

文章编号：1000-4882(2006)S-0121-06

深水地质和土工调查的新进展

王淑云，鲁晓兵

(中国科学院力学研究所，北京 100080)

摘要

介绍了近十年来国外在深水地质和土工调查方面取得的新进展，包括：地质调查方法；钻孔取样技术、原位试验方法以及 CPT、PCPT 分析理论；天然气水合物的地质调查。

关键词：地质；土工；取样；原位试验；天然气水合物

1 前言

海洋地质和土工调查及评价工作一般分为三个阶段：①初勘阶段，即利用声纳探测和地震测量方法，进行较大范围的海底地形测量，地貌和浅部地层调查以及地震调查。②详细勘查阶段，包括钻孔和取样，进行现场原位试验和室内土工试验。③评价阶段，包括资料的汇总和整理，计算和分析以及最后的评价。

一般来讲，水深大于 300m 的水域称之为深水（有些文献指水深大于 500m）。海洋深水地质和土工调查是从 20 世纪 70 年代开始的。目前，美国在墨西哥湾的深水地质和土工调查处于世界领先水平^[1]。海洋深水地区一般处于大陆坡地段，其地质和地形条件复杂、浪高、海底静水压力大，因此深水地质和土工调查难度较大。与浅水不同的是，深水地质和土工调查不仅要求钻探船的动力定位和海水波动补偿系统好，海底钻探能力强，而且需要更先进的原位测量设备、技术和相应的分析方法^[2]。

目前，美国、日本、加拿大、德国和印度等国在天然气水合物的调查、研究、勘探和开发等方面保持领先地位^[3]。与石油和天然气不太相同，深水天然气水合物调查的主要难点在于勘查确定天然气水合物的技术和保温保压取芯技术，具体涉及到：地球物理资料的采集、处理及解释，资源量计算，实物样品采集及试验研究等。

CPT 是圆锥触探试验（cone penetration test）的简称，现一般指能测量探头端部阻力和侧摩阻力，不能测量孔隙水压力的触探试验。PCPT 或 CPTU（首字母 P 和尾字母 U 均代表孔隙水压力）是指带孔隙水压力测量的圆锥触探试验，亦被称为压电圆锥（piezocone）试验。为了叙述简便起见，本文将其称为 PCPT。PCPT 是目前土工调查最常用的原位试验方法，尤其广泛应用在海洋土工调查和评价中。一方面，与其它原位试验相比，PCPT 具有经济、快速和可提供连续贯入测量数据的优点，其试验结果也具有很好的重复性和可靠性，尤其在土层剖面和土质分类、土的抗剪强度和变形特性等土工参数的评价方面，更令人满意。另一方面，与原状土样的室内试验相比，PCPT 具有反映原位真实应力状态的优点，尤其在对软土或深水高压条件下的土工评价中，因为原状土样扰动问题严重和不可避免性而造成室内土样强度试验结果不可靠的情况下，土性强度参数的评价更要依赖于 PCPT 结果。

本文主要介绍深水调查在以下几个方面的最新进展：地质调查方法；钻孔取样技术、贯入试验以及分析方法；减少土样扰动的室内试验新方法及应用；深水天然气水合物的调查方法与技术。

2 地质调查方法

深水条件下的地质调查需要详细的声纳测量、精确的定位和调查的有效性。如挪威为适合水深3000m的地质调查而设计的HUGIN 3000^[4]。它在原有的适于水深600m的HUGIN I和HUGIN II的高灵活性、稳定和低拖拽体型以及电池和航海原理的基础上，主要扩展了深水能力、潜水持续性、有效负载传感器的灵活性以及航海传感器的成套性。HUGIN的AUV/UUV定位是用数学最佳方法，结合众多的定位数据，如：HIPAP声音定位跟踪系统、DGPS航海系统、辅助惯性系统、DVL、压力传送、陀螺罗盘等系统的定位数据，从而使航海系统实现精确和实时定位分辨。AUV/UUV系统可放在约6m的驳船上，便于移动和提携。最重要的是：HUGIN 3000能在大量的声纳系统操作的同时具有友好的协同性。这些声纳系统包括多束回声仪、侧扫声纳、海底剖面仪、声控和数字通讯及声学定位系统。

利用现代的计算机图像处理和分析技术，通过几种地球物理调查数据的结合分析，得到高质量的深水地貌和地质结构特征的方法，是目前地质调查数据处理及分析的新趋势^[5]。这些调查数据包括常规的三维地震测量、高分辨率的二维地震走线、海底剖面和旁侧声纳的AUV走线、高分辨率的三维地震测量数据。

