

文章编号:1673-2049(2009)01-0030-07

# 半空间上水平层状场地自振频率特性研究

邓亚虹<sup>1,2,3</sup>, 夏唐代<sup>3</sup>, 彭建兵<sup>1,2</sup>, 范 文<sup>1,2</sup>

- (1. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;  
2. 长安大学 国土资源部岩土工程开放研究实验室, 陕西 西安 710054;  
3. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**在传统的基于集中质量矩阵的剪切质点系法(集中质量法)基础上,发展了基于一致质量矩阵的剪切质点系法(一致质量法),利用剪切质点系法对半空间上水平层状场地自振频率特性进行了分析,主要考虑了土层剪切模量分布、土层层厚分布以及覆盖层总厚度 3 个因素对场地自振频率的影响,并总结了影响规律,同时考虑了计算厚度选取的问题。分析结果表明:所得结论对于建筑场地地震分析、结构抗震以及剪切质点系法的工程应用均具有一定的实际意义。

**关键词:**半空间;水平层状场地;自振频率;剪切质点系法;结构抗震

**中图分类号:**TU352.12 **文献标志码:**A

## Research on Natural Frequency Characteristics of Horizontal Layered Soils on Half Space

DENG Ya-hong<sup>1,2,3</sup>, XIA Tang-dai<sup>3</sup>, PENG Jian-bing<sup>1,2</sup>, FAN Wen<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering of Ministry of Land and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

**Abstract:** On the basis of traditional shear particle system method (lumped mass method), a new shear particle system method based on consistent mass matrix (consistent mass method) was developed. Then, natural frequency characteristics of horizontal layered soils were analyzed with shear particle system method. The distribution of soil layer shear modulus and thickness and the total thickness of soil layers were considered and the influencing law was summarized. At the same time, the problem of computing thickness was considered. The analysis results show that the conclusions have practical meanings to field earthquake analysis, structure earthquake-resistance and apply of shear particle system method.

**Key words:** half space; horizontal layered soil; natural frequency; shear particle system method; structure earthquake-resistance

## 0 引言

在 seismic 区经常会发现,在具有不同工程地质条

件的建筑场地上,建筑物在地震中的破坏程度是明显不同的。不同场地,不同覆盖层厚度,甚至不同的土层组成都会使震害表现明显不同。为了弄清楚上

收稿日期:2008-12-07

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40534021);中国博士后科学基金项目(20080431256);长安大学科技发展基金项目(0305-1001)

作者简介:邓亚虹(1978-),男,湖南益阳人,长安大学讲师,工学博士,博士后,E-mail: hoverdyh@zju.edu.cn.

述问题,需要研究场地土的动力特性,场地土层的自振(固有)频率是场地土的重要动力特性之一<sup>[1]</sup>。大量震害观测资料表明,许多震害是由结构物与场地地基的共振或类共振效应引起的,因此,为了较准确地估计和防止这类震害的发生,工程设施的固有频率应尽可能避开地基的固有频率<sup>[2]</sup>。

鉴于问题的重要性,不少学者从理论上研究了地基自振频率的特性及其计算方法<sup>[3-4]</sup>,但由于公式复杂或层数较多时应用受限,工程中多数仍采用基于土层剪切波速的简化计算方法,如子层周期求和法、加权平均波速法等<sup>[5]</sup>,这些方法虽然简单,但缺陷也是显而易见的,因此只能用来粗略估算场地自振频率。Idriss 等<sup>[6]</sup>首先采用基于集中质量矩阵的剪切质点系法(集中质量法)研究水平层状场地的地震响应,并用振型分析法求解系统的运动方程。刘增武<sup>[7]</sup>首次用集中质量法研究了场地土层的周期特性,通过对 15 种常见场地地质剖面的分析,总结了土层固有周期的特点。集中质量法其实与采用线性单元和集中质量矩阵的有限单元法形式是一致的<sup>[8]</sup>。

