** T/CECS G：XXXX-2025**

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

**自落式动力触探仪测试标准**

Code for Free-Fall Penetration Tests

（征求意见稿）

**2025-XX-XX 发布 2025- XX-XX 实施**

发布

中国工程建设标准化协会

**前 言**

本规范在系统总结国内外相关自落式动力触探仪测试研究成果和工程经验的基础上编制而成。

本规范按照《》的规则编写,共分为8章，主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、仪器设备、探头标定、现场测试、数据处理和成果报告。

本规范的某些内容可能涉及专利,本规范的发布机构不承担识别专利的责任。

本规范由安徽建筑大学提出，受中国工程建设标准化协会委托，由其负责具体解释工作。请有关单位将实施中发现的问题和建议，反馈至安徽建筑大学（主编单位）（地址：安徽省合肥市蜀山区紫云路292号，联系方式：13913911288，电子邮箱： focuscai@163.com）,供修订时参考。

**主编单位：** 安徽建筑大学

**参编单位：**东南大学

中交第四航务工程勘察设计院有限公司

磐索地勘科技（广州）有限公司

福建省水利水电勘测设计研究院有限公司

中国海洋大学

温岭南光地质仪器有限公司

华设设计集团股份有限公司

安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司

安徽省交控建设管理有限公司

江苏开放大学

太原理工大学

南京智探岩土科技有限公司

中国矿业大学

温州大学

福建省三川海上风电有限公司

**主要起草人：** 蔡国军、何欢、周瑞先、乔欢欢、黄斌彩、陈偲、刘涛、张宁、蔡毅、殷帅、聂利青、闫超、刘松玉、张民生、林军、荣琦、赵泽宁、祝刘文、杜宇、陈奇、徐春明、刘薛宁、张胜、吴磊磊、段海澎、段伟、刘路路、刘晓燕、王军、张艳、张金光、蔡烨、黄习习、陈瑞锋

**主要审查人：**

**目 次**

1 总则 1

2 术语和符号 2

 2.1 术语 2

 2.2 符号 2

3 基本规定 5

4 仪器设备 6

 4.1 仪器组成 6

 4.2 探头 6

 4.3 控制舱 8

 4.4 配重 9

 4.5 探杆 9

5 探头标定 10

 5.1 一般规定 10

 5.2 标定要求 10

 5.3 标定结果 11

6 现场测试 14

 6.1 一般规定 14

 6.2 测试准备 14

 6.3 测试工作 15

 6.4 安全要求 15

7数据处理 17

 7.1 一般规定 17

 7.2 数据处理 17

8 成果报告 21

 8.1 一般规定 21

 8.2 土的物理力学指标 21

1 总则

**1.0.1** 为提高水域浅层软弱土勘查技术水平，满足自落式动力触探技术应用需要，制定本规程。

条文说明

自落式动力触探技术（FFP）作为一种新型的便携式动力触探装备，测试时无需大型船舶作业平台和贯入设备，操作轻便灵活，可较准确地获得江河湖海等水底浅层土体（通常<20m）的原位特性参数，有效缩短勘察时间、降低勘察成本，受到国内外学者的广泛关注。

本规程基于多年来自落式动力触探技术测试研究成果，并总结国内、外已有工程应用成果，统一自落式动力触探技术规格、测试方法，测试参数、资料整理和分析方法，以提高我国自落式动力触探技术应用水平。

**1.0.2** 本标准适用于江河湖海等水底浅层饱和软土、黏性土及沿海滩涂超软土等软弱土的自落式动力触探测试。

**1.0.3** 自落式动力触探试验应用于缺乏地区经验的复杂地层时，应与传统静力触探试验和原位取样室内试验等其他岩土工程勘察方法配合使用。

条文说明

岩土体具有区域性和变异性的特点。现有设计和计算方法主要基于钻探取样获得室内土工试验参数进行，故将自落式动力触探试验应用于工程设计时，需积累经验，或者与其他（如静力触探试验和十字板剪切试验）试验方法配合使用。

