

FOUNDATION
AND UNDERGROUND
ENGINEERING IN SOFT
GROUND

软土地基

(第二版)

与地下工程

黄绍铭 高大钊 主编
孙更生 主审

中国建筑工业出版社
CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

软土地基与地下工程

FOUNDATION AND UNDERGROUND ENGINEERING IN SOFT GROUND

(第二版)

黄绍铭 高大钊 主编

孙更生 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

软土地基与地下工程/黄绍铭, 高大钊主编. —2 版.

北京: 中国建筑工业出版社, 2005

ISBN 7-112-07208-5

I. 软… II. ①黄…②高… III. ①软土地基—基础
(工种)②地下工程—工程技术 IV. ①TU471.8②TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 012609 号

软土地基与地下工程
FOUNDATION AND UNDERGROUND
ENGINEERING IN SOFT GROUND

(第二版)

黄绍铭 高大钊 主编

孙更生 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 70½ 字数: 1756 千字

2005 年 7 月第二版 2005 年 7 月第四次印刷

印数: 29056—33055 册 定价: 113.00 元

ISBN 7-112-07208-5

TU·6436(13162)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书在第一版的基础上介绍我国沿海软土地区，尤其是上海地区的软土工程特性及其地基基础和地下工程设计、施工的新经验，对地域范围和内容都有所扩大，其中的工程经验则反映了近 20 年来的新进展，章节编排上也作了较大的调整。全书内容包括：软土的工程特性、原位测试、天然地基、箱筏基础、桩基础、沉降控制复合桩基、地基处理、软土的动力特性与地基抗震、基础振动、基坑工程、沉井、盾构隧道、沉管隧道、顶管、减少地基变形的措施与环境保护、地面沉降等。

本书可供土建设计、勘察、施工、教学人员参考。

责任编辑：朱象清 王 梅

责任设计：刘向阳

责任校对：关 健 王金珠

序 言

改革开放以来,上海城市建设突飞猛进,年均数百万至上千万平方米建筑面积的居住建筑以及三千多幢高层平地拔起;地下铁道已有两条线路建成通车,多条线路在建;越江隧道已有数条通行。在软土地区建设如此重大的基础工程和地下工程难度非常高,因而成就辉煌。

综合反映上海地区上述技术成就的文献有两个:一个是上海市《地基基础设计规范》(简称规范);另一个是《软土地基与地下工程》专著(简称本书)。规范内容都是结论性的条文,其条文说明也是扼要的。本书则包含了规范的背景材料,较为详细,而且还介绍了国内外新技术,内容更丰富。规范自1963年初版,至1999年为第四版;本书在1984年初次出版,主编为编制规范的主要负责人,作者大多是修订规范的专家。今后设想规范修订一、二版后,接着编写本书新版。在一定条件下也可先写书,后修订规范。几年前酝酿编写本书第二版时,本人已年逾古稀,不宜再担任主编,推荐较年轻的上海现代建筑设计(集团)公司资深总工程师黄绍铭和同济大学高大钊教授担任,得到作者们和出版社的一致赞同。

上述两个技术文献,反映了上海软土工程的发展历史和国内外技术进步的历程;同时也反映了人才辈出、后浪推前浪,可喜的人才链,这些都具有可持续发展的意义。

对于上海软土地基与地下工程的发展,本人总结了三条主要体会,并举例说明。

第一,创新精神

面对高层、超高层的兴起,必须采用长桩,桩端入土深度最深的达到70多米,进入粉细砂持力层,而且还要穿过埋藏深度为40多米的厚层粉细砂,无法采用预制混凝土打入桩,因而陷入了困境。就在此时,与岩土工程关系不大的原上海凿井公司的专家与工人相结合,创造性地设想将凿井用的磨盘钻机改装成混凝土灌注桩的设备,经过试验终于成功,不仅开拓了该公司的业务;而且开创了桩基工程的新局面,目前桩长可达80多米,灌注桩工程队如雨后春笋,成为新兴行业。

