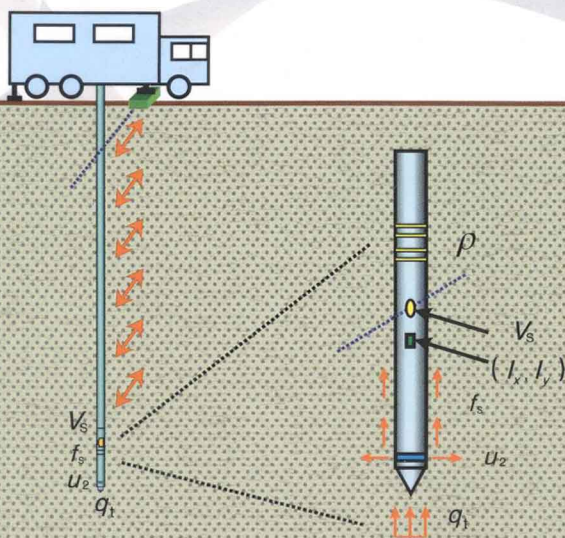


现代多功能CPTU

技术理论与工程应用

刘松玉 蔡国军 童立元 编著



科学出版社

现代多功能 CPTU 技术 理论与工程应用

刘松玉 蔡国军 童立元 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了国内外关于现代多功能孔压静力触探(CPTU)技术的最新理论研究和工程应用成果,主要包括:CPTU 技术的发展历史、测试方法,国际标准 CPTU 和中国 CPT 技术的对比,基于 CPTU 测试的黏性土和无黏性土工程性质的确定方法,CPTU 技术在土分类、液化评价、沉降计算和桩基工程中的应用及工程应用实例,以及电阻率 CPTU 及其在环境岩土工程领域的应用。

本书注重理论分析与测试技术相结合、测试技术与工程应用实践相结合,具有前沿性、系统性、实用性的特点,可供建筑、交通、水利、电力、铁路、环境等领域的工程技术人员和有关科研院所研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代多功能 CPTU 技术理论与工程应用/刘松玉,蔡国军,童立元编著.
—北京:科学出版社,2013.11
ISBN 978-7-03-038904-6

I. 现… II. ①刘…②蔡…③童… III. ①土体-静力触探 IV. ①TU413

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 246249 号

责任编辑:陈 婕 / 责任校对:彭 涛
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

×

2013 年 11 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 11 月第一次印刷 印张:27 1/4 彩插:4

字数:540 000

定价:145.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

改革开放以来,我国经济建设高速发展,城市化和大型基础设施建设日新月异,工程规模与建设水平达到空前水平。然而,岩土参数确定和设计方法的不合理性经常导致工程设计不断变更、沉降与承载力计算可靠性低等问题的出现,甚至出现重大工程安全事故。岩土体是自然历史产物,复杂多变,岩土工程参数确定与合理设计往往是工程建设的难点,也是保证工程质量、缩短工程周期、降低工程造价、提高工程经济效益和社会效益的关键问题之一。钻孔取样、室内试验会造成试样扰动,试验结果难以反映地基岩土的真实状况。原位测试技术是在工程场地原位测试评价地基岩土工程性质的方法,不需要取样,简便快捷,是获得岩土工程参数的有效方法。

孔压静力触探(piezcone penetration test, CPTU)技术是 20 世纪 80 年代国际上兴起的新型原位测试技术,在发达国家得到了大量工程推广应用。该技术是在传统静力触探(cone penetration test, CPT)技术的基础上,根据土体工程性质的特殊性,在触探锥头增设孔隙水压力传感器,在贯入过程中可以同时量测锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力,具有测试精度高、采集数据量大、测试连续、不需取样、快速便捷、干扰小和费用低廉等优点,特别适合于像高速公路、铁路、地铁等大范围工程的勘察设计。随着工程建设和传感器技术的发展,国际上近二十年来研发了一系列基于 CPT 的新型传感器,如地震波传感器、电阻率传感器、热导率传感器等,使 CPT 技术呈现出多功能、数字化发展的特征,使其在工程建设领域的应用达到了前所未有的水平,并拓展到了环境工程、海洋工程等领域。

我国 CPT 技术在 1970 年以前基本上与国际水平同步发展,之后,虽然一些学者在 20 世纪 90 年代也进行了孔压静力触探技术的开发研究,但与国际水平渐行渐远,目前还主要采用传统的单、双桥 CPT 技术,无论在机理和理论研究,还是在规范化、功能扩展、工程应用方面都已明显落后于国际水平,制约了我国岩土工程技术水平的发展。

