



# 试验土工学

Experimental Soil Engineering


谢定义 陈存礼 胡再强 编著



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

SOIL

TEST



试验土工学  
Experimental Soil Engineering

谢定义 陈存礼 胡再强 编著



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

## 内容简介

本书比较完整地讲述了土工试验的广阔范围、理论基础、测试技术、工作现状与发展趋势。内容包括总论,土工试验方案的拟订,土工试验的土样采取与试样制备,土的物质结构特性指标试验,土的基本物理性质特性指标试验,土的基本力学性质特性指标试验,土工室内三轴试验,特殊土的土工试验,土工原位、现场、原型试验,土工物理模型试验,土工数值模型试验,土工试验资料的整理与分析,土工试验现代化的理论与方法等,共计13章。

本书注意了简洁与清晰的结合、传统与现代的结合、方法与举例的结合、基础与深化的结合以及来龙与去脉的结合,可以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科研与技术人员的教材或参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

试验土工学/谢定义,陈存礼,胡再强编著. —北京:高等教育出版社,2011.8

ISBN 978-7-04-031692-6

I. ①试… II. ①谢…②陈…③胡… III. ①土工试验-高等学校-教材 IV. ①TU41

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第121767号

策划编辑 刘剑波                      责任编辑 焦建虹                      封面设计 李卫青                      版式设计 王莹  
插图绘制 尹莉                      责任校对 杨雪莲                      责任印制 张泽业

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 100120  
印 刷 三河市华润印刷有限公司  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 35  
字 数 600千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landrao.com>  
<http://www.landrao.com.cn>  
版 次 2011年8月第1版  
印 次 2011年8月第1次印刷  
定 价 65.00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 31692-00

# 前 言

本书的第一编著者在退休后的几年里先后同有关教授合作,编著出版了《高等土力学》、《岩土工程学》和《土动力学》,也编写了作为基础土力学的《土力学教程》。但是,总觉得还需要补充写些什么。想来想去,就把目标盯在了土工试验技术上。这一方面是因为它在土力学及岩土工程中具有重要的地位,另一方面也是因为它是编著者曾经为研究生多遍讲授过的课程,有了一个比较详细的课程提纲,可以作为进一步发展的基础,写出一本既面向土材料的基本特性,又面向土体的工程需要,并且比较完整地论述土工试验的广阔范围、理论基础、测试技术、工作现状与发展趋势的《试验土工学》,弥补前几本书留下的一个大空间。现在,这本《试验土工学》即将问世了,但它是否能够使这个意图如愿以偿,还有待于广大读者的评论。

土工试验是采用不同的手段和方法,以揭示土的物质结构状态及其变化,或者揭示土或土体在力作用下的特性规律为主要目的的试验活动。它的基本任务是为某种工程需要提供认识土、选择土、利用土、改善土的正确基础数据和基本关系,为学科发展探索土性奥秘和未知规律。土工试验必须以具有代表性的土试样或现场的土体为依据,以具有特定目的性的试验条件为控制,以具有准确性要求的测试成果为基础,以具有科学性的资料整理分析方法为手段,以满足工程建设与科学研究的需要为目的。试验土工学的根本特点在于“用理论指导试验,用试验发展理论”,使它真正起到现代土力学发展四大支柱的基础作用。

本书不仅将一般土工试验的物理、力学、化学性质指标的测定作为基础内容,还特别关注了不同土工试验方案拟定的原则与方法,关注了各类三轴试验在当今土力学发展中的作用,关注了各类特殊土特性试验的基本方法,关注了土工离心模型试验,尤其是土工数值试验在解决土工问题上的作用,关注了土工室内试验与原位、现场、原型试验间的相辅相成作用,关注了土工试验成果整理的理论依据与具体方法,也关注了土工试验自动化的现代测试技术。通过对本书的学习,要求能够既加深对土工试验重要性和实用性的认识,又掌握大量有关土工试验方面有效而实用的、具有生命力的“技术元件”。为此,本书安排了总论,土工试验方案的拟订,土工试验的土样采取与试样制备,土的物质结构特性指标试验,土的

基本物理性质特性指标试验,土的基本力学性质特性指标试验,土工室内三轴试验,特殊土的土工试验,土工原位、现场、原型试验,土工物理模型试验,土工数值模型试验,土工试验资料的整理与分析,土工试验现代化的理论与方法等,共计 13 章。而且,在行文上尽量注意了简洁与清晰的结合、传统与现代的结合、方法与举例的结合、基础与深化的结合以及来龙与去脉的结合。

