 Hz, 且动刚度幅值也从 189.6 dB 减小至 167.9 dB, 可见橡胶隔振层纵向深度的变化对实心桩的纵向振动特性影响很大。

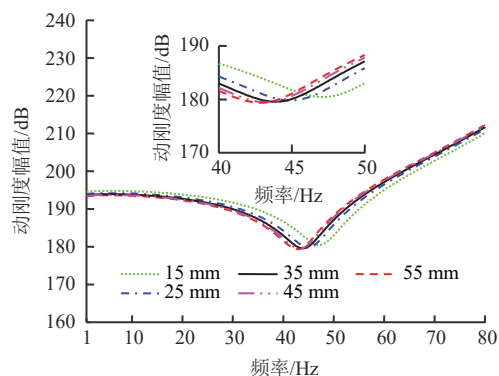


图 12 橡胶隔振层厚度变化对桩顶动刚度的影响

Fig.12 Influence of rubber vibration isolation layer thickness on dynamic stiffness at pile head

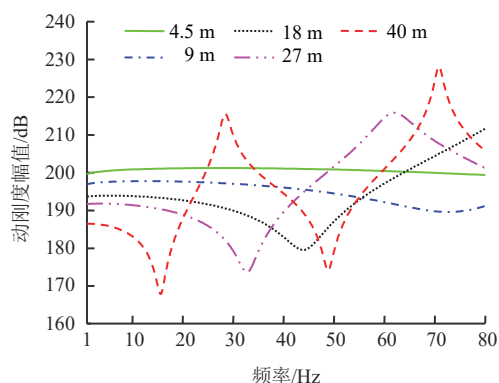


图 13 橡胶隔振层纵向深度变化对桩顶动刚度的影响

Fig.13 Influence of rubber vibration isolation layer longitudinal depth on dynamic stiffness at pile head

4.4.3 隔振层材料变化

鉴于目前计算结果仅采用橡胶作为隔振层材料, 以下通过改变隔振层的材料参数取值分析了不同种类材料作为隔振层时实心桩纵向振动特性的变化。分别采用了包含橡胶在内的 3 种剪切模量均小于桩周土体的柔性材料和 3 种剪切模量均大于桩周土体的刚性材料作为隔振层材料进行计算, 隔振层

材料参数取值如表 3 所示, 并沿用 35 mm 厚度和 18 m 纵深的几何尺寸。

表 3 隔振层材料性质

Table 3 Characteristics of vibration isolation layer materials

材料种类	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切模量 (MPa)	泊松比
橡胶	930	0.39	0.45
泡沫塑料	80	4.21	0.40
粉煤灰	500	9.26	0.35
C40 混凝土		13 542.00	
C60 混凝土	2 550	15 000.00	0.20
C80 混凝土		15 833.00	

注: 第 1 层和第 2 层土体剪切模量分别为 38.81 MPa 和 1 900 MPa。

如图 14 所示, 当采用剪切模量小于桩周土体的柔性材料作为隔振层时, 动刚度幅值曲线会随着隔振材料剪切模量的减小向低频移动, 曲线的振荡幅度和振荡频率也会随之增加。通过对比粉煤灰和橡胶作为隔振材料的计算工况, 随着隔振材料剪切模量减小, 第一共振频率从 74.9 Hz 减小至 43.9 Hz, 且动刚度幅值也从 191.0 dB 减小至 179.6 dB。结果表明, 桩周振动传播介质的软化会导致动刚度幅值曲线整体向低频移动, 同时振荡幅度和振荡频率也会提高, 且软化程度越大变化越明显, 相同的规律分别在图 12、13 中橡胶隔振的厚度和纵向深度增加时也可以观察到。

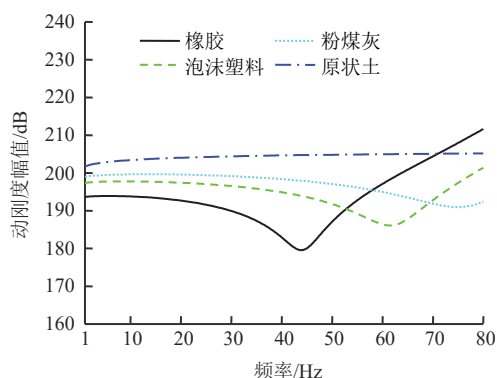


图 14 柔性材料隔振层对桩顶动刚度的影响

Fig.14 Influence of flexible material vibration isolation layer on dynamic stiffness at pile head

