

# 近海原位测试技术与深海软土理论分析指南

本附录翻译自文献 Lunne T, Andersen K H, Eng Low H. Guidelines for offshore in situ testing and interpretation in deepwater soft clays[J]. Canadian Geotechnical Journal. 2011, 48(4): 543-556.

目前海洋油气资源开发利用已经发展到 3000 米深处的水域，与此同时岩土工程设计越来越注重于海底上部 30 米左右的软沉积物。由于从深水地区回收高质量样品的难度和成本过高，导致确定岩土工程设计参数越来越依赖于现场原位测试技术。本文总结了由挪威岩土工程研究所和西澳大利亚大学的海洋基础系统中心共同承担的联合工业项目，该项目采用原位测试对深海软土特性进行了确定。该项目研究的理论和实证研究为探讨解释 T 型和球型触探试验数据，并与原位十字板剪切测试和高质量土样室内测试所得抗剪强度进行比较。本文主要解译了现场原位测试数据，特别是通过各种类型探头贯入测得的锥尖阻力估计原状和重塑土的不排水抗剪强度。本文对原位测试技术未来发展提出了一些的建议，以进一步发展原位测试在深水软土特性测试中的应用。

## 1 前言

海底表层沉积物的岩土性质对于深水油气田的发展越来越重要，其海上设施主要包括井口、海底完井、管道网和浅层锚固系统。此外，对于深水地区地质灾害评估（特别是海底生物的减少）重要性也日益增加。通常，深水沉积物有质软、正常固结、细粒沉积、表面强度低（小于 20 kPa）和随着深度的强度增加（1~2 kPa/m）的特点。这导致取得优质土样非常困难且成本较高，从而使得设计参数的确定越来越多地依赖于现场原位测试所得到的数据。

孔压静力触探（CPTU）试验在超软土中所测数据的精度可能随水深度的增加而减少。这是部分由于 (i) 海底高压环境，使得超软土贯入阻力导致的负载增量的测量精度降低，在中的不确定性 Seabed 及 (ii) 不等面积效应和上覆土层压力对贯入阻力影响的修正。这些设备上的局限性，可以通过使用全流贯入探头减少，如 T 型和球型探头（图 1）等具有较大投影面积的探头形状。自从 Randolph 等分别在 1996 年和 2003 年引入了 T 型和球型探头（Randolph 等，1998 年；Kelleher、Randolph 等，2005 年；Peuchen 等，2005 年）后，现在许多地区的海洋勘察开始使用全流贯入。然而，关于测试程序和数据解译的研究仍然是新兴领域。

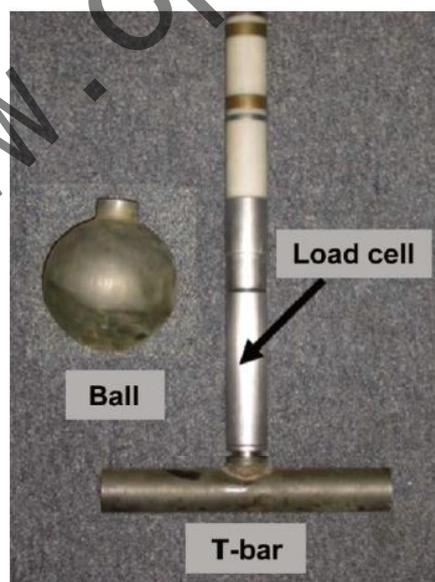


图 1 T 型和球型探头

该项目由挪威岩土工程研究所 (NGI) 和西澳大利亚大学海洋基础系统中心 (COFS) 联合承担, 并对深水超软土地勘察实践进行了改进。本文对于 T 型和球型探头测试时的应变软化、依赖强度的应变率和强度各向异性的影响进行了广泛的理论研究 (Randolph and Andersen 2006; Zhou 和 Randolph 2009a, 2009b)。此外, 11 个近海和 3 个岸边的现场和实验室的数据来源于一个世界性的数据库。通过这个数据库, T 型和球型探头的 CPTU 测试结果能够与高品质的土样的室内三轴和直剪切试验以及十字板剪切试验所得不排水抗剪强度相关联。通过这些研究, 确定一些关键的土体特性对于不排水抗剪强度和渗透性的影响。

本文总结了联合项目的主要成果, 提出一些关于原位测试设备和相关测试程序设计方面的建议, 提高了现场试验数据的准确性、可靠性和一致性。此外, 还给出了用于贯入测试所得数据的解译方法, 并重点分析了使用不同探头贯入测量所得土体原状和重塑条件下的不排水抗剪强度与渗透性等工程特性。为了最大限度地促进原位测试工具在确定深水软粘土的设计参数的发展, 对于原位测试设备进行了进一步的发展并且提出了新的测试程序。最后, 在确认深水软粘土特征时, 该指南给出了如何根据土体的不同状态和工程问题而采用哪种类型的原位测试工具的指导意见。值得注意的是, 指南中提及大多数的参考意见同样适用于陆上软土的原位测试。

## 2 设备和测试程序

### 2.1 原位测试工具

#### 2.1.1 孔压静力触探 CPTU

CPTU 设备应按照国际公认的规范和标准, 尤其是国际标准测试规程 (IRTP), 由国际土力学与岩土工程学会出版 (ISSMGE 1999); g-001 NORSOK 标准 (挪威标准 2004), 美国材料与试验协会 (ASTM) 标准 D5778-07 (ASTM 2007), 和 EN-ISO 标准 22476-1 (ISO /CEN 2007)。至于孔压静力触探设备的要求在这些文献记载, 不在这里重复。

在海上 CPTU 所使用的圆锥贯入仪尺寸更大。单孔测试中, 陆上常使用锥尖面积  $1000\text{mm}^2$  的标准尺寸 (直径  $35.7\text{mm}$ ), 而海底测试则广泛使用  $1500\text{mm}^2$  的标准尺寸 (直径  $43.7$  毫米)。有研究表明,  $500$  至  $1500\text{mm}^2$  横截面积的圆锥所测得贯入阻力是非常相似的 (de Ruiter 1982)。因此, 孔压静力触探试验使用  $1000$  和  $1500\text{mm}^2$  的贯入仪都可以进行, 且 EN-ISO 22476-1 (ISO/CEN 2007) 允许使用截面积  $500$  和  $2000\text{mm}^2$  的圆锥 (直径  $25$  和  $50\text{mm}$ )。截面积小于  $100\text{mm}^2$  (直径  $11.3\text{mm}$ ) 的圆锥也被用于微型海床升降架中 (Lunne 2001), 但这些设计与 EN-ISO 22476-1 标准不一致。

#### 2.1.2 T 型贯入仪

目前, 唯一包含 T 型贯入测试的标准是 NORSOK G-001 (Standards Norway 2004)。该标准建议 T 型贯入仪直径设为  $40\text{mm}$ , 长为  $250\text{mm}$ , 投影面积为  $10,000\text{mm}^2$  (10 倍于标准锥杆尺寸)。文献中关于 T 型贯入仪尺寸、形状对于贯入阻力的影响只有有限的报告。关于软粘土, 离心模型试验 Chung and Randolph (2004)、现场试验 Weemees et al. (2006) 和 Yafate et al. (2007) 结果显示长径比在  $4$  至  $10$  的范围内对贯入阻力没有影响 (T 型贯入仪投影面积为标准锥面积  $6.4\sim 15$  倍)。因此, 我们建议, 如果 T 型贯入仪尺寸小于 NORSOK 标准尺寸时, 长径比应不小于  $4$ 。同时建议连接轴的横截面积不应超过 T 型杆投影面积的  $15\%$ , 直径不大于的 T 型杆的直径。在现场试验的结果中, 表面机械抛光将导致 T 型贯入阻力减少最大  $5\%$ , 建议表面进行轻度喷砂, 如 NORSOK g-001 (Standards Norway 2004)。

#### 2.1.3 球型贯入仪

球型贯入仪目前没有规范, 很少有研究关于球型贯入仪尺寸和材料类型对测试结果的影响。新 ISO 标准预计将于 2011-2012 发表, 规定球型贯入仪直径为  $113\text{mm}$ , 投影面积  $10,000\text{mm}^2$ , 直接连接到标准锥杆 (Chung and Randolph 2004; Yafate and DeJong 2006; Yafate et al.

