

团体标准

T/CEATEC XXX—2026

全海深海底沉积物力学性质原位测试 方法

Test method for in-situ mechanical properties of full-ocean-depth seafloor
sediments

(征求意见稿)

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总则 1

 4.1 测试目的 1

 4.2 测试条件 1

 4.3 测试精度 2

 4.4 测试深度 2

5 测试仪器设备 2

 5.1 一般要求 2

 5.2 核心测试仪器 2

 5.3 辅助设备 2

 5.4 仪器设备校准 2

6 原位测试作业流程 3

 6.1 作业准备 3

 6.2 仪器下放与就位 3

 6.3 原位测试操作 3

 6.4 仪器回收 4

 6.5 现场记录 4

7 数据处理与结果判定 4

 7.1 一般要求 4

 7.2 静力触探数据处理 4

 7.3 十字板剪切数据处理 5

 7.4 全流动贯入数据处理 6

 7.5 测试报告 6

8 质量控制与安全要求 6

 8.1 质量控制 7

 8.2 安全要求 7

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

全海深海底沉积物力学性质原位测试方法

1 范围

本文件规定了全海深海底沉积物力学性质原位测试的总则、测试仪器设备、原位测试作业流程、数据处理与结果判定、质量控制与安全要求。

本文件适用于全海深海域海底沉积物静力触探、十字板剪切、全流动贯入等力学性质的原位测试作业。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 42629.4 国际海底区域和公海环境调查规程 第4部分：海洋沉积物物理特性调查

HG/T 20716 海洋静力触探测试技术规程

3 术语和定义

GB/T 42629.4界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

全海深 full-ocean-depth

水深范围覆盖 0m~11000m 的海域，包含浅海、深海、超深渊海域。

3.2

海底沉积物 seafloor sediments

覆盖于海底表面及浅层的松散碎屑物质，包括黏土、粉砂、细砂、砾砂等类型。

3.3

原位测试 in-situ test

在海底原始应力状态下，对沉积物力学性质进行直接测试的方法，无需取样搬运，减少土体扰动。

4 总则

4.1 测试目的

获取全海深海底沉积物原位力学参数，包括锥尖阻力、侧壁摩阻力、不排水抗剪强度、贯入阻力等，为深海工程建设、矿产资源开发、地质灾害防治等提供基础数据支撑。

4.2 测试条件

4.2.1 海况条件

作业海域浪高 $\leq 2.0\text{m}$ ，风速 $\leq 15\text{m/s}$ ，能见度 $\geq 500\text{m}$ ，无暴雨、台风等恶劣天气。

4.2.2 水深条件

适用水深 0m~11000m, 超深渊海域(水深>6000m)应采用专用耐压测试设备。

4.2.3 底质条件

测试区域海底地形坡度 $\leq 15^\circ$, 无明显礁石、杂物遮挡, 沉积物厚度 ≥ 2.0 m。

4.3 测试精度

力学参数测试相对误差应满足: 锥尖阻力 $\leq \pm 5\%$, 侧壁摩阻力 $\leq \pm 8\%$, 不排水抗剪强度 $\leq \pm 10\%$ 。

4.4 测试深度

常规测试深度为海底表面以下 0m~5.0m, 根据工程需求可加深至 10.0m, 超深渊海域测试深度不宜超过 3.0m。

5 测试仪器设备

5.1 一般要求

5.1.1 仪器设备应满足全海深耐压、耐腐蚀、高灵敏度要求, 工作电压稳定, 数据传输可靠。

5.1.2 所有仪器设备应经法定计量机构校准合格, 校准周期 ≤ 12 个月, 超期未校准设备严禁使用。

5.1.3 超深渊海域使用的设备, 耐压等级应 ≥ 110 MPa, 材质宜选用 316 不锈钢或钛合金。

5.2 核心测试仪器

5.2.1 静力触探仪(CPT)

