

韩冰,陈少林,梁建文.结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响[J].地震工程学报,2019,41(6):1574-1580.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1574

HAN Bing, CHEN Shaolin, LIANG Jianwen. Effects of Structure-Soil-Structure Dynamic Interaction on the Frequency of Structural Systems[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1574-1580. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1574

# 结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响

韩 冰<sup>1</sup>, 陈少林<sup>1</sup>, 梁建文<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学土木工程系, 江苏 南京 210016; 2. 天津大学建筑工程学院土木工程系, 天津 300072)

**摘要:** 采用间接边界元法, 研究结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响。数值分析表明, 与不考虑相邻结构的结果相比, 结构-土-结构动力相互作用可能增大或减小结构的系统频率, SH 波垂直入射时, 影响程度达 5%, SV 波垂直入射时, 影响程度达 3%。随着结构间距离的增大, 结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响程度并不单调下降, 还与场地的动力特性和结构的动力特性有关。结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响可能对结构健康监测结果造成一定影响, 值得注意。

**关键词:** 结构-土-结构动力相互作用; 结构健康监测; 系统频率; SH 波; SV 波

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1574-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1574

## Effects of Structure-Soil-Structure Dynamic Interaction on the Frequency of Structural Systems

HAN Bing<sup>1</sup>, CHEN Shaolin<sup>1</sup>, LIANG Jianwen<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The effects of structure-soil-structure dynamic interaction on structural system frequency were studied using the indirect boundary element method. Numerical analysis showed that, compared to those of stand-alone structures, the structure-soil-structure dynamic interaction may increase or decrease system frequency. The influence degree was about 5% under vertical SH incidence and 3% under vertical SV wave incidence. With increasing distance between structures, the effects on the structural system frequency did not show a monotone decrease, which was related to the dynamic characteristics of the site and structure. These results suggest that more attention should be focused on the fact that the influence of structure-soil-structure dynamic interaction on system frequency may affect monitoring results of structural health.

**Keywords:** structure-soil-structure dynamic interaction; structural health monitoring; system frequency; SH wave; SV wave

收稿日期: 2018-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578372)

第一作者简介: 韩 冰(1987-), 女, 博士后, 主要从事地震工程研究。E-mail: hanbingxing@126.com。

通信作者: 梁建文(1965-), 男, 教授, 主要从事地震工程研究。E-mail: liang@tju.edu.cn。

### 0 引言

由于振动的基础和结构可看作是额外的波源,因此相邻结构间通过土体存在着相互作用,即结构-土-结构动力相互作用。近几十年来,人们采用解析法<sup>[1-2]</sup>、数值法<sup>[3-4]</sup>、试验法<sup>[5-6]</sup>或地震动观测法<sup>[7-8]</sup>等手段对结构-土-结构动力相互作用进行了广泛研究。文献<sup>[9]</sup>对该领域的研究现状进行了详细介绍。

对于结构健康监测而言,由于结构的振动频率对结构损伤敏感,通过监测结构振动频率的变化来判断结构损伤程度是目前最基本的监测手段。但有研究表明<sup>[10]</sup>,结构的基本振动频率容易受环境因素的影响,进而对监测结果造成干扰。本文作者的研究<sup>[11-12]</sup>表明,相邻结构的存在可能使结构的振动频率发生偏移。本文将在此基础上,进一步系统地研究结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响,旨在回答如下两个问题:

- (1) 结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响是否显著?
- (2) 随结构间距离的增大,结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响如何变化?

### 1 方法

如图 1 所示,层状半空间由弹性基岩上覆土层组成,基岩由如下参数确定:两个拉梅常数为  $\lambda_R$  和  $G_R$ ,压缩波速为  $\alpha_R$ ,剪切波速为  $\beta_R$ ,泊松比为  $\nu_R$ ,质量密度为  $\rho_R$ ,滞后阻尼比  $\xi_R$ ;土层厚度为  $D$ ,其参数与基岩相同但下标为“L”。两个结构完全相同,刚性基础埋置于土层中,基础半径为  $a$ ,两基础间的距离为  $b$ ,基础单位长度质量是  $M_0$ ,被每个基础替换

