

地震荷载作用下确定土的阻尼比的频域分析法

马倩倩^{1,2}, 刘保健², 吴明玉^{2,3}, 韩珏⁴

(1. 南阳理工学院, 河南 南阳 473000; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;

3. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 4. 商洛学院, 陕西 商洛 726000)

摘要: 为了从频域角度分析地震荷载作用下土的阻尼比, 将随机过程理论引入土阻尼比分析中, 并提出了一种基于傅里叶变换的频域分析法, 最后通过试验及数值分析手段验证了利用该方法确定土的阻尼比的可行性。结果表明: 通过傅里叶变换的频域分析方法得到的地震荷载下土的阻尼比是一个与频率相关的函数; 任意一种土及地震波都可得到一条“阻尼比-频率谱”。实际工程应用时, 建议将土阻尼比看作随地震波输入过程而动态变化的参数。通过此频域分析法可找到每类土、每种地震波作用下的“阻尼比-频率谱”, 即可得到土的动态阻尼比参数。以期为随机荷载作用下土阻尼比的确定提供参考。

关键词: 地震荷载; 土的阻尼比; 频域分析法; 傅里叶变换

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)05-0213-05

Frequency domain analysis in determining damping ratio of soil under seismic load

MA Qianqian^{1,2}, LIU Baojian², WU Mingyu^{2,3}, HAN Jue⁴

(1. Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473000, China; 2. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

3. Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 4. Shangluo University, Shangluo 726000, China)

Abstract: In order to analyze the damping ratio of soil under seismic load in frequency domain, stochastic process theory was introduced into soil damping ratio analysis. A frequency domain analysis method based on Fourier transform was proposed, and the feasibility of this method was verified by experiment and numerical analysis. The results showed that the damping ratio of soil under seismic load was a frequency-dependent function obtained by the frequency domain analysis method of Fourier transform. Any kind of soil and seismic wave can get a "damping ratio-frequency spectrum". We suggest that the soil-damping ratio should be regarded as a parameter that changes dynamically with the seismic wave input process. Through this frequency-domain analysis method, the "damping ratio-frequency spectrum" of every soil and every seismic wave can be found, and the dynamic damping ratio parameters can be obtained. In order to provide a reference for the determination of soil damping ratio under random load.

Key words: seismic load; damping ratio of soil; frequency domain analysis; Fourier transform

1 研究背景

土的阻尼比是土的一个重要动力特性参数^[1], 它的确定一直是土动力学研究中的重要问题。现行土的动阻尼比室内试验确定方法, 仅适用于周期荷载作用下土的阻尼比的确定, 并且这些确定土阻尼比的方法都依据单自由度和阻、弹系统的有阻尼自由振动理

论, 将所有阻尼力产生的能量损耗都等效为土黏弹性的能量损耗; 因而采用传统的方法不能合理地计算随机地震荷载作用下土的阻尼比, 更不能分析地震荷载作用下的不同频率对阻尼比的影响。地震荷载是比较常见的随机荷载, 在实际工程中相关场地的抗震设计要求的阻尼参数都是依据现有的参考值来确定的, 与实际地震荷载作用下土的阻尼比是不相符的。为

收稿日期: 2018-06-07; 修回日期: 2018-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378004)

作者简介: 马倩倩(1988-), 女, 河南郑州人, 博士研究生, 主要从事土动力学的研究。

通讯作者: 吴明玉(1984-), 女, 江苏泗阳人, 博士研究生, 主要从事岩土与隧道工程的研究。

了合理确定地震荷载作用下土的阻尼比,为工程提供合理的动力特性参数,有必要对随机荷载作用下土的阻尼比的确定方法进行研究。

许多研究采用等效线性模型法计算土的阻尼比,通过试验分析动应变、循环次数、孔隙比等因素对不同类型的土的动阻尼比的影响^[2-11];李晶晶等^[12]、黄志全等^[13]和张雨廷等^[14]采用对数衰减率法计算了共振柱试验中土的阻尼比;应怀樵等^[15]采用半功率带宽法与 INV 阻尼计法求材料的阻尼比;刘保健等^[16]提出了不考虑土性、固结类型、动载类型、频率等因素影响的互相关函数法,计算土的阻尼比。

常规的土阻尼比的计算方法没有考虑参数频率的影响,但在随机荷载作用下土的阻尼比是与频率相关的,而此方面的研究较少,因此有必要在此方面展开研究。本文将随机过程理论引入土动力学特性测试与分析中,将动应力时程、动应变时程和动孔压时程均视为随机过程,在此基础上提出一种基于傅里叶变换的频域分析法,并通过试验及数值分析手段验证了利用该方法确定土的阻尼比的可行性。

