

DOI: 10.11779/CJGE20220409

# 垫层隔震基础动力阻抗薄层法求解及参数分析

梁发云<sup>1,2</sup>, 李通达<sup>1,2</sup>, 贾亚杰<sup>1,2</sup>, 张浩<sup>1</sup>

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

**摘要:** 基于半无限弹性地基模型, 引入薄层法, 推导出层状地基中垫层隔震基础的动力阻抗解答, 与黏弹性边界有限元模型进行对比, 验证了方法的合理性。针对垫层隔震基础的水平和摇摆动力阻抗, 开展了系统的参数分析。模型的计算结果表明: 在 0~10 Hz, 垫层厚度、桩数对摇摆阻抗均有着明显的影响, 垫层厚度越大, 垫层隔震基础的摇摆阻抗越小; 桩数越多, 垫层隔震基础的摇摆阻抗越大。此外, 相同条件下, 桩长越大, 垫层隔震基础摇摆阻抗实部越大; 垫层剪切波速对基础的水平和摇摆阻抗都有着一定的影响。该方法可用于分析垫层隔震基础在地震荷载作用下的动力特性。

**关键词:** 动力刚度; 阻抗函数; 垫层隔震基础; 层状地基; 薄层法

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)05-0883-10

**作者简介:** 梁发云(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程的教学科研工作。Email: fyliang@tongji.edu.cn。

## Thin-layer method for dynamic impedance of isolated foundation with cushions and its parameter analysis

LIANG Fayun<sup>1,2</sup>, LI Tongda<sup>1,2</sup>, JIA Yajie<sup>1,2</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the semi-infinite elastic foundation model, the dynamic impedance solution of the isolated foundation with cushions in layered soils is deduced by introducing the thin-layer method. The proposed method is verified by the viscoelastic boundary finite element model. A systematic parameter analysis is carried out for the horizontal and rocking dynamic impedances of the isolated foundation with cushions. The calculated results by the model show that within the range of 0~10 Hz, the thickness of the cushions and the number of piles have obvious effects on the rocking impedances: the greater the thickness of the cushions, the smaller the rocking impedance of the isolated foundation with cushions; the more the piles, the greater the rocking impedance of the isolated foundation with cushions. In addition, under the same conditions, the greater the pile length, the greater the real part of the swing impedance of the cushion isolation foundation. The shear wave velocity of the cushion has a certain influence on the horizontal and rocking impedances of the foundation. The proposed method is suitable for analyzing the dynamic characteristics of the isolated foundation with cushions under earthquake loads.

**Key words:** dynamic stiffness; impedance function; isolated foundation with cushion; layered soil; thin-layer method

## 0 引言

垫层隔震基础是一种适用于水深 50 m 以上的跨海桥梁基础形式, 2004 年建成的希腊 Rion-Antirion 大桥开创性地采用了这种新型基础形式(图 1), 妥善地解决了跨海桥梁深水基础在设计施工上的关键难题<sup>[1]</sup>。该基础关键之处在于采用刚性桩加固软弱地基解决了主塔基础的承载变形问题, 同时通过垫层的隔震效应消减传递至上部结构的地震作用, 为复杂环境下的深水工程建设提供了创新的思路。其后, 2017 年建成通车的土耳其 Izmit 跨海大桥<sup>[2]</sup>及 2022 年初刚刚建成通车的土耳其 Canakkale 大桥<sup>[3]</sup>(主跨 2023 m,

目前世界第一跨径悬索桥)均采用该基础型式。

垫层隔震基础虽然在 Rion-Antirion 大桥等实际工程中得到了成功应用, 但更多地是从概念上把握, 其中仍有一些关键问题亟待解决, 如垫层隔震基础自身动力特性及其上部结构地震动力响应的影响机制等。垫层隔震基础有别于常规的桩基础或天然地基形式, 在开展动力分析时, 需考虑地基、垫层和上部结构之间的相互作用, 目前国内外对于垫层隔震基础地震响

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878487)

收稿日期: 2021-04-07

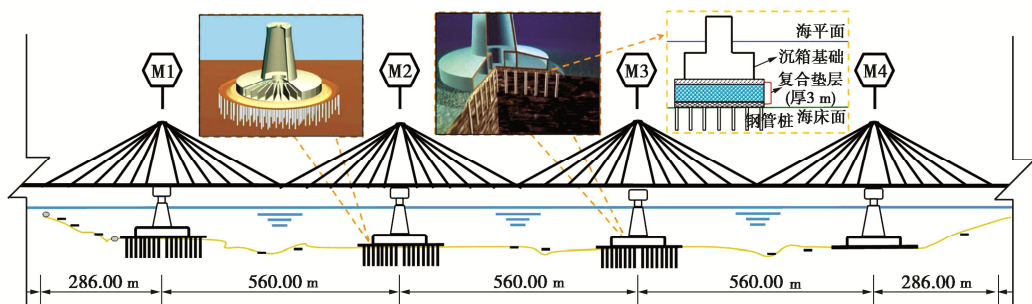


图 1 Rion-Antirion 大桥及其垫层隔震基础示意

Fig. 1 Schematic diagram of Rion-Antirion bridge and isolated foundation with cushions

应的研究还较少<sup>[4-5]</sup>。对于复杂体系的土-结构动力相互作用问题，子结构法是常用的研究方法之一<sup>[6]</sup>。对于采用垫层隔震基础的跨海桥梁而言，子结构法无疑是一种合适的方法，其中的重要问题之一便是确定垫层隔震基础的动力阻抗。

半无限地基模型和动力 Winkler 地基模型是分析地基基础动力阻抗的两种常用方法。在半无限地基模型方面，Kaynia<sup>[7]</sup>采用边界积分法求解了群桩基础的阻抗；Cairo 等<sup>[8-9]</sup>则重点分析了竖向激励下的群桩阻抗及其相互作用因子。动力 Winkler 地基模型方面，Gazetas 等<sup>[10]</sup>、Makris 等<sup>[11]</sup>将地基简化为动力 Winkler 地基模型，采用动力相互作用因子方法计算了均质地基和 Gibson 地基中群桩基础阻抗。除上述方法外，薄层法因形式简洁，适合分析层状介质与结构的动力相互作用特性，也被用来分析基础的阻抗。Lysmer 等<sup>[12]</sup>较早将该方法用于分析土-结构动力相互作用的问题。此后，Wass<sup>[13-14]</sup>通过函数变换得到了层状介质中不同荷载激励下的频域 Green 函数，分析了地震荷载作用下的群桩动力响应。Sen<sup>[15]</sup>将桩模拟为梁单元，采用薄层法分析了单桩阻抗函数的变化规律。蒋通等<sup>[16-17]</sup>对薄层法插值函数进行了改进，提高了计算精度。薄层法的求解思路是将地基沿垂直方向分割成若干薄层，假设每一薄层是均匀连接的。由于垫层的存在，垫层隔震基础中分层状况尤为明显。相较于其他方法，薄层法这类离散方法更适合于垫层隔震基础的模拟。

