

土力学与地基基础

黄 风 才 主 编
钱 维 德

中等专业学校试用教材

中 国 铁 道 出 版 社

中等专业学校试用教材

土力学与地基基础

TULIXUE YU DIJI JICHU

黄凤才 钱维德 主编

中国铁道出版社

内 容 简 介

本书比较系统地叙述了土力学及铁路路基、桥涵地基基础的基本知识，内容包括：土的物理性质及工程分类，土的力学性质，土中应力，地基沉降计算，天然地基的承载力，扩大基础，桩基础，沉井基础，地基加固的设计原理及特殊地基等十一章。各章附有例题及习题，便于读者理解基本理论及复习思考。

本书可作为铁路中等专业学校铁道工程专业的教材，亦可供土建工程技术人员参考应用。

中等专业学校试用教材

土力学与地基基础

黄凤才 钱维德 主编

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：16 字数：400千

1984年6月第1版 1984年6月第1次印刷

印数：0001—11,500册 定价：1.75元

前 言

本书论述有关铁路路基及桥涵建筑所必需的土力学与地基基础的基本知识。系统地叙述了土的物理、力学性质，土中应力计算，地基沉降计算，天然地基的承载力，扩大基础，桩基础，沉井基础及地基加固的设计原理等。此外也扼要地介绍了湿陷性黄土地基、多年冻土地基、岩溶及断层地基的一般知识。本书力求理论联系实际，深入浅出地阐明基本概念和基本理论，并通过实例帮助读者加深理解基本知识，以提高分析问题和解决问题的能力。各章之后附有习题，供初学者复习思考。

本书计量单位采用国际单位制。

本书是根据1981年铁路中等专业学校《铁道工程专业教学计划》（铁路局）及《土力学与地基基础》教学大纲进行编写的。作为教材，可按两种学制规定学时适当取舍，但应保证实验知识不致削弱。

由于边坡稳定检算及土压力计算放在《地质路基》中讲授，故本书未予编入。为保持教材的完整性，本书附录列有土压力（主要叙述桥涵土侧压力）计算及桥涵地基勘探两部分内容。

本书由齐齐哈尔铁路工程学校黄凤才、钱维德主编，衡阳铁路工程学校黄振民、刘致平主审。其中绪论、第一至四章及附录由黄凤才执笔；第五至十一章由钱维德执笔。黄振民审阅第四至十一章及附录，刘致平审阅绪论及第一至三章。此外，包头铁路工程学校张振业、天津铁路工程学校宋鹏也先后参加了审校。

由于编者业务水平所限，缺点错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1983年7月

目 录

绪 论	1
第一章 土的物理性质及工程分类	3
第一节 概 述	3
第二节 土的结构与构造	3
第三节 土的组成	6
第四节 土的物理性质指标	13
第五节 砂土及碎石土的特征及其指标	19
第六节 粘性土的特征及其指标	21
第七节 土的冻结与融化	25
第八节 土的工程分类及野外鉴别法	28
习 题	30
第二章 土的力学性质	32
第一节 土的渗透性	32
第二节 土的压缩性	40
第三节 土的抗剪强度	51
第四节 砂土的振动液化	63
习 题	65
第三章 土中应力	68
第一节 自重应力	68
第二节 基础底面的接触压力	71
第三节 土中附加应力的计算	75
第四节 非均质地基中的附加应力计算	94
第五节 软弱下卧层顶面的附加应力检算	96
第六节 桥头路基填土及锥体对桥台基底应力的影响	98
习 题	100
第四章 地基沉降计算	103
第一节 分层总和法计算地基沉降量	103
第二节 等值层法及弹性理论法计算地基沉降量	109
第三节 基础由于相互影响及偏心荷载而引起的倾斜	111
第四节 地基沉降随时间变化的计算	118
第五节 荷载试验	127
习 题	131

第五章 天然地基的承载力	133
第一节 地基的破坏形态	133
第二节 地基的临塑荷载与临界荷载	135
第三节 塑性半无限体的应力状态及其应用	137
第四节 浅地基承载力的近似解	140
第五节 深地基承载力的近似解	143
第六节 按《规范》确定地基容许承载力	144
第七节 触探法确定地基承载力	154
习 题	157
第六章 桥涵基础概述	158
第一节 基础的分类	158
第二节 基础类型的选择	160
第三节 基础设计与检算内容概述	161
第四节 基础埋置深度的确定	161
习 题	163
第七章 扩大基础	164
第一节 基础的设计与计算	164
第二节 基础设计算例	168
习 题	173
第八章 地基加固	174
第一节 砂垫层	174
第二节 砂 桩	177
第三节 砂 井	180
第四节 灌浆法	181
习 题	183
第九章 桩 基 础	184
第一节 桩基的构造和类型	185
第二节 单桩的轴向容许承载力	188
第三节 桩基承载力的确定	200
第四节 低桩承台设计	202
习 题	208
第十章 沉井基础	209
第一节 概 述	209
第二节 沉井的型式与构造	211
第三节 沉井尺寸的拟定	213
第四节 沉井基础考虑土的弹性抗力作用的计算	215
习 题	222
第十一章 特殊地基	223
第一节 湿陷性黄土地基	223
第二节 多年冻土地基	226

