

Suiji Hezaixia Tudongli Texing Ceshi Fenxifa

# 随机荷载下土动力特性测试分析法

刘保健 著  
谢定义

人民交通出版社

随机荷载下土动力特性测试分析法

刘保健 谢定义 著

正文设计:王静红 责任校对:尹 静 责任印制:

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号 010 64216602)

各地新华书店经销

印刷厂印刷

开本: 787×1092  $\frac{1}{16}$  印张: 插页: 字数: 千

2001年4月 第1版

2001年4月 第1版 第1次印刷

印数: 0001- 2000册 定价: 18.00元

ISBN 7-114-03907-7

U · 02847

# 前 言

尽管土动力特性研究中遇到的动荷载绝大多数都是不规则变化的,甚至是随机变化的,但长期以来土动力学的试验总是在规则变化,甚至在正弦变化的动荷时程作用下研究孔压和应变发展规律,但少数在不规则动荷作用下的试验已经发现动荷载频幅的变化,波型的差异,甚至波序的不同都会影响到动应变、动孔压的发展,从而表明了按实际可能的动荷载波型进行土性研究的合理性和必要性。在这种情况下,对于地震荷载,选择几种可能的代表性波型,并将其通过计算机控制施加到土试样上进行土动力特性试验的途径得到了一些研究者的注视。这一途径,不仅在选择代表性波型上有一定困难,而且在试验,尤其是资料分析整理方法上也遇到了很多困难。现用的方法常带有不同程度的主观随意性。显然,如果能够将随机过程理论引入土动力学特性的测试与分析,无疑将是一种很有前景的新途径。本书的著者在这方面的初步证实了这一新途径的可行性与合理性。

本书将动应力、动应变和动孔压时程均视为随机过程,通过对这个随机过程在时域内的幅值分析与相关分析或频域内的谱值分析与相关(相干)分析,将随机过程分析的某种特征参数,与土动力学中不同土特性参数的物理概念相结合,通过对应选取的随机过程特征参数来测定表征土动强度变形特性的参数。从思路上有明确的概念,理论上充分的依据,从而认为这种学科的交叉渗透对深入研究具有一定的启发性。由于著者非常珍视这支崭新的幼苗,但又深感力不从心,因此特将它辑出,希望得到更多的建议、补充、检验和发展,使它迅速茁壮地成长!

著者虽在本书各章节论述中,力图对随机过程理论的基本认识和土动力学关于土动力特性的基本概念作出简明清晰的介绍,并着重寻求二者之间的内在联系,但限于篇幅,尤其是限于水平,不免有不妥当之处,希望得到有关专家的批评与指正。本书的见解虽然在一些方面已经得到了试验资料的支持,但在有些方面,还只停留在理论分析与推理求索上。对此,著者将在尽快作出新工作的基础上与读者作进一步的讨论。

著 者

2000年3月·西安

# 目 录

第一章 总论.....	1
第一节 概述.....	1
第二节 土动力特性试验的基本概念.....	2
第三节 基于规则动荷过程的土动力特性试验分析法.....	5
第四节 基于不规则动荷过程的土动力特性测试分析法 .....	13
第五节 基于随机动荷过程的土动力特性试验分析法 .....	14
第二章 随机数据分析的基本概念 .....	16
第一节 物理现象量化分析的基本任务 .....	16
第二节 物理数据的分类与性质 .....	17
第三节 随机过程的基本概念 .....	18
第四节 随机数据的统计分析思想和描述方法 .....	21
第五节 随机波形分析中的几种读数和计算方法 .....	24
第三章 土动力特性的幅值分析方法 .....	34
第一节 随机数据幅值分析的基本理论 .....	34
第二节 周期波荷载作用下土动力特性的幅值分析 .....	50
第三节 随机动荷作用下土动力强度幅值的现行分析法 .....	62
第四节 随机动荷作用下土动力特性幅值的统计分析法 .....	68
第四章 土的动阻尼特性分析法 .....	73
第一节 数据的相关分析 .....	73
第二节 土的阻尼性质与经典确定方法 .....	87
第三节 用相关分析思想确定土的阻尼参数 .....	94
第五章 土动力特性的频域分析法.....	100
第一节 动态数据频谱分析的基本原理.....	100
第二节 土动力特性的频域分析法.....	119
第三节 土动力反应频域分析法简介.....	126
第四节 关于傅里叶变换的公式和说明.....	129
第六章 随机动荷过程下土动力特性测试的实现.....	133
第一节 概述.....	133
第二节 地震过程随机动荷模型的模拟.....	133
第三节 用地震反应谱合成人工地震波的实用程序举例.....	136
第四节 动三轴仪的现代发展简介.....	160
参考文献.....	165