应满足下列要求:

a) 探头规格: 锥角 60° , 锥底面积 10cm^2 , 侧壁摩擦筒表面积 150cm^2 ;

b) 技术参数: 贯入速率 $1.2\text{m}/\text{min} \pm 0.1\text{m}/\text{min}$, 量程 $0\text{kN} \sim 100\text{kN}$, 分辨率 0.01kN , 耐压 ≥ 110 MPa;

c) 组成部分: 探头、探杆、贯入驱动装置、数据采集系统、耐压密封舱。

5.2.2 十字板剪切仪(VST)

应满足下列要求:

a) 探头规格: 十字板直径 50mm, 高 100mm, 板厚 2mm;

b) 技术参数: 旋转速率 $0.1^\circ/\text{s} \sim 0.5^\circ/\text{s}$, 扭矩量程 $0\text{N}\cdot\text{m} \sim 50\text{N}\cdot\text{m}$, 分辨率 $0.01\text{N}\cdot\text{m}$, 耐压 ≥ 110 MPa;

c) 组成部分: 十字板探头、钻杆、旋转驱动装置、扭矩传感器、数据记录仪。

5.2.3 全流动贯入仪(FFP)

应满足下列要求:

a) 探头规格: 球形探头直径 30mm~50mm, 圆柱探头直径 40mm;

b) 技术参数: 贯入速率 $0.5\text{m}/\text{min} \sim 2.0\text{m}/\text{min}$, 阻力量程 $0\text{kN} \sim 50\text{kN}$, 分辨率 0.01kN , 耐压 ≥ 110 MPa;

c) 组成部分: 球形/圆柱探头、导杆、液压驱动单元、压力传感器、数据传输模块。

5.3 辅助设备

应满足下列要求:

a) 深海着陆器: 搭载测试仪器, 具备海底稳定支撑、姿态调节功能, 承重 $\geq 500\text{kg}$, 耐压 ≥ 110 MPa;

b) 水下定位系统: 定位精度 $\leq 1.0\text{m}$, 水深测量精度 $\leq \pm 0.1\text{m}$;

c) 数据传输系统: 水下无线传输距离 $\geq 1000\text{m}$, 数据传输速率 $\geq 1\text{Mbps}$;

d) 供电系统: 锂电池组, 连续工作时间 $\geq 72\text{h}$, 工作电压 $24\text{V} \pm 5\%$;

e) 监控系统: 高清摄像头, 分辨率 $\geq 1080\text{P}$, 水下可视距离 $\geq 5\text{m}$, 实时传输画面。

5.4 仪器设备校准

5.4.1 静力触探仪

采用标准砝码校准锥尖阻力、侧壁摩阻力, 校准点不少于 5 个, 线性相关系数 ≥ 0.999 。

5.4.2 十字板剪切仪

采用标准扭矩砝码校准扭矩传感器, 校准点不少于 5 个, 相对误差 $\leq \pm 0.5\%$ 。

5.4.3 全流动贯入仪

采用标准压力块校准贯入阻力，校准点不少于 5 个，线性相关系数 ≥ 0.999 。

5.4.4 校准记录

详细记录校准日期、环境条件、校准数据、校准结果，校准报告存档备查。

6 原位测试作业流程

6.1 作业准备

6.1.1 技术准备

应按下列规定进行：

- a) 收集作业海域水深、地形、底质类型、海洋水文等基础资料，编制测试方案；
- b) 根据测试方案确定测试点位，点位间距 $\geq 50\text{m}$ ，每个测试区域不少于 3 个测试点位；
- c) 对作业人员进行技术培训，考核合格后方可上岗，熟悉仪器操作、数据记录、应急处置流程。

6.1.2 设备准备

应按下列规定进行：

- a) 检查所有仪器设备外观完好性，无破损、变形、锈蚀，密封部件无渗漏；
- b) 测试仪器通电调试，检查传感器灵敏度、数据采集系统稳定性、监控系统清晰度；
- c) 辅助设备功能测试，包括着陆器姿态调节、定位系统精度、数据传输稳定性、供电系统续航能力；
- d) 按要求组装测试仪器，连接探杆、传感器、数据传输线，确保连接牢固、密封可靠。

