

考虑土 - 结构动力相互作用的 框架结构的参数识别研究

周 云 易伟建

(湖南大学, 湖南长沙 410082)

摘要: 对一座采用柱下独立基础的钢筋混凝土 4 层框架结构进行了随着层数增加的 4 种工况模态实验, 用脉冲锤击法测试得到了各种工况的整体模态频率和振型。考虑地基 - 基础 - 上部结构动力相互作用, 上部框架结构采用缩聚得到的弯剪结构模型, 下部基础利用 Pais 等人提出的弹性地基上埋置矩形板的地基阻抗函数进行简化处理得到的计算模型。在满足地基动剪模量和各层混凝土的弹性模量随框架层数的增加而增加的原则下, 建立了 4 种工况下的多目标优化准则。将基于频率数据识别欠定问题的灵敏度方法进行了结构物理参数以及地基参数同时识别, 识别得到的模态实验值与测试值符合良好。识别结果能够反应地基基础对结构的影响并为进一步损伤诊断提供了依据。

关键词: 土 - 结构动力相互作用; 框架结构; 实验模态分析; 多目标优化; 灵敏度方法; 参数识别

中图分类号: TU375.4 TU317*.1 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2007) 06-0014-06

Parameter identification for frame structures considering dynamic soil-structure interaction

Zhou Yun Yi Weijian

(Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Four cases of experimental modal analyses, with variation of the number of stories, were conducted for a four-story reinforced concrete frame structure with independent footing under the columns. The hammer impulse method was employed to measure the global modal frequencies and the mode shapes of each case. Considering the dynamic interaction of the soil-base-structure, a shear-bending frame model is employed for the superstructure, and the simplified embedded square slab's impedance function proposed by Pais et al. is employed as for the infrastructure. Using the criterion that the foundation's dynamic shear modulus and story's elastic modulus will increase with the increase in stories, a multi-objective optimization criterion is formulated. A sensitivity method for under-determined problems, using frequencies, is employed to identify the physical parameters and foundation parameters simultaneously. The identified modes match well with the measured ones. The identified parameters can reflect the influence of foundation on the structure and provide the basis for damage identification.

Keywords: soil-structure interaction; frame structure; experimental modal analysis; multi-objective optimization; sensitivity method; parameter identification

E-mail: zhouyun05@126.com

引 言

基于实验模态分析的结构物理参数识别国内外已

有大量研究。工程实际中房屋桥梁结构的模态测试结果不同程度地受到地基的影响, 通常实测得到的频率比有限元计算结果低, 一般认为这种降低与计算模型的刚度系数选取有关, 或计算模型本身没有正确反映机构的受力性能, 例如, 计算模型没有考虑基础-地基体系的柔度影响。如何区别这两种不同状态的关键在于确定地基的参数。

基金项目: 国家自然科学基金 (50678064、50378034)

作者简介: 周 云, 博士研究生

收稿日期: 2006-09-28 Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对于地基上结构的动力实验研究相对较少。Whitman^[1]对一个 7 层 Chimes Tower 进行了激振器激励实验,未利用弹性地基理论而直接通过平衡方程识别地基水平和转动阻抗值。Wong^[2]对 9 层钢筋混凝土框架结构 Millikan Library 进行顶层激振实验,对理论计算与实测进行了对比分析。Trifunac^[3]等人对加利福尼亚一栋 7 层混凝土框架结构(VN7SH)安置长期观测速度传感器记录到了 12 次地震记录,并进行了随机振动测试,用傅里叶谱分析了“表观结构转角”信息并得出系统频率随激励水平的非线性现象。Hans^[4]等人对法国里昂 5 座待拆房屋进行了随机振动、稳态激励和冲击激励实验,指出了地基结构弱非线性振动的现象,并研究了轻质工作单元、填充墙、平面面板和邻近建筑对结构频率的影响。Luco^[5]等对台湾花莲 Lotung 1/4 核电模型的强迫激振实验结果分别进行了结构的参数识别和地基参数识别。Kobayashi^[6], Choi^[7]等人对该模型进行了系统识别研究。国内有重要意义的研究有吕西林^[8]的一系列土-结构共同作用地震台实验和黄义^[9]的筒仓-地基共同作用模型实验研究。

