

软土地基与地下工程

孙更生 郑大同 主编

中国建筑工业出版社

软土地基与地下工程

孙更生 郑大同 主编

中国建筑工业出版社

本书介绍我国沿海软土地区的地基基础和地下工程的设计、施工经验，汇集和分析了各种实例约150个、建筑物沉降观测资料约100份、试验资料约160份。全书内容包括软土的流变性质、原位测试、地基承载力、沉降计算、地面沉降、地震反应分析、土的液化、基础振动、降水、地基加固、箱形基础、桩基础、沉井、地下连续墙、盾构隧道、沉管隧道、水下长距离顶管等。

本书可供土建设计、勘察、施工、教学人员参考。

软土地基与地下工程

孙更生 郑犬同 主编

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 46 字数: 118千字

1984年9月第一版 1984年9月第一次印刷

印数: 1—12,500册 定价: 5.10元

统一书号: 15040·4610

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。

我们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

一九八三年八月

主 要 符 号

A ——面积; 振幅	d ——直径; 砂井间距
$A(\omega)$ ——传递函数	d_{10} ——有效粒径
a ——加速度	E ——弹性模量; 强夯夯击能量
a_{1-2} —— $1 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$ 压力下的压缩系数	E_a ——主动土压力
a_0 ——频率比	E_s ——压缩模量
a_{vc} ——压缩系数	E_t ——切线模量
a_{vs} ——回弹系数	E_0 ——变形模量
B ——宽度; 修正的质量比	E_{1-2} —— $1 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$ 压力下的压缩模量
b ——质量比	e ——孔隙比;
C ——附加压力系数	偏心距;
C_c ——压缩指数	贯入度
C_r ——前期固结比	F ——面积; (标贯)侧部阻力; 地震力
C_x ——动力基床系数(水平振动); 抗剪刚度系数	F'_s ——抗滑安全系数
C_z ——动力基床系数(竖向振动); 抗压刚度系数	$E(t)$ ——锤击力
C_ϕ ——动力基床系数(摇摆振动); 抗弯刚度系数	f ——位移函数; 摩阻力
C_θ ——动力基床系数(扭转振动); 抗扭刚度系数	f_s ——侧壁摩阻力
c ——内聚力; 粘滞阻尼系数	G ——剪切模量
c_a ——粘附力	G_s ——土粒比重
c_c ——临界阻尼系数	g ——重力加速度
c_h ——横向固结系数	H ——深度、高度、厚度
c_R ——残余强度	h ——深度、高度、厚度
c_r ——径向排水固结系数	I ——惯性矩
c_u ——三轴不排水抗剪强度	I_L ——液性指数
c_v ——竖向固结系数	I_p ——塑性指数
c_{vR} ——第 N 次循环粘滞力	J ——惯性矩
D ——直径; 基础埋深; 阻尼比; 抗弯刚度	J_c ——阻尼系数
D_r ——相对密度	K ——安全系数; 贯入侧压力系数; 复圆波数
	K_c ——十字板常数
	K_p ——桩的刚度系数
	K_r ——基础相对刚度系数

K_0 ——侧压力系数;
 静止土压力系数
 K'_0 ——有效侧压力系数
 K_1 ——抗剪强度增长率
 $[K]$ ——刚度矩阵
 k ——基床系数;
 渗透系数;
 地震系数;
 弹簧系数;
 圆波数
 k_v ——竖向渗透系数
 L ——长度、距离
 l ——长度、距离
 M ——力矩;
 震级;
 动力放大系数
 m ——质量;
 经验系数
 m_s ——沉降量经验系数
 N ——标准贯入击数;
 循环次数
 N_c ——承载力系数
 N_q ——承载力系数
 N_r ——承载力系数
 n ——摩阻比
 OCR——超固结比
 P ——荷载、力
 p ——荷载、压力
 p_c ——前期固结压力;
 临界压力
 p_l ——塑流压力
 p_t ——极限压力
 p_s ——比贯入阻力
 p_x ——线荷载
 p_o ——土的覆盖压力;
 基底附加压力;
 载荷试验比例界限压力
 Q ——剪力
 Q_c ——单桩容许承载力
 Q_b ——桩端总阻力
 Q_{bu} ——桩端总极限阻力
 Q_s ——桩周总摩阻力
 Q_{su} ——桩周总极限摩阻力