**1.0.4** 自落式动力触探试验除应符合本规程外，尚应符合有关法律、法规及国家现行有关标准、规范的规定。

2 术语和符号

**2.1 术 语**

**2.1.1** 自落式动力触探试验 free fall penetration test

一种土体原位测试技术，测试时将一定规格的自落式动力触探探头通过自由落体贯入土层中，同时测量贯入过程中探头受到的锥尖阻力和孔隙水压力。

**2.1.2** 自落式动力触探仪 free fall penetrometer

用于自落式动力触探测试的仪器。

**2.1.3** 净锥尖阻力 net penetration resistance

基于有效面积比和上覆土压力修正后的锥尖阻力。

**2.2 符 号**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *A*p | —— | 探头竖向投影面积； |
|  | —— | 有效面积比； |
|  | —— | 贯入过程中t时刻记录的加速度，m/s2； |
| *FS* | —— | 在额定荷载下，探头及仪表的满量程输出值； |
|  | —— | 重力加速度，m/s²； |
| *K* | —— | 标定系数； |
| *m* | —— | 荷载分级数； |
| *N*k | —— | 承载力系数； |
| *p*i | —— | 第i级荷载值（kN）； |
|  | —— | 实测的动态锥尖阻力，kPa； |
|  | —— | 实测锥尖阻力，kPa； |
|  | —— | 净锥尖阻力，MPa； |
|  | —— | 参考应变率下的锥尖阻力，kPa； |
|  | —— | 孔压修正后的锥尖阻力，kPa； |
|  | —— | 应变率系数； |
|  | —— | 不排水抗剪强度，kPa； |
|  | —— | 初始位移，m； |
|  | —— | 贯入过程中*t*时刻的贯入深度，m； |
|  | —— | 为在锥肩位置量测的孔隙水压力，kPa； |
|  | —— | 贯入过程中t时刻记录的水压，kPa； |
|  | —— | 初始速度，m/s； |
|  | —— | 卸荷归零时仪表的平均不归零值； |
|  | —— | 最佳直线上对应第i级荷载的仪表输出值； |
|  | —— | 第i级荷载下传感器的平均输出值； |
|  | —— | 加荷至第i级荷载时传感器的平均输出值； |
|  | —— | 卸荷至第i级荷载时传感器的平均输出值； |
|  | —— | 仪表的最小分度值； |
|  | —— | 重复加荷（或卸荷）至第i级荷载时仪表输出值的极差； |
|  | —— | 某深度 d 的测试值； |
|  | —— | 以测试零点为基准的某深度 d 的测试值； |
|  | —— | 测试零点的测试值； |
|  | —— | 起始感量； |
|  | —— | 第i层土的厚度，m； |
|  | —— | 第i层土的重度，g/cm3 |
|  | —— | FFP测试时的应变率，cm/s； |
|  | —— | 参考应变率，取2cm/s； |
|  | —— | 非线性误差； |
|  | —— | 重复性误差； |
|  | —— | 滞后误差； |
|  | —— | 归零误差； |
|  | —— | 修正系数； |
|  | —— | 水的密度，g/cm³； |
|  | —— | 总的竖向上覆土应力（kPa）； |
|  | —— | 有效内摩擦角，°； |