群桩基础或沉井基础均可以选择一个合适的坐标作为控制点来计算基础的阻抗，但是对于垫层隔震基础，因桩与沉井之间的垫层为柔性，难以确定一个控制点来建立其与基础之间的位移关系，目前鲜有针对垫层隔震基础动力阻抗的研究文献发表。考虑到在以横向作用为主的地震激励下，基础运动以水平和摇摆为主，且水平、摇摆阻抗对基础固有频率有着明显的影响<sup>[18]</sup>。本文基于薄层法构建分析模型，求解得到垫层隔震基础的动力阻抗，对比分析了群桩基础、桩筏基础和垫层隔震基础阻抗的异同点，并通过参数分析

研究了垫层厚度、垫层剪切波速、桩长及桩数等因素对垫层隔震基础水平及摇摆阻抗的影响。

### 1 薄层法求解思路

垫层隔震基础因筏板与桩之间存在柔性垫层，两者并非刚性连接，无法直接建立筏板与各桩桩顶之间的位移关系。为解决上述问题，建立如图 2 所示的虚土桩模型，将桩顶与筏板之间的垫层视为桩的一部分，则垫层隔震基础可视为桩身参数变化的桩筏基础<sup>[19]</sup>。基于桩筏基础的阻抗计算方法，以筏板底部中心点为控制点，确定控制点与各虚拟桩顶之间的位移协调关系，由此计算垫层隔震基础的阻抗。推导过程中，假设筏板为刚体，且地基土与桩、筏板紧密连接，不发生分离。

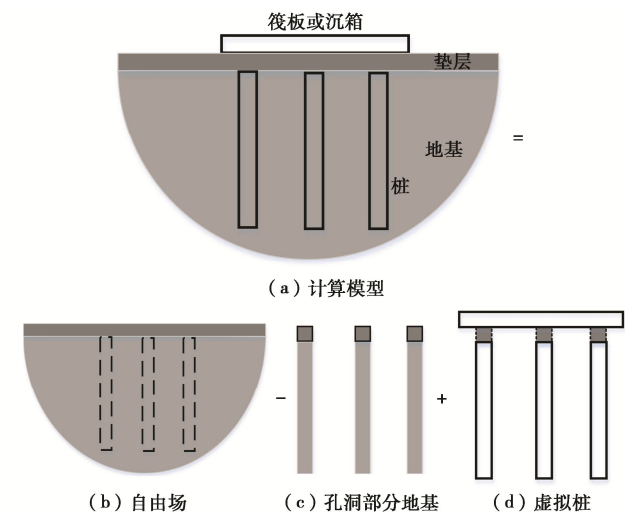


图 2 垫层隔震基础计算模型

Fig. 2 Model for isolated foundation with cushions

将地基土分为一定数量的薄层，并在筏板与土体的接触面以及虚土桩的顶部和底部位置均设置节点，如图 3 所示。节点位于各薄层的分界面上，桩节点分为桩身节点和桩头节点，桩身节点与模拟桩身的梁单元节点位移一致。

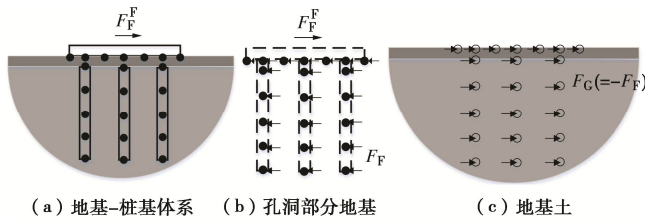


图3 地基-桩基础体系分离示意

Fig. 3 Separation of soil-pile foundation system

设上部结构激振力为  $\{F_F^F\}$ , 地基-基础体系运动方程为

$$\left( \begin{bmatrix} K_{FF} & K_{FG} \\ K_{GF} & K_{GG} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_F \\ M_G \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \{u_F\} \\ \{u_G\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F_F^F\} \\ \{0\} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中:  $[K]$ ,  $[M]$  分别为刚度矩阵和质量矩阵;  $\{u\}$  为绝对位移。

采用 Tabatabaie-Raissi 提出的容积法<sup>[20]</sup>, 将地基作为自由场, 在结构的基础所占地基内部空间设置节点。结合 Muki 等<sup>[21]</sup>提出的力虚土桩分析模型, 将基础体系的实际刚度矩阵  $K_{FF}$  及质量  $M_F$  表示成与基础相同体积的排土刚度矩阵  $K_{FF}^G$  及质量矩阵  $M_F^G$  与刚度矩阵  $(K_{FF} - K_{FF}^G)$  及质量矩阵  $(M_F - M_F^G)$  的叠加, 从而可以分别得到两个子结构的运动方程, 其中基础体系:

$$\left( \left( [K_{FF}] - [K_{FF}^G] \right) - \omega^2 \left( [M_F] - [M_F^G] \right) \right) \{u_F\} = \{F_F^F\} + \{F_F\}. \quad (2)$$

地基体系:

$$\left( \begin{bmatrix} K_{FF} & K_{FG} \\ K_{GF} & K_{GG} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_F \\ M_G \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \{u_F\} \\ \{u_G\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F_G\} \\ \{0\} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中:  $F_F$ ,  $F_G$  分别表示由于体系分离而产生的基础体系与地基体系间的相互作用力, 需满足:

$$\{u_F\} + \{F_G\} = \{0\}. \quad (4)$$

根据式 (3) 的物理意义, 由图 3 (c) 可知, 地基体系受自由场地震动作用, 且在基础与地基共有节点处产生相互作用力。在分析中将问题分为入射问题和激振问题, 其中自由场地震产生的位移用  $\{u^*\}$  表示, 基础与地基共有节点相互作用力产生的位移用  $\{\Delta u\}$  表示。

对于  $\{u^*\}$ , 在容积法叠加中, 基础部分由同体积的土置换, 其即为地震动自由场位移:

$$\{u_F^*\} = \{u_g(i\omega)\}. \quad (5)$$

对于  $\{\Delta u\}$ , 将  $\begin{bmatrix} \{u_F\} \\ \{u_G\} \end{bmatrix}$  替换为  $\begin{bmatrix} \{\Delta u_F\} \\ \{\Delta u_G\} \end{bmatrix}$  将  $\{\Delta u_G\}$  消

去, 得到仅包括地基与基础的共有节点位移  $\{\Delta u_F\}$  的方程:

$$\{\Delta u_F\} = [A(i\omega)] \{F_G\}. \quad (6)$$

式中:  $[A(i\omega)]$  联系了基础与地基共有节点之间激振力和位移之间的关系, 是地基的动柔度矩阵。

$$\{F_G\} = [A(i\omega)]^{-1} \{u_F\} - \{F^*(i\omega)\}. \quad (7)$$

式中:  $\{F^*(i\omega)\} = [A(i\omega)]^{-1} \{u_g(i\omega)\}$ , 表示在地震波自由场作用下为使基础不发生运动所施加的广义约束力, 将式 (4), (7) 代入式 (2) 中可得

$$\left( \left( [K_{FF}] - [K_{FF}^G] + [A(i\omega)]^{-1} \right) - \omega^2 \left( [M_F] - [M_F^G] \right) \right) \{u_F\} = \{F_F^F\} + \{F^*(i\omega)\}. \quad (8)$$

