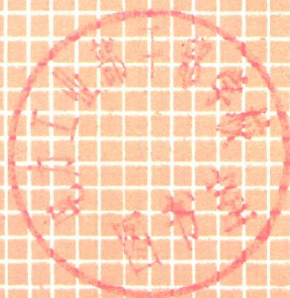


动力机器基础设计

钱鸿缙 张迪民 王杰贤 编



中国建筑工业出版社

0585

TU435
1

动力机器基础设计

钱鸿缙 张迪民 王杰贤 编

中国建筑工业出版社

本书介绍土动力学基本知识和常见类型的机器基础的设计。
主要内容有动力荷载下土的性能、地基刚度及阻尼、动力机器基础的振动计算原理以及曲柄连杆式机器、破碎机、金属切削机床、锻锤等基础的设计计算及防振措施等。

本书可供土建技术人员学习参考。

动力机器基础设计

钱鸿缙 张迪民 王杰贤 编

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 7¹/₂ 字数: 196千字

1980年7月第一版 1980年7月第一次印刷

印数: 1—23,200册 定价: 0.73元

统一书号: 15040·3732

前 言

机器基础设计是工业建筑设计的一个组成部分。它涉及土建和机械两个专业。目前已出版的几本专门著作对初学者似失之过深，而一般大学教材则因篇幅所限又语焉不详。因此，对于从事机器基础设计的同志，一本较有系统而又实用的书籍是迫切需要的。

本书以土建设计人员为主要对象，比较系统地介绍土动力学的基本知识和常见类型的机器基础的设计。对于从事工程地质勘察、机器安装和设备更新的机械专业人员，以及大学土建类高年级学生和研究生也可作为参考。

对于常见的曲柄连杆式机器、锻锤、矿石破碎机和金属切削机床等机器的基础设计，均列为专章，详加讨论并附有例题。对压力机、水泵、鼓风机以及涡轮发电机和轧钢机基础均未列入，读者可参考有关专门书籍。

地基刚度和机器扰力等数据的选用极为重要，但涉及到工程地质勘察和机器设计专业，土建人员对此往往不大熟悉，因此本书对此做了较详细的讨论。

在编写过程中，蒙第一机械工业部《动力机器基础设计规范》编制组、冶金工业部建筑研究院、北京钢铁设计院、第一机械工业部第一设计院和第四设计院、山西化工设计院、陕西省水泥工业设计所等提供有关资料，谨此致谢。

本书共分九章，由西安冶金建筑学院地基基础教研室钱鸿缙同志（负责一、七、九章）、张迪民同志（负责二、三、六、八章）、王杰贤同志（负责四、五章）编写。

目 录

第一章 动力荷载作用下土的性能	1
第一节 振波在土中的传播	3
第二节 土的振动模量	7
第三节 土的阻尼	11
第四节 土的振动压密	14
第五节 土的动强度	15
第六节 饱和砂土的振动液化	17
第七节 地基土容许承载力的降低	21
第二章 机器基础的分类及其一般要求	23
第一节 机器基础的分类	23
第二节 动力机器基础设计和施工的一般要求	26
第三节 振动的容许标准	28
第三章 动力机器基础的振动计算原理	31
第一节 动力机器基础设计方法的回顾	32
第二节 质弹阻计算模式的基本假设	33
第三节 振动的基本知识	34
第四节 基础的竖向振动	35
第五节 基础的扭转振动	48
第六节 基础的水平-摇摆(回转)耦合振动	50
第七节 弹性半空间介质上基础振动理论的简介	62
第四章 地基刚度及阻尼	67
第一节 基本概念	67
第二节 地基刚度系数	69
第三节 桩基刚度	82
第四节 地基刚度系数的测试方法	88
第五节 阻尼比	100
第六节 按弹性半空间模式的地基刚度及阻尼比	102

