

Bodenmechanik

Gerd Gudehus

土 力 学

盖尔德·古德胡斯著

朱百里 译



同济大学出版社

Bodenmechanik

Gerd Gudehus

土 力 学

盖尔德·古德胡斯著

朱百里 译

同济大学出版社

责任编辑 方 芳

封面设计 王肖生

土 力 学

[联邦德国] 盖尔德·古德胡斯著

同济大学出版社出版

上海四平路 1239 号

新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印张 12.75 字数 326 千字

1986 年 11 月第 1 版 1986 年 11 月第 1 次印刷 印数 1—5000

科技新书目 120—214

统一书号 13335·016

定价 2.30 元

目 录

1. 引论	(1)
1.1 内容概要	(1)
1.2 表示方法和工作说明	(3)
2. 土的构造和组成	(5)
2.1 土颗粒	(5)
2.1.1 颗粒	(5)
2.1.2 片状颗粒	(8)
2.1.3 其它的粘土颗粒	(10)
2.2 土	(12)
2.2.1 颗粒分布	(12)
2.2.2 容重和孔隙	(16)
2.2.3 含水量	(18)
2.2.4 掺合物	(23)
2.2.5 结构	(24)
2.3 土体	(32)
2.3.1 初步资料和地面勘探	(32)

2.3.2 钻探、取样和地下水勘测.....	(35)
2.3.3 触探和地球物理方法.....	(39)
2.3.4 地基土的描述.....	(43)
 3. 地下水渗流	(49)
 3.1 渗透性.....	(49)
3.1.1 渗透速率和比渗流力.....	(49)
3.1.2 渗透定律.....	(52)
3.1.3 渗透试验.....	(55)
 3.2 稳定渗流.....	(60)
3.2.1 竖直渗流.....	(60)
3.2.2 渗流的平面问题.....	(64)
3.2.3 坡降较小的地下水位.....	(69)
3.2.4 把非稳定流作为准稳定流.....	(72)
 4. 竖直压缩	(77)
 4.1 压缩性.....	(77)
4.1.1 相对压缩和有效应力.....	(78)
4.1.2 压缩性的量测和表示方法.....	(80)
4.1.3 土在初次加载时的性能.....	(83)
4.1.4 土在卸载与再加载时的性能.....	(88)
 4.2 竖直应力.....	(96)

4.2.1 由土自重及地下水引起的应力·····	(96)
4.2.2 由于地面荷载引起的应力·····	(99)
4.3 由于压缩引起的沉降 ·····	(105)
4.3.1 地面上一点的沉降 ·····	(105)
4.3.2 差异沉降 ·····	(110)
4.4 减速沉降 ·····	(119)
4.4.1 由于孔隙水渗流而产生的减速沉降 ·····	(119)
4.4.2 线性固结理论的简化应用 ·····	(125)
4.4.3 由于土的粘滞性而产生的沉降 ·····	(128)
5. 极限状态 ·····	(136)
5.1 土体在极限状态下的性能 ·····	(136)
5.1.1 简单剪切 ·····	(136)
5.1.2 剪切试验和库伦极限条件 ·····	(139)
5.1.3 六面体形变 ·····	(143)
5.1.4 六面体形变试验和莫尔-库伦极限条件·····	(149)
5.1.5 粒状土的强度性能 ·····	(154)
5.1.6 正常固结粘土的强度性能 ·····	(158)
5.1.7 超固结粘土的强度性能 ·····	(165)
5.1.8 非饱和的、胶结的和裂隙粘性土的强度性能 ···	(172)
5.2 主动土压力和被动土压力 ·····	(178)
5.2.1 库伦假说和最小安全度原理 ·····	(178)

5.2.2	无粘性土的主动土压力	(182)
5.2.3	土具有摩擦力和内聚力时的主动土压力	(186)
5.2.4	无粘性土的被动土压力	(192)
5.2.5	粘性土的被动土压力	(198)
5.2.6	土压力的分布	(200)
5.3	土坡稳定	(212)
5.3.1	平面滑动面	(212)
5.3.2	均匀土中的滑裂圆	(219)
5.3.3	贯穿两个土层的滑裂圆	(228)
5.3.4	任意土层中的滑裂圆	(235)
5.3.5	其它的破坏机理	(241)
5.4	地基承载力	(248)
5.4.1	土没有重量和摩擦力或者没有内聚力时的承载力	(248)
5.4.2	用于初步设计的近似公式	(255)
5.4.3	复杂条件下的地基破坏分析	(260)