2 土阻尼比确定的频域分析法

土的阻尼比可以表示为 $\lambda = \frac{1}{2} \tan \varphi$ ^[1]。式中的 φ 为动应变滞后于动应力的相角,可见用滞后角同样可测算土的阻尼比。因此在地震荷载作用下求土的动阻尼比的关键是确定动应变滞后于动应力的相角 φ 的值。

频域分析的傅里叶变换是将一般的时域函数 $x(t)$ 转化成频域函数 $x(f)$ 来进行研究的,其基本关系为:

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) e^{j2\pi ft} df \quad (2)$$

其中 $x(f)$ 为复变量,可以写成:

$$x(f) = |x(f)| e^{j\varphi(f)} \quad (3)$$

式中: $|x(f)|$ 为 $x(f)$ 的模; $\varphi(f)$ 为 $x(f)$ 的相角; $x(f)$ 为信号 $x(t)$ 的频谱。

随机过程理论将动载试验所得的动应力时程、动应变时程和动孔压时程均视为随机过程。试验测试和分析出的动应力功率谱用 $G_{xx}(f)$ 来表示,动应变功率谱用 $G_{yy}(f)$ 来表示,其互功率谱用 $G_{xy}(f)$ 表示。用互功率谱定义的传递函数表示为:

$$\begin{aligned} H(f) &= G_{xy}(f)/G_{xx}(f) \\ &= |H(f)| e^{-j\varphi(f)} = A(f) - jB(f) \end{aligned} \quad (4)$$

$$|H(f)| = \sqrt{A^2(f) + B^2(f)} \quad (5)$$

$$\varphi(f) = \arctan \frac{B(f)}{A(f)} \quad (6)$$

式中: $|H(f)|$ 为传递函数 $H(f)$ 的模; $\varphi(f)$ 为其相位角。

公式(6)表明,输出动应变和输入动应力的相位角 $\varphi(f)$ 在物理意义上即为动应变滞后动应力的相角,反映了土的阻尼特性。

使用频域分析法进行地震荷载下土的阻尼比求解的具体流程为:

(1) 采用 Matlab 编程对原始时间信号(输入信号 $x(t)$ 、输出信号 $y(t)$) 进行自相关函数 $R_x(\tau)$ 、 $R_y(\tau)$ 和互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 求解;

(2) 对自相关函数、互相关函数进行如公式(1)傅里叶变换求得自功率谱 $G_{xx}(f)$ 、 $G_{yy}(f)$, 对互相关函数进行快速傅里叶变换求得互功率谱 $G_{xy}(f)$;

(3) 由公式(4)表示出传递函数 $H(f)$, 然后进一步利用公式(6)求出输出动应变和输入动应力的相位差 $\varphi(f)$;

(4) 将相位差 $\varphi(f)$ 代入公式 $\lambda = \frac{1}{2} \tan \varphi(f)$ 即得土的阻尼比随频率 f 的变化关系。对于非平稳的时间过程需要先进行平稳化处理。

3 试验概况

3.1 试样制备

试验所用土样为取自某地铁现场的砂性土。土样的基本物理特性指标参数见表 1。试样尺寸为 100 mm(高) × 50 mm(直径), 见图 1。重塑土样的制备方法为水中落砂法。



图 1 重塑砂样

3.2 试验过程

采用长安大学 GDS 空心圆柱扭剪试验系统的动三轴模块进行试验。

地震荷载作用下砂土的动三轴试验分为固结、动载两个阶段。固结阶段的固结应力比 $K(K = \sigma_1/\sigma_3)$ 分别为 1、1.5、2,固结围压分别为 100、200、300 kPa,固结过程中当孔压消散为 0 且保持不变时固结完成;动载阶段的振动波形为埃而森特罗波 (EL Centro) 南北方向的地震波,历时为 40 s,其中 $\sigma_{d\max}$ 分别为 20、40、60、80、120 kPa。试验操作和数据整理均依据《土工试验规程》(SL237-1999) 的步骤进行。

