



北京市高等教育精品教材立项项目

清华大学土木工程系列教材

Advanced soil mechanics

高等土力学

李广信 主编

Li Guangxin



清华大学出版社



北京市高等教育精品教材立项项目

清华大学土木工程系列教材

Advanced soil mechanics



高等土力学

李广信 主编

Li Guangxin



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系在国内最早开展土力学领域研究的学者们十几年的教学积累的基础上编写而成的,是目前国内内容比较全面的土力学教材。本书作为研究生教材,力图以更开阔的视角向读者全方位地展示土力学研究的领域,同时还介绍了近年来引起人们关注和争论的问题,此外还较全面地介绍了国内学者的研究成果,希望读者不仅仅能系统地学习和领会书中的内容与成果,而且能够了解和体会土力学学科研究的基本途径和方法,并逐步形成自己的研究理念和模式。

全书内容是在本科土力学教材的基础上的进一步延伸,共分七章,包括:土工试验与测试,土的本构关系,土的强度,土中水与土中渗流及其计算,土的压缩与固结,土工数值计算(包括土体稳定的极限平衡计算,土的渗流与固结的有限元计算)。各章均附有相应的习题、思考题或者计算程序。部分章节可以作为课外的参考内容。

本书被评为北京市精品教材,可作为土建、水利、铁道、交通、地质、冶金、农业、林业等有关专业的老师、硕士生等相关人员的教材和参考用书,同时还可作为对岩土工程有兴趣的相关专业的本科生、科研人员和工程技术人员的进修读物和参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

高等土力学/李广信主编. —北京:清华大学出版社,2004.7

(清华大学土木工程系列教材)

ISBN 7-302-08394-0

I. 高… II. 李… III. 土力学—高等学校—教材 IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 026642 号

出版者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:曹旭 汪亚丁

文稿编辑:汪亚丁

印装者:清华大学印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:203×253 印张:29 字数:708千字

版 次:2004年7月第1版 2004年7月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-08394-0/TU·222

印 数:1~3000

定 价:58.00元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:
(010)62770175-3103 或(010)62795704

前 言

与相对成熟和系统的土力学本科教材相比,多年来国内一直缺少比较系统的、适用于岩土工程专业研究生用的高等土力学教材。我国在20世纪70年代末开始恢复研究生制度,随后实行学位制,当时岩土工程的研究生数量很少,都是直接由老教授们面授,有时是“一生多师”,使学生们有幸亲聆老一代专家们讲授本学科的发展和前沿知识。80年代初,黄文熙先生预见到大量培养研究生的形势即将来临,同时他感到由于十年浩劫,国内的岩土工程专业人员对于国外的土力学发展相当生疏,亟需补课,于是,黄文熙先生带领他的弟子们遍读在此期间国外书刊发表的重要文献,针对学科中的几个主要课题,编写了《土的工程性质》一书。随后先生在北京举办过几期岩土工程讲座。在这个基础上,北京有关院所的一些岩土工程专家开始联合讲授高等土力学这门课,组织北京地区的岩土工程专业的研究生集中听讲。这种联合授课的形式持续了十多年,地点几经变动,内容也未完全成型,有时也是因人设题。就这样,这门课培养了许多岩土工程技术人员和专家。但逝者如斯,岁月无痕,十余年后,最初授课的专家们大多年事已高,有的已经离开了我们。这门课后来就固定在清华大学进行教授,主要是由清华大学的教授们授课。多年来,学生们一直希望有一本系统的、与讲课配套的教材,因此,本书就应运而生了,这本教材是在大家多年讲课内容的基础上编写的。其内容并不是本学科最新和前沿的发展,只是包含了比本科教材内容更深入一步的知识,适当地介绍了新的发展和成果,使研究生们对于土力学学科能有比较深入和全面的了解,为他们的选题打下一定的基础。由于本书各章编者都是相应领域的专家,在编写过程中,也收入了他们个人的研究成果,同时也特别注意介绍我国学者的代表性研究成果。另外,在各章后边附有一定数量的思考题、习题或计算程序。