本书第一作者于 2002 年在美国密执根大学土木与环境工程系开始研究现代 CPTU 技术,于 2004 年引进了国内第一台美国多功能数字式 CPTU 测试系统。近十年来,作者所在课题组在国内公路、桥梁、铁路、机场、工民建、市政工程等领域进行了大量的现场测试、设备开发研究工作,对 CPTU 技术进行了系统的研究。相应的研究工作先后获得了三项国家自然科学基金项目(40702047、50478073、41202203)的资助;以该技术为研究对象的博士论文《现代数字式多功能 CPTU 技

术理论与工程应用研究》入选 2012 年度全国百篇优秀博士学位论文。本书就是在上述研究成果的基础上参考吸收国内外同行的最新成果撰写而成。

作者注重理论分析与测试技术相结合、测试技术与工程应用实践相结合,力求全面系统反映近年来国内外 CPTU 理论研究和工程应用的最新成果。在本书的章节编排和撰写过程中,作者既注重贯入力学机理分析,又强调工程应用要求;既反映最新成果,又注意发展过程,并在重要工程应用领域给予工程实例进行验证,以便使读者进一步理解 CPTU 技术的工程应用。

在撰写本书过程中,参阅了国内外大量文献,谨向所有文献作者表示衷心感谢!在研究过程中,作者课题组其他成员和研究生也参与了部分现场测试和研究工作,包括杜广印、刘志彬、杜延军、经绯、章定文、邓永锋、朱志铎、涂启柱、邹海峰、程远、刘锦、姬付全等,对他们的精诚合作和辛勤工作表示诚挚的谢意!此外,感谢东南大学仪器科学与工程学院秦文虎教授和南光地质仪器有限公司陈偲工程师在现场测试技术方面给予的支持!

国际 CPTU 技术一直处于快速发展之中,由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,欢迎读者批评指正!

