

土工测试

刘松玉¹ 蔡正银²

(1.东南大学, 江苏南京 210096; 2.南京水利科学研究院, 江苏南京 210024)

摘要: 本文总结了国内外近年来在土工测试技术领域的发展, 主要包括室内试验技术, 土的特殊性质试验技术, 现场原位测试技术, 室内模型试验和土工监测技术等。分析表明现代原位测试技术和监测技术的应用和发展是发达国家土工测试技术研究的热点, 也是我国土工测试技术需要重点发展的方向。

关键词: 室内试验; 现场原位测试技术; 室内模型试验; 土工监测;

中图分类号: U 231+.3

文献标识码: A

文章编号:

Geotechnical Testing

Liu Songyu¹ Cai Zhengyin²

(1.Southeast University,Nanjing 210096, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute,Nanjing 210024, China)

Abstract : The recently developing geotechnical testing techniques are reviewed in this paper. These techniques include laboratory testing, special behaviour testing such as geoenvironmental, geothermal, electrical resistivity properties, in-situ testing, laboratory model and monitoring. It is stated that the in-situ testing and modern monitoring techniques such as CPTU, wireless networking should be strengthened to match the international advanced level.

Keywords : laboratory testing; in-situ testing; laboratory model testing; real time monitoring

E-mail: liusy@seu.edu.cn

引言

岩土介质由于其多相性、散粒性、自然性等特点, 具有十分复杂的工程力学性质。岩土工程参数确定与合理设计是保证工程质量、缩短工程周期、降低工程造价、提高经济效益和社会效益的关键技术之一。

岩土工程参数可以简单地分为两大类: 一是初始状态参数包括: 粒度、矿物成分、稠度、初始应力状态参数等; 二是与变形、稳定分析相关的力学状态参数包括: 渗透、压缩变形、刚度、强度指标等。图 1 为目前常用的岩土工程参数测试与分析方法^[1]。

1 室内试验技术进展

土的室内力学参数常用试验方法如图 2。

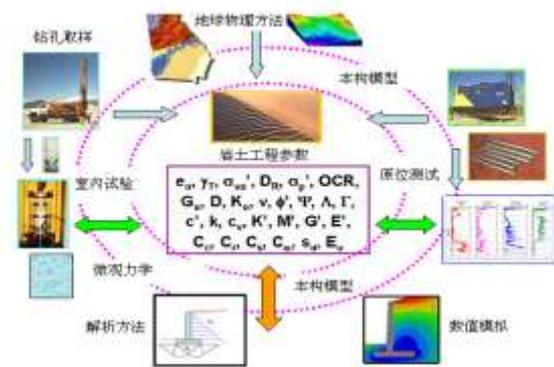


图 1 常用的岩土工程参数与测试方法

Fig.1 Geotechnical parameters and analysis methods

(Mayne P.W., 2005)

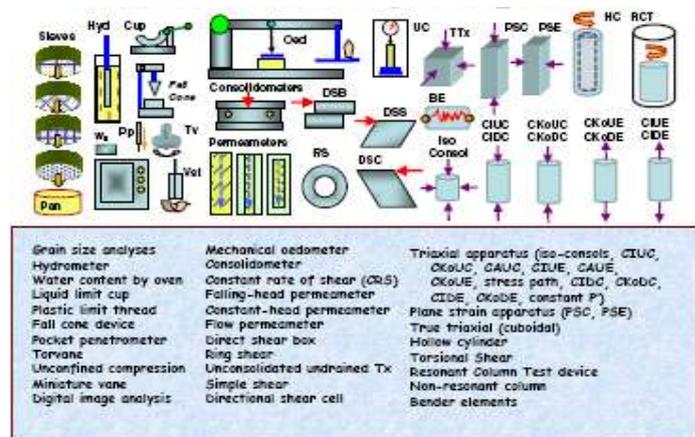


图 2 常用的室内土力学参数试验方法

Fig.2 Laboratory testing methods (Mayne P.W., 2010)

小应变试验技术自从 1989 年 Burland 提出以来, 无论在应用方面还是在试验方面都得到了快速发展, 应用方面包括挡土墙、隧道、开挖工程等, 试

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (40702047, 50478073)

作者简介: 刘松玉, 博士, 教授, 博士生导师

收稿日期:

验方面发展了弯曲元试验和现场试验等方法^{[2][3][4]}。在非饱和土试验方面, Orense 等发展了一种直接测量土饱和度的图像分析方法; 利用电阻率测试方法来估计吸力是近年不少学者关注的方法, 初步建立了电阻率与吸力的相关关系^[5]; 洪振舜等^[6]对高含水量软土的压缩特性, 采用改进的轻型固结仪进行了试验研究, 该装置有二套加压系统, 当竖向应力小于 12.5Kpa 时, 采用轻型加压系统, 其最小竖向应力为 0.5Kpa, 通过对连云港等软土的试验研究, 推广了 Burland (1990) 关于软土固有压缩曲线的适用范围。

温度作用下黏性土力学特性的研究是不少学者关注的课题, 近年来研究出了可控制温度的土力学试验装置, 包括等温固结试验^[7]、等温三轴试验^[8], 温度控制方式有水槽式、加热线圈式、实验室控温式等; 陈正汉等^[9]将常规三轴仪的台架与压力室置于一个电热恒温箱内, 实现了温控三轴试验, 并对不同温度下非饱和膨胀土变形和强度特性进行了研究; 白冰等^[10]研制出了一种饱和土热固结试验装置, 用来测定温度和外力荷载耦合作用下试样的热固结变形过程, 该装置采用筒状电热板嵌入压力室侧壁内的方法, 形成了一种灵敏度高的温控固结压力室系统, 压力室内温度可控制在 17℃~100℃ 范围内变化。

正如 Newson^[11]在 2010 年第十七届国际土力学大会所总结的, 近十几年来, 先进的测试技术在全世界各地各部门不断推广应用, 现有室内测试技术基本满足常规工程和研究需要, 近年进展主要表现在土工新材料和新用途如固体废弃物、土工加筋材料的室内试验技术和试验标准。

2 土的特殊性质试验技术

2.1 环境土工试验

针对我国日益需要的城市固体废弃物处理工程、垃圾卫生填埋工程, 近年来我国不少单位对固体废弃物的试验方法进行压缩和强度特性进行了试验研究, 研制了大孔隙介质导气系数测试装置、大尺寸压缩—渗透仪等^[12]。

对污染场地和废弃物污染需进行污染扩散评价, 另外对污染场地处理后需进行化学稳定性评价, 这时采用的主要试验为淋滤试验, 包括萃取淋滤试

验 (TCLP), 半动态试验或块体水槽试验 (Tank Test), 动态试验或柱体淋滤试验^{[13][14]}。

2.1.1 萃取淋滤试验 (TCLP)

TCLP 试验 (Toxic Characteristic Leaching Procedure), 也称为毒性淋滤试验, 是目前使用最多的淋滤试验规程。该方法是美国资源保护与回收法案 (RCRA, 1976) 针对危险废物和固体废物的管理于 1984 年制定的一套危险废物毒性浸出程序, 用于确定液体、固体和城市垃圾中 40 项毒性指标 (TC) 的迁移性。

TCLP 试验通过采用粉碎的测试材料和酸化的浸提液 (leachant) 来加速试样的淋滤过程。试验时, 测试材料和浸提液置于密封的聚乙烯瓶中, 通过连续的摇动提取, 促进试样中的污染物质在液相中的溶解和扩散。浸出液中的成分及其影响, 是确定该种废物是否为危险废物的重要依据。

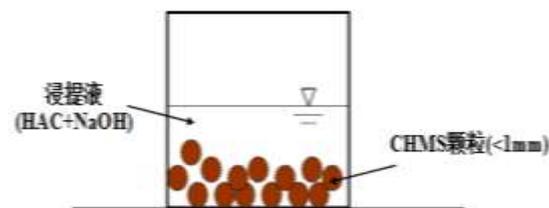


图 3 TCLP 淋滤试验示意图

Fig.3 TCLP testing method

2.1.2 半动态试验 (Semi-dynamic test) 或块体水槽试验 (Tank Test)

Tank 淋滤试验, 即水槽淋滤试验, 常用的 Tank 淋滤试验标准有欧洲的 EA NEN 7375 : 2004、美国的 ANSI/ANS-16.1-2003。该试验用于评价填埋场中废弃物的环境风险, 通过扩散试验确定整块试样中非有机质成分的淋滤特性, 该试验还可以推导出表面漂清 (surface rinsing) 程度和有效扩散系数等参数, 从而用来估计试样的长期淋滤特性。Tank 淋滤试验原理如图 4 所示, 将整块测试样淹没于浸提液中, 静止放置, 污染物质通过溶解、扩散的方式释放于浸提液中, 通过测试浸提液的成分和浓度评价试样的淋滤特征。

