

高等学校教材

土 力 学

杨英华 主编

地质出版社

高等学校教材

土 力 学

杨英华 主编

地质出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了土力学的基本概念、基本理论及其实际应用。全书共分九章，分别论述了土的压缩变形特性、土体中的应力分布、地基变形量的计算、地基变形与时间关系、土的抗剪强度特性、挡土结构物上的土压力、土坡稳定性分析和地基稳定性计算等内容。每章均有例题和习题。书中附有常用符号和单位及常用名词汉英对照等。

本书为高等地质院校水文及工程地质专业通用教材，亦可供水利水电、工业民用建筑、农田水利、铁道及港口工程等类专业师生及有关工程技术人员参考。

※ ※ ※

本书由王兰生副教授担任主审，经地矿部工程地质教材编审委员会于85年3月主持召开的审稿会议审定，同意作为高等学校教材出版。

※ ※ ※

高 等 学 校 教 材

土 力 学

杨英华 主编

责任编辑：王兰生 王肇芬

地质出版社出版

(北京西四)

河北蔚县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：787×1092¹/₁₆。印张：14³/₄。字数：336,000

1987年5月北京第一版·1987年5月蔚县第一次印刷

印数：1—7,000册 定价：2.30元

统一书号：13038·教271

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 土力学研究对象及任务	(1)
第二节 土力学研究方法及要求	(2)
第三节 土力学发展概况及展望	(4)
第二章 土的压缩变形特性	(6)
第一节 概述	(6)
第二节 土的有效应力原理	(7)
一、有效应力及孔隙水压力	(7)
二、自重应力作用下的两种应力	(9)
三、渗流作用下的两种应力	(9)
四、附加应力作用下的两种应力	(10)
五、孔隙水压力参数	(12)
第三节 土的压缩性及其参数	(14)
一、单向压缩试验及其参数	(15)
二、三向压缩试验及其参数	(17)
三、载荷试验及其参数	(20)
第四节 土的前期固结压力	(21)
一、天然土层的三种固结状态	(21)
二、前期固结压力的确定	(22)
三、现场压缩曲线的推求	(23)
第五节 土的应力路线	(25)
一、应力路线的概念	(25)
二、应力路线试验	(26)
三、应力路线试验测定变形参数	(28)
习 题	(30)
第三章 土体中的应力	(32)
第一节 概述	(32)
第二节 土体的自重应力	(32)
第三节 基底应力	(34)
一、垂直中心荷载	(34)
二、垂直偏心荷载	(35)
三、斜向偏心荷载	(36)
四、基底附加压力	(36)
第四节 地基中的附加应力	(37)
一、集中力作用下地基中的附加应力	(38)

二、局部荷载作用下地基中的附加应力·····	(41)
三、条形荷载作用下地基中的附加应力·····	(52)
第五节 非均质和各向异性地基中的附加应力·····	(57)
一、双层地基 ·····	(57)
二、各向异性地基·····	(61)
三、变形模量随深度增大的地基·····	(62)
习 题·····	(63)
第四章 地基变形量的计算·····	(65)
第一节 概述·····	(65)
第二节 分层总和法·····	(66)
第三节 TJ7-74规范法·····	(69)
第四节 $e \sim \log \sigma'$ 曲线法·····	(76)
一、正常固结土 ·····	(76)
二、超固结土 ·····	(77)
三、欠固结土 ·····	(78)
第五节 司开普顿法·····	(80)
第六节 应力路线法·····	(83)
一、应力路线原理 ·····	(83)
二、应力路线法求沉降·····	(84)
第七节 相邻荷载的影响·····	(85)
一、附加沉降的计算·····	(85)
二、基础倾斜的计算·····	(87)
第八节 建筑物地基的容许变形值·····	(88)
习 题·····	(90)
第五章 地基变形与时间的关系 ·····	(92)
第一节 概述·····	(92)
第二节 土体的固结特性·····	(92)
一、主固结与次固结·····	(92)
二、渗透固结模型·····	(93)
三、渗透固结系数的测定·····	(94)
四、粘弹性固结模型·····	(96)
五、粘弹性参数的测定·····	(97)
第三节 土的固结理论·····	(97)
一、单向渗透固结理论·····	(97)
二、二向及三向渗透固结理论·····	(99)
三、土的粘弹性固结理论·····	(101)
第四节 沉降与时间关系的计算·····	(102)
一、渗透固结沉降与时间关系计算·····	(102)
二、经验估算法·····	(107)
三、次固结沉降与时间关系计算·····	(108)
习 题·····	(110)

第六章 土的抗剪强度..... (111)

第一节 概述..... (111)

第二节 土的强度理论..... (112)

一、莫尔-库伦强度理论 (113)

二、土中一点的极限平衡条件..... (114)

第三节 土的抗剪强度试验..... (116)

一、直剪试验..... (116)

