

782125

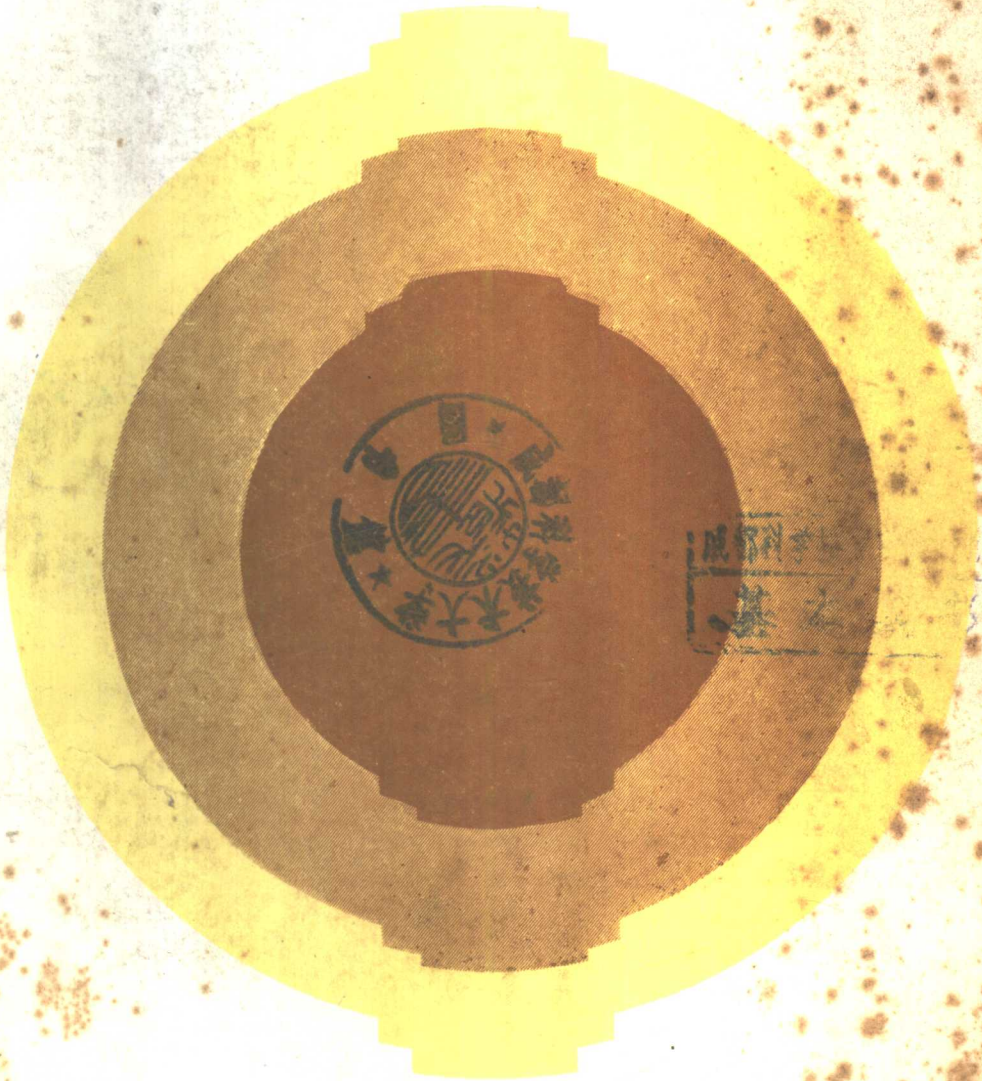
5(3)81

10347.2

土力学与地基

(港口与航道工程、海洋石油建筑工程专业用)

天津大学 编



581

47.2

人民交通出版社

5(3)81
-
10347.2

5(3)81
10347.2

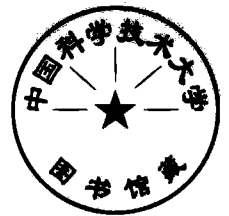
高等学校教材

土力学与地基

Tulixue Yu DiJi

(港口与航道工程、海洋石油建筑工程专业用)

天津大学 编



人民交通出版社

内 容 提 要

本书共十五章，分成三篇。第一篇土力学 I，为各专业通用的土力学基本内容；第二篇土力学 II，是土力学近年来有较大发展的土的有效应力原理、土动力学和土的本构关系等三个方面的主要内容，也是第一篇的深化；第三篇地基，结合专业特点阐述了软土地基的设计和处埋。同时还适当地介绍了其他几种特殊土地基的特点和处埋方法，以及桩基等内容。