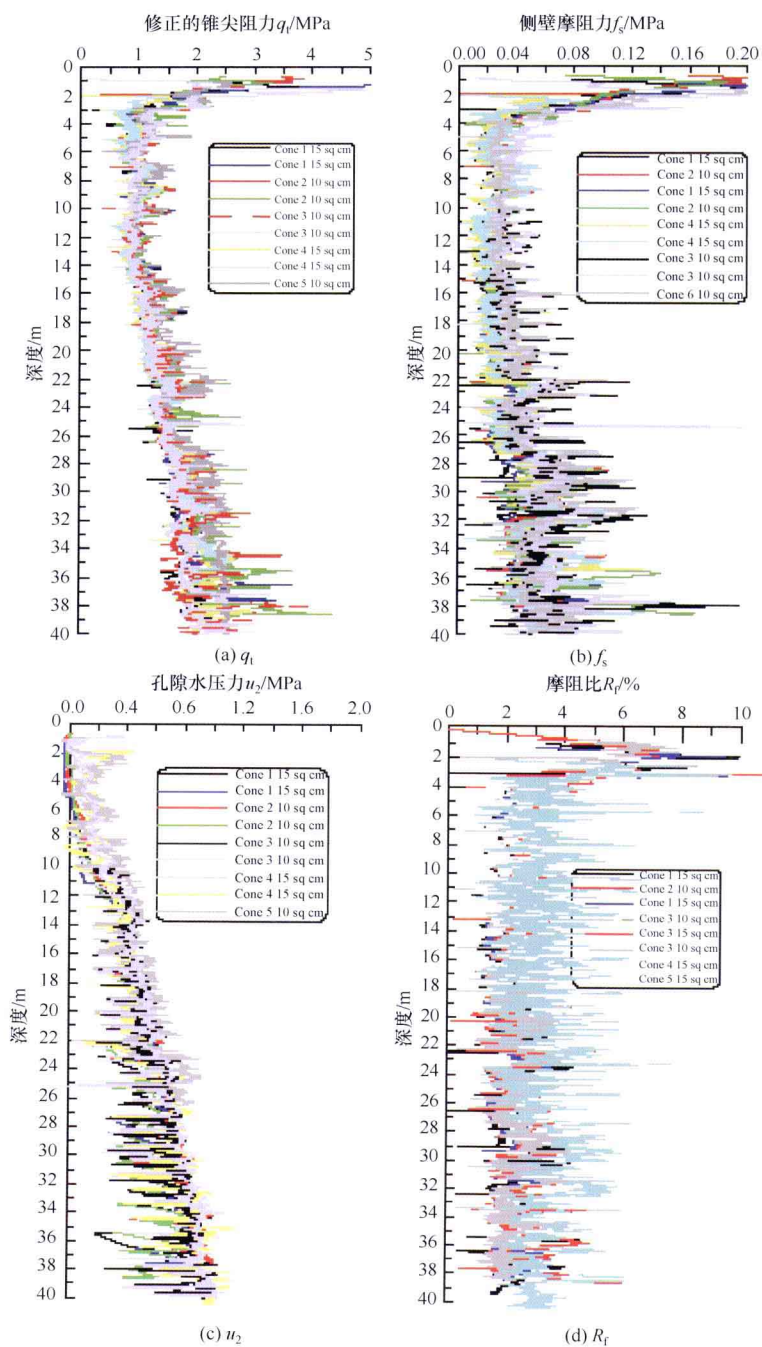


图 4.3 Pentre 场地不同探头的测试曲线

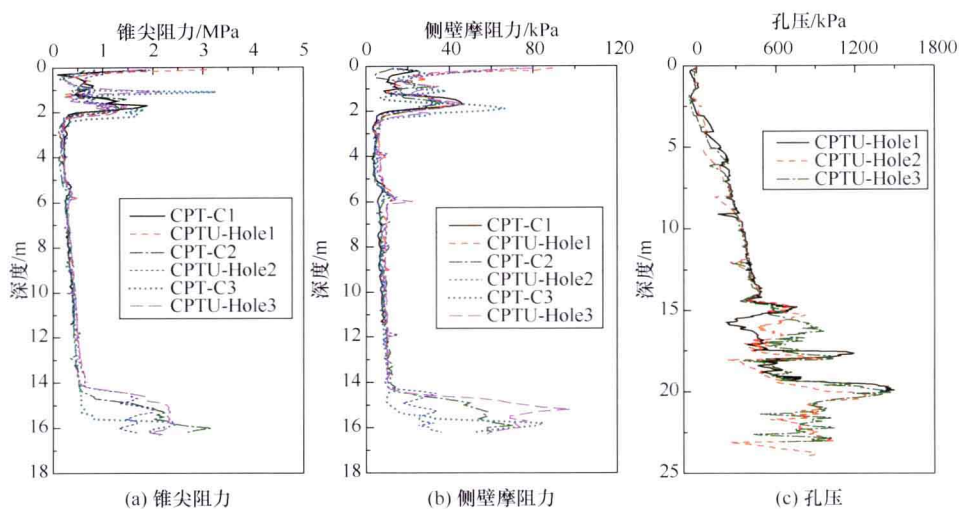


图 4.11 沪苏浙高速场地

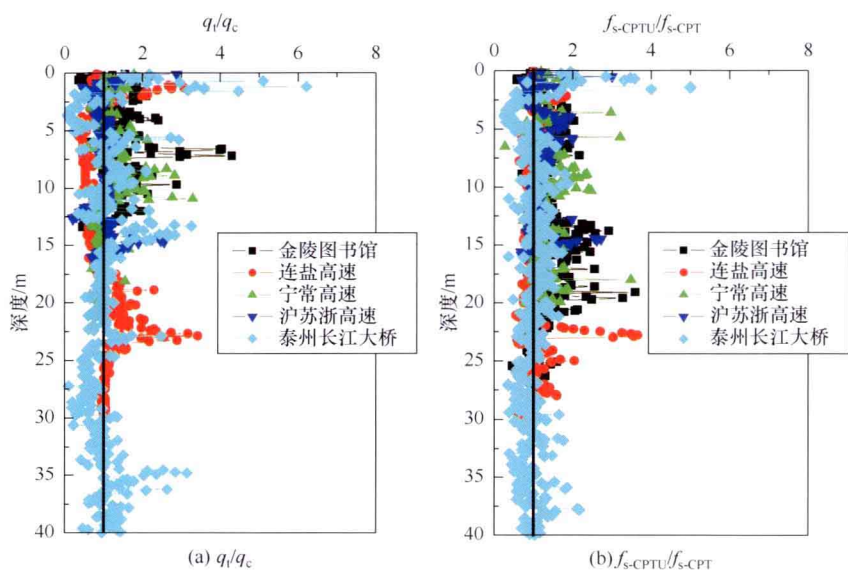


图 4.13 测试参数比随深度变化

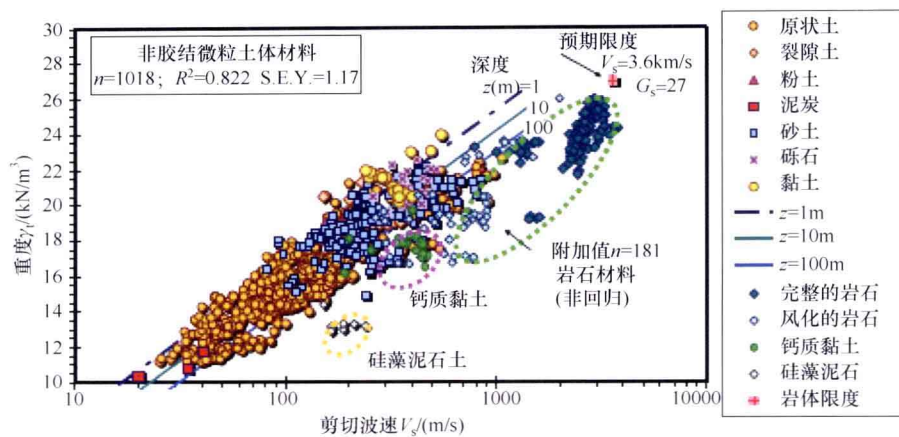


图 6.2 剪切波速与土的天然重度关系图

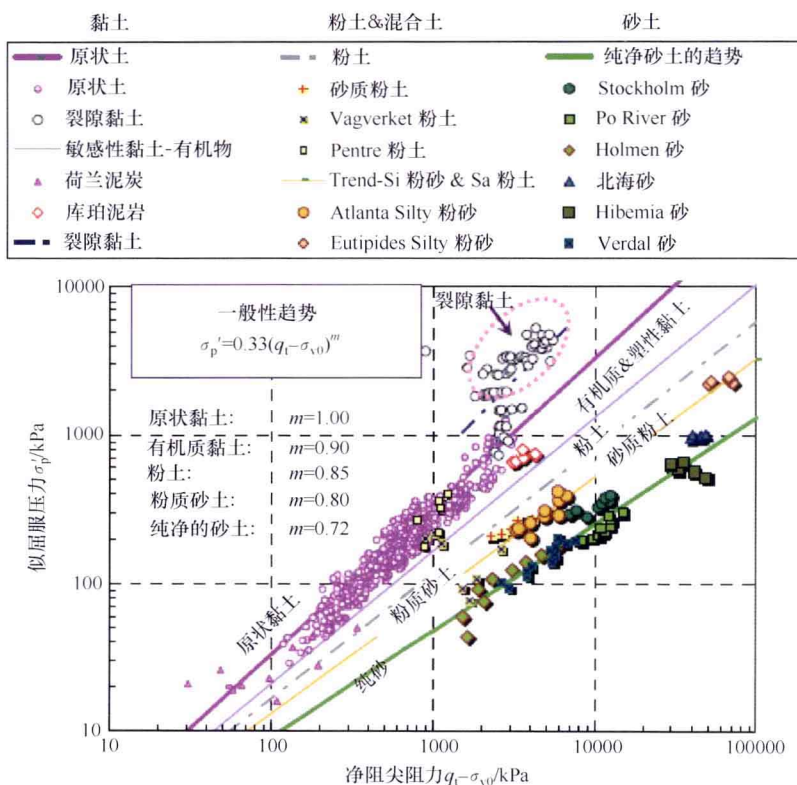


图 6.7 前期固结压力 σ'_p 与净锥尖阻力的关系

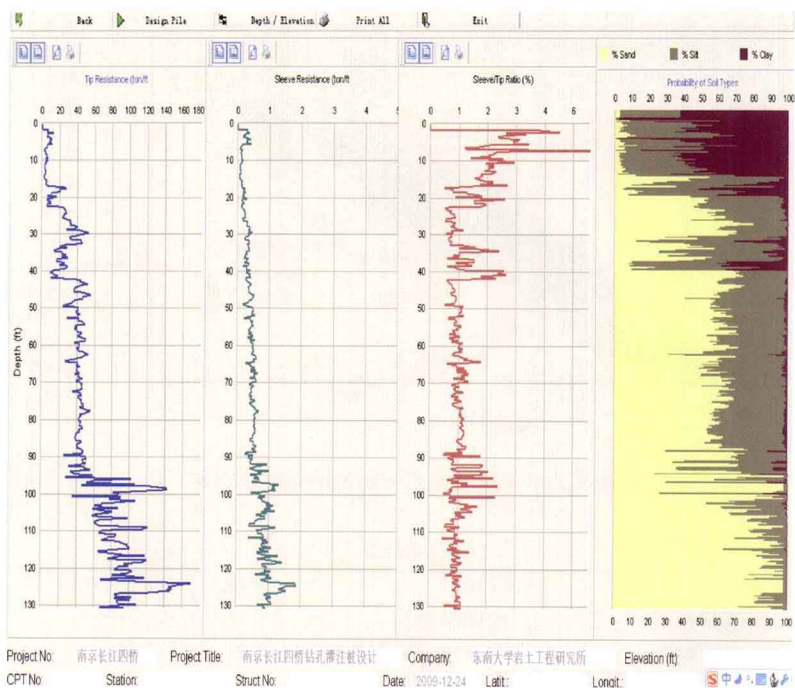