## 1 问题说明

图 1 为半空间上水平层状场地模型,其中, $x$  轴为水平向, $y$  轴为竖直向, $O$  为圆点,场地土层自上而下分为  $1 \sim n$  层; $y$  轴与土层界面交点(质点)编号自上而下为  $1 \sim n$ ;第  $i$  层土的密度、剪切模量和厚度分别为  $\rho_i$ 、 $G_i$ 、 $d_i$ ;第  $i$  层土质量为  $m_i$ (单位宽度土柱), $m_i = \rho_i d_i$ ,集中后的质点质量为  $M_i$ ;第  $i$  层土质点间剪切刚度为  $K_i$ ;将半空间视为刚性,考虑层状土层的水平方向剪切振动,形成刚性半空间上的多自由度剪切质点离散体系。

## 2 振动方程的建立

### 2.1 质量矩阵

传统的剪切质点系法是建立在集中质量矩阵的基础之上的,优点是简单、直观。而一致质量矩阵能够反映质量的实际分布情况,因而计算出的频率和振型比较精确,且为真实频率的上限,这对实际工程设计是有意义的。下面首先介绍传统的集中质量法及质量矩阵的形成,然后基于图 1 所示的模型以及研究的问题,对单元一致质量矩阵形式进行推导。

#### 2.1.1 集中质量矩阵

集中质量法一般是把第  $i$  层质量的一半及其上面  $i-1$  层的质量的一半集中到  $i$  层界面上的质点  $i$

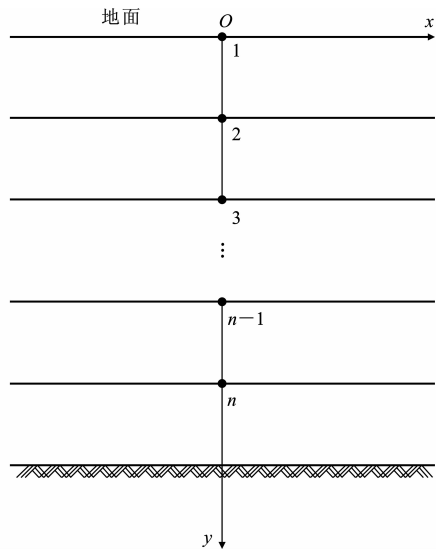


图 1 半空间上水平层状场地模型

Fig. 1 Model of Horizontal Layered Soils on Half Space

上,这样,集中质点质量可表示为

$$\left. \begin{aligned} M_i &= \frac{1}{2}(m_{i-1} + m_i) \quad i \neq 1 \\ M_1 &= \frac{1}{2}m_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由式(1)确定的集中质量矩阵  $\mathbf{M}$  为对角矩阵,具体可表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_1 & & & \\ & M_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & M_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

#### 2.1.2 一致质量矩阵

单元一致质量矩阵  $\mathbf{M}^e$  可表示为

$$\mathbf{M}^e = \iiint_{V_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV \quad (3)$$

式中: $\rho$  为质量密度; $\mathbf{N}$  为形函数矩阵; $V$ 、 $V_e$  分别为体积和单元体积。

对于某一单独土层有如图 2 所示长度为  $d$  的二节点( $h, j$ )单元,仅考虑水平方向位移  $u_h$ ,则节点位移  $\delta_h$  可表示为

$$\delta_h = u_h \quad (4)$$

每个单元有 2 个节点,即有 2 个节点位移(自由度),则单元位移向量  $\delta^e$  可表示为

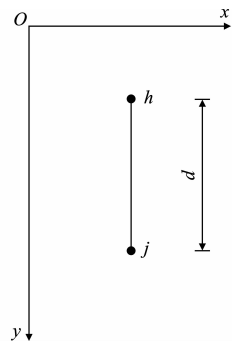


图 2 二节点线性单元

Fig. 2 Linear

Element of Two Nodes

$$\boldsymbol{\delta}^e = \begin{bmatrix} \delta_h \\ \delta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_h \\ u_j \end{bmatrix} = [u_h, u_j]^T \tag{5}$$

