

江苏省地方标准

DB32/T 2977-2016

孔压静力触探技术规程

Technical Specification for Piezocone Penetration Test

2016-09-20 发布

2016-11-20 实施

江苏省质量技术监督局 发布

孔压静力触探技术规程

1 范围

本标准规定了孔压静力触探探头标定、现场操作、原始数据处理及成果资料分析应用等技术要求。本标准适用于软土、黏性土、粉土、砂类土及含少量碎石的土层，可应用于公路、水运、港口、环境、海洋及地质等行业。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 50021 岩土工程勘察规范

TB 10018 铁路工程地质原位测试规程

CECS 04 静力触探技术标准

YS5223 静力触探试验规程

3 术语与定义

下列术语与定义适用于本文件。

3.1

CPTU 孔压静力触探 piezocone penetration test

岩土工程勘察的一种原位测试技术，是将具有一定规格的锥形探头以规定的速率匀速贯入土中，量测贯入过程中探头受到的阻力和孔隙水压力的技术。当探头停止贯入时，还可测量孔压随时间而变化的过程值。该技术是由圆锥头、侧壁摩擦筒、孔压过滤环、传感器测量元件以及相连的探杆所组成的集成系统。

3.2

孔压静力触探探头 piezocone penetration probe

由圆锥头和摩擦筒等量测仪器所组成的装置，可同时测量贯入过程中锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力，在贯入停止后还可记录随时间变化的孔隙水压力。