二、三轴剪切试验..... (117)

三、无侧限抗压强度试验..... (120)

四、原位十字板试验..... (121)

第四节 粘性土的抗剪强度..... (122)

一、不固结不排水剪..... (122)

二、固结不排水剪..... (123)

三、固结排水剪..... (124)

四、土的残余强度..... (125)

五、软粘土地基在荷载作用下强度的变化..... (126)

第五节 无粘性土的抗剪强度..... (128)

第六节 土的动力强度..... (129)

一、饱和砂土液化..... (130)

二、粘性土的动强度..... (134)

习 题..... (134)

第七章 挡土结构物上的土压力..... (135)

第一节 概述..... (135)

一、挡土结构物的类型及用途..... (135)

二、土压力概念及静止土压力计算..... (136)

第二节 郎肯土压力理论..... (138)

一、主动土压力计算..... (139)

二、被动土压力计算..... (141)

第三节 库仑土压力理论..... (142)

一、土压力计算数解法..... (143)

二、库尔曼图解法..... (148)

第四节 一些情况下的土压力计算..... (149)

一、库仑土压力理论在计算粘性土压力时的应用..... (149)

二、有地下水时土压力的计算..... (150)

三、墙后填土成层时土压力的计算..... (150)

四、墙后土面上有荷载时土压力的计算..... (151)

五、折线形墙背的主动土压力的计算..... (152)

六、特殊情况下的朗肯土压力的计算..... (153)

七、地震情况下的土压力的计算..... (153)

习 题..... (156)

第八章 土坡稳定性分析..... (157)

第一节 概述..... (157)

第二节 无粘性土坡稳定性分析..... (158)

 一、干的无粘性土坡..... (158)

 二、有渗流作用的无粘性土坡..... (158)

第三节 粘性土坡稳定性分析..... (159)

 一、瑞典圆弧法 (159)

 二、瑞典条分法 (160)

 三、毕肖普法 (163)

 四、折线形滑动面的土坡稳定性分析 (166)

 五、复合滑动面土坡稳定性分析法 (167)

第四节 土坡稳定分析中的图解法简介 (168)

 一、洛巴索夫图表法..... (168)

 二、泰勒图解法..... (169)

第五节 工程地质比拟法和经验数据 (170)

第六节 土坡稳定分析中的一些问题 (172)

 一、坡顶开裂和超载的影响 (172)

 二、渗流对粘性土坡稳定性的影响 (172)

 三、地震对土坡稳定的影响..... (174)

 四、土层组成、结构构造、应力历史等的影响 (175)

 五、抗剪强度指标的选用..... (176)

 六、安全系数的选定..... (176)

 七、条分法小结..... (177)

习 题 (177)

第九章 地基稳定性 (179)

第一节 概述 (179)

第二节 按塑性变形区发展范围确定地基容许承载力 (181)

 一、临塑荷载公式 (181)

 二、地基承载力的确定..... (183)

第三节 地基极限承载力 (185)

 一、极限承载力公式的基本形式..... (185)

 二、各公式中的修正系数..... (190)

 三、安全系数的选用..... (193)

 四、影响极限承载力的因素..... (196)

第四节 确定容许承载力的经验方法..... (197)

 一、用室内土工试验指标查规范表格确定..... (197)

 二、用原位测试方法确定..... (199)

 三、按建筑经验确定..... (202)

第五节 地基抗滑稳定性验算..... (203)

 一、承受较大水平荷载结构物的地基稳定性验算..... (203)

 二、斜坡结构物稳定性验算..... (205)

 三、地震力作用下地基承载力的计算..... (206)

习 题..... (207)

常用名词汉英对照 (208)

常用符号和单位 (218)

主要参考书 (221)

第一章 绪 论

第一节 土力学研究对象及任务

土——通常系指岩石圈表层非岩质的组成部分，它是由各种岩石、矿物颗粒组成的松散集合体。颗粒之间有孔隙，孔隙中存在水和气体，所以它是一种松散介质。土具有许多区别于岩石的特征，其颗粒之间的联结强度远比颗粒本身的强度要小得多，有的甚至没有联结，因而它具有不同于一般理想刚体和连续固体的力学特性，如压缩性大、易透水和强度低等。研究土的力学性状时，除运用一般力学原理外，还应用专门的土工试验技术来测定和研究土的这些特性。土的变形、固结和强度理论，就是在这些试验研究的基础上建立和发展起来的。

在工程实践中，土被广泛用作各种工程建筑物的地基，或作为建筑材料用来修筑堤坝、路基以及其它土工建筑物。此外，土还可作为建筑物（如隧洞、渠道和地下建筑工程）周围的护体。

