

〔日〕松岡元 著

土力学

罗汀 姚仰平 编译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

土力学

[日] 松岡元 著

罗 汀 姚仰平 编译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TU43

24871

图书在版编目 (CIP) 数据

土力学 / (日) 松岡元著; 罗汀, 姚仰平编译. —北京: 中国水利水电出版社, 2001. 3

ISBN 7-5084-0609-5

I. 土… II. ①松…②罗…③姚… III. 土力学-高等学校-教材
IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 12884 号

书 名	土力学
作、译 者	(日) 松岡元 著 罗汀 姚仰平 编译
出版、发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	水利电力出版社印刷厂
规 格	850×1168 毫米 32 开本 8 印张 215 千字
版 次	2001 年 5 月第一版 2001 年 5 月北京第一次印刷
印 数	0001—4100 册
定 价	25.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

日本学者松冈元 (H. Matsuoka) 教授是著名的土力学专家。他对于土力学中的诸多问题都有自己独特的看法和贡献, 特别是他从微观的角度进行试验来研究土的强度和应力应变特性、考察地基的承载力和边坡的稳定性等, 在多方面取得了大量的成果。由他潜心研究出来的 SMP (Spatially Mobilized Plane) 准则可以很好的表示三维应力条件下土的强度, 有着很明确的物理、力学意义, 在国际上享有盛誉。我所认识的松冈元教授是一位治学态度非常严谨、很有个性的学者。

松冈元教授在他 20 多年的科研成果和教学工作经验的基础上力著这本《土力学》教材。在本教材中不但系统地讲述了土力学的基本概念、基本理论和基本计算方法, 还包含了很多他对土力学基本问题的独特见解, 教材中的许多照片和插图就是他在教学和科研中积累下来的宝贵资料, 这些对于读者形象地理解书中的内容是非常有益的。松冈元教授编著的《土力学》不受各种规范、规程的约束, 只介绍最基本的内容, 深入浅出, 语言生动形象, 是当前本学科中一本值得一读的好书。松冈元教授的编著风格与国内现使用教材的风格不同, 看后让人耳目一新, 因此, 我向国内同行推荐这本教材。

本教材的译者罗汀和姚仰平老师均具有多年的土力学教学和科研经验, 他们也都在日本名古屋工业大学的

EAA12'06

松风研究室学习、工作过。经他们翻译的中译本保持了原版教材的基本风貌，会使读者得到益处。

中国科学院院士 沈珠江

2001年4月于北京

编译者引言

自从土力学的奠基人太沙基（美国）教授发表了第一部土力学专著至今的 70 多年间，在全世界范围内已对土力学中各种基本问题进行了非常广泛的试验和理论研究，取得了大量的研究成果，极大地丰富和发展了土力学的基本理论，推动了与土力学相关的工程实践。同时，世界各国也相继出版了许多各具特色的土力学专著。各著者因其科研工作的经历和背景不同，对于土力学中一些基本问题研究的侧重点不同，使得所编著的土力学书风格各异，形成了各自的特点。对于广大读者来讲，学习不同学者所著的土力学，对于从更广的角度去掌握和理解土力学的基本内容是非常必要的。

松冈元（日本）教授是著名的土的三维破坏准则——SMP（Spatially Mobilized Plane）准则的发明人，对于土力学中的诸多问题都有自己独特的看法和贡献。特别是他在从微观的角度进行试验，研究土的强度和应力应变特性、考察地基承载力和边坡稳定等方面均取得了大量的公认成果。

松冈元教授在他 20 多年的科研成果和教学工作经验的基础上推出了这本土力学教材。在本教材中不但系统地讲述了土力学的基本概念、基本理论和基本计算方法，还包含了很多他对土力学基本问题的独特见解，教材中的许多照片和插图就是他在教学和科研中积累下来

的宝贵资料，这些对于读者形象地理解书中的内容是非常有益的。

译者认为，松冈元教授编著的这本《土力学》很有特色，从最基本的内容开始，深入浅出，语言生动形象，寓意深刻，并且还包含了许多令人耳目一新的照片和插图，是当前本学科中一本非常好的教材。松冈元教授也非常愿意把本书翻译成中文并介绍给中国的同行读者。由于编译者水平有限，在编译中肯定还存在着许多不妥的地方，欢迎广大读者提出宝贵的意见。

