

711

TU435

127

土 动 力 学

杨桂通 著



A1021796

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土动力学/杨桂通著. —北京:中国建材工业出版社,
2000. 7

ISBN 7-80159-019-8

I. 土… II. 杨… III. 土动力学 IV. TU435

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 38078 号

土动力学

杨桂通 著

*

中国建材工业出版社出版

(北京海淀区三里河路 11 号 邮编 100831)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

北京密云红光印刷厂印刷

*

开本: 850mm×1168mm 1/32 印张: 6.375 字数: 181 千字

2000 年 10 月第一版 2000 年 10 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 18.00 元

ISBN7-80159-019-8/N·000

前 言

土是一种组成复杂的多孔多相介质。其种类繁多，地域性差别明显。土动力学是专门研究这类介质在遭受动力载荷时变形规律的科学。众所周知，任何建筑物、构筑物都离不开岩土的地基，而地基土承受各种动力作用的场合是非常广泛的。所以，土动力学的研究有着重要的工程实用价值。

土动力学作为土力学的一个重要分支，它融合了多相介质动力学、弹粘塑性动力学、波动与冲击动力学、地震工程与岩土工程等学科的研究成果，根据土木工程、水利工程、道路与桥梁工程、防灾工程等的需要逐渐丰富了土动力学的研究内容，促进了土动力学的发展。

本书的目的在于揭示土的动力特性，了解土动力学特有的问题及各类动力载荷作用对土体的不同反应，熟悉与工程实际密切相关的动力学问题和处理方法。

本书共分七章，第一章、第二章主要介绍土动力学与静力学的重要区别与土的动力学特性，给出了一些有实际意义的实验结果。第三章讨论土的各种本构理论。主要介绍比较成熟的、简便实用的力学模型，其中某些简化的理想模型具有明显的实用价值，一般能够满足工程需要。第四章讨论应力波在土介质中的传播问题。分别介绍土体视为弹性介质、弹塑性介质、粘弹性介质、粘塑性介质等情况下波的传播问题，饱和土中应力波的传播问题等。第五章讨论侵入体向土中的侵彻问题。像打桩及桩基础的施工过程都不可避免地要遇到这类问题；此外，像野外现场测定土的力学性质以及军事工程中的攻击地下工事等问题都将涉及侵彻力学问题。第六章介绍了一维及多维的固结理论，进而给出了动力固

结的基本关系及求解方法。讨论动力固结（强夯）与工程应用的有关问题。第七章介绍了在周期载荷或循环载荷（地震载荷）作用下砂土液化现象出现的条件以及发生液化的估算方法等。全书由浅入深，便于自学。为阅读方便起见，书末列有矢量与张量的基本知识，作为附录。

对于阅读本书的读者，只需具有初等土力学地基基础知识，弹性力学基础知识，便不会有困难。对于部分工程应用的内容，则可直接用以计算有关工程问题。

本书在完成过程中，得到了张年梅博士、李银山博士、树学锋博士的热情帮助，太原理工大学应用力学研究所的教师与研究生们给予了一贯地热情帮助，使本书得以顺利完成，特向他们致以衷心地感谢。

由于作者水平有限，不当之处，敬请专家与读者们不吝赐教，批评指正！

作者于太原理工大学

2000年6月28日

目 录	
第一章 绪论	1
§ 1.1 土动力学问题	1
§ 1.2 土的组成	4
§ 1.3 土的结构与分类	5
第二章 土动力特性	8
§ 2.1 土动力特性的测试方法	8
§ 2.2 动力压缩曲线.....	11
§ 2.3 应变率效应.....	18
第三章 本构理论	21
§ 3.1 屈服条件、破坏条件.....	21
3.1.1 Tresca 条件	23
3.1.2 Mises 条件	23
3.1.3 Mohr-Coulomb 条件	25
3.1.4 Drucker-Prager 条件.....	28
§ 3.2 加载条件.....	29
3.2.1 各向同性强化模型.....	30
3.2.2 随动强化模型及各种修正方案.....	30
3.2.3 Roscoe 强化模型及其修正方案	32
3.2.4 动强度的降低情况.....	34
§ 3.3 不计应变率效应的本构理论.....	35
3.3.1 弹塑性体的增量理论.....	35
3.3.2 弹塑性体的全量理论.....	37
§ 3.4 计入应变率效应的本构理论.....	39
3.4.1 Maxwell 模型和 Kelvin 模型	39