4 试验结果与分析

通过试验所得的 EL Centro 地震波的动应力时程曲线和动应变时程曲线分别如图 2、3 所示。

由图 2、3 可以看出动应力达到试验的设定值,动

应变的发展趋势与动应力的基本相同;在荷载加载到 20 s 时动应变开始向负方向发展,这是与地震波的类型、动应力的幅值、固结围压等因素相关的。因为在均压固结的情况下,当较大的动应力幅值出现的时间比较早时,土样在拉伸阶段较大的固结围压导致试样产生较大的拉伸形变,故在接下来小的动应力幅值下会产生更大的拉伸形变,均压固结情况下,固结围压越大,轴向动应力幅值越大,则这种现象越明显;由于是均压固结,所得的动应力时程曲线和动应变时程曲线均可看做是平稳的时间过程。

在基于傅里叶变换的地震荷载作用下土的阻尼比的确定过程中采用 Matlab 编程对土的阻尼比进行求解,可得到阻尼比 λ 与频率 f 之间的关系如图 4 所示。

表 1 土样的基本物理参数

干密度 $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	土粒密度 $\rho_s / (g \cdot cm^{-3})$	最大孔隙比 e_{max}	最小孔隙比 e_{min}	相对密实度 $D_r / \%$	土样中不同粒径(mm)的质量百分含量 (%)			
					<0.25	0.25~0.6	0.6~1	>1
1.64	2.66	0.75	0.47	45	30.4	14.1	25.4	30.1

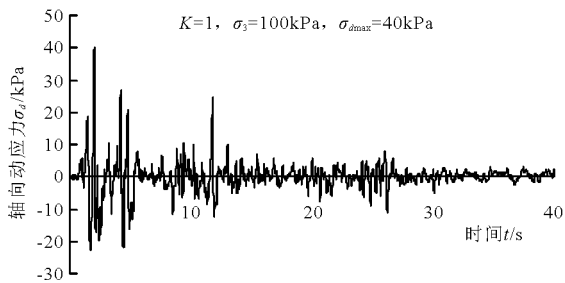


图 2 动应力时程曲线

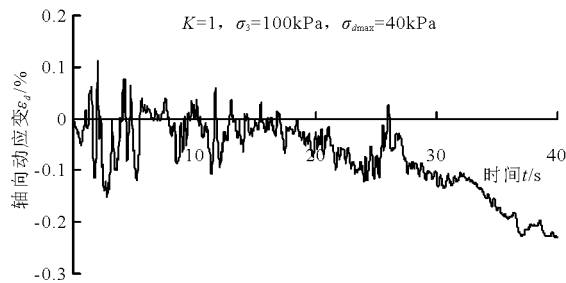


图 3 动应变时程曲线

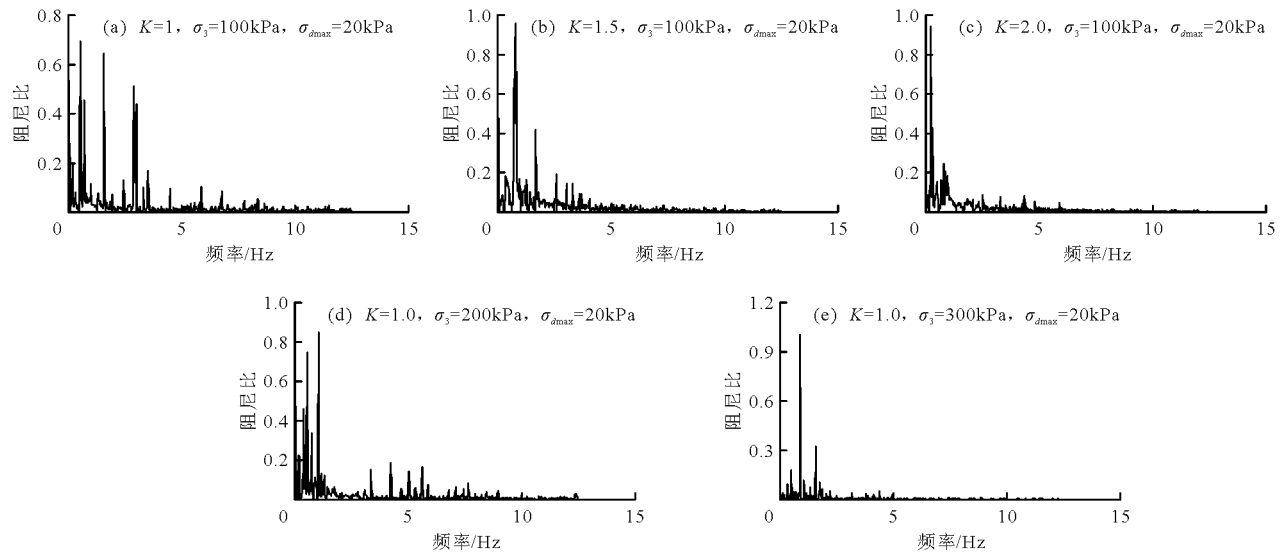
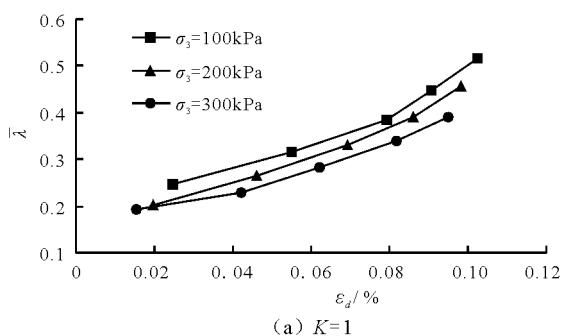


