

21 世纪应用型人才培养规划教材

高等职业技术教育“十二五”规划教材——土木工程类

土工试验与检测

主 编 庞旭卿

主 审 胡再强

西南交通大学出版社

·成 都·

图书在版编目 (C I P) 数据

土工试验与检测 / 庞旭卿主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2014.7

高等职业技术教育“十二五”规划教材. 土木工程类
ISBN 978-7-5643-3206-8

I. ①土... II. ①庞... III. ①土工试验—高等职业教育—教材 IV. ①TU41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 161448 号

高等职业技术教育“十二五”规划教材——土木工程类

土工试验与检测

主编 庞旭卿

责任编辑	孟苏成
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	11
字 数	273 千字
版 次	2014 年 7 月第 1 版
印 次	2014 年 7 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-3206-8
定 价	28.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

前 言

随着我国大型土木工程建设项目不断增多，建设规模不断加大，怎样有效地开展土工试验与检测，更好地为工程的设计和施工服务，对于工程项目建设变得尤为重要。为此，编者从工程实用性出发，全面系统地介绍了土工试验与检测方法的原理、技术要求和成果应用等。本书可作为高等院校尤其是高职高专院校土木工程类专业进行实践教学培养学生创新精神和实践能力的教材，也可作为从事土木工程建设的技术人员进行培训或自主学习的参考资料。

根据土木工程施工与检测技术的发展对工程施工单位应用型人才的实际要求，将土力学的理论知识与工地现场的实际工作任务相结合，将涉及“土的物理性质指标”、“土的渗透性”、“土中应力及强度的计算”、“土的变形计算”、“土工试验方法标准”、“地基处理”、“土工试验与原位测试”等多方面内容实施重组与优化，按照由浅入深循序渐进的认知规律，将课程内容组织成碎石类土地基土工试验与检测、砂类土地基土工试验与检测、黏性土地基土工试验与检测、软土地基土工试验与检测、黄土地基土工试验与检测、高速铁路路基土工试验与检测等 6 个学习情境。每个学习情境内容分为土的认识、土工试验、地基检测、应用案例等 4 个层次，真正实现了理论与实践的有机融合。本书体现以学生自主学习为主，融入多种学习素材及教学手段，突出专业技术知识的实用性、综合性和先进性，以培养学生进行工程试验检测以及土的工程应用等工作能力。

本书由庞旭卿（陕西铁路工程职业技术学院副教授，西安理工大学博士）主编，胡再强（西安理工大学教授，博士生导师）主审。庞旭卿负责编写了学习情境 1、3、4、5、6，陕西铁路工程职业技术学院郭亚宇负责编写了学习情境 2。全书由庞旭卿统稿。在本书编写过程中，得到了陕西铁路工程职业技术学院教务处、轨道工程系，西安理工大学岩土所，西安地铁有限责任公司高级工程师温克兵及同仁们的大力帮助和支持，在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中引用了许多专家、学者在教学、科研、实验中积累的资料以及有关的规范规程条文，在此一并表示感谢。由于编者水平所限，加之时间仓促，不妥之处在所难免，敬请各位读者批评指正。

编 者

2014 年 6 月

目 录

学习情境 1 碎石类地基土工试验与检测	1
碎石类土的认知	1
典型工作任务 1 碎石类土颗粒分析试验	3
典型工作任务 2 碎石类土地基静力载荷试验检测	17
典型工作任务 3 碎石类土地基土工试验与检测应用案例	30
学习情境 2 砂类土地基土工试验与检测	33
砂类土的认知	33
典型工作任务 1 砂类土地基渗透试验	35
典型工作任务 2 圆锥动力触探和标准贯入试验	39
典型工作任务 3 砂类土地基土工试验与检测应用案例	54
学习情境 3 黏性土地基土工试验与检测	57
黏性土的认知	57
典型工作任务 1 黏性土液、塑限联合测定试验	58
典型工作任务 2 黏性土直接剪切试验	64
典型工作任务 3 黏性土地基土工试验与检测应用案例	77
学习情境 4 软土地基土工试验与检测	80
软土的认知	80
典型工作任务 1 软土固结试验	81
典型工作任务 2 软土地基十字板剪切试验检测	93
典型工作任务 3 软土地基土工试验与检测应用案例	96
学习情境 5 黄土地基土工试验与检测	99
黄土的认知	99
典型工作任务 1 黄土湿陷性试验	100
典型工作任务 2 黄土地基静力触探试验检测	105
典型工作任务 3 黄土地基土工试验与检测应用案例	118
学习情境 6 高速铁路路基土工试验与检测	122
典型工作任务 1 高速铁路路基填料及压实标准	122
典型工作任务 2 地基土的击（压）实试验	127
典型工作任务 3 路基压实质量试验检测方法	133
典型工作任务 4 压实地基土工试验与检测应用案例	160
参考文献	168

学习情境 1 碎石类地基土工试验与检测



情境描述

本学习情境主要培养学生对土的工程类别、碎石类土的工程特性的认知，掌握土的基本指标的测定方法及颗粒分析试验的操作步骤、数据收集及成果的整理分析。同时了解地基静力载荷试验检测方法的工作原理及其优缺点，掌握其操作步骤，并能正确地进行数据采集、试验成果的整理分析。



拟实现的教学目标

1. 能力目标

- 具备沟通协调的能力并严格遵循规范作业；
- 具备根据收集的试验数据或出具的试验报告提出相关专业问题的能力；
- 具备试验过程中及时获取信息、进行判断、运用理论知识的能力；
- 具备规范进行颗粒分析试验与静力载荷试验检测的能力。

2. 知识目标

- 了解土的工程类别及碎石类土的工程特征；
- 掌握颗粒分析试验的操作步骤并能对试验成果进行整理分析；
- 掌握静力载荷试验检测的工作原理、仪器组成及其特点；

- 掌握静力载荷试验检测的操作步骤并能对试验成果进行整理分析；
- 了解颗粒分析试验、静力载荷试验检测方法的注意事项；
- 了解试验与检测仪器设备的维护与保养办法。

碎石类土的认知

《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10002.5—2005) 将土分为碎石土、砂土、黏性土及特殊土等。碎石土是指粒径大于 2 mm 的颗粒质量超过总质量 50% 的土。分类见表 1-1。

表 1-1 碎石土的名称

土的名称	颗粒形状	土的颗粒级配
漂石	浑圆或圆棱状为主	粒径大于 200 mm 的颗粒超过全重 50%
块石	尖棱状为主	
卵石	浑圆或圆棱状为主	粒径大于 60 mm 的颗粒超过全重 50%
碎石	尖棱状为主	
圆砾	浑圆或圆棱状为主	粒径大于 20 mm 的颗粒超过全重 50%
角砾	尖棱状为主	

注：碎石土定名时，应根据粒径分组，由大到小以最先符合者确定。

《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007) 将土分为碎石土、砂土、黏性土及特殊土等。碎石土是指粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土。分类见表 1-2。

表 1-2 碎石土分类

土的名称	颗粒形状	颗粒级配
漂石	圆形及亚圆形为主	粒径大于 200 mm 的颗粒超过全重 50%
块石	棱角形为主	
卵石	圆形及亚圆形为主	粒径大于 20 mm 的颗粒超过全重 50%
砾石	棱角形为主	
圆砾	圆形及亚圆形为主	粒径大于 2 mm 的颗粒超过全重 50%
角砾	棱角形为主	

注：定名时应根据粒径分组由大到小以最先符合者确定。

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)将建筑地基的岩土分为岩石、碎石土、砂土、粉土、黏性土和人工填土。碎石土为粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土。碎石土可按表 1-3 分为漂石、块石、卵石、碎石、圆砾和角砾。

表 1-3 碎石土的分类

土的名称	颗粒形状	粒组含量
漂石	圆形及亚圆形为主	粒径大于 200 mm 的颗粒含量超过全重 50%
块石	棱角形为主	
卵石	圆形及亚圆形为主	粒径大于 20 mm 的颗粒含量超过全重 50%
碎石	棱角形为主	
圆砾	圆形及亚圆形为主	粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过全重 50%
角砾	棱角形为主	

注：分类时应根据粒组含量栏从上到下以最先符合者确定。

典型工作任务 1 碎石类土颗粒分析试验

一、工作任务

通过碎石类土颗粒分析试验知识的学习，能够承担以下工作任务：

- (1) 掌握土的组成与结构构造特征；
- (2) 掌握土的基本指标的测定办法；
- (3) 掌握颗粒分析试验的操作步骤、数据收集及成果的整理分析。

二、相关配套知识

(一) 土的组成

土一般是由固体颗粒（土粒）和颗粒之间孔隙中的水和气体所组成，可以把土看成是一种三相分散系，即由固相、液相和气相所组成的分散体系。只有在特殊情况下才由两相组成：当土粒间的孔隙全部被水充满时，就形成了饱和土，由固相和液相组成；当土粒间的孔隙中只有空气时，就形成了干土，由固相和气相组成。

1. 土粒

土粒是指土中的固体颗粒，它构成了土体的骨架，其矿物成分、形状和大小是决定土的工程性质的主要因素。

1) 土粒的矿物成分

土中颗粒的矿物成分包括原生矿物、次生矿物和腐殖质 3 部分。

2) 粒径和粒组

天然土都是由大小不同的土颗粒混杂组成的，土粒的直径大小称为粒径。土粒由粗到细逐渐变化时，土的工程性质也相应发生变化，如黏性从无到有、可塑性从无到有、渗透性由大变小、毛细水现象从无到有。粒径大小在一定范围内的土粒，其工程性质也比较接近，可将土中不同粒径的土粒按适当的粒径范围分成若干组，即粒组。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。粒组划分的界限尺寸在不同的国家，甚至同一国家的不同部门根据用途不同都有不同的规定。

《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10002.5—2005) 采用的分组界限粒径为 200 mm、60 mm、20 mm、2 mm、0.075 mm、0.005 mm，把土粒分为 6 大粒组，即漂石或块石、卵石或碎石、圆砾或角砾、砂粒、粉粒和黏土粒粒组。粒组划分及特性列于表 1-4 中。

在《公路土工试验规程》(JTG E40—2007) 中，土的颗粒根据表 1-5 所列粒组范围划分粒组。在《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007) 中，土的粒组根据表 1-6 规定的土颗粒粒径范围划分。

表 1-4 土的颗粒分类 (TB 10002.5—2005)

颗粒分类		粒径/mm	一般特性
漂石 (浑圆或圆棱) 或块石 (尖棱)	大	> 800	透水性很大, 无黏性, 毛细水上升高度极微, 不能保持水分
	中	800 ~ 400	
	小	400 ~ 200	
卵石 (浑圆或圆棱) 或碎石 (尖棱)	大	200 ~ 60	
	中	60 ~ 40	
	小	40 ~ 20	
圆砾 (浑圆或圆棱) 或角砾 (尖棱)	大	20 ~ 10	
	中	10 ~ 5	
	小	5 ~ 2	
砂 粒	粗	2 ~ 0.5	易透水, 无黏性, 毛细水上升高度不大, 遇水不膨胀, 干燥时不收缩且松散, 不表现可塑性, 压缩性甚微
	中	0.5 ~ 0.25	
	细	0.25 ~ 0.075	