3.4.2 粘塑性模型·····	43
§ 3.5 循环载荷作用下的本构理论·····	46
3.5.1 双曲线模型·····	48
3.5.2 Ramberg-Osgood 模型·····	49
第四章 应力波在土中的传播 ·····	52
§ 4.1 一维弹性波·····	52
4.1.1 运动方程·····	52
4.1.2 纵波的传播特征·····	53
4.1.3 一维剪切波·····	54
4.1.4 一维弹性波的反射·····	55
§ 4.2 一维粘弹性波·····	57
§ 4.3 一维弹塑性波·····	61
§ 4.4 卸载波·····	64
§ 4.5 无限介质中的波·····	71
4.5.1 控制方程·····	71
4.5.2 体波·····	72
4.5.3 SH 波·····	73
4.5.4 饱和土中的波·····	75
§ 4.6 半无限介质中的波·····	80
4.6.1 控制方程的波反射·····	80
4.6.2 波的斜入射·····	85
4.6.3 Rayleigh 波·····	86
4.6.4 层状介质中的波—Love 波·····	89
第五章 土中侵彻问题 ·····	92
§ 5.1 一般概念·····	92
§ 5.2 问题的提出与基本方程·····	94
§ 5.3 侵彻体上的应力·····	99
§ 5.4 侵彻深度的确定·····	101
§ 5.5 尖顶锥头与尖顶拱头对饱和砂土的侵彻·····	107
5.5.1 基本关系式·····	107

5.5.2 弹坑扩张	108
5.5.3 侵彻力分析	111
§ 5.6 非饱和土的侵彻问题	115
§ 5.7 塑性介质侵彻力公式	118
5.7.1 基本方程	119
5.7.2 侵入体表面应力及侵彻力的确定	123
§ 5.8 侵彻问题的应用	129
5.8.1 用现场侵彻实验估算土的剪切模量	129
5.8.2 标准侵彻实验与剪应力的关系	132
5.8.3 相对密度与标准侵彻实验击数的关系	134
第六章 动力压密与动应力分析	136
§ 6.1 问题的提出	136
§ 6.2 Terzaghi 一维固结理论	138
§ 6.3 Biot 固结理论	143
§ 6.4 动力固结问题	146
6.4.1 简单模型分析	146
6.4.2 动力固结空间理论	149
6.4.3 实验与应用实例	152
§ 6.5 夯锤质量与合理落距的选择	155
§ 6.6 动应力分析——声波方法	161
§ 6.7 动应力分析——弹性波方法	166
第七章 砂土液化分析	170
§ 7.1 土体液化现象	170
§ 7.2 液化分析	172
§ 7.3 液化估算经验公式	174
附录 A	176
索引	187
参考文献	192

第一章 绪 论

§ 1.1 土动力学问题

经典土力学主要是研究静力学问题。其涉及的领域是非常广泛的，包括土体中应力状态的研究；建筑物基础的安全性；土体在外载荷作用的强度与稳定性；土的渗透性研究以及粘土的固结等重要分支。在这些问题的研究中，人们最关心的是土的变形。变形的程度或应变的大小是土体发生破坏，地基发生不容许沉降量的重要标志。

上述静力学问题的研究已有很长的历史，有许多成熟的结果和成熟的工程经验，人们在各种土质情况下建造了许多百年不朽的各式各样的建筑物就是明证。经典土力学仍将继续发挥其重要的作用，并在工程实践中进一步得到理论与实践方面的发展。

