

604435

5(3)81

7253

T. 1

高等学校试用教材

土力学和基础工程

上册

刘成宇 主编



中国铁道出版社

成都科学技术大学图书馆

基本馆藏

5(3)81

7253

T. 1

高等学校试用教材

土力学和基础工程

上册

刘成宇 主编

中国铁道出版社

1980年·北京

内 容 简 介

本书是高等学校专业基本理论教材，适用于铁道工程，铁道桥梁和隧道，以及地下铁道等专业；也可供从事这方面工作的技术人员参考。

全书分上下两册，共十一章。上册五章为土力学部分，下册六章为基础部分。本册分别论述土的物理和力学性质；土中应力和变形状态；天然地基承载力，地基的沉降及计算；土压力和边坡稳定检算等。有些章的后面附有算例和习题，概括了该章主要内容，可对读者起总复习作用。

高等学校试用教材 土力学和基础工程 上 册

刘 成 宇 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 1/16 印张：10.75 字数：267 千
1980年10月 第1版 1980年10月 第1次印刷
印数：0001—9,500 册 定价：1.15 元

目 录

前言	1
绪论	2
第一章 土的物理性质	6
§ 1—1 土的形成	6
§ 1—2 土的结构	8
§ 1—3 颗粒分析	10
§ 1—4 土的各相指标	13
§ 1—5 胶粒和胶胞	17
§ 1—6 土中水分形态	19
§ 1—7 粘性土的物理和物理化学性质	21
§ 1—8 粘性土的稠度	23
§ 1—9 砂的密实度	26
§ 1—10 地基土的分类	26
§ 1—11 土的冻结	28
习 题	29
第二章 土中应力状态和土的力学性质	30
§ 2—1 土中一点的应力状态和应力平衡方程	30
§ 2—2 土在弹性状态下的简单应力和应变	32
§ 2—3 土的渗透性	34
§ 2—4 土的有效压力和中性压力	37
§ 2—5 天然地基的自重有效压力	40
§ 2—6 土的压缩性	42
§ 2—7 饱和粘土的渗透固结概念和超静水压	45
§ 2—8 固结度方程及其应用	49
§ 2—9 土的抗剪强度	51
§ 2—10 土中一点应力极限平衡	54
§ 2—11 用轴压试验测土的抗剪强度及其指标	56
§ 2—12 粘性土的流变性质	60
习 题	62
第三章 地基的沉降及计算	65
§ 3—1 基底的接触应力	65
§ 3—2 刚性基础基底压力算法	68
§ 3—3 弹性半无限体内的应力分布	71
§ 3—4 地基沉降量计算	83

§ 3—5	沉降差和倾斜	87
§ 3—6	饱和粘土地基的沉降过程	91
§ 3—7	荷载试验和变形模量	96
例 题		98
习 题		101
第四章	天然地基的承载力	105
§ 4—1	地基的破坏状态	105
§ 4—2	地基临塑压力	107
§ 4—3	塑性半无限体的应力状态及其应用	109
§ 4—4	浅地基承载力的近似解	112
§ 4—5	深地基承载力的实用解	116
§ 4—6	按铁路工程技术规范确定地基容许承载力	119
§ 4—7	触探法定地基承载力	125
习 题		129
第五章	土压力和边坡稳定	130
§ 5—1	兰金土压论	132
§ 5—2	库伦土压论	137
§ 5—3	土面和墙背为直线的库伦土压公式及其图解法	142
§ 5—4	荷载的土压力	146
§ 5—5	几种特殊情况	150
§ 5—6	桥台土压力	153
§ 5—7	重力式挡土墙及新型支挡结构	157
§ 5—8	边坡稳定检算	159
习 题		166

前 言

本教材系根据1978年铁路高等院校制定的“土力学和基础工程”教学大纲进行编写的。本书共十一章,分上下两册,上册为土力学部分,下册为基础部分,适用于铁道工程、铁道桥梁和隧道及地下铁道等专业,也可作从事土建工程的工程技术人员的参考书。

本教材力求以通俗易懂的文字,系统地阐述本门学科的基本理论、概念和方法。近十年来、国内外土力学和基础设计理论的发展非常迅速,基础施工技术也日新月异,本教材尽量反映了这门学科的国内外先进水平,以适应教学需要,为我国四个现代化服务。

根据上述原则,教材内容摆脱了旧大纲和原有教材的束缚,删去一些繁琐过时的东西,补充一些新的内容,如关于粘土力学性质方面,增补了粘土流变性质一节;关于地基强度理论方面,系统地介绍勃朗特—卡柯公式,并增加用触探法确定地基和桩的承载力的内容;在桩基设计方面,介绍用矩阵法计算高承台桩基,以便采用电子计算机进行桩基设计等等。在施工技术方面,为了反映国内外基础施工的新技术和新工艺,补充了用泥浆套和空气幕法加速沉井下沉和水中基础的双壁钢围堰等。为了理论的完整性,在第五章增添了边坡稳定检算。此外,还考虑到我国是一个多地震的国家,以往教材对地基基础的抗震设计不予重视,本教材纠正了这一偏向,把“墩台基础的抗震设计”作为一章,系统地阐述了抗震理论和设计原则。