粉 粒	0.075 ~ 0.005	透水性小,湿润时能出现微黏性,遇水膨胀和干缩都不明显,毛细水上升高度较快,上升高度较大
黏土粒	< 0.005	几乎不透水,潮湿时呈可塑性,黏性大,遇水膨胀和干缩都较显著,压缩性大

表 1-5 粒组划分 (JTG E40—2007)

200	60	20	5	2	0.5	0.25	0.074	0.002 (mm)	
巨粒组		粗粒组					细粒组		
漂石 (块石)	卵石 (小块石)	砾 (角砾)			砂			粉粒	黏粒
		粗	中	细	粗	中	细		

表 1-6 粒组划分 (GB/T 50145—2007)

粒 组	颗粒名称	粒径 d 的范围/mm	一般特性	
巨 粒	漂石 (块石)	$d > 200$	透水性大,无黏性,无毛细水,不易压缩	
	卵石 (碎石)	$200 \geq d > 60$		
粗 粒	砾粒	粗砾	透水性大,无黏性,不能保持水分,毛细水上升高度不超过粒径大小,压缩性较小	
		中砾		$5 < d \leq 20$
		细砾		$5 \geq d > 2$

续表

粒 组	颗粒名称	粒径 d 的范围/mm	一般特性	
粗 粒	砂粒	粗砂	易透水,无黏性,遇水不膨胀,干燥时松散,毛细水上升高度不大,饱和松细砂在振动荷载作用下会产生液化	
		中砂		$0.25 < d \leq 0.5$
		细砂		$0.075 < d \leq 0.25$
细 粒	粉 粒	$0.075 \geq d > 0.005$	透水性小,湿时有微黏性,遇水膨胀小,干时稍有收缩,毛细水上升高度较大,易冻胀,饱和并很松时在振动荷载作用下会产生液化	
	黏 粒	$0.005 \geq d$	透水性差,湿时有黏性、可塑性,遇水膨胀大,干时收缩显著,毛细水上升高度大,但速度慢	

3) 土的颗粒级配

天然土常常是由各种不同大小的土粒组成的混合物,它包含几种粒组的土粒。不同粒组在土中的相对含量,在很大程度上决定着土的工程特性,因此,工程上常以土中各粒组的相对含量表示土中颗粒的组成情况。各粒组的质量占土粒总质量的百分数叫做颗粒级配。

对土的颗粒组成的测定称为粒径分析或颗粒分析。根据土颗粒的粒径大小，采用下列颗粒分析试验：① 筛析法，适用于粒径小于或等于 60 mm，大于 0.075 mm 的土；② 密度计法和移液管法，适用于粒径小于 0.075 mm 的土。当土中含有粒径大于和小于 0.075 mm 的颗粒，各超过总质量的 10% 时，应联合使用筛析法及密度计法或移液管法。

颗粒级配的表示方法有表格表示法和级配曲线表示法。前者虽然制作简便，但是后者更加便于评价粒径含量的组合情况。以下对应用较广的级配曲线表示法作一说明。

根据颗粒大小分析试验结果，在半对数坐标纸上，以纵坐标表示小于某粒径的土颗粒含量占总质量的百分数（注意是累计百分数，不是某一粒径的百分含量），对数横坐标则表示粒径的大小（因为土颗粒的粒径变化范围很大，适宜用对数比例尺），绘出颗粒级配曲线，如图 1-1 所示。根据曲线的陡缓大致可判断出土的级配良好程度：若曲线较陡（见图 1-1 中 01 线），则表示粒径大小相差不多，土粒均匀，即级配不良，压实时不易获得较大的密

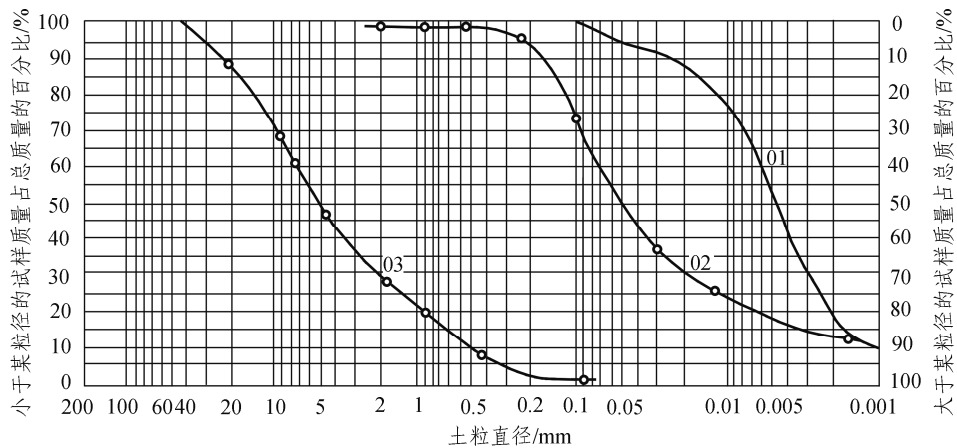


图 1-1 颗粒级配曲线（粒径大小分布曲线）

实度，但透水性好；若曲线平缓（见图 1-1 中 02 线），则表示粒径大小相差悬殊，土粒不均匀，即级配良好。级配良好的土，粗粒间的孔隙被细粒所填充，压实时容易获得较大的密实度，这样土的承载力高，压缩性低，适合路基填方。

在工程中，对于粗粒土常采用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 来评价土的颗粒级配情况，其定义为

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-1)$$

式中 C_u ——不均匀系数，计算至 0.01；

d_{60} ——限制粒径，分布曲线上小于该粒径的试样含量占总试样质量 60% 的粒径；

d_{10} ——有效粒径，分布曲线上小于该粒径的试样含量占总试样质量 10% 的粒径。

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (1-2)$$

式中 C_c ——曲率系数，计算至 0.01；

d_{30} ——连续粒径，分布曲线上小于该粒径的试样含量占总试样质量 30% 的粒径。

不均匀系数 C_u 越大，说明粒径分布曲线越平缓，土粒大小分布范围较大，土粒越不均匀，土的级配良好。 C_u 越小，粒径分布曲线越陡，土粒大小分布范围较小，颗粒越均匀，级配不良。若曲率系数 C_c 为 1~3 时，反映粒径分布曲线形状没有突变，各粒组含量的配合使该土容易实现密实状态。根据工程经验可按如下标准估计土的级配是否良好： $C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$ 时，土粒不均匀，级配良好； $C_u < 5$ 且 $C_c \neq 1 \sim 3$ 时，土粒均匀，级配不良。

2. 土中水

在天然状态下，土中常含有一定数量的水。在常温条件下，根据水和土粒有无相互作用，土中水可分成结合水和自由水。

3. 土中气体

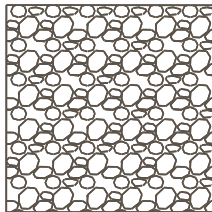
土中气体主要是空气和水汽，有时也可能有较多的二氧化碳、沼气及硫化氢等。土中气体有两种存在形式：一种与大气相通；另一种在土的孔隙中封闭着，与大气隔绝。

与大气相通的气体存在于接近地表的孔隙中，其含量与孔隙体积大小及孔隙被填充的程度有关，它对土的工程性质影响不大。

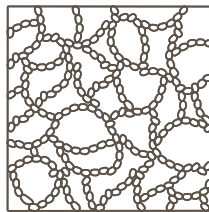
(二) 土的结构和构造

1. 土的结构

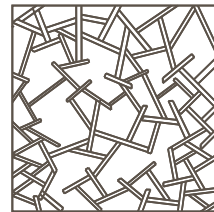
土的结构是指土中颗粒之间的联系和相互排列形式，一般分为如图 1-2 所示的单粒结构、蜂窝结构和絮状结构等 3 种基本类型，后两种又合称为海绵结构，是细粒土所具有的结构特征。在天然状态下，任何一种土都由多种不同土粒混杂而成，所以真正土的结构也是混合起来的复杂形式。



(a) 单粒结构



(b) 蜂窝结构



(c) 絮状结构

图 1-2 土的结构

1) 单粒结构

单粒结构是无黏性土的基本组成形式，是由粗大土粒（砾石、砂粒等）在重力作用

下，一颗一颗沉积下来而形成的，每个土粒都受到周围各个土粒的支承，土粒间几乎没有联结，如图 1-2 (a) 所示。单粒结构常见于无黏性的砂土和碎石土，土粒排列的紧密程度随其沉积的条件不同而异，由于沉积条件和后来的变化作用不同，又可分为松散的和密实的两种。

2) 蜂窝结构

当较细的土粒（如粉粒粒径为 $0.005\sim 0.075\text{ mm}$ ）在水中下沉碰到已经稳固沉积的土粒时，由于它们之间在接触处的分子吸引力大于其自重，因而土粒将停留在接触面上不再下沉，形成了具有很大孔隙的蜂窝结构，如图 1-2 (b) 所示。

3) 絮状结构

细粒土（如黏粒粒径小于 0.005 mm ）在水中处于悬浮状态，不会因单个颗粒的自重而下沉。但在一定条件下（掺入某些电解质），黏粒会凝聚成团，使重量增加而下沉。一个个粒团在沉积时，和已沉积的粒团接触形成类似蜂窝而孔隙很大的絮状结构，如图 1-2 (c) 所示。

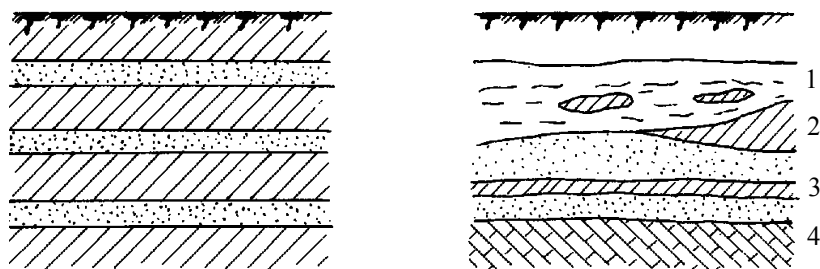
蜂窝结构和絮状结构，在沉积初期较疏松，一般它们单个孔隙体积远大于土粒本身的尺寸，孔隙总体积也较大，但沉积年代较长久时，上覆土重就比较大，结构会变得较密实。如沉积年代短，未受到较大的压力，其结构还是疏松状态，在外力作用下，将产生较大的压缩。

2. 土的构造

土的构造是指同一土层中成分和大小都相近的颗粒或颗粒集合体相互关系的特征。通常分为层状构造、分散构造和裂隙构造。

1) 层状构造

土粒在沉积过程中，由于不同阶段沉积的物质成分、颗粒大小不同，沿铅直方向呈层状分布。这种层状构造反映不同年代不同搬运条件形成的土层，是细粒土的一个重要特征。层状构造常见有水平层理构造和交错层理构造，如图 1-3 所示。