# 第一章 总 论

## 第一节 概 述

土力学是研究土在应力作用下的工程性质与行为的学科。土动力学是土力学的一个分支,它是研究土在动应力作用下的工程性质与行为的学科。

土动力学的任务在于探求动荷载作用下土变形强度特性变化的规律性,应用近代力学的原理,分析研究土工建筑物及建筑物土质地基在各种动力影响下的变形稳定性和强度稳定性。土动力学研究的内容应该包括土的动力特性,土体的动力稳定性(包括土与结构物相互作用)两大部分。由于动荷具体作用的特性不同,土可能在不同应力水平和动应变幅下工作,显示出不同的应力-应变特性规律。故上述两个部分的分析研究,必须尽量模拟实际动荷作用的特点,面向动荷作用下工程建设中的实际问题,建立起自己的理论体系和分析解决问题的基本方法。

土动力学问题的研究,必须建立在土力学、地震工程学、结构动力学、土工抗震学等一系列学科的基础上,并且充分运用现有室内外试验量测技术,广泛积累原型观测和工程实录资料,作出理论联系实际的分析,建立科学的理论方法。当前,解决问题的途径:一是,建立起一定理论下的计算方法,引入一些表征动力作用和土动力特性的相应指标,作为动力设计的基础,并在不断的实践中加以检验和修正;二是,直接用模型试验的方法作为基础,并根据运用相似律模拟的精确程度和量测手段的完善程度,为设计提供出定性或定量的依据。由于问题的复杂性,现阶段土动力学研究的主要工作还是沿着第一条途径进行的,其着重点仍在理论依据和指标的合理确定方面,同时注重理论的实际验证和增稳工程措施。

土在动力荷载作用下性能的研究虽已取得了巨大的成就,但目前仍是土动力学研究的主要方向。

动力荷载按其产生的原因可分为自然的和人为的两类。前者有风、地震等荷载,后者有爆炸(包括核爆炸),打桩、机械振动、振动压实、车辆行驶等引起的荷载。按其荷载性质可分为周期性荷载(谐和型或非谐和型)和非周期性荷载(冲击型、爆炸型等)。这些荷载基本上可以分为下列三类:(1) 单次作用的快速载荷(如爆炸),其载荷时间非常短促,约为  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  s 的量级;(2) 多次重复的微幅的振动(如机械基础的振动);(3) 有限次数(几次到几十次)的无规律的振动(如地震、每次载荷时间约为 0.03 ~ 0.10s)。

至于工程爆破引起动荷载,大吨位的定向爆破其特点接近于第一类动荷,岩体开挖时的爆破,常由装药数量上有差异的多个药包相继多次起爆,其特点接近于第三类动荷。

一般来讲,各类动荷的作用过程(波型)除在少数情况下可视为规则变化外多是不规则变化的,甚至是随机变化的。这种动荷波频率的大小、峰谷值的高低,幅值的变化,持续时间的长短以及不同幅值各个脉冲排列的顺序都标志着动荷的变化,它们反映出不同的峰值效应。速率效应、往复效应、波序效应和持时效应,从而使土的动力性质在其它诸如土的粒度、湿度、密度、

结构和静应力状态等相同的条件下也会表现出不同的反应,而引起不同的动孔隙水压力,不同的动应变和不同的动强度。毫无疑问,将这种复杂的动荷过程用一个规则的周期性的,甚至正弦型的波来反映,显然是不能令人满意的。用某种办法将这类不规则的甚至随机的波替换为某种所谓“等效”的规则波,在理论上几乎是不可能的,在实用上也只能是近似的,从不同角度去等效,如从动孔压发展等效。从动应变发展等效,或从其它什么参数的发展等效,很难得到一致性的效果。现在对地震动荷载提出的“等效”处理方法,也只能看作是一个在某种意义上的经验,很有完善的必要。它用测试分析上简易性容忍了在荷载转换方面的粗糙性,并把这种所引起不完善性的后果转嫁到试验结果与应用经验间所需调整参数值的变化上。只要这个调整参数选取得当,这种“等效”的思路仍不失为一种良好的途径。因为毕竟在土性测试的荷载(输入)与应变、孔压(输出)之间,在土体动力分析结果(包括参数的影响)与实际反应之间存在着太多的尚难完全合理解决的难题。但这些丝毫没有否定对动荷作用过程及其对土性反应所产生的效果作出更加合理描述的必要性。

