



YANTU GONGCHENG
CESHI JISHU

岩土工程 测试技术

龚晓南 杨仲轩 主编

中国建筑工程工业出版社

岩土工程测试技术

龚晓南 杨仲轩 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

岩土工程测试技术/龚晓南, 杨仲轩主编. —北京:
中国建筑工业出版社, 2017. 10
ISBN 978-7-112-21366-5

I. ①岩… II. ①龚… ②杨… III. ①岩土工程-测试技术 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 250363 号

本书首先介绍岩土工程测试新技术和岩土工程测试中的物联网技术, 然后介绍建筑、交通、海洋等工程领域测试和监测技术及其工程应用。全书分 14 章, 为: 概述、岩土工程原位测试技术、岩土工程物探技术、岩土工程光纤测试与监测技术、岩土工程测试中的物联网技术、铁路路基工程监测技术、码头结构监测技术、离岸深水防波堤监测技术、跨海基础设施与结构物测试技术、隧道工程监测技术、基坑工程监测、城市轨道交通工程监测技术、边坡工程监测技术、桩基完整性测试中的若干疑难问题研究与分析。

本书可供从事土木工程设计、施工、监测、研究、工程管理工作工程技术人员和大专院校土木工程及其相关专业师生参考。

责任编辑: 王 梅 辛海丽

责任设计: 李志立

责任校对: 王 瑞 李美娜

岩土工程测试技术

龚晓南 杨仲轩 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

大厂回族自治县正兴印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 33½ 字数: 835 千字

2017 年 11 月第一版 2017 年 11 月第一次印刷

定价: 99.00 元

ISBN 978-7-112-21366-5

(31091)

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)

前 言

随着现代化进程的飞速发展,各类土木工程日新月异,呈现高、大、深、重的发展趋势,对岩土工程测试技术提出了更高的要求。在土木工程建设需求推动下,在飞速发展的测试技术促进下,近年来岩土工程测试技术发展很快。为了加强土木工程各行业间,设计、施工、科研和厂商间的交流,促进岩土工程测试新技术的推广应用,进一步提高岩土工程测试技术水平,中国工程院土木、水利与建筑工程学部,中国土木工程学会土力学及岩土工程分会,浙江省科学技术协会和浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心共同主办的“岩土工程西湖论坛”2017年的主题选为岩土工程测试技术。为了配合“岩土工程西湖论坛(2017)”,论坛组委会邀请全国各地岩土工程专家编写出版“岩土工程测试技术”。

岩土工程测试技术的重要性,主要体现在岩土工程设计、施工的复杂性和特殊性。重型厂房、高层建筑、铁路桥隧、高坝大库以及为开发海洋资源、城市地下空间而进行的各种重大工程等的顺利建设,无不与岩土工程地质条件及工程结构的精准探测息息相关。岩土工程普遍采用信息化施工方法,通过监测施工过程中地层及结构的力学响应,利用测试结果及时调整施工、趋利避害、做出决策。岩土工程检测与监测已经贯穿于勘察、设计、施工、运营的全部过程,是精心设计、精心施工的重要手段。

岩土工程测试技术不仅在工程实践中十分重要,在岩土工程理论的形成及发展过程中也起了重要的作用。达西定律、固结理论、摩尔库仑强度理论等土力学经典理论,大多建立在试验测试的基础之上。

本书系统地介绍了岩土工程测试的目的和意义,分析了岩土工程测试技术的发展现状及趋势,并介绍了岩土工程测试技术的主要原理和方法。本书共分为测试技术和工程应用两个部分。在测试技术部分主要介绍了原位测试技术、物探技术、光纤测试技术及物联网技术等的基本理论及成果;在工程应用部分系统介绍了交通、港航、隧道、基坑、边坡、桩基、跨海基础设施等具体工程的最新监测系统及技术,如自动化监测、超前预报技术等,从而便于研究人员及工程技术人员参考及应用。