(a) 水平层理

(b) 交错层理

图 1-3 层状构造

1—淤泥夹黏土透镜体；2—黏土尖灭层；3—砂土夹黏土层；4—基岩

2) 分散构造

土层颗粒分布均匀，性质相近，常见于厚度较大的粗粒土，如砂与卵石层，如图 1-4 所示。

3) 裂隙构造

土体被许多不连续的小裂隙所分割，在裂隙中常充填有各种盐类的沉淀物，如图 1-5 所示。某些硬塑或坚硬状态的黏土具有此种构造而黄土具有特殊的柱状裂隙。裂隙的存在大大降低了土体的强度和稳定性，破坏了土的整体性，增大了透水性，对工程不利。

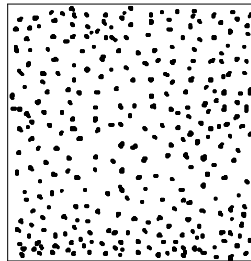


图 1-4 分散构造

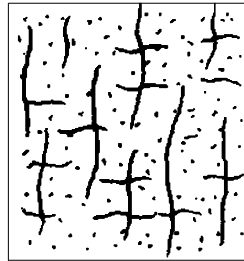


图 1-5 裂隙构造

(三) 土的物理性质指标

1. 土的三相草图

土是由土粒、水、气体组成的三相分散系。表达土体三相组成之间在体积和质量方面的比例关系的指标称为土的物理性质指标，它们是评价土的工程性质的最基本的指标。这三相在土中本来是交错分布的，但为了便于说明问题，现人为地将这三相抽象地分离并且集中起来，画出如图 1-6 所示的三相草图（三相图），并用下列符号代表土中这三相的体积和质量：

- V —— 土的总体积；
- V_v —— 土中孔隙的体积；
- V_a —— 土中空气的体积；
- V_w —— 土中水的体积；
- V_s —— 土中土粒的体积；

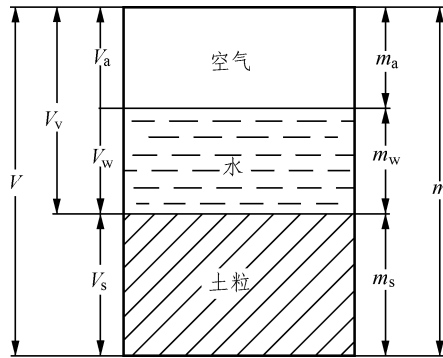


图 1-6 土的三相草图

- m ——土的总质量；
- m_a ——土中空气的质量，忽略不计；
- m_w ——土中水的质量；
- m_s ——土中土粒的质量。

由三相草图可知土的总体积和总质量分别为

$$V = V_a + V_w + V_s \quad (1-3)$$

$$m = m_a + m_w + m_s \approx m_w + m_s \quad (1-4)$$

土的物理性质指标，有些可以在试验室内直接测定，称为基本指标（也称实测指标）；另一些可以根据基本指标换算得到，称为导出指标（也称换算指标）。

2. 土的基本指标

1) 土的密度和重度

(1) 定义：单位体积土的质量称为土的质量密度，简称土的密度，用符号 ρ 表示，单位 g/cm^3 或 kg/m^3 。单位体积土所受的重力称为土的重力密度，简称土的重度（也称容重），用符号 γ 表示，单位为 kN/m^3 。

(2) 表达式： $\rho = \frac{m}{V}$ ， $\gamma = \frac{mg}{V}$ 。

(3) 常见数值：土的重度变化范围较大，一般为 $16 \sim 22 \text{ kN}/\text{m}^3$ （密度为 $1.6 \sim 2.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ ），重度大的土比较密实，强度也高。

(4) 测定方法：环刀法、蜡封法、灌砂法、灌水法、气囊法、核子射线法。

2) 土粒密度、土粒重度和土粒比重

(1) 定义：单位体积土粒的质量称为土粒的质量密度，简称土粒密度，用符号 ρ_s 表示，单位 g/cm^3 或 kg/m^3 。单位体积土粒所受的重力称为土粒的重力密度，简称土粒重度，用符号 γ_s 表示，单位 kN/m^3 。土粒比重是指土粒与同体积 4°C 时纯水的重力之比（或质量之比），也称为土粒相对密度（ d_s ），用符号 G_s 表示，无单位。

(2) 表达式: $\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$, $\gamma_s = \frac{m_s g}{V_s}$, $G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$ 。

(3) 常见数值: 土粒比重(相对密度)多为 2.65~2.75; 砂土为 2.65~2.69, 黏性土为 2.70~2.75; 含有机质较多的土, 土粒比重较小, 含铁质矿物较多的土, 土粒比重较大。

(4) 测定方法: 量瓶法、浮称法、虹吸筒法。

3) 土的含水率(含水量)

(1) 定义: 土中水的质量与土粒的质量之比或重力之比称为土的含水率(含水量), 符号为 w , 常用百分数表示。

(2) 表达式: $w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\%$ 或 $w = \frac{m_w g}{m_s g} \times 100\%$ 。

(3) 常见数值: 天然土的含水率差别很大, 通常为 20%~60%。同一类土, 含水率越大, 说明土越湿、越软, 强度也就越低。

(4) 测定方法: 烘干法、酒精燃烧法、碳化钙减量法、核子射线法。

3. 土的导出指标

1) 孔隙比和孔隙率

(1) 定义: 土中孔隙体积与土粒体积之比称为孔隙比, 符号为 e , 用小数表示。土中孔隙体积与土的体积之比称为孔隙率(孔隙度), 符号为 n , 常用百分数表示。

(2) 表达式: $e = \frac{V_v}{V_s}$, $n = \frac{V_v}{V} \times 100\%$ 。

(3) 常见数值: 孔隙比范围多为 0.25~4.0。砂土为 0.3~0.9, 一般黏性土为 0.4~1.2。少数近代沉积未经压实黏性土可大于 4, 泥炭一般为 5~15, 有的高达 25。对于同一种土, 孔隙比越小, 土越密实; 孔隙比越大, 土越疏松。所以它是表示土的密实程度的重要物理性质指标。一般黏性土的孔隙率为 30%~60%, 砂土为 25%~45%。

(4) 换算公式: 在如图 1-7 所示的三相草图中, 假设土粒的体积 $V_s = 1$, 则有 $V_v = e \cdot V_s = e$, $V = V_s + V_v = 1 + e$ 。土体的总质量既是水与土粒的质量之和又是总体积与土的密度之积, 即

$$V_s \rho_s + w \cdot V_s \rho_s = \rho_s (1 + w) = (1 + e) \cdot \rho$$

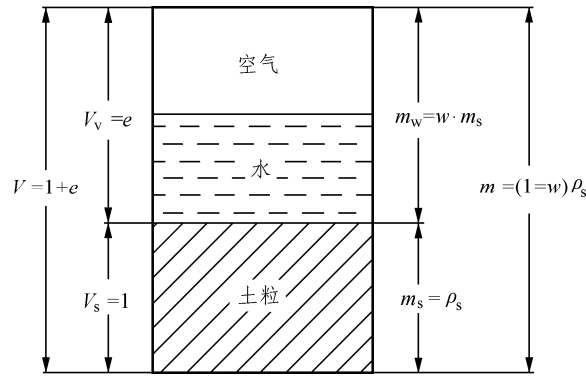


图 1-7 三相草图 (设 $V_s = 1$)

所以

$$e = \frac{\rho_s(1+w)}{\rho} - 1 = \frac{\gamma_s(1+w)}{\gamma} - 1 \quad (1-5)$$

若 e 为已知, 则由图 1-7 可知

$$n = \frac{e}{1+e} \quad \text{或} \quad e = \frac{n}{1-n} \quad (1-6)$$

2) 饱和度

(1) 定义: 土中水的体积与孔隙体积之比称为土的饱和度, 符号为 S_r , 多用小数表示, 也用百分数表示。

(2) 表达式: $S_r = \frac{V_w}{V_v}$ 。

(3) 常见数值: $S_r = 0 \sim 1$ 。碎石土、砂土的潮湿程度可根据其饱和度划分为稍湿 ($S_r \leq 0.5$)、潮湿 ($0.5 < S_r \leq 0.8$)、饱和 ($S_r > 0.8$)。

(4) 换算公式: $S_r = \frac{w \cdot G_s}{e}$ 。

3) 饱和密度和饱和重度

(1) 定义: 土中孔隙完全被水充满时单位体积土的质量称为土的饱和密度, 用符号 ρ_{sat} 表示, 单位 g/cm^3 或 kg/m^3 。土中孔隙完全被水充满时单位体积土所受的重力称为土的饱和重度, 用符号 γ_{sat} 表示, 单位 kN/m^3 。

(2) 表达式: $\rho_{\text{sat}} = \frac{m}{V} = \frac{m_s + \rho_w V_v}{V}$, $\gamma_{\text{sat}} = \frac{mg}{V} = \frac{m_s g + \gamma_w V_v}{V}$ 。

(3) 常见数值: $\rho_{\text{sat}} = 1.8 \sim 2.3 \text{ g}/\text{cm}^3$, $\gamma_{\text{sat}} = 18 \sim 23 \text{ kN}/\text{m}^3$ 。

(4) 换算公式: $\rho_{\text{sat}} = \frac{\rho_s + e\rho_w}{1+e}$, $\gamma_{\text{sat}} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e}$ 。

4) 浮密度和浮重度

(1) 定义：在水下的透水土体，受到浮力作用时单位体积土的质量称为土的浮密度，用符号 ρ' 表示，单位 g/cm^3 或 kg/m^3 。在水下的透水土体，受到浮力作用时单位体积土的重力，称为土的浮重度，用符号 γ' 表示，单位 kN/m^3 。

(2) 表达式：
$$\rho' = \frac{m_s - \rho_w V_s}{V}, \quad \gamma' = \frac{m_s g - \gamma_w V_s}{V}。$$

(3) 常见数值： $\gamma' = 8 \sim 13 \text{ kN}/\text{m}^3$ 。

(4) 换算公式：
$$\rho' = \rho_{\text{sat}} - \rho_w = \frac{\rho_s - \rho_w}{1+e}, \quad \gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e}。$$

5) 干密度和干重度

(1) 定义：单位体积土中土粒的质量称为土的干密度，用符号 ρ_d 表示，单位 g/cm^3 或 kg/m^3 。单位体积土中土粒所受的重力称为土的干重度，用符号 γ_d 表示，单位 kN/m^3 。

(2) 表达式：
$$\rho_d = \frac{m_s}{V}, \quad \gamma_d = \frac{m_s g}{V}。$$

(3) 常见数值： $\gamma_d = 13 \sim 20 \text{ kN}/\text{m}^3$ 。 γ_d 越大， e 越小，土越密实，故路基、堤坝、填土地基、机场等工程常以土压实后的干重度（干密度）作为填土质量的指标。

(4) 换算公式：
$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{\rho}{1+w}, \quad \gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{\gamma}{1+w}。$$

