

土质试验与试验分析

宋畅 柴寿喜 王沛 等 编著



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

组稿编辑/油俊伟
责任编辑/郝永丽
封面设计/郭 泉
技术设计/郭 婷

土质试验与试验分析

ISBN 978-7-5618-2385-9



9 787561 823859 >

定价： 32.00 元

土质试验与试验分析

宋 畅 柴寿喜 王 沛 等 编著

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS



内 容 提 要

全书以我国现行的国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)为主体,参考了水利部、交通部等有关土工试验的行业标准以及诸多教材和手册中的相关内容,结合编者多年的教学心得和科研、生产中积累的经验编写而成。全书共 20 章,前 4 章分别论述了土质试验的目的和基本内容,汇编了国家和有关行业土的工程分类标准,提出了对土样的要求与管理,介绍了土样和试样制备程序。土质试验部分选择了土的含水率、密度、比重、颗粒分析、界限含水率、相对密度、击实、承载比、渗透、固结、三轴压缩、无侧限抗压强度、直接剪切和静止侧压力系数等 14 项试验,详细地分析介绍了每项试验的目的、原理、方法、仪器设备、结果整理、试验的影响因素、试验中应注意的事项及有关仪器的校验问题。书中附有大量图表、术语、符号和国际单位制的构成及应用。

本书可作为高等院校土木工程、地质工程及相关专业的实验教学用书,亦可供从事岩土工程、地质工程及相关专业的生产技术人员和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土质试验与试验分析/宋畅等编著. —天津:天津大学出版社,2007.1

ISBN 978-7-5618-2385-9

I. 土... II. 宋... III. 土质学—试验②土质学—试验分析(数学) IV. P642.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 008818 号

出版发行 天津大学出版社

出版人 杨欢

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)

电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742

网 址 www.tjup.com

短信网址 发送“天大”至 916088

印 刷 昌黎太阳红彩色印刷有限责任公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 185mm × 260mm

印 张 19.25

字 数 510 千

版 次 2007 年 1 月第 1 版

印 次 2007 年 1 月第 1 次

定 价 32.00 元

数字图书馆
PDG

序

土质试验是工程地质和岩土工程勘察的重要手段之一。其目的是通过试验获取土的物理力学性质指标,作为工程建筑设计中有关计算的参数或科学研究中定量分析研究有关问题的数据。它的应用范围很广泛,对它的要求也很高。很明显,试验结果的准确性直接关系到工程计算的正确程度,影响工程的安全稳定和经济合理性。

土是地壳表层分布最广泛的物质,工程建设最常与土打交道,尤其是土木工程,或以之作地基,或以之作填料,有的甚至建于土体之内。而土体是很复杂的,土体常由不同的土层组成。在工程所辖范围内,由于陆相土层多呈扁豆体,土体在纵向和横向上的变化较大,这就使土质试验复杂化,要在取样时考虑样品的代表性问题。为此土质试验应与勘察的其他手段(测绘、勘探等)结合进行,才能获得合理的试验数据。

作者宋畅多年讲授工程地质学,注重实验室工作,在教学科研中积累了丰富的土质试验经验,操作技术熟练,深切了解影响试验结果准确性的各种因素。与她合著此书的作者也都富有经验,各具所长。所以,这本书既实用又精细,具有以下几方面的特色。

(1)所选的14项试验完全适合土木工程专业教学的需要。这些项目也是土的物理力学性质最基本的内容,对城市建设、房屋建筑、道路桥梁等工程特别适用。在工程地质问题分析和工程计算中常用到这些试验所得的数据。土木工程专业学生能掌握这些试验一般也就够用了,之外的试验,需要时在此基础上再学也不困难。

(2)书中对每一试验项目都阐明了其目的、原理、试验方法、仪器设备、操作步骤、结果整理等,以便了解为什么和怎样做此试验,能取得什么结果,从而提高学生的试验意识和动手能力,这是本书的主要内容。

(3)特别应该指出,书中对每一项试验均有试验分析一节。这一节很重要,很有启发性。说明的内容主要是针对试验中的一些问题、有关的基本概念、不同方法的特点及相关比较、应当注意的特殊事项、仪器设备的校验等,这些内容对试验都是很重要的。其中蕴含着有益的经验,展现了本书的水平,应当仔细学习、体味。