本书共14章,由浙江大学杨仲轩和龚晓南编写第1章,杭州市勘测设计研究院岑仰润编写第2章,浙江省物化勘查院赵竹占编写第3章,南京大学施斌编写第4章,杭州鲁尔物联科技胡辉和浙江大学董梅编写第5章,石家庄铁道大学杜彦良和赵维刚编写第6章,南京水利科学研究院蔡正银编写第7、8章,中交第一航务工程局叶国良编写第9章,同济大学朱合华编写第10章,浙江开天工程技术有限公司吴慧明编写第11章,华东勘测设计研究院陈文华编写第12章,浙江大学尚岳全编写第13章,浙江大学王奎华编写第14章。全书由杨仲轩和龚晓南负责统稿。在编写过程中,编者参考和引用了大量文献资料,在此对其原作者深表谢意。

由于编者水平有限,书中纰漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

1 概述	1
1.1 岩土工程测试的意义	1
1.2 岩土工程测试的内容	1
1.2.1 室内试验技术	2
1.2.2 原位测试技术	2
1.2.3 现场监测技术	3
1.3 岩土工程测试技术发展现状与展望	3
1.3.1 岩土工程测试技术发展现状	3
1.3.2 岩土工程测试技术发展展望	4
2 岩土工程原位测试技术	6
2.1 引言	6
2.2 载荷试验	7
2.2.1 概述	7
2.2.2 平板载荷试验 (PLT; Plate Loading Test)	7
2.2.3 螺旋板载荷试验 (SPLT; Screw Plate Loading Test)	9
2.2.4 特殊土载荷试验	10
2.3 静力触探试验 (CPT; Cone Penetration Test)	10
2.3.1 概述	10
2.3.2 试验设备	11
2.3.3 试验技术要点	12
2.3.4 资料整理与成果应用	12
2.4 圆锥动力触探试验 (DPT; Dynamic Penetration Test)	13
2.4.1 概述	13
2.4.2 试验设备	14
2.4.3 试验技术要点	15
2.4.4 资料整理与成果应用	15
2.5 标准贯入试验 (SPT; Standard Penetration Test)	16
2.5.1 概述	16
2.5.2 试验设备	16
2.5.3 试验技术要点	16
2.5.4 资料整理与成果应用	18
2.6 十字板剪切试验 (VST; Vane Shear Test)	18
2.6.1 概述	18

2.6.2 试验设备	19
2.6.3 试验技术要点	20
2.6.4 资料整理与成果应用	20
2.7 旁压试验 (PMT; Pressuremeter Test)	21
2.7.1 概述	21
2.7.2 试验设备	22
2.7.3 试验技术要点	23
2.7.4 资料整理与成果应用	23
2.8 扁铲试验 (DMT; Flat Dilatometer Test)	23
2.8.1 概述	23
2.8.2 试验设备	24
2.8.3 试验技术要点	24
2.8.4 资料整理与成果应用	25
2.9 现场直接剪切试验	25
2.9.1 概述	25
2.9.2 试验设备及布置	26
2.9.3 试验技术要点	26
2.9.4 资料整理与成果应用	27
2.10 抽水试验	27
2.10.1 概述	27
2.10.2 试验设备	27
2.10.3 试验技术要点	28
2.10.4 资料整理与成果应用	29
2.11 其他岩土工程原位测试技术简介	30
3 岩土工程物探技术	32
3.1 概述	32
3.2 高分辨率地震法	32
3.2.1 高分辨率地震法应用领域	33
3.2.2 原理及方法技术	33
3.2.3 工程实例: 京杭运河八堡船闸口综合整治工程抛石调查	33
3.3 高密度电法	35
3.3.1 高密度电法应用领域	36
3.3.2 原理及方法技术	36
3.3.3 工程实例: 建筑场地区内的岩溶探测	37
3.4 瞬态瑞利波法	40
3.4.1 瞬态瑞利波法应用领域	40
3.4.2 原理及方法技术	41
3.4.3 工程实例: 强夯地基的检测及效果评价	41
3.5 瞬变电磁波法	44