2007)。新标准同时允许使用一个直径较小的钢球，最小 60 mm（投影面积 2800 mm<sup>2</sup>）。标准主要保持连接轴投影面积与球投影面积比值低于约 15%。类似于 T 型，建议在钢球表面轻喷砂。

#### 2.1.4 十字板

剪切试验十字板的尺寸应符合国际公认的标准如 NORSOK G-001 (Standards Norway 2004) 和 ASTM D2573-08 (ASTM 2008)。根据这些标准，十字板的直径应在 40 至 65 毫米的范围内，高度的比例为 2。十字板的厚度范围从 1.6 到 3.2 毫米。为了最大限度地减少由于十字板插入所导致的土壤扰动，十字板应尽可能薄 (La Rochelle et al. 1973; Roy and Leblanc 1988; Cerato and Lutenegeger 2004)，最好有一个周长比 ( $= 4e/\pi d_{\text{vane}}$ ，其中  $e$  是十字板厚度， $d_{\text{vane}}$  是十字板直径) 不超过 3%。十字板大小的选择取决于所测土的强度。十字板直径与轴径比应至少大于 3，以最大限度地减少土体固结对强度测试的影响。

## 2.2 数据精确

### 2.2.1 传感器校准和温度稳定性

圆锥型，T 型和球型贯入仪的传感器（传感器和孔隙水压力传感器）应按照国际标准进行校准（例如，NORSOK G-001 (Standards Norway 2004); ASTM D5778-07 (ASTM 2007); EN-ISO 22476 (ISO/CEN 2007)）。

在贯入测试中基准读数的变化可能会导致明显的错误，特别是在软粘土中的测试。参考值的转变的一个原因是由于温度变化导致的传感器信号输出的移位 (Lunne et al. 1986)。因此，建议仪传感器设计中考虑提供温度补偿。

### 2.1.2 数据采集

孔压静力触探、十字板剪切试验要求的数据采集应按照国际标准 (NORSOK G-001 (Standards Norway 2004); ASTM D5778-07 (ASTM 2007); ISSMGE (1999); EN-ISO 22476-1 (ISO/CEN 2007); ASTM-D2573-08 (ASTM 2008))。建议 T 型和球型贯入试验数据采集的要求应与孔压静力触探试验的要求一致，但对于贯入过程中的贯入阻力处理有重要补充。下面列出了贯入测试中的一些需要特别注意的重要问题，特别是对于 T 型和球型贯入测试。

根据国际标准，软粘土的孔压静探最大数据测试间距为 20 mm。但是在（大多数）实践中，测井分布较所需更频繁。建议 T 型和球型贯入试验的测试间距与静力触探试验一致。虽然规范推荐 T 型和球型贯入试验测井最小间隔分别为  $\pm 0.15$  和 0.20 米，本文推荐最大为 T 型和球型贯入试验测量间隔为 10 毫米循环。这是为了确保足够的的数据点对贯入测试的测试结果进行解译。

## 2.3 测试过程

### 2.3.1 贯入测试

在贯入测试开始前测量传感器的参考读数时尽量减少误差，以减少工具测量中的不确定因素。在为渗透测试取参考读数前必须确保所有的传感器能够在当地的温度下稳定运行（无论是海底或井下测试的参考读数）。此外应避免贯入测试开始读数前贯入仪先埋进土中的情况。为了在软粘土中进行高质量的测试，必须将参考读数记录下来并备录在案，如下文所述。单向 CPTU 和 T 型触探试验按照国际标准如 NORSOK G-001 (Standards Norway 2004) 执行。目前，球型贯入测试没有标准，建议测试依照 T 型触探 NORSOK G-001 的标准执行。单向 CPTU 试验、T 型和球型贯入试验应该保持稳定约 20mm/s 的速度进行贯入，或 T 型保持每秒 0.5 倍 T 型杆直径大小的速度进行贯入、球型按每秒 0.25 倍球直径大小的速度进行贯入。对于尺寸大小不同的贯入仪，最好保持每秒相较于直径倍数一致的贯入速率，以保持土壤相同的平均剪切应变率。建议 T 型和球型贯入试验在贯入和提出时都进行贯入（拔出）阻力测试。尽管这一点不在指定的国际标准范围内，仍建议在提出过程中记录孔压静力触探数据，这可能有助于测量中的质量控制。

T型和球型贯入试验可以估计重塑土的不排水抗剪强度,建议每一个测试地点进行至少一次循环测试,以提供额外的数据,以检查传感器的参考读数。同时建议,10个周期的贯入及提出中T型贯入试验最小间隔 $\pm 0.20\text{m}$ ,球型贯入试验 $0.15\text{m}$ 或 $\pm 3$ 倍直径。循环试验应进行于测试的贯入阶段,因为如果在测试的提出阶段进行试验,杆周围软土的局部固结会导致提出时测到更大的阻力。贯入测试中贯入和提出速度应与CPTU测试的贯入速度一样。

### 2.3.2 十字板剪切试验

十字板剪切试验应按照国际公认的标准进行,如NORSOK-001(挪威2004年标准)和ASTM-d2573-08(ASTM 2008)。建议的初始旋转至峰值扭矩(或不排水抗剪强度)的旋转速率应在 $0.1^\circ$ 至 $0.2^\circ/\text{s}$ 范围内。NORSOK G-001指定从达到所需测试深度的瞬间到测试开始(等待时间)的时间应为2到5min。在测量峰值扭矩后,如果需要改造的不排水抗剪强度,NORSOK G-001规定改造后的不排水抗剪强度应在至少10转后测量,转速快于4转/分( $24^\circ/\text{s}$ ),直到恒定扭矩超过 $45^\circ$ 时为止。

现有的用于近海十字板剪切试验的十字板剪切装置无法进行快速旋转,因此即使进行10次快速旋转也是不切实际的。

通常,在近海十字板剪切试验中,当旋转速率为 $1^\circ/\text{s}$ 时,只需旋转一次,即可测得残余不排水抗剪强度。一些工程师将此作为改造后的抗剪强度,但这一数值很可能是对改造后的抗剪强度的高估。残余十字板剪切强度反映具有减摩特性的离散剪切面的发展程度尚不清楚,但有证据表明,情况并非如此,在叶片旋转一次后记录的残余剪切强度一般大于实验室或现场循环渗透仪试验中所获得的完全重塑强度。

因此,为了可靠地测量重建后的不排水抗剪强度(类似于陆上做法),鼓励近海岩土工程承包商开发能在大约5分钟内进行20次旋转的设备,但仍允许完整和改造后的不排水抗剪强度测量的旋转速率为 $0.1^\circ$ 至 $0.2^\circ/\text{秒}$ 。

### 2.3.3 采用海床模式在海上安装现场设备

近海现场原位测试,可以使用单孔井下(以钻柱为基础)和海床模式(以位于海床的升降架为基础)。对于浅锚定系统的深水区域,原位测试通常使用海床模式。

在海床升降架的操作方面有几个问题需要考虑,以提高后续测试数据的可靠性。下落过程中,升降架可能会由于其自重陷入软沉积物中。因此,对原位测试的深度小心控制,以避免任何原位测试工具在测试开始之前埋入土中是极为重要的,这可能会导致传感器得到错误的参数。此外,当测量海床上1-2m的土体特性时,必须确保海底升降架的底座不干扰原位试验附近的土体,并确保承受应力。

可通过以下方式考虑减少海床升降架对试验结果的影响:

- 1 海底框架的设计应使其自重足以满足原位测试所需的反应力,但也不能太大而扰动海底附近的土体。
- 2 在海床升降架外围设置挡板以将海底架的重量转移到硬土,避免海床升降架陷入海底。
- 3 海床升降架设计的接触面积应该包括一个足够大的开口,使得原位工具得以进入海底,并使架远离原位测试中心。

要评估海底框架对于原位测试的影响,建议对任何与海床接触或沉入海床的海床升降架进行监测。实现这一方法之一是在海床升降架上安装摄像机,目前已经在这些商用海床升降架上得到了应用。

### 2.3.4 参数测量与记录的建议

原位测试在超软土和高精度测量领域备受关注,或需要NORSOK G-001标准(Standards Norway 2004)的1级精度,建议记录圆锥型、T型和球型贯入测试所有部署及测试阶段的数据,用以评估测试质量。图1所示1至9阶段的测量和参考的建议适用于海床模式,这些将包括在国际标准化的海洋土调查中,预计公布于2011至2012。并将包括用于井下测试的类

似计划。

图 2 所示阶段为 1 到 9 所记录的数据，应该按照国际标准要求提出对应的“标准”进行分析所测数据（如  $q_c$ ,  $u$ ,  $f_s$ ）和计算所得参数（如  $q_t$ ,  $q_{net}$ ,  $F_r = f_s/q_{net}$ , and  $B_q = Du/q_{net}$ ）。数据应呈现在各种传感器读数与时间关系的图中，如图 2 所示。在表中，所有传感器的参考读数在 2 至 9 阶段如图 2 所示。可以用记录的数据来分析测试结果。原位的垂直应力  $s_{v0}$ ，需要先计算  $Q_{net}$ 。此外，应于提出探头时记录孔隙压力和端阻力数据用于确认校准面积比。

对于高质量的测试，7 和 4 阶段、9 阶段和 2 阶段的参考读数之间的差异应该是微小的。暂时建议限制阶段 7 和 4 阶段、9 阶段和 2 阶段参考读数值值的差异（相对于海底采取最大读数）

1. 对于  $q_c$ ——35kPa 或 5%的测试最大读数。
2. 对于  $u$ ——10kPa 或 2%的测试最大读数。
3. 对于  $f_s$ ——5 kPa 或 10%的测试最大读数。

对于 T 型和球型贯入试验，建议限制  $q_{T-bar}$  或  $q_{ball}$  的差为 105 kPa 或 5%的最大读数。

建议限值以上的贯入测试按照新欧洲标准 EN-ISO 22476-1 (ISO/CEN 2007) 1 级标准的规定要求。如果在阶段 7 和 4、9 和 2 之间的差异超过了建议限制的最大值，建议在每一个图上注释以说明差异的幅度。

上述建议适用于海底模式测试，每次测试海床升降架回收回到甲板。如果将海床升降架从一个测试地点移到另一个而不回收回到甲板的位置，该程序必须进行修改。虽然上面的建议针对于贯入测试，其也适用于类似的测试中，如在海底升降架中进行十字板剪切试验。对于某些项目，可能有必要对上述建议作出更严格的要求。

鼓励现场调查承包商开发改进现场工具和数据采集系统，尽量减少参考读数的偏移值至低于上述建议值。如 Randolph 等（2007）所示，通过 T 型和球型贯入试验，贯入和提出所得数据关于零线相关对称可以检查传感器的参考读数。建议在每个测试位置上至少进行一次循环贯入测试。

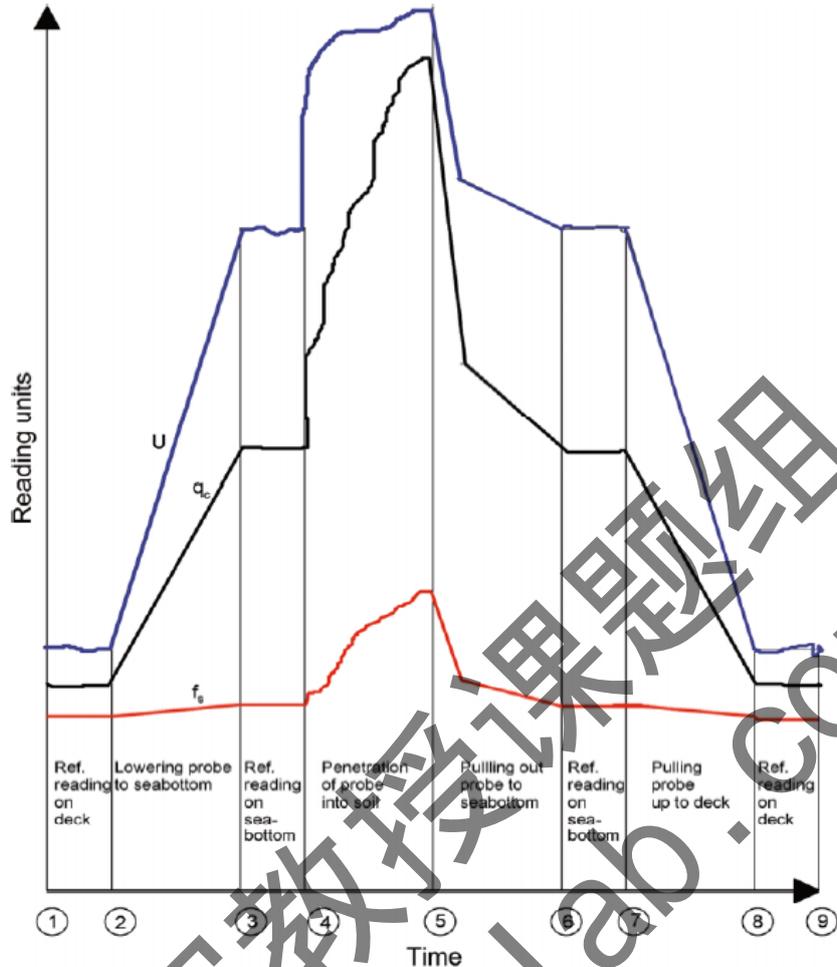


图 2 进行海床原位测试参考读数的方案(在时间轴上标明阶段数)(ISO/CEN 2007)

### 2.3.5 数据表达

孔压静力触探和 T 型贯入试验、十字板剪切试验的结果说明应按照国际标准(ISSMGE (1999); NORSOK G-001 (Standards Norway 2004); ASTM D5778-07 (ASTM 2007); EN-ISO 22476-1 ISO/CEN 2007; ASTM D2573-08 (ASTM 2008))。建议球型贯入试验结果按照 NORSOK G-001 (挪威 2004)所提出的 T 型贯入试验标准。对于 T 型贯入测试，除了贯入阻力的分布，应当给出提出时的阻力分布以及贯入提出阻力比。

周期 T 型和球型贯入试验结果应图中表示出贯入阻力曲线和相关于循环次数的退化因子如图 3 所示。建议的初始贯入的循环数应取 0.25 而初步提出时取 0.75 等(Randolph et al. 2007)。退化因子的计算通过将初始贯入时测得的贯入阻力除以每个半周期（无论是贯入或提出）的平均（绝对）净阻力。每一个周期的平均净阻力应取自在该循环的中心部分，以避免循环区极端条件的影响。修正上覆土层压力和孔隙压力对测得贯入阻力的影响，将在下一节中讨论。