(4)书中1~4章所述内容具有宏观指导意义,特别重要。深入学习能够从中获得宝贵经验和启示,树立正确的概念和观点,理解土的各种性质之间的有机联系、指标换算关系,全面掌握影响试验精度的各种因素,土的分类和鉴别方法,土样采取、管理和制备的要求等。其中土的工程分类方面把几种国家标准和行业标准的分类作为附录,集中放在这里,便于查找、比较,很有必要。

(5)书中所附术语、符号、国际单位制的构成及其应用对试验工作很有用,也是离不开的。

本书是一本优秀教材,符合教学目标,蕴涵着深刻的理论见解和宝贵的实践经验。本书基本概念清楚、内容丰富、层次分明、结构完整、深入浅出,有助于动手能力的培养和启发深入思考,适合土木工程、地质工程等专业教学的需要,也便于生产部门和研究人员应用参考。其方便之处在于内容不多也不少,都是最基本、最必要的,适合应用。内容也是最齐全的,需要的材料都有,一书在手,即可满足一切需要。这样便于应用的书是少见的。

张成恭

2006年4月于北京

前 言

土工试验是测定土的物理、力学、化学和其他工程性质,供岩土工程设计和施工控制使用。土工试验有两种方式,即室内试验和原位试验。前者是对采取的土样进行试验,后者是在现场自然条件下直接进行试验。室内试验包括土的物理、力学、化学和矿物等分析试验(《中国大百科全书·土木工程》,581页)。现行的中华人民共和国国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)规定了32项试验。为了名实相符,本书名用“土质试验”,意指书中的内容仅为土工试验的部分内容。

土质试验,顾名思义,是通过一系列的具体试验设计测定与工程相关的土的性质指标,以满足工程建设的要求。关于土质试验的必要性和作用,张咸恭教授在序中已作了高度概括。当前,世界科技发展日新月异,知识经济、信息化与数字化地球、可持续发展等新理念不断涌现。事实上,从信息化和数字化方面来看,土工试验是人类获取与工程有关的地球信息的基本手段之一,处于基础地位。众所周知,如果基础数据不符合实际,依此进行的计算分析、预测分析是不可能正确的。对于土木工程而言,这方面的事例教训不胜枚举。

土与其他人工材料的本质区别在于:土是自然历史的产物,是多成分、多相系、赋存于一定自然环境中的复杂系统;其结构性、不均一性、不连续性和高度非线性是人类经过长期不断探索对土工程特性的高度概括;同时土工试验过程也是复杂的非线性过程,试验者和试验结果应用者对之应有清晰的认识,这也是土工试验必须遵循一定规范的内在原因。

本书是为土木工程、地质工程等专业编写的实验教学用书,同时兼顾生产和科研的需要,编者有意尝试集教材、规范、手册一体化之模式。本书以我国现行的国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)为主线,并参考了水利部、交通部等相关的行业标准以及诸多教材和手册中的内容。书中体现了编者多年的教学心得及在科研、生产中积累的经验。

全书共20章,编者对所选择的14项土质试验的目的、原理、方法、所用的仪器设备、操作步骤、试验结果整理等内容进行了系统的阐述和介绍。书中附有大量图表,岩土工程术语、符号及国际单位制的构成及其应用等,便于读者参考使用。在每项试验的“试验分析”部分中,对试验的理论依据、试验结果整理中的公式推导、影响试验结果的主要因素分析、试验中应注意的事项、仪器设备的技术要求及校验问题、试验结果的应用、部分试验结果的常见值等内容作了较全面、深入的分析与归纳,并附有试验思考题。编者意在较深刻地阐述测试技术与学科理论的相依关系,并希望在试验结果的一致性和可比性方面与试验工作的标准化、规范化方面有所补益。

本书的编写工作分工如下:前言、第1、8、9章由宋畅编写;第2、3、4、11、12章由柴寿喜编写;第14、15、17章由王沛编写;第13、16、18、19、20章由李雪峰编写;第5、6、7、10章由张淑朝编写,最后由宋畅负责修改、定稿及出版工作。

编者对韩文峰教授对本书的精心审阅表示衷心的感谢。

中国工程地质学奠基人之一、著名的工程地质学家、教育家张咸恭先生对本书悉心指导并为之作序,编者表示特别感谢。

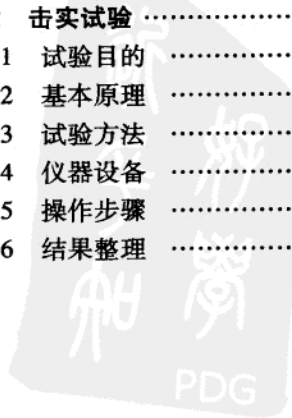
本书初稿已在兰州大学地质工程及天津城市建设学院土木工程专业试用三年,但因编者学术水平有限,错误和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者 宋畅
2006年5月于天津