令基础周围地基阻抗函数为

$$[R(i\omega)] = [A(i\omega)]^{-1} - [K_{FF}^G] + \omega^2 [M_F^G]. \quad (9)$$

式 (8) 简化为

$$\left( [K_{FF}] + [R(i\omega)] - \omega^2 [M_F] \right) \{u_F\} = \{F_F^F\} + \{F^*(i\omega)\}. \quad (10)$$

将基础总位移  $\{u_F\}$  分为相互作用力  $\{F_F^F\}$  产生的位移  $\{\Delta u_F\}$  和地震驱动力  $\{F^*(i\omega)\}$  产生的位移  $\{u_F^*\}$ :

$$\left( [K_{FF}] + [R(i\omega)] - \omega^2 [M_F] \right) \{\Delta u_F\} = \{F_F^F\}, \quad (11)$$

$$\left( [K_{FF}] + [R(i\omega)] - \omega^2 [M_F] \right) \{u_F^*\} = \{F^*(i\omega)\}. \quad (12)$$

式 (11) 可进一步改写为

$$[S(i\omega)] \{\Delta u_F\} = \{F_F^F\}. \quad (13)$$

式中:

$$[S(i\omega)] = [A(i\omega)]^{-1} + [K_F] - [K_F^G] - \omega^2 \left( [M_F] - [M_F^G] \right). \quad (14)$$

对于垫层隔震基础, 基础刚度矩阵  $[K_F]$  及质量矩阵  $[M_F]$  分别由筏板的刚度矩阵  $[k_B]$  和质量矩阵  $[m_B]$  以及虚拟桩的刚度矩阵  $[k_P]$  和质量矩阵  $[m_P]$  构成。基础排土部分的刚度矩阵  $[K_F^G]$  及质量矩阵  $[M_F^G]$  分别由筏板同体积排土体的刚度矩阵及质量矩阵  $[k_B^G]$ ,  $[m_B^G]$  和与虚土桩同体积的排土桩的刚度矩阵及质量矩阵  $[k_P^G]$ ,  $[m_P^G]$  构成,

$$[K_F] = \begin{bmatrix} [k_B] \\ [k_P] \end{bmatrix}, [M_F] = \begin{bmatrix} [m_B] \\ [m_P] \end{bmatrix}, [K_F^G] = \begin{bmatrix} [k_B^G] \\ [k_P^G] \end{bmatrix}, [M_F^G] = \begin{bmatrix} [m_B^G] \\ [m_P^G] \end{bmatrix}. \quad (15)$$

基础的阻抗函数定义为无质量刚体基础产生单位位移时所需要的激振力, 故筏板假定为刚性并不计其质量。在计算时, 式 (15) 中筏板的刚度矩阵  $[k_B]$ 、排土体的质量矩阵  $[m_B^G]$  的取值为 0。将矩阵  $[S(i\omega)]$  分为 4 个部分<sup>[6]</sup>, 式 (13) 可记为

$$\begin{Bmatrix} \{F_F^F\}_1 \\ \{F_F^F\}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [S]_{11} & [S]_{12} \\ [S]_{21} & [S]_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta u_F\}_1 \\ \{\Delta u_F\}_2 \end{Bmatrix} \quad (16)$$

脚标 1 代表基础刚体部分, 包括承台节点和群桩基础桩头节点, 脚标 2 代表桩身节点。计算基础阻抗时, 桩身节点不受外力作用, 故  $\{P\}_2=\{0\}$ , 由式 (16) 可得:

$$\{F_F^F\}_1 = [R]\{\Delta u_F\}_1 \quad (17)$$

式中:  $[R]=[S]_{11}-[S]_{12}[S]_{22}^{-1}[S]_{21}$ 。

以承台底面中心  $o$  参考点, 设在其上的作用力为  $\{P\}_0=(p_x, p_y, p_z, M_x, M_y, M_z)^T$ , 刚体部分位移为  $\{U\}_0=(U_x, U_y, U_z, \phi_x, \phi_y, \phi_z)^T$ 。刚体位移  $\{U\}_0$  与各刚体节点位移向量  $\{F_F^F\}_1$  之间的关系, 及激振力  $\{P\}_0$  和刚体各节点激振力  $\{F_F^F\}_1$  之间的关系为

$$\begin{cases} \{\Delta u_F\}_1 = [T]\{U\}_0, \\ \{P\}_0 = [T]^T \{F_F^F\}_1. \end{cases} \quad (18)$$

$[T]$  为几何变换矩阵。刚体内  $m$  个节点的几何变换矩阵  $[T]$  为

$$[T] = \begin{bmatrix} [T]_1 & [T]_2 & \cdots & [T]_i & \cdots & [T]_m \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

$$\text{式中: } [T]_i = \begin{bmatrix} 1 & z_i - z_0 & 0 \\ 0 & -(x_i - x_0) & 1 \end{bmatrix}.$$

结合式 (17), (18) 可得

$$\{P\}_0 = [K]\{U\}_0 \quad (20)$$

式中:  $[K]$  为基础的阻抗函数<sup>[8]</sup>,

$$[K] = [T]^T [R] [T] = \begin{bmatrix} K_{HH} & K_{HR} & 0 \\ K_{RH} & K_{RR} & 0 \\ 0 & 0 & K_{VV} \end{bmatrix} \quad (21)$$

## 2 数值计算方法和算例验证

### 2.1 基于黏弹性边界的有限元方法

由于目前学界鲜见垫层隔震基础动力阻抗的相关研究成果。有鉴于此, 本文基于 ABAQUS 软件, 采用黏弹性边界有限元的方法验证所提出的薄层法计算垫层隔震基础阻抗的合理性。在此之前, 需首先验证所建立的黏弹性边界有限元模型计算基础阻抗的合理性。黏弹性边界是指模型边界施加连续分布的弹簧-阻尼系统, 借此实现无限地基的模拟。研究表明, 切向与法向的人工边界系数  $\alpha_T$  和  $\alpha_N$  在 (0.35, 0.65) 及 (0.8, 1.2) 范围内取值可以得到良好的计算效果<sup>[9]</sup>, 本文中  $\alpha_T=0.5$ ,  $\alpha_N=1$ 。为验证本文计算方法的正确性, 将本文数值计算结果与经典算例进行对比。

现以群桩基础动力阻抗函数为例进行说明。建立

均质弹性半空间内  $3 \times 3$  群桩基础的 1/4 模型, 计算域水平取 27 m, 竖向取 30 m。数值模型和计算参数选取来自文献<sup>[7]</sup>, 如表 1 所示。

