

绪论

在学习了一些经典力学之后,面前的这本《土力学》教材向你展示了一门新的力学课程及一种新的学习与研究的对象。在进一步深入接触以后,你会感到这门力学有些奇特和陌生,甚至怀疑它作为一门力学的合法性,以前就有学生判定土力学是一门“伪科学”。

清华大学的校训源于梁启超先生的讲演所提出的“天行健,君子以自强不息;地势坤,君子以厚德载物。”(易传·象传)。在古老的《易》经中,曾以“坤”为64卦之首,坤象地,即为土。可见土是人类得以生存的载体,土以其厚重的品格承载着万物。

土是人们十分熟悉的东西:普天之下,莫非王土。在路边工地抓起一把砂石料,可见松散的砂石颗粒,所谓“一盘散沙”就是指这种东西。挖起一小块湿润的黏土,发现它可切可塑;待其变干变硬之后,可以用手捻成粉末,在显微镜下可以见到片状的颗粒。从而可知所有土都是由碎散的颗粒组成的,颗粒间有明显的孔隙。

在寸草不生的沙漠,砂土是干燥的;在芳草萋萋的绿地,土是湿润的;在风蒲猎猎的湿地,土可能是饱和的泥炭。因而土可以是无水、含水或饱水的,孔隙中未充水的部分是气体。可见,土可以有固体颗粒、土中水和气体这三相物质。

土是自然中岩石风化后的产物,提起土,每个人的头脑中可能会出现完全不同的景象:戈壁滩“一川碎石大如斗,随风满地石乱走”是土;沙漠中“平沙莽莽黄入天”是土;沃野里“锄禾日当午,汗滴禾下土”是土;江南的“谁家春燕啄新泥”的也是土。作为大自然的产物,土真是千姿百态,气象万千,很难界定一种“标准土”或者抽象的土,这远非以前我们将固体抽象为质点、刚体或者连续弹性介质那么简单。其种类之繁多,性质之复杂及其对环境影响之敏感成为这门力学难以掌握的主要原因。

土是碎散的、三相的和天然的。由于其碎散性,颗粒间没有联结或只有很弱的联结,所以土的强度主要是颗粒间摩擦产生的抗剪强度;碎散的颗粒会在压力下相互移动与靠近,占很大比例的孔隙会缩小,孔隙中的水与气会排出,因而土的压缩变形主要源于孔隙体积的减少而非颗粒本身的压缩,因而其体应变可以是很大的;土中水可在势差作用下流动,土中水的运动是地球水循环的重要一环,与人类的生活息息相关,也与很多自然灾害与工程事故密切相关。所以与土有关的工程问题基本

可归因于土的强度、土的变形和土中水的渗流。

上海闵行区某高楼于 2009 年建成后只来得及向周围匆匆张望了一眼,就前扑倒地而亡,如图 1 所示。图 2 是 2000 年发生在西藏易贡的大滑坡,滑坡体高差 3330m,总方量近 3 亿 m^3 。它截断易贡河,形成坝高 290m,库容 15 亿 m^3 的堰塞湖。这些惊心动魄的事故与灾害皆源于土的强度问题。



图 1 上海闵行区某高楼的扑倒



图 2 西藏易贡的大滑坡

图 3 是台湾高雄地铁施工造成的房屋沉陷,图 4 为我国东北地区由于冻胀变形造成的房屋开裂。由于过量开采地下水而造成的大面积地面沉降就更为壮观。目前,我国在 19 个省市中有超过 50 个城市发生了不同程度的由地下水位下降引起的地面沉降,其中累计沉降量超过 200mm 的总面积超过 7.9 万 km^2 。中心最大沉降量超 2.0m 的有上海、天津、太原、西安、苏州、无锡、常州、沧州等城市。天津塘沽局部地区的最大沉降量达到了 3.1m,上海市的最大累计沉降量近 3.0m,从 20 世纪 70 年代至今,沧州有的地区的最大沉降量达到 2.4m。大面积地面沉降加上海平面上升,在沿海地区可能引起长远的、毁灭性的后果。可见土的变形问题也是极为严重的问题。