取位移函数

$$u(y) = a_1 + a_2 y \tag{6}$$

式中： $a_1、a_2$  为待定系数，且有

$$\left. \begin{aligned} u(0) &= u_h \\ u(d) &= u_j \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

将式(7)代入式(6)可得

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= u_h \\ a_2 &= \frac{u_j - u_h}{d} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

则

$$u(y) = (1 - \frac{y}{d})u_h + \frac{y}{d}u_j \tag{9}$$

其矩阵形式为

$$\boldsymbol{u}(y) = (1 - \frac{y}{d}, \frac{y}{d}) \begin{bmatrix} u_h \\ u_j \end{bmatrix} \tag{10}$$

令  $N_h = 1 - \frac{y}{d}, N_j = \frac{y}{d}$ ，则

$$u(y) = N_h u_h + N_j u_j \tag{11}$$

即

$$u(y) = \boldsymbol{N} \boldsymbol{\delta}^e \tag{12}$$

式中： $\boldsymbol{N} = (N_h, N_j)$ 。

将  $\boldsymbol{N}$  代入式(3)有

$$\boldsymbol{M}^e = \iiint_{V_e} \rho \boldsymbol{N}^T \boldsymbol{N} dV = \rho \int_0^d \boldsymbol{N}^T \boldsymbol{N} dy =$$

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & & & & \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 & & & \\ & -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & -K_{n-2} & K_{n-2} + K_{n-1} & -K_{n-1} \\ & & & & -K_{n-1} & K_{n-1} + K_n \end{bmatrix} \tag{17}$$

2.3 自由振动方程及自振频率的求解

系统自由振动方程的表达式为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{x} = 0 \tag{18}$$

式中： $\boldsymbol{M}、\boldsymbol{C}、\boldsymbol{K}$  分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵； $\ddot{\boldsymbol{x}}、\dot{\boldsymbol{x}}、\boldsymbol{x}$  分别为加速度向量、速度向量和位移向量。对于谐振情况，式(18)可化为

$$(\boldsymbol{K} + i\omega\boldsymbol{C} - \omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{x} = 0 \tag{19}$$

式中： $\omega$  为圆频率； $i$  为虚数单位。对式(19)，要使  $\boldsymbol{x}$  有非零解，则行列式

$$\det(\boldsymbol{K} + i\omega\boldsymbol{C} - \omega^2\boldsymbol{M}) = 0 \tag{20}$$

求解式(20)即可得到自振圆频率  $\omega_i$  及其相应振型  $\boldsymbol{x}_i$ 。

$$\begin{aligned} &\rho \int_0^d (1 - \frac{y}{d}, \frac{y}{d})^T (1 - \frac{y}{d}, \frac{y}{d}) dy = \\ &\rho \int_0^d \begin{bmatrix} (1 - \frac{y}{d})^2 & \frac{y}{d}(1 - \frac{y}{d}) \\ \frac{y}{d}(1 - \frac{y}{d}) & (\frac{y}{d})^2 \end{bmatrix} dy = \\ &m \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{13}$$

式中： $m$  为单层土质量， $m = \rho d$ 。通过组集单元一致质量矩阵  $\boldsymbol{M}^e$  便可得到整个系统的一致质量矩阵。由于单元的一致质量矩阵为  $2 \times 2$  方阵，所以整体质量矩阵将为三对角线形式的矩阵。