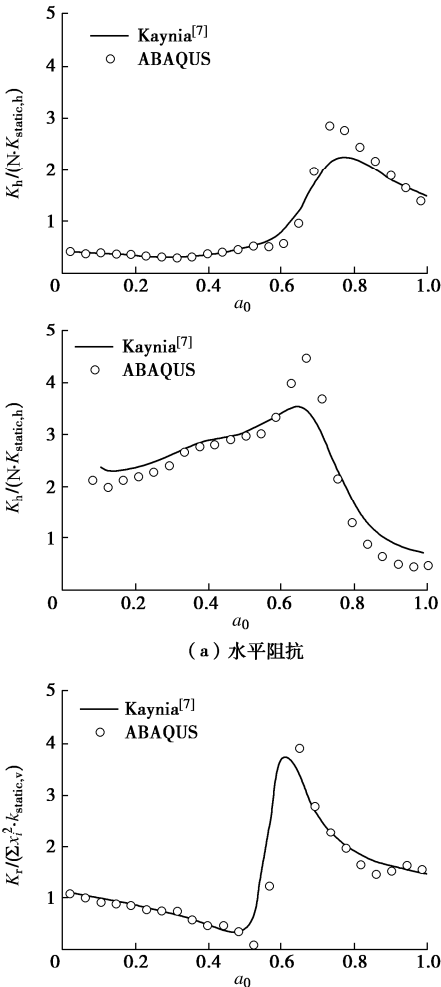
表 1  $3 \times 3$  群桩基础数值模型参数

Table 1 Numerical model parameters of $3 \times 3$ pile groups			
参数	量值	参数	量值
土体泊松比 $\nu_s$	0.4	桩泊松比 $\nu_p$	0.25
土体阻尼 $\beta_s$	0.05	桩阻尼 $\beta_p$	0.0
土桩弹性模量比 $(E_s/E_p)$	$10^{-3}$	桩间距直径比 $(s/d)$	5
土桩密度比 $(\rho_s/\rho_p)$	0.7	桩长细比 $(L/d)$	15

基础的阻抗函数可以表示为

$$K = K_{Re} + iK_{Imag} = k + i\omega c \quad (22)$$

式中:  $K_{Re}$ ,  $K_{Imag}$  分别为阻抗函数  $K$  的实部和虚部;  $k=K_{Re}$  为基础的刚度,  $c=K_{Imag}/\omega$  为基础的等效黏滞阻尼系统;  $\omega$  为圆频率。图 4 中  $K_h$ ,  $C_h$  分别为水平阻抗的实部和虚部,  $K_r$ ,  $C_r$  分别为摇摆阻抗的实部和虚部。如图 4 可知,  $3 \times 3$  群桩基础阻抗的有限元计算结果与 Kaynia<sup>[7]</sup> 的积分计算结果较为接近, 表明所建立黏弹性边界有限元模型较为合理, 为验证垫层隔震基础阻抗计算结果奠定了基础。



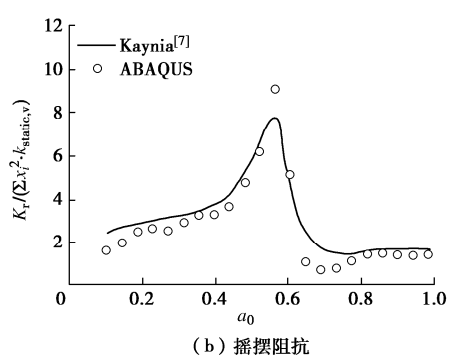


图 4 3×3 群桩基础阻抗

Fig. 4 Dynamic impedances of 3×3 pile groups

2.2 与筏板基础、群桩基础和桩筏基础的对比

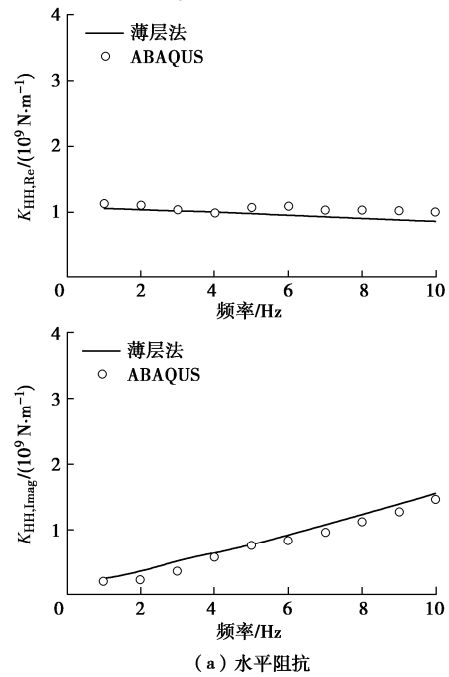
在验证黏弹性边界有限元方法计算基础阻抗的可行性后, 可借助该方法间接验证薄层法的可行性。继续建立模型计算各基础的阻抗函数, 桩数为3×3, 桩径0.5 m, 桩间距3 m, 桩长10 m, 筏板尺寸为9 m×9 m。本节的参数取值参考文献[22], 如表2所示。

表 2 算例计算参数

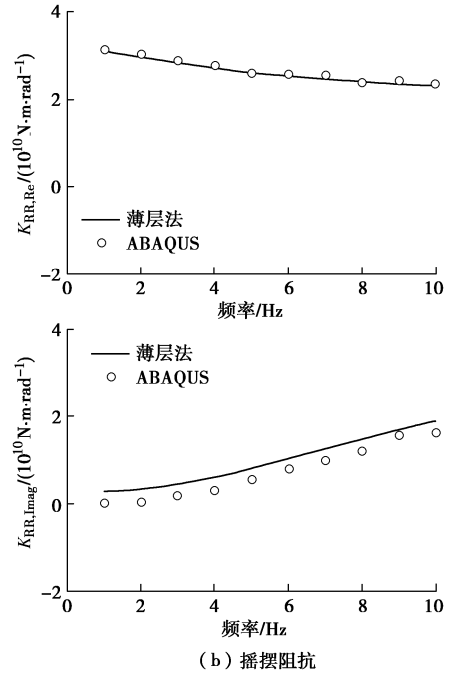
Table 2 Parameters of example			
参数	量值	参数	量值
土体密度	1800 kg/m <sup>3</sup>	桩泊松比	0.167
土体泊松比	0.4	剪切波速	150 m/s
土体阻尼比	0.05	桩密度	2500 kg/m <sup>3</sup>
桩弹性模量	25.5 GPa		

在计算垫层隔震基础阻抗函数时, 因假设筏板与垫层不发生滑移和分离, 故无需建立筏板模型, 只需耦合筏板位置土体与控制点的位移。

如图5所示, 其中 $K_{HH,Re}$ ,  $K_{HH,Imag}$ 为水平阻抗的实部、虚部,  $K_{RR,Re}$ ,  $K_{RR,Imag}$ 为摇摆阻抗的实部、虚部。模型计算结果与ABAQUS黏弹性边界计算结果接近。