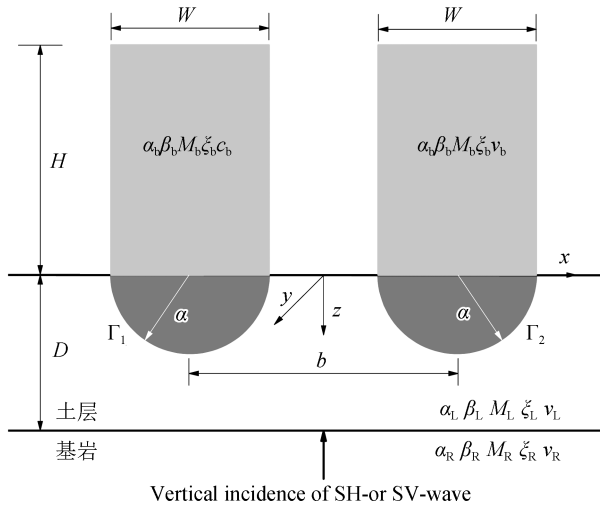


图 1 模型图  
Fig.1 The model

掉的土的单位长度质量为  $M_s$ 。上部结构由剪力墙表示,其参数与基岩参数相同但下标为“b”,上部结构的单位长度质量  $M_b$ ,高度为  $H$ ,宽度为  $W$ 。基础与土的交界面用  $\Gamma_1, \Gamma_2$  表示,  $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$ ,  $\Gamma_1, \Gamma_2$  以及剪力墙结构与基础的交界面均为刚性连接,不会产生任何相对滑移。垂直入射 SH 或 SV 波,圆频率为  $\omega$ 。定义无量纲参数  $\epsilon = \beta_L H / (\beta_b a)$  来表征上部结构的柔度,  $\epsilon$  越大结构的刚度越小;定义无量纲入射频率  $\eta = \omega a / \beta_L$ 。

刚性基础的位移  $\Delta$  由两部分组成:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 \tag{1}$$

$\Delta_1 = [\Delta_{11}, \Delta_{12}]$  称为基础的有效输入( $\Delta_{11}$  和  $\Delta_{12}$  分别表示基础 1 和基础 2 的有效输入),是由于入射波在基础边界处的散射作用产生; $\Delta_2 = [\Delta_{21}, \Delta_{22}]$  是由于波的辐射作用,基础质量惯性力和剪力墙质量惯性力产生的位移( $\Delta_{21}$  和  $\Delta_{22}$  分别表示基础 1 和基础 2 的位移)。具体计算时首先计算边界  $\Gamma$  上自由场的位移响应  $U_f(x, z)$  和应力响应  $T_f(x, z)$ ;然后计算层状场地中斜线荷载位移格林函数  $g_u(x, z)$  和应力格林函数  $g_t(x, z)$ ;并在  $\Gamma$  上作用虚拟均布斜线荷载来模拟由于两个基础存在而产生的散射场,虚拟荷载幅值的大小由基础的刚性位移条件来确定;之后,根据虚拟均布荷载幅值可确定出两基础体系的刚度矩阵(阻抗函数)  $[K]_{2 \times 2}$  (SH 波) 或  $[K]_{6 \times 6}$  (PSV 波):

SH 波:

$$K_{ij} = G_L [k_{ij} + i(\omega a / \beta_L) c_{ij}]; i, j = y_1, y_2 \tag{2}$$

PSV 波:

$$K_{ij} = G_L [k_{ij} + i(\omega a / \beta_L) c_{ij}]; i, j = x_1, \varphi_1, z_1, x_2, \varphi_2, z_2 \tag{3}$$

式中:  $y_1$  和  $y_2$  是平面外模型中(SH 波)基础 1 和基础 2 沿着  $y$  方向的自由度;  $x_1, \varphi_1, z_1$  是平面内模型中(SV 波)基础 1 水平向、转角、竖向自由度;  $x_2, \varphi_2, z_2$  是平面内模型中(SV 波)基础 2 水平向、转角、竖向自由度;  $k_{ij}$  和  $c_{ij}$  称为无量纲刚度系数和无量纲辐射阻尼系数。最后,基础位移幅值的第一部分  $\Delta_1$  由刚度矩阵和自由场动力响应和格林函数求得,  $\Delta_2$  通过基础的动力平衡方程确定。

SH 波入射时上部结构的相对位移幅值与自由场地表位移幅值的比值用  $|\bar{\Delta}_1^{rel}|$  表示,SV 波入射时用  $|\bar{\Delta}_1^{relx}|$  表示。具体计算过程见文献<sup>[11-12]</sup>。其中  $|\bar{\Delta}_1^{rel}|$  或  $|\bar{\Delta}_1^{relx}|$  第一峰值对应的频率成为结构的系统频率。

## 2 数值分析

### 2.1 结构-土-结构动力相互作用

图2给出了层状场地  $D/a=4$ 、 $\beta_R/\beta_L=2$ 、结构间距离  $b/W=3$  时二维平面外模型(SH波)的基础阻抗函数  $[\mathbf{K}]_{2 \times 2}$ 。为了便于对比相邻结构存在对