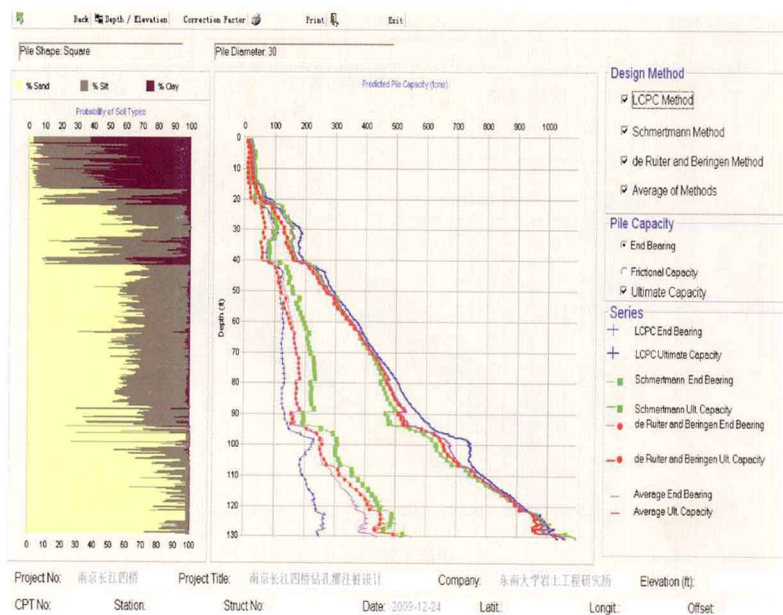


图 10.37 多功能 CPTU 试验曲线和土层剖面划分



10.38 基于多功能 CPTU 的桩基承载力计算结果

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 国际 CPT 技术的发展	3
1.2.1 机械式 CPT 技术	3
1.2.2 电测式 CPT 技术	6
1.2.3 CPTU 技术	6
1.2.4 新型传感器	10
1.3 我国 CPT 技术现状与评价	12
1.3.1 我国 CPT 技术的发展	12
1.3.2 国内外 CPT/CPTU 技术应用比较	15
1.3.3 我国 CPT 技术与国外的差距	22
参考文献	23
第 2 章 CPTU 的基本原理与测试方法	29
2.1 CPTU 的基本原理	29
2.2 CPT 贯入机理的理论分析	31
2.2.1 承载力理论	31
2.2.2 孔穴扩张理论	34
2.2.3 应变路径方法	41
2.2.4 点位错理论	43
2.3 CPT 贯入机理的数值模拟分析	43
2.3.1 概述	43
2.3.2 CPTU 尺寸效应的数值模拟方法	46
2.3.3 不同初始应力状态下 CPTU 贯入的数值模拟分析	48
2.3.4 CPTU 尺寸效应的模拟分析	54
2.3.5 影响 CPTU 测试结果的其他因素模拟分析	58
2.4 CPTU 贯入临界深度的标定罐试验分析	62
2.5 CPTU 现场试验操作方法	65
2.5.1 CPTU 测试系统基本组成	65
2.5.2 CPTU 测试基本步骤	66