3 基本规定

**3.0.1** 自落式动力触探测试系统应包括自落式触探仪、测试船舶和吊放回收系统。

**3.0.2** 探头应定期校验和维护，不得使用未经标定或超出标定期限的探头。

**3.0.3** 自落式动力触探测试应根据工程特点和要求，选择具有代表性的点位。

4 仪器设备

**4.1 仪器组成**

**4.1.1** 自落式触探仪包括以下组成部分：探头、控制舱、配重、探杆和吊环，如图4.1.1所示。

1.吊环

2.控制舱

3.配重

4.探杆

5.探头

图4.1.1 自落式触探仪基本结构

**4.2 探 头**

**4.2.1** 探头应满足下列要求：

**1** 应配备锥尖阻力传感器、孔隙水压力传感器。

**2**  探头耐压应大于应用水深对应压力的1.25倍。

**3** 探头连接的水密线缆具有可插拔性且耐压大于实际水深的1.25倍。

**4** 宜配备水土界面识别模块。

条文说明

水土界面识别模块是采用感光传感器，协助数据处理过程中，准确判断探头贯入土体的位置和时刻。

**4.2.2** 锥尖阻力传感器应满足下列要求：

**1**  锥底截面积为10 cm²或15 cm²，锥尖角度为60°。

**2** 量程需大于设备自身重量产生的压力且低于3 MPa，且大于测试水深产生的压力，综合分辨率不小于5‰ *FS*。

**4.2.3** 孔隙水压力传感器应满足下列要求：

**1** 量程需大于测试水深产生的压力，综合分辨率不小于3‰ *FS*。

**2** 透水石孔隙率应在50～80 μm。

**4.2.4** 探头的性能指标应符合下列规定：

**1** 探头阻力传感器精度应满足表4.2.4-1的要求。

表4.2.4-1 传感器精度

|  |  |
| --- | --- |
| 误差类型 | 精度要求 |
| 非线性误差 | ≤1.0%*FS* |
| 重复性误差 | ≤1.0%*FS* |
| 滞后误差 | ≤1.0%*FS* |
| 归零误差 | ≤1.0%*FS* |

条文说明

探头的关键部件是传感器。非线性误差是影响探头测试精度的主要因素之一。我国规定探头的非线性误差小于满量程的l % ，否则为不合格探头。非线性误差的大小主要与传感器空心柱的材质有关。有些探头加荷时与卸荷时的非线性误差有较大区别，因此，探头的非线性误差要在加荷与卸荷两种情况下进行检验，都需要满足非线性误差的要求。探头的重复性误差及归零误差均影响探头的测试精度，其误差大小主要与传感器空心柱的材质、应变片及贴片质量的好坏等有关。这两种误差均需要小于满量程的1 % ，在检验时排除仪器本身的误差影响，一般是用线性好、归零及重复性误差小的探头先校核仪器，确认仪器正常后再去检验探头归零误差及重复性误差的大小。

**2** 探头绝缘电阻应满足表4.2.4-2的要求。

表4.2.4-2 探头绝缘电阻

|  |  |
| --- | --- |
| 绝缘电阻 | 性能指标 |
| 出厂时的绝缘电阻 | ≥ 200 MΩ |
| 2MPa水压下6h耐压测试的绝缘电阻 | ≥ 200 MΩ |
| 现场测试时的绝缘电阻 | ≥ 50 MΩ |

条文说明

探头的绝缘度是指应变片电阻丝及外接引线与探头金属件之间的绝缘电阻。探头出厂时的绝缘电阻需要大于200 MΩ，探头使用后绝缘电阻衰减是允许的，但不能低于50 MΩ，绝缘电阻的主要影响因素是探头的密封质量，密封效果不好，会使探头内部传感器受潮，从而降低其绝缘电阻；其次是受贴片胶、贴片、外接引线等质量的影响，如贴片胶本身质量差、贴片时胶层太薄、引线本身绝缘不好等。