如图 15 所示, 当采用剪切模量大于桩周土体的刚性材料作为隔振层时, 在 1~80 Hz 频段内并未观察到明显的特征频率, 而动刚度幅值曲线则会随着隔振材料剪切模量的增大整体出现小幅的抬升。通过对比 C80 和 C40 混凝土作为隔振材料的计算工况, 随着隔振材料剪切模量的增大, 动刚度幅值在

1~80 Hz 频段内整体增加了 0.02%~0.08%。结果表明, 桩周振动传播介质的硬化会导致动刚度幅值曲线整体出现小幅的增大, 且硬化程度越大增幅越大, 并且与软化的情况相比, 曲线的振荡频率会减小并趋于平缓。

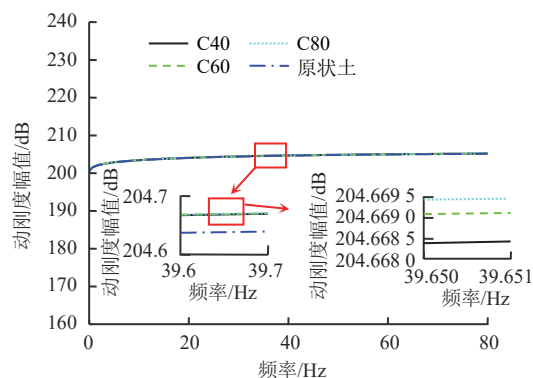


图 15 刚性材料隔振层对桩顶动刚度的影响

Fig.15 Influence of rigid material vibration isolation layer on dynamic stiffness at pile head

5 结 论

本文以裹覆橡胶隔振层的实心桩为研究对象通过实测动刚度和地铁振动的现场试验, 研究了动刚度与动力响应之间的关系, 并在此基础上应用基于复刚度传递和阻抗函数传递性建立的桩周振动传播介质-实心桩耦合作用纵向动力阻抗解析模型, 对橡胶隔振层的厚度和纵向深度以及隔振材料种类变化进行了参数化分析, 结果表明:

(1) 隔振桩桩顶动刚度由低频至高频呈现出先衰减后增大的振荡特性, 在过程中会产生一系列与极值相对应的特征频率, 地铁振动在桩顶动刚度共振频率附近的频段内容易诱发隔振桩的共振, 导致相应频段内产生桩顶动力响应在频域中的振动峰值。

(2) 地铁振动引起的桩顶动力响应与桩顶动刚度之间高度相关, 但桩顶动力响应在共振(反共振)频率下仍可能小(大)于邻近的地面振动。

(3) 橡胶隔振层厚度的增加(减小)会令动刚度幅值曲线向低频(高频)移动, 同时共振频率和相对应的动刚度幅值均会减小(增大)。

(4) 橡胶隔振层纵向深度的增加(减小)会令同一频段内动刚度幅值曲线的振荡幅度、振荡频率和特征频率数量提高(降低), 同时第一共振频率和相对应的动刚度幅值均会明显减小(增大)。

