

文章编号: 1000-7598(2009)08-2489-07

水平层状场地自振频率的剪切质点系法研究

邓亚虹¹⁻³, 夏唐代³, 彭建兵^{1,2}, 李喜安^{1,2}, 黄强兵^{1,2}

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

摘 要: 场地土层的自振频率是场地土的重要动力特性之一。为避免结构物与场地地基的共振效应, 工程设施的固有频率应尽量避免地基的固有频率。在传统的基于集中质量矩阵的剪切质点系法(集中质量法)的基础上, 发展了基于一致质量矩阵的剪切质点系法。在此基础上, 对利用剪切质点系法求解水平层状场地自振频率的精度影响因素进行了分析, 主要考虑了土层分层特性、质量矩阵形式以及材料阻尼3个影响因素, 分析表明: 分层数越多, 计算结果越接近真实解, 从实际工程角度出发, 分层数超过三层时可不再细分; 在层数相等的情况下, 层厚对计算结果精度的影响甚微; 一致质量法的计算结果要优于集中质量法, 且表现出上限解性质; 在通常小阻尼情况下, 阻尼对自振频率的影响很小。

关 键 词: 水平层状场地; 自振频率; 剪切质点系法

中图分类号: TU 352.12; O 328

文献标识码: A

Research on shear particle system method of natural frequency of horizontal layered soils

DENG Ya-hong¹⁻³, XIA Tang-dai³, PENG Jian-bing^{1,2}, LI Xi-an^{1,2}, HUANG Qiang-bing^{1,2}

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

Abstract: Natural frequency is one of the most important dynamic characteristics of field soil layers. In order to avoid the resonance between structure and ground, the natural frequency of engineering establishments should be different from that of ground. On the basis of traditional shear particle system method based on lumped mass matrix (lumped mass method), a new shear particle system method based on consistent mass matrix (consistent mass method) is developed. Then, influencing factors on computing precision of shear particle system method are analyzed. The three aspects of soil delamination, mass matrix form and material damping are mainly considered. The analysis indicates: the more layer numbers we divide, the more precise the results will be and from the standpoint of practice engineering, when layer number is more than three, a subdivision is needless; layer thickness has very small effect on computing results; the result of consistent mass method is superior to that of lumped mass method and has the property of upper bound solution; in small damping circumstance, the material damping has small influence on natural frequency.

Key words: horizontal layered soil; natural frequency; shear particle system method

1 引 言

在具有不同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^[1]。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, 因此, 为了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量避免地基的固有频率^[2]。

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^[3-4], 但由于公式较复杂, 实际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^[5], 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。

收稿日期: 2008-04-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 40534021); 国家自然科学基金资助项目(No. 40772182); 中国博士后科学基金项目(No. 20080431256); 长安大学科技发展基金项目(No. 0305-1001)。

第一作者简介: 邓亚虹, 男, 1978年生, 博士, 讲师, 在站博士后, 主要从事土动力学及岩土工程方面的研究工作, E-mail: hoverdyh@zju.edu.cn

Idriss 和 Seed (1968 年)^[6]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;刘曾武等(1981 年)^[7]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^[8]。

本文在传统的基于集中质量矩阵的剪切质点系法(集中质量法)的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)。在此基础上,对剪切质点系法求解精度的影响因素进行了分析,主要考虑了土层分成特性、质量矩阵形式以及材料阻尼 3 个方面对剪切质点系法求解结果的影响,并总结了它们的影响规律,这为剪切质点系法的实际工程应用提供了理论基础。

2 问题说明

如图 1 所示半空间上的层状场地,场地土层自上而下分为 1~ n 层, y 轴与土层界面交点(质点)编号自上而下为 1~ n ,第 i 层土材料密度、剪切模量、层厚分别设为 ρ_i 、 G_i 、 d_i ,第 i 层土质量设为 m_i (单位宽度土柱),集中后的质点质量设为 M_i ,第 i 层土质点间剪切刚度设为 K_i 。将半空间视为刚性,考虑层状土层的水平向剪切振动,形成刚性半空间上的多自由度剪切质点离散体系。