目 录

第1章 土质试验的目的和基本内容	(1)
1.1 土质试验的目的	(1)
1.2 土质试验的基本内容	(1)
1.3 室内土质试验的局限性	(8)
第2章 土的工程分类	(10)
2.1 土的工程分类的基本类型	(10)
2.2 土的工程分类的一般原则和形式	(10)
2.3 国外土分类的简况	(10)
2.4 我国土的工程分类	(11)
附录 a 中华人民共和国国家标准《土的分类标准》(GBJ 145—90)	(12)
附录 b 中华人民共和国国家标准《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001) 土的分类和鉴定	(19)
附录 c 中华人民共和国国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002) 土的分类	(24)
附录 d 中华人民共和国行业标准《公路土工试验规程》(JTJ 051—93) 土的工程分类	(26)
附录 e 中华人民共和国行业标准《铁路工程岩土分类标准》(TB 10077—2001 / J 123—2001)	(35)
附录 f 中华人民共和国行业标准《土工试验规程》(SL 237—1999) 土的工程分类 (SL 23—001—1999)	(46)
第3章 土样的要求与管理	(53)
3.1 采样要求	(53)
3.2 土样的包装与运输	(54)
3.3 土样验收	(54)
3.4 土样管理	(55)
第4章 土样和试样制备	(57)
4.1 土样和试样制备所需的仪器设备	(57)
4.2 扰动土样预备程序	(58)
4.3 扰动土试样制备	(59)
4.4 原状土试样制备	(61)
4.5 试样饱和	(62)
第5章 含水率试验	(64)
5.1 试验目的	(64)
5.2 基本原理	(64)

5.3	试验方法	(64)
5.4	含水率试验分析	(72)
第6章	密度试验	(76)
6.1	试验目的	(76)
6.2	基本原理	(76)
6.3	试验方法	(76)
6.4	密度试验分析	(84)
	附录 g 标准砂密度测定	(87)
第7章	土粒比重试验	(88)
7.1	试验目的	(88)
7.2	基本原理	(88)
7.3	试验方法	(88)
7.4	最终结果整理	(93)
7.5	土粒比重试验分析	(95)
	附录 h 比重瓶校准	(97)
第8章	颗粒分析试验	(98)
8.1	试验目的	(98)
8.2	基本原理	(98)
8.3	试验方法	(98)
8.4	颗粒分析试验分析	(114)
	附录 i 密度计校正	(122)
第9章	界限含水率试验	(125)
9.1	试验目的	(126)
9.2	基本原理	(126)
9.3	试验方法	(126)
9.4	界限含水率试验分析	(134)
	附录 j 碟式仪校准	(140)
第10章	相对密度试验	(141)
10.1	试验目的	(141)
10.2	基本原理	(141)
10.3	试验方法	(142)
10.4	结果整理	(144)
10.5	相对密度试验分析	(145)
第11章	击实试验	(148)
11.1	试验目的	(148)
11.2	基本原理	(148)
11.3	试验方法	(149)
11.4	仪器设备	(149)
11.5	操作步骤	(150)
11.6	结果整理	(151)



11.7	击实试验分析	(152)
第12章	承载比试验	(160)
12.1	试验目的	(160)
12.2	基本原理	(160)
12.3	试验方法	(160)
12.4	仪器设备	(161)
12.5	操作步骤	(162)
12.6	结果整理	(163)
12.7	承载比试验分析	(164)
第13章	渗透试验	(169)
13.1	试验目的	(169)
13.2	基本原理	(169)
13.3	试验方法	(170)
13.4	渗透试验分析	(179)
第14章	固结试验	(189)
14.1	试验目的	(189)
14.2	基本原理	(190)
14.3	试验方法	(190)
14.4	仪器设备	(190)
14.5	操作步骤	(191)
14.6	结果整理	(193)
14.7	固结试验分析	(200)
附录 k	固结仪变形校正	(216)
第15章	三轴压缩试验	(217)
15.1	试验目的	(217)
15.2	基本原理	(217)
15.3	试验方法	(218)
15.4	仪器设备	(219)
15.5	操作步骤	(222)
15.6	结果整理	(227)
15.7	三轴压缩试验分析	(234)
第16章	无侧限抗压强度试验	(255)
16.1	试验目的	(255)
16.2	基本原理	(255)
16.3	试验方法	(256)
16.4	仪器设备	(256)
16.5	操作步骤	(257)
16.6	结果整理	(257)
16.7	无侧限抗压强度试验分析	(258)
第17章	直接剪切试验	(263)

