

高等学校试用教材

工程机械地面力学

吉林工业大学 刘述学 主编

机械工业出版社

高等学校试用教材

工程机械地面力学

吉林工业大学 刘述学 主编



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书论述了土方工程机械行走装置以及工作部件与其工作介质和工作对象—地面的相互作用力学问题。着重介绍 Bekker 在地面—机器系统研究中所采用的半经验方法及其结论，寻求提高土方工程机械牵引性能和作业效率的途径以及预测机器性能的方法。

本书为高等工业学校起重运输与工程机械专业的教材，亦可作为从事工程机械研究、设计的技术人员的参考书。

3101

工程机械地面力学

吉林工业大学 刘述学 主编

责任编辑：林 松 责任校对：李莲凤
封面设计：郭景云 版式设计：冉晓华
责任印制：王国光

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张9³/₄·字数234千字

1992年4月北京第1版·1992年4月北京第1次印刷

印数 0,001—1,600·定价：3.00元

ISBN 7-111-03038-9/TH·331(课)

前 言

本书是根据高等工业学校起重运输与工程机械专业教学指导委员会审定的《工程机械地面力学》教学大纲编写的。主要讨论土方工程机械的行走装置以及工作部件与地面相互作用的力学问题，寻求提高土方工程机械牵引性能和作业效率的途径和预测机器性能的方法。全书共分六章：第一章介绍土力学基础知识，第二、三、四章分别论述履带、轮胎以及工作部件与地面的相互作用，第五章论述了土壤性能的试验测定方法，第六章论述了模型试验问题。书中着重介绍Bekker在地面—机器系统研究中所采用的半经验方法及其结论。

本书由吉林工业大学刘述学副教授主编，机械电子工业部农机工程司杨红旗高级工程师主审。参加本书编写工作的有吉林工业大学刘述学副教授（绪论、第一、五章），太原重型机械学院陈守礼副教授（第二、三章）和西安公路学院孙树仁教授（第四、六章）。

本书为全国高等学校起重运输与工程机械专业教材，亦可作为从事工程机械研究、设计和使用的技术人员的参考书。

由于编者水平所限，本书难免存在错误和不足之处，欢迎读者批评指正。

编者 1991.5

目 录

绪 论	1	§3-3 驱动轮的牵引力和滑转率.....	73
第一章 土力学基础知识	3	§3-4 驱动轮胎的效率.....	75
§1-1 概述	3	第四章 土壤切削	78
§1-2 土的物理性质	6	§4-1 概述.....	78
§1-3 砂土及粘土的特性及其指标.....	10	§4-2 工作部件与土壤相互作用的过 程及基本规律.....	82
§1-4 土的工程分类.....	13	§4-3 挖掘力与挖掘功的确定.....	98
§1-5 载荷作用下土中的应力分布.....	15	第五章 土壤性能的试验测定	103
§1-6 土的垂直载荷与沉降.....	19	§5-1 概述	103
§1-7 土的剪切应力与位移.....	23	§5-2 c 、 φ 及 τ 值的测定	104
§1-8 土的极限平衡条件与Rankine 状态.....	26	§5-3 贝氏土壤参数的测定	110
第二章 履带与地面的相互作用	30	§5-4 土中应力与土体变形的测定	114
§2-1 履带的接地压力.....	30	§5-5 圆锥指数的试验测定	118
§2-2 静止状态下履带接地压力的分 析方法.....	33	第六章 模型试验	126
§2-3 作业时履带接地压力分布的 研究.....	38	§6-1 概述	126
§2-4 履带的行驶阻力.....	43	§6-2 相似原理	128
§2-5 土壤推力.....	49	§6-3 相似准则的导出	137
§2-6 两种类型土壤与牵引力的关系.....	55	§6-4 相似准则形式的转换与模型试 验数据的处理	141
第三章 车轮与地面的相互作用	59	§6-5 真实模型、近似模型与畸变模型.....	143
§3-1 轮胎与地面接触过程中的变形.....	59	§6-6 模型理论的应用举例	146
§3-2 车轮的滚动阻力.....	65	参考书目	150

绪 论

工程机械地面力学是地面力学 (Terramechanics) 的一个组成部分, 它主要讨论土方工程机械 (或称铲土运输机械、土方机械) 的行走装置、工作部件与地面之间相互作用的力学问题, 即土方工程机械的地面—机器系统力学问题。

从系统分析观点来看, 地面—机器系统力学的任务也可以说是探索地面和机器之间关系的定量描述, 建立地面—机器系统的数学模型, 完成系统分析的关键环节, 从而进行系统分析, 使得在设计过程中, 预知机器在特定地面上的性能, 以保证其最优选择。

地面与机器间力学问题的研究, 是从第二次世界大战期间, 为了研制高通过性能的战车而发展起来的。

第二次世界大战末期, 英国的战斗车辆研究与发展机构 (FVRED) 的Micklethwaite为了研究战车在德国北部最困难的地面条件 (无摩擦饱和重粘土) 的通过性, 而开始了地面—机器 (车辆) 系统力学的研究。他们测定了那里的土壤特性, 并首先应用经典力学中的库伦公式

$$\tau_{\max} = c + p \tan \varphi$$

来预测车辆可能发挥的最大牵引力。其公式为

$$F_{\#} = blc + W \tan \varphi$$

式中 c ——土壤的内聚力;
 φ ——土壤的内摩擦角;
 b ——履带接地部分的宽度;
 l ——履带接地部分的长度;
 W ——车辆的重力;
 p ——接地压力。