3 钻孔取样技术、贯入试验及分析方法

在目前深水原位试验因技术的局限不能完全满足地质和土工调查需要的情况下，从深水原位取样并进行室内试验和研究是必不可少的。深水取样可分为重力式、活塞式和箱式三种方法。Moran^[2](2000年)介绍了一种先进的有线活塞取样器，它可在水深3000m条件下取到海床以下300m范围内的高质量土样，且一次取样程度可达10m。Silva^[6](1999年)比较了在水深800~2700m条件下大直径重力取样和大直径长活塞取样系统所取土样的室内试验结果，认为两种取样方法得到的数据很接近。Bienvenu^[7](2002年)介绍了法国MARINE GEOSYSTEM公司发明的一种新概念静力取样设备“STARFISH”。它的工作水深可达到6000m，可钻探取样到海床以下30m范围。STARFISH不同于传统的有线动力冲击贯入方法，由高压水泵提供动力将取样器推入土中。整个设备由框架系统、动力系统、岩芯取样管、测量系统、能量提供和定位系统组成，并由控制系统控制贯入速度、位置以及保证垂直取样等。STARFISH还可用于地震贯入测量和原位十字板试验。

在深水的原位试验中，最常用的就是贯入试验（简称CPT）和十字板试验。其中CPT试验结果重复性好，非常适合于划分土层剖面和对不同土类进行区分。由于深水取样难以避免的对土样扰动问题的存在，尤其是在碰到软土取样和现场操作局限条件下，CPT的应用更显得尤为重要。未来的趋势是：用CPT试验结果为平台基础设计提供土性参数会越来越重要。

目前，常用的CPT均利用减型（subtraction-type）贯入测量方法。CPT有两种贯入系统：基于海床的（seabed-based）和下孔（downhole）的。其中前者因允许试验前对海水的静压进行零点校正且较为准确，从而在深水中得到广泛地应用。在CPT试验中最常用的是孔压贯入试验（简称PCPT），即在原有CPT基础上，探头中加入孔隙水压力测量单元，而且孔压测量单元还可以布置在探头前部、后部和尾部。通过对PCPT试验中孔压数据的分析，土层、土类的划分和土性参数的确定变得更有把握。目前，对贯入试验结果的分析方法有：承载力方法、空穴膨胀理论、稳定贯入理论、有限元方法、应力特性和应变路径理论等。其中承载力方法简单，但不适合探头稳定贯入问题。空穴膨胀理论，具有模拟和较真实反映土行为的优点。应力路径方法更适用于深基础和粘性地基。

在贯入试验技术方面最新的进展体现在探头的小型化、多样化和高精度以及测量的无缆化方面^[9]。在原位钻杆钻入过程中，可通过更换不同探头和配备不同的传感器来完成不同类型的试验。这些探头包括：地震、电阻率、孔隙水压力、水平应力以及十字板探头等。探头配备地震测量的称为SCPT试验。下面重点介绍PCPT的进展。

3.1 探头设计

PCPT技术最新的进展体现在探头的小型化、多样化和多功能化。

近几年出现了一种适用于深水土工调查的小直径压电探头^[10],如图1所示。与常规尺寸的Dolphin压电探头相比,它在圆锥锥角、截面、长度以及孔压、侧摩阻力测量单元的大小和相对位置方面做了改进。如:孔压透水室由位于圆锥后的直径38mm改为位于锥尖部的直径6.35mm,同时锥尖部与套管距离从229mm加大到2900mm,减少了由于套管插入引起的孔压梯度变化,从而使得孔压测量结果和孔压消散特性试验质量大大提高。为实现铁路设计和高速公路堤防结构控制目的,出现了一种适于对小于10m深的粘土土性参数进行评价的微型(miniature)圆锥触探试验系统MCPT^[11]。它的锥角仍为60°,但截面积只有2cm²,摩擦套管面积仅为40cm²。