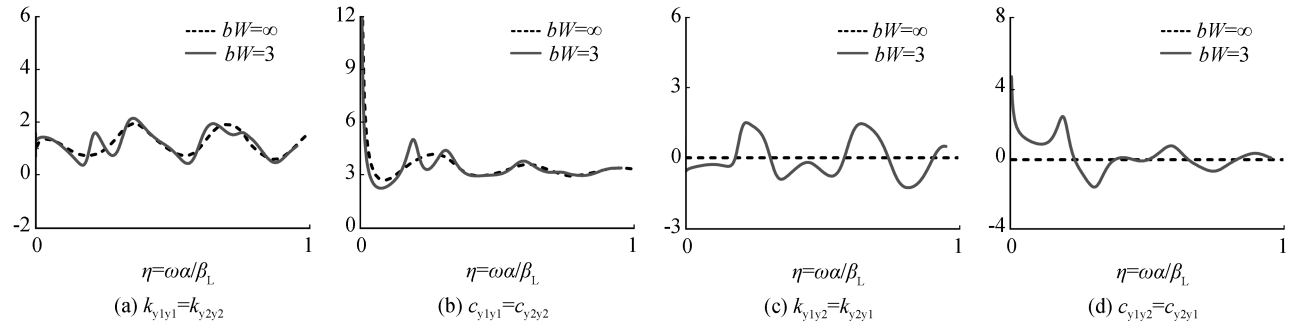


图2 二维平面外模型(SH波)的基础阻抗函数(场地参数为  $D/a=4$ 、 $\beta_R/\beta_L=2$ ，结构间距离为  $b/W=3$  和  $b/W=\infty$ )

Fig.2 Impedance function of foundation for 2D out-plane model (SH wave) ( $D/a=4$ ,  $\beta_R/\beta_L=2$ ,  $b/W=3$ , and  $b/W=\infty$ )

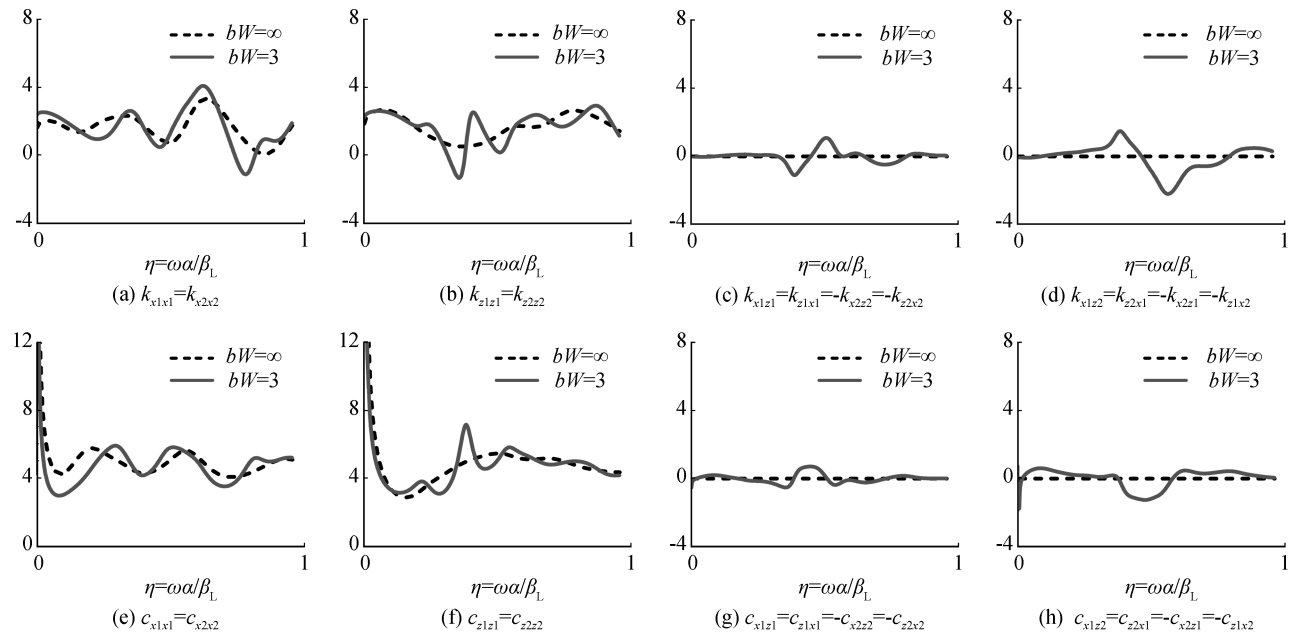


图3 二维平面内模型(PSV波)基础阻抗函数(仅部分结果,  $D/a=4$ 、 $\beta_R/\beta_L=2$ 、 $b/W=3$  和  $b/W=\infty$ )