本书为大学本科港口与航道工程、海洋石油建筑工程专业的教科书。若以第一篇内容为主，并适当选择第二、三篇的部分内容，也可作为有关专业大学本科与专科的教材。本书还可供其他专业的学生和有关工程技术人员参考。

高等学校教材
土力学与地基
(港口与航道工程、海洋石油建筑工程专业用)

天津大学 编

责任编辑 阎育丹

人民交通出版社出版
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：16.25 字数：401千

1986年6月 第1版

1986年6月 第1版 第1次印刷

印数：0001—7,000册 定价：2.35元

前 言

天津大学、大连工学院、交通部第一航务工程局科研所和重庆交通学院共同编写的《土力学与地基》一书，1980年出版，1983年第二次印刷。根据交通部教育局(84)高字12号“关于修订《土力学与地基》教材”的要求，由天津大学对该书进行了修订、改编。主要修订的内容有：

1. 根据既加强基础理论又少而精的原则，充实和增添了有效应力原理、渗流、地基设计与处理等基本内容；而精简了某些较专门的非基本内容，如原书第十一章地基变形参数以及第八章和第十二章的部分内容等。

2. 本着循序渐进、先易后难的思想，将原书土力学部分分成两篇。第一篇土力学 I，是土力学的基本内容，属于古典土力学的范畴。重点阐述土力学的基本原理和当前生产中实际应用的基本计算方法。第二篇土力学 II，在第一篇的基础上介绍了土力学近年来发展的新内容。

3. 原书的地基部分列为第三篇。增加了软土地基设计和几种特殊土地基及其处理的章节。前者可使学生对土工设计的全貌和基本内容有所了解；后者是为扩大知识面而编写的。

另外，与本书配合，还同时出版一本《土力学与地基习题集》。

本书由陈环、要明伦任主编。荆原（绪论和第八章）、杨进良（第一、五、六章）、李同田（第二、三章）、张学言（第十一章）、要明伦（第四、七、十、十五章）、陈环（第九、十二、十三、十四章）参加编写。罗征、戴令慧绘图。

全书由王正宏主审，对各章节进行了认真仔细的审阅，提出了很多宝贵意见。

由于编者水平所限，缺点错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1985年

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	3
第四节 本课程的内容和特点	4

第一篇 土 力 学 I

第一章 土的物理性质	5
第一节 土的生成与组成	5
第二节 土的三相量比例指标	5
第三节 土的固体颗粒	9
第四节 粘土颗粒特性	13
第五节 土中水和气	16
第六节 土的状态	17
第七节 土的压实	20
第八节 土的工程分类	23
第二章 地基应力计算	26
第一节 土的自重应力	27
第二节 土的附加应力	30
第三节 基底压力	44
第四节 应力计算方法的进一步研究	46
第三章 地形变形计算	48
第一节 土的压缩性	48
第二节 荷载试验与变形模量	55
第三节 地基变形计算	56
第四节 深挖基坑和大面积边载对地基变形计算的影响	60
第五节 对地基变形计算的讨论	63
第四章 渗透与固结	64
第一节 土的渗透性与渗流应力	64
第二节 附加应力作用下的渗流与土的固结	71
第三节 饱和土的一维渗流固结理论	73
第四节 二、三维渗流固结问题与比奥固结理论简介	81

第五章 土的抗剪强度	84
第一节 土的剪切破坏.....	84
第二节 直剪试验与土的抗剪强度定律.....	85
第三节 土的强度理论.....	88
第四节 三轴剪切试验.....	92
第五节 抗剪强度指标的应用.....	96
第六章 土压力	97
第一节 概述.....	97
第二节 朗肯土压力理论.....	99
第三节 库仑土压力理论.....	107
第四节 对于土压力计算中一些问题的分析.....	111
第七章 地基承载力	112
第一节 地基的破坏过程与确定地基承载力的方法.....	112
第二节 塑性变形区与临界荷载.....	114
第三节 极限荷载与地基承载力.....	117
第四节 《港工地基规范》中地基容许承载力确定方法.....	128
第五节 影响地基承载力的因素.....	130
第六节 地基水平滑动验算.....	131
第八章 土坡稳定分析	134
第一节 概说.....	134
第二节 整体圆弧滑动边坡稳定计算.....	134
第三节 简单条分法.....	136
第四节 不考虑分条间竖向力的毕肖普法.....	141
第五节 非圆弧滑动面的稳定计算.....	143
第六节 边坡稳定计算方法的讨论.....	145