(a) 水平阻抗

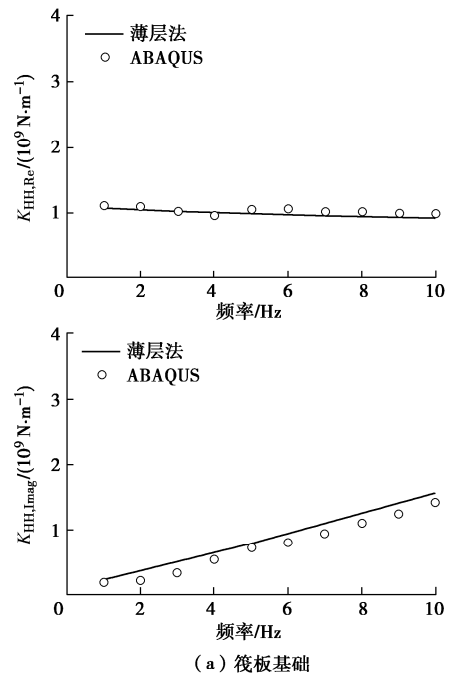


(b) 摇摆阻抗

图 5 垫层隔震基础阻抗 (垫层厚度 1d)

Fig. 5 Impedances of isolated foundation with cushions (cushion thickness of 1d)

当上述模型中虚土桩、桩的参数与周围土体相同, 并设置垫层厚度为 0 时, 模型为筏板基础; 当删除上部筏板, 设置垫层厚度为 0, 并使虚土桩与下部桩的参数相同时, 模型为群桩基础; 当虚土桩与下部桩的参数相同, 并设置垫层厚度为 0 时, 模型为桩筏基础。图 6, 7 分别为筏板基础、群桩基础、桩筏基础的水平、摇摆阻抗。薄层法结果与 ABAQUS 频域黏弹性边界数值计算结果一致。进一步验证了薄层法与频域黏弹性边界数值模型的合理性。此外, 对比各基础阻抗可得, 垫层隔震基础阻抗并不是筏板阻抗与群桩阻抗的简单叠加。垫层隔震基础阻抗与桩筏基础阻抗较为接近。



(a) 筏板基础

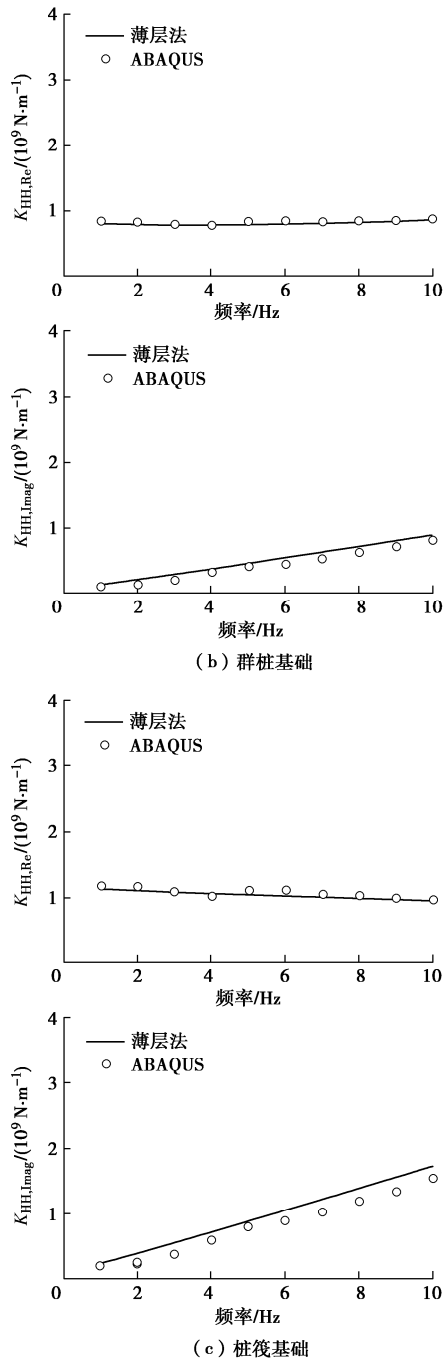


图 6 基础水平阻抗

Fig. 6 Horizontal impedances of foundation

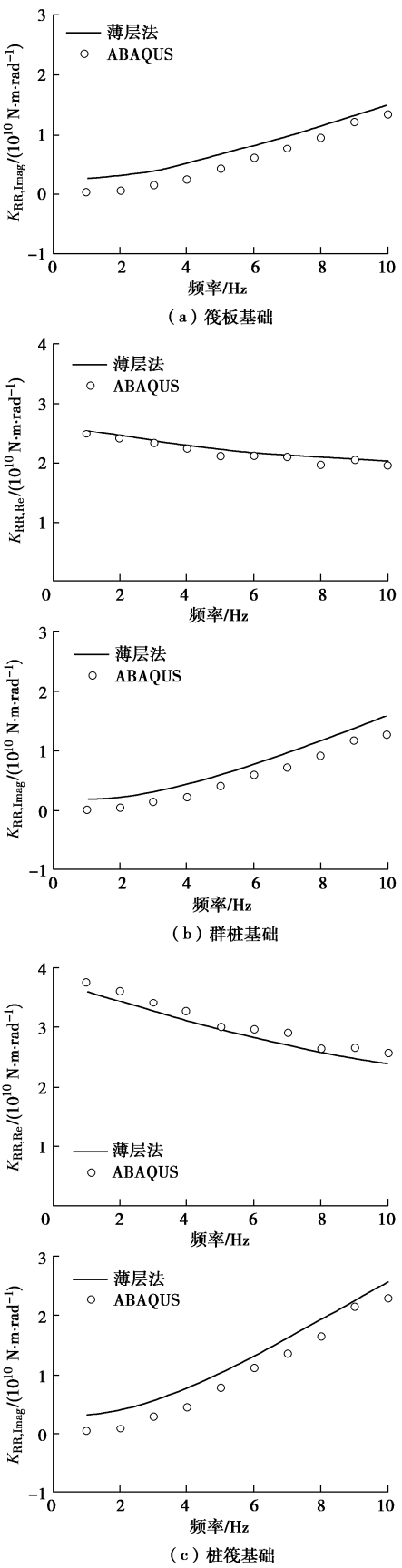
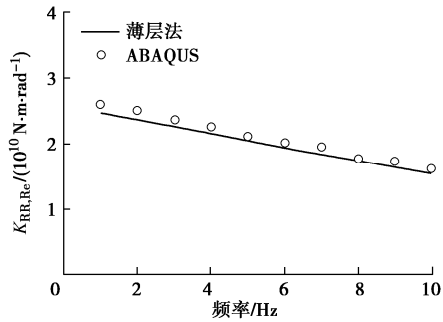