为了便于应用，现将常用的土的物理性质指标换算公式汇总列于表 1-7 中。

表 1-7 土的物理性质指标换算公式

指标名称	符号	表达式	常用换算公式	常见数值范围
密度	ρ	$\rho = \frac{m}{V}$	可在试验室内直接测定	1.6 ~ 2.2 g/cm^3
重度	γ	$\gamma = \frac{mg}{V}$		16 ~ 22 kN/m^3
土粒密度	ρ_s	$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$		一般黏性土：2.70 ~ 2.75 g/cm^3 砂土：2.65 ~ 2.69 g/cm^3
土粒重度	γ_s	$\gamma_s = \frac{m_s g}{V_s}$		一般黏性土：27.0 ~ 27.5 kN/m^3 砂土：26.5 ~ 26.9 kN/m^3
土粒比重	G_s	$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$		一般黏性土：2.70 ~ 2.75 砂土：2.65 ~ 2.69
含水率	w	$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\%$		20% ~ 60%

孔隙比	e	$e = \frac{V_v}{V_s}$	$e = \frac{\rho_s(1+w)}{\rho} - 1$ $= \frac{\gamma_s(1+w)}{\gamma} - 1$	一般黏性土：0.40 ~ 1.20 砂土：0.30 ~ 0.90
孔隙率	n	$n = \frac{V_v}{V} \times 100\%$	$n = \frac{e}{1+e}$	一般黏性土：30% ~ 60% 砂土：25% ~ 45%
饱和度	S_r	$S_r = \frac{V_w}{V_v}$	$S_r = \frac{w \cdot G_s}{e}$	0 ~ 1
饱和密度	ρ_{sat}	$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + \rho_w V_v}{V}$	$\rho_{\text{sat}} = \frac{\rho_s + e\rho_w}{1+e}$	1.8 ~ 2.3 g/cm ³
饱和重度	γ_{sat}	$\gamma_{\text{sat}} = \frac{m_s g + \gamma_w V_v}{V}$	$\gamma_{\text{sat}} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e}$	18 ~ 23 kN/m ³
浮密度	ρ'	$\rho' = \frac{m_s - \rho_w V_s}{V}$	$\rho' = \rho_{\text{sat}} - \rho_w = \frac{\rho_s - \rho_w}{1+e}$	0.8 ~ 13 g/cm ³
浮重度	γ'	$\gamma' = \frac{m_s g - \gamma_w V_s}{V}$	$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e}$	8 ~ 13 kN/m ³
干密度	ρ_d	$\rho_d = \frac{m_s}{V}$	$\rho_d = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{\rho}{1+w}$	1.3 ~ 2.0 g/cm ³
干重度	γ_d	$\gamma_d = \frac{m_s g}{V}$	$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{\gamma}{1+w}$	13 ~ 20 kN/m ³

由三相草图求解土的物理性质指标的方法有二：第一，根据未知指标与已知指标之间的换算关系式（见表 1-7），直接求出未知指标；第二，假定 $V_s=1$ （或 $V=1$ ），即一个体积单位，根据已知指标的表达式及其数值，将三相草图左右两侧的体积和质量全部求出，再根据未知指标的表达式求解未知指标。

【例 1-1】 某原状土样由室内试验测得其重度 $\gamma=18.6 \text{ kN/m}^3$ ，土粒比重 $G_s=2.69$ ，土的含水率 $w=28\%$ ，试求土的孔隙比 e 、孔隙率 n 、饱和度 S_r 、饱和重度 γ_{sat} 、浮重度 γ' 、干重度 γ_d 。

$$\text{解：孔隙比： } e = \frac{\gamma_s(1+w)}{\gamma} - 1 = \frac{G_s \gamma_w(1+w)}{\gamma} - 1 = \frac{2.69 \times 10 \times (1+28\%)}{18.6} - 1 = 0.851$$

$$\text{孔隙率： } n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.851}{1+0.851} = 46\%$$

$$\text{饱和度： } S_r = \frac{w \cdot G_s}{e} = \frac{28\% \times 2.69}{0.851} = 0.885 = 88.5\%$$

$$\text{饱和重度： } \gamma_{\text{sat}} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e} = \frac{G_s \gamma_w + e\gamma_w}{1+e} = \frac{2.69 \times 10 + 0.851 \times 10}{1+0.851} = 19.13 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{浮重度： } \gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} = \frac{G_s \gamma_w - \gamma_w}{1+e} = \frac{2.69 \times 10 - 10}{1+0.851} = 9.13 \text{ kN/m}^3$$

或 $\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = 19.13 - 10 = 9.13 \text{ kN/m}^3$

$$\text{干重度： } \gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = \frac{2.69 \times 10}{1+0.851} = 14.53 \text{ kN/m}^3$$

或
$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} = \frac{18.6}{1+28\%} = 14.53 \text{ kN/m}^3$$

(四) 颗粒分析试验——筛析法

1. 筛析法试验原理

对于粒径大于 0.075 mm 的粗粒土，一般采用筛析法分析土的颗粒大小。筛析法是采用不同孔径的分析筛，由上至下孔径自大到小叠在一起。试验时，取质量为 m_s 的干土放入最上的筛里，通过筛析后，得到不同孔径筛上土质量 m_{si} ，进而计算出粒组含量和累积含量。

2. 仪器设备

筛析法试验仪器主要包括：

(1) 分析筛。分析筛据孔径大小分粗筛和细筛两类。土工试验中常用的粗筛一般为圆孔，孔径为 100 mm，80 mm，60 mm，40 mm，20 mm，10 mm，5 mm，2 mm；细筛一般为方孔，等效孔径为 2.0 mm，1.0 mm，0.5 mm，0.25 mm，0.10 mm，0.075 mm。不同国家和不同部门使用的分析筛孔径大小分级有些差别。

(2) 分析天平。分析天平依称量范围和精度需要分为两种：① 称量 10 kg，感量 1 g；② 称量 1 000 g，感量 0.1 g。

(3) 摇筛机。规范规定摇筛机能够在水平方向摇振，垂直方向拍击。摇振次数为 100~200 次/分钟，拍击次数为 50~70 次/分钟。

(4) 辅助设备。辅助设备包括：烘箱、量筒、漏斗、瓷杯、研钵、瓷盘、毛刷、匙、木碾、白纸等。

3. 操作步骤

筛析法试验步骤包括：

(1) 从风干的松散土样中，用四分法取土。取土数量按表 1-8 执行；

表 1-8 筛分法取土数量

最大粒径/mm	≤2	≤10	≤20	≤40	> 40
取样质量/g	100 ~ 300	300 ~ 900	1 000 ~ 2 000	2 000 ~ 4 000	4 000 以上

(2) 将试样过 2 mm 筛，分别称出筛上和筛下土质量。取 2 mm 筛上土倒入依次叠好的粗筛的最上层筛中，取 2 mm 筛下土倒入依次叠好的细筛的最上层筛中（分析筛自上至下孔径自大至小叠放）。用摇筛机充分筛析至各筛上土粒直径大于筛孔孔径，一般摇筛 15~30 min。

(3) 由最大孔径筛开始，顺序将各筛取下，将留在各筛上的土分别称量，精确至 0.1 g。各筛上土质量之和与总土质量之差不得大于总土质量的 1%。

(4) 计算粒组含量和累积含量，画出级配曲线，得到各特征粒径，分析土的级配，据规范定名。

4. 成果整理

(1) 粒组含量

$$X = \frac{m_i}{m} \times 100\% \quad (1-7)$$

(2) 累积含量

$$P = \frac{m_A}{m} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 X ——某粒组百分含量，%；

P ——小于某粒径土粒占总土质量百分含量，%；

m ——试样总质量，g；

m_i ——某粒组土粒质量，g；

m_A ——小于某粒径土粒质量，g。

5. 结果评定与数据记录

筛析法试验记录及试验成果包括：

- (1) 筛析法试验记录表，见表 1-9。
- (2) 颗粒大小级配曲线（累积分布曲线）。
- (3) 获得特征粒径 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} ，计算曲率系数 C_c 、不均匀系数 C_u 。
- (4) 根据土的分类标准给土分类定名。

表 1-9 筛析法试验记录表

风干试样质量 =		g	小于 0.075 mm 的试样占总试样质量百分数 =		%	
2 mm 筛上试样质量 =		g	小于 2 mm 的试样占总试样质量百分数 =		%	
2 mm 筛下试样质量 =		g	细筛分析时所取试样质量 =			g
筛 号	孔径 /mm	累积留筛 试样质量 /g	小于该孔径的 试样质量 /g	小于该孔径的 试样质量百分数 /%	小于该孔径占总试样 质量百分数 /%	

底盘总计					
------	--	--	--	--	--

(五) 颗粒分析试验——密度计法

1. 试验原理

密度计法，是将一定量的土样（粒径 $< 0.075 \text{ mm}$ ）放在量筒中，然后加蒸馏水，经过搅拌，使土的大小颗粒在水中均匀分布，使土粒在液体中靠自重下沉。在土粒沉降过程中，用密度计测出在悬液中对应于不同时间的不同悬液密度，根据密度计读数和土粒的下沉时间，就可计算出粒径小于某一粒径 d (mm) 的颗粒占土样的百分数。

2. 仪器设备

(1) 密度计：目前通常采用的密度计有甲、乙两种，现介绍甲种密度计。甲种密度计刻度自 $0 \sim 60$ ，最小分度单位为 1.0 ，如图 1-8 所示。

- (2) 天平：称量 200 g ，分度值 0.01 g 。
- (3) 搅拌器：轮径 50 mm ，孔径 3 mm 。
- (4) 煮沸设备：电热器、三角烧瓶等。
- (5) 分散剂：4% 六偏磷酸钠或其他分散剂。
- (6) 其他：温度计、蒸馏水、烧杯、研钵和秒表等。

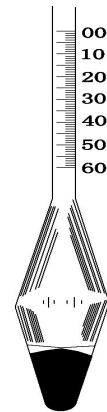


图 1-8 甲种密度计

3. 操作步骤

(1) 称取试样：取有代表性的风干或烘干土样 $100 \sim 200 \text{ g}$ ，放入研钵中，用带橡皮头的研棒研散，将研散后的土过 0.075 mm 筛，均匀拌和后称取试样 30 g 。

(2) 浸泡试样：将称好的试样小心倒入烧瓶中，注入 200 mL 蒸馏水对试样进行浸泡，浸泡时间不少于 18 h 。

(3) 煮沸分散：将浸泡好后的试样稍加摇荡后，放在电热器上煮沸。煮沸时间从沸腾时开始，黏土约需要 1 h ，其他土不少于半小时。对教学试验，浸泡试样及煮沸分散均由实验室准备。

(4) 制备悬液：土样经煮沸分散冷却后，倒入量筒内。然后加 4% 浓度的六偏磷酸钠约 10 mL 于溶液中，再注入蒸馏水，使筒内的悬液达到 1000 mL 。

(5) 搅拌悬液：用搅拌器在悬液中上下搅拌 1 min ，往复各 30 次，使悬液内土粒均匀分布。

(6) 定时测读：取出搅拌器，立即开动秒表，测定经过 1 min 、 5 min 、 30 min 、 120 min 、 1440 min 时的密度计读数。每次测读完后，立即将密度计取出，放入盛水量筒中，同时测记悬液温度，准确至 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4. 试验注意事项

