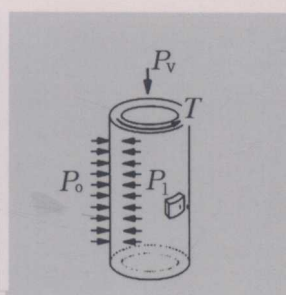
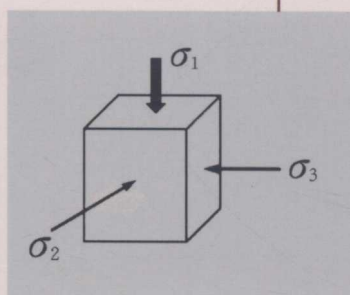
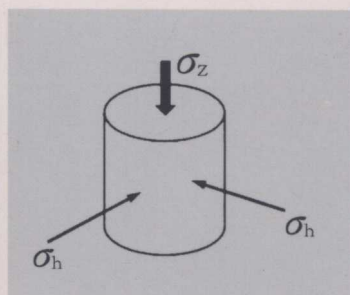
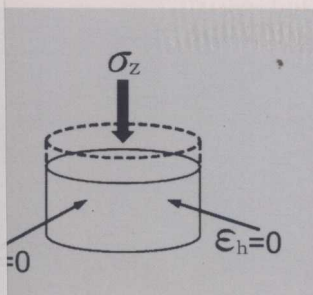


Experimental Soil Mechanics

试验土力学

【法】 Jean BIAREZ Pierre-Yves HICHER

尹振宇 姚仰平 译著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

主要内容

Experimental Soil Mechanics

试验土力学

【法】 Jean BIAREZ Pierre-Yves HICHER

尹振宇 姚仰平 译著

TU41
14同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

北航

C1721108

内 容 提 要

本书以大量的饱和砂土和黏土的重塑土样室内试验为基础,从土体作为颗粒材料集合体的特性出发,阐述了应力应变连续性假定的合理性;系统地总结了土体力学特性中的几个基本问题:恒应力比压缩特性、固结压缩特性、正常固结土的剪切特性、超固结土的剪切特性、几个重要参数指标的分类及其相关性、三维强度的中主应力效应、各向异性、循环动力特性、小应变刚度特性、流变特性等。本书精选简明易懂的试验成果和规律总结,以期读者能够在较短时间内具备运用试验方法分析问题和解决问题的能力。

本书可作为高等院校和科研院所的土木、水利、交通、铁道、工程地质等专业的研究生教材或高年级本科生的选修课教材,也可作为上述相关专业科研、工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

试验土力学 / (法) 比亚尔赫 (Biarez, J.), (法) 伊谢尔 (Hicher, P-Y.) 原著; 尹振宇, 姚仰平编译.

—上海: 同济大学出版社, 2014. 3

ISBN 978-7-5608-5402-1

I. ①试… II. ①比… ②伊… ③尹… ④姚…

III. ①土工试验—高等学校—教材 IV. ①TU41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 002824 号

试验土力学

【法】 Jean BIAREZ Pierre-Yves HICHER 尹振宇 姚仰平 译著

责任编辑 季 慧 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 8

字 数 200 000

版 次 2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-5402-1

定 价 29.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

序 一

It is my great pleasure to introduce this book written in 1989 with Jean BIAREZ to the Chinese-speaking scientific community thanks to the joint efforts of Professors Zhenyu YIN and Yangping YAO.

Jean BIAREZ directed my Ph. D. thesis and our close collaboration lasted until his death in 2006. The impetus for this book came from his desire to produce a synthesis of the research work he had directed first at the University of Grenoble and then at the Ecole Centrale in Paris. His aim was to provide a comprehensive approach for studying some typical behavior of soils considered as discretely structured granular materials. The parameters controlling typical soil behaviors were to be related to the micro-structural characteristics of the soils according to their formation and deposition modes. This idea prompted us to do a thorough analysis of how to link the representative parameters of an equivalent continuous medium to the representative parameters of a discontinuous medium. My own research at that time was focused on constitutive modeling of soil behavior and it was apparent to me that a new book on this subject would be helpful to students and researchers.