本教材的内容尽量符合“铁路工程技术规范”第二篇“桥涵”中各项条文的规定,并尽可能阐明规范中各项规定的意义。本书中采用的符号力求与规范取得一致,使初学者在阅读课外资料时不致产生混淆。在有关土力学和基础设计的各章之后,还附有例题和习题,以便同学进行练习,有助于初学者熟练地掌握有关理论。

为了满足铁道工程,铁道桥梁和隧道及地下铁道三专业的教学大纲要求,本教材内容有所扩大,但讲授时,教师可根据本专业的要求,择所需者进行讲授。例如,第六章人工降低地下水位一节主要是为隧道及地下铁道专业编写的,其它专业可不讲或少讲。

本教材第一章和第五章的土压力部分(第一节至第七节)由上海铁道学院潘浩民编写,第七章和第九章由北方交通大学林敏生编写,第十章和第五章的边坡稳定部分(第八节)由北方交通大学吴灿然编写,第二章、第三章和第四章由西南交通大学刘成宇编写,第六章由西南交通大学陈禄生编写,第八章和第十一章由西南交通大学李克钊编写。全书由西南交通大学刘成宇主编,由长沙铁道学院张式琛主审。

由于编写者水平有限,错误或不当之处实属难免,请广大读者指正。

编 者

1980年3月

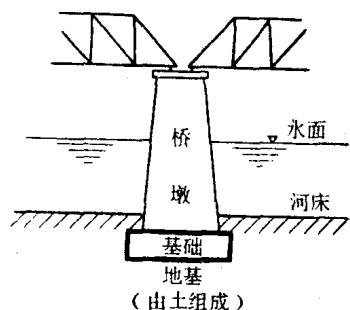
绪 论

“土力学和基础工程”的研究对象

凡土木建筑工程，无不修建在地壳上，建筑物的全部重量均为地壳所支承。以铁路桥梁工程为例，桥梁上部结构(如桁架)连同火车的重量传递到桥墩顶，再加上桥墩自重，一并传到桥梁基础上，基础则直接与地壳接触，如图—1所示。与基础直接相接触的那部分地壳，叫做地基；组成地基的介质，通称为“土”，从工程角度来看，它包括破碎成散体颗粒的土和连成整体的岩石。岩石作为建筑物地基最为理想，有关它的研究属于“工程地质”和“岩石力学”课程的范畴，本课程所涉及的仅是分散颗粒的土。

由于地基支托着整个建筑，所以它的任何形式的变形都将给建筑物带来影响。如地基沉降过大，或产生破坏，则建筑物也将随之毁坏，或无法使用。故在整个建筑设计中，地基设计和计算是一个重要课题。

很容易看出，地基在受力后所引起的一切变化，都取决于土的性质。为了进行地基设计计算，必须先把土的基本特性搞清楚，然后才能研究地基的计算方法，看它在外力作用下是否会产生破坏，或产生多大沉降变形。只有掌握了这些土力学基本知识，才可能比较科学地解决基础工程中所提出的一些实际问题，即，如何根据不同地质条件合理地设计不同类型的基础，以及如何用安全而有效的方法进行基础建造。这些问题也是本教材所要讨论的对象。本门课程的基本内容概括为土力学和基础工程两大部分。



图—1 桥墩的地基和基础

土力学部分

1. 土的物理和力学性质——指的是与基础工程有关的若干重要的土的物理、物理化学和力学性质。

2. 地基的变形性质——研究地基在受到荷载作用后的变形规律，用以预测建筑物在修建和使用阶段，地基的沉降。

3. 地基的稳定——研究地基在外力作用下，是否可能发生破裂，或者说，地基是否会丧失稳定。有些土工结构，如土堤、土坡等，往往由于自重的不均衡分布，也会导致稳定性的丧失，故地基和土体的稳定问题，是土力学的一个主要内容。

基础工程部分

1. 基础的设计和计算——基础支承着上部建筑的全部荷载，如基础发生破坏，或产生过大变形，将直接影响整个建筑物的安全，所以基础设计计算在整个建筑设计中占有重要地位。

置。设计时,应根据荷载大小,地质及水文地质条件等来考虑基础的埋置深度和轮廓尺寸,并进行地基检算,即一方面要计算地基沉降,使不大于地基容许沉降值,保证不致由于地基沉降而引起建筑物的破坏,或影响正常使用;另一方面又要计算在荷载作用下,地基不致失去稳定。所以基础的设计计算,在很大程度上是土力学理论在基础工程中的具体运用。