图 3 台湾高雄地铁施工造成的房屋沉陷



图 4 我国东北地区由于冻胀造成的房屋开裂

1998 年长江洪水期间,发生了数千处险情和几次大溃堤;1993 年青海省的沟后水库大坝溃决,造成数百人死亡,原因是大坝漏水,坝料被冲刷,浸润线过高,导致堆石坝溃决(图 5)。这



图5 青海省沟后水库大坝溃决

都是由于渗流和渗透破坏引起的灾难。

土是人类最老的朋友,万物生发于土,归藏于土。人们在广袤深厚的大地上耕耘营造,生息繁衍。在与自然的抗争中,土也是人类最古老的武器:大禹治水“兴人徒以傅土”,也就是依靠土方工程。在与土打交道的长期实践中,人们积累了有关土的丰富知识和经验。但是土力学作为一门学科却远不是那么古老。大家公认它始于1925年太沙基(Terzaghi K)发表了关于土力学的第一本专著之后。之前的几千年人类的知识和经验基本还处于感性阶段,土的有效应力原理和单向渗流固结理论是土力学标志性的理论,标志着土力学作为一门独立学科的诞生。

土是自然的产物,“道法自然”,我们也应在自然中熟悉土、掌握土和应用土。在童年时期玩砂、玩泥,挖坑堆土,是认识土的重要环节;土工试验也是土力学学习的基础。基于土性质的复杂性,作为天然材料的不确定性和对环境的高度敏感性,在土力学中,我们只能根据不同的问题和要求对土做不同的理想化和假设,不能期望我们能够像运用其他力学一样,通过严密的理论和精确的计算来准确地解决土工问题。

随着试验、测试、计算工具和工程技术的发展,在总结近年来空前规模的岩土工程实践的基础上,人们对土的认识进一步深入,土力学已经有很大的进展。将土力学基本概念和原理应用于工程实践,在此基础上发展和创新,是土力学学科前进的必由之路。

土的物理性质和工程分类

1.1 土 的 形 成

在土木工程中所谓的土是指处于地球地壳表层,在人类的生活和经济活动范围内的第三纪以来的地质体,是岩体风化而成的碎散颗粒群体,这些颗粒构成能够承担与传递应力的构架体,即土骨架,土骨架及其孔隙中的水与气体组成为土。

地球表面的岩石在大气中经受长期的风化作用而破碎后,形成形状不同、大小不一的颗粒,这些颗粒受各种自然力的作用,在各种不同的自然环境中堆积下来,就形成通常所说的土。堆积下来的土,在漫长的地质年代中发生复杂的物理化学变化,逐渐压密、岩化,最终又形成岩石,就是沉积岩。因此,在自然界中,所谓沧海桑田,岩石不断风化破碎形成土,而土也会被压密、岩化变成沉积岩。在漫长的地质历史过程中,这一循环过程重复地进行着。

工程上遇到的大多数土都是在第四纪地质历史时期内形成的。第四纪地质年代的土又可划分为全新世和更新世两类,如表 1-1 所列。其中第四纪全新世中晚期沉积的土,亦即在人类文化期以来所沉积的土称为新近代沉积土,一般为欠固结土,强度较低。

表 1-1 土的生成年代

纪(或系)	世(或统)		距今时间
第四纪(Q)	全新世(Q ₄)	Q ₄ ³ (晚期)	<0.25 万年
		Q ₄ ² (中期)	0.75 万~0.25 万年
		Q ₄ ¹ (早期)	1.3 万~0.75 万年
	更新世(Q _p)	晚更新世(Q ₃)	12.8 万~1.3 万年
		中更新世(Q ₂)	71 万~12.8 万年
		早更新世(Q ₁)	距今 71 万年以前