第三节	岩溶和断层地基	229
附录一	土 压 力	231
第一节	土压力的分类	231
第二节	土压力的计算	232
第三节	铁路桥涵的土的侧压力计算	238
附录二	桥涵地基勘探	244

绪 论

一、土力学与地基基础的研究对象

土力学是研究土的工程性质以及土在荷载作用下的应力、变形、强度和稳定性的科学；地基基础是研究地基的承载力、沉降量及基础设计与施工的科学。而前者又是后者的理论基础。土力学与地基基础则是这两个学科的综合领域。

土是由岩石经过风化作用形成的分散颗粒在各种自然环境中生成的沉积物。桥梁、涵洞、路基、站舍、挡土墙等一切建筑物都修建在土层（或岩层）上，这种支承建筑物的土层（岩层）叫做地基。地基承受着建筑物的全部荷载。在路基工程中，土既是填筑路堤的材料，又是支承路堤的地基。涵洞、隧道等则以土作为它的周围介质，而挡土墙又与土体互相作用着。

土力学是从工程力学范畴里发展起来的。它应用工程力学的原理，分析土在各种条件下的应力分布、变形大小以及土压力、地基承载力与土坡稳定等课题。同时也研究土的物理性质及工程分类，土中水的运动规律（如渗透、毛细水上升、冻结时水的迁移与积聚等），土的压实性与水稳性，土的结构与构造等，据以分析土的工程问题及评价各种力学计算方法的可靠性与适用条件。

由于地基支承着整个建筑物，地基的状态便关系到整个建筑物的安危。因此，作为建筑物的地基应满足两个基本条件：（1）作用于地基的荷载不超过地基的承载能力，以保证地基不致开裂破坏，或者说保证地基稳定。在土力学中，研究土体是否破坏的问题叫做稳定问题。土的稳定性取决于它的强度，因此稳定问题的实质就是土的强度问题。（2）地基的沉降量不超过容许的限度，以保证建筑物不致损坏或影响其正常使用。这类问题在土力学里叫做变形问题。

建筑物借以向地基传递荷载的最下部结构就是基础。基础的结构形式很多，通常把埋置深度不大，只须经过开挖基坑、排水等普通施工方法就可以进行建造的基础统称为浅基础（或明挖基础）。反之，埋置于地层深处的基础统称为深基础（如桩基础、管柱基础、沉井基础、沉箱基础等）。设计时应根据地基的地质、水文、上部结构的荷载、建筑材料、施工方法、地形和临近既有建筑物等条件，选择适当的基础类型。

二、本书的主要内容

本书主要论述有关铁路路基和桥涵建筑所必需的土力学与地基基础的基本知识。主要内容有：

（一）土的物理性质与工程分类

这是土力学原理的基础，主要论述与铁路工程设计及施工有关的土的物理性质指标及评价方法。

（二）土的力学性质

主要介绍土的基本力学规律，研究土的渗透性、压缩性及抗剪强度，用力学原理来分析土的变形和强度问题。并在此基础上讨论土的击实性与基坑渗流量的计算。

（三）土中应力

主要研究土的自重应力，基底接触压力以及在荷载作用下土中应力的分布与计算。

（四）地基沉降计算

讨论地基沉降计算的基本原理与方法。

（五）天然地基的承载力及稳定性计算

介绍天然地基承载力及稳定性计算的基本原理，按《铁路桥涵设计规范》确定地基容许承载力的方法，以及用触探原理确定地基承载力的方法等。

（六）桥涵基础

论述桥涵基础的类型选择、设计与检算，主要介绍扩大基础、低桩承台基础及沉井基础的设计原理。

（七）地基加固及特殊地基

叙述常用的地基加固方法。介绍特殊地基（湿陷性黄土、多年冻土、岩溶及断层地基）上的基础设计特点。

本书附录中编入了土压力（主要叙述桥涵土侧压力计算）及桥涵地基勘探等内容。

本书未述及路基边坡稳定检算理论，这方面的内容可参阅有关铁路路基专书。

本书在论述有关桥涵地基基础的内容和要求时，都以《铁路桥涵设计规范》为依据。书中凡引用《铁路桥涵设计规范》时，都简称《规范》。为便于读者学习，书中采用的符号力求与《规范》所用者一致。