2.5.3 CPTU 探头的标定方法	68
2.5.4 CPTU 孔压系统的饱和	72
2.5.5 孔压消散试验及试验要点	74
参考文献	75
第 3 章 CPTU 测试影响因素与表达	80
3.1 CPTU 测试影响因素	80
3.1.1 仪器、设备因素	80
3.1.2 操作因素	81
3.1.3 温度	81
3.2 考虑影响因素的原始数据修正	82
3.2.1 考虑倾斜的深度修正	82
3.2.2 零飘修正	82
3.2.3 锥尖阻力修正	82
3.2.4 侧壁摩阻力修正	83
3.3 资料表达	83
3.3.1 实测数据表达	84
3.3.2 导出参数表达	85
参考文献	86
第 4 章 国际标准 CPTU 与中国 CPT 测试结果对比分析	87
4.1 概述	87
4.2 对比试验简介	92
4.2.1 场地描述	92
4.2.2 CPT 和 CPTU 试验设备	93
4.3 对比试验结果分析	94
4.3.1 CPT 和 CPTU 测试结果	94
4.3.2 CPT 与 CPTU 测试参数对比	99
参考文献	105
第 5 章 基于 CPTU 的土分类方法	107
5.1 基于 CPT 的土分类方法评述	107
5.1.1 我国 CPT 土分类方法	108
5.1.2 国外 CPT 土分类方法	110
5.2 基于 CPTU 的土分类方法评述	113
5.2.1 Senneset 和 Janbu 分类图	113
5.2.2 Robertson 和 Campanella 分类图	113
5.2.3 Robertson 分类图	114

5.2.4	Jefferies 和 Davies 土分类图	115
5.2.5	Eslami 和 Fellenius 的分类法	116
5.2.6	Lunne 等的分类图	117
5.2.7	Zhang 和 Tumay 的概率分类法	118
5.3	基于聚类分析的 CPTU 土分类方法	120
5.3.1	聚类分析方法介绍	121
5.3.2	聚类分析步骤	121
5.3.3	聚类分析用于多功能 CPTU 资料的解译	125
5.3.4	讨论	135
5.4	基于我国典型场地 CPTU 土分类方法应用	135
5.4.1	典型场地 CPTU 测试结果	135
5.4.2	不同场地 CPTU 分类方法的比较	137
5.4.3	典型土类的 Robertson 和 Campanella 分类验证分析	137
	参考文献	148
第 6 章	基于 CPTU 的黏性土物理力学性质评价	152
6.1	黏性土物理力学性质评价方法	152
6.1.1	主要状态特性指标	152
6.1.2	强度特性指标	160
6.1.3	变形特性指标	164
6.1.4	渗透和固结特性	166
6.1.5	土动力参数确定方法	175
6.2	基于多功能 CPTU 的江苏软土工程性质评价	178
6.2.1	原位状态与应力历史评价	178
6.2.2	不排水抗剪强度评价	184
6.2.3	压缩模量	188
6.2.4	固结与渗透系数	192
6.2.5	基于 CPTU 测试的连云港海相软土工程性质总结	198
6.3	基于 CPTU 的江苏泻湖相软土最大剪切模量测试评价	199
6.3.1	试验概况	199
6.3.2	$G_{\max}$ 确定方法	200
	参考文献	203
第 7 章	基于 CPTU 的无黏性土物理力学性质确定方法	209
7.1	状态特性	209
7.1.1	相对密实度	209
7.1.2	状态参数	212

7.2	砂土有效内摩擦角	214
7.3	变形特性	218
7.3.1	杨氏模量	218
7.3.2	侧限模量	219
7.3.3	小应变剪切模量	219
7.4	废黄河泛滥区无黏性土工程性质的评价	220
	参考文献	234
第 8 章	基于 SCPTU 的砂土液化评价	236
8.1	SCPTU 测试原理与方法	236
8.2	CPT-SPT 相关关系	237
8.3	基于 SCPTU 的砂土液化判别方法研究	239
8.3.1	基于 SCPTU 的砂土液化判别方法	240
8.3.2	工程实例	250
8.4	基于 SCPTU 的唐山地区砂土液化性能的再调查评价	258
8.4.1	试验点分布及试验设备	258
8.4.2	砂土液化概率判别方法	260
8.4.3	试验结果与统计分析	262
8.5	基于 CPTU 的砂土液化判别程序与方法	269
	参考文献	271
第 9 章	基于 CPTU 的浅基础承载力和沉降计算方法	275
9.1	基于 CPTU 的浅基础承载力计算方法	275
9.1.1	间接方法	275
9.1.2	直接方法	279
9.1.3	工程实例	280
9.2	基于 CPTU 的沉降计算方法	281
9.2.1	无黏性土浅基础沉降计算方法	282
9.2.2	黏性土地基沉降计算方法	285
9.2.3	工程实例	286
	参考文献	291
第 10 章	基于 CPTU 的桩基承载力评价方法	293
10.1	概述	293
10.2	CPT/CPTU 确定单桩承载力的基本方法	294
10.2.1	国内应用 CPT 确定桩基承载力方法	294
10.2.2	国外应用 CPT 确定桩基承载力方法	297
10.2.3	国外基于 CPTU 测试的直接预测法	303

