

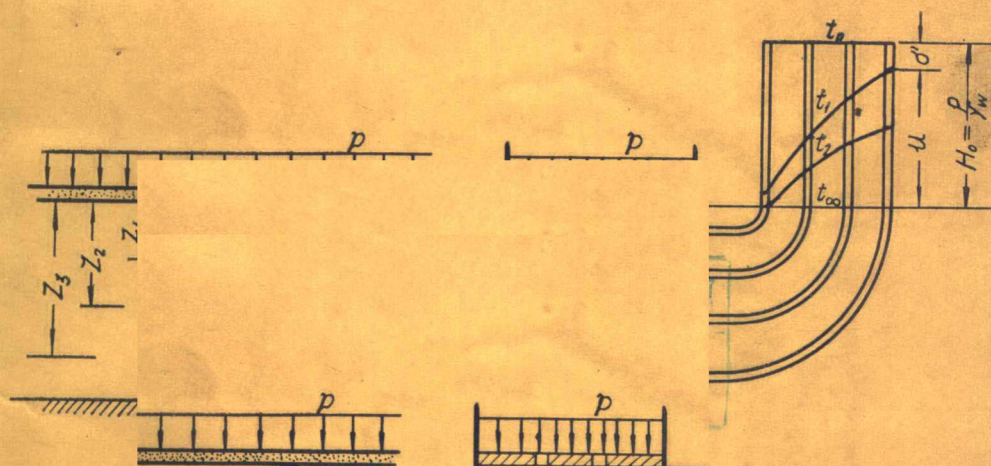
高等学校试用教材

TU LI XUE YU DI JI

土力学与地基

(港口及航道工程、海洋石油建筑工程专业用)

天津大学 主编



人民交通出版社

高等学校试用教材

土力学与地基

(港口及航道工程、海洋石油建筑工程专业用)

天津大学 主编

人民交通出版社

内 容 提 要

全书共十二章，除了包括一般土力学教科书必需的基本内容外，结合专业要求，对有效应力原理、边坡稳定、地震中的土力学问题、软土地基、地基变形参数与桩基等内容作了较多的介绍。全书有较多的例题和习题。

本书除可作为港口及航道工程、海洋石油建筑工程专业的教科书外，也可供相应专业的工程技术人员参考。

高等学校试用教材

土 力 学 与 地 基

(港口及航道工程、海洋石油建筑工程专业用)

天津大学 主编

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 006 号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092_{1/16} 印张：24.75 字数：618千

1980年12月 第1版

1980年12月 第1版 第1次印刷

印数：0001—6,500册 定价：2.55元

前 言

本书是根据交通部1978年“关于高等学校交通专业教材编审出版的通知”及附件的要求，由天津大学、大连工学院、交通部第一航务工程局科研所、重庆交通学院四单位共同编写的。天津大学陈环担任主编，李同田参加了组织工作。编写的具体分工是：大连工学院何广纳第十一、十二章，重庆交通学院胡正恭第一章，徐关宏第六章，交通部一航局科研所叶柏荣第十章，天津大学荆原绪论、第七章，陈环第三、五章，李同田第二、四章，要明伦第八、九章，罗征绘图，要明伦参加了各章的统稿工作。

通过审稿和定稿两次会议对教材的内容和深广度进行了详细讨论，并由部分编写人和天津大学土木系吴家驹，交通部一航局科研所杨国强等分章负责审查，王正宏审阅了第三、四、五章，同济大学叶书麟参加了定稿会。某些章节征求了各编写单位有关同志的意见。编写过程中参考了兄弟院校的教材和科研生产单位的资料，在此一并致谢。

教材编写中力求贯彻加强基础理论，对土力学的基本概念和原理作了重点阐述，注意了结合专业和联系实际，并适当地反映了国内外本学科的新成就和发展趋势，增加或加强了有效应力原理、边坡稳定、地震中的若干土力学问题、软土地基、地基变形参数、桩基等内容。

由于编者水平所限，缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1980年3月

目 录

绪 论	1
第一节 本学科研究的对象	1
第二节 本学科的发展简史与现状	2
第三节 我国在本学科方面的发展与展望	4
第四节 本课程的任务、内容和特点	4
第五节 国际单位制简介	5
第一章 土的物理性质	8
第一节 土的生成与组成	8
第二节 土的三相量比例指标	8
第三节 土的固体颗粒	12
第四节 粘土颗粒特性	15
第五节 土中水及界限含水量	18
第六节 砂土的特性	21
第七节 土的分类	22
第二章 地基应力计算	28
第一节 概述	28
第二节 土的自重应力	29
第三节 地基中的附加应力计算	31
第四节 土中应力的实测结果与计算理论的发展	47
第五节 基底压力计算	50
第三章 土的应力应变特性	55
第一节 概说	55
第二节 压缩试验及压缩曲线	55
第三节 膨胀曲线与前期固结压力	60
第四节 现场荷载试验与变形模量	62
第五节 有效应力原理	65
第六节 应力应变模型简介	75
第四章 地基变形计算	85
第一节 概说	85
第二节 最终沉降量计算的分层总和法	86
第三节 沉降量计算中对深挖基坑和大面积边载影响的考虑	93
第四节 计算沉降量的斯肯普敦方法	96
第五节 最终沉降量计算方法的讨论	101
第六节 饱和粘土地基的固结理论	104