3.5.1	瞬态电磁波法应用领域	44
3.5.2	原理及方法技术	44
3.5.3	工程实例：工程地质勘察中的深部岩溶探查	45
3.6	地质雷达法	48
3.6.1	地质雷达法应用领域	49
3.6.2	原理及方法技术	49
3.6.3	工程实例	51
4	岩土工程光纤测试与监测技术	56
4.1	概述	56
4.2	光纤感测技术	59
4.2.1	光纤感测技术的基本原理	59
4.2.2	光纤感测技术的基本构成	60
4.2.3	光纤感测技术的分类	60
4.3	几种常用的岩土工程分布式光纤感测技术	62
4.3.1	光纤布喇格光栅感测技术	62
4.3.2	基于瑞利散射的全分布式光纤感测技术	64
4.3.3	基于拉曼散射的全分布式光纤感测技术	64
4.3.4	基于布里渊散射的全分布式光纤感测技术	65
4.3.5	岩土工程常用光纤感测技术性能比较	70
4.4	地质与岩土工程多场光纤测试与监测技术	72
4.4.1	地质与岩土工程中的场	73
4.4.2	地质与岩土工程多场光纤传感器结构设计	74
4.4.3	岩土工程多场光纤测试与监测分析系统的总体结构设计	78
4.4.4	地质与岩土工程多场光纤测试与监测总体结构设计	79
4.4.5	地质与岩土工程光纤监测技术相关产品	79
4.5	土中含水率分布式光纤测定方法	85
4.5.1	概述	85
4.5.2	基本原理	86
4.5.3	温度特征值定义及 C-DTS 系统设计	86
4.5.4	方法的验证	89
4.5.5	试验结果分析	90
4.5.6	误差分析	92
4.5.7	降水过程中模型土体水分场测定	92
4.5.8	基坑抽水过程中土体剖面含水率变化测试	94
4.5.9	结论	97
4.6	土工离心机模型光纤光栅测试系统	98
4.6.1	概述	98
4.6.2	测试系统	99
4.6.3	边坡离心模型试验	101

4.6.4	结果与分析	103
4.6.5	结论	106
5	岩土工程测试中的物联网技术	112
5.1	概述	112
5.2	物联网相关技术	113
5.2.1	无线传感器网络	113
5.2.2	无线传输技术	116
5.3	基于物联网技术的岩土工程安全监测意义	117
5.4	基于物联网技术的岩土工程监测内容、仪器、设备	118
5.4.1	监测内容	118
5.4.2	监测设计原则	119
5.4.3	监测仪器设备	119
5.4.4	监测方法	125
5.5	信息处理与智能分析技术	126
5.5.1	数据融合的层次	127
5.5.2	数据融合的方法	128
5.6	基于物联网的岩土工程监测信息综合管理系统	128
5.6.1	系统总体架构	129
5.6.2	系统建设内容及功能组成	130
5.6.3	信息化管理平台	134
5.7	基于物联网的岩土工程安全监测应用实例	135
5.7.1	项目背景	135
5.7.2	项目实施	136
5.7.3	项目结果	137
6	铁路路基工程监测技术	142
6.1	概述	142
6.1.1	铁路路基工程监测意义	142
6.1.2	铁路路基工程监测现状及发展趋势	143
6.2	铁路路基土质边坡监测技术	144
6.2.1	监测区工程概况	145
6.2.2	监测区边坡稳定性分析	146
6.2.3	监测技术及系统构建	148
6.2.4	边坡变形监测系统施工及防护	152
6.2.5	小结	154
6.3	冻土地区高速铁路路基长期自动监测技术	155
6.3.1	哈大高铁路基监测内容及测点布设方案	155
6.3.2	长期自动监测系统组成及特点	156
6.3.3	基于液力测量的路基沉降变形监测技术	159
6.3.4	传感器和监测仪器现场安装工艺	160