3.3

孔压过滤环 filter

置于孔压静力触探探头中，将孔隙水压力传递至孔压传感器，同时维持探头的几何形状不变的多孔透水元件。

3.4

孔隙水压力 pore water pressure

贯入与消散试验过程中的土体孔隙中水压力。本规程中孔隙水压力为在圆锥头的锥肩部位测得的孔隙水压力(u_2)，简称孔压。

3.5

有效面积比 cone area ratio

孔压静力触探圆锥头上部、测量孔隙水压力的间隙或凹槽部位处载荷元件横截面积与圆锥头底座处横截面积的比值。

3.6

孔压消散试验 pore water pressure dissipation test

探头贯入过程中，在某一深度暂停贯入并保持探头静止时量测孔隙水压力随时间的变化规律。

3.7

孔压参数比 pore pressure parameter ratio

孔压静力触探测试得到的某一深度处产生的触探超静孔隙水压力与锥尖阻力上覆应力修正值的比值，无量纲。

3.8

归一化摩阻比 normalized friction ratio

孔压静力触探测试得到的某一深度处侧壁摩阻力与经上覆应力修正的锥尖阻力的比值，%。

3.9

归一化锥尖阻力 normalized cone resistance

孔压静力触探测试得到的某一深度处的锥尖阻力上覆应力修正值与竖向有效应力的比值，无量纲。

3.10

土类指数 soil behavior type index

由归一化锥尖阻力和归一化摩阻比所表示的土分类参数，其数学意义为基于孔压静力触探成果的土分类图中近似同心圆曲线簇的半径，无量纲。

4 总则

4.1 为提高岩土工程勘察设计水平，推动孔压静力触探（CPTU）技术应用，特制定本规程。

4.2 本规程适用于公路、水运、港口、环境、海洋等行业的岩土工程勘察工作。

4.3 在重要工程场地或缺乏 CPTU 使用经验的地区，CPTU 应与其他勘察测试方法相结合。

4.4 采用本规程时，尚应符合国家现行有关标准规范的规定。

5 仪器设备

5.1 孔压静力触探设备应包括触探设备和标定设备。

a) 触探设备由贯入系统、测量系统、反力装置三部分组成。

b) 标定设备包括测力（压）计或力传感器，加（卸）荷装置、压力罐及辅助设备等。

5.2 贯入系统应包括主机、探杆和附属工具。主机应符合下列技术条件：

a) 匀速贯入速率宜为 (20 ± 5) mm/s，宜有保证标准贯入速率 20 mm/s 的控制装置。

b) 贯入和起拔时，施力作用线应垂直机座基准面，垂直度公差为 30'。

c) 额定起拔力不小于额定贯入力的 120%。

d) 贯入设备推动探杆压力的轴线偏离铅垂线的角度应小于 2°。

5.3 测量系统应包括数据采集仪、探头和信号传输电缆。

5.4 反力装置可采用地锚或压重，必须限制主机在贯入中相对地表移动。

5.5 数据采集仪应符合下列技术条件：

- a) 电源的额定电压和电流应满足工作需要；
- b) 非线性度小于等于 40ppm，温漂小于等于 0.6 uV/°C；
- c) 数据采集间隔沿深度不得大于 5 cm。
- d) 工作环境温度为-10 °C ~45 °C；

5.6 探头规格必须为锥角 60°，锥底直径 35.7 mm，锥底横截面积 10 cm²，侧壁摩擦筒表面积 150 cm²。其余各部加工公差和更新标准应参见附录 A。

5.7 孔压过滤环必须安装在圆锥头肩部（ u_2 ）位置。

5.8 探头的技术性能应符合下列要求：

- a) 测力传感器的检测总误差不应大于 3% F·S，其中非线性误差、重复性误差、滞后误差、归零误差均应小于 1% F·S。
- b) 探头在工作状态下，各部传感器的互扰值应小于本身额定测试值的 0.2%。
- c) 探头绝缘性能，应符合表 1 的规定：

表 1 探头绝缘电阻性能表

出厂时的绝缘电阻	$\geq 500 \text{ M}\Omega$
现场测试时的绝缘电阻	$\geq 50 \text{ M}\Omega$
2 MPa 水压下 6 h 后的绝缘电阻	$\geq 300 \text{ M}\Omega$

- d) 在满负荷水压条件下，孔压传感器的应变腔的体（容）积变化量不应大于 4mm³，体变率应小于 0.2%。
- e) 测试期间，零点读数应在探头温度与地面温度接近的条件下读取；标定时与工作时的温度变化不宜大于 20 °C。探头传感器温度敏感性应符合表 2 的规定。

表 2 传感器温度敏感性表

锥尖阻力	$\leq 2.0 \text{ kPa}/^\circ\text{C}$
侧壁摩阻力	$\leq 0.1 \text{ kPa}/^\circ\text{C}$
孔隙水压力	$\leq 0.05 \text{ kPa}/^\circ\text{C}$

5.9 自探头锥底起算的 1000 mm 长度范围内，探杆直径不得大于探头直径；为降低探杆与土的摩阻力而需加设减摩器时，只能在此规定范围以外的位置设置。

5.10 探头贮存应配备防潮、防震的专用探头箱（盒），并存放于干燥、阴凉的处所；带透水元件的探头，应贮存于盛有脱气液体（水或硅油）的专用密封容器内，使透水元件始终处于饱和状态。

6 探头的标定

6.1 测力、孔压标定

6.1.1 未经标定或超期标定的探头，严禁使用。探头标定应包括力传感器标定与孔压传感器标定，其公称量程不宜大于探头额定荷载的两倍。

6.1.2 探头的标定应采用固定桥压法，根据固定供桥电压标定施加于探头的荷载与仪表输出值之间的对应关系。

6.1.3 对锥尖阻力 q_c 与侧壁摩阻力 f_s 单独测量的独立型探头, 测力传感器 q_c 、 f_s 和孔压传感器 u 应分别进行; 对于减法型探头, 测力传感器 q_c 与 f_s 应同时标定, 孔压传感器 u 应单独标定。

6.1.4 测力传感器的标定。应采用标准测力计(钢环、不低于III等标准)在专用的探头率定架上进行。应按照下列步骤进行标定:

- 标定时最大加荷应根据其探头额定测试范围而定。为消除探头残余应力, 影响标定的正确性, 在每次正式标定前, 至少进行3次以上的满负荷加荷和卸荷, 待归零稳定, 方可正式标定;
- 正式标定时, 对探头逐级进行加、卸荷, 每级荷载量以探头的额定荷载 1/10 (不允许低于 1/5) 进行。每次标定加、卸荷应有3个循环;
- 记录逐级加、卸荷所对应传感器的应变或电量输出值。按传感器标准计算方法, 计算探头的线性、滞后、重复性和归零误差, 同时给定探头标定系数。

