

# 软土理论

# 与工程

杨顺安  
冯晓腊  
张聪辰

著

地质出版社

# 软土理论与工程

杨顺安 冯晓腊 张聪辰 著

地质出版社

· 北 京 ·

# 序

在各类岩土中，最软弱的莫过于软土，其性质恶劣，孔隙比大、含水量高、强度低。工程建设遇到这种土就很麻烦，因为软土地基承载力低，易于变形，一般难于满足工程要求，而必需进行加固处理。在我国，软土分布广泛而且零星。东部西部，华南华北，平原山区都会遇到它。不像别的特殊土有一定的地区性，例如黄土主要分布在西北地区，红粘土主要分布在长江以南，盐渍土主要分布在内陆盆地。但是有一个特点，即凡是平坦的地方，如滨海平原、河口三角洲、湖泊周围、大河两岸、山间谷地等处，往往就有淤泥软土的存在，当然，主要还是分布在沿海地区。而这些地方也正是大小城市、工业厂址所在之地，各类建筑特别集中，研究软土的工程特性，进行软土地基处理，也就成为工程地质学和岩土工程的重要内容之一。

1985年，深圳要在海滨修建机场，遇到了淤泥软土地基，如何处理成为难题。中国地质大学沈孝宇教授带领青年教师杨顺安等和研究生勇敢地承担了这项任务。他们以深厚的工程地质理论知识为基础，对深圳地区的淤泥类软土进行了深入的调研和试验研究，取得了大量的第一手材料。并搜集了国内外文献资料，作了系统的分析，深入思考，大胆尝试。1992年扩建停机坪时提出了用强夯块石墩复合地基加固法，处理停机坪等处的软土地基的设想。并结合当地工程地质条件和技术机理的分析，经过精心设计，妥善施工，结果地基承载力满足要求，沉降验算合格，质量检测优良，新的地基加固方法取得成功。

此后，深圳、珠江三角洲地区许多软土地基工程项目，纷纷聘请他们承担岩土工程任务。这就给了他们更广泛研究软土理论和工程实践的机会。对每项任务，他们总是通过野外调查和室内试验，深入了解软土的类型、成分和结构，取得岩土的物理力学性质，根据工程要求，采用适宜的方法，制定最佳处理方案，获得满意结果。既完成了生产任务，又积累了资料和技术经验。基于多年来对多种软土的研究和地基加固的经验，编写了这本《软土理论与工程》专著。可以说本书既是理论研究的成果，又是实践经验的总结。

软土理论研究已有多年历史，成果累累，但多是零散的。像本书从软土基本理论到各种加固处理方法，全面系统，具体深入地加以论述尚不多见，这是本书的最大特点。全书共分9章，前5章为软土理论部分，6章以后为软土工程部分。

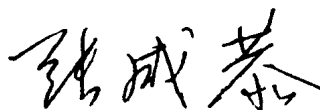
在1~5章中，论述了软土的定义与研究现状，沉积时代和沉积环境，物质成分与微观结构，物理力学性质，吹填淤泥软土的工程特性，以及饱和粘性土中结合水的运移机制。其中地质观点特别突出，用地质基础理论指导和统帅全局。这有助于掌握软土的本质，了解其来龙去脉，是很重要的。软土的工程特性主要是压缩性高，强度低，流动触变，而这正是与其沉积时代新，孔隙比大，物质成分特殊，天然含水量高等地质成因相关的。结合水更是取决于粘粒的含量及粘土矿物的种类等地质因素，而这又对加固处理方法的选择有重要影响。书中专章论述饱和粘性土中结合水的运移机制，是十分必要而正确的。这也是中国地质大学多年来一直坚持研究的传统课题之一，几年来的工程实践，在这方面又有了新

的进展。

6~9章分别论述了软土地基加固的各种方法,包括排水固结法,强夯块石墩复合地基加固法,换填法,粉喷桩复合地基加固法等。每一种加固方法都介绍了适用的工程地质条件,加固的机理,设计原则,施工要点,加固效果的分析与评价,以及应用实例等。讲得具体完全,明确细致,便于选择应用,参考实施。这一部分主要是实践经验总结出来的,其价值不同一般,特别可贵。总地说来加固方法大者两种:一种是挖除换填,这只适用于埋藏浅、厚度小的软土地基。另一种就是改善软土的性质,这又可分为排水压密和增强粒间连结力,二者均需排水,主要是结合水,这是难点。

本书是教、产、研三结合的产物,理论与实际相结合,在理论指导下进行工程实践,又反过来发展了理论。教师的理论底蕴厚实,能在实践中认识事物的本质,使理论更加丰富,本书成功即在于此。这与作者们的勤奋踏实,刻苦钻研,善于思考是分不开的。书中引进了许多新的理论知识和技术方法,也提出了很多新的见解与新的经验,给人以新颖、先进的感受。本书内容丰富,资料翔实,论据充分,概念明确,系统性、完整性和实用性强,具有重要的理论意义和实际价值,对工程地质学和岩土工程的发展有着推动作用。它的出版必将成为读者的良师益友。