第五章 曲柄连杆式机器基础	105
第一节 设计原则	105
第二节 基础的材料及构造	109
第三节 扰力的计算	110
第四节 基组特征值的计算	130
第五节 基础的动力计算	132
第六节 曲柄连杆式机器基础设计步骤及例题	140
第六章 破碎机基础	155
第一节 破碎机的扰力及基础类型	155
第二节 破碎机基础的计算	162
第七章 金属切削机床基础	173
第一节 金属切削机床的分类	173
第二节 金属切削机床基础的设计	176
第八章 自由锻锤和模锻锤基础	184
第一节 自由锻锤和模锻锤的工作简况	184
第二节 锤基础设计原则及构造	187
第三节 锤基础的计算	193
第九章 动力机器基础的隔振	214
第一节 振波在土中的衰减	215
第二节 隔振类型、隔振材料和隔振器	221
第三节 锻锤基础振动对厂房的影响及其隔振措施	228
第四节 空压机基础振动对厂房的影响及其隔振措施	233
第五节 金属切削机床基础的隔振措施	234

第一章 动力荷载作用下 土 的 性 能

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）。

土在动力荷载作用下的性能与其在静力荷载作用下的性能有明显的不同，而且要复杂得多，其影响因素除了同样对土的静力性质有影响的一些因素（如土的粒径组成、孔隙比、含水量、周围侧限压力、荷载历程、温度等）以外，主要还有荷载时间（指在土中形成一定的应力或应变所需要的时间，可概括为速度效应）、重复（或周期）效应（指荷载以一定的周期反复作用在土上所产生的影响）和应变幅值等这三个因素。

土在荷载作用下经历了一定的时间以后，其性质就有所变化。凡荷载使土达到某种应力或应变的时间在几十秒以上，而且荷载的增减又都很缓慢的，通常按静力问题考虑；反之，按动力问题来处理。图 1-1 是土的动力问题按荷载时间和重复次数的分类，归纳起来，基本上可以分为下列三类：（1）单次作用的快速荷载（如爆炸），其荷载时间非常短促，约为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 秒的量级；（2）多次重复的微幅的振动（如机器基础的振动）；（3）有限次数（几次到几十次）的无规律的振动（如地震、每次荷载时间约为 $0.03 \sim 0.10$ 秒）。

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 $10^{-6} \sim 10^{-1}$ 范围（如由于动力机器基础、车辆行

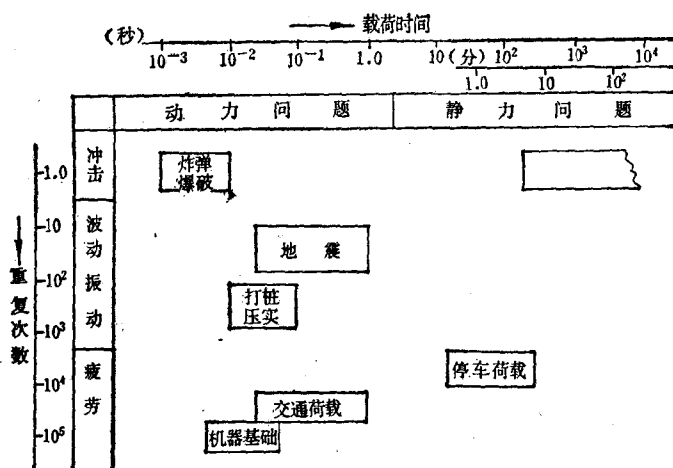


图 1-1 土动力问题按载荷时间和重复次数的分类

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} 的应变幅值作为大小应变幅振动的界限值。

土的动力特性随应变幅值而变化的情况,参见表1-1。

由上所述,可见研究上的动力特性,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、振动压密、动强度和液化等五个方面,我们将在后面逐一加以讨论。

在动力机器基础、地基体系、土坝等的动态反应分析中,不

土的动力性质随应变幅值的变化

表 1-1

应变幅值		10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
现 象		波动 、 振动		开裂 不均匀下沉		压密、滑动、 液化	
力学特性		弹 性		弹、塑性		破 坏	
动力特性参数		剪切模量、泊松比、阻尼系数					内摩擦角 内聚力
原位测定	弹性波法						
	振动试验						
	重复载荷 试验						
室内测定	波动法						
	共振柱法						
	重复加荷 试验						

论把土看作是甚么样的介质、或采用甚么样的计算模式，都首先要确定土的动力特性参数，而计算结果的精度，则不论其计算是如何的严密，都不会高于土的动力特性参数的测定精度。可见，正确测定土的动力特性参数是非常重要的。但是，由于土动力问题的复杂性，近三十多年来，虽然对于土的动力特性进行了大量的试验研究工作，还存在不少问题有待于进一步深入研究。