第二篇 土 力 学 II

第九章 有效应力原理	148
第一节 两个力系的总结与分析.....	148
第二节 初始超静水压力及其应用.....	152
第三节 孔隙压力系数在变形计算中的应用.....	155
第四节 抗剪强度试验方法的有效应力分析.....	157
第五节 抗剪强度与应力路径.....	161
第六节 有效应力原理的简要分析.....	165
第十章 土的动力特性	165
第一节 概述.....	165
第二节 砂土振动液化.....	167
第三节 土的动力特性指标及其测定.....	177
第四节 土体动力稳定分析.....	183

第十一章	土的本构关系及模型简介	188
第一节	概说.....	188
第二节	一点应力状态与应力空间.....	192
第三节	非线性弹性模型.....	195
第四节	弹塑性模型举例.....	196

第三篇 地 基

第十二章	软土地基设计	203
第一节	软土及其工程特性.....	203
第二节	软土地基设计的内容和特点.....	205
第三节	软基设计所需工程地质资料.....	207
第四节	边坡设计.....	211
第五节	重力式建筑物地基设计和沉降量计算.....	214
第六节	建筑物地基观测设计.....	216
第七节	软土地基上修建建筑物的工程措施.....	217
第十三章	软土地基处理	218
第一节	概况.....	218
第二节	加速排水的措施.....	218
第三节	预压加固法.....	219
第四节	强夯法.....	222
第五节	换土法.....	223
第六节	振冲桩法.....	224
第七节	胶结法.....	226
第八节	土工织物的应用.....	228
第十四章	几种特殊土地基及其处理	229
第一节	砂砾石地基.....	229
第二节	松砂地基及其处理.....	231
第三节	黄土地基.....	231
第四节	杂填土地基.....	234
第五节	胀缩土地基.....	234
第十五章	桩基	236
第一节	桩基及其应用.....	236
第二节	单桩轴向承载力的确定.....	238
第三节	群桩的轴向承载力.....	243
第四节	轴向承载桩的负摩擦力.....	246
第五节	桩基设计中的几个问题.....	248
参考文献	252

绪 论

第一节 本学科研究的对象

一般土木工程建筑或修建在地表，或埋置于岩土之中；此外，绝大部分建筑材料是利用地球表层的岩土。所以研究同建筑物有密切联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，一般是较坚硬的连续块体；而土是岩石风化后的产物，它是由许多岩石碎块（如漂石、块石）和矿物颗粒（大的如石英砂，小的如粘粒）所组成，颗粒间联系微弱，故称为散体。

土既是散体，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、孔隙性和多相性。土一般为三相系，即土颗粒、水和空气；有时只有土颗粒和水或土颗粒和空气，则为两相系。土既为多相性物质，因此，它具有较大的渗透性及压缩性，以及较小的抗剪强度。

研究土的特性及其受力后强度及体积变化规律的学科就是土力学，而研究岩石的力学特性的是岩石力学。土力学与岩石力学合称岩土力学（Geomechanics）。由于生产发展的需要，土力学研究的领域正不断扩大，现在已有好多土力学的分支，如冻土力学、土动力学、海洋土力学等。

建筑物的修筑使一定范围内地层的应力状态发生变化，这一范围内的地层称为地基。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。可见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0-1a)表示一个柱和墙在地下部分的结构，可以看出上部结构、基础(图中柱下的阴影部分)和地基三者的关系。图0-1b)是港口工程中经常使用的钢筋混凝土扶壁式码头，这里建筑物和基础划分的就不明显。

地基按它是否经过人工处理，分成天然地基与人工地基两类。前一类地基受到建筑物作用时变形不太大，同时土的强度足以支承建筑物的重量，所以无需处理；后一类地基不能满足工程要求，而需要人工处理。天然地基省工省料，应当尽量采用。