6. 使用状态下的应力和形变

6.1	材料性能	(267)
6.1.1	砂土的性能	(267)
6.1.2	饱和粘土的性能	(270)
6.2	力-位移问题	(272)
6.2.1	粒状土中的位移	(272)

6.2.2 粘性土中的位移	(276)
6.3 应力分布	(281)
6.3.1 粒状土中的应力分布	(281)
6.3.2 粘性土中的应力分布	(286)
6.4 邻近建筑物的相互作用	(288)
6.4.1 粒状土中的相互作用	(288)
6.4.2 粘性土中的相互作用	(289)
7. 附录	(292)
7.1 习题解答	(292)
7.2 参考文献	(368)
7.3 名词对照表	(377)
7.4 符号表	(392)

1. 引 论

1.1 内容概要

土力学是探讨土的运动和力的科学。它作为土木工程的一门辅助学科而建立起来，因而集中于研究建筑物在施工和使用期间所发生的过程。土力学的发展和任何经验科学一样，起源于观测、试验和直观。基础工程的经验规则在古代已经具备；关于一定的土在某种荷载作用下可能产生的运动，所作的评述大多只是定性的。随着工业时代的开始，带来了建筑事业的繁荣。人们越来越需要对于土的力学特性作出定量解释。

有关土体运动和作用力的第一个数学理论是由库伦(1773年)提出的。两百多年来，该理论在挡土墙的设计中证明是实用而可靠的。差不多被人们遗忘的是柯林(Collin, 1846年)有关土坡失稳的重要论文(见第5.3.2节)。朗金(Rankine, 1856年)的有关粒状土中的应力理论奠定了挡土墙上土压力分布的基础(见第5.2.6节)。布西奈斯克(1885年)有关线性弹性理论的公式，至今还用于计算土体中的应力(见第4.2.2节)。

直到本世纪初叶，土力学获得长足的进展。为了解决地基破坏和土坡坍塌等课题，在瑞典提出了所谓的滑裂圆法；由Hultin(1916年)和Fellenius(1926年)提出的理论到今天还在继续使用(见第5.3.2和5.3.4节)。太沙基(1925年)提供了第一本内容广博的教科书。其中用于计算沉降的方法多次证明是有效的(见第四章)。太沙基阐明了各种建筑课题中的土工试验和力

学计算之间的关系。因此，他被认为是一门独立学科——土力学的奠基人。

最近数十年土力学得到了迅速发展，提出了大量的论文成果。从事实际工作的土木工程师在大量技术文献面前几乎应接不暇，而且土力学家也越来越倾向于专业化。对于某一特定的土力学课题往往有许多解决方法可供选择，但是对其可行性和可靠性不易理解。因而担任规划和设计的土木工程师不禁要问：自己应从土力学中学些什么，自己对土力学家相信些什么？

基于下述三个原因，土力学的预估从来就不是没有缺点的：

- * 在一些情况下土的构造和组成大多是未知的。耗费昂贵的地基勘测只能为若干点的情况提供解释，人们只能借助于估计而完成一幅完整的图画。

- * 在采取土样和试验时，不能完全避免扰动和不均匀性。

- * 在力学计算中包含着简化的、在数学上往往不易完全理解的假设。

这些误差来源常常不能明确地划分。正是由于这一点，使人们可以解释预估和观测之间的偏差。

按照 Popper (1976 年) 的意见，在本书中注意到所提出的理论具有可检验性，在逻辑上结论是可以重复实现的，而在任何时刻，通过多次的观测使假说都得到证实。不言而喻，任何理论都不具有永恒的持久性：一再被迫对新的试验成果作出改进。何况迄今为止土力学的假说还没有组成为公理体系。

