

动三轴试验的原理与方法

李松林 编

地 质 出 版 社

动三轴试验的原理与方法

李松林 编



地质出版社

内 容 简 介

应用振动三轴仪测试土的动力特性指标,是土工试验中较先进的试验手段,在我国已逐步得到推广应用。本书介绍了振动三轴试验的基本原理和试验操作方法,并讲述了如何确定土的各项动力参数,以及应用这些参数进行土的稳定性分析计算等问题。

书的内容简明实用,可供土工试验人员、工程地质勘查技术人员和有关师生参考。

动三轴试验的原理与方法

李松林 编

*

责任编辑:高天平

地质出版社出版发行

(北京和平里)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

*

开本: $850 \times 1168^{1/32}$ 印张: 3.25 字数: 80000

1990年12月北京第一版·1990年12月北京第一次印刷

印数: 1—1050 册 国内定价: 2.45 元

ISBN 7-116-00752-0/P·638

序 言

振动三轴试验属于土的动态测试内容，是室内进行土的动力特性测定时较普遍采用的一种方法。

土的动力特性主要是指变形特性和强度特性。变形特性即动应力—应变关系；强度问题除了土的一般动强度外，还包括可液化土的振动液化强度。

土体动态测试技术，直接影响着土动力特性研究和土体动力分析计算的发展，起着正确揭示土的动力特性规律和完善分析计算理论的重要作用，是土动力学发展的基础。在室内进行土的动力特性试验，主要包括两方面的内容：一是确定土的动强度，用以分析在大变形条件下地基和结构物的稳定性，特别是砂土的振动液化问题；一是确定剪切模量和阻尼比，用以计算在小变形条件下土体在一定范围内所引起的位移、速度、加速度或应力随时间的变化。

我国对土和土体在地震作用下变形和稳定特性的研究，起步并不晚。早在五十年代末，国家水利科学院就在黄文熙教授等领导下，开始利用振动三轴试验方法来研究饱和地基及边坡的抗液化稳定性；六十年代初期，振动三轴试验被正式列入水电部的《土工试验操作规程》，这大大推动了土动力特性的试验研究工作。但是，迄今为止，除了操作规程外，我国尚无一本专门介绍振动三轴试验的书籍。因此，编写一本供试验技术人员参考的书是很有必要的。

本书主要介绍了振动三轴试验的测试原理与方法，并简略介绍了动力特性指标的应用。为了使读者对测试原理有较系统的了解，本书首先着重介绍了振动三轴试验所涉及的基础理论，其中包括：振动与波的基本概念、地震的有关知识、受力体的三向应

目 录

序 言

第一章 土动力学的基础知识	1
第一节 概述	1
第二节 振动与波的基础知识	2
一、谐振动	2
二、阻尼振动	3
三、弹性介质中波的产生和传播	5
第三节 地震及地震中的土力学问题	7
一、地震波	7
二、地震震级与地震烈度	8
三、地面的地震反应	9
四、土的动力性质	11
第四节 砂土的振动液化	15
一、砂土的液化机理	15
二、砂土液化的影响因素	16
第二章 振动三轴试验原理	19
第一节 概述	19
第二节 应力状态的概念	20
一、二向应力状态与莫尔圆	20
二、三向应力状态	24
三、广义虎克定律与剪切模量计算	28
第三节 土的强度与极限平衡理论	31
一、土的强度理论提要	31
二、土的极限平衡原理	33
第三章 振动三轴试验方法	38
第一节 振动三轴仪的结构型式与功能	38
一、仪器的分类与发展概况	38

二、仪器的结构原理	39
三、仪器应具有的功能	41
第二节 仪器的标定	44
一、动孔隙水压力标定	44
二、动应力标定	45
三、动变形标定	46
四、 $\sigma_1-\sigma_3$ 关系的标定	47
第三节 土的动强度试验	50
一、动强度与动强度指标	50
二、破坏标准的选择	50
三、动强度指标试验与成果整理	53
第四节 砂土的抗液化强度试验	62
一、地震剪应力 τ_c 的计算	64
二、抗液化剪应力 τ_d 的确定	67
第五节 砂土液化的判别	74
一、抗液化剪应力法	74
二、临界标准贯入击数法	76
三、液化指数判别法	78
四、经验指标判别法	80
五、液化的环境条件	82
第六节 土的动力特性指标试验	83
一、试验方法	83
二、成果整理	83
第四章 土的动力特性指标应用简介	89
第一节 土体动力稳定分析方法的发展	89
第二节 动强度指标在拟静力分析中的应用	90
一、土坡稳定计算示例	91
二、挡土墙压力计算示例	92
第三节 动力特性指标在动力反应分析中的应用	94
一、在集中质量法中的应用示例	94
二、在有限单元法中的应用示例	95
参考文献	96