2. 基础施工——基础都建筑于土中,有的甚至放置在水下,故建造基础将涉及到排土、防水或水下灌注混凝土等复杂施工问题。要解决好这些问题,除了根据具体情况采用不同的施工机具外,还要充分利用土力学和其它方面知识来选择最好施工方案,以求达到施工中的安全、高效率 and 低消耗的目的。

如上所述,本门课程的内容,似乎显得庞杂和广泛,但它们都是有机地连系在一起的,土力学知识为地基设计提供计算原理和方法,而基础设计和施工,又离不开地基计算和有关土力学基本知识,所以,这样编排是必要的。

本学科在我国的成就

我国是有四千多年历史的文明古国,在历史上我国的土建工程就有较高的技术水平,本门学科也不例外。

远在新石器时代的我国有名的仰韶文化,就充分表明我们祖先在土建技术上的聪明才智。如在洛阳王湾发掘出来的许多房屋遗址,其墙基都是先挖沟槽,再填以红烧土碎块。在古代文献中也记载有,房屋建筑是“堂高三尺,茅茨土阶”,可见那时房屋的地基和基础构造已具有一定水平。对于土工,我们的祖先亦很精通,象打夯,加石灰排实等人工地基,早就有较高的成就。这些方法不但用于地基上,而且也用于筑土城和河堤等。如山东龙山镇城子崖就发现有夏代(约4000年前)的古城,高6米,厚约10米,南北长450米,东西长390米。

历史上记载,西周之初(约3000年前)曾建造过三次京城,规模一次比一次大。直到秦统一中国,出现了世界驰名的伟大工程长城及横贯全国的驰道。这些工程的地基和基础及其它土工结构肯定都是经过精心规划建造的。西汉、隋唐的长安,东汉、魏晋的洛阳,都是当时全国的政治和经济中心,建筑非常宏伟。近年来对两城的发掘,发现许多建筑群,如宫殿,祭坛等遗址,其地基和基础做得很坚实,到现在还能很好地保存着。我国首都北京自辽(约公元1000年)就开始建筑,直到明初又花了十五年时间(公元1406~1421年),经过大规模改造修建才奠定了现在所看到的建筑形式。这些宏伟壮丽的建筑群,包括故宫,太庙(现在劳动人民文化宫),天坛等都有着牢固的地基和基础,否则,也不可能完整地保留到现在。

古代建筑除了宫殿、祭坛等外,尚有宗教建筑,如寺庙和塔等。塔是高层建筑,荷载很集中,对地基和基础要求非常严格,如地基有较大不均匀沉降或沉陷,就会造成塔的倾侧和倒塌。我国一千三百年前建造的嵩山嵩岳寺砖塔,高40米,由于地基牢固,到现在安然无恙。

桥梁也是一个很复杂的建筑,其基础荷载很大,又往往位于水下,并具有一定的埋深,对地基的稳定和沉降有着严格的要求,修造时也很困难,所以它的基础工程较一般建筑显得更为艰巨。在我国桥梁和房屋建筑都有着同样的悠久历史,而且造诣很深,如隋代(公元605~616年)李春造的河北赵州安济桥,是世界首创的石砌敞肩拱桥(拱上加拱),已有一千三百多年的历史,至今安然无恙。该桥台是建造在很浅的粗砂层上,根据桥台基础的反力计算,

砂层上承受了 $5 \sim 6$ 公斤/厘米²的压力,在一千多年前就能够充分利用天然地基的承载力,确实使人钦佩。又如宋代(公元1053~1059年)在福建泉州造的万安桥,为一石梁桥,共四十六孔,长三百六十丈,因水深流急,潮汐涨落频繁,河床变化激烈,给修建基础带来很大困难,故采用特殊修建方法:先在江底抛大块石,移蛎房(即礮)散置在块石上,使其繁殖,将块石胶结成整体石基,最后在石基上修筑桥墩。这种独特的施工工艺和基础构造形式,反映出我们祖先在基础工程中的卓越才能。

至于利用桩做基础在我国也有悠久的历史,桩不仅使用在桥基,而且也用在其它建筑物的软弱地基。如一千多年前五代时杭州湾大海塘工程,为了在软弱地基上修石工岸壁而采用了木桩。

近百余年来,由于国外帝国主义的入侵,国内封建统治的腐败,本学科和其它科学技术一样,也落后于同时代的工业发达的国家。直到新中国成立,在中国共产党的领导下,全国开展了大规模的经济建设,本门学科有了迅速的发展。仅以桥梁基础工程为例,解放前长江天堑没有修建大桥,虽然有过几次计划在武汉建大桥,都因长江水深(40米),地质复杂,水中基础难于修建而作罢。解放后,决定采用最新型的管柱基础修建武汉大桥,以克服深水施工的困难,结果只用了一年半时间,就完成了水中墩台基础的修建,全桥共用了三年,即胜利建成,这是我国第一座长江大桥。随后,又有几座长江大桥相继建成,其中尤其值得一提的是在南京建成的更长的长江大桥。该桥的水更深,地质更为复杂,而且完全由我国工人和技术人员以独立自主、自力更生的精神来完成的。他们采用了气筒浮运沉井、沉井套管柱等一系列施工新工艺和新型基础,使我国桥梁基础施工水平达到了新的高度。现正在施工的九江长江大桥,在基础施工工艺上又有新的发展,如采用泥浆套法和空气幕法下沉井,使沉井下沉速度大大地加快。