- (1) 5 min 时的读数时间包括 1 min 时读数的时间，其余 30 min 、 120 min 、 1440 min 的

读数时间也是如此累加。

(2) 读数后甲种密度计必须立即从量筒里取出，否则会阻碍土粒下沉速度。

5. 成果整理

(1) 由于刻度、温度与加入分散剂等原因，密度计每一次读数须先经弯液面校正后，由实验室提供的 $R-L$ 关系图，查得土粒有效沉降距离，计算颗粒的直径 d ，按简化公式计算

$$d = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (1-9)$$

式中 d ——颗粒直径，mm；

K ——粒径计算系数（由实验室提供的资料查得）；

L ——某时间 t 内的土粒沉降距离（由实验室提供的资料查得）；

t ——沉降时间，s。

(2) 将每一读数经过刻度与弯液面校正、温度校正、土粒比重校正和分散剂校正后，按式 (1-10) 计算小于某粒径的土质量百分数

$$X(\%) = \frac{100}{m_s} C_s (R + m_t + n - C_D) \quad (1-10)$$

式中 X ——小于某粒径的土质量百分数，%；

m_s ——试样干土质量（30 g）；

C_s ——土粒比重校正系数，可查甲种密度计的土粒比重校正系数表（由实验室提供的资料查得）；

R ——甲种密度计读数；

m_t ——温度校正值，可查甲种密度计的温度校正值表（由实验室提供的资料查得）；

n ——刻度及弯液面校正值（由实验室提供的图表中查得）；

C_D ——分散剂校正值（由实验室提供资料）。

(3) 用小于某粒径的土质量百分数 $X(\%)$ 为纵坐标，粒径 d (mm) 的对数为横坐标，绘制颗粒大小级配曲线。

6. 数据记录

记录格式应符合表 1-10 的要求。

表 1-10 颗粒分析试验记录表 (密度计法)

下沉 时间 t/min	悬液 温度 $T/^\circ\text{C}$	密度 计读 数 R	温度 校正 值 m_t	刻度 弯液 面校 正值 n	分散 剂校 正值 C_D	$R_m = R + m_t + n - C_D$	$R_H = R_m \times C_s$	土粒 落距 L/cm	粒径 d/mm	小于某 孔径的 土质量 百分数 /%
1										
5										
30										
120										
1 440										

典型工作任务 2 碎石类土地基静力载荷试验检测

一、工作任务

通过原位测试知识的学习，能够承担以下工作任务：

- (1) 掌握静力载荷试验的操作步骤；
- (2) 掌握试验检测方法的数据采集并能对试验成果进行整理分析；
- (3) 了解试验检测方法的工作原理及其优缺点。

二、相关配套知识

(一) 地基的变形阶段与破坏形态

1. 地基的变形阶段

地基土现场载荷试验可得到其载荷 p 与沉降 s 的 $p-s$ 关系曲线，从 $p-s$ 曲线形态来看，地基破坏的过程一般将经历以下 3 个阶段，如图 1-9 所示。

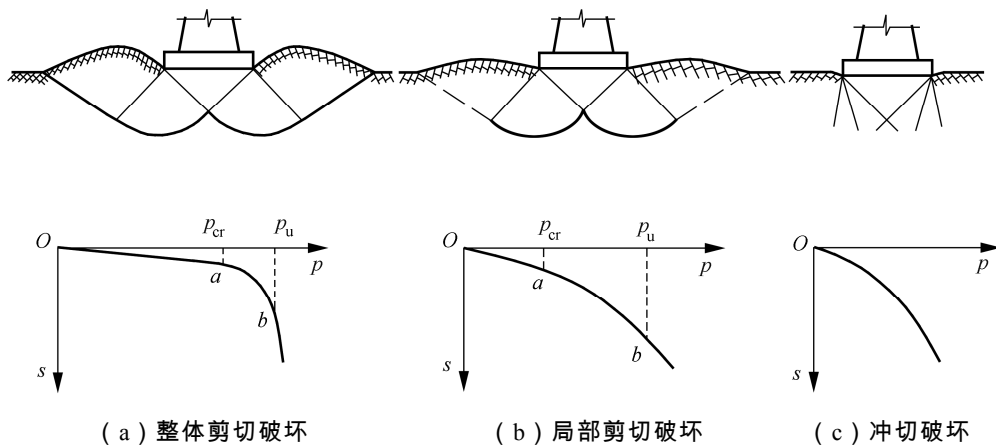


图 1-9 地基的破坏形式

1) 压密阶段

压密阶段也称线弹性变形阶段，即 $p-s$ 曲线中的 Oa 段。载荷与变形基本上呈直线关系，土中各点的剪应力均小于土的抗剪强度，土体处于弹性平衡状态。载荷板沉降主要是由于土的压密变形引起的，即土内孔隙减少、土粒靠拢挤紧。将 $p-s$ 曲线上相应于 a 点的载荷称为临塑载荷 p_{cr} ，表示载荷板底面以下的地基土体将要出现而尚未出现塑性变形区时的基底压力。

2) 剪切阶段

剪切阶段也称弹塑性变形阶段，即 $p-s$ 曲线中的 ab 段。当载荷超过临塑载荷 p_{cr} 后，它已不再保持线性变化而是向下弯曲，沉降的增长率随载荷的增大而增加。在这个阶段，从载荷板边缘开始，地基土中局部范围内的剪应力达到土的抗剪强度，土体发生剪切破坏，塑性变形区（剪切破坏区）以外仍然是弹性平衡状态区，剪切阶段是地基中塑性变形区的发生与发展阶段。将 $p-s$ 曲线上相应于 b 点的载荷称为极限载荷 p_u ，它表示地基即将丧失稳定时的基底压力。

3) 破坏阶段

破坏阶段也称完全塑性变形阶段，即 $p-s$ 曲线上 b 点以后的曲线。当载荷超过极限载荷 p_u 后，载荷板急剧下沉，即使不增加载荷，沉降也不能稳定，这表明地基进入了破坏阶段。由于土中塑性变形区范围的不断扩展，最后在土中形成连续滑动面，土从载荷板四周挤出隆起，地基土产生剪切破坏而失稳。

2. 地基的破坏形式

地基破坏的形式是多种多样的，根据土的性质、基础的埋深、加荷速率等因素而异，大体上可分成 3 种主要形式，如图 1-9 所示：

1) 整体剪切破坏

当地基为密实的砂类土和较坚硬的黏性土，且基础埋置较浅时，常出现整体剪切破坏。当基底压力 $p < p_{cr}$ 时， $p-s$ 曲线呈直线关系；当基底压力 $p \geq p_{cr}$ 时，塑性变形区首先在基础底面边缘处产生，然后逐渐向侧面向下扩展，此时基础的沉降速率较前一阶段增大， $p-s$ 曲线表现为明显的曲线特征；当基底压力达到 p_u 时，剪切破坏面与地表面连通形成弧形的滑动面，地基土沿着此滑动面从一侧或两侧大量挤出，造成基础侧面地面隆起，整个地基将失去稳定，形成破坏状态，如图 1-9 (a) 所示。

2) 局部剪切破坏

当地基为一般黏性土或中密砂土，基础埋深较浅时或当地基为砂性土或黏性土，基础埋深较大时，常出现局部剪切破坏。

随着载荷的增加，塑性变形区同样从基础底面边缘处开始发展，但被限制在地基内部的某一区域内，而不能形成延伸至地面的连续滑动面，如图 1-9 (b) 所示。图中虚线仅表示滑动面的延展趋势，并非实际破裂面。地基失稳时，基础两侧土没有挤出现象，地面只有微微的隆起。 $p-s$ 曲线有转折点，但不如整体剪切破坏那么明显，转折点 b 后的沉降速率虽然较前一阶段为大，但不如整体剪切破坏那样急剧增加。

3) 冲切破坏

冲切破坏也称为冲剪破坏或刺入破坏。当地基为松砂、饱和软黏土时，随着载荷的增加，基础下土层发生压缩变形，基础随之下沉，当载荷继续增加，在基础边缘下及基础正下方土体产生垂直剪切破坏，使基础刺入土中，而基础两边的土体并无隆起现象。 $p-s$ 曲线上没有明显的转折点，也无明显的临塑载荷及极限载荷，如图 1-9 (c) 所示。冲切破坏的主要特征是基础发生了显著的沉降。

(二) 按规范确定地基承载力

确定地基承载能力的方法，除了按照理论公式以外，还可以采用各地区和各产业部门制定的地基基础设计规范。这些规范所提供的数据和确定地基承载力的方法是根据大量的工程实践经验、土工试验和地基载荷试验等综合分析总结出来的。因为这些数据和方法在地基的稳定和变形方面均具有一定的安全储备，不致因种种意外情况而导致地基破坏，所以它们是确定地基承载力的一种可靠而实用的方法。

《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10002.5—2005) 对于一般铁路桥涵基础给出了各种土体基本承载力 σ_0 的数据表，并推荐了计算地基容许承载力 $[\sigma]$ 的经验公式。在一般情况下，按照规范确定的地基容许承载力进行设计的建筑物，其地基强度和稳定性可以得到保证，同时其沉降量也在容许范围以内。

1. 地基的基本承载力

地基的基本承载力是指当基础宽度 $b \leq 2\text{ m}$ ，埋置深度 $h \leq 3\text{ m}$ 时，地质情况简单（指地基土比较均匀或水平成层）的地基容许承载力。基础宽度 b 的含义：对于矩形基础为短边宽度；对于圆形或正多边形基础为 \sqrt{F} ， F 为基础的底面积。

规范中各类土的基本承载力数据表（表 1-11~表 1-21）是根据我国各地不同地基上已有建筑物的观测资料和载荷试验资料，结合工程实践经验，采用统计分析方法制定出来的。若要利用这些表中数据，必须先在现场取出土样，进行室内试验，以划分土的分类和测定土的物理力学指标，然后根据土的分类和测出的有关指标，从表中查取基本承载力。由于我国幅员辽阔，自然条件复杂，不是在任何条件下上述各表都能适用的，因此如经原位测试、理论公式的计算、邻近旧桥涵的调查对比、既有地区建筑经验的调查，确定基本承载力时可不受表列数值的限制；对于地质复杂（指地基土不均匀，或土层倾斜较大，易引起建筑物不均匀沉降）和结构复杂的桥涵地基，应根据实际情况尽量进行原位测试。

表 1-11 岩石地基的基本承载力 σ_0 (kPa)

岩石类别	节理发育程度	节理很发育	节理发育	节理不发育较或发育
	节理间距 /cm	2~20	20~40	大于 40
硬质岩		1 500~2 000	2 000~3 000	大于 3 000
软质岩		800~1 000	1 000~1 500	1 500~3 000
极软岩		400~800	600~1 000	800~1 200

- 注：① 对于溶洞、断层、软弱夹层、易溶岩石等，应个别研究确定；
 ② 裂隙张开或有泥质填充时，应取低值；
 ③ 对风化成土、砂、砾状的，可比照土、砂土、碎石土确定，并可根据具体情况按式（1-11）计算容许承载力。当风化后颗粒之间还保持一定联系时可适当提高。

表 1-12 碎石土地基的基本承载力 σ_0 (kPa)

土名	密实程度	松散	中密	密实
	卵石		300~500	600~1 000
碎石		200~400	500~800	800~1 000
圆砾		200~300	400~600	600~800
角砾		200~300	300~500	500~700