三、本学科的特点及发展方向

由于土是分散颗粒组成的三相介质的沉积物，土粒之间和土粒与水之间的相互作用，使土体具有十分复杂的物理力学性质。现有的土力学理论还不能对此进行全面而准确的描述与分析。由于土体不是理想的弹性体或塑性体，因而目前土力学中所用的弹性理论与塑性理论方法都只能是近似的计算方法，这就使计算结果可能不完全符合实际情况，有时甚至还有较大的偏差。因此，现有的土力学知识虽是指导我们从事路基工程及地基基础工程实践的理论基础，但还应通过实验、实测并紧密结合实践经验进行合理分析，才能使实际问题得到妥善解决。所以理论联系实际是本学科的显著特点。

从六十年代到七十年代，由于电子计算技术的逐步普及，土力学的计算方法得到了迅速的发展。现在已有可能采用有限元法来计算比较复杂的土工和地基基础结构，并可进一步采用最优化方法来设计基础。今后应利用现代科学技术成就，大力改进土工试验方法，积累可靠的试验资料，更深入地认识土的基本性质和土力学的基本规律。由于土的不均匀性，同一类土的物理力学性质也不是均一的，所以在土的基本试验和力学分析中，在土工结构物和地基基础的设计中，已开始采用概率与数理统计的理论。国外有些学者并提出了应用概率方法的土力学计算理论。

此外，在基础工程方面，采用新材料、新工艺、新型基础结构及新的施工方法，也是重要的发展方向。

第一章 土的物理性质及工程分类

第一节 概 述

土木建筑工程所称的土，是岩石经过风化、剥蚀、搬运、沉积等过程后所形成的各种松散颗粒物质。这是土的狭义概念，广义的概念则将整体岩石也视为土。

铁路工程中将土（岩石除外）分为几大类，即碎石土、砂土、粘性土和特殊土（包括黄土、软土和冻土等）。几大类中又分亚类，如砂土分砾砂、粗砂、中砂、细砂和粉砂；粘性土又分粘土、砂粘土和粘砂土等。碎石土和砂土统称为无粘性土，分类的依据是土的颗粒组成。粘性土则根据工程地质特征和塑性指数进行分类。

在土的形成过程中，由于自然地理环境、原始沉积条件及沉积以后的经历各不相同，土的类型与性质是千差万别的。一般说来，在大致相同的地质年代及相似的沉积条件下形成的土往往在成分及性质上是相近的。沉积年代愈长，上覆土层重量愈大，土愈压得密实，由孔隙水中析出的化学胶结物也愈多。因此，老土层的强度、变形模量比新土层的要高；甚至由散粒体经过成岩作用又变成整体岩石，如砂土成为砂岩，粘土变成页岩等。目前所见到的土大都是第四纪沉积层，还正处于成岩过程中而尚未完成这个过程，因此一般都呈松散状态，胶结作用较低。但第四纪是由距今一百万年开始的相当长的时期，在第四纪早期沉积的和近期沉积的土，性质上就有着相当大的差别。这种沉积年代长短的影响，对粘性土尤为明显。不同的自然地理环境对土的性质也有很大影响。我国沿海地区的软土、严寒地区的永冻土、西北的湿陷性黄土、西南亚热带的红粘土等，除了具有一般的共性外，还各具有自己的特点。

本章着重讨论一般粘性土与无粘性土的主要物理性质、指标与分类，至于一些特殊土将在第十一章中阐述。

第二节 土的结构与构造

一、土 的 结 构

土粒或土粒集合体的大小、形状、相互排列与联结等综合特征，称为土的结构。土的结构可分为三种基本类型：

（一）单粒结构（图 1—1）

这种结构是由较大土粒在自重作用下，在水或空气中下落堆积而成，碎石土和砂土就是单粒结构的土。因土粒较大，土粒间的分子引力远小于土粒自重，土粒之间几乎没有相互联结作用，是典型的散粒状物体。土的强度主要来源于土粒之间的内摩擦力。

单粒结构可能是紧密的，也可能是疏松的。紧密单粒结构的土，土粒排列已接近最稳定

的位置，内摩擦力发挥比较充分，所以土的强度较大，压缩性较小，是良好的天然地基。

疏松结构的土，土粒间的空隙大，土粒位置不稳定。在荷载作用下，土粒容易移动，产生很大下沉，不经处理不宜用作地基。

(二) 蜂窝结构 (图 1—2)