本书著者在近年来对随机过程理论学习和对土动力特性试验测试分析长期工作的基础上认识到,将这二者结合起来可能会使土动力学试验的荷载描述更加合理,土性参数更加符合实际,本章将对这个基于随机动荷过程进行土动力学参数测定的思路和方法与现有基于规则动荷过程测定土动力特性参数的思路和方法作一个简要的介绍与对比,以便在后叙各章中对随机动荷过程的测试分析法作出深入的讨论。

## 第二节 土动力特性试验的基本概念

由于土的动力特性与其应变幅值有关。当土的应变幅值(纵向应变或剪应变)在  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  范围(如由于动力机器基础、车辆行驶等所引起的振动)以内时,土显示出近似弹性的特性;当应变幅值在  $10^{-4} \sim 10^{-2}$  范围(如打桩、中等程度的地震等所引起的振动)以内时,土具有弹塑性的特性;当应变幅值达到百分之几的量级(如 0.02 ~ 0.05)时,土已不能维持其原来形状,将发生振密、破坏、液化等现象,这时土的主要动力特性是它在破坏时的强度。通常,以  $10^{-4}$  应变幅值作为大小应变幅振动的界限值。

由上所述,可见研究土的动力特性,必须区别两种不同应变幅值的情况。在小应变幅( $< 10^{-4}$ )情况下,主要是研究土的弹性模量、剪切模量和阻尼,为建筑物地基、动力机器基础和土工构筑物的动态反应分析提供必要的计算参数;而在大应变幅情况下,则主要研究土的动变形(振动压密或振陷)和动强度(振动液化是特殊条件下的动强度问题)。所以,土的动力特性主要是指模量、阻尼、振动压实、动强度和液化等五个方面。

土动力问题研究的应变范围很大,从精密设备基础振幅很小的振动到强烈地震或核爆炸的震害,剪应变从  $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 。在这样广阔应变范围内的土动力计算中所用的特性参数,需要用不同的测试方法来确定。这些参数包括:动模量或动应变与动应力的关系。阻尼比或衰减系数、动强度或液化周期剪应力以及动孔隙水压力增长规律。

土动力特性测试和其他土工测试一样,原位测试能得到代表实际土层性质的试验资料。但是限于原位试验的条件和较大的试验费用,一般在原位只做小应变试验,在实验室内则可以做从小应变到大应变的试验,室内常用的测试方法有动三轴试验、动单剪试验和动扭剪试验,超声波脉冲试验、共振柱试验。这些试验方法适用的剪应变范围如图 1-1 所示。用这些试验可以确定的土动力特性参数如表 1-1 所示。

图 1-1 各种室内动试验方法测试的应变范围

各种室内试验测定的土动力特性参数

表 1-1

试验方法	弹性模量	剪切模量	阻尼比	衰减系数	液化剪应力或动强度
超声波脉冲					
共振柱					
周期三轴剪切					
周期单剪					
周期扭剪					

### 一、土的原位动力特性测试法

土的原位动力测试方法常用的有两类,一类是用物探中的地震法原理,观测弹性波在土层中传播的速度,计算土的动力变形特性参数,包括折射法、反射法、表面波速法、钻孔波速法;另一类是动力荷载试验,用于测试较大应变时的变形特性参数,例如钻孔中动荷载试验。实用上可分为三类:物理勘探法;表面振动法和平板振动法(见图1-2)。

图 1-2 原位测试方法与剪应变关系

1. 物理勘探法是在钻的孔内测定地基内各种深度的剪切波波速。用波速计算动弹性模量  $E$  和动剪切模量  $G$ 。图 1-3a) 的左图是跨孔法,在一个孔发射震源,另一孔检波接收,在阴极射线管上显示波形,可明显分清纵波( $p$ )和横波( $s$ )的到达。跨孔法可测不同深度水平地层的动剪切模量。跨孔法测试时,剪应变约为  $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 。图 1-3a) 中图为上孔法,右图为下孔法,上孔法下孔法只能测得混合地层的动剪切模量。由于纵波能被固体和液体传布,地层有地下水时波速测量不准。横波不能由液体传布,其波速不受地下水干扰,故常用横波波速计算剪切模量。波速测得以后,动剪切模量和动弹性模量用下式计算:

$$G = \rho v_s^2 \quad (1-1)$$

$$E = 2(1 + \mu)G \quad (1-2)$$

式中:  $v_s$ ——横波波速;