Q_u ——桩的极限承载力
 Q_0 ——地基竖向极限荷载;
 地震荷载
 q ——土反力;
 基础侧向超载;
 加荷速率
 q_b ——桩端阻力
 q_{bu} ——桩端极限阻力
 q_c ——(触探)锥尖阻力
 q_j ——地基竖向极限承载力
 q_l ——桩端阻力稳值
 q_n ——桩的负摩阻力
 q_s ——桩周摩阻力
 q_{su} ——桩周极限摩阻力
 q_u ——无侧限抗压强度
 R ——半径;
 距离;
 (标贯)端部阻力
 $[R]$ ——地基容许承载力
 R_D ——动阻力
 R_l ——极限荷载
 R_u ——静阻力
 R_o ——临塑荷载
 $R_{1/4}$ ——界限荷载
 r ——半径
 S ——反应谱
 S_r ——灵敏度
 S_r ——饱和度
 s ——沉降量;
 总强度
 $\dot{S}$ ——沉降速率
 s_g ——直剪快剪强度
 s_v ——十字板抗剪强度
 s_o ——天然抗剪强度
 T ——周期
 t ——时间
 U ——固结度;
 周长
 u ——孔隙水压力;
 位移分量
 V ——体积
 v ——速度;
 位移分量

目 录

前言

主要符号

第一章 软土的一般工程特性	1
第一节 细粒土的工程分类	1
第二节 我国软土的物理力学性指标	7
第三节 上海软土的特性	8
第四节 福建省软土的特性	19
第五节 天津塘沽新港区软土的特性	25
第二章 软土的流变性质	27
第一节 软土的流变性质	28
第二节 软土的长期强度	38
第三节 软土的流变模型	49
第四节 流变在土坡稳定方面的应用	54
第五节 流变在沉降计算中的应用	55
第三章 原位测试	65
第一节 十字板剪力试验	65
第二节 静力触探试验	72
第三节 标准贯入试验	94
第四节 其他原位测试简介	104
第四章 浅基础地基的承载力	111
第一节 地基的极限承载力	111
第二节 地基的临界荷载	122
第三节 各种承载力公式对软土地基适用性 的分析	123
第四节 以变形为控制因素的软土地基 承载力	124
第五节 软土地基的载荷试验	126
第六节 加荷速率对实际工程的影响	134
第七节 软土地区工程地质图集的编制 方法	137
第五章 沉降计算	142
第一节 国内外地基的沉降计算方法	142
第二节 用建筑物沉降观测成果推算最终沉 降量的经验公式	143
第三节 几种最终沉降量计算方法的计算结果 与实测资料的比较	149

第四节 分层总和法	149
第五节 容许沉降量	163
第六节 大面积地面堆载引起的地基附加 沉降	165
第六章 防止不均匀沉降等危害 的措施	173
第一节 减少地基沉降和不均匀沉降的 措施	174
第二节 增强上部结构对地基变形适应能力的 措施	183
第三节 防止动荷载引起地基不均匀沉降 的措施	195
第四节 施工中应注意的问题	206
第七章 地面沉降	214
第一节 国外地面沉降情况	214
第二节 上海地面沉降概况	221
第三节 计算	228
第四节 控制上海市区地面沉降的措施	234
第八章 地震反应分析	236
第一节 概述	236
第二节 土的本构关系	238
第三节 地基地震反应计算	259
第四节 挡土墙的动土压力	283
第九章 土的液化	288
第一节 土液化机理	289
第二节 影响土液化特征的因素	295
第三节 水平地层中土的地震液化	300
第四节 边坡、填方以及结构物下水平地层 的液化	314
第五节 对无粘性土液化破坏的防治措施	316
第六节 饱和粘性土在循环荷载下的强度	316
第七节 土液化的实验方法	317
第十章 基础振动	323
第一节 土与基础的振动理论	323
第二节 软土地基上的基础振动计算	332
第三节 用于振动计算的土性指标	346

第四节 我国机器基础振动计算实践	354	第十六章 地下连续墙	589
第十一章 降水	363	第一节 概述	589
第一节 降水技术的发展历史	363	第二节 施工工艺	593
第二节 井点施工技术	364	第三节 槽段钢筋混凝土施工	607
第三节 工程实例	375	第四节 附属结构施工与基坑开挖	609
第四节 计算实例	379	第五节 结构计算	610
第十二章 地基加固	385	第十七章 盾构隧道	617
第一节 概述	385	第一节 概述	617
第二节 强夯法	387	第二节 盾构的构造及壳体尺寸计算	619
第三节 振动水冲法	405	第三节 盾构的分类与开挖方法	629
第四节 预压法	414	第四节 圆形隧道装配式衬砌设计	641
第五节 旋喷法	435	第五节 装配式钢筋混凝土衬砌防水	661
第六节 深层水泥系搅拌法	443	第六节 地表变形及隧道沉降	665
第七节 砂桩加固上海软土适用性的探讨	449	第十八章 沉管隧道	670
第十三章 箱形基础	456	第一节 概述	670
第一节 箱形基础的地基强度与变形	456	第二节 沉管结构	673
第二节 箱形基础的计算	468	第三节 变形缝与防水措施	677
第三节 地基基础与上部结构的共同作用	482	第四节 管段沉设与水下连接	683
第十四章 桩基础	502	第五节 管段接头	690
第一节 桩型和施工技术的发展	502	第六节 沉管基础	693
第二节 桩的荷载传递分析	511	第十九章 水下长距离顶管	702
第三节 软粘土中摩擦桩承载力的增长	516	第一节 概述	702
第四节 负摩阻力	521	第二节 工具管——三段双铰型工具管的构造及性能	703
第五节 桩基承载力的深度效应	526	第三节 中继环	704
第六节 确定单桩承载力的动测法	532	第四节 SFEC顶管系统	706
第七节 群桩工作原理	546	第五节 主要施工技术	710
第十五章 沉井	555	第六节 工程实例——甬江穿越工程	711
第一节 概述	555	外国人名索引	716
第二节 沉井结构计算要点	556	技术名词索引	718
第三节 沉井设计中问题的探讨	561		
第四节 沉井施工中问题的探讨	574		

