

普通高等教育“十三五”规划教材
土木工程类系列教材

土动力学基本原理

Fundamentals of Soil Dynamics

刘 洋 编著



清华大学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

土木工程类系列教材

土动力学基本原理

Fundamentals of Soil Dynamics

刘 洋 编著

贵州师范学院内部使用

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书由编者结合十余年的教学实践,参阅大量文献编写而成。书中介绍土动力学的基本原理,重点讨论土的波动规律和三相耦合动力特性。全书共 11 章,主要包括五个方面的内容:土中动荷载基本特性、土的波动问题、土的基本动力特性、土体动力反应分析和土的动力测试与试验技术。本书的一个显著特点是在注重内容系统性和完整性的同时,重点介绍土动力学的基本原理以及土的基本动力特性;另一个特点是为了帮助读者理解一些较抽象的概念和理论,给出了详细的推导过程和程序代码。此外,在介绍土动力学经典理论的同时,书中也增加了一些新的研究思路和成果。

本书可作为高等院校土木工程类有关专业的研究生、高年级本科生教材,也可供从事土动力学、岩土地震工程等方面工作的研究人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

土动力学基本原理/刘洋编著. —北京:清华大学出版社,2019.10
普通高等教育“十三五”规划教材. 土木工程类系列教材
ISBN 978-7-302-53846-2

I. ①土… II. ①刘… III. ①土动力学—高等学校—教材 IV. ①TU435

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 209025 号

责任编辑:秦 娜 赵从棉
封面设计:陈国熙
责任校对:赵丽敏
责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:21.75

字 数:525千字

版 次:2019年10月第1版

印 次:2019年10月第1次印刷

定 价:59.00元

产品编号:068670-01

土动力学是土力学一个重要的分支学科,是研究各种动力荷载作用下土的变形和强度特性以及土体动力稳定性的一门科学。

土动力学的研究内容十分丰富,涉及振动和波动力学、地震力学、土力学、弹塑性力学、数学物理方法、数值分析方法和动力测试技术等多个学科和多种方法。随着社会经济的发展,动力荷载引起工程建设中的新问题给土动力学的研究不断注入新的活力,其研究内容也延伸到与土的动力特性密切相关的岩土地震工程、海洋岩土工程和交通岩土工程等领域,同时提出了新问题、新挑战,也有越来越多的年轻学者和研究生投身到土动力学方面的研究中来。

对于初涉此领域的研究人员和选修此课程的研究生而言,土动力学的研究需要一定的理论基础,也有一定的难度。因此,编者的初衷是希望通过编写一本系统、简洁、容易理解并可供研究生使用的教材,内容以讲解土动力学的基本原理为主,使读者通过学习能够掌握土动力学的基本概念和原理,建立分析土动力学的基本方法和科学思维方式。诚然,要编写这样一本教材是非常困难的,好在编者一直在高校为研究生讲授土动力学课程,本书的讲义作为教学参考书已在十余届研究生中使用,有了一定的实践基础。而历届选修本课程研究生的宝贵意见和建议,也进一步促成了本书的出版。

鉴于此,本书内容体现了两个特点,一是在注重系统性和完整性的同时,重在简明扼要地介绍土动力学的基本原理和土的基本动力特性;二是为了更好地让读者掌握土动力学中一些理论较强和不易理解的问题,如波的传播问题、土体地震反应分析问题等,笔者在书中对一些解析方法给出了详细的推导过程,并用 MATLAB 语言编写了大量程序,读者可以通过这些程序的调试运行,更深入地理解相关原理和理论。此外,在介绍土动力学经典理论的同时,书中也增加了一些新的研究思路和成果。