图 7 基础摇摆阻抗

Fig. 7 Rocking impedances of foundation

3 垫层隔震基础阻抗的参数分析

为进一步研究垫层隔震基础的动力特性, 通过参数分析的方法, 研究了垫层厚度、垫层剪切波速、桩长以及桩数等因素对基础阻抗的影响。因垫层隔震基础筏板尺寸对基础的阻抗影响较大, 在进行垫层隔震基础参数分析时, 保持筏板尺寸不变 (9 m×9 m), 土体及桩的参数如表 3 所示。基准模型的垫层厚度为 2 d, 剪切波速 150 m/s, 桩长 20d, 桩数 3×3, 当某个参数调整时, 其他参数均保持不变。由于造成基础较大振幅的频率多在 10 Hz 以下, 参考文学章等<sup>[22]</sup>频率取值范围, 本节将频率范围限定在 0~10 Hz。

表 3 模型参数

Table 3 Parameters of model	
因素	量值
垫层厚度	0d, 1d, 2d, 4d
垫层剪切波速/(m·s <sup>-1</sup> )	150, 200, 250, 300
桩长	10d, 15d, 20d, 25d
桩数	2×2, 3×3, 4×4

3.1 垫层厚度对垫层隔震基础阻抗的影响

图 8 为垫层厚度改变时基础的水平、摇摆阻抗。水平阻抗方面: 0~10 Hz, 桩筏基础实部略大于垫层隔震基础。随激振频率增加, 垫层厚度影响逐渐凸显。激振频率为 5 Hz 时, 垫层厚度为 4d 的模型水平阻抗实部与垫层厚度为 1d 的模型水平阻抗实部近乎相等。激振频率 10 Hz 时, 垫层厚度为 4d 模型的水平阻抗实部(0.91×10<sup>9</sup> N/m)为垫层厚度为 1d 模型的水平阻抗实部(0.95×10<sup>9</sup> N/m)的 95.8%。水平阻抗虚部方面, 桩筏基础同样大于垫层隔震基础。摇摆阻抗方面, 频率相同时, 桩筏基础阻抗大于垫层隔震基础, 随垫层厚度增加, 桩筏基础与垫层隔震基础阻抗差异增大。以桩筏基础模型、垫层厚度为 1d 模型和垫层厚度为 4d 模型为例, 激振频率为 10 Hz 时, 三者摇摆阻抗实部分别为 2.40×10<sup>10</sup>, 2.32×10<sup>10</sup>, 2.02×10<sup>10</sup> N·m/rad; 与此同时, 桩筏基础模型, 垫层厚度为 1d 模型和垫层厚度为 4d 模型的摇摆阻抗虚部分别为 2.57×10<sup>10</sup>, 1.90×10<sup>10</sup>, 1.40×10<sup>10</sup> N·m/rad。

3.2 桩长对垫层隔震基础阻抗的影响

图 9 为桩长改变时垫层隔震基础的水平、摇摆阻抗。由图 9 可知, 桩长对垫层隔震基础的水平阻抗影响较小, 在 0~10 Hz 频率范围内, 激振频率相同时, 不同桩长垫层隔震基础水平阻抗之间的差异较小。对于摇摆阻抗, 激振频率相同时, 不同桩长隔震基础摇摆阻抗的差异较大。以桩长 10d, 25d 的模型为例, 激振频率 5 Hz 时, 两模型摇摆阻抗实部分别为 2.23×

10<sup>9</sup>, 2.57×10<sup>10</sup> N·m/rad, 后者是前者的 115.2%; 与此同时, 桩长为 10d, 25d 模型的摇摆阻抗虚部分别为 0.71×10<sup>10</sup>, 0.76×10<sup>10</sup> N·m/rad, 后者是前者的 107.0%。当激振频率为 10 Hz 时, 桩长为 10d, 25d 模型的摇摆阻抗实部分别为 1.81×10<sup>10</sup>, 2.31×10<sup>10</sup> N·m/rad, 后者是前者的 127.6%; 与此同时, 桩长为 10d, 25d 模型的摇摆阻抗虚部分别为 1.75×10<sup>10</sup>, 1.60×10<sup>10</sup> N·m/rad, 后者是前者的 91.4%。