2.1.3 动态试验 (Dynamic test) 或柱体淋滤试验

柱体淋滤试验用于模拟污染物质在地下水水头压力下的淋滤过程, 试验时浸提液在柱中以连续向上通过试样的方式提取污染物质获得浸出液, 示意图如图 5 所示。该法主要用于评估无机成分的浸出

特征，主要有 ASTM 土柱淋滤试验标准 (ASTM D4874-95 2001) 和欧洲土柱淋滤试验标准 (prEN14405 2002)。

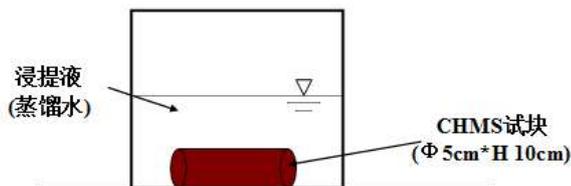


图4 Tank 淋滤试验示意图

Fig.4 Tank testing method

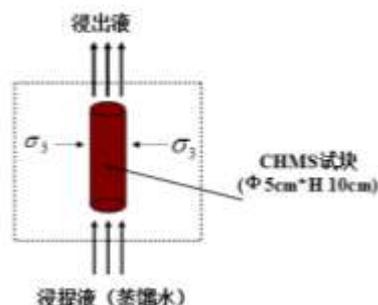


图5 柱体淋滤试验示意简图

Fig.5 Dynamic testing method

东南大学岩土工程研究所采用柔性壁三轴渗透仪对水泥固化铅污染土的化学稳定性进行了较详细的研究^[14]。

尽管上述各种淋滤试验规范为环境岩土工程研究者所广泛采用，但均存在不足之处：

(1) 萃取试验中所使用的土样均要求粉碎并过筛，这与现场非扰动污染土样有很大差别；

(2) TCLP 仅适合于模拟废弃物填埋场有机废弃物分解所产生的有机酸情况，与污染场地的固化处理有所区别；

(3) 柱状试验中未施加覆压力，这与污染场地的现场情况不符。且若没有上覆压力，可能导致土样与淋滤仪器的接触界面发生渗漏，从而影响试验结果。

2.2 土的热物性参数测试技术

地源热泵技术和能源基础工程技术是近年来涌现的新型节能环保技术，在国内外得到了应用推广。

研究表明，岩土基本性质包括岩土体种类、密度、含水率和热物性参数热导率和热扩散率，对地源热泵系统的设计影响很大，计算表明，传递相同热量所需传热管管长在含水率较高的岩土中为完全干土中的 1/3。因此，岩土热物性的确定是浅层地温

能应用设计的关键。

与地源热泵系统设计有关的土壤或岩石的热物性参数主要有热传导系数、比热和热扩散系数。其中，热传导系数是衡量其换热能力的最重要参数，主要取决于地层的成分、密度、温度和含水量等。测试方法可分为四类，即经验查表法、稳态热流法、非稳态热流法以及现场热响应测试法。

2.2.1 经验查表法

查表法一般也称为经验估计法。它是根据施工现场的岩土类型，从岩土热物性参数表中查取对应的热传导系数。如砂岩导热系数为 2.3-4.5 W/m·K；淤泥质土导热系数为 1.1-1.5 W/m·K。该方法由于岩土样含水量的变化和取值范围变化而导致其精度较差。

2.2.2 稳定热流法

该方法是一种实验室测定法，又分为平板法、圆球法、热流计法和比较法等，它们都基于稳定热流原理，即在测试样品的两面保持恒定的温差，通过测定热流及测试样品中的温度梯度，用傅立叶导热定律就可求得导热系数。稳定热流法的特点是原理简单，计算方便，精度较高，但试验时间较长，一般需要持续几个小时。且该方法不考虑径向的热流损失，因而要采取相应措施以减小径向热量损失，尽量减小待测样品的厚度。常用的热流法是稳态平板法。

2.2.3 非稳定热流法

非稳定热流法是在待测介质中引进一个具有一定几何形状的热源，通过测量热源附近介质和热源表面温度随时间的变化，来计算导热系数。该方法又分为瞬态热丝法、探针法和平板准稳态法等。应用较多是探针法(图 6)，它既可用于实验室测定也可用于现场测试，且试验时间短，一般不超过 20 分钟，一次测试往往能同时求得三个热性能参数(导热系数、导热系数和比热)。1992 年，美国材料与试验协会提出了用探针法测定土壤和软岩石热传导系数的测试标准^[15]。Rao 和 Singh^[16]用瞬态测试法对影响土体热阻的因素进行了研究；研究表明土体热导率与密度和含水量的对数成正比。同济大学的张旭和高晓兵^[17]利用探针法研究了不同含水率、不同密度条件下的土壤及不同比例的土沙混合物的导热系数，

得到了便于工程使用的土壤及土沙混合物导热系数的实验关联式；中科院地质与地球物理研究所的苏天明和刘彤等^[18]通过对南京地区土体样品含水量、孔隙比、比热容和导热系数等参数的测试，提出了根据土体含水量计算比热容值，根据含水量、孔隙比值计算热导率的经验公式。

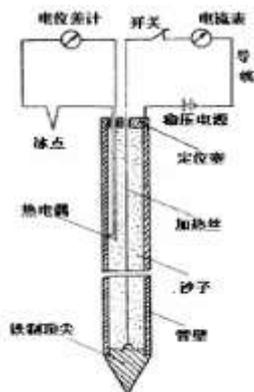


图6 探针法的测试装置示意图

Fig.6 Geothermal needle testing system

需要指出的是，一般探针的长度只有0.1-0.4 m长，探针加热测量的过程也很短，只能对其周围的很小一部分区域进行加热，所以探针法测量结果只是探针周围部分土壤的导热系数。由此可见，无论是稳态测试还是非稳态测试，实验室测试还是探针现场测试，其测试结果都不能准确反映实际地层的换热情况，特别是不能准确考虑地下水流动影响，一些实例也证明了使用这种测量或估计的导热系数作为计算参数是不安全的，尤其在有对流的区域。

2.2.4 现场热响应原位测试法(GRT)

目前，国外普遍采用一种现场原位测试岩土热物性参数的方法，即现场热响应测试法。该方法是在地热换热器的现场钻孔打井，井深度与实际井深一致。测试时，地下埋管换热器和测试系统内部的循环管道相连形成封闭环路，利用加热器或热泵向管路中的流体输入热量或冷量，当流体流经地下换热器时与地下岩土进行热交换，同时测得流体入口、出口温度和流量等数据，利用传热模型可计算岩土的热物性参数。测试的原理见图7所示。

利用现场热响应测试实验，可以准确反映施工现场的地质条件，能够得到较准确的土壤平均热传导系数和钻孔热阻等，为地源热泵地下换热器的设计提供可靠的计算参数。现场地热测试设备的设想第一次出现在1983年在斯德哥尔摩举行的国际能源

机构的国际会议上，Mogensen提出一种现场确定大地热传导系数和钻孔热阻的方法；1996年，第一台可移动地热反应测试设备在瑞典开始使用，1999-2000年间，在瑞典和美国设备的基础上，加拿大也研制了类似测试设备，目前，这种现场测试技术已推广到欧洲、亚洲、北美等；Katzenbach等^[19]总结了热响应测试方法的特点，并介绍了一种热响应测试的无线测试方法。

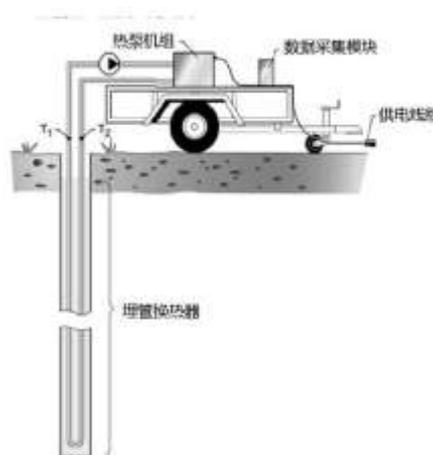


图7 土壤热物性原位测试原理示意图

Fig.7 Geothermal response testing system

国内岩土热响应测试设备研究较晚，在工程中的应用也很少^[20-23]。山东建筑大学地源热泵研究所李晓东、方肇洪等最早研制了一种手提箱大小的便携式岩土热物性测试仪器；北京华清集团先后研制了几种土壤热物性测试设备，其早期的仪器主要以加热器作为热源，2008年，研制并应用了一种冷、热响应测试仪。华中科技大学胡平放等也研发了电加热式和热泵式两类热物性测试仪，这两种测试仪均可进行换热量和热物性的测试。中国地质大学马志同、夏柏如等研制了一种利用加热器作为热源的浅层岩土热物性参数测量仪，根据能量守恒原理建立了圆筒壁传热模型，并根据传热模型编制了测量仪的数据处理软件。国内该测试技术还需进一步积累资料并加强理论研究，为能源基础工程设计提供科学依据。