第一章 软土的一般工程特性

软土是一种简称，主要是由细粒土组成，它表明就地基土的总体而言是软弱的，但实际上各土层的软弱程度有所不同，甚至个别或少数土层较密实。

研究软土一般工程特点的主要目的是逐步认识它对工程的反应和危害的规律以及相应的防治措施，使在软土地区的建设得到技术先进、经济合理和使用安全的效益。

软土地基的承载力低，承受荷载后变形大，在建设中如有疏忽，必然导致建筑物的开裂，甚至损坏和失稳。但是事在人为，解放后我国土力学界进行了大量科学研究，对软土的特性有了较多认识，在地基的设计、施工和加固等方面积累了很多经验。但限于篇幅，本章仅介绍上海、福建、天津等沿海地区的软土，在实用上对工程建设有较大影响的一般工程特点。

在国外对软土地基也有很多研究和处理经验，例如世界闻名的软土地区墨西哥城，地基是火山灰沉积，表土层为5m厚的人工填土和砂夹卵石层，其下直至30m深为超高压缩性软粘土，孔隙比高达7~12，含水量为150~600%。由于在墨西哥城推广了地下连续墙施工方法^[1.1]，克服了软土带来的施工困难，深度可达17~18m。该城的地下铁道第一期工程41.5公里，只花了一年四个月就建成。目前地下连续墙施工方法还应用于高层建筑的地下部分，可减少基础的附加压力，并在基础下打桩，以减少建筑物的沉降量。

在特定条件下，软土也可能对地下工程是有利的，例如在上海建设第一条黄浦江水底隧道时，利用了软土容易挤出的特点，采用闭胸盾构法推进，不仅免去了进土的运输和处理，而且取消了气压施工，大大加速了施工进度。

第一节 细粒土的工程分类

小于0.1mm颗粒占土样总重50%以上的土称为细粒土。本节仅阐述目前国内外常用的细粒土工程分类法以及工程界的反映。

一、塑性图分类法

(一) 卡萨格兰德 (A. Casagrande) 塑性图分类法^[1.2]

卡萨格兰德于1947年提出塑性图分类法，此法以阿太堡界限，即液限 w_L （用碟式仪求得）和塑性指数 I_P 分类，如图1-1所示。

图中绘有A、B两条直线，A线的方程式为： $I_P = 0.73(w_L - 20)$ ；B线的方程式为： $w_L = 50\%$ 。塑性图分类中的代号和名称如表1-1所示。

A线的上侧为粘土，下侧为粉土。B线左侧为低塑性土，右侧为高塑性土。A、B两线相交，将塑性图分成四个区域：CL为低塑性粘土区，CH为高塑性粘土区，ML为低塑性粉土区，MH为高塑性粉土区。此外，还有 $I_P = 4$ 和 $I_P = 7$ 两条水平短线与A线联合组成

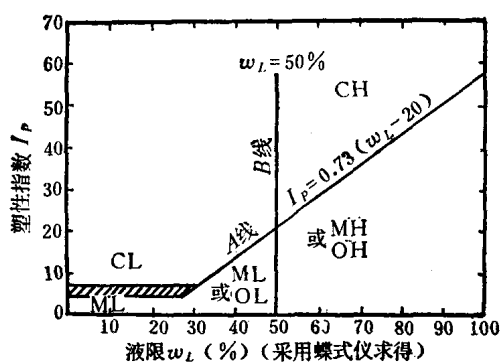


图 1-1 卡萨格兰德塑性图

塑性图中的代号和名称 表 1-1

名 称	成 分			塑 性	
	粘 土	粉 土	有机质	高	低
代 号	C	M	O	H	L

的区是CL与ML的搭界区。分类时，按实测的土的液限及塑性指数点在图上，就可根据分区定名。有机土具有臭味及深灰或黑色的特征，易与无机土区分开来。

自从卡萨格兰德提出塑性图分类法后，已被很多国家采用，各国塑性图所定A线的位置是一致的，只是按液限值定的塑性分级有些不同。

美国的ASTM法 (D-2487-69) 最为简单，以 $w_L = 50\%$ 为界，将土分为低塑性 (L) 和高塑性 (H) 两级。

西德 (DIN-18196-66) 按液限分为三级： $w_L < 35\%$ 为低塑性 (L)； $w_L = 35\% \sim 50\%$ 为中等塑性 (M)； $w_L > 50\%$ 为高塑性 (H)。

