

文章编号:1673-2049(2009)02-0032-06

场地土动力特性识别方法对比

陈 隽¹, 赵冠宇², 祁晓煜², 史晓军²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要:结合自由场地土振动台试验,对比了随机子空间迭代(SSI)方法、经验模式分解结合希尔伯特变换(EMD+HT)方法和频域分解(FDD)方法识别场地土卓越频率、阻尼比的适用性,以及不同激励类型、不同土层深度和大阻尼比情况对识别精度的影响。结果表明:对于随机激励,当阻尼比较小时,上述3种方法均能准确识别出场地土卓越频率;而大震时土体卓越频率、阻尼比与振动过程耦合,此时经验模式分解结合希尔伯特变换方法可以给出合理的识别结果。

关键词:场地土动力特性;振动台试验;随机子空间迭代;经验模式分解;频域分解方法

中图分类号:TU411.8

文献标志码:A

Comparison of Soil Dynamic Property Identification Method

CHEN Jun¹, ZHAO Guan-yu², QI Xiao-yu², SHI Xiao-jun²

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

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

Abstract: Combining free soil shaking table test, the predominant frequency of silty clay and its damping ratio used in series of shaking table test were identified by three commonly used methods, i. e. the stochastic subspace identification (SSI) method, frequency domain decomposition (FDD) method and empirical mode decomposition plus Hilbert transform (EMD+HT) method. The applicabilities of the three methods were verified and identification results were discussed in items of effect of input type, different soil depths and selection of calculating parameters concerning large damping ratio cases. The results show that the three methods are applicable for random excitation and small damping ratio cases; only empirical mode decomposition plus Hilbert transform method can produce reasonable results when soil predominant frequency and damping ratios are coupled with vibration process or subjected to strong earthquake.

Key words: soil dynamic property; shaking table test; stochastic subspace iteration; empirical mode decomposition; frequency domain decomposition method

0 引言

土体动力特性是地下结构抗震分析的重要计算参数,土动力非线性特性可采用最大动剪切模量、割线剪切模量-剪应变关系曲线以及土体阻尼比-剪应

变关系反映。利用地脉动、小震或强震时地面运动的加速度观测资料,结合参数识别方法是确定土动力特性参数的一种重要方式^[1-2]。目前常用谱分析方法来确定场地土的卓越频率和阻尼比。Pitilakis等^[3]通过傅里叶变换和功率谱对应的峰值来估算土

收稿日期:2009-03-02

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(50621062/E0805);

土木工程防灾国家重点实验室基础研究项目(SLDRCE08-C-03)

作者简介:陈 隽(1972-),男,湖南茶陵人,副教授,工学博士,E-mail:cejchen@tongji.edu.cn。

体卓越周期。Elgamal 等^[4]利用井下台阵的地震记录,通过自功率谱函数和加窗傅里叶变换识别场地土的卓越频率,并且对比了不同窗长度下的识别结果。时域识别法方面,Glaser 等^[5]采用等效线性化方法建立响应的 ARMA 模型,通过台阵记录识别了场地土的卓越频率和阻尼比,对比了不同峰值加速度地震波下的卓越频率和阻尼比。Mikami 等^[6]用等效线性法将土体等效为多自由度系统,并利用井下台阵记录基于扩展 Kalman 滤波器和局部迭代法识别了 1995 年 Hyogoken-Nanbu 地震土体的阻尼比等特性。

利用实测地震动响应数据分析土动力特性避免了在取样和运输过程中的随机扰动,可靠性较高,对于一些重大的工程项目必须通过现场测试的方法来确定场地土的动力参数。参数识别方法的选取是测试分析工作的核心,对参数结果精度影响显著。目前,有关土体动力特性识别方法的研究尚不充分,因此,笔者采用工程结构参数识别常用的方法,结合模拟地震振动台试验来识别场地土的动力特性,对比研究了广为应用的 3 种识别方法:随机子空间迭代(Stochastic Subspace Identification, SSI)方法、经验模式分解结合希尔伯特变换(Empirical Mode Decomposition plus Hilbert Transform, EMD + HT)方法和频域分解(Frequency Domain Decomposition, FDD)方法识别场地土卓越频率和阻尼比的适用性,以及不同激励类型、不同土层深度和大阻尼比情况对识别结果的影响。