Writing the book with Jean BIAREZ was a greatly satisfying and enriching experience. We were fortunate to be joined by Professor David Naylor a few years later for its translation into English. *Elementary Mechanics of Soil Behaviour* published by Balkema Press appeared in 1994 and despite its out-of-print status for many years now, it is still this title which colleagues at international conferences most readily connect with my work.

Therefore the translation into Chinese is a significant step and represents a turning point in the destiny of this book, which this time I am in no position to control. To my regret, I am unable to read the book myself but Zhenyu YIN and Yangping YAO are both personal friends who have my full esteem and trust. Both are illustrious members of the soil mechanics community and each in his own way has made significant contribution to the field.

My acquaintance with Zhenyu YIN goes back to 2002 when he came to the Ecole Centrale in Nantes, France, for a Master degree. Later I directed his Ph. D. thesis on viscoplastic modeling of clay. He has since developed modeling approaches of natural clayey materials, combining the characteristics proper to these materials such as structural anisotropy and the existence of internal cohesion. The role of inherent and/or induced anisotropy is the subject of one of the chapters in this book, whereas the effect of structuration is often treated from observed deviations in the behavior of natural materials vis-à-vis the standard behaviors of remolded materials as presented in the book.

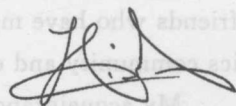
My collaboration with Zhenyu Yin has never ceased even after his return to China to become Professor at the Shanghai Jiao Tong University. We have worked on different topics including multi-scale modeling of mechanical behavior of soils. The spirit of this multi-scale ap-

proach guided the work of Jean Biarez and this spirit can be felt throughout the book.

My acquaintance with Professor Yanping YAO goes back to the summer of 2009 when I came to the campus of Beihang University for a workshop organized with the intergroup of the Ecoles Centrales. Our discussion centered immediately on our common interest of constitutive modeling of the mechanical behavior of soils. Even though Professor Yao was already an eminent scientist in the field, due to his research training in Japan, he surprised me by displaying enthusiastic interest in this little book, which my wife happened to show to him. The following year, Professor Yao was invited to Ecole Centrale in Nantes and I was invited to the University of Beihang in 2011. On all these occasions we have evoked the possibility of translating the book into Chinese, notably as a teaching manual for Master students. Finally it was Professor Zhenyu Yin with the indispensable aid of his graduate students who completed the project of the present translation. I hereby express my deep gratitude to each contributor.

Given my longstanding involvement with China, this book is precious to me because I hope to leave something of my work to students in soil mechanics. I have benefitted from great spells of hospitality at many universities in China, in particular the Tongji University in Shanghai. I am proud to have contributed to establishing the double Ph.D degrees program between the Universities of Tongji and Jiaotong in Shanghai and the Ecole Centrale in Nantes, as well as the double Engineering Degrees between Tongji and our school in Nantes. With the CSC program, doctoral students have come to study in Nantes for three years and to obtain their PhDs after which they pursue scientific careers in China and in the world.

My hope is that this book will reinforce a scientific collaboration between France and China, and develop a new school of thought from our respective scientific traditions. I hope that Jean BIAREZ's approach to soil mechanics which has continued to inspire me and so many of his students in and outside of France will now have a chance to inspire a new generation of students in China.



Pierre-Yves HICHER
Nantes, October 2013

序 二

法国著名土力学专家 Jean BIAREZ 教授和 Pierre-Yves HICHER 教授毕生致力于土的本构关系及岩土工程应用方面的研究。我虽无缘与 BIAREZ 教授相识,但有幸结识 HICHER 教授。最初与 HICHER 教授接触是在 2010 年 GeoShanghai 国际会议上。两年后在清华大学召开的土的本构关系国际会议上,再次与 HICHER 教授相聚,更增进了对他的了解。HICHER 教授作为国际著名的岩土力学专家,长期从事土的基本特性与本构关系的研究,尤其从微观角度对土的基本力学特性有非常深刻的认识,相关成果为国际同行关注,他现担任多个国际学会的重要职务,并任美国土木工程师协会工程力学期刊副主编,还为我国培养了多位岩土工程领域的青年专家。