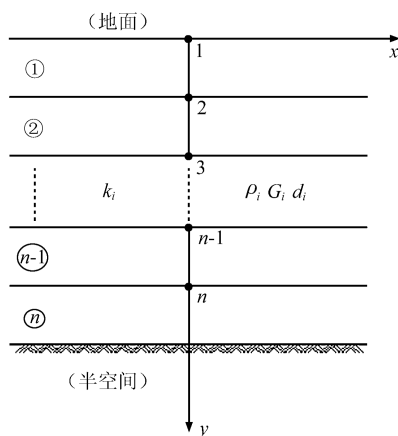


图 1 半空间上层状场地模型

Fig.1 Model of horizontal layered soil on half space

3 振动方程的建立

3.1 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,这样做的优点是简单、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。下面将首先介绍传统的质量集中方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了推导。

3.1.1 集中质量矩阵

质量集中的方法一般是把第 i 层质量的一半及其上面 $i-1$ 层的质量的一半集中到两层界面上的质点 i 上,这样,集中质点质量可表示为

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

式中: m_i 为第 i 层土的质量,可表示为

$$m_i = \rho_i d_i \quad (2)$$

由此,确定的集中质量矩阵 $[M]$ 为对角线矩阵,具体可表示为

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & M_2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & M_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.1.2 一致质量矩阵

单元一致质量矩阵为

$$M^e = \iiint_{V^e} \rho N^T N dV \quad (4)$$

式中: N 为形函数矩阵。

对于某一单独土层有长度为 d (如图 2 所示)的二节点单元,仅考虑水平方向位移 u ,则节点位移向量 $\{\delta\}$ 可表示为

$$\delta_i = u_i \quad (5)$$

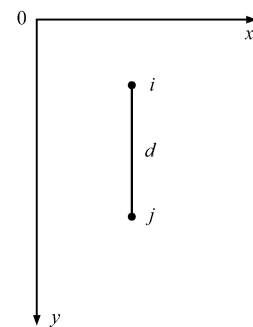


图 2 二节点线性单元

Fig.2 Linear element of two nodes

每个单元有 2 个节点,即 2 个节点位移(自由度)

$$\{\delta\}^e = \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = [u_i \quad u_j]^T \quad (6)$$

取位移函数:

$$u(y) = a_1 + a_2 y \quad (7)$$

式中: a_1 、 a_2 为待定系数, 且有

$$\left. \begin{aligned} y=0 \text{ 时, } u(0) &= u_i \\ y=d \text{ 时, } u(d) &= u_j \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (7), 得

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= u_i \\ a_2 &= \frac{u_j - u_i}{d} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

则有:

$$u(y) = \left(1 - \frac{y}{d}\right)u_i + \frac{y}{d}u_j \quad (10)$$

写成矩阵形式, 有:

$$u(y) = \left[1 - \frac{y}{d}, \frac{y}{d}\right] \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} \quad (11)$$

令 $N_i = 1 - \frac{y}{d}$, $N_j = \frac{y}{d}$, 则式 (10) 写为

$$u(y) = N_i u_i + N_j u_j \quad (12)$$

$$u(y) = N \{\delta\}^e \quad (13)$$

式中: $N = [N_i \quad N_j]$, 将 N 代入式 (4), 有:

$$\begin{aligned} M^e &= \iiint_{V_e} \rho N^T N dV = \rho \int_0^d N^T N dy = \\ &\rho \int_0^d \left[\frac{y}{d} \frac{y}{d} \right]^T \left[1 - \frac{y}{d} \frac{y}{d} \right] dy = \\ &\rho \int_0^d \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{y}{d}\right)^2 & \frac{y}{d} \left(1 - \frac{y}{d}\right) \\ \frac{y}{d} \left(1 - \frac{y}{d}\right) & \left(\frac{y}{d}\right)^2 \end{bmatrix} dy = m \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $m = \rho d$, 为单层土质量, 同式 (2)。由单元质量矩阵 M^e 通过组集便可得到整个体系的一致质量矩阵。由于单元的一致质量矩阵为 2×2 方阵, 所以整体质量矩阵将为三对角线形式的矩阵。