其它建筑,如规模庞大的工业与民用建筑,长隧道以及水利、海港工程等,近30年来在技术上也有了很大的进展。这些形形色色建筑无不包括技术极其复杂的基础工程。由于施工机具和施工方法的改进,新型基础结构的采用,尤其是随着电子计算机的出现,近年来基础设计和施工技术以更快的速度向前发展,这反过来又推动土力学理论的研究。

本学科存在的问题和今后发展的方向

土力学所研究的对象是颗粒分散的土。由于土是多相介质的堆积物,固体颗粒相互之间和颗粒与水之间的相互作用,使土的力学性质更加复杂化,给研究工作带来很大困难。到目前为止,还没有一套较严整的理论来表达这种土的复杂力学性质。但为了满足生产建设的需要,不得不借用固体力学的法则,如把土简单地当作弹性体或理想塑性体,从而在土力学中大量地引用弹性理论和塑性理论。这种作法是一种非常近似的算法,当然不能准确地反映土的实际情况,有待今后不断进行科学研究,使土力学这门学科在理论上不断完善。

由于目前土力学在理论上的重大缺陷,使地基和基础的设计计算理论在不同程度上偏离实际,如把性质复杂的地基土当作线性变形材料来计算地基沉降和土对桩的抗力等。至于基础施工,目前的问题是如何进一步改善劳动条件,加快施工进度,和提高工程质量。

根据前面所述本门学科所存在的问题,大致可以看出今后发展方向。土力学作为一个独立学科,应建立自己的基本力学法则,目前应大力改进土工试验仪器设备,积累可靠的试验资料,为建立土力学基本法则奠定基础。同时,还要注意,土的种类繁多,性质相差悬殊,

不能以一个单一的法则来适应所有的土，而应该根据土的分类，提出各自独特的力学法则。

在地基和基础的设计和计算方面，近年来随着电子计算机的普遍应用，有可能考虑土的特殊性质，采用有限单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的方法来设计基础。对于施工，看来加强机械化和自动化是基础施工的一个发展方向。此外，如何广泛引用土力学知识，多采用新材料、新工艺和设计新型基础结构，也是基础工程在发展中的一个重要方面。

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，在地基基础的设计计算中，采用数理统计的方法也是必然的趋势。

第一章 土的物理性质

§ 1—1 土 的 形 成

土是由岩石经风化作用(包括物理风化、化学风化及生物风化),然后以不同的搬运方式,在不同的地点堆积下来的自然历史产物。风化、搬运和堆积这三者不是简单的互相衔接,而是在搬运和堆积过程中风化仍然在继续;并且它也并不是只经过一次的搬运堆积,而往往是经过多次的搬运和堆积的;这些过程的交错进行,使土具有了多种多样性。

岩石暴露在大气中,经受风、霜、雨、雪的侵蚀,动植物的破坏、地壳运动的压、挤、气温的变化,裂缝中积水成冰膨胀等等作用,就逐渐由大块体崩解为较小的碎屑和颗粒,这一过程称为物理风化作用,岩石经物理风化作用形成的物质基本上仍保持原来岩石(母岩)的成分,仅是量的变化。随后,这些碎屑和颗粒由于受到某种动力地质的作用(例如重力、水流、冰川或风力等等),它们可以由甲地搬运到乙地堆积起来。在搬运和堆积期间又受大气中某些气体,例如碳酸气(CO_2),氧气(O_2),或动植物的腐蚀等等的化学及生物作用,使这些碎屑和颗粒分解为非常细小的颗粒状物质,这一过程称为化学及生物风化作用,这些经化学及生物风化作用的物质与原来岩石(母岩)的成分截然不同,使岩石产生质的变化。

实践经验表明,土的工程特性一方面固然取决于原始堆积条件,使其组成土的结构构造、矿物成分、粒度成分、孔隙中水溶液的性质等等的不同;另一方面也取决于堆积以后的经历,如生成年代的长短、自然地理条件的变迁等,都可引起原始堆积物的成分或性质的某些改变。一般生成年代越长,上复土层重量越大,土压得越密实,由孔隙水中析出的化学胶结物也越多。因此,老土层比新土层的强度及变形模量要高,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。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、西北地区的湿陷性黄土、西南亚热带的红粘土等,除了具有一般土的共性外,还各具有自己的特点。

土按其成因的不同,可以区分为下列几种主要类型:

一、残 积 土

岩石经风化破坏后,残留在原地的一种堆积物。其主要特征是颗粒常呈棱角状,未经分选作用,无层理,土的孔隙所占体积的百分比较大,其强度较低,具有不均匀的压缩性,在作为建筑物的地基土时宜慎重考虑。