除了带锥尖阻力、摩擦阻力和孔隙水压力测量的常规一体化探头外,还有地震、电阻率、水平应力以及十字板探头等。在原位钻杆钻入过程中,可通过更换不同的探头和配备不同的传感器来完成不同类型的试验。根据功能不同,探头可分为单独功能的独立探头和多功能的综合一体化探头。如十字板试验为独立探头,其形状为交叉的扇板式。它通过测量十字板的扭矩来推算粘土的不排水抗剪强度。DeJong(2002)^[12]推出了一种新型的压电触探试验的多套筒摩擦附件,如图2所示。它是在常规的PCPT探头和摩擦管后,增加几段不同质地钢管的摩擦套管,每一段套管配有自己的摩擦荷载室来测量与周围土的摩擦力,从而实现了在贯入过程中不同粗糙度钢管与同一种或不同土之间产生的摩擦阻力的测量,为评价与计算不同粗糙度基础与不同土的交界面摩擦和力的传递效应,提供了重要的依据,是一种很好的原位试验方法。探头的多样化设计还表现在多孔压单元的测量。目前,已有一次贯入试验可同时测量探头附近几个位置的孔压值,Anderson^[13]的多传感器压电圆锥设计就是很好的一例,如图3所示。

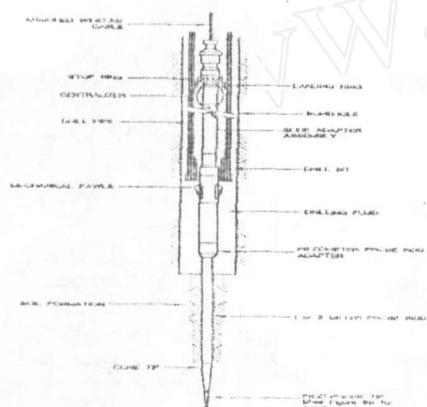


图1 小直径的压电探头(Dutt,1997)

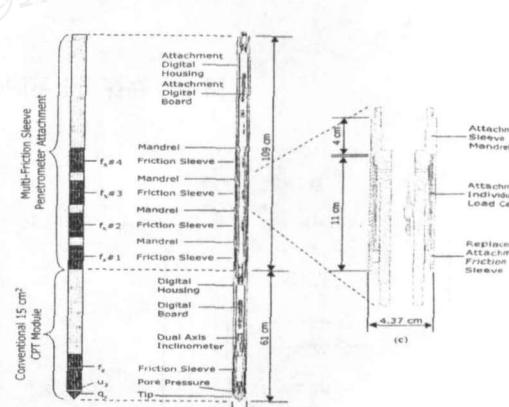


图2 多摩擦测量的压电探头 (Jason,2005)

3.2 孔压测量

压电圆锥主要的进展还表现在孔压单元如何设计。目前,已有孔压测量单元在探头上的设计位置如图4所示。不同位置的孔压值和孔压消散特性具有不同的解释,对不同的土表现也不同。这些孔压数据对土层的分类和土性参数的确定是非常有益的。

在探头贯入过程中,探头前后左右土所受的应力状态不同,即所谓的“应力路径”不同。这样,对于同一深度的同一种土来讲,在探头不同位置、不同感应单元和大小的孔压测量传感器测量到的孔压值以及孔压消散试验曲线均是有差异的,所以,压电圆锥的孔压单元设计位置、孔压感应元件的材料选择以及探头的饱和方法都是非常重要的。图5为锥头设计和饱和式方法。

一般来讲,压电圆锥试验的深水操作系统主要分为两类:基于海床的(seabed-based)系统和下孔(downhole)系统。目前,最常用的贯入系统均利用减法型(subtraction-type)圆锥触探仪。减法型(subtraction-type)圆锥触探仪允许试验前对海水的静压力进行零点校正。基于海床的操作系统采用一种不确定性来逼近贯入系统的分辨能力,从而使静水压力实现零点校正。下孔操作系统被安装在钻管的底部,钻管内的压力可能并不与周围静水压力平衡,从而使零点校正增加了不确定性。Peuchen^[14]

介绍了一种适于300m水深和软粘土的高质量的减法型触探仪。它通过在触探仪内部注满绝缘流体，由管路将压力补偿仪与绝缘流体连接，最后引到海面的办法，实现了对外部压力的补偿。图6为减法型压电圆锥的探头设计剖面。