英国修正案-68 (BS-CP-2001) 分得最详细，共分为六级。在B线 ($w_L = 50\%$) 左侧分成无塑性 (N)、低塑性 (L)、中等塑性 (I) 三级；在B线右侧分成高塑性 (H)、非常高塑性 (V)、极高塑性 (E) 三级。

日本统一分类法 (JUSC-72) 与美国一致。1969年公布的草案中，曾提出结合其本国特点，在塑性图上除A、B两线外，增加C线 ($I_P = 20$) 及D线 ($I_P = w_L - 50$) 两条线，但在讨论中看法未统一而作罢。

(二) 用瓦西里耶夫 (A.M.Василиев) 法求得的液限 w_{LV} 与用卡萨格兰德法求得的液限 w_{Lo} 的关系

液限试验的方法是阿太堡 (A. Atterbery) 于1911年提出的，但应用于农业。卡萨格兰德于1932年应用于土工试验，这就是大家都很熟悉的碟式法。

1942年瓦西里耶夫提出了另一种液限试验方法，也称锥式法。目前世界各国分别采用这两种方式进行试验。但由于方法不同，求得 w_{Lo} 时土样的抗剪强度为 27g/cm^2 ，而求得 w_{LV} 时为 84g/cm^2 ， $w_{LV} < w_{Lo}$ ，为此通过大量试验研究两者的关系是必要的。

自1971年开始，施考贝克 (J.Skopek) 和泰尔-斯吉潘扬 (G.Ter-stepanian) 用557个土样进行了试验^[13]，液限幅度为 $17 \sim 382\%$ ，得出 w_{LV} 与 w_{Lo} 的关系曲线R，如图1-2所示。

曲线R的方程式为：

$$w_{LV} = \frac{324 w_{Lo}}{w_{Lo} + 324} \quad (1-1)$$

相关系数为0.87。

在 $w_{LC}=20\sim 100\%$ 范围内 可视
为直线 S ，其方程式为：

$$w_{LV}=6.9+0.71w_{LC} \quad (1-2)$$

在实用上可进一步简化为：

$$w_{LV}=0.7w_{LC}+7 \quad (1-3)$$

或 $w_{LC}=1.4w_{LV}-10$

我国交通部科学研究院公路所土工组^①根据653个土样的试验结果，得出 w_{LV} 与 w_{LC} 的关系式如下：

$$w_{LV}=0.65w_{LC}+7.44 \quad (1-4)$$

式 (1-4) 的相关系数 $r=0.91$

我国有关科研单位根据大量统计资料， w_{LV} 与 w_{LC} 的关系可表达为

$$w_{LV}=a+bw_{LC} \quad (1-5)$$

式中 a 与 b 是经验常数，搜集到的国内外资料如表1-2所示。

经验常数 a 、 b 值

表 1-2

序 号	a	b	资 料 来 源 与 说 明
1	5.59	0.7	南科所(1957)，84个试样， $I_P=7\sim 51.4$
2	2.5	0.8	昆明冶金设计院，8个试样， $w_L=22\sim 93\%$
3	5.1	0.69	Stefanoff(1958)，保加利亚天然土
4	3.64	0.76	Feda(1962)，夹砂高岭粘土
5	4.4	0.69	Piaskowski(1963)，波兰天然土
6	7.7	0.72	Skopek(1971)，236个试样， $w_L\leq 100\%$
7	7.0	0.70	Skopek与Ter-Stepanian(1975)，236个试样， $w_L=20\sim 100\%$

(三) 我国塑性图的特点^②

水利电力部《土工试验规程SDS01-79》采用卡萨格兰德塑性图分类法，但换算成采用锥式仪求得的试验数据，将旧塑性图变换为新塑性图。

1. 指标关系

设由 w_{LC} 与 w_{LV} 分别换算的塑性指数为 I_{PC} 与 I_{PV} ，则有：

$$I_{PC}=w_{LC}-w_P \quad (1-6)$$

$$\begin{aligned} I_{PV} &= w_{LV}-w_P=(a+bw_{LC})-w_P \\ &= I_{PC}+(b-1)w_{LC}+a \end{aligned} \quad (1-7)$$

