

岩土工程测试技术

王钟琦 孙广忠 刘双光 编著
朱小林 唐家洪 黄世铭



中国建筑工业出版社

岩土工程测试技术

王钟琦 孙广忠 刘双光 编著
朱小林 唐家洪 黄世铭

中国建筑工业出版社

本书系统地介绍了岩土工程测试技术的理论和方法，侧重于介绍工程实用的系统性成果和国内外新近的理论 and 测试技术，并加以评述。

全书共分九章，主要包括：土的物理性和渗透性，土的变形和强度，土的动力性状和室内测定方法，土的原位测试技术、原型试验和现场监测，岩体力学测试原理及方法，岩土工程试验设计等。书中附有大量的图表及工程实际资料，书前列有主要符号，各章末均附有参考文献，书末附有索引。

本书可供建筑、水电、铁道、交通、冶金、机械等部门从事工程勘察测试和地基基础设计的工程技术人员、科研人员及大专院校有关岩土工程专业师生参考。

岩土工程测试技术

王鍾琦 孙广忠 刘双光 编著
朱小林 唐家洪 黄世铭

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本：787×1092毫米^{1/16}，印张：27^{1/2}，字数：662千字
1986年2月第一版 1986年2月第一次印刷
印数：1—5,400册 定价：5.05元
统一书号：15040·4741

Testing Techniques in Geotechnical Engineering

Wang Zhong-qi Sun Guang-zhong Liu Shuang-guang
Zhu Xiao-lin Tang Jia-hong Huang Shi-ming

China Building Industry Press
Beijing

序 言

岩土工程是利用土力学、岩体力学及工程地质学的理论与方法，为研究各类土建工程中涉及岩土体的利用、整治或改造问题而进行的系统性工作。

随着现代化进程的飞速发展，各类土建工程的日新月异，重型厂房、高层建筑、浩大的水电枢纽、艰险的铁路桥隧以及为了向海洋寻找资源、向地下争取空间而进行的各种开发性工程等，都与它们所赖以存在的岩土地层发生了极为密切的关系。各类工程的成败利钝，在很大程度上取决于岩土体能否提供足够的承载力，保证工程结构不致遭受超过设计限度的地基沉降、水平位移、差异变形或各种形式的岩土应力作用。近二十年来，为了解决建筑地基、斜坡路基、堤坝挡墙、铁路桥隧、地下建筑、岸边支挡、近海工程、场地抗震、地震区划、地热开发、地下蓄能以及国土开发和环境保护等难以列举的各类工程岩土问题，在岩土力学及工程地质方面，提出了一系列新的理论和新的设计方法。例如，根据岩土特性，针对工程特点，可以设计相应的应力-应变本构关系，给定数值计算模型，以便准确掌握岩土体在工程运营期间的性状，预估其长期效果和影响。这可以说是岩土力学新理论的极大贡献。

然而新的岩土力学理论要变为工程现实，如果没有新的测试手段的相应发展，则是不可能的。因为，不论设计理论与方法如何先进、合理，如果测试技术落后，则设计计算所依据的各项岩土参数无法准确测求，不仅岩土工程设计的先进性无从体现，而且岩土工程的质量与精度亦难以查验和保证。所以，测试技术是从根本上保证岩土工程设计的精确性、代表性以及经济合理性的重要手段。在整个岩土工程中它与理论计算和施工检验是相辅相成的三个环节。

岩土工程测试技术不仅在工程实践中十分重要，而且在学科理论的研究与发展中也起着决定性作用。例如 K. Terzaghi，在二十年代创立了土的一维固结理论，对于主固结过程做出了数学解析，同时还提出次固结（次时间效应）的概念性论述。但是，由于当时的测试手段不够充分，所以他始终没有对次固结过程进行过具体的分析，甚至在实验中无法准确划分主、次固结的界限。然而，到了七十年代，人们开始在土样内实际监测固结过程中的孔隙压力变化，尤其是在等梯度固结试验等仪器及方法提出之后，才开始能够真正划分二者的界限，从而为建立完整的固结理论提供了有效手段。又如，众所周知的土的非线性应力-应变关系及应力路径描述，是使岩土工程性状分析工作上升到本征性新水平的重要标志，但它也是来源于实验的理论成果，如果没有三轴有效应力测试仪器的产生，就不可能有应力路径的描述和控制设计。如果我们再追溯到早期的达西定律、摩尔-库伦强度理论等旧有的土力学理论，几乎都是基于实验测试的结果。由此可以说岩土测试技术在工程实践中是以岩土力学理论为指导法则和服务对象的，而岩土力学理论又是以岩土测试技术为实验依据和发展背景的。这就是岩土工程测试在生产实践和科学实验中的地位和作用。