17.1	试验目的	(263)
17.2	基本原理	(263)
17.3	试验方法	(263)
17.4	仪器设备	(264)
17.5	操作步骤	(265)
17.6	结果整理	(266)
17.7	直接剪切试验分析	(267)
第 18 章	静止侧压力系数试验	(278)
18.1	试验目的	(278)
18.2	基本原理	(278)
18.3	试验方法	(278)
18.4	仪器设备	(279)
18.5	操作步骤	(279)
18.6	结果整理	(280)
18.7	静止侧压力系数试验分析	(280)
第 19 章	术语、符号	(284)
19.1	术语	(284)
19.2	符号	(292)
第 20 章	国际单位制的构成及其应用	(293)
	参考文献	(298)



第 1 章 土质试验的目的和基本内容

1.1 土质试验的目的

地壳表面分布着的土是岩石圈表层在漫长的地质历史中经受各种复杂的地质作用(包括人类活动)而形成的地质体。我国大部分地区的松软土形成于第四纪时期。土是由固体相、液体相、气体相三相物质组成的。其中固体相是由大小不等、形状不同、成分不一的岩屑或矿物颗粒及有机质组成,是组成土的核心部分;液体相是指土中的液态水,在负温条件下呈固态冰出现,由于其中常含有溶解物质,所以应称为土中溶液或孔隙溶液;气体相即土中的气体。土粒聚集在一起,粒间形成孔隙,成为液体相和气体相物质的储存场所和传导通道,所以土是多矿物组成的一个非均质、多相、分散、多孔的系统。在该系统中,上述三相物质不仅各相之间,而且在某一相(如固体相)内的不同部分的物质都是不相同的。由于三相间比例关系以及相邻各相间相互作用,使其界面上出现各种物理化学现象,如吸附、表面张力、摩擦、分散、黏聚、离子交换,等等,由此产生和影响土的各种物理力学性质,例如孔隙性、膨胀性、收缩性、可塑性、渗透性、压缩性、抗剪性……

岩石圈表层土是经受各种复杂的地质作用后形成的。由于形成土的母岩成分的差异以及经受各种不同的地质营力作用,导致土的成因类型(残积、坡积、洪积、冲积、淤积、冰积、风积),物质组成(粒度成分、矿物成分和化学成分),结构构造(微观的矿物排列形式和宏观土的组合特征)以及物理、化学状态(干湿程度、密实程度、孔隙溶液成分、浓度及 pH 值)也不相同。

综上所述,由于土的分散性特征和复杂的成因,使土具有不同的物理力学性质。

在工程建设中,土往往作为不同的研究对象。例如,在土层上修建房屋、桥梁、道路、堤坝时,土是用来承受建筑物传来的荷载,这时土是用来作为地基;路堤、土坝等土工构筑物,土是用来作为建筑材料;而隧道、涵洞及地下建筑等,土是用来作为建筑物周围的介质或环境。

在工程建设中,为了保证工程的经济合理、安全使用,必须要摸清和正确评价土的物理、力学性质,为建筑物地基的设计和施工提供可靠的依据和参数,这是土质试验的主要目的。

1.2 土质试验的基本内容

实验室常规的土质试验内容分为两大类。

1) 土的物理性质试验 包括含水率试验、密度试验、土粒比重试验、颗粒分析试验、界限含水率试验、砂的相对密度试验等。这些试验主要用于土的工程分类及判断土的状态。

2) 土的力学性质试验 包括击实试验、承载比试验、渗透试验、固结试验、三轴压缩试验、无侧限抗压强度试验、直接剪切试验、静止侧压力系数试验等,主要目的是直接提供设计参数,