对于地基基础的动力阻抗,包括圆形、条形以及矩形基础,国外 20 世纪七八十年代已经进行了大量的研究, Pais^[10]利用大量的数值计算结果(有限元或边界元),采用数值拟合途径,提出了基础动力阻抗的近似公式,蒯行成^[11]基于此提出了系统基本频率的概念。

对于地基参数与结构参数的同步识别,国内外研究比较少, Sanayei^[12]用“基于模态刚度的误差函数”从理论上成功进行了地基上半约束梁单元的参数识别和损伤诊断。灵敏度方法、逆摄动法和优化方法等是进行参数识别的主要途径,徐丽^[13]利用灵敏度方法对一实验室混凝土框架结构成功进行了物理参数识别。Cheng^[14]等利用 Pareto GA 和模糊罚函数算法在设计问题中进行多目标优化,易使结果达到全局最优解。

本文将对一栋地基上柱下独立基础的 4 层框架结构模型进行逐层实验模态分析,对结构利用弯剪模型、对地基利用阻抗函数,基于多目标优化思想用灵敏度分析方法,进行地基参数和结构物理参数的同步识别,为损伤诊断提供了依据。

1 实验概况

1.1 实验模型的基本概况

4 层 1 跨 2 开间钢筋混凝土框架结构模型,模型的比例为 1:3。框架结构的总体尺寸为 $L \times B \times H =$

2.8 m × 1.8 m × 4.333 m (图 1)。原型框架按抗震设计规范设计,首层层高为 1.333 m,二至四层层高均为 1 m,框架模型的基础为 $L \times B \times H = 0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.06 \text{ m}$ 的柱下独立板式埋置基础。柱尺寸为 133 mm × 133 mm,楼板厚度为 30 mm。框架模型的梁、柱、板的受力钢筋为 I 级,设计混凝土强度为 C25。

试验在湖南大学结构试验室试验土槽中进行。挖方土槽深度为 1.2 m,填土深度为 1.10 m,填土类型为粉质黏土,按照每层 20~30 cm 分层夯实。环刀测试地基密度 1965.2 kg/m³,含水率为 18.85%。用承载板法选择 10 个点测试地基弹性模量为 48.1 MPa。利用 TSZ-30B 土工三轴压力实验系统,测定 3.91 cm 原状土试样在周围压力 σ_3 作用下总抗剪强度,测定 $C=55.8137 \text{ kPa}$, $\phi=8.519^\circ$ 。

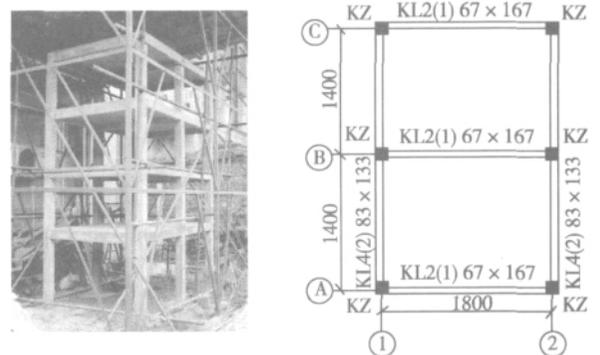


图 1 地基上混凝土框架模型及平面图
Fig.1 Model of frame structure on elastic foundation and plane schematics

地基动特性的测试采用瞬态脉冲激振方法。将测点布置在地面上沿波的传播方向,按照 3 m 距离设置 3 个竖向传感器,当锤头敲击地面时产生一个宽频带脉冲信号,传感器接收到瑞雷波的传播过程。取地基阻尼比为 0.3,地基动特性如表 1 所示,其中 $\nu_2 = (1 + \nu_2)/(0.87 + 1.12 \nu_2)^{1/2}$ 。