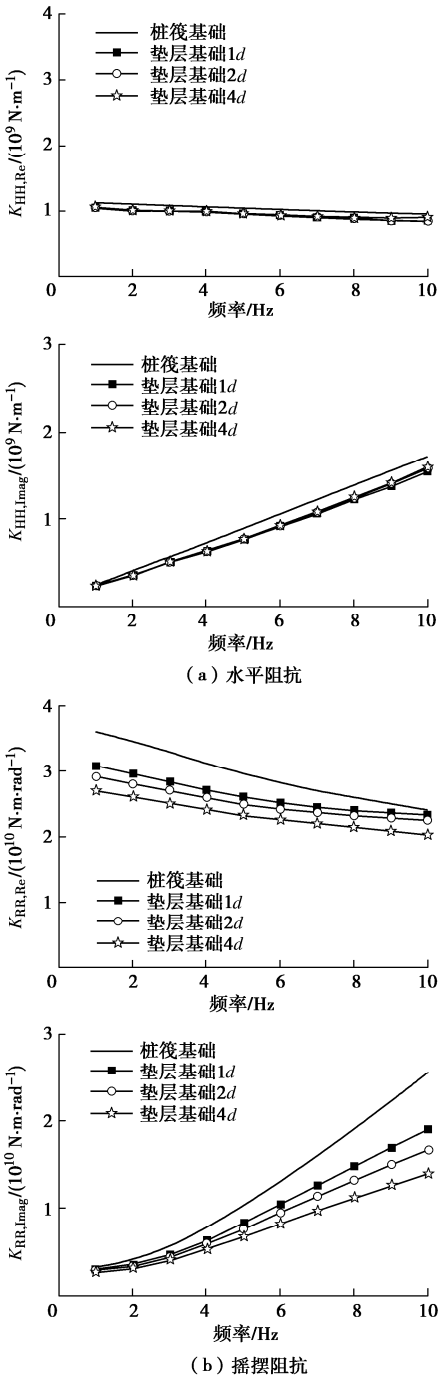


图 8 垫层厚度对基础阻抗的影响

Fig. 8 Influences of cushion thickness on foundation impedance



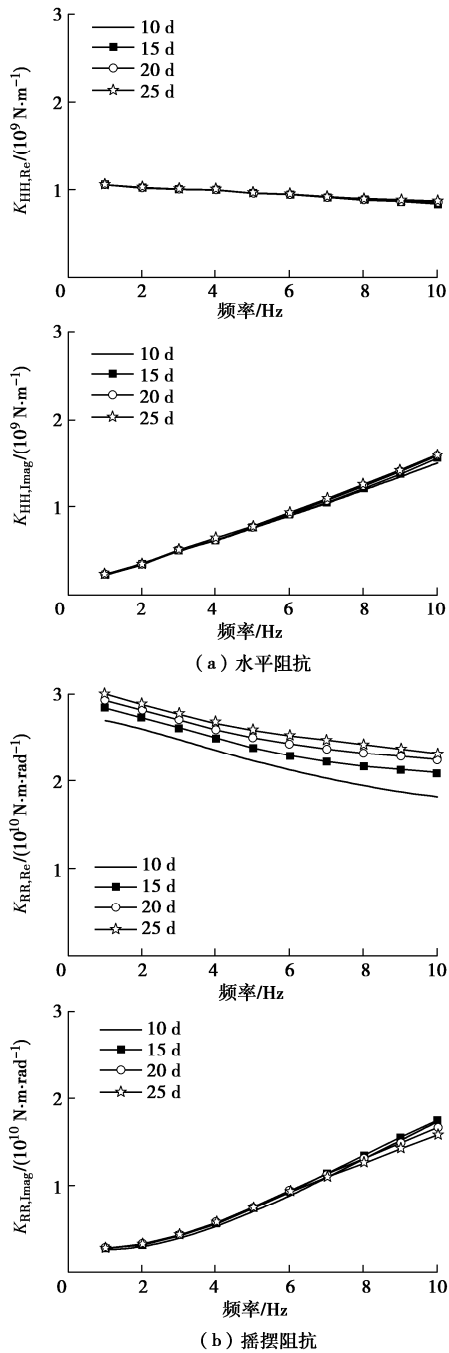


图9 桩长对基础阻抗的影响

Fig. 9 Influences of pile length on foundation impedance

### 3.3 桩数对垫层隔震基础阻抗的影响

图10为桩数分别取 $2\times 2$ 、 $3\times 3$ 、 $4\times 4$ 时垫层隔震基础的水平、摇摆阻抗。桩数对水平阻抗的影响不明显。摇摆阻抗方面,当激振频率相同时,桩数越多,基础摇摆阻抗越大。例如,当激振频率为5 Hz时,桩数为 $2\times 2$ 、 $3\times 3$ 、 $4\times 4$ 模型的摇摆阻抗实部分别为 $2.19\times 10^{10}$ 、 $2.49\times 10^{10}$ 、 $2.80\times 10^{10}$  N·m/rad;与此同时,桩数为 $2\times 2$ 、 $3\times 3$ 、 $4\times 4$ 模型的摇摆阻抗虚部分别为 $0.66\times 10^{10}$ 、 $0.76\times 10^{10}$ 、 $0.88\times 10^{10}$  N·m/rad。

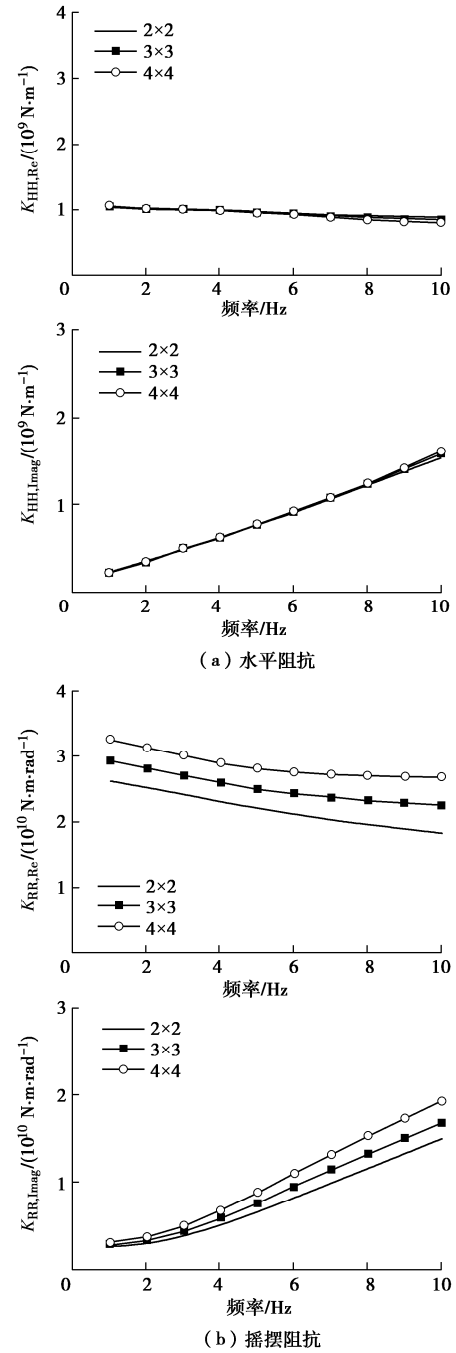


图10 桩数对基础阻抗的影响

Fig. 10 Influences of pile number on foundation impedance

### 3.4 垫层剪切波速对垫层隔震基础阻抗的影响

图11为垫层剪切波速为150, 200, 250, 300 m/s时垫层隔震基础的水平、摇摆阻抗。由图11可知,在0~10 Hz频率范围内,激振频率相同时,剪切波速越大,阻抗越大。以剪切波速为150, 300 m/s的模型为例,激振频率为10 Hz时,两模型的水平阻抗实部分别为 $0.85\times 10^9$ 、 $1.55\times 10^9$  N/m,后者是前者的182.3%;与此同时,剪切波速为150, 300 m/s模型的水平阻抗虚部分别为 $1.58\times 10^9$ 、 $2.80\times 10^9$  N/m,后者是前者的177.2%。剪切波速对摇摆阻抗的影响与水平阻抗类似,激振频率相同时,剪切波速越大,阻抗越大。同



样以剪切波速为 150 m/s, 300 m/s 的模型为例, 激振频率为 10 Hz 时, 两模型摇摆阻抗实部分别  $2.24 \times 10^{10}$ ,  $2.83 \times 10^{10}$  N·m/rad, 后者是前者的 126.3%; 与此同时, 剪切波速为 150, 300 m/s 模型的摇摆阻抗虚部分别  $1.67 \times 10^{10}$ ,  $2.83 \times 10^{10}$  N·m/rad, 后者是前者的 169.5%。垫层剪切波速对基础水平、摇摆阻抗均有着一定的影响。