本章简要介绍有关振波在土中的传播，土的主要动力特性和饱和粉砂的振动液化等问题；关于按我国现行《动力机器基础设计规范》进行动力计算所需用的地基土的刚度问题详见第四章。

第一节 振波在土中的传播

由于某种原因（如动力机器的运转、地震等）所引起的振动，在土中以振波的形式从振源向四面八方传播开去，它们的传播规律可以按振波在均质、各向同性的弹性连续介质中的传播来研究。

振波分体波和面波两类，前者在土的内部传播，而后者则只

在地表附近传播。体波分纵波和横波两种。纵波也叫膨胀波、无转动波等，它是从振源向外传播的压缩波，质点的振动方向与波的前进（即传播）方向一致，如图 1-2(a) 所示。一般表现为周期短，振幅小，其波速 v_p 可按下式计算：

$$v_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\mu_d)}{\rho(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}} \quad (1-1)$$

式中 v_p ——纵波的速度，米/秒；
 E_d ——介质的动弹性模量，吨/米²；
 $\rho \left(= \frac{\gamma}{g} \right)$ ——介质的密度，吨·秒²/米³；
 γ ——介质的容重，吨/米³；
 g ——重力加速度，米/秒²；
 μ_d ——介质的动泊松比。

横波又叫畸变波、等体积波等，它是从振源向外传播的剪切波，质点的振动方向与波的前进方向相垂直，如图 1-2(b) 所示。一般表现为周期较长，振幅较大，其波速 v_s 可按下式计算：

$$v_s = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1+\mu_d)}} \quad (1-2)$$

$$= \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} \quad (1-2)'$$

式中 v_s ——横波的速度，米/秒；
 G_d ——介质的动剪切模量，吨/米²，且

$$G_d = \frac{E_d}{2(1+\mu_d)} \quad (1-3)$$

对比式 (1-1) 和式 (1-2)，可见

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-\mu_d)}{1-2\mu_d}} \quad (1-4)$$

由于土的动泊松比总小于 0.5，可见 v_p 总大于 v_s 。当 $\mu_d = 0.25 \sim 0.45$ ，则相应的 v_p 值约为 v_s 值的 (1.7~3.3) 倍，因此，在仪器观测到的振波记录图中纵波总是先于横波到达。所以，纵波又叫初波，或 P 波；而横波则叫做次波，或 S 波，它们在各种土中

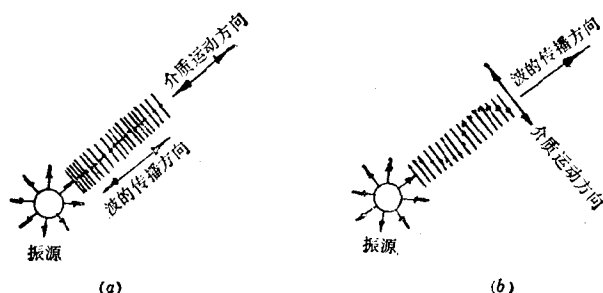


图 1-2 纵波和横波

(a) 纵波; (b) 横波

的代表性速度值如表1-2所示。

纵波和横波在各种土中的传播速度

表 1-2

土 的 种 类	土的密度 (公斤·秒 ² / 厘米 ⁴)	波速:米/秒)		土 的 种 类	土的密度 (公斤·秒 ² / 厘米 ⁴)	波速(米/秒)	
		v_p	v_s			v_p	v_s
湿 粘 土	1.8×10^{-6}	1500	150	中等大小的圆砾	1.8×10^{-6}	750	180
天然湿度的黄土	1.67×10^{-6}	800	260	风化岩石		1000	500
密实的砾砂	1.7×10^{-6}	480	250	砂 岩		1950	1100
细 砂	1.65×10^{-6}	300	110	花 岗 岩		4350	2660
中 砂	1.65×10^{-6}	550	160	石 灰 岩		5300	2600