中国地质学会工程地质专业委员会副主任  
中国地质大学教授



2000.8.9

# 目 录

|                      |      |
|----------------------|------|
| 第一章 绪论               | (1)  |
| 一、软土与软土理论            | (1)  |
| 二、软土理论现状与发展          | (2)  |
| 三、软土工程现状与发展          | (2)  |
| 四、本书的内容              | (4)  |
| 第二章 淤泥类软土的沉积环境和物质成分  | (5)  |
| 第一节 软土的沉积环境          | (5)  |
| 一、粒度分析               | (5)  |
| 二、微量元素及重矿物分析         | (8)  |
| 三、重矿物分析所反映的沉积相       | (9)  |
| 四、其他生物标志             | (9)  |
| 五、孢粉所反映的气候变迁         | (16) |
| 第二节 软土的物质组成          | (17) |
| 一、粒度成分               | (17) |
| 二、矿物成分和化学成分          | (17) |
| 第三节 淤泥类软土的微观结构       | (18) |
| 一、土中颗粒种类及其特征         | (18) |
| 二、淤泥中的孔隙特征           | (19) |
| 三、颗粒骨架之间的连结特征        | (20) |
| 四、微观结构的类型及特点         | (20) |
| 五、微观结构对工程性质的影响       | (21) |
| 第三章 软土的物理-力学性质及其相关分析 | (23) |
| 第一节 软土的工程特征及相关分析     | (23) |
| 一、软土的固结历史            | (23) |
| 二、淤泥软土的触变性           | (26) |
| 三、淤泥软土的蒸发特性          | (27) |
| 四、淤泥软土的物理力学性质及其变化规律  | (29) |
| 五、淤泥软土的流变特性          | (32) |
| 六、相关分析               | (33) |
| 第二节 淤泥的渗透固结特性及其微观机理  | (36) |
| 一、问题的提出              | (36) |
| 二、 $K_0$ 固结试验        | (37) |
| 三、不同压力条件下的渗透固结规律     | (39) |



|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 四、渗透固结的微观机理 .....                | (43)  |
| 第三节 抗剪强度实质性的探讨 .....             | (50)  |
| 一、问题的提出 .....                    | (50)  |
| 二、模型的建立 .....                    | (52)  |
| 三、问题的分析 .....                    | (54)  |
| 第四章 吹填淤泥土的工程特征 .....             | (57)  |
| 第一节 吹填淤泥土的基本特征 .....             | (57)  |
| 一、吹填淤泥土的淤积特征 .....               | (57)  |
| 二、吹填淤泥土基本物理力学性质及相关分析 .....       | (59)  |
| 三、吹填淤泥土物质成分与粒度分析 .....           | (61)  |
| 第二节 吹填淤泥土微观结构及渗透固结特征 .....       | (63)  |
| 一、吹填淤泥土微观结构特征分析 .....            | (63)  |
| 二、吹填淤泥土的蒸发特征 .....               | (66)  |
| 三、吹填淤泥土的渗透固结特征 .....             | (69)  |
| 四、吹填淤泥土的强度特征 .....               | (72)  |
| 五、吹填淤泥固结沉降量的计算 .....             | (74)  |
| 第五章 饱和粘性土中结合水的运移机制 .....         | (76)  |
| 第一节 饱和粘性土渗透规律研究现状 .....          | (76)  |
| 一、非达西观点 .....                    | (77)  |
| 二、达西观点 .....                     | (78)  |
| 第二节 饱和粘性土中孔隙水压力传递规律实验及理论分析 ..... | (79)  |
| 一、试验条件 .....                     | (80)  |
| 二、资料整理与分析 .....                  | (80)  |
| 三、机理的探讨 .....                    | (81)  |
| 第三节 饱和粘性土的渗流规律 .....             | (85)  |
| 一、渗流规律的探讨 .....                  | (85)  |
| 二、 $I_0$ 的实质及其变化规律 .....         | (86)  |
| 第六章 预压排水固结法的应用实践 .....           | (89)  |
| 第一节 堆载预压法的工程应用 .....             | (89)  |
| 一、工程地质概况 .....                   | (89)  |
| 二、工程设计与施工 .....                  | (89)  |
| 三、施工期地基稳定性评价 .....               | (91)  |
| 四、堆载预压加固效果分析与评价 .....            | (103) |
| 第二节 真空联合堆载预压法的工程实践 .....         | (110) |
| 一、真空联合堆载预压法的概况与发展 .....          | (110) |
| 二、实践工程的概况与地质条件 .....             | (111) |
| 三、真空联合堆载预压法设计与施工 .....           | (112) |
| 四、加固效果与分析 .....                  | (115) |
| 第七章 强夯块石墩复合地基加固法应用 .....         | (118) |