Fig.3 Part of the impedance function of foundation for 2D in-plane model (PSV wave)

( $D/a=4$ ,  $\beta_R/\beta_L=2$ ,  $b/W=3$ , and  $b/W=\infty$ )

模型(SV波)的结构顶部相对位移幅值频谱,其中场地参数与图2和图3相同,结构的参数为柔度系数  $\epsilon=(\beta_L H)/(\beta_b a)=4$ ,上部结构与基础质量比  $M_b/M_0=5$ ,基础与替换掉的土的质量比  $M_0/M_s=0.2$ ,结构高度  $H=4a$ ,结构宽度  $W=2a$ 。可以看出,虽然结构动力响应主要受结构动力特性的影响,但相邻结构的存在通过影响阻抗函数而改变结构的动力响应,从而影响结构系统频率。

阻抗函数的影响,图2中还给出了相应无相邻结构( $b/W=\infty$ )的结果。图3给出了相应的二维平面内模型(PSV波)基础阻抗函数  $[\mathbf{K}]_{6 \times 6}$  的部分结果。可以看出,相邻结构的存在,影响基础的阻抗函数,并使两个基础的自由度耦合在一起。

图4给出了二维平面外模型(SH波)和平面内

### 2.2 结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响规律

下面将通过两个算例来分析结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响规律。其中,算例一将层状场地等效为简单的基岩上部的单一土层场地,分析场地动力特性(土层厚度和基岩与土层刚度比)对结构-土-结构动力相互作用体系系统频率的影响规律;算例二以位于美国加州理工学院的 Mil-

likan Library building 为例,来分析结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响程度。