2.2 刚度矩阵

对于某层土体，其应力-应变关系为

$$\tau = G_i \gamma \tag{14}$$

式中： $\tau、\gamma$  分别为剪应力和剪应变。

根据  $\tau、\gamma$  的定义，式(14)可化为

$$Q/A = G_i \frac{\Delta x}{d_i} \tag{15}$$

式中： $Q$  为剪力； $A$  为剪切面积； $\Delta x$  为水平向变形。取  $\Delta x = 1, A = 1$ ，则有

$$K_i = G_i / d_i \tag{16}$$

刚度矩阵  $\boldsymbol{K}$  对于上述模型为三对角线形式的矩阵，即

若不考虑阻尼的影响，则系统的自由振动方程为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{x} = 0 \tag{21}$$

同样，对谐振情况有

$$(\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{K} - \omega^2\boldsymbol{E})\boldsymbol{x} = 0 \tag{22}$$

式中： $\boldsymbol{E}$  为单位矩阵。此时，直接对矩阵  $\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{K}$  求特征值和特征向量即可得到系统的自振圆频率和相应振型。

3 剪切模量分布对自振频率的影响

3.1 软夹层场地

如表1所示的含软夹层的3层覆盖场地，从模

表 1 软夹层模型参数

Tab. 1 Parameters of Soft Interlayer Models

模型编号	土层编号	密度	剪切模量	层厚
1	1	1	0.5	1
	2	1	1.0	1
	3	1	1.0	1
2	1	1	1.0	1
	2	1	0.5	1
	3	1	1.0	1
3	1	1	1.0	1
	2	1	1.0	1
	3	1	0.5	1

型 1 到模型 3,软夹层分别处于顶层、中间层和底层,同时,保持土体其他参数不变(表 1 中的参数均为量纲一的量)。图 3 为场地自振频率随软夹层位置变化关系曲线。

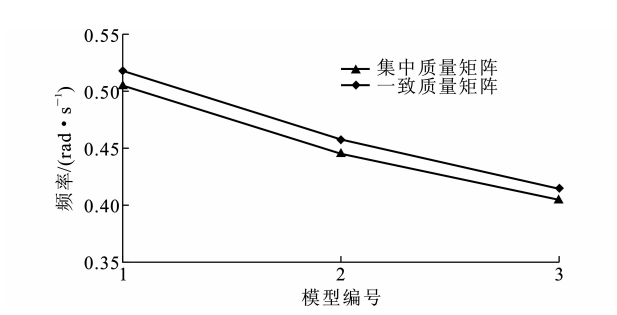


图 3 基频随软夹层位置变化关系

Fig. 3 Relations Between of Basic Natural Frequencies and Soft Interlayer Positions

从图 3 可以看出,软夹层所处位置对场地的自振频率有较大影响,软夹层位于顶层时频率最大,随着软夹层向半空间靠近,自振频率逐渐减小。集中质量法和一致质量法对刚度的敏感程度相当。

3.2 硬夹层场地

如表 2 所示的含硬夹层的 3 层覆盖场地,从模型 1 到模型 3,硬夹层分别处于顶层、中间层和底层,同时,保持土体其他参数不变(表 2 中的参数均为量纲一的量)。图 4 为场地自振频率随硬夹层位置变化关系曲线。

从图 4 可以看出,硬夹层所处位置对场地的自振频率有较大影响,硬夹层位于顶层时频率最小,随着硬夹层向半空间靠近,自振频率逐渐增大。集中质量法和一致质量法对刚度的敏感程度相当。

4 土层层厚分布对自振频率的影响

4.1 薄夹层场地

如表 3 所示的含薄夹层的 3 层覆盖场地,从模

表 2 硬夹层模型参数

Tab. 2 Parameters of Hard Interlayer Models

模型编号	土层编号	密度	剪切模量	层厚
1	1	1	2	1
	2	1	1	1
	3	1	1	1
2	1	1	1	1
	2	1	2	1
	3	1	1	1
3	1	1	1	1
	2	1	1	1
	3	1	2	1