第七节	地基变形与时间的关系	111
第五章	土的抗剪强度	117
第一节	土的剪切破坏	117
第二节	直剪试验与抗剪强度定律	117
第三节	土的强度理论——一点的极限平衡条件	121
第四节	三轴剪切试验	125
第五节	抗剪强度的有效应力原理	129
第六节	影响抗剪强度的因素	135
第六章	挡土墙土压力	145
第一节	概述	145
第二节	库伦土压力理论	148
第三节	朗肯土压力理论	153
第四节	库伦和朗肯土压力理论的适用条件	160
第五节	各种具体情况下土压力的近似计算	163
第六节	关于挡土墙土压力的一些问题分析	171
第七章	土坡稳定分析	180
第一节	土坡类型与滑坡现象	180
第二节	整体圆弧滑动边坡稳定计算	181
第三节	圆弧滑动面简单条分法边坡稳定计算	183
第四节	不考虑分条间竖向力的毕肖普法	192
第五节	非圆弧滑动面假定分条间推力作用点位置的詹布法	197
第六节	有关土坡稳定问题的分析和讨论	202
第七节	防止岸坡滑动应注意的问题	205
第八章	地基承载力	209
第一节	地基的破坏过程与确定地基承载力的方法	209
第二节	按塑性变形区的深度确定地基承载力	212
第三节	极限荷载的求解	216
第四节	影响地基承载力的因素与承载力计算方法的应用	231
第五节	确定地基容许承载力的查表法	233
第六节	地基整体稳定性验算	237
第九章	地震中的若干土力学问题	243
第一节	地震与地基抗震研究	249
第二节	地震作用下饱和砂土地基的液化	249
第三节	地震作用下粘性土的特性	263
第四节	地震作用下土压力、边坡稳定及地基承载力计算	268
第十章	软土地基	273
第一节	软土的工程特性	273
第二节	固结理论与有效应力原理在软土中的应用	279
第三节	软土的天然抗剪强度	289
第四节	在附加荷载作用下抗剪强度的确定	297

第五节	确定抗剪强度的两种实用方法.....	299
第六节	软土地基设计要点.....	305
第七节	软土地基加固.....	309
第十一章	地基变形参数	329
第一节	概说.....	329
第二节	半刚性基础地基反力计算方法简介.....	330
第三节	地基变形参数的试验测定法和经验数值.....	334
第四节	变形参数的影响因素和确定方法的讨论.....	340
第十二章	桩基	345
第一节	桩与桩基的类型.....	345
第二节	低桩台桩基中的单桩受力计算.....	347
第三节	单桩的轴向容许承载力的确定.....	349
第四节	群桩验算.....	360
第五节	桩的负摩擦力.....	363
第六节	打桩的动态分析.....	368
第七节	竖直单桩的水平承载力.....	373
第八节	求解弹性地基梁和水平受荷桩的结构矩阵分析方法简介.....	382

绪 论

第一节 本学科研究的对象

一般工程建筑或修造在地表，或埋置于土层之中；此外，绝大部分建筑材料是来自地球表层。所以研究同建筑物有着紧密连系的地表土层的工程地质特征及其力学性质，有非常重要的意义。

组成地表的主要物质是岩石和土。岩石的矿物颗粒间具有很强的连接，一般是较坚硬、连续的块体；而土是岩石风化后的产物，它是由许多岩石碎块（如大颗粒的漂石）、矿物颗粒（如石英砂）和粘土矿物所组成，颗粒间连系很微弱，故称为散体。

工程地质学 (Engineering Geology) 及水文地质学 (Hydrological Geology) 研究岩石的工程性质。而研究岩石的力学特性的是岩石力学 (Rock Mechanics)。

显然，土是散体，它必然具有一般理想刚体和连续固体所没有的特性——破碎性、孔隙性和多相系；一般为三相系，即土颗粒、水和空气，有时为两相系。因此土具有较大的渗透性及压缩性，而抗剪强度较小。研究土的特性及其受力后变化规律的学科就是土力学 (Soil Mechanics)。最近趋向于将土力学与岩石力学统一于一个新学科，称为岩土力学 (Geomechanics)。它研究的主要方面是岩土的内力与变形、强度与稳定等问题。