全书共 11 章,除第 1 章绪论部分介绍了土动力学的特点、发展历史和主要研究内容外,其余章节构成了五个部分的内容:第一部分介绍土动力学的基础知识和土中动荷载基本特性,包括土的基本力学性质(第 2 章)、振动与波动基础(第 3 章)和土体在典型动力荷载作用下的应力状态(第 4 章);第二部分介绍土的波动问题,包括固体中的弹性波(第 5 章)和饱和土体中的波(第 6 章),这部分是本书的重点内容之一;第三部分介绍土的三相耦合动力特性,包括土的动变形与动强度特性(第 7 章)、土的动应力-动应变关系(第 8 章)和饱和砂土液化问题(第 9 章),这部分是本书的核心内容;第四部分是土体动力反应分析,在第 10 章中讲解;第五部分是土的动力测试与试验技术,在第 11 章中讲解,本章内容可结合第三部分土的三相耦合动力特性相关内容一起学习。

上述五个方面的研究内容中,土中动荷载基本特性及其波动规律是分析土动力学问题的基础;土的三相耦合动力特性是分析土动力学问题的核心;土体的动力反应是土动力学问题的综合分析及应用;而土动力特性的测试与试验技术是验证上述土动力理论、原理的

必要手段,同时也是土动力学理论发展的有力推动工具。

限于篇幅,书中对于土动力学中的一些其他专门问题如动力机器基础、桩基动力测试、土-结构物相互作用和土体动力稳定性分析等问题则没有涉及。但在准确掌握了土动力的基本概念和基本原理后,理解上述专门问题的解决思路和方法并不难,详细的内容可以参考其他相关专著与文献。

本书的编写和出版得到了国家自然科学基金项目(50808016,51178044)的支持和资助,在此表示感谢。书稿完成之时正值北京的金秋十月,感谢刘葛、王肖肖、田睿华等研究生在排版、绘图等方面的辛苦付出。感谢清华大学出版社和编辑秦娜、赵从棉为本书出版所付出的辛勤劳动。此外,本书引用了国内外许多学者的研究成果和资料,特别是国内已经出版的土动力学教材和专著,在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中的缺点与错误之处在所难免,希望有关专家和读者批评指正。

刘 洋

2019年10月于北京

符 号 表

α	加速度,圆形空腔半径	E	弹性模量
A	杆的横截面积	E_0	动弹性模量最大值
B	孔压系数	E'	损失模量
c	波速,阻尼,黏聚力	E_c	体积压缩模量
c'	土的有效黏聚力	E_d	动弹性压缩模量
\hat{c}	等效阻尼	\bar{E}_r	土在一次应力循环开始时有效应力状态下的回弹模量
c_d	动黏聚力	E_s	土颗粒的弹性模量
c'_d	有效动黏聚力	f	工程频率
c_p	压缩波的传播速度	F	荷载
c_{p1}	P_1 波波速	F_0	荷载振幅
c_{p2}	P_2 波波速	F_D	阻尼力
c_r	临界阻尼系数	F_I	惯性力
c_R	瑞利波的传播速度	F_s	弹性恢复力,滑动面的稳定安全系数
c_s	剪切波的传播速度	g	重力加速度
c_{scr}	临界剪切波的传播速度	G	剪切模量,拉梅常数
C_b	土骨架的体积压缩系数	G_0	初始剪切模量
C_{Z0}	抗压刚度系数	G_d	动剪切模量
C_f	孔隙流体压缩系数	G_s	土粒比重
C_N	考虑上覆有效应力影响的修正系数	G_t	骨架曲线的切线模量
C_u	不均匀系数	H	硬化参量,Heaviside 单位阶跃函数
C	阻尼矩阵	i	水力梯度
d	直径	i_{cr}	临界水力梯度
d_{50}	平均粒径	I_L	液性指数
d_g	剪胀比	I_p	塑性指数
d_s	饱和土标准贯入点深度	j	渗透力
d_w	地下水位深度	J	极惯性矩,阻抗
$\overline{de^p}$	塑性八面体剪应变	J_1	第一应力不变量
de	应变增量	J_2	第二应力不变量
de^e	弹性应变增量	k	刚度系数,波数,渗透系数
de^p	塑性应变增量	\hat{k}	等效刚度
de_q	剪应变增量	K	体积模量,物态参数
de_v	体应变增量	\tilde{K}	复刚度
D	能量耗散率,土骨架竖直方向压缩模量	K_0	静止侧压力系数
D_{50}	平均粒径	K_c	静力固结应力比
D_r	砂土的相对密度	K_{cr}	破坏时的固结应力比
e	孔隙比,偏心距	K_f	孔隙流体的体积模量
e_{cr}	临界孔隙比	K_p	硬化模量,塑性模量
e_{max}	最大孔隙比	K_s	考虑上覆有效应力影响的修正系数
e_{min}	最小孔隙比	K	刚度矩阵
e_{ss}	稳态孔隙比		