6.3.5	监测结果分析	162
6.3.6	小结	166
6.4	北京地铁 14 号线下穿京津城际和京沪铁路路基变形监测	166
6.4.1	工程概况及工程地质和水文地质条件	166
6.4.2	监测方案	168
6.4.3	监测数据分析	174
6.4.4	小结	179
7	码头结构监测技术	182
7.1	港口工程概况	182
7.2	码头结构现场监测概述	182
7.2.1	码头结构的主要形式	182
7.2.2	码头结构现场监测的目的与原则	184
7.2.3	原型观测的内容	185
7.3	码头结构现场监测技术	186
7.3.1	位移和变形观测技术	186
7.3.2	土压力观测及土压力计埋设技术	189
7.3.3	桩身和墙体弯矩测试技术	190
7.4	工程实例	192
7.4.1	唐山港京唐港区工程概况	192
7.4.2	工程地质条件	193
7.4.3	码头结构形式	193
7.4.4	测试内容及测点布置	193
7.4.5	测试结果与分析	196
7.5	本章小结	209
8	离岸深水防波堤监测技术	211
8.1	离岸深水防波堤简介	211
8.1.1	传统直立式防波堤	211
8.1.2	传统斜坡式防波堤	212
8.1.3	传统混合式防波堤	213
8.1.4	新型防波堤介绍	213
8.2	总体监测思路与难点	214
8.2.1	离岸深水防波堤监测的必要性	214
8.2.2	监测的主要内容	215
8.2.3	开敞式深水离岸结构原位监测难点	216
8.2.4	监测的频率与监测报警值	217
8.2.5	仪器设备的保护	217
8.3	监测的关键技术	219
8.3.1	整体变形监测技术	219
8.3.2	外荷载监测技术	224

8.3.3	内力监测技术	228
8.3.4	分布式自动化监测系统	231
8.4	工程实例	234
8.4.1	徐圩港区防波堤工程概况	234
8.4.2	测点布置	235
8.4.3	负压下沉工况中桶体的监测及分析	242
8.4.4	运行期间桶体的监测及分析	247
8.4.5	单侧回填工况中桶体的监测及分析	250
8.4.6	原位观测结论和建议	254
9	跨海基础设施与结构物测试技术	256
9.1	概述	256
9.1.1	跨海通道工程建设特点及建设情况	256
9.1.2	跨海通道测试技术现状及发展趋势	258
9.2	人工岛建设工程测试技术要求	259
9.2.1	岛壁结构监测技术要求	259
9.2.2	人工岛岛内地基监(检)测技术要求	259
9.2.3	岛隧过渡段复合地基监(检)测技术要求	260
9.2.4	人工岛挤密砂桩载荷试验技术要求	260
9.3	沉管隧道建设测试技术要求	260
9.4	人工岛建设监测技术实例	260
9.4.1	港珠澳大桥西人工岛工程概况	260
9.4.2	水文地质情况	260
9.4.3	监测检测技术难点	263
9.4.4	岛壁钢圆筒区监测	263
9.4.5	岛内区地基处理监测检测	269
9.4.6	沉管过渡段沉降监测	275
9.4.7	水下地基载荷试验技术	283
9.4.8	人工岛监测检测创新点	285
9.5	沉管隧道施工监测技术	286
9.5.1	沉管隧道施工监测内容	287
9.5.2	监测方法	288
9.5.3	监测实例	290
9.5.4	沉管隧道基床载荷试验	295
10	隧道工程监测技术	299
10.1	隧道传统监测技术	299
10.1.1	盾构隧道工程	299
10.1.2	山岭隧道工程	304
10.1.3	应用实例	311
10.2	隧道监测新技术	326

10.2.1	概述	326
10.2.2	监测内容和方法	327
10.2.3	监测频率与周期	337
10.2.4	采集监测设备	338
10.2.5	远程自动化监测技术	339
10.2.6	应用实例	346
11	基坑工程监测	352
11.1	引言	352
11.1.1	基坑工程监测目的与意义	352
11.1.2	监测总体要求	352
11.1.3	监测对象	353
11.1.4	监测工作程序	353
11.1.5	监测质量控制	353
11.2	监测准备	354
11.2.1	现场踏勘及资料收集	354
11.2.2	监测方法与监测项目	355
11.2.3	测点布置	357
11.2.4	监测频率	359
11.2.5	监测报警值	361
11.2.6	监测方案编制	364
11.3	监测实施	364
11.3.1	水平位移监测	364
11.3.2	深层水平位移监测	366
11.3.3	竖向位移监测	367
11.3.4	倾斜监测	370
11.3.5	裂缝监测	371
11.3.6	支护结构内力监测	371
11.3.7	锚杆及土钉内力监测	373
11.3.8	土压力监测	374
11.3.9	地下水位监测	375
11.3.10	孔隙水压力监测	376
11.3.11	现场巡查	376
11.4	监测成果及应用	377
11.4.1	监测数据处理与分析	377
11.4.2	成果反馈	378
11.4.3	基坑风险评估	379
11.4.4	信息化施工与动态设计	380
11.5	工程实例	382
11.5.1	工程实例 1: ××基坑工程监测总结报告	382