3.2 刚度矩阵

对于某层土体, 有剪应力-剪应变关系:

$$\tau = G_i \gamma \quad (15)$$

$$V/A = G_i \frac{\Delta x}{d_i} \quad (16)$$

式中: V 为剪力; A 为剪切面积; Δx 为水平向位移。取 $\Delta x = 1$, $A = 1$, 则有:

$$K_i = G_i / d_i \quad (17)$$

刚度矩阵 K 对于上述模型为三对角阵, 即

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 & \ddots & & \vdots \\ 0 & -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & -K_{n-2} & K_{n-2} + K_{n-1} & -K_{n-1} \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & -K_{n-1} & K_{n-1} + K_n \end{bmatrix} \quad (18)$$

3.3 阻尼矩阵

材料的阻尼在一般情况下是依赖于振动频率的。因此, 在实际分析中, 要精确地决定阻尼矩阵是相当困难的。同时, 在体系的运动方程中, 阻尼力与惯性力和抗力相比要小得多, 因此, 通常将实际结构的阻尼矩阵简化为质量矩阵 M 和刚度矩阵 K 的线性组合, 这种阻尼称为瑞利 (Rayleigh) 阻尼, 表达式为

$$C = \alpha M + \beta K \quad (19)$$

式中: α 、 β 为不依赖于频率的常数。

$$\alpha = \frac{2(\xi_i \omega_i - \xi_j \omega_j)}{(\omega_i + \omega_j)(\omega_i - \omega_j)} \omega_i \omega_j \quad (20)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_i \omega_i - \xi_j \omega_j)}{(\omega_i + \omega_j)(\omega_i - \omega_j)} \quad (21)$$

只要实测两种振型下的圆频率 ω 和阻尼比 ξ 值, 便可根据式 (20)、(21) 计算出 α 和 β 。这种方法的缺点是一般只能测得低频阻尼比, 按此确定的系数用于动态分析, 结果会使得体系的高频反应被“阻尼掉”很多。另一种方法是先进行体系的模态分析, 根据模态分析结果, 采用两种“贡献”较大的, 与模态相应的自振圆频率和阻尼比来计算 α 和 β 。

3.4 自由振动方程及自振频率求解

系统的自由振动方程的表达式为

$$M\{\ddot{x}\} + C\{\dot{x}\} + K\{x\} = 0 \quad (22)$$

式中, $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 和 $\{x\}$ 分别为加速度、速度和位移向量。对于谐振情况, 上式可化为如下形式:

$$(K + i\omega C - \omega^2 M)\{x\} = 0 \quad (23)$$

式中: ω 为圆频率, i 为虚数单位。对此方程, 要使 $\{x\}$ 有非 0 解, 则有:

$$\det(K + i\omega C - \omega^2 M) = 0 \quad (24)$$

求解上式即可得到自振圆频率 ω_i 及其相应振型 $\{x_i\}$ 。

若不考虑阻尼的影响,则体系的自由振动方程为

$$\mathbf{M}\{\ddot{x}\} + \mathbf{K}\{x\} = 0 \quad (25)$$

同样,对谐振情况,有:

$$([\mathbf{M}]^{-1}\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{E})\{x\} = 0 \quad (26)$$

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

4 土体分层特性对求解结果的影响

形成离散多自由度体系时,离散单元的多少或大小对求解结果的精度往往有直接而显著的影响。对于本文所研究的模型,这个问题可归结于半空间上层状场地的分层特性。具体来说,包括上覆土层的层数以及层厚 2 个影响因素。可以肯定的是,对于给定的土层厚度划分的层数越多,得到的结果将更接近于真实解。那么,什么样的层数对于求解精度和计算效率 2 个方面来讲都是合适的呢?另外,在分层数相同的前提下,层厚对计算结果的精度是否有影响呢?下面将讨论这 2 个问题。