2. 一点在新旧塑性图上的座标

如图1-3所示，设在旧塑性图上有一点 M ，则在新塑性图上的相应点为 $\bar{M}$ ，则 $\bar{M}$ 的座标为：

$$X=a+bx \quad (1-8)$$

$$Y=I_{PV}=w_{LV}-w_P=y+(b-1)x+a \quad (1-9)$$

① 交通部科学研究院公路所土工组：土的液限、塑限测定方法的商榷，1979年。

② 王正宏、南京大学李生林：我国统一土分类法的建议方案，华北水利水电学院，1979年。

3. 换算后的A线方程式

(1) 一般方程: 设在旧塑性图上A线的方程为:

$$y = D + Ex \quad (1-10)$$

由式(1-8), 有 $x = \frac{X-a}{b}$ (1-11)

将式(1-10)、(1-11)代入(1-9), 得:

$$\begin{aligned} Y &= D + Ex + (b-1) \frac{X-a}{b} + a \\ &= \frac{E+b-1}{b} X + D + \frac{a}{b}(1-E) \end{aligned} \quad (1-12)$$

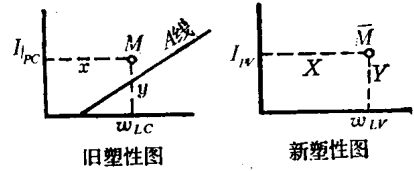


图 1-3

由式(1-12)可见, 在新塑性图上, A线仍为一直线。

在旧塑性图上, 当 $I_{p0} = 0$, $w_{L0} = 20$; 当 $I_{p0} = 30$, $w_{L0} = 60$, 代入式(1-10), 得:

$$D + 20E = 0$$

$$D + 60E = 30$$

解方程, 得 $D = -15$, $E = \frac{3}{4}$

代入式(1-12), 得:

$$\begin{aligned} Y &= \left(1 + \frac{E-1}{b}\right) X + \left[D + \frac{a}{b}(1-E)\right] \\ &= \left(1 - \frac{1}{4b}\right) X + \left(-15 + \frac{a}{4b}\right) \end{aligned} \quad (1-13)$$

(2) 数字方程: 将表1-2中所列 a 、 b 值代入式(1-13), 可得新塑性图中的A线方程, 如表1-3所示。

表1-3中七个直线方程十分接近, 根据它们的斜率与截距的平均值, 可得新A线的方程式如下:

$$Y = 0.66X - 13.2$$

$$\text{或 } I_{pv} = 0.66w_{Lv} - 13.2$$

$$= 0.66(w_{Lv} - 20) \quad (1-14)$$

B线方程: 旧塑性图中B线的方程式为 $w_{L0} = 50$, 将表1-2中的 a 、 b 值及 $w_{L0} = 50$ 代入式(1-5), 取其平均值得:

$$w_{Lv} = 41.3\% \approx 42\%$$

考虑到A、B两线划分的土类过于简单, 又增加了相应于 $w_{L0} = 30\%$ 的C线, 与其对应的新方程式为 $w_{Lv} \approx 26\%$ 。新塑性图的另一条分界线为 $I_{pv} = 4$, 取代了旧塑性图的 $I_{p0} = 4$ 和 $I_{p0} = 7$ 两条短线。新塑性图如图1-4所示。

目前国内土力学界对于 SDS01-79 塑性图 (图1-4) 的反应: 一般认为塑性图分类法考虑了细粒土中的有机质和土的塑性指数的影响, 比单纯按塑性指数分类有所进步。但是, 也有学者认为我国幅员辽阔, 土类繁多, 需要大量的试验数据才能得出更符合我国实际情况的塑性图。有的学者^[1,4]根据沿海地区1500个有机土 (灼失量一般在5~10%) 土样的试验资料整理分析, 统计了 $I_p \sim w_L$ 的回归方程如下:

天津地区 (包括: 大港、塘沽、新港等地)

A 线 方 程 表 1-3

序号	$\frac{1}{4b}$	$\frac{a}{4b}$	$1 - \frac{1}{4b}$	$-15 + \frac{a}{4b}$	A 线 方 程 (新塑性图)
1	0.36	2.0	0.64	-13	$Y=0.64X-13$
2	0.31	0.78	0.69	-14.2	$Y=0.69X-14.2$
3	0.36	1.84	0.64	-13.2	$Y=0.64X-13.2$
4	0.33	1.2	0.67	-13.8	$Y=0.67X-13.8$
5	0.36	1.54	0.64	-13.5	$Y=0.64X-13.5$
6	0.35	2.7	0.65	-12.3	$Y=0.65X-12.3$
7	0.36	2.52	0.64	-12.5	$Y=0.64X-12.5$