- 注：① 半胶结的碎石土，可按密实的同类土的 σ_0 值，提高 10%~30% 计算；
 ② 由硬质岩块组成，充填砂土者用高值；由软质岩块组成，充填黏性土者用低值；
 ③ 松散的在天然河床中很少遇到，需特别注意鉴定；

④ 漂石、块石的 σ_0 值，可参照卵石、碎石土适当提高。

表 1-13 砂土地基的基本承载力 σ_0 (kPa)

土名	密实程度	稍松	中密	密实
	湿度			
砾砂、粗砂	与湿度无关	200	400	550
中砂	与湿度无关	150	350	450
细砂	稍湿或潮湿	100	250	350
	饱和	—	200	300
粉砂	稍湿或潮湿	—	200	300
	饱和	—	100	200

表 1-14 Q₄冲、洪积黏性土地基的基本承载力 σ_0 (kPa)

液性指数 I_L	孔隙比 e												
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
0.5	450	440	430	420	400	380	350	310	270	240	220	—	—
0.6	420	410	400	380	360	340	310	280	250	220	200	180	—
0.7	400	370	350	330	310	290	270	240	220	190	170	160	150
0.8	380	330	300	280	260	240	230	210	180	160	150	140	130
0.9	320	280	260	240	220	210	190	180	160	140	130	120	100
1.0	250	230	220	210	190	170	160	150	140	120	110	—	—
1.1	—	—	160	150	140	130	120	110	100	90	—	—	—

注：土中含有粒径大于 2 mm 的颗粒且按其土重占全重 30%以上时， σ_0 可酌情提高。

表 1-15 Q₃及其以前冲、洪积黏性土地基的基本承载力 σ_0

压缩模量 E_s /MPa	10	15	20	25	30	35	40
σ_0 /kPa	380	430	470	510	550	580	620

注：① $E_s = \frac{1+e_1}{a_{1-2}}$

式中： e_1 ——压力为 0.1 MPa 时土样的孔隙比；

a_{1-2} ——对应于 0.1~0.2 MPa 压力段的压缩系数， MPa^{-1} 。

② 当 $E_s < 10$ MPa 时，其基本承载力按表 1-16 确定。

表 1-16 残积黏性土地基的基本承载力 σ_0

压缩模量 E_s /MPa	4	6	8	10	12	14	16	18	20
σ_0 /kPa	190	220	250	270	290	310	320	330	340

注：本表适用于西南地区碳酸盐类岩层的残积红土，其他地区可参照使用。

表 1-17 新黄土 (Q₄、Q₃) 地基的基本承载力 σ_0 (kPa)

含水量 w_n /% 液限 w_L 孔隙比 e		含水量 w_n /%						
		5	10	15	20	25	30	35
24	0.7	—	230	190	150	—	—	—
	0.9	250	210	170	130	100	—	—
	1.1	230	190	150	110	80	—	—
	1.3	—	160	120	80	50	—	—
28	0.7	290	260	230	190	150	110	—
	0.9	270	240	210	170	130	90	—
	1.1	250	220	190	150	110	70	—
	1.3	230	200	170	130	90	50	—

续表

含水量 w_n /% 液限 w_L 孔隙比 e		含水量 w_n /%						
		5	10	15	20	25	30	35
32	0.7	—	300	280	240	200	160	—
	0.9	—	280	260	220	180	140	—
	1.1	—	260	240	200	160	120	90
	1.3	—	240	210	180	130	100	70

注：① 对 Q₃ 新黄土，当 $0.85 < e < 0.95$ 时，可按表中 σ_0 值提高 15%；

② 本表不适用于坡积、崩积和人工堆积层。

表 1-18 老黄土 (Q₂、Q₁) 地基的基本承载力 σ_0 (kPa)

含水比 w_n/w_L	孔隙比 e			
	< 0.7	$0.7 \leq e < 0.8$	$0.8 \leq e < 0.9$	> 0.9
< 0.6	700	600	500	400
$0.6 \leq w_n/w_L \leq 0.8$	500	400	300	250
> 0.8	400	300	250	200

注：① w_n ——天然含水量， w_L ——液限含水量；

② 山东老黄土性质较差， σ_0 应降低 100~200 kPa。

表 1-19 多年冻土地基的基本承载力 σ_0 (kPa)

序号	土名	基础底面的月平均最高气温/°C				
		- 0.5	- 1.0	- 1.5	- 2.0	- 3.5
1	块石、卵石、碎石	800	950	1 100	1 250	1 650
2	圆砾、角砾、砾砂、粗砂、中砂	600	750	900	1 050	1 450
3	细砂、粉砂	450	550	650	750	1 000
4	黏砂土	400	450	550	650	850
5	砂黏土、黏土	350	400	450	500	700
6	饱冰冻土	250	300	350	400	550

- 注：① 本表序号 1~5 类的地基基本承载力，适合于少冰冻土、多冰冻土，当序号 1~5 类的地基为富冰冻土时，表列数值应降低 20%；
 ② 含土冰层的承载力应实测确定；
 ③ 基础置于饱冰冻土的土层上时，基础底面应敷设厚度不小于 0.20~0.30 m 的砂垫层；
 ④ 表列数值不适用于含盐量大于 0.3% 的冻土。

2. 地基的容许承载力

当基础的宽度 $b > 2$ m，基础底面的埋置深度 $h > 3$ m，且 $h/b \leq 4$ m 时，地基的容许承载力可按式 (1-11) 计算

$$[\sigma] = \sigma_0 + k_1 \gamma_1 (b - 2) + k_2 \gamma_2 (h - 3) \quad (1-11)$$

式中 $[\sigma]$ ——地基的容许承载力，kPa；

σ_0 ——地基的基本承载力，kPa；

b ——对于矩形基础为短边宽度，m，对于圆形或正多边形基础为 \sqrt{F} (F 为基础的底面积)， b 大于 10 m 时，按 10 m 计算；

h ——基础底面的埋置深度，m (对于受水流冲刷的墩台，由一般冲刷线算起；不受水流冲刷者，由天然地面算起；位于挖方内，由开挖后地面算起)；

γ_1 ——基底以下持力层土的天然容重， kN/m^3 ；如持力层在水面以下，且为透水者，应采用浮重度；

γ_2 ——基底以上土的天然容重的平均值， kN/m^3 ；如持力层在水面以下，且为透水者，水中部分应采用浮重度；如为不透水者，不论基底以上水中部分土的透水性如何，应采用饱和重度；

k_1 、 k_2 ——宽度、深度修正系数，按持力层土决定，见表 1-20。

表 1-20 宽度、深度修正系数

土 的 类 别	黏性土			黄土			砂土						碎石土					
	Q ₄ 的冲、洪积土		Q ₃ 及其 以前的 冲、洪 积土	残 积 土	新 黄 土	老 黄 土	粉砂		细砂		中砂		砾砂 粗砂		碎石 圆砾 角砾		卵石	
	$I_L < 0.5$	$I_L \geq 0.5$					中 密	密 实	中 密	密 实	中 密	密 实	中 密	密 实	中 密	密 实	中 密	密 实
k_1	0	0	0	0	0	0	1	1.2	1.5	2	2	3	3	4	3	4	3	4
k_2	2.5	1.5	2.5	1.5	1.5	1.5	2	2.5	3	4	4	5.5	5	6	5	6	6	10

注：① 节理不发育或较发育的岩石不作宽深修正，节理发育或很发育的岩石， k_1 、 k_2 可按碎石土的系数，但对已风化成砂、土状者，则按砂土、黏性土的系数；

② 稍松状态的砂土和松散状态的碎石土， k_1 、 k_2 值可采用表列中密值的 50%；

③ 冻土的 $k_1 = 0$ 、 $k_2 = 0$ 。

3. 软土地基的容许承载力

软土地基的容许承载力必须同时满足稳定和变形两方面的要求，可按下列方法确定，但应同时检算基础的沉降量，并符合有关规定

$$[\sigma] = 5.14c_u \frac{1}{m'} + \gamma_2 h \quad (1-12)$$

对于小桥和涵洞基础，也可由式 (1-13) 确定软土地基容许承载力

$$[\sigma] = \sigma_0 + \gamma_2(h-3) \quad (1-13)$$

式中 $[\sigma]$ ——地基的容许承载力，kPa；

m' ——安全系数，可视软土灵敏度及建筑物对变形的要求等因素选用 1.5~2.5；

c_u ——不排水剪切强度，kPa；

γ_2 、 h ——同式 (1-11)；

σ_0 ——由表 1-21 确定。

表 1-21 软土地基的基本承载力 σ_0 (kPa)

天然含水量 w_n / %	36	40	45	50	55	65	75
σ_0	100	90	80	70	60	50	40

(三) 地基静力载荷试验检测

静力载荷试验 (plate load test, 缩写 PLT) 是工程地质上的一种现场试验, 指通过一定垂直压力测定土在天然产状条件下的变形模量、土的变形随时间的延续性及在载荷板接近于实际基础条件下估计地基承载力等。静力载荷试验应在建筑物基础砌置深度的承压层中进行。当需要测定黄土的湿陷性时, 可在试验中进行人工注水。由于取样方法的改进以及其他先进现场试验方法的出现, 现场静力载荷试验已渐逊色, 但仍可与其他方法校核使用。试验目的用于确定地基土的比例界限压力、极限应力, 为评定地基土的承载力提供依据, 还可用于确定地基土的变形模量和基床系数, 估算地基土的不排水抗剪强度等。

静力载荷试验分为平板试验、螺旋板载荷试验、深层平板载荷试验等。其中平板测试最为常见。

1. 试验设备

平板载荷试验因试验土层软硬程度、压板大小和试验面深度等不同, 采用的测试设备也不同。除早期常用的压重加荷台试验装置外, 目前国内采用的试验装置, 大体可归纳为由承压板、加荷系统、反力系统、观测系统 4 部分组成, 其各部分机能是: 加荷系统控制并稳定加荷的大小, 通过反力系统反作用于承压板, 承压板将载荷均匀传递给地基土, 地基土的变形由观测系统测定。

1) 承压板类型和尺寸

承压板材质要求承压板可用混凝土、钢筋混凝土、钢板、铸铁板等制成, 多以肋板加固的钢板为主。承压板形状可加工成正方形或圆形, 其中圆形压板受力条件较好, 使用最多。

2) 承压板面积

我国勘察规范规定一般宜采用 $0.25 \sim 0.50 \text{ m}^2$, 对均质密实的土, 可采用 0.1 m^2 , 对软土和人工填土, 不应小于 0.5 m^2 。

3) 加荷系统

加荷系统是指通过承压板对地基施加载荷的装置, 大体有:

(1) 压重加荷装置。一般将规则方正或条形的钢锭、钢轨、混凝土件等重物, 依次对称置放在加荷台上, 逐级加荷, 此类装置费时费力且控制困难, 已很少采用。

(2) 千斤顶加荷装置。根据试验要求, 采用不同规格的手动液压千斤顶加荷, 并配备不同量程的压力表或测力计控制加荷值。

4) 反力系统

一般反力系统由主梁、平台、堆载体 (锚桩) 等构成。

5) 量测系统

量测系统包括基准梁、位移计、磁性表座、油压表（测力环）。

机械类位移计可采用百分表，其最小刻度 0.01 mm，量程一般为 5~30 mm，为常用仪表。电子类位移计一般具有量程大、无人为读数误差等特点，可实现自动记录和绘图。