颗粒细小的粘性土大多具有蜂窝结构，有时粉砂也可能有这种结构。粒径为 $0.02 \sim 0.002\text{mm}$ 左右的土粒在水中沉积时，基本是单个土粒下沉。由于土粒很细，土粒表面分子吸引力很大，超过了土粒本身的重量。当土粒在下沉途中碰上已沉积的土粒时，这种分子吸引力就使土粒停留在最初的接触点上不再下降，因而形成很大孔隙的蜂窝状结构。

蜂窝结构的孔隙一般远大于土粒本身的粒径。如在沉积后没有受过比较大的上覆压力，则在建筑物的荷载作用下这种土可能产生较大的沉降。

(三) 絮状结构 (图 1—3)



(a) 疏松单粒结构



(b) 紧密单粒结构

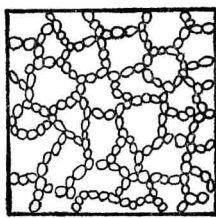


图 1—2 土的蜂窝结构

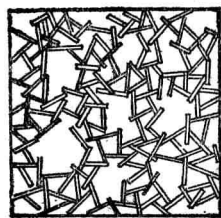


图 1—3 土的絮状结构

图 1—1 土的单粒结构

这是粘土颗粒特有的结构形式。粒径小于 0.002mm 的土粒能够在水中长期悬浮，不因自重而下沉。当自然环境变迁，水质发生变化时，这些悬浮的细小土粒凝聚成絮状物下沉。这些絮状物中的孔隙远大于土粒的粒径，当絮状物下沉时，由于土粒表面分子吸引力的作用，在絮状物之间形成类似蜂窝而孔隙很大的结构，称为絮状结构。

当外界条件变化时，土的结构会发生变化。例如下卧土层在上覆土层的作用下固结压密时，结构趋向于更紧密的排列；卸载时土发生膨胀（如钻探取土时土样的膨胀或基坑开挖时土的隆起）会松动土的结构；当土层失水干缩或介质变化时，盐类结晶胶结也会增强土粒间的联结；在外力作用下（如夯实时）会破坏土粒原来的排列方式和颗粒间联结，使絮状结构变为平行的定向结构。

土的结构被扰动后，会影响土的原有的物理力学性质。因此在取土试验时，应尽量减少扰动，避免破坏土的原状结构。

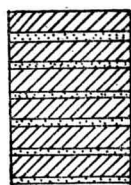
二、土的构造

土的构造是指同一土层中土粒或土粒集合体相互间的位置与充填空间的特点。土的构造大体分为下列几种。

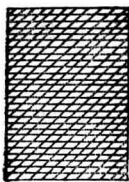
(一) 层状构造 (图 1—4 a)

层状构造也称为层理。土层表现为由不同细度与不同颜色的颗粒构成的薄层交叠而成，薄层的厚度可由零点几毫米至几毫米，成分上有细砂与粘土交互层或粘土交互层等。最常见

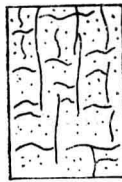
的层理是水平层理（薄层互相平行，且平行于土层界面），此外还有波状层理（薄层面呈波状，总方向平行于层面）及斜层理（薄层倾斜，与土层界面有一交角）等。



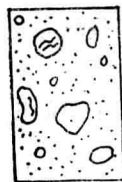
(a) 层状构造



(b) 分散构造



(c) 裂隙构造



(d) 结核状构造

图 1—4 土的构造

层状构造使土在垂直层理方向与平行层理方向的性质不一样，平行于层理方向的压缩模量与渗透系数往往要比垂直方向的大。

(二) 分散构造 (图 1—4 b)

土层中各部分的土粒组合没有明显差别，分布均匀，各部分的性质也相近。各种经过分选的砂、砾石、卵石形成较大的埋藏厚度，没有明显层次，都是分散构造。分散构造的土比较接近理想的各向同性体。

(三) 裂隙构造 (图 1—4 c)

土体被许多不连续的小裂隙分割，裂隙中往往充填盐类沉淀，不少坚硬与硬塑状态的粘土具有这种构造。裂隙破坏土的整体性。裂隙面是土中的软弱结构面，沿裂隙面的抗剪强度很低而渗透性却很高。浸水以后裂缝张开，工程性质更差。

(四) 结核状构造 (图 1—4 d)