如渗透系数、压缩系数、固结系数、抗剪强度指标、无侧限抗压强度及灵敏度、静止侧压力系数等。

1.2.1 土的基本物理性质指标

土质试验所获得的物理性质指标一部分通过试验仪器直接测定,属于必测指标;另一部分通过必测指标换算求得。

(1) 直接测定的指标

直接测定的基本物理性质指标见表 1-1。

表 1-1 直接测定的基本物理性质指标

指标名称	符号	单位	物理意义	试验项目及方法	取土要求
含水率	w	%	土中水的质量与土粒质量之比 $w = \frac{m_w}{m_d} \times 100\%$	含水率试验: 烘干法(温度 105℃ ~ 110℃) 酒精燃烧法 比重法 碳化钙气压法	保持天然湿度
比重	G_s	—	土粒质量与同体积 4℃ 时水的质量之比 $G_s = \frac{m_d}{V_d \cdot \rho_w}$ (ρ_w 为 4℃ 时纯水的密度)	比重试验: 比重瓶法 浮称法 虹吸筒法	扰动土
质量密度 (密度)	ρ	g/cm^3	土的总质量与其体积之比,即单位体积的质量 $\rho = \frac{m}{V}$	密度试验: 环刀法 蜡封法 灌砂法 灌水法	保持天然湿度和密度
重力密度 (重度)	γ	kN/m^3	土的总重力与其体积之比,即质量密度乘以重力加速度 $\gamma = g \times \rho = 9.8 \times \rho \approx 10 \times \rho$		

(2) 计算求得的指标

计算求得的基本物理性质指标见表 1-2。各指标的换算公式,见表 1-3。

(3) 饱和状态下及地下水位以下土的基本物理性质指标

① 饱和状态下土的孔隙全部为水所充填,即饱和度 $S_r = 100\%$,此时土的含水率和土的密度分别称为饱和含水率和饱和密度,即

$$w_{sr} = \frac{e}{G_s} \times 100\% = \frac{G_s \rho_w - \rho_d}{G_s \rho_d} \times 100\% = \frac{G_s \rho_w - \rho_{sr}}{G_s (\rho_{sr} - \rho_w)} \times 100\% \quad (1-1)$$

$$\rho_{sr} = \frac{G_s + e}{1 + e} \cdot \rho_w = \frac{G_s (1 + 0.01 w_{sr})}{0.01 w_{sr} G_s + 1} \cdot \rho_w \quad (1-2)$$

式中: w_{sr} ——饱和含水率, %;

ρ_{sr} ——饱和密度, g/cm^3 ;

G_s ——土粒比重;

表 1-2 计算求得的基本物理性质指标

已知指标	所 求 指 标						
	含水率 $w/\%$	比重 G_s	密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	干密度 $\rho_d/g \cdot cm^{-3}$	孔隙比 e	孔隙率 $n/\%$	饱和度 $S_r/\%$
G_s, φ, e	$\frac{100\rho(1+e)}{G_s\rho_w} - 100$			$\frac{G_s\rho_w}{1+e}$		$\frac{100e}{1+e}$	$\frac{(1+e)\rho - G_s\rho_w}{\varphi\rho_w} \times 100$
G_s, φ, n	$\frac{100\rho}{G_s\rho_w(1-0.01n)} - 100$			$(1-0.01n)G_s\rho_w$	$\frac{n}{100-n}$		$\frac{100\rho - (100-n)G_s\rho_w}{0.01n\rho_w}$
G_s, φ, S_r	$\frac{S_r(G_s\rho_w - \rho)}{G_s(\rho - 0.01S_r\rho_w)}$			$\frac{G_s(\rho - 0.01S_r\rho_w)}{G_s - 0.01S_r}$	$\frac{G_s\rho_w - \rho}{\rho - 0.01S_r\rho_w}$	$\frac{100(G_s - \rho_w - \rho)}{G_s - 0.01S_r}$	
G_s, φ_d, S_r	$\frac{S_r(G_s\rho_w - \rho_d)}{G_s\rho_d}$		$\frac{0.01S_r(G_s\rho_w - \rho_d)}{G_s} + \rho_d$		$\frac{G_s\rho_w}{\rho_d} - 1$	$\frac{100\rho_d}{100 - G_s\rho_w}$	
G_s, e, S_r	$\frac{eS_r}{G_s}$		$\frac{(G_s + 0.01eS_r)\rho_w}{1+e}$	$\frac{G_s\rho_w}{1+e}$		$\frac{100e}{1+e}$	
G_s, n, S_r	$\frac{nS_r}{(100-n)G_s}$		$\frac{0.01nS_r\rho_w + (100-n)G_s\rho_w}{100}$	$(1-0.01n)G_s\rho_w$	$\frac{n}{100-n}$		
ρ, φ_d, e	$\frac{100\rho}{\rho_d} - 100$	$\frac{(1+e)\rho_d}{\rho_w}$				$\frac{100e}{1+e}$	$\frac{100(\rho - \rho_d)(1+e)}{\varphi_w}$
ρ, φ_d, n	$\frac{100\rho}{\rho_d} - 100$	$\frac{100\rho_d}{(100-n)\rho_w}$			$\frac{n}{100-n}$		$\frac{100(\rho - \rho_d)}{0.01n\rho_w}$
ρ, φ_d, S_r	$\frac{100\rho}{\rho_d} - 100$	$\frac{S_r\rho_d}{S_r\rho_w - 100(\rho - \rho_d)}$			$\frac{\rho - \rho_d}{0.01S_r\rho_w - \rho + \rho_d}$	$\frac{100(\rho - \rho_d)}{0.01S_r}$	
ρ, e, S_r	$\frac{eS_r\rho_w}{\rho(1+e)} - 0.01eS_r$	$\frac{(1+e)\rho - 0.01eS_r}{\rho_w}$		$\rho - \frac{0.01eS_r\rho_w}{1+e}$		$\frac{100e}{1+e}$	
ρ, n, S_r	$\frac{nS_r\rho_w}{100\rho - 0.01nS_r\rho_w}$	$\frac{100\rho - 0.01nS_r\rho_w}{(100-n)\rho_w}$		$\rho - \frac{0.01nS_r\rho_w}{100}$	$\frac{n}{100-n}$		
ρ_d, e, S_r	$\frac{eS_r\rho_w}{(1+e)\rho_d}$	$\frac{(1+e)\rho_d}{\rho_w}$	$\frac{0.01eS_r\rho_w}{1+e} + \rho_d$			$\frac{100}{1+e}$	
ρ_d, n, S_r	$\frac{0.01nS_r\rho_w}{\rho_d}$	$\frac{100\rho_d}{(100-n)\rho_w}$	$\frac{0.01nS_r\rho_w}{100} + \rho_d$		$\frac{n}{100-n}$		