一般建筑物由上部结构和基础两部分组成。基础是建筑物的下部结构，通常埋在地面以下，它的作用是把建筑物的荷重传至地层。由于建筑物的修建而使一定范围内原有应力状态发生改变的地层，即称为该建筑物的地基。图 1-1 表示了上部结构、基础和地基三者的关系，图中 D 为基础埋置深度， B 为基础宽度。有时上部结构和基础之间没有明显界限，如路基、坝基（图 1-2）等。

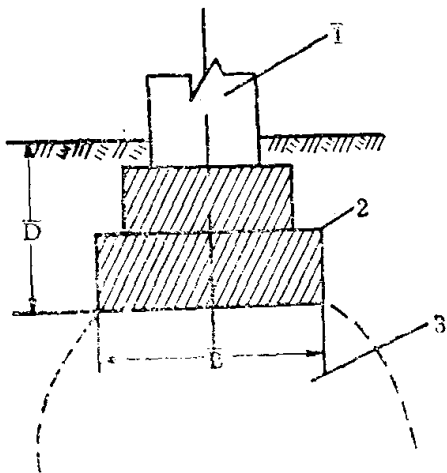


图 1-1 上部结构、地基与基础示意图
1—上部结构；2—基础；3—地基

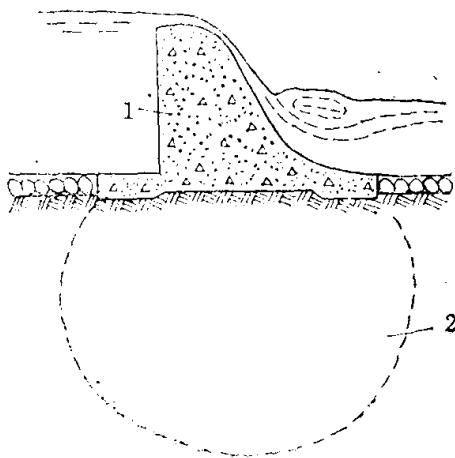


图 1-2 重力式混凝土溢流坝
1—溢流坝；2—地基

土的上述特征常给建筑物带来许多危害。图 1-3 为加拿大特朗斯康谷仓地基发生强度破坏而失稳的典型实例。该谷仓由 65 个圆柱形筒仓组成，其下为钢筋混凝土片筏基础。谷仓总重量为两万吨，容积 36500m^3 。当谷仓建成装谷达 32000m^3 后，谷仓西侧突然下沉 8.8m ，

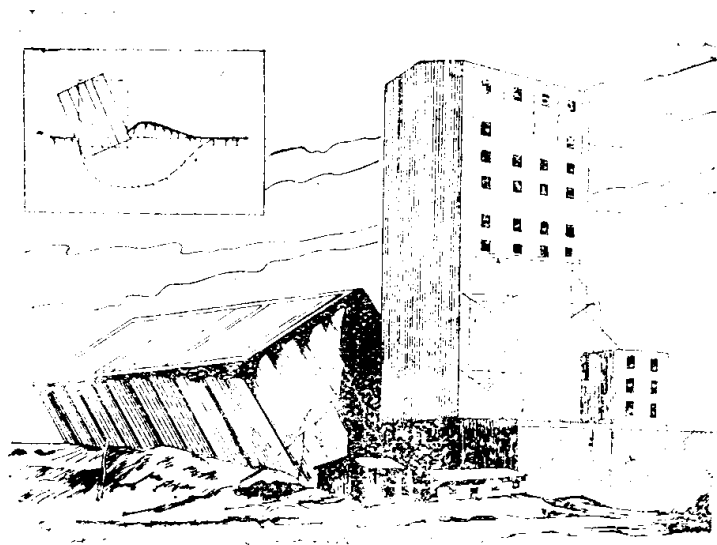


图 1-3 加拿大特朗斯康谷仓地基破坏事故

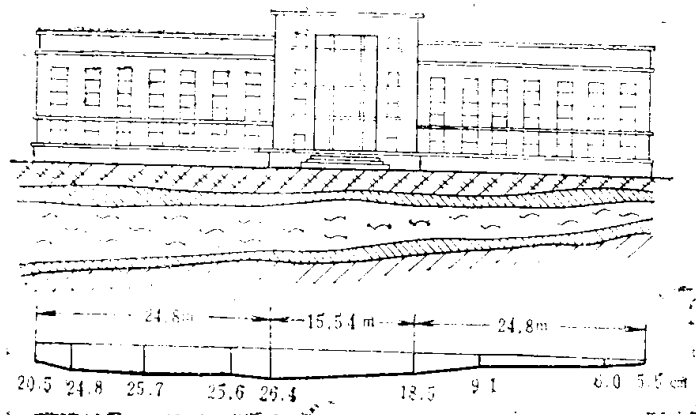


图 1-4 某火车站服务楼的不均匀沉降

东侧却抬升 1.5m，整体倾斜 $26^{\circ}53'$ 。事后查勘，方知基底以下为十多米厚的淤泥质软粘土层，地基的极限承载力仅为 245kPa，而装谷后的基底压力已超过 300kPa，因而造成地基整体强度破坏。为补救这一事故，曾在原有基础下做了七十多个支承于基岩上的混凝土墩，使用 388 个 490kN 的千斤顶和支承系统，才把仓体逐渐纠正过来，但其整个仓体比