建筑物的修筑使地层一定范围内的应力状态发生变化，这一范围的地层称为地基。所以地基就是承担建筑荷重的土体或岩体。与地基接触的建筑物下部结构称为基础。所以基础是建筑物的一部分，由它将建筑物上部结构与地基联结起来。

图 0-1-1 表示一个柱或墙在地下部分的结构。从图上可以看出上部结构、基础和地基三者的关系。图 0-1-2 是港工中经常使用的钢筋混凝土扶壁式码头。这里建筑物和基础分的就不很明显。

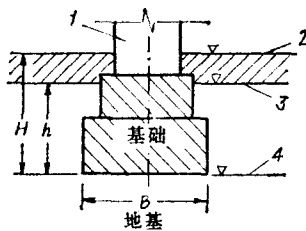


图0-1-1 柱或墙的基础与地基

1-上部结构；2-设计地面；3-天然地面；4-基础底面

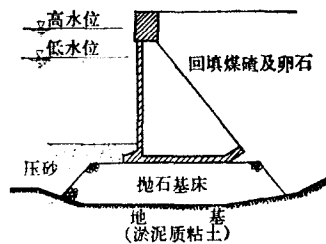


图0-1-2 钢筋混凝土扶壁重力式码头

地基按它是否经过人工处理而分为天然地基与人工地基两类。前一类是在天然情况下，受到建筑物作用时地基变形不太大，同时土的强度能满足建筑物的要求，无需处理的；后一类是不能满足要求，需要人工处理的。天然地基省工省料，应当尽量使用。

我国筑港及海上采油工程目前主要在沿海海岸和近海进行。这里也有岩石，但大部分是

较软的淤积土。这种软土成层厚度由数米、数十米甚至几百米。它们一般是含水量大，有机质含量较高，因之压缩性高，强度很低。在这种土上建造建筑物时常使地基产生过量的沉降与不均匀沉降，甚至发生破坏，不能满足设计要求，因而在许多情况下必须做人工处理。如连云港、塘沽新港、上海港、湛江港等地均发生过由于软土地基未经处理而造成的不同情况的故事。因此，学好本门课程，掌握土层的特性并适应这些特性应用有效的工程措施，才能更好地解决这些问题。

第二节 本学科的发展简史与现状

本学科同其他技术学科一样，是人类在长期的生产实践中，经过经验积累逐渐提高为理论，其后又反复地经过实践验证和理论提高，使土力学理论不断充实与发展。

土力学学科的发展可分为四个阶段。

一、经验积累阶段

人类自远古以来就广泛利用土作为建筑地基和材料。“水来土挡”，就是我国古代劳动人民用土防御洪水的写照。古代许多伟大建筑，如我国的长城、大运河、桥梁、宫殿庙宇和世界上知名的建筑物，如比萨斜塔、埃及金字塔等的修建，都需要有丰富的土的知识 and 在它上面建造建筑物的经验。

由于社会生产力和技术条件的限制，使这一阶段经过了很长时间。和其他学科一样，直到十八世纪中叶，还停留在经验积累的感性认识阶段。

二、理论提高阶段

产业革命后，大量建筑物的兴建促使人们对土进行研究，把已积累的经验进行理论解释。如1773年法国科学家库伦 (C.A.Coulomb) 发表了土压力滑楔理论和土的抗剪强度公式；1856年法国工程师达西 (H.Darcy) 研究砂土的透水性，创立了达西公式；1857年英国学者朗肯 (W.J.M.Rankine) 发表了另一土压力理论，与库伦共同形成古典土压力理论；1885年法国学者布辛内斯克 (J.Boussinesq) 提出了半无限弹性体中应力分布计算公式，为迄今计算地基中应力的主要方法。

这一阶段人们在已往实践经验的基础上，从不同角度作了探索，在理论上有了突破。但是大部是某些局部问题的单独突破，还不能形成统一理论，建立独立的学科。

三、形成独立学科的阶段

从本世纪二十年代起，对土的研究有了迅速发展，发表了许多有关理论和系统著作。如1920年法国普兰特 (L.Prandtl) 发表了地基滑动面的数学公式；1916年瑞典彼得森 (K.E.Petterson) 提出，以后由瑞典费伦纽斯 (W.Fellenius) 及美国泰勒 (D.W.Taylor) 进一步发展的计算边坡稳定性圆弧滑动法。1925年太沙基 (K.Terzaghi) 发表了《土力学》一书，这本著作比较系统地论述了若干重要的土力学问题，提出了著名的有效应力原理，是土力学很重要的理论。至此土力学开始形成独立学科。在其后的30~40年间，即一直到50~60年代，土力学的研究基本上是对原有理论与试验的充实与完善。例如，计算边坡稳定的简单圆弧滑动法最初是一种不考虑条间力的简化方法，1955年毕肖普 (A.W.Bishop) 提出了考虑