Micklethwaite还提出了应用Terzaghi的土力学原理来解决地面的承载能力问题。

地面力学的研究, 在美国引起了更大的重视。美国的军事部门在第二次世界大战中发现, 恶劣的地面条件常常限制了战车的动作。由于不能预计到的地面状况的改变, 常使已制定好的作战计划遭到破坏。为此, 他们在战争期间集中精力进行了地面可行驶性的研究, 目的在于探索一种可以预报某种车辆能否通过某一特定地段的快速方法。

美国陆军工程部队水道试验站 (U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experimental Station, 简称WES) 采用了纯经验的方法研究车辆通过性问题。他们采用一个圆锥穿入仪测量土壤的“圆锥指数”, 并将这个“圆锥指数”和车辆曾经试验过的“车辆圆锥指数”相比较, 就可以判断车辆在某一特定土壤表面能否通过。

这个方法是在第二次世界大战后期建立起来的。由于它简单易行, 在美、英、日等许多国家都得到了广泛的应用。

50年代末期, 美国的M.G. Bekker和他的陆军汽车坦克部陆地行走装置研究室(L.L.L.)的同事们, 以经典土力学为依据, 提出了一套半经验性的地面—车辆系统数学模型。Bekker

等人将地面对车辆的作用分解为承压与剪切,并分别用两种仪器模拟这两种作用,得到压力 p 与沉陷量 z 、抗剪强度 τ 与位移 j 的两种关系曲线 $p(z)$ 、 $\tau(j)$ 。将这两种关系分别用半经验公式表示:

$$p = \left(\frac{k_0}{b} + k_1 \right) z^n$$

$$\tau = (c + p \tan \varphi) (1 - e^{-j/b})$$

式中的 k_0 、 k_1 、 b 及 n 等都是表征土壤特性的参数 (详见第一章)。Bekker 以这些参数以及 c 、 φ 等为依据,发展了地面—车辆关系的数学模型。

Bekker 的工作已达到的水平为,与车辆有关的地面物理性质能够定量地描述;地面几何状态能够统计地说明;车辆与地面的关系能够用半经验的、大体适用的数学模型来表示,根据这些模型,可通过系统分析的方法给出最佳性能的设计参数。Bekker 应用这一方法解决了地面—车辆系统的许多重大课题,并成功地设计了适用于月球表面的车辆。后来,此登月车由阿波罗号宇宙飞船送上了月球。

在此期间, Bekker 先后出版了《陆用车辆行驶原理》(Theory of Land Locomotion)、《越野行驶》(Off-the-Road Locomotion)、《地面—车辆系统导论》(Introduction to Terrain-Vehicle Systems) 等三部著作,系统地总结了五六十年代有关地面—车辆系统力学的研究成果,被公认为地面力学的经典著作。

Bekker 的工作引起了世界许多国家的重视。1961年,由美、意两国陆军发起,在意大利都灵召开了有17个国家300多名代表参加的第一届国际地面—车辆系统力学会议。1962年,在美国成立了国际地面—车辆系统协会(International Society for Terrain-Vehicle Systems),商定每3~4年召开一次国际学术会议,并创办了国际学术季刊—地面力学杂志(Journal of Terramechanics),大大地推动了这个领域的研究工作。

除了上述经验、半经验方法之外,许多国家还采用了模型试验来探寻地面与车辆性能相互关系和验证有关这种关系的理论。模型试验就是把自然界物理现象中一切与车辆工作过程有关的因素按一定比例缩小,并将该现象搬到实验室土槽中来观察,然后再把观察到的结果用一定的比例放大,从而得到发生于原型中的物理现象。模型试验结果可以用来定性或定量地预测原型性能。

模型试验能够很好地控制所有的参数,尤其是试验条件,并可节约试验设备的开支和缩短试验周期。地面—车辆系统模型试验的主要问题是土壤性质的模型化问题。目前对于这一问题采取两种方法,一种是采用人工土壤,将土壤性质按比例缩小;另一种是采用畸变模型。

然而上面这些方法建立起来的地面—车辆系统数学模型都还存在一些问题。它们只适用于某一特定条件。推导这些经验、半经验公式所作的假设都与实际情况不符。因此,所得到的结论都有很大的局限性。为此,应当大力开展基本理论的研究。例如,应用塑性理论和流变学理论以及有限单元方法来研究地面与行走装置和工作部件间的相互作用,研究土壤受力后的反应以及应力—应变关系,研究土壤的平衡条件以及破坏或失效理论。只有这样,才能获得土壤和机器相互作用的内在联系和变化规律,才能利用这些知识探寻合理的行走装置结构与合理的工作部件形状与工作方式。

第一章 土力学基础知识

土是铲土运输机械（或称土方机械）的工作对象和工作介质。土方机械在作业过程中，工作部件（如推土板、铲斗等）的切削刃要对土壤进行切削，在切削过程中，机器为了克服土壤的切削阻力而消耗的能量，在大多数情况下，又是通过地表土层对机器的反作用而发挥出来的。因此，机器在工作过程中，土壤的切削阻力、地表土层对机器的支承能力以及对机器的水平反作用力，是影响机器性能及效率的重要因素。研究土壤本身的力学性质及其与机器的相互作用，是设计和合理使用机器的一个重要课题。为此，本章首先讨论土的物理机械性质及其力学特点，以后各章将进一步讨论土与机器的相互作用问题，以及这种相互作用的试验、研究方法。