原来低了有 4m。

又如国内某火车站的服务楼，由于造在厚薄不均的软土地基上，加之上部结构布局不当，建成后不久便产生了显著的不均匀沉降（图 1-4）。因两翼墙基向中部倾斜，致使上部结构产生严重开裂，影响安全和使用。后经加固更换等措施，又化费了占总造价的 75%，才保证了建筑物的安全。

由上述实例不难看出，为保证与土基有关的建筑物和工程设施的正常使用、安全和经济，为合理使用土石料和改造土的性能以适应工程实践的需要，必须研究土的力学性状及其与建筑物相互作用的力学过程，这正是土力学这门学科所要研究的主要内容。具体的说，土力学要研究土的应力与应变关系及强度特性，土内应力和变形、强度和稳定性的计算理论，还要研究与工程实践直接有关的地基稳定性、土坡稳定性和挡土结构物的土压力等应用课题。

第二节 土力学研究方法及要求

在我国土力学被视为工程地质专业的一门专业基础课程，它是定量分析和评价工程地质问题的重要理论基础之一。

土是自然历史的产物，它的性质往往比较复杂而又多变。在研究土的力学特性时，必须注意土的生成环境和历史过程，结合微观结构和宏观土层的边界条件及自然环境的变化等。既要有充分可靠的地质和水文地质勘测资料、符合实际的测试手段和试验方法，又要能预估因建筑物的施工和使用而引起土层性质的可能变化，以便能动地改善或适应其变化规律，正确建立和发展土体的变形和强度理论。因而，土力学与地质学和工程岩土学有着极密切的关系。

本课程是在学习工程岩土学的基础上，利用力学原理（包括工程力学、弹塑性理论、流变理论、地下水动力学等）和土工试验来研究问题的，是一门偏于计算的理论课程。因而，数学、力学是建立土力学计算理论和方法的重要手段。随着测试技术的不断改进和电子计算技术的发展，这一手段对发展土力学理论尤为重要。

工程地质工作者的任务，是研究解决与各类工程建筑物的设计、施工和正常使用有关的地质问题。然而，各种建筑物因设计要求的不同，它对土体变形和稳定性的要求就很不一样。所以，在运用土力学理论为工程建筑物服务时，必须考虑建筑物本身的结构特点和使用要求，特别对建筑物的地基和基础部分应直接运用土力学理论设计和施工，才能解决实际问题。

总之，运用土力学理论解决各类建筑物的实际问题时，既要对当地的地质及水文地质条件进行详细的勘测和分析，又要考虑建筑物本身的结构特点和要求，必须运用辩证唯物主义的观点从实际出发，将建筑物的地基、基础和上部结构共同作用而又相互影响的三个部分统一起来，进行全面分析研究。要反对脱离土的自然历史条件，脱离实际的形而上学观点和研究方法。这样，才能正确运用和发展土力学理论，保证工程建筑物修建符合多快好省的原则。

对工程地质专业学生学习本课程总的基本要求如下：

- (1) 在复习土的力学性质基础上，进一步掌握孔隙水压力，受荷历史和应力路线对土体变形和强度特性的影响及其参数测定。牢固掌握变形及强度指标在土力学中的应用。
- (2) 重点掌握土体应力分布理论、固结理论和强度理论的实质及其应用。
- (3) 对各类工程建筑物和构筑物地基的变形、强度和稳定性能作出定量评价，并掌握按变形和强度条件确定地基承载力的方法。
- (4) 掌握土坡稳定性分析的基本概念和计算原理。能对一般土坡的稳定性作出定量评价。
- (5) 掌握挡土结构物上土压力的基本概念，计算理论和一般常用的计算方法。

除上述基本要求外，尚应对土力学的研究现状有一概括了解，以便开阔进一步分析问题和解决问题的思路。

土力学牵涉的基本理论知识范围较广，又是一门偏于计算的理论课程，在运用基础理论和数学手段解决土力学问题时，除对公式的来源有所了解之外，应着重搞清其物理概念、前提假定和适用条件，以便正确运用和解决实际问题。

工程地质专业要为各类工程建筑的地质问题进行定量评价，但因学时所限，不能面面俱到。学习时应掌握少而精的原则，抓住重点，搞清基本概念和计算原理，在此基础上密切结合生产实际，加强作业练习，就能达到举一反三的学习效果。