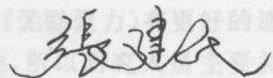
对于岩土力学与岩土工程来说,试验研究及规律总结至关重要。由于仪器或操作等多种原因,许多试验结果都存在着可信度问题。HICHER 教授非常重视试验研究和试验成果的可靠性。正因为此,他的专著 *Elementary Mechanics of Soil Behaviour-Saturated Remoulded Soils* 在国外读者甚多,并被广为引用。从内容上讲,此书汇集了作者在土的室内试验和土的基本特性研究方面的原创性成果,并且从非常直接、直观的试验现象出发,让读者快速、准确地建立起饱和土力学本构特性的概念,解决了同类著述在描述方式上抽象、难懂的缺憾。

本书译著者尹振宇和姚仰平教授是土的本构关系研究方面的有为专家。尹振宇教授是我国在土的基本理论方面功力颇深的青年学者,他从硕士到博士阶段起便跟随 HICHER 教授,在欧洲尤其是法国工作学习十多年。在土力学与岩土工程领域的国际顶级期刊上发表了许多高水平学术论文,并且积极参与学术交流,在国内外均有一定的知名度,2010 年回国后,一直潜心于土的基本特性和本构关系方面的研究,为我国岩土工程领域的后起之秀。姚仰平教授是我的挚友,长期从事土力学与岩土工程的研究,提出了统一硬化系列模型、变换应力空间方法等有特色的土的本构关系与强度理论,是目前我国土的本构关系研究的代表人物之一。他与 HICHER 教授长期保持交流与合作。他们在原著的基础上,又增加了近些年科研成果的综合及分析,使得此译著既保持了原著的风貌,又融合了他们的分析和认知。

本书概念清晰、试验精细,成果深具基础性、系统性和创新性,因此特向同行推荐之。

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会 理事长

2013 年 12 月于北京清华园



前言

2010年初,我们有幸共同在法国南特中央理工大学 HICHER 教授研究团队工作,在探讨科研之余,也讲到了土力学基础教学和研究过程中的一些疑惑。HICHER 教授向我们介绍了他的一些心得并推荐了他与其导师共同撰写的英文专著 *Elementary Mechanics of Soil Behaviour-Saturated Remoulded Soils*,使我们深受启发,并当即决定将此书翻译成中文,与国人共享。然而由于各自忙于工作,直至今日才完成夙愿。

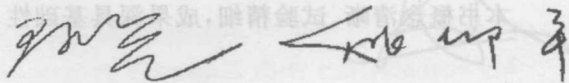
本书是原作者三十余年的土力学科研实践的结晶,主要以较为简单、基础的饱和重塑土室内试验为基础,从土体作为颗粒材料的特性出发,阐述应力应变连续性假定的合理性,系统地总结了土的力学特性中的几个基本问题,如压缩特性、剪切特性、小应变刚度特性、中主应力的影响、各向异性、循环动力特性以及几个重要参数指标的分类及它们之间的相关性等。为了达到让读者零起点入门、快速掌握从试验结果分析总结土力学本构关系的技能,原作者精选了简明易懂的试验内容和规律总结,以期读者能够在较短时间内具备运用试验方法分析和解决问题的能力。

本书的中文译本在原著内容的基础上,结合了近些年科研成果的综合及分析,增加了软土流变特性的阐述。另外,我们对原著的图表重新进行整理,可供读者分析或训练之用,以期对读者有所帮助。

本书的部分成果和出版得到了国家自然科学基金项目(41240024, 41372285)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110073120012)和上海交通大学国际科研合作种子专项基金项目(2012-1.5.3.1)资助,在此表示衷心的感谢。

感谢上海交通大学研究生金银富、夏云龙、李艳玲、吴则祥、卢阳明、朱启银、刘映晶、张浩、萧潇等在本书编排、整理和校阅过程中所付出的辛勤劳动,特别感谢金银富同学为本书的统稿所做的工作;也感谢北京航空航天大学研究生刘林和胡晶在编辑、校对中的工作。