分条间竖向力,应用有效强度指标的比较精确的方法。而五十年代后期詹布(N.Janbu)与摩金斯顿(N.R.Morgenstern)相继提出了,不仅可考虑条间作用力,而且滑动面可取任意形状的计算方法,可以说这种方法已发展到较完善的程度。在强度理论与强度试验方法方面发展了库伦-朗肯-摩尔理论。对土的破坏准则、应力路线、影响因素等作了多方面的研究,尤其对抗剪强度的有效应力原理作了深入细致的研究,并用测孔隙水应力的三轴仪作了全面的验证,1960年召开的抗剪强度研究会议对此作了全面总结。在土压力与承载力理论方面,索科洛夫斯基(В.В.Соколовский)等人将古典塑性理论引进土力学领域并进行了多方面的研究,专著《散体静力学》问世。土的基本特性、有效应力原理、固结理论、变形理论、土动力特性研究、流变学在土力学中的应用等的进一步完善是这一阶段研究的中心问题。太沙基、泰勒、崔托维奇(Н.А.Цытович)、斯肯普敦(A.W.Skempton)、毕肖普等在这方面都做出了有效成绩;在这一阶段中,我国陈宗基、黄文熙在土力学方面也有很好的研究成果。

但是,总的看来,上述这些工作基本上是对以古典弹塑性理论为基础的“古典土力学”的发展和完善;也就是假设土符合理想弹性体和理想塑性体的应力应变条件。

四、土力学发展的新趋势

早在1936年容杜利克(L.Rendulic)就发现了土的剪胀性(这一性质是一般固体材料所没有的),并发现土的应力-应变关系是非线性的,并具有加工硬化与加工软化的性质。因此古典弹塑性理论不完全符合土的实际情况,因而也不能满足重型、高大、高精密建筑工程的需要。过去由于没有现代化的计算手段,所以非线性理论的发展受到了限制。随着电子计算机的出现和新计算技术的高速度发展,使土力学的研究进入了一个全新的阶段,即不是将土作为理想弹塑性体,而是作为“土”来研究的新阶段。目前的研究还着重于新的非线性应力-应变关系,即应力-应变模型的建立,并以此为基础建立新的理论。新的应力-应变关系,即土的应力应变规律自1957年朱克(D.C.Drucker)提出的“土力学与加工硬化塑性理论”以后,对这方面的研究起了很大的推动作用。许多学者纷纷进行研究并召开了多次学术会议,这些研究者提出各种应力应变模型,如邓肯-张(J.M.Duncan—C.Y.Chang)模型、剑桥模型以及我国南京水利科学研究所提出的模型。这些模型都是对土的非线性应力-应变规律提出的数学描述。由于土的复杂性,这些描述还没有取得统一的认识。但是我们深信,通过进一步的研究,一定会对土的应力-应变关系提出符合“土”实际情况的模型,从而摆脱古典弹塑性理论,建立新的土力学理论。

从实验手段来说,在六十年代以前,加载时量测力用的是标准压力计。仪器由人工操纵,数据眼看手记,用计算尺计算结果,点绘曲线。而今天试验量测可用电子传感器,数据用自动记录仪表显示,并由电子计算机处理。

从1936年至1977年已开过九届国际土力学与基础工程会议,其中有六次是在五〇年后召开的。不同国家不同地区也越来越多地召开有关土工学科的各种专业会议;各大洲区域性的土力学会议三、五年召开一次,其他有关土力学的专门会议就更多了。从这些会议材料看,土力学的发展是很快的。

国际性的土工刊物《岩土工学》(Geotechnique)已成为定期刊物。出版历史较长的美国土木工程学会编的《土力学与基础工程》(A.S.C.E.)杂志已改名为《岩土技术》(Geotechnical)杂志。苏联有土力学、地基、基础杂志。一些土工较发达的国家如日本、瑞典、挪威等都出了土工学科的刊物。这些都有助于本学科的国际交流,促进其发展。