第三节 土力学发展概况及展望

土力学与其它科学技术一样,是劳动人民长期生产实践的产物。人类很早就利用土进行工程建设,并有卓越的创造,在长期实践中积累了丰富的经验。如举世闻名的万里长城和南北大运河,以及许多宏伟壮丽的宫殿寺院和宝塔,它们经历了千百年强震风暴的考验,至今仍安然矗立。隋朝石工李春修建的赵州石拱桥,把桥面砌置在密实粗砂层上,一千三百多年来沉降很小,经验算其基底压力约490—588kPa,很接近现行规范确定的承载力数值,可见古代劳动人民已积累有丰富的土力学知识,只是未能总结为理论而已。

产业革命以后,由于大量建筑物兴建的需要,促进了对土力学理论的研究。1773年法国库伦(C.A.Coulomb)提出了著名的砂土抗剪强度定律和土压力滑楔理论。1856年法国达西(H.Darcy)研究砂土的透水性,创立了土的渗透定律。1857年英国郎肯(W.J.M.Rankine)从不同角度提出另一土压力理论,推动了土体强度理论的发展。1885年法国布西奈斯克(J.Boussinesq)提出垂直集中力作用下半无限弹性体中应力和变形的计算公式。1922年瑞典费伦纽斯(W.Fellenius)为解决土坡坍方问题提出计算边坡稳定性分析的圆弧滑动面法。以上这些古典理论,至今仍在广泛应用。

1925年美国太沙基*(K.Terzaghi)发表了土力学专著,系统地论述了土力学问题,并提出著名的有效应力原理和渗透固结理论,使土力学形成了一门独立学科。随后,崔托维奇(H.A.Читович)、索科洛夫斯基(B.B.Соколовский)、泰勒(D.W.Taylor)、比奥特(M.A.Biot)、斯开普顿(A.W.Skempton)、毕肖普(A.W.Bishop)、詹布(N.Janbu)、弗洛林(B.A.Флорин)等,在原有理论和试验的基础上进一步充实和发展起来。使有效应力原理广泛应用于土体变形、强度和土体稳定,并用测量孔隙水压力的三轴仪作了全面验证。同时,将松散介质静力学和蠕变学引入解决土体稳定和次固结问题。

自1936年至1981年已召开过十届国际土力学和基础工程会议,很多国家都定期出版各种土工刊物和召开土力学专门会议。特别从1957年第四届国际土力学和基础工程会议以来,由于电子技术的渗入,有了现代化的计算技术和测试手段,使在古典理论的基础上建立起新的土力学理论,并对土力学的研究领域逐渐扩大。如从过去的线性弹性应力—应变关系发展为非线性应力—应变关系,提出各种应力应变模型,像邓肯(J.M.Duncan)等人的非线性弹性模型,弹塑性理论的剑桥模型,以及各种粘弹性理论模型等,使土的本构关系逐渐符合实际,并将土的变形和强度问题统一起来考虑,以及用土的微观结构来研究土的力学性质等,使土力学理论进入新的发展阶段。同时,由于强烈地震的威胁以及核电站和大型地下建筑等的兴建,提出了土动力学和海洋土力学等新的土力学分支,从而扩大了土力学的研究领域。在土工试验方面,为配合新的土力学理论,目前原位测试技术日益受到重视,如动力和静力触探、十字板剪切仪、旁压仪、现场孔隙水压力仪等均已广泛使用。同时,不断改进室内试验,使之能更好模拟原位应力状态、固结条件及应力路线,如真三轴仪、大型三轴仪、流变仪、振动三轴仪等等。由于原位试验是在土层中进行,可以

* 现译为特兰特吉。

减少取原状土样的困难和扰动程度，并有可能减少费用，因此当前正在不断发展新的更加完善的原位测试技术，发挥其更大的优势。

建国三十年来，我国学者对土力学理论亦作出了重大贡献。早在五十年代，黄文熙教授提出了非均质地基的应力分布和考虑侧向变形的沉降计算方法，并发表用振动三轴试验探讨饱和砂土地基和土坝的抗液化稳定问题，研制出了第一台振动三轴仪；陈宗基教授提出了粘性土的流变模式及次固结理论问题，引起国际学者们的重视。中国土木工程学会分别于1958年、1962年、1979年及1983年召开过四届土力学及基础工程学术会议，并成立了土力学及基础工程学会，大大推动了该学科的发展。五十年代以来，在大规模经济建设经验的基础上，编制了具有国内特点的各类工程地基基础设计规范和土工试验操作规程，研制出各种新型测试仪器，使我国土力学理论的发展，正向着世界先进水平稳步迈进。

第二章 土的压缩变形特性

第一节 概 述

土是由固体颗粒、水和气体组成的三相分散体系。由于不同成因土的粒度组成、颗粒排列和结构连结的不同，形成了复杂的微观结构和构造上的差异，使得土体往往是非均质和各向异性的。加之土体受荷历史和周围环境的多变性，因而研究这种松软三相分散体系的变形特性比研究连续物体和理想材料要困难得多。如何能正确而又简便地掌握土体的变形特性，这是本章要解决的关键问题。