全书共分7章,内容及其作者如下:第1章 土工试验及测试(李广信,清华大学,北京,100084);第2章 土的本构关系(李广信,清华大学;濮家骝,清华大学);第3章 土的强度(李广信);第4章 土中水与土中的渗流及其计算(王钊,武汉大学,武汉,430072,清华大学双聘教授;李广信);第5章 土的压缩与固结(王正宏,华北水利学院北京研究生部,北京,100044);第6章 土工数值计算(一):土体稳定的极限平衡和极限分析法(陈祖煜,中国水利科学研究院,北京,100044,清华大学兼职教授);第7章 土工数值计算(二):渗流、应力应变和固结的有限元方法(陈祖煜;陈立宏、李新强和王成华等也参加部分内容的编写)。其中第1章和第3章由濮家骝校阅;第5章由清华大学周景星和李广信校阅;第6章由李广信校阅;第7章由宋二祥校阅。另外,沈珠江和杨光华也校阅了部分章节。

笔者感谢参加本书编写和校阅的各位教授在繁忙的工作之余,以他们渊博的学识和严谨的作风为莘

II 高等土力学

莘学子们提供了这本宝贵的教材。另外也感谢参加本书的校阅、补充、打印和整理的我的学生们,他们是周晓杰、张其光、王成华、葛锦宏、余斌、刘早云、童朝霞、王海燕、高波等。

由于编者的水平所限,书中的谬误和不当之处在所难免,敬请读者不吝赐教。

李广信
2002年10月

符 号 表

A ——面积; 塑性硬化模量, 是硬化参数的函数	D_s ——土中空气流动传导常数
A, a ——孔压系数	$[D]_{ep}$ ——弹塑性模量矩阵
A_c ——土颗粒的接触面积	D_s^* ——空气传导系数
A_D ——截面上由于损伤断裂产生的孔隙面积	D_r ——相对密度
A_{ef} ——截面的有效受力面积	d ——颗粒尺寸
a, a_m ——加速度	$d\lambda$ ——塑性流动规则中参数
a ——基础尺寸; 土样在断裂切度试验中裂缝长度	d_{10} ——土的有效粒径
a_v ——压缩系数	
	E ——变形模量, 弹性模量; 变形能
B ——孔压系数; 体积变形模量	E_i ——初始变形模量
B, b ——宽度	E_s ——压缩模量
b ——毕肖甫(Bishop)常数	E_t ——切线变形模量
	e ——孔隙比
C ——孔隙流体的压缩系数	e_0 ——初始孔隙比
C_c ——压缩指数	e_{cr} ——砂土的临界孔隙比
C_e ——再压缩指数	e_{ij} ——偏应变张量
CSL——临界状态线	
C_s ——土骨架的压缩系数	F, F_s ——安全系数
C_v ——固结系数	f ——初始剪应力比
C^w ——水的压缩系数	$f(\sigma_{ij})$ ——屈服函数
C_{ijkl} ——本构模型中材料性质张量	$\{f_b\}$ ——单位体积力
C_u ——不均匀系数	
C_a ——次压缩系数	G ——剪切模量; 井阻因子; 条间作用力
c ——粘聚力; 孔压系数; 空气浓度	G_s ——土颗粒比重
c_c ——真粘聚力	G_t ——切线剪切模量
c'' ——非饱和土的粘聚力	g ——重力加速度
c_{cu} ——固结不排水试验粘聚力	$g(\sigma_{ij})$ ——塑性势函数
c_u ——不排水抗剪强度	
	H ——厚度; Hvorslov 面斜率
D, d ——基础埋深, 直径	H, h ——硬化参数
D ——损伤因子(损伤变量); 扰动因子	h ——测管水头高度; 亨利溶解系数
$[D]$ ——弹性模量矩阵	h_i ——水平地震力作用点与条底中点间距离

