

清华大学土木工程系
按新规范编写专业用书

土力学及基础工程

丁金粟 李锦坤
虞石民 王洪瑾 编著

地质出版社

1992

清华大学土木工程系
按新规范编写专业用书

土力学及基础工程

丁金粟 李锦坤
虞石民 王洪瑾 编著

地质出版社

1992

(京)新登字 095 号

内 容 提 要

本书由清华大学土木工程系组织编写。全书共分九章，前五章包括土的物理性质、渗透性与渗流、地基应力和变形、抗剪强度与地基承载力、挡土墙土压力和土坡稳定分析等土力学内容；后四章包括建筑场地工程地质勘察、天然地基浅基础设计、桩基、软土地基处理和特殊土地基等基础工程内容。上述各章中凡与规范有关内容，均依据《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7-89)编写。

本书是一本按新规范编写的简明、实用并注意结合一般工程实际的土力学基础工程教材，它可作为大专院校工业与民用建筑专业的教材或教学参考书，也可作为职工业余大学学生自修教材和广大工程技术人员的专业技术参考书。

土力学及基础工程

丁金粟 李锦坤 编著
虞石民 王洪瑾

责任编辑：王 伟

责任校对：王花芝

*

地震出版社出版

北京民族学院南路 9 号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 17.5印张 448 千字

1992年6月第一版 1992年6月第一次印刷

印数 0001—6000

ISBN 7-5028-0584-2/TU·46

(973) 定价：10.00元

清华大学土木工程系《按新规范编写专业用书》

编 委 会

主 编 王国周 龙驭球 沈聚敏 陈肇元 崔京浩

编 委 (以姓氏笔画为序)

支秉琛 邝守仁 刘元鹤 江见鲸 杨德驊

郑金床 裘宗濂

特约编辑 陈金凤

编委的话

新规范已陆续颁布执行，工民建专业在教学、设计方面迫切需要这方面的专业参考书。为此，清华大学土木工程系组织教师编写了这套《按新规范编写专业用书》。主要读者对象是：大专院校、广播电视大学、职工业余大学、继续进修学院工民建专业的师生，土建专业工程设计、施工技术人员以及准备高等教育自学考试的青年。

根据我们多年的教学经验，编写中遵循“内容充实，取材新颖，注重实用，便于自学”的原则，努力做到不仅包括学科的基本内容，而且反映科学技术的最新成果；既重视理论概念的阐述，也注意实际专题和工程实例的讲解。此外，为了减少自学的困难，对于个别内容较深的章节和习题标以注解和提示，绝大多数习题列有答案。以上是我们的主观意愿，问题和缺点一定不少，希望得到同行和读者指教。

在内容的编排上，除了参照清华大学土木工程系有关教学大纲之外，还参考了全国高等教育自学考试土建类自学大纲（草案），以及电视大学、建设部职工高等专科学校等单位所制订的工民建专业的部分教学大纲，使这套专业用书具有较广泛的适用范围，便于有关部门选为教材或教学参考书。

这套书的出版，得到了地震出版社的大力支持，在此谨致谢意。

清华大学土木工程系
《按新规范编写专业用书》编委会
1990年1月

目 录

绪 论	(1)
一、土力学、地基与基础概念	(1)
二、学习土力学及基础工程的重要性	(1)
三、本学科发展简介	(3)
四、本课程内容及学习要求	(4)
第一章 土的物理性质和工程分类	(5)
§ 1-1 土的生成	(5)
§ 1-2 土的三相组成	(6)
§ 1-3 土的物理状态	(14)
§ 1-4 土的结构与构造	(23)
§ 1-5 土的压实特性	(25)
§ 1-6 土的工程分类	(27)
思考题与习题	(29)
第二章 土的渗透性与渗流	(31)
§ 2-1 土的渗透性	(31)
§ 2-2 流网原理及其绘制方法	(35)
§ 2-3 渗透力及临界水力坡降	(40)
思考题与习题	(42)
第三章 地基的应力和变形	(44)
§ 3-1 概述	(44)
§ 3-2 地基自重应力	(44)
§ 3-3 基底压力	(46)
§ 3-4 地基附加应力计算	(49)
§ 3-5 土的压缩性	(67)
§ 3-6 地基的最终沉降量	(74)
§ 3-7 基础沉降随时间变化关系的分析	(85)
§ 3-8 应力历史对地基沉降的影响	(96)
思考题与习题	(100)
第四章 土的抗剪强度与地基承载力	(102)
§ 4-1 土的抗剪强度基本概念	(102)
§ 4-2 土的极限平衡条件与破坏理论	(104)
§ 4-3 土的抗剪强度指标测定	(107)
§ 4-4 应力历史、应力路径与抗剪强度的关系	(119)
§ 4-5 地基的破坏过程与确定地基承载力的原理	(123)