作者们通过多年的工作体验，深感岩土工程测试的重要性和在我国四个现代化建设中的实际贡献。同时，也感到国内外有关这方面的论述很少，而且缺乏较系统的介绍。1956年王锺琦和林绣贤编著的《土工试验》一书虽然在我国前几个五年计划建设时期中起了一定的作

目 录

序言

主要符号

第一章 土的物理性质	1
1.1 土的基本物理性质	1
1.1.1 土的三相物质组成	1
1.1.2 土的基本物理指标	1
1.1.3 土物理指标间的相互关系	3
1.1.4 比重试验	4
1.1.5 单位容重试验	6
1.1.6 含水量试验	9
1.2 土的颗粒级配	11
1.2.1 基本概念	11
1.2.2 粒径参数及级配特征参数	12
1.2.3 筛分析	12
1.2.4 斯托克斯定律	13
1.2.5 斯托克斯定律的适用条件	14
1.2.6 方法概述	16
1.2.7 不同粒径范围内各粒组所占重量百分比	17
1.2.8 有关问题	18
1.3 土的稠度界限	24
1.3.1 土的稠度概念及稠度界限	24
1.3.2 稠度界限测定的原理及方法	25
1.3.3 土的天然稠度直接测定及其研讨	32
1.4 砂土的紧密度	33
1.4.1 紧密度的含义	33
1.4.2 测求砂土最大与最小孔隙比的方法评述	34
1.4.3 影响最大与最小孔隙比的因素	36
1.5 土的结构及其微观分析	36
1.5.1 土的结构及其类型	36
1.5.2 土的微观结构的研究方法	38
1.5.3 颗粒表面积测定	41
1.6 土的矿物成份及其测定	45

1.6.1 粒度成份与矿物成份的关系	45
1.6.2 粘土矿物的分类及其特征	46
1.6.3 土的矿物成份的分析方法	46
1.7 土的击实试验	53
1.7.1 击实试验原理和方法	53
1.7.2 击实仪功能的选择	55
1.7.3 击实试验应注意的几个问题	56
1.8 室内加州承载比试验	58
1.9 第一章参考文献	60
第二章 土的渗透性与渗流参数	61
2.1 基本概念	61
2.2 达西定律	63
2.3 室内渗透试验方法及其原理	65
2.3.1 常水头法渗透试验	65
2.3.2 变水头法渗透试验	65
2.3.3 三轴仪法渗透试验	68
2.3.4 固结仪法渗透试验	69
2.3.5 渗透试验的若干经验	69
2.4 影响土的渗透性的因素	71
2.5 渗透系数的间接测定	74
2.6 自控渗透仪	76
2.7 第二章参考文献	78
第三章 土的变形	79
3.1 基本概念	79
3.2 土的压缩变形	80
3.2.1 压缩试验的基本原理	80
3.2.2 压缩变形指标及其相互关系	82
3.3 土的压缩(固结)历史与先期固结压力	84
3.3.1 土的压缩-回弹特性	84
3.3.2 土的固结应力历史的描述	85
3.3.3 确定先期固结压力的方法	86
3.3.4 准先期固结压力	88
3.3.5 现场原始压缩曲线的确定方法	89
3.4 土的固结特性	89
3.4.1 一维固结理论	89