表 1 地基动特性指标
Table 1 Dynamic indices of foundation

地基指标	取值
瑞雷波波速 ν_R	145.54 m/s
横波波速 $\nu_s = \nu_2 \nu_R$	156.88 m/s
动剪模量 $G_s = \nu_s^2$	$4.837 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
动弹模量 $E_s = 2(1 + \nu_2) \nu_s^2$	$1.258 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$

1.2 弹性模量的取值

为考虑每层框架浇筑完毕地基对结构的影响,随着每层混凝土浇筑完成进行了逐层测试。通过混凝土立方体试块抗压强度和回弹法测试强度综合评价,得到混凝土立方体抗压强度平均值 f_c ,再根据 GB50010—

2002 《混凝土结构设计规范》公式 $E_c=100(2.2+34.7/f_c)$ 计算混凝土的弹性模量如表 2 所示。

表 2 混凝土弹性模量值 (单位: $\times 10^4 \text{ N/mm}^2$)
Table 2 Elastic modulus of concrete (units: $\times 10^4 \text{ N/mm}^2$)

浇筑完成	第一层	第二层	第三层	第四层
第一层	2.526	—	—	—
第二层	2.979	2.161	—	—
第三层	3.020	2.881	2.132	—
第四层	3.265	3.148	3.199	2.857

1.3 模态测试方法与结果

用脉冲锤击法对框架结构进行模态测试, 激励利用美国 PCB 力锤, 加速度信号由 626A12 型 PCB 系列传感器采集, 利用 DP-730 信号分析仪进行实验数据结果采集, 用 ME-scope 软件进行模态分析。实验时框架的顶层节点拾振, 每楼层依次激励, 测试方向如图 1 所示的 B 轴方向, 每组测试都包括了对柱子根部进行了敲击以反应基础水平振动信息。每一层框架浇筑完成时进行一次实验, 相当对应不同的上部结

表 3 模态试验结果与计算结果比较

Table 3 Comparison between experimental results and calculations

工况	Case I	Case II		Case III			Case IV			
频率阶数	一阶	一阶	二阶	一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶	四阶
测试频率 (Hz)	20.1	13.4	51.2	9.86	34.1	69.3	7.67	26.1	50.6	79.3
测试阻尼比 (%)	2.68	2.01	1.82	2.28	1.81	1.18	1.57	2.1	0.89	1.14

本文试验框架的基本尺寸与文献 [13] 室内框架相同, 室内框架模型阻尼比在 0.326%~0.803%之间, 本文室外框架的阻尼比在 0.885%~2.28%之间, 比室内模型要大。另外还对四层框架结构在改变力幅度大小的情况下进行了测试, 激励力分别为 200 N, 400 N, 800 N, 结果发现对于该种量级力大小的变化, 模态频率值基本不变, 而阻尼比增大达 30%左右, 这说明在此种量级激励作用下, 存在阻尼非线性现象, 与文献 [3-4] 中发现的弱非线性现象类似。由于频率值稳定, 可认为结构始终处于线性振动状态, 能用实模态理论进行分析。

2 计算模型的确定

2.1 框架结构计算模型的确定

本文研究对象与文献 [13] 研究模型的主要区别在于其模型位于刚性地基上, 而本文的框架结构位于弹性地基上。文献 [13] 中利用弯剪型模型计算模态与测试值符合较准确, 剪切型结构计算结果与实测值相差较大, 因此本文对地基上框架结构主要考虑使用弯剪