§1-1 概 述

一、土的定义

在“工程机械地面力学”中，所谓“土”或“土壤”，是指由岩石的机械风化和化学风化所产生的固体颗粒，以及颗粒之间的水和空气等三部分组成。风化后的固体颗粒仍保留在原来位置者称为残积土；由于各种原因而搬动者（如雨水的冲刷、淤积）称为运积土。农业上的“土壤”是指生长了有机物并含有较显著的腐植质的土体表层。本书中，“土”与“土壤”二词没有本质区别，并且在一般情况下，亦不区别其中是否含有有机物。

与“土壤”一词相对应，“岩石”是指由极大强度和永久性内聚力结合的矿物自然团。在本书中，“岩石”与“土壤”的界限也是不很严格的。

二、土的结构

自然界中的土，是以颗粒或颗粒的集合体的形式存在。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。土的结构可分为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构，如图1-1所示。

1. 单粒结构

单粒结构（图1-1a）为砂土和碎石的特征，是由土粒在水或空气中，在其自身重力作用下沉落堆积而成。由于土粒尺寸较大，颗粒间分子引力远小于土粒自重，故土粒间几乎没有相互联结作用，是典型的散粒状物体。疏松的单粒结构中颗粒间孔隙大，颗粒位置不稳定，不论在静载或动载作用下都很容易错位，尤其在振动作用下，体积可减少20%。紧密的单粒结构中颗粒的排列已接近最稳定的位置，在静载或动载作用下体积均不发生较大的变化。

2. 蜂窝结构

蜂窝结构（图1-1b）多为颗粒细小的粘土所具有的结构形式。粒径在0.02~0.002mm左右的土粒在水中沉积，下沉途中碰上已沉积的土粒时，由于土粒间分子引力对自身重力而言已足够大，便停留在最初接触点上而不再下降，形成孔隙很大的蜂窝状结构。蜂窝状结构的孔隙一般远大于土粒本身的尺寸。

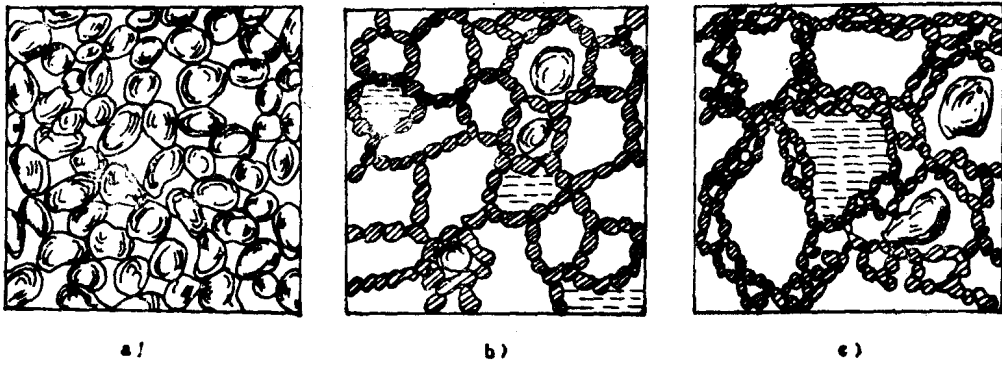


图1-1 土的结构类型
a) 单粒结构 b) 蜂窝结构 c) 絮状结构

3. 絮状结构

絮状结构 (图1-1c) 是颗粒最细小的粘土所具有的结构形式。粒径小于0.002mm的土粒能够在水中长期漂浮，不因自身重力而下沉。当水中加入某些电解质后，颗粒间的排斥力削弱，运动着的土粒凝聚成絮状物下沉，形成类似蜂窝状但孔隙却很大的结构，称为絮状结构。

粒径小于0.002mm的土粒多呈片状或针状，表面带负电荷，而在片的断口处有局部正电荷。因此在土粒聚合时，多半以面一边、面一角或面一面等方式结合，如图1-2所示。

粘土中的颗粒更多的是以土粒的集合体的形式存在，称为集粒。粘土的性质主要取决于集粒间的相互联系与排列。图1-3是粘土结构中颗粒排列方式示意图。土受外力扰动时，其原结构即发生变化。例如粘土受到均匀夯实时，可由絮状结构变成无定向结构。压力愈大或土的含水量愈高，土粒或集粒的定向程度就愈高；反之，当土受外力强烈扰动时，可由原来的定向结构或絮状结构变成无定向结构。此外，土粒或集粒的排列对土的均匀性也有很大影响。