目 录

3.4.2 固结系数的确定方法	93	度和应力-应变关系	181
3.4.3 固结理论的发展	97	4.5.1 单剪仪的应用	181
3.5 固结试验方法和技术要求	98	4.5.2 扭剪仪测定土的强度和应力- 应变关系	182
3.5.1 常规固结试验	98	4.6 土的残余强度	186
3.5.2 快速固结试验	102	4.6.1 测定的目的和意义	186
3.5.3 固结试验新法	102	4.6.2 测定方法	188
3.6 土的胀缩性及湿陷性	108	4.7 土的流变性质及流变参数的测定	192
3.6.1 膨胀土的变形特征	108	4.7.1 土的流变性质及其测定方法	192
3.6.2 膨胀土的胀缩性指标及其 测定方法	108	4.7.2 流变参数的测定	194
3.6.3 湿陷性黄土的变形特征	110	4.8 第四章参考文献	195
3.6.4 湿陷性黄土的变形指标及其 测定方法	110	第五章 土的动力性状及其室内测定 方法	198
3.7 第三章参考文献	112	5.1 基本概念	198
第四章 土的强度	114	5.1.1 定义	198
4.1 土的强度理论及抗剪强度试验的 基本要求	114	5.1.2 各种动力作用的特征	198
4.1.1 土的强度理论	114	5.1.3 波与波动	199
4.1.2 土的应力-应变关系与 破坏准则	116	5.1.4 振动类型及振动性状	201
4.1.3 有效应力原理	118	5.1.5 共振	202
4.1.4 剪切试验的基本要点	121	5.1.6 单自由度振动	203
4.1.5 应力路径与强度试验设计	123	5.2 弹性介质中波的传播	204
4.2 直剪试验测求土的抗剪强度指标	127	5.2.1 体波的传播	204
4.2.1 概述	127	5.2.2 面波的传播	205
4.2.2 直剪试验方法及其适用性	128	5.3 激振与激振技术	206
4.2.3 试验技术标准与要求	129	5.3.1 激振	206
4.2.4 无粘性土的剪切特性	131	5.3.2 激振技术	207
4.3 三轴试验测求土的强度及应力 应变关系	134	5.4 测振系统	209
4.3.1 概述	134	5.4.1 通用测振网络	209
4.3.2 三轴仪的主要特点	135	5.4.2 测振传感器	209
4.3.3 三轴试验方法及其应用	140	5.5 岩土动力测试技术概述	212
4.3.4 三轴试验技术标准与要求	141	5.5.1 岩土动力测试技术的分类	212
4.3.5 三轴试验中的校正工作	155	5.5.2 岩土动力测试各类方法的 特点	212
4.3.6 试验成果整理中的几个 问题	160	5.6 动三轴试验	213
4.3.7 土的非线性应力-应变关系与 土的侧压力系数	165	5.6.1 动三轴试验原理	213
4.3.8 特种三轴仪简介	173	5.6.2 动三轴试验成果及其分析 法则	215
4.4 土的无侧限抗压强度和拉伸试验	178	5.7 动单剪试验	220
4.4.1 土的无侧限抗压强度试验	178	5.7.1 单剪试验机理及动单剪仪的 设计选型	220
4.4.2 土的拉伸试验	179	5.7.2 动单剪试验的应用——判定液 化势	223
4.5 单剪试验及扭剪试验测求土的强		5.8 大型振动台试验	223
		5.9 共振柱试验	224

5.9.1 共振柱试验工作原理	225	6.8 土的渗透性的现场测定方法	305
5.9.2 仪器特征常数的标定	227	6.8.1 注水试验	306
5.9.3 试验方法要点	229	6.8.2 抽水试验	308
5.9.4 计算问题	230	6.8.3 压水试验	309
5.10 第五章参考文献	234	6.8.4 渗压计测定渗透系数	311
第六章 土的原位测试技术	235	6.9 第六章参考文献	314
6.1 静力载荷试验	235	第七章 岩体力学试验原理及方法	318
6.1.1 载荷试验的基本理论	236	7.1 岩体力学基础	318
6.1.2 载荷试验的试验设备	240	7.1.1 岩体的地质特征及其力学效应	318
6.1.3 载荷试验的技术要求	241	7.1.2 岩体变形机理及变形参数研究 原理	323
6.1.4 其它载荷试验	242	7.1.3 岩体破坏机理及强度研究 原理	330
6.2 横压(旁压)试验	243	7.1.4 岩体力学性质分析原理	333
6.2.1 横压试验的基本原理	244	7.1.5 岩体结构力学效应	334
6.2.2 横压试验的仪器设备	249	7.2 岩体力学试验原理	341
6.2.3 影响横压试验的因素	251	7.2.1 岩体力学试验工作准则	341
6.2.4 横压试验的技术要求	252	7.2.2 岩体力学试验设计	343
6.2.5 横压试验的成果分析和应用	252	7.2.3 试验方法选择	347
6.2.6 横压试验的新发展	256	7.3 岩体力学试验方法	348
6.3 电测静力触探试验	256	7.3.1 试块室内试验方法	349
6.3.1 静力触探的机理	257	7.3.2 试块野外原位试验方法	355
6.3.2 影响静力触探贯入阻力的 因素	262	7.3.3 岩体变形参数测试方法	357
6.3.3 静力触探探头和主要装置	264	7.3.4 岩体声波测试技术	360
6.3.4 操作技术要点	265	7.4 地应力量测方法	362
6.3.5 静力触探试验成果的应用	265	7.4.1 地应力量测方法分类及其基本 原理	362
6.4 动力触探试验	277	7.4.2 表面应力解除法测定岩体应力	368
6.4.1 动力触探的设备	278	7.4.3 钻孔应力解除法测定岩体应力	370
6.4.2 动力触探的原理及影响贯入阻力 的因素	278	7.4.4 水压破裂法测定岩体应力	375
6.4.3 动力触探的成果整理及应用	284	7.5 岩体变形观测	376
6.5 十字板剪切试验	290	7.5.1 概述	376
6.5.1 十字板剪切试验的原理及影响 因素	291	7.5.2 岩体变形观测方法	376
6.5.2 十字板剪切试验的应用	293	7.5.3 岩体变形位移反演分析	380
6.6 块体振动试验	295	7.6 第七章参考文献	383
6.6.1 块体自由振动试验	296	第八章 原型试验和现场监测	385
6.6.2 块体强迫振动试验	298	8.1 桩基试验	385
6.6.3 影响块体模型基础振动试验的 因素	301	8.1.1 单桩垂直静载荷试验	386
6.7 土的动弹性常数的原位测定 (波速法)	302	8.1.2 单桩水平静载荷试验	390
6.7.1 折射波速法	302	8.2 土中锚杆试验	392
6.7.2 钻孔波速法	304	8.3 土体位移(变形)量测	393
6.7.3 面波法	304	8.3.1 垂直沉降观测	393
		8.3.2 水平位移的测量	396
		8.3.3 边坡变形的观测	396