**3** 传感器温度敏感性能不应大于0.05 %*FS*/℃。

**4.2.5** 水土界面识别模块应满足下列要求：

**1** 应具备准确识别探头初始贯入沉积物物时间节点的能力。

**2** 识别精度换算为深度后误差应控制在5 cm以内。

**4.3 控制舱**

**4.3.1** 控制舱应配备数据记录与通讯模块、贯入深度测量模块及电源，且应满足下列要求：

**1** 采用径向密封，且抗压能力需大于实际工作水深的1.25倍。

**2** 应配置外部开关以避免多次打开控制舱造成舱内漏水。

**4.3.2** 数据记录与通讯模块应满足下列要求：

**1**  通道数应满足传感器个数需求，且具备同步采集功能。

**2** 采样精度需大于16位，采样率不小于200 Hz。

**3** 数据采集模块应具备自容式数据采集能力，依据工作场景可采用无线或有线通讯方式与外界通讯。

**4.3.3** 贯入深度测量模块应包含三轴加速度传感器及水压传感器，并满足下列要求：

**1** 应用于陆地测量时应采用加速度传感器记录并计算贯入深度，应用于海洋沉积物测量时可采用加速度传感器或压力水压传感器记录并计算记录深度。

**2** 加速度传感器应安装在采集舱内，且水平条件下z轴的倾斜度小于5°。

**3**  加速度传感器量程不小于8 g，分辨率不小于10 mg。

**4** 水压传感器应安装在舱盖上或舱底部。

**5**  水压传感器量程需大于工作水深的1.25倍，且综合分辨率不小于1‰ *FS*。

**4.3.4** 电源持续供电时长应大于24小时，且具备充电功能。

**4.4 配 重**

设备配重采用模块化设计，每块配重的质量10 kg～35 kg，以便于安装，且配重安装架至少分2节，以便调整配重数量。

**4.5 探 杆**

**4.5.1** 探杆的尺寸应略小于探头，且内部中空，可容纳探头和控制仓之间的线缆。

**4.5.2** 探杆长度应根据测试需求确定，宜采用拼接方式。

5 探头标定

**5.1 一般规定**

**5.1.1** 标定力传感器的测力计应满足精度要求，其量程应与力传感器量程相匹配。

**5.1.2**  标定时压力作用线应与探头中心线重合。

**5.1.3** 标定有效期不应超过180 d。探头使用期间数据出现异常时应重新标定。

**5.2 标定要求**

**5.2.1** 标定时，其环境温度应满足下列要求：

**1** 与作业环境的温差不宜大于20 ˚C。

**2** 将探头放入起始温度宜为20 ˚C的烘箱内，进行力传感器温度漂移检验。以5 ˚C为温度增量，逐级加热至45 ˚C，并在各级温度下稳定24 h。

**3** 传感器每10 ˚C的温度漂移值，不应大于额定荷载下仪表量程输出值的0.5 %。

条文说明

自落式动力触探测试所用的各种传感器大多是电阻应变式的，因此温度的变化会产生电阻值的变化，进而产生零点漂移。导致温度变化的原因，一是标定时的环境温度与地下温度的差异，二是量测时应变片通电发热，三是贯入过程中与土摩擦发热，因此，可采用温度补偿应变片来补偿温度变化对应变量测的影响。通过温度补偿可将零点漂移限制在满量程的0.05 ％以内，并可在标定时确定温度对读数的影响系数，从而在贯入测试时进行温度修正；操作中，也可在正式试验前将探头在地下1 m处放置30 min，使探头温度与地下温度平衡，再调节仪器的初始零点。针对温度异常测试，比如环境温度高于45 ˚C或者低于0 ˚C，要求厂家提供探头的温度漂移曲线。