考察一半空间上的单层覆盖场地,用不同分层数的 3 个模型来研究层数对求解结果的影响,表 1 为各模型参数的具体情况,表 2 为各模型基频的计算结果,图 3 为基频与层数的关系曲线。

从表 1 可以看出,在上覆土层总厚度不变的情况下,从模型 1 到模型 3,土层分别被分为 1 层、2 层和 3 层。从表 2 及图 3 可以看出,不论是基于集中质量矩阵的剪切质点系法,还是基于一致质量矩阵的剪切质点系法,其计算结果均随着层数的增加而逐渐逼近精确解,误差在 1 层时约为 10%,2 层时约为 3%,3 层时精度已很高,误差仅为 1%左右。从表 3 可以发现,基于集中质量矩阵的剪切质点系法的计算结果均位于精确解的下方,随着层数的增加,基频逐渐增大并向精确解逼近,表现出“下限解”的性质。而基于一致质量矩阵的剪切质点系法则刚好相反,其基频均高于精确解,且随着层数的增加逐渐减小并向精确解逼近,表现出“上限解”的性质。

从上面的计算结果及分析可以看出,上覆土层的总划分层数超过 3 层后,求得的基本自振频率的精度已很高,误差仅为 1%左右。从工程角度出发,此时再细分土层已无多大实际意义。

表 1 不同分层数模型参数

Table 1 Parameters of models with different layer numbers

模型编号	密度	剪切模量	层数	层厚
1	1	1	1	1
2	1	1	2	1/2
3	1	1	3	1/3

表 2 不同分层数模型基频计算结果

Table 2 Basic frequency results of different models with different layer numbers

模型编号	基频精确解	集中质量矩阵		一致质量矩阵	
		基频	与精确解比值	基频	与精确解比值
1		1.41	0.90	1.73	1.10
2	1.57	1.53	0.97	1.61	1.03
3		1.55	0.99	1.59	1.01

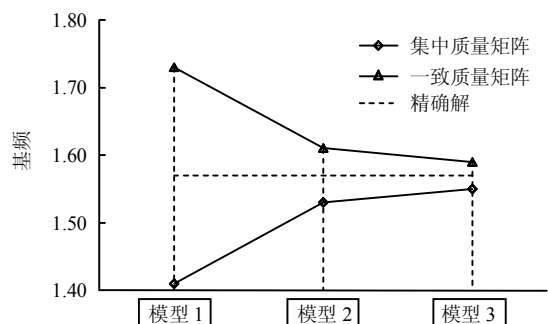


图 3 不同分层数模型基频与层数关系曲线

Fig.3 Relation between basic frequency and layer number of models with different layer numbers

为分析层厚对计算结果的影响,如表 3 所示,将上面 3 个模型的层厚均增大为原来的 3 倍,其余参数不变进行重新计算。表 4 为不同模型的基频计算结果,图 4 为基频与层数的关系曲线。

表 3 不同层厚模型参数

Table 3 Parameters of models with different layer thicknesses

模型编号	密度	剪切模量	层数	层厚
1	1	1	1	3
2	1	1	2	3/2
3	1	1	3	1

表 4 不同层厚模型基频计算结果

Table 4 Basic frequency results of different models with different layer thicknesses

模型编号	基频精确解	集中质量矩阵		一致质量矩阵	
		基频	与精确解比值	基频	与精确解比值
1		0.47	0.90	0.58	1.10
2	0.52	0.51	0.97	0.54	1.03
3		0.52	0.99	0.53	1.01