纵波能在固体和液体中传播，而横波只能在固体中传播。

面波只限于沿着地表附近传播，一般是体波经过地层介面多次反射后而形成的次生波，分瑞利波和乐夫波两种。瑞利波又叫 R 波，在其传播时，质点在波的前进方向和自由面（即地表面）法向组成的平面内[见图1-3(a)的 xz 平面]作椭圆运动（其长轴垂直于地面），其转动方向与波的前进方向相反，而与该平面相垂直的水平方向（即 y 方向）上则没有振动，并在地面上呈滚动形式；它与横波波速的关系如下式所示：

$$v_R = \frac{0.87 + 1.12\mu_d}{1 + \mu_d} v_s \quad (1-5)$$

如土的 μ_d 值为 $0.25 \sim 0.45$ ，可得 $v_R = (0.92 \sim 0.95) v_s$ ，比 v_s 值

稍慢一些。对于一般的第四纪土， v_R 约为（75~300）米/秒，并随着深度的增加而很快减弱。

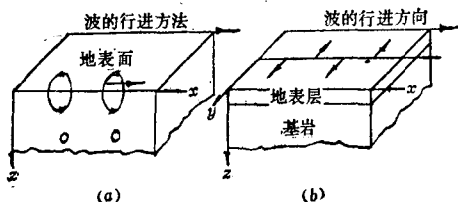


图 1-3 面波

(a) 瑞利波；(b) 乐夫波

综上所述，可见 $v_P > v_S > v_R$ ，而 v_S 与 v_R 又相差不多。当 $\mu_d = 0 \sim 0.5$ 时， v_R/v_S 和 v_P/v_S 与 μ_d 间的关系如图 1-4 所示。

乐夫波又叫 Q

波，只存在于半无限弹性体上有一层均匀的表层的情况（表层介质的横波速度小于下面半无限体的横波速度），各质点只是在与波的前进方向相垂直的水平方向上[即图1-3(b)中所示的 y 方向]振动，即在地面上呈蛇形的运动形式。它的波速介于上层横波速度与下层横波速度之间。

由于面波的速度小于体波的速度，所以，在振波记录图中，体波到达后，面波才到达。一般，当横波或面波到达时，地面振动最为剧烈。

由于土总是成层的，而且也不是单纯的理想固

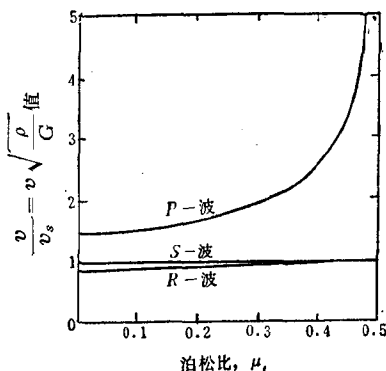


图 1-4 在半无限弹性介质中 P 波、S 波和 R 波的速度与泊松比 μ_d 间的关系

体，土体中的孔隙总充满着空气、水或流体的混合物，因而振波在土中的实际传播规律当然要复杂得多，这方面的讨论可参见 F·E·小理查特等所著《土与基础的振动》一书（1970）中的第四和第五章（中译本，中国建筑工业出版社出版，1976年10月）。

第二节 土的振动模量

为了预估地基土和土工构筑物的动态反应（如按弹性半空间理论计算动力机器基础），必须确定土的振动模量—动压缩模量（通常叫动弹性模量） E_d 和动剪切模量 G_d ，它们可通过现场测定或室内试验求得。本节只介绍共振柱法、现场波速法和一些经验公式。

一、共振柱法

共振柱试验创始于日本饭田(1938)，但当时并未引起重视，一直到五十年代才又引起重视，并对仪器设备诸如端部条件、试样尺寸、激振方法等方面进行了改进和发展，迄今已成为美、日、加拿大、西德等国家五十多个土动力学试验室的主要设备之一，并为测定土的动剪切模量的一种标准方法。图 1-5 是一般共振柱仪器的简图。