根据载荷试验所得荷载 p 与变形量 S 的关系曲线（图2-1），通常人为地将地基土的变形分为三个不同特征的变形阶段：

（1）压密变形阶段 相当于曲线的0a段，这一阶段的 $p \sim S$ 关系近似直线，亦称直线变形阶段。此阶段的变形，主要是因土的孔隙体积被压缩引起土粒发生以铅直向为主的位移，故称压密变形，如图2-2a所示。在此阶段内，地基在各级荷载下的变形，是随时间的增长而渐趋稳定的。

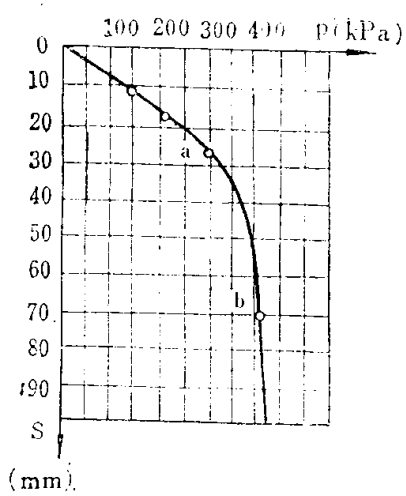


图 2-1 荷载与变形关系曲线

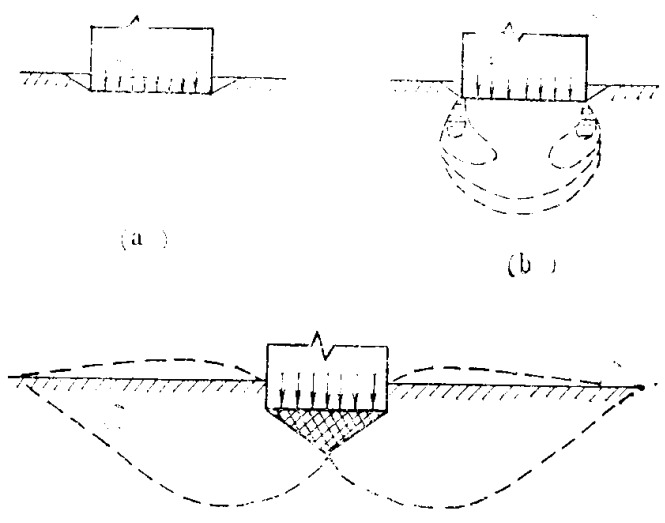


图 2-2 地基变形三阶段

（2）局部剪切阶段 相当于曲线的ab段。当荷重超过a点后， $p \sim S$ 关系不再呈直线，且 S 对 p 的增加率逐渐加大。这一变形阶段主要是在压密变形的同时，地基中局部地方的剪应力超过土的抗剪强度引起土粒间相互错动的位移，故称剪切变形，亦称塑性变性。塑性变形区从基底边缘开始，随荷重的增加而逐渐扩大，如图2-2b所示。塑性变形区的不断发展，导致地基稳定性的逐渐降低。

（3）整体破坏阶段 即b点以下的一段。荷载继续增大至某一极限值时，地基中

的塑性变形区扩大成一连续的滑动面，土开始向侧面挤出，见图 2-2c。这时，地基的变形将急剧增加，整个地基处于破坏状态而导致稳定性丧失。

由地基变形的三阶段可看出，土体的变形可分为两种不同性质的变形类型，既压密变形和剪切变形。压密变形主要由土的孔隙体积压缩而引起，故通常用压应力与孔隙体积的变化关系来计算地基的压缩变形量（即基础沉降量）。由于压密变形阶段的 $p \sim S$ 关系近于直线，故通常将土体视为线性弹性体，应用线性弹性理论来计算土体的应力和变形。至于土的剪切变形，是属于土体的强度和稳定性问题，常将土体视为刚塑性体，用莫尔-库伦强度理论和刚塑性模型的解答进行计算。这方面问题将在第五章中讨论。

必须指出，将土体的变形和强度分开研究，是一种简化的近似估算方法。实际上，随着外荷的增加，应力和变形将相应地发展，土体的变形直至达到最终破坏是连续发生的，自始至终伴有压密变形和剪切变形。通常所指的强度总是与土的应力、应变发展至某一阶段相联系的。随着电子计算技术的发展和土性状模型的研究，采用符合实际的试验方案，已有可能用非线性弹性理论和弹塑性理论及流变理论来解决土体的变形和稳定问题，使土力学的研究达到新的水平。

因此，研究土体变形特性的途径有两种。一种是将变形和强度分开考虑的简化估算法，也是目前工程实践中广泛采用的。另一种是将变形和强度统一考虑的严格分析法，即计算是建立在符合土体实际的本构关系基础上的。这一方法对复杂而重要的工程，考虑较多因素影响时，具有重大实际意义，也是目前正在进一步探讨的课题。