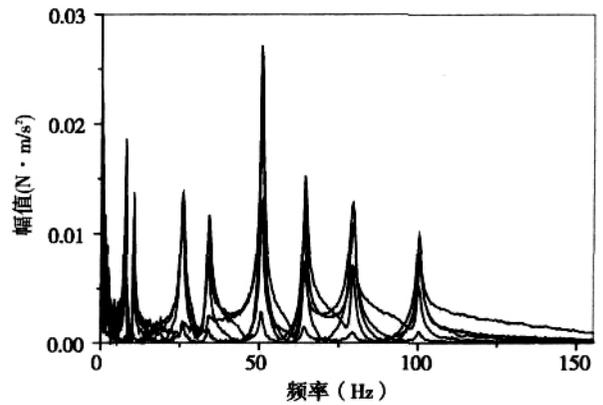


图 2 Case IV 集总传递函数曲线

Fig. 2 Gathered transfer function curves of Case IV

构、相同的下部结构进行了 4 种工况测试, 分别记为 Case I, Case II, Case III 和 Case IV。Case 的集总传递函数结果如图 2 所示, 图中传函峰值奇数阶为平动模态, 偶数阶为扭转模态, 模态分析得到平动的频率和阻尼结果如表 3 所示, 得到 Case 的振型如图 4 所示。

层模型。

2.2 与频率相关的基础计算模型

本文利用文献 [10] 中的矩形埋置板阻抗函数模型, 该模型动力阻抗地基刚度和阻尼系数是频率 $\omega_0 = B/V_s$ 的函数, 其值的大小并非一常数。埋置矩形基础的动力刚度如下所示, 水平、摇摆、水平摇摆组合阻抗分别为:

$$\bar{K}_{Hx}^d = K_{Hx}^s (G, B, \nu, L, e) (1.0 + i\alpha_0 c) \quad (1)$$

$$\bar{K}_{Rx}^d = K_{Rx}^s (G, B, \nu, L, e, \alpha_0) (k + i\alpha_0 c) \quad (2)$$

$$\bar{K}_{HR}^d = (e/B) \bar{K}_{Hx}^d / 3 \quad (3)$$

其中 K^s 为埋置基础的静刚度, ω_0 为振动圆频率, L 和 B 为矩形基础长边和短边边长的一半, V_s 为土中的剪切波速, k 和 c 分别是反应基础动刚度和阻尼的系数。

由于地基的刚度与运动频率相关, 地基-结构耦合系统没有通常意义上的固有频率和振型。系统以某一频率作自由振动时, 地基的动力阻抗正是采用这一频率计算得的, 在基频未求出之前, 无法计算地基阻抗, 如果地基阻抗不确定, 又不能计算基频, 一般只能采用迭代计算方法[11]。本文进行实模态分析时不考

虑阻尼项。水平阻抗刚度值与 a_0 值无关，而摇摆阻抗值与 a_0 有关，通过计算发现 k 值为 0.99 左右接近于 1，因此把 k 值近似取为 1，则水平摇摆阻抗刚度项就与频率无关。而 L/B ， e/B 为常数，值近似取为 0.3。因此阻抗刚度项就为动剪切模量的函数，在物理参数识别中就以此为识别量。

考虑阻抗边界条件的运动方程需在结构边界位置的自由度上加入阻抗值，如式 (4) 所示其中 K_{Hx} 为水平阻抗， K_{Rx} 为摇摆阻抗， K_{HR} 为水平摇摆耦合阻抗：

$$\begin{bmatrix} \bar{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{Hx} & K_{HR} \\ K_{HR} & K_{Rx} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3 带地基框架结构缩聚自由度模型

用不考虑轴力作用的杆系有限元，其单元刚度矩阵为 4×4 阶矩阵，有 30 个自由度，用静力缩聚的方法把结构缩聚成为 4 个平动自由度的框架模型，由于独立基础每个基底条件不完全相同，底部基础的自由度保持不变，则全结构共有 10 个自由度，如图 3 所示。而需要识别的参数为以下 7 个，一至四层弹性模量 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 ，图 3 基础从左至右 G_1 、 G_2 、 G_3 。弹性模量的参考值以回弹法测试为基准，地基模量的参考值以动剪模量为基准。质量矩阵使用堆聚质量矩阵，每楼层的质量取为梁和楼板的质量并加上柱子的一半的质量，基础的质量由原始杆系模型堆聚质量加上地基板的质量。