2. 设备的现场布置

当场地尚未开挖基坑时，需在研究的土层上挖试坑，坑底标高与基底设计标高相同。如在基底压缩层范围内有若干不同性质的土层，则对每一土层均应挖一试坑，坑底达到土层顶面，在坑底置放刚性压板，试坑宽度不小于压板宽度的 3 倍。设备的具体布置方式有以下两种：

1) 堆载平台方式 (见图 1-10)

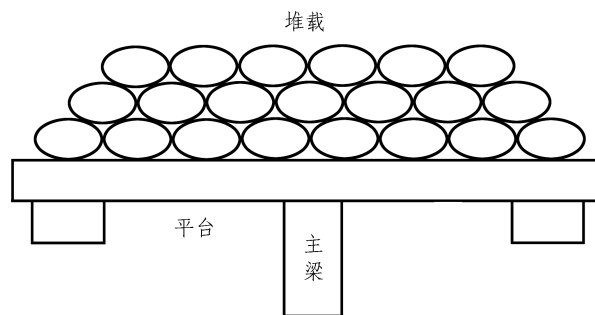


图 1-10 平板载荷试验装置示意图

2) 锚桩反力梁方式 (见图 1-11)

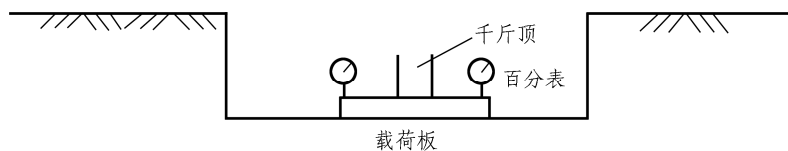


图 1-11 锚桩反力梁载荷试验装置示意图

设备安装时应确保载荷板与地基表面接触良好且反力系统和加荷系统的共同作用力与承压板中心在一条垂线上。当对试验的要求较高时，可在加荷系统与反力系统之间，安设一套传力支座装置，它是借助球面、滚珠等，调节反力系统与加荷系统之间的力系平衡，使载荷始终保持竖直传力状态。

3. 测试方法与数据采集

平板载荷试验适用于浅层地基，螺旋板载荷试验适用于深层地基或地下水位以下的地基。

承压板形状和尺寸的选择：一般用圆形刚性承压板；一般地基承压板面积 0.25~0.5 m²，岩石地基根据节理裂隙的密度确定，一般直径为 300 mm (《建筑地基基础设计规范》GB 50007

—2011，以下简称《地基规范》，复合地基根据加固体的具体情况确定。

试验用的加载设备，最常见的是液压千斤顶加载设备。位移测试可采用机械式百分表或电测式位移计，测试时将位移计用磁性表座固定在基准梁上。液压加载设备和位移量测设备要定期标定，以最大可能地消除其系统误差。

试验的加载方式可采用分级维持载荷沉降相对稳定法（慢速法）、沉降非稳定法（快速法）和等沉降速率法，以慢速法为主。

载荷试验较费时费力，在勘测设计阶段，一般是根据工程设计要求，在一条线路或一个工程地质分区内，选择具有代表性的均质地层（厚度大于2倍压板直径）进行试验。

以下是《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2011）对于慢速法加载过程的规定：

载荷分级：不少于8级，总加载量不应少于载荷设计值的两倍。

稳定标准：当连续两小时内，每小时沉降增量小于0.1 mm时，则认为沉降已趋稳定，可施加下一级载荷。

数据测读：每级加载后，按间隔10 min、10 min、10 min、15 min、15 min，以后每半小时读一次沉降，直至沉降稳定。

加载终止标准：

- （1）承压板周围的土明显地侧向挤出。
- （2）沉降急剧增大，载荷-沉降曲线出现陡降段。
- （3）在某一级载荷的作用下，24 h内沉降速率不能达到稳定标准。
- （4） $s/b \geq 0.06$ （ b 为承压板宽度或直径）。

卸载：该规范没有对卸载过程做出规定，但完整的试验应包含卸载过程。

注意各规范的规定有一些差别。

试验操作过程：

（1）正式加荷前，将试验面打扫干净以观测地面变形，将百分表的指针调至接近于最大读数位置。

（2）按规定逐级加荷和记录百分表读数，达到沉降稳定标准后再施加下一级载荷，一般在加荷5级或已能定出比例界限点后，注意观测地基土产生塑性变形使压板周围地面出现裂纹和土体侧向挤出的情况，记录并描绘地面裂纹形状（放射状或环状、长短粗细）及出现时间。

（3）试验过程的各级载荷要始终确保稳压，百分表行程接近零值时应在加下一级载荷前调整，并随时注意平台上翘、锚桩拔起、撑板上爬、撑杆倾斜、坑壁变形等不安全因素，及时采取处置措施，必要时可终止试验。

快速法加载：特点是加荷速率快、试验周期短，一般情况下试验过程仅数小时至十多个小时，但其测试成果和适用条件与常规方法略有差异。

快速载荷试验仍是逐级加荷，但前后两级加荷的间隔时间是固定的，一般为10~30 min，有规定为60 min的。根据研究结果，在比例界限点以内的弹性变形阶段，快速载荷试验的沉降量 s 一般偏小，当载荷超过 p_1 后地基土已处于塑性变形阶段，快速载荷试验的沉降量 s 一般增幅较大，当载荷接近或超过地基土的极限载荷时，快速与常规两种试验 $p-s$ 曲线逐渐接近，所定极限载荷值相同或差一个载荷级。因此，两种试验方法确定的 p_1 、 p_2 和基本承载力 σ_0 值基本相近，其极差（最大与最小值间）不会超过平均值的30%，符合规范要求。快速载荷试验主要适用于沉降速率快的地层，如岩石、碎石类土、砂类土等，对毋须作沉降检算的建

筑物，结合施工时限也可对黏性土地层采用快速试验。

4. 试验成果的整理分析

1) 曲线绘制

一般地，地基静载试验主要应绘制 $p-s$ 曲线，但根据需要，还可绘制各级载荷作用下的沉降和时间之间的关系曲线以及地面变形曲线。

完整的 $p-s$ 曲线包含了 3 个阶段，如图 1-12 所示。

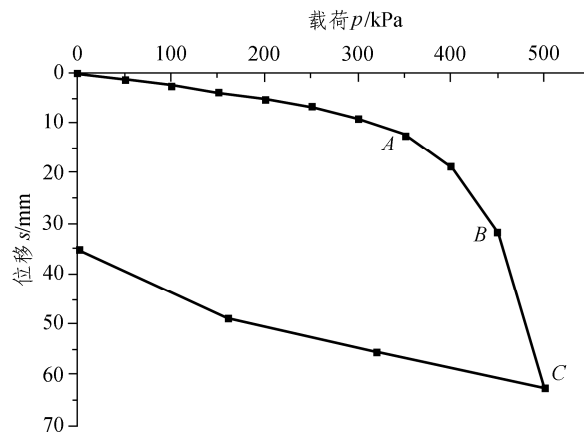


图 1-12 某地基静载试验的载荷~位移曲线 ($p-s$ 曲线)

OA 段为弹性阶段，曲线特征为近似线性，基本上反映了地基土的弹性性质，A 点为比例界限，对应的载荷称为临塑载荷；

AB 段为塑性发展阶段，曲线特征为曲率加大，表明地基由弹性过渡到弹塑性，并逐步进入破坏；

BC 段为破坏阶段，曲线特征为产生陡降段，C 点对应的载荷称为破坏载荷，在该级载荷作用下压板的沉降通常不能稳定或总体位移太大，C 点载荷的前一级载荷（不一定是 B 点）称为极限载荷。

若绘出的 $p-s$ 曲线的直线段不通过坐标原点，可按直线段的趋势确定曲线的起始点，以便对 $p-s$ 曲线进行修正。

2) 试验资料的整理

(1) 根据原始记录绘制 $p-s$ 和 $s-t$ 曲线图。

(2) 修正沉降观测值，先求出校正值 s_0 和 $p-s$ 曲线斜率 C 。 s_0 和 C 的求法有图解法和最小二乘法。

① 图解法。在 $p-s$ 曲线草图（见图 1-13）上找出比例界限点，从比例界限点引一直线，使比例界限前的各点均匀靠近该直线，直线与纵坐标交点的截距即为 s_0 。将直线上任意一点的 s 、 p 和 s_0 代入下式求得 C 值

$$s = s_0 + C_p$$

② 最小二乘法。计算式如下

$$Ns_0 + C \sum p - \sum s' = 0 \quad (1-14)$$

$$s_0 \sum p + C \sum p^2 - \sum ps' = 0 \quad (1-15)$$

解上两式求得

$$C = \frac{N \sum ps' - \sum p \sum s'}{N \sum p^2 - (\sum p)^2} \quad (1-16)$$

$$s_0 = \frac{\sum s' \sum p^2 - \sum p \sum ps'}{N \sum p^2 - (\sum p)^2} \quad (1-17)$$

式中 N ——加荷次数；

s_0 ——校正值，cm；

p ——单位面积压力，kPa；

s' ——各级载荷下的原始沉降值，cm；

C ——斜率。

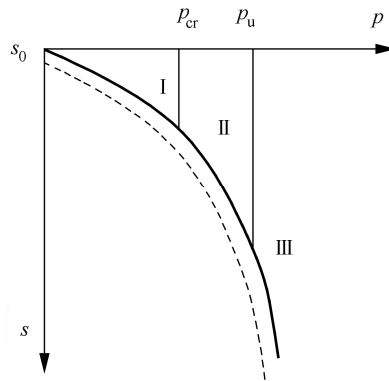


图 1-13 $p-s$ 曲线修正沉降观测

求得 s_0 和 C 值后，按下述方法修正沉降观测值 s ，对于比例界限以前各点，根据 C 、 p 值按 $s = C_p$ 计算；对于比例界限以后各点，则按 $s = s - s_0$ 计算。

根据 p 和修正后的 s 值绘制 $p-s$ 曲线。

5. 地基承载力的判断

就总体而言，建筑物的地基应有足够的强度和稳定性，这也就是说地基要有足够的承载

能力和抗变形能力。确定地基的承载力时既要控制强度，一般至少确保安全系数不小于 2，又要能确保建筑物不致产生过大沉降。但具体到各类工程时侧重点有所不同，这与工程的使用要求和环境有关。铁路建筑物一般以强度控制为主、变形控制为辅；工业与民用建筑则一般以变形控制为主、强度控制为辅。

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 附录 C 对于确定地基承载力的规定如下：

(1) 当 $p-s$ 曲线上有明确的比例界限时，取该比例界限所对应的载荷值。

(2) 当极限载荷小于对应比例界限的载荷值的 2 倍时，取极限载荷值的一半。

(3) 当不能按上述两款要求确定时，当压板面积为 $0.25\sim 0.5\text{ m}^2$ ，可取 $s/b = 0.01\sim 0.015$ 所对应的载荷，但其值不应大于最大加载量的一半。