本书的内容轮廓是根据规划工程师和设计工程师的需要而安排的。此外，有时也作出一些说明。本书还从专业文献中为那些已经对土力学产生兴趣的读者列举最重要的内容：

- * 用已经为科学的特殊试验所证实的结论来表示材料定律，把标准试验当作获得土性质指标的手段，但并没有列举详尽的操作

作指南。

* 引入渗流力作为地下水运动所产生的力(见第 3.1.1 节)。

* 强调了侧压力对于土的压缩性的影响(第 4.1.4 和 第 6.1 节)。

* 各种图解法(其中有 Newmark 图解法和 Culmann 图解法)已略去。因为采用小型计算器来解题,图解法就显得过时而陈旧了。

* 对于粘性土的抗剪强度(第 5.1.6 和 5.1.7 节)只讨论其初始和最终极限状态,在本书中未出现孔隙水压力系数。

* 一律用部分安全系数来处理 Fellenius(1926 年)和 Brinch-Hansen(1960 年)的建议。

* 在粘土的次固结(第 4.4.3 节)和抗剪强度(第 5.1.6 节)中考虑了粘滞性。

* 根据相似理论的公式来说明建筑物在粒状土中的位移(第 6.2.1 节)。

1.2 表示方法和工作说明

内容的环节尽可能不用跳跃式的和超前的表述方式。因为其它科学——尤其是地质学,也涉及到土,所以在这一章中很多内容常常只是简略提到或者只是暗指一下。

相比之下,在第三、第四和第五章中有关地下水渗流、压缩和极限状态则是相当完整和一致的。每次总是先讨论土体单元的运动和受力状态,然后再讨论土体。第六章是不太完备的,只是对有关应力形变问题提供一些简单而又经过检验的求解方法。

对于第一次加以说明的重要概念用黑体字加以强调。有关名词术语则列在附录(第 7.3 节)中,另外附上德文、英文和法文

译名。名词符号以统一的常用语言为标准。对于一些定义，尤其是有关渗透性、压缩性和抗剪强度的概念，则用文献中常见的方式来叙述。在有关文献中经常把运动看成为力作用的结果，偶尔也有倒过来的情况；对于土的特性，则看成两者是不可分割的，并且是相互联系的，而没有把两者中的一个作为原因来叙述。

可以定量的名词符号则与国际上通用的符号相对应。它们列于附录（第 7.4 节）中。一些量的特殊值则用脚标来区分，其含义可以从课文或图中找到。图中的符号也力求统一，符号上面的一横表示相应的加权平均值；例如 $\bar{c}$ 是内聚力 c 的加权平均值。符号 $:=$ 表示赋值号；例如 $\gamma' := \gamma_r - \gamma_w$ 表示差值 $\gamma_r - \gamma_w$ 从今以后用 γ' 表示。符号上面的一点表示对于时间的导数；例如 $\dot{\varepsilon} := d\varepsilon/dt$ 。向量——例如力或速度，没有方向脚标，因为它的方向已经规定或另外标明。

在每章末尾差不多都列有习题，其答案在附录（第 7.1 节）中可以找到。解答的表示方式尽可能紧凑。一般来说，公式和数值只出现一次。建议为重复使用的公式编制小小的计算程序，并且用有实际意义的值进行考核。

文献索引（附录 7.2）也是很紧凑的。除了教科书和历史上的重要文献以外，只列举有代表性的论文。在自学时，首先应当熟悉本书。为了进一步追根溯源，应当参阅联邦德国土工工程和基础工程公司的连载文件以及岩土工程摘要和索引。没有列举技术协会的标准、规范和建议。因为其适用性不但在法律上，而且在科学上都是有局限性的。

2. 土的构造和组成

本章描述土的几何形状和物理特征。在下面将依次探讨土颗粒、土和土体的性状。

本章将提供最重要的资料，以说明有关土颗粒的形状、大小、混合比和排列。

2.1 土颗粒

土是由固体的、液体的和气体的成份所组成的混合物。土颗粒构成土的固体成分。按照其形状，将土颗粒划分为粒状的（第 2.1.1 节）、片状的（第 2.1.2 节）及其它，杆状的或纤维状的颗粒则很少。液体成分，即所谓孔隙水，与固体成分有很密切的关系。气体成分，一般说就是孔隙气，人们只关心它与孔隙水的关系。在本节中，只讨论两个彼此很接近的颗粒，至于许多颗粒的相互排列，直到第 2.2.5 节才深入讨论，掺合物——亦即土颗粒表面的沉淀物质和溶解于孔隙水中的物质，在第 2.1.3 节中简单地作了介绍。

2.1.1 颗粒

土粒尺寸大致在 0.002mm 到 60mm 之间。它的形状和大小是由矿物类型和地质历史等因素决定的。最常见的矿物是石英，其次是长石和方解石（详见 Füchtbauer 和 Müller, 1970 年）。图 2.1 中列举了一些常见的颗粒：