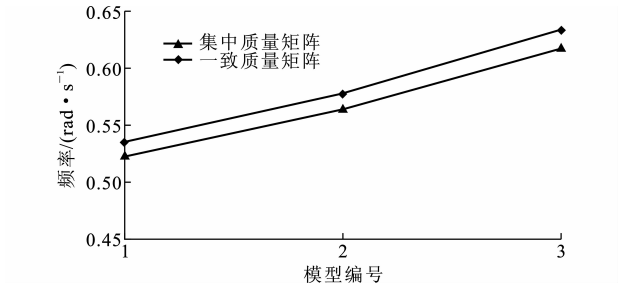


图 4 基频随硬夹层位置变化关系

Fig. 4 Relations Between Basic Natural Frequencies and Hard Interlayer Positions

表 3 薄夹层模型参数

Tab. 3 Parameters of Thin Interlayer Models

模型编号	土层编号	密度	剪切模量	层厚
1	1	1	1	0.5
	2	1	1	1.0
	3	1	1	1.0
2	1	1	1	1.0
	2	1	1	0.5
	3	1	1	1.0
3	1	1	1	1.0
	2	1	1	1.0
	3	1	1	0.5

型 1 到模型 3,薄夹层分别处于顶层、中间层和底层,同时,保持土体其他参数不变(表 3 中的参数均为量纲一的量)。图 5 为场地自振频率随薄夹层位置变化关系曲线。

从图 5 可以看出,薄夹层所处位置对场地的自振频率有一定影响,薄夹层位于顶层时频率最小,随着薄夹层向半空间靠近,自振频率逐渐增大。集中质量法对层厚分布的敏感性要强于一致质量法,但与刚度相比,土层层厚的空间分布对自振频率的影响相对要小。

4.2 厚夹层场地

如表 4 所示的含厚夹层的 3 层覆盖场地,从模

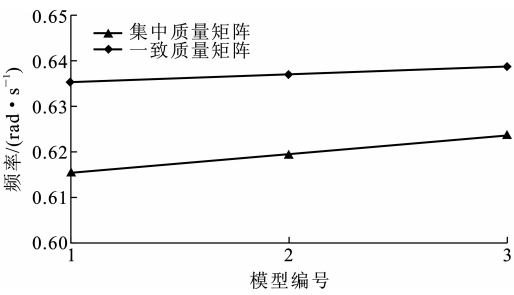


图 5 基频随薄夹层位置变化关系

Fig. 5 Relations Between Basic Natural Frequencies and Thin Interlayer Positions

型 1 到模型 3,厚夹层分别处于顶层、中间层和底层,同时,保持土体其他参数不变(表 4 中的参数均为量纲一的量)。图 6 为场地自振频率随厚夹层位置变化关系曲线。

表 4 厚夹层模型参数

Tab. 4 Parameters of Thick Interlayer Models

模型编号	土层编号	密度	剪切模量	层厚
1	1	1	1	2
	2	1	1	1
	3	1	1	1
2	1	1	1	1
	2	1	1	2
	3	1	1	1
3	1	1	1	1
	2	1	1	1
	3	1	1	2

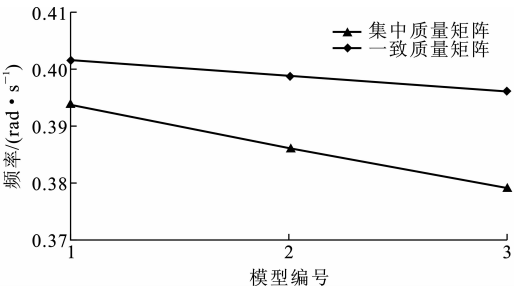


图 6 基频随厚夹层位置变化关系

Fig. 6 Relations Between Basic Natural Frequencies and Thick Interlayer Positions

从图 6 可以看出,厚夹层所处位置对场地的自振频率有一定影响,厚夹层位于顶层时频率最大,随着厚夹层向半空间靠近,自振频率逐渐减小。与薄夹层情况一样,集中质量法对层厚分布的敏感性要强于一致质量法,但与刚度相比,土层层厚的空间分布对自振频率的影响相对要小。