- l 单位向量
 L 渗流路径
 m 质量
 m_v 土颗粒的体积压缩系数
 M 地震的震级
 \mathbf{M} 质量矩阵
 M_T 扭矩
 n 孔隙率
 N 标准贯入次数, 接触力, 循环荷载作用次数
 N_0 判别饱和土液化的标准贯入击数基准值
 $(N_1)_{60}$ 对应于上覆有效应力 100kPa 的修正标准贯入击数
 N_{50} 孔压比等于 50% 时的循环次数
 N_{cr} 临界标准贯入次数
 N'_{eq} 等效均匀应力循环次数
 N_L 循环加载周数
 OCR 超固结比
 p 孔隙水压力, 平均应力
 p' 有效平均应力
 p_0 大气压力
 p_c 黏粒含量百分比
 p_{cr} 达到极限平衡状态时土样的孔隙水压力
 p_f 非等向固结的孔压极限值
 P_H 最大水平扰力
 q 广义剪应力, 偏应力, 渗流量
 q' 有效偏应力
 q_c 最大循环应力
 q_{pk} 不排水单向峰值强度
 Q 渗流量
 R_v 反射系数
 s 拉普拉斯变换因子
 S 地基变形量
 S' 地基塑性变形量
 S_c 最终固结变形量
 S_{cr} 固结时间 t 时的沉降量
 S_e 地基弹性变形量
 S_{ij} 偏应力张量
 S_r 饱和度
 S_{us} 不排水稳态抗剪强度
 t 时间
 t_r 松弛时间
 T 周期
 T_v 透射系数, 时间因数
 u 位移, x 方向上的位移
 \dot{u} x 方向上的速度
 \ddot{u} x 方向上的加速度
 u_0 位移幅值
 u_{st} 静位移
 \mathbf{u} 位移向量
 $\dot{\mathbf{u}}$ 速度向量
 U 固体部分位移, 固结度
 \dot{U} 土颗粒运动速度
 v 渗流速度, 荷载移动速度, y 方向上的位移分量
 V_b 土骨架的体积
 V_w 水的体积变化
 w 竖向位移, 孔隙水相对于土骨架的位移
 W 能量, 流体部分位移
 \dot{W} 流体运动速度
 β 动力放大系数
 γ 剪应变, 土的天然重度
 γ' 土的浮重度
 γ_{av} 平均动剪应变
 γ_c 循环剪应变
 γ_{cr} 临界剪应变
 γ_d 干重度, 动剪应变, 剪应力折减系数
 γ_{d0} 动剪应变幅值
 γ_r 参考剪应变
 γ_{sat} 土的饱和重度
 γ_t 极限剪应变
 γ_w 水的重度
 δ_{ij} 克罗内克符号
 $\Delta p'$ 有效应力增量
 Δp_e ΔT 时段发展的应力孔压增量
 Δp_c ΔT 时段发展的结构孔压增量
 Δt 时间步长
 Δu_T ΔT 时段发展的传递孔压增量
 ΔV_b 土骨架体积变化量
 ΔV_w 水体积变化量
 ϵ 应变, 初相位角
 ϵ_{re} 残余应变
 ϵ^e 弹性应变
 ϵ^p 塑性应变
 ϵ_a 轴向应变
 ϵ_d 动正应变
 ϵ_{ij} 土骨架应变
 ϵ_q 广义剪应变
 ϵ_r 参考线应变
 ϵ_v 体应变
 ϵ_θ 切向应变