地铁隧道施工在淤泥质土中进行,为了保证密布于隧道顶上的地下管线不被损坏,要求因盾构施工引起的地面沉降不超过2cm,没有现成的国外经验可借鉴,完全依靠隧道专家和工人的智慧,摸索、试验、总结出一整套的施工工艺而取得成功。上下两个隧道相隔只有一米多的软土,穿越后引起的沉降只有1cm,真是奇迹。

第二,实践第一

上海量大面广的居住建筑一般以采用6~7层的多层建筑为主,既避免了高层建筑过高、过多、过密的弊端,又节约土地资源。如果采用长桩,则浪费;采用短桩则没有科学的设计准则,也无法达到减少沉降的目的。设计专家们大胆设想并经过试点,采用预制混凝土小型桩取得成功,定名为沉降控制复合桩基,荷载由承台下桩与桩间土共同分担,按沉降控制要求确定用桩数量。桩型大多为小截面预制桩,要求桩端穿过淤泥质土,进入压

缩性相对较低的但不十分坚硬的粉质黏土层作为持力层。这样，保证桩与桩间土共同下沉，分担荷载，而沉降量不大，控制在 15cm 左右。由于在淤泥质土中容易打入或压入，噪声、挤土和振动较小，冲破了不能在市区使用预制桩的环保禁区。有理论，重实践，是创举。前几年全面推广，节约了大量资金和材料。经验需要理论提高，经验、理论、创新都在实践中实现，实践第一。

第三，变形控制

软土地区基础工程和地下工程的设计原则基本上是变形控制，天然地基、桩基必须进行沉降量计算，计算方法和容许值都是经过上百个建筑物的沉降观测资料分析而得。深基坑支护结构不仅要保证结构本身的稳定，而且要控制水平位移和墙外地表沉陷，防止相邻建筑物和地下管线的损坏。地基处理方案的取舍也取决于变形控制，成功的地基处理方案必须保证经过处理后的地基上的建筑物沉降量和不均匀沉降满足设计要求。

本书承蒙中国建筑工业出版社热忱邀稿，初版受广大读者的欢迎，向作者、出版社和读者表示由衷的感谢；并希望读者多提意见，作者可从中吸取营养，为第三版早作准备。

孙更生

二〇〇四年五月

第二版前言

本书第一版出版于1984年9月,其编写的宗旨是以介绍我国包括上海、天津、福建、浙江等地区在内的沿海软土地区,尤其是上海地区的软土工程特性及其地基基础和地下工程的设计、施工经验为主,着重介绍了上海地区从20世纪50年代至80年代初30年间所进行的大量工程实践经验和科研成果,其中许多内容是来自于60年代早期和70年代中期先后两次编制和修订上海市《地基基础设计规范》时所积累的技术资料,同时也概略地介绍了一些当时学术界和工程界正在探索的新理论和新技术。

从第一版出版至今已整整20年了,在这20年间,我国沿海软土地区,包括部分内陆软土地区,均出现了新一轮空前规模、并且持续至今的工程建设高潮。以上海地区为例,尤其是进入90年代后,量大面广、年均建成数百万甚至上千万平方米建筑面积的住宅建筑,至今总数已达3000多幢设有地下室的高层、超高层建筑,贯穿全市各个区县以地下铁道为主的城市轨道交通网以及多座跨越黄浦江的大桥和多条越江隧道等超大型工程的建设,既对软土地区的地基基础和地下工程提出了许多新的机遇和新的挑战,同时通过工程实践也获得了大量的新经验。在此期间,基于上海地区地基基础和地下工程的设计及与其相关的施工实践的需要,在全面调查总结上海地区20世纪80年代和90年代的工程实践经验和科研成果的基础上,曾分别于80年代后期和90年代,对上海市《地基基础设计规范》以及若干相关标准又先后进行了两次较大规模的编制和修订,同时也较系统地积累了一批有价值的资料。这些都为本书第二版的编著打下了坚实的基础。