目 录

8.4 土压力的测量.....	397	9.2 常规岩土试验设计	403
8.4.1 测量接触压力的土压力盒	397	9.3 特殊试验的设计	406
8.4.2 土体内部压力的测量.....	399	9.3.1 动力参数试验方法选择	406
8.4.3 永久或临时支撑结构承受荷载 的测量	399	9.3.2 模型试验设计	408
8.5 孔隙水压力的测量	399	9.3.3 模型试验设计的相似律	408
8.5.1 敞开式测压管或观测井	400	9.4 试验设计简例	415
8.5.2 封闭式测压计	400	9.4.1 固结试验设计简例	415
8.6 第八章参考文献	401	9.4.2 静力模型试验设计简例	415
第九章 岩土工程试验设计.....	402	9.4.3 动力模型试验设计简例	416
9.1 试验设计的概念	402	9.5 第九章参考文献	418
		索引	419

主要符号

A	面积	E_0	变形模量、弹性模量
A	孔隙压力系数	E_s	土的压缩模量、体积压缩系数的倒数
\bar{A}	平均断面积	E_s	静弹性模量
a	加速度	e	孔隙比
a_v	压缩系数	e	自然对数的底
A_s	活动性	e_c	临界孔隙比
B	孔隙水压力系数	e_{max}	最大孔隙比
B	磁场强度	e_{min}	最小孔隙比
b	宽度、质量比	e_0	起始孔隙比
C	土颗粒骨架的压缩性	e_s	体缩
C	粘滞阻尼系数、速度阻尼、哈普经验系数	F	力、修正系数
C_c	压缩指数、曲率系数	f	摩擦系数
C_c	临界阻尼系数	f_s	摩阻力
CD	固结排水剪	F_s	安全因素
C_e	回弹指数、膨胀指数	G	剪切模量
C_u	不均匀系数	G_d	动剪切模量、动刚度
CU	固结不排水剪(不测孔隙压力)	G_s	土粒比重
\bar{CU}	固结不排水剪(测孔隙压力)	G_w	水的比重
c	内聚力	g	重力加速度
c	咬合力、连结力	H, h	高度、厚度、深度
c_u	土与桩身的粘附力	h	亨利系数
c'	单位面积有效内聚力	I	量力环截面惯性矩
c_r	单位面积残余内聚力	I_1	脆性指数
c_v	土的不排水抗剪强度	I_c	相对稠度、稠性指数
C_c	固结系数	I_L	液性指数
C_{α}	次固结系数	I_p	塑性指数
C_v	消散系数	I_f	流动指数
C_z	地基抗压刚度系数	i	水力梯度
D	阻尼比	J	转动惯量
D, d	直径或粒径	J_p	转动惯性矩
D_r	紧密度、相对密度	j	单位渗透力
d_{10}	有效粒径	K	孔隙渗流弹性参数
d_{50}	平均粒径	k	渗透系数、超固结比
E	土的杨氏模量、土的变形模量	K_0	静止侧压力系数
E	感应电动势	K_{0s}	超固结土的静止侧压力系数
E	弹性系数	K_s	剪切刚度
E_d	动弹性模量	L	距离、长度、土的沉降距离