将基于多目标优化准则用改进的灵敏度分析方法对物理参数和地基参数进行同步识别。

3.1 多目标优化准则

求解多目标优化最基本的方法有评价函数法，其基本的思想是构造评价函数将多目标优化问题转化为单目标优化问题进行求解。本文对每一工况的模式值建立一独立优化目标，在满足参考原则的基础上形成多目标优化准则。

本文的实验研究是随着框架浇筑逐层进行的，假设本文结构已浇筑到第 n 层时，测试得到整体平动 n 个频率，本文要通过该 n 个频率来识别 $n+3$ 个参数，进行逐层物理参数和地基参数识别，所参考的原则是：地基动剪模量和各层混凝土的弹性模量随框架层数的增加而增加，判定准则为满足频率符合最接近原则。

$$f_n = \sqrt{\sum (f_{i, \text{measure}} - f_{i, \text{calculate}})^2} \quad (5)$$

其优化模型表示为：

$$\min F(X) = [f_1, f_2, f_3, f_4] \quad (6)$$

$$\text{s.t. } E_{i,n} < E_{i,n+1}, G_{i,n} < G_{i,n+1}$$

$$X = [E_1, E_2, E_3, E_4, G_1, G_2, G_3] \quad (7)$$

式中： $E_{i,n}$ 为浇筑混凝土达第 n 层时第 i 层的弹性模量； $G_{i,n}$ 为浇筑混凝土达 n 层时第 i 个地基下的剪切模量。

3.2 灵敏度方法

由有限元表示的无阻尼自由振动方程可知，结构的模式参数能够表示成为结构的物理参数的函数：

$$(K - \lambda_i(P)M)\phi(P)_i = 0 \quad (8)$$

将特征对组成的向量用 P 的一阶 Taylor 基础展开如下：

$$\begin{pmatrix} l(P) \\ \phi(P) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l(P) \\ \phi(P) \end{pmatrix}_{P=P_a} + S(P - P_a) \quad (9)$$

灵敏度矩阵如下所示，求解可通过特征导数求导或通过参数变化比率用数值方法计算。

$$S = \begin{bmatrix} \partial l / \partial P \\ \partial \phi / \partial P \end{bmatrix} \quad (10)$$

当未知参数个数小于灵敏度矩阵的行数时，方程组为亚定方程组，将式 (10) 改写为：

$$\begin{aligned} P &= P - P_a \\ &= S^T \left(\begin{pmatrix} l(P) \\ \phi(P) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} l(P) \\ \phi(P) \end{pmatrix}_{P=P_a} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

对于亚定问题：

$$S^T = S^T (SS^T)^{-1} \quad (12)$$

以第四层为例，求解所需要识别的未知数有 7 个，可利用的信息有四阶频率和四阶振型，单独利用

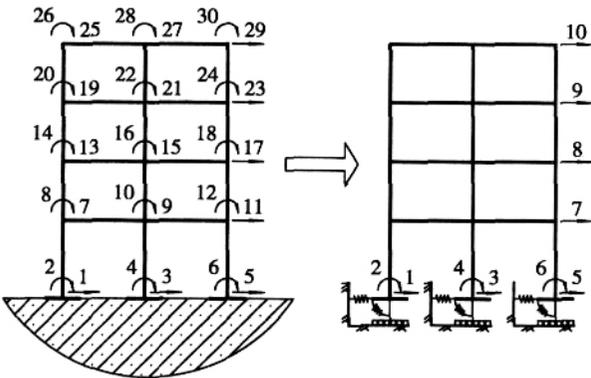


图 3 四层框架结构的原始和缩聚有限元模型

Fig. 3 Original and condensed finite element models of the four-story frame structure