1 参数识别方法

本文中选取 SSI、FDD 和 EMD+HT 三种参数识别方法开展对比研究。SSI 方法和 FDD 方法分别是目前时域和频域内最有效的识别方法之一。EMD+HT 方法则是结合新近提出的经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法而发展出来的新的参数识别方法。

1.1 SSI 方法

SSI 方法是一种新的时域识别方法,1996 年由 Overschee^[7]提出。在随机激励假定下,SSI 方法只需系统的输出响应,计算速度快而且频率分辨率高,在阻尼识别精度及具有密集频率特征的系统识别方面显示了优势,目前广泛用于机械、土木等工程领域的参数识别。SSI 方法仅用于随机响应数据,通过矩阵 QR 分解和奇异值分解(SVD)可以得到一套正交投影算法的识别系统模型,即

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_t + \mathbf{w}_t \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{C}\mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \quad (2)$$

式中: \mathbf{A} 、 \mathbf{C} 分别为转换矩阵和可观测矩阵; \mathbf{x}_t 、 \mathbf{y}_t 分别为系统状态向量和观测量; \mathbf{w}_t 、 \mathbf{v}_t 分别为系统的噪声向量和激励向量。

式(1)、(2)为 SSI 系统识别的基本方程,式(1)为状态方程,式(2)为可观测方程。SSI 方法的主要思想是通过 Kalman 滤波估计将上述的 2 个输入转换为 1 个输入,而后用估计值代替状态列向量,式(1)、(2)可转换为如下形式

$$\hat{\mathbf{x}}_{t+1} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_t + \mathbf{K}_t \mathbf{e}_t \quad (3)$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_t + \mathbf{e}_t \quad (4)$$

式中: \mathbf{K}_t 为 Kalman 增益矩阵; \mathbf{e}_t 为零均值高斯白噪声向量。

而后通过优化算法进行参数识别。

SSI 方法由 2 个步骤组成:①确定扩展可观测矩阵或者估计出系统的可观测序列;②计算系统矩阵并获得系统参数。在确定可观测矩阵估计系统的可观测序列过程中,根据加权矩阵的不同选择,通常有 3 种实现方法:①非加权主分量(UPC)算法;②加权主分量(PC)算法;③规范变分量(CVA)算法。CVA 算法用的状态空间维度比较大,适用于估计能量等级差别较大的模态,如果某个模态没有很明显地被激发出来,激励的能量分布不均匀,这种情况下适用 CVA 算法。针对土体特性,本文中的计算采用 CVA 算法。

1.2 FDD 方法

FDD 方法可以看作是传统基于频域识别方法的扩展,最早由 Brinker 等^[8]提出,有 2 个假定:①输入激励类型是高斯白噪声过程;②小阻尼假定。FDD 方法的主要思想是通过奇异值分解(SVD)把功率谱密度(PSD)矩阵在一些频率上分解为对应的主值和一些正交的向量,而后进行选点,选择出对某一模态贡献最大的频率,最后通过该频率对应的列向量确定振型。它相对于传统频域识别方法的优点是有较高的频率分辨率,可分辨密集频率结构的模态。

FDD 方法的具体实现步骤如下:①首先计算得到输出数据的 PSD;②对 PSD 矩阵进行 SVD 处理;③对多组 SVD 值进行平均;④对多组 SVD 平均值进行选点得出对应的模态信息。

应当注意的是在进行 SVD 分解后,SVD 曲线的峰值给出了系统阻尼频率,相应的左奇异值向量与模态振型成正比,右奇异值向量则与模态参与系数成正比。以上述的模态振型与参与向量为加权函