主要符号

L	线缩	T	岩体抗拉强度
M, m	质量	T_v	时间因素
M	力矩	t_f	破坏历时
m_v	体积压缩系数	U	固结度、桩的周长
N	击实次数	u	孔隙压力
n	孔隙率、孔隙度	u_a	孔隙气压力
OCR	超固结比	u_0	超静水压力、超孔隙水压力
P	总压力	U_f	平均固结度、桩的周长
p	单位面积上的荷载、破坏荷载	u_i	破坏时的孔隙压力
p_a	大气压力	u_w	静水压力
P_0	先期固结压力	u_w	孔隙水压力
p_s	桩侧阻力	UU	不固结不排水剪 (不测孔隙压力)
P_v	扰力	\overline{UU}	不固结不排水剪 (测孔隙压力)
p_v	比贯入阻力	V	体积、容积
p_{vs}	湿陷起始压力	v	速度
p_v	固结降伏应力	V_a	孔隙中气体体积
Q	总渗流量	V_{a0}	孔隙中空气的起始体积
Q	锤重	V_v	体变
q	单位面积 (长度) 渗流量	v_p	P 波速度
q	广义剪应力	v_s	S 波速度
Q_c	准先期固结压力	V_s	土粒体积
q_c	探头阻力	V_v	孔隙体积
$(Q_c)_r$	应力比	V_w	土中水的体积
Q_0	频率比、扰动力	W	总重量
$(Q_0)_r$	扰率比	w	含水量、单位吸水量
q_u	无侧限抗压强度	w_L	液限
q'_u	重塑土无侧限抗压强度	w_0	风干含水量
R, r	半径	w_p	塑限
Re	雷诺数	w_s	缩限
R	超固结比	W_s	土粒固体重量
$[R]$	承载力	w_{sat}	饱和含水量
R_i	摩阻比	W_w	土中水重
R_v	抗液化强度	w_v	最优含水量
R_c	收缩比	y	位移
S	总沉降量	y_d	动位移
S	折算位移、贯入度	Z, z	深度
S_0	起始饱和度	α	天然坡角、休止角
S_r	饱和度	α	爬坡角、入射角
S_r	残余抗剪强度	α	水平应力集中系数、结构系数
S_i	灵敏度	β	下坡角、坡角 (对水平面)、折射角
S_c	最后饱和度	β	垂直应力集中系数
s	单位面积抗剪强度	γ	土的容重、湿容重
T, t	时间	γ'	土的浮容重
T, t	温度	γ'_d	土的干容重

γ_s	土的饱和容重	σ	应力、总应力、法向应力
γ_{dmax}	最大干容重	σ'	有效法向应力
γ_{dmin}	最小干容重	σ_c	岩块单轴抗压强度
γ_s	土粒容重	σ_d	动应力
γ_{sat}	饱和土容重	σ_0	周围压力、初始应力
γ_v	单位体积容重	σ_r	径向应力
γ_w	水的容重	σ_θ	切向应力
δ	湿陷系数	σ_t	抗拉强度
δ_m	自重湿陷系数	σ_1	岩体水平初始应力
Δ_s	分级湿陷量	σ_v	岩体垂直初始应力
Δ_{so}	总湿陷量	σ_1	大主应力、轴向应力
ε	广义剪应变、应变、线应变	σ'_1	有效大主应力
$\dot{\varepsilon}$	线应变率	σ_2	中主应力
ε_a	轴应变	σ_3	小主应力, 周围压力
ε_d	动应变	σ'_3	有效周围压力
ε_p	轴向应变	$\sigma'_1 - \sigma'_3$	有效主应力差, 偏应力
η	粘滞系数、流变常数	σ'_1 / σ'_3	有效主应力比
θ	角度	$\Delta\sigma$	偏应力
λ	拉梅常数	τ	剪应力、切向应力
λ	形状系数	$\bar{\tau}$	平均剪应力
λ	碰撞恢复系数	τ_f	峰值剪应力, 土的抗剪强度
μ	土的泊松比	τ_R	残余抗剪强度
μ	土的吸收系数	τ_u	不排水抗剪强度
μ	剪胀系数	φ, ϕ	内摩擦角
μ_d	动泊松比	ϕ	相位角
μ_s	静泊松比	φ', ϕ'	有效内摩擦角
ν	泊松比	φ_s	结构面基本强度
ζ	临界阻尼比	ω_n	扰力振动圆频率
ρ	密度	ω_s	系统固有圆频率
ρ'	浸没密度		

第一章 土的物理性质

1.1 土的基本物理性质

1.1.1 土的三相物质组成

土是由固体、液体和气体三相物质组成的散体。固体部分为矿物颗粒，它构成土的骨架。水连同其所溶解的盐类，即所谓水溶液构成土中液相物质。空气、水汽和一些其他气体（如甲烷、氨、硫化氢等）构成土的气相。土的骨架颗粒间存在着许多孔隙，当孔隙中全部被液态的水充满时，则为二相体；如果在土体孔隙中一部分被水占据，而另一部分被气体占据，这时的土体则为三相体系。

上述各相物质的比例关系和它们的组成形式以及相互结合的强弱和状态决定了土的物理力学性状。在工程上为了说明土的物理性质和物理状态，就用某些物理量来表征，这些定量参数称为土的物理性指标。为了清楚地说明土的各种物理性质之间的关系，可将土颗粒、土中水份和气体按其体积或重量的相对关系表示成三相物质图，如图1.1.1所示。图中符号：

