



土动力学

Soil Dynamics

谢定义 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

SOIL DYNAMICS



DONGLIXUE

土动力学

Soil Dynamics

谢定义 编著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书研究各种动荷载作用下土的变形、强度特性和土体的变形、强度稳定性,包括土材料的动力特性和土体的动力稳定性两大方面的问题。本书共10章,包括土动力学理论和试验基础、土的动力特性规律、土体的地震反应分析和土体的地震稳定性分析等几大部分。本书不仅保持了编著者1988年版《土动力学》(西安交通大学出版社出版)的系统性、完整性、简明性等特点,而且着重注意了先进性、启发性和实用性,汲取了大量新的思路与成果,扩充了知识的深度和广度。

本书可作为土木工程类有关专业研究生、高年级本科生以及岩土工程界从事土动力学工作与研究人员的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土动力学/谢定义编著.—北京:高等教育出版社,2011.5
ISBN 978-7-04-031495-3

I. ①土… II. ①谢… 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(2011)第042690号

策划编辑 刘剑波 责任编辑 焦建虹 封面设计 李卫青 责任绘图 尹莉
版式设计 王莹 责任校对 杨雪莲 责任印制 朱学忠

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社址	北京市西城区德外大街4号	网址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印刷	涿州市星河印刷有限公司	网上订购	http://www.landrace.com
开本	787×1092 1/16		http://www.landrace.com.cn
印张	37	版次	2011年5月第1版
字数	630 000	印次	2011年5月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定价	69.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 31495-00

前 言

自从本书编著者在 1988 年编著出版了我国第一本土动力学的专著《土动力学》(西安交通大学出版社出版)以来,国内先后出版了几本以“土动力学”命名的书籍,从不同的角度阐述了土动力学的主要内容。本书考虑到研究生和有关人员学习土动力学基础知识的需要,不仅注意了保持系统性、完整性、简明性,而且着重注意了先进性、启发性和实用性,注意了从已经相当浩瀚的文献资料中汲取大量新思路和新成果,并选择了较多的参考文献供有实际需要的读者参考,以继续扩充自己知识的深度和广度。

本书分为 10 章,主要包括了四大部分:土动力学理论和试验基础(绪论,土与土体中的动荷载,土的动力特性测试,共 3 章),土的动力特性规律(土的动强度、动变形与动孔压特性,土的振动液化特性,土的动应力-动应变关系,共 3 章),土体的地震反应分析(土体地震反应的地震反应谱分析法,土体地震反应的动力时程分析法,土体地震反应的总应力、有效应力分析法,共 3 章),以及土体的地震稳定性分析(共 1 章)。由于篇幅限制,对一些土动力学的专题(土体上的动力机器基础,土体中的波动理论及其在岩土工程中的应用,土体中桩基动测的理论与技术)从略。

在第一部分中,第 1 章绪论,介绍土动力学研究的基本课题、主要动荷载的基本特性、土动力学的发展和本书的基本框架。第 2 章土与土体中的动荷载,在介绍动荷载的基本特性之后,着重从振动和波动两个方面讨论动荷载变化和传播的基本理论,以及这些理论应用于土介质时的特点和处置方法。第 3 章土的动力特性测试,介绍土动力特性测试的基本内容,并从土动力特性测试的设备的成样系统、激振系统和量测系统诸方面介绍它们的主要类型、有效方法和各自的优缺点;进而针对室内试验方法重点讨论最常用和最基础的动三轴试验和共振柱试验;针对现场试验方法重点讨论最常用和最基础的波速试验和波动试验,包括有关的原理、方法、成果整理分析与存在的问题。

在第二部分中,第 4 章土的动强度、动变形与动孔压特性,介绍影响土动力特性的各种因素和有关土动力特性的主要成果,以及在现代研究中有关土动力特性的基本结论和广阔的思考面。第 5 章土的振动