2.3 土的电导率测试技术

土的电导率是表征土的导电性的基本参数，是导电率的倒数，是土的固有物性参数之一。研究表明，土的电导率取决于土的孔隙率、孔隙形状、孔隙液电阻率、饱和度、固体颗粒成分、形状、定向

性、胶结状态等。1942年, Archie 率先研究了土的电阻率与其结构性的关系, 提出了适用于饱和和无粘性砂岩的电阻率结构模型, Archie 还提出了土的结构因子的概念, 并建立了结构因子与孔隙率之间的关系模型。随后许多学者对土的电阻率理论进行了进一步的研究。1980年前后, 美国学者^{[24][25][26]}开始将此概念应用于无粘性土结构描述并应用于砂土液化评价, 他们在总结无粘性土电阻率研究成果的基础上, 沿用 Archie 定律, 通过测得水平向、竖直向电阻率以及孔隙水电阻率, 提出了三个基本电阻率结构参数: 平均结构因子 \bar{F} ($\bar{F} = (F_v + 2F_h)/3$), 式中 F_v 、 F_h 分别为竖直向、水平向的结构因子, 可反映土的孔隙率和孔隙结构; 平均形状因子 \bar{f} , 描述颗粒形状; 各向异性指数 A ($A = \sqrt{F_v/F_h}$), 可反映颗粒的定向排列, 并揭示出 F 、 f 的张量特性; 在此基础上, 进一步建立了这三个基本参数与最大剪切模量、压缩指数、膨胀指数、渗透系数、应力比、动力剪切模量的相关关系。

Fukue 等^[27]应用电阻率指标, 通过对天然状态 and 重塑状态粘性土电阻率测试, 建立了一个简单的粘性土电阻率模型, 并初步分析了电阻率指标与微观结构特征的关系。Aristodemous 等^[28]研究了应用电阻率指标确定土的渗透系数的方法, 并建立了由形状因子确定渗透系数的关系式。

Yoon 等^[29]分析了污染和吸附对砂土电阻率的影响特点。Delaney 等^[30]讨论了冻土的电阻率基本特征, 着重研究了低温和污染对电阻率的影响规律。Abu-hassanein 等^[31]研究了压实土的电阻率特征; 已有学者开始采用电阻率静力触探 (RCPT) 现场测试原状土的电阻率并用于评价土的天然结构状态和地基加固效果^[32]。刘松玉等^{[33][34][35][36]}开发研制了专用电阻率测试设备, 并研究了水泥土、结构性土、结构性膨胀土的电阻率变化规律并在现场进行了初步应用, 取得了一定的成果; 刘国华等^[37]开展了不同土的室内电阻率试验, 分析了影响电阻率的基本因素, 并采用电阻率层析成像技术进行地下探测; 查甫生^[38]等对黄土湿陷过程中的电阻率参数进行了测试, 得出了黄土湿陷过程的微结构变化的定量规律; 太原理工大学^[39]对不同浓度硫酸溶液对水泥土污染

后的电阻率特征进行了研究, 建立了预测任意浓度和龄期的水泥土电阻率公式。电阻率测试在土的结构分析、环境岩土工程领域等具有较大的应用前景, 还需要从测试和应用规范化方面加强研究。

3 土工原位测试技术

原位测试技术由于其不需取样、连续测试等优点, 在岩土工程中得到了广泛应用和发展。图 8 为国内外采用的原位测试方法一览表。Dejong 等^[40]把原位测试方法分为三类: 无损或半无损型、贯入型、组合型。下面重点介绍 CPTU, BAT, TDR 技术及其发展。

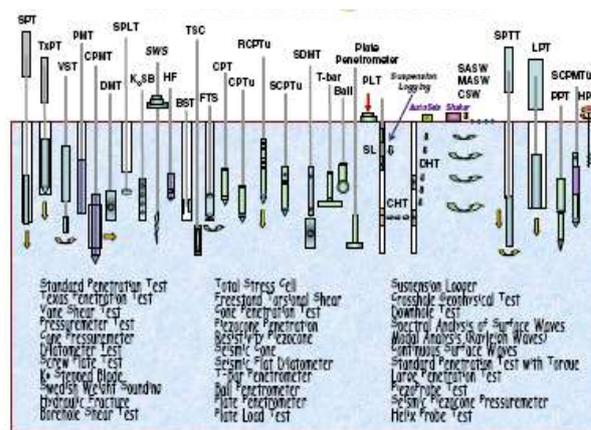


图 8 土工原位测试方法示意图

Fig.8 In-situ testing methods (Mayne P.W., 2010)

3.1 多功能 CPTU 技术

静力触探技术 (CPT) 作为最主要的原位测试技术, 具有快速便捷、不需取样、采集数据量大、干扰小及费用低廉的优点, 尤其适用于高速公路、铁路这种线形分布、范围广泛的大型工程。国内外 CPT 技术发展历史见表 1。从 20 世纪 80 年代中期开始, 随着岩土工程特别是环境岩土工程的发展, 国际不少研究机构 (如英属哥伦比亚大学 UBC、美国 Georgia Institute of Technology、荷兰 Delft 土工所等) 和专业原位测试仪器开发公司 (如 Hogentogler、Vertek、ConeTec、Furgo 公司等) 研制开发了用于 CPTU 的新传感器, 进一步加强了 CPTU 技术在环境岩土工程中的应用, 促使 CPTU 向多功能和数字化方向发展^[41]。表 2 是国际上已研制成功的 CPT 新型传感器情况。

表 1 CPT/GPTU 发展史简表

Table1 CPT/CPTU history

阶段	特征	优缺点
第一阶段 (1932-1948)	机械式	简单、方便与便宜；存在严重缺点，主要是套管与钢杆之间的摩擦、侧绕相互作用、及泥土挤入等因素，大大影响了贯入阻力的测试精度。另外测试装置本身的测读精度及连续性，也限制了该技术的推广。
第二阶段 (1948-至今)	电测式	简单；地层阻力—空心柱变形—电阻变化—电压变化—微电压测量；要求测量设备精度很高，电缆噪音对数据影响较大；目前电阻应变仪、数字式测力仪（手动记录）和自动记录仪（应用最广，可连续记录，但灵敏度不如应变仪），微机采集处理系统有应用，提高了效率，但精度不能令人满意。
第三阶段 (1970-至今)	电子式	探头中的电子装置进行信息测量并传输至电缆末端的数据采集系统；采集计算机向下发送电压激励—调制—通过应变仪，信号放大后通过电缆传输至计算机，模—数转换后，显示记录。与电测式探头比较，电压在探头中经过调制与放大，然后传输，不受电缆的影响；问题是每个通道都需要独立的一套线来传输数据，这就限制了探头功能的扩展。
第四阶段 (1985-至今)	数字式	数字式将上述工作在探头中进行了处理：计算机输送电压，调制后通过应变仪；探头拥有自己的模—数转换电路板和微处理器、温度补偿，在探头中收集数据后，以 ASCII 格式连续的传输到地表计算机；所有的信号都可以通过同一根线传输，减少了电缆线的冗余，允许探头有更多的测试通道，即实现了探头的多功能化，多参数测试功能。

表 2 国际 CPT 最新传感器一览表

Table2 New CPT sensors

传感器	测量参数	应用情况	研制时间及单位
侧压力传感器(Lateral Strees)	侧向应力	尚未投入使用	美国加利福尼亚伯克利分校 (UCB, 1990)
旁压静探仪(Cone Pressuremeter)	应力, 应变 (确定模量)	有应用, 未成熟	Fugro (1986)
地震波传感器(Seismic CPT)	波速 V_p 、 V_s	广泛应用, 已成熟	加拿大不列颠哥伦比亚大学 (UBC, 1986)
电阻率传感器(RCPT)	电阻率	有应用, 基本成熟	荷兰 (1985)
热传感器	温度、热传导率	尚未投入使用	Fugro (1986)
放射性传感器	重度、含水量	有应用	Delft Geotechnics, (1985)
激光荧光传感器(LIF)	荧光强度	有应用	Hirshfield (1984)
可视化静力触探(VisCPT)	图象、Energy、wavelet	有应用	Hryciw, R. D. (1997)