本书第一编著者谢定义教授对本书做了全面、系统的工作;西安理工大学的陈存礼教授、胡再强教授分别编写了第 8 章和第 9 章,并对全书进行了校修与补充工作;西安力创仪器公司的赵合稳高工与扎定一高工对第 13 章作了仔细的修改与把关。此外,西安理工大学的李宁教授对第 11 章提出了宝贵的意见和建议。西安理工大学岩土工程学科的历届研究生也曾为本书的形成做过多方面的工作。以前类似书籍和有关资料的编者也为本书供给了宝贵的经验和创新的见解。尤其是,西安理工大学岩土工程研究所为本书的出版给予了大力的支持。对于他们热情的关怀和付出的心血,本书编著者在此表示由衷的感谢。

最后,本书编著者期望能够听到来自专业同行们的各种有益的批评与建议,它将会使本书更好地发挥它应有的作用。

编著者

2011.5.10 于西安理工大学

# 符 号 表

- $A_m$  最大振幅
- A/D 模数转换
- $a$  压缩系数,导温系数
- $C$  比热
- $C_c$  曲率系数,压缩指数
- $C_e$  回弹指数
- $C_i$  相似比
- $C_u$  不均匀系数
- $C_v$  变异系数或变差系数,  $C_v = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\%$
- CAT 计算机辅助测试系统
- CD 试验 固结排水的剪切试验
- CU 试验 固结不排水的剪切试验
- $c$  粘聚力
- $D_r$  相对密实度
- D/A 数模转换
- $D(x)$  方差
- $d_{10}$  有效粒径
- $d_{50}$  平均粒径
- $E_c$  单位击实功
- $E_d$  动压缩模量
- $E_p$  横压变形模量
- $E_s$  压缩模量
- $E_t$  切线模量
- $E_u$  回弹模量
- $E_0$  变形模量
- $E(x)$  期望
- $e$  孔隙比
- $e_s$  体积收缩率
- $f_n$  自振频率

$f_s$  侧壁摩阻力,  $f_s = \frac{P_f}{F_s}$

$G_d$  动剪切模量

$G_s$  相对体积质量

$g$  重力加速度

$I_L$  液性指数

$I_s$  收缩指数

$J_m$  基组(包括基础、激振器和电机等)质量对过重心并垂直于振动面轴的质量惯性矩

$K_x$  抗剪刚度

$K_z$  抗压刚度

$K_\phi$  抗弯刚度

$K_\psi$  抗扭刚度

$k$  渗透系数

$L_R$  面波的波长

$L_{yy}$  总平方和

$m_s$  综合结构势

$m_x$  绝对误差,  $m_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$

$N$  标准贯入击数, 振动循环次数

$N_f$  破坏振次

$n$  孔隙率

$p_f$  旁压试验的屈服应力

$p_L$  旁压试验的极限应力

$p_s$  比贯入阻力

$p_0$  初始水平应力

$Q$  剩余平方和

$q_c$  锥头阻力,  $q_c = \frac{Q_c}{A}$

$q_d$  动贯入阻力

$q_L$  竖向承载力

$q_0$  无侧限抗压强度

$R_f$  摩阻比,  $R_f = \frac{f_s}{q_c}$

$S$  灵敏度

$S^2$	样本方差
$S_r$	饱和度
$s$	基质吸力, $s = u_a - u_w$
$U$	线位移, 回归平方和
UU	UU 试验 不固结不排水的剪切试验
$u_a$	孔隙气压力
$u_d$	动孔隙水压力, 动孔压
$u_w$	孔隙水压力
$w$	含水量
$w_L$	液限
$w_{op}$	最优含水量
$w_p$	塑限
$w_s$	缩限含水量
$\bar{X}$	样本均值
$\alpha$	显著性水平, $\alpha = (1 - F(\beta))$
$\beta$	置信水平
$\gamma$	重度
$\delta_{ef}$	自由膨胀率
$\delta_s$	湿陷变形系数
$\delta_{wt}$	渗透溶滤变形系数
$\delta_{zs}$	自重湿陷系数
$\varepsilon_r$	破坏应变
$\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}$	侧向应变
$\varepsilon_z$	轴向应变
$\eta$	衰减系数
$\theta$	角位移
$\lambda$	阻尼比, 导热系数
$\lambda_{max}$	最大阻尼比
$\mu_t$	切线泊松比
$\pi$	渗透吸力
$\rho'$	浮密度
$\rho_b$	饱和密度
$\rho_d$	干密度
$\rho_{d,max}$	最大干密度