从上面简短的介绍可以知道，近二、三十年现代土力学的飞速发展，使它成为一门较成熟的独立学科；但仍存在不少问题，有待进一步充实完善。

第三节 我国在本学科方面的发展与展望

我们祖先勤劳勇敢，有智慧并富于创造性，曾经在地基基础方面积累了丰富的经验。但近百年来由于帝国主义的侵略，封建势力和官僚资产阶级的反动统治，使我国的生产技术和科学水平极端落后，有关土力学几乎无人注意。只是在解放以后，才为本学科的发展提供了充分而优越的条件。

建国后开展了史无前例的大规模经济建设，但技术力量极端缺乏，因此许多工程未经勘测设计就施工，给工作带来一些损失。1951年财经委员会发布指示：没有设计不能施工，没有地基的勘探试验就不能进行设计。1953年召开的工程地基土壤检验会议是这一阶段工作的总结。1953年我国开始了第一个发展国民经济的五年计划。这个阶段我们建立了许多土工试验室和勘探机构，培养了大批地基基础方面的人才。1956年水利部编制的《土工试验操作规程》是在总结我国工程经验的基础上编制的，具有较高的水平。1958年建筑工业部召开的全国地基基础经验交流会及1959年年底召开的全国水利科学讨论会上收到了有关土工方面的论文和资料达数百篇。从这些资料看，我国已在土力学及基础方面有了很好的发展。在1961年召开的五届国际土力学及基础工程会议上我国提交了两篇论文，得到了好评。这说明当时我国土力学的某些方面已经接近或达到国际水平。

近年来，在土力学地基基础方面也相应的有了较快发展，完成了许多工作，制订了具有我国特点的各种工程地基规范；修订了《土工试验操作规程》；许多土工专业会议均已或正要召开，一九七九年召开了全国第三次土力学学术讨论会；各专业土力学的教材也正在编写出版。我们相信，一定能在不久的将来赶上和超过世界先进水平。

第四节 本课程的任务、内容和特点

本课程的任务是使同学们掌握土力学的基本知识。掌握这些内容，将它们融会贯通，以便在工作中继续提高，经济合理地解决工程问题，是建筑工程人员的重要任务。而明了地基情况，作出合理的设计是缩短工期，降低造价的重要因素。

本课程分为两个主要部分。

一是土力学部分，这一部分主要包括在建筑物荷重及土自重作用下，土体中的应力、变形、边坡稳定和地基承载力等。它是根据土的基本力学性质，应用数学及力学计算，得出最后使用结果。新增加的“应力应变特性与有效应力原理”与“地震中的有关土力学问题”既反映了近年来本学科的新内容，也适合本专业的需要。学习这一部分时应避免陷于单纯的理论推导，而忽略了推导中引用的条件和假设，只有这样才能正确地将理论应用于工程实际。

二是地基部分。这一部分包括软土、地基变形参数、桩基等三章。软土一章是为适应大多数港口工程和海洋工程安排的，内容包括软土特性、软土中固结理论的应用、软土中抗剪强度的确定、设计要点、软基加固方法等，结合软基特点，内容比较丰富。地基变形参数是根据船坞、船闸、船台、水闸以及重力式采油平台底板设计需要而增设的，主要介绍了有关

变形参数的概念、测试方法与经验数据影响因素及选定方法等。桩基在海洋工程、港口工程中使用很多，对近年来在工程实践和设计理论上的新发展作了适当反映。这部分是综合利用土性知识和土力学理论解决地基实际问题。学习时应注意和土力学理论密切联系。

由于本课程具有多方面的内容，因而要求较广泛的先修课知识，主要有弹性力学、材料力学等。

一般建筑材料可根据生产条件对其性质作出规定，如钢材可根据生产条件定出它的强度标号，混凝土可根据水泥标号和砂石比定出它的强度。因此这些材料的强度、变形模量都较固定，因而设计时容易选定。

土是自然历史的产物，它的成层规律性和均匀性决定于土的自然地理环境和历史条件。它的规律性和均匀性较之一般建筑材料要复杂得多，故设计地基时首先在于认识土和利用改造土。土层一般是不均匀的，不同地点土的试验结果往往有差异；如何在这些比较分散、但在一定范围变化的数据中，选用合理的数据是较困难的；只有深入掌握了土力学知识，仔细进行每一工作步骤，才能得出合理的结果。

由于土力学还是一门比较年轻的学科，再加上土的复杂性，所以对许多较复杂情况需要做近似处理，因而应用土力学理论去解决实际问题时常带有较多的条件性。故正确处理问题需要较多的工程经验，还需要配合现场试验和观测。

土力学的理论是前人实践的总结，只要合理运用，是完全可以指导实践的。

第五节 国际单位制简介

一、国际单位制的由来

国际单位制是1960年第十一届国际计量大会正式通过的全世界各国通用的单位制，国际代号为SI，简称国际制。这是一种比较完善和科学的单位制，适用于所有学科，可把各学科使用的各种单位有机地统一起来，减少了许多不必要的并用单位，省去了原来各单位制之间的换算系数，具有明显的优越性。近年来世界上越来越多的国家逐渐认识到这一优越性，纷纷制订了执行或推行国际单位制的有关法令。