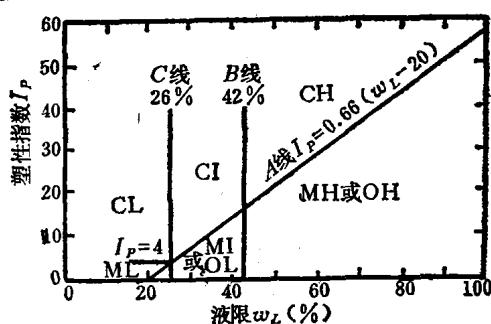


图 1-4 新塑性图 (水利系统)

$$I_p = 0.68(w_L - 12.5), w_L = 24 \sim 52$$

浙江地区 (包括: 温州、宁波、嘉兴、绍兴等地)

$$I_p = 0.78(w_L - 15.8), w_L = 30 \sim 60$$

上海地区 $I_p = 0.74(w_L - 16.8), w_L = 30 \sim 55$

福建地区 (包括: 沿海地区及福州市)

$$I_p = 0.55(w_L - 10.9), w_L = 31 \sim 52$$

广东沿海地区 $I_p = 0.56(w_L - 8.1), w_L = 29 \sim 60$

将上述回归方程绘入塑性图中, 均位于A线以上。在散点图上仅有极少数位于A线以下, 约占总数的3%左右。如按塑性土分类, 该类土应属高塑性粘土 (CH) 和中塑性粘土 (CI), 而非有机土。

有的学者●根据我国各地四万多组常见的粘性土 (有机质含量少于5%, 塑性指数小于35, 液限小于70%) 的试验资料进行分析, 建议A、B、C三线的确定分别以下列公式和数据为宜: $I_p = 0.6(w_L - 16), w_L = 40\%, w_L = 28\%$ 。

最近公路研究部门根据来自全国的1400多个粘性土样和200多个砂性土进行试验分析, 提出了采用100克锥 (锥角为30°, 入土深度为20mm) 联合测定土的液限和塑限●, 与标准方法 (液限以碟式仪为准, 塑限以搓条法为准) 比较, “t”检验结果 (在5%的水平上) 平均值无显著性差异。上述100克锥锥入粘滞塑性状态的土体, 剪切应力为27.8g/cm², 与碟式仪剪力标准一致, 同各国的锥式仪标准也基本接近, 比76克锥合理。同时, 根据试验资料统计分析●, 得出如下两个关系式:

$$I_p(76\text{克}) = 0.67I_p - 0.26 \quad (1-15)$$

(n=1239, r=0.98)

$$I_p = 0.67w_L - 7.69 \quad (1-16)$$

(n=1260, r=0.91)

式中 $I_p(76\text{克})$ ——76克锥所测土样的液限并计算的塑性指数;

I_p ——与碟式相当的100克锥所测土样的塑性指数;

w_L ——碟式仪所测土样的液限。

学者们认为卡萨格兰德塑性图中的A线, 虽然表现为 I_p 和 w_L 的关系式, 但不是

- ① 长春地质学院唐大雄、王先锋, 我国常见的粘性土在塑性图上的位置对我国塑性图的建议, 1980年。
- ② 交通部公路科学研究所, 土的液塑限联合测定, 1981年。
- ③ 交通部公路科学研究所, 公路土分类, 1981年。

统计相关方程，它是卡氏建立在实际分析不同地区不同地层的大量土样的基础上，依据经验提出的，已被许多国家采用，也基本符合我国土质情况。按76克锥塑性指数来划分亚粘土和粘土的界限值是 $I_P(76\text{克})=17$ ，将此值代入式(1-15)和式(1-16)，得出蝶式仪的液限 $w_L=49.9$ ，相当接近于卡氏塑性图中的B线 ($w_L=50$)。对应于 $I_P(76\text{克})=7, 12, 27$ 时，蝶式仪液限 w_L 分别为27, 38, 72。 $w_L=27$ 即为塑性分级中低塑性和中塑性的界限；至于 $w_L=38$ ，实际上为对应于轻、重亚粘土的界限； $w_L=72$ 为对应于轻、重粘土的界限。鉴于 $I_P(76\text{克})=12$ 和27两个界限在塑性分级上远不比 $I_P(76\text{克})=7, 17$ 明显，所以在制定我国塑性图时，采用虚线。这样，公路系统制定了新的塑性图，如图1-5所示。C线 $w_L=28$ ，E线 $w_L=70$ ，对上述27, 72略有调整。

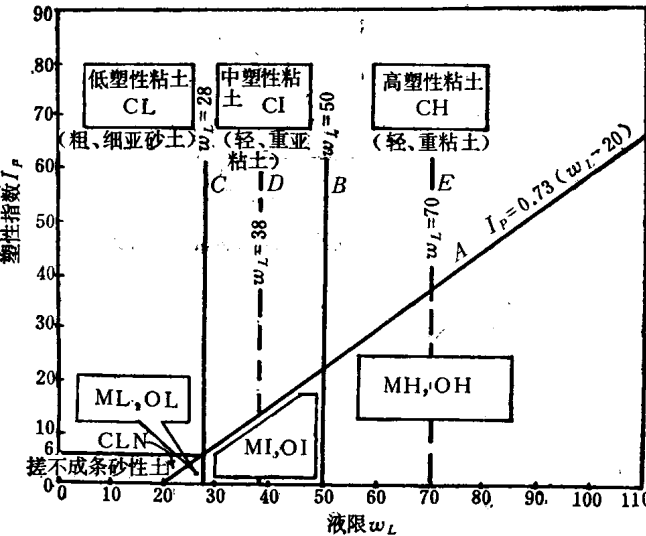


图 1-5 新塑性图 (公路系统)