鉴于我们英语和专业水平的限制,书中难免有纰漏之处,望读者和同行批评指正。



尹振宇 姚仰平

2013年12月

原著前言

一本优秀的专著应该能简单地反映本领域最新的研究进展。否则,这将会浪费工程师们宝贵的时间。因而撰写一本好的专著,需要作者每年都仔细研究成百上千的文献,并对它们进行归纳总结,最终形成系统的知识体系。此外,本书也要尝试探索所撰写的内容是否适合于培养研究生。

书中的部分结果摘自巴黎中央理工大学 C. ZERVOYANNIS 的博士论文。此外,国家文档教育中心的 F. VERGNE 在教育性和技术性上为本书的出版提供了很大帮助。

图表与文字之间的关联性,需要我们在增加文章的可读性和语言表达的严密性方面不断地去完善。同时,我们的设备和画图软件间的结合使文档更新变得越来越容易(软件里都具备标准的版式来加快文档的检查)。然而,我们尚需要研究并不断改进和拓展这种方法,进而提高与相关部门的合作效率。

在这种背景下,本书的研究主要为了展示土力学实践中碰到的土体的基本特性及准则。本项目工作量庞大且困难重重,这就要求我们必须和其他伙伴紧密协作。1989 年,欧洲组织 ERASMUS 提供机会使得我们和全欧洲的同行探讨我们的工作。在此,我们十分感谢 The Gembloux 大学的 VERBRUGGE 教授和葡萄牙里斯本大学的 Antonio 教授。最后,通过 ERASMUS,我们和希腊大学的 CHRISTOULAS 教授取得了联系。到 1990 年止,共有 14 个大学决定参与我们的这个项目。

在将近四分之一世纪里,得益于连续介质力学和有限元方法方面的研究,土力学的研究得到了长足的发展。很遗憾的是,工程界却从中获益不多。为此,本书加入了试验结果的研究,旨在尽量帮助年轻的工程师获得更加专业的技能。

我们尽可能地按逻辑顺序来重新整理试验数据,以便增强本书的可读性。此外,也可以在培养研究生过程中提高他们的讨论能力,并且促进我们与相关组织的联系和交流。

本书中引用了一些学者的试验数据,并绘制了相应的图表。由于篇幅的限制,本书只列出部分参考文献。

本书研究内容主要关注重塑土,我们可以在研究重塑土的情况下引入相关特性框架来进行探讨。我们将通过对砂土和黏土的类比来说明这些框架可以同时应用于这两种材料。

这并不改变土被分为黏性土和非黏性土的传统分类法。粗颗粒土(无黏聚力)有更好的透水性,因此更加关注其排水特性,而细粒土(有黏聚力)由于透水性较差,所以研究人员主要关注其不排水特性。

大量的失败经验告诉我们,要获得未受扰动的土样不仅经济上不可行,而且技术上也不现实。对于取样器来说,砾石、卵石和巨砾颗粒太大;但是对于有裂隙的土体来说,取样器又太小,因为取样器中的土样不能完整地描述裂隙土的实际状态。而动力测试数据(可以提供相关的非线性弹性数据)的科学解释可以提高我们对原位土性质的认识。同时,我们的计算方法可以用来说明如何通过工程界的测试方法(旁压仪,贯入仪)来提供适用于本构模型所需要的参数。

因此,本书能够为将来更深入地认识原状土提供基础,以便把最近 20 年内获得的科学成

果应用于实际问题。作者十分感谢 Edgar BARD, Afif RAHMA 和 Said TAIBI,他们在本书撰写的最后阶段提供了大量的帮助。最后我们还要感谢 David NAYLOR,他并不是一位纯粹的翻译人员,他通过广泛的专业知识的讨论把此书涉及的主要概念表述得更易于被英语国家的读者所接受。

