

研究生教学用书

高等土力学

Advanced Soil Mechanics

谢定义 姚仰平 党发宁



高等教育出版社

GRADUATE

研究生教学用书

高等土力学

Advanced Soil Mechanics

谢定义 姚仰平 党发宁



高等教育出版社

内容简介

本书以对土力学学科发展与土力学基础知识间联系纽带的分析为背景,瞄准发展该学科和解决实际复杂问题的需要,立足于理论与实际的前沿发展和在更高层次上和更大范围内的紧密结合,使普通土力学既有知识体系能够进一步得到加深、加宽与系统化。本书共计 16 章,包括土材料和土体两大部分。第一部分以土材料基本特性的有关理论为中心,内容有:绪论,土的物质结构理论,土的应力、应变理论,土的强度理论,土的变形、本构理论,土的渗透理论,土的固结、流变理论和土的强化理论等 8 章;第二部分以土体变形、强度等稳定性分析的理论和方法为中心,内容有:土体的渗流问题,土体的固结问题,土体的松散介质极限平衡问题,土体的楔体极限平衡问题,土体的极限分析问题,土体的抗震问题,土体的数值分析问题和土体的加固处理问题等 8 章。

本书可作为土木建筑工程类专业研究生的教材,也可供相关专业大学本科高年级学生和工程技术人员在学习及工作时参考。

图书在版编目(CIP)数据

高等土力学 / 谢定义,姚仰平,党发宁. —北京:
高等教育出版社,2008. 1
ISBN 978 - 7 - 04 - 023068 - 0

I. 高… II. ①谢…②姚…③党… III. 土力学 -
研究生 - 教材 IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 182256 号

策划编辑 刘剑波 责任编辑 刘剑波 封面设计 李卫青
版式设计 史新薇 责任校对 杨凤玲 责任印制 宋克学

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010 - 58581000

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 高等教育出版社印刷厂

网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787 × 960 1/16
印 张 33.75
字 数 560 000

版 次 2008 年 1 月第 1 版
印 次 2008 年 1 月第 1 次印刷
定 价 56.00 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 23068 - 00

前 言

高等土力学是岩土工程学科研究生的一门十分重要的课程。本书的编者在多年对该课程的教学实践中积累了较为丰富的经验,也在相当程度上形成了自己的特色。这些特色,除了完整的体系之外,在每一个章节的内容和重点等方面也有许多新的、富有启发性的思路和认识,并且注意到作为教材的简明性、准确性、启发性和全面性。在提供必需基础知识的前提下,为读者进一步开发思路、深化和扩展知识做出相关的引导。本书的编者们希望读者能够主动地注意到这一点,以便收到良好的学习效果。

本书由西安理工大学谢定义教授主编,内容包括了土材料与土体两大部分。对于土材料,以其基本特性理论为中心,包括绪论,土的物质结构理论,土的应力、应变理论,土的强度理论,土的变形、本构理论,土的渗透理论,土的固结、流变理论和土的强化理论等8章;对于土体,以其变形、强度等稳定性分析的理论和方法为中心,包括土体的渗流问题,土体的固结问题,土体的松散介质极限平衡问题,土体的楔体极限平衡问题,土体的极限分析问题,土体的抗震问题,土体的数值分析问题和土体的加固处理问题等8章。全书共计16章。其中,第5章(土的变形、本构理论)主要由北京航空航天大学姚仰平教授成稿;第15章(土体的数值分析问题)主要由西安理工大学党发宁教授成稿;其他章节由谢定义教授成稿,姚仰平教授和党发宁教授也对这些章节进行了认真的工作,提出过很多宝贵的意见、补充和建议,为本书的进一步完善做出了积极的贡献。

在本书即将问世的时候,本书的编者们衷心地感谢西安理工大学多年来为本书的实践和完成所提供的良好教学环境与支持,感谢历届研究生们曾经为本书在内容上提出的意见和建议,感谢西安理工大学研究生在打印初稿和北京航空航天大学研究生在绘制插图等方面做出的劳动;也感谢西安理工大学李宁教授、邵生俊教授、郭增玉教授、胡再强教授、刘奉银副教授等在诸多方面对本书的支持与帮助。