11.5.2	工程实例 2: ××基坑工程监测总结报告	395
12	城市轨道交通工程监测技术	406
12.1	概述	406
12.2	工程监测要求	407
12.2.1	工程影响区及监测范围的划分	407
12.2.2	工程监测等级划分	408
12.2.3	仪器监测项目要求	409
12.2.4	现场巡视内容要求	412
12.2.5	监测点布设要求	413
12.2.6	工程监测仪器设备要求	418
12.2.7	监测设施安装埋设要求	420
12.2.8	监测频次要求	423
12.2.9	监测控制值要求	425
12.2.10	监测管理要求	430
12.2.11	运营阶段监测要求	433
12.3	轨道交通工程安全监测与风险管理平台	433
12.3.1	首页界面	434
12.3.2	监测管理	434
12.3.3	风险管理	435
12.3.4	隐患排查	437
12.3.5	文档管理	439
12.3.6	视频监控	439
12.3.7	GIS 地图	440
12.3.8	手持智能终端	440
12.4	基坑工程变形自动化监测实例	441
12.4.1	工程概况	441
12.4.2	监测方案	442
12.4.3	监测实施	443
12.4.4	监测成果	445
12.5	联络通道安全监测实例	449
12.5.1	工程概况	449
12.5.2	监测方案	450
12.5.3	监测实施	453
12.5.4	监测成果	454
12.5.5	监测工作小结	457
12.6	隧道近距离穿越运营盾构隧道工程自动化监测实例	458
12.6.1	工程概况	458
12.6.2	监测方案	459
12.6.3	监测实施	461
12.6.4	监测成果	463

12.6.5	监测工作总结	466
12.7	地铁保护区基坑开挖对运营盾构隧道影响的监测实例	467
12.7.1	工程概况	467
12.7.2	监测方案	468
12.7.3	监测实施	470
12.7.4	监测成果	471
12.7.5	监测工作总结	478
13	边坡工程监测技术	479
13.1	边坡工程监测概论	479
13.1.1	监测内容与监测方法	479
13.1.2	监测设计基本要求	480
13.1.3	巡视检查	483
13.2	监测工作实施	483
13.2.1	边坡表面变形监测	483
13.2.2	坡体深部位移监测	484
13.2.3	支护结构受力监测	485
13.2.4	边坡地下水监测	486
13.3	监测资料整理与分析	487
13.3.1	监测资料的收集与整理	487
13.3.2	各种监测物理量表达方式	488
13.3.3	监测资料分析方法	490
13.3.4	监测成果解释	492
13.4	边坡监测应用工程案例	493
13.4.1	红岩滑坡概况	493
13.4.2	边坡工程地质条件	493
13.4.3	HP1 滑坡处置过程的边坡变形	494
13.4.4	坡脚抗滑桩施工过程的边坡变形监测	495
13.4.5	施工期间滑坡可能失稳时间的 Verhulst 模型预报	497
13.4.6	抗滑桩系统承载过程及边坡稳定性	498
13.4.7	边坡监测基本认识	499
14	桩基完整性测试中的若干疑难问题研究与分析	501
14.1	概述	501
14.2	桩土模型	501
14.2.1	Voigt 土体模型	502
14.2.2	平面应变土体模型	503
14.2.3	管桩焊缝模型	505
14.3	分析与讨论	507
14.3.1	桩基尺寸效应及几何形状效应	507
14.3.2	焊缝质量	514
14.3.3	激振频率对检测结果的影响分析	519
14.4	结论	522