ζ	阻尼比	σ_f	破坏强度
η	滞变阻尼参数, 能量损失系数	σ_h	水平正应力
θ	荷载频率, 应力洛德角	σ'_h	水平有效应力
θ_0	特征频率	σ_m	平均主应力
λ	波长, 拉梅常数	σ'_m	平均有效固结主应力
λ_d	等效阻尼比	σ_r	径向应力, 侧向压力
λ_{dmax}	最大等效阻尼比	σ_{tp}	瞬态破坏荷载的峰值应力
λ_R	瑞利波的波长	σ_v	竖向正应力
μ	泊松比, 滑动摩擦系数	σ'_v	竖向有效应力
ξ	流体相对膨胀比	σ_x	x 方向上的正应力, 水平方向上的正应力
ξ'	有效侧压力系数	σ'_x	水平法向有效应力
ρ	质量密度	σ_y	y 方向上的正应力
ρ'	有效密度	σ_z	z 方向上的正应力
ρ_d	干密度	σ'_z	垂直法向有效应力
ρ_l	孔隙水密度	σ_θ	切向应力
ρ_s	土颗粒密度	τ	剪应力
ρ_{sat}	饱和密度	τ_0	剪应力幅值
σ	正应力	τ_{av}	等效循环剪应力
σ'	有效应力	τ_d	动剪应力
σ_0	应力幅值	τ_{d0}	滞回圈上的最大剪应力
σ_1	第一主应力, 大主应力	τ_{dmax}	骨干曲线上的最大剪应力
σ_2	第二主应力, 中间主应力	τ_f	剪切强度
σ_3	第三主应力, 小主应力	τ_{max}	最大剪应力
σ_n	轴向总应力	φ	土的内摩擦角, 胀缩势函数
σ'_n	轴向有效应力	φ'	有效内摩擦角
σ_c	固结围压	φ_d	动内摩擦角
σ'_c	有效围压	φ'_d	动力有效内摩擦角
σ_{ed}	动弹性应力	φ_c	滑动摩擦角
σ_{cd}	动黏性应力	ψ	剪胀角, 相位角, 旋转势函数, 能量损失系数
σ_d	动正应力	ω	圆频率, 土的含水量
σ_{d0}	动应力幅值	ω_d	考虑阻尼的自振频率, $\omega_d = \omega \sqrt{1 - \zeta^2}$
σ_{df}	破坏应力	ω_L	液限
σ_{dh}	水平动正应力	ω_p	塑限
σ_{dv}	竖向动正应力	∇^2	拉普拉斯算子

第 1 章 绪论	1
1.1 动力问题与静力问题的区别	1
1.1.1 小应变的不可忽略性	1
1.1.2 动荷载的循环效应与速率效应	2
1.2 土的动力特性	3
1.3 土动力学的主要研究内容	5
1.4 土动力学的发展历史	6
1.5 本书的主要内容	7
参考文献	8
第 2 章 土的基本力学性质	9
2.1 概述	9
2.2 土的三相性	10
2.2.1 土中的固体颗粒	10
2.2.2 土中的流体和气体	10
2.2.3 土-水-化学系统相互作用	11
2.2.4 土的物理性质及状态	11
2.3 土的渗透性	12
2.3.1 渗流的驱动力	12
2.3.2 达西定律	13
2.3.3 渗透破坏	14
2.4 有效应力原理	14
2.4.1 太沙基有效应力原理	14
2.4.2 土颗粒的粒间应力	15
2.5 土的压缩与剪切变形	16
2.5.1 压缩变形	17
2.5.2 剪切变形	17
2.6 土的剪胀性	18
2.6.1 剪胀机理	18
2.6.2 Taylor 剪胀角与应力-剪胀方程	19
2.6.3 Rowe 应力-剪胀方程	20
2.7 饱和土的固结性质	21