土动力学是研究土在动载荷作用下的动力响应。动力学问题的特点是土体受动载荷作用下发生运动时的惯性力和其他相关的作用不能忽略。因而，问题变得复杂起来，特别是土的种类很多，动力学问题便会出现各种特殊的理论问题和工程实际问题。在静力学问题中，土的应变水平在 10^{-4} 左右时，将不致引起明显的沉降或其他形式的破坏，而在动力学问题中，若应变水平在 10^{-2} 时，就要引起高度的重视。因为，尽管应变水平不高，但由于惯性力的作用可导致土体的动力急剧增大，以致实际工程结构难以承受。

动载荷的加载速度对土的变形影响很大。动载荷的特征用其载荷作用的持续时间 t ，载荷重复作用的次数，或称循环次数及加

载速度，或称应变率 $\dot{\epsilon}$ 等来表征。图 1.1 给出了动力问题与静力问题的加载特点，图 1.2 给出了加载时间与振动次数有关动力问题。

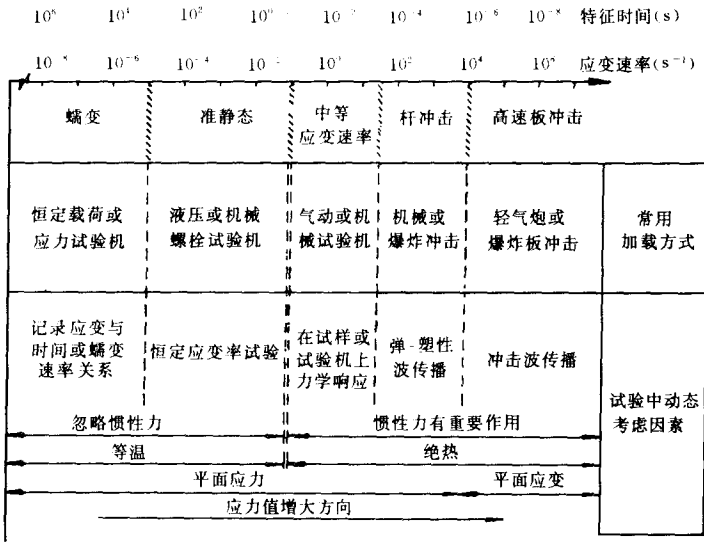


图 1.1 静力与动力问题的加载特点

特征时间：产生 1% 的应变对应于应变率所需的时间

动力现象的产生是由于各式各样的随时间变化的外力对土体的作用。例如：

(1) 冲击载荷。冲击载荷产生的短时强载荷是一种撞击作用，形如一个单脉冲，其载荷持续时间约为 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{s}^{-1}$ [图 1.3 (a)]。

(2) 爆炸波载荷。这种载荷可在 2~4ms 之间升至峰值，之后很快衰减，并将出现负压段 [图 1.3 (b)]。

(3) 振动载荷。是一种由振动机械产生的循环往复的载荷，一般情况的振动周期和振幅都是给定的 [图 1.3 (c)]。例如：对于振动打桩、振动压密来说，一般以 10~60Hz 之间的频率打击 100