第一章 土动力学的基础知识

第一节 概 述

在建筑工程中，往往会遇到地震、波浪、车辆等作用形成的周期性变化荷载，和由于爆破、爆炸等原因产生的冲击性荷载。我们将这种作用大小和方向随时间呈周期性变化的荷载和冲击性荷载，统称为动荷载。

动荷载的作用很复杂，它随荷载的振幅、频率、作用持续时间等因素的不同而异。所以，研究土在动荷载作用下的应力、变形及土体稳定性等问题时，必须了解动荷载的这些特点和变化规律；研究地基在地震作用下的稳定性问题时，还必须了解地震的震动特性。

地震、波浪、车辆等各类动荷载的振幅、频率和作用持续时间都不相同。波浪形成的动荷载，频率低、循环作用次数多；车辆产生的动荷载，振幅和频率变化范围比较大，作用持续时间长短不一；地震引起的动荷载，振幅大、频率低、历时短，缺乏规律性。

土在动荷载的反复作用下，由于土的类型和所处的状态不同，对动荷载的反应也不相同。处于饱和状态的砂土和以粉砂为主的轻亚粘土，在地震作用下可能产生液化，使地基突然丧失承载能力。对于建筑物来说，地震还可能使建筑物和地基形成共振体系一起振动，产生附加地震荷载。

为了解动荷载的变化规律和特点，本章首先简要介绍振动与波的基本概念，接着对地震的震动特点、地震中有关的土力学问题及砂土的振动液化问题。

第二节 振动与波的基础知识

在采用振动三轴仪进行土的动力特性指标测试中，为了弄清楚地震的震动特性，首先应弄清楚振动与波的传播原理。

一、谐振动

大家都知道，当弹性物体（以弹簧为例）受到作用力后，会引起变形和弹性力，并产生振动。根据牛顿运动定律和虎克定律，可求得弹性体的谐振动方程为：

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1-1)$$

$$x = A \sin(\omega t + \varphi') \quad (1-2)$$

式中， x ——弹簧受力后产生的弹性变形；

t ——振动时间；

φ ——振动的初周相，即 $t=0$ 时的周期；其中 $\varphi' = \varphi + \frac{\pi}{2}$ ；

ω ——其值的平方为弹簧的倔强系数 K 与其质量 m 之比

$$\left(\omega^2 = \frac{K}{m}\right);$$

A ——振幅，为弹簧振动过程中的最大变形 ($|x| < A$)。

当质点作匀速圆周运动时，该点在直线上投影的运动，就是谐振动。 ω 在圆周运动中是角速度，而在谐振动中称为圆频率。质点作匀速圆周运动时，旋转一周即相当于完成一个完全振动所需的时间，称为振动周期 T 。

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1-3)$$

周期 T 的倒数称为频率 n ，单位为赫兹 (Hz)。

$$n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

谐振动方程也常用频率或周期表述：

$$x = A \cos\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi\right) \quad (1-4)$$

$$x = A \cos(2n\pi t + \varphi) \quad (1-5)$$

由此可知, 根据谐振动的周期 (或频率)、初相和振幅三个量, 就可以确定一个谐振动。

不难理解, 当振动系统作谐振动时, 它的周期或频率, 完全是由系统本身的性质即 m 和 K 决定的。

二、阻尼振动

谐振动是一种理想的自由振动, 即在振动过程中, 振动系统的能量是守恒的。如果振动的能量和振幅都随时间而减小, 我们就称这种振动为阻尼振动。振动在岩土中的传播, 就属于阻尼振动。

当一定的振动系统作阻尼振动时, 能量 (或振幅) 减少的快慢, 完全由阻尼的大小决定。阻尼愈大、能量或振幅减少愈快。但是, 当阻尼不大时, 可以将阻尼振动近似看作谐振动。