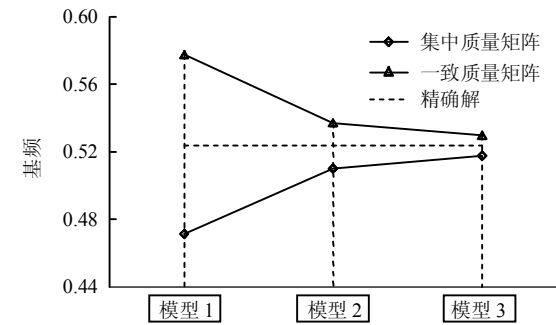


图 4 不同层厚模型基频与层数关系曲线

Fig.4 Relation between basic frequency and layer number of models with different layer thicknesses

对比表 2 和表 4 以及图 3 和图 4 可以看出，虽然层厚增大为原来的 3 倍，但只要分层数相同，计算得到的基频精度完全一样。

实际工程中遇到的地层根据土体物理力学性质不同进行的自然分层数一般都在 3 层以上，此时每层土无需再进行细分即可获得满意的计算精度。

5 质量矩阵形式对求解结果的影响

从上面的计算和分析中已经可以看出，基于不同质量矩阵形式的剪切质点系法计算结果的不同。下面将采用更具有一般性的一双层覆盖场地来进一步分析质量矩阵对计算结果的影响。表 5 为一上软下硬的双层覆盖场地，上层土体的密度、剪切模量和厚度分别为 1、1 和 2，下层土体的密度、剪切模量和厚度分别为 1.1、1.5 和 2，4 个模型采用了不同的分层策略，模型 1 的上下层土体均不再细分，整个上覆土体分为 2 层，每层厚度为 2；模型 2 将上层土体均分为 2 层，每层厚度为 1，下层土体不再细分，整个上覆土体分为 3 层；模型 3 将下层土体均分为 2 层，每层厚度为 1，上层土体不再细分整个上覆土体分为 3 层；模型 4 将上、下土层均分为两层，每层厚度为 1，整个上覆土体分为 4 层。表 6 将表 5 的软硬土层交换位置，形成一上硬下软双层覆盖场地，土体参数及各模型分层策略与表 5 相同。图 5 为表 5 所示 4 个模型的计算结果，图 6 为表 6 所示 4 个模型的计算结果。

表 5 上软、下硬模型参数

Table 5 Parameters of upper-soft lower-hard models

模型编号	土层	密度	剪切模量	层数	层厚
1	上层	1.0	1.0	1	2
	下层	1.1	1.5	1	2
2	上层	1.0	1.0	2	1
	下层	1.1	1.5	1	2
3	上层	1.0	1.0	1	2
	下层	1.1	1.5	2	1
4	上层	1	1	2	1
	下层	1.1	1.5	2	1

表 6 上硬、下软模型参数

Table 6 Parameters of upper-hard lower-soft models

模型编号	土层	密度	剪切模量	层数	层厚
1	上层	1.1	1.5	1	2
	下层	1	1	1	2
2	上层	1.1	1.5	1	2
	下层	1	1	2	1
3	上层	1.1	1.5	2	1
	下层	1	1	1	2
4	上层	1.1	1.5	2	1
	下层	1	1	2	1