(1) 算例一

图 5 和图 6 分别给出了 SH 波和 SV 波垂直入

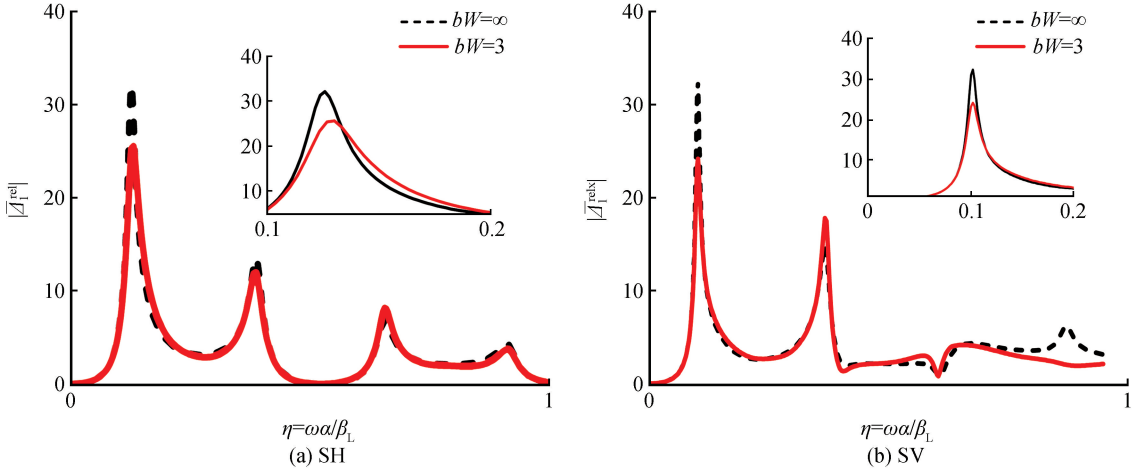
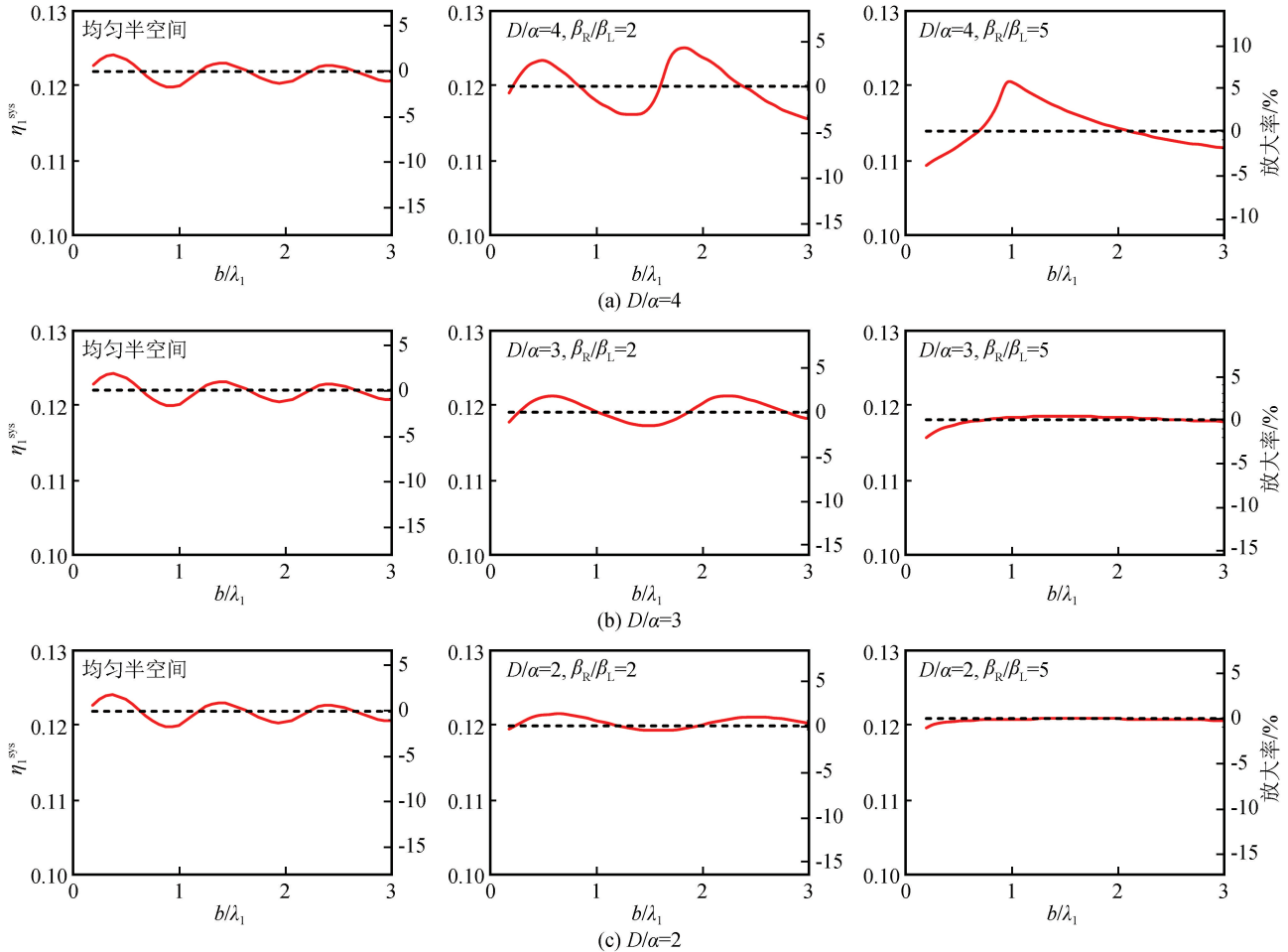


图 4 结构动力响应幅值频谱(垂直入射,  $\epsilon=4, M_b/M_0=5, M_0/M_s=0.2, H=4a, W=2a$ )

Fig.4 Dynamic response of the structure (vertical incident,  $\epsilon=4, M_b/M_0=5, M_0/M_s=0.2, H=4a, W=2a$ )



— 双结构(考虑相邻结构的影响)    - - - 单个结构(忽略相邻结构的影响)

图 5 SH 波垂直入射时结构系统频率随无量纲距离  $b/\lambda_1$  的变化( $\epsilon=4, M_0/M_s=0.2, M_b/M_0=5, H=4a, W=2a$ )

Fig.5 Structural system frequency vs. dimensionless distance  $b/\lambda_1$  under vertically incident SH-wave ( $\epsilon=4, M_0/M_s=0.2, M_b/M_0=5, H=4a, W=2a$ )