最后,本书的编者们认为,高等土力学既然是以对土力学学科发展的历史考察与趋势预测以及它们与基础土力学知识联系纽带的分析作为背景,以理论土力学、试验土力学、应用土力学与计算土力学这些土力学学科发展的四大支柱在高度概括、合理选择基础上的综合为基础,它就应该

注意到所讨论问题的基本前提条件,考虑问题的基本思路,简单的历史概述,最基本的概念、理论和方法,带有方向性的发展趋势以及需要进一步解决的问题与主要参考文献等诸多方面,动态地处理好从丰富成果中的选材问题,并用“立足于当前水平,着眼于未来发展”的思想,不断地做出调整和更新。本书的编者们希望能够看到这方面的新成果,也希望能够听到关于本书的批评与建议。

编 者
2007年7月

符 号 表

A	硬化函数或塑性系数
\bar{A}	偏应力的孔隙压力系数
B	球应力的孔隙压力系数
b	中主应力参数
$b_k (k=\gamma, q, c)$	基底面倾斜修正系数
$[B]$	应变矩阵
C	土介质的瞬时阻尼力(C_x, C_y, C_z)
C_s, C_t	土骨架和孔隙流体的体积压缩系数
C_{v1}	单向渗流固结系数
C_{v2}	二维渗流固结系数
C_{v3}	三维渗流固结系数
C_z	综合影响系数
c	黏聚力
$c'/F_s, \tan\varphi/F_s$	土的折减抗剪强度
$[C]^e$	单元的阻尼矩阵
D	切线模量矩阵
$D=J\gamma_w$	渗透力
D_a	扩散系数
D_a^*	空气流动的传导系数
D_i^*	土孔隙中气相流动的传导系数(Fick 定理)
D_{ijkl}^*	非饱和土的本构张量
$d_k (k=\gamma, q, c)$	基础埋深修正系数
$d\epsilon^e$	弹性应变增量
$d\epsilon^p$	塑性应变增量
$[D_e]$	弹性刚度矩阵
$[D_{ep}]$	弹塑性刚度矩阵
$[D_{et}]$	弹性矩阵

$[D_p]$	塑性矩阵
E	弹性压缩模量
E	土条侧边界上的土骨架间的有效作用力
E_d	压缩弹性模量
E_i	初始模量
E_{ij}	Green 应变张量
\dot{E}_{ij}	Green 应变率
$E(t)$	松弛模量
e_{ij}	Almansi 应变张量
\dot{e}_{ij}	Almansi 应变率
F_L	土的液化安全系数
F_v	分条界面上(长度为 z)的抗滑安全系数
$f=0$	屈服函数
f_c	压缩的屈服面
f_p	剪切的屈服面
$\{\bar{F}\}_{t+\Delta t}^e$	$t+\Delta t$ 时刻的单元等效动力荷载列阵
G	剪切模量
\mathbf{G}	基岩瞬时地震加速度(G_x, G_y, G_z)
G	井阻因子;土条侧边界上的作用力
G_d	剪切弹性模量
G_t	切线剪切模量
G_0	最大动剪切模量
$g=0$	塑性势函数
\mathbf{g}	重力加速度(g_x, g_y, g_z)
g_c	压缩的塑性势面
$g_k (k=\gamma, q, c)$	地面倾斜修正系数
g_p	剪切的塑性势面
H	硬软化参量
$H(t)$	阶跃函数

I	液化指数
I_B	脆性指标
$I_{r,cr}$	基土在剪切时有压缩和无压缩的界限刚度指标
I_{rr}	修正刚度指标
I_1, I_2, I_3	应力球张量的第一不变量、第二不变量、第三不变量
I'_1, I'_2, I'_3	球应变的应变不变量
$i_k (k = \gamma, q, c)$	荷载倾斜修正系数
J	水力梯度
J_1, J_2, J_3	应力偏量的第一不变量、第二不变量、第三不变量
J'_1, J'_2, J'_3	偏应变的应变不变量
$J(t)$	蠕变柔量
K	体积模量
\mathbf{K}	土介质的渗透系数矩阵
K_H	水平地震系数
K_t	切线体变模量
K_V	垂直地震系数
k_a	渗气系数
$\frac{k_a}{\rho_{ma} g}$	气的传递系数
$\frac{k_a}{\rho_{ma} g / v_a} = K_a$	固有渗气系数
k_d	土空气全干燥情况下的渗气系数
k_s	完全饱和情况下的渗水系数
k_T, k_w, k_s	土骨架、液相水及固相土颗粒的体积弹性模量
k_w	含水量 w 时土孔隙中水相的渗水系数(Darcy 定理)
k_w	渗水系数
$k_w / \rho_w g$	水的传递系数
$\frac{k_w}{\rho_{mw} g / v_w} = K_w$	固有渗水系数
$k_{垂直}$	垂直层面方向的平均渗透系数
$k_{平行}$	平行层面方向的平均渗透系数
$k(t - \tau)$	蠕变核
$[K]^e$	单元的刚度矩阵