性图，如图1-5所示。C线 $w_L=28$ ，E线 $w_L=70$ ，对上述27, 72略有调整。

二、按塑性指数与颗粒级配分类

《工业与民用建筑地基基础设计规范 TJ7—74》规定，粘性土按塑性指数 I_P 分为：粘土， $I_P > 17$ ；亚粘土， $10 < I_P \leq 17$ ；轻亚粘土， $3 < I_P \leq 10$ 。天然含水量大于液限，天然孔隙比 $e > 1.5$ 时称为淤泥， $1.0 < e < 1.5$ 时，称为淤泥质土。

《上海市地基基础设计规范》(1975) 的规定与“TJ 7—74”基本一致，只是 $7 \leq I_P < 10$ 时定名为轻亚粘土，并增加亚砂土一项，作为轻亚粘土和粉砂间的过渡土类。亚砂土以 $I_P < 7$ 及颗粒级配定名，即粒径小于0.005mm的颗粒含量占全重的3%~10%及粒径为0.05~0.005mm的颗粒含量超过全重的50%。亚砂土如按 I_P 和颗粒级配定名有矛盾时，以颗粒级配为准。亚砂土在现场鉴别时有明显的触变现象。增加亚砂土一类的主要目的是因为它的工程性质接近粉砂，在基础和地下工程施工中容易发生“流砂”现象，如误认此类土的工程性质接近亚粘土，往往导致工程事故或增加施工困难，定名为亚砂土似较轻亚粘土容易引起注意，有利于工作。对于塑性指数小于7的土，由于粘粒含量很少，采用搓条法的塑限试验不易掌握，故轻亚粘土的界线划到 ≥ 7 ，而不是 > 3 。很多地区的勘察单位也有类似的意见^①。

一般而言，当粘土的孔隙比大于1.0时，它的强度较低，但也有特殊情况，即孔隙比较大，但强度较高。例如在广东湛江某厂船坞下面离地表16m处取得的试样，属新生代老第四纪沉积物，这一地层最厚处可达800米，系由粘土夹粉砂组成，外观比较紧密，处在硬塑状态。新鲜时呈蓝灰色，暴露在空气中，很快变成黄褐色，物理力学性质也随之变化，它

① 同济大学工程地质水文地质教研室杨桂林：土的工程分类与承载力问题调查汇编，同济大学科学技术情报站，1981年。

的另一个特点是孔隙比较大，为1.1~1.3，而强度却较高，是一种特殊土。根据X光衍射分析、差热分析、红外吸收光谱分析、电子显微镜观察以及阳离子交换量、比表面积等综合分析结果^①确定它的矿物组成是以伊利石和高岭石为主，并含有部分氧化铁和少量多水高岭石、绿泥石和斑脱石。该土中对土壤团聚体的形成有较大影响的为游离氧化铁，含量为3.05%，主要由高度分散的无定形无机铁组成，以铁质薄膜的形式分布在粘土颗粒和团聚体的表面，并将其胶结成更大的次生团聚体，使这种土具有较高的强度和表现前期固结压力的特点。另一方面由于无定形无机铁易受周围物理化学因素如氧化还原条件、孔隙溶液的pH值等变化的影响，故可称之为化学活性土，因此在评定其工程性质时，要注意物理化学因素对物理力学性质的影响。

第二节 我国软土的物理力学性指标^②

软土在我国沿海一带分布很广，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省的沿海地区都存在海相或湖相沉积的软土，是在盐水或淡水中沉积形成的，