——地层的密度, 等于  $\frac{\gamma}{g}$ ,  $\gamma$  为容重,  $g$  为重力加速度;

$\mu$ ——泊松比。

图 1-3 原位测试求剪切模量

a) 物探试验; b) 表面振动试验; c) 平板荷载试验

2. 表面振动法是用电磁激振器发生高频振动(30 ~ 1000Hz), 或用转动块激振器发生低频振动(< 30Hz), 见图 1-3b)。这些表面激振器发生瑞利波。波速由设置在地面的拾振器测得的波长和振动频率计算得到, 在小应变范围内测得的瑞利波速接近于横波波速, 故

$$v_s \approx v_r = Lf \quad (1-3)$$

式中:  $v_r$ ——瑞利波速;

$L$ ——波长;

$f$ ——振动频率。

根据经验,瑞利波通过半波长土层深度范围。因此变换波长和频率可测得不同深度的横波波速。

3. 平板承载试验是在基坑表面的平板面上设置较小振动器测共振频率,或者在平板上施加往复荷重测沉降曲线。见图 1-3c)。此法限于测平板下土的模量及地基刚度。这些参数主要应用于动力基础设计。

## 二、土的室内动力特性测试法

土的室内动力特性测试是本书讨论的主要对象。室内动力特性测试的特点是以土试样为中心,它可以保持不同的粒度、湿度、密度和结构状态,不同的静应力状态和不同的排水状态(不排水或部分排水),由动力试验的成样系统按照实际条件或研究的要求来完成。然后在既定条件下的试样上由激振系统施加要求的动荷过程激振,并同时由量测系统测定动应力过程即输入过程,测定动孔压过程和动应变过程,即输出过程。试验测得的这三类过程及其对应的初始试样状态是动力特性测试的根本资料。一切有关的所需土性参数和土性规律均由对这三类过程的整理分析得出。从它们可得到不同条件下土的动模量与阻尼比,动孔压模型,动强度规律与液化准则,以及动变形规律与动本构关系。现分别对现行的基于规则动荷过程和基于不规则动荷过程的土动力特性试验分析法以及由著者建议的基于随机动荷过程的动力特性试验分析法进行一些简要的介绍,有关的细节还将结合后续各章作出适当的讲解。

### 第三节 基于规则动荷过程的土动力特性试验分析法

向土试样施加一个规则的动荷过程作为输入来测试土的动力特性是土动力学中最常用的方法。它适用于实际的或等效处理的规则动荷,它的频率,动力应幅值和波型(正弦波、三角波、方波等)等均不变,可以利用动应力幅  $\sigma_d$ , 频率  $f$  和作用持续时间或振次  $N$ , 对这类动荷过程的特性作出完整的描述。如前所述,周期动三轴试验是这类试验的主要方法,此外还有周期动单剪试验,周期动扭剪试验和共振柱试验。

#### 一、周期动三轴试验

周期动三轴试验是用圆柱形试样,在不同的压力室压力下,施加不同大小的激振力使试样发生轴向振动或轴向与侧向两个方向的振动,量测在振动过程中的轴向应力、应变以及孔隙水压力的变化。这种试验用于确定在天然饱和砂土层中发生液化的条件和土的动强度,也用于测试大应变时试样的周期应力与周期应变的关系,确定其弹性模量与阻尼比。

周期加荷三轴仪的型式也有多种,其差别主要是加荷的方法不同。有用应力控制加荷的设备,也有用应变控制加荷的设备。有用电磁激振器激振的,也有用气动或液压激振的,但是各种形式的仪器都由以下三个部分组成: 压力室及固结试样的加压系统; 激振器及调节激振力大小的激振系统; 量测试样轴向应力、应变和孔隙水压力的量测装置。图 1-4 是一种周期加荷三轴仪的示意图。

用周期加荷三轴仪模拟天然土层在水平向上传播的地壳剪切波时水平面上的应力条件进行试验,实验时应将压力室中的圆柱试样先在各向相等压力  $\sigma_0$  作用下固结,然后在不排水条件下通过激振装置在轴向增加周期压力  $\pm \sigma_d/2$ , 同时在侧向增加周期压力  $\pm \sigma_d/2$ 。这样使试样在与轴向压力方向夹角  $45^\circ$  平面上的法向应力不变,但增加了周期剪应力  $\pm \sigma_d/2$ , 以此平面