本章主要介绍当前广泛采用的简化研究方法。使学生在学习工程岩土学的基础上，对土的变形特性，变形参数及其相互关系能结合实际作一概括了解。本章还重点讨论了孔隙水压力、受荷历史和应力路线对变形特性的影响。

第二节 土的有效应力原理

作为建筑物地基、建筑材料和地下工程的土体，由于其本身重量和建筑物荷载以及水的渗流等等作用，都将使土体产生应力。弄清土体中各点的应力是如何传递和分担问题，对真实掌握土体变形和强度特性，正确定量评价土体变形、强度和稳定性，是极其重要的。

一、有效应力及孔隙水压力

土体是由固体颗粒和孔隙水及空气组成的三相集合体，显然外荷在土体中产生的应力是通过颗粒间的接触来传递的。由颗粒间接触点传递的应力，会使土的颗粒产生位移，引起土体的变形和强度的变化。这种对土体变形和强度有效的粒间应力，称有效应力，用 σ' 表示。

如果土体中的孔隙是互相连通而又充满着水，则孔隙中的水服从于静水压力分布规律。这种由孔隙水传递的应力，称孔隙水压力，用 u 表示。由于孔隙水在土中一点各方向产生的压力相等，它只能压缩土颗粒本身但不能使土粒产生位移，而土粒本身的压缩量是可以忽略的。这种不能直接引起土体变形和强度变化的孔隙水压力，又称中性应力。

图2-3为一单位断面积的饱和土体，在水平断面A-A处，每单位面积粒间接触点处垂直分力的总和为有效应力 σ' 。若在单位断面积A-A上粒间接触点的面积为 a ，则孔隙水压力

作用的面积为 $1-a$ 。因此，饱和土体垂直方向所受的总应力 σ 为有效应力及孔隙水压力之和，即

$$\sigma = \sigma' + u (1-a)$$

研究表明，粒间接触面积 a 值甚小，与总断面积相比，可忽略不计，故上式可写成

$$\sigma = \sigma' + u \tag{2-1}$$

此式说明饱和土体中的有效应力与总应力及孔隙水压力之间的关系。当总应力一定，若土体中孔隙水压力有所增减时，势必相应地增减土内有效应力，从而影响土体的固结程度。此即为太沙基提出的饱和土体有效应力原理。它是研究土体固结和强度的重要理论基础。