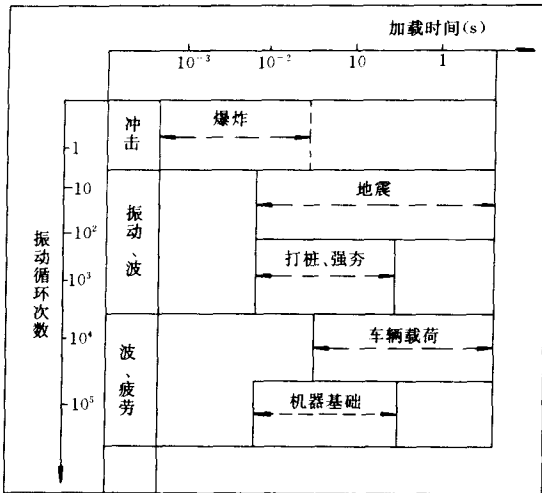


图 1.2 加载时间与振动次数有关的动力问题

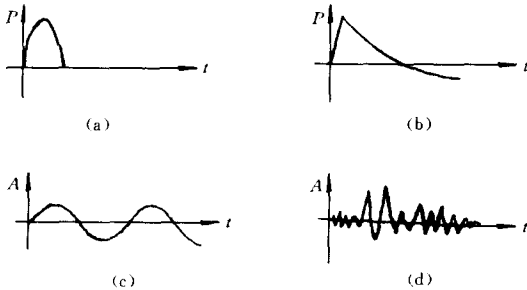


图 1.3 各种不同类型的动载荷

(a) 冲击载荷；(b) 爆炸波载荷；(c) 振动载荷；(d) 地震载荷

t —时间； P —载荷； A —振幅

~1000 次。

(4) 地震载荷。是一种在时间历史上无规律的载荷，往复振动的周期与振幅值也是无规律的。其每一个脉冲的周期约为 $0.1 \sim 3.0s^{-1}$ ，加载时间约为 $0.02 \sim 1.0s^{-1}$ [图 1.3 (d)]。

土动力学问题就是研究土体在这类载荷作用下的运动与变形的规律。由于动载荷作用下土体的响应与静载荷作用下的响应有

极大的区别，工程上出现的现象也大不相同，所以要专门进行研究。土动力学问题有许多工程背景，像地震过程中土层出现的液化现象，机器基础的沉陷问题，振动打桩及动力夯实时土体的变形问题等等都是静力学方法无法解决的问题。此外，像土体的动力失稳、动力固结、动力蠕变以及土体在动力作用下力学性质的变化，应力波在土中的传播引起的各种力学现象等等，都是人们非常关心的理论与工程实践中有重要意义的问题。图 1.4 给出了土的特性与应变值之间的关系。

应变值	10^{-6}	10^{-3}	10^{-1}	10^3	10^2	10^1
现象	弹性波、振动		裂纹、微量沉陷		滑动、压密、液化	
力学特性	弹性		弹塑性		失效	
常数	剪切模量、泊松比、阻尼比				内摩擦角、粘聚力	
现场测定方法	地震波法					
			振动法			
			重复加载法			
实验室测定方法	波传播法					
			共振柱法			
			重复加载实验			
其他	加载速度实验					

图 1.4 土的特性与应变值之间的关系

§ 1.2 土的组成

土是一种由固体、液体和气体组成的三相混合物。其中固相为多种矿物质组成，它是岩石风化的产物，由于母岩成分和风化程度的不同，所形成的矿物质的类型和颗粒的大小也不同。这种矿物质大致可分为原生矿物和次生矿物。原生矿物又称为非粘土矿物，包括石英、云母、长石、角闪石等，这类矿物质化学性质

较稳定,有较强的抗力性和抗风化能力。次生矿物又称粘土矿物,主要是由各种硅酸盐类矿物分解形成的含水铝硅酸盐组成,一般粒径小于 $5\mu\text{m}$,如高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石等,由于它们的颗粒小,形成土中的粘粒,故称为粘土矿物。

除以上两种主要的矿物质外,尚有水溶盐和有机质也是土中固相的组成部分。水溶盐实际上是可溶性次生矿物。其中像易溶性大的有全部氯盐及钾、钠的硫酸盐、碳酸盐,如钠盐、钾盐、芒硝、苏打等;中等溶解于水的有石膏等;难溶于水的有方解石、白云石等。有机质是动植物分解后的腐殖质,包括碳水化合物、纤维素等,其颗粒极小,粒径约小于 $0.1\mu\text{m}$,呈凝胶状。有机质的存在对土的性质影响很大。工程上往往对有机质的含量给予限定指标。

土中除以上固态矿物质外,土中水可以固态、液态和气态存在。其中固态水为矿物内部的结晶水和结合水,这种水只有在高温(80°C 以上)下才能化为气态水与颗粒分离,否则它永久是矿物颗粒的一部分。

土中的液态水有结合水和自由水,前者为受电分子吸引力作用吸附于土颗粒表面上的水;后者为重力水和毛细水。重力水是存在于地下水位以下透水层中的地下水,而毛细水则存在于地下水位以上的透水层中,是受水与空气交界面处的表面张力作用的一种自由水。