1.1.1 岩石风化的产物

土是岩石风化的产物。岩石和土中的粗颗粒在自然界会不断风化,这包括物理风化、化学风化和生物风化,它们经常是同时进行而且是互相促进

的,从而加剧了发展的进程。

物理风化是指岩石和土的粗颗粒受机械破坏及各种气候因素的影响,如温度的昼夜变化和季节变化,降水、风、裂隙中水的冻融等原因,导致体积胀缩而发生裂缝并加剧裂缝的发展;在运动过程中因碰撞和摩擦而破碎;由于剥蚀卸载而应力释放;裂隙中由于盐分结晶而发生盐胀,都会产生裂隙或是节理张开,于是岩体逐渐变成碎块和细小的颗粒,粗的粒径可以米(m)计,细的粒径可以在0.05mm以下,但它们的矿物成分仍与原来的母岩相同,称为原生矿物。所以物理风化后的土是颗粒大小的变化,是量变,但是这种量变的结果使原来的大块岩体和岩块的孔隙增加,变成了碎散的颗粒,其性质也发生很大的变化。

化学风化是指母岩表面和土中的岩屑颗粒受环境因素的作用而改变其矿物的化学成分,形成新的矿物的现象,也称次生矿物。环境因素包括水、空气以及溶解在水中的氧气和二氧化碳等。化学风化常见的反应如下:

(1) 水解作用——指矿物成分被分解,并与水进行化学成分的交流,形成新的矿物。例如正长石经过水解作用后,形成高岭石,这是一种黏土矿物。

(2) 水化作用——土中有些矿物与水接触后,发生化学反应。水按一定的比例加入矿物组成中,改变矿物原有的分子结构,形成新的矿物。例如土中的 CaSO_4 (硬石膏)水化后成为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (含水石膏)。

(3) 氧化作用——土中的矿物与氧结合形成新的矿物,例如 FeS_2 (黄铁矿)氧化后变成 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (铁矾)。

此外,还有溶解作用、碳酸化作用等。化学风化的结果,形成十分细微的土颗粒,最主要的为黏土颗粒(粒径 $<0.005\text{mm}$)以及大量的可溶性盐类。微细颗粒的比表面积很大,具有吸附水分子的能力。

生物风化是指岩石受生物活动的影响而产生和加速的破坏过程,严格地讲,它也可归入物理风化与化学风化,所以有时不另分生物风化。生物风化包括植物根系生长对岩隙的撑胀作用,穴居动物的钻洞;生物新陈代谢的产物及其死亡产生的化学物质对岩石的破坏;人类生活及生产活动过程及产物对岩石的物理与化学作用等。由于人类的活动范围和工程规模越来越大,对于环境的干预和影响不容忽视,形成生物风化的重要部分。

在自然界中,岩石的物理风化与化学风化时刻都在进行,而且相互加强。这就形成了碎散的、三相的和具有强烈自然变异性的产物——土。所以仅根据土的堆积类型还远不足以确定土的工程特性。要进一步描述和确定土的性质,就必须具体分析和研究土的三相组成、土的物理状态和土的结构,并以适当的指标表示。

1.1.2 土的堆积和搬运

工程中遇到的大多数土是第四纪地质历史时期所形成的,第四纪的土,按其是否有所运移,可分为残积土和运积土两大类。

残积土是指母岩表层经风化作用而破碎成为岩屑或细小的矿物颗粒后,未经搬运而残留在原地的碎屑体。它的特征是颗粒粗细不均、表面粗糙、多棱角、无层理,常含有黏土矿物,其分布厚度变化很大。在我国的南方,如广州、深圳等地,花岗岩分布广泛,花岗岩残积土也大面积分布,土层厚度可达15~40m,成为该地区建筑物基础的主要持力层。

运积土是指风化所形成的土颗粒,在不同的环境下,受不同自然力的作用,搬运到远近不同的地点后所沉积而成的堆积物。根据搬运的动力不同,运积土又可分为下面所介绍的几类,如图 1-1 所示。