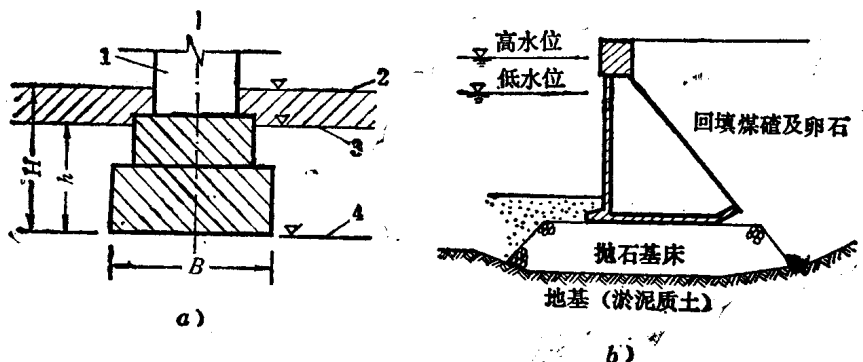


图0-1 基础与地基示意图

a)柱或墙；b)钢筋混凝土扶壁重力式码头
1-上部结构；2-设计地面；3-天然地面；4-基础底面

我国筑港及海上采油工程目前主要在沿海岸及近海进行。这里大部分是较软的淤积土层。层厚由数米直至数百米。它的表层一般是含水量大、有机质含量较高；因之压缩性高、而强度很低。在它上面修造建筑物时，常产生过量的沉降与不均匀沉降，有时发生强度破坏；因而在许多情况下，必须作人工处理。如塘沽新港、连云港、上海港、湛江港等地的软土地基均发生过不同程度的事故。因此，掌握土层特性，并适应这些特性采用有效的工程措施，才能满足工程建筑对地基的要求。

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，是人类在长期生产实践中不断发展形成的。土力学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物地基和建筑材料。“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、灌溉渠道、桥梁、宫殿、庙宇和世界上知名的建筑物，如比萨斜塔、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。但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

十八世纪产业革命后，大量建筑物的兴建，促使人们对土进行研究，并对已积累的经验进行理论解释。如1773年法国科学家库仑(C.A.Coulomb)发表了土压力滑动楔体理论及土的抗剪强度公式；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，与库仑理论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，成为计算地基中应力的主要方法。

这一阶段中人们在以前实践经验的基础上，从不同角度作了探索，在理论上有了突破。但大多是局部理论的单独突破，还不能形成统一理论，并建立独立的学科。

三、形成独立学科的阶段

自本世纪二十年代起，对土的研究有了迅速发展，发表了许多有关理论著作。如1920年法国普朗特(L.Prandtl)发表了地基滑动面的数学公式；1916年由瑞典彼得森(K.E.Petterson)提出，以后由费仑纽斯(W.Fellenius)及美国泰勒(D.W.Taylor)进一步发展的边坡圆弧滑动法。

1925年太沙基(K.Terzaghi)发表了《土力学》一书，它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。至此土力学开始形成独立学科。其后一直到五十~六十年代，基本上是对土力学原有理论与试验的充实和完善。例如，计算边坡稳定的简单圆弧滑动法是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计算方法；而五十年代后期詹布(N.Janbu)与摩金斯坦(N.R.Morgenstern)相继提出了不仅考虑条间力，而且滑动面可取任意形状的计算方法。在强度理论与强度试

验方法方面发展了库仑—朗肯—摩尔理论。对土的破坏准则、应力路线，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总结。在土压力与承载力等理论方面，索科洛夫斯基(В.В.Соколовский)等人将古典塑性理论引进了土力学领域，并进行多方面的研究，发表了专著《散体静力学》。

土的基本特性、有效应力原理、固结理论、变形理论、土体稳定问题、动力特性、流变学等在土力学中应用的进一步完善，是这一阶段研究的中心问题。太沙基、泰勒、崔托维奇(Н.А.Цытович)、斯开普敦(A.W.Skempton)、贝伦(L.Bjerrum)、毕肖普等人在这方面都做出了有效成绩；我国陈宗基、黄文熙在土力学方面也有很好的研究成果。

总的看来，上述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；也就是还没有离开土符合理想弹性体和理想塑性体的应力应变关系的假设。

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；而且具有加工硬化或加工软化的性质。但由于没有现代化计算手段，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，使土力学的研究也进入了一个全新阶段，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。目前的研究着重于新的非线性应力—应变关系和应力—应变模型的建立，并以此为基础建立新的理论。1957年朱克(D.C.Drucker)提出“土力学与加工硬化塑性理论”以后，对土的应力应变规律方面研究起了很大推动作用。许多学者纷纷研究，并召开了多次学术会议，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院提出的模型。这些模型都是对土的非线性应力—应变规律的数学描述。由于土的复杂性，这些描述还没有取得统一的认识。但是，通过进一步研究，一定会出现更符合土实际情况的应力—应变关系模型，从而建立起新的土力学理论。