1 概述

1.1 岩土工程测试的意义

岩土工程是土木工程的分支，是运用工程地质学、土力学、岩石力学的理论与方法，解决各类工程中关于岩石、土的工程技术问题的科学。其内容包括：岩土工程勘探、岩土工程设计、岩土工程治理、岩土工程监测、岩土工程检测等。

岩土工程测试就是对岩土体的工程性质进行观测和度量，得到岩土体的各种物理力学指标的试验工作。随着现代化建设事业的飞速发展，各类建设工程呈现高、大、深、重的发展趋势，给岩土工程领域带来了新的发展契机，如一系列新理论及新设计方法的出现，同时也对岩土工程测试技术提出了更高的要求。发展岩土工程测试技术具有重要的意义，主要体现在：

1) 岩土工程测试技术推动了岩土工程理论的形成和发展。理论分析、室内外测试和工程实践是岩土工程分析的三个重要方面。岩土工程的许多理论是建立在试验的基础上，如太沙基（Terzaghi）的有效应力原理建立在压缩试验中孔隙水压力的测试基础上，达西（Darcy）定律建立在渗透试验的基础上，剑桥（Cambridge）模型建立在正常固结黏土和超固结黏土三轴压缩试验的基础上。

2) 岩土工程测试技术是保证岩土工程设计合理可行的重要手段。随着经济社会的发展，工程实践中出现了更多、更复杂的岩土工程问题，需要运用创新的工程设计方法来解决。创新的设计方法要求测试技术不断发展突破，提高岩土体物理力学参数的测试水平，进而保证岩土工程设计的合理、经济、可行。

3) 岩土工程测试技术是岩土工程施工质量与安全的重要保障。现场测试已成为岩土工程施工，特别是大型岩土工程信息化施工中不可分割的重要组成部分。监测技术在基坑工程、桩基工程、边坡工程、地下工程、路基工程等工程的施工中发挥着越来越重要的作用。

4) 岩土工程测试技术是保证大型重要岩土工程长期安全运行的重要手段。在重大岩土工程的运营过程中，如地质条件复杂的越江海隧道、大型地下空间、大型高陡边坡、高速铁路路基等工程需要在运营期间对岩土工程及其结构的变形、受力、渗流、沉降等进行长期监测，以保证其运营期的安全，避免重大工程事故的发生。

1.2 岩土工程测试的内容

岩土工程测试技术一般分为室内试验技术、原位测试技术和现场监测技术三个方面，在整个岩土工程中占有特殊而重要的地位。

1.2.1 室内试验技术

室内试验技术能进行各种理想条件下的控制实验，在一定程度上容易满足理论分析的要求。室内试验主要包括土的物理力学指标室内试验、岩石的物理力学指标室内试验、利用相似材料完成的岩土工程模型试验和采用数值方法完成的数值仿真试验。以下仅列举一些试验的具体名称。

1) 土的物理力学指标室内试验主要包括：土的含水量试验、土的密度试验、土的颗粒分析试验、土的界限含水量试验、相对密度试验、击实试验、回弹模量试验、渗透试验、固结试验、黄土湿陷试验、三轴压缩试验、无侧限抗压强度试验、直剪试验、反复直剪强度试验、土的动力特性试验、自由膨胀率试验、膨胀力试验、收缩试验、冻土密度试验、冻土温度试验、未冻土含水量试验、冻土导热系数试验、冻胀量试验和冻土融化压缩试验等。

2) 岩石的物理力学指标室内试验主要包括：含水量试验、颗粒密度试验、块体密度试验、吸水试验、渗透性试验、膨胀性试验、耐崩解性试验、冻融试验、岩土断裂韧度测试试验、单轴压缩强度和变形试验、三轴压缩强度和变形试验、抗拉强度试验、点荷载强度试验等。

3) 岩土工程模型试验主要采用相似理论，用与岩土工程原型力学性质相似的材料，按照几何常数缩制成室内模型，在模型上模拟各种加载和开挖过程，研究岩土工程的变形和破坏等力学现象。模型试验种类繁多，主要包括：岩土工程开挖施工过程围岩破坏规律试验、岩土工程加固机理研究、地下工程开挖引起的地表损害规律研究、岩爆机理研究、地下洞室支护设计优化分析、离心模型试验等。