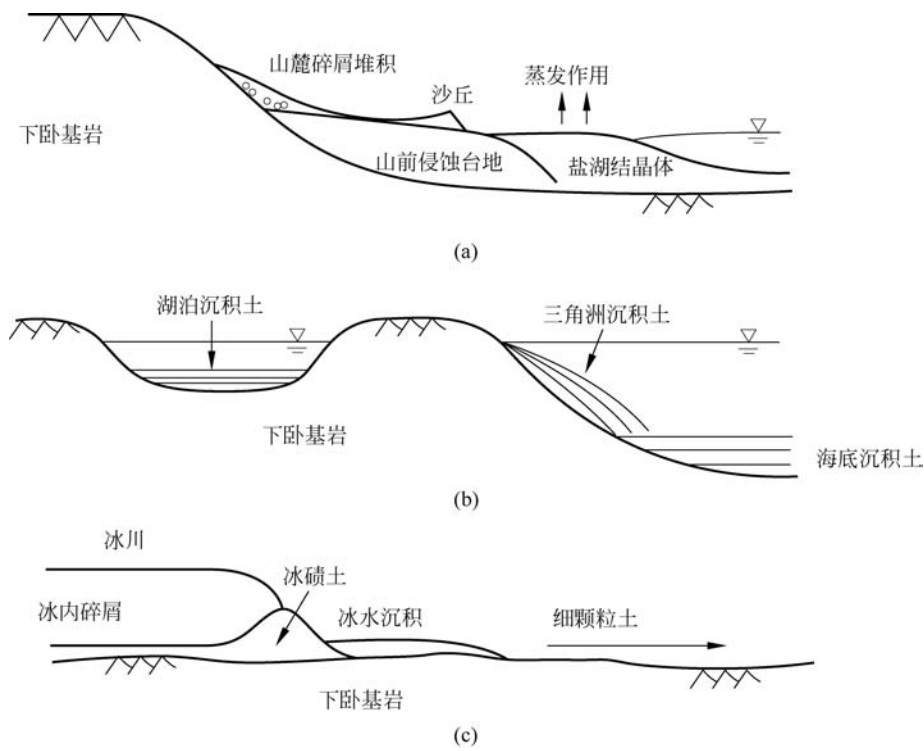


图 1-1 不同环境下土的形成
(a) 山前台地与荒原; (b) 河流、湖、海; (c) 冰川

(1) 坡积土——图 1-1(a)中的山麓碎屑堆积,是风化岩碎屑与残积土受重力和短期水流(如雨水和雪水)的作用,被裹挟到坡腰或坡脚处聚积起来的碎屑堆积物。堆积体内土粒粗细不均,较松散,性质也很不均匀。

(2) 洪积土——如图 1-1(a)所示,残积土和坡积土受洪水冲刷,挟带到山麓的山沟处沉积形成洪积土。其地貌特征是离山近处窄而陡,离山远处宽而缓,形如锥体,故称为洪积扇。它又可被水流进一步冲蚀,形成山前冲蚀台地。由于离山越远,山洪的流速越缓,洪积物具有明显的分选性:搬运距离近的沉积颗粒较粗,力学性质较好;搬运距离远的则颗粒较细,力学性质较差。

(3) 冲积土——如图 1-1(b)所示,由于江、河水流搬运所形成的沉积物,分布在山谷、河谷、冲积平原、河口和三角洲上的土都属于冲积土。这类土由于经过较长距离的搬运,其特点是颗粒经过滚动和相互摩擦,粗颗粒因摩擦作用而变圆滑,具有一定的浑圆度。在沉积过程中因受水流等自然力的分选作用而形成颗粒粗细不同的层次,粗颗粒下沉快,细颗粒下沉慢;在流速快的水中(例如洪水期),沉积较大的颗粒;而在流速缓慢(如枯水期)时,沉积细颗粒。因而形成不同粗细的土互层,常形成砂砾层和黏性土层交叠的地层。冲积土分布广泛,与人类关系密切,因此冲积平原和三角洲通常分布着经济发达、人口密集的城镇。

(4) 湖泊沉积土——图 1-1(b)中的湖泊沉积土,是在极为缓慢水流或静水条件下沉积形成的堆积物,可分为湖边沉积物和湖心沉积物。湖边沉积物常常是由波浪冲蚀湖岸形成的碎屑沉积而成,成分多为砂砾,它具有斜层理结构,近岸承载力高,远岸承载力低。湖心沉积物是由河流与湖流携带的细小的颗粒组成的,主要是黏土与淤泥。若湖泊逐渐淤塞,则可演变为沼泽土,常伴有不同含量的由生物及化学作用所形成的有机物,成为具有特殊性质的淤泥、淤泥质土或泥炭土,其工程性质一般都很差。