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。而现在试验量测可用传感器，数据由电子仪器自动记录、显示，并可由电子计算机处理。

从1936年至1985年已开过十一届国际土力学基础工程会议，其中七次是在五十年代后召开的。各大洲区域性的土力学会议二、四年召开一次，其他有关土力学的专门会议就更多了。国际性的土工刊物《岩土工程》(Geotechnique)已创刊多年。出版历史较长的美国土木工程学会(A.S.C.E.)编的《土力学与基础工程》已改名为《岩土技术》(Geotechnical)杂志。苏联、日本及瑞典、挪威等都出了土工学科的刊物。我国“岩土工程学报”已出刊六年。这些都有助于本学科的交流，促进学术发展。

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。早在两千年前，四川省就广泛采用泥浆钻探法开凿盐井；使用灰土地基也有一千多年的历史。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，但技术力量薄弱，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就是这一阶段工作的总结。1953年开始了第一个发展国民经济的五年计划。这个阶段我国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年水利部制定的《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。从这些资料可看出，我国已在土力学及基础方面有了很好的发展。在1961年召开的第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达到或接近国际水平。

近年来，我国在土力学与地基方面也相应有了较快发展，尤其是最近几年内。对全国的特殊土类如黄土、冻土、红粘土、胀缩土、软粘土等都进行了大量的试验研究，制订了一些工程地基规范或条例；对软粘土的固结理论及加固措施，如砂井预压、真空排水固结等均从理论上与实践中取得较好效果；其他如强夯加固地基、桩基设计计算、新型基础设计等方面均获得突出成绩。1980年修订了《土工试验规程》。成立许多土工专业委员会，并召开了多次学术会议。1983年召开的第四届全国土力学及基础工程学术讨论会上，收到论文数百篇。各专业的土力学教材也相继编写出版。我国在国际土力学及基础工程会议上提交的论文，无论从数量上或质量上均有很大的提高。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 本课程的内容和特点

本课程分为两大部分：

一是土力学部分。其中土的物理性质；在建筑物荷重及土的自重作用下，土体中的应力、变形、渗透与固结；土压力、地基承载力与土坡稳定等，都是土力学的基本内容。它是根据土的基本物理力学性质，应用古典力学理论计算土体的变形和强度。也是目前生产实际中常用的计算方法。这是第一篇土力学I的内容。近年来土力学有很大发展，土的有效应力原理、土动力学以及土的本构关系，是土力学新发展的三个重要方面，这是第二篇土力学II讲授的内容。

二是地基部分。包括软基设计、软基处理、几种特殊土地基及其处理。这部分内容是土力学理论的实际应用，阐述设计基本原理和各类地基的处理方法。对于目前工程中应用相当广泛的桩基，也作了基本介绍。

一般建筑材料可根据工程要求进行选择，如钢材可根据工程要求选择强度标号，混凝土可调整其配合比以满足工程要求。这些建筑材料一般具有较均匀的工程性质和固定的力学指标，设计时容易选定。土是岩石经风化、搬运、沉积等地质作用的产物，虽然具有一定的成层规律性，但其不均匀性常是很明显的，在较小范围内也可能有较大变化。而且土的性质容易受环境条件（温度、湿度、应力等）变动的影 响。因而设计计算中使用的力学指标常是可变的，而且经常具有较大的分散性。因此选用反映实际情况的数据相当困难。由于土与土层的复杂性，土力学学科至今在理论上仍然不很严密，所以应用土力学解决实际问题时，常带有较多的条件性，需配合现场试验和观测；同时尚需较多的工程经验。

土力学成为一门独立的学科至今已有60余年的历史，解决了大量实际工程问题；但它又是一门新兴的学科。随着建筑工程的需要，正在不断的发展、充实、完善和更新。

本课程的任务是使学生掌握土力学基本理论、计算方法和试验方法以及地基设计和处理的基本方法。为在工程实践中解决土工问题打下必要的基础。

第一篇 土力学 I

第一章 土的物理性质

第一节 土的生成与组成

土是岩石经风化、搬运、沉积的产物。

风化可分为物理风化和化学风化。大块岩体经物理风化作用而碎成小块，风化后的颗粒基本上保持岩石原来的矿物成分，称原生矿物；化学风化则使原矿物成分发生化学变化，产生成分与原来矿物颗粒迥异的新物质，称为次生矿物。从物理风化到化学风化是由量变到质变的过程。