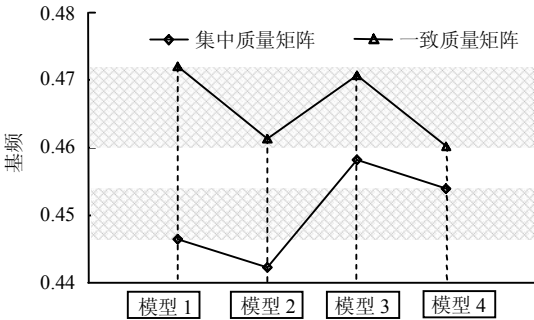


图 5 上软、下硬模型基频计算结果

Fig.5 Natural frequency results of upper-soft lower-hard models

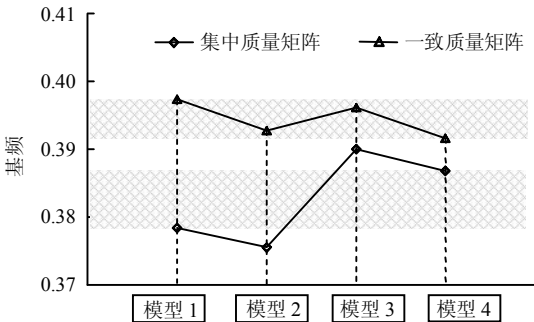


图 6 上硬、下软模型基频计算结果

Fig.6 Natural frequency results of upper-hard lower-soft models

从表可以看出，无论是上软下硬还是上硬下软土层，模型 1 为均匀分层，总层数为 2 层；模型 2 和模型 3 为非均匀分层，总层数为 3 层；模型 4 为均匀分层，总层数为 4 层。

从图 5 和图 6 可以看出，对于基于一致质量矩阵的剪切质点系法（一致质量法），虽然分层数同为 3 层的模型 2 和模型 3 由于层厚分布不同而使计算结果有差异，但两者求得的基频均小于分层数为两层的模型 1，且均大于分层数为 4 层的模型 4，即 3 层的计算结果介于 1~4 层之间，符合离散方法的“收敛性”原则，即分层越细、分层数越多计算结果越逼近真实解，而对于基于集中质量矩阵的剪切质点系法（集中质量法），从图可以看到，无论是上硬下软土层还是上软下硬土层，由于非均匀分层，计

算结果出现了“振荡”现象。分层数为 3 层的模型模型 2 计算结果反而要小于分层数为 2 层的模型 1, 同时, 模型 3 的计算结果反而要大于分层数为 4 层的模型模型 4。一般来说, 实际地层的层厚是不一样的, 也就是属于非均匀分层情况, 那么, 如果采用集中质量法, 将无法把握计算结果的精度和“收敛性”, 而一致质量法则很好地解决了这个问题, 且计算结果具有“上限解”性质, 随着分层数的增加, 计算结果以递减的形式逐渐逼近真实解。

6 阻尼对计算结果的影响

在结构的动力响应问题中, 弹性体系的材料阻尼一般是很小的, 阻尼比通常在 10 % 以下, 且多在 5 % 左右, 土体阻尼比稍大一些, 但一般也不会超过 20 %^[9], 因此, 一般情况下阻尼对体系自振频率的影响很小。但在强震等情况下, 当结构产生较大应变时, 体系的阻尼可能成倍的增加, 这时阻尼的影响也将增大。对如表 7 所示的土层模型, 采用前述的瑞利阻尼模型, 分别设阻尼比为 0.1、0.2 和 0.4 进行计算, 并与无阻尼的计算结果进行比较来分析阻尼对体系自振频率的影响。表 8 为计算结果, 图 7 和图 8 分别为集中质量法和一致质量法得到的基频随阻尼比变化曲线。

表 7 不同阻尼比模型参数

Table 7 Parameters of models with different damping ratios

层号	密度	剪切模量	层厚
1	1	1	0.5
2	1	1	0.5

表 8 不同阻尼比模型基频计算结果

Table 8 Basic natural frequency results of different models with different damping ratios

模型 阻尼	集中质量法			一致质量法		
	有阻尼	无阻尼	比值 /%	有阻尼	无阻尼	比值 /%
0.1	1.523		99.49	1.603		99.48
0.2	1.498	1.531	97.86	1.579	1.611	97.99
0.4	1.405		91.79	1.479		91.78

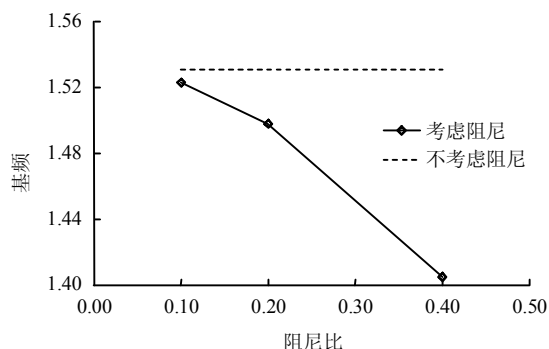


图 7 基频随阻尼比变化曲线 (集中质量法)