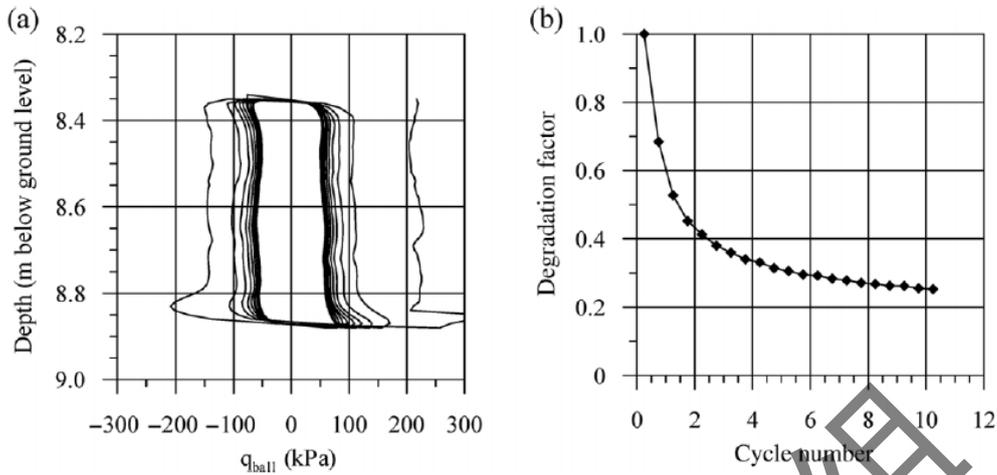


图3 举例说明循环贯入试验结果：(a)深度与贯入阻力的关系；(b)退化因子与循环次数之间的关系。

### 3 实测贯入阻力的修正

在利用实测贯入阻力估计土体性质之前，需要对其进行孔隙水压和上覆土层的修正。修正后的总锥尖阻力  $q_t$  如下式：

$$q_t = q_c + u_2(1 - \alpha)$$

其中  $u_2$  是锥肩处的实测孔压值， $\alpha$  是净面积比。水下  $\alpha$  值的大小一般在 0.6 至 0.8 之间。静锥尖阻力计算如下：

$$q_{net} = q_t - \sigma_{v0}$$

其中  $\sigma_{v0}$  现场总的上覆土重 ( $\sigma_{v0} = \gamma_{bulk} \times h$ )。

类似的，在 T 型和球型探头使用过程中，都需要对孔压和上覆应力进行修正，修正公式如下 (Chung and Randolph 2004)：

$$q_{T-bar} \text{ 或 } q_{ball} = q_m - \frac{[\sigma_{v0} - u_0(1 - \alpha)]A_s}{A_p}$$

其中  $q_m$  为实测锥尖阻力， $u_0$  为静孔隙水压力，静面积比  $\alpha$  的范围同上式； $A_s$  为探杆的截面积； $A_p$  为探头水平轴向的投影面积。Randolph 在 2007 年对上式进行了一些微调，微调后的公式并没有产生太大的计算差异，同时上式避免了 T 型和球型探头对于  $u_2$  的精确测量。修正后 T 型和球型探头的锥尖阻力值将被分别表示为  $q_{T-bar,rem}$  和  $q_{ball,rem}$ 。

### 4 不排水抗剪强度的解释

基于联合工业项目的世界范围内数据库建立了完整的不排水抗剪强度 ( $S_u$ ) 和贯入试验测量参数值之间的相关研究。Low 等在 2010 年的研究中表明锥尖系数  $N_{kt} = q_{net}/s_u$  和  $N_{\Delta u} = (u_2 - u_0)/s_u$  受到土体刚性指数的影响。相反的，基于三轴试验及直剪试验抗剪强度平均值 ( $s_{uave}$ ) 和十字板剪切强度 ( $s_{uvane}$ ) 的全流贯入系数  $N_{T-bar} = q_{T-bar}/s_u$  和  $N_{ball} = q_{ball}/s_u$  却是独立于 secondary 土体性质的，上述的两个全流系数且不谈土的各向异性的影响，单就灵敏度  $\leq 8$  的土体而言确实具有独立性。有全面数据统计得出，上文中出现过的三种贯入测试的锥尖系数具有类似的波动性，其波动系数  $c_v$  都在 0.10-0.20 之间。然而，这并不包括  $N_{\Delta u}$ ，因为  $N_{\Delta u}$  易受到土体刚度指数的影响以及波动系数太大 (0.20-0.35)，所以在没有特定场地修正下， $N_{\Delta u}$  并不被推荐用于  $S_u$  的评价。

表 1 重塑承载力系数 N-factors (Low et al. 2010).

N-factor or $N_{rem}$ -factor	Definition	Recommended N-factor			
		All data		Gulf of Guinea	
		Mean	Range	Mean	Range
$N_{kt,suc}$	$q_{net}/s_{uc}$	12.0	10.0–14.0	12.5	10.5–14.5
$N_{kt,suave}$	$q_{net}/s_{uave}$ Or $q_{net}/s_{udss}^a$	13.5	11.5–15.5	13.5	11.5–15.5
$N_{T-bar,suc}$	$q_{T-bar}/s_{uc}$	10.5	8.5–12.5	10.5	8.5–12.5
$N_{T-bar,suave}$	$q_{T-bar}/s_{uave}$ Or $q_{T-bar}/s_{udss}^a$	12.0	10.0–14.0	12.0	10.0–14.0
$N_{T-bar,rem,UU}$	$q_{T-bar,rem}/s_{ur,UU}$	20.0	13.0–27.0	—	—
$N_{T-bar,rem,fc}$	$q_{T-bar,rem}/s_{ur,fc}$	14.5	12.5–16.5	—	—
$N_{T-bar,rem,vane}$	$q_{T-bar,rem}/s_{ur,vane}$	14.0	12.0–16.0	—	—

Note: Shear strengths:  $s_{uc}$ , triaxial compression;  $s_{uave}$ , average of triaxial compression and extension and simple shear;  $s_{udss}$ , simple shear;  $s_{ur,UU}$ ,  $s_{ur,fc}$ , and  $s_{ur,vane}$ , remoulded UU, fall cone, and vane, respectively.

<sup>a</sup>When triaxial extension strength ( $s_{ue}$ ) is not available.

表 1 概括了 Low 等在 2010 年经研究得到的锥尖系数 N 的推荐值，用以估算不排水抗剪强度  $S_u$ 。表 1 中的锥尖系数值仅适用于灵敏度  $\leq 8$  的土体，并且会根据当地土体的性质进行变动。因此，如若新场地的相关土体性质超出了上述符合表 1 条件的范围之外，需要对此更加注意，可能会有不可靠数据的出现。针对表 1 给出的锥尖系数范围，采用高抗剪强度保守时，应采用较低值进行计算；在采用低抗剪强度时，应采用较高值。

根据对于 T 型和球型探头贯入阻力的比较（包括初始值和修正值），Low 等发现球型的贯入阻力大致比 T 型的高出 5% 左右。在实验开始不久，仍缺乏球型探头贯入数据时他们提出了  $N_{ball} = N_{T-bar}$  的假设，但随着越来越多数据的分析采集，发现有必要对两者的关系进行调整。

同时需要注意的是，不像陆地工程实践中，水上的十字板剪切强度近乎不需要任何修正系数的修正。这项结论的得出是基于其他几组实测抗剪强度的关系，但严格来说随着十字板进入土体中并对土体产生扰动时，其十字板抗剪强度多多少少会发生一些变化，主要是升高。

## 5 重塑不排水抗剪强度

重塑不排水抗剪强度  $S_{ur}$  能够从 T 型和球型探头的循环贯入试验中得到。修正后的锥尖阻力， $q_{T-bar,rem}$  和  $q_{ball,rem}$ ，在循环贯入测试结束时（正常情况下循环 10 次）测得，并采用合适的重塑锥尖系数 ( $N_{rem}$  见下文) 对  $S_{ur}$  进行估算。尽管土体可能在第 10 循环贯入之后并未达到完全重塑的状态，只要锥尖系数  $N_{rem}$  是在第 10 次循环时根据  $q_{T-bar,rem}$  和  $q_{ball,rem}$  进行标定的， $S_{ur}$  就能够由  $q_{T-bar,rem}$  和  $q_{ball,rem}$  推算得到。根据  $S_{ur}$  和第 10 次循环期间的重塑锥尖阻力实测平均值之间的关系，Low 等发现  $N_{rem}$  值大于不排水抗剪强度  $S_u$  下的各类锥尖系数值，并随土体强度灵敏度的增加而略微升高，但不存在与相关指数性质有一致趋势。这一结论确定了数值分析的相关理论参数和结果（详见 Randolph 2006 and Zhou 2009b），即  $q_{T-bar}/q_{T-bar,rem}$  和  $q_{ball}/q_{ball,rem}$  灵敏度的比值总会低于抗剪强度灵敏度  $S_u/S_{ur}$ 。