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 第一节 场地的技术要求与基本地质条件·····       | (118) |
| 一、扩建停机坪的技术要求 ·····            | (118) |
| 二、拟建场地的基本地质条件 ·····           | (119) |
| 第二节 饱和软粘土中的强夯机理·····          | (121) |
| 一、土的动力学特性 ·····               | (121) |
| 二、强夯动力固结作用 ·····              | (122) |
| 三、饱和土体的局部液化和触变恢复 ·····        | (124) |
| 第三节 强夯块石墩复合地基软基加固设计·····      | (124) |
| 第四节 强夯块石墩复合地基加固与质量检测·····     | (125) |
| 一、强夯块石墩及块石垫层施工 ·····          | (126) |
| 二、质量检测 ·····                  | (127) |
| 第五节 强夯块石墩复合地基的沉降分析与承载力确定····· | (137) |
| 一、强夯块石墩复合地基的沉降分析 ·····        | (137) |
| 二、强夯块石墩复合地基承载力的确定 ·····       | (146) |
| 第八章 换填法在淤泥软土加固中的应用·····       | (151) |
| 第一节 概述·····                   | (151) |
| 第二节 换填地基加固软土的设计与施工·····       | (152) |
| 一、场地的地质概况与分区 ·····            | (152) |
| 二、飞行区换填地基的设计与施工 ·····         | (153) |
| 第三节 换填地基的沉降分析·····            | (158) |
| 一、地基沉降计算方法及固结模型 ·····         | (158) |
| 二、本工程采用的压缩与固结模型及计算方法 ·····    | (158) |
| 三、沉降分析与观测结果 ·····             | (159) |
| 第九章 粉喷桩复合地基加固软土地基的应用·····     | (160) |
| 第一节 概述·····                   | (160) |
| 一、粉喷桩发展史 ·····                | (160) |
| 二、复合地基概述 ·····                | (161) |
| 三、粉喷桩的应用与发展 ·····             | (162) |
| 第二节 粉喷桩复合地基作用机理·····          | (164) |
| 一、粉喷桩复合地基的基本作用 ·····          | (164) |
| 二、桩、土作用原理与分析 ·····            | (165) |
| 三、垫层效应与刺入作用 ·····             | (166) |
| 四、桩土应力特征 ·····                | (169) |
| 五、粉喷桩复合地基的本构关系 ·····          | (171) |
| 第三节 珠江三角洲软土工程特性·····          | (173) |
| 一、主要土性指标 ·····                | (174) |
| 二、软土的微结构特性 ·····              | (174) |
| 第四节 粉喷桩复合地基的工程应用·····         | (176) |
| 一、宝安新中心区道路工程 ·····            | (176) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 二、京珠高速公路广珠段工程 .....          | (180) |
| 第五节 粉喷桩复合地基承载力的确定与沉降分析 ..... | (182) |
| 一、粉喷桩复合地基承载力的确定 .....        | (182) |
| 二、粉喷桩复合地基的沉降分析 .....         | (186) |
| 后记 .....                     | (190) |
| 主要参考文献 .....                 | (191) |



# 第一章 绪 论

## 一、软土与软土理论

软土的定义各专业技术部门都不尽相同，国内外也均无统一的结论。有的定义软土是一种简称，主要由细粒土组成。有的定义软土一般是含水量、孔隙比大，抗剪强度、渗透系数低，且压缩性、灵敏度高的粘性土的统称。还有的将软土泛指近代沉积的剪切强度低，压缩性大的软弱土层，主要为饱和软粘土，在天然地层剖面上，它往往与泥炭或粉砂交错沉积。还有的定义软土一般是静水或缓慢水流中以细颗粒为主的近代沉积物，即流速减缓与温度变化使微细粒径的粘土矿物和有机质在悬浮液溶解力与粘滞性降低的条件下，逐渐停积的饱和软弱粘性土。还有定义软土是指天然含水量大、压缩性高、承载能力低的一种软塑到流塑状态的粘性土，如淤泥、淤泥质土以及其他高压缩性饱和粘性土、粉土等。我国《岩土工程勘察规范》中规定：天然孔隙比大于或等于 1.0，且天然含水量大于液限的细粒土应判定为软土，包括淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭土等，其压缩系数大于  $0.5 \text{ MPa}^{-1}$ ，不排水抗剪强度小于  $30 \text{ kPa}$ 。

上述诸多定义多与其工程类型及解决的工程问题有关。尽管有的把软土视为软粘土的简称，有的把软土视为整个软弱土质（高压缩性的有机土、可液化的砂土、软粘土等）的简称，有的则把软土视为软弱土基的简称。但无论软土还是软土地基，它的软硬都是相对的，软硬不但对土质而且对工程而言也是相对的。软硬应与土质、工程性质两者相关。因此软土应是与土质、工程性质相关的高孔隙比、大含水量、低强度、高压缩性及低渗透性的以粘性土为主的软弱土层的统称。

国内外各行业对软土的鉴别是依软土的若干特征指标划分的，采用的具体指标各不相同。我国铁路部门建议以下列指标作为区分软土的界限：

天然含水量接近或大于液限；孔隙比大于 1；压缩模量小于  $4000 \text{ kPa}$ ；标准贯入击数小于 2；静力触探贯入阻力小于  $700 \text{ kPa}$ ；不排水强度小于  $25 \text{ kPa}$ 。

我国建设部《软土地区工程地质勘察规范》(JGJ83-91) 规定凡符合以下三项特征即为软土：

- (1) 外观以灰色为主的细粘土；
- (2) 天然含水量大于或等于液限；
- (3) 天然孔隙比大于或等于 1.0。

上述 (2)、(3) 两特征与我国港工规范基本上是一致的。我国公路部门规范主要选择了能说明强度低、压缩性高的三项特征指标，即天然含水量、天然孔隙比、天然抗剪强度（不排水剪切强度）作为鉴别软土的特征指标。

我国软土分布十分广泛，滨海平原、河口三角洲、湖盆地周围、山间谷地均有分布，其形成绝大部分在全新世的中晚期，个别软土层（如埋藏于一些密实的硬粘土下的软土层）会形成于全新世的中期以前。就软土的成因类型划分，可分为滨海相软土、溺谷相软土、潟

湖相软土、三角洲相软土、河漫滩相软土、牛轭湖相软土、谷地相软土、湖相软土和沼泽相软土等。如渤海湾及天津塘沽、长江三角洲、浙江、珠江三角洲以及福建广东的沿海地区都存在海相和湖相沉积的软土。在云贵的山地型软土，是泥灰岩、炭质页岩、泥砂质页岩等风化产物和地表的有机质经水流搬运沉积于低洼处，长期饱水软化或间有微生物作用而形成的，属坡洪积、湖积和冲积为主的软土。

由于软土成因类型复杂，分布范围广泛，在工程实践中经常会遇到软土地基及由此引起的工程问题，这主要是由于软土的特性决定的。一般情况下，软土地基的承载力均不能满足设计要求，故均需进行加固处理。不同成因、不同物质组成的软土，因其表现出的特性不同，选取的最优处理方案也就不同，故对软土特性的认识显得尤为重要，包括其物理性质、力学性质、尤其是渗透固结特性等。以此为基础，形成了实用的软土理论。