§ 4-6 地基的比例极限荷载 (临塑荷载).....	(125)
§ 4-7 地基的极限荷载	(127)
思考题与习题.....	(133)
第五章 挡土墙土压力和土坡稳定分析	(135)
§ 5-1 概述	(135)
§ 5-2 土压力种类	(135)
§ 5-3 朗金土压力理论	(137)
§ 5-4 库仑土压力理论	(142)
§ 5-5 挡土墙设计要点	(146)
§ 5-6 土坡稳定分析	(150)
思考题与习题.....	(156)
第六章 建筑场地工程地质勘察	(158)
§ 6-1 概述	(158)
§ 6-2 勘察任务和内容	(158)
§ 6-3 工程地质勘察方法	(161)
§ 6-4 工程地质勘察报告	(169)
思考题与习题.....	(171)
第七章 天然地基上浅基础设计	(172)
§ 7-1 设计原则与步骤	(172)
§ 7-2 天然地基上浅基础的类型	(174)
§ 7-3 基础材料	(180)
§ 7-4 基础埋置深度的确定	(181)
§ 7-5 地基承载力的确定	(184)
§ 7-6 地基变形允许值	(194)
§ 7-7 基础底面尺寸的确定	(197)
§ 7-8 减轻建筑物不均匀沉降危害的措施	(202)
§ 7-9 基础的结构与构造	(206)
思考题与习题.....	(216)
第八章 桩基础	(218)
§ 8-1 概述	(218)
§ 8-2 单桩承载力的确定	(220)
§ 8-3 群桩的承载力	(229)
§ 8-4 桩基础的设计步骤与例题	(234)
§ 8-5 深基础简介	(238)
思考题与习题.....	(242)
第九章 软弱土地基处理和特殊土地基	(244)
§ 9-1 概述	(244)
§ 9-2 软弱土地基处理的一般方法	(245)
§ 9-3 夯实	(246)

§ 9-4 换土垫层	(247)
§ 9-5 挤密桩及振冲桩	(249)
§ 9-6 堆载预压加固	(251)
§ 9-7 化学加固	(257)
§ 9-8 区域性特殊土	(258)
思考题与习题	(267)
主要参考文献	(269)

绪 论

一、土力学、地基与基础概念

建筑物一般都建造在地层之上，支承建筑物全部重量的那部分地层称为 建 筑 物 的 地 基 (图 0-1)。在平原地区，由于基岩埋藏较深，地表覆盖土层较厚，因此建筑物常建造在由土构成的地基之上，这种地基称为土基。在丘陵地带和山区，由于基岩埋藏浅，甚至裸露于地表，因此建筑物将建造在由岩石构成的地基之上，这种地基称为岩基。解决岩石地基上的工程设计和施工问题属于岩石力学和岩石工程等的任务，在本门课程中，我们仅限于研究和讨论土基问题。由于地表土层都是

岩石经过漫长地质年代风化、搬运、沉积后的产物，是由固体颗粒、水和气体所组成的三相散布系物质，它具有强度低、受力后压缩变形大以及透水性低、固结时间长等一系列特点：为了安全地将建筑物全部重量传给地基，就需要将建筑物底部与地基接触部分的尺寸扩大，这个被扩大的部分，就被称为建筑物的基础。例如墙下

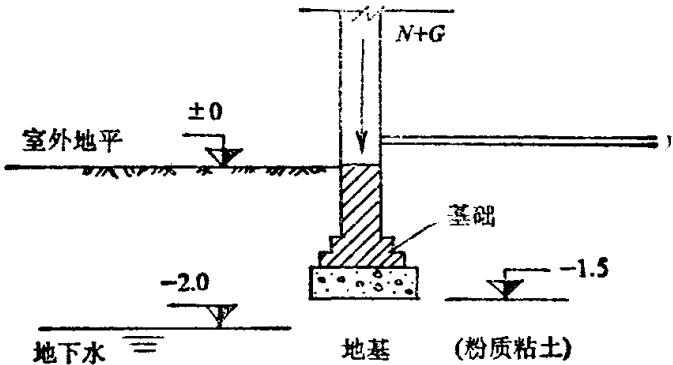


图 0-1 建筑物地基与基础

扩大部分称为墙基，柱下扩大部分称为柱基，因此，基础是建筑物结构的一个组成部分 (图 0-1)。由于基础担负着将建筑物全部重量安全地传给地基而地基又必须能正常地支承建筑物全部重量的任务，因此地基基础设计是整个建筑结构设计工作中的重要环节之一，而合理的地基基础设计必须从建筑场地的实际地质勘察资料出发，并考虑上部建筑结构类型特点，才能确定出合理的地基基础设计方案。土力学则是为了能正确进行地基基础设计以及路堤、土坝、挡土墙等土工构筑物的设计和计算，而着重于研究土的物理性质、水理性质及力学性质的一门科学，它是一门技术基础科学，是力学的一个分支。

二、学习土力学及基础工程的重要性

由于设计人员不掌握建筑场地地质资料，缺乏对地基土工程性质应有的正确评价，工作中违背了地基基础设计原则，导致基本建设投资浪费甚至造成重大工程事故的例子是屡见不鲜的。