在细粒土中明显掺有大颗粒或聚集的铁质、钙质集合体、贝壳等杂物，叫做结核状构造。例如含砾石的冰碛粘土、含结核的黄土等。由于大颗粒或结核往往分散，所以这类土的性质取决于细粒部分。在取小型试样试验时应注意将结核与大颗粒剔除，以免影响成果的代表性。

三、土的结构性与灵敏度

从地层中取出的土样，如能保持原有的结构及含水量不变，则称为“原状土样”。如果土样的结构、构造已受到人为的破坏或水分发生变化，则称为“扰动土”或“非原状土”。

粘性土的性质与其结构是否被扰动有密切关系。扰动土与具有相同密度和含水量的原状土相比，力学性质往往变坏。土的性质受结构扰动的影响而改变的特性，称为土的结构性。粘性土是具有结构性的土，而砂土和碎石土则没有结构性。

粘性土结构性的强弱，用灵敏度 s_l 来表示：

$$s_l = \frac{q_u}{q'_u} \quad (1-1)$$

式中 q_u ——原状土的无侧限抗压强度（即单轴受压的抗压强度），kPa；

q'_u ——彻底破坏原状土结构但仍保持其密度和含水量的重塑土的无侧限抗压强度，kPa。

按灵敏度大小，粘性土可分为：

低灵敏土 $1 < s_i \leq 2$;
 中灵敏土 $2 < s_i \leq 4$;
 高灵敏土 $s_i > 4$ 。

某些软粘土在重塑后甚至不能维持自己的形状，无侧限抗压强度几乎等于零，这时灵敏度就很大。

对于灵敏度大的土须特别注意保护基槽及持力层，使其结构不受扰动。

第三节 土的组成

一般说来，土是由固体颗粒（土粒）和颗粒之间孔隙中的水和气体组成的；因此可以把土看成三相体系，即固相、液相和气相。有时，土粒间的孔隙全部被水充满，形成饱和土，这种土就是二相的（即固相与液相）。当土粒间的孔隙中只有空气时，就是干土。干土也是二相的（即固相与气相）。土的各相组成部分的性质以及它们之间的比例关系和相互作用，决定了土的物理力学性质。

一、土的固体颗粒

土的固体颗粒由不同大小和形状的各种矿物颗粒所组成，此外还有少量有机质。这里简要讨论土的固体颗粒的粗细形状、矿物成分及其特性。

（一）土的颗粒级配或粒度成分

1. 粒组及其划分方案

土颗粒的大小称为粒度，把粒度相近的土粒合为一组，称为粒组（或粒级）。粒组的划分应能反映土粒直径的变化引起土的物理性质变化的客观规律。一般说，在同一粒组范围内，土的物理性质大致相同。而不同粒组范围内的土，其物理性质又有所区别。通常采用的粒组划分方案列于表 1—1 中。

2. 颗粒分析方法

天然土是各种不同大小的土粒的混合物，它包含着若干粒组的土粒。各粒组的重量（质量）所占土样总重（质量）的百分比（以干土重量百分比表示）叫做颗粒级配或粒度成分。颗粒分析的目的就是确定土的颗粒级配，也就是确定土中各粒组颗粒的相对含量。颗粒分析的方法目前有筛分法与比重计法两种。前者适用于粒径大于 0.1mm 的土，后者适用于粒径小于 0.1mm 的土。

（1）筛分法：用一套筛子，各筛的筛孔由大到小自上而下排列，上加顶盖，下加底盘，叠在一起。筛子有粗筛与细筛二种：粗筛（圆孔）孔径为 100、80、60、40、20、10、5、2 mm；细筛孔径为 2、1、0.5、0.25、0.1mm。我国铁路部门也有使用标准筛的，其孔径为 10、5、2、1、0.5、0.25、0.1mm。试样的用量，按水电部《土工试验规程》规定为：不含粒径大于 2 mm 颗粒的土，用 100~300g；最大颗粒粒径不超过 10、20、40mm 的土，分别用 300~900、1000~2000 和 2000~4000g；最大颗粒粒径超过 40mm 的土，用 4000g 以上。试验时，将烘干或风干土样放入最上一层筛中以后，用摇筛机振荡各筛，使细土分别通过各级筛孔漏下。称出存留在每层筛子和底盘内的土粒重量，就可以计算出粒径大于（或小于）某一数值的土粒重量占土样总重量的百分数。表 1—2 是某土样颗粒分析试验