V ——土的总体积(cm^3)，包括颗粒、水份和空气的体积；

W ——土的总重量(g)，包括颗粒和水的重量，空气的重量(W_a)可以忽略不计；

V_s ——固体颗粒的净体积(cm^3)；

V_a ——空气的体积(cm^3)；

V_w ——水的体积(cm^3)；

V_v ——孔隙的体积(cm^3)；

W_w ——水的重量(g)；

W_s ——土颗粒（在 105°C 下烘干后的土）的重量(g)。

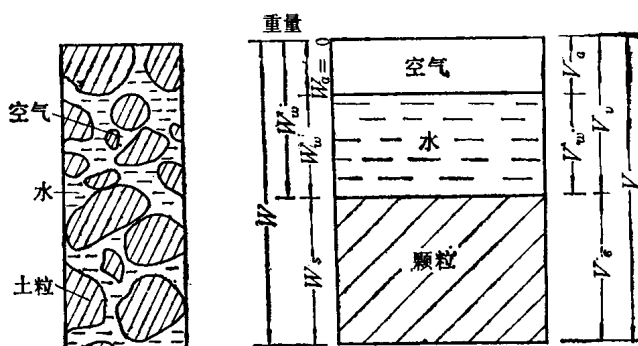


图1.1.1 土的三相示意图

1.1.2 土的基本物理指标

1. 颗粒比重(G_s)

土颗粒（包括矿物结晶成份及有机与无机胶体部分）的重量与同体积 4°C 的蒸馏水的重量比。蒸馏水在 4°C 时每一立方厘米重1克，所以土的比重在数值上即等于土的固体颗粒部分的单位体积重，即：

$$G_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (1.1.1)$$

在实用中，颗粒比重亦可简称为土的比重。

2. 单位容重

单位体积土的重量。按照土所处的不同状态，在工程实用中可分别表示如下：

(1) 天然单位容重(γ) 在天然湿度及结构状态下土单位体积的重量，其值等于土的三相物质总重与其总体积之比，即：

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1.1.2)$$

(2) 骨架单位容重(γ_d) 或称土的干容重, 即假想土处于无水的二相状态时的单位体积重量。在数值上等于土颗粒在105℃下烘干的恒重与土的天然状态总体之比, 即:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad \text{又} \quad W_s = \frac{W}{1+w}$$

$$\text{则} \quad \gamma_d = \frac{W}{(1+w)V} \quad (1.1.3)$$

式中: w ——土的含水量(以百分数表示)

应当说明, 骨架单位容重并非烘干土的单位容重, 后者的体积因干燥收缩, 恒较原有的体积小, 所以此项指标仅能由换算求得而不能直接测定。土体中有孔隙, 故单位体积中固体颗粒的重量常小于土的平均比重, 而干容重实际上仅决定于土孔隙大小, 结构愈紧密的土, 其干容重 γ_d 值越大; 反之, 干容重 γ_d 值越小。

(3) 饱和单位容重(γ_f) 土中孔隙全为水所充满时的单位体积重量。由图 1.1.1 所示关系知:

$$\gamma_f = \frac{W_s + V_v \cdot \gamma_w}{V} \quad (1.1.4)$$

式中, γ_w ——蒸馏水在4℃时的单位容重等于1g/cm³。

所以

$$\gamma_f = \frac{W_s + V_v}{V} \quad (1.1.5)$$

(4) 水下单位容重(γ') 又称浮容重, 因为处于水面以下的土体受到水的浮力作用而减轻其在水中的重量, 故浮容重是土体淹没在自由水面以下的有效容重, 为土饱和时的单位容重减去水的浮力(即与土固体颗粒同体积水的重量), 即:

$$\begin{aligned} \gamma' &= \frac{W_s - V_s \cdot \gamma_w}{V} = \frac{W_s - (V - V_v) \gamma_w}{V} \\ &= \frac{W_s + V_v \cdot \gamma_w}{V} - \gamma_w = \frac{W_s + V_v}{V} - 1 \end{aligned}$$

$$\text{所以,} \quad \gamma' = \gamma_f - 1 \quad (1.1.6)$$

上述指标中, 以天然单位容重为基本数据, 通过计算求得其余指标以表示土在各种情况下所具有的物理意义。在通常情况下, 只提到土的单位容重时, 系指天然单位容重而言。

3. 含水量(w)

土孔隙中所含水的重量与土在温度为100~105℃下烘至恒重时的重量百分比, 即:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100(\%) \quad (1.1.7)$$

通常称土在天然状态时的含水量为天然含水量; 风干状态时的含水量为吸湿含水量; 饱和状态时的含水量为饱和含水量。

4. 孔隙比(e)

土孔隙部分的体积与土固体部分的体积之比, 以小数表示为:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.1.8)$$

5. 孔隙率(n)