**5.2.2** 标定应按下列步骤进行：

**1** 将连接探头的仪表调零。

**2** 将配套的测试仪器与探头相连，并一同检验。

**3** 根据力传感器量程确定最大加载量，进行满负荷加卸载不少于3次，待测量读数归零，方可标定。

**4** 探头应逐级加载和卸载，荷载分级宜为探头最大加载量的1/10，每次标定的加载、卸载循环次数不应少于3次。

**5** 在各级标定荷载作用下，待读数稳定后记录各级加载、卸载时传感器的输出值。

**5.3 标定结果**

**5.3.1** 标定系数应按下列步骤计算：

**1** 分别计算同级荷载下，各级加载、卸载的平均输出值。

**2** 绘制荷载与输出值的关系曲线。

**3**  标定系数*K*按式（5.3.1-1）计算：

  （5.3.1-1）

式中： *K* —— 标定系数；

*m* —— 荷载分级数；

*p*i —— 第*i*级荷载值（kN）；

*A*p—— 探头竖向投影面积（m2）；

—— 第*i*级荷载下仪表的平均输出值，第i级荷载下仪表的平均输出值按式（5.3.1-2）计算：

  （5.3.1-2）

式中： —— 加荷至第*i*级荷载时仪表的平均输出值；

—— 卸荷至第*i*级荷载时仪表的平均输出值。

**5.3.2** 检测误差确定应符合下列规定：

**1**  检测误差包括非线性误差、重复性误差、滞后误差、归零误差，如图5.3.2所示。



图5.3.2 标定曲线及其误差组成

**2** 最佳直线为经过原点、斜率为*K*的直线。

**3** 参照线为经过原点、斜率为1的直线。

**4** 非线性误差按式（5.3.2-1）计算：

  （5.3.2-1）

式中：—— 非线性误差；

—— 加荷或卸荷至第*i*级荷载时仪表的平均输出值；

—— 最佳直线上对应第*i*级荷载的仪表输出值；

—— 在额定荷载下仪表的满量程输出值。

**5** 重复性误差按式（5.3.2-2）计算：

  （5.3.2-2）

式中： —— 重复性误差；

—— 重复加荷（或卸荷）至第*i*级荷载时仪表输出值的极差；

—— 在额定荷载下仪表的满量程输出值。

**6** 滞后误差按式（5.3.2-3）计算：

  （5.3.2-3）

式中： —— 滞后误差；

—— 加荷第*i*级荷载时仪表的平均输出值；

—— 卸荷第*i*级荷载时仪表的平均输出值；

—— 在额定荷载下仪表的满量程输出值。

**7** 归零误差按式（5.3.2-4）计算：

  （5.3.2-4）

式中： —— 归零误差；

—— 卸荷归零时仪表的平均不归零值；

—— 在额定荷载下仪表的满量程输出值。

**8** 标定后的误差应满足本规程表4.3.3-1的要求。

**5.3.3** 起始感量按式（5.3.3）计算：

  （5.3.3）

式中：—— 起始感量；

—— 探头的标定系数，按本规程式（5.3.1-1）计算；

—— 仪表的最小分度值。

**5.3.4** 探头的起始感量应小于或等于2 kPa。

条文说明

当探头起始感量值超过规定数值时，要提高探头的拱桥电压并进行重新标定和计算。

6 现场测试

**6.1 一般规定**

**6.1.1** 测试点位、高程和深度等应满足工程设计要求，并应符合下列规定：

**1**  两个自落式动力触探测试点之间的间距不应小于1 m。

**2**  自落式动力触探测试点与已完成工程钻孔的距离应至少为钻孔直径的20倍，且不小于2 m。

条文说明

室内模型试验证明，30倍探头直径以外的边界条件对测试结果的影响可以忽略。考虑到自落式动力触探测试时探杆倾斜的影响，自落式动力触探测试孔一般至少距其他勘探孔20倍孔径，且不小于2 m；自落式动力触探测试宜在钻孔前进行，以免钻孔对贯入阻力产生影响。