(5) 海相沉积土——图 1-1(b)中的海底沉积土,是由水流挟带到大海沉积起来的堆积物,可分为滨海带、浅海带和深海带,其沉积物性质也各有不同。随着城市化的进展,人们往往在滨海带及浅海带填海造地。滨海带沉积物主要由砂砾组成,承载力较高,透水性较好,具有缓倾的层理结构;浅海带是由细砂、黏性土、淤泥及生物化学沉积物等构成,压缩性大,承载力低。大陆坡和深海沉积物主要是有机质淤泥,成分均一,工程力学性质很差。

(6) 冰碛土——冰碛土是由于冰川的冻融和移动侵蚀而形成的,是冰川或冰水挟带搬运的堆积物,颗粒粗细变化大(从黏粒到巨粒),土质也不均匀,如图 1-1(c)所示。由于冰川搬运和融化水流的冲积,冰碛土颗粒从上游到下游由粗到细,沉积在不同的位置。由于其以粗颗粒为主,一般具有较高的强度,是较好的持力层。

(7) 风积土——在干旱荒漠地区,风是主要的搬运动力。岩层的风化碎屑或第四纪松散土,经风力搬运形成堆积物,其颗粒均匀,往往堆积层很厚而不具层理。图 1-1(a)中的沙丘就是由风搬运而来的,我国西北黄土高原的黄土就是典型的风积土。

(8) 盐渍岩土——在干旱与半干旱地区,一些含盐量高的天然水体(如潟湖、盐湖和盐海等),由于蒸发作用易溶盐结晶成为结晶体,如图 1-1(a)所示。在这些地区,蒸发量大而降水量小,毛细作用强,地下水沿着土层的毛细管上升到地面附近,经蒸发作用,水中盐被析出并聚集,在地面及地下土层中形成盐渍土。盐渍土具有溶陷、盐胀和腐蚀等特性。

1.2 土的三相组成

如前所述,土是由固体颗粒、水和气体三部分所组成的三相体系。固体部分,一般由矿物质所组成,有时也含有有机质(半腐烂和全腐烂的植物物质和动物残骸等)。土骨架是由土颗粒相互接触与联结形成的,可承担和传递应力的构架体,土骨架有整个土体的体(面)积。土骨架不包括其中相互贯通的孔隙中的流体(水与气体),这些孔隙如果完全被水充满,则成为饱和土;部分被水占据,成为非饱和土;孔隙中无水只有气体则是干土。水和溶解于水的物质构成土的液体部分。空气及其他气体构成土的气体部分。这三种组成部分本身的性质以及它们之间的比例关系和相互作用决定土的物理力学性质。因此,研究土的性质,必须首先研究土的三相组成。

1.2.1 固体颗粒

固体颗粒构成土的骨架,它对土的物理力学性质起决定性的作用。研究固体颗粒就要分析粒径的大小及不同尺寸颗粒在土中所占的百分比,即土的粒径级配,还要研究固体颗粒

的矿物成分以及颗粒的形状,这三者之间又是密切相关的。例如粗颗粒的成分都是原生矿物,形状多呈单粒状;而颗粒很细的土,其成分多是次生矿物,形状多为片状。

1. 粒径级配

由于颗粒大小不同,土可以具有很不相同的性质。例如粗颗粒组成的砾石,具有很强的透水性,没有可塑性;而由细颗粒组成的黏土则透水性很弱,黏性和可塑性较大。颗粒的大小通常以粒径(d)表示。由于土颗粒形状各异,所谓颗粒粒径,在筛分试验中用其能通过的最小筛孔的孔径表示;在水分法中用在水中具有相同下沉速度的当量球体的直径表示。工程上按粒径大小分组,称为粒组,即某一级粒径的变化范围。表 1-2 表示国内常用的粒组划分及各粒组的粒径范围。

表 1-2 土的粒组划分

粒 组	颗 粒 名 称		粒 径 d 的 范 围/mm
巨 粒	漂 石(块 石)		$d>200$
	卵 石(碎 石)		$60< d \leq 200$
粗 粒	砾 粒	粗 砾	$20< d \leq 60$
		中 砾	$5< d \leq 20$
		细 砾	$2< d \leq 5$
	砂 粒	粗 砂	$0.5< d \leq 2$
		中 砂	$0.25< d \leq 0.5$
		细 砂	$0.075< d \leq 0.25$
细 粒	粉 粒		$0.005< d \leq 0.075$
	黏 粒		$d \leq 0.005$