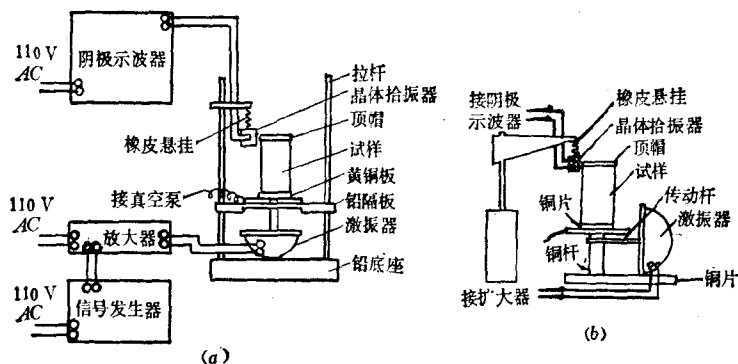


图 1-5 共振柱仪简图

(a) 纵向振动仪；(b) 扭转振动仪

试验是把圆柱形土样（近十年来还采用了空心圆柱形试样）放在压力室中以气压作为侧限压力这样的应力状态下进行的。土样装在橡皮薄膜内，固定在压力室的底座上。土样底端受着可变频率的纵向或扭转振动。振动是通过电磁式激振器发生。在试样顶端，通过拾振器和示波器以测得振动。试验开始时，采用一

个较低的激振频率(低于土样的自振频率), 这时试样顶端的振幅较小; 以后逐渐增大振动频率, 使土样处于共振状态, 这时相应的频率就是土样的共振频率, 而土样顶端的振幅则达到了最大值。

对于一端自由、一端固定这样配置的土样, 在试样内通过的纵波速度 v_p (厘米/秒) 可按式计算:

$$v_p = 4fl = \left(1 - \frac{\pi^2 \mu_a^2 r^2}{16l^2}\right) \sqrt{\frac{E_d g}{\gamma}} \quad (1-6)$$

式中 f ——纵向振动时的共振频率, 赫兹;

l ——试样的长度, 厘米;

r ——试样的半径, 厘米;

E_d ——土的动弹性模量, 公斤/厘米²;

其它符号的意义同前。

试验表明: 当土样的长度为其直径的二倍时, 采用任何泊松比值, 由于忽略了上式中括号内项目所导致的最大误差不超过 (1~2)%, 且这个误差值又小于激振器本身的校正误差值; 因此, 实用上, 可忽略括号内的项目, 把式 (1-6) 改写成:

$$4fl \approx \sqrt{\frac{E_d g}{\gamma}} \quad (1-7)$$

或

$$E_d = \frac{16f^2 l^2 \gamma}{g} \quad (1-8)$$

可见, 只要知道土样的尺寸、容重和共振频率, 就可求得土的动弹性模量。

式 (1-8) 同样适用于计算扭转振动下土的动剪切模量 G_d (公斤/厘米²), 即

$$G_d = \frac{16f'^2 l^2 \gamma}{g} \quad (1-9)$$

式中 f' ——扭转振动时的共振频率, 赫兹;

其它符号的意义同前。

由式 (1-2),

$$v_s = \sqrt{\frac{E_d g}{2(1 + \mu_a) \gamma}} = \sqrt{\frac{G_d g}{\gamma}}$$

可得

$$\mu_d = \frac{E_d}{2G_d} - 1 \quad (1-10)$$

因此, 只要知道给定土的 E_d 和 G_d , 就可求得 μ_d 。当无试验数据时, 可参考采用表 1-3 所列的经验数字。由于其变化幅度不大, 在采用表列数值计算时, 不会导致太大的误差。

土的动泊松比 μ_d 值

表 1-3

土 的 种 类	μ_d
岩 石	0.25~0.30
砂	0.30~0.35
轻亚粘土	0.35~0.40
亚 粘 土	0.40~0.45
粘 土	0.45~0.50

试验研究表明: (1) 共振柱法适用于应变幅值为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 的范围, 也可用于 1×10^{-5} 的情况 (参见表 1-1); (2) 土的振动模量随着应变幅值的增加而减小; (3) 土的动剪切模量随着周围有效压力的增加而增大。在小应变幅值 ($< 10^{-4}$) 的情况下, 动剪切模量与有效平均主应力 $\left[\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \right]$ 的 $\frac{1}{2}$ 次方有关; 在大应变幅值时, 则动剪切模量与有效平均主应力的一次方有关; (4) 土的动剪切模量随着加荷循环次数的增加而减小, 但, 对于粘性土, 只是略有增加; (5) 土的动剪切模量随着土的孔隙比的增加而减少, 并随着土的容重和含水量的增加而增大; (6) 土的动剪切模量随着不均匀系数 C_u ① 和细粒土含量的增加而减少。