10.3 基于 SCPTU 的桩基反应分析	306
10.3.1 采用 SCPTU 确定桩基竖向承载力	306
10.3.2 桩基竖向变形和荷载传递分析	308
10.3.3 土刚度计算	308
10.3.4 工程应用实例	309
10.4 基于 CPT/CPTU 的桩基承载力确定方法比较	312
10.4.1 CPT/CPTU 预测方法选择	312
10.4.2 现场测试情况	313
10.4.3 CPT 和 CPTU 预测方法的评价	317
10.4.4 CPT/CPTU 预测值与实测值的比较	318
10.4.5 讨论	325
10.4.6 基于有效锥尖阻力的桩承载力预测方法	326
10.5 基于 CPTU 的静压桩(PHC 管桩)单桩承载力确定方法研究	330
10.5.1 场地试验概况	330
10.5.2 基于 CPT 锥尖阻力确定静压桩承载力	333
10.5.3 基于 CPTU 锥尖阻力确定桩基承载力	333
10.5.4 不同方法所得单桩承载力比较及误差分析	335
10.6 基于 CPTU 的灌注桩承载力预测新方法	340
10.6.1 场地试验概况	340
10.6.2 基于 CPTU 的灌注桩承载力预测的折线法	340
10.6.3 不同单桩承载力预测方法比较	343
10.6.4 误差分析与讨论	348
10.7 基于多功能 CPTU 的桩基工程设计实例	349
10.7.1 桩基础设计步骤	349
10.7.2 工程设计实例	353
参考文献	369
第 11 章 基于电阻率 CPTU 的环境土工应用	374
11.1 电阻率 CPTU 原理与方法	374
11.1.1 土的电阻率理论	375
11.1.2 土的电阻率影响因素	375
11.1.3 土的电阻率测试原理	379
11.2 RCPTU 在污染场地评价中的应用	385
11.2.1 概述	385
11.2.2 RCPTU 在污染地基中的应用	386
11.2.3 RCPTU 在垃圾填埋场中的应用	392

11.2.4 RCPTU 在农药污染场地评价中的应用	398
11.3 基于 RCPTU 的软土成因环境分析	405
11.3.1 试验概况	405
11.3.2 海相软土成因环境分析	407
11.3.3 讨论	412
参考文献	413
主要符号及说明	419

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

近十几年来,我国经济建设高速发展,城市化建设、高速公路、铁路、桥梁及港口码头、地下空间开发等大型基础设施建设日新月异,工程规模与建设水平达到空前水平。然而,工程建设中经常出现设计参数不可靠或不完全、施工过程中不断变更设计、沉降计算可靠性低、桩基设计随意性大等问题,往往造成巨大经济损失或出现工程安全问题,影响正常营运,而产生这些问题的主要原因是岩土参数确定和设计方法与实际不符合。由于自然条件复杂多变,确定岩土工程参数与合理设计往往成为工程建设的难点,它是保证工程质量、缩短工程周期、降低工程造价、提高工程经济效益和社会效益的关键技术之一。钻孔取样、室内试验会造成土样扰动,试验结果难以反映地基岩土的真实状况^[1]。原位测试技术是在天然位置对岩土工程性能进行测试的一种技术^[2~4],不需要取样,简便快捷,是准确获得土性参数的有效方法。图 1.1 为目前常用的岩土工程参数测试方法^[5]。因此,研究基于高精度现场原位测试理论与技术,建立基于原位测试的土木工程设计计算理论,是当前我国工程领域迫切需要解决的重要课题。