软土理论的研究应包括软土特征与成因、软土的本构模型、软土地基加固理论等，由于软土自身的特性复杂，故理论的发展在很大程度上取决于实践经验的总结。

## 二、软土理论现状与发展

我国软土理论的研究已有数十年的历史，水利、铁道、交通、建筑、港口等行业均涉及到软土与软土工程问题，对软土的基本工程性质进行了大量的试验与集累，对我国分布的软土物理力学性质有了基本了解，表 1-1 是全国各地软土的物理力学性质指标统计。

为了系统阐述软土的特性及内部机理，我国著名学者高国瑞教授以电化学、胶体化学理论为基础，系统研究了软土的物质成分及微观结构，并分析了它们对软土工程的影响程序，出版了《专著近代土质学》，它的主要特点是从微观的角度来研究软土的特性。与此相对应沈珠江院士则从宏观的角度，对软土的特性尤其是强度特性进行了系统研究，它主要以大量的室内试验资料为依据，全面探讨了软土在不同应力条件下的应力应变关系及其表现出的强度特性，它的研究成果开创了软土工程的新局面。越来越多的试验研究与工程实践表明，天然软土的结构普遍存在并对其工程特性有重要影响，具体表现在它的压缩曲线和剪切曲线都可以分成两段，后一段的特性可以从通常的室内试验测定，前一段则易受取样扰动的影响，只能通过原位测试方法确定。从天然软土的结构性出发，现有的弹塑性本构模型已不能很好反映天然软土的规律，要合理地描述天然土的特性，必须发展新一代的本构模型——结构性模型。利用本构模型进行有限元计算，是今后发展的方向，但目前常用的仍是基于经典理论的半经验方法，在发展结构性模型的同时，常规设计方法中如何考虑结构性是一个需要研究的问题。

软土理论研究离不开试验测试手段，试验技术理论与测试方法手段的研究是软土学科发展的基础。随着工程建设的发展，适应于高应力、大位移、多因素和复杂应力组合的试验设备和方法必将得到新的发展。天然软土的结构性的揭示，除了必要的室内试验外，原位测试是必不可少的。

## 三、软土工程现状与发展

理论来源于实践同时又可以更好地指导工程实践，由于我国软土分布广泛，故在大量的工程中，如机场、码头、高速公路、高层建筑深基坑等均会遇到软土工程问题。软土工程在我国已有相当长的历史，随着改革开放更有新的发展。目前国际上已有的软土工程技术在我国都有应用与发展，其中主要的排水固结工程运用较为广泛（如塑料板排水、袋装砂井排水、真空预压排水等）。排水固结工程是治本的软土工程，适用于大面积的软土加固。

表 1-1 全国各地软土物理力学性质指标统计

| 指<br>地<br>区<br>标 | 土层深度<br>m  | 天然含<br>水量<br>% | 密度<br>$\text{t/m}^3$ | 孔隙比     | 液限<br>% | 塑限<br>% | 渗透系数<br>$\text{cm/s}$ | 压缩系数<br>$\text{kPa}^{-1}$ | 无侧限<br>抗压强度<br>$\text{kPa}$ |
|------------------|------------|----------------|----------------------|---------|---------|---------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 天 津              | 7~4        | 34             | 1.82                 | 0.97    | 36      | 19      | $1 \times 10^{-7}$    | 5.1                       | 30~40                       |
| 塘 沽              | 8~17       | 47             | 1.77                 | 1.31    | 42      | 20      |                       | 9.7                       |                             |
|                  | 0~8, 17~24 | 39             | 1.81                 | 1.07    | 34      | 19      | $2 \times 10^{-7}$    | 6.5                       |                             |
| 上 海              | 6~17       | 50             | 1.72                 | 1.37    | 43      | 23      | $6 \times 10^{-7}$    | 12.4                      |                             |
|                  | 1.5~6, >20 | 37             | 1.79                 | 1.05    | 34      | 21      | $2 \times 10^{-6}$    | 7.2                       | 20~40                       |
| 杭 州              | 3~9        | 47             | 1.73                 | 1.34    | 41      | 22      |                       |                           |                             |
|                  | 9~19       | 35             | 1.84                 | 1.02    | 33      | 18      |                       | 11.7                      |                             |
| 宁 波              | 2~12       | 50             | 1.70                 | 1.42    | 39      | 22      | $3 \times 10^{-8}$    | 9.5                       | 60~48                       |
|                  | 12~28      | 38             | 1.86                 | 1.08    | 36      | 21      | $7 \times 10^{-8}$    | 7.2                       |                             |
| 舟 山              | 2~14       | 45             | 1.75                 | 1.32    | 37      | 19      | $7 \times 10^{-6}$    | 11                        |                             |
|                  | 17~32      | 36             | 1.80                 | 1.03    | 34      | 20      | $3 \times 10^{-7}$    | 6.3                       |                             |
| 温 州              | 1~35       | 63             | 1.62                 | 1.79    | 53      | 23      |                       | 19.3                      |                             |
| 福 州              | 3~19       | 68             | 1.50                 | 1.87    | 54      | 25      | $8 \times 10^{-8}$    | 20.3                      | 5~18                        |
|                  | 1~3, 19~35 | 42             | 1.71                 | 1.17    | 41      | 20      | $5 \times 10^{-7}$    | 7.0                       |                             |
| 龙 溪              | 0~6        | 89             | 1.45                 | 2.45    | 65      | 34      |                       | 23.3                      |                             |
| 广 州              | 0.5~10     | 73             | 1.60                 | 1.82    | 46      | 27      | $3 \times 10^{-6}$    | 11.8                      |                             |
| 深 圳              | 0~20       | 73.2           | 1.58                 | 2.07    | 56.8    | 33.6    | $3 \times 10^{-7}$    | 17.4                      | 10                          |
| 昆明<br>淤泥<br>泥炭   |            | 41~270         | 1.2~1.8              | 1~5.8   |         |         | $1 \times 10^{-4}$    | 12~42                     | 2~35                        |
|                  |            | 68~299         | 1.1~1.5              | 1.9~7.0 |         |         | $1 \times 10^{-8}$    |                           |                             |
| 贵州<br>淤泥<br>泥炭   | <20        | 54~127         | 1.3~1.7              | 1.7~2.8 |         |         | $1 \times 10^{-4}$    | 12~42                     | 1~18                        |
|                  |            | 140~264        | 1.2~1.5              | 1.6~5.9 |         |         | $1 \times 10^{-8}$    | 17~73                     |                             |