图 0-2 为著名加拿大特朗斯康谷仓工程事故实例。该谷仓建于 1941 年，谷仓高 31 m、宽 23 m、长 60 m，整个谷仓由 65 个圆筒仓组成，谷仓下面为一块厚 2 m、埋深为 3.6 m 的整体钢筋混凝土筏片基础，因此谷仓的整体结构刚度较好，谷仓自重 $2 \times 10^5 \text{ kN}$ 。谷仓建造后第一次装填谷物，当填装谷物重为 $2.7 \times 10^5 \text{ kN}$ 时，发现谷仓已下沉 30 cm，立即停止填装谷物并进行监测，谷仓继续下沉，结果在 24 小时内，谷仓西侧下沉 8.8 m，东侧抬高 1.5

m，仓身整体倾斜达 27°(图 0-2)。所幸由于谷仓结构整体刚度较强，仓身虽严重倾斜，但仓筒完整，未出现明显裂缝。事故发生后，经过地基勘察了解到，基础以下的地基土为厚约 15 m 的高塑性淤泥质软粘土，通过试验室内力学性指标测定及计算，该层软粘土的极限承载力为 280 kPa，但谷仓填装谷物后使基底平均压力达到 320 kPa，由于地基负荷过大，导致地基土整体滑动，发生地基土强度破坏。为了扶正谷仓以恢复使用，在基础下面设置了 70 多根支承于深 16 米基岩上的混凝土桩，并使用 388 个 500 kN 千斤顶，将谷仓扶正，但扶正后的谷仓比原来下沉了 4 m。

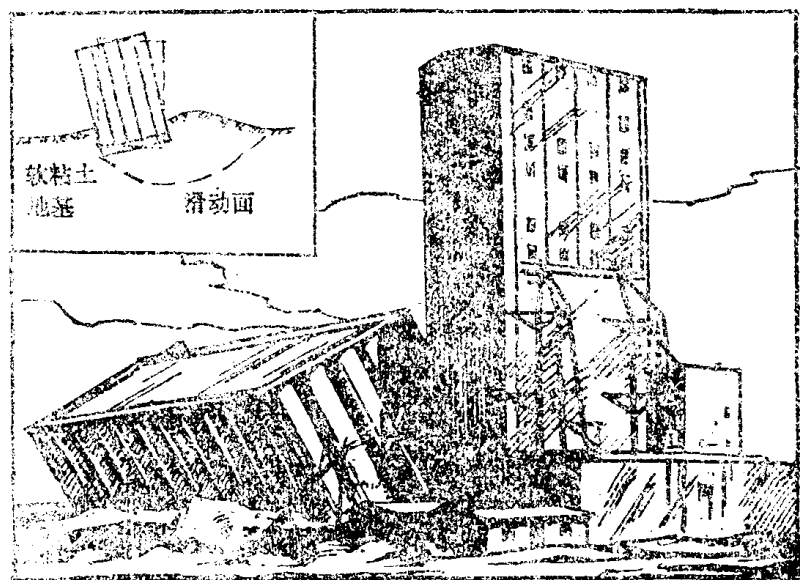


图 0-2 加拿大特朗斯康谷仓工程事故

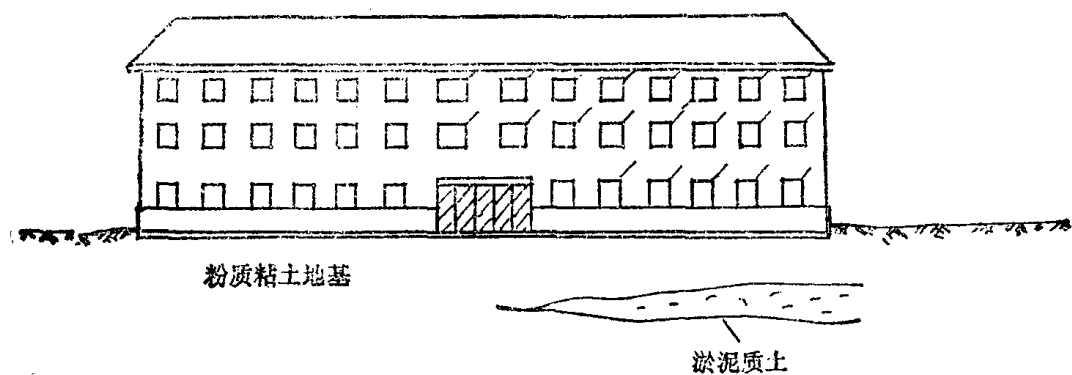


图 0-3 某教学楼因地基不均匀下沉墙面开裂

图 0-3 为某 3 层教学楼示意图。该教学楼建筑面积约 3000 m²，砖混结构，纵墙承重，采用钢筋混凝土条型基础。教学楼建于 1952 年，建成后不久，在楼梯间以北（包括楼梯间在内）由三楼外墙面开始出现裂缝，以后裂缝逐渐向二楼、一楼延伸、扩展，同时在室内三楼、二楼地板也出现东西向裂缝，以后不得不封闭教学楼，停止使用；并探查裂缝原因，准备对教学楼进行加固。通过进一步对教学楼地基勘察，发现在建筑物北侧地基土中含有局部淤泥质土，它的天然含水量高，孔隙比大于 1，有机质含量高，压缩性大，以致北侧地基压缩变