XII 高等土力学

- h_c ——毛细水上升高度
- I ——基础形状对沉降的影响系数；载荷试验确定变形模量的系数
- I_1, I_2, I_3 ——第一、二、三应力不变量
- I_l ——液性指数
- I_p ——塑性指数
- I_z ——应变影响因数
- i ——水力坡降
- i_{cr} ——临界水力坡降
- J ——总渗透力
- J_1, J_2, J_3 ——第一、二、三偏应力不变量
- J_a ——单位面积土空气质量流量
- j ——渗透力
- K ——体积变形模量；模量数
- $[K]$ ——刚度矩阵
- K_0 ——静止土压力系数
- K_{1c} ——I型(张开型)断裂韧度
- K_a ——主动土压力系数
- K_f ——破坏主应力线
- K_p ——被动土压力系数
- K_{ur} ——卸载、再加载模量数
- k ——渗透系数；波尔兹曼常数
- k_a ——土中空气渗透系数
- k_f ——强度参数
- k_w ——非饱和土中水的渗透系数
- L, l ——长度
- M ——以 q'/p' 表示的临界状态线斜率
- M_a ——气体的摩尔质量
- m ——质量, 体积变化系数
- m_v ——体积压缩系数
- N ——总法向压力
- $N, N_{63.5}$ ——动力触探贯入函数
- N_i ——形函数
- NCL——正常固结线
- n ——孔隙率；模型比尺或重力加速度水平；离子浓度；模量指数
- n_i —— s 面法线方向导数
- OCR——超固结比
- P ——力, 总压力
- p ——平均主应力；压力强度
- p' ——有效平均主应力
- p_0 ——自重下固结应力, 各向等压固结应力
- p_a ——大气压力, 主动土压力
- p_c ——先期固结压力
- p_{eq} ——拟似超固结土等效固结压力
- pF ——吸力指数
- p'_m ——最大固结压力
- p_p ——被动土压力
- p_s ——单桥静力触探的比贯入阻力
- Q ——非饱和土的压缩模量, 静力触探的总阻力, 流量
- Q_0 ——单井涌水量
- q ——广义剪应力；单位面积流量；单位面积(长度)上超载
- q_0, q_s ——双桥静力触探的比贯入阻力
- q_{ult} ——地基极限承载力
- R ——井的影响半径；通用(克分子)气体常数
- R, r ——半径, 径向长度
- Re ——雷诺数
- R_f ——破坏比
- r_w ——砂井半径
- S ——应力水平；井点降水深度；非饱和土的基质吸力
- S, S_T ——总沉降
- S_c ——固结沉降
- S_i ——瞬时沉降
- S_{ij} ——偏应力张量
- S_R ——沉降比
- S_r ——饱和度

- S_s ——加载系数
 S_t ——时间 t 时的沉降
 S_u ——土的不排水抗剪强度与 c_u 相同
 SL——回弹线
- T ——剪切力, 扭矩; 绝对温度
 T_i ——作用于表面上的边界力
 T_v ——时间因数
 t ——时间; 摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- U ——固结度
 u ——孔隙压力; x 方向位移
 u_a ——孔隙气压力
 u_i ——位移向量
 u^s ——土骨架在 x 方向的位移
 u_w ——孔隙水压力
- V ——体积
 $\{V\}$ ——水在土中孔隙中流速矢量
 V_a ——空气体积
 V_s ——固体体积
 V_w ——水的体积
 v ——比体积; y 方向的位移; 流速
 v^s ——土骨架在 y 方向位移
- W ——重量、重力
 W ——变形能密度函数
 W^e, W^p ——弹性变形能和塑性变形能
 W_c, W_p ——塑性功
 w ——土的含水量, 损伤比
 w_l ——液限含水量
 w_p ——塑限含水量
 w^s ——土骨架在 z 方向位移
- x —— x 方向距离
- y —— y 方向距离
- z —— z 方向距离, 深度
- z_0 ——张拉缝深度
- α ——角度; 平均孔隙水压力 \bar{u} 与试样底 u_b 之比
- β ——角度
- Γ ——当 $\sigma' = 1\text{kPa}$ 时 CSL 线在纵轴截距
 γ ——容重; 工程剪应变
 γ' ——浮容重
 γ_d ——干容重
 γ_s ——土颗粒容重
 γ_{sat} ——饱和容重
 γ_w ——水压 4°C 下容重
- δ ——很小增量, 位移
 δ_{ij} ——克罗纳克尔 δ (Kroneker delta)
- ϵ ——正应变
 $\bar{\epsilon}$ ——广义剪应变
 ϵ_a ——三轴试验中轴应变
 ϵ^e, ϵ^p ——弹性和塑性应变
 ϵ_i ——主应变
 ϵ_{ij} ——应变张量
 ϵ_v ——体应变
 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ ——在 x, y, z 方向正应变
- η ——动力粘滞系数; 水平地震系数, 最优化方法目标函数; 有效应力比 q'/p'
- θ ——角度; 应力洛德角
 θ, θ_s ——体积含水率及饱和时的体积含水率
- κ ——各向等压卸载—再加载斜率 ($v \ln p'$)
- λ ——正常固结及临界状态线斜率 ($v \ln p'$)
- μ ——摩擦系数
 μ_0, μ_1 ——考虑基础埋深及压缩层厚度的沉降修正系数
 μ_c ——考虑三向压缩效应的沉降修正系数