液化特性,专门介绍土动力学研究和应用中最为活跃的饱和砂土振动液化问题,包括与它有关的各种影响因素和对它进行科学分析的各种思路、认识、评判方法和研究途径,以及工程应用涉及的液化危害性和增强土体、建筑物抗液化稳定性的途径。第6章土的动应力-动应变关系,介绍将各种力学模型与土的动应力-动应变间试验关系进行对比、拟合与抽象描述的基本方法,选择等效粘弹性线性模型这种有实用基础的模型作为重点分析、讨论的对象,同时对有应用前景的 Iwan 模型、Martin-Finn-Seed 模型和弹塑性模型等也作基础性的介绍。最后,简要涉及研究中其他一些新的思路,强调当前继续研究动本构模型的必要性。

在第三部分中,第7章土体地震反应的地震反应谱分析法,介绍以单质点系为基础的地震反应谱和设计反应谱的基本概念,并将它们与土体或结构简化而成的多质点系相联系,结合多质点系的固有特性(振型的正交性与线性无关性)讨论多质点系动力特性的反应谱分析法。第8章土体地震反应的动力时程分析法,介绍以实际动力时程为基础的、土体动力分析的真正动力法,包括剪切层法、剪切梁法、集中质量法、振型叠加法和有限单元法等的基本概念、逐步积分方法和其他有效的求解方法。第9章土体地震反应的总应力、有效应力分析法,在考虑地震动力特性、结构动力特性的基础上,着重考虑土体材料的动力特性,分别介绍总应力法、简化的有效应力法和真正的有效应力法(动力固结法)。

在第四部分,即第10章土体的地震稳定性分析中,在回顾地震反应谱分析法、动力时程分析法(包括总应力、有效应力的时程分析法),并简要讨论它们在土体地震稳定性分析中的应用后,对于以土体刚塑性假定为基础确定地基地震承载力、挡土墙的地震土压力、土坡的抗震稳定性等强度稳定问题方面常用的拟静力分析法作系统介绍,又从变形稳定性方面讨论地基和挡土墙的位移,以及土坡的 Newmark 地震滑动位移分析法、Makdisi-Seed 的图表简化计算法和 Seed-Lee-Idriss 的动应变势法等拟静力分析法,强调有限单元法在解决土体地震变形和强度稳定性分析问题上的重要作用。

本书以编著者多年从事土动力学教学、科研工作的资料积累和实践体会为基础,在编写过程中,国内外有关专家文献资料和论著给了编著者很多帮助,得到了不断的启发和材料补充。西安理工大学岩土工程研究所及其同仁和研究生们也在多方面给予了支持与帮助。在此,编者对它们深表谢意。自然,在对问题的分析介绍中,由于受到编著者水平、资料

接触范围、工程实践经验等方面的限制,不足甚至错误之处在所难免,希望有关专家和读者能够给予及时指正。

编著者
2011年5月

符 号 表

- a 振幅
- a_i 地震加速度系数
- B 轴心荷载时基础的宽度
- \mathbf{B} 应变矩阵
- B' 偏心受荷载时基础的等效宽度
- \mathbf{C} 总阻尼矩阵, $\mathbf{C} = \sum \mathbf{C}_e$.
- \mathbf{C}_e 单元阻尼矩阵
- C_r 考虑现场条件与室内动三轴试验条件之间差别的一个应力校正系数
- CPT 锥式贯入试验
- CRR 循环阻抗应力比 (Cyclic Resistance Ratio), 抗液化剪应力比
- CSL 临界状态线 (Critical State Line)
- c 阻尼系数、粘聚力
- c_{cr} 临界阻尼系数
- c_d 动粘聚力
- c'_d 有效动粘聚力
- c_p, v_p P 波的波速
- c_R, v_R R 波的波速
- c_s, v_s S 波的波速
- c_u 不均匀系数
- \mathbf{D} 弹性矩阵
- D_r 相对密度
- d_q, d_r, d_c 超载、体力及粘聚力的承载力埋深修正系数
- d_{50} 平均粒径
- E_d 动压缩模量
- E_{vs} 等效的体积模量
- \bar{E}_r 回弹模量
- e 孔隙比
- e_{cr} 临界孔隙比