3 物理参数和地基参数的同步识别

对于物理参数和地基参数的同步识别国内外研究甚少，成功进行物理参数地基参数识别能反映地基对结构的影响大小并能区别出完好结构的频率降低是由于地基约束影响而非损伤引起，其实质上成为广义的边界条件识别问题。灵敏度分析给出了摄动的方向，通过迭代的手段不断对摄动方向进行修正。本文

四阶频率进行识别则灵敏度矩阵的行数目为 4，每阶振型包括图 3 所示 5、7、8、9、10 五个测点振型值，灵敏度矩阵的函数为 5，都是亚定方程组，直接利用上式求逆可得答案。但在求解过程中，由于 E 和 G 两种物理量大小不匹配，利用振型识别物理参数时，极易使 S 矩阵陷入病态，因此本文利用频率的结果进行识别。

3.3 考虑多目标优化的灵敏度方法

在得到灵敏度矩阵后，利用迭代格式识别物理参数和地基参数，先求出 P，把修正的弹性模量和地基模量修正原始模量后计算刚度矩阵，再计算特征值和特征向量，在大于容许误差的情形下重复灵敏度分析。在计算的过程中，全局最优解往往超出了物理参数的物理意义范围，因此在迭代过程中对地基模量用以下的判定准则进行改进。在识别浇筑完第 n 层地基模量和结构模量后，在识别浇筑完第 n+1 层的参数时，把浇筑完第 n 层的识别结果作为初参数，对于浇筑完一层的灵敏度分析：

$$\text{当 } P(G) > 0 \text{ 时, 则 } G = G(1 +) \quad (13)$$

$$\text{当 } P(G) < 0 \text{ 时, 则 } G = G(1 -) \quad (14)$$

其中 表示按梯度方向指定的剪切模量变化量。而对于 $n > 1$ 的情况下为保证满足地基动剪模量随层数增加而增加的参考原则，将式 (14) 设为：

$$\text{当 } P(G) < 0 \text{ 时, 则 } G = G \quad (15)$$

用式 (13)，式 (14)，式 (15) 能保证地基模量在梯度方向上逐渐逼近最优解，并能使每次模量修正值的迭代振荡收敛。

3.4 物理参数及地基参数识别

对于 和 的取值需要试算，太大则陷于全局最优，太小则导致迭代次数增加耗费机时，通常取为 0.01，逐层模态实验物理参数及地基参数识别值如表 4 所示。第三层的识别结果规律异常，分析原因估计与第三层测试时间为全年最冷的冬季，其测试温度为 0 有关，温度的原因导致模态频率值下降反应到了识别结果中。识别得到的 3 个基础的动力剪切模量中，中间基础的动力剪切模量较小，其原因是与多基础的动力相互作用的耦合效应有关^[16]。另外，以第四层为例实测得到模态振型值、识别模量计算得到振型值、识别模量计算得到固定基础振型值比较如图 4 所示，可见识别得到结果与实测结果符合良好。