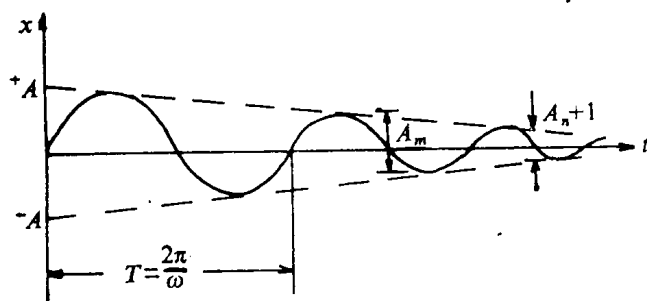


图 1-1 阻尼振动

阻尼振动的位移—时间关系曲线如图 1-1 所示。设 A_n 和 A_{n+1} 是自由振动中任意两次连续振动的振幅, 则 A_n/A_{n+1} 是一个常数:

$$\frac{A_n}{A_{n+1}} = e^{T\lambda}$$

或

$$\ln \frac{A_n}{A_{n+1}} = T\lambda$$

这个常数叫作对数减量, 它表达了阻尼效应的强度。式中的

A_n 、 A_{n+1} 及周期 T 均可直接测定。

λ 称为阻尼比（或阻尼因数），是材料阻尼与临界阻尼（即开始进入非振动状态）的比值，具有圆频率的因次（1/秒）。可按下式求得：

$$\lambda = \frac{1}{T} \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} = \frac{1}{T} \lg \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (1-6)$$

材料吸收振动能的能力，用吸收系数 ϕ 表示。所谓吸收系数，就是在一个振动循环内，被吸收后不能返回的功与在同一循环内最大弹性功的比值。吸收系数值等于对数减量的二倍。即

$$\phi = \text{一个循环内} \frac{\text{被吸收的功}}{\text{最大弹性功}} = 2 \lg \frac{A_n}{A_{n+1}} = 2T\lambda$$

故
$$\lambda = \frac{\phi}{2T} = \frac{1}{2T} \cdot \frac{\text{被吸收的功}}{\text{最大弹性功}}$$

对某一级动应力幅 σ_d 和对应的应变幅 ϵ_d ，可作出振动一个循环内不同时刻 t 的应力应变关系，见图1-2。当材料为完全弹

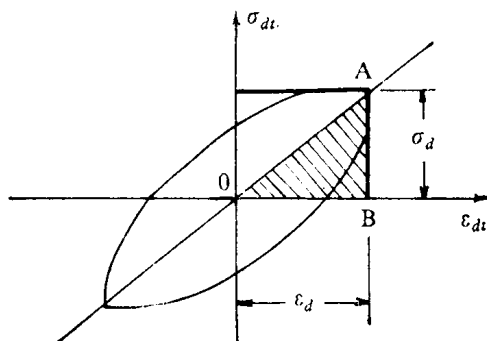


图 1-2 应力滞回圈图

图中斜线部分对△0AB面积

性体时， $\sigma_{dt}-\epsilon_{dt}$ 关系为一直线。但对于土来说，因有内阻尼而形成应变滞后，故振动一周内的 $\sigma_{dt}-\epsilon_{dt}$ 曲线形成一个滞回圈。滞回圈面积愈大，表示变形时内摩擦作用消耗的能量愈大，或者说土的阻尼愈大。

故
$$\phi = \frac{A}{A_r}$$

$$\lambda = \frac{1}{2T} \cdot \frac{A}{A_r} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{A}{A_r} \quad (1-7)$$

式中， A ——滞回圈面积， cm^2 ；

A_r —— OAB 三角形面积， cm^2 。

三、弹性介质中波的产生和传播

当弹性介质中一点发生振动时，它可以影响周围的介质，使它们也陆续地发生振动，向周围介质传播。这种传播过程称为波动，简称波。

波的产生，首先要有产生振动的波源，其次，还要有能够传播这种振动的介质。波传播时，各质点要发生振动，因而具有动能。波传播时，伴随着能量的传播，介质一层接着一层地振动，从而能够将能量由近及远地传播出去。

波传播时，如果质点的振动方向和波动方向相垂直，这种波称为横波；如果质点的振动方向和波传播方向一致，称这种波为纵波。横波和纵波是自然界中两种最简单的波。固体能够传播横波和纵波，液体和气体仅能传播纵波。

一般地说，波传播时，各质点的振动情况是很复杂的。有一种最简单而又最重要的波，称为余弦波（或正弦波）。这种波的波源振动是谐振动。当这种波的传播达到稳定状态时，各质点的振动也是谐振动。

振动三轴试验所采用的电-磁振动，就是将不规则的震动，简化为等幅的、有一定频率的谐振动。

波的传播既然和介质的弹性有密切的关系，那么，波动的传播速度，必然和介质的弹性模量有关。理论证明，横波和纵波在固态介质中的传播速度 v 可用下列两式计算。

横波：
$$v_r = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1-8)$$

纵波:
$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1-9)$$

式中, G 和 E ——介质的切变弹性模量和杨氏弹性模量;