表 1-3 土的基本物理性质指标换算公式

已知指标	所求指标						
	含水率 $w/\%$	比重 G_s	密度 $\rho' \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	干密度 $\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比 e	孔隙率 $n/\%$	饱和度 $S_r/\%$
w, G_s, ρ			$\frac{\rho}{1+0.01w}$	$\frac{G_s \rho_w}{1+0.01w}$	$\frac{G_s \rho_w (1+0.01w)}{\rho} - 1$	$100 \frac{100p}{G_s \rho_w (1+0.01w)}$	$\frac{w G_s \rho}{G_s \rho_w (1+0.01w) - \rho}$
w, G_s, ρ_d			$(1+0.01w) \rho_d$	$\frac{G_s \rho_w (1+0.01w)}{1+e}$	$\frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1$	$100 - \frac{100p_d}{G_s \rho_w}$	$\frac{w G_s \rho_d}{G_s \rho_w - \rho_d}$
w, G_s, e				$\frac{G_s \rho_w}{1+e}$		$\frac{100e}{1+e}$	$\frac{w G_s}{e}$
w, G_s, n			$(1+0.01w)(1-0.01n) G_s \rho_w$		$\frac{n}{100-n}$	$\frac{100w G_s}{(100-n)w G_s}$	$\frac{(100-n)w G_s}{n}$
w, G_s, S_r			$\frac{S_r G_s \rho_w (1+0.01w)}{w G_s + S_r}$		$\frac{w G_s}{S_r}$	$\frac{100w G_s}{w G_s + S_r}$	
w, ρ, e		$\frac{(1+e)\rho}{(1+0.01w)\rho_w}$		$\frac{\rho}{1+0.01w}$		$\frac{100e}{1+e}$	$\frac{w(1+e)\rho}{(1+0.01w)\rho_w}$
w, ρ, n		$\frac{100p}{(1+0.01w)(100-n)\rho_w}$		$\frac{\rho}{1+0.01w}$	$\frac{n}{100-n}$	$\frac{100wp}{S_r \rho_w (1+0.01w)}$	$\frac{100wp}{n(1+0.01w)\rho_w}$
w, ρ, S_r		$\frac{S_r \rho}{S_r \rho_w (1+w) - wp}$		$\frac{\rho}{1+0.01w}$	$\frac{wp}{S_r \rho_w (1+0.01w) - wp}$	$\frac{100wp}{S_r \rho_w (1+0.01w)}$	
w, ρ_d, e		$\frac{(1+e)\rho_d}{\rho_w}$	$(1+0.01w)\rho_d$			$\frac{100e}{1+e}$	$\frac{w(1+e)\rho_d}{\rho_w}$
w, ρ_d, n		$\frac{100p_d}{(100-n)\rho_w}$	$(1+0.01w)\rho_d$		$\frac{n}{100-n}$	$\frac{100wp_d}{S_r \rho_w}$	$\frac{100wp_d}{np_w}$
w, ρ_d, S_r		$\frac{S_r \rho_d}{S_r \rho_w - wp_d}$	$(1+0.01w)\rho_d$		$\frac{wp_d}{S_r \rho_w - wp_d}$	$\frac{100wp_d}{S_r \rho_w}$	
w, e, S_r		$\frac{e S_r}{w}$	$\frac{e S_r (1+0.01w)\rho_w}{(1+e)w}$			$\frac{100e}{1+e}$	
w, n, S_r		$\frac{n S_r}{(100-n)w}$	$\frac{n S_r (1+0.01w)\rho_w}{100w}$		$\frac{n}{100-n}$	$\frac{100p_d}{100 - G_s \rho_w}$	$\frac{100(\rho - \rho_d) G_s}{G_s \rho_w - \rho_d}$
G_s, ρ, ρ_d	$\frac{100p}{\rho_d} - 100$				$\frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1$	$100 - \frac{100p_d}{G_s \rho_w}$	$\frac{100(\rho - \rho_d) G_s}{G_s \rho_w - \rho_d}$