图 1-4 动三轴仪示意图

1-试样; 2-压力室; 3-孔隙压力传感器; 4-变形传感器; 5-拉压力传感器; 6-导轮; 7-励磁线圈(定圈); 8-激振线圈(动圈); 9-接侧压力稳压罐系统; 10-接垂直压力稳压罐系统; 11-接反压力饱和及排水系统; 12-接静孔隙压力测量系统

上的应力变化代表天然土层水平面在地震时的应力状态,如图 1-5 所示。地震时饱和砂土层发生液化主要是由于从基岩向上传播的剪切波作用引起的。在地震前水平面上的法向力为土重有效应力  $\sigma_v$ , 剪应力为零, 地震时该水平面上的法向力不变, 但增加了周期剪应力  $\pm \tau_d$ 。在三轴试样中即  $\sigma_0 = \sigma_v$ ,  $\pm \tau_d / 2 = \pm \tau_d$ 。这样的试验方式称为: 应力控制, 均压固结, 双向激振。因为仪器和土的耦合作用, 通常的三轴试验要在轴向增减  $\tau_d / 2$  的同时在侧向减增  $\tau_d / 2$  且保持同相位很难实现。因此实用上常改为侧向压力保持不变, 仅在轴向施加周期压力  $\pm \tau_d$ 。这样使试样在  $45^\circ$  方向的平面上增加周期剪应力  $\pm \tau_d / 2$ , 但是法向应力发生了变化, 如图 1-6 所示。这样的试验方式称为: 应力控制, 均压固结, 单向激振。

周期加荷的三轴仪模拟倾斜地面下土层的应力条件进行试验时, 需将压力室中的圆柱试样在轴向压力  $\sigma_{1c}$  和侧向压力  $\sigma_{3c}$  的作用下固结,  $45^\circ$

方向的平面上的法向应力等于平均有效应力  $\sigma_0 = (\sigma_{1c} + \sigma_{3c}) / 2$ , 剪应力  $\tau_0 = (\sigma_{1c} - \sigma_{3c}) / 2$ , 使该平面上的  $\sigma_0$  等于天然土层中某点水平面上的法向应力  $\sigma_v$ ,  $\tau_0$  等于该点水平面上的初始剪

图 1-5 均压固结双向周期加荷三轴试样的应力状态

应力。试样在轴向与侧向压力不等的条件下固结后,在不排水条件下施加轴向周期压力  $\pm \sigma_d$  在 45° 方向的平面上增加了周期剪应力  $\pm \sigma_d/2$ , 如图 1-7 所示。这样的试验方式称为: 应力控制, 偏压固结, 单向激振。

与应力控制相对应的还有应变控制式动三轴试验。目前较高级的动三轴仪可实现应力控制, 也可实现应变控制。

在周期剪切下试样发生液化或破坏时周期剪应力的大小与其往复作用的次数有关。试验时将激振力调至适当的大小, 连续施加。激振的频率应接近实际动荷载作用的频率, 研究地震液化时一般取 1 ~ 4Hz, 在不排水条件下量测并记录在振动过程中试样的轴向应力、应变和孔隙水压力的变化, 直到孔隙水压力上升达到等于侧向固结压力或应变达到规定的破坏标准数值为止, 分别确定试样发生液化或达到破坏的剪应力及其对应的振动周数作为抗液化剪应力 ( $\tau_l = \sigma_d/2$ ) 和动强度 ( $\tau_{df} = \sigma_d/2$ ), 对应的振次分别为液化振次  $N_l$  和破坏振次  $N_f$ 。在振动过程中的轴向压力, 轴向应变和孔隙压力的变化如图 1-8 所示。图中  $u_d, \sigma_d$  表示均压固结时的动孔压时程与动应变时程,  $\sigma_d$  表示偏压固结时的动应变时程。

图 1-6 均压固结单向周期加荷三轴试样的应力状态

图 1-7 偏压固结试样单向周期加荷时的应力状态

当用周期三轴试验的资料在一个周期内整理出动应力  $\sigma_d(t)$  与动应变  $\epsilon_d(t)$  的关系如图 1-9 所示或直接将激振力调至需要的大小, 对压力室中的试样施加轴向周期压力, 用函数记录仪绘出轴向应力  $\sigma_d$  与应变  $\epsilon_d$  的关系曲线(如图 1-9 所示称为滞回圈)时, 从滞回圈可以看出, 在一周加荷卸荷过程中土的应力与应变关系不同, 从滞回圈顶点到原点连一直线, 以该直线的斜率代表应变幅值等于滞回圈顶点处应变的动模量  $E$ , 称为等效动模量。等效阻尼比由式 (1-4) 确定, 即

$$\zeta = \frac{A_L}{4 A_T} \quad (1-4)$$

式中:  $A_L$  —— 滞回圈包围的面积, 表示加荷与卸荷损失的能量;