我国 1954 年由陈宗基教授自荷兰引进机械式静探仪，并在黄土地区进行了试验研究。1964 年，王钟琦等独立成功地研制出我国第一台电测式单桥触探仪，测定包括锥尖阻力和侧壁摩阻力的总贯入阻力，很快得到了推广应用，并建立了比贯入阻力与土性参数之间的经验关系，在国内是一种比较成熟的探头，而国外则没有应用。20 世纪 70 年代我国也研制出能区分侧阻力和锥尖阻力的双桥探头。目前，在国内岩土工程设计过程中，主要采用我国上世纪 60 年代的单桥静力触探和双桥静力触探技术，近 20

多年来几乎没有发展，测试精度低、分辨率低、稳定性差、功能单一，应用粗糙，严重影响了设计水平的提高，与国际先进的多功能 CPTU 有很大差距(表 3)^[41]。我国一些专家学者开始注意研究现代 CPTU 技术，在理论和应用上取得了一定进展，但未有本质变化，且单桥静力触探的使用历史较长，在推广上 CPTU 受到了限制，使其难以发展。近年来东南大学原位测试课题组通过引进原装国际标准 CPTU 测试系统，开展了一系列研究工作，取得了一定进展^[42-45]。

表 3 可提供岩土设计参数设计表

Table3 Comprison of measured parameters between Chinese CPT and international CPTU

静力触探	剖面分层	液性指数、 相对密度	压缩模量	强度参数	固结系数	渗透系数	孔隙水压力	静止土压 力系数	超固结比	动力参数
单桥双桥	√	√	√	√						
多功能 CPTU	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

注：√表示可提供

我国与国外 CPT 技术应用的差别主要有以下几个方面:

1. 技术规格方面: 我国主要使用的是单桥探头和双桥探头, 探头规格与国际通用不同; 2. 指标方面: 我国主要用: q_c 、 f_s 、 p_s , 而国际已普遍采用 B_q 、 R_f , 即可测孔压的 CPTU 技术已经广泛使用; 3. 理论研究方面: 国际 CPT 的应用建立在较完善的理论基础之上, 包括 CPT 贯入机理、影响因素、相关指标选取等方面, 已达到较理性的程度。而我国对 CPT 贯入机理、理论的研究不够深入, 常常用一些经验关系把贯入阻力与土的物理力学性质联系起来, 建立经验公式; 4. 精度和可靠性方面: 我国由 CPT 测试结果所推算出的各土层物理力学参数仅作为钻孔资料的参考值, 基本上不能直接作为设计参数使用。国外在利用 CPTU 成果来求取土的各种参数的可靠性比国内好; 5. 多功能测试方面: 国外新型传感器技术已得到应用, 并已大量应用于环境岩土工程领域。而我国仍采用单桥和双桥探头, 功能单一, 在环境岩土工程领域方面应用还是一片空白。

3.2 几种新型 CPT 测试技术^[46]

3.2.1 电阻率静力触探 RCPTU

RCPTU 作为一种新型的原位测试技术, 除有常规 CPTU 测试功能外, 还能测试土的现场电阻率, 可用于地基处理效果评价、液化评判、污染场地评价与环境岩土工程等。RCPTU 设备的核心部分为电阻率传感器, 目前主要有: UBC 探头: 1993 年, Campanella 等研发双电极 CPTU (RCPTU) 探头, 可以同时测出孔隙水压力、水电阻率、土电阻率、侧壁摩阻力和锥尖阻力; Hogentogler 探头: 电阻率测试部分主要由四个铜质电极以及内部的电路系统等所组成, 铜电极之间用绝缘塑料隔离开来, 形成 O 形环状密封系统, 通过其内部的电路系统与四个电极同步、连续地测量内部两电极间的电压变化, 并根据欧姆定律原理编制计算程序计算电极周围土体的电阻率大小。

3.2.2 无线 CPT 技术

无线数据传输的优点: 完全和水隔离不受雷电干扰, 避免由于电缆损坏而丢失数据, 减少现场安装成本, 无不牢固点等。瑞典 Geotech 公司于上世纪七十年代早期开始研发无线声波 CPT 系统, 目前

无线声波 CPT 系统已升级到第四代, 后来又开发出无线电波 CPT 系统, 目前为止 Geotech 公司提供无线声波和无线电波 CPT 系统。

3.2.3 海上 CPT 技术

目前, 国外已将 CPT 测试技术应用到海底土力学测试, 为海洋工程构筑物, 特别是为海上油气开发平台和输油管线的地基稳定性评价等提供设计参数。海上 CPT 分为: 下孔模式和海床模式。

下孔模式: 贯入仪通过钻孔护筒贯入海底土中, 在钻孔底端的土很少扰动, 并且可以得到高质量的 CPT 结果。海床模式: 贯入仪由探杆连接到海底, 从海底固定装置连续贯入到土中, 该模式据设备的重量、贯入深度和探头直径大小等可分为轻型海床 CPT 系统和重型海床 CPT 系统。

3.3 BAT 技术

80 年代, 瑞典工程师 Beng-Arne Tosrtensosn 开发出专门用于测试地基原位孔隙水压力、固结系数和渗透系数的 BAT 系统。该技术在西欧、美洲, 特别是荷兰、英国、挪威、加拿大、美国诸国得到迅速发展。2001 年才由浙江大学岩土工程研究所从荷兰引进 BAT 系统, 并在实际工程中进行了应用^{[46][47]}。

BAT 测试系统主要由滤头、玻璃容器、电子压力传感器、控制系统和套管等设备组成。现场测试渗透系数时根据地下水压力可以将渗透系数的测试方法分为抽水试验和压水试验二种。当玻璃容器内压力小于地下水压力时, 地下水将向滤头渗流, 称之为抽水试验, 反之为压水试验。根据测试过程中玻璃容器内压力变化情况, 计算固结土体的原位渗透系数。

BAT 系统测试地基水平固结系数的基本原理是通过测量滤头贯入引起的超静孔隙水压力消散过程, 采用圆柱型空腔扩张及轴对称一维固结理论模拟, 分析得出水平固结系数。该方法简单快速, 还可以取水样进行化学分析, 是一种有应用前景的原位地基渗透系数和固结系数测试方法。

3.4 TDR 技术

时间域反射测试技术 (Time Domain Reflectometry) 简称 TDR, 是一种基于电磁波时域反射原理的远程遥控测试技术, 许多年来, 一直被

用于各种物体形态特征的测量和空间定位。近年来被广泛用于岩土工程领域，TDR 试验设备主要由同轴电缆电磁波反射系统和 TDR 系统探头组成。

在岩土工程领域，TDR 主要用于测试土体含水量^[48-52]及电导率^[53]，监测岩土体变形^[54]及含水量^[55]变化。詹良通等^[55]将 TDR 技术用于长期监测土体体积含水量的变化；美国 ASTM 颁布的 TDR 测试标准可以同时测定土的质量含水量和干密度^[56]，该方法比传统的环刀法、核子密度仪法等测试效率显著提高；最近，陈贇等^[57]成功研制出一种整体性好、性能可靠、价格低廉的新型 TDR 传感器，该 TDR 既可现场快速测试土体质量含水量和干密度，又可用于长期含水量和密度的变化，已在室内大型模型试验中得到了验证，该技术在岩土工程现场监测中有应用前景。

3.5 轻型动力触探测试法(DCP)

公路土基压实度和土基承载力是反映路基质量的重要指标。目前在国内，土基压实度的检测方法通常有灌沙法、环刀法、核子密度仪、落锤频谱式路基压实度快速测定仪。表征土基承载力的指标通常有回弹模量、地基反应模量和加州承载比 CBR (California Bearing Ratio)。近年来轻型动力触探技术被用来方便地评价公路土基承载力^{[58][59]}。

轻型动力触探仪，最初是 1956 年由 Scala 设计，作为评价软基路面强度的检测技术，故又称为 Scala 触探仪，1998 年，南非 Transvaal 省公路部门提出了现今通用的轻型动力触探测试方法模型，美国材料与测试协会 (ASTM) 于 2005 年又提出了一种测试流程 D6951。国际轻型动力触探的评价指标一般采用动力触探贯入指数 (DCPI) 来描述测试结果，即单位锤击数的贯入深度，mm/blow。

我国《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002) 中，提出用轻型动力触探进行基坑开挖后的基槽检验，评价指标是 N_{10} ，即用一重为 10kg 的穿心锤从 50cm 的落距上自由下落，将触探杆竖直打入土层中，记录每打入土层 30cm 的锤击数，这与国际上通用的动力触探指数 (DCPI) 这一评价指标是不同的 (表 4)。我国最新《公路路基路面现场测试规程》(JTG E60-2008) 引入了国际上通用 DCPI 测试评价方法，但是由于缺少实际工程应用和相关的理论研究，目