Fig.7 Relation between basic natural frequency with damping ratio (lumped mass method)

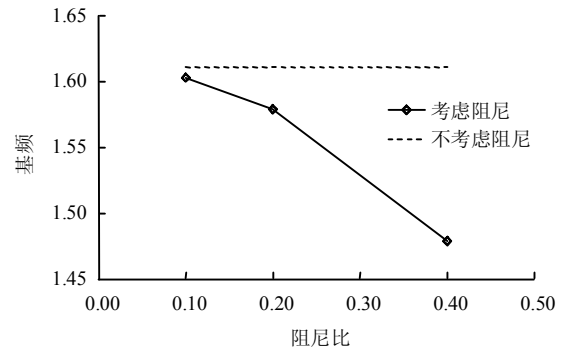


图 8 基频随阻尼比变化曲线 (一致质量法)

Fig.8 Relation between basic natural frequency with damping ratio (consistent mass method)

从表及图可以看出, 阻尼比较小时, 阻尼对自振频率的影响甚微, 随着阻尼比的增大, 系统自振频率逐渐减小, 阻尼的影响也越来越显著。当阻尼比为 0.1 时, 阻尼对自振频率的影响仅为 0.5 % 左右; 阻尼比为 0.2 时, 阻尼的影响增大到 2 % 左右; 阻尼比达到 0.4 时, 阻尼对自振频率的影响已接近 10 %。但在一般情况下, 如果忽略阻尼的影响, 将土体看成弹性体进行计算, 所得结果应该说完全能满足实际工程对精度的要求。

7 结 论

对传统的基于集中质量矩阵的剪切质点系法 (集中质量法) 振动方程的建立及自振频率的求解进行了说明, 并在此基础上建立了基于一致质量矩阵的剪切质点系法 (一致质量法); 对剪切质点系法求解精度的影响因素进行了分析, 并比较了 2 种质点系法的不同。计算和分析表明:

(1) 上覆土层层数对计算结果有较大影响, 层数越多, 计算结果越接近真实解。总层数为 3 层时已有较高精度。从工程角度出发, 此时再细分土层没有太大实际意义。

(2) 在分层层数相同情况下, 土层厚度对求解精度影响甚微。

(3) 在单层覆盖、均匀分层情况下, 集中质量法和一致质量法分别表现出“下限解”和“上限解”性质。

(4) 在非单层覆盖、非均匀分层情况下, 集中质量法出现求解结果的“振荡”现象, 而一致质量法没有此问题, 分层数越多, 精度越高, 表现出良好的“收敛性”。

(5) 在小阻尼情况下, 材料阻尼对自振频率的影响很小; 在大阻尼情况下, 阻尼的影响不容忽视。从算例来看, 阻尼比为 0.4 时, 阻尼对场地自振频率的影响可达 10 % 左右。

参 考 文 献

- [1] 高振世, 朱继澄, 唐九如, 等. 建筑结构抗震设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 19—25.
- [2] 王钟琦, 谢君斐, 石兆吉. 地震工程地质导论[M]. 北京: 地震出版社, 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): 23—37
- [4] 陈龙珠, 吴世明, 魏玉伦. 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.
- [5] 葛双成. 场地卓越周期计算浅议[J]. 浙江建筑, 1999, (1): 32—33.
- [6] IDRIS I M, SEED H B. Seismic response of horizontal soil layers[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE**, 1968, 94(SM4): 1003—1031.
- [7] 刘增武. 场地土层的周期特性[C]. 中科院工程力学研究所地震工程研究报告集(4). 北京: 科学出版社, 1981.
- [8] 吴世明. 土动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 210—211.
- [9] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988: 262—264.