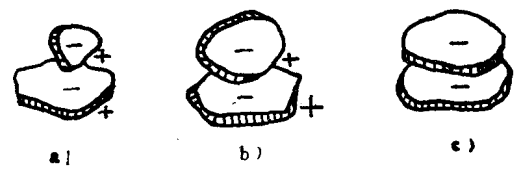


图1-2 土粒的接触方式
a) 面一角 b) 面一边 c) 面一面

三、土的构造

同一土层中颗粒或集粒集合体相互间的位置与填充空间的特点，称为土的构造。土的构造大体可分为层状构造、分散构造、裂隙构造和结核状构造，如图1-4所示。

1. 层状构造

层状构造 (图1-4a) 使土在垂直层理方向与水平层理方向的性质不一，平行于层理方向的压缩模量与渗透系数往往要大于垂直方向的。

2. 分散构造

分散构造 (图1-4b) 中各部分土粒组合无明显差别，分布均匀，各部分的性质亦相近，是比较理想的各向同性体。

3. 裂隙构造

裂隙构造 (图1-4c) 的土体为许多不连续的小裂隙所分割。不少坚硬与硬塑状态的粘土

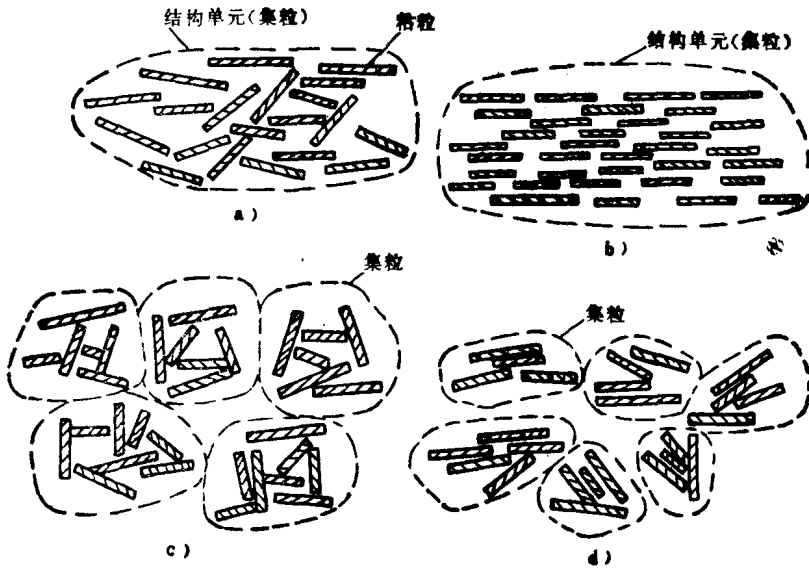


图1-3 粘土结构示意图

a) 部分定向结构 b) 完全定向结构 c) 颗粒无定向的集粒 d) 颗粒定向的集粒

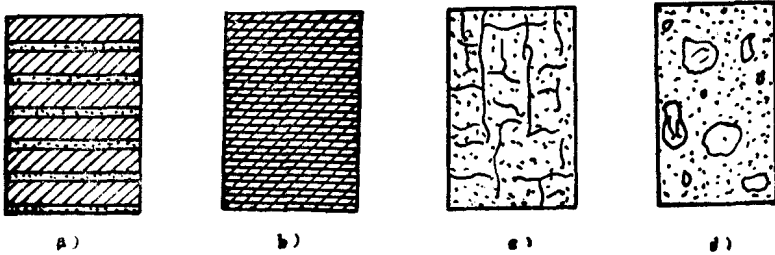


图1-4 土的构造

a) 层状构造 b) 分散构造 c) 裂隙构造 d) 结核状构造

都具有此种构造。裂隙破坏了土的整体性。

4. 结核状构造

结核状构造(图1-4d)是在细粒土中明显掺有大颗粒或聚集的铁质、钙质集合体,以及贝壳等杂物。

四、土的结构性与灵敏度

由地层中取出的土样,如能保持原有的结构与含水量不变者,称为“原状土”;如土样的结构、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,其力学性质往往变坏。土的力学性质受结构扰动的影响而改变的特性,称为土的结构性。粘土是具有结构性的土,砂土和碎石则不具有结构性。

粘土结构性的强弱,用灵敏度 K_s 来表示:

$$K_s = \frac{q_u}{q_0} \tag{1-1}$$

式中 q_u ——原状土的无侧限抗压强度,即单向受压的抗压强度;

q_0 ——具有与原状土相同密度和含水量，并彻底破坏其结构的重塑土的无侧限抗压强度。

按灵敏度的大小，粘土可分为：

低灵敏	$K_u=1\sim 2$
中灵敏	$K_u=2\sim 4$
高灵敏	$K_u> 4$

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

§1-2 土的物理性质

一、土的组成

在一般情况下，土由矿物颗粒和有机质，水溶液以及空气等三相组成。矿物颗粒构成土体的骨架，空气与水溶液填充骨架的孔隙。显然，土的性质将取决于各相的特性、相对含量以及各相间的交互作用。

1. 土的固体颗粒

土的固相主要由矿物颗粒构成，有时还含有有机质。

自然界中的土都是由大小不同的土粒所组成。大颗粒与小颗粒的物理性质并不完全一致。为了便于进行研究，将土粒按大小及性质不同，划分成若干粒组。表1-1列出了各粒组的粒径范围和相应的特性。显然，土中所含各粒组的相对含量不同，它们表现出来的土的性质也就不同。通常，土中所含各粒组的相对含量，以土粒总质量的百分数表示，称为土的粒径级配。它是确定土的工程性质的重要依据。

工程中常用的粒径分析方法有筛分法（适用于粒径大于0.1mm的土）和比重计法（适用于粒径小于0.1mm的土）两种。如土中同时含有大于和小于0.1mm的土粒时，两种方法并用。

土粒的矿物成分不同，土的性质也就不同。例如，石英、长石呈粒状，化学性质不活泼，堆积时形成的孔隙不大；云母则呈片状，当土中含云母较多时，孔隙体积增大，使土体的压缩性增加。

土壤颗粒单位体积所含表面积的总和，称为比表面。粘土矿物和腐植质等细小颗粒的比表面很大，颗粒与水的交界面上发生物理化学作用的场所也就很大，因而具有很大的表面能。有时虽然它们在土中所占的比重不过百分之几，却足以改变土的性质。