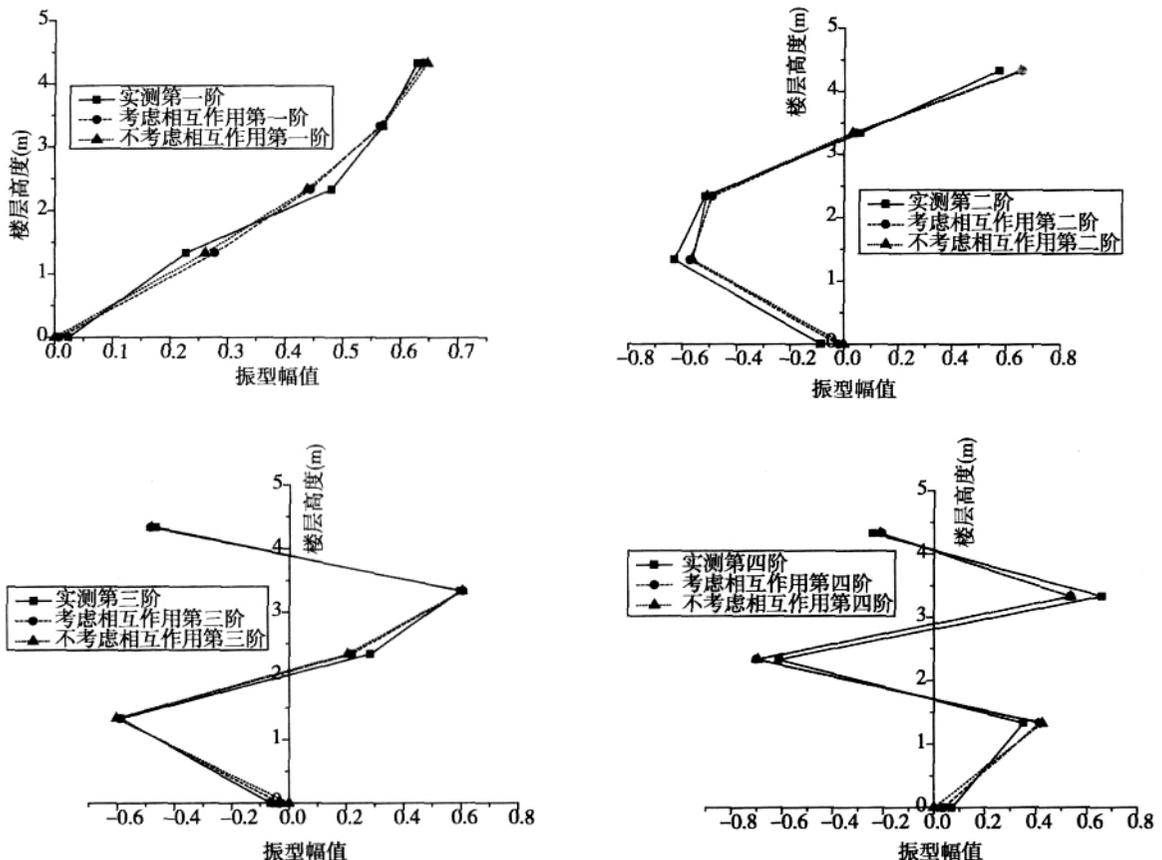


图 4 实测模态振型值与识别模量计算所得理论值比较

Fig. 4 Comparison of the modal vibration shapes between experimental and identified results

表 4 识别得到的框架结构弹性模量和地基剪切模量值
Table 4 Identified elastic modulus of the frame structure and shear modulus of the foundation

工况	Case I	Case II	Case III	Case IV
E ₁	2.5415	3.0159	3.6519	3.9886
E ₂	—	3.4983	4.9146	4.6607
E ₃	—	—	2.6850	4.0833
E ₄	—	—	—	3.3983
G ₁	6.9608	7.5252	7.6464	7.7155
G ₂	6.9608	7.3175	7.5553	7.5553
G ₃	6.9608	7.5252	7.6160	7.6848

注: 弹性模量 $\times 10^{10}$ N/m², 剪切模量 $\times 10^7$ N/m².