形过大，造成建筑物地基过大的不均匀下沉，导致建筑物开裂。事后经研究决定采取加强上部结构整体刚度，以调整地基不均匀沉降。具体做法是在建筑物四周外墙，除门、窗洞外全部敷设钢筋网，并喷射砾石混凝土，厚度 8 cm，将整个建筑物外墙箍起，并将原有清水墙面改为水刷石混水墙面，此项加固措施投资，接近原建筑投资一半。经加固后的教学楼一直使用至今，未再出现问题。

上面两个工程事故实例说明，在建筑物地基基础设计中必须遵守两条规定：① 应满足地基强度要求；② 地基变形应在容许值范围之内。为了在建筑物地基基础设计中能严格遵守上述两条规定，以保证建筑物的安全和正常使用，这就要求工程技术人员学习和掌握土力学、基础工程的基本原理和主要概念，结合建筑场地具体地质条件、结构物特点以及可能的施工方案，经过必要计算，从而才能确定出合理的地基基础设计方案。

三、本学科发展简介

土力学、基础工程和其他技术科学一样，是人类在长期生产实践中逐步总结提高而形成的。它既有着长久的发展历史，又是近六十年来才得到迅速发展的一门科学。

人类自远古以来就已广泛利用土进行工程建设，如我国的万里长城、大运河以及埃及的金字塔等。但是由于受到社会生产力和科学技术条件限制，直到 18 世纪中叶，人们对土的工程特性认识还只是停留在感性认识阶段。

18 世纪产业革命，大量建筑物兴起，积累了许多成功的经验，也总结了不少失败的教训，它促使人们寻求理论上的解释。如 1773 年法国科学家库伦发表了土的抗剪强度和土压力理论；1856 年达西研究了砂土透水性，创立了达西定律；1885 年布辛内斯克给出了半无限弹性体中应力分布的计算公式，等等。这些理论的出现，又推动了大规模的桥梁、铁路、房屋建筑工程的建造。但是，从 18 世纪中叶到 19 世纪末，人们对土的强度、变形以及渗流等问题，只能做某些局部理论的探讨，还形不成一门系统的、完整的学科。

20 世纪初，由于工业发展、建筑规模扩大以及科学技术上的新成就，促使人们有条件全部系统地对土的力学性质做理论和实践的研究。1925 年土力学奠基人太沙基的专著《土力学》问世，这本书总结了前人的经验，系统阐述了若干土力学原理问题，提出了著名的有效应力原理，使土力学作为一门独立的学科出现在人们面前，以后在工程实践中不断丰富、不断提高。

60 年代后，大型电子计算机问世以及土工实验设备及技术的迅速发展，推动了土力学研究工作的进一步深入开展。长期以来，在土力学理论中计算沉降时，是将土看作纯弹性体，而进行土体稳定分析和土压力计算时，又将土看作理想塑性体材料，而实际上土的应力应变关系具有非线性、剪胀性、加工硬化和软化等特性，不是弹性理论或塑性理论所能概括的，特别是对于那些大型的高重建筑物的设计，运用已有的理论已经远远不能满足要求。借助于计算机及实验技术，许多学者已开展了土的弹塑性应力应变关系研究，提出了各种土的本构模型，其中有的模型已应用于实际工程的计算和分析。此外，在固结理论方面也开始探讨三维非线性固结问题，同时也开展了土的微观结构等方面的研究。

随着新的大型施工机械出现以及施工技术的不断改进和完善，在高填方工程（如高土石坝工程）、城市高重建筑物地基基础设计、施工水平方面，近三四十年来有了很大的发展。例

如先后出现了锚杆工程、地下连续墙、旋喷桩、挖孔桩、土工织布等一系列地基基础工程新技术，尽管目前它们的设计理论还很不完善，但这些新的工程技术已在许多重要工程中被广泛采用。

我国古代劳动人民在生产实践中积累了丰富的土力学地基基础知识，运用这些知识建成了举世闻名的万里长城、大运河等工程。但是解放前由于帝国主义的侵略、封建主义和官僚资本主义的长期统治，使我国科学技术水平非常落后，同样，土力学基础工程方面的科学水平也得不到应有的发展。

新中国成立后，随着国家经济建设的开展，我国在地基勘探、土工测试技术、土的物理力学性质研究以及地基基础工程设计、施工等方面都取得了显著成绩，并借鉴国外技术经验、结合国内实际情况，还先后编订出适用于我国的土工试验操作规程及建筑地基基础设计规范。相信随着我国社会主义现代化建设蓬勃发展，通过众多的高重建筑、大型桥梁、机场、公路、水坝、港湾以及海洋采油平台等工程的修建，必将进一步推动我国土力学和基础工程学科的更大发展。