二、大陆流水沉积层

它是由河流、小溪、临时性的洪水或山坡上的小水流所形成的沉积物。这类沉积土层可分为以下三种主要类型:

(一) 坡积土

在重力作用下，风化物被缓慢流动的雨水或雪水所搬运而形成的山坡堆积物。其主要可分为山地坡积和山麓平原坡积两种。坡积土常以不同厚度埋藏在斜坡地上，越向坡脚厚度越大，在河谷两岸斜坡处的坡积土，由于受地表地形及下卧倾斜岩层的影响，常易发生移动而形成滑坡，所以在坡积土中，开挖基坑时尤应注意。

(二) 洪积土

是由山区暴雨和临时性洪水的作用，而在山前形成的堆积物。其主要特征是分选不良，有不规则的交错层理，透镜体、尖灭及夹层。这种土孔隙较多，有较大的渗透性，土的性质随离开山区的距离远近有很大的不同，一般紧靠山前的洪积土常具有较高的强度，压缩性较小。

(三) 冲积土

是由近代河流所形成的沉积物。这种土形成于宽广的河谷中或山区以外的冲积平原上。其特征是有明显的分选性，层理清晰，常形成尖灭现象频繁的砂与粘性土的交错层理，间或存有砾石层。

三、大陆静水沉积

它是由水流在相对静止或流动极为缓慢的环境下所形成的沉积物。根据沉积环境的不同，有湖相和沼泽相两种类型；它们的共同特征是除了在沉积物中有细粒物质外，还常有生物化学作用的有机质存在，形成了特殊性质的淤泥和泥炭，其含水量高，压缩性大，强度低，对建筑物地基常是十分不利的。

四、冰川沉积物

它是由冰川和冰水作用所形成的沉积物。一般又可分为冰碛、冰湖及冰水沉积三种类型。冰碛物主要堆积在冰川的近底部分，颗粒组成常以砾石为主，夹有砂和粘土，而为上复冰层的巨大压力所压实，具有较高的强度，可作为建筑物的良好地基；冰湖与冰水沉积物，它们分别是在冰川湖泊或经融化后的冰川水所形成的堆积物。冰湖沉积的带状粘性土，具有明显的层理，天然结构对土性质有很大影响。

五、风成沉积物

它是由于风的作用而形成的沉积物。其主要包括松散的砂和砂丘，典型的黄土亦属于风积物的一种。这种土的特征是在水平方向有极为明显的分选性，同一地点沉积的物质、颗粒大小十分相近。

六、海相沉积物

它是由水流带到海水中的物质，在海底堆积而形成的沉积物。一般离海岸越远，颗粒越细。按沉积物在海岸中的深度不同，海相沉积物有滨海、浅海、大陆坡及深海四种类型。

其主要特征是常含有海底生物经生物化学作用而产生的大量石灰质、泥灰质及砂质等胶结成分。土的性质受生成历史年代，以及距离海岸的远近而不同。例如滨海沉积物，主要是由粗碎屑和砂粒组成，厚度不大，无层理或层理不规则；浅海相，则主要为细小碎屑、粉土、粘土及淤泥等物质所组成，而深海沉积物主要为一些生物软泥。此外三角洲的泻湖及溺谷相沉积物，它是介于大陆沉积与海相沉积之间的过渡类型，其特征是土质松软，厚度很大，常含有有机质的混合物，以淤泥质为主。

七、土 壤 层

它是以生物风化作用为主所形成的一种特殊残积土层。土壤中常富有大量的有机质，不宜于作为建筑物的地基。

§ 1—2 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。土的结构常对土的工程性质带来重要的影响，结构不同土的物理力学性质是有很大差别的。土的结构基本形式有下列三种：

一、单 粒 结 构

在沉积过程中，较粗的矿物颗粒在重力作用下沉落后，每个颗粒都受到周围各个颗粒的支承，如图 1—1 所示。单粒结构常见于砂类土及碎石、砾石等土中。

砂类土中可分为松散的及密实的两种结构。在松散的砂土中，砂粒处于较不稳定的状态，并可能具有超过土粒尺寸的较大孔隙。密实砂土则相反。砂土的结构与沉积条件、土粒大小有关，天然状态的密实细砂比密实粗砂少见得多。显然，这两种结构土的工程性质是不相同的。

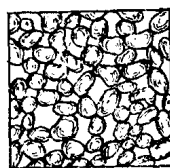


图 1—1 单粒结构

二、蜂 窝 结 构

蜂窝结构多为颗粒细小粘性土所具有的结构形式。这种土粒在水中下沉时，由于其颗粒细、重量轻，这时如两土粒间接触点处的分子引力大于下沉土粒的重量，土粒被吸引，就不再下沉，而处于不稳定的位置。如此继续不已，便形成疏松的蜂窝状结构，如图 1—2 所示。蜂窝结构的土中单个孔隙体积一般远大于土粒本身的尺寸，孔隙总体积也较大。如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，可产生较大沉降。