2. 土中水

土壤孔隙中经常含有液态水。土体中的液态水依其存在形式可分为结合水和自由水。

(1) 结合水 结合水是借土粒的电分子引力吸附在土粒表面上的水，它对土的物理机械性质影响极大。由于土粒与周围介质（包括气体或液体）间发生物理化学变化，使土粒表面带电（多为负电），并在周围形成电场，从而将介质中的水分子（极性分子）及阳离子吸附于表面，形成结合水膜，如图1-5所示。

直接靠近土粒表面，厚度约几个水分子层的结合水，受到的吸附力极大，可达100MPa，称为强结合水。土粒可以从潮湿的空气中吸收这种水，所以又称为吸附水。这种水的密度比普通水高一倍左右，可以抗剪，但不能传递静水压力，在外力作用下不能移动，仅在105℃

将土烘烤时，可能将吸附水排出。粘土仅含有吸附水时表现为固体状态。砂土也能含有少量吸附水（约为2%~3%），仅含吸附水的砂土呈散粒状。

表1-1 土的粒组及其基本特征

粒组名称	粒径范围/mm	基本特征
漂石及块石 卵石及碎石 圆砾及角砾	800~200 200~20 20~2	透水性大，无粘性，无毛细作用，土体强度大，压缩性小
砂粒	2~0.05	易透水，无粘性，毛细水上升高度不大，遇水不膨胀，干燥不收缩，呈松散状，不表现可塑性，压缩性甚微
粉粒	0.05~0.005	透水性小，毛细水上升高度较大，湿润时能出现微粘性，遇水膨胀与干燥收缩都不显著
粘粒 胶粒	0.005~0.002 <0.002	几乎不透水，结合水作用显著，潮湿时呈现可塑性，粘性大，遇水膨胀与干燥收缩都较显著，压缩性大

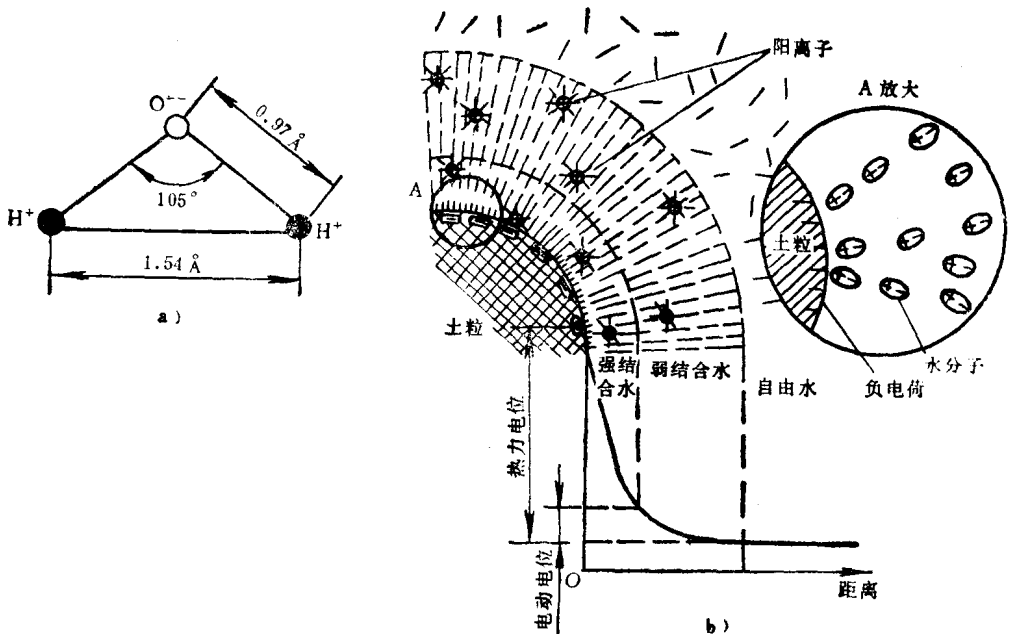


图1-5 土中固体颗粒与水的相互作用

a) 极性水分子示意图 b) 土粒表面的结合水膜

结合水膜中除强结合水以外的水称为弱结合水或扩散层水（图1-5），占水膜的绝大部分。弱结合水受到的吸附力较小，相对密度在1~1.7之间，呈粘滞状态，在外力作用下可以挤压变形。当相邻土粒的水膜厚度不一致时，可由厚的地方向薄的地方转移，抗剪强度较小，在载荷作用下变形所需时间较长，在外因（如压力、电流等）的作用下，可不同程度地脱离土粒。弱结合水对粘土的影响最大，粘土的一系列物理力学特性都与弱结合水有关。砂土实际上可认为不含弱结合水。

(2) 自由水 处于土粒电分子吸引力以外的水称为自由水。它的运动主要由重力法则控制，不能抗剪。位于地下水位以下的水称为重力水，它仅受本身重力作用而运动。位于地

下水位以上，除受重力外，还受毛细管作用的，称为毛细水。在毛细力作用下，地下水沿着土粒间的孔隙上升，形成土体中的毛细管上升带。

毛细水除存在于毛细管上升带以外，还存在于不饱和土的较大孔隙中（图1-6）。在气-水交界面上，由于表面张力沿毛细管弯液面的切线方向作用，对土粒（即毛细管壁）产生一向内的、使土粒相互挤紧的力，称为毛细压力。