四、本课程内容及学习要求

本课程除绪论外共有九章，其中第一章至第五章为土力学原理部分；第六章至第九章为地基基础勘察、设计、施工等内容，属基础工程部分。因此，本门课程是既有技术基础课内容（土力学原理部分）又有专业课内容（基础工程部分）。

通过本课程学习，要达到下列基本要求：

（1）了解土的基本物理力学性质，掌握主要土工试验的基本原理及操作技术。知道为确定地基基本承载力和解决某些土工问题需作哪些室内和现场土工试验。

（2）掌握一般建筑物设计中有关土力学内容的设计计算方法，例如地基强度（承载力）、地基变形（沉降）、土坡稳定和挡土墙土压力计算等。

（3）了解在建筑物设计之前需要进行勘察工作的内容，掌握地基土野外鉴别能力，学会使用工程地质勘探报告书。

（4）能够正确地使用《建筑地基基础设计规范（GBJ 7-89）》，解决地基基础设计中所遇到的有关问题。

当然，正确合理地解决地基基础设计、施工中的问题，要依赖于土力学基本原理的运用和实践经验的借鉴，但是由于地基土性质的复杂以及建筑物类型、荷载情况可能又各不相同，因而在地基基础工程中不易找到完全相同的实例，因此，学习本门课程时，应特别注意掌握基本概念、基本理论，以培养分析问题和解决问题的能力。

第一章 土的物理性质和工程分类

土的物理性质是土最基本的性质，是分析土的工程性质的重要依据，也是学习后面各章的基础。研究土的物理性质必须针对它的特点，土最重要的特点就是它不是一种连续性的材料，而是由三相不同物质（固体、液体、气体）组成的集合体，同时土又是地质历史的产物。影响这种散粒性材料物理性质的主要因素是：① 三相组成本身的性质及其相互作用——土的组成；② 三相之间相对含量比例的变化——土的状态；③ 颗粒的排列方式和连接状况——土的结构。

本章将主要说明这三个因素对土性质的影响以及在工程应用上对这三个影响因素所使用的指标和表达方式。此外，还将介绍如何根据这些指标对土进行工程分类。

§ 1-1 土 的 生 成

工程上所谓的土，是指覆盖在地球上大部分陆地表面和部分海底的碎散岩石的堆积物。除火山灰、硅藻土等外，土都是岩石风化后的产物。地壳表层的岩石长期暴露在大气中，受到温度、湿度变化的影响，体积经常在膨胀或收缩，不均匀的胀缩会使岩石产生裂隙而解体。与此同时，还受到风、霜、雨、雪的侵蚀以及植物根的破坏，岩体就逐渐崩解、碎裂为大小和形状不同的一些碎块，这个过程叫作物理风化。物理风化是个量变过程，它只改变颗粒的大小和形状，而不改变颗粒的成分。因此，其产物保持了与母岩相同的矿物成分，称为原生矿物。物理风化的结果，产生了象砂、卵石、砾石等颗粒间没有粘结作用的粗粒土，也叫无粘性土。物理风化后形成的碎块与四周的水、氧气、二氧化碳等接触，并受到有机质、微生物等的作用，引起化学变化，使岩石性质发生质变，产生出更细的与母岩矿物成分不同的次生矿物颗粒，这个过程叫作化学风化。化学风化所形成的细粒土，颗粒之间具有粘结能力，所以又叫作粘性土。这两类土由于成因不同，组成土的颗粒大小和矿物成分不同，表现出的物理性质和工程性质差别很大。在自然界中，这两种风化过程往往是同时或交替进行的。由物理风化和化学风化所形成的矿物颗粒堆积在一起，中间贯串着孔隙，孔隙间存在着水和空气，这种碎散的固体颗粒、水和气体的集合体就叫作土。

岩石表面风化后所生成的土，没有经过搬运而残留在原来地方的叫作残积土，一般分布在山顶或山坡。残积土由于未经搬运，故其颗粒呈棱角状，粒径组成也未经分选，无层理构造，均质性很差。

岩石的风化产物如果被各种自然力（如重力、流水、风力、冰川等）搬运至别的地方再沉积下来，可以总称为沉积土。细分可有坡积土、洪积土、冲积土、风积土以及冰积土等。由于搬运与沉积的条件和行程的远近不同，土粒大小的分选程度、土粒形状以及土的结构都会各不相同。例如最常碰到的冲积土，由于是流水冲积而成，流水所能带走的颗粒大小取决于流速。因此，大小不同的颗粒随着河流流速的改变，可以堆积在不同的地方，一般总是粗颗粒沉积在河流上游，细颗粒则沉积在河流下游，具有明显的颗粒分选性，并可形成层理构

造。同时，颗粒的棱角由于在流水搬运过程中，经过滚磨逐渐变成光滑、圆浑。此外，土在沉积过程中，由于沉积的环境不同，沉积后所受的力不同，形成的土的松密程度和软硬程度也必然不一样。在水中刚沉积不久的土，没有经过压密，土就又松又软；当土愈积愈厚，下部的土因为长时间受上部土的压力作用，就要变密变硬。