前在国内并没有得到广泛应用。

表 4 轻型动力触探仪技术指标

Table4 DCP testing devices parameters

序号	落锤		探头		探杆	国家
	质量/kg	落距/cm	直径/mm	锥角/(°)	直径/mm	
1	8	57.5	20	30	16	美国
2	4.6	57.5	20	60	16	美国
3	2	78.74	20.3	30	15.9	美国
4	10	50	40	60	25	中国

为了快速估计土基回弹模量值，Louisiana 交通研究中心 (LTRC) 在路面工程中开展动力触探试验测试，测试方法是根据 ASTM2005 提出的 D6951 进行。利用统计分析方法建立了 DCPI 和 E_r 的关系，得到了 E_r 的预测模型^{[60][61][62]}。

不少学者对动力触探贯入指数和加州承载比的关系进行了研究^[63]，发现二者之间是对数关系式，形式如下：

$$\lg CBR = A - B \cdot (\lg DCPI) \quad (1)$$

式中，A, B 都是待定常数。已有测试结果表明， $A=2.4 \sim 2.65$ ， $B=1.1 \sim 1.5$ 。

2004 年日本还发展了一种能测孔压的动力触探装置 (PDC)^[64]，该装置在动力触探头底部配有孔压传感器，可以测量施工时产生的孔压，用来评价液化场地的变形特性。

2005 年，日本发展了一种静力触探和动力触探技术相结合的方法 (CPTC)，研制了相应设备^[65]。该设备可以同时动力触探试验、静力触探试验和 CPTC 试验，该方法先在场地进行动力触探，后在动力触探孔内进行静力触探，可以针对不同土层方便地选择试验方法。

3.6 T-BAR 测试技术

对超软土的原位测试方法，国外近几年发展了一种流动贯入试验 FFP (full flow penetrometer)，它是一种与静力触探类似的试验，只是为了在超软土中应用，将贯入探头换成大尺寸的不同形状的探头，主要有 T-Bar，球形，板型等 (图 9)，该方法在近海工程中得到了应用^[1]。对超软土而言，该方法比 CPTU 技术相比较有三个优点：提高了力测试精度；大大减小了由于形状变化产生的超孔压影响；直接用总阻力作为测试参数。



图9 各种 T-BAR 测试探头

Fig.9 T-bar probes

4 室内模型试验

4.1 离心模型试验

虽然早在 1869 年 E. Phillips 就提出了离心模型试验的设想,但一直到 20 世纪 30 年代,这一概念才在美国和前苏联重新提出并开始进行试验工作。经历了 20 世纪 30 年代到 50 年代的创立与探索阶段、60 年代到 80 年代的发展壮大阶段,90 年代以来向大型化、标准化方向发展。我国自 20 世纪 80 年代引进离心模拟技术以来得到了快速发展。南京水科院、中国水科院、清华大学、同济大学、浙江

大学、四川大学等相继建立了不同规模的土工离心模拟装置。

土工离心机振动台能模拟地震中场地土和地下基础设施的动应力和应变,对于再现场地和地下基础设施的地震响应、观测其震害的物理机制、验证理论模型、检验评价方法等方面已显示出独特的优越性,是研究岩土地震问题最有效、最先进的研究手段。土工动力离心模拟试验技术是近年离心模拟技术的一个重要进展,也是岩土地震工程研究的一个新方向。目前国际上已有 20 多台大型离心机配备了振动台等动力试验设备,如剑桥大学的 Bumpy Road 系统。离心模型振动台形式主要有:波轨道路(剑桥大学)、电磁式(日本清水公司)、压电式(UC Davis)、机械式(东京工业大学)、爆炸激振式、电液伺服式等。表 5 为国内外部分电液伺服离心机振动台系统参数一览表。土工离心机振动台正由水平单向发展为双向振动,未来目标是大容量、长持时、三向离心机振动台,以模拟各种复杂场地地震破坏机理。

表 5 部分电液伺服离心机振动台系统参数(陈云敏, 2011)

单位	动力模型试验离心机		最大振动加速度	最大振动频率	最大负载	备注
	最大加速度/g	/g	/g	/Hz	/kg	
美国 Davis 加州大学	53	15	15	200	2700	
美国 Rensselaer 理工学院	100	30	30	350	400	2D 水平
美国 Rensselaer 理工学院	100	30	30	500	400	
美国加州理工学院	75	30	30	1000	40	
美国科罗拉多大学	87	48	48	500	50	
日本大林组技术研究所	50	18	18	200	3000	
日本清水公司	50	10	10	350	300	
日本大成公司	50	20	20	300	180	
日本东京工业大学	50	20	20	100	90	
日本东京工业大学	50	20/10	20/10	200	70	2D 水平+垂直
日本土木研究所	100	40	40	400	>300	
日本港湾研究所	60	10~50	10~50	300	92	
香港科技大学	75	15	15	350	300	2D 水平
南京水利科学研究院	100	20	20	100	200	
清华大学	50	20	20	250	100	2D 水平+垂直
中国水利水电科学研究院	120	30/20	30/20	400	400	
美国 Davis 加州大学	53	15	15	200	2700	

4.2 大型室内模型试验

近年来,国内不少单位结合大型工程研究需要,陆续建立了一些大型模型试验装置。浙江大学2008年建成了大型地基和边坡工程模拟系统,该模型模型槽(15米长、5米宽、6米高)、致灾因素产生装置和监测系统组成。致灾因素产生装置主要包括伺服加载装置(竖向和水平)、开挖模拟装置、水位升降模拟装置、降雨入渗模拟装置、真空抽水装置、内部气压产生装置等。主要用于复杂环境条件下地基与边坡工程灾变机理的研究、软弱地基与危险边坡加固机理研究和加固方案比较以及土工理论分析方法和数值模拟软件的验证;长安大学结合高速公路沉降控制研究,开发了大型沉降模拟试验台,对桥头跳车机理、不同桥台类型路桥过渡段土工格室楔形柔性搭板处置效果等进行了模拟试验,取得了一系列很好的成果;中科院武汉岩土力学研究所2006年研制了大型岩土工程模型试验机,可进行大比例尺平面应力应变模型试验、地下地表工程三维试验及软岩试样力学特性研究,同时还具有真三轴仪、剪切流变仪等设备功能。模型试验机由加载主机、电液伺服控制系统和检测系统组成。模型尺寸:整体模型:0.8×0.8×0.8m,平面模型:1.0×1.0×0.3m,软岩试样:0.3×0.3×0.6m;河海大学^[66]为了对现浇混凝土大直径管桩进行深入研究,开发了大型桩基模型试验系统。该试验系统主要有模型槽、加载系统、测量系统等组成。通过对PCC桩的模型试验,论证了该模型试验系统的先进性。东南大学针对搅拌桩复合地基加固软土地基的问题开发了粉喷桩室内模拟试验装置和气压劈裂试验装置^{[67][68]},并对高速公路过渡段差异沉降进行了室内大型模型试验^[69],通过这些试验,提出了气压劈裂原理应用于工程的基本准则,建立了控制高速公路过渡段差异沉降的设计方法。

大型模型试验是分析复杂岩土工程问题的一种有效方法,已取得不少成果。但需在尺寸效应、传感器技术、模型制作技术等方面进一步加强研究。

5 土工现场监测技术

现场监测技术是岩土工程测试技术的重要组成部分,近年来无论在测试设备、测试技术还是在测试理论方面均取得了重要进展。

5.1 光纤监测技术

为了确保基础设施的安全性、完整性和耐久性,对可能出现的灾害进行预测和告警,迅速、及时、精确地掌握这些结构与基础设施的运营状况,是土木工程师面临的重要课题。长期以来人工监测一直是大型基础设施运营状况的主要监测方法,该方法耗费大,精度较低,更重要的是监测数据难以连续,因而对突发情况的反应、处理以及预警能力大大下降,对于不易进入的永久性使用设施,如地下埋藏的管道和极为繁忙的地下铁,则更加难以监测和控制。有线监测是近20年发展起来的监测技术,其代表就是光纤监测技术,与机电测量相比,光纤传感器由于其安全防爆、抗电磁干扰、抗腐蚀、耐高温、体积小、重量轻、灵活方便,且容易实现远距离信号传输和测量控制,尤其适用于恶劣环境中,已在土木工程监测领域中得到了大量应用。