e ——孔隙比；

ρ_d ——干密度, g/cm^3 ；

ρ_w ——4℃时纯水的密度, g/cm^3 。

② 地下水位以下的土, 颗粒受到水的浮力作用, 其密度称为水下浮密度 ρ' , 即

$$\rho' = \frac{\rho_d(G_s - 1)}{G_s} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \cdot \rho_w \quad (1-3)$$

(4) 黏性土的可塑性指标

① 直接测定的指标见表 1-4。

表 1-4 直接测定的可塑性指标

指标名称	符号	单位	物理意义	试验方法	取土要求
液限	w_L	%	土由可塑状态过渡到流动状态的界限含水率	液塑限联合测定法 碟式仪液限测定法	扰动土
塑限	w_P	%	土由可塑状态过渡到半固体状态的界限含水率	液塑限联合测定法 滚搓法	扰动土

② 计算求得的指标见表 1-5。

表 1-5 计算求得的可塑性指标

指标名称	符号	物理意义	计算公式
塑性指数	I_P	土呈可塑状态时, 含水率的变化范围代表土的可塑程度	$I_P = w_L - w_P$
液性指数	I_L	土抵抗外力的量度, 其值越大, 抵抗外力的能力越小	$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P}$
活性指数	A	活性指数越大, 黏粒对土的塑性影响越大	$A = \frac{I_P}{P_{0.002}}$

注: $P_{0.002}$ 为土中粒径小于 0.002 mm 的颗粒含量占总质量的百分数。

(5) 粒度组成及砂土的密度指标

① 直接测定的指标见表 1-6。

表 1-6 直接测定的粒度组成和砂土密度指标

指标名称	符号	单位	物理意义	试验方法
粒度组成	—	%	土中各种粒径范围的粒组的相对比例, 用占总土质量的百分数表示	筛分法、密度计法、移液管法、自动粒度分析仪法
最大干密度	ρ_{dmax}	g/cm^3	砂在最紧密状态下的干密度	振动锤击法
最小干密度	ρ_{dmin}	g/cm^3	砂在最松散状态下的干密度	漏斗量筒法

② 计算求得的指标见表 1-7。

表 1-7 计算求得的粒度组成指标

指标名称	符号	单位	物 理 意 义	求得方法
限制粒径	d_{60}	mm	颗粒大小分布曲线上小于该粒径的土含量占总土质量 60% 的粒径	从颗粒大小分布曲线上求得
平均粒径	d_{50}		颗粒大小分布曲线上小于该粒径的土含量占总土质量 50% 的粒径	
中间粒径	d_{30}		颗粒大小分布曲线上小于该粒径的土含量占总土质量 30% 的粒径	
有效粒径	d_{10}		颗粒大小分布曲线上小于该粒径的土含量占总土质量 10% 的粒径	
不均匀系数	C_u	—	反映土颗粒粒径分布的均匀性,其值越大,越不均匀	$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$
曲率系数 (级配系数)	C_c	—	反映颗粒大小分布曲线的形态,表示某种粒组是否缺失	$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}}$
砂的相对密度	D_r	—	反映砂土的紧密程度	$D_r = \frac{\rho_{dmax}(\rho_d - \rho_{dmin})}{\rho_d(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})}$