2.8	土的临界状态	23
2.8.1	土临界状态的试验表现	23
2.8.2	正常固结线与临界状态线	24
2.8.3	临界状态的物理意义	24
2.9	土的应力-应变关系特性	25
2.9.1	非线性	25
2.9.2	压硬性	26
2.9.3	弹塑性	26
2.9.4	结构性	26
2.9.5	各向异性	27
2.9.6	流变性	27
2.9.7	应力历史和应力路径的依赖性	27
	参考文献	28
第3章	振动与波动基础	30
3.1	概述	30
3.1.1	振动的概念	30
3.1.2	波动的概念	31
3.2	单自由度体系的振动	32
3.2.1	自由振动与受迫振动	32
3.2.2	单自由度体系的振动方程	32
3.2.3	单自由度体系的自由振动	34
3.2.4	单自由度体系的受迫振动	35
3.3	多自由度体系的振动	39
3.3.1	两自由度体系的振动方程	39
3.3.2	多自由度体系的振动方程	40
3.4	滞变阻尼	41
3.5	时域和频域分析	43
3.5.1	振型叠加法	43
3.5.2	逐步积分法	43
3.5.3	Fourier 变换法简介	44
	参考文献	45
第4章	土体在典型动力荷载作用下的应力状态	46
4.1	概述	46
4.2	地震荷载作用下的土体应力状态	47
4.2.1	地震荷载	47
4.2.2	压缩波在半无限场地中产生的应力	47
4.2.3	剪切波在半无限场地中产生的应力	49

4.2.4	二维条件下的应力状态	50
4.3	交通荷载	51
4.3.1	交通荷载作用下的应力路径	51
4.3.2	交通荷载作用下土体中的应力分布	53
4.4	波浪荷载	54
4.4.1	波浪荷载作用下的应力特点	54
4.4.2	旋转剪切问题	56
	参考文献	57
第 5 章	固体中的弹性波	59
5.1	概述	59
5.2	一维弹性杆件中的波	59
5.2.1	一维波动方程的建立	59
5.2.2	行波法	61
5.2.3	拉普拉斯变换法	63
5.2.4	分离变量法	65
5.2.5	数值解法	67
5.2.6	一维弹性波的反射与透射	70
5.3	无限弹性介质中的波	72
5.3.1	无限弹性体中的三维波动方程	72
5.3.2	无限弹性体中波的类型	75
5.3.3	球面波	77
5.3.4	柱面波	80
5.4	半无限弹性介质中的波	85
5.4.1	半无限弹性介质中的平面波特性与分解	85
5.4.2	平面波的反射	87
5.4.3	瑞利波及其性质	90
5.4.4	成层介质中乐夫波	95
5.4.5	侧限条件下的半无限弹性介质中的波	95
5.5	表面移动荷载在半无限弹性平面中产生的波	98
5.5.1	移动波作用于半空间表面的解析解	98
5.5.2	移动条形荷载作用于半空间表面的解析解	101
	参考文献	103
第 6 章	饱和土体中的波	104
6.1	概述	104
6.2	Biot 理论	104
6.2.1	基本假设	105
6.2.2	Biot 理论控制方程	105