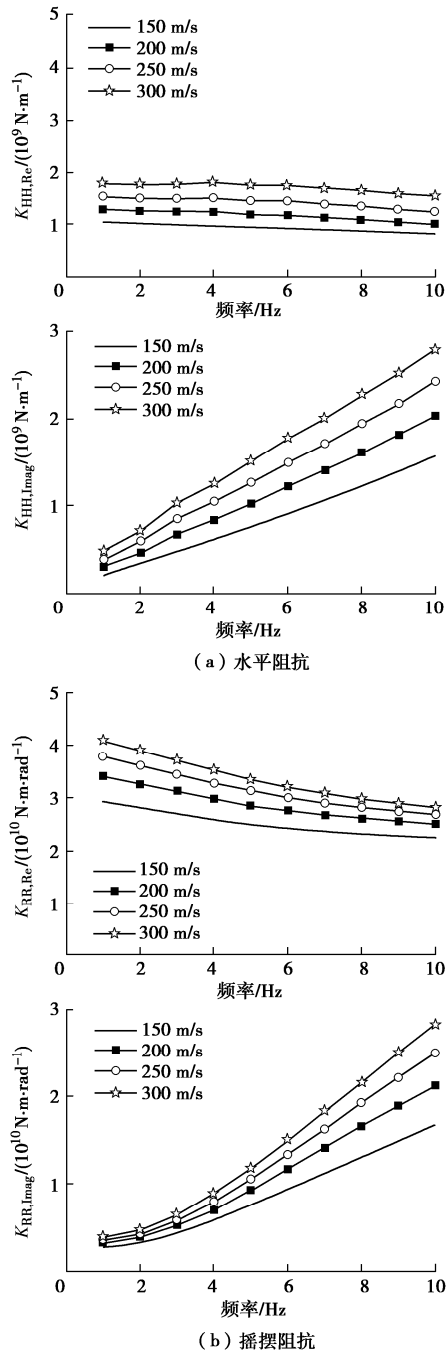


图 11 剪切波速对基础阻抗的影响

Fig. 11 Influences of shear wave velocity on foundation impedance

## 4 结 论

基于半无限弹性地基模型, 引入薄层法, 求解了

垫层隔震基础的动力阻抗, 结合参数分析, 得到 3 点结论。

(1) 基于薄层法, 推导了垫层隔震基础阻抗函数的计算公式, 通过与其他数值计算结果对比, 验证了本方法的适用性。

(2) 对比分析了筏板基础、群桩基础、桩筏基础及垫层隔震基础的阻抗, 结果表明, 垫层隔震基础阻抗与桩筏基础阻抗更为接近, 垫层隔震基础阻抗并不是筏板基础阻抗与群桩基础阻抗的简单叠加。

(3) 垫层厚度、桩长及桩数主要影响基础的摇摆阻抗, 而垫层剪切波速对基础水平和摇摆阻抗均有明显的影响。

## 参考文献:

- [1] COMBAULT J. The Rion-Antirion bridge—when a dream becomes reality[J]. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2011, **5**(4): 415-426.
- [2] STEENFELT J S, FOGED B, AUGUSTESEN A H. Izmit Bay Bridge-Geotechnical challenges and innovative solutions [J]. *International Journal of Bridge Engineering*, 2015, **3**(3): 53-68.
- [3] KROON I B, POLK H, FUGLSANG K. 1915 çanakkale bridge-Meeting the challenge[M]// *Springer Tracts on Transportation and Traffic*. Cham: Springer International Publishing, 2021: 55-69.
- [4] PECKER A. Enhanced seismic design of shallow foundations: example of the Rion-Antirion Bridge [C]// *Proceeding of 4th Athenian Lecture on Geotechnical Engineering*. Athens, 2006.
- [5] LIANG F Y, LI T D, QIAN Y, et al. Investigating the seismic isolation effect of the cushioned pile raft foundation in soft clay through dynamic centrifuge tests[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, **142**: 106554.
- [6] 肖晓春, 林皋, 迟世春. 桩-土-结构动力相互作用的分析模型与方法[J]. *世界地震工程*, 2002, **18**(4): 123-130. (XIAO Xiaochun, LIN Gao, CHI Shichun. Analysis model and methods of pile-soil-structure dynamic interaction[J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2002, **18**(4): 123-130. (in chinese))
- [7] KAYNIA A M. Dynamic Stiffness and Seismic Response of Pile Groups [D]. CAMBRIDGE: Massachusetts Institute of Technology, 1982.
- [8] CAIRO R, CONTE E, DENTE G. Analysis of pile groups under vertical harmonic vibration[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, **32**(7): 545-554.

- [9] CAIRO R, CONTE E, DENTE G. Interaction factors for the analysis of pile groups in layered soils [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2005, **131**(4): 525-528.
- [10] GAZETAS G, MAKRIS N. Dynamic pile-soil-pile interaction Part I: Analysis of axial vibration[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1991, **20**(2): 115-132.
- [11] MAKRIS N, GAZETAS G. Dynamic pile-soil-pile interaction Part II: Lateral and seismic response[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1992, **21**(2): 145-162.
- [12] LYSMER J, WAAS G. Shear waves in plane infinite structures[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1972, **98**(1): 85-105.
- [13] WASS G. Dynamisch belastete fundamente auf geschichtetem baugrund[J]. *VDI Berichte*, 1980, **381**: 185-189. (WASS G. Dynamically liacted for foundations on layered ground[J]. *VDI Berichte*, 1980, **381**: 185-189. (in German))
- [14] WASS G, HARTMANN H. Seismic analysis of pile foundations including pile-soil-pile interaction[C]// *Proc 8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, 1984.
- [15] SEN R. Green's function implementation for pile analysis[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1987, **113**(4): 594-609.
- [16] 蒋 通, 程昌熟. 用薄层法分析层状地基中各种基础的阻抗函数[J]. *力学季刊*, 2007, **28**(2): 180-186. (JIANG Tong, CHENG Changshu. Impedance functions analysis of various foundations embedded in stratified soils by using thin layer method[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2007, **28**(2): 180-186. (in Chinese))
- [17] 蒋 通, 程昌熟. 用二次形函数薄层法分析弹性层状地基中的动力问题[J]. *力学季刊*, 2006, **27**(3): 495-504. (JIANG Tong, CHENG Changshu. Dynamic analysis of elastic stratified soil problems by using thin layer method with quadratic shape function[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2006, **27**(3): 495-504. (in Chinese))
- [18] HE R, PAK R Y S, WANG L Z. Elastic lateral dynamic impedance functions for a rigid cylindrical shell type foundation[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2017, **41**(4): 508-526.
- [19] 陈龙珠, 梁发云. 桩筏基础的积分方程解法及其参数分析[J]. *岩土工程学报*, 2004, **26**(6): 733-738. (CHEN Longzhu, LIANG Fayun. An integral equation approach and parametric analysis for piled raft foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(6): 733-738. (in Chinese))
- [20] TABATABAIE-RAISSI M. The Flexible Volume Method for Dynamic Soil-Structure Interaction Analysis [D]. Berkeley: University of California, 1982.
- [21] MUKI R, STERNBERG E. Elastostatic load-transfer to a half-space from a partially embedded axially loaded rod [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1970, **6**(1): 69-90.
- [22] 文学章, 尚守平. 层状地基中桩筏基础的动力阻抗研究[J]. *工程力学*, 2009, **26**(8): 95-99. (WEN Xuezhang, SHANG Shouping. Research on dynamic impedance functions of pile-raft foundation in layered soil[J]. *Engineering Mechanics*, 2009, **26**(8): 95-99. (in Chinese))