为了更好地结合我国特点发展排水固结技术, 全国成立了专门的学术技术机构——塑料排水学术委员会, 并已召开了四次全国会议, 全面交流总结了排水固结技术与应用的现状。

此外复合地基技术也是软土工程的主要部分, 目前我国应用的软土工程技术主要有: 碎石桩复合地基技术(振冲碎石桩复合地基、沉管碎石桩复合地基、干振碎石桩复合地基、强夯置换碎石桩复合地基、夯扩碎石桩复合地基和袋装碎石桩复合地基等); 砂桩复合地基技术; 灰土桩复合地基技术; 水泥土复合地基技术(深层搅拌与旋喷); 强夯块石墩复合地基技术; 低强度混凝土桩复合地基技术; 钢筋混凝土桩复合地基技术与水平向增强体复合地基技术(土工布垫层、土工格栅垫层、加筋土等)。复合地基理论与实践发展很快, 但理论发展落后于实践发展, 复合地基理论研究特别是复合地基承载力和变形计算理论的研究还很不够。将理论分析、现场测试和工程实录反分析结合起来, 通过对各类复合地基应力场和位移场的分析, 了解各类复合地基的荷载传递机理, 从而发展、完善各类复合地基承载力和变形计算理论, 特别是沉降计算理论。

无论采用何种软土加固工程, 都有成功的范例与失败的教训。软土地基总的说来是软

弱的，但软硬是相对的，软中有硬，要具体分析，做到物尽其用。根据工程的具体情况，应尽量发挥地基的潜力。同时在利用生态环境进行工程建设和发展经济时，要高度重视，针对生态环境作特殊处理——绿色软土工程的规划设计与施工，尽可能避免和减少环境性能的改变，以利于可持续发展和再利用。

#### 四、本书的内容

从1985年开始本书的作者们一直在深圳地区及珠江三角洲地区从事岩土工程实践与理论研究工作，尤其在深圳国际机场建设期间，对深圳地区的淤泥类软土进行了系统深入的分析，积累了大量宝贵的试验资料与监测资料，本书便是以此为基础撰写的。

外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用。本书首先以工程地质调查为基础，结合室内先进的测试手段，对深圳地区淤泥类软土的沉积环境及与之密切相关的物质成分作了全面介绍，然后结合大量工程实践所取得的实测资料及室内模型试验成果，对淤泥类软土的工程地质特性尤其是渗透固结特性及抗剪强度特性进行了深入研究，并从结合水动力学的角度对其微观机理作了详细分析。理论来源于实践同时也应该更好的为实践服务，本着这一思想，本书系统介绍了淤泥类软土所采用的几种主要处理方法及相应的适用条件，并从理论上对处理效果作了合理的评述。

本书的宗旨意在强调理论与实践的结合，同时更突出理论对实践的指导作用，在软土地区从事岩土工程是一个复杂的系统工程，必须遵循软土的客观规律，由于作者的认识有限，书中有些观点难免完全合理、正确，请同仁们批评指正。

## 第二章 淤泥类软土的沉积环境和物质成分

外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因只有通过内因才能起作用，只有了解了事物的内在本质，才能合理解释与之相关的各种复杂现象。

淤泥类软土具有一系列特殊的性质，这首先取决于它的物质组成（内因），当外界环境条件如压力、温度、湿度（外因）发生变化时，淤泥的性质也会随之而变，即两者具有明显的联动性，而物质组成与其自身的沉积环境是密不可分的。

### 第一节 软土的沉积环境

探讨珠江三角洲地区淤泥类软土的沉积环境，首先必须弄清整个珠江三角洲的沉积相和沉积旋回。

珠江三角洲是一个特殊的三角洲，它主要由西江、北江、东江在湾内堆积复合而成。三角洲内有五分之一的面积为星罗棋布的丘陵、台地、残丘，使水道分八个口门出海：三江汇合，八口分流，成为珠江三角洲的地貌特色（图 2-1）。

近几年来，由于较快地建立了 $^{14}\text{C}$  实验室，并应用粒度分析、重矿分析、微量元素测定、硅藻分析、孢粉分析等技术手段，取得了许多实验分析数据，从而能够进一步认识珠江三角洲的形成、发育和演变过程。

一般认为，珠江三角洲的第四纪松散层由两套从下而上由粗变细的沉积物组成，即由砂砾（或粗砂）过渡为砂质粘土（或淤泥），再由粗砂（或中细砂）过渡为淤泥（或砂质粘土），构成垂向上变化的两个韵律，两套沉积物之间夹有腐木层，并存在风化的杂色粘土，上、下两层淤泥或粘土中含有丰富的毛壳，依据岩性、生物遗骸和风化现象，在沉积相的垂向划分方面，一般都采用三分性，杂色粘土之下的一套沉积物称为河流相沉积，其上的一套沉积物为海湾沉积类型，表层为海河混合沉积类型，下面从几个方面来论证淤泥类软土的沉积环境。