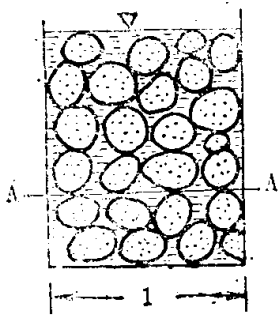


图 2-3 单元饱和土体

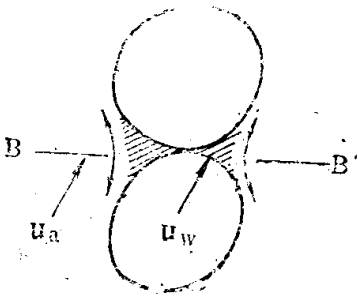


图 2-4 非饱和土体的孔隙水压力和孔隙气压力

对非饱和土体，孔隙中存在有封闭的气泡和与大气连通的气体，水在孔隙中是不连续的，如图2-4所示。这时土的孔隙压力是孔隙水压力 u_w 和孔隙气压力 u_a 之和。

若取一单位断面积的非饱和土体，在水平断面 $B-B$ 处，粒间接触点的面积为 a ，孔隙中水的断面积为 a_w ，则非饱和土体中单位断面积的孔隙水压力为

$$u = u_w a_w + u_a (1-a-a_w)$$

由于 a 值甚小，可忽略不计，故

$$u = u_a + a_w (u_w - u_a)$$

则非饱和土体的有效应力公式应为

$$\sigma' = \sigma - [u_a + a_w (u_w - u_a)] \tag{2-2}$$

显然， a_w 值是随土体饱和度 S_r 的增加而增大的，如图2-5所示。

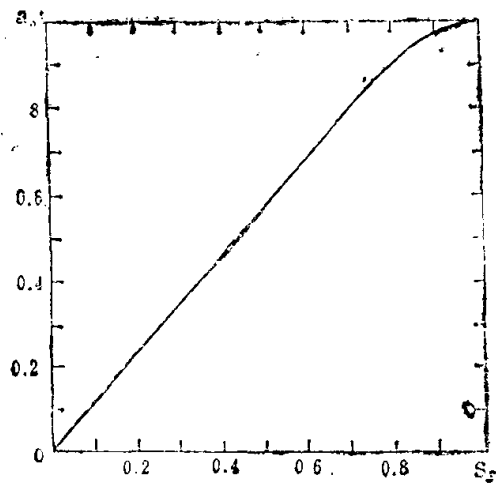


图 2-5 S_r 与 a_w 的关系

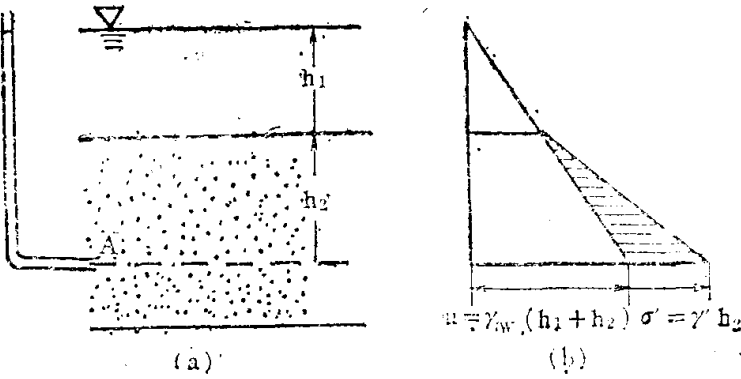


图 2-6 自重应力作用下的两种应力

目前已研制出可同时测定非饱和土体中孔隙气压力和孔隙水压力的新仪器。

二、自重应力作用下的两种应力

图2-6a为处于水下的饱和土层，在地面下 h_2 深处的A点，由于土体自重对地面以下A点处作用的垂向总应力为

$$\sigma = \gamma_w h_1 + \gamma_{sat} h_2$$

式中 γ_w ——水的容重， kN/m^3 ；

γ_{sat} ——土的饱和容重， kN/m^3 。

A点处由孔隙水传递的静水压力，即孔隙水压力为

$$u = \gamma_w (h_1 + h_2)$$

根据有效应力原理，由于土体自重对A点作用的有效应力应为

$$\sigma' = \sigma - u = (\gamma'_{sat} - \gamma_w) h_2 = \gamma' h_2 \tag{2-3}$$

式中 γ' ——土的浮容重， kN/m^3 。

式2-3说明，浸在静水面以下的土层，由于土自重引起的有效应力，等于该点以上单位面积土柱体的有效重量，即浮容重与土层深度之积，而与地面以上水位的高低无关。另外孔隙水压力，为该点以上单位面积的静水压力。两种压力随深度的分布，如图2-6b所示。

在第三章中土体的自重应力计算，即以此有效应力原理为理论基础。

三、渗流作用下的两种应力

在渗流作用下，土体中的有效应力及孔隙水压力将会发生变化。如在图2-7a的土层中，由于水头差而发生自上而下的渗流时，其土层表面以上的水柱仍为 h_1 ，则在土层以下 h_2 深度处a— a'断面上的总应力，应为该点以上单位面积土柱和水柱的重量，即

$$\sigma = \gamma_w h_1 + \gamma_{sat} h_2$$

在深度 h_2 处由于自上而下的渗流，其孔隙水压力将因水头损失而减小。若在 h_2 土层中渗流时的水头损失为 h ，则在a— a'断面上的孔隙水压力将为

$$u = \gamma_w (h_1 + h_2 - h)$$

其孔隙水压力分布图，如图2-7b所示。

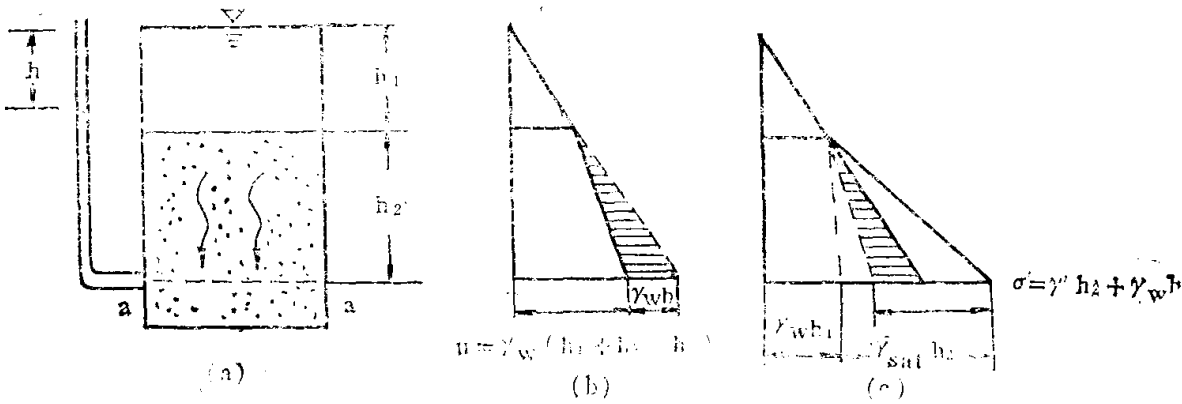


图 2-7 向下渗流时的孔隙水压力及有效应力