摘自《土木试验方法标准》(GB/T 50123—2019)

实际上,土常是各种不同大小颗粒的混合物。较笼统地说,主要以粒径大于 0.075mm 的颗粒组成的土称为粗粒土。主要以不大于 0.075mm 粉粒和黏粒为主的土称为细粒土。土的具体的工程分类见 1.5 节。很显然,土的性质主要取决于土中不同粒组的相对含量。为了了解各粒组的相对含量,必须先将各粒组分离开,再分别称其质量。这就是粒径级配的分析方法。

1) 粒径级配分析方法

工程中,实用的粒径级配分析试验方法有筛分法和水分法两种。

筛分法适用于土颗粒大于等于 0.075mm 的部分。它是利用一套孔径大小不同的筛子,将事先称过质量的烘干碎散土样过筛,分别称留在各筛上土的质量,然后计算相应的百分数。

水分法用于分析土中粒径小于 0.075mm 的部分。根据斯托克斯(Stokes)定理,球状的颗粒在水中的下沉速度与颗粒直径的平方成正比。因此可以利用粗颗粒下沉速度快、细颗粒下沉速度慢的原理,按下沉速度进行颗粒粗细分组。基于这个原理,实验室常用密度计进行颗粒分析,称为密度计法。该法的原理说明和操作方法,可参阅土工试验操作规程或土工试验指示书。

【例题 1-1】 取烘干土 200g(全部通过 10mm 筛),分别用筛分法和水分法求各粒组含量和小于某种粒径(以筛孔直径表示)颗粒占总质量的百分数。

【解】

(1) 筛分结果列于表 1-3。

表 1-3 某种土的筛分结果

筛孔直径 /mm	筛上土的质量 (即粒组质量)/g	筛下土的质量(即小于某 粒径土的质量)/g	筛上土的质量占总土 质量的百分数/%	小于该筛孔土的质量 占总土质量的百分数/%
5	10	190	5	95
2	16	174	8	87
1	18	156	9	78
0.5	24	132	12	66
0.25	22	110	11	55
0.075	46	64	23	32

(2) 将表 1-3 中筛分试验的筛余量,即粒径小于 0.075mm 的土颗粒 64g,再用水分法进行分析,得到细粒土的粒组含量,见表 1-4。

表 1-4 细粒部分的粒组含量

粒径范围/mm	0.075~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	<0.005
质量/g	12	25	7	20

(3) 两种分析方法相结合,就可以将一个混合土样分成若干个粒组,并求得各粒组的含量,见表 1-5。

表 1-5 某土样粒径级配分析的结果

粒径/mm	5	2	1	0.5	0.25	0.075	0.05	0.01	0.005	
粒组质量/g	10	16	18	24	22	46	12	25	7	20
小于某粒径土累积质量/g	—	190	174	156	132	110	64	52	27	20
小于某粒径土占总土质量的百分比/%	—	95	87	78	66	55	32	26	13.5	10

2) 粒径级配曲线

综合上述筛分试验和比重计试验的全部结果,在表 1-5 中,除提供某试样的全部粒组质量外,还算出小于某粒径的颗粒累积质量及占总质量的百分数。将表中的结果绘制成土的粒径级配累积曲线,也可简称为粒径级配曲线或粒径分布曲线,如图 1-2 所示。粒径级配累积曲线的横坐标为土颗粒的粒径,以 mm 表示。由于土中所含各粒组的粒径往往相差甚大,且细粒土的含量对土的性质影响很大,需详细表示。因此,粒径的坐标常取为对数坐标。级配曲线的纵坐标为小于某粒径的土颗粒累积含量,用百分比表示。