6.1.3 现场准备

应按下列规定进行：

- a) 作业船舶到达指定海域，抛锚定位，船位偏差 $\leq 5.0\text{m}$ ；
- b) 清理作业区域海面杂物，布置安全警示标志，禁止无关船只进入作业区域；
- c) 搭建临时作业平台，放置仪器设备、工具、记录表格，确保平台稳固、干燥。

6.2 仪器下放与就位

6.2.1 采用作业船舶吊机将搭载测试仪器的深海着陆器缓慢下放，下放速率 $\leq 1.0\text{m/s}$ ，避免仪器晃动、碰撞。

6.2.2 下放过程中，通过水下定位系统实时监测着陆器位置、深度，通过监控系统观察仪器状态、海底环境。

6.2.3 着陆器到达海底后，静置 $5\text{min} \sim 10\text{min}$ ，待姿态稳定后，调节支撑脚，确保着陆器水平，倾斜角度 $\leq 2^\circ$ 。

6.2.4 记录着陆器就位深度、位置坐标、姿态角度、海底沉积物表面状态。

6.3 原位测试操作

6.3.1 静力触探试验（CPT）

应按 HG/T 20716 的规定进行，符合下列要求：

- a) 启动贯入驱动装置，将探头以 $1.2\text{m/min} \pm 0.1\text{m/min}$ 的速率匀速压入沉积物，贯入过程中速率波动 $\leq \pm 0.1\text{m/min}$ ；
- b) 数据采集系统实时记录贯入深度、锥尖阻力、侧壁摩阻力、摩阻比，采样频率 $\geq 10\text{Hz}$ ；
- c) 每贯入 0.1m 记录一组数据，直至达到设计测试深度，停止贯入，探头静置 $1\text{min} \sim 2\text{min}$ ；
- d) 缓慢提升探头，提升速率 $\leq 2.0\text{m/min}$ ，提升过程中观察探头状态，无卡阻、变形。

6.3.2 十字板剪切试验（VST）

应按下列规定进行：

- a) 将十字板探头垂直插入沉积物，插入深度至设计深度以上 0.5m ，静置 5min ，使探头与沉积物紧密接触；

b) 启动旋转驱动装置, 以 $0.1^{\circ}/s \sim 0.5^{\circ}/s$ 的速率匀速旋转探头, 旋转角度 $\geq 360^{\circ}$, 直至扭矩达到峰值后稳定或下降;

c) 数据采集系统实时记录旋转角度、扭矩值、测试深度, 采样频率 $\geq 5\text{Hz}$;

d) 测试完成后, 反向旋转探头, 缓慢提升至海底表面, 检查探头无弯曲、变形。

6.3.3 全流动贯入试验 (FFP)

应按下列规定进行:

a) 启动液压驱动单元, 将球形/圆柱探头以 $0.5\text{m}/\text{min} \sim 2.0\text{m}/\text{min}$ 的速率匀速贯入沉积物, 贯入速率保持稳定;

b) 数据采集系统实时记录贯入深度、贯入阻力, 采样频率 $\geq 10\text{Hz}$;

c) 每贯入 0.05m 记录一组数据, 直至达到设计测试深度, 停止贯入, 探头静置 1min ;