注:公式中 ρ_d 为砂的天然干密度。

1.2.2 土的力学性质指标

(1) 土的击实性指标

在标准击实方法下,测定土的最大干密度 ρ_{dmax} 和最优含水率 w_{opt} 。测定方法见表 1-8。

表 1-8 击实性指标室内测定法

适用的土类	试验方法	单位体积击实功	取土要求
最大粒径 < 5 mm 的黏性土	轻型击实	592.2 kJ/m ³	扰动土
最大粒径 ≤ 20 mm 的土、三层击实 ≤ 40 mm 的土	重型击实	2 684.9 kJ/m ³	扰动土

(2) 土的承载比(CBR)指标

通过室内承载比试验,测定路面基层和底层材料以及各种土料当贯入柱($\phi 50 \times 100$ mm)贯入达到 2.5 mm 或 5 mm 时的单位压力,从而得出与标准荷载强度的比值($CBR_{2.5}$ 和 $CBR_{5.0}$)。这是反映路基路面强度的指标。

(3) 土的渗透性指标

通过室内渗透试验,测定渗透系数 k 。测定方法见表 1-9。

表 1-9 渗透系数的室内测定法

土 的 名 称	试 验 方 法
细粒土	变水头试验(南 55 型试验法、加荷式渗透法)
粗粒土	常水头试验

(4) 土的压缩性指标

土的压缩性指标是指土在外力作用下变形的特性指标。

通过固结试验,可提供压缩系数 a 、压缩模量 E_s 、体积压缩系数 m_v 、前期固结压力 P_c 、压缩

指数 C_c 、回弹指数 C_s 、固结系数 C_v 等指标。测定方法见表 1-10。

表 1-10 固结试验提供的指标

试验方法	提供的指标	符号	单位	适用的土类
常规固结试验 快速固结试验	压缩系数	a	MPa^{-1}	饱和土、非饱和土
	压缩模量	E_s	MPa	饱和土、非饱和土
	体积压缩系数	m_v	MPa^{-1}	饱和土、非饱和土
	前期固结压力	P_c	kPa	饱和土、非饱和土
	压缩指数	C_c	—	饱和土、非饱和土
	回弹指数	C_s	—	饱和土、非饱和土
常规固结试验	固结系数	C_v	cm^2/s	饱和黏性土
	次固结系数	C_α	—	饱和黏性土

(5) 土的抗剪性指标

土的抗剪性指标即为土的抗剪强度指标。依据库仑定律、有效应力原理和莫尔-库仑破坏准则来测定土的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 。具体测定方法如下。

① 按试验仪器和工作原理而分的剪切试验方法见表 1-11。

表 1-11 不同试验仪器、不同工作原理的剪切试验方法

试验方法	优点	缺点
直接剪切试验	① 试样厚度薄、固结快、试验历时短 ② 剪切盒刚度大, 试样几乎没有侧向膨胀的可能, 可以直接计算出试验过程中试样体积的变化 ③ 仪器构造简单, 操作方便	① 剪切面不一定是试样的抗剪能力最弱的面 ② 剪切面上的应力分布不均匀, 而且受剪面的面积越来越小 ③ 不能严格控制排水条件, 无法测量剪切过程中孔隙水压力的变化
三轴压缩试验	① 试验过程中能够严格控制试样的排水条件, 能够测定孔隙水压力的变化和体积的变化 ② 剪切面预先不固定 ③ 应力状态比较明确, 可以控制大小主应力 ④ 除抗剪强度指标之外还能测定其他指标	① 操作比较复杂 ② 所需的试样较多 ③ 主应力方向固定不变, 而且是在 $\sigma_2 = \sigma_3$ 轴对称条件下进行试验, 不能模拟广泛的应力状态

② 按不同排水条件而分的剪切试验方法见表 1-12。

表 1-12 不同排水条件下的剪切试验方法

试验方法	适用范围
快剪(不固结不排水剪)	加荷速度快, 排水条件差, 如斜坡稳定性及厚度很大的饱和黏土地基稳定分析等
固结快剪(固结不排水剪)	施工期间具有一定的固结作用, 如一般建筑物地基的稳定分析
慢剪(固结排水剪)	加荷速度慢, 排水条件好, 施工期长, 如透水性较好的低塑性土以及在软弱饱和土层上的高填方分层控制填筑等