图 1—2 蜂窝结构

三、絮 状 结 构

絮状结构是颗粒最细小的粘性土特有的结构形式。最细小的土粒分散在水中形成胶体悬

浮液后，便会发生分子热运动，因为此时土粒带有同号电荷，彼此之间不能相互碰撞，因此不能结成粒团下沉，只有在悬液中加入电解质后，运动着的土粒才会彼此碰撞，并凝聚成絮状粒团而下沉，形成更不稳定的复杂的絮状结构，如图 1—3 所示。这种结构常在海相沉积土层中见到。



图 1—3 絮状结构

在天然情况下，任何一种土类的骨架，都由大小不同的土粒组成。所以土的结构并不象上述基本类型那样简单，而常是上述各种结构混合起来的复合型式。

据最近几十年的研究，对粘土颗粒间的结构有了进一步的认识，提出了粘土颗粒的架迭图式，并已由电子显微镜观测所证实。粘土颗粒多呈片状或针状，它们之间的架迭图式，基本上可分为絮凝型和分散型两种结构，分别如图 1—4 a, b 所示。

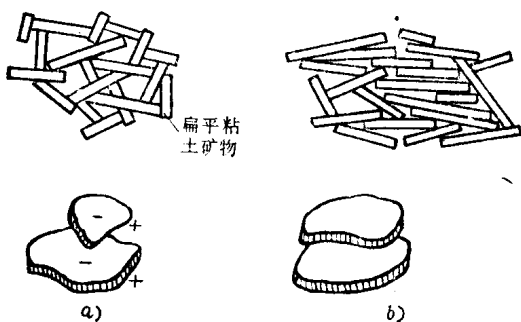


图 1—4 粘土粒间结构示意图

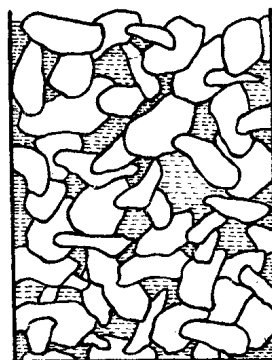


图 1—5 牌架结构

这两种结构的主要区别在于絮凝型结构是以扁平粘土粒之间的点接触或边接触为主，它是由于粘土粒面上带有负电，边缘带有正电，相互吸引凝聚而形成的，其点（边）面相互吸引凝聚后的空间架迭情况如图 1—5 所示，一般叫作牌架结构。这种结构的特点是颗粒排列疏松，常形成较多的封闭孔隙。分散型结构是以扁平粘土粒之间的面接触为主，它是由于土颗粒间缺乏电吸引力，而使颗粒排列的形式能以遵守最小能量为佳，其特点是颗粒排列得比较紧密。

图 1—6 a 所示为海相沉积粘性土的结构示意图，它基本上是属于絮凝型结构；图 1—6 b 所示为淡水粘性土结构，基本上是属于分散型结构。显然海水沉积的粘性土要比淡水沉积的疏松。当土因受压或受剪而发生结构扰动后，矿物颗粒便会定向地排列起来，如图 1—6 c 所示。

目前对粘性土结构的研究虽然尚处在开始阶段，但已取得了一定的成效，这对理解和进一步研究粘性土的工程特性是很有帮助的。

粘性土的结构与土的性质有着密切的关系。当土的原有结构受到破坏或扰动时，不仅改变了土粒的排列情况，同时也使土粒间原有的联结遭到不同程度的破坏。结构受到扰动的土压缩性一般较大，强度亦降低。土的性质随着结构的改变而发生变化的特性，称为土的结构性。因此，对具有明显结构性的土，要注意土的结构避免扰动破坏，保持天然结构的原来状态就显得相当重要了。