土中的气体主要是空气和水气。土中气体的二氧化碳含量较高,约比空气中二氧化碳的成分高 $6\sim 7$ 倍,因而氧的含量相对减少。随着深度的增长,这种差异就愈大。气态水(即水气)的转移和聚集对土的性质变化有很大的影响。

§ 1.3 土的结构与分类

土的结构与土的形成过程与沉积环境以及土颗粒情况和各种地质力的作用有关,其最终形成的结构形式多种多样,常见有单粒结构、蜂窝结构、絮凝结构、分散结构等(图 1.5)。

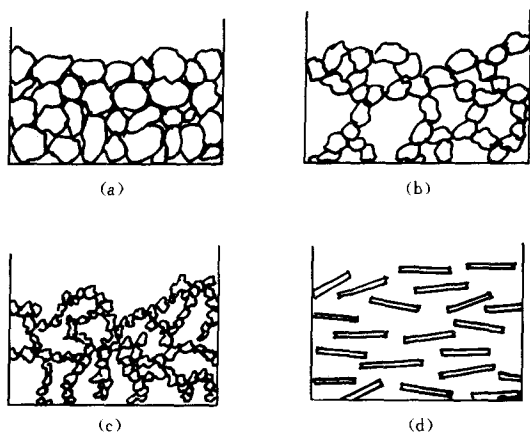


图 1.5 土的结构

(a) 单粒结构；(b) 蜂窝结构；(c) 絮凝结构；(d) 分散结构

容易理解，粒径较大的土，例如砂质土，其粒径多在 $0.05 \sim 0.005\text{mm}$ 左右，它的结构多为单粒结构 [图 1.5 (a)]。这类土在沉积过程中当遇到已沉积的土粒，若两者的相互吸引力大于其重力，则土粒将停留在两者的接触点上形成一种蜂窝状结构 [图 1.5 (b)]。粒径较小的土颗粒（粒径约小于 0.005mm ）则因其在悬浮液中颗粒间排斥力和吸引力的不平衡，将产生两种情况：若颗粒间的排斥力远大于吸引力，则土颗粒在悬浮液处于分散状态；若排斥力小至一定程度，则土颗粒相互聚集，形成絮凝结构 [图 1.5 (c)]。粘土颗粒的堆积方式多为絮凝结构。由于土的固结作用，絮凝结构会变成部分定向结构或完全定向结构，称为分散结构 [图 1.5 (d)]。

土的分类是研究土质学、土力学、土动力学基础理论的一部分，目的是将各类自然土按其力学特性和工程应用中的共性划分类别，便于应用。

土的分类方法有多种，有普通分类与专门分类两大类。例如：砂土按其粒径、密度的分类，黄土按其湿陷性指标分类，粘土按其压缩性指标、塑性指数分类等都属于专门分类。结合某一建筑

工程、或水利工程，或道路工程的设计规范中土的分类也属于专门分类。而对自然界的各种土进行统一分类称为普通分类。各国都有自己的分类法。一般地，土分为有机土和无机土。有机土分为有机质土和泥炭两种；无机土则种类较多，分粗粒土与细粒土。细粒土又分为粉土、粘土和含砂砾细粒土；粗粒土又分为砾石土和砂土，还可以再细分等等。此外，还有把特殊性质的土（例如黄土、红粘土等）专门列出来等分类方法。

第二章 土动力特性

§ 2.1 土动力特性的测试方法

如前所述，土受动力作用的情况多种多样，例如：机器运动引起土的振动的振幅和强烈地震引起土的振动的振幅相差可能很大，土的应变可相差3~4个数量级。因而土动力特性的测试方法应适应这种情况。土的动力分析所需的特性参数应包括动弹性模量，动剪切模量，动屈服极限，动阻尼比与衰减系数以及其他一些表征土动力特性的参数。

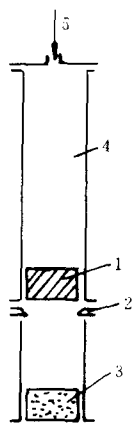


图 2.1 绝热冲击试验装置示意图

土动力特性的测试方法分为实验室方法和野外现场测试方法两大类。实验室测试方法有多种，下面介绍一种绝热冲击试验。图 2.1 是这种实验的简图。图中 1 为活塞；2 为制动装置；3 为土试