① 不均匀系数 $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$

式中 d_{60} ——小于该粒径的颗粒占总重的 60%;

d_{10} ——有效粒径, 小于该粒径的颗粒占总重的 10%。

一般把 $C_u < 5$ 的土看作为粒径均匀, 而 $C_u > 10$ 的土看作为级配良好。

二、波速法

根据式(1-1)即

$$v_p = \sqrt{\frac{E_d g}{\gamma}} \sqrt{\frac{1 - \mu_d}{(1 - 2\mu_d)(1 + \mu_d)}}$$

和式(1-2)即

$$v_s = \sqrt{\frac{E_d g}{\gamma}} \sqrt{\frac{1}{2(1 + \mu_d)}} = \sqrt{\frac{G_d g}{\gamma}}$$

可分别得出

$$E_d = v_s^2 \frac{\gamma}{g} \frac{(1 + \mu_d)(1 - 2\mu_d)}{1 - \mu_d} \quad (1-11)$$

$$G_d = v_s^2 \frac{\gamma}{g} = \frac{E_d}{2(1 + \mu_d)} \quad (1-12)$$

和

$$\mu_d = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{v_p}{v_s} \right)^2 - 1}{\left(\frac{v_p}{v_s} \right)^2 - 1} \quad (1-13)$$

只要在现场测得 v_s 和 v_p , 就可由上列各式分别求得 μ_d 、 E_d 和 G_d 。

纵波速度 v_p 一般在地面或地面下某一深度处用爆炸或落锤撞击试验测定, 而横波速度 v_s 则可猛烈敲打铺在地面上的木板(木板尺寸一般为 $5 \times (30 \sim 50) \times (200 \sim 300)$ 厘米, 上面压以 $300 \sim 400$ 公斤的重物)测得。

此外, 也可用测定瑞利波速度 v_R 以代替横波速度的方法来求得土的振动模量。

应该指出: 从振源激发出来的振波, 实际上往往并不是单一的纵波或横波, 而是它们的组合; 除此以外, 还伴有瑞利波、乐夫波等。这样, 就需要有专门的知识 and 经验, 以便能对观测到的振波记录进行振相分析, 并鉴别出不同的波型和分析其传播规律。这项工作往往由地球物理专业人员进行。

三、经验公式

当剪应变幅值为 1×10^{-4} 或更小的情况下, 土的动剪切模量

G_d (用公斤/厘米²表示)可用下列经验公式初步估算[B.O.哈丁(Hardin)和小理查特, 1963]:

对于圆粒砂土 ($e < 0.80$):

$$G_d = \frac{700(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma_m)^{\frac{1}{2}} \quad (1-14)$$

对于角粒砂土:

$$G_d = \frac{326(2.97-e)^2}{1+e} (\sigma_m)^{\frac{1}{2}} \quad (1-15)$$

式中 $\sigma_m = \left[\frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \right]$ ——平均有效应力, 公斤/厘米²。

在三维情况下, $\sigma_2 = \sigma_3 = k_0 \sigma_1$, 则 $\sigma_m = \frac{(1+2k_0)\sigma_1}{3}$,

其中 k_0 是静止土压力系数, 可按 $1 - \sin \bar{\varphi}$ 估算, 其中 $\bar{\varphi}$ 是以有效应力表示的土的内摩擦角。

式(1-15)也可用来近似地估算表面活性低的正常固结粘土的动剪切模量。

对于不含细土粒的均匀净砂, 日本 T·岩先 (Iwasaki) 和 F·立岗 (Tatsuoka) 最近 (1977) 提出下列经验公式以计算其动剪切模量 G_d (公斤/厘米²):

$$G_d = 900 \frac{(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma_m)^{0.40} \quad (\text{当剪应变为 } 10^{-6}) \quad (1-16)$$

$$G_d = 850 \frac{(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma_m)^{0.40} \quad (\text{当剪应变为 } 10^{-5}) \quad (1-17)$$

第三节 土的阻尼

生活实践表明: 任何振动着的物体或体系, 当激发其振动的因素消失后, 由于能量耗失, 终究要慢慢地停下来; 振波在土中传播时, 也同样出现这种情况。这种材料或体系由于内部能量耗