罗汀 姚仰平

2001年4月

前 言

著者在学生时代学习了许多专业课程，觉得土力学是最难学懂的，因此为了探求土这种离奇物质的特性专攻了土力学。现在看来这个选择是正确的。所以至今我仍衷心地感谢那些曾经与我交谈过，最终使我喜欢、并且从事了这项工作的许多大学生、研究生和同事们。然而，写教科书与写科研论文不同，还需要些其他方面的能力，开始我总认为自己不能胜任这个工作。在已经有了那么多土力学教科书的今天，为什么还要继续写呢，我常常为此困扰着。教科书不是他人和自己最新研究成果的简单罗列，而应该是把已经成熟的成果加以系统地归纳和总结。但因著者的能力和知识有限，所做的归纳和总结也不一定能很尽人意。

虽然这么讲，但想到自己已经在教坛上教授土力学 20 余年，总该写点什么吧。可是如果仅简单地把所教的内容罗列下来大概是写不出好教材的。值得庆幸的是著者与研究室的学生们一起做了许多试验，积累了许多很有价值的照片，而从现行的诸多教科书中很难看到类似的资料，在各章中适当地编入一些照片，也许是本书的特色之一。此外，在书中还插入了很多插图，以尽可能地帮助读者直观理解，而不是死记硬背，并使读者在理解后自然地掌握书中的内容，因为著者本人也是不愿意死记硬背的。所以，假如在学习其他的教科书时仍然有不理解的地方，建议不妨比较性地看一下本书，假如能与著者和拍，也许会容易理解书中的一些难点，这也是著者所希望的。

土，不论是砂土还是粘土，都是离散状土颗粒的集合体。对于粘土，看起来好象在土颗粒之间存在着粘聚力，可是如果将其放入盛有水的桶里，会发现粘土不久就成为颗粒状沉入桶底。所以与铁和混凝土相比，土也许可以看成是一种一开始就被破坏了

的、离散的、仅仅依靠土颗粒间的摩擦力才产生抵抗力的材料。即便是同样的土，因地表面和深层处土颗粒所受的作用力不同（地基中的土所受的自重应力随着深度的增加而增加），土的抵抗力（摩擦力，强度）也不同。地表面的砂，风一吹就可以飞起来，可是在地层深处的砂却可以承受桩的荷载。在土的孔隙中存在着水和空气，如果水压力增大，使土颗粒相互离散，土颗粒间的摩擦力消失，土的强度也就丧失了。土就是这样，具有人们直觉上所不可理解的一面，是一种既令人生畏又很有意思的材料。然而，即便是说法欠妥，我们还是把土看成是“不动的大地”。本书如果能对学习土力学的人有点帮助的话，著者会感到无比欣慰。

最后对在本书编写过程中给予帮助的各位表示感谢。京都大学名誉教授赤井浩一老师，是著者的土力学老师，并且提供了本书出版的机会，在此表示衷心感谢。京都大学已故名誉教授村山朔郎老师，是著者的恩师，他教给著者从微观的观点追寻事物根源的研究方法，用本书许多照片中出现的铝棒研究土的特性。著者年轻时代，曾得到了当时在京都大学研究室的京都大学名誉教授柴田彻老师、爱媛大学教授八木则男老师、神户大学教授轻部大藏老师、京都大学教授足立纪尚老师等的帮助。在长年的教学中使用了东京工业大学已故名誉教授山口柏树老师的教科书，受益匪浅。此外东京大学名誉教授石原研而老师、シソオジャイロ公司的安川郁夫老师、鸟取大学的夏明洁老师、东京电机大学的安田进老师、京都大学的岗二三生老师、广岛大学的森胁武夫老师等，均在本书的编写过程中给予了许多帮助。同级生东京工业大学的太田秀树老师从学生时代起就同著者进行了很多启发式的讨论。东昭エンジニアリング公司的山口启三郎先生（工学博士，一级建筑师），在关于土力学与建筑物基础间的关系方面也给了著者很多启发。关于粘土矿物成分方面，得到了名古屋工业大学宇野泰章老师的帮助。另外还要感谢经常进行讨论和给予帮助的岐阜工业高等专科学校的吉村优治老师、名古屋工业大学的中井照夫老师、前田健一老师、孙德安老师、姚仰平老师、罗汀老师、刘