本书第二版原则上仍遵循第一版的编写宗旨,即仍以介绍我国沿海软土地区尤其是上海地区的软土工程特性及其地基基础和地下工程的设计、施工经验为主。但本版在介绍具有地域性特点的软土工程特性时,对地域范围和内容都有所扩大;而在介绍工程经验时,则反映了很多近20年来在新一轮工程建设高潮中所取得的新进展,其中许多内容是来自于20世纪80年代后期和90年代后期先后两次较大规模编制修订上海市地基基础设计规范及其相关标准时所积累的有关资料。因此本版的章节编排在第一版的基础上作了较大调整,按照本版章节编排顺序,依次主要有:将第一版中“软土的一般工程特性”和“软土的流变性质”两章的内容合并为“软土的工程特性”一章,除继续保留介绍我国沿海软土工程特性外,增加了部分我国内陆软土工程特性内容,此外还新增了关于软土结构性及其工程意义的内容;将第一版中“浅基础地基的承载力”和“沉降计算”两章的内容合并为“天然地基”一章,同时介绍了已纳入上海市《地基基础设计规范》(DGJ 08—11—1999)的按概率极限状态设计原则计算天然地基承载力的有关内容;对第一版中“桩基础”一章的内容作了重新调整,本版该章重点介绍上海地区确定单桩和群桩竖向承载力的方法,增加了其主要内容已在上海地区得到实际应用的“单桩和群桩沉降计算”一节,此外,在汇集现行规范有关内容基础上,还新增了“桩基结构设计”一节内容;根据近10多年来沉降控制复合桩基这一新的地基基础形式在上海地区多层建筑中得到大量应用的实际现状,

本版新增了“沉降控制复合桩基”一章；根据近 20 年来地基处理工程得到极其广泛和迅速发展的实际现状，将第一版中“地基加固”一章的内容作了较大幅度的扩大和充实，章名改为“地基处理”；将第一版中“地震反应分析”和“土的液化”两章的内容合并为“软土的动力特性与地基抗震”一章，和第一版相比，内容作了较大更新，也更系统；根据近 10 多年来上海地区各种类型基坑工程得到超大规模迅速发展的实际现状，将第一版中与基坑工程有较密切关系的“降水”和“地下连续墙”两章的内容调整并扩大为“基坑工程”一章，该章以大量篇幅介绍了上海地区多个内容翔实、资料丰富的典型基坑工程实例，可供读者直接引用参考；本书第一版中“沉井”、“盾构隧道”、“沉管隧道”和“水下长距离顶管”等四章为地下工程方面的内容，本版修编中均根据近 20 年来上海地区地下工程迅速发展的实践中所积累的经验，作了不同程度的修改和充实，其中“水下长距离顶管”一章内容扩充并将章名改为“顶管”；基于近年来地基基础和地下工程活动与环境保护之间的关系越来越受到社会各界的关注，将本书第一版中“防止不均匀沉降等危害的措施”一章内容扩大，章名改为“减少地基变形危害的措施与环境保护”，该章在保留第一版中有关内容的基础上，以较大篇幅增加了由于沉桩、井点降水和基坑开挖等工程活动对环境可能造成的影响及预防措施的大量工程实例。经过上述章节编排上的调整后，本版除前言和技术名词索引外，共计十六章。

本版编写的作者分工如下：序言——黄绍铭、高大钊；第一章——高大钊；第二章——杨桂林；第三章——高大钊（第一、二、三、四节）、刘陕南（第五、六、七节）；第四章——朱百里、赵锡宏；第五章——宰金璋（第一、二、三、四、七节）、黄绍铭（第五、六节）；第六章——黄绍铭；第七章——叶观宝；第八章——王天龙；第九章——王天龙；第十章——高秀理（第一、二、三、四、五、七、八节）、王卫东（第六节）；第十一章——葛春辉；第十二章——金志靖、何自强；第十三章——杨国祥、刘千伟、杨我清；第十四章——王承德；第十五章——张耀庭；第十六章——施履祥。朱象清、王梅编写了技术名词索引。黄绍铭、高大钊、刘陕南对全书进行了统稿，岳建勇参加了第五章、第六章的统稿，王卫东参加了第十章的统稿。本书所用符号原则上参照上海市《地基基础设计规范》（DGJ 08—11—1999）的规定采用。