$A_T$  —— 滞回圈顶点至原点连线与横轴所形成的直角三角形的面积, 表示加荷或卸荷的应变能。

图 1-8 周期加荷动三轴试验记录曲线

由图 1-9 可见,随着滞回圈顶点应变的增大,顶点与原点连线的斜率减小,滞回圈的面积增大。这表示等效弹性模量减小、阻尼比增大。虽然三轴试验中有在振动过程中大、小主应力轴不能转动且方向交替变化等缺点,但因它使用方便,应力状态好控制,因而得到了广泛的应用。

图 1-9 轴向应力与轴向应变关系曲线

## 二、周期动单剪试验

周期动单剪试验用周期动单剪仪,是直剪仪改进的,它克服了普通直剪仪试样剪应变分布不均匀、剪切面为预先固定平面以及不能控制排水条件等缺点而发展起来的。周期动单剪试验是对单剪仪施加周期剪力,测试土的动强度、液化剪应力和剪切模量、阻尼比。图 1-10 是两

种类型周期动剪切试验的单剪仪示意图。一种的试样为圆形,用有侧限环的橡胶模或绕钢弦的

图 1-10 周期加荷单剪仪

a)侧限环式;b)刚性剪切盒式

橡胶模包扎,放在能施加竖向压力和周期剪力的压力室中试验。另一种的试样为方形,由橡胶模封闭,放在刚性的剪切盒内,剪切盒对角线方向由一对固定的插销和一对可移动的插销把四边连在一起,剪切时使试样变形均匀。这两种单剪仪内的试样都是在侧限条件下固结,周期剪切时主应力的大小的变化和方向的摆动,都与天然地层受到水平传递的地壳剪切波时的假定条件相近,一般认为较符合实际土层的情况,是一种较好的室内动力测试仪器。

周期单剪试验在用于为测试土的液化剪应力时,先将饱和试样在竖向压力  $\sigma_{cf}$  下固结,然后在不排水条件下往复施加周期剪力  $\pm \tau_d$ ,量测并记录周期剪应力、剪应变和孔隙水压力随振动周数的变化,直到孔隙水压力增长到等于  $\sigma_{cf}$ 、有效应力为零为止,得到试样发生液化时的剪应力  $\tau_L$  及振动周数  $N_L$ 。对于有初始剪应力的液化试验,可在试样固结时施加一剪应力  $\tau_{cf}$  ( $\tau_{cf}$  与  $\sigma_{cf}$  在不排水周期剪切过程中保持不变,  $\tau_{cf} / \sigma_{cf}$  称为初始剪应力比),用以模拟倾斜地面下土层的应力条件。图 1-11 是一个典型的单剪试验记录曲线。

图 1-11 在单剪条件下松砂的一个典型动荷载试验记录

用周期单剪试验测定土的动模量与阻尼比时,试样在排水条件下固结后施加周期剪力,用函数记录仪绘出一周往复剪切过程中的剪应力  $\tau_d$  与剪应变关系曲线,即滞回圈,如图 1-12 所示。从滞回圈顶点到原点连一直线,该直线的斜率代表剪应变幅值等于滞回圈顶点处剪应变的剪切模量  $G$ ,称为等效动剪切模量。等效阻尼比同样根据滞回圈的面积  $A_L$  和三角形面积  $A_T$  由式(1-4)确定。

单剪试验的缺点,在于它的制样较难,仪器侧壁有摩擦影响,对其它应力状态适应性差,故仍应用较少。它应力分布不均匀(由于试样侧面没有剪应力,在剪切时发生畸变,引起顶面和底面上的法向应力在边缘处增大,剪应力则在中部较大,使单剪仪中试样不完全符合天然土层中的应力状态)。在试验时封闭的试样仍会发生体积变化,随着周期剪切时孔隙水压力的增大,试样为侧限环或绕钢弦橡胶膜约束的柔性侧面向侧向膨胀,刚性板约束的橡胶膜会向边角的空隙膨胀。此时,由于水体积不可压缩,封闭的饱和试样必然力图使自己的体积膨胀,使试样的孔隙水压力减小,其结果导致达到液化或破坏时的加荷周数增多,过高估计了试样的动强度或抗液化能力。也是单剪试验应用较少的重要原因。