(5) 当隔振材料的剪切模量小于桩周土体时, 随着剪切模量的减小, 动刚度幅值曲线的振荡幅度

和振荡频率也会随之提高, 同时共振频率和相对应的动刚度幅值均会减小。

(6) 当隔振材料的剪切模量大于桩周土体时, 动刚度幅值曲线的振荡属性基本消失, 且随着剪切模量的增大, 在 1~80 Hz 频段内的动刚度幅值均会小幅提高。

参 考 文 献

- [1] 王一千, 刘鹏辉, 李腾, 等. 车辆段轨道减振措施对上盖建筑减振降噪效果试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(21): 284-291.
WANG Yi-gan, LIU Peng-hui, LI Teng, et al. Tests for effect of track vibration reduction measures in a depot on vibration and noise reduction of a superstructure[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2020, 39(21): 284-291.
- [2] 李秋义, 罗伟, 朱彬, 等. 广州地铁 1 号线橡胶浮置板道床服役性能评估[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(12): 7-11.
LI Qiu-yi, LUO Wei, ZHU Bin, et al. Service performance evaluation of rubber floating slab track for Guangzhou metro line 1[J]. **Railway Standard Design**, 2021, 65(12): 7-11.
- [3] MA M, LI M H, QU X Y, et al. Effect of passing metro trains on uncertainty of vibration source intensity: monitoring tests[J]. **Measurement**, 2022, 193: 110992.
- [4] ZHANG X, LUO W L, LIN B H, et al. Vibration isolation effects of barriers filled with ceramsite and sand: full-scale model test and numerical investigation[J]. **Construction and Building Materials**, 2022, 341: 127789.
- [5] 张希, 罗威力, 林本海, 等. 陶粒、砂填充连续与非连续屏障隔振效果的全尺试验与数值研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 1): 567-579.
ZHANG Xi, LUO Wei-li, LIN Ben-hai, et al. Full-scale test and numerical investigation on vibration isolation effect of continuous and discontinuous barriers filled with ceramsite and sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.1): 567-579.
- [6] WANG Y, ZHANG Z S, GAO M. Field test on the isolation effects of Duxseal-WIB subjected to vertical excitation forces[J]. **Journal of Testing and Evaluation**, 2022, 50(3): 1377-1387.
- [7] 梁秋河, 汪大洋, 周云, 等. 地铁上盖超高层结构竖向振动台模型试验——试验结果与数值计算对比验证研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(5): 22-28.
LIANG Qiu-he, WANG Da-yang, ZHOU Yun, et al. Study on vertical shaking table model test of super high-rise structure over subway: comparison and verification of test results and numerical calculation[J]. **Building Structure**, 2022, 52(5): 22-28.
- [8] 杨维国, 李昊, 康凯, 等. 地下高铁致结构振动全过程分析及隔振支座减隔振性能研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(1): 254-264.
YANG Wei-guo, LI Hao, KANG Kai, et al. Analysis of whole process of structural vibration induced by underground high-speed train and performance of vibration isolation support[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2022, 41(1): 254-264.
- [9] 汤康生, 吴燕, 盛涛, 等. 基于新型支座的地铁上盖高层建筑基础隔振模型试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(5): 76-81, 163.
TANG Kang-sheng, WU Yan, SHENG Tao, et al. Experimental research on base isolation model of over-track high-rise buildings using a new type of bearing[J]. **Industrial Construction**, 2021, 51(5): 76-81, 163.
- [10] 罗威力, 邓世邦. 一种减振工程桩的结构及其成型施工方法: CN115354652A[P]. 2022-11-18.
LUO Wei-li, DENG Shi-bang. Structure and forming construction method of a vibration reduction engineering pile: CN115354652A[P]. 2022-11-18.
- [11] ULGEN D, TOYGAR O. Screening effectiveness of open and in-filled wave barriers: a full-scale experimental study[J]. **Construction and Building Materials**, 2015, 86: 12-20.
- [12] TANDON K, KUMAR D, AYOTHIRAMAN R, et al. Numerical evaluation of tire chips-filled trench barriers for effective vibration isolation[J]. **Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control**, 2022, 42(1): 325-344.
- [13] 舒进辉, 马强, 常立君. 非饱和土地基中复合多层波阻板对 S 波的隔离效应[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 217-231.
SHU Jin-hui, MA Qiang, CHANG Li-jun. Isolation effect of S-wave by composite multilayer wave impeding block in unsaturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(1): 217-231.
- [14] YU J, CAI Y Y, WU W B. Effect of sediment on vertical dynamic impedance of rock-socketed pile with large diameter[J]. **Journal of Central South University**, 2013, 20(10): 2856-2862.
- [15] 吴文兵, 蒋国盛, 窦斌, 等. 嵌岩特性对嵌岩桩桩顶纵