本版是在继承第一版的编写原则和基本格局的基础上写成的，第一版的作者中，许多都参加了本版的编写。但有的因为年事已高而没有参加本版的编写，也有几位作者已经作古，如郑大同先生、钱征先生和郑汉璋先生，他们对于这本颇具特色的专著所作的贡献，后人会永远铭记。

还需指出，如前所述，本版各章节的编写工作实际上都是建立在 20 世纪 80 年代和 90 年代大量工程实践经验和科研成果的坚实基础之上的，而每个工程和每项科研成果的成就都是参与工作的同志们辛勤劳动的结果，谨向他们致以衷心的感谢。

虽然本版各章节的作者都是在相应领域有一定专长的技术人员，但限于水平，不足和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

黄绍铭 高大钊

二〇〇四年五月

第一版前言

随着经济建设的蓬勃开展,我国在沿海软土地区,如上海、天津、福建、浙江等地,积累了大量的工程建设经验,特别是最近几年,在基础工程和地下建筑中成功地采用了一些新技术,对于各种理论的应用也进行了一些探索。同时,在工程实践中,由于土,特别是软土的复杂性,深感有效的测试手段不足,解决土力学及基础工程的实际问题必须强调理论计算与实践经验的结合,尤应重视工程实例和测试数据的分析。而软土作为地基或地下结构物的空间,在工程建设中往往遇到不少困难。因此,很有必要系统地分析这些工程实例与数据,认真地总结经验。

我国从工程实践得到的启示是:从事土力学及基础工程的科技人员的知识结构,在设计、勘察、施工以及地基、基础、地下工程等方面,既要根据工作需要以一项为主,又要有全面的知识,做到适应性较大,考虑问题较周到。这样才能更好地处理工程问题,为社会主义现代化建设作出更多的贡献。

根据上述设想与要求,本书着重介绍我国沿海软土地地区的地基、基础、地下工程的设计与施工经验,汇集和总结各种实例约150个,建筑物沉降观测资料近100份,各种测试和分析资料约160份,同时也概略地介绍一些土力学界正在探索的新理论和新技术,如地震反应分析、软土的流变性质、地基加固新方法等。本书内容既有软土地基和基础工程的基本问题,如沉降计算、地基承载力、桩基础、箱形基础和沉井等,又有地下连续墙、盾构隧道、沉管隧道、水下长距离顶管等地下工程新技术。既有土静力学,也有土动力学。既有个体工程的问题,也有涉及整个城市或建设地区的问题,如地面沉降以及利用积累的大量勘察资料编制地区性工程地质图集的经验等。

由于本书以介绍实践经验为主,对工程建设中的有关问题不可能面面俱到,但也考虑到在工业与民用建筑以及城市建设范围内,基本上照顾到土力学、基础与地下工程问题的完整性。

在拟订本书内容的计划时,曾请同济大学俞调梅教授、浙江大学曾国熙教授、中国建筑工业出版社李伯宁高级工程师、朱象清工程师给予指导;华东水利学院钱家欢教授对第二章软土的流变性质,交通部第一航务工程局科研所刘翼熊主任工程师对有关天津新港地区的内容提出了宝贵意见,特此致谢。

每个工程和每项科研工作的成就都是参与工作的同志们辛勤劳动的结果,我们还引用了许多单位的一些科研成果和技术总结,谨向这些同志致以衷心的感谢。

尽管编著者都是有关设计、教学、科研、施工工作的技术领导或从事本专业的技术人员,但限于水平,不足和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

本书的编著成员及分工如下:

孙更生(上海市城市规划建筑管理局副总工程师):第一章,第四章,第五章,第六章,第十二章第一节、第三节、第四节一、二、第五节、第七节;郑大同(同济大学教

授)：第八章；施履祥(上海市民用建筑设计院副总工程师)：第七章，第十一章；路平(上海市基础工程公司副总工程师)：第十六章；郑汉璋(同济分校高级工程师)：第十八章；钱征(交通部第一航务工程局科研所工程师)：第二章，第十二章第二节、第四节三、第六节；李珍烈(上海市基础工程公司工程师)：第十五章；朱百里(同济大学副教授)：第十三章第二节；赵锡宏(同济大学副教授)：第十三章第一节；胡文尧(同济大学副教授)：第九章；杨桂林(同济大学讲师)：第三章；曹名葆(同济大学讲师)：第十三章第三节；王天龙(同济大学讲师)：第十章；宰金璋(同济大学讲师)：第十四章；金志靖(上海市隧道建设公司工程师)：第十七章；王承德(上海市基础工程公司工程师)：第十九章。朱象清编制了主要符号表、技术名词索引和外国人名索引。

孙更生 郑大同
1983年8月

目 录

第一章 软土的工程特性	1
第一节 软土的定名及其成因类型.....	1
第二节 我国内陆软土的工程特性.....	2
第三节 我国沿海软土的物理力学性指标.....	8
第四节 上海软土的工程特性	18
第五节 软土的流变性及其工程意义	32
第六节 软土的结构性及其工程意义	48
第二章 地基土原位测试	64
第一节 载荷试验	64
第二节 十字板剪切试验	74
第三节 静力触探试验	81
第四节 标准贯入试验	105
第五节 其他原位测试简介	115
第三章 天然地基	125
第一节 地基基础设计的荷载条件与设计原则	125
第二节 天然地基承载力的确定方法	133
第三节 地基承载力的概率极限状态设计方法	148
第四节 软土地基承载力的特殊问题	154
第五节 软土地基沉降的一般规律	172
第六节 天然地基最终沉降量计算	182
第七节 建筑物的容许沉降量	199
第四章 箱筏基础	208
第一节 箱形基础的适用条件和工程实录	208
第二节 筏形基础的适用条件和工程实录	224
第三节 筏形基础	228
第四节 箱形基础	233
第五节 结构物与地基基础共同作用的分析	239
第五章 桩基础	254
第一节 概述	254
第二节 桩型	258
第三节 单桩竖向承载力	265
第四节 群桩竖向承载力	302
第五节 桩基沉降计算	307

第六节 桩基结构设计	324
第七节 桩基施工要点	336
第六章 沉降控制复合桩基	344
第一节 概述	344
第二节 主要受力性状的试验研究	348
第三节 主要计算假定及设计步骤	356
第四节 工程实例及应用效果简况	360
第五节 结语	366
第七章 地基处理	369
第一节 概述	369
第二节 换填法	376
第三节 强夯法	383
第四节 碎(砂)石桩	397
第五节 排水固结	402
第六节 灌浆法	417
第七节 水泥土搅拌法	428
第八节 高压喷射注浆法	441
第九节 土工合成材料	448
第十节 托换技术	455
第八章 软土的动力特性与地基抗震	468
第一节 概述	468
第二节 循环荷载下软土的应力应变关系	477
第三节 软土地基的地震反应分析	496
第四节 松散无黏性土的地震液化	521
第五节 软弱黏土在循环荷载作用下的永久变形和强度	554
第九章 地基基础振动	563
第一节 弹性半空间表面刚性圆盘的振动理论	563
第二节 基础振动实用计算方法	572
第三节 用于基础振动计算土性指标的确定	586
第四节 我国机器基础振动计算方法的实践和发展	594
第五节 地基基础振动的控制和隔离	602
第十章 基坑工程	611
第一节 概述	611
第二节 基坑工程勘察	611
第三节 基坑围护结构侧压力的计算与探讨	627
第四节 水泥土搅拌墙和自立式挡墙	639
第五节 板式支护体系	657
第六节 与主体工程地下结构相结合的基坑支护结构	691
第七节 基坑降水和土方开挖	718