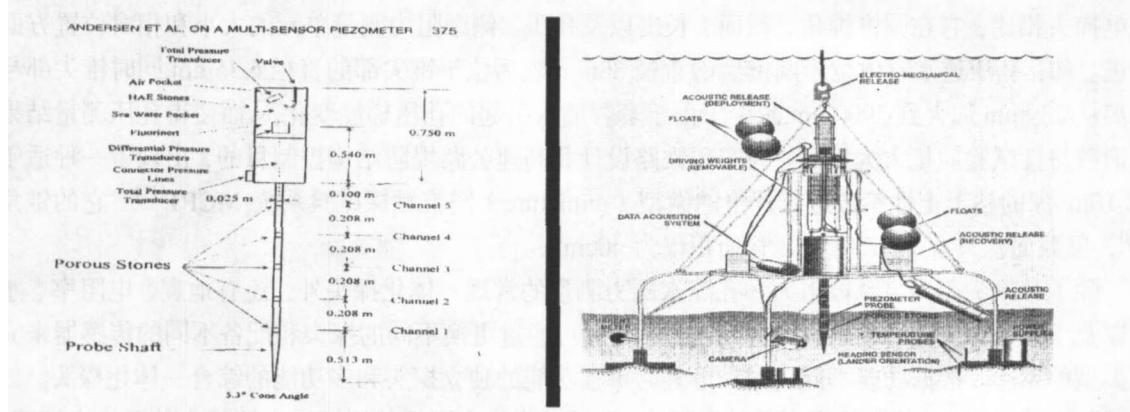


图3(a) 多孔压测量的探头

图3(b) 与多孔压测量配套的海底(Anderson, 1996)就位系统

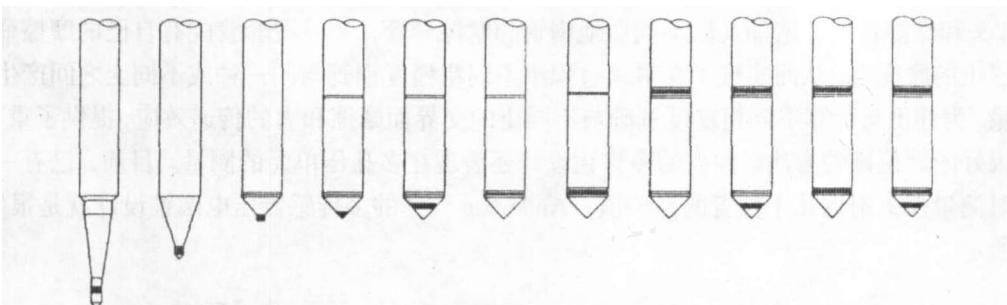


图4 在探头上不同的孔压测量位置示意

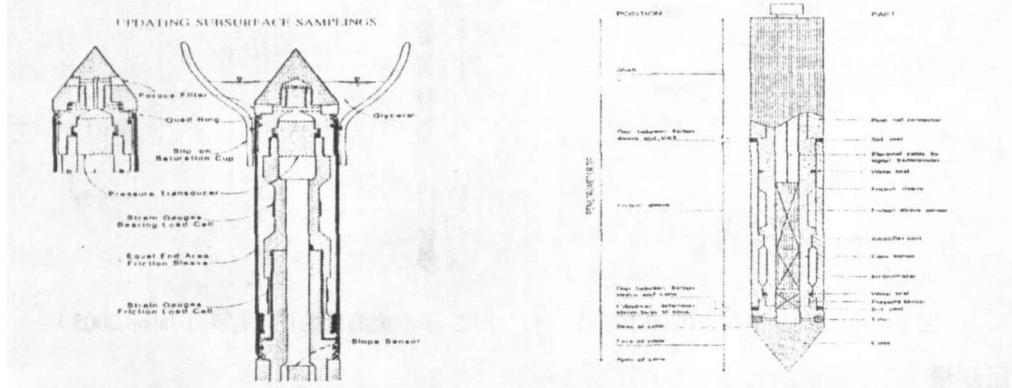


图5 孔压测量单元的饱和

图6 减法型的探头设计(Peuchen, 2000)

4 天然气水合物的调查方法与技术

传统上的只借助地震反射剖面上的异常反射特征，即BSR、空白反射带和反射波极性反转的识别方法，已不能满足准确查明天然气水合物位置、储量和了解水合物性质的调查需要。目前，天然气水合物的调查研究呈现多学科、多方法的综合发展趋势，即除了地球物理方法以外，地球化学方法、自生沉积矿物学法和钻孔取样技术也结合进来，并得到较大的发展，取得了较多的成果^[15,16]。

地震地球物理方法，除了在单道或多道地震反射剖面上识别异常反射特征外，还可在剖面上确认水合物形成过程中流体运移的断裂和通道等特征。如何利用多道地震反射剖面的资料，定量分析天然气水合物的含量及下伏游离气体带的厚度，已成为地球物理调查研究的重点。现已可以利用地震反射

的真振幅和层速度分析方法、BSR 的 AVO 分析方法对水合物含量进行定量分析。此外，测井技术、旁侧声纳扫描、多波束测深等技术也可用于天然气水合物的识别。

地球化学方法又分为有机的、流体的和同位素等方法，它是对地球物理方法的重要补充。有机地球化学方法通过分析水合物中的烃类气体含量和物质组成，流体地球化学方法通过研究海底底层水和沉积物中的甲烷浓度和盐度的异常值变化，稳定同位素地球化学方法通过研究水合物成矿气体来源，从而判定天然气水合物的存在与否。