$[\bar{K}]^e = [K]^e + a_1[C]^e + a_0[M]^e$	单元等效动力刚度矩阵
L	线性小变形微分算子
m	单位算子(1,1,1,0,0,0)
$[M]^e$	质量矩阵
N_c, N_q, N_γ	承载量因数
n	土的孔隙率;土介质的孔隙率
p	孔隙水压力
P_a	主动土压力
P_p	被动土压力
p_u	极限荷载的竖向分量
p_u^+	上限解
p_u^-	下限解
Q	塑性势函数;土介质固、液相的综合压缩性系数
Q, g	塑性势面
q	填土表面超荷载
$q\Delta x$	土条坡面垂直荷载
R	通用气体常数,等于 8.314 32 J/(mol · K)
R	土条底滑面上的有效反力
RH	相对湿度
Re	Reynold 数
R_f	破坏比
r_u	孔压比,等于 $u/(\gamma h)$
$R(t-\tau)$	松弛核
$\{r\}^e$	结点位移向量
S	拉氏变量;应力水平
$S(\infty)$	最终沉降
s_{ij}	应力张量

\dot{S}_{ij}	Kirchhoff 应力率(物质速率)
S_{lm}	Kirchhoff 应力张量
s'_{ij}	应力偏张量
s''_{ij}	应力球张量
$s_k (k=\gamma, q, c)$	基础形状修正系数
T	绝对温数
T	土介质的瞬时体积力(X, Y, Z)
T_{ij}	Eular 应力张量
$T_v = C_{v1}t/H^2$	时间因数
U	土条侧边界上的水压力
U_s	土条底滑面上的孔隙水压力
$U(t)$	固结度
$\bar{U}(t)$	平均固结度
u	瞬时孔隙水应力
u_a	孔隙气压力
$(u_a - u_w)$	基质吸力
u_w	孔隙水压力
u^*	等效孔隙压力
$\bar{u}(t)$	孔压的平均值
\hat{u}	试函数
V	水的动黏滞系数
V	土骨架的瞬时位移(V_x, V_y, V_z)
V_{ij}	变形率张量
V_0	初始的土体积
v	比容
$v_{s,cr}$	液化剪切波速
v_{wi}, v_{ai}	孔隙水、孔隙气的流动速度
W	液相水的瞬时平均渗透速度(W_x, W_y, W_z)
W_i, W_b	内部权函数和边界权函数
\dot{W}	能量耗散率

w^p	塑性功
w_a	气体的分子质量
w_L	液限
w_p	塑限
w_s	缩限
$z_0 = \frac{2c}{r \sqrt{K_a}}$	开裂深度
α	水平地震加速分布系数
β	填土表面的倾角
β_w	液体的体积压缩系数
γ	墙后填土的重度
γ_{cr}	液化剪应变
γ_r	参考应变
$\bar{\gamma}$	广义剪应变
ΔQ	土条的水平地震力
ΔR	土条底滑面上的反力
ΔW	土条的重力
$\Delta \lambda$	塑性因子
$\{\delta\}_{t+\Delta t}^e$	$t+\Delta t$ 时刻的单元结点位移列阵
ε	土介质的瞬时应变 ($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$)
ε_c	孔压增量引起的固相颗粒压缩应变
$\varepsilon_\pi, \gamma_\pi$	π 平面上的正应变和剪应变
ε_i^e	瞬时弹性应变
ε_i^p	瞬时塑性应变
ε_v^e	后效的弹性应变
ε_v^p	黏塑性应变
ε_{vt}^p	黏性流动应变
ε_0	热效应等引起的初始应变
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	主应变