**6.1.2** 现场测试作业安全应符合《岩土工程勘察安全标准》（GB/T 50585）的有关规定。

**6.1.3** 现场测试作业前，应收集下列资料：

**1** 作业区地形、地质、水文和气象等资料。

**2** 作业区及附近电缆、光缆、油气等管线，以及沉船等障碍物分布情况。

**6.2 测试准备**

**6.2.1** 测试作业前，应对探头、数据无线传输及电量进行检查，保证数据通讯、探头、传感器工作正常。

**6.2.2** 应配备自落式仪器的吊放和回收装置，总起吊力应不小于自落式仪器总重量的4倍。

**6.2.3** 应用于海洋沉积物测量时，应将起吊装置固定在作业船舶上，并满足下列要求：

**1** 作业船舶应准确锚泊定位于测试点位，以满足测试作业与安全的要求。

**2**  起吊高度应大于触探仪总长。

**3** 起吊装置应能延伸至船身1m以外，以保证触探仪自由释放。

**4** 起吊装置应配备触探仪固定装置，以避免风、浪和船舶移动造成触探仪碰撞船身。

**5** 起吊装置线缆长度应大于测试深度需求，且抗拉能力应不小于自落式仪器总重量的4倍。

**6.2.4** 测试作业前，应对探头进行抽真空饱和，抽真空时间应不小于10分钟。

**6.3 测试工作**

**6.3.1** 达到设计贯入深度，或测试作业过程中出现下列情况之一时，应停止测试作业：

**1** 密封元件出现破损、裂痕及过度挤压。

**2** 水密插头出现永久性变形且影响密封效果。

**3** 水密电缆出现破损，导致耐压性降低。

**4** 孔隙水压力探头的过滤片凹陷或透水功能失效。

**6.3.2** 测试作业完成后，自落式触探仪回收应符合下列规定：

**1** 检查触探仪各部件是否完好，并对触探仪进行清理。

**2** 读取零点读数，并将此次零点读数与初始零点读数进行对比。

**3** 对触探仪进行充电，以保证下次测试正常使用。

**6.4 安全要求**

**6.4.1** 人员安全应符合下列规定：

**1** 设备的运输、安装和操作，应由专人负责。

**2** 水上作业应遵守船舶规章。

**3** 作业人员在操作、维修和维护之前应熟悉设备的操作手册。

**4** 现场作业人员应佩戴安全防护用品。

**6.4.2** 设备及操作安全应符合下列规定：

**1** 作业时应划定作业区域，禁止闲杂人等进入。

**2** 作业前，应确认设备各项安全防护和保险限位装置功能正常。

**3** 设备吊装移动时，应确认回转半径内无人员或障碍物。

**4** 作业期间，应严格执行设备操作手册相关要求。

**5** 设备电路与驱动单元的维护和维修人员应具有相应资格。

7 数据处理

**7.1 一般规定**

**7.1.1** 触探试验结果应记录工程名称、孔号、水深、试验日期信息。

条文说明

触探试验结果是确定基地承载力等计算参数的重要依据之一，应结合需要绘制各种形式曲线和图表，展现土体力学特性随深度的变化规律，便于工程技术人员使用。

**7.1.2** 依据自落式动力触探试验成果进行土层划分时，应结合钻孔及地区经验验证确定。

条文说明

原位触探试验不能提供直接土样供技术人员观察土层的分层特性，只能借助贯入阻力曲线进行土类判断及分层情况确定。因此，基于阻力曲线进行土层确定时，宜结合周围钻孔资料进行划分，若附近无钻孔资料，可采用钻孔验证。

**7.1.3** 试验数据处理中应考虑初始数据漂零影响。

条文说明

可通过对贯入前的测量数据进行均值处理并作为初值，后续数据处理扣除初值。

**7.2 数据处理**

**7.2.1** 基于加速度传感器数据，贯入过程中每个时刻的贯入速度和贯入深度应按下式计算：

  （7.2.1-1）

  （7.2.1-2）

式中： ——初始速度，m/s；

——贯入过程中*t*时刻记录的速度，m/s；

——贯入过程中*t*时刻记录的加速度，m/s2；

——初始位移，m；

——贯入过程中*t*时刻的贯入深度，m；

条文说明

相较于CPT/CPTu技术，自落式动力触探技术在测试时没有用于测量贯入深度的深度计，必须采取其他手段来解决这个问题，可通过对加速度的一次积分获取贯入过程中每个时刻的速度；可通过对速度的一次积分获取贯入过程中每个时刻的位移。在自落式动力触探现场测试过程中，初始速度很难获得。然而，测试结束时的最终速度为0。因此，可以通过后向积分来获得贯入速度。

**7.2.2** 基于压力传感器数据，贯入过程中每个时刻的贯入深度应按下式计算：

  （7.2.2）

式中： ——贯入过程中t时刻记录的水压，kPa；

——水的密度，g/cm³；

——重力加速度，m/s²；

**7.2.3** 零点漂移修正应按测试深度间隔对各点测试值采用下式进行平差修正：

  （7.2.3）

式中： $x\_{d}^{'}$——以测试零点为基准的某深度 *d* 的测试值；

$x\_{d}$ ——某深度 *d* 的测试值；

$∆x\_{d}$——测试零点的测试值；

**7.2.4** 锥尖阻力应按下式进行修正

  （7.2.4）

式中： ——修正后的总锥尖阻力，kPa；

——实测锥尖阻力，kPa；

——为在锥肩位置量测的孔隙水压力，kPa；

——有效面积比，大部分探头*a=A*a*/A*c为0.55～0.90，常为0.8，其中，*A*a、*A*c分别为顶柱和锥底的横截面积；

条文说明

在锥尖后部及摩擦套筒两端的面上作用有水压力，这些水压力会影响锥尖阻力，实测值不能代表土的真正贯入阻力，如图7.1所示，由于孔压探头摩擦筒上部和底部的横截面积差别很小，并且用于测量孔隙水压力的透水石饱和难度较大，且容易在贯入砂层时损坏，因此孔压探头仅测量锥肩位置的孔隙水压力，并仅对锥尖阻力进行修正。