3. 土中气体

土中的气体如与大气相连通时，对土的性质影响不大，当土受力变形时，能很快逸出。若气体是封闭气泡时，受压后气体体积缩小，卸载后体积又恢复，这就使土的弹性与塑性增加，透水性减小。

二、土的物理性质指标

土中固、液、气三相组成的比例指标，反映了土的物理状态。土是三相交错分布的分散系。为叙述方便，将三相各部分集中起来，画出土的三相示意图，如图1-7所示。

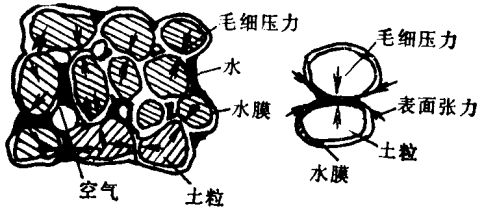


图1-6 土粒间的毛细水与毛细压力

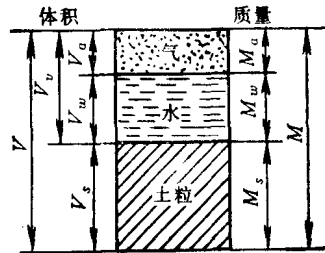


图1-7 土的三相示意图

图中各符号的意义为：

- V ——土的总体积；
- V_s ——土中固体颗粒的体积；
- V_a ——土中孔隙的体积；
- V_w ——土中水所占的体积；
- V_g ——土中气体所占的体积；
- M ——土的总质量；
- M_s ——土中固体颗粒的质量；
- M_w ——土中水的质量；
- M_a ——土中气体的质量，一般可认为 $M_a = 0$ 。

土的主要物理特性指标有下列各项

1. 土的密度 ρ

土在天然状态下单位体积的质量，用下式表示：

$$\rho = \frac{M}{V} \tag{1-2}$$

工程上还常用到干密度 ρ_s ，即单位体积干土粒的质量，用下式表示：

$$\rho_s = \frac{M_s}{V} \tag{1-3}$$

不同土壤的密度不同，它与土的密实程度、含水量等有关。一般在 $1.2 \times 10^3 \sim 3.2 \times 10^3$ kg/cm³之间，密度大的土比较密实，强度也高。

土的密度可用环刀法或蜡封法测定。

2. 土的相对密度 d

土的相对密度是土的干密度 ρ_s 与4℃蒸馏水密度 $\rho_w(4^\circ\text{C})$ 的比值，用下式表示：

$$d = \frac{\rho_s}{\rho_w(4^\circ\text{C})} \quad (1-4)$$

在数值上，水在4℃时的密度等于1 g/cm³。

土的相对密度大小决定于土的矿物组成，一般在2.65~2.80之间。砂土的相对密度大约为2.65；粘土的相对密度约为2.70~2.80。同一种类的土，其相对密度变化幅度很小。

土的相对密度可用比重瓶法测定。

3. 土的含水量 w

土的含水量即土中水的质量与固体颗粒质量之比值，以百分数表示：

$$w(\%) = \frac{M_w}{M_s} \times 100\% \quad (1-5)$$

土的含水量表示土的湿度。土的含水量的变化幅度是很大的，砂土大致在0~40%间变化，粘土在20%~100%间变化，有的甚至可高达百分之几百。

土的含水量一般采用烘干法测定，近年来现场也逐渐采用各种快速测定法，如实容积法等。

4. 土的孔隙比 e 及孔隙率 n

土的孔隙比是土中孔隙体积与土粒体积之比，用下式表示：

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-6)$$

土的孔隙率（亦称孔隙度）是孔隙体积与土体总体积之比，以百分数表示：

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-7)$$

孔隙比 e 与孔隙率 n 之间有如下关系：

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1-8)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \times 100\% \quad (1-9)$$

5. 土的饱和度 S_r

土的饱和度表示土中水的体积与孔隙体积之比，以百分数表示：

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1-10)$$

土的饱和度表示土体孔隙被水充满程度。 $S_r = 100\%$ ，说明土体孔隙全部充满水，土是饱和的； $S_r = 0$ ，说明土是完全干燥的。

上述各项物理指标中，土的密度、相对密度、含水量

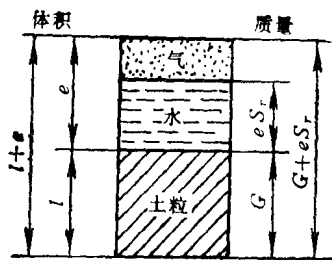


图1-8 土的三相物理指标换算图

是三个基本指标, 应由试验直接测定。其它指标可由这三个指标计算得到。为了说明各物理特性指标间的关系, 可利用图1-8。此处, 令固体颗粒体积 $V_s = 1$, 由式(1-6)得 $V_v = e$, 而总体积 $V = 1 + e$ 。据此, 可以容易地导出各指标间的换算关系。表1-2给出各常用指标的换算关系。