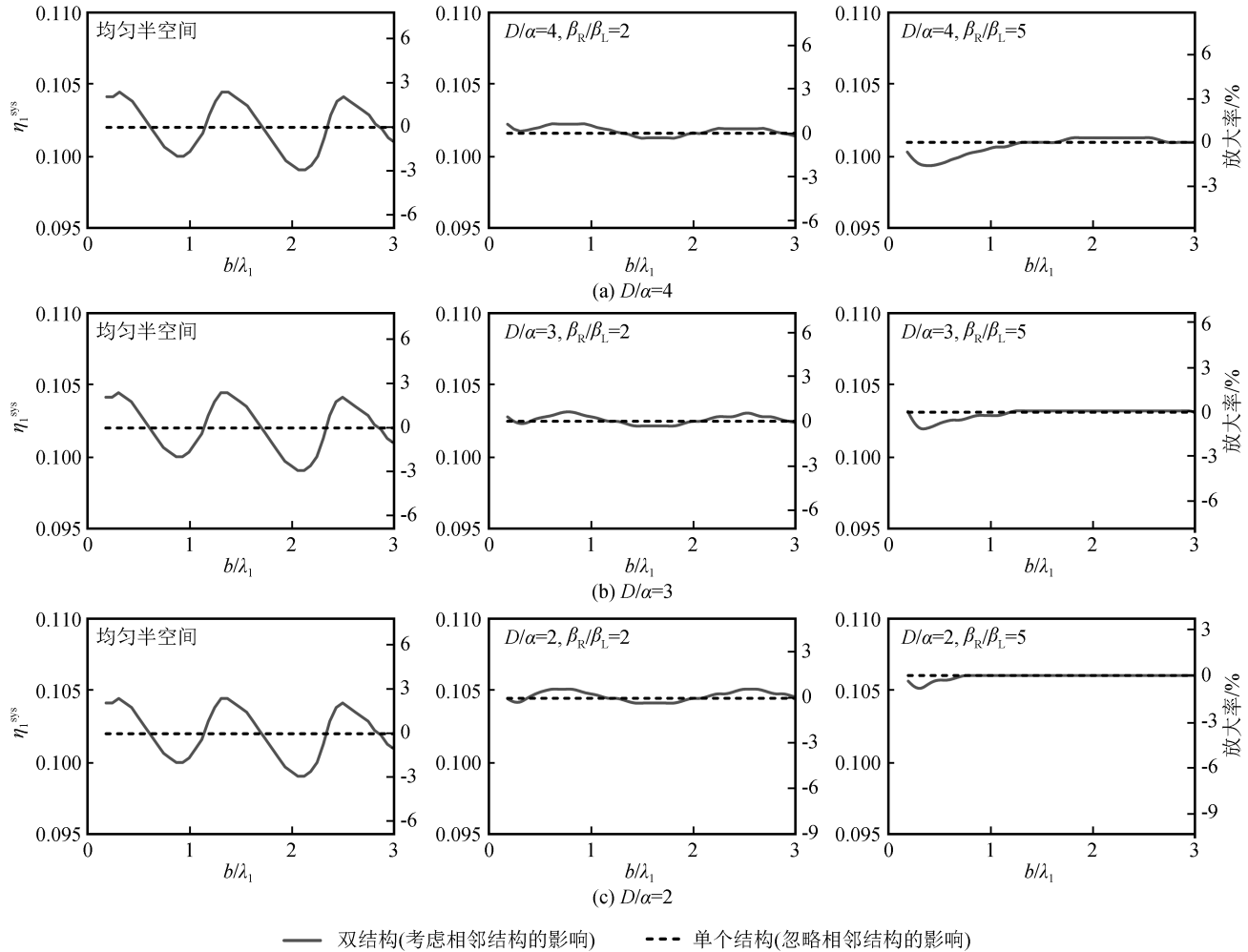


图6 SV波垂直入射时结构系统频率随无量纲距离  $b/\lambda_1$  的变化 ( $\epsilon=4, M_0/M_s=0.2, M_b/M_0=5, H=4a, W=2a$ )

Fig.6 Structural system frequency vs. dimensionless distance  $b/\lambda_1$  under vertically incident SV-wave ( $\epsilon=4, M_0/M_s=0.2, M_b/M_0=5, H=4a, W=2a$ )

射时,结构系统频率  $\eta_1^{\text{sys}}$  随无量纲距离  $b/\lambda_1$  的变化,其中  $\lambda_1 = \beta_L/f_1$  是结构底部固定基频  $f_1$  在土层中对应的波长。场地参数分别为  $D/a = 4, 3, 2$ ;  $\beta_R/\beta_L = 1$  (均匀半空间),  $2, 5$ 。结构参数为  $\epsilon = 4, M_0/M_s = 0.2, M_b/M_0 = 5, H = 4a, W = 2a$ 。为方便对比相邻结构的影响,图中还给出了相应的不考虑相邻结构时的结果,同时图的右侧还给出了考虑相邻结构影响后  $\eta_1^{\text{sys}}$  的放大率。