综上所述，可以清楚地了解到，天然土的性质是如此的千变万化，各不相同，但却受其成因的支配，产生了土的不同结构，反映了土的不同工程特性。因此，研究这些土时，就必

须考虑到土形成时的自然地理环境,不能脱离其自然历史条件来评价土的性质,而要结合土的成因进行工程性质的全面评价才是较科学的方法。

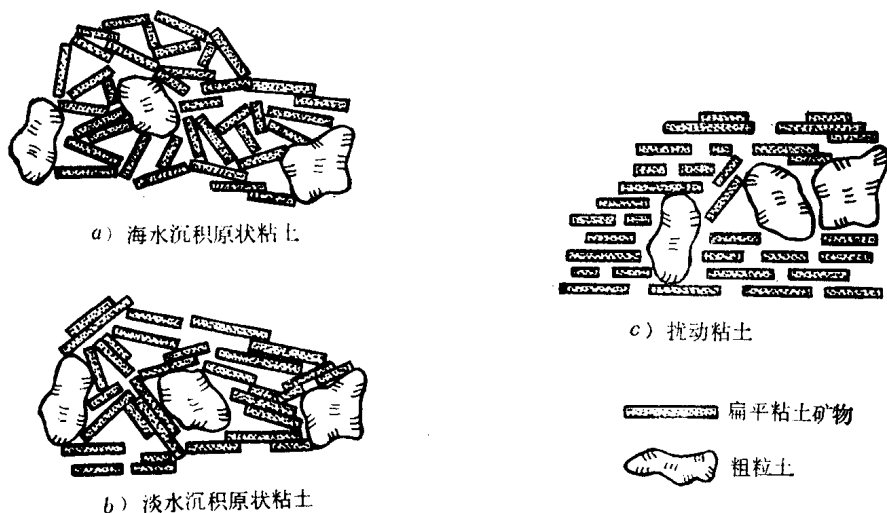


图 1—6 粘性土结构示意图

§ 1—3 颗粒分析

土是由大小不同的固体颗粒组成,对颗粒的组合作些实验研究,即颗粒分析,是完全必要的。工程上颗粒分析只测定土中各种大小颗粒的相对重量,而不分析颗粒的矿物成分。土的颗粒大小的改变达到一定程度(量变),会引起土的性质发生显著的变化(质变),从而可以把粒径大小相近、性质相似的颗粒合并为一组,称为粒组,如表 1—1 所示。一般说来,不同粒组的土,具有不同的特征,如果在土中某粒组颗粒占优势时,整个土将反映这一粒组颗粒的性质。土中各粒组的相对含量(以占全部干土重量的百分比),称为土的粒径级配。测定土样中各种粒组含量的试验方法,称为土的颗粒大小分析试验。

工程实践中,最常用的颗粒大小分析方法,有筛分法和比重计法两种,前者适用于分析粒径大于 0.1 毫米的土。如土中同时含有大于和小于 0.1 毫米的土粒时,则应采用上述两种方法进行试验。

筛分法: 将试验土样中大于 0.1 毫米的粗粒部分烘干后用一套标准筛(图 1—7),其孔径为 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.1 毫米者进行分析。把筛连底盘和盖叠在一起,孔小者在下,干土粒放在最上层,然后用摇筛机振摇使细粒下漏。称出遗留在每一个筛和底盘上颗粒重量,即可计算小于某一孔径颗粒重量占总重量的百分数。

比重计法: 取小于 0.1 毫米的颗粒重 Q 克加水使其彻底分散。最细的颗粒常聚集成粒团,应将结成粒团的细粒分散开来才能测量它们的粒径。分散方法主要为煮沸或机械搅拌,同时视土性质的不同加适当的化学品(如盐酸、氢氧化钠、草酸钠、硅酸钠或偏磷酸钠)使粒团的细粒通过离子交换散开。分散后置量筒中加水使土悬液体积为 V 。

用搅拌器搅动量筒中土悬液,使土粒在悬液中均匀分布。这时悬液中任一单位体积内所含各种大小颗粒是相同的,且其颗粒浓度为 $C_0 = \frac{Q}{V}$ (克/厘米³),如图 1—8 a 所示。若量筒放平时时刻为 $t = 0$, 则该时刻后颗粒开始以加速度下沉。在极短时间后颗粒下沉速度

土 的 粒 组

表1—1

粒 组 名 称		粒 径 (毫米)	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。

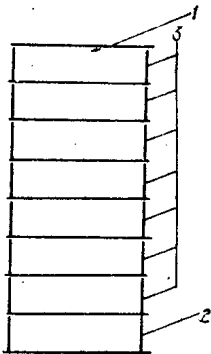


图 1—7 标准筛
1——盖; 2——底盘;
3——不同孔径的筛。

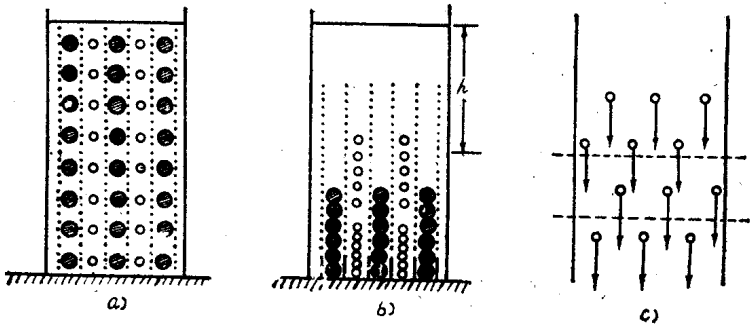


图 1—8 悬液中颗粒的下沉

v (厘米/秒) 就增加到使水的粘滞阻力已恰巧能平衡其重量。根据司笃克斯定律, 一个直径为 d (厘米) 的球体在粘滞性液体中以速度 v 竖向下沉时阻力为 $3 \pi \eta v d$, η 为液体粘滞系数 (克-秒/厘米²)。若 γ_0 和 γ_w 为土粒和水的容重 (克/厘米³), 则土粒的重量为 $\frac{1}{6} \pi d^3 (\gamma_0 - \gamma_w)$ 。若将土粒当作圆球, 当粘滞阻力和土粒重量平衡时

$$3 \pi \eta v d = \frac{1}{6} \pi d^3 (\gamma_0 - \gamma_w), \text{ 或 } v = \frac{d^2}{18 \eta} (\gamma_0 - \gamma_w).$$