$\rho_x$  精度指标,  $\rho_x = \frac{m_x}{X}$

$\sigma$  标准差

$\sigma_d$  动应力

$\sigma_{r1}, \sigma_{r2}$  侧向应力

$\sigma_z$  轴向应力

$\sigma_1$  最大主应力

$\sigma_3$  最小主应力

$\tau_{fi}$  抗剪强度

$\tau_0/\sigma_{3c}$  起始剪应力比

$\varphi$  内摩擦角

$\psi$  总吸力

# 目 录

<b>第 1 章 总论</b> .....	1
1.1 试验土工学的任务与重要性 .....	1
1.2 土工试验的类型与试验方案设计的基本原则 .....	2
1.2.1 土工试验的类型 .....	2
1.2.2 土工试验方案设计的基本原则 .....	3
1.3 《试验土工学》的基本框架 .....	4
1.4 土工试验发展的基本趋向 .....	5
1.5 小结 .....	5
参考文献 .....	7
<b>第 2 章 土工试验方案的拟订</b> .....	9
2.1 土工试验的生产型方案 .....	9
2.1.1 生产型土工试验方案制订的原则方法 .....	9
2.1.2 生产型土工试验方案制订的举例 .....	12
2.2 土工试验的研究型方案 .....	16
2.2.1 研究型土工试验方案制订的原则方法 .....	16
2.2.2 研究型土工试验方案制订的举例 .....	20
2.3 土工试验的生产研究型方案 .....	25
2.3.1 生产研究型土工试验方案制订的原则方法 .....	25
2.3.2 生产研究型土工试验方案制订的举例 .....	27
2.4 土工试验方案中的正交试验设计方法 .....	30
2.4.1 概述 .....	30
2.4.2 正交表的概念、类型及特性 .....	31
2.4.3 正交试验方案的举例 .....	34
2.5 小结 .....	38
参考文献 .....	39
<b>第 3 章 土工试验的土样采取与试样制备</b> .....	40
3.1 概论 .....	40
3.2 土工试验土样的采取 .....	40
3.2.1 扰动土样的采取 .....	41
3.2.2 原状土样的采取 .....	41

3.2.3 钻孔方法与取土设备的适用范围 .....	49
3.3 土工试验试样的制备 .....	52
3.3.1 散状试样与块状试样 .....	52
3.3.2 散状试样的制备 .....	52
3.3.3 块状试样的制备 .....	53
3.4 小结 .....	57
参考文献 .....	59
<b>第4章 土的物质结构特性指标试验 .....</b>	<b>60</b>
4.1 概论 .....	60
4.2 土矿物成分的试验测定 .....	61
4.2.1 概述 .....	61
4.2.2 粘土矿物的 X 射线粉晶分析法 .....	62
4.2.3 粘土矿物的差热分析法 .....	64
4.3 土化学成分的试验测定 .....	67
4.3.1 概述 .....	67
4.3.2 土中可溶盐(易溶盐、中溶盐、难溶盐)的测定 .....	68
4.3.3 土中有机的测定 .....	73
4.3.4 土酸碱度(pH)的测定 .....	75
4.3.5 土阳离子交换量的测定 .....	75
4.3.6 土比面积的测定 .....	78
4.3.7 土中硅、铁、铝、钙、镁、钾等主要元素的全量测定 .....	79
4.4 土微观结构特性的试验测定 .....	80
4.4.1 概述 .....	80
4.4.2 土结构特性的微观结构分析试验 .....	81
4.5 小结 .....	82
参考文献 .....	84
<b>第5章 土的基本物理性质特性指标试验 .....</b>	<b>85</b>
5.1 概论 .....	85
5.2 土的湿度、密度特性指标试验 .....	85
5.2.1 概述 .....	85
5.2.2 土的密度(或重度)特性指标试验 .....	86
5.2.3 土粒的相对体积质量特性指标试验 .....	87
5.2.4 土的湿度特性指标试验 .....	89
5.2.5 粘性土的塑限、液限特性指标试验 .....	90
5.2.6 无粘性土的最大密度、最小密度特性指标试验 .....	93