第八节 圆形深基坑的变形和稳定性探讨	733
第十一章 沉井	745
第一节 概述	745
第二节 沉井的分类及用途	745
第三节 结构上的作用	747
第四节 沉井设计	750
第五节 沉井下沉计算	752
第六节 顶管井的受力分析	756
第七节 沉井设计中问题的探讨	759
第八节 沉井施工中问题的探讨	773
第十二章 盾构隧道	789
第一节 概述	789
第二节 盾构的构造及壳体的尺寸计算	791
第三节 盾构的分类与开挖方法	801
第四节 圆形隧道装配式衬砌设计	825
第五节 装配式钢筋混凝土衬砌防水	844
第六节 地表变形及隧道沉降	848
第十三章 沉管隧道	857
第一节 概述	857
第二节 沉管法隧道的总体方案设计	862
第三节 沉放管段设计要点	871
第四节 沉管隧道管段结构制作	881
第五节 基槽浚挖	887
第六节 管段的沉放与连接	891
第七节 基础处理与回填覆盖	903
第八节 国内外沉管隧道工程实例	909
第十四章 顶管	921
第一节 概述	921
第二节 管材	924
第三节 顶管主要设备	931
第四节 顶管施工技术	954
第五节 顶管井	969
第六节 顶管阻力分析	979
第七节 施工质量	983
第十五章 减少地基变形的措施与环境保护	985
第一节 减少地基变形的地基基础措施	986
第二节 使建筑结构适应地基变形的措施	998
第三节 沉桩对周围环境的影响及防治措施	1022
第四节 井点降水对周围环境影响及防治措施	1051

第五节 基坑开挖影响及防治措施	1061
第十六章 地面沉降	1083
第一节 国外地面沉降情况	1083
第二节 上海地面沉降概况	1090
第三节 计算	1098
第四节 控制上海市区地面沉降的措施	1104
技术名词索引	1108

第一章 软土的工程特性

软土是一种区域性的特殊土，是在一定的地质条件下形成的，具有变形大、承载力低等特点。在软土地区的工程建设需要特别重视了解和研究软土的工程特性，采取有针对性的技术措施以使建设工程得到技术先进、经济合理和使用安全的效益。

软土地区是指在建筑物影响的深度范围内存在一定厚度的软土，并对工程建设可能产生不良作用的地区。由于不同的成因条件，软土地区的土层构造并不相同，各层土的软硬程度不同，也可能出现个别或少数的土层是比较坚硬或密实的情况。

软土在世界范围内分布极广，在软土分布的地区曾发生过许多重大的工程事故，在总结这些事故的基础上，发展了土力学的理论，例如，瑞典圆弧滑动法是在分析 Stigberg 码头破坏原因的过程中产生的。可以毫不夸张地说，现代意义的土力学是太沙基(Terzaghi)在研究软土的工程特性的基础上提出了土的有效应力原理和土的固结理论而建立的。正是软土地区的工程事故和处理经验提供了土力学这门学科发展的客观条件。我国的软土主要分布在沿海地区，在内陆和山区也有分布。特别是沿海地区，由于工程建设的发展比较快，建设的规模也比较大，软土地基的问题非常突出，曾经发生过不少的工程事故，也取得了许多宝贵的经验，丰富了土力学的宝库。

软土的工程性质取决于软土的成因和成分，也取决于地层的构造，即软土的厚度、埋藏深度及其与上覆或下卧的比较坚硬土层的相对位置，因此在研究软土的工程性质时，必须注意其成因类型及构造。

第一节 软土的定名及其成因类型

一、软土的定名

软土在英语词汇里，习惯称为 Soft Clay，译为软黏土。我国通常称为软土，在浅层的地基中分布有软土的地区，称为软土地区。

《岩土工程名词术语标准》(GB/T 50279—98)^[1.1]的解释是：“软黏土，Soft Clay，天然含水率高，呈软塑到流塑状态，具有压缩性高、强度低等特点的黏土”。在这同一标准中，还给出了另一个术语：“淤泥，Muck，在静水或缓慢流水环境中沉积，经生物化学作用形成的土。”

《建筑岩土工程勘察基本术语标准》(JGJ 84—92)^[1.2]的解释是：“软土，Soft Clay，天然含水量大、压缩性高、承载力低、软塑到流塑状态的黏性土。”

《岩土工程勘察规范》^[1.3](GB 50021—2001)将软土划归为“特殊土”，定名的标准规定为“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、泥炭质土等。”