表 1 涵盖了估计  $S_{ur}$  的  $N_{rem}$  推荐值。同样的，推荐的  $N_{rem}$  值仅在灵敏度  $\leq 8$  的土体中适用，且满足  $N_{rem,ball} = N_{rem,T-bar}$ 。需要注意的是，推荐的  $N_{rem}$  值依赖于  $S_{ur}$  的测量方式。

## 6 其他土体参数的解译

Low 等 (2011) 在对不同探头得到的贯入阻力值的比较中发现，土的刚度系数或许跟这些值有关系。另外，根据 Low et al. (2007/2008a) 等的研究，通过修正试验流程以及在探头上添加可测量孔隙水压的传感器，使全流贯入设备在确定土体固结系数和基于土体强度的应变速率上具有十分显著的优势。

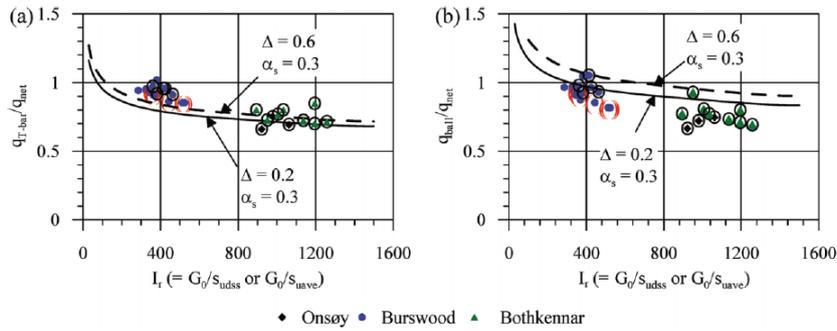


图 4 (a)  $q_{T-bar}/q_{net}$  和 (b)  $q_{ball}/q_{net}$  随刚性指数 ( $I_r$ ) 变化关系曲线

### 6.1 刚度系数的估计

Low 等在 2011 年证实  $q_{T-bar}/q_{net}$  和  $q_{ball}/q_{net}$  满足锥尖阻力的理论趋势，就是随着刚度系数  $G/S_u$  的增加而增加。最佳定量能够通过小应变刚度系数  $G_0/s_{u,ave}$  得到，其中小应变刚度  $G_0$  可经现场地震波静力触探试验得到（见图 4）。基于此，Low 等认为在缺少剪切模量的精确数据时，小应变刚度系数  $G_0/s_{u,ave}$  的值在  $q_{T-bar}/q_{net} = 1$  的情况下估计范围在 200-300 之间，而当  $q_{T-bar}/q_{net} = 0.75$  时， $G_0/s_{u,ave}$  的估计范围将扩大至最大 1000。不仅如此，Low 等认为地震剪切波数据能够用来对实测圆锥和 T 型探头贯入阻力进行检验。

### 6.2 应变速率对强度的影响

不排水抗剪强度受到实际剪切应变速率的影响。所以，土体强度与应变速率的依存关系是一个很重要的问题，尤其是在解读测试数据和针对不同设计工程实例应该选择用哪种抗剪强度时。在贯入试验中控制贯入速率可以有效评估土体强度与应变速率的关系。同样的，变速率的十字板剪切试验，Peuchen 和 Mayne 在 2007 年提出的，也是基于这个目的。将上述两个变速率试验的数据分别以半对数和双曲线应变速率方程的形式进行拟合，可以得到应变速率和土体强度的关系，如表 2。Lehane 等在 2009 年发现这些试验数据或许也能在幂指关系中拟合。

表 2 最佳拟合双曲正弦和半对数速率系数(Low et al. 2008a).

	Hyperbolic sine rate coefficient, $\mu$ $\frac{q}{q_{ref}} = \frac{1 + \{[\mu/\ln(10)]\} [\sinh^{-1}(v/v_0)]}{1 + \{[\mu/\ln(10)]\} [\sinh^{-1}(v_{ref}/v_0)]}$	Semi-logarithmic rate coefficient, $\mu$ $\frac{q}{q_{ref}} = 1 + \mu \log\left(\frac{v}{v_{ref}}\right)$
Penetrometer		
T-bar (intact)	0.21	0.15 (0.19) <sup>a</sup>
T-bar (remoulded)	0.21	0.15 (0.19) <sup>a</sup>
Ball (intact)	0.12	0.10 (0.11) <sup>a</sup>
Ball (remoulded)	0.12	0.10 (0.11) <sup>a</sup>

Note:  $q_{ref}$  was taken as penetration resistance measured at the penetration rate of 20 mm/s;  $v_{ref}$  was taken as penetration rate of 20 mm/s;  $\mu$  is the rate coefficient that quantifies the change in strength with an order of magnitude change in rate.

<sup>a</sup>Values in brackets were obtained by replacing  $v_{ref}$  with  $v_0$  ( $= 1$  mm/s) and  $q_{ref}$  with  $q$  measured at the penetration rate of  $v_0$ .  $v_0$  is the penetration rate at which the undrained strain rate effect start to decay towards zero.

图 5 显示了 Low 等人 2008a 在西澳进行的一系列变速率 T 型和球型贯入试验以及变速率的循环 T 型和球型贯入试验，试验场地土性为软粘土，通过试验得到的贯入速率和贯入阻力的关系都在图 5 中有表示。该场地由轻微超固结、粉质软粘土组成，塑性指数在 40%-70% 之间，强度灵敏度在 3.5-4.5 之间。粘土的屈服应力比大约为 1.4。

图 5 中同样揭示了，在维持不排水的环境下， $q_{T-bar}$  和  $q_{ball}$  随着贯入速率的减小而减小，这里的贯入速率是与标准速率测试（贯入速率在 20mm/s）相比之下。Low 等 2008a 发现由 T 型和球型贯入试验推到得到的速率系数在 0.10-0.21 之间。速率系数受速率方程和用于拟合数据的参考贯入速率二者的轻微影响，但是球型的速率系数往往略低于 T 型的速率系数（见表 2）。但无论是  $q_{T-bar}$  或  $q_{ball}$ ，速率系数在完整土体和重塑土体中没有区别。利用这一点，可以发现重塑土体中进行变速率贯入试验更有优势，因为试验在重塑土中进行时，更易采集到一致连续的贯入阻力数据。

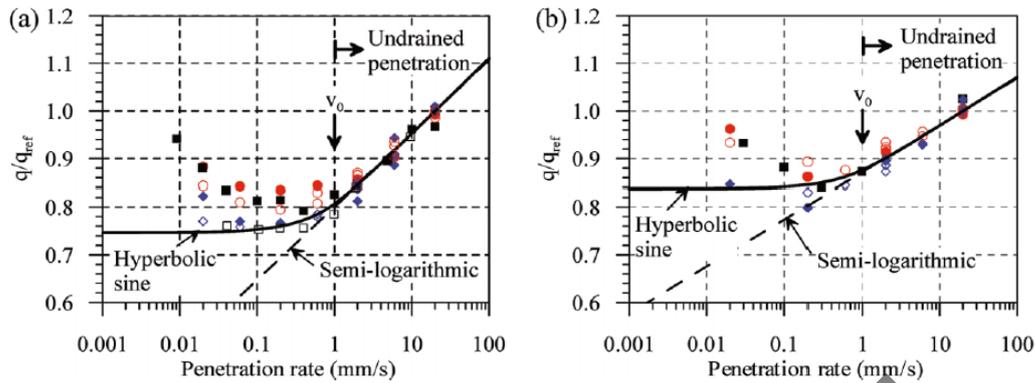


图 5 贯入速率对(a)  $q_{T\text{-bar}}$  and (b)  $q_{\text{ball}}$  的影响

基于施加的剪切速率, 变速贯入测试数据使得贯入阻力值能够直接应用与不同工程实例的设计中。然而, 经验表示应变速率对土体强度的影响随着应变速率的降低而减小。所以, 当工程中需要进行几种不同数量级贯入速率的静力触探测试时, 要特别小心去处理应变速率和土体强度之间的关系, 然后再进行计算。尤其是在利用半对数方程拟合二者关系的情况下。