从图5和图6可以看出,相邻结构可能增大或减小结构的系统频率,SH波垂直入射时,减小率达4%,增大率达5%;SV波垂直入射时,减小率达3%,增大率达2%。基本上土层厚度越小,基岩与土层的刚度比越大,相邻结构对系统频率的影响程度越小,这说明,随着土层厚度的减小,或基岩与土层的刚度比增大,场地动力特性的影响相对增大,相

邻结构的影响相对降低。随着结构间距离的增大,相邻结构的存在对结构系统频率的影响不是单调变化的,呈现振荡减小的趋势,振荡规律与场地的动力特性和结构的动力特性有关。另外,假设  $\beta_L = 250 \text{ m/s}, f_1 = 1.5 \text{ Hz}$ , 则  $\lambda_1 = 166.7 \text{ m}$ , 图5中  $D/a = 4, \beta_R/\beta_L = 2$  的结果中,  $b/\lambda_1 \approx 2$  时 ( $b \approx 333 \text{ m}$ ), 放大率达4%,  $b/\lambda_1 \approx 3$  时 ( $b \approx 500 \text{ m}$ ), 减小率达3.8%;图6均匀场地的结果中,  $b/\lambda_1 \approx 2$  时 ( $b \approx 333 \text{ m}$ ), 减小率达3%,  $b/\lambda_1 \approx 2.5$  时 ( $b \approx 416.7 \text{ m}$ ), 放大率达2.2%, 说明相邻结构的影响范围很大,需引起注意。

## (2) 算例二

算例二以位于美国加州理工学院的 Millikan Library building 为例,分析结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响。Millikan Library

building 是一幢 9 层的钢筋混凝土结构,高度  $H = 44 \text{ m}$ ,宽度  $W = 25 \text{ m}$ ,结构的质量为  $M_b/M_0 = 7.5$ ,  $M_0/M_s = 0.2$ ,结构南北方向的底部固定基频为  $f_1 = 2.33 \text{ Hz}$ ,结构的阻尼比为  $\beta_b = 0.01$ ,场地参数

如表 1 所列<sup>[13-14]</sup>。计算中假设 Millikan Library building 附近存在另一完全相同的结构,如模型图 1 所示。图 7 给出了 SH 波和 SV 波垂直入射时,结构系统频率  $f_1^{\text{sys}}$  随无量纲距离  $b/\lambda_1$  的变化。

表 1 Millikan Library building 场地参数<sup>[13-14]</sup>

Table1 Site parameters of Millikan Library building<sup>[13-14]</sup>

土层编号	剪切波速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	土层厚度 /m	深度 /m	密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	阻尼比 /%
1	298.7	1.83	0~1.83	1 810	0.02
2	298.7	0.91	1.83~2.74	1 810	0.02
3	298.7	2.75	2.74~5.49	1 810	0.02
4	387.1	1.52	5.49~7.01	1 810	0.02
5	387.1	2.74	7.01~9.75	1 810	0.02
6	454.2	3.66	9.75~13.41	1 810	0.02
7	487.7	6.71	13.41~20.12	1 810	0.02
8	609.6	82.29	20.12~102.41	1 810	0.02
9	762.0	16.16	102.41~118.57	1 810	0.02
基岩	944.8	-	>118.57-	1 810	0.02