5 覆盖层总厚度对自振频率的影响

场地覆盖层总厚度,也就是本文中所选取的计

算深度,对场地自振频率将产生直接的影响。如表 5 所示的 3 层覆盖场地,从模型 1 到模型 3,层厚分别为 1、2、4,同时,保持土体其他参数不变(表 5 中的参数均为量纲一的量)。图 7 为场地自振频率随覆盖层厚度变化关系曲线。

表 5 覆盖层模型参数

Tab. 5 Parameters of Overburden Layer Models

模型编号	土层编号	密度	剪切模量	层厚
1	1	1	1	1
	2	1	1	1
	3	1	1	1
2	1	1	1	2
	2	1	1	2
	3	1	1	2
3	1	1	1	4
	2	1	1	4
	3	1	1	4

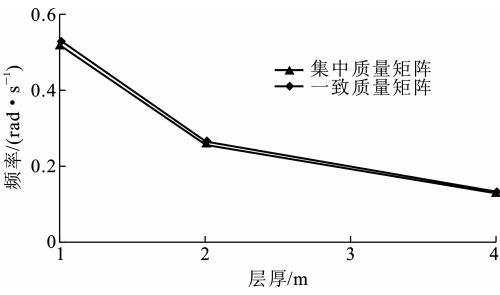


图 7 基频随层厚变化关系

Fig. 7 Relations Between Basic Natural Frequencies and Layer Thicknesses

从图 7 可以看出:覆盖层厚度对场地的自振频率影响显著,随着覆盖层厚度的增大,场地自振频率逐渐减小;覆盖层厚度增大到原来的 2 倍,场地自振频率减小为原来的 1/2;覆盖层厚度增大的原来的 4 倍,场地自振频率则减小为原来的 1/4。

对于一个实际的工程场地,在保证土层剖面资料准确的前提下,能否获得场地较为准确的自振频率参数,这在很大程度上取决于覆盖层厚度即计算深度的选取,也就是把半空间顶面取在什么深度位置。

浙江杭州 CBD 尊宝大厦工程位于杭州市钱江新城内,拟建工程总用地面积为 34 900 m<sup>2</sup>,总建筑面积为 164 725 m<sup>2</sup>,主要包括 A、B 两幢 45 层超高层办公楼,建筑高度为 160 m,结构拟采用框架-核心筒结构,基础拟采用桩-筏基础,桩基形式拟采用大直径钻孔灌注桩。根据浙江大学建筑设计研究院提供的岩土工程勘察报告<sup>[9]</sup>,拟建场地地质层可分

为 9 大肠,18 亚层,场地工程地质分层见表 6。该场地各土层力学性质指标见表 7。

表 6 场地工程地质分层

Tab. 6 Engineering Geology Layers of Site

层号	主要构成	土层性状
1	人工填土	生活垃圾、砂土组成,全场分布,层厚 1.7~6.8 m
2	砂质粉土	灰黄色,干强度低,韧性低,层厚 0.7~5.9 m
3	砂质粉土	灰黄色,干强度低,韧性低,层厚 0.9~4.8 m
4	砂质粉土	灰色,很湿,摇振反应迅速,无光泽,层厚 0.9~3.6 m
5	粉砂	灰色,饱和,中密状,层厚 6.8~10.2 m

表 7 场地土层力学性质指标

Tab. 7 Mechanics Property Indexes of Site Soil Layers

层号	主要构成	含水量/%	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙比/%	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
1	人工填土	25.0	18.00		
2	砂质粉土	27.2	19.44	0.752	2.68
3	砂质粉土	27.5	19.32	0.766	2.67
4	砂质粉土	25.3	19.65	0.755	2.68
5	粉砂	39.1	18.09	0.703	2.67