的筛分成果记录。

土 的 粒 组

表 1—1

粒 组 名 称		粒 径 (mm)	一 般 特 性
漂石 (浑圆或圆棱) 或块石 (尖棱)	大	大于800	透水性大, 无粘性, 毛细上升高度极微, 不能保持水分。
	中	400~800	
	小	200~400	
卵石 (浑圆或圆棱) 或碎石 (尖棱)	大	60~200	
	中	40~60	
	小	20~40	
砾石 (浑圆或圆棱) 或角砾 (尖棱)	大	10~20	
	中	4~10	
	小	2~4	
砂 粒	粗	0.5~2	易透水, 无粘性, 毛细上升高度不大, 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	0.25~0.5	
	细	0.05~0.25	
粉 粒		0.005~0.05	透水性小, 湿润时能出现微粘性, 遇水膨胀和干缩都不显著, 毛细上升较快, 上升高度较大。
粘 土 粒		小于0.005	几乎不透水, 潮湿时呈可塑性, 粘性大, 遇水膨胀和干缩都较显著, 压缩性大。

注: <0.002mm的颗粒在土力学中称为胶粒。

颗粒分析试验记录 (筛分法)

表 1—2

筛前总土重: 2834 (g); 筛后总土重: 2832 (g)			
小于2mm土重: 2120 (g); 小于2mm土重百分比: 75 (%); 小于2mm试样重: 100 (g)			
孔 径 (mm)	留 筛 土 重 (g)	小于某孔径的土重 (g)	小于某孔径土重百分比 (%)
20	176	2658	94
10	198	2460	87
2	338	2122	75
0.5	28.3	71.7	54
0.25	32.4	39.3	29
0.10	31.6	7.7	6
底盘	7.7		

颗 粒 级 配

粒 径 (mm)	>20	20~10	10~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	<0.1
百分比 (%)	6	7	12	21	25	23	6

(2) 比重计法: 取小于0.1mm的干土Qg (一般为20~30g) 加水, 使其彻底分散并放入量筒中。为使聚集成粒团的土粒分散开来, 需要煮沸或机械搅拌或加适当的化学药品 (如盐酸、氢氧化钠等)。设土的悬液体积为V, 用搅拌器搅动量筒中的悬液, 使土粒在悬液中均匀分布 (如图 1—5 a所示); 当停止搅拌一定时间后, 悬液中不同粒径的土粒都以相应的速度匀速下沉, 粗土粒沉得快, 细土粒沉得慢。因

此,在不同深度处土粒的分布浓度或悬液的浓度(即悬液的密度, g/ml)都不相同。

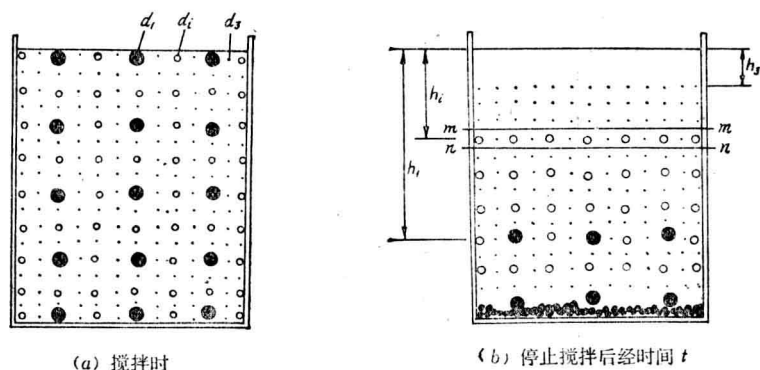


图 1—5 土粒悬液

设停止搅拌的瞬间为 $t = 0$, 当将悬液静置时间 t_i 后, 粒径为 d_i 的球形颗粒在自重作用下沉降的深度为 h_i , 粒径 d_i 按下列司托克斯 (Stokes) 公式计算

$$d_i = \sqrt{\frac{1800 \eta h_i}{(\gamma_s - \gamma_w) t_i}} \quad (1-2)$$

式中 d_i ——土粒直径 (mm);

η ——水的动力粘滞系数 ($\text{kPa} \cdot \text{s}$);

γ_s ——土粒容重 (kN/m^3);

γ_w ——水的容重 (kN/m^3), 随水的温度而变;

h_i ——在时间 t_i 内土粒的沉降深度 (cm);

t_i ——土粒沉降时间 (s)。

为了简化计算, 公式 (1-2) 可写成

$$d_i = K \sqrt{\frac{h_i}{t_i}} \quad (1-2a)$$

式中 K ——粒径计算系数 ($= \sqrt{\frac{1800 \eta}{\gamma_s - \gamma_w}}$), 与悬液温度和土粒容重 (或土粒比重) 有关。其值见表 1-3;