样（土样直径可为 90mm，长可为 50~100mm）；4 为圆筒；5 为冲击压力。由于冲击压力作用的时间很短，故可认为试验过程是一个绝热过程。此时，压力作用的时间可达 $1 \sim 1.2 \times 10^{-3}$ s。此外，实验室测试方法还有共振柱试验，动三轴剪切试验等。

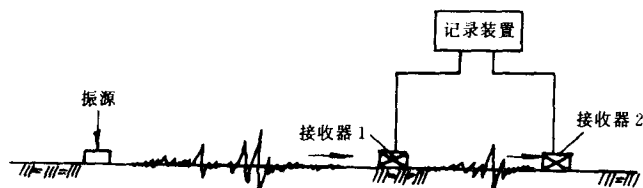


图 2.2 表面波谱分析法野外测试示意图

野外现场测试方法是利用应力波的传播理论观测弹性波的传播速度，计算土的动力变形特性参数。可以采用表面波波谱分析法（图 2.2），即利用谱分析对测点 1 和测点 2 接收到的时域信号进行分析，将时域变化转换为频域变化，然后进行谱分析，可得互功率谱。从而可得两测点在各种频率成分时的相位差。若任一频率 f 的相位差为 φ ，则振源与一点 x 间表面波 (Rayleigh 波) 传播的时间 $t = x/c_R$ ，此处 c_R 为表面波速。若振源为一正弦扰动，则地表的位移 $u(t)$ 也可以认为是正弦型的，即

$$u(t) = u_0 \sin \omega t \quad (2.1)$$

于是振源以远处的竖向位移为

$$u(t) = A \sin(\omega t - \varphi) = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c_R} \right) = A \sin \left(\omega t - \frac{2\pi f x}{c_R} \right)$$

由相角 $\varphi = 2\pi$ 可得

$$\varphi = \frac{2\pi f x}{c_R} \quad (2.2)$$

此处 f 为测点处的振动频率。上式 (2.2) 可改写为

$$c_R = f L_R$$

其中 L_R 为表面波的波长。

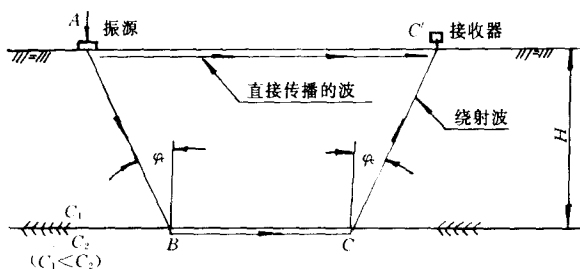
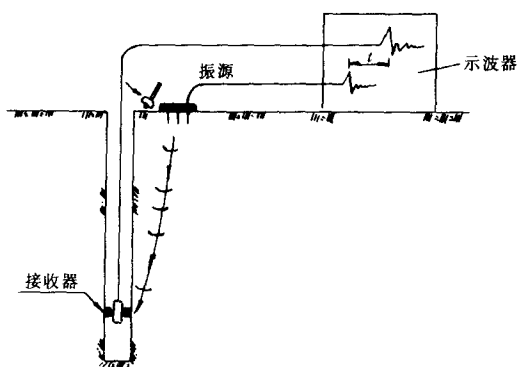
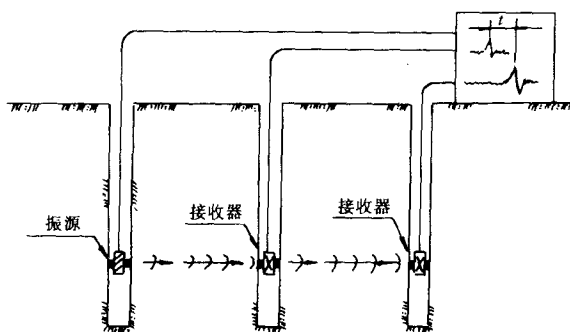


图 2.3 反射波的传播路径



(a)



(b)

图 2.4 钻孔测定法示意图