该场地 2 个钻孔 A、B 的波速测试结果如表 8、9 所示。

表 8 钻孔 A 的波速测试结果

Tab. 8 Results of Wave Velocity Test of Single Hole A

层号	主要构成	层深/m	层厚/m	波速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	人工填土	0.0	1.9	159
2	砂质粉土	1.9	4.9	172
3	砂质粉土	6.8	3.1	175
4	砂质粉土	9.9	2.9	158
5	粉砂	12.8	7.8	192

表 9 钻孔 B 的波速测试结果

Tab. 9 Results of Wave Velocity Test of Single Hole B

层号	主要构成	层深/m	层厚/m	波速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	人工填土	0.0	2.4	248
2	砂质粉土	2.4	3.2	160
3	砂质粉土	5.6	3.7	162
4	砂质粉土	9.3	2.1	175
5	粉砂	11.4	9.1	181

根据表 8、9,选取 5、10、15、20 m 四个深度,采用一致质量法分别对 2 个波速钻孔剖面进行了计算,图 8 为基频随计算深度变化关系曲线。

从图 8 可以看出,2 个钻孔剖面各深度的自振频率基本一致,均随着计算深度的增大而减小,深度的选取对计算结果的影响显著。下面根据场地地脉动测试的结果来判断哪个计算深度的计算结果能真正反映场地的实际自振特性。

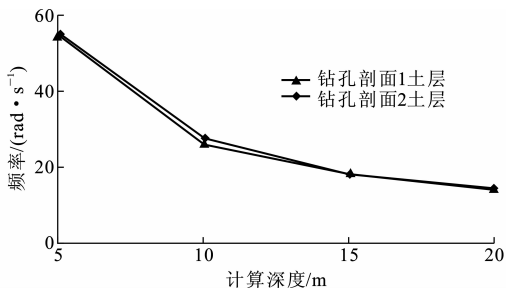


图 8 基频随计算深度变化关系

Fig. 8 Relations Between Basic Natural Frequencies and Computing Depths

地脉动测试一般用来获得场地的卓越频率,为工程抗震和隔振提供依据,而卓越频率是与场地基本自振频率相接近的场地振动频率值。浙江大学土木工程测试中心对该场地进行了地脉动测试,根据对 4 个测点的测试数据的整理和分析,得出如下结论<sup>[10]</sup>:

(1)该场地 4 个测点中每个测点的 3 个位移分量的主频范围和卓越频率一致性较好,3 个位移分量中垂直向脉动位移比水平位移稍大,4 个测点的主频范围和卓越频率略有不同,但差异很小。

(2)整个场地的地脉动主频为 2.40~3.05 Hz,卓越周期为 0.367~0.331 s,卓越频率为 2.723~3.020 Hz(17.109~18.975  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

从图 8 可以看出,地脉动测试的场地卓越频率范围与 15 m 深度计算结果比较接近。地脉动主要反映了地表 15~20 m 内土层的自振特性,且场地卓越频率主要受场地浅部岩层影响。中国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)<sup>[11]</sup>在按土层等效剪切波速进行场地分类时,土层厚度取为 20 m(原规范为 15 m),这与本文的计算结果比较一致。计算深度该如何确定,又与哪些因素有关,这些问题都有待进一步研究。

## 6 结 语

(1)软夹层所处位置对场地的自振频率有较大影响,软夹层位于顶层时频率最大,随着软夹层向半空间靠近,自振频率逐渐减小,集中质量法和一致质量法对刚度的敏感程度相当。

(2)硬夹层所处位置对场地的自振频率有较大影响,硬夹层位于顶层时频率最小,随着硬夹层向半空间靠近,自振频率逐渐增大,集中质量法和一致质量法对刚度的敏感程度相当。

(3)薄夹层所处位置对场地的自振频率有一定影响,薄夹层位于顶层时频率最小,随着薄夹层向半

空间靠近,自振频率逐渐增大。集中质量法对层厚分布的敏感性要强于一致质量法,但与刚度相比,土层层厚的空间分布对自振频率的影响相对要小。

(4)厚夹层所处位置对场地的自振频率有一定影响,厚夹层位于顶层时频率最大,随着厚夹层向半空间靠近,自振频率逐渐减小。与薄夹层情况一样,集中质量法对层厚分布的敏感性要强于一致质量法,但与刚度相比,土层层厚的空间分布对自振频率的影响相对要小。