- a1) 尖棱的石灰岩（碎片）；
- a2) 片状的花岗岩和片麻岩（河卵石）；
- a3) 矮胖的花岗岩和片麻岩（冰碛碎石）；

- b1) 圆浑的石英(河砂);
- b2) 尖棱的方解石(粉砂);
- b3) 矮胖的, 带石灰质藻类的石英(白垩砂);
- c1) 尖棱的方解石(黄土);
- c2) 矮胖的石英和方解石(粉砂);
- c3) 尖棱的方解石和白云石(粉砂)。

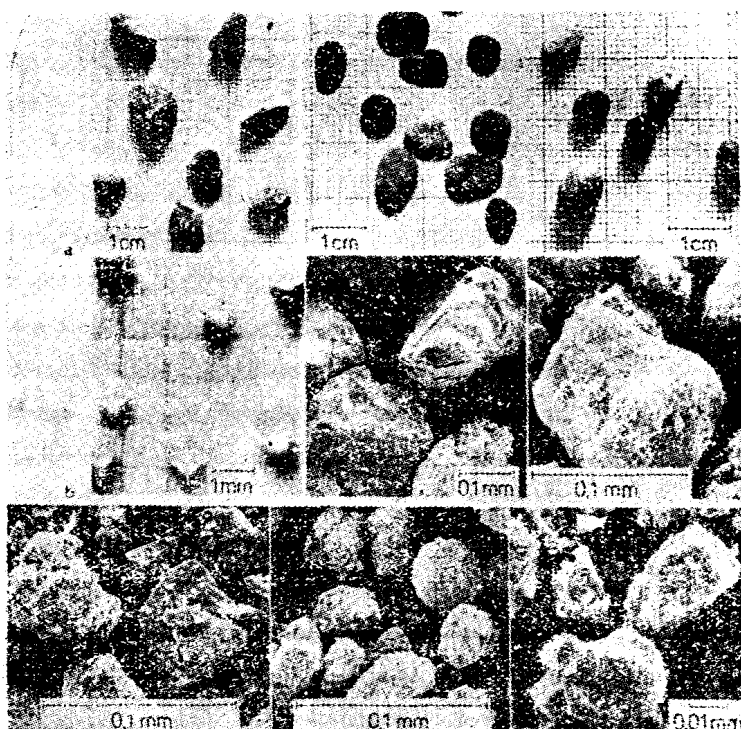


图 2.1 不同大小和形状的颗粒

土力学研究所涉及的土,按照颗粒大小进行分类即已足够(第2.2.1节)。颗粒形状和矿物种类也同样影响着土的力学性

质，然而大多数只是为了对试验结果进行定性的说明才考虑这些因素。以下简单介绍一下颗粒形状和矿物成分。

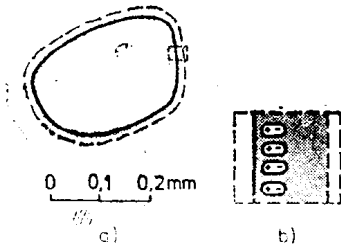


图 2.2 a) 石英颗粒的扩散层水膜和
b) 极化水分子

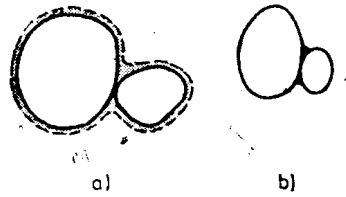


图 2.3 a) 相互接触的颗粒之间的孔隙水
b) 三角形孔隙中的胶结物



图 2.4 包以石灰质薄膜和有胶质接触的石英颗粒
(摄影: Paluska 博士)

孔隙水的一部分以**扩散层水膜**的形式包在颗粒的周围(图 2.2a)。矿物表面带负电荷,水分子的正极吸引在矿物的一边(见图 2.2b)。这种电吸引力随着距矿物颗粒表面距离增大而迅速降低。在一定距离以内,与温度相联系的布朗分子运动是非常剧烈

的，以致在单位时间内（假设物理平衡成立），被撞开的水粒等于被捕捉到的水粒。水膜并不受到严格的约束，因而这种相互依存物是扩散的。在扩散层水膜的外面是所谓的**自由孔隙水**。