风化后的碎块，有的残存于原地堆积起来；有的则在各种机械力（重力、水力、风力、冰川等）作用下移动，称搬运作用。搬运可使颗粒磨圆，并产生分选，从而使土具有大小不同的颗粒。不同方式的搬运和沉积可以生成不同的沉积物。故土具有不同种类和成层规律。

土的生成是一非常复杂的过程。风化、搬运、沉积三种地质作用往往是同时或相互交错地进行。一种土可能先后经受以上三种地质作用，也可能主要经受某种地质作用，或反复多次地经受这三种地质作用。因此，在研究土的物理性质时，必须考虑土的生成历史、环境等因素。

大部分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植质混入土中，当有机质含量超过 5% 时，则称为有机土。

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，称为干土。饱和土与干土都是两相分散系。

显然，土的性质将受三相的相对含量及其间的相互作用等因素的影响。

第二节 土的三相量比例指标

组成土三相的相对含量，对土的工程性质有重要的影响，故土力学中把土的三相量间的

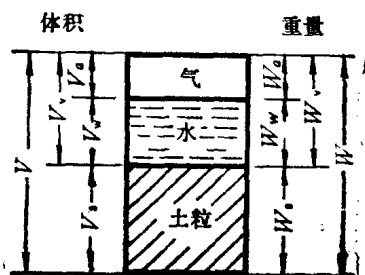


图1-1 土的三相示意图

- | | |
|-------------|-------------|
| V 总体积； | V_s 颗粒体积； |
| V_w 水体积； | V_g 气体积； |
| V_g 孔隙体积； | W 总重量； |
| W_s 颗粒重量； | W_w 水重量； |
| W_g 气体重量； | W_g 孔隙重量 |

比例关系作为土的基本物理性质指标。

为直观地了解这些指标的含义，常把本来互相分散的三相，理想化地各自集合起来，绘成示意图，如图1-1。

一、由试验直接测定的基本指标

1. 土的天然容重（密度） γ

天然土单位体积的重量称为天然容重。

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

天然状态下土的容重约在 $16 \sim 22 \text{ kN/m}^3$ 之间。 $\gamma > 20 \text{ kN/m}^3$ 的土一般是比较密实的；而当 $\gamma < 18 \text{ kN/m}^3$ 时，则多是较松软的。

土的容重常用环刀法测定。

2. 土的含水量 w

土中水的重量 W_w 与干土重量 W_s 的比值，称为含水量。常用百分数表示：

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

土的含水量反映土的干湿程度。含水量愈大，说明土愈湿，一般说来土也愈软；反之，则说明土愈干也愈硬。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%，高者达60~70%。内地有一种泥炭土，含水量可达300%。含水量低于25%的粘土，可能是很硬的土。

含水量一般采用烘干法测定。

3. 土粒相对密度 G

土粒重量 W_s 与同体积的 4°C 时水的重量之比值称为土粒相对密度。即：

$$G = \frac{W_s}{V \cdot \gamma_w} \quad (1-3)$$

土粒相对密度可用比重瓶法测定。

土粒相对密度的大小随土粒的矿物成分而异。砂土的相对密度约为2.65，粘土的相对密度在2.70~2.80之间。土中含大量有机质时，土粒相对密度则显著减小。

上述三个指标是用试验方法直接测定的基本指标（具体测定可参阅我国水利电力部制订的《土工试验规程》），其他指标可由它们换算，称换算指标。

二、换算指标

(一) 土的饱和容重 γ_m 、浮容重 γ' 及干容重 γ_d

1. 饱和容重 γ_m

土的孔隙全部被水充满时的容重，称为饱和容重。即：

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

式中： W'_w ——充满土中全部孔隙的水重；

γ_w ——水的容重，一般可取 $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ 。

2. 浮容重 γ'