数,得到对应各模态的频率响应函数,然后再用时域或频域的方法识别出模态频率和阻尼比。

1.3 EMD+HT 方法

EMD+HT 方法包含经验模式分解(EMD)方法和希尔伯特变换(HT)两部分。EMD 是由 Huang 等^[9]在 1998 年提出的一种新的数据处理方法,在处理非平稳信号方面较傅里叶变换和小波变换方法有一定的优势。Yang 等^[10]提出了基于 EMD+HT 方法的多自由度结构模态参数识别框架,并结合风洞试验识别了 76 层模型结构的频率和阻尼比。Chen^[11]采用 EMD+HT 方法成功识别得到了中国香港青马大桥在台风作用下的振动频率和阻尼比,并对该方法在密集频率结构参数识别中的应用进行了理论研究^[12]。上述研究结果表明,EMD+HT 方法适用于非平稳及非线性振动信号的分析与参数识别。

EMD 方法将信号分解为本质协振函数(Intrinsic Mode Function, IMF)的和,IMF 由分解信号自身的特性决定。由 EMD 方法得到的 IMF 是一个适合希尔伯特变换的窄带信号,理论上讲每一个 IMF 都对应一个单一的频率成分,通过希尔伯特变换可以将一个单自由度的响应转换为响应的解析信号 $z(t)$,即

$$z(t) = v(t) + i\tilde{v}(t) = A(t)e^{-i\theta(t)} \quad (5)$$

式中: t 为时间; $A(t)$ 、 $\theta(t)$ 分别为瞬时幅值和瞬时相位角; $\tilde{v}(t)$ 为 $v(t)$ 的希尔伯特变换。

而后建立幅值、相位角与时间的函数为

$$\ln[A(t)] = -\xi\omega_0 t + \ln A_0 \quad (6)$$

$$\theta(t) = \omega_d t - \pi/2 \quad (7)$$

式中: ω_0 为圆频率; ω_d 为阻尼频率; ξ 为阻尼比; A_0 为常数,由冲击强度及结构质量、频率特性确定。

通过确定直线方程式(6)的斜率可求出系统的阻尼比和频率。

EMD+HT 方法振动系统参数识别包含 4 个计算步骤^[13]:①首先由振动测试信号(如加速度)进行 EMD 方法分解,得到多个 IMF;②对应特定 IMF 分量应用随机减量技术(Random Decrement Technique, RDT),得到某阶振动模态的自由衰减响应;③对自由衰减响应进行希尔伯特变换[式(5)],得到信号的瞬时幅值和相位角;④对幅值和相位角函数[式(6)、(7)]进行最小二乘拟合得到该阶振动模态的频率和阻尼比。

1.4 等效阻尼比

上述方法识别出的土体动力特性本质上是等效

线性系统参数。为了进一步和土体动力本构关系模型计算结果相对比,将土体视为等效线性动黏弹性体,则可采用式(8)计算等效阻尼比 λ ^[14]

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (8)$$

式中: ΔW 为一个应力循环周期中的能量消耗; W 为一个周期中保存下来的能量,即弹性应变能。

需要注意的是,由于等效线性的本质,式(8)仅在动应变幅值较小时适用。动应变幅值较大时,因残余应变的存在,应力-应变的滞回曲线不闭合,形状与椭圆假定相差甚远。为方便描述,以下称式(8)的计算结果为土体阻尼比定义值。

2 场地土自由场振动台试验

采用图 1 所示剪切模型箱开展了场地土自由场振动台试验。模型箱的内部尺寸为 $3.0 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 1.92 \text{ m}$,由 16 层方钢管框架叠合而成,框架之间可以定向水平相对滑移,以满足模型地基的层状水平变形要求^[15]。试验模型土选取长江上游重庆段的粉质黏土,内摩擦角为 27.9° ,黏聚力为 24.4 kPa 。