ε_8, γ_8 { ε }	八面体面上的正应变和剪应变 应变的列阵
$\zeta_k (k = \gamma, q, c)$	基土压缩修正系数
θ_{\max} θ_σ $\theta_\varepsilon, \gamma_\varepsilon$	最大倾斜角 应力的 Lode 角 应变的 Lode 角和应变的 Lode 参数
λ λ_{\max}	Lame 常数 最大阻尼比
μ μ_σ	Poisson 比 应力的 Lode 参数
ρ_w, ρ_a ρ_w	孔隙水和孔隙气的质量密度 水的密度
\sum_{ki} σ ($\sigma - u_a$) $\sigma_{\text{SMP}}, \tau_{\text{SMP}}$ σ_c $\sigma_{\text{oct}}, \tau_{\text{oct}} (\sigma_8, \tau_8)$ σ_t $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ σ_π, τ_π σ' $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ($\sigma_1 - \sigma_3$) _f ($\sigma_1 - \sigma_3$) _{ult} { σ }	Lagrange 应力张量 瞬时总应力 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$) 净总应力 SMP 面上的法向应力与剪应力 压缩极限强度 八面体面的正应力和剪应力 拉伸极限强度 正应力分量 π 平面的正应力和剪应力 瞬时有效力 ($\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$) 主应力 破坏剪应力 极限剪应力 应力的列阵
$\tau_{f, \text{PSC}}, \tau_{f, \text{PSE}}$ $\tau_{f, \text{TC}}, \tau_{f, \text{TE}}$	平面应变试验测得的主动压缩强度和主动挤伸强度 三轴试验测得的主动压缩强度和主动挤伸强度

τ_{fs}	吸附强度
$\tau_{l\bar{N}}$	抗液化剪应力
τ_u	极限荷载的切向分量
$\tau_{xy} (= \tau_{yx}), \tau_{yz} (= \tau_{zy}),$ $\tau_{zx} (= \tau_{xz})$	剪应力分量
τ_y	最大动剪应力
τ_∞ 或 σ_∞	长期强度极限
$\dot{\tau}_{ij}$	Jauman 应力率
$\dot{\tau}_{ij}^{(T)}$	Truesdell 应力率
ϕ	加载屈服面
φ	内摩擦角
ϕ, f	屈服面
ϕ, ψ	渗流的势函数和流函数
ϕ_a, ϕ_w	孔隙中气体体积和水体积与总体积之比
ω	系统基频
∇	算子 $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)^T$

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 高等土力学的发展	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 20 世纪土力学发展中的重大事件	1
1.2 高等土力学的四大支柱	5
1.2.1 概述	5
1.2.2 理论土力学是土力学发展的龙头	5
1.2.3 试验土力学是土力学发展的基础	6
1.2.4 应用土力学是土力学发展的动力	7
1.2.5 计算土力学是土力学发展的经脉	8
1.3 高等土力学的基本框架体系	9
1.3.1 概述	9
1.3.2 高等土力学的基本框架体系	10
1.4 结论	12
参考文献	12
第 2 章 土的物质结构理论	14
2.1 概述	14
2.1.1 物质结构的变化是土性变化的内在依据	14
2.1.2 物质结构的状态是自然历史与环境条件综合影响的结果	14
2.1.3 物质结构组分的物质特性与相互作用是土性考察的主要对象	15
2.1.4 物质结构的总体特性是评价、利用与改造土的基础	15
2.2 土中固相的物质结构特性	16
2.2.1 固相的物质成分	16
2.2.2 固相的结构特征	19
2.2.3 固相的相对含量	21
2.2.4 固相的运动形式	22
2.3 土中液相的物质结构特性	22
2.3.1 液相的物质成分	22
2.3.2 液相的结构特征	23