总之，自然界的土都是由岩体经过长期的风化、搬运、堆积而形成的。实践证明，不同成因和年代的土，具有不同的工程性质。因此，在研究土的物理、力学性质时，必须重视土的形成历史、环境及存在条件等因素对土性的影响。

§ 1-2 土的三相组成

一般情况下，土由三相不同物质组成：固相——矿物颗粒和有机质；液相——水溶液；气相——气体。固体颗粒构成土的骨架，骨架间贯穿着孔隙，孔隙充有水和气体，故土也被称为三相散布系（图 1-1）。在自然界一个土单元中，这三部分所占的比例（按重量或体积计算）并不是固定不变的，而是随着四周环境，例如压力、空气的湿度、地下水位的高低等条件的变化而变化。例如土所受的压力增加，土就要变密，单位体积内固体颗粒的重量就增加，相应的水和气体的数量就减少。位于地下水位之下的土，其孔隙可能全部为水所充满，称之为饱和土。反之，当土孔隙中没有水而全部为气体所填充时，则称之为干土。



图 1-1 土的三相组成示意
1. 固体颗粒；2. 水；3. 汽泡

饱和土和干土为二相散布系。

显然，土的性质必然取决于三相物质本身的特性以及受它们之间的相互作用和相对含量的影响，因此有必要首先对组成土的各相物质进行研究。

一、土的固体颗粒

在组成土的三相物质中，固体颗粒是土的主要组成部分，也是决定土性质的最主要因素。土颗粒的级配不同、矿物成分不同、形状不同，则土的性质也不同。下面就从这三方面进行讨论。

1. 土的颗粒组成

土的颗粒组成是指土中所含固体颗粒的大小及其组合搭配的情况。

(1) 粒组。土中固体颗粒由粗到细变化范围很大，有粗到几十厘米的，有细到千分之几毫米的。土由粗至细的数量变化可引起土性质的质量变化，例如可从无粘性土变成粘性土。

土粒的大小通常是以粒径来表示的，我们不可能，也没有必要研究每个土粒的粒径大小，一般都是把粒径相近的颗粒归成一组，叫作粒组，不同等级的粒组在物理力学性质上就有显著的差别。各国对土粒组的分界粒径不尽相同，我国现在常用的各粒组名称及其分界粒径尺寸如表 1-1 所示。

(2) 粒径级配曲线。自然界里很难遇到只有一种粒组所组成的土，绝大多数都是由几种粒组混合搭配而成。这样，土的性质就将取决于不同粒组的相对含量。我们把土中所含各粒组的相对含量用土粒总质量的百分数表示，称为土的粒径级配。粒径级配对土的工程性质（尤其是对粗粒土）有重要影响，常被用来作为土的分类定名的标准（详见§1-6）。

表 1-1 土 的 粒 组

粒组名称	漂石 (块石)	卵石 (碎石)	砾石 (角砾)	砂粒	粉粒	粘粒
粒径范围(mm)	>200	20—200	2—20	0.05*—2	0.005—0.05*	<0.005

* 有些教科书也用0.075mm作为粉粒的上限和砂粒的下限。

为了确定各粒组的相对含量，首先要在试验室内进行颗粒分析。常用的分析方法有筛分法和比重计法两种。所谓筛分法就是将风干的土样，在振动下通过一套孔径递减的标准筛，然后称出留在各个筛子上的土质量，即可求得各个粒组的相对含量。由于标准筛的最小筛孔孔径为 0.074 mm,故筛分法通常只适用于粒径大于 0.1 mm 的土颗粒。对于粒径小于 0.1 mm 的土颗粒，可根据不同粒径的土粒在静水中下沉速度不同的原理，用比重计法测定各粒组的相对含量百分数。具体试验方法可参阅土工试验有关书籍。如果土中既含大于又含小于 0.1 mm 的颗粒时，则上述两种方法可联合使用。

颗粒分析的成果常用粒径级配累积曲线来表达。绘制粒径级配曲线时用直角坐标系。横坐标表示颗粒直径，为了把土样中粒径相差上千倍的粗细含量都表示出来，尤其是能把占总重量小，但对土性质可能会有重要影响的细粒部分清楚地表达出来，宜采用对数尺度坐标；纵坐标则表示小于某粒径的土质量占土样总质量的百分数（简称累积百分数），采用算术尺度。下面用一个例子说明粒径级配曲线的绘制方法。

取 500 g 某种天然砂放入标准筛中。经筛分后，称出留在各筛子上的土粒质量(图 1-2)。经整理、计算结果如表 1-2。将表中计算结果绘在半对数坐标系上，即可得到该砂样的粒径级配曲线 如图 1-3 中曲线①。图中曲线②和③是另外二种土样的级配曲线。