6.2.3	饱和土中的弹性体波	106
6.3	一维饱和土柱中的波	110
6.3.1	问题模型	110
6.3.2	控制方程	110
6.3.3	$u-w$ 形式的全耦合解	111
6.3.4	$u-p$ 形式的解	115
6.3.5	全耦合解与 $u-p$ 解的对比	115
6.4	多孔介质中的一维平面波	115
6.4.1	基本控制方程	116
6.4.2	两种特殊情况下的解	118
6.4.3	波动方程的数值解法	120
	参考文献	122
第7章	土的动变形与动强度特性	124
7.1	概述	124
7.1.1	动荷载作用下的土体平衡与失稳	124
7.1.2	土的动变形、动强度与动孔压	125
7.2	土的动变形特性	125
7.2.1	土的残余变形与波动变形	125
7.2.2	砂土的残余变形特征	125
7.2.3	黏性土的残余变形特征	126
7.3	土的动强度特征	127
7.3.1	典型荷载作用下土的动强度	127
7.3.2	动荷载的速率效应与循环效应	129
7.3.3	土的动力破坏标准与破坏曲线	131
7.4	黏性土的动强度	134
7.4.1	瞬态荷载作用下黏性土的动强度特性	135
7.4.2	循环荷载作用下黏性土的动强度特性	136
7.4.3	不规则荷载作用下黏性土的动强度特性	138
7.4.4	静荷载和动荷载综合作用下的强度特性	140
7.4.5	黏性土的破坏准则	141
7.4.6	黏性土动强度的影响因素	143
7.5	砂土的动强度与振动液化	145
	参考文献	145
第8章	土的动应力-动应变关系	148
8.1	概述	148
8.1.1	土的动应力-动应变关系的基本特点	148
8.1.2	土的动应力-动应变关系的描述方法	149

8.2	基本力学模型	157
8.3	黏弹性线性模型	160
8.4	黏弹性非线性模型	162
8.4.1	等效线性理论	162
8.4.2	双线性模型	166
8.4.3	Ramberg-Osgood 模型	167
8.4.4	Hardin-Drnevich 模型	168
8.4.5	M-F-S 模型	169
8.5	弹塑性模型	170
8.5.1	弹塑性理论	170
8.5.2	卸荷引起的塑性变形	173
8.5.3	界面模型	175
8.5.4	临界状态模型	179
8.6	土的动孔压模型	183
8.6.1	动孔压的概念及影响因素	183
8.6.2	砂土的动孔压模型	184
8.6.3	黏性土的动孔压模型	195
	参考文献	197
第 9 章	饱和砂土液化问题	199
9.1	概述	199
9.2	液化的相关概念	200
9.2.1	孔隙水压力	200
9.2.2	剪缩土与剪胀土	200
9.2.3	初始液化、流滑与循环活动性	201
9.3	饱和砂土的液化机理	202
9.3.1	砂沸	202
9.3.2	流滑	203
9.3.3	循环活动性	207
9.3.4	液化机理研究的新进展	208
9.4	砂土液化的影响因素	211
9.4.1	土性条件的影响	212
9.4.2	初始应力条件的影响	214
9.4.3	预剪切的影响	214
9.4.4	动荷载条件的影响	215
9.4.5	排水条件的影响	216
9.5	饱和砂土液化性能评价与分析	217
9.5.1	临界标准贯入击数法	217
9.5.2	循环应力法(Seed 简化法)	219

9.5.3	剪切波速法	224
9.5.4	稳态强度法	225
9.6	可液化场地地基处理	227
	参考文献	229
第 10 章	土体动力反应分析	233
10.1	概述	233
10.2	一般计算方法	235
10.2.1	土体动力分析一般思路	235
10.2.2	有限元方程的建立	235
10.2.3	有限元方程的解法	237
10.3	总应力分析法	242
10.3.1	简化的 Seed 法(一维总应力法)	242
10.3.2	二维总应力法	242
10.3.3	三维总应力方法	244
10.4	有效应力分析法	244
10.4.1	不排水有效应力分析	245
10.4.2	排水有效应力分析	246
10.5	弹塑性方法	250
10.5.1	基于边界面模型的弹塑性动力分析	250
10.5.2	基于 P-Z-C 模型的弹塑性分析	251
10.6	水平土层地震反应分析简化方法	253
10.6.1	均匀土层的剪切梁法	253
10.6.2	分层土层的频域分析法	257
10.6.3	分层土层中的集中质量法	259
	参考文献	260
第 11 章	土动力特性的试验测试	262
11.1	概述	262
11.2	制样、激振与测量系统	262
11.2.1	制样系统	262
11.2.2	激振系统	264
11.2.3	测量系统	266
11.3	动三轴试验	268
11.3.1	试验类型	268
11.3.2	试验条件	270
11.3.3	试验方法	271
11.3.4	试验成果及应用	272
11.4	动单剪试验	276