处于水下的土，当受到水的浮力作用时，单位体积中土的有效重量称为土的浮容重。

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

3. 干容重 γ_d

单位体积土体中固体颗粒的重量 W_s 称为干容重。

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

干容重反映土颗粒排列的紧密程度，因此，工程上常用它作为控制人工填土密实度的指标。

显然：

$$\gamma' < \gamma_d < \gamma < \gamma_m$$

(二) 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。即

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

土的孔隙率 n 是孔隙体积 V_v 占土总体积 V 的百分数。

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-8)$$

孔隙比 e 与孔隙率 n 有如下关系：

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1-9)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (1-10)$$

对于一定的土，土的孔隙比反映了土的密实程度。孔隙比愈大，即表示土中孔隙体积愈大，土愈疏松。

(三) 土的饱和度 S_r

土的饱和度是指土孔隙被水充满的程度，即土中水的体积 V_w 与孔隙体积 V_v 的比值，常以百分数表示：

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1-11)$$

$S_r = 100\%$ 说明土孔隙全部为水充满，土是饱和的； $S_r = 0$ ，则全部土孔隙中无水，土是干燥的。

为便于计算时参考，现将指标换算公式综合列入表 1-1 中。这些公式都可以根据各指标的定义，利用以上三相量的关系推导出来。

例题 1-1 有一原状土样，经试验测得容重 $\gamma = 18.9 \text{ kN/m}^3$ ，含水量 $w = 18.4\%$ ，土粒容重（土粒重量与土粒体积的比值） $\gamma_s = W_s/V_s = G\gamma_w = 27 \text{ kN/m}^3$ 。试求土的孔隙率 n 、孔隙比 e 和饱和度 S_r 。

解 按单位体积考虑，即取 $V = 1 \text{ m}^3$ ，则土重

$$W = \gamma V = 18.9 \text{ kN/m}^3 \times 1 \text{ m}^3 = 18.9 \text{ kN}$$

$$W_w = W_s w = W_s \times 18.4\% = 0.184 W_s$$

$$\begin{aligned} \therefore \quad & W = W_s + W_w \\ \text{即} \quad & 18.9 \text{ kN} = W_s + 0.184 W_s \end{aligned}$$

$$\therefore \quad W_s = \frac{18.9}{1 + 0.184} = 16 \text{ kN}$$

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s} = \frac{16}{27} = 0.59 \text{ m}^3$$

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{W - W_s}{10} = \frac{18.9 - 16}{10} = 0.29 \text{ m}^3。$$

$$\text{土的孔隙率 } n = \frac{V_v}{V} = \frac{V - V_s}{V} = \frac{1 - 0.59}{1} = 41\%$$

土的三相物理性指标换算公式

表1-1

指标名称	符号	表达式	单位	换算公式	备注
容重	γ	$\gamma = \frac{W}{V}$	N/m ³ 或 kN/m ³	$\gamma = \frac{G + S_r e}{1 + e}$ $\gamma = \frac{G(1+w)}{1+e}$	试验直接测定
相对密度	G	$G = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$		$G = \frac{S_r e}{w}$	试验直接测定
含水量	w	$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$		$w = \frac{S_r e}{G} \times 100\%$ $w = \left(\frac{\gamma}{\gamma_d} - 1 \right) \times 100\%$	试验直接测定
孔隙比	e	$e = \frac{V_v}{V_s}$		$e = \frac{G r_w (1+w)}{\gamma} - 1$ $e = \frac{G r_w}{\gamma_d} - 1$	
孔隙率	n	$n = \frac{V_v}{V} \times 100\%$		$n = \frac{e}{1+e} \times 100\%$ $n = \left(1 - \frac{\gamma_d}{G r_w} \right) \times 100\%$	
饱和度	S_r	$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\%$		$S_r = \frac{wG}{e}$ $S_r = \frac{w r_d}{n}$	
干容重	γ_d	$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$	N/m ³ 或 kN/m ³	$\gamma_d = \frac{G r_w}{1+e}$ $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$	
饱和容重	γ_m	$\gamma_m = \frac{W_s + V_v \gamma_w}{V}$	N/m ³ 或 kN/m ³	$\gamma_m = \frac{G + e}{1+e}$	
浮容重	γ'	$\gamma' = \gamma_m - \gamma_w$	N/m ³ 或 kN/m ³	$\gamma' = \gamma_m - \gamma_w = \gamma_m - 1$ $\gamma' = \frac{(G-1)\gamma_w}{1+e} = \frac{(G-1)\gamma_d}{G}$	

土的孔隙比
$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{1 - 0.59}{0.59} = 0.69$$