从粒径级配曲线上可以看出：

- ① 土的组成情况。即土样所含土粒大小的范围及各粒组的相对含量，可用于土的分类。
- ② 颗粒分布情况。试比较图 1-3 中①、②、③三条级配曲线的形状。曲线①和②比较光滑、连续，形状大体相似。但曲线坡度的陡缓不同，代表了土样的均匀程度不同。曲线①较陡，分布范围窄，说明该土所含颗粒大小相差不多，比较均匀；曲线②则较平缓，表示土粒分布范围广，土中大小颗粒相差悬殊，颗粒不均匀，各粒组级配良好。曲线③和曲线②比较起来，虽然两者的分布范围相差不多，但形状却很不相似。曲线③中间出现了水平段，说明缺乏某些中间粒径，叫作级配不连续。为了衡量土的粒径级配是否良好，常用不均匀系数 K_u 和曲率系数 K_c 两个判别指标，

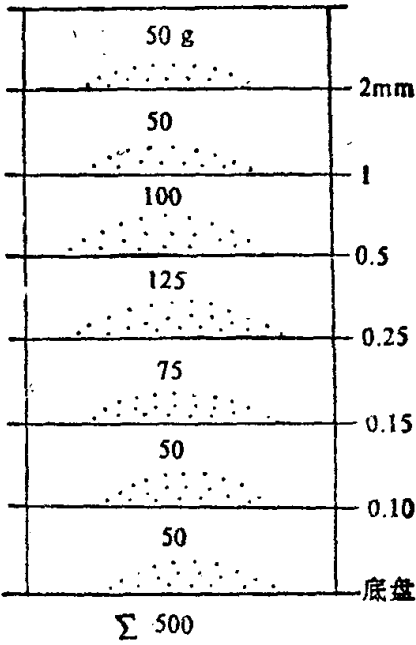


图 1-2 土样筛分示意

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

- 7 -

表 1-2

某种砂的粒径级配

孔径(mm)	留筛质量(g)	小于相应孔径的质量(g)	小于相应孔径上占总质量百分数(%)
2	50	450	90
1	50	400	80
0.5	100	300	60
0.25	125	175	35
0.15	75	100	20
0.1	50	50	10
底盘	50		

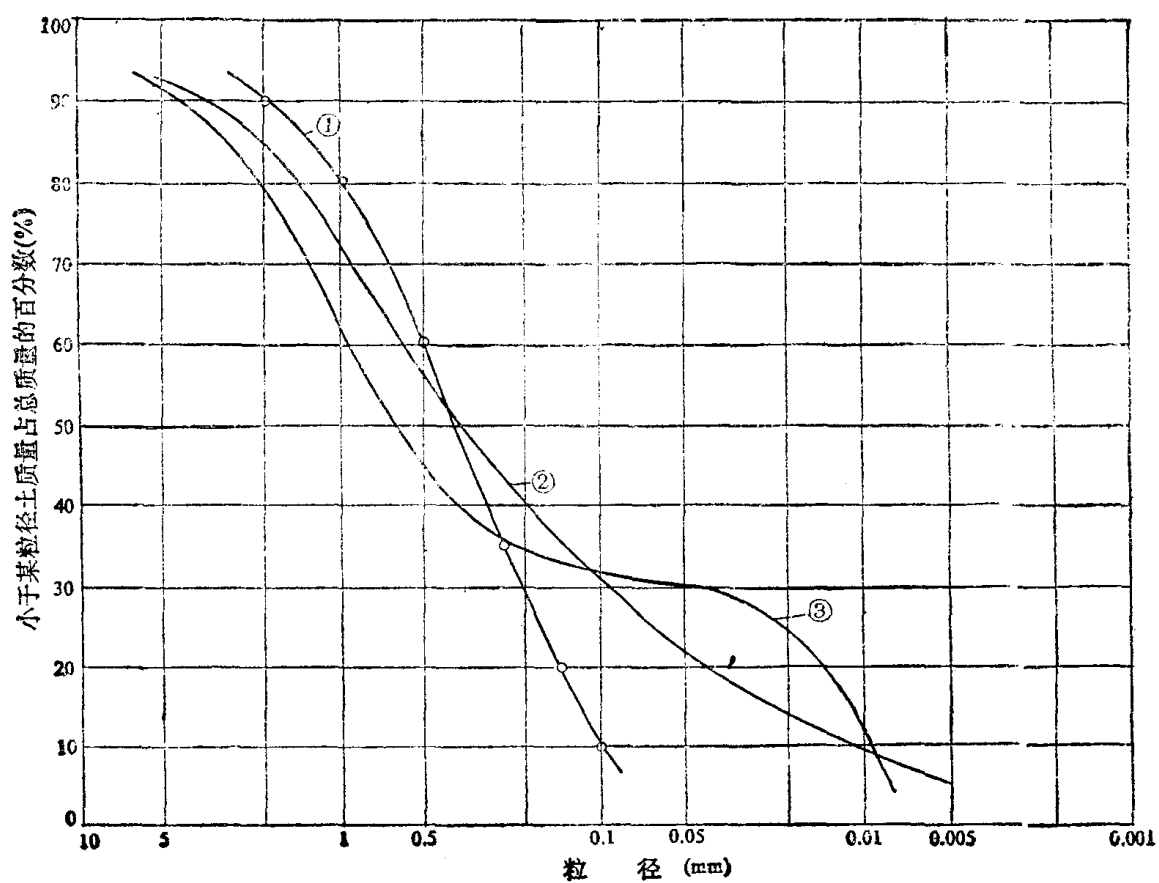


图 1-3 粒径级配曲线

式中 d_{60} ——某一土粒直径，小于该直径的土粒质量占全部土粒总质量的 60%，即图 1-3 中相应于纵坐标为 60% 的横坐标值， d_{60} 又称为控制粒径；