4 结 论

本文对一弹性地基上独立基础的四层钢筋混凝土框架结构进行了随着浇筑层数的增加的逐层模态实验研究, 用弯剪层模型作为结构计算模型, 采用 Pais 等人提出的弹性地基阻抗模型作为地基基础计算模型, 基于多目标优化准则, 用灵敏度方法成功识别了结构弹性模量以及地基模量, 得出的结论如下:

(1) 用脉冲锤击法对框架结构进行了 4 种工况模态实验研究, 主要用来考察地基对不同层结构的影响, 测得地基模型的阻尼比在 0.885%~2.28%之间, 结构频率不随锤击力量级变化, 可认为结构处于线性振动状态, 能用实模态理论进行分析研究。

(2) 计算模型的选择是研究地基对结构的影响的重要一环。根据与实验室一座框架结构尺寸基本相同的先验知识, 框架结构模型用缩聚得到弯剪层模型作为参照地基上结构的参考模型, 而对地基阻抗函数简化处理成为与频率不相关的地基函数。

(3) 在满足地基动剪模量和各层混凝土的弹性模量随框架层数的增加而增加的原则下, 建立了 4 种工况下的多目标优化准则。利用基于频率数据识别欠定问题的灵敏度方法对结构物理参数和地基参数进行了同步识别, 识别模态振型结果与测试结果符合良好。

实际结构均处于弹性地基的条件下, 考虑土结构动力相互作用条件下的物理参数识别和地基参数识别具有重要的意义。

参 考 文 献

[1] Whitman R V, Protonotarios N J, Nelson F M. Case study of dynamic soil-structure interaction [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1973, 99 (SM11): 997-1009

[2] Wong H L, Trifunac M D. A comparison of soil-structure interaction calculations with results of full-scale forced vibration tests [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1988, 7(1): 22-31

[3] Trifunac M D, Ivanovic S S, Todorovska M I. Apparent periods of a building. I: Fourier analysis [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(5): 517-526

[4] Hans S, Boutin C, Ibraim E. In situ experiments and seismic analysis of existing buildings. Part I: Experimental investigations [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005, 34(12): 1513-1529

[5] Luco J E, de Barros F C P. Identification of structural and soil properties from vibration tests of the Hualien containment model [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005, 34(1): 21-48

[6] Kobayashi T, Kan S, Yamaya H, et al. System identification of the hualien LSST model structure [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26(11): 1157-1167

[7] Choi J S, Lee J S, Yun C B. Input and system identification of the Hualien soil-structure interaction system using earthquake response data [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(13): 1955-1975

[8] 陈跃庆, 吕西林, 李培振, 等. 分层土-基础-高层框架结构相互作用体系振动台模型试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(3): 104-112 (Chen Yueqing, Lu Xilin, Li Peizhen, et al. Shaking table testing for layered soil-foundation-structure interaction system [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(3): 104-112 (in Chinese))

[9] 刘增荣, 黄义, 尹冠生. 一种新的地基参数确定方法 [J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(3): 25-28 (Liu Zengrong, Huang Yi, Ying Guansheng. A method of determining the layer foundation parameters [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20(3): 25-28 (in Chinese))

[10] Pais A, Kausel E. Approximate formulas for dynamic stiffness of rigid foundations [J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 1988, 7(4): 213-227

[11] 蒯行成. 地基-基础-上部结构动力相互作用分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 1998 (Kuai Xingcheng. Analysis of Dynamic Soil-Foundation-upper-structure interaction [D]. Changsha: Hunan University, 1998 (in Chinese))

[12] Sanayi M, McClain J, Fascetti S W. Parameter estimation incorporating modal data and boundary conditions [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(9): 1049-1055

[13] 徐丽. 基于模态参数的混凝土框架结构损伤诊断研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2004 (Xu Li. Research on damage detection of reinforced concrete frame structures based on modal parameters [D]. Changsha: Hunan University, 2004 (in Chinese))

[14] Cheng F Y, Li D. Multiobjective optimization design with pareto genetic algorithm [J]. Journal of Structural Engineering, 123(9): 1252-1261

[15] 王杰贤. 动力地基与基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 105-106 (Wang Jexian. Dynamic foundation and basement [M]. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese))

[16] Qian J, Beskos D E. Dynamic interaction between 3-D rigid surface foundations and comparison with the ATC-3 provisions [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2002, 128(4): 438-448