Jean BIAREZ & Pierre-Yves HICHER

符号定义

γ_d	干重度
γ_s	土颗粒重度
γ_w	水的重度
δ	由于外部应力造成的内部颗粒倾斜
ε	应变张量
$d\varepsilon$	应变增量张量
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	大主应变, 中主应变, 小主应变
γ	剪切应变
$\varepsilon_v^p, \varepsilon_v^e$	塑性、弹性体积应变
$\varepsilon_s^p, \varepsilon_s^e$	塑性、弹性偏应变
η, η'	应力比 q/p'
η'_i	破坏时的应力比 q/p'
$\eta'_{\max}$	均质应变下的最大应力比 q/p'
η'_{peak}	在应力-应变曲线峰值处的应力比 q/p'
θ	固体面上的液-液或者液-气接触面的角度
κ	超固结各向同性压缩线的斜率 ($\ln p'-v$ 或 $\ln p'-e$ 坐标系下, $\kappa' = C_s/2.3$)
κ_p	恒定平均应力 p' 下偏压缩直线的斜率 ($\ln(1+\eta'^2/M'^2)-e$ 坐标系下)
λ	正常固结压缩曲线的斜率 ($\ln p'-v$ 或 $\ln p'-e$ 坐标系下, $\lambda = C_c/2.3$)
ν, ν_g, ν_u	材料的泊松比
σ, σ'	总应力张量, 有效应力张量
$d\sigma, d\sigma'$	总应力增量张量, 有效应力增量张量
σ_1, σ'_1	大主应力, 有效大主应力
σ_2, σ'_2	中主应力, 有效中主应力
σ_3, σ'_3	小主应力, 有效小主应力
I_1	第一应力不变量 $I_1 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$
I_2	第二应力不变量 $I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1$
I_3	第三应力不变量 $I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3$
J_2	第二偏应力不变量 $J_2 = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]/6$
b_σ	中主应力系数 $b_\sigma = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$
b_ε	中主应变系数 $b_\varepsilon = (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)/(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$
σ_n, τ	总应力的法向和切向分量
$\sigma'_n, \tau' = \tau$	有效应力的法向和切向分量
σ'_v	上覆土重力作用下的有效应力
ϕ'	饱和土体的有效摩擦角

ϕ_u	不排水摩擦角
ϕ_{ap}	表观峰值摩擦角
ϕ'_{peak} 或者 ϕ'_{max}	土体均质变形下的最大摩擦角
ϕ'_{cs}	临界状态下的摩擦角 $\phi'_{cs} = 3M/(6+M)$
ϕ'_f	破坏时的摩擦角
ϕ'_r	残余摩擦角
ψ 或者 ϕ'_u	颗粒间的摩擦角
A, B	孔隙水压力系数
c'	饱和土体的有效黏聚力
c_u	不排水抗剪强度
c_{ap}	总应力下的黏聚力
c_{cap}	毛细黏聚力
c'_{ce}	颗粒胶结产生的黏聚力
c'_{oc}	给定应力范围内的表观黏聚力
C_e, C_s	压缩指数, 回弹指数
c_d	恒定平均应力 p' 下偏压缩直线的斜率 ($\log(1+\eta^2/M^2)$ - e 坐标系下)
C_u	不均匀系数 ($=D_{60}/D_{10}$)
D_{10}, D_{60}	小于某尺寸所占总质量的 10%(60%) 时的粒径大小
e	孔隙比
e_{cs}	临界状态时的孔隙比
e_i, e_f	初始孔隙比, 最终孔隙比
e_{min}, e_{max}	最小孔隙比, 最大孔隙比
E_g	固体颗粒的杨氏模量
E_e 或者 E_{max}	弹性范围内的杨氏模量
E_{iso}	给定压力下的等向压缩模量
E_d	恒定压力下的偏应变模量
E_u	不排水模量
E_v	体积压缩模量
E_{oed}^{NC} 或 E_{oed}^{OC}	正常固结或者超固结应力路径下的切线模量
E_{TH}	双曲线准则的切线模量
E_{sec}	应变从 0 到 ϵ_1 的曲线 $q(\epsilon)$ 的割线模量
F	粒径小于 0.08mm 的颗粒百分比
G	剪切模量
I_p	塑性指数 ($=w_L-w_p$)
I_C	稠度指数 ($=(w_L-w)/I_p$)
I_L	液性指数 ($=(w-w_p)/I_p$)