图7.1 锥尖阻力不等端面积示意图

**7.2.5** 总上覆应力应按下式计算

  （7.2.5）

式中： ——总上覆应力，kPa；

——第*i*层土的重度，g/cm3；

——第*i*层土的厚度，m。

**7.2.6** 数据记录应符合下列规定

**1**  每次测试时，应对下列信息进行记录：

1） 测试点的地理位置。

2） 测试点的位置坐标。

3） 测试日期。

4） 探头序列号。

5） 探头几何形状和尺寸。

6） 传感器的测量范围。

7） 探头的磨损和损坏情况。

8） 测试中的任何异常情况。

9） 测试期间的水深。

**2** 测试结束后，测试成果应以数字和曲线形式呈现，宜包括以下内容：测试数据应绘制、随深度的变化曲线。

8 成果报告

**8.1 一般规定**

**8.1.1** 试验结束后应及时整理试验报告，应做到数据真实、参数计算准确、图表清晰，满足设计需求。

**8.2 土的物理力学指标**

**8.2.1** 黏性土的不排水抗剪强度应按下式计算

  （8.2.1-1）

  （8.2.1-2）

式中： ——不排水抗剪强度，kPa；

——应变率系数；

 ——孔压修正后的锥尖阻力，kPa；

——总上覆应力，kPa；

——承载力系数，取值范围为10~15。

——实测的动态锥尖阻力，kPa；

——参考应变率下的锥尖阻力，kPa；

——修正系数，锥尖阻力的值取0.1~0.2；

——FFP测试时的应变率，cm/s；

——参考应变率，取2cm/s；

条文说明

在不排水条件下，土体剪切应变率的增加会导致其不排水抗剪强度的提高，这种现象称为应变率效应。相较于静力触探试验，自落式动力触探试验测试时贯入土体的速率较大，导致其测得的动态贯入阻力值偏高，因此，国内外许多学者提出应变率系数，以解决自落式动力触探试验测试时动态贯入阻力比静态贯入阻力高得多的问题。目前，已有几种应变率模型和公式被提出，这些应变率模型通常表示为速度的半对数或幂函数形式，本规程采用半对数公式。

工程案例 案例1：福建三川海上风电有限公司莆田海上风电场项目

福建省三川海上风电有限公司莆田石城海上风电场项目和莆田平海湾海上风电场F区项目，共安装58台风电机组，总装机容量400MＷ，项目于2021年6月全面建成投产。为了保障海上风电场运行期的安全，利用自落式动力触探技术监测风机基础附近地基土体的力学特征，研究风机基础附近地基土体的变化趋势，建立基于FFP测试的地基土体评价方法，提出基于FFP测试的分级预警方案，形成研究对象特有的基于FFP测试的地基土体监测机制，更好地保障风机的安全运行。

自落式动力触探外业作业工程位于莆田市秀屿区，包含莆田石城项目和莆田平海湾F区项目。石城项目规划场址位于兴化湾北东南部海域，埭头半岛北部，距离岸线 1～5km，水深5～20m，规划场址总面积约 19.4km2。共安装29台风电机组，总装机容量200MＷ。F区项目：规划场址位于平海湾北部海域，南日岛南侧，距离南日岛0.5～4.0km，水深5～15m，规划场址总面积约25.9km2，共安装29台风电机组，总装机容量200MＷ。根据现场扫海及钻探揭露，场区地层上部地层主要为海积的淤泥，泥质中粗砂、粘土等地层，下伏燕山期花岗岩各风化层。

自落式动力触探仪工作量：

第一次F区和石城全场风机基础安全自落式动力触探FFP和基准点检测外业工作；共布置464个FFP点和40个基准点，合计504个FFP测试点。

应用效果：

以场区中部分风机测试点为例，采用上述规程中解译方法进行成果分析，并与地勘报告对比，结果如下：自风机2021年建成后运行2年期间，与地勘报告资料对比，风机周围黏性土不排水抗剪强度*S*u总体未发生明显变化，如图8.2.1-1所示。结果表明，自落式动力触探技术在现场可以快速准确获取土体不排水抗剪强度，并且相较于孔压静力触探技术（CPTU）或全流触探技术（FFPT），自落式动力触探技术（FFP）在测试时无需体型巨大、质量沉重的静力触探贯入设备，操作轻便灵活。



图8.2.1-1 典型风机测试点与地勘报告对比图

**8.2.2** 无黏性土的有效内摩擦角应按下式计算

粉砂、细砂：

  （8.2.2-1）

中砂、粗砂、砾砂：

  （8.2.2-2）

  （8.2.2-3）

式中： ——有效内摩擦角，°；

——净锥尖阻力，MPa；

条文说明

本条是基于珠三角地区水运工程项目的72组中砂~粗砂和33组粉砂~细沙样品的三轴古街排水剪切试验成果与对应的CPTU数据统计分析（如图8.1所示）得出：



图8.1 无黏性土有效内摩擦角与净锥尖阻力的关系

在钙质砂和碳质砂中，探头贯入过程中会出现颗粒破碎等情况，其锥尖阻力不能客观反映真实的内摩擦角；因此，本条无黏性土不包括钙质砂和碳质砂。