- 向振动阻抗的影响研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(7): 51-57.
- WU Wen-bing, JIANG Guo-sheng, DOU Bin, et al. Influence of rock-socketed characteristics on vertical dynamic impedance at head of a rock-socketed pile[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2014, 33(7): 51-57.
- [16] 杨晓, 唐洁. 成层饱和土中考虑横向惯性的单桩纵向振动[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1560-1566.
- YANG Xiao, TANG Jie. Vertical vibration of single pile with transversal inertia effect in stratified saturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1560-1566.
- [17] 高远, 侯宏伟, 程宇慧. 饱和黏弹性土中单桩的纵向振动[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(3): 18-23.
- GAO Yuan, HOU Hong-wei, CHENG Yu-hui. Longitudinal vibrations of a single pile in saturated viscoelastic soil[J]. **Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2014, 36(3): 18-23.
- [18] 崔春义, 孟坤, 武亚军, 等. 轴对称径向非均质土中单桩纵向振动特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 570-579, 591.
- CUI Chun-yi, MENG Kun, WU Ya-jun, et al. Dynamic impedance for vertical vibration of a single pile in axisymmetrically surrounding soil considering radial inhomogeneity[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(2): 570-579, 591.
- [19] CAI Y Y, LIU Z H, LI T B, et al. Vertical dynamic response of a pile embedded in radially inhomogeneous soil based on fictitious soil pile model[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2020, 132: 106038.
- [20] ZHENG C, GAN S, LUAN L, et al. Vertical dynamic response of a pile embedded in a poroelastic soil layer overlying rigid base[J]. **Acta Geotechnica**, 2021, 16: 977-983.
- [21] WU W B, WANG K H, ZHANG Z Q, et al. Soil-pile interaction in the pile vertical vibration considering true three-dimensional wave effect of soil[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2013, 37(17): 2860-2876.
- [22] WU W B, JIANG G S, HUANG S G, et al. Vertical dynamic response of pile embedded in layered transversely isotropic soil[J]. **Mathematical Problems in Engineering**, 2014, 2014: 126916.
- [23] 李振亚, 王奎华. 考虑横向惯性效应时非均质土中大直径桩纵向振动特性及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 243-253.
- LI Zhen-ya, WANG Kui-hua. Vertical vibration of a large diameter pile embedded in inhomogeneous soil considering the transverse inertia effect and its applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(1): 243-253.
- [24] CUI C Y, MENG K, XU C S, et al. Analytical solution for longitudinal vibration of a floating pile in saturated porous media based on a fictitious saturated soil pile model[J]. **Computers and Geotechnics**, 2021, 131: 103942.
- [25] 马文杰, 王长丹, 王炳龙, 等. 层状非饱和土中端承桩竖向振动响应的半解析算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊 1): 3767-3777.
- MA Wen-jie, WANG Chang-dan, WANG Bing-long, et al. Semi-analytical method for vertical vibration response of end-bearing pile in layered unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2023, 42(Suppl.1): 3767-3777.
- [26] 胡昌斌, 王奎华, 谢康和. 基于平面应变假定基桩振动理论适用性研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 595-601.
- HU Chang-bin, WANG Kui-hua, XIE Kang-he. Study on theories of axial response of dynamically loaded single piles based on plane strain assumption[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(5): 595-601.
- [27] 李强, 王奎华, 谢康和. 饱和土中大直径嵌岩桩纵向振动特性研究[J]. 振动工程学报, 2005, 18(4): 500-505.
- LI Qiang, WANG Kui-hua, XIE Kang-he. Dynamic response for vertical vibration of large diameter pile in saturated soil[J]. **Journal of Vibration Engineering**, 2005, 18(4): 500-505.
- [28] NOVAK M. Dynamic soil reaction for plane strain case[J]. **Journal of Engineering Mechanics Division**, 1978, 104(4): 953-959.
- [29] 刘林超, 杨晓. 基于薄层法的饱和土桩纵向振动研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 92-98.
- LIU Lin-chao, YANG Xiao. Study of longitudinal vibrations of pile in saturated soil based on layer method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 92-98.
- [30] 王奎华, 高柳, 肖偲, 等. 考虑桩周土竖向作用大直径楔形桩纵向振动特性[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 223-231, 242.
- WANG Kui-hua, GAO Liu, XIAO Si, et al. Dynamic characteristic of large diameter tapered pile considering vertical reaction of pile surrounding soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.2): 223-231, 242.