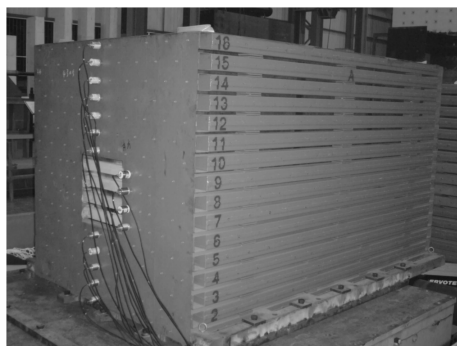


图 1 剪切模型箱

Fig. 1 Shearing Model Box

测试传感器布置见图 2。图 2 中 A1~A19 为加速度传感器,记录土体加速度响应时程,D1~D8 为位移计,记录剪切模型箱的位移响应时程。

试验中考虑了 3 种不同类型的输入:白噪声($0 \sim 25 \text{ Hz}$ 扫频)、正弦波(6 Hz)和 El Centro 地震波。对于正弦波和 El Centro 地震波还考虑了不同幅值的输入,激振方向是沿模型箱长轴方向的,如图 2 所示。

3 土动力特性参数识别结果及分析

3.1 概述

利用第 1 节 3 种方法分别识别了在白噪声激励、 6 Hz 正弦波(幅值分别为 $0.1g$ 、 $0.6g$ 和 $1.0g$ 、 g

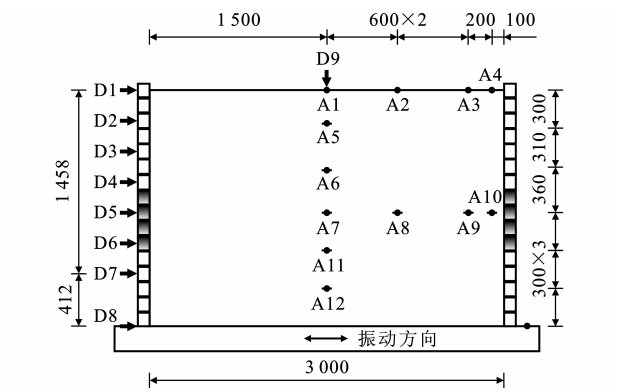


图 2 传感器布置(单位:mm)

Fig. 2 Sensor Arrangements (Unit:mm)

为重力加速度)和 El Centro 地震波(幅值分别为 0.05g、0.1g 和 0.4g)激励下场地土的卓越频率及对应的阻尼比。所采用的数据为传感器 A1、A7 和 A12 的水平(激振方向)加速度信号。

在 SSI 方法中,对于白噪声和正弦波激励的工况采用 CVA 加权算法,并利用文献[7]中提出的分析程序实现。FDD 方法利用 ARTeMIS 软件完成参数识别。在 EMD+HT 方法中,考虑到土体频谱杂化现象,EMD 方法分解时的最小筛选次数取为 3 000。在随机减量法(RDT)中,阈值选取为 1.0~1.4 倍的标准差,自由衰减曲线取 3~10 s 不等。EMD+HT 方法参数识别采用自编程序实现。

场地土动力特性与其应变幅值有关,因此以下分析中计算了传感器 A1 对应土层处的平均剪应变绝对值的最大值。平均剪应力-应变关系由实测模型箱位移与加速度信号推算,假定同一层所有点的位移相同,即同一层的所有点的应变都相等;2 个位移测点之间的所有土层的应变相等,取为平均应变。图 3 为 0.1g 的正弦波、0.4g 的 El Centro 地震波和白噪声激励下计算所得的土层剪应力-剪应变曲线。