图 1-12 剪应力与剪应变关系曲线

### 三、周期动扭剪试验

为消除周期单剪试验因为试样的边界限制,应力分布不均匀等缺点,可用圆筒状试样的周期扭剪试验,如图 1-13 所示。圆筒试样的内侧和外侧都用橡胶膜包扎,内外压力室可对试样的内侧和外侧施加压力  $\sigma_r$ 。对试样顶用激振装置施加周期扭力  $\tau_d$ ,用装在顶上的扭矩传感器和扭转角度传感器量测扭矩和扭转角的大小,根据在周期扭剪过程中量测的扭矩和扭转角计算得到试样的剪应力与剪应变关系曲线,确定其剪切模量与阻尼比。如果考虑到周期扭剪试验中用圆筒样时试样内剪应变分布仍然不均匀的缺点,则可使圆筒样的内高和外高不等。由图 1-14 可以看出,当圆筒试样受到扭力作用顶面沿圆周方向转动  $\theta$  角时,若径向和竖向变形都等于零,试样的高度为  $H$ ,则试样的剪应变如下:

图 1-13 周期加荷扭剪仪

1-外压力室; 2-试样; 3-内压力室

图 1-14 圆筒形的扭剪试样

$$\begin{aligned} z &= \frac{r}{H} \\ r &= 0 \\ r_z &= 0 \end{aligned} \quad (1-5)$$

式(1-5)表示圆筒试样只有剪应变  $\gamma_z$ ,  $\gamma_z$  随着半径  $r$  的大小变化, 在圆筒内侧面最小, 等于  $r_1 / H$ ; 在圆筒外侧面最大, 等于  $r_2 / H$ 。  $r_1$  与  $r_2$  分别是圆筒内侧与外侧的半径, 整个横断面上的平均剪应变为:

$$\gamma_{av} = \frac{2(r_2^3 - r_1^3)}{3(r_2^2 - r_1^2)} \frac{1}{H} \quad (1-6)$$

如果改用截头圆锥形底面的试样, 使试样的高度  $z$  随半径  $r$  增大, 即试样内侧半径  $r_1$  与高度  $h_1$  之比等于外侧半径  $r_2$  与高度  $h_2$  之比, 如图 1-15 所示。则扭剪时试样的剪应变均匀, 与半径无关, 都为

图 1-15 圆锥形底面的扭剪试样

$$\gamma_z = \frac{r_2}{h_2} \quad (1-7)$$

但是圆锥形底面试样发生了剪应变  $\gamma_r$

$$\gamma_r = - \frac{r_2 z}{r h_2} \quad (1-8)$$

由式(1-8)可见, 减小  $z/r$  可以减小剪应变  $\gamma_r$ , 即底面坡度应平缓。由于试样横断面上剪应变均匀, 扭转剪应力也均匀, 故可按式(1-9)计算

$$\tau_{av} = \frac{3M}{2(r_2^3 - r_1^3)} \quad (1-9)$$

式中:  $M$ ——施加于试样顶端的扭矩。

图 1-16 为一个扭剪试验的动剪应力, 动剪应变与振动次数的实测记录曲线。

图 1-16 动剪应力、动剪应变与振次的关系

a) 动剪应力—振次关系; b) 动剪应变—振次关系

这类试验方法虽有剪应力分布比较均匀及可研究主应力轴旋转的影响等优点, 但是做成

圆锥形底面的原状土试样非常困难,只适于用人工制备的试样进行试验,且因试样厚度不一,竖向应变不同,故一般多用于研究工作。

#### 四、共振柱试验

共振柱是用圆柱状或圆筒状试样以不同频率的激振力顺次使试样振动,测定其共振频率,通过在共振频率与波速间建立的关系,确定出弹性波在试样中传播的速度后即可按式(1-1)和式(1-2)计算动模量。最常用的共振柱是施加扭转激振力,确定剪切波速。

共振柱按其约束条件区分为一端固定另一端自由和一端固定另一端用弹簧和阻尼器支承两种型式,如图 1-17 所示。不论哪一种型式的共振柱都是由三个主要部分组成: 压力室及施加固结压力的加压系统; 激振器及调节振动频率和振动力大小的激振系统; 位移,速度或加速度传感器及记录振幅变化的量测系统。