#### 一、粒度分析

对沉积物进行粒度分析，由粒度参数及粒度曲线特征可以判断当时的搬运介质、搬运方式、沉积环境，然后结合岩性及其他标志即可区分沉积相。

##### 1. 粒度参数散点图（图 2-2）

常用的四种粒度参数是  $\sigma_i/SK_i$ ， $SO_i/\alpha_s$ ， $\sigma\varphi/\alpha_s$ ， $\sigma\varphi/\alpha_s\sigma\varphi^3$ ，其中  $\sigma_i$  为概括图解标准差， $SK_i$  为概括图解偏度， $SO_i$  为简单分选系数， $\alpha_s$  为简单偏度； $\sigma\varphi$  为标准差， $\alpha_s\sigma\varphi^3$  为立方偏差平均值，它们均由频率累积曲线求得，具体计算式为：

$$\sigma_i = \frac{\varphi 84 - \varphi 16}{4} + \frac{\varphi 95 - \varphi 5}{6.6}$$

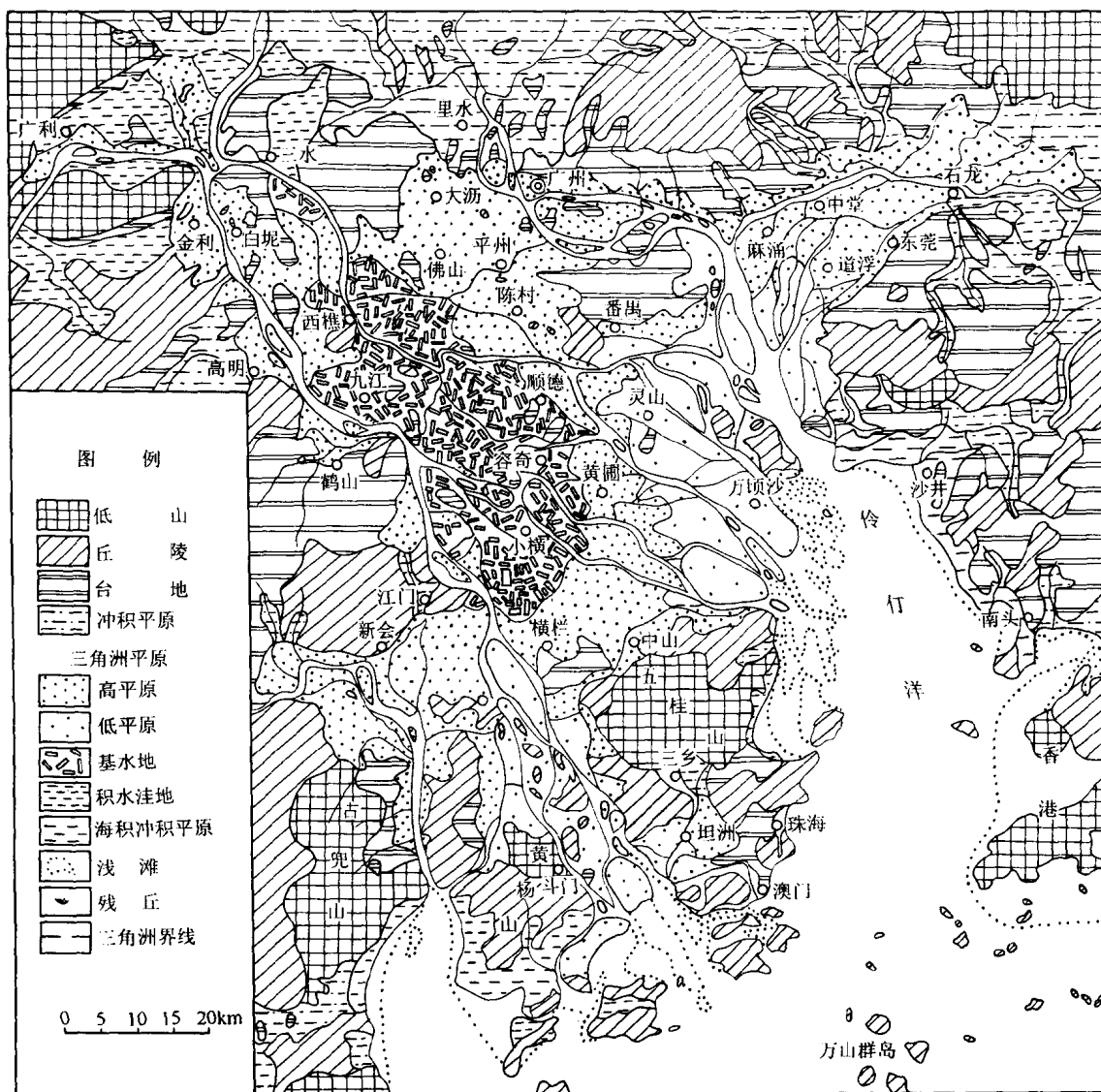


图 2-1 珠江三角洲地貌图

$$SK_i = \frac{\varphi 16 + \varphi 84 - 2\varphi 50}{2(\varphi 84 - \varphi 16)} + \frac{\varphi 5 + \varphi 95 - 2\varphi 50}{2(\varphi 95 - \varphi 5)}$$

$$SO_i = \frac{\varphi 95 - 2\varphi 5}{2}$$

$$\alpha_i = (\varphi 95 - \varphi 5) - 2\varphi 50$$

$$\text{平均值 } \bar{X}_\varphi = \sum f_x / 100$$

$$\text{偏度 } \alpha_3 = \sum f (x - \bar{x}_\varphi)^3 / 100\sigma^3\varphi$$

$$\text{标准差 } \sigma_\varphi = \left[ \frac{\sum f (x - \bar{x}_\varphi)^2}{100} \right]^{1/2}$$