3.2 卓越频率

表 1 中给出了不同激励类型在不同幅值下场地

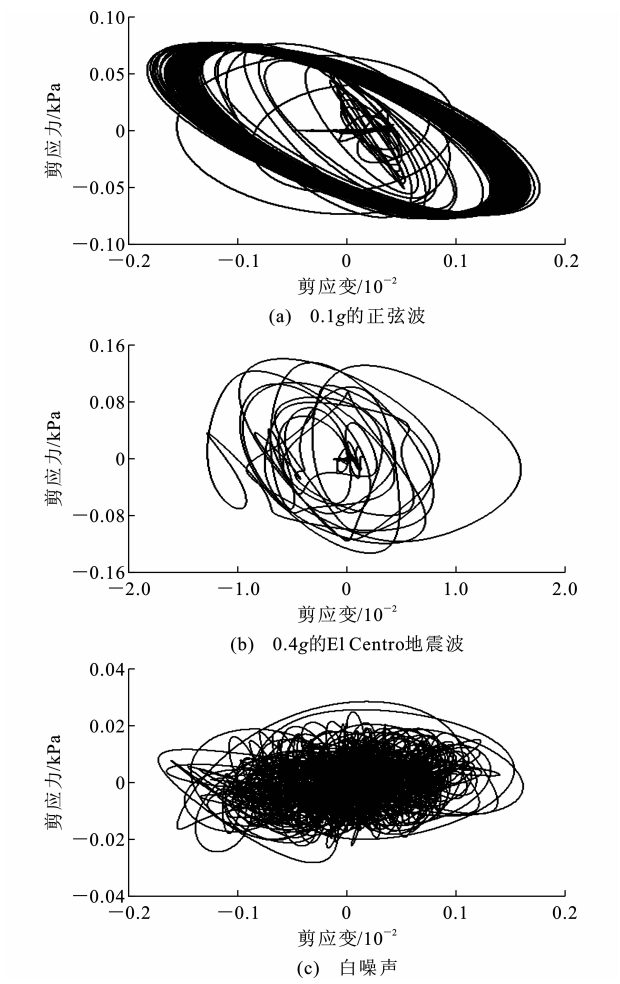


图 3 传感器 A1 的土层剪应力-剪应变曲线

Fig. 3 Relations of Shearing Stress and Shearing Strain of Soil of Sensor A1

土卓越频率的识别结果。本次试验中,对于 El Centro 地震波激励情况,SSI 方法和 FDD 方法均未能给出可靠的频率识别结果。表 1 中同时给出了不同加速度输入幅值时传感器 A1 对应土层处的平均剪应变绝对值的最大值。

从表 1 可见,3 种激励形式下土体的最大剪应变值在 10⁻⁴~10⁻² 之间,土体特性介于弹性与弹塑

表 1 场地土卓越频率识别结果

Tab. 1 Identification Results of Soil Predominant Frequencies

激励类型	加速度幅值	剪应变/10 ⁻³	识别方法	卓越频率/Hz		
				传感器 A1	传感器 A7	传感器 A12
正弦波	0.1g,0.6g,1.0g	1.4,13	EMD+HHT	6.01,6.01,6.02	6.03,5.97,5.95	5.77,6.00,6.01
			SSI	6.00,6.00,6.01	6.00,6.00,6.01	6.00,6.00,6.01
			FDD	6.01,6.01,6.00	6.01,6.02,6.00	6.01,6.01,6.00
El Centro 地震波	0.05g,0.1g,0.4g	1,2,4	EMD+HT	7.94,7.24,3.87	7.90,6.95,3.69	7.32,6.44,NA
白噪声	位移控制	1	EMD+HT	6.29	6.54	6.32
			SSI	6.16	6.21	5.67
			FDD	6.00	6.00	6.25

注:NA 为未识别出结果;下表同。

性之间。白噪声激励下卓越频率的识别结果比较稳定,随着土层深度的变化,频率值在 6 Hz 附近波动。利用系统响应识别得到的系统特性实际上是系统及输入特性的综合反映。正弦波激励下由于优势频率的存在,其识别值与外激励幅值无关,反映的是外激励中的优势频率。El Centro 地震波激励下频率识别值随输入幅值增大呈下降趋势,与试验中观察到土体宏观震害现象一致。0.1g 的 El Centro 地震波输入时,土体内部开始出现微裂缝,土体非线性开始发展,刚度下降,其卓越频率随之下降。0.4g 的 El Centro 地震波输入时,土体表面出现宏观裂缝,破坏严重,因此频率也显著下降。显然,地震波输入时场地土的卓越频率是个变化量,并随着地震震级的变化而变化,与振动过程耦合。这与采用脉动(白噪声)或者正弦波激励(周期荷载)方式获得的地震周期有明显的区别,特别是在大震级的情况下。结果表明,采用现场试验测定土体特性时应注意激励形式对识别结果的影响。