对于一端固定一端自由的共振柱试验,试样的下端固定,上端有附加质量随着试样一起振动。这附加质量包括产生稳态激振力的激振器、量测振动速度或加速度的传感器。设试样的回转惯性矩为  $I$ , 试样顶上附加质量的回转惯性矩为  $I_t$ , 试样的高度为  $H$ , 施加在试样顶上的稳定激振扭矩为  $M\sin\omega t$ ,  $M$  为扭矩的幅值,  $\omega$  是激振的圆频率,  $t$  是时间,对于每一台仪器,  $I_t$  为仪器常数。对于每一个试样,  $I$  经计算可得。用一定的计算方法,可解出式(1-10)所示的频率方程的  $F$  值。而  $\omega_n = 2\pi f_n$ ,  $f_n$  是实验可测的共振频率。则用式(1-11)可计算土样的剪切模量  $G$ 。

$$F \tan F = I / I_t \quad (1-10)$$

$$G = V_s^2 = (2\pi f_n H / F)^2 \quad (1-11)$$

共振柱用于测定试样的阻尼比时,常有两种测定方法,一种是自由振动法,另一种是稳态振动法。

用自由振动测定阻尼比是在圆柱试样顶端施加静扭力产生扭转角  $\theta_s$ ,然后迅速释放扭力,使试样发生自由振动。由于试样的阻尼作用,扭转振幅越来越小,最后停止振动。振幅的衰减曲线如图 1-18 所示。从图可见,振幅的对数  $\lg A$  与波峰数  $N$  为直线关系,直线的斜率称

图 1-17 共振柱型式示意图

a) 一端固定一端自由; b) 一端固定一端弹簧阻尼器支承

1-附加质量; 2-试样

图 1-18 自由振动振幅衰减曲线

a) 振幅随时间的衰减; b) 振幅对数随波峰数的衰减

为对数衰减率，即

$$= \frac{1}{N} \lg \frac{A_1}{A_{N+1}} \quad (1-12)$$

对数衰减率与阻尼比的关系如下

$$= \frac{2}{1-\zeta^2} \quad (1-13)$$

当阻尼比较小时，可得到

$$= \frac{1}{2\zeta} \quad (1-14)$$

图 1-19 位移幅值与频率关系曲线

用稳态振动测定阻尼比是在圆柱试样稳态振动下测在不同激振频率时试样顶端的扭转位移幅值与频率的关系曲线，如图 1-19 所示。设对应最大振幅  $A_{\max}$  的频率为  $f_n$ ，对应于  $A_{\max}/\sqrt{2}$  的频率分别为  $f_1$  和  $f_2$ ，则阻尼比可按式(1-15)确定，即

$$= \frac{f_2 - f_1}{2f_n} \quad (1-15)$$

## 第四节 基于不规则动荷过程的土动力特性测试分析法

为了探讨不规则动荷过程的影响，并将其与前述周期动荷过程的土性参数和规律进行对比，寻求二者之间的联系与用周期荷载过程的试验成果解决不规则动荷过程的途径，已往的研究已在不规则动荷过程作用下进行了土动力特性的测试分析。这类动荷过程的一般频率不变，但各个应力脉冲的大小不同，大小排列的波序也不同，对它的描述，应该包括频率，幅值分布、波序特征以及持续时间。已有的研究大体上可以分为直接输入法，分类对比法以及波序叠加法三类。

### 一、直接输入法

直接输入法是将某种可能的不规则动荷过程，通过计算机模拟直接施加到土试样上，测记其动应力动孔压和动应变的反应过程，作为土性规律分析的基础。兰州地震所的处理属于此类。输入动荷的方法有两种，一是限定动荷的波型与持续时间不变，只是逐级改变动应力的幅值，按动应力的峰值代表动荷过程的应力，用反应动孔压和动应变的累积值代表该动应力的动荷过程所对应的动孔压和动应变来整理资料，建立各类关系，二是将一定频幅、波型和持续时间的动荷过程，多次重复地施加到土试样上，每一次的作用记为一个振次，实际上变成了以一个特定波型作用为振次单位的周期性变化荷载，不同的试验可以改变不规则动荷过程的幅值。整理分析资料时同样以动应力峰值代表动应力，作出动孔压和动应变随振次单位变化的关系，分析其土性规律的变化。上述方法的第一种比较接近于单脉冲爆炸、海浪或地震的动荷过程，第二种比较接近于多次或多点相继发生的工程爆破。虽然动荷过程的频率，持时及幅值均可视实际所模拟的条件来调整，但它们都没有反映动荷过程中各应力脉冲在作用顺序上变化的影响，要考虑这种影响，就必须将其分别作为一个新的动荷过程来重新进行试验，大大地增大了试验的工作量。