I_D	相对密度($= (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$)	
I_G	组指数	
k	土的渗透系数	
k_w	水的渗透系数	
k_a	空气渗透系数	
K_0	静止侧压力系数($= \sigma'_h / \sigma'_v$)	
$K'^{\text{NC}}_0, K'^{\text{OC}}_0$	正常固结土静止侧压力系数 $K'^{\text{NC}}_0 = 1 - \sin \phi'$, 超固结土静止侧压力系数	
M	在 $q-p'$ 平面上临界状态线的斜率	
n	孔隙率	
NC, OC	正常固结, 超固结	
OCR	超固结比	(1)
P_a	大气压力	(1)
p	平均应力 $= (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$	(1)
p'	平均有效应力	(1)
p'_i	等向压缩有效应力	(4)
p'_{ic}	最大等向固结应力	(4)
σ'_c	最大竖向有效应力	(4)
p_0	剑桥模型中参考等向压缩应力	(5)
q	偏应力 $q = \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] / 2}$	(7)
R_c	无侧限抗压强度	(8)
S_r 或 S_w	饱和度	(8)
u_w, u_a	水压力, 空气压力 ($u = u_w - u_a$)	(8)
v	比容 $= 1 + e$	(10)
w	含水量	(12)
w_L, w_P	液限, 塑限	(12)
w_{SL}	缩限	(12)
w_{sat}	饱和土体的含水量	(13)
	沉降计算	(13)
	砂土的固结特性	(14)
	"可变形"圆柱	(15)
	第5章 正常固结土剪切特性	(16)
	5.1 正常固结土路径	(16)
	5.2 常规三轴排水路径	(16)
	5.3 三轴偏应力路径	(20)
	5.4 正常固结土的特征面	(22)
	5.5 体积恒定路径	(23)

目 录

序一	1
序二	2
前言	3
原著前言	4
符号定义	5
第 1 章 颗粒材料介质力学	(1)
1.1 基本力学方程	(1)
1.2 材料特性准则	(1)
1.3 颗粒边界条件	(1)
第 2 章 连续性假设	(4)
2.1 应力	(4)
2.2 应变	(4)
2.3 基于球状散粒体特性的连续介质本构关系计算	(5)
2.4 理想连续介质的特性	(7)
第 3 章 恒应力比压缩特性	(8)
3.1 各向同性压缩	(8)
3.2 各向异性压缩	(10)
第 4 章 固结压缩特性	(12)
4.1 正常固结压缩特性	(12)
4.2 超固结压缩特性	(12)
4.3 沉降计算	(13)
4.4 砂土的固结特性	(14)
4.5 “可变形”圆柱	(15)
第 5 章 正常固结土剪切特性	(16)
5.1 正常固结土路径	(16)
5.2 常规三轴排水路径	(16)
5.3 三轴偏应力路径	(20)
5.4 正常固结土的特征面	(22)
5.5 体积恒定路径	(23)

第 6 章 超固结土剪切特性	(26)
6.1 应力剪胀关系	(26)
6.2 拟弹性体积屈服面	(27)
6.3 最大强度包络线	(30)
6.4 临界状态	(32)
6.5 应变局部化	(34)
6.6 体积恒定路径	(39)
第 7 章 参数的分类及参数间的相关性	(43)
7.1 基于室内试验的参数分类	(43)
7.2 基于原位试验的参数分类	(47)
7.3 颗粒性质分析	(49)
7.4 颗粒排列分析	(50)
7.5 固结试验分析	(51)
7.6 三轴试验分析	(52)
第 8 章 三维特性-中主应力的影响	(61)
8.1 比例路径试验	(61)
8.2 应力应变关系	(61)
8.3 主应变的发展	(62)
8.4 三维强度	(65)
第 9 章 各向异性	(69)
9.1 几何各向异性	(69)
9.2 力学各向异性	(70)
9.3 真三轴试验现象	(72)
9.4 主应力轴固定的试验现象	(77)
9.5 主应力轴旋转的影响	(78)
第 10 章 循环动力特性	(81)
10.1 各向同性应力路径	(81)
10.2 三轴排水路径	(81)
10.3 主应力轴旋转的影响	(83)
10.4 不排水剪切路径	(84)
第 11 章 小应变刚度特性	(89)
11.1 割线模量	(89)
11.2 非线性弹性	(91)