其余符号同前。

由于土粒在悬液中匀速下沉, 因此在停止搅拌 t_i 时间后, 在深度 h_i 范围以内已经没有大于 d_i 的土粒了, 或者说大于 d_i 的土粒已沉到深度 h_i 以下去了 (图 1-5 b)。并且在深度 h_i 附近一个小区段 $m-n$ 内, $\leq d_i$ 的土粒分布浓度与停止搅拌时 ($t = 0$) 均匀悬液中 $\leq d_i$ 的土粒分布浓度 γ_i 一样。浓度 γ_i 可以表示为

$$\gamma_i = \frac{1}{V} \left[Q_i + \left(V - \frac{Q_i}{\gamma_i} \right) \gamma_w \right] \quad (1-3)$$

式中 Q_i 为在 Q 重的土样中 $\leq d_i$ 的土粒重量, 由此公式可得

$$Q_i = V \gamma_i \frac{\gamma_i - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \quad (1-4)$$

悬液中 $\leq d_i$ 的土粒重量 Q_i 占总土重 Q 的百分比 p_i 可由下式求得

$$p_i = \frac{Q_i}{Q} \times 100\%$$

将公式 (1-4) 代入, 得:

$$p_i = \frac{V \gamma_i}{Q} \left(\frac{\gamma_i - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \right) \quad (1-5)$$

粒径计算系数 $K \left(= \sqrt{\frac{1800}{\gamma_s - \gamma_w}} \right)$ 值表

表 1—3

温 度 (℃)	土 粒 比 重								
	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
5	0.1385	0.1360	0.1339	0.1318	0.1298	0.1279	0.1261	0.1243	0.1226
6	0.1365	0.1342	0.1320	0.1299	0.1280	0.1261	0.1243	0.1225	0.1208
7	0.1344	0.1321	0.1300	0.1280	0.1260	0.1241	0.1224	0.1206	0.1189
8	0.1324	0.1302	0.1281	0.1260	0.1241	0.1223	0.1205	0.1188	0.1172
9	0.1305	0.1283	0.1262	0.1242	0.1224	0.1205	0.1187	0.1171	0.1155
10	0.1288	0.1267	0.1247	0.1227	0.1208	0.1189	0.1173	0.1166	0.1141
11	0.1270	0.1249	0.1229	0.1209	0.1190	0.1173	0.1156	0.1140	0.1124
12	0.1253	0.1232	0.1212	0.1193	0.1175	0.1157	0.1140	0.1124	0.1109
13	0.1235	0.1214	0.1195	0.1175	0.1158	0.1141	0.1124	0.1109	0.1094
14	0.1221	0.1200	0.1180	0.1162	0.1144	0.1127	0.1111	0.1095	0.1080
15	0.1205	0.1184	0.1165	0.1148	0.1130	0.1113	0.1096	0.1081	0.1067
16	0.1189	0.1169	0.1150	0.1132	0.1115	0.1098	0.1083	0.1067	0.1053
17	0.1173	0.1154	0.1135	0.1118	0.1100	0.1085	0.1069	0.1054	0.1039
18	0.1159	0.1140	0.1121	0.1103	0.1086	0.1071	0.1055	0.1040	0.1026
19	0.1145	0.1125	0.1108	0.1090	0.1073	0.1058	0.1042	0.1028	0.1014
20	0.1130	0.1111	0.1093	0.1075	0.1059	0.1043	0.1029	0.1014	0.1000
21	0.1118	0.1099	0.1081	0.1064	0.1048	0.1033	0.1018	0.1003	0.0990
22	0.1103	0.1085	0.1067	0.1050	0.1035	0.1019	0.1004	0.0990	0.09767
23	0.1091	0.1072	0.1055	0.1038	0.1023	0.1007	0.09930	0.09793	0.09659
24	0.1078	0.1061	0.1044	0.1028	0.1012	0.09970	0.09823	0.09688	0.09555
25	0.1065	0.1047	0.1031	0.1014	0.09990	0.09830	0.09701	0.09566	0.09434
26	0.1054	0.1035	0.1019	0.1003	0.09879	0.09731	0.09592	0.09455	0.09327
27	0.1041	0.1024	0.1007	0.09915	0.09767	0.09623	0.09482	0.09349	0.09225
28	0.1032	0.1014	0.09975	0.09818	0.09670	0.09529	0.09391	0.09257	0.09132
29	0.1019	0.1002	0.09859	0.09706	0.09555	0.09413	0.09279	0.09144	0.09028
30	0.1008	0.09910	0.09752	0.09597	0.09450	0.09311	0.09176	0.09050	0.08927