即速度达到上式所给值后土粒将以该匀速下沉。在开始下沉时土粒具有加速度的时间极短,可略去不计,在 t 时刻,液面下深度 h 处的悬液中,就只有直径小于下式所求得 的 颗粒了,

$$d = \sqrt{\frac{18\eta h}{(\gamma_0 - \gamma_w)t}} \quad (1-1)$$

上式称为司笃克斯公式。

t 时刻悬液中颗粒分布情况如示意图 1-8 b。显然,这时浓度 C 上下不均匀。在 h 深处无粒径大于式 (1-1) 的颗粒;但粒径小于该式 d 的颗粒数量却没有变化,因这些颗粒从该处下沉和从上面沉入者数量相同,如图 1-8, c 所示。所以 t 时刻在 h 深处的浓度 C 为悬液中只有粒径 d 小于式 (1-1) 的颗粒情况。令 $p = \frac{C}{C_0}$ (以%表示),则 p 为粒径小于式 (1-1) d 的颗粒重量占全部颗粒重量的百分数。测出许多 d 对 p 实验值就能知道各种大小颗粒重量占总重的百分数了。

比重计法是用一支特制的比重计,在不同时刻放入悬液中测其比重 γ ,这比重可近似地认为是比重计浮泡中心处悬液者。每次测量时浮泡中心离液面距离 h 是知道的,故仍可用式 (1-1) 求出 d 。相应于这 d 值的 p 可如下述算出。测得比重 γ 的单位体积悬液重 $= p c_0 + \gamma_w \left(1 - \frac{p c_0}{\gamma_0}\right)$, 所以 $\gamma = \frac{p c_0}{\gamma_w} + 1 - \frac{p c_0}{\gamma_0} = 1 + p c_0 \left(\frac{1}{\gamma_w} - \frac{1}{\gamma_0}\right)$ 。令 g_0 为颗粒的比重,可写出 p 的算式如下:

$$p = \frac{\gamma_0 V}{Q} \cdot \frac{\gamma - 1}{g_0 - 1}.$$

用比重计法测得的土的粒径 d ,是指土粒的水力直径。所谓水力直径,乃是一种想象的球状颗粒直径(实际粘土粒常呈扁平鳞片状或针状),这种假想的球状颗粒,在水中是和原土粒有相同的下沉速度。

将粗粒和细粒土两部分实验结果合在一起算出小于某粒径 d 的颗粒重量占总重的百分数 p ,在半对数坐标 (d 对数) 作出曲线,如图 1-9 的 I,即土的粒径分布曲线或级配曲线。级配曲线的位置,形状和各段梯度说明土颗粒大小分布特点,将几条级配曲线比较一

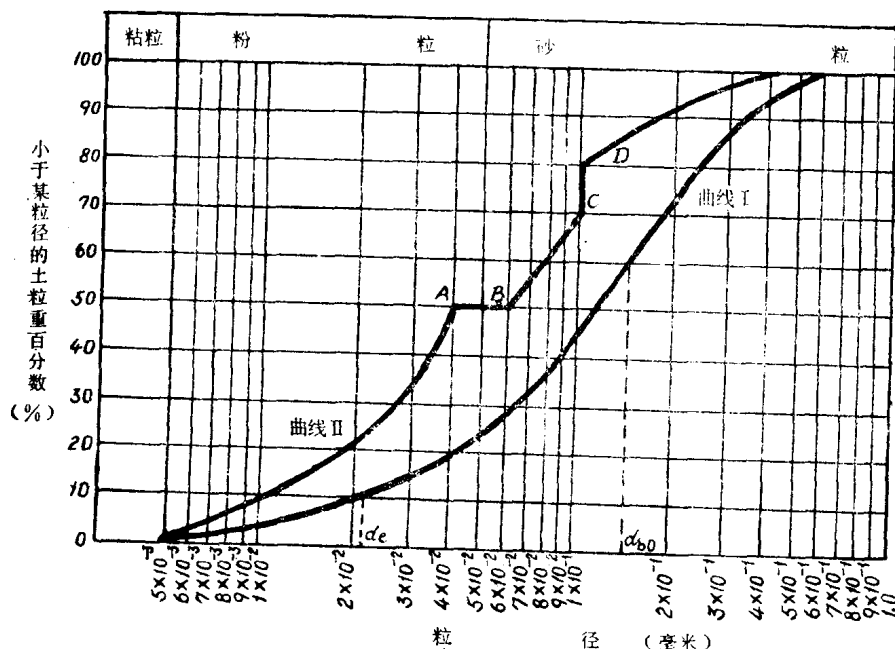


图 1-9 土的级配曲线