对深海天然气水合物实物样品的室内试验及研究，是对地球物理和化学方法解释成果的最好验证，目前为止的近 10 处的天然气水合物的发现是直接通过活塞和重力取芯方法确定的。但在深海的高压低温条件下，保压保温钻孔取芯技术难度很大。1999 年，德国首次在水深 782m 处，利用深海大型抓斗在海底采集、玻璃试管在深海海底合成方法和海底浅部的重力式取样方法，获得了天然气水合物冰结晶体的实物样品。

与国外相比，我国对天然气水合物的调查和研究起步晚、差距大。我国从 1999 年开始，目前已在西沙海槽和东沙群岛地区发现明显的 BSR 分布区带。总之，深海天然气水合物的调查技术和分析方法尚未完全定型，今后的发展趋势仍是多学科的有效综合，强调科学性、高技术性和创新性。

参 考 文 献

- 1 Bradley,J.C.,Nimish,P.D.,Michael,A.M.et al, Gulf of mexico ultra-deepwater development study,Offshore Technology Conference,2001,OTC12964.
- 2 Moran,K.Deepwater technology in the international ocean drilling program,Offshore Technology Conference,2000,OTC12179.
- 3 许红,刘守全,王建桥等.国际天然气水合物调查研究现状及其主要技术构成,中国地质,2001, 28 (3), 1-4.
- 4 Karstein,V.,Rolf,A.K.,Kongsberg,S.AS,et al.HUGIN 3000AUV for deepwater surveying, Offshore Technology Conference,2000,OTC12005.
- 5 Mai,T.T., Changes in geophysical technology on deepwater exploration in eastern offshore,Offshore Technology Conference,2002,OTC14070.
- 6 Silva,A.J.,Bryant,W.R.,Young,A.G.,et al.Long coring in deep water for seabed research,geohazard studies and geotechnical investigations. Offshore Technology Conference,1999,OTC10923.
- 7 Bienvenu,V.,Bessonart,J.,An innovative deepwater geotechnical tool, Offshore Technology Conference,2001,OTC13096.
- 9 Henry,S.P.,Repsol,YPF and Paul,W.,World-wide deepwater exploration and production: past, present and future,Offshore Technogy Conference,2002,OTC14024.
- 10 Dutt,R.N.,Rainey,W.S. and Hamilton,T.K.,Recent Advances in Deepwater Gulf of Mexico Geotechnical Investigations,Offshore Technology Conference,1997,OTC 8303.
- 11 Titi,H.H.,Mohammad,L.N. and Tumay,M.T.,Miniature cone penetration tests in soft and stiff clays,Geotechnical Testing Journal,GTJODJ,2000,Vol.23,No.4,432-443.
- 12 DeJong,J.T.,Frost,J.D.,A multisleeve friction attachment for the cone penetrometer, Geotechnical Testing Journal,GTJODJ,2002,Vol.25,No.2,111-127.
- 13 Anderson,G.R.,Bennett,r.h.,Barber,M.E. et al,A multi-sensor piezometer for shallow marine sediments in coastal environments,Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 1996, Vol.19, No.4, 373-383.
- 14 Peuchen,J.,Deepwater cone penetration tests, Offshore Technology Conference, 2000, OTC12094.
- 15 Kvalstad,T.J.,Nadim,F.and Harbitz,C.B.,Deepwater geohazards: geotechnical concerns and solutions,Offshore Technology Conference,2001,OTC12958.
- 16 杨木壮, 梁金强, 郭依群, 天然气水合物调查研究方法与技术, 海洋地质动态, 2001,17 (7),14-19.

Advances in Geologic Site Survey and Geotechnical Investigation in Deep Water

Wang Shuyun Lu Xiaobing

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China)

Abstract

Some advances in geologic site survey and geotechnical investigation in deep water during last decade were introduced. These advances include the following items :geologic survey method ;sampling technology , in-situ tests method , CPT and PCPT analysis theory; laboratory tests method for minimizing sample disturbances;nature gas hydrate exploration.

Key word: geology, geotechnics, sampling, in situ test, nature gas hydrate.

作者简介

王淑云 女, 1965 年生, 学士, 高级实验师。现从事土力学实验研究工作。

鲁晓兵 1968 年出生, 副研究员, 现从事土力学实验研究工作。