4) 数值仿真试验利用计算机进行岩土工程问题的研究，具有可以模拟大型岩土工程、模拟复杂边界条件、成本低、精度高等特点。岩土工程数值仿真试验主要方法包括：有限元法、离散元法、边界元法、有限差分法、不连续变形法、颗粒流法、无单元法等。

1.2.2 原位测试技术

原位测试可以最大限度地减小试验前对岩土体的扰动，避免扰动对试验结果的影响。原位测试结果可以直接反映岩土材料的物理力学状态，更接近工程实践的实际情况。同时，对于某些难以采样进行室内测试的岩土材料（如承受较大固结压力的砂层），原位测试是必需的。在原位测试方面，地基中的位移场、应力场测试，地下结构表面的土压力测试，地基土的强度特性及变形特性测试等是研究的重点。原位测试技术可以分为土体的原位测试试验和岩体的原位测试试验两大类。

1) 土体的原位测试试验主要包括：载荷试验、静力触探试验、动力触探试验、标准贯入试验、十字板剪切试验、旁压试验、现场剪切试验、地基土动力特性原位测试试验、场地土波速测试、场地微震观测、循环荷载板试验、地基土刚度系数测试、振动衰减测试、渗透试验等。

2) 岩体的原位测试试验主要包括：地应力测试、弹性波测试、回弹试验、岩体变形试验、岩体强度试验等。其中地应力是存在于地层中的未受工程扰动的天然应力，也称原岩应力，它是引起地下工程开挖变形和破坏的根本作用力。地应力测试的结果对地下工程

洞室和巷道的合理布置、地下洞室围岩稳定性数值分析和地下工程支护设计方案的优化设计具有重要意义,应引起充分重视。

1.2.3 现场监测技术

现场监测技术是随着大型复杂岩土工程的出现而逐渐发展起来的,在水电工程大型地下厂房群、城市地铁建设中的车站及区间隧道、大型城市地下空间、跨海基础设施与结构物、大断面盾构隧道、高陡边坡灾害监测及加固等工程施工中,由于信息化施工的普及,现场监测已成为保证工程安全施工的重要手段之一。以下仅简介现场监测技术涉及的领域和分类。

1) 岩土工程现场监测涉及的领域众多,主要包括:水利水电工程、铁路、公路交通、矿山、城市建设、国防建设、港口建设、地下空间开发与利用等。

2) 岩土工程现场监测的分类。按开展监测的时间,岩土工程现场监测可分为施工期监测和运营期监测。按监测的建筑物类型,岩土工程现场监测可分为大坝监测、地下洞室监测、隧道监测、地铁监测、基坑监测、边坡监测、支挡结构监测等。按影响因素,岩土工程现场监测可分为对人类活动进行的监测、自然地质灾害监测。按监测物理量的类型,岩土工程现场监测可分为变形监测、应力(压力)应变监测、渗流监测、温度监测和动态监测等。按监测变量,岩土工程现场监测可分为原因量监测和效应量监测,原因量即环境参量,它们的变化将引起建筑物性态的变化;效应量是建筑物对原因量变化而产生的响应。

1.3 岩土工程测试技术发展现状与展望

1.3.1 岩土工程测试技术发展现状

随着现代化科学技术的发展,现代测试技术较传统机械式的测试技术已发生了根本性的变革,在符合岩土力学理论和满足工程要求的前提下,电子计算机技术、电子测量技术、光学测试技术、航测技术、电磁场测试技术、声波测试技术、遥感测试技术等先进技术在岩土工程测试技术中得到了广泛应用,进而推动了岩土工程测试技术的快速发展,更先进、精密的测试设备相继问世,使测试结果的可靠性、可重复性得到很大的提高。经过多年的发展,岩土工程测试技术的主要进展包括:

1) 测试方法和试验手段的不断更新。岩土工程测试技术与现代科技结合,一些传统测试方法得以改进。如近年来,采用原位测试技术确定土工参数在国内外普遍受到重视。该方法特别适用于对深层土和难以取土样(如砂土、卵砾石等)或难以保证土样质量的土进行土工参数确定。岩土工程物探技术通过探测对象与其周围介质间的物性差异(电性、磁性、波速、温度等),目前广泛应用于工程地质勘察及工程质量鉴定与检测中。表面水平位移观测采用全站仪,深层侧向位移观测出现了梁式倾斜仪,分层沉降观测中开始采用磁环式沉降仪等,试验手段得到不断更新。

2) 大型工程的自动监测系统不断出现。软基加固、公路路基、基坑支护等工程现场监测很多采用了先进的实时自动化监测,如多通道无线遥测隧道围岩位移系统已用于工程

实践,基于地理信息系统(GIS)和可视化技术的大型边坡安全监测系统已经有了成功的使用等。

3) 一系列新型技术应用于岩土工程测试中。如国内外已有将光纤测试技术用于岩土工程现场监测中的实例。光纤布拉格光栅传感器已经用于深基坑钢筋混凝土内支撑应变监测。大测距的分布式光纤技术,开始实现由点到线的监测,甚至可以完成重大工程的三维在线监测。声发射技术在岩体监测预警、地应力测试等领域得到了广泛应用等。此外,瞬变电磁仪、红外成像仪、近景摄影测量技术、地质雷达等新型技术探测精度高、抗干扰能力强,正逐渐成为岩土工程勘察及监测预警中不可或缺的技术手段。

4) 监测数据的分析和反馈技术提高迅速。基于物联网技术的岩土工程安全监测系统能够可靠方便、高效快捷地实现岩土工程安全监测自动化、无损化,是近年来逐渐兴起的新型监测技术。先进的三维地质建模软件、数据库系统、数据挖掘和专家系统等正在得到逐步应用。人工神经网络技术、时间序列分析、灰色系统理论、因素分析法等数据处理技术得到了广泛应用。岩土工程反分析研究取得了重要进展,反分析得到的综合弹性模量等参数成为岩土工程围岩稳定性数值模拟分析的重要基础,在岩土工程信息化施工中发挥了巨大作用。岩土工程施工监测信息管理、监测预警系统的发展成绩显著。

5) 第三方监测得到日益推广和认可。实施城市地下工程施工第三方监测是保证施工安全和工程质量十分重要的举措,有效地避免了施工过程中可能发生的事故。此外,对于城市地铁工程、跨海基础设施等重大岩土工程问题,监测不仅在施工过程中开展,还需在运营过程中进行,岩土工程地运营期间地长期健康监测系统的建立和研究已经发展为岩土工程领域的重要课题之一。

1.3.2 岩土工程测试技术发展展望

随着岩土工程规模的不断增大,工程施工技术要求越来越高,测试技术成为保证安全施工的重要手段。为满足不断发展的岩土工程对测试技术的要求,岩土工程测试技术需进一步发展,具体发展趋势如下:

1) 国产设备的改进及进口设备国产化。目前,国产岩土工程现场监测仪器的信息化程度及其监测精度有待进一步提高,以满足当前日益提高的岩土工程测试技术的要求。此外,国外设备虽然具有较好的精度和较高的信息化程度,但造价高昂,一定程度上限制了其在岩土工程测试领域的应用。因此需要进一步消化吸收先进的国外监测仪器技术,促进先进仪器国产化,降低监测仪器的成本。

2) 新型测试仪器及测试技术的开发。针对岩土工程测试中出现的新问题,依靠现有测试设备及技术难以完成相应测试任务,如岩土体物理力学性质和参数的原位直接测试、高可靠性地应力测试技术、盾构隧道施工超前预报技术、多物理场复杂受力过程监测技术等。

3) 岩土工程施工监测系统自动化及监测可靠性的提升。目前已有的适合现场施工人员使用的工程软件较少,且功能相对单一、集成性较差,导致数据分析实时性差,自动化、信息化程度低,及时反馈指导施工水平较差。因此,需进一步研究利用监测数据开展工程施工风险预测预报的完善系统,发挥监测工作的优化设计和及时反馈指导施工的作用。运用物联网技术与地理信息系统(GIS)等技术,将数据库管理、分析预测与综合信