我国自1963年开始着手这一工作，1977年国务院颁布的《中华人民共和国管理条例（试行）》中规定“逐步采用国际单位制”。我们本着这一精神，同时考虑到与本学科有关的各种工程技术规范仍然使用着原有单位制的实际情况，在教材中基本上采用了与原有单位制相近的“暂时与国际单位制并用的单位”，并在书中第一次出现的各种单位后面的括弧中注明相应的国际制单位，在例题中同时列出相应采用国际单位制的计算数据，还举出一些用国际单位制运算的习题，以便同学既能运用现在工程中广泛使用的单位，又可逐渐熟悉将来必然要使用的国际制单位。

二、国际单位制简介

1. 基本单位与辅助单位

国际单位制有七个基本单位和两个辅助单位，见表0-1、表0-2。

本书所用到的基本单位是前三个，可见这三个单位与我国工程中目前采用的单位基本上是一致的。

国际制基本单位

表0-1

量的名称	单位名称	单位代号	
		国际	中文
长度	米	m	米
质量	千克(公斤)	kg	千克(公斤)
时间	秒	s	秒
电流	安培	A	安
热力学温度	开尔文	K	开
物质的量	摩尔	mol	摩
光强度	坎德拉	cd	坎

国际制辅助单位

表0-2

量的名称	单位名称	单位代号	
		国际	中文
平面角	弧度	rad	弧度
立体角	球面度	sr	球面度

2. 国际单位制的导出单位

国际单位制中的导出单位很多，现将与本书有关的列于表 0-3。

与本书有关的国际单位制导出单位

表0-3

量的名称	单位名称	单位代号		备注
		国际	中文	
面积	平方米	m ²	米 ²	△
体积(容积)	立方米	m ³	米 ³	△
速度	米每秒	m/s	米/秒	△
加速度	米每秒平方	m/s ²	米/秒 ²	△
频率	赫兹	Hz	赫	△
波数	每米	m ⁻¹	米 ⁻¹	△
密度	千克每立方米	kg/m ³	千克/米 ³	
力	牛顿	N	牛	1N = 1kg·m/s ²
力矩	牛顿米	N·m	牛·米	
断面惯性矩	米四次方	m ⁴	米 ⁴	△
压力, (压强)	帕斯卡	Pa	帕	1Pa = 1N/m ²
应力	帕斯卡	Pa	帕	
(体积)流量	立方米每秒	m ³ /s	米 ³ /秒	△
重度	牛顿每立方米	N/m ³	牛/米 ³	
表面张力	牛顿每米	N/m	牛/米	

3. 国际单位制词冠

在使用国际单位制时，当某一单位前面的数字太大或太小时可使用词冠，本书涉及到的词冠如表 0-4。

国际单位制词冠可冠于国际单位制中任一单位之前，如 kN 表示 1000 牛，km 表示 1000 米，而 cm 表示 1/100 米，而 mN 则表示 1/1000 牛等等。

在使用国际单位制时，应采用合适的词冠，使单位制前的数字介于 0.1~1000 之间。如 0.005 毫米应写成 5μm，而 10000 千牛则应写成 10 兆牛等等。

国际制词冠

表0-4

因 数	冠 词 名 称	代 号		备 注
		国 际	中 文	
10 ⁶	兆	M	兆	
10 ³	千	k	千	
10 ²	百	h	百	
10 ¹	十	da	十	
10 ⁻¹	分	d	分	
10 ⁻²	厘	c	厘	
10 ⁻³	毫	m	毫	
10 ⁻⁶	微	μ	微	
10 ⁻⁹	纳诺	n	纳	