表1-2 土的常用物理性质指标换算公式表①

$\left[\frac{(1+e)\rho}{\rho_w(1+w)} \right]$	$\left[\frac{\rho(1+e)}{d\rho_w} - 1 \right]$	$\left[\frac{\rho}{\rho_d} - 1 \right]$	$\left[\frac{S_r(d\rho_w - \rho_d)}{d\rho_d} \right]$
$\frac{(1+e)\rho}{\rho_w(1+w)}$	相对密度 d	$\frac{S_r\rho}{S_r\rho_w(1+w) - w\rho}$	$\frac{S_r\rho}{S_r\rho_w - w\rho}$
$\frac{d\rho_w(1+w)}{1+e}$	$\frac{S_r d\rho_w(1+w)}{w d + S_r}$	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho_d(1+w)$
$\frac{\rho}{1+w}$	$\frac{d\rho_w}{1+e}$	$\frac{d(\rho - S_r\rho_w)}{d - S_r}$	干密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
$\frac{d\rho_w(1+w)}{\rho} - 1$	$\frac{w d}{S_r}$	$\frac{w\rho}{S_r\rho_w(1+w) - \rho w}$	$\frac{\rho - \rho_d}{S_r\rho_w - (\rho - \rho_d)}$
$\left[1 - \frac{\rho}{d\rho_w(1+w)} \right]$	$\left[\frac{w d}{S_r + w d} \right]$	$\left[\frac{\rho - \rho_d}{S_r\rho_d} \right]$	$\left[\frac{w\rho_d}{S_r - \rho_d} \right]$
$\left[\frac{w d \rho}{d\rho_w(1+w) \rho} \right]$	$\left[\frac{w d}{e} \right]$	$\left[\frac{(\rho - \rho_d) d}{d\rho_w - \rho_d} \right]$	$\left[\frac{w(1-e)\rho_d}{e\rho_w} \right]$
$\left[\frac{e S_r}{d} \right]$	$\left[\frac{n S_r \rho_w}{\rho - n S_r \rho_w} \right]$	$\left[\frac{e S_r \rho_w}{(1+e)\rho_d} \right]$	
$\frac{(1+e)\rho_d}{\rho_w}$	$\frac{\rho - n S_r \rho_w}{(1-n)\rho_w}$	$\frac{e S_r}{w}$	
$\frac{d + e S_r \rho_w}{1+e}$	$\rho_d + n S_r \rho_w$	$\frac{e S_r (1+w)\rho_w}{(1+e)w}$	
$\frac{e S_r \rho_w}{(1+e)w}$	$\rho - n S_r \rho_w$	$\frac{S_r d\rho_w}{w d + S_r}$	
孔隙比 e	$\frac{n}{1-n}$	$\frac{d\rho_w - \rho}{\rho - S_r\rho_w}$	
$\left[\frac{e}{1+e} \right]$	孔隙率 n	$\left[\frac{d\rho_w - \rho}{(d - S_r)\rho_w} \right]$	
$\left[\frac{\rho(1+e) - d\rho_w}{e\rho_w} \right]$	$\frac{w\rho}{n(1+w)\rho_w}$	饱和度 $S_r \%$	

① 表中方框内为欲求指标, 同一横行内的式子为其计算式。 ρ_w 为水的密度, (ρ_w) 为 kg/m^3 。

§1-3 砂土及粘土的特性及其指标

一、砂土的密实度

砂土是无粘性的散体, 不具有可塑性。砂土一般处于从紧密到松散的不同物理状态。松砂中颗粒处于较不稳定状态, 具有超过土粒尺寸的较大孔隙; 紧砂(亦称密砂)则与此相反。确定砂的密实程度, 可用砂的天然孔隙比 e 、相对密实度 D_r 和贯入试验等几种方法。

根据天然孔隙比 e , 可按表1-3将砂土分为密实、中密、稍密和松散等四种状态。

考虑到级配因素, 可采用相对密实度 D_r 来表示砂土的密实程度。

表1-3 砂土的密实度

砂土名称	密 实 度			
	密 实	中 密	稍 密	松 散
砾砂、粗砂、中砂	$e < 0.60$	$0.60 \leq e \leq 0.75$	$0.75 \leq e \leq 0.85$	$e > 0.85$
细砂、粉砂	$e < 0.70$	$0.70 \leq e \leq 0.85$	$0.85 \leq e \leq 0.95$	$e > 0.95$

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1-11)$$

式中 e_{\max} ——砂土在最松状态下的孔隙比，即最大孔隙比。测定方法是将疏松的风干土样，通过长颈漏斗轻轻倒入容器，求其最小干密度 $\rho_{d\min}$ ，再按 $e_{\max} = \frac{\rho_w d}{\rho_{d\min}} - 1$ 求得；

e_{\min} ——砂土在最密实状态下的孔隙比，即最小孔隙比。测定方法是将疏松的风干土样分几次装入金属容器，并加以振动和锤击，直到密度不变为止，求其最大干密度 $\rho_{d\max}$ ，再按 $e_{\min} = \frac{\rho_w d}{\rho_{d\max}} - 1$ 求得；

e ——砂土在天然状态下的孔隙比。

$D_r = 0$ 表示砂土处于最松状态； $D_r = 1$ 表示砂土处于最密实状态。一般地， $D_r < 0.2$ 为极松， $0.2 \leq D_r < 0.33$ 为稍松， $0.33 \leq D_r < 0.67$ 为中密， $D_r > 0.67$ 为密实。

由于测定 e_{\max} 、 e_{\min} 会因人而异，误差较大，实际应用有一定困难。因此，有时采用“标准贯入试验”来判断砂土的密实度，详见有关土工试验规程。

二、水对粘土性质的影响

粘土的特性主要是由于土中的粘粒和胶粒与水之间相互作用产生的。由于粘土的细小颗粒有巨大的表面能，虽然它们在土中的含量有时并不大（例如2%~3%），但对土的性质产生不可忽视的影响。