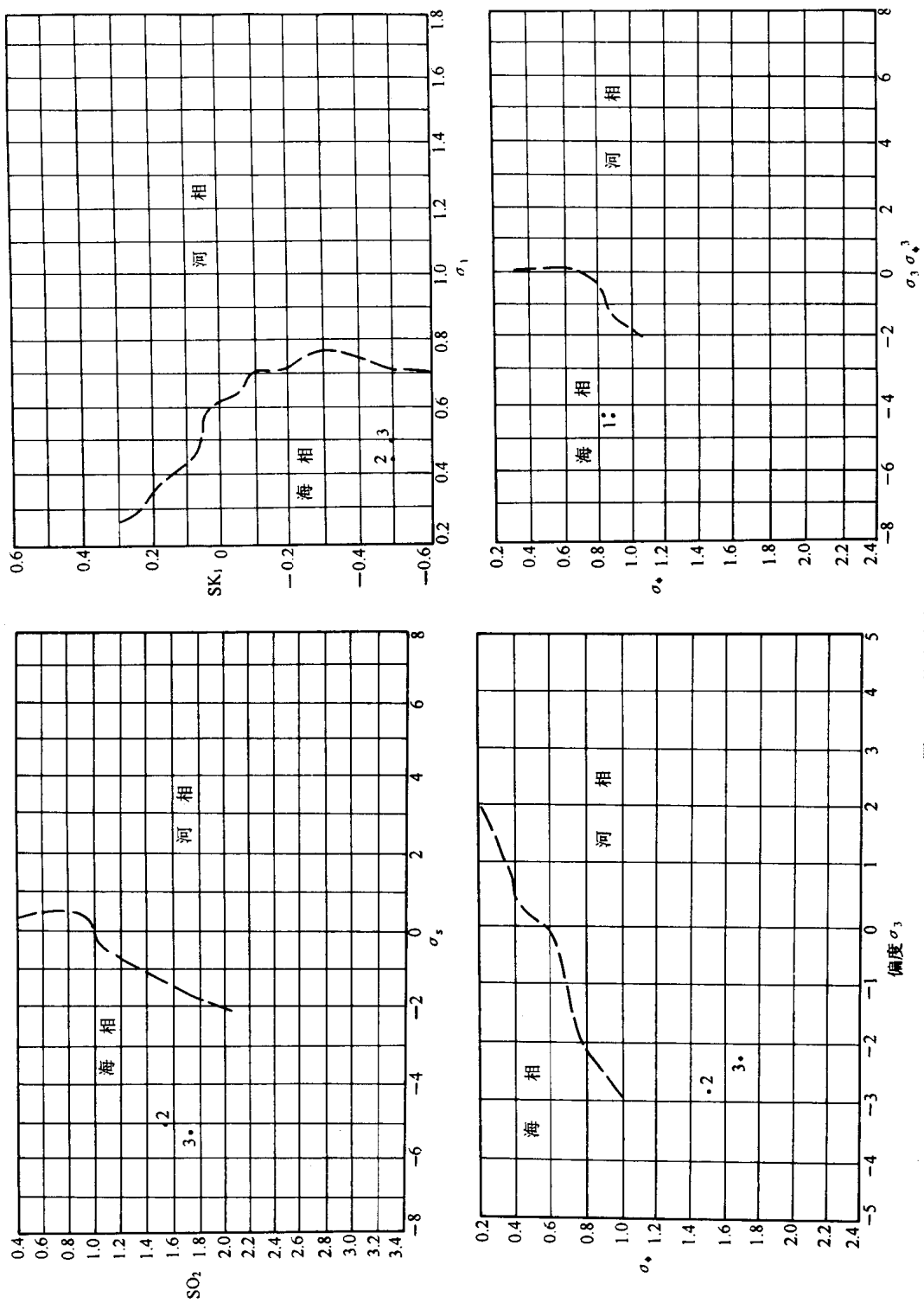


图 2-2 粒度参数散点图



立方偏差平均值  $\alpha_3\sigma^3\varphi = \sum f(x - \bar{x}\varphi)^3/100$

对深圳地区淤泥样品,取如表 2-1 所示的三个样品,根据上述公式可求得如表 2-2 所示的结果。

表 2-1 淤泥样品粒度分析成果表

| 样品号 | $\frac{2\sim 0.05}{\text{mm}}$ | $\frac{0.05\sim 0.005}{\text{mm}}$ | $\frac{<0.005}{\text{mm}}$ | $\frac{<0.002}{\text{mm}}$ |
|-----|--------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1   | 5.0                            | 29.0                               | 66.0                       | 42.0                       |
| 2   | 12.0                           | 25.0                               | 63.0                       | 43.0                       |
| 3   | 14.0                           | 25.0                               | 61.0                       | 43.0                       |

表 2-2 粒度参数计算成果一览表

| 样品号 | $\sigma_i$ | $SK_i$ | $SO_i$ | $\alpha_i$ | $\bar{x}_\varphi$ | $\alpha_3$ | $\sigma\varphi$ | $\alpha_3\sigma^3\varphi$ |
|-----|------------|--------|--------|------------|-------------------|------------|-----------------|---------------------------|
| 1   | 0          | -0.5   | 0      | 0          | 5.85              | -7.39      | 0.816           | -4.02                     |
| 2   | 0.462      | -0.5   | 1.525  | -5.45      | 5.466             | -2.761     | 1.517           | -9.65                     |
| 3   | 0.50       | -0.5   | 1.650  | -5.15      | 5.33              | -2.332     | 1.675           | -10.96                    |