d) 匀速提升探头, 提升速率 $\leq 2.0\text{m}/\text{min}$, 提升过程中观察探头状态, 无损坏、卡阻。

6.4 仪器回收

6.4.1 测试完成后, 通过数据传输系统确认测试数据完整、有效, 无丢失、异常。

6.4.2 启动深海着陆器回收装置, 作业船舶吊机匀速提升着陆器, 提升速率 $\leq 1.5\text{m}/\text{s}$, 避免仪器晃动、碰撞。

6.4.3 回收过程中, 通过监控系统实时观察仪器状态、海面情况, 到达海面后, 缓慢将着陆器放置在作业平台上。

6.4.4 拆除仪器连接部件, 检查仪器外观完好性, 清理表面海水、沉积物, 晾干后装箱存放。

6.5 现场记录

6.5.1 记录内容应至少应包括包括作业日期、海域、水深、测试点位坐标、海况条件、仪器型号、校准信息、测试类型、测试深度、原始数据、异常情况及处理措施等。

6.5.2 记录应字迹清晰、内容完整、数据准确, 不得涂改, 如需修改, 应在修改处签字确认。

6.5.3 现场记录完成后, 应经作业负责人审核签字, 存档备查, 电子数据同步备份至存储设备。

7 数据处理与结果判定

7.1 一般要求

7.1.1 数据处理前, 对原始数据进行筛选, 剔除异常数据 (如仪器故障、操作失误、环境干扰导致的突变数据)。

7.1.2 数据处理采用专用软件, 计算过程清晰、可追溯, 参数计算结果保留 2 位小数。

7.1.3 同一测试点位平行测试不少于 2 次, 平行测试数据相对偏差 $\leq 15\%$, 取平均值作为最终结果; 若偏差 $> 15\%$, 应重新测试。

7.2 静力触探数据处理

7.2.1 锥尖阻力 (q_c)

单位面积锥尖所受阻力, 按式 (1) 计算:

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

q_c ——锥尖阻力, 单位为兆帕 (MPa);

Q_c ——锥尖总阻力, 单位为千牛 (kN);

A_c ——锥底截面积, 单位为平方厘米 (cm^2)。

7.2.2 侧壁摩阻力 (f_s)

单位面积侧壁所受摩阻力, 按式 (2) 计算:

$$f_s = \frac{Q_s}{A_s} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

f_s ——侧壁摩阻力, 单位为兆帕 (MPa);

Q_s ——侧壁总摩阻力，单位为千牛（kN）；
 A_s ——侧壁摩擦筒表面积，单位为平方厘米（cm²）。

7.2.3 摩阻比（ R_f ）

侧壁摩阻力与锥尖阻力的比值，按式（3）计算：

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

R_f ——摩阻比，无量纲；
 f_s ——侧壁摩阻力，单位为兆帕（MPa）；
 q_c ——锥尖阻力，单位为兆帕（MPa）。

7.2.4 不排水抗剪强度（ C_u ）

由锥尖阻力换算沉积物不排水抗剪强度，按式（4）计算：

$$C_u = \frac{q_c}{N_c} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

C_u ——不排水抗剪强度，单位为千帕（kPa）；
 q_c ——锥尖阻力，单位为兆帕（MPa）；
 N_c ——锥尖阻力系数，全海深沉积物取 9.5，无量纲。

7.2.5 结果判定

根据锥尖阻力、摩阻比判定沉积物类型，参照表 1 执行。

表 1 静力触探试验沉积物类型判定表

沉积物类型	锥尖阻力 q_c （MPa）	摩阻比 R_f （%）
淤泥质黏土	<0.5	1.5~3.0
黏土	0.5~1.5	1.0~2.5
粉砂	1.5~5.0	0.5~1.5
细砂	5.0~10.0	0.3~1.0
中粗砂	>10.0	>0.5

7.3 十字板剪切数据处理

7.3.1 不排水抗剪强度（ C_u ）

由峰值扭矩计算沉积物不排水抗剪强度，按式（5）计算：

$$C_u = \frac{2M_{max}}{\pi D^2 \left(H + \frac{D}{3} \right)} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

C_u ——不排水抗剪强度，单位为千帕（kPa）；
 M_{max} ——峰值扭矩，单位为牛米（N·m）；
 D ——十字板直径，单位为米（m）；
 H ——十字板高度，单位为米（m）。

7.3.2 残余抗剪强度（ C_r ）

由残余扭矩计算沉积物残余抗剪强度，按式（6）计算：

$$C_r = \frac{2M_r}{\pi D^2 \left(H + \frac{D}{3} \right)} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

C_r ——残余抗剪强度，单位为千帕（kPa）；
 M_r ——残余扭矩，单位为牛米（N·m）；
 D ——十字板直径，单位为米（m）；
 H ——十字板高度，单位为米（m）。