μ_0 ——应力洛德系数

ν, ν' ——泊松比 (Poisson's ratio)

ν_t ——切线泊松比

π ——泛函; 八面体平面

ρ ——密度, 电荷密度

ρ_a ——空气密度

ρ_d ——干密度

ρ_{sat} ——饱和密度

ρ_w ——水在 4°C 下的密度

σ, σ' ——总应力, 有效应力

$\{\sigma\}$ ——应力向量

$\bar{\sigma}$ ——应力莫尔圆圆心坐标, $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$

σ_a ——三轴试验中轴向应力

σ_c ——三轴试验中围(室)压力

σ_n ——面上的法向应力

σ_i ——三个主应力

σ_{ij} ——应力张量

σ_m ——球应力张量, 平均主应力

σ_{oct} ——八面体正应力

σ_t ——抗拉强度, 表面张力

σ_v, σ_n ——垂直与水平应力

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ —— x, y, z 方向上的正应力

τ ——剪应力

$\bar{\tau}$ ——应力莫尔圆半径, 为 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$

τ_f ——破坏时剪应力

τ_{oct} ——八面体剪应力

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ——作用于三个坐标面上的剪应力

Φ, ϕ ——势函数

φ ——内摩擦角, 直径

φ' ——有效应力内摩擦角

φ'' ——吸力部分的内摩擦角

φ_{cu} ——三轴固结不排水试验确定的内摩擦角

φ_c ——真强度理论的内摩擦角

φ_p ——平面应变试验内摩擦角

φ_1 ——三轴试验内摩擦角

φ_s ——滑动内摩擦角

φ_r ——残余强度内摩擦角

χ ——非饱和土的有效应力系数

Ψ ——流函数, 粘土颗粒扩散层中的电位

Ψ_g, Ψ_m, Ψ_p ——重力势、基质势、压力势

ψ ——角度, $\bar{\sigma}$ 与 $\bar{\tau}$ 坐标下强度线与水平线夹角

$\psi = A_{ct}/A$ ——连续性因子

Ω ——余能密度函数

目 录

第 1 章 土工试验及测试	1
1.1 室内试验	1
1.1.1 直剪试验、单剪试验和环剪试验	1
1.1.2 侧限压缩试验	3
1.1.3 三轴试验	3
1.1.4 真三轴试验	10
1.1.5 空心圆柱扭剪试验和方向剪切试验	12
1.1.6 共振柱试验	13
1.2 模型试验	14
1.2.1 $1g$ 下的模型试验	14
1.2.2 ng 的模型试验	15
1.3 现场测试与原型观测	19
1.3.1 平板载荷试验	19
1.3.2 静力触探	20
1.3.3 动力触探	21
1.3.4 十字板剪切试验(VST, vane shear test)	22
1.3.5 旁压试验(pressuremeter test)	23
1.3.6 螺旋板压缩试验(SPC, screw plate compressometer)和 钻孔剪切试验(BST, borehole shear test)	23
1.3.7 物探检测	25
1.3.8 原型监测	25
1.4 试验检验与验证	25
1.4.1 对试验的检验	25
1.4.2 本构关系模型的验证	27
1.4.3 数值计算的检验	29
习题与思考题	30
参考文献	31
第 2 章 土的本构关系	32
2.1 概述	32

IV 高等土力学

2.2 应力和应变	33
2.2.1 应力	33
2.2.2 应变	39
2.3 土的应力应变特性	41
2.3.1 土应力应变关系的非线性	41
2.3.2 土的剪胀性	42
2.3.3 土体变形的弹塑性	42
2.3.4 土应力应变的各向异性和土的结构性	43
2.3.5 土的流变性	45
2.3.6 影响土应力应变关系的应力条件	45
2.4 土的弹性模型	48
2.4.1 概述	48
2.4.2 邓肯-张双曲线模型	50
2.4.3 <i>K-G</i> 模型	56
2.4.4 高阶的非线弹性理论模型	58
2.5 土的弹塑性模型的一般原理	61
2.5.1 塑性理论在土力学中的应用	61
2.5.2 屈服准则及屈服面	62
2.5.3 流动规则(正交定律)与硬化定律	65
2.5.4 弹塑性本构模型的弹塑性模量矩阵的一般表达式	67
2.6 剑桥模型(Cam-Clay)	69
2.6.1 正常固结粘土的物态界面	69
2.6.2 超固结土和完全的物态界面	71
2.6.3 弹性墙与屈服轨迹	74
2.7 莱特-邓肯模型和清华模型	80
2.7.1 莱特-邓肯模型	80
2.7.2 修正的莱特-邓肯模型	83
2.7.3 清华弹塑性模型	85
2.8 土的结构性及土的损伤模型	89
2.8.1 概述	89
2.8.2 粗粒土的结构	89
2.8.3 粘土颗粒与水的相互作用——双电层	90
2.8.4 粘土颗粒间作用力及粘土的结构	92
2.8.5 土的结构性	93
2.8.6 损伤理论及其在岩土材料中的应用	95