斯宏博士，以及帮助打印本书的佐藤智范技官等研究室的各位人员。还有，感谢在试验和摄影中给予帮助的许多毕业生，特别是阪上最一、竹田一夫、平尾淳一、杉藤哲也、杉本亨、藤井俊逸、山崎浩之、松原义仁、成赖哲哉、杉山要一郎、大桥彻也等各位。最后，感谢在本书的出版中给予了许多帮助的森北出版社的菅原义一、森岐满、水垣伟三夫等各位先生。

松冈元

1999 年 7 月

内 容 提 要

日本学者松冈元 (H. Matsuoka) 教授是国际上著名的土力学方面的专家, 特别是他潜心研究出来的 SMP (Spatially Mobilized Plane) 准则可以很好地表示三维应力条件下土的强度特性, 在国际上享有盛誉。松冈元教授根据自己 20 余年的执教经验, 精心编写了《土力学》这本教材。教材中对土力学的基本知识做了系统地归纳和总结, 用通俗易懂的语言深入浅出地讲述了土力学的基本概念、~~基本原理和计算方法~~。主要包括土及其基本性质; 土中的水及其流动, 弹性地基中的应力和变形, 土的固结; 土的剪切; 土压力; 地基承载力; 边坡稳定等八章内容。

本书写作角度很新颖, 从人们日常接触的土及土力学现象入手, 使土力学这门抽象、枯燥的学科变得生动、易懂。书中用铝棒模拟土力学现象的试验方法, 也很形象。与其他版本的《土力学》教材相比, 本书很具特色, 适合作土力学教材。

本书可作为水利水电工程建筑专业、土木工程专业科技人员的技术参考书, 也可作为高等院校相关专业的教材及参考书。

目 录

序

编译者引言

前 言

第一章 土及其基本性质	1
1.1 概述	1
1.2 土的成分及其分类	4
1.3 土的基本物理指标	10
1.4 土的分类	16
1.5 土的压实特性	22
1.6 地基勘察	26
参考文献	28
第二章 土中的水及其流动	29
2.1 概述	29
2.2 达西定律	29
2.3 渗透系数	32
2.4 地下水的流动	35
2.5 具有浸润面的地下水的流动	46
2.6 水井的稳定渗流问题	49
2.7 流砂、管涌	51
2.8 非饱和土的性质	56
参考文献	62
第三章 弹性地基中的应力和变形	63
3.1 概述	63
3.2 各种荷载作用下弹性地基内的附加应力	65

3.3 基底的接触压力	80
3.4 地基的变形	83
参考文献	85
第四章 土的固结	87
4.1 概述	87
4.2 粘性土的固结特性	89
4.3 单向固结理论	95
4.4 固结试验	106
4.5 最终固结沉降量及固结沉降量随时间变化的预测	111
4.6 次固结	116
4.7 与固结相关的施工方法	118
参考文献	120
第五章 土的剪切.....	121
5.1 概述	121
5.2 土的抗剪强度	123
5.3 土的剪切试验	143
5.4 砂土和粘土的静剪切特性	155
5.5 砂土的动剪切特性	160
5.6 粘土的时间效应特性	167
5.7 原位直剪试验	170
参考文献	172
第六章 土压力——稳定分析 I	174
6.1 概述	174
6.2 主动土压力、被动土压力和静止土压力	174
6.3 朗肯土压力理论	178
6.4 库仑土压力理论	185
6.5 挡土墙的变形与土压力分布	189
6.6 现场施工实例	192
参考文献	196

第七章 地基承载力——稳定分析Ⅱ	197
7.1 概述	197
7.2 浅基础的承载力公式	199
7.3 承载力公式的适用范围	202
7.4 深基础的承载力公式	205
7.5 现场施工实例	208
参考文献	211
第八章 边坡稳定——稳定分析Ⅲ	212
8.1 概述	212
8.2 表层滑动的边坡稳定分析	213
8.3 基于条分法的边坡稳定分析	217
8.4 各种稳定分析问题和土的强度参数的选择	230
参考文献	235
附录 土的单轴抗压强度的意义	236
后记	243