- F_s 安全系数
 $F_{s,d}$ 地震作用情况下的安全系数
 FC 细粒含量
 f 频率
 G^* 复合剪切模量
 \bar{G} 剪切模量 G_i 的加权平均值
 G_d 动剪切模量
 G_h 和 G_v 水平向和竖向的剪切模量
 G_s 剪切弹性模量
 G_0 初始动剪切模量
 G_1 复合剪切模量的弹性部分
 G_2 复合剪切模量的粘性部分
 g_q, g_r, g_c 超载、体力及粘聚力的承载力地面倾斜修正系数
 H_s 砂层埋深
 H_w 地下水埋深
 h_{eq} 用 $\frac{1}{2\pi}$ × 滞回圈面积表示的滞回阻尼
 I 转动体系的惯性矩、液化危害性指数
 i 水平地震力作用时的地震偏角
 i' 水平地震力与垂直地震力作用时的地震偏角, $i' = \arctan \frac{k_h}{1 \pm k_v}$
 i_q, i_r, i_c 超载、体力及粘聚力的承载力荷载倾斜修正系数
 $J_0(x)$ 零阶贝塞尔函数
 $J_1(x)$ 一阶贝塞尔函数
 K 频率 ω 与剪切波波速 v 之比、破损参数、阻尼比退化系数、物态参数、记忆参数
 \mathbf{K} 总刚度矩阵, $\mathbf{K} = \sum_e \mathbf{K}_e$
 K_c 固结应力比, $K_c = \sigma_{1c} / \sigma_{3c}$
 K_d 和 K_s 动刚度和静刚度
 K_E 动力条件时的土压力系数
 K_{Ea} 动力主动土压力系数
 $K_{Ea}(\beta+i)$ 墙背倾角 $(\beta+i)$ 、填土面坡角 $(\alpha+i)$ 时由静力状态确定的库仑主动土压力系数
 K_{Ep} 动力被动土压力系数

- $K_{E_p}(\beta-l)$ 墙背倾角($\beta-l$)、填土面坡角($\alpha-l$)时由静力状态确定的库仑被动土压力系数
- K_{E_0} 非屈服刚性墙上动土压力
- K_e 单元刚度矩阵
- K_p 硬化模量
- K_s 静力条件时的土压力系数、地震系数
- K_y 屈服加速度
- K_α 地面倾斜的修正系数
- k 弹簧系数、渗透系数
- k_h, k_v 水平地震系数和垂直地震系数
- $k_{h_{eq}}(t)$ 等价地震系数
- k_{PP}, k_{PS} 同类波的透射系数和转换波的透射系数
- k_σ 上覆压力的修正系数
- L波 勒夫波
- L_R 瑞利波的波长
- LPT 大型贯入试验
- M 地震的震级,动力放大系数、隔振系数
- M 总质量矩阵, $M = \sum_e M_e$
- M_e 单元质量矩阵
- M_{Q_j} 滑弧各条块水平地震惯性力 Q 对滑弧中心的力矩
- M_{D1} 水平向脉冲作用时承载力的力矩
- M_{D2} 水平向脉冲作用时动水平力的力矩
- M_{dp} 竖向脉冲作用时干扰力 p_i 的力矩
- M_{R1} 水平向脉冲作用时滑楔摩阻力的力矩
- M_{R2} 水平向脉冲作用时滑楔凝聚力的力矩
- M_{R3} 水平向脉冲作用时滑楔重力的力矩
- M_{R4} 水平向脉冲作用时滑楔土体重心位移阻力的力矩
- M_{R5} 水平向脉冲作用时滑体惯性力的力矩
- M_{rs} 竖向脉冲作用时滑楔惯性力的力矩
- M_{rs} 竖向脉冲作用时土阻力 p_s 的力矩
- $M_{r\omega}$ 竖向脉冲作用时滑楔重心位移阻力的力矩
- m 振动体系的质量
- N 动力循环次数,振次
- $[N]$ 结点坐标的函数或形状函数