对于一定的矿物成分和在一定的温度下，扩散层水膜究竟有多厚，人们尚未取得一致意见。总之，温度愈高以及液体的极性愈低，水膜就愈厚。可以设想，其厚度大致在 $0.1\mu\text{m}$ 的数量级（详见 Wegl 及 Ormsby, 1960 年）。在实际上出现的接触力作用下，在两个颗粒接触的地方，扩散层水膜差不多会全部被挤出（图 2.3a）。

对于那些既不干燥又不饱和的土，孔隙水就以封闭水膜的形式包住土颗粒（象图 2.3a 那样）。在土接触点周围的三角形孔隙中，这种水膜要厚一些。由于存在着表面张力，毛细管中的水处于负压作用下，这就是**毛细水**。毛细负压与表面张力成正比，而与表面的曲率半径成反比（详见 Bernatzik, 1947 年）。

随着时间的推移，原先溶解于水中的物质可能富集在三角形孔隙中，并产生固化，这就叫**胶结**（图 2.3b）。一般来说，这种胶结链是难溶于水的，它赋与土以一定的强度。图 2.4 表示用碳酸钙将两个相邻的石英颗粒粘结在一起（颗粒之间的胶结被破坏了）。在理论上和在试验室中很难弄清这种胶结作用（见第 5.1.8 节）。

2.1.2 片状颗粒

长石和其它的结晶矿物经过风化由岩石变成极微小的多角形·鳞片状的颗粒。在示意图 2.5a 中显示了两常见的矿物的形状和大小。人们通过电子显微摄影（图 2.5b 及 c）获得这方面的知识（详情主要参考 Beutelspacher 和 Van der Marel, 1968 年）。

这些鳞片在土中不会再细分。它们构成粘土或另一些土中的固体粘粒粒组（粘粒粒组的定义，将在第 2.2.1 节中讨论）。可

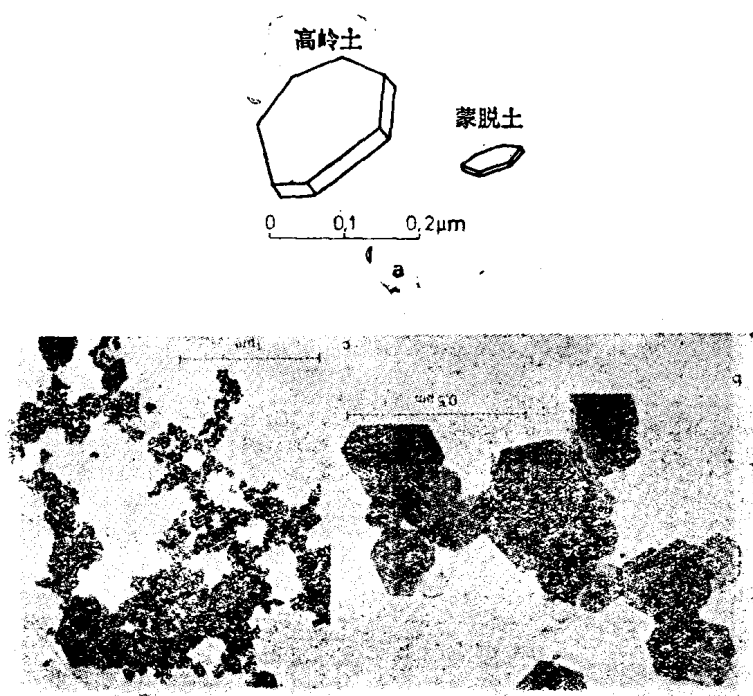


图 2.5 粘土片状颗粒: a) 示意图 b) 高岭土 c) 铝-蒙脱土
(b 和 c 由 Beutelspacher 和 Van der Marel 提供, 1968 年)

以用伦琴光谱仪清晰地揭示各种粘土矿物鳞片的原子层状结构 (详见 Grim, 1968 年)。

三种最常见的粘土矿物为**高岭土**、**伊里土**和**蒙脱土**。通过图 2.5, 人们对鳞片尺寸的变化谱 (幅度) 有一清晰理解。粘土颗粒是如此之小, 以致无法用一般的光学显微镜加以观测。

一般来说, 在石英颗粒周围所形成的这种扩散层水膜 (图 2.2b), 在自由悬浮的片状颗粒周围则比较厚一些。关于水膜厚度的解释是众说纷纭的。在地基中经常遇到的压力下, 人们一般认为水膜厚度的数量级在 0.01 到 $0.1\mu\text{m}$ 之间。因此, 在相同的