一个导出单位中不能出现两个词冠，如不能写成1千牛/厘米而应写成100千牛/米等。

三、本书使用的单位与国际制单位的换算

本书采用的单位中有些是与国际制单位基本相同，如表0-3中带△号者，这些单位不需进行换算。现将需换算的单位及换算关系列于表0-5。

本书采用的单位与国际制单位的对比与换算

表0-5

量的名称	SI 单位	本书采用单位	换 算 关 系
力	牛 (N) 千牛 (kN)	公斤力 (kgf) 吨力 (tf)	1公斤力 = 9.81牛 ≈ 10牛 1吨力 = 9.81千牛 ≈ 10千牛
力 矩	牛·米 (N·m) 千牛·米 (kN·m)	公斤力·厘米 (kgf·cm) 吨力·米 (tf·m)	1公斤力·厘米 = 0.0981牛·米 ≈ 0.1牛·米 1吨力·米 = 10千牛·米
应 力	帕斯卡 (Pa)	公斤力/厘米 ² (kgf/cm ²) 吨力/米 ² (tf/m ²)	1公斤力/厘米 ² = 98.1千帕 ≈ 100千帕 1吨力/米 ² = 9.81千帕 ≈ 10千帕
容 重	千牛/米 ³ (kN/m ³)	克力/厘米 ³ (gf/cm ³) 吨力/米 ³ (tf/m ³)	1克力/厘米 ³ = 9.81千牛/米 ³ ≈ 10千牛/米 ³ 1吨力/米 ³ = 9.81千牛/米 ³ ≈ 10千牛/米 ³

本书还用了一些其他的量，其单位与上述表中单位完全相同，如压强、剪应力、弹性模量等与表0-5中的应力单位完全相同，可采用上表中相应的换算关系；有些不完全相同的，也可用上述换算关系式推算。例如有的量采用的单位为应力单位的倒数厘米²/公斤力，则可用应力公式关系的倒数来推求，如1厘米²/公斤力 = $\frac{1}{98.1 \text{千帕}} \approx \frac{1}{100 \text{千帕}}$ ；又如有的量的单位采用公斤力/厘米³，则可用容重的单位换算：1公斤力/厘米³ = 1000克力/厘米³ ≈ 1000 × 10千牛/米³ = 10兆牛/米³等等。

本书所采用的容重相当于国际制单位的重度。

第一章 土的物理性质

第一节 土的生成与组成

一、土的生成

土是岩石风化的产物。大块岩体经物理风化作用而碎成小块，经此种风化而成的颗粒基本上保持原来岩石的矿物成分。若风化过程中矿物颗粒发生化学变化，产生成分与原来矿物颗粒迥异的新物质，此一过程称化学风化，化学风化产生的矿物称次生矿物。次生矿物的颗粒一般是非常细小的。

物理风化作用使岩石由大块变成小块，这是量变过程；化学风化作用使岩石产生性质上的变异，即质变过程。这两种作用往往是同时或者相互交错地进行。自然界的土都是经过连续风化作用，从母岩经量变到质变而逐渐形成的。因此，研究土的物理性质必须紧密结合土的形成历史、环境以及存在条件等因素。

大部分的土都是岩石风化的产物，通常称为无机土。但在自然界中常有动植物腐烂后的有机质和腐殖质混入土中，当有机质含量超过5%时则称为有机土。

二、土的组成

土由固体颗粒、水和气体组成。固体颗粒构成土的骨架，水和气体填充于固体颗粒之间的孔隙中。由于土中固体、液体和气体三种不同相的物质互相分散存在，故土也被称之为三相分散系。当孔隙全部为水所填充时，称为饱和土，反之，当孔隙中没有水，而全部为气体所填充时称之为干土。饱和土与干土都是两相分散系。

显然，土的性质将受各相物质的相对含量、各相物质的特性以及各相物质间相互作用的程度等因素的影响。

固体颗粒组成土骨架，是影响土性质的基本因素，如大颗粒组成的砾石与细小颗粒组成的粘土具有完全不同的性质。

液体是溶解着各种离子的溶液，其含量的多少明显地影响土的性质，如由于含水量的多少，土可由坚硬的固体变为可塑的土膏，甚至流动状态的泥浆。

气体可与大气连通也可以以气泡状态存在，在水中溶解着少量的气体。港口工程和海上采油工程所遇到的大都是饱和土，所以气体的影响较小。但在淤泥中，由于有机质的腐烂，可能出现可燃性气体，对土性有一定的影响。

第二节 土的三相量比例指标

如上节所述，三相的相对含量对土的工程性质有实质性影响，所以土力学把土的三相量之间的比例作为土的基本物理性质指标。它们包括土的容重、比重、含水量、孔隙比、孔隙

率和饱和度等，现分述如下。

为了直观地了解这些指标的含义，我们把本来互相分散的三相，各自集合起来，绘成示意图，如图1-2-1。

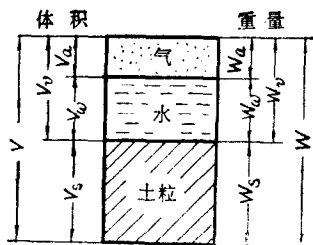


图1-2-1 土的三相示意图

一、土的含水量 w

土中水的重量与干土重量比值的百分数称含水量。

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (1-2-1)$$

土的含水量表示土的干湿程度，含水量愈大说明土愈湿，一般说来也愈软。土的含水量变化幅度甚大，我国沿海软粘土含水量常接近50%，最高可达60~70%。我国内地有一种泥炭土，含水量可达300%。粘土的含水量低于25%就是很硬的土。