- \bar{N} 地震的等效循环数
- N'_{aq} 、 N'_{ar} 、 N'_{ac} 超载、体力及粘聚力的动土压力因数
- N_{cr} 砂层埋深和地下水埋深修正后的液化临界标准贯入击数
- \bar{N}_{cr} 基本情况下的液化临界标准贯入击数
- N_f 破坏开始时的应力循环数
- N_L 液化振次
- N_q 、 N_r 、 N_c 超载、体力及粘聚力的承载力因数
- N_1 对应于 $\sigma'_v = 1 \text{ kg/m}^2$ 时的换算标准贯入击数
- N_{60} 标准贯入试验时落锤机构的理论能量有 60% 传到钻杆上使钻杆贯入土中时的击数
- n 裂隙深度与挡土墙高度之比
- OCR 超固结比
- P 消散过程任意时刻的固结残余孔压
- P_c 作用在坝坡临水段上由水平地震引起的动水压力
- P_{Ea} 总的动力主动土压力
- P_{LD} 惯性作用产生的土压力分量
- P_{EQ} 附加荷载产生的土压力分量
- P_{ES} 有效重量产生的土压力分量
- P_e 单元的结点力
- P_{ev} 体力引起的等效结点力
- $P_{e\phi}$ 面力引起的等效结点力
- $P(t)$ 干扰力
- $P(t)_{ve}$ 单元体上的体力对结点的贡献,或称体力的有效结点力
- P 波 拉压波、纵波
- P_1 波 孔隙水纵波
- P_2 波、S 波 骨架纵波、骨架横波
- P_3 波 气体 P 波
- p_a 大气压力
- p_c 粘粒含量
- p_g 振动作用所引起的孔压
- Q 作用在滑弧条块重心处的水平向地震惯性力
- Q' 作用在滑弧条块重心处的竖向地震惯性力
- q_c 比贯入阻力
- q_{ci} 归一化的比贯入阻力

- q_{PP} 、 q_{PS} 同类波的反射系数和转换波的反射系数
 q_x 、 q_y x 、 y 方向孔隙水的流速
 q_0 填土表面作用的分布超载
 R 非弹性阻力系数
 R_{L20} 20次应力循环发生破坏时的剪应力比
 $\mathbf{R}(t)$ 结点的荷载向量
 R 波 瑞利波
 r_j 振型参与系数
 r_p 地震动水压力与 P_0 滑弧中心的距离
 \mathbf{S} 应力矩阵, $\mathbf{S} = \mathbf{DB}$
 $S_e \cap S_o$ Ω_e 的边界 S_e 与弹性体面力边界 S_o 重合的部分
 S_i 测量数据的均方差
 S_q 、 S_r 、 S_c 超载、体力及粘聚力的承载力形状修正系数
 S_r 饱和度
 SPT 标准贯入试验
 SSL 稳态剪切强度线 (Steady-state Strength Line)
 S 波 剪切波、横波
 T 周期
 T_n 挡土墙与填土系统的自然周期, $T_n = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}}$
 t 时间
 $\tan\varphi_d$ 动内摩擦系数
 $\tan\varphi'_d$ 有效动内摩擦系数
 U_w 稳定渗流情况下滑弧条块底面中点处的孔隙水压力
 u 、 v 、 w x 、 y 、 z 轴方向的位移分量
 u_d 动孔隙水压力、地震作用下滑弧条块底面中点处的附加孔隙水压力
 $\frac{u_d}{\sigma'_0}$ 动孔压比
 $\mathbf{u}(t)$ 单元内任一点的位移向量
 $\mathbf{u}(t)_e$ 单元结点的位移向量
 $\bar{\mathbf{u}}(t)_e$ 单元体结点的任意虚位移
 \ddot{u}_{gx} 、 \ddot{u}_{gy} 地震在 x 、 y 方向的加速度分量
 $\ddot{u}_g(t)$ 地震运动的加速度