ρ ——介质的质量密度, $\rho = \frac{\gamma}{g}$ (γ ——介质的容重,

g ——重力加速度)。

如果波的传播介质是土体, 并假定土体为均质各向同性的无限弹性体, 由动力平衡条件以及弹性介质的应力应变关系和应变位移关系建立起来的弹性体运动方程, 可以导出纵波和横波在土中传播速度的计算式。

纵波:
$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (1-10)$$

横波:
$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1-11)$$

式中, λ ——海拉恒量, $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$;

ν ——土的泊松比。

液体只能传播纵波, 传播速度可用下式计算:

$$v_p = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (1-12)$$

式中, B ——液体的容变弹性模量。

由上所述, 如果测定了两种波到达某处前后相隔的时间, 就

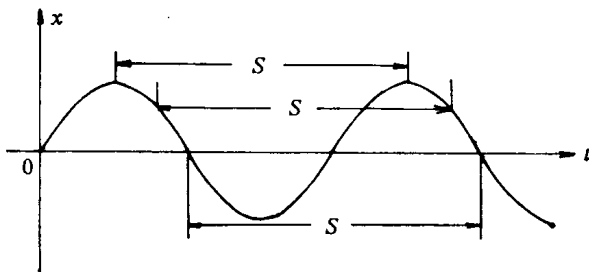


图 1-3 波长图

可以求出波源与观测点之间的距离。这一方法在研究地震、地质构造等问题上有广泛的应用。

如图 1-3 所示，设波长为 S ，波的周期为 T ，质点振动的频率为 n ，波的传播速度为 v ，则

$$v = \frac{S}{T} = nS \tag{1-13}$$

第三节 地震及地震中的土力学问题

地震也叫地动，是构造运动或其他运动所引起地壳岩层的震动。

地震时，震源处释放出巨大的能量，产生强烈的振动。建筑物受地震的影响程度，不仅与地震的震级、震源远近及地震波的性质有关，同时也与地基、建筑物自身的动力性质有关。由于地震作用，地基土会产生振动液化，导致垮坝和其他建筑物的倒塌。

一、地震波

如果把地球视为弹性体，就可以把地震波视作简谐运动。地

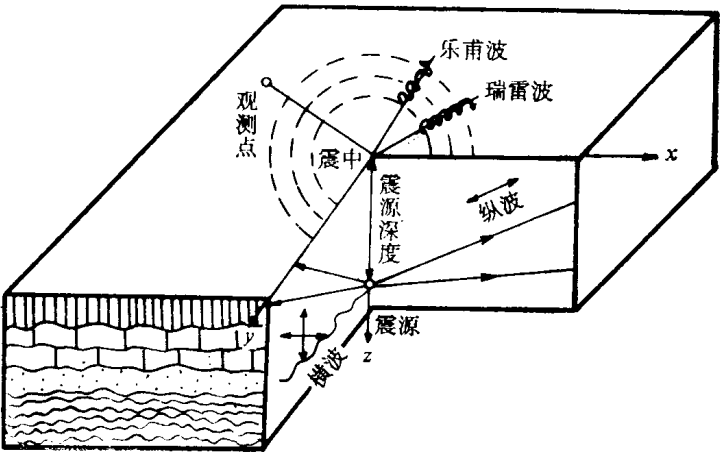


图 1-4 地震波传播示意图

震波包括在地球内部传播的体波和沿地表的面波。参见图1-4。

(一) 体波

地震波的体波是指可以通过地球本体的波，它包括纵波与横波两种。

纵波称P波（又称首波），是由震源向外传播的压缩波，也称压力波。这种波的周期短、振幅小、摧毁力不大。

横波称S波（又称次波），是由震源向外传播的剪切波。这种波只能在固体里传播，其周期长、振幅大，震动的摧毁力较强。

纵波较横波传播得快，两者的差别与土的泊松比有关。当泊松比为0.25时，纵波的波速约为横波的1.73倍。在地震分析中，常以纵波与横波出现的时间差来计算震源的距离。

(二) 面波

发生于弹性体自由面（即地面）上的波为表面波（L波），简称面波。它是体波向地表传播时，经土层界面多次反射、折射后所形成的沿着地表面传播的次生波。其中包括瑞雷波（R波）和乐甫波（Q波）两种。表面波沿着地面传播时，由于波速小，振幅大，故破坏力最强。