11.3 双曲线法得到的模量	(91)
11.4 对比侧限压缩路径和三轴试验路径	(92)
11.5 超固结度的影响	(93)
第 12 章 流变特性	(96)
12.1 应变速率影响	(96)
12.2 蠕变规律	(98)
12.3 应力松弛现象	(103)
12.4 时效特性的相互关系	(104)
1.3 基本力学方程	(105)
参考文献	(105)

基本方程与力和质量相关, 相对恒定质量 m , 方程为 $F = m\Gamma$, 质量与重度相关, 单位重度 γ , 质量 ρ , 其中 ρ 是密度, g 为重力加速度。其他的方程都可由质量守恒以及能量守恒定律推导而来。

1.2 材料特性准则

1. 颗粒材料特性

通常在小应力或应变范围内, 假弹性本构关系(用弹性模量 E 和泊松比 ν 来描述)便足以描述颗粒材料的特性。然而, 在特定的问题上, 比如打桩时应力足够大导致的颗粒破碎等问题, 就需要一个更加复杂的材料本构模型来描述。

2. 颗粒间接触特性

在颗粒之间只有摩擦角 μ 一个参数来描述它们之间的接触特性。因此我们并不考虑颗粒间的胶结。因此, 本书只讨论重塑土的力学特性。

3. 矿物物质成分影响的特性

颗粒的矿物质成分决定土体的特性, 尤其对黏土的影响更为显著。黏土特性可用液限接近似表达。

1.3 颗粒边界条件

颗粒集合体由颗粒及其几何排列而成。在小应力或应变范围内, 这些颗粒及其排列只会发生很小程度的几何变化。当材料发生塑性变形时, 这些颗粒及其排列才会有较大的变化。

1. 颗粒几何

颗粒几何可以简单的表示为:

(1) 颗粒尺寸, 颗粒级配图(图 1.2); 为了描述颗粒尺寸, 我们可以用小于 $80\mu\text{m}$ 的颗粒百分比由 F 或者 d_n 来表示(其中 d_n 为小于某尺寸的颗粒占总重 10% 的颗粒尺寸), 用均匀性系数 $C_u = d_{60}/d_{10}$ 来描述颗粒集合体的分布特性。可以根据颗粒分布曲线或均匀性系数来判断颗粒体是否充分连续。

(2) 颗粒形状及表面粗糙度, 平滑的, 有棱角的, 或粗糙的。

第1章 颗粒材料介质力学

土体通常由散体颗粒材料集合而成。连续介质力学可以应用在这些颗粒连续接触的特殊集合体介质中(图 1.1)。因此,土力学研究首先需要解决以下三个基本问题:基本力学方程、材料特性准则以及颗粒边界条件。

1.1 基本力学方程

基本方程与力和动量相关,即对恒定质量 m , 方程为 $F = m\Gamma$ 。质量与重度相关:单位重度 $\gamma_s = \rho_s g$, 其中 ρ_s 是密度, g 为重力加速度。其他的方程都可由质量连续以及动量守恒定律推导而来。

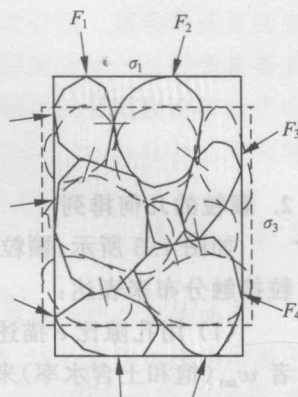


图 1.1 散体颗粒材料集合体

1.2 材料特性准则

1. 颗粒材料特性

通常在小应力或应变范围内,线弹性本构关系(用杨氏模量 E_g 和泊松比 ν_g 来描述)便足以描述颗粒材料的特性。然而,在特定的问题上,比如打桩时应力足够大导致的颗粒破碎等问题,就需要一个更加复杂的材料特性准则来描述。