土的饱和度
$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{0.29}{1 - 0.59} = 71\%$$

例题 1-2 某饱和砂土，测得其含水量 w 为 25%， G 为 2.65。试求其容重 γ ，干容重 γ_d 及孔隙比 e

解 直接用表 1-1 换算公式计算：

$$e = \frac{wG}{S_r} = \frac{0.25 \times 2.65}{1} = 0.66$$

$$\gamma_d = \frac{G}{1+e} \gamma_w = \frac{2.65 \times 1.25}{1.66} \times 10$$

$$= 19.96 \text{ kN/m}^3$$

例题 1-3 推证下列各式

1)
$$S_r = \frac{wG}{e}$$

2)
$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$$

证明 设 $V_s = 1$ ，根据指标定义则有：

1.
$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{e} = \frac{W_w/\gamma_w}{e} = \frac{wG\gamma_w/\gamma_w}{e} = \frac{wG}{e}$$

2. 原式右边为
$$\frac{V}{V_s} - 1 = \frac{1+e}{1} - 1 = e$$

第三节 土的固体颗粒

固体颗粒主要是矿物颗粒，有时也包括有机质和腐植质颗粒，它们组成土的骨架。固体颗粒的大小、级配和矿物成分是影响土的工程性质的重要因素。

一、土颗粒大小

1. 颗粒大小分组

不同尺寸的土颗粒具有不同的性质。因此，根据土性的变化，可将土粒按其大小分为若干组别，称为粒组。

我国常用的分组界限如表 1-2 所列。

分组间的界限粒径在不同国家、不同部门不尽相同。表中括弧内的数字就是用得较多的另一种分界粒径。

由上表还可看出，随着颗粒大小的变化，土可具有完全不同的性质。例如，粗颗粒的卵石、砾具有很大的透水性，完全没有粘性；而细颗粒的粘粒，则具有粘性，透水性极小，常称为不透水土。所以，粒组划分是土按颗粒分类的基础。

粒组名称	分界粒径(mm)	主要特征	
漂(块)石	200	无粘性, 透水性很大, 不能保持水分, 毛细上升高度很小。	
卵(碎)石	20		
砾	2(1)		
砂粒	粗 0.5		无粘性, 易透水, 有一定毛细上升高度
	中 0.25		
	细 0.1		
	极细 0.05(0.06)		
粉粒	0.005	湿时有微粘性, 透水性小, 毛细上升高度较大, 在水中易悬浮。	
粘粒	(0.002)	有粘性和可塑性, 透水性极微其性质随含水量有很大变化	

2. 颗粒的比表面积

颗粒尺寸变化对土性质的影响, 与土颗粒表面积有关。表面积的大小常用比表面积表示, 即单位体积(或单位重量)的颗粒所具有的表面面积, 单位为 m^2/cm^3 。如 $1 cm^3$ 的正方形块体, 其表面积为 $6 cm^2$, 当切成八个边长为 $0.5 cm$ 见方的小块时(图1-2), 表面积增加为 $12 cm^2$; 如再切成64个边长为 $0.25 cm$ 的小立方体时, 其表面积将增加为 $24 cm^2$ 。

不难看出, 颗粒大小与比表面积有着密切关系。一般说来, 较大颗粒比表面积小, 较小颗粒则具有较大的比表面积。

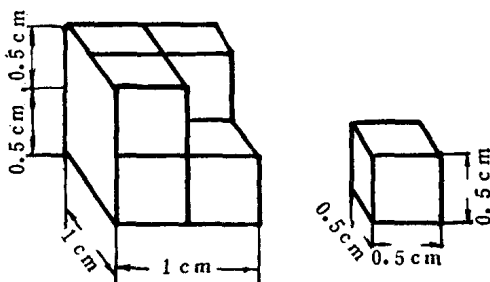


图1-2 分割正方形块体比表面积变化

表 1-3 是立方体边长与比表面积的关系。

表面积增大, 表面能随之增大, 致使土颗粒与周围介质(液体、气体)的作用增强。由于土颗粒与水之间存在着复杂的物理、化学作用, 这就使土的性质随颗粒尺寸的变小而有很大变化。

1 cm³ 的立方体边长变小时比表面积的变化

表1-3

边长(mm)	10	1	0.1	0.001	0.00001
比表面积(m^2/cm^3)	0.0006	0.006	0.06	6	600