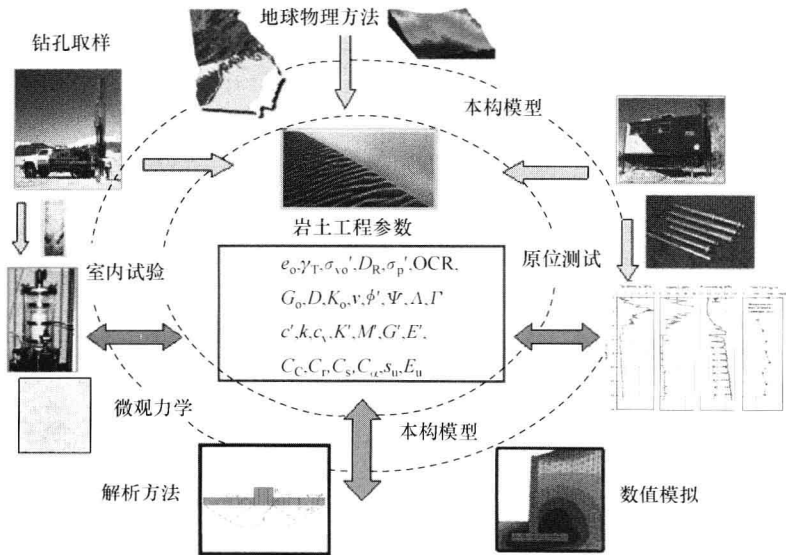


图 1.1 常用的岩土工程参数测试方法^[5]

原位测试技术可以分为以下两类：

(1) 剖面测试法, 主要包括静力触探、动力触探、扁铲侧胀仪及电阻率法等。该类测试方法具有连续、快速、经济的优点。

(2) 专门测试法, 主要包括平板载荷试验、旁压试验、标准贯入试验、十字板剪切试验等。该类方法可得到关键层位土的工程性质指标, 可直接供设计部门使用。表 1.1 为土的各种原位测试技术方法及其适用范围和所得指标的精度^[6]。

表 1.1 土的原位测试技术适用范围及精度一览表

分类	设备	定土名	测剖面	土参数										地基土类型								判液化	承载力
				u	φ	S_u	D_r	M_v	C_v	K_0	G_0	σ_h	OCR	σ_ϵ	硬岩	软岩	砾石	砂土	粉土	黏土	泥炭		
触探	动力触探 (DCP)	C	B	—	C	C	B	—	—	—	C	—	—	C	—	C	A	A	B	B	B	B	C
	标准贯入 (SPT)	A	B	—	B	C	B	C	—	—	C	—	—	—	—	C	—	A	B	B	C	A	B
	机械式静力触探	B	A	—	B	C	B	C	—	—	C	C	C	—	—	C	—	A	A	A	A	A	C
	电测式静力触探	B	A	—	B	C	B	C	—	C	B	B	C	—	—	C	—	A	A	A	A	A	B
	孔压静力触探	A	A	A	B	B	B	C	A	C	B	B	B	B	—	C	—	A	A	A	A	A	B
	地震波孔压静力触探	A	A	A	B	B	B	C	A	C	B	B	B	B	—	C	—	A	A	A	A	A	B
	电阻率静力触探	A	A	A	B	B	B	C	A	B	A	B	B	B	—	C	—	A	A	A	A	A	B
旁压	预钻孔旁压仪	B	B	—	C	B	C	C	C	—	A	C	C	C	A	A	B	B	B	A	B	C	A
	自钻孔旁压仪	A	B	A	A	B	B	B	A	A	A	A	A	A	—	B	—	B	B	A	B	C	A
	全应变式旁压仪	C	B	B	C	B	C	C	A	C	B	B	C	C	—	C	—	B	B	A	A	C	A
	压入式旁压仪	A	B	B	C	B	C	C	A	C	B	C	C	C	—	—	—	B	A	A	A	C	A
扁铲	扁铲侧胀仪	B	A	—	—	C	C	—	—	B	B	B	B	B	—	C	—	A	A	A	A	C	B
十字板	十字板	C	C	—	—	A	—	—	—	C	—	—	B	—	—	—	—	B	A	A	—	B	
载荷	平板载荷 (PLT)	B	B	—	C	B	B	B	C	C	B	B	B	B	B	A	B	B	A	A	A	—	A
	螺旋板载荷 (SPLT)	C	C	—	C	B	B	B	C	C	B	B	B	B	—	—	—	B	A	A	B	—	A