1. 土粒与水的相互作用

粒径小于0.005mm的土粒，实际上已具有胶体颗粒或类似胶体颗粒的特性。

实验表明，粘土颗粒放在水中时，由于矿物晶格表面与水化合或选择性吸附，常常在土粒表面生成内层带负电、外层带正电的双电层，如图1-9所示。

双电层中内层与外层的电量相等，呈电中性。内层中靠近土粒表面的阳离子与土粒表面阴离子吸着力很强，称为固定层，相当于强结合水的位置。外层中分布较远的阳离子，与土层结合较弱，离子浓度逐渐减小，直到与四周溶液中的浓度相等，称为扩散层，相当于弱结合水的位置。

当粘土中的水相当多，土粒被水隔开时，土呈泥浆状，可以流动。当水分减少时，泥浆变稠，少到一定程度，土就不能流动，变成可塑的土膏。若进一步减少含水量，土便由可塑状态变为半固体状态。这时，土的形状不变，但体积可因水分减少而收缩。当土中水分再进

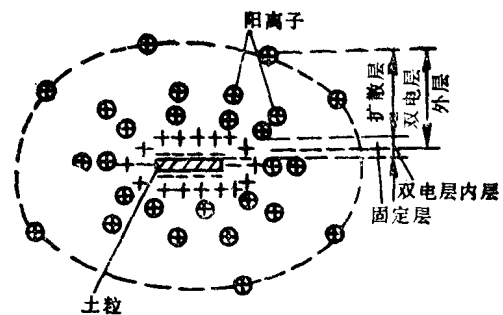


图1-9 胶粒外双电层构造

一步减少时，土便由半固状态变成固体状态。

2. 土的界限含水量

粘土由某一状态转入另一状态时的分界含水量，称为土的界限含水量。土由流动状态变为可塑状态的界限含水量称为塑性上限含水量，简称液限，用符号 w_L 表示；由可塑状态变成半固状态的分界含水量称为塑性下限含水量，简称塑限，用符号 w_p 表示；由半固状态变为固态的分界含水量称为缩限，用符号 w_s 表示。液限与塑限是粘土的重要指标。

粘土物理状态的改变，反映了水对土壤性质的影响(见图1-10)。当土粒相距较远，中间为自由水隔开时，土就处于流动状态；当水分减少到多数土粒为弱结合水隔开时，土粒在外力作用下可互相滑动而不产生颗粒间联系的破坏，这时土就处于可塑状态；当弱结合水含量减少，水膜变薄，粘滞性增大，土就向半固态转化；当土中主要含强结合水时，土便处于固体状态。

测定粘土的液限，我国常用锥式液限仪，亦称流限仪，如图1-11所示。该仪器是在一个特定的土杯中装满均匀的土样，刮平表面，将质量为76g的平衡锥放在土表面中心处，锥体便在自重作用下徐徐沉入土中。如锥体恰好沉入土内10mm，即锥上的刻度与土面齐平，这时的含水量就是液限 w_L 。

测定塑限的方法一般采用搓条法。将土样放在毛玻璃板上，用手搓成细条，如细条的直径刚好达到3mm时就裂成几段，这时的含水量就是塑限 w_p 。

3. 塑性指数与液性指数

从图1-10中可见，液限和塑限是土处于可塑状态的上限和下限含水量，二者之差称为塑性指数，用 I_p 表示，即

$$I_p = w_L - w_p \quad (1-12)$$

塑性指数表示粘土处在可塑状态时，含水量的变化范围。塑性指数愈大，说明土能吸附的水量愈多。因此，塑性指数是一个全面反映土的组成情况的指标。塑性指数愈大，表明土的粘性愈大。 I_p 一般以百分数的绝对值表示。粘土的 $I_p > 17$ ，当 $I_p < 3$ 时，就是无粘性、无塑性的砂土。

液性指数 I_L 是判别粘土软硬程度的指标，也叫稠度，用下式表示：

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (1-13)$$

式中 w ——土的天然含水量。

根据液性指数，重塑粘土可分为下列状态

$I_L \leq 0$	坚硬状态
$0 < I_L \leq 0.25$	硬塑状态

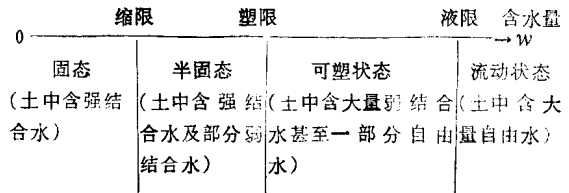


图1-10 粘土物理状态与含水量的关系

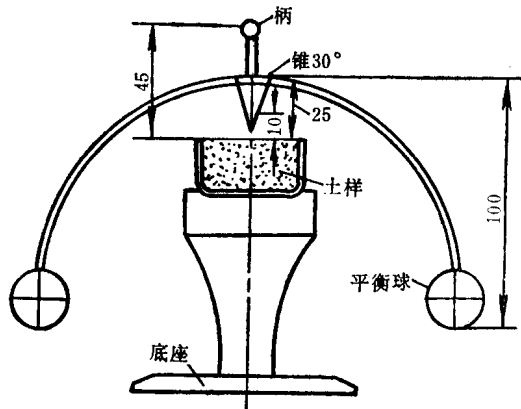


图1-11 锥式液限仪