2.8.7 沈珠江结构性粘土的弹塑性损伤模型	99
2.9 土的本构关系模型的数学实质及广义位势理论	102
2.9.1 土的一般应力应变关系及广义位势理论	103
2.9.2 超弹性模型或格林(Green)弹性模型	104
2.9.3 柯西(Cauchy)弹性模型	105
2.9.4 次弹性模型	105
2.9.5 弹塑性模型的塑性位势理论	106
2.9.6 相适应与不相适应的流动规则	106
2.9.7 多重势面的广义塑性理论	107
习题与思考题	108
参考文献	113
第3章 土的强度	114
3.1 概述	114
3.2 土的抗剪强度机理	116
3.2.1 摩擦强度	117
3.2.2 粘聚力	121
3.3 影响土强度的内部因素	123
3.3.1 影响土强度的因素	123
3.3.2 影响土强度的一般物理性质	124
3.3.3 孔隙比与砂土抗剪强度关系——临界孔隙比	126
3.3.4 孔隙比与粘土强度——真强度理论	129
3.4 影响土强度的外部因素	131
3.4.1 围压 σ_3 的影响	131
3.4.2 中主应力 σ_2 的影响	133
3.4.3 主应力方向的影响——土强度的各向异性	135
3.4.4 土的抗剪强度与加载速率的关系	138
3.4.5 温度与土强度关系	142
3.5 土的排水与不排水强度	143
3.5.1 有效应力原理及孔压系数	143
3.5.2 砂土的排水强度和不排水强度	147
3.5.3 粘土的排水与不排水强度	149
3.6 土的强度理论	156
3.6.1 概述	156
3.6.2 土的经典强度理论	157

3.6.3	近代强度理论	161
3.6.4	关于强度理论的讨论	167
3.7	粘性土的抗拉强度	168
3.7.1	实际工程中的拉伸破坏与开裂	168
3.7.2	土的抗拉强度的测定	169
3.7.3	粘性土的联合强度理论	172
	习题与思考题	174
	参考文献	180

第4章	土中水与土中的渗流及其计算	181
4.1	概述	181
4.1.1	岩土中的水及其运动	181
4.1.2	渗流的工程意义	182
4.1.3	土中水的渗流问题的研究历史	182
4.2	土中水的形态及其对土性的影响	183
4.2.1	土与水间的物理化学作用、粘土颗粒表面的双电层	183
4.2.2	毛细水与土中吸力	186
4.2.3	土的冻胀和冻融作用	187
4.3	土的渗透性	190
4.3.1	土中水的势能	190
4.3.2	达西定律的物理意义	194
4.3.3	非饱和土的渗透性	195
4.3.4	影响土渗透系数的因素	197
4.3.5	达西定律的适用范围	199
4.4	二维渗流与流网	200
4.4.1	二维渗流的基本微分方程	200
4.4.2	流网及其应用	202
4.5	有关渗流的一些工程问题	209
4.5.1	渗透力与渗透变形及其防治	209
4.5.2	渗流条件下土坡的稳定	212
4.5.3	挡土构造物上的土压力和水压力	215
4.5.4	基坑的井点降水	218
4.6	渗流的数值计算	224
4.6.1	渗流的基本微分方程	224
4.6.2	定解条件	225