## 7 近海床表面沉积物的性质

海床近地表约 1-2m 处的土体强度数据在管线、流线和冒口设计中显得尤为重要, 但却是通过现场试验或室内实验最难以获取的数据。根据一份对能够获取海床表面土体性质方法的总结, Low 等 2008b 总结到, 在箱形取样器中进行的现场强度试验是最能反映海床表面软土沉积物不排水抗剪强度真实值的方法。一个小型的十字板剪切试验能反映一个核心样品盒中土体的完整和重塑不排水抗剪强度, 然而小型的贯入试验却可以在更小的时间成本下得到沿深度分布更加连续的数据。另外, 值得一提的是, 贯入试验能够提供更加完整的关于地壳特征的定义。原状和重塑不排水抗剪强度, 利用贯入阻力和表 1 中的锥尖系数  $N$  值联合估计得到。

到目前为止, 商业上可行的箱形取样器能够修复海床以下最多 0.5m 深度以内的土体样本。考虑到箱形取样器在修复超软性完整海床表面土体上的巨大潜力, 如何将箱形取样器的应用深度扩大十分值得研究和探讨。远程遥控机动设备 (ROV) 也是十分有效的水下测试辅助仪器, 能够在海床下 1-2m 处部署现场测试设备却不会造成土体的扰动, 这项技术在经济上已经具备可行性。

## 8 原位测试设备和测试技术的前景

许多现场设备和技术的发展要求是放大现场测试的潜力和可行性, 特别的, 对全流贯入设备而言就是加强其在深水处软粘土中的应用。具体一些的建议有: 将更多的传感设备加在现有的测试工具中, 提升传感器的性能, 以及提升测试设备的测试精度等等。

### 8.1 在全流探头上加设孔压传感器

最近的关于提升全流探头性能的设想便是在其上增加测量孔隙水压的传感器, 借此提升全流探头的测试范围, 使其能够估算除了不排水抗剪强度之外的土体参数。Kelleher 和 Randolph (2005) 以及 Peuchen 等 (2005) 研究表示带孔隙水压传感器的 T-bar 和球型 I 贯入仪器能够更好地反映土壤地层学。这其中 Kelleher 和 Randolph (2005) 在 ball 探头的赤道线上设置可测量孔压, 而 Peuchen 等 (2005) 则是沿着 T 型的轴线 (两个传感器分别在中心和边缘处) 和球型探头的顶端测量孔压。在泥质土研究上, Boylan 和 Long (2006) 也发现在球型探头距顶端 1/3 直径处设置传感器测量孔压能够更加直观、高效地对泥炭沉积的相对腐殖化进行测量。Low 等 2007 和 Dejong 等 2008 表示, 对于能够测量孔压, 即能够进行孔压消散测试的球型探头 (在赤道线上布置孔压传感器), 可以用来估计土体的固结参数。理论上讲, 孔隙水压在 T 型和球型探头周围的分布很大程度上受控于土体刚性系数。这

一点或许能够在利用孔压消散测试确定土体固结系数上提供相应优势。

现有的国际标准例如 NORSOK G-001 (Norway 标准 2004) 并没有关于 T 型探头测试中出现孔隙水压测量的描述。由于目前关于在 T 型和球型探头中添加孔压测量值这一点上, 依旧缺乏工程实例和相关研究经验, 建议在已经完全掌握土体资料的场地中进行试验, 发掘设置孔压传感器的最佳位置, 以便将孔压测量在全流探头的使用上更快的规范化、标准化。

### 8.2 用于补偿环境压力的传感器

深海处, 受力元件和承压传感器在贯入过程中会首先受到来自四周海水的压力影响, 这部分环境压力占了实测压力值不容忽视的一部分。因此, 大容量的传感器十分必要, 并且传感器的灵敏度要求能够在贯入过程中检测到很小的电阻增量。为了增加测量的精度和灵敏度, 开发商应该鼓励各类新型传感器在原位测试中的应用, 方便对不同的压力以及与环境水压力相关的贯入阻力的测量。针对能够补偿环境压力的传感器而言, 圆锥锥探头相比于 T 型 r 和球型探头更加需要此类型的传感器, 因为 T 型和球型探头本身的投影面积便是连接杆截面积的 10 倍, 使得这两类探头在补偿环境压力上具有优势。压力补偿型锥尖探头已经在经济上具备了可行性。

### 8.3 变速率贯入测试

回顾一下变速率贯入试验在评价应变速率和现场土体强度以及贯入测试中固结状态之间的依存关系的优势, 岩土业界应该尝试设计一种测试控制软件, 能够囊括几种不同速率的贯入测试。一定程度上这就对仪器设备的要求上了一个层次, 一来要增加测试控制系统的可控范围, 即可控的贯入速率范围变大, 二来是增加数据录入的速度。就目前而言, 短期内的目标是将贯入速率的变化范围控制在 1-2 个数量级之间, 圆锥型和 T 型每一步至少提前 0.1m, 球型至少是 2 倍直径。关于变速率贯入试验, 表 3 给出了一个可能的速率测试序列, 根据此序列试验将在 0.5m 或是 10 倍球型探头直径深度内完成, 耗时在 2-3 分钟。本文提出的变速率贯入测试将在判断中粒径土体如粉土的贯入测试分析和预测基础变形上起到关键的作用。

表 3 用于评估速率效应的贯入速率建议顺序

Step	Rate (mm/s)	Comment
0	20	Standard rate
1	60	Increased rate for 0.1 m or $2d$
2	20	Standard rate for 0.1 m or $2d$
3	6	Decreased rate for 0.1 m or $2d$
4	2	Decreased rate for 0.1 m or $2d$
5	6	Increased rate for 0.1 m or $2d$
6	20	Revert to standard rate

Note:  $d$ , penetrometer diameter.

### 8.4 重塑不排水抗剪强度

很多近海工程的设计施工中要求对土体的重塑不排水抗剪强度进行估算。一个典型的应用实例就是利用重塑不排水抗剪强度估算吸力锚安装过程中的表面摩擦。二者之间的关系在设计中被认为是相等的。一般而言, 探头锥尖摩擦套筒能提供关于表面摩擦值的合适估计, 但是摩擦套筒在应用中存在不可忽视的不确定性, 目前人们在利用摩擦套筒数据时并没有考虑到可靠性的问题。提高探头锥尖摩擦套筒的测试精度是未来需要面对的一项挑战, 尤其是在水下进行测试时, 水下极软土中的土体摩擦力会变得十分小, 难以精确测量。至于添加传感器测量孔隙水压, 可以将传感器安置在套筒的上端。

## 9 结 论

基于联合项目取得的研究和经验总结,就软近海沉积物现场设备和测试过程的设计提出了若干建议,目的是为了提 高测试结果的精度和可靠度,以及完善几种不同原位测试方法下结论的一致性。指南同时提供了几种不同探头得到的原状和重塑不排水抗剪强度的估算方法。上述研究主要集中在轻微超固结土体上,并且土体的强度小于 100kPa。

在此之前就有相关研究表现了全流探头的巨大潜力,特别是配置了孔隙水压测量传感器的全流探头,主要表现在确定应变速率和土体强度性质的依存关系上、土层地质学的理解上、确定固结参数上,其中有些性质需要借助变速率贯入测试的帮助才能得出。鉴于此,很多关于水下原位测试的前景建议都集中在改进全流探头性能上面。