- [31] 龚志超, 杨冬英. 考虑横向惯性效应时饱和土中大直径桩的纵向振动研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 163-168.
- GONG Zhi-chao, YANG Dong-ying. Vertical vibration of a large diameter pile with transversal inertia effect in saturated soil[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2018, 37(2): 163-168.
- [32] 刘鑫, 吴文兵, 王立兴, 等. 大直径桩纵向振动广义轴对称连续圈层模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(9): 1916-1925.
- LIU Xin, WU Wen-bing, WANG Li-xing, et al. Generalized axisymmetric continuous circle model for longitudinal vibration of large-diameter piles and its application[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2023, 45(9): 1916-1925.
- [33] 王奎华, 杨冬英, 张智卿. 基于复刚度传递多圈层平面应变模型的桩动力响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 825-831.
- WANG Kui-hua, YANG Dong-ying, ZHANG Zhi-qing, et al. Study on dynamic response of pile based on complex stiffness transfer model of radial multizone plane strain[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(4): 825-831.
- [34] FORBRIGER T. Inversion of shallow-seismic wavefields: I. wavefield transformation[J]. **Geophysical Journal International**, 2003, 153(3): 719-734.
- [35] DEGRANDE G, BADSAR S A, LOMBAERT G, et al. Application of the coupled local minimizers method to the optimization problem in the spectral analysis of surface waves method[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2008, 134(10): 1541-1553.
- [36] SCHEVENELS M, LOMBAERT G, DEGRANDE G, et al. A probabilistic assessment of resolution in the SASW test and its impact on the prediction of ground vibrations[J]. **Geophysical Journal International**, 2008, 172(1): 262-275.
- [37] 周永强, 盛谦, 李娜娜, 等. 非一致性地震动作用下某长大隧洞动力响应的时空效应初步研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2287-2297.
- ZHOU Yong-qiang, SHENG Qian, LI Na-na, et al. Preliminary study on time-space effect of the dynamic response of long tunnel under non-uniform ground motion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(8): 2287-2297.
- [38] LI Z Y, WANG K H. Vertical dynamic impedance of large-diameter pile considering its transverse inertia effect and construction disturbance effect[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 2017, 35(2): 256-265.
- [39] LIANG Z M, CUI C Y, MENG K, et al. An analytical method for the longitudinal vibration of a large-diameter pipe pile in radially heterogeneous soil based on rayleigh-love rod model[J]. **Mathematics**, 2020, 8(9): 1442.
- [40] 刘阔阔. 橡胶-混凝土组合式周期隔振屏障性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- LIU Kuo-kuo. Study on the performance of rubber-concrete composite periodic vibration isolation barriers[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [41] 马蒙, 刘建磊, 孙宁, 等. 桩基刚度影响因素分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1939-1944.
- MA Meng, LIU Jian-lei, SUN Ning, et al. Analysis of factors influencing dynamic stiffness of pile foundations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(7): 1939-1944.
- [42] HECKL M, HAUCK G, WETTSCHURECK R. Structure-borne sound and vibration from rail traffic[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1996, 193(1): 175-184.
- [43] 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(4-5): 678-705.
- [44] LOMBAERT G, DEGRANDE G. Ground-borne vibration due to static and dynamic axle loads of intercity and high-speed trains[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2009, 319(3-5): 1036-1066.
- [45] WOODS R D. Screening of surface wave in soils[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division**, 1968, 94(4): 951-979.
- [46] WOODS R D, JEDELE L P. Energy-attenuation relationship from construction vibrations[C]//Proceedings of ASCE Symposium on Vibration Problems in Geotechnical Engineering. Detroit: ASCE, 1985: 229-246.
- [47] AMICK H. A frequency-dependent soil propagation model[C]//SPIE Conference on Current Developments in Vibration Control for Optomechanical Systems. Denver: SPIE-International Society Optical Engineering Bellingham, 1999: 72-80.
- [48] JIN Q Y, THOMPSON D J, LURCOCL D E J, et al. A 2.5D finite element and boundary element model for the ground vibration from trains in tunnels and validation using measurement data[J]. **Journal of Sound and Vibration**,