含水量一般采用烘干法测定。取欲测的湿土样称重，然后在烘箱中以100°C~105°C的恒温烘至恒重，称烘干土重。烘干前后土重的差值即为水重。水重与干土重比值的百分数即为所求的含水量。

二、土的容重 γ

土的单位体积重量称容重。

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1-2-2)$$

天然状态土的容重称天然容重，一般在1.6~2.2克力/厘米³或吨力/米³（≈16~22千牛/米³）之间。一般 $\gamma > 2.0$ 克力/厘米³的土多是比较密实的土，而 $\gamma < 1.8$ 克力/厘米³则多是较松软的土。

土的容重常用环刀法测定。环刀就是一种特制的已知体积的带刃口的圆环。用环刀切取土样后，称环刀内土的重量，除以其体积即得土的容重。对不能用环刀切取的试样（即无法得到规则的外形以便计算其体积），可将其放入水银中测得其体积。

三、土粒的比重 G

为土粒重量与同体积的4°C时的水的重量之比值。可用下式表示：

$$G = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (1-2-3)$$

在工程问题中，由于水的容重近似取为1克力/厘米³（≈10千牛/米³），故数值上：

$$G = \gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

土粒的比重可在试验室内用比重瓶法测定。土粒比重的大小随土粒的矿物成分而异。砂土的比重约为2.65，粘土的比重介于2.65~2.8之间。土中含有大量有机质时土粒比重则显著减小。

四、土的饱和容重、浮容重、干容重及其应用

在工程上还常用到饱和容重 γ_m ，浮容重 γ' ，干容重 γ_d 等指标。

饱和容重 γ_m ，即土的孔隙全部被水充满时的容重，可用下式表示：

$$\gamma_m = \frac{W_s + W_w'}{V} = \frac{W_s + V_v \gamma_w}{V} \quad (1-2-4)$$

式中： W_w' ——充满土中全部孔隙的水重；

γ_w ——水的容重，可取 $\gamma_w = 1$ 吨力/米³。（ ≈ 10 千牛/米³）

浮容重 γ' ，即在地下水水位以下的土，受到水的浮力作用时，单位体积中土颗粒的有效重量（浮重），可用下式表示：

$$\gamma' = \frac{W_s - V_s \gamma_w}{V} = \gamma_m - \gamma_w = \gamma_m - 1 \quad (1-2-5)$$

干容重 γ_d ，即单位体积土中固体颗粒的重量，可用下式表示：

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (1-2-6)$$

干容重在一定程度上反映了土颗粒排列的紧密程度，因此工程中用它作为控制人工填土施工质量的指标。

对于一项具体的填土工程，需通过击实试验找出填土在最有利的压实条件下的最大干容重。

室内击实试验采用标准击实仪。标准击实仪包括一个1000立方厘米的击实筒和一个重为2.5公斤力的击实锤。

试验时一般取5~7份土，每份土加不同的水量进行拌合，并使其各份的含水量约相差1~3%（中间一份的含水量接近塑限）。将每份土分三层在击实仪中按规定的击数击实。击实后测湿容重 γ 与含水量 w ，算出干容重 γ_d 。然后绘制 γ_d 与含水量 w 关系曲线如图所示，从曲线上确定最大的干容重和相应的含水量。前者称最大干容重后者称最优含水量。在相同的击实条件下只有具有最优含水量的土击的最密实。填土施工时要求其含水量接近最优含水量，而压实后的填土要大部分都达到或接近最大干容重。

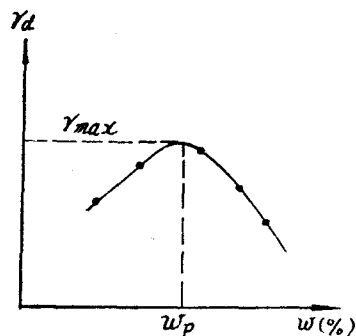


图1-2-2 击实曲线

土的容重、含水量以及土粒比重是三个用试验方法直接测定的指标，称为直接测定指标。其他指标都可以由这三个指标换算求得，所以这三个指标的精确度很值得重视。由于测定这三个指标的试验，除土粒比重外，均需用原状土进行，而取样过程很容易使土的天然容重及含水量改变，这样将会使试验成果产生误差，因此要特别注意取土样时保持土的原状。

五、土的孔隙比 e 及孔隙率 n

土的孔隙比是土中孔隙体积 V_v 与土粒体积 V_s 的比值，用下式表示：

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-2-7)$$