工程中,在原位测试探头(圆锥型、T 型或球型)的选择上,主要从以下几点进行考虑:工程需要、可能遭遇到的水下土体的性质、需要解决的工程地质问题等等。表 4 详细罗列了针对水下工程地质可能发生的一些问题、能够由原位测试获得的土体参数的种类(主要是不排水抗剪强度)以及这些参数获取上的可靠程度。表 4 可以看做是一个指南,用来帮助判断选择不同探头的使用。其中 T 型和球型探头被归为了一类因为二者测量得到的贯入阻力值十分类似。

表 4 解译土工参数的适用性与可靠性

Geotechnical problem	Depth below seabed (m)	Comment	Soil parameters required <sup>d,f</sup>	Applicability-reliability		
				Piezocone	T-bar, ball	Vane
Back-filled trenches: upheaval buckling	0-1	Extremely soft material may be encountered	Soil profile	1-2	3	—
			Classification	2	—	—
Pipeline-riser soil interaction	0-3	Very soft material may be encountered	Soil density	2-3	—	—
			Undrained shear strength	2-3	1-2	2-3
			Soil profile	1-2	3	—
			Classification	2	—	—
			Undrained shear strength	2	1-2	2-3
Skirted foundations: penetration, bearing capacity	0-15/40	—	Remoulded shear strength	5	1-2 <sup>b</sup>	2-3 <sup>e</sup>
			Soil profile	1-2	3	—
			Classification	2	—	—
			Undrained shear strength	2	1-2	2-3
Seabed templates, penetration, stability, settlements	0-10	—	Remoulded shear strength	5	1-2 <sup>b</sup>	2-3 <sup>e</sup>
			Soil profile	1-2	3	—
			Classification	2	—	—
			Undrained shear strength	2	1-2	2-3
Geohazards: slope stability	0-10/100	Use of T-bar-ball and vane may be limited to 40 m depth	Remoulded shear strength	5	1-2 <sup>b</sup>	2-3 <sup>e</sup>
			Soil profile	1-2	3	—
			Classification	2	—	—
			Undrained shear strength	2	1-2	2-3
			Remoulded shear strength	5	1-2 <sup>b</sup>	2-3 <sup>e</sup>

<sup>a</sup>Scale of relative applicability-reliability: 1, high; 5, very low; —, no applicability. The values indicate to some extent NGI and COFS's view on the potential tool to derive a certain parameter.

<sup>b</sup>Requires cyclic T-bar (or ball) penetration tests.

<sup>c</sup>This study mainly covers the interpretation of parameters at depths up to say 30 m below seabed.

<sup>d</sup>Settlement parameters have not been covered in this study.

<sup>e</sup>Requires at least 10 quick rotations.

<sup>f</sup>Parameters for evaluating cyclic behaviour not included in the above table.

由水下 CPTU 得到的不排水抗剪强度在回填材料中的测量可靠度小于海床原状土中的测量结果。这是因为回填材料的锥尖阻力和孔隙水压力都很小,难以进行精确测量。对于水下极浅深度处的软土性质,利用 T 型(或者球型)与十字板剪切试验可以估算得到足够精度的不排水抗剪强度值,当且仅当试验进行的十分谨慎和细致。然而,T 型(或者球型)获取数据的速度较十字板剪切试验更快,且能够得到连续的不排水抗剪强度值。另外值得注意的是,在进行十字板剪切试验之前,十字板在进入土体的过程中会对土体产生相对较大的扰动,造成软土剖面较为分散,试验精度有所流失。尽管如此,在工程实践中还是推荐将静力触探试验作为首选的现场测量方法,并以十字板剪切试验为补充,从而增加实测不排水抗剪强度的可靠性。T 型和球型静力触探试验需要在箱芯样品中进行试验以测量海床下 0.5m 深度内的土体强度性质。

在天然沉积土体中,推荐使用静力触探作为现场调查的首选工具,这是因为从静力触探获得的参数中进行土体分类已经是十分普遍的操作方法。然而,当需要对土体的不排水抗剪

强度进行估算时，尤其是针对水下相对较软的土体时，都会选择 T 型或球型探头作为补充试验工具。这是因为 T 型和球型探头能够提供更为可靠的不排水抗剪强度估算值（尤其在  $q_{T-bar}$  和  $q_{ball}$  都与  $s_{uave}$  和  $s_{uvane}$  相关时），并且由 T 型和球型贯入阻力值推断出的不排水抗剪强度值能够为基础的承载能力提供一个更加贴切的预测。

目前仍旧缺乏足够的经验去完整地评估 T 型和球型触探仪的优点。T 型探头，由于其本身的特性，对测压元件中的弯矩变化更为敏感。导致测量到测压元件中非真实的变化值，是因为很难避免测压元件中弯曲效应的影响。然而这并不影响 T 型触探被视为一个模型管线元件，因此能够直接为管线的设计提供数据。

## 参考文献

1. ASTM. 2007. Standard test method for electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils. ASTM standard D5778-07. ASTM International, West Conshohocken, Penn.
2. ASTM. 2008. Standard test method for field vane shear test in cohesive soil. ASTM standard D2573-08. ASTM International, West Conshohocken, Penn..
3. Boggess, R., and Robertson, P.K. 2010. CPT for soft sediments and deepwater investigations. In Proceedings of CPT10: 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, Calif., 9-11 May 2010.
4. Borel, D., Puech, A., Dendani, H., and Colliat, J.-L. 2005. Deepwater geotechnical site investigation practice in the Gulf of Guinea. In Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG), Perth, Australia, 19-21 September 2005. Taylor & Francis, London. pp. 921-926.
5. Boylan, N., and Long, M. 2006. Characterisation of peat using full flow penetrometers. In Proceedings of the Fourth International Conference on Soft Soil Engineering, Vancouver, B.C., 4-6 October 2006. Edited by D. Chan and K.T. Law. Taylor & Francis, London. pp. 403-414.
6. Cerato, A.B., and Lutenecker, A.J. 2004. Disturbance effects of field vane tests in a varved clay. In Proceedings of the 2nd International Conference on Site Characterisation, Porto, Portugal. Millpress, Rotterdam, the Netherlands. Vol. 1, pp. 861-867.
7. Chung, S.F., and Randolph, M.F. 2004. Penetration resistance in soft clay for different shaped penetrometers. In Proceedings of the 2nd International Conference on Site Characterisation, Porto, Portugal, 19-22 September 2004. Millpress, Rotterdam, the Netherlands. pp. 671-678.
8. Chung, S.F., Randolph, M.F., and Schneider, J.A. 2006. Effect of penetration rate on penetrometer resistance in clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(9): 1188-1196.
9. De Ruiter, J. 1982. The static cone penetration test. State-of-the-art report. In Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II, Amsterdam, 24-27 May 1982. A.Balkema, Rotterdam, the Netherlands. Vol. 2, pp. 389-405.
10. DeJong, J.T., Yafate, N.J., and Randolph, M.F. 2008. Use of pore pressure measurements in a ball full-flow penetrometer. In Proceedings of the 3rd International Conference on Geotechnica and Geophysical Site Characterization, Taipei, Taiwan, 1-4 April 2008. Taylor and Francis, London. pp. 1269-1275.
11. Erbrich, C.T. 2005. Australian frontiers-spudcans on the edge. In Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG), Perth, Australia, 19-21 September 2005. Taylor & Francis, London. pp. 49-74.
12. ISO/CEN. 2007. Geotechnical investigation and testing- field testing part 1: electrical cone and piezocone penetration tests.
13. EN-ISO standard 22476-1. International Standards Organization (ISO) / Comité Européen de Normalisation (CEN), Geneva, Switzerland.