第一章

土及其基本性质

1.1 概 述

如果有人问：“土是什么？”怎样回答呢？例如与铁和水相比，你是不是觉得挺难回答的。这是因为土（土质材料）有以下特征：

（1）土通常是由土颗粒、水和空气组成的三相混合体。只含有土颗粒和水而没有空气的土称为饱和土；只含有土颗粒和空气而没有水的土称为干燥土；由土颗粒、水和空气三者共同组成的土称为不饱和土。像土这样的多相混合体，不仅要考虑土体整体的性质和运动规律，还应考虑组成土体的各相的性质和运动规律。对于人类来讲，土是一种非常难以处理的材料。后面将要讲的“有效应力”（effective stress）的思考方法就是基于土是多相混合体而产生的一个重要概念。

（2）土的本质在于它是离散的颗粒的集合体。这样的集合体既不是气体，也不是液体，也不是固体（土颗粒本身是固体），而是称之为“粒状体”（granular material）的集合体。砂土就是这样粒状体的集合体，这很容易理解。那么粘土又该如何解释呢？图 1.1 是粘土在电子显微镜下的照片。由该照片可以看出，粘土也是微小的扁平状粒子的集合体。从而可知土与金属等材料相比具有很大的不同。从金属材料观点来看，可以认为土质材料最初就是已被破坏了的碎末。因此，通常会产生这样的疑问，这样的材料怎么能支撑得住构筑物呢？土体基本粒子间的粘聚力几乎不存在，只是依靠土颗粒间的摩擦力承受荷载，所以土的变形和破坏受着“摩擦法则”（frictional law）的支配。而且，粒状材料的颗粒之间在荷载作用下位置相互错动，随着剪切变形的增加还会产



图 1.1 粘土（高岭土含量高）在电子显微镜下的照片^[1]。

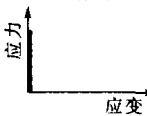
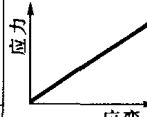
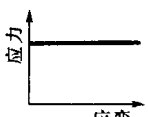
生体积变化，即发生“剪胀”（dilatancy）（参见图 5.7）。

（3）土是天然的产物，不是人类按照某种配方制造出来的。即使通过破碎岩石可以获取碎石，但岩石本身也是天然的，所以在这方面土与钢铁、混凝土是完全不同的。

综合以上特征，可以认为土是一种难以理解、非常复杂的材料。并且不论是砂土还是粘土都是离散的土颗粒的集合体，土颗粒间的粘聚力从本质上讲几乎不存在，只是土颗粒间的摩擦力起作用来承受荷载，这是土的本质中最为重要的一点。所以土会由于土粒间孔隙水压力的作用使土颗粒相互分离，在水中如果土颗粒呈悬浮状态则会像水一样地流动。例如，由于地震作用使土中孔隙水压力上升，土颗粒呈悬浮状态的现象称为“地震液化”（liq-

uefaction) 现象。所以土是一种既令人生畏而又很有意思的材料。在美国国家航空航天管理局(NASA)乘宇宙飞船飞往月球的研究者中,也有以土这种与人类生活密切相关、具有很多特性、又难以用公式表达其规律、甚至有点离奇的材料为研究对象的研究人员。

表 1.1 本书各章中对土性的假定

章节		第二章	第三章	第四章	第六~八章
土	土颗粒骨架	刚体 	弹性体 	弹性体 	刚塑性体 
	孔隙水	粘性流体		粘性流体	
基本方程		拉普拉斯方程 $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$	弹性理论	热传导方程 $\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$	滑移线理论

土力学很难学懂的另一点是,针对不同的研究内容对土的应力应变特性作了不同的假定。如果不能认识到这一点,就会觉得学习土力学时,考虑得越深头脑就越混乱。表 1.1 是著者在研究生期间与同级生探讨的一些问题及看法^[2]。在本书第二章“土中的水及其流动”中,在考虑土的渗透性时,把土分为土骨架和孔隙水两部分,并且把土骨架看成是刚体(不变形的材料),把孔隙水看成是具有粘滞性的流体。在第三章“弹性地基中的应力和变形”中,把土体整体看成是弹性体(像弹簧一样,应力与应变成比例)。在第四章“土的固结”中,把土的骨架看成是弹性体,把孔隙水看成是具有粘滞性的流体。在第六章“土压力”、第七章“地基承载力”和第八章“边坡稳定”中,均把土体整体作为刚塑性体(达到某应力值时产生破坏,变形不能恢复)。像这样随着章节的不同,对土的应力应变特性的假定也不一样,这是很麻烦的。聪明的读者一定会问:“那么土