3) 粒径级配累积曲线的应用

土的粒径级配累积曲线是土工中很有用的资料,从该曲线可以直接了解土的粗细程度、粒径分布的均匀程度和分布连续性程度,从而判断土的级配情况和按级配分类。土的粗细

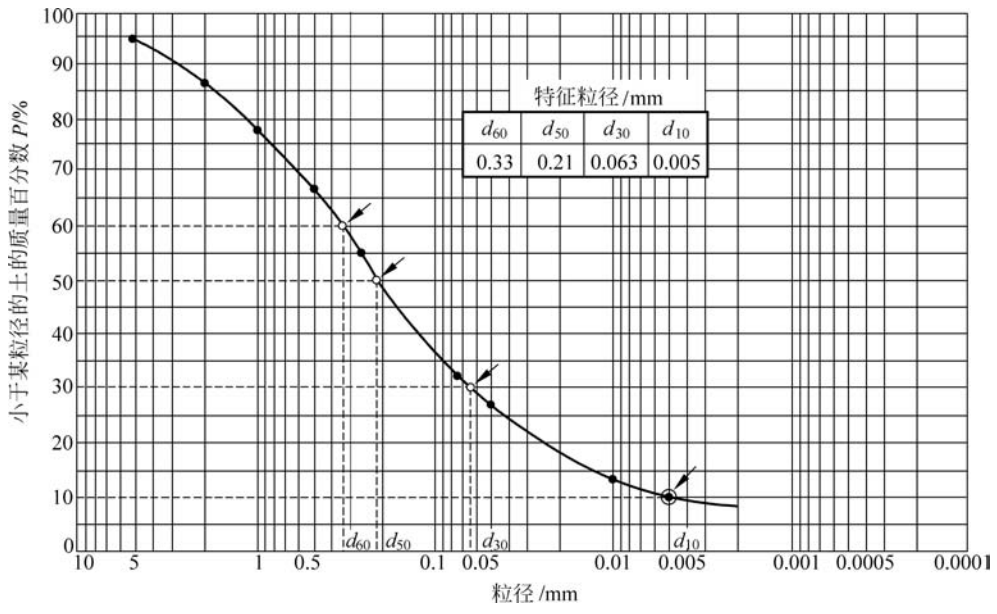


图 1-2 土的粒径级配累积曲线

程度常用平均粒径 d_{50} 表示。它指土中大于此粒径和不大于此粒径的颗粒质量均占 50%。为了表示土颗粒的均匀程度和分布连续性程度,取如下三种粒径作为特征粒径:

- d_{10} ——小于该粒径的土颗粒的质量占土颗粒总质量的 10%,亦称为有效粒径。
 - d_{30} ——小于该粒径的土颗粒的质量占土颗粒总质量的 30%,亦称为连续粒径。
 - d_{60} ——小于该粒径的土颗粒的质量占土颗粒总质量的 60%,亦称为控制粒径。
- 定义土的不均匀系数 C_u 为

$$C_u = d_{60} / d_{10} \tag{1-1}$$

可见, C_u 越大,表示土越不均匀,即粗颗粒和细颗粒的大小相差越悬殊。如果粒径级配曲线是连续的, C_u 越大,则级配曲线越平缓,表示土中含有许多粗细不同的粒组,亦即粒组的变化范围宽。 $C_u \geq 5$ 的土称为级配不均匀土,反之称为级配均匀土。

但是,如果粒径级配累积曲线斜率不连续,在该曲线上的某一位置出现水平段:如图 1-3 中曲线②和曲线③所示。显然水平段范围所包含的粒径的颗粒含量为零。这种土称为缺少某种中间粒组的土。如果水平段的范围较大,这种土的组成特征是颗粒粗的相对很粗,细的相对特细。在同样的击实与压密条件下,得到的干密度不如级配连续的土高,其他的工程性质差别也较大。土的粒径级配累积曲线的斜率是否连续可用曲率系数 C_c 表示,其定义为

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

下面分析曲率系数 C_c 所表示的物理概念。假定在图 1-3 中三条级配曲线上代表 d_{60} 的 a 点和代表 d_{10} 的 b 点位置相同,则土的不均匀系数 C_u 也相同。图中曲线①表示级配连续的曲线,在此曲线上读得 $d_{60} = 0.33\text{mm}$, $d_{30} = 0.063\text{mm}$, $d_{10} = 0.005\text{mm}$ 。由式(1-2)得:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} = \frac{0.063^2}{0.33 \times 0.005} \approx 2.41$$