由均匀剪切梁法可知,土体的 1 阶频率 f 与剪切波速 V_s 之间的关系式为^[16]

$$f=\frac{V_s}{4H}$$

(9)

式中: H 为试验土体深度。每次试验前均对土体的剪切波速进行了测量,试验测得的剪切波速平均值在 $55\sim 60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,取 $H=1.8\text{ m}$,按照式(9)计算土体的 1 阶频率在 $7.63\sim 8.33\text{ Hz}$ 之间,与 0.05g 的 El Centro 地震波输入下 EMD+HT 方法的频率识别结果非常接近,这从另外一个方面说明了该方法的合理性。

3.3 阻尼比

表 2 中给出了采用 3 种识别方法以及定义计算方法得到的土体阻尼比。对试验用土,直接从模型箱中取样并采用动三轴仪测定了 3 种不同干密度下土体的动弹性模量、动剪切模量和阻尼比等动力特性,结果见表 3,其中得到的阻尼比在 $3.01\%\sim 11.02\%$ 之间。

从图 3 可见,即使对于正弦波激励,土体的剪应力-剪应变滞回曲线与等效阻尼比定义模式中的椭圆假定也有很大的差别,对于 El Centro 地震波和白噪声激励则相差甚远。因此,表 2 结果显示的 3 种荷载下采用定义方式计算的阻尼比均不可靠。这一结果进一步证明了采用识别方法确定土体特性的重要性。

对于白噪声及 El Centro 地震波激励,FDD 方

表 2 阻尼比识别结果

Tab. 2 Damping Ratio Identification Results

激励类型	加速度幅值	识别方法	阻尼比/%		
			传感器 A1	传感器 A7	传感器 A12
正弦波	0.1g,	EMD+HT	1.32, 1.43,4.00	2.63, 4.30,4.40	7.11, 0.30,0.20
	0.6g, 1.0g	SSI	0.085, 0.140,0.110	0.096, 0.150,0.140	0.140, 0.140,0.140
El Centro 地震波	0.05g,	FDD	2.00, 2.00,2.08	2.00, 2.04,2.01	2.00, 2.01,2.00
	0.1g,	式(8)	59.00, 98.00,70.00	51.00, 10.70,78.00	12.79, 134.00,42.00
	0.4g	定义值			
白噪声		EMD+HT	4.66,9.28, 6.91	5.40,14.41, 11.81	8.19,11.44, NA
		式(8)	57.0,52.0, 29.8	64.0,68.0, 22.8	2.89,15.97, 5.78
		定义值			
		EMD+HT	9.39	6.07	7.09
		SSI	10.41	NA	9.13
		式(8)	36.0	25.8	132.0

表 3 土性参数试验结果

Tab. 3 Test Results of Soil Parameters

试验编号	$\rho_d / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	K_c	σ_{3c} / kPa	E_{dmax} / MPa	G_{dmax} / MPa	$\xi_{dmax} / \%$
1	1.4	1.2	50	7.63	2.73	11.02
		1.2	100	9.27	3.31	3.01
		1.2	150	7.15	2.55	5.01
2	1.5	1.2	50	12.89	4.60	9.56
		1.2	100	15.20	5.43	7.01
		1.2	150	18.76	6.70	6.01
3	1.6	1.2	50	14.79	5.28	9.74
		1.2	100	23.75	8.48	9.91
		1.2	150	31.55	11.27	4.92

注: ρ_d 为场地土干密度; K_c 为固结主应力比; σ_{3c} 为侧向固结应力; E_{dmax} 为室内最大动弹性模量; G_{dmax} 为室内最大动剪切模量; ξ_{dmax} 为室内最大阻尼比。