二、软土的成因与分布

在全世界主要河流的三角洲都分布有厚层的软黏土，这些河流包括尼罗河、密西西比河、莱茵河、易北河、长江、恒河等。但通常认为北欧诸国(丹麦除外)、加拿大、美国北部(芝加哥和波士顿)和墨西哥城都是典型软黏土的主要分布地区。

世界上著名的软土如挪威的 Drammen 黏土和加拿大的 Leda 黏土，灵敏度超过 10 甚至更高，这种称为超灵敏黏土或称为“快黏土”。墨西哥城的黏土含水量也很大，高达 400% 以上，孔隙比达 10 以上，由于抽汲地下水引起的地面沉降最大已超过 8m。

我国软土的分布，按软土的区域性可分为沿海软土、内陆软土和山区软土。不同成因的软土，其物质组成、物理性质和力学性质都有一定的差别。但在我国尚未大面积地发现如墨西哥城黏土那样高的孔隙比或灵敏度超过 10 以上的超灵敏黏土。

我国沿海地区分布有三角洲相沉积的软土，如长江三角洲、瓯江三角洲、闽江三角洲和珠江三角洲等。当河流流至海洋时，流速急剧减小，因此河水所携带的沉积物质在河口沉积，以这种方式在堆积在陆相和海相环境边界上的沉积物形成了三角洲。三角洲相沉积的软土，其主要特点是厚度比较大，黏性土和砂土或粉土相间成层，土层的厚度和工程性质一般比较均匀。在沿海地区的软土，除了三角洲相外，还分布有泻湖相和滨海相等成因类型的软土。

在内陆地区，河流相沉积软土沿江河分布非常广泛，主要是由于河流改道泛滥期形成的沉积物和河岸沉积物构成的冲积平原。这种沉积物都具有层理和纹理特征，有时夹细砂层，分布的范围比较小，土层厚度变化比较大，一般不会遇到很厚的均匀黏土层。

在内陆和山区，还分布有湖相沉积和冰湖相沉积。湖相沉积物是所有沉积物中成分变化最大的，通常含有大量的黏土颗粒，但在湖边缘处的沉积物一般是较粗的颗粒。冰湖沉积物常常由主要为粉粒的浅色土层和主要含黏粒的深色土层交替组成，具有这种层理的黏土沉积物称为纹泥，一层纹泥相当于一年的沉积，夏季沉积的土层平均约有 80% 的粒径大于 $2\mu\text{m}$ ，而冬季的沉积含黏土很多，约有 80% 左右的粒径小于 $2\mu\text{m}$ 。

第二节 我国内陆软土的工程特性

我国内陆的幅员非常广阔，河流纵横，大小湖泊星罗棋布，在江河流域和湖泊周围散布着各种成因类型的软土，在工程建设中也经常需要处理软土地基带来的工程问题。只是由于内陆软土的类型复杂，分布比较分散，工程项目也比较分散，对内陆软土工程特性的系统研究没有象对沿海软土的研究那么充分。

下面从一些实际工程场地的软土的工程性质指标的范围及土层的剖面了解内陆软土的特性。

一、内陆河流相沉积的软土

内陆河流相沉积的软土主要分布在大江大河的中下游的阶地或河漫滩上，与其他较粗颗粒的土交替成层，软土厚度不大且分布不均匀，因而产生的沉降很不均匀，对工程不利。河流相沉积物常夹薄层粉砂，有利于地基处理时水平向排水。除牛轭湖或沼泽外，一般较少含腐殖质或植物根系，有利于采用水泥加固土。平面分布范围比较局限，在比较大的工程场地可能局部出现，常需分段处理。