土孔隙部分的体积与土总体积之比, 以百分数表示:

$$n = \frac{V_v}{V} \cdot 100(\%) \quad (1.1.9)$$

孔隙比和孔隙率不表示孔隙的大小, 只表示孔隙的总体积。由于孔隙比的变化直接与土的孔隙体积变化成正比, 一般来说, 用孔隙比反映土的紧密状态变化比较合适。砂土的密实程度与孔隙比有如下关系(见表1.1.1)。

砂土的密实度

表1.1.1

土的名称 \ 密实度	密实的	中密的	稍密的	松散的
砾砂, 粗砂, 中砂	$e < 0.60$	$0.60 \leq e \leq 0.75$	$0.75 \leq e \leq 0.85$	$e > 0.85$
细砂 \ 粉砂	$e < 0.70$	$0.70 \leq e \leq 0.85$	$0.85 \leq e \leq 0.95$	$e > 0.95$

6. 饱和度(S_r)

土中水份所占体积与全部孔隙体积之比, 通常以百分数表示, 即:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100(\%) \quad (1.1.10)$$

砂土的干湿状态, 可用饱和度的大小来表示, 见表1.1.2。

砂土湿度的划分

表1.1.2

饱和度 S_r (%)	土的状态
$S_r \leq 50$	稍湿的
$50 \leq S_r \leq 80$	很湿的
$S_r > 80$	饱和的

上述指标就其本身意义而言, 比重、天然单位容重、天然含水量三项为最基本数据, 需要直接测定。其余指标则可按照三相物质的相互关系通过换算求得。土的物理指标变化的一般规律是: 含水量、天然单位容重皆随土层深度增加而增大; 孔隙比和孔隙度则与此相反, 随深度的增加而减小; 而干容重则随孔隙度减少而增大。

1.1.3 土物理指标间的相互关系

1. 天然单位容重(γ)、含水量(w)与土干容重(γ_d)之间的关系

根据1.1.3式可得出:

$$\gamma_d = \frac{W}{(1+w)V} = \frac{\gamma}{1+w} \quad (1.1.11)$$

2. 土的干容重(γ_d)、比重(G_s)与孔隙比(e)、孔隙率(n)之间的关系

求得了土的干容重和颗粒比重, 则可计算孔隙比、孔隙率。其关系如下:

$$e = \frac{1 - \frac{\gamma_d}{G_s}}{\frac{\gamma_d}{G_s}} = \frac{G_s - \gamma_d}{G_s} \cdot \frac{G_s}{\gamma_d} = \frac{G_s - \gamma_d}{\gamma_d} = \frac{G_s}{\gamma_d} - 1 \quad (1.1.12)$$

$$n = \frac{G_s - \gamma_d}{G_s} = 1 - \frac{\gamma_d}{G_s} \quad (1.1.13)$$

又根据(1.1.12)式及(1.1.13)式, 可得出 e 及 n 值的相互关系:

$$e = \frac{n}{100 - n} \quad (1.1.14)$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \cdot 100(\%) \quad (1.1.15)$$

3. 土的比重、含水量、孔隙比或孔隙率与饱和度的相互关系

求得土的孔隙比或孔隙率, 并已知土的比重和含水量, 根据图1.1.1可算得土的饱和度 S_r 。

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{\gamma_w \cdot V_w}{V_v \cdot G_s} \quad (1.1.16)$$

$$\text{通常取 } \gamma_w = 1, \text{ 因此得 } w = \frac{V_w}{V_v \cdot G_s} = \frac{V_s \cdot S_r}{V_v \cdot G_s} = \frac{S_r \cdot e}{G_s}$$

$$\text{即 } S_r = \frac{w \cdot G_s}{e} \quad (1.1.17)$$

$$\text{或 } S_r = \frac{w \cdot G_s (1 - n)}{n} \quad (1.1.18)$$

1.1.4 比重试验

土的比重是提供计算孔隙比、孔隙率、饱和度等物理性指标必不可缺的一项基本数据。这些指标的计算不仅用于直接反映土的天然状态干湿及紧密程度, 同时对于计算及研究土在外力影响下所产生相应的物理变化也具有特别重要的作用^[1]。

1. 测定比重的一般原理及法则

土颗粒比重是土颗粒在100~105℃下烘干至恒重时重量与同体积4℃时蒸馏水重之比。用符号 G_s 表示。在数值上, 土颗粒比重与土颗粒的容重, 即土颗粒的单位体积重量 γ_s 相等。但前者为一因次值, 即:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (1.1.19)$$