14. ISSMGE. 1999. ISSMGE Technical Committee TC16 ground property characterisation from in situ testing (1999) international reference test procedure (IRTP) for the cone penetration test (CPT) and the cone penetration test with pore pressure (CPTU). In Proceedings of the XIIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, 7-10 June 1999.
15. Balkema, Rotterdam, the Netherlands. pp. 2195-2222. Kelleher, P.J., and Randolph, M.F. 2005. Seabed geotechnical characterisation with the portable remotely operated drill. In Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG), Perth, Australia, 19-21 September 2005. Taylor & Francis, London. pp. 365-371.
16. Kolk, H.J., Hoop, J., and Ims, B.W. 1988. Evaluation of offshore insitu vane test results. In Vane shear strength testing of soils: field and laboratory studies. ASTM STP 1014. Edited by A.F. Richard. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa. pp. 339-353.
17. La Rochelle, P., Roy, M., and Tavenas, F. 1973. Field measurements of cohesion in Champlain clays. In Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 6-11 August 1973. Strojizdat, CIS, Moscow. Vol. 1, pp. 229-236.
18. Lehane, B.M., O'Loughlin, C.D., Gaudin, C., and Randolph, M.F. 2009. Rate effects on penetrometer resistance in kaolin. *Géotechnique*, 59(1): 41-52.
19. Low, H.E., and Randolph, M.F. 2010. Strength measurement for near-seabed surface soft soil using manually operated miniature full-flow penetrometer. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(11): 1565-1573.
20. Low, H.E., Randolph, M.F., and Kelleher, P. 2007. Comparison of pore pressure generation and dissipation rates from cone and ball penetrometers. In Proceedings of the 6th International Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference: Confronting New Challenges and Sharing Knowledge, London, 11-13 September 2007. Society for Underwater Technology, London. pp. 547-556.
21. Low, H.E., Randolph, M.F., DeJong, J.T., and Yafate, N.J. 2008a. Variable rate full-flow penetration tests in intact and remoulded soil. In Proceedings of the 3rd International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Taipei, Taiwan, 1-4 April 2008. Taylor and Francis, London. pp. 1087-1092.
22. Low, H.E., Randolph, M.F., Rutherford, C., Bernie, B.B., and Brooks, J.M. 2008b. Characterisation of near seabed surface sediment. In Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Tex., 5-8 May 2008. Offshore Technology Conference, Richardson, Tex. Paper OTC 19149.
23. Low, H.E., Lunne, T., Andersen, K.H., Sjursen, M.A., Li, X., and Randolph, M.F. 2010. Estimation of intact and remoulded undrained shear strengths from penetration tests in soft clays. *Géotechnique*, 60(11): 843-859.
24. Low, H.E., Randolph, M.F., Lunne, T., Andersen, K.H., and Sjursen, M.A. 2011. Effect of soil characteristics on relative values of piezcone, T-bar and ball penetration resistances. *Géotechnique*. (Posted online ahead of print 25 January 2011.) doi:10.1680/geot. 9.P.018.
25. Lunne, T. 2001. In situ testing in offshore geotechnical investigation. In Proceedings of the International Conference on In Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia, 21-24 May 2001. Edited by P.P. Rahardjo and T. Lunne. Parahyangan Catholic University, Bandung, Indonesia. pp. 61-81.
26. Lunne, T., and Andersen, K.H. 2007. Soft clay shear strength parameters for deepwater geotechnical design. In Proceedings of the 6th International Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference: Confronting New Challenges and Sharing Knowledge, London, 11-13 September 2007. Society for Underwater Technology, London. pp. 151-176.
27. Lunne, T., Eidsmoen, T., Gillespie, D., and Howland, J.D. 1986. Laboratory and field evaluation of cone

- penetrometers. In *Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Proceedings of In Situ '86*, Blacksburg, Va., 23–25 June 1986. GSP 6. Edited by S.P. Clemence. American Society of Civil Engineers, New York. pp. 714–729.
28. Lunne, T., Robertson, P.K., and Powell, J.J.M. 1997. *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Blackie Academic and Professional, London.
  29. Meunier, J., Sultan, N., Jegou, P., and Harmegnies, F. 2004. First tests of Penfeld: a new seabed penetrometer. In *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE 2004)*, Toulon, France, 23–28 May 2004. International Society of Offshore and Polar Engineers, Cupertino, Calif. Vol. 2, pp. 338–345.
  30. Newson, T.A., Bransby, M.F., Brunning, P., and Morrow, D.R. 2004. Determination of undrained shear strength parameters for buried pipeline stability in deltaic soft clays. In *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE 2004)*, Toulon, France, 23–28 May 2004. International Society of Offshore and Polar Engineers, Cupertino, Calif. Vol. 2, pp. 38–43.
  31. Peuchen, J., and Mayne, P.W. 2007. Rate effects in vane shear testing. In *Proceedings of the 6th International Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference: Confronting New Challenges and Sharing Knowledge*, London, 11–13 September 2007. Society for Underwater Technology, London. pp. 187–194.
  32. Peuchen, J., Adrichem, J., and Hefer, P.A. 2005. Practice notes on push-in penetrometers for offshore geotechnical investigation. In *Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG)*, Perth, Australia, 19–21 September 2005. Taylor & Francis, London. pp. 973–979.
  33. Randolph, M.F., and Andersen, K.H. 2006. Numerical analysis of T-bar penetration in soft clay. *International Journal of Geomechanics*, 6(6): 411–420.
  34. Randolph, M.F., Hefer, P.A., Geise, J.M., and Watson, P.G. 1998. Improved seabed strength profiling using T-bar penetrometer. In *Proceedings of the International Conference on Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour - "New Frontiers"*, London, September 1998. Society for Underwater Technology, London. pp. 221–235.
  35. Randolph, M.F., Low, H.E., and Zhou, H. 2007. In situ testing for design of pipeline and anchoring systems. Keynote lecture. In *Proceedings of the 6th International Conference on Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference: Confronting New Challenges and Sharing Knowledge*, London, 11–13 September 2007. Society for Underwater Technology, London. pp. 251–262.
  36. Roy, M., and Leblanc, A. 1988. Factors affecting the measurements and interpretation of the vane strength in soft sensitive clays. In *Vane shear strength testing in soils: field and laboratory studies*. ASTM STP 1014. Edited by A.F. Richard. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Penn. pp. 117–128.
  37. Standards Norway. 2004. Marine soil investigations. NORSOK standard G-001, Rev. 2, October 2004. Standards Norway, Lysaker, Norway.
  38. Watson, P.G. 1999. Performance of skirted foundations for offshore structures. Ph.D. thesis, The University of Western Australia, Crawley, Australia.
  39. Weemee, I., Howie, J., Woeller, D., Sharp, J., Cargill, E., and Greig, J. 2006. Improved techniques for in situ determination of undrained shear strength in soft clays. In *Sea to Sky Geotechnics, Proceedings of the 59th Canadian Geotechnical Conference*, Vancouver, B.C., 1–4 October. BiTech Publishers Ltd., Richmond, B.C. pp. 89–95.
  40. Yafate, N.J., and DeJong, J.T. 2006. Interpretation of sensitivity and remolded undrained shear strength with full flow penetrometers. In *Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, Calif., 28 May – 2 June 2006. International Society of Offshore and Polar

Engineers, Cupertino, Calif. pp. 572–577.

41. Yafraate, N.J., DeJong, J.T., and DeGroot, D.J. 2007. The influence of full-flow penetrometer area ratio on penetration resistance and undrained and remoulded shear strength. In Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference: Confronting New Challenges and Sharing Knowledge. London, 11–13 September 2007. Society for Underwater Technology, London. pp. 461–468.
42. Zhou, H., and Randolph, M.F. 2009a. Resistance of full-flow penetrometers in rate-dependent and strain-softening clay. *Géotechnique*, 59(2): 79–86.
43. Zhou, H., and Randolph, M.F. 2009b. Numerical investigation into cycling of full-flow penetrometers in soft clay. *Géotechnique*, 59(10): 801–812.

蔡国军教授课题组  
WWW.CPTULAB.COM