- v_{s1} 归一化剪切波波速
 VICL 起始均压固结线 (Virgin Isotropic Consolidation Line)
 W 一个应力循环内作用的总能量
 ΔW 一个应力循环内损耗的能量
 $\overline{W}(z)$ 液化危害性与深度有关的权函数。
 W_E 土楔体重量的转换重量, $W_E = W\sqrt{(1-k_v)^2 + k_h^2}$
 W_1 滑弧条块在坝坡外水位以上部分的实际重量
 W_2 滑弧条块在坝坡外水位以下部分的有效重量
 w 含水量
 X, Y x, y 方向的单位体力
 x 质点运动的位移
 \dot{x} 质点运动的速度
 \ddot{x} 质点运动的加速度
 \bar{x}_i 测量数据的均值
 $x(t)$ t 时刻的位移
 $\dot{x}(t)$ t 时刻的速度
 $\ddot{x}(t)$ t 时刻的加速度
 Z_y 挡土墙的屈服位移
 $Z_1 = A_1 \rho_1 c_1, Z_2 = A_2 \rho_2 c_2$ 入射波与反射波的广义阻抗 (截面积 \times 质量密度 \times 纵波波速)

 α 挡土墙后填土滑裂面方向角
 α_{\max} 地震的最大地面运动加速度
 $\beta_j(t)$ 具有自振频率 ω_j 和阻尼比 λ 的单质点系在地面加速度 $\ddot{x}_0(t)$ 影响下的动力系数
 γ_{cr} 液化临界剪应变
 γ_d 干重度, 地震最大剪应力沿深度的减小系数
 γ_r 参考应变, $\gamma_r = \frac{\tau_j}{G_0}$
 γ_w 水的重度
 Δ_a, Δ_p 挡土墙达到主动和被动极限状态条件所要求的位移量
 δ 挡土墙与填土间的摩擦角, 单元体内任一点的位移
 δ_0 单元体结点的位移

- ε 初相位角、挡土墙背的倾斜角
 ε_d 动应变
 ε_{ii} 法向应变
 $\varepsilon_{ij}、\gamma$ 剪切应变
 ε_s^e 弹性偏应变
 ε_s^p 塑性偏应变
 ε_v^e 弹性体应变
 ε_v^p 塑性体应变
 $\varepsilon(t)$ 单元体内任一点的应变向量
 η 动粘滞系数,挡土墙与填土的刚度比,桩的贯入系数
 $\eta_p、\eta_s$ P波的衰减系数和S波的衰减系数
 Θ 体积胀缩或体变
 θ 扭转的角位移
 θ_1 和 θ_2 与 x 轴和 y 轴的夹角
 λ 阻尼比、波长
 $\lambda、G$ 二阶拉梅常量
 λ_{max} 最大阻尼比
 λ_1 门槛剪应变
 $\lambda_1、\lambda_2、\lambda_3$ 超载、体力及粘聚力的动土压力因数 N' 值与静土压力对
 应因数 N 值之比
 μ 泊松比
 ξ 应变路径长度
 ρ 质量密度
 $\bar{\rho}$ 质量密度 ρ_i 的加权平均值
 ρ_d 干密度
 σ_d 动应力
 σ_f 破坏强度
 σ_{ii} 法向应力
 $\sigma_{ij}、\tau$ 剪应力
 σ_r 侧向压力
 σ'_v 竖向有效应力
 $\sigma'_x、\sigma'_y$ $x、y$ 方向的有效应力
 $\sigma_{1c}、\sigma_{3c}$ 轴向固结应力、侧向固结应力
 $\sigma(t)$ 单元体内任一点的应力向量

- $\bar{\tau}_e$ 地震的等效剪应力
 τ_L 液化剪应力
 τ_y 最大动剪应力、屈服剪应力
 τ_0 初始剪应力
 ν_{hh} 水平方向应力引起水平方向应变的泊松比
 ν_{hv} 水平方向的应力引起竖直方向应变的泊松比
 ν_{vh} 竖直方向应力引起水平方向应变的泊松比
 ϕ 应力-应变相位角
 φ'_{mob} 、 δ_{mob} 不同的墙位移 Δ 值对应的填土内摩擦角发挥角、墙土间摩擦角发挥角
 ψ 能量损失系数、地基动容许承载力的调整系数
 Ω_e 单元的体积
 ω 自由振动的频率、圆频率
 ω_0 衰减振动的频率