二、地震震级与地震烈度

(一) 地震震级

震级是表示地震本身强度大小的等级，它是衡量地震震源释放出的总能量大小的一种量度。震级与放出的总能量近似地有如下关系：

$$\lg E = 11.8 + 1.5M \quad (1-14)$$

式中， E ——能量，J；

M ——震级。

对远震（震中距 $\Delta > 1000\text{km}$ ），一般用面波计算其震级，经验公式如下：

$$M_s = \lg \left(\frac{A_s}{T} \right)_{\text{最大}} + \sigma(\Delta) \quad (1-15)$$

式中， M_s ——根据面波求得的震级；

T ——相应于 A_u 的振幅；

A_u ——记录到的水平地动位移， μm ；

$\sigma(M)$ ——面波震级的起算函数。

(二) 地震烈度

“地震震级”是用来衡量震源释放出的总能量，而“地震烈度”则是用来衡量地面及建筑物被震坏的程度。烈度的大小不仅取决于每次地震本身放出的能量多少，而且受震源深度、震区距震中的距离、震波传播介质的性质、震区的表土性质及其他地质条件影响。

地震烈度通常是根据宏观地震调查确定的。我国地震烈度采用12度划分法，主要是根据地震时人的感觉、建筑物的损坏程度等确定的。下面摘要列出我国1957年编制的地震烈度表及国际上几种地震烈度的对照表，如表1-1、表1-2。

以上所述的烈度和震级，从两个方面说明了地震的等级。前者反映地面的破坏程度，后者反映震源的能量多少。对于浅源地震，震级与烈度的大体对应关系如表1-3。

(三) 基本地震烈度与设计地震烈度

在地震区进行建筑物设计，首先应确定工程所在地的基本地震烈度。基本地震烈度是根据对该地区地震调查、历史记载并结合地质构造情况，综合分析研究得出的较大范围内的地震烈度。基本地震烈度，可向地震主管单位查询取得，大型工程一般都由国家地震局鉴定。

在“基本烈度”的基础上可根据工程所在地的工程地质条件，确定建筑物地基的“实际地震烈度”。然后根据建筑物的重要性和结构特点，综合考虑加以适当调整，从而确定工程的“设计地震烈度”，又称计算地震烈度或设防地震烈度，如表1-4。工程设计中所采用的设计烈度，应根据建筑物等级确定。

三、地面的地震反应

由于地壳多为不均匀的岩石组成，即使震源发出上述那种简单的波，当经过各个层面的多次反射、折射后，亦会变成多种波

表 1-1 中国地震烈度表

烈度	名称	加速度 a (cm/s^2)	地震系数 $K_e = a/g$	地震情况
I	无感觉	<0.25	$<\frac{1}{4000}$	人无感觉
II	微震	$0.26-0.5$	$\frac{1}{4000}-\frac{1}{2000}$	个别非常敏感的能感觉到
III	轻震	$0.6-1.0$	$\frac{1}{2000}-\frac{1}{1000}$	少数人感觉地动
IV	弱震	$1.1-2.5$	$\frac{1}{1000}-\frac{1}{400}$	室内大多数人感觉到
V	次强震	$2.6-5.0$	$\frac{1}{400}-\frac{1}{200}$	差不多人人都感觉到, 悬吊物摇晃
VI	强震	$5.1-10.0$	$\frac{1}{200}-\frac{1}{100}$	人人感觉, 行动不稳, 家具移动
VII	损坏震	$10.1-25.0$	$\frac{1}{100}-\frac{1}{40}$	人从室内逃出, 悬吊物强烈摇摆
VIII	破坏震	$25.1-50.0$	$\frac{1}{40}-\frac{1}{20}$	人很难站稳, 房屋有破坏
IX	毁坏震	$50.1-100.0$	$\frac{1}{20}-\frac{1}{10}$	坚固建筑物损伤颇重, 一般建筑物倒塌
X	大毁坏震	$100.1-250.0$	$\frac{1}{10}-\frac{1}{4}$	坚固建筑物倒塌, 堤坝严重损伤
XI	灾震	$250.1-500.0$	$\frac{1}{4}-\frac{1}{2}$	砖砌建筑全部塌, 到处土滑山崩
XII	大灾震	$500.1-1000$	$>\frac{1}{2}$	地崩山摧, 一切建筑物无不毁坏

类传至地面, 因此, 地面上某点的振动, 实际上是各种波相互重叠、极为复杂而具有空间性质的一种振动。

目前, 许多国家都在进行地基和建筑物的强震观测, 积累了不少强震记录。为了分析地面的复杂振动记录, 通常采用频谱分析法。

所谓频谱分析方法, 具体地说, 就是对某一地基土体在地震