由表 2-2 的结果,即可求出  $\sigma_i/SK_i$ ,  $SO_i/\alpha_i$ ,  $\sigma\varphi/\alpha_3$ ,  $\sigma\varphi/\alpha_3\sigma^3\varphi$ 。将这些计算结果投到图 2-1 中,由此可以判断上述 3 个样品代表的淤泥土层所处的沉积环境,如表 2-3 所示。

表 2-3 沉积相判断成果表

| 样品号 | $\sigma_i/SK_i$ | $SO_i/\alpha_i$ | $\sigma\varphi/\alpha_3$ | $\sigma\varphi/\alpha_3\sigma^3\varphi$ |
|-----|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------------------------------|
| 1   | 海               | 海               | 海                        | 海                                       |
| 2   | 海               | 海               | 河                        | 海                                       |
| 3   | 海               | 海               | 河                        | 海                                       |

综合判断结果表明,深圳地区淤泥为以海相沉积环境为主。

## 2. Passaga 的 C-M 图

Passag (1957, 1964) 分析了近万个样品,选择粒度参数 C (频率累积曲线上 1%含量的粒径) 和 M (频率累积曲线上 50%含量所对应的粒径),两者均取毫米值,在双对数坐标纸上,以 C 为纵轴, M 为横轴,投点作图即得到图 2-3, C-M 图被 N, O, P, Q, R, S 各点截成五个区段,反映不同的搬运方式和水动力强度,由这五个区段组合成 9 个沉积区,每个区的搬运方式的组合不相同,推移、跃移、悬移三种方式各有侧重,因而 9 个沉积区的水动力强度的顺序由强到弱,依次为 I, IV, I, V, III, VI, VI, IX, VIII。

将上述三个试样点在 C-M 图上,与其相对应的区间分别为 IX-VIII, IX-VIII, IX-VIII,即水动力条件非常弱。

## 二、微量元素及重矿物分析

一般认为,在不同的水介质条件下,沉积物中粘土矿物的种类不相同,粘土矿物的吸

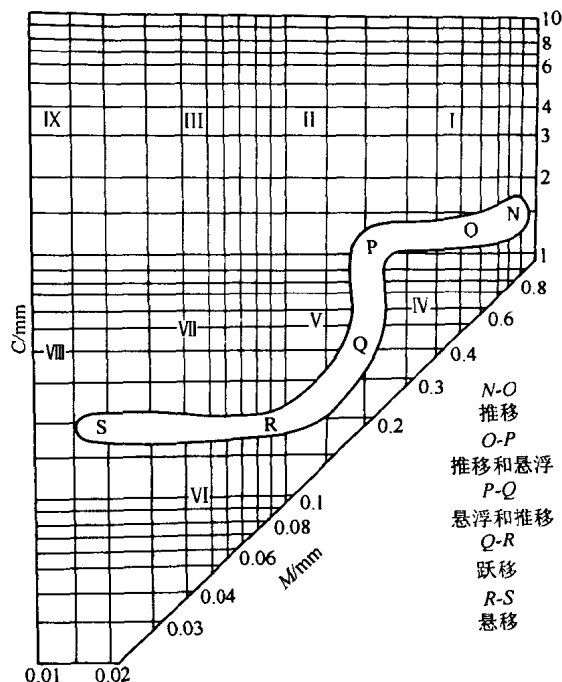


图 2-3 C-M 分区图

附也不相同、伊利石吸附钾 (K) 最高, 还吸附大量的铷 (Rb)、硼 (B)、高磷石吸附钾最少, 其他碱金属离子也相应减少, 但镓 (Ga) 较富集, 因此根据微量元素的含量可以判断沉积环境。

将珠江三角洲的二百多个样品进行微量元素含量的测定, 可得到图 2-4 和图 2-5, 这些样品的投点总的来看都处在咸、淡环境的过渡带, 反映了海、河交互作用的三角洲环境。

将微量元素分析结果按剖面绘成 Sr (锶)、Ba (钡)、Rb、K 的含量曲线, 可得到图 2-6, 从中可以看出, 虽然在同一剖面中四种元素的含量值是不相同的, 甚至相差很大, 同一种元素在不同剖面中的含量值也不相同, 但四条含量曲线的起伏形态及高值, 低值的层次是相当接近的, 它们共同反映出该剖面各个层次沉积相的递变关系, 不论是哪一个剖面, 都反映出一个共同特征, 即剖面中, 上几层主要为三角洲相沉积。

### 三、重矿物分析所反映的沉积相

水介质的性质及水动力条件的强弱, 在沉积物所含重矿物的种类上有所反映, 如绿泥石是在特定海洋地质条件下生成的海相自生矿物, 自生黄铁矿往往也是一种海相标志矿物, 深圳地区淤泥样品的矿物成分测定和微观结构分析结果表明, 其内绿泥石含量较高, 同时, 自生黄铁矿分布较普遍。其中黄铁矿呈球状、微晶集合体方式存在, 这些均表明深圳地区淤泥主要为海相沉积。

### 四、其他生物标志

#### 1. 蚝壳层

蚝 (牡蛎 *Ostrea* sp.) 在潮间带环境生长, 一般认为, 珠江三角洲第四系分三层, 下层的砂砾层不含蚝壳, 中层的淤泥, 粉砂质淤泥富含蚝壳, 表层的粉砂和粘土, 部分地区含