4.6.3	泛函和变分	226
4.6.4	渗流有限元计算	227
4.6.5	关于渗流自由水位线(浸润线)的确定	230
	习题与思考题	234
	参考文献	237
第5章	土的压缩与固结	238
5.1	概述	238
5.2	土的压缩与地基的沉降	239
5.2.1	土的压缩	239
5.2.2	影响土压缩性的主要因素	243
5.2.3	沉降产生原因和类型	246
5.2.4	瞬时沉降和次压缩沉降	249
5.3	地基沉降计算	252
5.3.1	计算方法综述	252
5.3.2	单向压缩沉降计算法	253
5.3.3	考虑三向变形效应的单向压缩沉降计算法	254
5.3.4	三向变形沉降计算法	255
5.3.5	弹性理论法	257
5.3.6	应力路径法	257
5.3.7	剑桥模型法	262
5.3.8	曲线拟合法	263
5.3.9	现场试验法	264
5.3.10	其他方法简述	265
5.3.11	对几种沉降计算方法的评述	266
5.3.12	堤坝沉降的简化计算	267
5.4	单向固结的普遍方程与太沙基固结理论	268
5.4.1	单向渗流固结的普遍方程	268
5.4.2	太沙基单向固结理论	270
5.5	单向固结的复杂情况	275
5.5.1	加荷随时间变化	275
5.5.2	土层厚度随时间变化	279
5.5.3	地基为成层土	281
5.5.4	有限应变土层的固结	282
5.5.5	固结微分方程的差分解法	283

5.6	二向和三向固结	290
5.6.1	比奥理论	291
5.6.2	太沙基-伦杜立克理论(扩散方程)	293
5.6.3	比奥理论和准多维固结理论的比较	295
5.6.4	三向固结的轴对称问题——砂井地基的排水固结	300
5.7	非饱和土的固结	303
5.7.1	非饱和土固结的某些特点	303
5.7.2	弗雷德隆德非饱和土单向固结理论	304
5.8	固结试验	311
5.8.1	几种固结试验方法	311
5.8.2	恒应变速率试验法(CRS法)	312
5.8.3	控制孔压梯度压缩试验(CGC法)	314
	习题与思考题	318
	参考文献	322

第6章 土工数值分析(一): 土体稳定的极限平衡和极限分析法 323

6.1	概述	323
6.2	理论基础——塑性力学的上、下限定理	325
6.2.1	理论背景	325
6.2.2	塑性力学的上、下限定理	326
6.2.3	边坡稳定分析的条分法	328
6.3	土体稳定问题的下限解——垂直条分法	330
6.3.1	垂直条分法的静力平衡方程及其解	330
6.3.2	数值分析方法	332
6.3.3	边坡稳定分析的简化方法	336
6.3.4	垂直条分法的有关理论问题	338
6.3.5	垂直条分法在主动土压力领域中的应用	342
6.4	土体稳定分析的上限解——斜条分法	344
6.4.1	求解上限解的基本方程式	344
6.4.2	上限解和滑移线法的关系	346
6.4.3	边坡稳定分析的上限解	349
6.4.4	地基承载力的上限解	349
6.5	确定临界滑动模式的最优化方法	352
6.5.1	确定土体的临界失稳模式的数值分析方法	352
6.5.2	单形法	354

6.5.3	负梯度法	356
6.5.4	随机搜索法	356
6.5.5	模拟退火法	358
6.5.6	遗传算法	359
附录 A	程序设计和应用	366
	参考文献	398
第 7 章	土工数值分析(二): 渗流、应力应变和固结的有限元方法	400
7.1	概述	400
7.2	反映静力和流量平衡的微分方程和边界条件	400
7.2.1	基本方程式	400
7.2.2	边界条件	402
7.3	变分原理	403
7.3.1	固结问题的数学提法	403
7.3.2	数学提法的证明	404
7.4	有限元解法的基本原理	405
7.4.1	离散化	405
7.4.2	形函数	406
7.4.3	里兹法	408
7.4.4	增量表达形式	408
7.4.5	将孔隙水压力作为未知量的处理	408
7.4.6	将超孔隙水压力作为未知量的处理	410
7.5	结构矩阵的形成和计算	412
7.5.1	三角形单元	412
7.5.2	四节点四边形单元	413
7.5.3	八节点四边形单元	416
7.5.4	不协调的位移模式	419
7.5.5	接触面单元	420
7.5.6	结构矩阵	421
7.6	比奥理论的简化情况: 渗流、总应力、应力变形和太沙基固结计算	426
7.6.1	渗流计算	426
7.6.2	土体总应力下的应力变形计算	427
7.6.3	太沙基单向固结计算	428
7.7	例题和实例	430
7.7.1	一维固结计算	431

X 高等土力学

7.7.2 二维固结计算	431
7.7.3 小浪底大坝斜心墙施工期孔隙水压消散计算	433
附录 B 第 7 章的有关知识及规定	439
附录 C 子程序 CAMCLY	441
参考文献	445