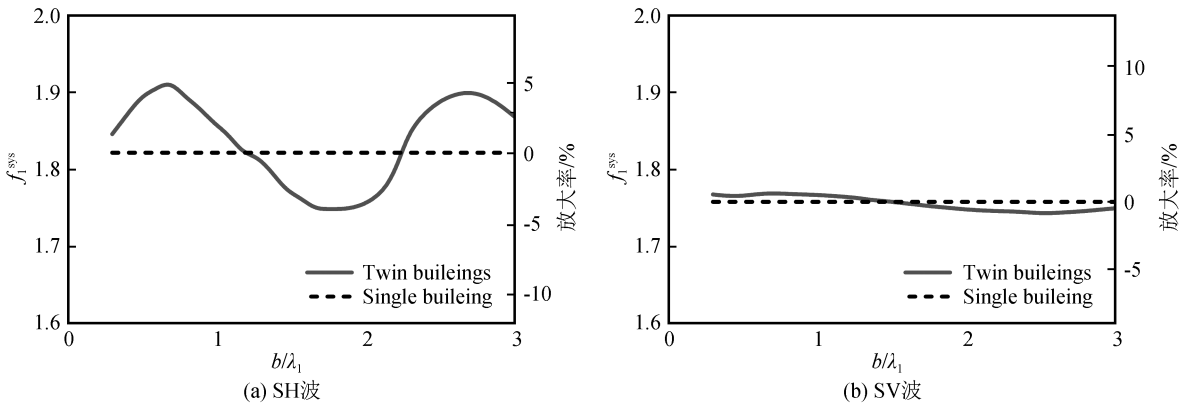


图 7 SH 波或 SV 波垂直入射时结构系统频率随无量纲距离  $b/\lambda_1$  的变化

Fig.7 Structural system frequency vs. dimensionless distance  $b/\lambda_1$  under vertically incident SH-wave or SV-wave

从图 7 也可以看出,相邻结构的存在可能增大或减小结构的系统频率,尤其是对于平面外模型(SH 波)这种影响更加明显,增大率可达 5%,减小率可达 3.5%。随着结构间距离的增大,相邻结构的影响程度呈现振荡下降的趋势。

### 3 结论

本文采用间接边界元法,建立结构-土-结构动力相互作用模型,研究了相邻结构对结构系统频率的影响,主要结论如下:

(1) 结构-土-结构动力相互作用在一定程度上影响基础的阻抗函数,并通过阻抗函数影响结构的系统频率。

(2) 相邻结构的存在可能增大或减小结构的系

统频率,SH 波垂直入射时,影响程度达 5%;SV 波垂直入射时,影响程度达 3%。且基本上土层厚度越小,基岩与土层的刚度比越大,相邻结构对系统频率的影响程度越小。

(3) 随着结构间距离的增大,相邻结构的存在对结构系统频率的影响程度不是单调下降的,与场地的动力特性和结构的动力特性有关。

值得指出的是,本文算例中相邻结构的存在对系统频率的影响程度约为 5%,但这已可能对结构健康监测的结果造成明显干扰,值得关注。

### 参考文献(References)

[1] LUCO J E, CONTESSE L. Dynamic Structure-Soil-Structure Interaction[J]. Bulletin of the Seismological Society of Ameri-



- ca, 1973, 63(4): 1289-1303.
- [2] WONG H L, TRIFUNAC M D. Two-Dimensional, Antiplane, Building-Soil-Building Interaction for Two or More Buildings and for Incident Planet SH Waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(6): 1863-1885.
- [3] WANG S, SCHMID G. Dynamic Structure-Soil-Structure Interaction by FEM and BEM[J]. Computational Mechanics, 1992, 9(5): 347-357.
- [4] KARABALIS D L, MOHAMMADI M. 3-D Dynamic Foundation-Soil-Foundation Interaction on Layered Soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1998, 17(3): 139-152.
- [5] MASON H B, TROMBETTA N W, CHEN Z, et al. Seismic Soil-Foundation-Structure Interaction Observed in Geotechnical Centrifuge Experiments[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 48: 162-174.
- [6] TROMBETTA N W, MASON H B, CHEN Z, et al. Nonlinear Dynamic Foundation and Frame Structure Response Observed in Geotechnical Centrifuge Experiments[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 50: 117-133.
- [7] ÇELEBI M. Seismic Responses of Two Adjacent Buildings. I: Data and Analyses[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(8): 2461-2476.
- [8] ÇELEBI M. Seismic Responses of Two Adjacent Buildings. II: Interaction[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(8): 2477-2492.
- [9] LOU M L, WANG H F, CHEN X, et al. Structure-Soil-Structure Interaction: Literature Review [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(12): 1724-1731.
- [10] CHANG P C, FLATAU A, LIU S C. Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure[J]. Structural Health Monitoring: an International Journal, 2003, 2(3): 257-267.
- [11] LIANG J W, HAN B, TODOROVSKA M I, et al. 2D Dynamic Structure-Soil-Structure Interaction for Twin Buildings in Layered Half-Space I: Incident SH-Waves[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 102: 172-194.
- [12] LIANG J W, HAN B, TODOROVSKA M I, et al. 2D Dynamic Structure-Soil-Structure Interaction for Twin Buildings in Layered Half-Space II: Incident SV-Waves[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 113: 356-390.
- [13] LUCO J E, TRIFUNAC M D, WONG H L. On the Apparent Change in Dynamic behavior of a 9-Story Reinforced-concrete building[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77(6): 1961-83.
- [14] LUCO J E, WONG H L, TRIFUNAC M D. Soil-Structure Interaction Effects on Forced Vibration Tests[R]. Report 86-05, Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, 1986.