当悬液搅拌均匀且停止搅拌后，每隔不同时间 t_i ，把比重计轻轻放入悬液内，读比重计读数，得比重计浮泡中心处的悬液浓度 γ_i 及悬液表面到浮泡中心处的（沉降）距离 h_i （从预先作出的 h_i 与比重计读数的关系曲线查得）。按公式（1—2）及（1—5）可分别求出粒径 d_i 及百分数 P_i 。试验时，每次读得比重计读数后要将比重计轻轻取出，同时要测量悬液温度。

3. 颗粒级配的表达方式

根据试验分析的结果，表达土的颗粒级配常用下列二种方式。

（1）表格法：用表格说明土样中各粒组的含量，如表 1—4 所示。土工试验报告书常用此法。

（2）粒径级配曲线法：用一条曲线表示土样的颗粒级配，如图 1—6 所示。图中横坐标表示粒径，用对数比例尺；纵坐标表示小于某一粒径 d 的土样总重的百分比，用普通比例尺。粒径级配曲线能表示土的颗粒级配。若级配曲线平缓，表示土中各种粒径的土粒都有，颗粒不均匀，级配良好；若曲线陡峻，则表示土粒均匀，级配不好。对于粗粒土（粒径小于 0.1mm 的细粒土含量少于 5%），采用不均匀系数 C_u 及曲率系数 C_k 来评价土的级配情况。 C_u 及 C_k 的定义为

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{1-6 a}$$

$$C_k = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}} \tag{1-6 b}$$

式中 d_{60} 、 d_{30} ——限定粒径，级配曲线上
小于该粒径的土粒重量
占土总重分别为60%及
30%；
 d_{10} ——有效粒径，级配曲线上
小于该粒径的土粒重量
占土总重的10%。

不均匀系数 C_u 及曲率系数 C_k 愈大，表示
级配愈良好，土粒大小愈不均匀。水电部《土
工试验规程》规定： $C_u \geq 5$ ， $C_k = 1 \sim 3$ 的土
称为级配良好的；不同时满足上述条件的土，
则为不良级配或均匀粒径的。

例如图 1—6 中的曲线 1， $d_{10}=0.085$ ，
 $d_{30}=0.18$ ， $d_{60}=0.29$ ，则

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.29}{0.085} = 3.4 < 5$$

$$C_k = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}} = \frac{0.18^2}{0.085 \times 0.29} = 1.31$$

土样颗粒级配的分析成果

表 1—4

粒 组 (mm)	颗粒级配 (%), 以重量计		
	土样 a	土样 b	土样 c
>10	—	6.3	—
10~5	—	18.7	—
5~2	3.1	20.0	—
2~1	6.0	12.3	—
1~0.5	14.4	8.0	—
0.5~0.25	41.5	6.2	—
0.25~0.1	26.0	4.9	8.0
0.1~0.05	9.0	4.6	14.4
0.05~0.01	—	8.1	37.6
0.01~0.005	—	4.2	11.1
0.005~0.001	—	5.2	17.9
<0.001	—	1.5	11.0
合 计	100%	100%	100%

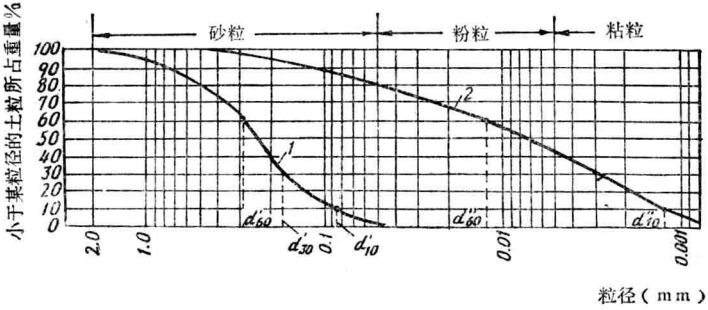


图 1—6 粒径级配曲线

表明曲线 1 是不良级配的土。

4. 土的颗粒级配对土的性质的影响

土的颗粒级配对于土的各种性质具有重要影响。前面说过，在同一粒组范围内，土的物理性质大致相同。对于非均质的天然土来说，土中所含的各个粒组的相对含量不同，那么表现出来的土的性质也就不同。一般说来，如果土中某一粒组的颗粒占优势，那末这种土就基本上具有这一粒组的性质。粗粒土的性质主要取决于其固相颗粒的粗细。细粒土的性质主要与粘土粒组的含量有关。粘土颗粒与土中水之间的相互作用，对粘性土的工程性质具有决定性的影响。这是因为粘土颗粒表面和它周围的水有很强的相互作用的能力，土粒的比表面愈大，这种能力就愈强。单位质量（或体积）的粘土颗粒的总表面积称为比表面。土粒愈细，