式中, γ_w —水的容重(工程计算中常取1g/cm³)。

土的比重是土中各种矿物的比重的平均值(即组成土的矿物颗粒密度的平均值), 其值的大小常与组成土颗粒矿物的种类及其含量有关。砂土的比重约为2.65, 粘土的比重变化范围较大, 常介于2.70至2.80之间, 而以2.65至2.75为最常见。土的比重与土的成份没有固定的关系, 如粘土成份多的土并不说明该土的塑性高比重就一定大。若土中含铁锰矿物较多时, 则比重偏大, 含有有机质或腐殖质较多时, 则比重偏小, 其值可降到2.40以下。

求干土重的方法是将制备好的土在100~105℃下烘干至恒重冷却的干土, 以天平称得其重量, 放于盛有蒸馏水的比重瓶中(比重瓶最好选用如图1.1.2所示的规格型号)。根据其

所排开的液体体积求得。

今设：

W_s ——干土重(g)；

W_1 ——在温度 $T^\circ\text{C}$ 时，比重瓶盛满蒸馏水至一定标记时的总重量(g)；

W_2 ——在温度 $T^\circ\text{C}$ 时，比重瓶装入干土后，再盛满蒸馏水至同一标记时的总重量(g)。

按上述三者之关系，可以想像，将 W_s 克的干土放入盛满蒸馏水之比重瓶内，则必将一部分蒸馏水挤出瓶外。当水中无空气存在时，被挤出的蒸馏水体积必然就等于放入的干土体积，其数值可自三者的重量关系求得：

$$V_v = \frac{W_1 + W_s - W_2}{\gamma_w(T^\circ\text{C})} \quad (1.1.20)$$

与土同体积 4°C 时的蒸馏水重

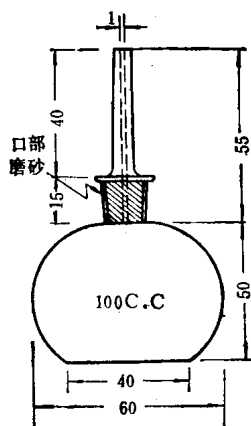
$$W_w = \frac{W_1 + W_s - W_2}{\gamma_w(T^\circ\text{C})} \cdot \gamma_w(4^\circ\text{C}) \quad (1.1.21)$$

所以土的比重为：

$$G_s = \frac{W_s}{W_w} = \frac{W_s}{W_1 + W_s - W_2} \cdot \frac{\gamma_w(T^\circ\text{C})}{\gamma_w(4^\circ\text{C})} \quad (1.1.22)$$

式中 $\gamma_w(T^\circ\text{C})$ ——为 $T^\circ\text{C}$ 时蒸馏水的密度(g/cm^3)；

$\gamma_w(4^\circ\text{C})$ ——为 4°C 时蒸馏水的密度(g/cm^3)。



(单位：毫米)

图1.1.2 比重瓶

但当土中含有水溶盐(如盐渍土等)、亲水性胶质(如蒙脱粘土)及有机质(如泥炭、腐殖土等)时，上述原理即不能适用。因为水溶盐遇水后，尤其在试验时的煮沸过程中，溶解于水而成溶液，故水与盐原有的体积之和大于溶解后盐溶液的体积。同时，水溶盐中原有的结晶水的密度较蒸馏水为小(如 $\text{CaSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 及 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 中的结晶水的密度分别为 0.71 、 0.79 及 $0.85\text{g}/\text{cm}^3$)，且由于土颗粒中水溶盐的溶解使土颗粒所排开水的体积减小，故按上式计算所得比重值随含盐量的增多而递增，见表1.1.3。

不同含盐量的土的比重测定成果比较

表1.1.3

含盐量 %	0.5	1.0	2.0	3.0
比重值增大数值	0.012	0.020	0.039	0.043

又如土中原有的亲水性胶体得到充足的水份后，与水分子在异性电荷作用下产生吸附，使粘结水(吸附水膜)比重相对增大(从 $1.20 \sim 1.75$)，土中粘结水的多少随胶粒含量、矿物成份和吸附各种离子而不同，因而也使原有水与土的体积之和大于水与土作用后的体积。根据一些对含有亲水胶质各种土的实验表明，土与水100克作用后的体积将会缩小 $0.05 \sim 1.15$ 立方厘米，而对含有有机物的土其收缩情况更大(有达 $2.53 \sim 4.72$ 立方厘米)。因此，如用上述公式计算，结果也是偏大。

据上所述，含有水溶盐及亲水性胶体的土(占颗粒矿物部分的 5% 以上时)，其比重的测定应用中性液体(如煤油、苯等代替水)，以防盐类的溶解。这样，上述公式应改为：

$$G_s = \frac{W_s}{W_1 + W_s - W_2} \cdot \frac{\gamma_k(T^\circ\text{C})}{\gamma_w(4^\circ\text{C})} \quad (1.1.23)$$

式中， $\gamma_k(T^\circ\text{C})$ ——在温度 $T^\circ\text{C}$ 时，中性液体的密度；其他符号同前。