自1989年Mendez等首先将光纤传感器埋入混凝土结构中进行结构安全检测以来,美国、日本、英国、德国等国家相继推动了光纤传感技术在水利及土木工程中的应用。国外成功应用光纤技术进行土木工程监测的案例很多,如:NTT-AT和NTT-Infranet在日本横滨长跨径悬索大桥安装了MOI监测系统,应用了20个光纤传感器,系统自从安装以来没有出现故障,一直良好地跟踪监测承受六车道与两列车道重交通和强烈风荷载高应力作用下大桥的运营状态。Kronenberg和Glisic等在瑞士和法国边界一个Emosson水电站水库的大坝上安装了SOF0系统,用它来测量坝体的裂纹和基础的位移,测试结果表明光纤传感器与原来杆式伸长计的结果非常吻合,结果也比较精确。2002年,德国柏林采用BOTDR传感器来检测盐水管道的渗漏探测,利用远程系统监控,一旦管道出现渗漏,系统就会自动报警和管理。意大利科摩大教堂采用FBG传感器,来监测结构的沉降量;剑桥大学的Kenichi Soga教授在最近几年应用光纤监测技术对伦敦地下铁、布拉格地下铁、巴塞罗那地下铁等地下工程的健康状态进行了测试评估。

我国光纤监测技术用于土木工程结构健康监测和诊断系统的研究工作主要集中在一些重点高校和研究所,理论和实验研究成果正从实验室向产品化、

工程化迈进,目前已取得了多项应用成果:(1)哈尔滨理工大学段进萍院士等人在渤海海洋平台建立了JZ20-2MUQ和CB32A导管式海洋平台健康监测系统,创建了海洋平台结构安全评定与维修决策理论和大型应用软件系统;(2)南京大学光电传感工程监测中心施斌等^{[70][71][72]}把远程分布式光电传感应变监测系统用于南京市鼓楼隧道、玄武湖隧道、广东河源高速公路滑坡监测,锚杆应力监测等多项重大工程中,取得了显著的社会、经济和工程效益,如2001年开展的针对玄武湖隧道工程变形监测的鼓楼隧道试验段远程分布式光纤应变监测技术研究,研究证明BOTDR分布式监测技术用于隧道变形、裂缝发生和发展等应变监测是可行的;(3)三峡大学土木水电学院蔡德等人以长江三峡工程、清江隔河岩土工程、古洞口面板堆石坝、鱼跳面板堆石坝等工程为背景,进行了多项探索性研究,获得了大坝随机裂缝、班剑峰与周边缝位移、温度、挠度即便破身不变形等监测项目的分布式光纤传感技术;(4)哈尔滨工业大学苑立波等人研制的结构健康监测的光纤光栅传感网络与集成系统,已经成功应用到胜利油田CB32A海洋平台、山东滨州黄河公路大桥、南京长江第三大桥、四川峨边大渡河大桥、黑龙江松花江大桥、等工程中,取得了显著的社会和经济效益,具有重要的推广应用价值。

可用于岩土工程光纤监测技术主要有:光纤传感器的多路复用技术;布拉格光栅技术(FBG);OTDR技术;布里渊散射光时域分析法(BOTDA)等。还有下列一些问题需要解决:

(1)传感器过程中传感系统的增敏和去敏问题,即从测量信息中分离出各个参量,主要是温度和应变的分离急需解决;(2)空间分辨率、测量精度、后期维护以及系统造价等仍需大力改进;(3)光纤传感器和导光光纤与光电信号处理部分的接口技术;

(4)埋入岩土工程构筑物中的光纤传感系统的工作寿命仍需进一步提高。

5.2 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术是一种先进的全自动高精度立体扫描技术,主要面向高精度逆向工程的三维建模与重构,可以高效地采集三维坐标点,并可以深入到复杂的现场环境中进行扫描,将各种大型的、

复杂的、不规则的实景三维数据完整地采集到电脑中,从而快速重构出目标的三维点云模型。

三维激光扫描系统由硬件和软件组成,硬件有三维激光扫描仪,它与常规的测量仪器相比其主要优势为:不需要设置反射点;不接触被测物;扫描速度快,可在十几分钟内获得上百万个数据点;坐标点高密度、高精度;配合后处理软件可以生成三维向量的空间表面或实体图形。激光扫描不需要光源,可以在黑暗中进行量测,因此能够在黑暗的隧洞中进行扫描。它还可以与数码相机协同工作,数码相机照片与扫描点云一一对应,为数据点提供颜色,形成三维影像,方便地建立虚拟现实。

三维激光扫描仪可用于边坡工程监测,能实时地获得边坡的动态三维坐标和边坡三维形态,并可用于边坡的安全监测和危险性预测。

5.3 无线传感技术(WSN)

无线传感网络和基于无线传感器网络的自主智能系统是涉及微机电系统、计算机、通信、自动控制、人工智能等多学科的综合性技术。目前,无线传感器网络的应用已由军事领域扩展到其他许多领域,能够完成如灾难预警与救助、结构健康监测、空间探索等任务。1999年,著名的美国商业周刊就将无线传感器网络列为二十一世纪最具影响的21项技术之一;2003年,MIT技术评论在预测未来技术发展的报告中,将其列为改变世界的10大新技术之一。1996年,美国学者Straser、Kiremidjian提出运用无线技术替代结构监测有线系统的思想,开辟了无线传感技术在结构监测领域中应用,并研制了一套实时的损伤识别结构健康监测系统。

Mitchell等^{[73][74]}于1999年开发了结构智能监测无线采集系统,该系统利用一个多路复用变换器来采集各路传感单元数据,并将这些数据借助单一无线通道发射出去。该通信通道工作在90QMHz频段,速率达50KPS。在此基础上,Mitchell还进行了向Internet网络方面的扩展;英国的剑桥大学、帝国理工学院在2006-2010开展了Smart Infrastructure无线传感网络项目的研究。我国中科院早在1999年就启动了无线传感网络的研究,中科院无锡微纳传感网工程技术研究中心,是我国目前研究互联网和无线传感网络的核心单位;哈尔滨

工业大学建成了包含十个节点的海洋平台结构监测的无线传感网络系统。总体来说,结构健康监测属于土木工程的一个新的研究方向,而将无线传感器网络应用于结构健康监测更是发展的热点。

在岩土工程领域,英国剑桥大学 Soga 教授领导的课题组已将 WSN 技术成功应用于伦敦地下铁道变形监测项目。2007 年 1 月至 2008 年 6 月,剑桥大学在 Bond street-Baker street 段、Aldwych station-Holborn Station 段安装了两套监测与预警系统,对隧道内的裂缝、温湿度、倾斜角、位移等参数监测了 17 个月,准确分析了若干条发展中的裂缝,隧道及墙壁变形的速度、支撑环间的相对移动,及时提出了预警;在欧洲其它地区,无线传感网络系统在地铁工程中也得到了应用,如捷克布拉格地铁监测项目、西班牙巴塞罗那地铁监测项目等。无线传感器网络系统提供了一种全新的数据采集模式,它将带动监测领域新的革命。其优势主要体现在^[75-79]:

(1) 感知范围扩大:单个大型传感设备虽然能力较强,但感知范围有限。而无线传感器网络通过将大量能力较弱的传感器散布于整个物理区域可以获得较大的感知空间;

(2) 容错性能提高:无线传感器网络中的节点密集分布,单位区域内的多个传感器在功能上是冗余的。这使无线传感器网络比单个大型传感设备具有更强的容错能力,网络中部分节点的损坏不影响系统的运行,大量的冗余节点可以替代这些节点的工作,为用户提供可靠的数据;

(3) 测量准确性提高:单个传感器由于能力较弱,测量的准确性低于传统设备。但多个传感器通过数据融合,可以提高测量的准确性。

(4) 成本降低:无线传感设备的成本大大低于传统的大型传感设备,且无线传感网络系统具有很高的智能性,可长期在无人干预的状态下工作,其维护成本低。

无线传感器网络技术尚处于研究初级阶段,在英国等地铁、桥梁、地下水利管网等结构监测领域有了应用,若能克服节点的供电、通信等关键问题,将具有更广泛的应用前景。

6 结 语

土工测试技术是土力学与岩土工程研究和应用的基础,也是论证土力学理论、优化岩土工程设计的有效手段。本文主要分析总结了室内土工试验技术、特殊性质试验技术、原位测试技术、土工监测技术等方面的进展。分析表明,国际上对土工测试技术的研究一直未停止过,随着新技术的发展,特别是信息技术、计算技术、传感技术的发展,土工测试技术取得了巨大的进步。现代原位测试技术和监测技术的应用和发展是发达国家土工测试技术研究的热点,也是我国土工测试技术需要重点发展的方向。

本文撰写过程中,参阅了大量文献和资料,并得到国内不少专家的指教和帮助,在此一并表示衷心感谢!欢迎读者指正!