5.3	土的粒度特性指标试验	95
5.3.1	概述	95
5.3.2	筛析法测定颗粒分布曲线	95
5.3.3	密度计法测定颗粒分布曲线	96
5.3.4	移液管法测定颗粒分布曲线	99
5.4	土的结构特性指标试验	99
5.4.1	灵敏度试验	99
5.4.2	结构强度试验	100
5.4.3	综合结构势试验	100
5.5	小结	101
	参考文献	103
<b>第6章</b>	<b>土的基本力学性质特性指标试验</b>	<b>104</b>
6.1	概论	104
6.2	土击实特性指标的试验	105
6.2.1	概述	105
6.2.2	击实试验、击实曲线与击实特性指标	107
6.2.3	含粗粒土的击实特性指标	108
6.2.4	击实试验与工程应用的关系	109
6.3	土压缩特性指标的试验	110
6.3.1	概述	110
6.3.2	压缩特性指标的计算	113
6.3.3	固结特性指标的计算	113
6.3.4	先期固结压力的计算	114
6.3.5	对压缩试验的若干讨论	116
6.3.6	连续加载的固结试验	117
6.4	土剪切特性指标的试验	123
6.4.1	概述	123
6.4.2	土抗剪特性指标的剪切试验	125
6.4.3	土残余强度指标的剪切试验	125
6.4.4	土长期强度指标的剪切试验	126
6.5	土渗透特性指标的试验	128
6.5.1	概述	128
6.5.2	定水头试验与变水头试验	130
6.5.3	对渗透试验的若干讨论	130
6.6	小结	131

参考文献 .....	134
<b>第7章 土工室内三轴试验 .....</b>	<b>135</b>
7.1 概论 .....	135
7.2 常规三轴试验 .....	136
7.2.1 概述 .....	136
7.2.2 测定土的抗剪强度与强度指标 .....	137
7.2.3 测定土的应力-应变关系 .....	141
7.3 $K_0$ 固结三轴试验 .....	143
7.3.1 概述 .....	143
7.3.2 $K_0$ 条件的控制与试验方法 .....	143
7.3.3 $K_0$ 条件下土的弹性模量试验 .....	144
7.4 应力路径三轴试验 .....	145
7.4.1 概述 .....	145
7.4.2 压缩路径和挤伸路径的三轴试验 .....	147
7.4.3 等向应力压缩路径和纯剪应力路径的三轴试验 .....	149
7.4.4 等应力比路径的三轴试验 .....	152
7.5 平面应变三轴试验 .....	152
7.6 真三轴试验 .....	154
7.7 扭剪三轴试验 .....	158
7.7.1 概述 .....	158
7.7.2 扭剪三轴试验的试验方法 .....	163
7.8 拉伸三轴试验 .....	164
7.9 动三轴试验 .....	166
7.9.1 概述 .....	166
7.9.2 动强度曲线与动强度指标 .....	167
7.9.3 土的抗液化剪应力 .....	169
7.9.4 动应力-动应变曲线与它的特性指标 .....	172
7.10 共振柱试验 .....	175
7.10.1 概述 .....	175
7.10.2 共振柱试验计算剪切模量的基本公式 .....	177
7.10.3 共振柱试验计算阻尼比的基本公式 .....	178
7.11 动扭剪三轴试验 .....	179
7.12 流变三轴试验 .....	180
7.13 小结 .....	182
参考文献 .....	186

<b>第 8 章 特殊土的土工试验</b> .....	187
8.1 概论 .....	187
8.2 粗粒土的土工试验 .....	187
8.2.1 相对密实度试验 .....	188
8.2.2 击实、压缩、直剪与三轴试验 .....	191
8.3 胀缩性土的土工试验 .....	193
8.3.1 自由膨胀率、膨胀率、膨胀力的试验 .....	193
8.3.2 缩限含水量、收缩指数和体积收缩率的试验 .....	194
8.4 冻土的土工试验 .....	195
8.4.1 概述 .....	195
8.4.2 冻土物理参数的试验 .....	196
8.4.3 冻土热学参数与冻融特性的试验 .....	201
8.4.4 冻土力学参数与特性(融化压缩性、抗剪强度、应力-应变 关系)的试验 .....	211
8.5 湿陷性土的土工试验 .....	215
8.5.1 湿陷变形系数 $\delta_s$ .....	215
8.5.2 自重湿陷系数 $\delta_{zs}$ .....	217
8.5.3 渗透溶滤变形系数 $\delta_{w1}$ .....	217
8.6 非饱和土的土工试验 .....	218
8.6.1 概述 .....	218
8.6.2 非饱和土的吸力特性参数 .....	218
8.6.3 非饱和土的渗透特性参数 .....	223
8.6.4 非饱和土的抗剪特性参数 .....	230
8.6.5 非饱和土的变形特性参数 .....	232
8.7 分散性土的土工试验 .....	236
8.7.1 概述 .....	236
8.7.2 双比重计法 .....	236
8.7.3 碎块崩解试验法 .....	237
8.7.4 针孔试验法 .....	237
8.7.5 孔隙水阳离子试验法 .....	237
8.7.6 土的交换性阳离子试验法 .....	239
8.8 其他特殊土类和土工材料的土工试验 .....	239
8.8.1 盐渍土、污染土与杂填土 .....	240
8.8.2 粉煤灰与尾矿料 .....	242
8.8.3 土工合成材料的试验 .....	243