全国各地软土物理力学性指标 表 1-4

地区	土层深度 (m)	含水量 $w(\%)$	容重 γ (g/cm ³)	孔隙比 e	饱和度 S_r (%)	液限 w_L (%)	塑限 w_p (%)	塑性 指标 I_p	渗透系数 k_o (cm/sec)	压缩系数 a_{1-2} (cm ² /kg)	无侧限 抗压强度 q_u (kg/cm ²)
天 津	7~14	34	1.82	0.97	95	36	19	17	1×10^{-7}	0.051	0.3~0.4
塘 沽	8~17 0~8, 17~24	47 39	1.77 1.81	1.31 1.07	99 96	42 34	20 19	22 15	2×10^{-7}	0.097 0.065	
上 海	6~17 1.5~6, >20	50 37	1.72 1.79	1.37 1.05	98 97	43 34	23 21	20 13	6×10^{-7} 2×10^{-6}	0.124 0.072	0.2~0.4
杭 州	3~9 9~19	47 35	1.73 1.84	1.34 1.02	97 99	41 33	22 18	19 15		0.117	
宁 波	2~12 12~28	50 38	1.70 1.86	1.43 1.08	97 94	39 36	22 21	17 15	3×10^{-8} 7×10^{-8}	0.095 0.072	0.6~0.48
舟 山	2~14 17~32	45 36	1.75 1.80	1.32 1.03	99 97	37 34	19 20	18 14	7×10^{-6} 3×10^{-7}	0.110 0.063	
温 州	1~35	63	1.62	1.79	99	53	23	30		0.193	
福 州	3~19 1~3, 19~35	68 42	1.50 1.71	1.87 1.17	98 95	54 41	25 20	29 21	8×10^{-8} 5×10^{-7}	0.203 0.070	0.05~0.18
龙 溪	0~6	89	1.45	2.45	97	65	34	31		0.233	
广 州	0.5~10	73	1.60	1.82	99	46	27	19	3×10^{-8}	0.118	
昆明 淤泥 泥炭		41~270 68~299	1.2~1.8 1.1~1.5	1.1~5.8 1.9~7.0				>7 27~62	1×10^{-4} 1×10^{-6}	0.12~0.42	0.02~0.35
贵州 淤泥 泥炭	<20	54~127 140~264	1.3~1.7 1.2~1.5	1.7~2.8 1.6~5.9				15~34 26~73	1×10^{-4} 1×10^{-6}	0.12~0.42 0.17~0.73	0.01~0.18

① 中国科学院武汉岩体力学研究所罗鸿禧、潘培才、张文敏、刘金英：湛江土中铁的形态及其对土壤性质的某些影响，1979年。
② 株洲玻璃工业设计研究所：软土地基调查资料汇编，1973年。

为有机质和矿物质的综合物，具有松软、孔隙比大、压缩性高和强度低的特点，其厚度由数米至数十米不等，但在同一地区厚度的变化不太大，土层呈带状分布。

此外，贵州、云南省的某些地区还存在山地型的软土，是泥灰岩、炭质页岩、泥砂质页岩等风化产物和地表的有机物质经水流搬运，沉积于低洼处，长期饱水软化或间有微生物作用而形成。沉积的类型属于坡洪积、湖沉积和冲积为主。其特点是分布面积不大，但厚度变化很大，如贵州省不少建设工地的软土面积在500m²以内，最大厚度不超过20m，但相距只有2~3m，厚度变化达7~8m。湖沉积软土一般厚度较小，约为10m左右，最深不超过25m。

全国各地软土的一般物理力学性指标如表1-4所示。

第三节 上海软土的特性

一、土层分布和物理力学性指标

上海地区浅层土为第四纪沉积层，地质年代较近，固结度低，比较软弱。土层呈带状分布，各主要土层的物理力学性指标大体上如表1-5所示。地下水（潜水）埋藏颇浅，离地表年平均仅50~70cm。土层的分布虽有一定的规律性，但土层的起伏和厚薄仍有较多的变化，有的土层在某些地段缺失。例如，往往引起注意的亚砂土层，有的直接卧于表土层下，有的却在地表下20m左右的深处发现，可是在较多情况下缺失；又如暗绿色亚粘土一般埋藏在20多米下，但有的地方在7~8m处找到，也有缺失之处。

粘性土的物理力学性质指标的统计关系如下^①：

(1) 塑性指数 I_p 与液限 w_L

$$I_p = 0.83(w_L - 20)$$

(2) 压缩指数 C_c 与液限 w_L

$$C_c = 0.022(w_L - 24)$$

(3) 压缩模量 E_s (kg/cm²)与静力触探比贯入阻力 p_s (kg/cm²)

深度12~24m, $E_s = 3.4p_s$;

深度24~50m, $E_s = 3.4p_s + 19$

(4) 三轴不排水抗剪强度 c_u (kg/cm²)与静力触探比贯入阻力 p_s (kg/cm²)

$$c_u = \left(\frac{1}{18} \sim \frac{1}{22} \right) p_s$$

(5) 地基土应力历史可用超固结系数表达，即前期固结压力与自重之比值。在地表下4m内，该系数可达8；4~25m内，平均值为1.08；25~32m暗绿色亚粘土的平均值为2.15。

地表下48m内各土层的矿物分析如表1-6所示。

二、正确选用和确定抗剪强度的重要性

上海地区有的勘察单位过去经常采用固结快剪（直剪）确定土的抗剪强度指标，规定

^① 电力工业部华东电力设计院，上海软土地基工程特性，1979年。