∇^2 拉普拉斯算子, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 土动力学及其研究的基本课题	1
1.2 主要动荷载及其基本特性	2
1.3 土动力学的发展	5
1.4 《土动力学》的基本框架	8
1.5 小结	9
参考文献	11
第 2 章 土与土体中的动荷载	12
2.1 概述	12
2.2 土与土体中动荷载的基本特性	13
2.2.1 振动与波动的特性	13
2.2.2 土工抗震中振动与波动的联系	13
2.2.3 土地震反应分析中实用的振动与波动	14
2.3 振动的基本规律	17
2.3.1 概述	17
2.3.2 自由振动与强迫振动	19
2.3.3 扭转振动	24
2.3.4 多个自由度体系的振动	25
2.3.5 振动体系的衰减与阻尼	27
2.4 波动的基本规律	30
2.4.1 概述	30
2.4.2 无限弹性介质中的波动	31
2.4.3 半无限弹性介质中的波动	41
2.4.4 有界弹性介质中的波动	49
2.5 土介质中的波动	53
2.5.1 概述	53
2.5.2 成层介质中的波动	53
2.5.3 非完全弹性介质中的波动	57
2.5.4 多孔、多相介质中的波动	65
2.5.5 土介质中波动研究的处理方法	72

2.6	土体减、隔振的理论与措施	72
2.6.1	概述	72
2.6.2	减振的理论与措施	73
2.6.3	隔振的理论与措施	76
2.7	小结	78
	参考文献	83
第3章	土的动力特性测试	85
3.1	概述	85
3.2	土动力特性室内测试的设备系统	86
3.2.1	土动力特性测试的成样系统	86
3.2.2	土动力特性测试的激振系统	89
3.2.3	土动力特性测试的量测系统	95
3.2.4	土动力特性测试的设备与装置	101
3.3	土动力特性的室内试验方法	102
3.3.1	动三轴试验	102
3.3.2	共振柱试验	114
3.4	土动力特性的现场试验方法	129
3.4.1	现场波速试验	129
3.4.2	现场波动试验	132
3.5	小结	135
	参考文献	138
第4章	土的动力特性规律(一)	
	——动强度、动变形与动孔压特性	141
4.1	概述	141
4.1.1	土动力特性变化的三个阶段	141
4.1.2	土的动变形、动强度、动孔压与液化	142
4.2	土的动强度特性	143
4.2.1	动荷载作用的速率效应与循环效应	143
4.2.2	动强度的破坏标准与动强度曲线	146
4.2.3	动强度的总应力参数与有效应力参数	148
4.3	土的动变形特性	150
4.3.1	残余变形与波动变形	150
4.3.2	土的振密变形与动力蠕变变形	150
4.3.3	动变形与静荷载、动荷载、增湿变化之间不同路径的关系	152
4.4	土的动孔压特性	153

4.4.1	动孔压的应力模型	153
4.4.2	动孔压的应变模型	159
4.4.3	动孔压的能量模型	167
4.4.4	动孔压的有效应力路径模型	168
4.4.5	动孔压的内时模型	173
4.5	小结	177
	参考文献	179
第5章	土的动力特性规律(二)	
	——振动液化特性	183
5.1	概述	183
5.1.1	饱和砂土的振动液化	183
5.1.2	液化与孔隙水压力	184
5.1.3	流动液化与循环液化	185
5.1.4	剪缩性土与剪胀性土	185
5.1.5	流动结构与稳态线	186
5.2	影响土振动液化的主要因素	188
5.2.1	土性条件	188
5.2.2	初始应力条件	189
5.2.3	动荷载条件	189
5.2.4	排水条件	193
5.3	饱和砂土液化可能性的评判	195
5.3.1	临界孔隙比法	196
5.3.2	振动稳定密度法	197
5.3.3	临界标准贯入击数法	197
5.3.4	标准爆破沉降量法	200
5.3.5	抗液化剪应力法	203
5.3.6	岩崎敏男的液化安全系数法	213
5.3.7	循环应变法	215
5.3.8	剪切波波速法	217
5.3.9	Seed-Idriss-Arango 法	218
5.3.10	综合指标法	227
5.3.11	统计法	230
5.3.12	静力触探法	237
5.3.13	稳态强度法	238
5.4	轻亚粘土液化可能性的评判	240