11.4.1	基本概念	276
11.4.2	试验仪器	277
11.4.3	试验成果	277
11.5	扭剪试验	278
11.6	共振柱试验	280
11.7	试样的波速测试	284
11.7.1	超声波法	284
11.7.2	弯曲元法	285
11.8	振动台试验	286
11.9	离心模型试验	286
11.10	原位动力测试	288
11.10.1	波速试验	288
11.10.2	循环荷载板试验	295
	参考文献	296
附录 1	地震荷载作用下循环应力路径	298
附录 2	交通荷载作用下循环应力路径	301
附录 3	波浪荷载作用下循环应力路径	303
附录 4	特征线求解一维波动问题	305
附录 5	差分法求解波在一维桩中的传播	307
附录 6	杆件分界面处透射波与反射波的波速变化	310
附录 7	杆件分界面处透射波与反射波的应力变化	312
附录 8	一维饱和土柱全耦合解	314
附录 9	一维饱和土柱 $u-p$ 解	317
附录 10	冲击荷载作用下多孔介质的孔隙水压力	320
附录 11	剪切梁法的数值解法	322
附录 12	剪切梁法的解析解法	324
	中英文名词对照表	326

土动力学是土力学的一个重要分支,是研究各种动荷载作用下土的变形和强度特性及土体动力稳定性的一门科学。动荷载主要包括爆炸荷载等脉冲型荷载,地震荷载等有限次、无规律的随机型荷载,以及波浪、交通与机器振动荷载等长期循环微幅动荷载。土动力学是设计具有良好抗震性能的地基基础和结构物,预测及控制动力荷载作用下土体变形的重要工具,其理论基础和研究水平直接关系到土工动力分析及设计的水平和质量。

1.1 动力问题与静力问题的区别

土体在动力荷载的作用下会产生各种力学响应问题。由于土体性质本身存在差异以及加载条件的不同,在动力学中很难对这些问题用一个明确的标准进行合理区分,于是,考虑动力问题和静力问题的差异,就成为对动力问题的特点进行综合分析行之有效的方法。

与静力问题相似,土的孔隙比、所承受的围压、含水量等因素会影响土的力学特性。另外,土的应力历史、应变水平、温度等也对土的力学行为有重要影响。而与静力条件不同的是,土在动荷载条件下的运动形式有振动和波动,因此为了探究土的动力特性,应当对土的振动和波动现象进行分析。

1.1.1 小应变的不可忽略性

应变考虑范围的不同是区分土体动力问题和静力问题的重要方面之一。在经典土力学中,静力问题的研究重点是土体的抗破坏能力和稳定性。通常需要计算土的有效强度,并将其与土中附加应力进行比较,进而评价土体稳定性。在考虑土体强度的同时,还需要考虑土体的变形问题,例如与地基沉降相关的固结问题,这是经典土力学中的一个重要研究课题。

上述强度和变形这两个问题实际上都是土体在大变形条件下的性质。一般来说,土体在数量级为百分之几的应变水平下会发生破坏。但在实际工程中,除非发生了失稳破坏,否则观测到的土体应变水平通常只有千分之几。因此对于静力问题,并不十分关注土体在小应变水平下的特性。