7.3.3 灵敏度（ S_t ）

不排水抗剪强度与残余抗剪强度的比值，按式（7）计算：

$$S_t=\frac{C_u}{C_r}$$

.....（7）

式中：
 S_t ——沉积物灵敏度，无量纲；
 C_u ——不排水抗剪强度，单位为千帕（kPa）；
 C_r ——残余抗剪强度，单位为千帕（kPa）。

7.3.4 结果判定

依据不排水抗剪强度划分沉积物强度等级及状态，按表 2 执行。

表 2 十字板剪切试验沉积物强度等级判定表

强度等级	不排水抗剪强度 c_u （kPa）	沉积物状态
极软	<10	流塑状态
软	10~25	软塑状态
中等	25~50	可塑状态
硬	50~100	硬塑状态
极硬	>100	坚硬状态

7.4 全流动贯入数据处理

7.4.1 贯入阻力（ q ）

单位面积探头所受阻力，按式（8）计算：

$$q=\frac{F}{A}$$

.....（8）

式中：
 q ——贯入阻力，单位为兆帕（MPa）；
 F ——探头总贯入阻力，单位为千牛（kN）；
 A ——探头投影面积，单位为平方厘米（cm²）。

7.4.2 不排水抗剪强度（ C_u ）

由贯入阻力换算沉积物不排水抗剪强度，按式（9）计算：

$$C_u=\frac{q}{N_q}$$

.....（9）

式中：
 C_u ——不排水抗剪强度，单位为千帕（kPa）；
 q ——贯入阻力，单位为兆帕（MPa）；
 N_q ——贯入阻力系数，球形探头取 11.1，无量纲。

7.4.3 结果判定

依据贯入阻力划分沉积物密实度等级，按表 3 执行。

表 3 全流动贯入试验沉积物密实度判定表

密实度等级	贯入阻力 q （MPa）	沉积物状态
松散	<1.0	松散状态
稍密	1.0~3.0	稍密状态
中密	3.0~6.0	中密状态
密实	6.0~10.0	密实状态
极密实	>10.0	极密实状态

7.5 测试报告

- 7.5.1 测试完成后，7 个工作日内编制完成原位测试报告，报告内容完整、数据准确、结论明确。
- 7.5.2 报告内容包括项目概况、测试依据、测试海域概况、仪器设备、作业流程、数据处理方法、测试结果、结论与建议、附录（原始记录、校准报告、图表）等。

8 质量控制与安全要求

8.1 质量控制

- 8.1.1 建立质量责任制，明确作业负责人、技术人员、操作人员、记录人员的质量职责，全程质量监督。
- 8.1.2 仪器设备严格执行校准、维护、保养制度，定期检查、调试，确保设备性能稳定，数据可靠。
- 8.1.3 作业人员必须经专业培训、考核合格，熟悉标准要求、仪器操作、数据处理，严禁无证上岗。
- 8.1.4 测试过程严格执行本文件规定的作业流程，每道工序专人检查，发现问题立即整改，严禁违规操作。
- 8.1.5 数据处理实行双人复核制，复核人员独立计算、核对，确保数据准确、结果可靠，复核记录存档。
- 8.1.6 定期开展质量抽查，抽查比例不少于 20%，对抽查中发现的问题，及时分析原因，制定整改措施，跟踪落实。

8.2 安全要求

- 8.2.1 作业前开展安全技术交底，明确安全风险、防护措施、应急处置预案，作业人员签字确认。
 - 8.2.2 作业人员必须穿戴救生衣、防滑鞋、安全帽等防护用品，严禁酒后作业、违规操作。
 - 8.2.3 作业船舶严格执行海上航行安全规定，配备足够的救生设备、消防器材、应急通讯设备，定期检查，确保完好。
 - 8.2.4 仪器下放、回收过程中，统一指挥，专人操作，严禁站在吊物下方，避免坠物伤人。
 - 8.2.5 用电设备严格执行用电安全规定，接地可靠，防水防潮，严禁私拉乱接电线，避免触电事故。
 - 8.2.6 遇暴雨、台风、大浪等恶劣天气，立即停止作业，撤离现场人员，仪器设备固定牢固，确保安全。
-