2. 颗粒间接触特性

在颗粒之间只有摩擦角 ϕ_μ 一个参数来描述它们之间的接触特性。在此我们并不考虑颗粒间的胶结。因此,本书只讨论重塑土的力学特性。

3. 受矿物质成分影响的特性

颗粒的矿物质成分决定土体的特性,尤其对黏土的影响更为显著。此相关性可以用液塑限近似表达。

1.3 颗粒边界条件

颗粒集合体由颗粒及其几何排列而成。在小应力或应变范围内,这些颗粒及其排列只会发生很小程度的几何变化。当材料发生塑性变形时,这些颗粒及其排列才会有较大的变化。

1. 颗粒几何

颗粒几何可以简单的表示为:

(1) 颗粒尺寸,即颗粒级配(图 1.2):为了描述颗粒尺寸,我们可以用小于 $80\mu\text{m}$ 的颗粒百分比由 F 或者 d_{10} 来表示(其中 d_{10} 为小于某尺寸的颗粒占总重的 10% 的颗粒尺寸);用均匀性系数 $C_u = d_{60}/d_{10}$ 来描述颗粒集合体的分布特性。可以根据颗粒分布曲线或均匀性系数来判断颗粒体是否充分连续。

(2) 颗粒形状及表面粗糙度:平整的,有棱角的,或粗糙的。

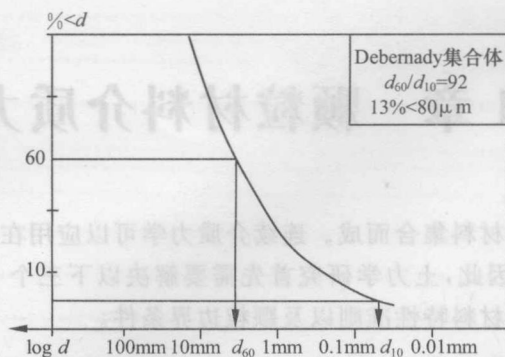


图 1.2 颗粒级配曲线

2. 颗粒的几何排列

如图 1.3 所示,颗粒的几何排列可由颗粒集合体的孔隙比及颗粒接触分布来表达:

(1) 用孔隙比 e 描述各向同性特性,也可用于重度 γ_d 和 γ_d/γ_s 或者 w_{sat} (饱和土含水率)来表示。

$$\text{孔隙比 } e = \frac{\text{空隙体积}}{\text{固体体积}} = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1-n}$$

$$\text{孔隙率 } n = \frac{\text{空隙体积}}{\text{总体积}} = \frac{V_v}{V}$$

$$\text{干重度 } \gamma_d = \frac{\text{干得量}}{\text{总体积}} = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s}{1+e}$$

$$\text{含水量 } w = \frac{\text{水重量}}{\text{干重量}} = \frac{W_w}{W_s}$$

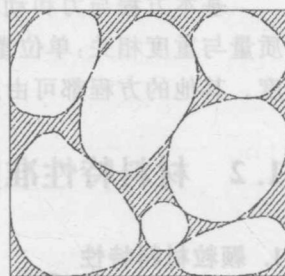
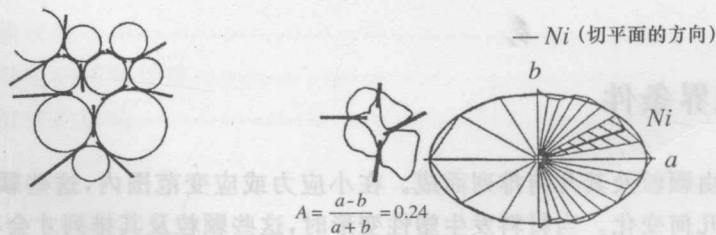


图 1.3 颗粒几何排列图

(2) 用颗粒间接接触平面的切线方向的统计值来描述各向异性特性。图 1.4 说明了一种沉积土的各向异性特性。



注: A 为各向异性参数

图 1.4 不同沉积方式带来的几何各向异性

[算例] 计算两个圆球在力 F 作用下,距离的减小量 w 如图 1.5 所示,按以下 3 个顺序来解决此问题。

由于两球受力之后的接触面积在不断改变,两线弹性球体的力学特性为非线性。