- 2018, 422: 373-389.
- [49] 陈文化, 张谦. 地铁列车进出站时土层空间振动特性分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3656-3661, 3669.
- CHEN Wen-hua, ZHANG Qian. Space vibration of subsoil during metro train arriving at or leaving station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3656-3661, 3669.
- [50] 夏禾, 张楠, 曹艳梅. 列车对周围地面及建筑物振动影响的试验研究[J]. 铁道学报, 2004, 26(4): 93-98.
- XIA He, ZHANG Nan, CAO Yan-mei. Experimental study of train-induced vibrations of ground and nearby buildings[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2004, 26(4): 93-98.
- [51] 王福彤, 陶夏新, 崔高航, 等. 地面城轨交通近轨道区域自由地表振动实测研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 131-135.
- WANG Fu-tong, TAO Xia-xin, CUI Gao-hang, et al. Test in situ for free ground vibration near urban railway line[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2011, 30(5): 131-135.
- [52] 黄强, 黄宏伟, 张锋, 等. 饱和软土层地铁列车运行引起的环境振动研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 563-567.
- HUANG Qiang, HUANG Hong-wei, ZHANG Feng, et al. Research on environmental vibration response of soft saturated soil due to moving metro train[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Suppl.1): 563-567.
- [53] 中华人民共和国国家环境保护局. GB 10071—88 城市区域环境振动测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- State Environmental Protection Bureau of the People's Republic of China. GB 10071—88 Measure method of environmental vibration of urban area[S]. Beijing: Standard Press of China, 1988.
- [54] 中华人民共和国国家环境保护局. GB 10070—88 城市区域环境振动标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- State Environmental Protection Bureau of the People's Republic of China. GB 10070—88 Standard of environmental vibration in urban area[S]. Beijing: Standard Press of China, 1988.

(上接第 3080 页)

《岩土力学》2023 年第 12 期被 EI 收录论文 (27 篇, 收录率 100%)

序号	论文题名	作者	页码
14	砂土中海上锚板抗拔极限状态的可靠度分析	李雨婷, 陈晓斌, 何鹏鹏	3495—3500
15	硅藻土的微观结构特征及其对物理性质的影响	徐倚晴, 张先伟, 王 港, 等	3501—3511
16	岩体裂隙几何结构对其渗流传热特性的影响	田 霄, 叶祖洋, 罗 旺	3512—3521
17	盐溶液环境下钙质砂渗透性影响因素分析	郑思维, 胡明鉴, 霍玉龙, 等	3522—3530
18	岩土工程连续极限分析方法拓展与验证	王祖乐, 孔德琼, 杜越明, 等	3531—3540
19	基于 Hoek-Brown 准则的层理岩石强度模型研究	李国泉, 王航龙, 彭 俊, 等	3541—3550
20	基于纳米压痕试验的大理岩宏观力学参数关联性研究	陈显辉, 程 毅, 谢欣玥, 等	3551—3564
21	考虑圆孔不均匀收敛和空间效应的基坑坑外土体水平位移场分析	应宏伟, 熊一帆, 沈华伟, 等	3565—3576
22	劲性复合桩挤土效应及承载力作用机制研究	朱 锐, 周 峰, 陈廷柱, 等	3577—3586
23	强降雨影响下盾构隧道开挖面稳定性的三维对数螺旋模型上限解	张治国, 罗 杰, 朱正国, 等	3587—3601
24	基于离散元法模拟的冻融砂岩微观破裂演化特征研究	宋勇军, 孙银伟, 李晨婧, 等	3602—3616
25	动静载下全长砂浆锚固玻璃钢锚杆受力及失效特征分析	王文杰, 刘 超, 黄永祥, 等	3617—3628
26	倾斜液化场地-桩基-结构体系在近场脉冲与非脉冲地震动下地震响应差异分析	正哲, 贾科敏, 许成顺, 等	3629—3638
27	海上风机导管架基础疲劳分析	杜越明, 孔德琼, 王思刘, 等	3639—3652