参 考 文 献:

- [1] Mayne P W. Integrated Ground Behavior: in-situ and lab test [C]//DiBenedetto H. Deformation characteristics of Geomaterials: Recent Investigations and Prospects. London: Taylor & Francis Group plc, 2005:155-177
- [2] 蔡正银,魏汝龙,郇能惠. 土的基本性质与测试技术 [C]//中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议论文集.重庆:重庆大学出版社,2007:3-11
- [3] 李广信. 土的基本性质与测试技术[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集.北京:清华大学出版社,2003:3-8
- [4] 郇能惠,程展林,杨光华. 土的基本性质和测试技术 [C]//中国土木工程学会第八届土力学及岩土工程学术会议论文集.北京:万国学术出版社,1999:3-11
- [5] Mayne P W, Coop M R, Springman S M, et al. 2009 Geomaterial behavior and testing [C]//Proc.17th ICSMGE. Alexandria, Egypt, 2009
- [6] Hong Z S, Yin J, Cui Y J. Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents[J]. Géotechnique, 2010, 60(9): 691-700
- [7] Abuel H M, Bergado D T, Bouazza A, et al. Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: experimental results and constitutive modeling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(8): 942-956
- [8] Cekerevac C, Laloui L, Vulliet L. A novel triaxial apparatus for thermo-mechanical testing of soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, 28(2): 161-170
- [9] 陈正汉,谢云,孙树国,等. 温控土工三轴仪的研制及

- 其应用[J].岩土工程学报, 2005, 27(8): 928-933 (Chen Zhenghan, Xie Yun, Sun Shuguo, et al. Temperature controlled triaxial apparatus for soils and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 928-933(in Chinese))
- [10] 白冰, 陈星欣. 一种用于饱和土的热固结试验装置及其应用[J].岩土工程学报, 2011, 33(6): 896-900 (Bai Bing, Chen Xingxin. Test apparatus for thermal consolidation of saturated soils and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 896-900(in Chinese))
- [11] Newson T. General Report Session1A -Laboratory testing[C]// Proc.17th ICSMGE. Alexandria, Egypt, 2009
- [12] 陈云敏, 施建勇, 张建红, 等. 中国环境岩土工程的发展[C]//中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议论文集.重庆: 重庆大学出版社, 2007: 114-130
- [13] 杜延军, 金飞, 刘松玉, 等. 重金属工业污染场地固化/稳定处理研究进展[J].岩土力学, 2011, 32 (1): 116-124 (Du Yanjun, Jin Fei, Liu Songyu, et al. Review of stabilization/solidification technique for remediation of heavy metals contaminated lands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 116-124(in Chinese))
- [14] 陈蕾. 水泥固化稳定重金属污染土机理与工程特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2010
- [15] American Society for Testing and Materials. D5334 Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure[S]. ASTM, 2000
- [16] Rao M V, Singh D N. Soil thermal resistivity[J]. Geotechnical Engineering Bulletin, 1999, 7(3): 179-199
- [17] 张旭, 高晓兵. 华东地区土壤及土沙混合物导热系数的实验研究[J].暖通空调. 2004, 34(5): 83-89 (Zhang Xu, Gao Xiaobing. Experimental study on thermal conductivity of soil and its mixture with sand[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning. 2004, 34(5): 83-89 (in Chinese))
- [18] 苏天明, 刘彤, 李晓昭, 等. 南京地区土体热物理性质测试与分析 [J]. 岩石力学与工程学报 .2006, 25(6): 1278-1283 (Su Tianming, Liu Tong, Li Xiaozhao, et al. Test and analysis of thermal properties of soil in nanjing district[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2006, 25(6): 1278-1283 (in Chinese))
- [19] Katzenbach R, Clauss T, Waberseck T, et al. Geothermal site investigation using Geothermal Response Test(GRT) [C]// Proc.17th ICSMGE. Alexandria, Egypt, 2009
- [20] 于明志, 彭晓峰, 方肇洪, 等. 基于线热源模型的地下岩土热物性测试方法[J].太阳能学报, 2006, 27(3): 279-283 (Yu Mingzhi, Peng Xiaofeng, Fang Zhaohong, et al. Line source method for measuring thermal proerties of deep ground[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006, 27(3): 279-283 (in Chinese))
- [21] 李鑫, 李玉杰, 于明志, 等. 深层岩土热物性的现场测定[J].工程建设与设计, 2007, 23(3): 6-9
- [22] 马志同. 浅层岩土热物性参数测量仪的研制[D].北京: 中国地质大学, 2006
- [23] 彭孝芳, 朱汉宝, 周亚素. U管理地换热器周围土壤传热性能测试方法[J].制冷与空调, 2007, 21(3): 53-58 (Peng Xiaofang, Zhu Hanbao, Zhou Yasu. The method on measuring the thermal properties of the soil around the ground loop heat exchanger with a U-bend pipe[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2007, 21(3): 53-58 (in Chinese))
- [24] Arulanandan K, Muraleetharan K. Level ground soil liquefaction analysis using in situ properties [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(7): 753-789
- [25] Arulmoli K, Arulanandan K. Review of an electrical method for evaluation of stress ratio required to cause liquefaction and dynamic modulus[C] // Dynamic Geotechnical Testing II .San Francisco, USA, 1994
- [26] Worthington P. The uses and abuses of the Archie equation, 1: The formation factor -porosity relationship[J]. Journal of Applied Geophysics, 1993, 30(3): 215-228
- [27] Fukue M, Minato T, Horibe H, et al. The micro-structure of clay given by resistivity measurements [J]. Engineering Geology, 1999, 54(1-2): 43-53
- [28] Aristodemous E, Thomasbetts A. DC resistivity and induces polarization investigations at a waste disposal site and its environments [J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 44(2): 275-302
- [29] Yoon G L, Park J B. Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 84(2-3): 147-161
- [30] Delaney A J, Peapple P R, Arcone S A. Electrical resistivity of frozen and petroleum-contaminated fine grained soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 2001, 32(2-3): 107-119
- [31] Abuhassanein Z S, Benson C H, Blotz L R. Electrical resistivity of compacted clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 22(5): 397-406
- [32] Howie J A, Daniel C R, Amini A A, et al. Combinations of in-situ tests for control of ground modification in silts and

- sands[C]// Proceedings of ASCE Specialty Conference. Denver, USA, 2000
- [33] Liu S Y, Yu X J. The electrical resistivity characteristic of the cemented soil[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Lowland Technology. Japan, 2000
- [34] 缪林昌, 刘松玉, 严明良. 水泥土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1), 126-130 (Miao Linchang, Liu Songyu, Yan Mingliang. Research on electrical resistivity feature of cement-soil and it's application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1), 126-130 (in Chinese))
- [35] 于小军, 刘松玉. 电阻率指标在膨胀土结构研究中的应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3):393-396 (Yu Xiaojun, Liu Songyu. Researches on application of electrical resistivity indices to the microstructure of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3):393-396(in Chinese))
- [36] 刘松玉, 韩立华, 杜延军. 水泥土的电阻率特性与应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11):1921-1926 (Liu Songyu, Han Lihua, Du Yanjun. Experimental study on electrical resistivity of soil-cement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11):1921-1926(in Chinese))
- [37] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1):83-87 (Liu Guohua, Wang Zhenyu, Huang Jianping. Research on electrical resistivity feature of soil and it's application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1):83-87(in Chinese))
- [38] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 黄土湿陷过程中微结构变化规律的电阻率法定量分析[J]. 岩石力学, 2010, 31(6):1692-1698 (Zha Fusheng, Liu Songyu, Du Yanjun, et al. Quantitative assessment on change in microstructure of loess during collapsing using electrical resistivity measurement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6):1692-1698(in Chinese))
- [39] 董晓强, 白晓红, 吕永康, 等. 污染对水泥土电阻率特性影响的试验研究[J]. 岩石力学, 2011, (32)1, 91-94 (Dong Xiaoliang, Bai Xiaohong, Lü Yongkang, et al. Experimental study of effects of pollution on electric resistivity characteristics of soil-cement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, (32)1, 91-94(in Chinese))
- [40] Dejong J T. General Report for technical Session 1D -In-situ testing [C]// Proc. 17th ICSMGE. Alexandria, Egypt, 2009
- [41] 刘松玉, 吴燕开. 论我国静力触探技术 (CPT) 现状与发展[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4):553-556 (Liu Songyu, Wu Yankai. On the state-of-art and development of CPT in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4):553-556(in Chinese))
- [42] 刘松玉, 蔡国军, 童立元, 等. 基于 CPTU 测试的先期固结压力确定方法试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4):490-495 (Liu Songyu, Cai Guojun, Tong Liyuan, et al. On preconsolidation pressure of clays from piezocone tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4):490-495(in Chinese))
- [43] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 基于孔压静力触探的连云港海相黏土的固结和渗透特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4):846-852 (Cai Guojun, Liu Songyu, Tong Liyuan, et al. Study on consolidation and permeability properties of lianyungang marine clay based on piezocone penetration test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4):846-852(in Chinese))
- [44] 童立元, 蔡国军, 刘松玉, 等. 基于 CPTU 测试的泻湖相沉积土固结屈服应力和 OCR 确定方法[J]. 东南大学学报, 2007, 23(1):112-116 (Tong Liyuan, Cai Guojun, Liu Songyu, et al. Use of piezocone tests to predict consolidation yield stress and overconsolidation ratio of lagoonal deposit soil[J]. Journal of Southeast University, 2007, 23(1):112-116(in Chinese))
- [45] 蔡国军. 现代数字式多功能 CPTU 技术莅临与工程应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2010
- [46] 林政, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 一种现场测定地基固结系数和渗透系数的方法[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4):125-130 (Lin Zheng, Chen Renpeng, Chen Yunmin, et al. A method for in-situ testing of consolidation and permeability coefficients of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4):125-130(in Chinese))
- [47] 陈云敏, 林政, Schellingerhout A J G. IFCO BAT 系统测试地基孔压及原位渗透系数理论及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24):4440-4448 (Chen Yunmin, Lin Zheng, Schellingerhout A J G. Theories of in-situ test for pore water pressure and permeability with ifco bat system and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24):4440-4448(in Chinese))
- [48] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resources Research, 1980, 16(3):574-582
- [49] 梁志刚, 陈云敏, 陈贇. 利用同轴电缆电磁波反射技术测定非饱和土的含水率[J]. 岩土工程学报,