2.3.3	液相的相对含量	25
2.3.4	液相的运动形式	26
2.4	土中气相的物质结构特性	30
2.4.1	气相的物质成分	30
2.4.2	气相的结构特征	30
2.4.3	气相的相对含量	31
2.4.4	气相的运动形式	32
2.5	土中固、液、气各相物质结构之间的相互作用特性	34
2.5.1	结构性理论	34
2.5.2	双电层理论	36
2.5.3	收缩膜理论	41
2.6	结论	43
	参考文献	45
第3章	土的应力、应变理论	46
3.1	概述	46
3.2	土的应力理论	48
3.2.1	土的应力状态	48
3.2.2	土的应力历史	61
3.2.3	土的应力路径	63
3.2.4	土的应力水平	67
3.2.5	土的应力类型	71
3.3	土的应变理论	77
3.3.1	应变张量	77
3.3.2	应变球张量与应变偏张量	78
3.3.3	主应变	78
3.3.4	应变的不变量	78
3.3.5	八面体面上的应变	79
3.3.6	π 平面上的应变	79
3.3.7	广义剪应变(应变强度)	79
3.3.8	应变 Lode 角与应变 Lode 参数	79
3.3.9	各类应变之间的关系	80
3.4	结论	80
	参考文献	81
第4章	土的强度理论	82
4.1	概述	82

4.2	土的强度准则	84
4.2.1	Mises 准则与广义 Mises 准则	86
4.2.2	Tresca 准则与广义 Tresca 准则	87
4.2.3	Mohr - Coulomb 准则	87
4.2.4	Zienkiewicz - Pande 准则	88
4.2.5	Lade - Duncan 准则	89
4.2.6	松冈-中井(SMP)准则	90
4.2.7	俞茂宏双剪准则	93
4.2.8	各强度准则之间的关系	93
4.3	土的强度参数	98
4.3.1	粒度对土强度参数的影响	99
4.3.2	密度对土强度参数的影响	100
4.3.3	湿度对土强度参数的影响	100
4.3.4	结构对土强度参数的影响	101
4.3.5	应力条件对土强度参数的影响	102
4.3.6	测试方法对土强度参数的影响	103
4.3.7	试样扰动对土强度参数的影响	104
4.3.8	环境条件对土强度参数的影响	104
4.3.9	时间对土强度参数的影响	105
4.3.10	其他条件对土强度参数的影响	105
4.4	结论	106
	参考文献	108
第 5 章	土的变形、本构理论	109
5.1	概述	109
5.1.1	土的变形特性	109
5.1.2	土变形特性力学模拟的途径	111
5.2	非线性弹性模型	111
5.2.1	概述	111
5.2.2	$E - \mu$ 型模型	113
5.2.3	$K - G$ 型模型	116
5.3	土的弹塑性模型	121
5.3.1	概述	121
5.3.2	弹塑性模型通析	122
5.3.3	土的弹塑性模型举例	130
5.4	结构性模型	161

5.5 结论	163
参考文献	165
第6章 土的渗透理论	167
6.1 概述	167
6.1.1 土的渗透梯度与渗透系数	167
6.1.2 土的渗透性函数	168
6.1.3 土的渗透稳定性参数	169
6.2 两相土中水的渗透问题	169
6.2.1 Darcy 定理的应用范围	170
6.2.2 土中水渗透的主要影响因素	170
6.2.3 土渗透系数的测试精度	171
6.2.4 土中的渗透力与渗透力的动力复活效应	172
6.3 三相土中水和气的渗透问题	172
6.3.1 土中孔隙水的渗透性函数	172
6.3.2 土中孔隙气的渗透性函数	175
6.3.3 土中气的过水扩散与水的化学扩散	175
6.4 渗水系数和渗气系数的测定	176
6.4.1 渗水系数的测定	176
6.4.2 渗气系数的测定	177
6.4.3 渗水系数和渗气系数的联合测定	178
6.5 结论	178
参考文献	179
第7章 土的固结、流变理论	180
7.1 土的固结理论	180
7.1.1 概述	180
7.1.2 饱和土的固结理论	180
7.1.3 非饱和土的固结理论	183
7.2 土的流变理论	185
7.2.1 概述	185
7.2.2 流变的基本力学特性与模拟理论	185
7.3 土的流变特性试验	190
7.3.1 土流变特性的试验方法	190
7.3.2 土流变的特性曲线与变化规律	192
7.4 线性流变模型理论的本构方程	196
7.4.1 线性流变的力学元件模型	196