1) 确定地基承载力特征值

在求得地基承载力实测值后，该规范规定按下述方法确定地基承载力特征值：

同一土层参加统计的试验点不应少于 3 点，当试验实测值的极差不超过其平均值的 30% 时，取此平均值作为该土层的地基承载力特征值 f_{ak} 。

铁道部第一勘测设计院曾对全国各地的 500 多个载荷试验资料进行分析，认为地基基本承载力 σ_0 的取值标准应与地基土的性质结合起来考虑，具体做法是：

(1) 对 $Q_1\sim Q_3$ 的老黏性土和 $Q_1\sim Q_2$ 的老黄土，比例界限对应的 s/d 的平均值为 0.03，取相应载荷值的 1/2 定 σ_0 ，其对应的 s/d 的平均值为 0.007。

(2) 对一般 Q_4 黏性土、 $Q_3\sim Q_4$ 新黄土、砂类土一般以比例界限定 σ_0 ，它所对应的 s/d 值为：

① $I_p > 10$ 的黏性土和新黄土平均为 0.01；

② $I_p \leq 10$ 的黏性土平均为 0.012；

③ 砂类土平均为 0.015。

当比例界限 p_1 和极限载荷 p_2 不明显时，以 $s/d = 0.06$ 对应的载荷当作 p_2 ，并以 $p_2/2$ 定 σ_0 。

(3) 对高压缩性软弱土层一般仍以 p_1 定 σ_0 ，在满足建筑物的沉降要求时，也可取 $s/d = 0.02$ 对应的载荷定为 σ_0 。

2) 确定地基土承载力方法

(1) 强度控制法。

即以比例界限 p_0 作为地基土承载力。这种方法适用于硬塑~坚硬的黏性土、粉土、砂土、碎石土。比例界限的确定方法有以下几种。

① 当 $p-s$ 曲线上有较明显的直线段时，一般采用直线段的终点所对应的压力即为比例界限。

② 当 $p-s$ 曲线上无明显的直线段时，可用下述方法确定：

a. 在某一载荷下，其沉降量超过前一级载荷下沉降量的 2 倍。即 $\Delta s_n > 2\Delta s_{n-1}$ 的点所对应的压力即为比例界限。

b. 绘制 $\lg p \sim \lg s$ 曲线，曲线上转折点所对应的压力即为比例界限。

c. 绘制 $p \sim \frac{\Delta s}{\Delta p}$ 曲线，曲线上的转折点所对应的压力即为比例界限。其中 Δp 为载荷增量，

Δs 为相应的沉降增量，如图 1-14 所示。

(2) 相对沉降量控制法。

根据沉降量和承压板宽度的比值 s/b 确定。当承压板面积为 $0.25 \sim 0.5 \text{ m}^2$ ，可取 $s/b = 0.01 \sim 0.015$ 对应的压力为地基承载力。

(3) 极限载荷法。

当 $p-s$ 曲线上的比例界限点出现后，土很快达到极限载荷，即比例界限 p_0 与极限载荷 p_u 接近时，将 p_u 除以安全系数 F_s ($F_s = 2 \sim 3$) 作为地基承载力；当比例界限 p_0 与极限载荷 p_u 不接近时，可按式 (1-18) 计算

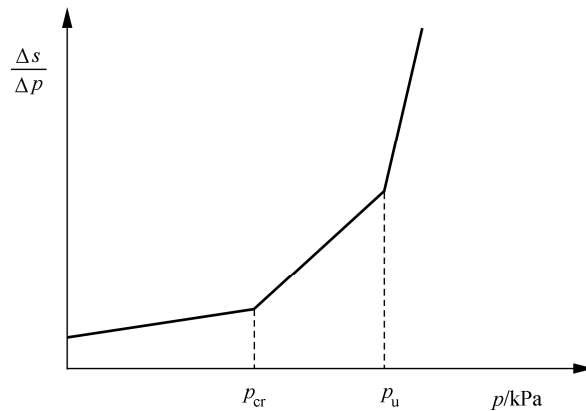


图 1-14 $p - \frac{\Delta s}{\Delta p}$ 曲线

$$f_k = p_u + \frac{p_u - p_0}{F_s} \quad (1-18)$$

式中 f_k ——地基土承载力，kPa；

p_0 ——比例界限，kPa；

p_u ——极限载荷，kPa；

F_s ——安全系数，一般取 $3 \sim 5$ 。

(4) 极限载荷的确定方法。

当载荷试验加载至破坏载荷，则取破坏载荷的前一级载荷为极限载荷 p_u 。

(5) 承载力特征值的确定应符合的规定。

① 当 $p-s$ 曲线上有比例界限时，取该比例界限所对应的载荷值。

② 满足终止试验前三条终止加载条件之一时，其对应的前一级载荷为极限载荷，当该值小于对应比例界限的载荷值的 2 倍时，取载荷极限值的一半。

③ 不能按上述两款要求确定时,可取 $s/b = 0.01 \sim 0.05$ 所对应的载荷值,但其值不应大于最大加载量的一半。

④ 同一土层参加统计的试验点不应少于 3 点,当试验实测值的极差不超过平均值的 30% 时,取此平均值作为该土层的地基承载力特征值 f_{ak} 。

典型工作任务 3 碎石类土地基土工试验与检测应用案例

一、工程概况

猴子石滑坡位于重庆市三峡库区奉节县新县城三马山小区,其所处位置为奉节县新县城的行政商贸和经济中心,滑坡体的整治工程已经基本结束,监测结果表明滑坡体处于稳定状态。然而,滑坡体上有栋重要的建筑物基础埋深在蓄水高程以下,为了确保这栋建筑物的安全,需要对库水位浸泡下的桩基础承载力和沉降特性有清楚的认识,在现场需进行颗粒分析(筛分)试验,为评价整栋建筑物基础在库水上升和涨落下的安全状态提供重要的资料依据,为库区类似工程提供参考。

二、岩土工程性质

根据建筑物修建时的岩土工程勘察报告,对持力层的物理力学性质及工程性能评价如下:

(1) 碎石:由泥质灰岩泥灰岩滑坡堆积而成,呈稍密、中密状态,具低压缩性,由于粒径大小充填物含量及疏密程度差异,导致均匀性差,变异性高,但整体上仍具有较高的力学强度及较小的变形,为不均匀的高差异性地基土。

(2) 块石:由泥质灰岩泥灰岩滑坡堆积而成,呈中密~密实状态,具低压缩性。

三、颗粒级配分析

从猴子石滑坡体现场取回来土样,在室内进行筛分试验,筛分结果如图 1-15 所示。

从图 1-15 中可以看出,碎石土的最大颗粒粒径小于 100 mm,黏粒含量很少,土样粒径大于 2 mm 占总质量的 96%。剔出了大于 10 mm 的土,实际上已经剔出了碎石土中绝大部分土体。其筛分结果如图 1-16 所示,黏粒的含量为 10%~30%。

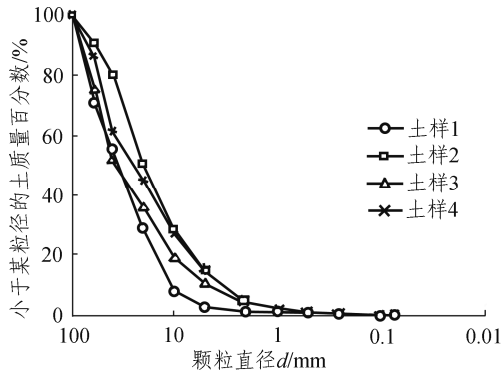


图 1-15 碎石土颗粒级配曲线

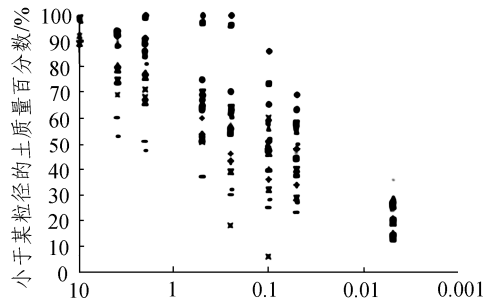


图 1-16 剔出了粒径大于 10 mm 颗粒的级配曲线

情境小结

(1) 土是由固相、液相和气相所组成的三相分散系，土的颗粒组成、结构、构造不同有着不同物理性质指标。土的颗粒级配不同工程性质差异很大。

(2) 《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10002.5—2005)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 的分类方法有一定的差异性。土分为碎石土、砂土、黏性土等，碎石土是指粒径大于 2 mm 的颗粒质量超过总质量 50% 的土。

(3) 颗粒分析试验是测定干土中各种粒组所占该土总质量的百分数的方法借以明了颗粒大小分布情况供土的分类及概略判断土的工程性质及选料之用，因此通过学习需要掌握颗粒分析试验的操作步骤并能对试验成果进行整理分析。

(4) 静力载荷试验是工程地质上的一种现场试验，指通过一定垂直压力测定土在天然产状条件下的变形模量、土的变形随时间的延续性及在载荷板接近于实际基础条件下估计地基承载力等。通过学习需要掌握静力载荷试验检测的工作原理、操作步骤并能对试验成果进行整理分析，确定地基土的临塑载荷、极限载荷，为评定地基土的承载力提供依据；估算地基土的变形模量，不排水抗剪强度和基床反力系数。

情境训练

一、名词解释

粒组 粒径级配 不均匀系数 曲率系数 基本承载力 极限承载力 容许承载力

二、计算题

1. 土样颗粒分析结果如表所示，试绘出颗粒级配曲线，并确定该土的 C_u 和 C_c 及评价该土的级配情况。

粒径/mm	> 2	2 ~ 0.5	0.5 ~ 0.25	0.25 ~ 0.1	0.1 ~ 0.05	< 0.05
粒组含量/%	9	27	28	19	8	9

2. 某原状土样，试验测得容重 $\gamma = 1.72 \text{ g/cm}^3$ ，比重 $G_s = 2.65$ ，含水量 $w = 13.1\%$ 。求：干容重，孔隙比，饱和度。

3. 某地基土样数据如下：环刀体积 60 cm^3 ，湿土质量 0.1204 kg ，干土质量 0.0992 kg ，土粒相对密度为 2.71 ，试计算：天然含水量 w ，天然重度 γ ，干重度 γ_d ，孔隙比 e 。

4. 试样 A 的含水量为 35% ，质量为 800 g 。加同质量的试样 B 与试样 A 后含水量变为 41% ；在搅拌中失去了 2 g 的水。试求试样 B 的含水量。

5. 某饱和土土体积为 97 cm^3 ，土的质量为 198 g ，烘干后的质量为 164 g ，试求该土的 G_s 、 e 、 w 及 ρ_d 。

三、问答题

1. 土的基本指标有哪些？如何由基本指标换算导出指标？

2. 《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10002.5—2005)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 确定地基承载力有何异同点？

四、实验操作题

1. 绘制土的三相草图。

2. 进行土的基本指标的实验测定。

3. 针对具体工程进行地基承载力静力载荷试验检测。