图 4 阻尼比 λ 与频率 f 的关系曲线

由图4可以看出,阻尼比不是确定值,而是随着频率的变化不断变化。在频率很小时,阻尼比受频率影响的波动较大;当频率逐渐增大,阻尼比受频率影响的波动较小,并逐渐减小。当固结围压相同时,随着固结应力比的增大,阻尼比随频率的波动情况在减弱;当固结应力比相同时,随着固结围压的增大,阻尼比随频率的波动也逐渐减弱。

在分析阻尼比 λ 与动应变 ε_d 之间的关系时,定义阻尼比为傅里叶变换求得阻尼比的平均值 $\bar{\lambda}$,具体计算公式为:



$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_i(f) \quad (7)$$

动应变 ε_d 为动载时间段统计的动应变时程曲线的标准差,具体的计算公式为:

$$\varepsilon_d = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2} \quad (8)$$

式中: ε_i 为离散的时间序列; $\bar{\varepsilon}$ 为序列的平均值; N 为序列点数。

通过一系列的整理可得到阻尼比 $\bar{\lambda}$ 与动应变 ε_d 之间的关系如图5所示。

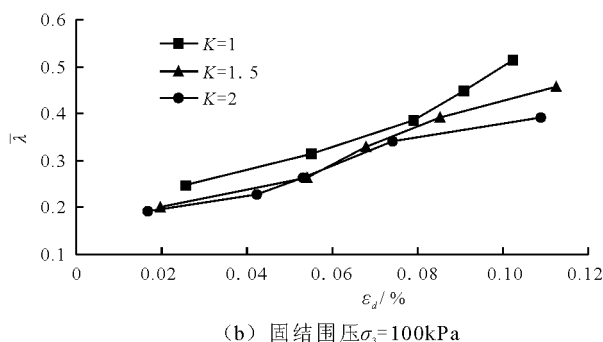


图5 阻尼比 $\bar{\lambda}$ 与动应变 ε_d 的关系曲线

由图5可以看出,无论是均压固结还是偏压固结,当固结围压一定时,阻尼比 $\bar{\lambda}$ 均随着动应变 ε_d 的增大而增大;当固结应力比相同时,在相同的轴向动应力幅值下,阻尼比 $\bar{\lambda}$ 均随着固结围压的增大而减小;当固结围压相同时,在相同的轴向动应力幅值下,阻尼比 $\bar{\lambda}$ 则是随着固结应力比的增大而减小;相比较而言,阻尼比 $\bar{\lambda}$ 的变化受围压的影响比受固结应力比的影响要大。

5 结 论

将随机过程理论引入土动力阻尼比的确定过程中,将动应力时程、动应变时程和动孔压时程均视为随机过程。提出了一种基于傅里叶变换的频域分析法,并通过试验及数值分析手段验证了利用该方法确定土的阻尼比的可行性。有如下结论:

(1) 采用基于傅里叶变换的频域分析法得到地震荷载作用下土的阻尼比 λ 是关于频率 f 的函数。任意一种土及地震波均可得到一条“阻尼比-频率谱”。

(2) 在傅里叶变换的频域分析法的基础上,可采用 $\lambda(f)$ 的平均值 $\bar{\lambda}$ 和动载时间段统计的动应变时程曲线的标准差 ε_d 来进一步分析阻尼比与动应变的关系。

(3) 工程应用上,建议将土阻尼比看作随地震波输入过程而动态变化的参数。只要通过频域分析法找到每类土、每种地震波作用下的“阻尼比-频率谱”,即可真正实现阻尼比参数的动态输入。并以此来考虑随机动荷载效应对土动力特性参数的影响。

参考文献:

- [1] 谢定义. 土动力学[M]. 西安:高等教育出版社,2011.
- [2] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, 1972,98(6):603-624.
- [3] ASSIMAKI D, KAUSEL E, WHITTLE A. Model for dynamic shear modulus and damping for granular soils [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2000,126(10):859-869.
- [4] ARAEI A, RAZEGHI H R, TABATABAEI S H, et al. Dynamic properties of gravelly materials [J]. Scientia Iranica, 2010,17(4):245-261.
- [5] 蔡袁强,王 军,徐长节. 初始静偏应力作用对萧山软黏土动弹模量与阻尼影响试验研究 [J]. 岩石力学, 2007, 28(11):2291-2296.
- [6] 李又云,谢永利,刘保健. 路基压实黄土动力特性的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5):1037-1046.

- [7] 孙德安,吴波. 非饱和粉土的动弹性模量和阻尼比研究[J]. 水利学报,2012,43(9):1108-1113+1120.
- [8] 邓国栋,张家生,王启云,等. 高速铁路粗粒土填料动力参数试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2014,11(2):76-83.
- [9] 王强,邵生俊,邵帅,等. 黄土的动力损伤耗能机制和变形特性的研究[J]. 地震工程与工程振动,2015,35(6):160-169.
- [10] 高洪梅,陈瑞,童飞,等. 复杂应力条件下EPS颗粒轻质混合土的动模量和阻尼比特性[J]. 防灾减灾工程学报,2015,35(2):166-172+198.
- [11] 李浩东,骆亚生,王志杰,等. 基于动变形试验的黄土剪切带特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(2):227-234.
- [12] 李晶晶,孔令伟. 应力历史影响下的膨胀土动力参数响应特征[J]. 振动与冲击,2017,36(12):181-188.
- [13] 黄志全,张茜,吴超,等. 膨胀土动力学特性变化规律试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(2):78-82.
- [14] 张雨廷,黄斌,张爽,等. 三种原状土动力特性试验研究[J]. 人民长江,2018,49(8):88-93.
- [15] 应怀樵,刘进明,沈松. 半功率带宽法与INV阻尼计法求阻尼比的研究[J]. 噪声与振动控制,2006(2):4-6.
- [16] 刘保健,谢定义. 随机荷载下土动力特性测试分析法[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

(上接第212页)

- [4] TOULABI H H, ADELI M M. The study of the reasons for increased cost of concrete containing special pozzolanic cement and presenting strategy for production of low cost pozzolanic concrete (case study of Roudbar dam of Lorestan) [J]. Journal of Scientific Research and Development, 2015,2(2):45-52.
- [5] ZHANG Jiake, SHI Caijun, LI Yake. Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98(15):1-7.
- [6] 张学元. 再生骨料在高性能混凝土中的应用研究[J]. 混凝土,2017(2):87-90+94.
- [7] 李海滨,盛燕萍,青维,等. 再生骨料在混凝土路面中的循环利用[J]. 中外公路,2017,37(1):237-241.
- [8] 刘震宇,秦鸿根,刘冠国,等. 再生混凝土力学性能提升技术与应用[J]. 水利水电科技进展,2017,37(1):90-94.
- [9] 秦志勇,范天奇,何鹏,等. 再生骨料在轻骨料混凝土中的应用[J]. 商品混凝土,2017(6):38-42.
- [10] 周志新,赵芸平,姚雷,等. 全再生骨料混凝土空心砌块配合比设计[J]. 混凝土,2017(6):119-121+130.
- [11] 潘钢华,伊立,周冬林,等. 一种再生自硬性胶凝材料及其制备方法:中国,201510910156.8[P]. 2016-3-2.
- [12] 陈伟,田健,郭东,等. 聚合铝改性再生胶凝材料力学性质与微结构[J]. 硅酸盐通报,2017,36(9):3094-3098+3104.
- [13] 何永佳,吕林女,华天星,等. 一种改性再生胶凝材料的制备方法:中国,201210126836.7[P]. 2012-4-27.
- [14] 李东,李鹏鹏,田万溪,等. 基于工业废渣再生微粉新型无熟料胶凝材料的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2015(10):94-98.
- [15] 方永浩,龚泳帆,朱晨辉. 一种无机胶凝材料及其制备方法:中国,201510088722.1[P]. 2015-2-26.
- [16] 陈景,兰聪,刘永道,等. 基于吸水动力学法研究砂浆孔结构对其力学性能与软化系数的影响[J]. 混凝土与水泥制品,2016(10):14-18.