法未能给出可靠的阻尼比识别结果,在正弦波激励下的识别结果均为 2%,与宏观试验现象不符,FDD 方法不适合于本次试验的数据分析。SSI 方法在白噪声激励下的识别得到了合理的阻尼比;正弦波激励下的阻尼比识别值在 0.1% 左右,不符合土体一般动力特性。EMD+HT 方法在 3 种激励形式下均得到了合理的阻尼比识别结果。白噪声和 El Centro 地震波激励下的识别结果与动三轴仪试验测定结果较接近。在小震时(0.1g 以下),正弦波和 El Centro 地震波激励的阻尼比识别值随埋深增加

而增大,与文献[17]中现场实测所得规律一致。

此外,El Centro 地震波激励下 EMD+HT 方法的阻尼比识别结果在 0.05g、0.1g 和 0.4g 时出现先增大再减小的变化趋势,这与宏观试验现象相吻合。0.05g 的 El Centro 地震波激励时,土体呈现弹性特征,阻尼比较小。在 0.1g 的 El Centro 地震波时,模型箱振动微弱,土体表面平静。由于土体内部微裂缝的出现,系统整体耗能能力增强,因此传感器 A1、A7 和 A12 处识别得到的阻尼比均显著上升。而在 0.4g 的 El Centro 地震波时,模型箱整体位移较大,土体内部的微裂缝发展成土体表面的宏观裂缝,土体被分隔成不同部分,各部分内部不再产生新的微裂缝,因此耗能能力不升反降,对应的阻尼比识别结果也呈现下降趋势。由于 EMD 方法理论上适合处理非线性非平稳信号^[18-19],因此可以认为 EMD+HT 方法的识别结果较其他 2 种方法更合理。然而,需要指出的是,EMD+HT 方法的稳定性仍然受到计算参数选择的影响。

4 结 语

(1)对于随机激励类型,SSI、FDD 和 EMD+HT 方法均可以准确地识别得到场地土的卓越频率;周期性激励下的识别结果受荷载优势频率影响显著;对于地震激励,EMD+HT 方法的频率识别结果更可靠。

(2)动荷载作用下由于剪应力-应变曲线呈椭圆型的基本假定不能满足,不宜采用定义的方式从实测振动响应中计算土体的阻尼比。

(3)阻尼比小于 10%左右时,SSI 和 EMD+HT 方法在随机激励下可以得到较好的阻尼识别结果,对于地震动输入及较大阻尼比情况,EMD+HT 方法更适合阻尼比识别,但算法的稳定性仍然受到计算参数选择的影响,需要进一步深入研究。

(4)大震情况下由于土体非线性的发展,其卓越频率和阻尼比会出现变化并与振动过程耦合,因此大震部分的研究应当围绕场地土进入非线性状态后时变动力特性的识别算法展开。

参考文献:

References:

- [1] 孙 静,袁晓铭.土的动模量和阻尼比研究述评[J].世界地震工程,2003,19(1):88-95.
SUN Jing, YUAN Xiao-ming. A State-of-art of Re-

search on Dynamic Modulus and Damping Ratio of Soils[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19 (1):88-95.

- [2] 刘保健,谢定义.随机荷载下土动力特性测试分析方法[M].北京:人民交通出版社,2001.
LIU Bao-jian, XIE Ding-yi. Analyzing and Testing Method of Soil Dynamic Property Under Random Excitation[M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [3] PITILAKIS K D, ANSTASSIADIS A, ROPTAKIS D. Field and Laboratory Determination of Dynamic Properties of Natural Soil Deposits[C]//ALBERTO B. Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering. Madrid: Taylor & Francis, 1992: 1275-1280.
- [4] ELGAMAL A W, ZEGHAL M, PARRA E, et al. Identification and Modeling of Earthquake Ground Response-I: Site Amplification[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1996, 15(8):499-522.
- [5] GLASER S D, BAISE L G. System Identification Estimation of Soil Properties at the Lotung Site[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 19(7): 521-531.
- [6] MIKAMI A, SAWADA T. Simultaneous Identification of Time and Space Variant Dynamic Soil Properties During the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(1):69-77.
- [7] OVERSCHEE V P, MOOR D B. Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation, Applications[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [8] BRINKER R, ZHANG L, ANDERSEN P. Modal Identification of Output-only Systems Using Frequency Domain Decomposition [J]. Smart Mater Struct, 2001, 10(3):441-445.
- [9] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. Proceedings of the Royal Society, 1998, 454 (1971):903-995.
- [10] YANG J, LEI Y, PAN S, et al. System Identification of Linear Structures Based on Hilbert-Huang Spectral Analysis. Part 1: Normal Modes[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(10): 1533-1554.