如安徽庐江至铜陵高速公路在长江北岸有 3.5km 的路段穿越软土地基区域,该区域处于长江下游河漫滩平原地带,海拔 5~8m,地势低平坦荡,水网交错,形成了洪冲积的河流相软土,厚度 15~25m,分布极其不均匀,土层中夹条带状或透镜体状的粉砂,厚度为 1.5~3.5m 不等。软土的天然孔隙比平均 1.2~1.3,最大为 2.2,含水量平均 40%以上,最大为 85.6%,饱和状态,压缩系数大于 0.5,最大 2.51,灵敏度最大为 7.6,属高灵敏度软黏土,软土的平均指标见表 1-1。由于高速公路的运行要求,对工后沉降的控制标准要求比较高,而软土地基的沉降量既大而又不均匀,为了控制软土地基的沉降和不均匀沉降,必须对软土地基进行地基加固处理或者控制路堤的堆载速度。

铜陵大桥北岸长江下游河漫滩软土的平均指标

表 1-1

含水量 %	孔隙比	液性指数	压缩指数	直剪快剪		直剪固快		不排水剪		三轴固结快剪				无侧限	
				c_u (kPa)	φ_u (°)	c_{cu} (kPa)	φ_{cu} (°)	c_u (kPa)	φ_u (°)	c_{cu} (kPa)	φ_{cu} (°)	c'_{cu} (kPa)	φ'_{cu} (°)	q_u (kPa)	S_t
41.2	1.13	1.57	0.64	17	2.9	18	10.2	22.3	7.1	36.9	17.1	14.9	30.9	54	6.2

又如在长江的北岸,京九铁路孔垄至九江大桥北 15km 范围为软土地基,为了研究路堤的工后沉降,进行了筑堤试验,研究塑料排水板加固和水泥粉喷桩加固软土地基^[1,4]。场地为长江北岸 I 级阶地,地基土为长江洪积层,由粉质黏土、粉土与淤泥质黏土交替成层,土层厚度变化比较大,各层土的特征如下:

1. 粉质黏土 黄红色—黄褐色,软塑—硬塑,层底深 0~4.75m;
2. 淤泥质黏土 青灰—深灰色,软塑—流塑,层底深 1.8~7.05m;
3. 粉质黏土 青灰色,软塑,层底深 4.75~8.8m;
4. 粉土 青灰色,软塑—硬塑,夹薄层粉砂及黏土,层底深 6.6~10.0m;
5. 淤泥质粉质黏土 青灰色,流塑,局部夹薄层粉砂,层底深 7.45~12.45m;
6. 粉土 青灰色,软塑—流塑,层底深 10.0~13.7m;
7. 粉质黏土 青灰色,软塑。

各层土的物理力学指标见表 1-2。

九江大桥北岸 I 级阶地冲积层软土的工程性质

表 1-2

	含水量 w (%)	重 度 γ	孔 隙 比 e	塑 性 指 数 I_P	液 性 指 数 I_L	固 结 系 数 C_v	压 缩 系 数 a	直 剪				三 轴		无侧限 抗压 强度 q_u	灵敏 度 S_t
								快 剪		固 快		不排水剪			
								c_u (kPa)	φ_u (°)	c_{cu} (kPa)	φ_{cu} (°)	c_u (kPa)	φ_u (°)		
粉 质 黏 土	34.3	18.9	0.94	16.9	0.78	10.7	0.48	11.3	19.0	16.0	20.0	36.0	10.8	—	—
淤泥质黏土	43.7	17.9	1.20	26.8	1.33	0.55	0.68	16.3	3.68	3.5	24.0	18.0	2.0	81	1.84
粉 质 黏 土	27.4	19.7	0.76	10.2	0.69	27.7	0.33	23.7	24.7	—	—	1.0	41.3	119	2.53
粉 土	26.0	19.6	0.73	6.4	0.78	15.6	0.18	19.0	28.2	4.0	39.4	30.0	3.3	—	—
淤泥质黏土	37.5	18.6	1.05	15.7	1.13	3.54	0.71	7.0	12.4	6.0	22.5	18.0	38.9	87	7.25
粉 土	23.9	19.9	0.69	6.7	0.56	15.6	0.25	27.5	25.8	13.5	24.9	—	—	—	—
粉 质 黏 土	31.9	19.0	0.87	14.0	0.70	19.0	0.23	20.3	16.5	19.0	21.3	—	—	—	—