d_{10} ， d_{30} ——分别为某一土粒直径，小于相应粒径的土粒质量分别占全部土粒总质量的 10%、30%， d_{10} 又称为有效粒径。

不均匀系数 C_u 可用来反映曲线的坡度， C_u 愈大，曲线愈平缓，土愈不均匀，说明这种土粗细搭配好，粗颗粒形成的孔洞可被中、细颗粒填满，压实时就能获得较高的密度，因而土的压缩性小、强度高。工程上一般把 $C_u \leq 5$ 的土称为级配均匀或级配不良的土，而 $C_u > 10$ 的土则称为级配良好的土。

曲率系数 C_c 可用来反映曲线形状是否连续。对于出现水平段的级配曲线来说，只用 C_u 一个指标判断级配好坏尚不够充分。例如图 1-3 中的曲线③，虽然其 d_{60} 与 d_{10} 均与曲线②相差不多， C_u 值高达 95，但它却因缺少某些中间粒径，造成土的级配不连续。这种粒径级配不连续的土往往渗透稳定性差，故仍不能称为级配良好。一般，当曲率系数 $C_c = 1-3$ 时，可以表示土的级配连续性能好。

综上所述，评价土的级配是否良好应该用 C_u 和 C_c 两个指标。因此，在我国水利部制定的土工试验操作规程中规定，级配良好的土必须同时满足 $C_u \geq 5$ ， $C_c = 1-3$ ；不能同时满足上二个指标者，称为级配不良的土。

2. 土的矿物成分

土的矿物成分是指土中固体颗粒自身的组成情况，它取决于成土母岩的成分及所受到的风化作用。前面已经讲到，构成土的矿物类型主要分原生矿物和次生矿物两大类。原生矿物是岩石物理风化破碎的结果，颗粒较粗，矿物成分与母岩相同，常见的有石英、长石、云母等。其形状多呈粒状(云母除外)。次生矿物是原生矿物经化学风化后的产物，颗粒极细，粘土矿物、氧化物、氢氧化物和各种难溶盐类如 CaCO_3 、 MgCO_3 等均属次生矿物。

次生矿物中粘土矿物最重要，它们是构成粘性土的重要组成部分。粘土矿物是一种复合的铝-硅酸盐，经 X 射线分析和在电子显微镜下观察，其内部有层状晶体构造，由两种基本结晶单元构成，一种是硅-氧四面体，另一种是铝-氢氧八面体(图 1-4)。由这两种结晶单元所形成的晶片，以不同的方式结合，就形成了三大类粘土矿物，即高岭土、伊里土和蒙特土(图

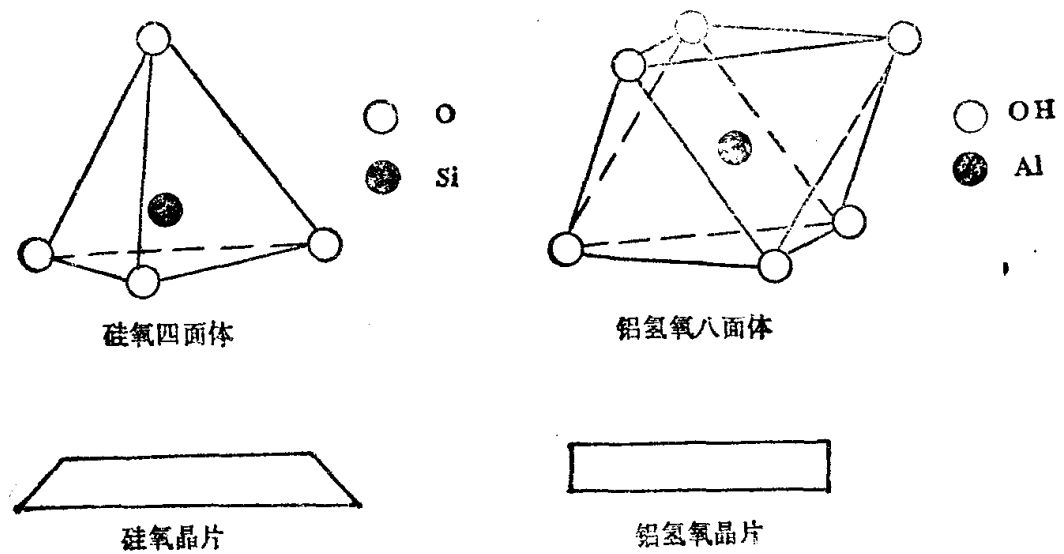


图 1-4 粘土矿物基本单元示意