- 2006,28(2):191-195 (Liang Zhigang,Chen Yunmin,Chen Yun. Measurement of water content of unsaturated soil by TDR technique[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(2):191-195(in Chinese))
- [50] 吕海波, 赵艳林, 陈川亮. 时域反射法测量膨胀土含水量试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008,27(12):2568-2574 (Lü Haibo, Zhao Yanlin, Chen Chuanliang. Experimental research on measuring water content of expansive soils by time domain reflectometry[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(12):2568-2574(in Chinese))
- [51] Siddiqui S I, Drenvich V P. A new method of measuring density and moisture content of soil using the technique of time domain reflectometry[R]. West Lafayette: Purdue University, 1995
- [52] Yu X, Drenvich V P. Soil water content and dry density by time domain reflectometry[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004,130(9):922-934
- [53] Topp G C, Yanuka M, Zebchuk W D, et al. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: Soil and water experiments in coaxial lines [J]. Water Resources Research, 1988,24(7):945-952
- [54] 陈云敏, 陈贇, 陈仁朋, 等. 滑坡监测 TDR 技术的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(16):2748-2755 (Chen Yunmin, Chen Yun, Chen Renpeng, et al. Testing study on applications of time domain reflectometry to slope monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(16):2748-2755(in Chinese))
- [55] 詹良通, 吴宏伟, 包承刚, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学, 2003,24(2):151-158 (Zhan Liangtong, NG Wangwai Charles, BAO Chenggang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(2):151-158(in Chinese))
- [56] American Society for Testing and Materials. D6780-05 Standard test method for water content and density of soil in place by time domain reflectometry(TDR) [S]. West Conshohocken: ASTM, 2005
- [57] 陈贇, 陈伟, 陈仁朋, 等. TDR 联合监测土体含水量和干密度的传感器设计及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2):418-426 (Chen Yun, Chen Wei, Chen Renpeng, et al. Design of tdr sensor for joint measurement of soil water content and dry density and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(2):418-426(in Chinese))
- [58] Mohammad L N, Herath A, Abu-Farsakh M Y, et al. Prediction of resilient modulus of cohesive subgrade soils from dynamic cone penetrometer test parameters [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(11):986-992
- [59] Amini, F. Dynamic cone penetrometer in quality control of compaction: state-of-the-art report[C]// Proc. Geo-Trans 2004. Los Angeles, USA, 2004
- [60] Herath, A, Mohammad, L N, Gaspard, K, et al. The use of dynamic cone penetrometer to predict resilient modulus of subgrade soils[C]// Proc. Geo-Frontiers 2005. Austin, USA, 2005
- [61] Luo X, Salgado R, Altschaeffl A G. Dynamic cone penetration test to access the mechanical properties of subgrade soil[R]. West Lafayette: Purdue University, 1998
- [62] Chen D H, Lin P H, Bilyeu J. Developing a correlation between dynamic cone penetrometer data and pavement layer moduli [J]. Geotech. Test, 2005, 28(1), 42-49
- [63] Salgado R, Yoon S. Dynamic cone penetration test (DCPT) for subgrade assessment[R]. West Lafayette: Purdue University, 2003
- [64] Sawada S, Yoshizawa D, Hiruma N, et al. Evaluation of differential settlement following liquefaction using Piezo Drive Cone[C]// Proc. 17th ICSMGE. Alexandria, Egypt, 2009
- [65] Rito F, Sugawara N. Development and field application of static cone penetration combined with dynamic penetration[C]// Proc. 17th ICSMGE. Alexandria, Egypt, 2009
- [66] 刘汉龙, 谭慧明, 彭劫, 等. 大型桩基模型试验系统的开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 452-457 (Liu Hanlong, Tan Huiming, Peng Jie, et al. Development of large scale pile foundation model test system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 452-457(in Chinese))
- [67] 邓永锋, 刘松玉, 洪振舜. 粉喷桩周土施工效应室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008,30(1):143-147 (Deng Yongfeng, Liu Songyu, Hong Zhenshun. Installation effect of dry-jet-mixing columns by laboratory model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008,30(1):143-147(in Chinese))
- [68] 羊晔, 刘松玉, 邓永锋. 加筋路基处治不均匀沉降模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009,30(3):703-706 (Yang Ye, Liu Songyu, Deng Yongfeng. Effect of reinforced subgrade on differential settlement by model test research [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(3):703-706(in Chinese))

- [69] 章定文, 刘松玉, 顾沉颖, 等. 土体气压劈裂的室内模型试验[J]. 岩土工程学报, 2009,31(12):1925-1929 (Zhang Dingwen, Liu Songyu, Gu Chenying, et al. Model tests on pneumatic fracturing in soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009,31(12):1925-1929(in Chinese))
- [70] 施斌, 徐学军, 王镝, 等. 隧道健康诊断 BOTDR 分布式光纤应变监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15):2622-2628 (Shi Bin, Xu Xuejun, Wang Di, et al. Study on botdr-based distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15):2622-2628(in Chinese))
- [71] 隋海波, 施斌, 张丹, 等. 地质和岩土工程光纤传感监测技术综述[J]. 工程地质学报, 2008,(16)1:135-143 (Sui Haibo, Shi Bin, Zhang Dan, et al. Review on fiber optic sensor-based monitoring techniques for geological and geotechnical engineering [J]. Journal of Engineering Geology, 2008,(16)1:135-143(in Chinese))
- [72] 高俊启, 施斌, 张巍, 等. 分布式光纤传感器监测预应力锚索应力状态的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(S2):5604-5609 (Gao Junqi, Shi Bin, Zhang Wei, et al. Experimental study on monitoring of stress for prestressed anchorage cable using distributed fiber optic sensor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(S2):5604-5609(in Chinese))
- [73] Mitchell K, Sana S, Balakrishnan V S, et al. Micro sensors for health monitoring of smart structures[C]// Proceedings of the SPIE conference on Smart Electronics and MEMS. Newport Beach, USA, 1999
- [74] Mitchell K, Dang N, Liu P, et al. Web-controlled wireless network sensors for structural health monitoring[C]// Proceedings of the SPIE conference on Smart Electronics and MEMS. Newport Beach, USA, 2001
- [75] Esrtin D, Govindan R, Heidemnan J, et al. Next century challenges: scalable coordination in sensor networks[C] // Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on mobile computing and networking. Seattle, USA, 1999
- [76] 陈帅, 钟先信, 刘积学, 等. 无线传感器网络的新进展与应用[J]. 压电与声光, 2006, 28(3):297-299 (Chen Shuai, Zhong Xianxin, Liu Jixue, et al. New development and application of wireless sensor networks[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2006, 28(3):297-299(in Chinese))
- [77] 喻言. 结构健康监测的无线传感器及其网络系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [78] Ruiz L B, Nogueira J M, Loureiro A A F. Manna: a management architecture for wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(2):116-125
- [79] Lynch J P, Kenneth J L. A summary review of wire-less sensors and sensor networks for structural health monitoring[J]. The Shock and Vibration Digest, 2006, 38(2): 91-128