- ity Analysis of Real-time Dynamic Substructuring Using Delay Differential Equation Models[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005, 34: 1817-1832.
- [5] WILLIAMS D M. Numerical Modeling of Real-time Substructure Testing[D]. Oxford: Oxford University, 2001.
- [6] HORIUCHI T, INOUE M, KONNO T, et al. Real-time Hybrid Experimental System with Actuator Delay Compensation and Its Application to a Piping System with Energy Absorber[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28(10): 1121-1141.
- [7] DARBY A P, BLAKEBOROUGH A, WILLIAMS M S. Real-time Substructure Tests Using Hydraulic Actuator[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(10): 1133-1139.
- [8] MAHIN S A, SHING P B. Pseudo-dynamic Method for Seismic Testing[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(7): 1482-1985.
- [9] 田石柱, 赵 桐, 赵雪峰. 位移保护下力-控制拟动力试验方法的原理[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 37-41.
- TIAN Shi-zhu, ZHAO Tong, ZHAO Xue-feng. Force-displacement Compound Control Method for Pseudo-dynamic Test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3): 37-41.
- [10] 刘哲锋, 沈蒲生, 龚胡广. 基于拟力法的框架结构静力弹塑性分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(3): 32-36.
- LIU Zhe-feng, SHEN Pu-sheng, GONG Hu-guang. Static Elastic-plastic Analysis of Frame Structure Based on Force Analogy Method[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(3): 32-36.
-
- (上接第 37 页)
- [11] CHEN J, XU Y L, ZHANG R C. Modal Parameter Identification of Tsing Ma Suspension Bridge Under Typhoon Victor: EMD-HT Method[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(10): 805-827.
- [12] CHEN J, XU Y. Identification of Modal Damping Ratios of Structures with Closely Spaced Modal Frequencies[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2002, 14(4): 417-434.
- [13] 陈 隽, 徐幼麟. HHT 方法在结构模态参数识别中的应用[J]. 振动工程学报, 2003, 16(3): 383-388.
- CHEN Jun, XU You-lin. Application of HHT for Modal Parameter Identification to Civil Structures[J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(3): 383-388.
- [14] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 141.
- CHEN Guo-xing. Soil Earthquake Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007: 141.
- [15] SHI X, WU H, CHEN J, et al. Design of Laminar Shear Box with Openings for Shaking Table Test and Experimental Verification [C]//SHEN Zu-yan, LI Jie, WU Zhi-shen, et al. Proceedings of the International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering. Shanghai: Tongji University Press, 2007: 798-806.
- [16] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2002.
- LIAO Zhen-peng. Introduction to Wave Motion Theories in Engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002.
- [17] 徐 建. 建筑振动工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 558.
- XU Jian. Architecture Vibration Engineering Handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 558.
- [18] 曹彩芹, 王春玲, 王爱勤. 指数函数模量成层土上剪切梁的随机地震反应[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 66-69.
- CAO Cai-qin, WANG Chun-ling, WANG Ai-qin. Random Earthquake Response of Shearing Beam on Stratified Foundation with Exponential Function Shear Modulus[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 66-69.
- [19] 曹彩芹, 王春玲, 黄 义. 层合圆板与无限层土地基静力相互作用[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(3): 395-398.
- CAO Cai-qin, WANG Chun-ling, HUANG Yi. Statics Interaction Analysis Between Laminated Circular Plate and Infinite Layer Foundation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(3): 395-398.