但与静力荷载不同的是,在动力问题中,土的运动状态是重要的研究对象,惯性力的作用显然不能忽略。土体每次发生变形的时间间隔越短,惯性力起到的作用就越明显。比如在简谐运动中,惯性力大小与变形循环频率的平方成正比。因此,即使应变水平很小,惯性力也可以随着运动速度的增加而显著变大,在土动力学中需要对小应变水平(例如 10^{-6})的土体动力特性进行考虑。而在静力问题分析中,这种级别的应变其影响是可以完全忽略的。

这是区分动力问题和静力问题的重要方面之一。

1.1.2 动荷载的循环效应与速率效应

如前所述,研究土的动力特性时,应当对土的振动和波动现象进行分析,此时主要考虑两种效应的影响:速度效应和循环效应。下面对这两种效应分别进行介绍。

1. 动荷载的循环加载特性

在动力问题中,荷载往往是重复施加的。因此,循环加载也是动力问题的一个重要标志。如图 1-1 所示,由爆炸等产生的冲击荷载可用快速施加的单一脉冲表示,脉冲或冲击荷载的持续作用时间通常在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ s 之间。对于地震荷载来说,尽管其在时程上不具有明显的规律性,但是通常认为,地震期间的振动主要包括 10~20 次不同振幅的循环荷载,且每个脉冲的周期基本在 0.1~3.0s 之间。在打桩、振动压实等情况下,需要以 10~60Hz 的频率对土施加 100~1000 次的荷载。上述这类荷载主要与振动或波的传播有关。而另一类循环荷载,如交通荷载和波浪荷载,它们作用的特点与上述荷载有所不同。铁路或公路下的路基在其使用寿命期间承受大量的重复载荷,这类荷载尽管强度不高,但由于多次施加,其累积效应会对路基稳定性产生影响,造成一种“疲劳效应”。

所有这些在循环荷载作用下的土体特性被称为土的循环加载效应。

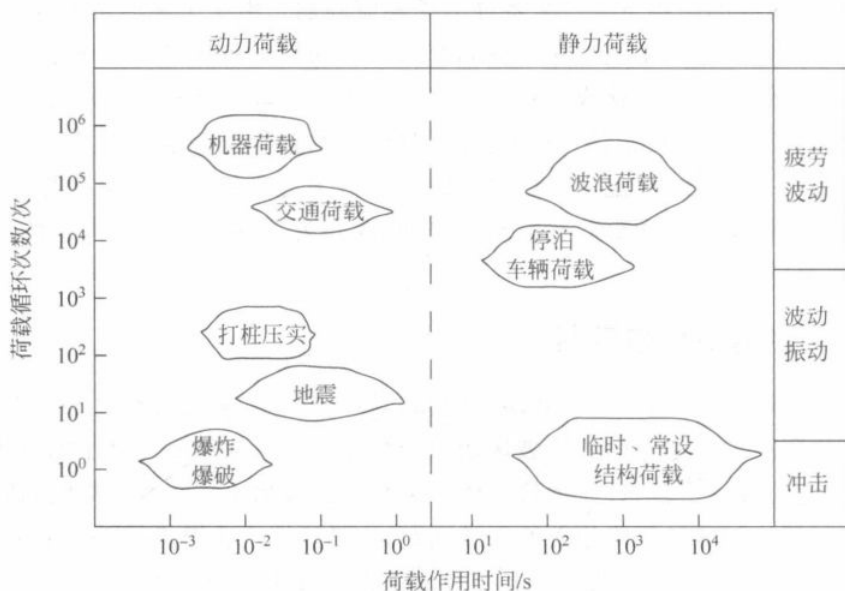


图 1-1 动荷载的分类

2. 动荷载的加载速度效应

较短周期或较高频率的振动或波动,一般对应着较短的加载时间。加载时间可以定义为土体达到一定的应力和应变水平所需要的时间,如果荷载作用的时间超过数十秒,则这样的问题通常可按静力问题分析,而荷载作用时间较短的问题则被认为是动力问题。荷载施加时间的长短可以用加载速度或应变速率来表示,其对土体产生的影响统称为速度效应或