(5)覆盖层厚度(计算深度)对场地的自振频率影响显著,随着覆盖层厚度的增大,场地自振频率逐渐减小,因此,计算深度的选取对计算结果的合理性至关重要,需要进一步研究。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 高振世,朱继澄. 建筑结构抗震设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.  
GAO Zhen-shi, ZHU Ji-cheng. Earthquake Resistance Design of Building Structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [2] 王钟琦. 地震工程地质导论[M]. 北京:地震出版社,1983.  
WANG Zhong-qi. Introduction of Earthquake Engineering Geology [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1983.
- [3] 熊建国,许贻燕. 分层土自振特性分析[J]. 地震工程与工程振动,1986,6(4):21-35.  
XIONG Jian-guo, XU Yi-yan. Free Vibration Analysis of Layered Soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1986, 6(4): 21-35.
- [4] 陈龙珠,吴世明. 用机械阻抗法求成层地基的固有频率[J]. 岩土工程学报,1989,11(2):82-87.  
CHEN Long-zhu, WU Shi-ming. Natural Frequency

of Layered Soils by Mechanical Impedance Method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(2): 82-87.

- [5] 葛双成. 场地卓越周期计算浅议[J]. 浙江建筑, 1999 (1): 32-33.  
GE Shuang-cheng. Discussion of Site Predominant Period Calculation [J]. Zhejiang Construction, 1999 (1): 32-33.
- [6] IDRISSE I M, SEED H B. Seismic Response of Horizontal Soil Layers[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(4): 1003-1034.
- [7] 刘增武. 场地土层的周期特性[R]. 北京:中国科学院工程力学研究所, 1978.  
LIU Zeng-wu. Period Characteristics of Site Soil Layers[R]. Beijing: Engineering Mechanics Institute of Chinese Academy of Science, 1978.
- [8] 吴世明. 土动力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2000: 210-211.  
WU Shi-ming. Soil Dynamics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000: 210-211.
- [9] 浙江大学建筑设计研究院. 杭州 CBD 尊宝大厦工程勘察报告[R]. 杭州:浙江大学, 2005: 12-18.  
Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University. Investigation Report of Hangzhou CBD Zunbao Building [R]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005: 12-18.
- [10] 浙江大学土木工程测试中心. 杭州 CBD 尊宝大厦场地脉动测试报告[R]. 杭州:浙江大学, 2005: 8-10.  
Civil Engineering Testing Centre of Zhejiang University. Microtremors Test Report of Hangzhou CBD Zunbao Building [R]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005: 8-10.
- [11] GB 50011—2001, 建筑抗震设计规范[S].  
GB 50011—2001, Code for Seismic Design of Building [S].

## 《建筑科学与工程学报》被美国《化学文摘》、《剑桥科学文摘》等国际权威检索系统收录

由于《建筑科学与工程学报》的学术质量及国际影响力大幅度提高,已被美国《化学文摘》、《剑桥科学文摘》以及波兰《哥白尼索引》收录。美国《化学文摘》(Chemical Abstracts, CA)创刊于 1907 年,由美国化学文摘服务社(CAS)编辑出版,是涉及学科领域最广、收集文献类型最全、提供检索途径最多、部卷也最为庞大的一部著名的世界性检索工具。美国《剑桥科学文摘》(Cambridge Scientific Abstracts, CSA)是基于网络服务的文献信息检索系统,包括 60 多个数据库,覆盖的学科范围包括:生命科学、水科学与海洋学、环境科学、计算机科学、材料科学以及社会科学,检索结果为文献的题录文摘信息。