8.9 小结 .....	251
参考文献 .....	253
<b>第9章 土工原位、现场、原型试验 .....</b>	<b>255</b>
9.1 概论 .....	255
9.2 土工原位试验 .....	256
9.2.1 密度、湿度的原位试验 .....	256
9.2.2 渗透的原位试验 .....	260
9.2.3 载荷试验 .....	271
9.2.4 十字板剪切试验 .....	282
9.2.5 静力触探试验(电测式) .....	286
9.2.6 动力触探试验 .....	292
9.2.7 标准贯入试验 .....	296
9.2.8 旁压试验 .....	302
9.2.9 原位直剪试验 .....	320
9.3 土工现场试验 .....	324
9.3.1 概述 .....	324
9.3.2 现场块体振动试验 .....	324
9.3.3 现场碾压试验 .....	331
9.3.4 现场波速试验 .....	331
9.4 土工原型观测 .....	339
9.4.1 概述 .....	339
9.4.2 土体原型观测的测试技术 .....	341
9.4.3 土体原型观测的主要测试设备 .....	350
9.5 小结 .....	357
参考文献 .....	358
<b>第10章 土工物理模型试验 .....</b>	<b>360</b>
10.1 概论 .....	360
10.2 土工物理模型试验与相似条件 .....	360
10.3 土工模型试验与土工离心模型试验 .....	363
10.4 土工离心模型试验及其发展 .....	365
10.4.1 土工离心模型试验的特点和缺点 .....	365
10.4.2 土工离心模型试验的发展 .....	368
10.5 土工离心模型试验一般原理 .....	370
10.5.1 土工离心模型试验的离心加速度 .....	370
10.5.2 土工离心模型试验的模型相似条件 .....	371

10.6	土工离心模型试验的设备与技术	377
10.6.1	土工离心模型试验的设备	377
10.6.2	土工离心模型试验技术	380
10.7	小结	385
	参考文献	388
<b>第 11 章</b>	<b>土工数值模型试验</b>	<b>389</b>
11.1	概论	389
11.2	土工数值试验的正、反分析方法	391
11.2.1	土工数值试验的正分析方法	391
11.2.2	土工数值试验的反分析方法	394
11.3	土工数值反分析法的参数反演	396
11.3.1	正反分析法的参数反演	396
11.3.2	逆反分析法的参数反演	398
11.3.3	反分析法的参数反演举例	401
11.4	土工数值反分析法的模型识别	402
11.4.1	模型判别准则	403
11.4.2	模型识别方法	405
11.5	小结	408
	参考文献	410
<b>第 12 章</b>	<b>土工试验资料的整理与分析</b>	<b>411</b>
12.1	概论	411
12.2	概率论基础	412
12.2.1	概率密度函数与概率分布函数	412
12.2.2	概率分布的数字特征	416
12.2.3	正态分布型的概率密度函数	419
12.3	数理统计基础	423
12.3.1	数理统计的点估计和区间估计	423
12.3.2	期望与方差的点估计	424
12.3.3	期望与方差的区间估计	427
12.3.4	假设检验	434
12.4	土性指标的最佳值与计算值	438
12.4.1	土性指标的最佳值	438
12.4.2	土性指标的计算值	439
12.5	指标间的关系曲线与经验公式	440
12.5.1	关系曲线的确定	440



---

12.5.2 经验公式的确定 .....	441
12.5.3 一元回归计算 .....	441
12.5.4 多元回归计算 .....	470
12.6 小结 .....	503
参考文献 .....	506
<b>第 13 章 土工试验现代化的理论与方法 .....</b>	<b>508</b>
13.1 概论 .....	508
13.2 自动控制的土工三轴试验 .....	509
13.2.1 概述 .....	509
13.2.2 土工三轴仪及三轴试验的回顾 .....	510
13.2.3 施加荷载的自动控制 .....	515
13.2.4 试样体变的自动量测 .....	520
13.2.5 GDS 数字控制器的应用 .....	521
13.2.6 试验过程的自动控制 .....	522
13.2.7 数据的自动采集 .....	524
13.3 测试理论应用的举例 .....	527
13.3.1 概述 .....	527
13.3.2 软件开发 .....	530
13.4 小结 .....	530
参考文献 .....	532
<b>中英文名词对照表 .....</b>	<b>533</b>