6.1.5 孔压传感器的标定。应采用专用的真空饱和率定器(标定罐)。在真空饱和率定器上进行时, 将探头插入饱和率定容器内, 先抽气、饱和, 然后逐级施加水压。

- 标定时最大加荷应根据其探头额定测试范围而定。为消除探头残余应力, 影响标定的正确性, 在每次正式标定前, 至少进行3次以上的满负荷加荷和卸荷, 待归零稳定, 方可正式标定;
- 正式标定时, 对探头逐级进行加、卸荷, 每级荷载量以探头的额定荷载 1/10 (不允许低于 1/5) 进行。每次标定加、卸荷应有3个循环;
- 记录逐级加、卸荷所对应传感器的应变或电量输出值。按传感器标准计算方法, 计算探头的线性、滞后、重复性和归零误差, 同时确定探头标定系数。

6.1.6 传感器相互干扰检测。当探头内某一个传感器标定时, 将其它未标传感器亦连接仪表, 记录某传感器加荷时, 对其它未加荷传感器的影响, 其最大影响值不应大于 0.3%F·S。

6.1.7 探头温漂检验。当探头内部有温度传感器进行温漂校验时, 仅需对温度传感器进行标定。当探头内部没有温度传感器时, 需要校验探头的温漂。将探头放在恒温箱内, 逐步加热至允许使用范围 45 °C。量测温度对各传感器输出变化, 其变化量即为漂移值, 应不大于 0.05%/°C·F·S。

6.2 测力、孔压标定结果计算

6.2.1 探头经测力、孔压标定后, 应按下列步骤计算其标定系数:

- 分别计算同级荷载下各次加荷和卸荷的仪表平均输出值。
- 以荷载为横轴, 仪表输出值为纵轴, 根据各级荷载下算得的平均输出值, 点绘荷载 (P) ~ 输出值 (x) 的关系曲线。此曲线应是一条过原点的直线。
- 按下式计算探头的标定系数:

$$K = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i P_i) / \left[A \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i)^2 \right] \dots\dots\dots (1)$$

式中:

K ——标定系数;

P_i ——第 i 级荷载值, kN

A ——探头的工作面积, cm^2

$\bar{x}_i$ ——第 i 级荷载下, 仪表的平均输出值, $\bar{x}_i = (x_i^+ + x_i^-) / 2$;

x_i^+ ——第 i 级荷载加上后, 仪表的平均输出值;

x_i^- ——卸至第 i 级荷载时, 仪表的平均输出值。

6.2.2 探头各项检测误差计算, 应符合下列要求:

- 以过原点的公式 (1) 所确定的直线, 定为“最佳直线”。
- 探头的检测误差统一采用极差值, 以满量程输出值的百分数表示。见图 1。

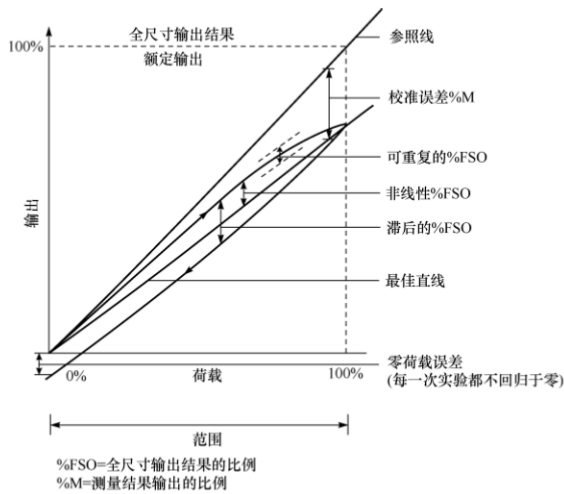


图 1 探头标定曲线及其误差

c) 按下列公式(2~5)计算探头的各项误差:

非线性误差 $\delta_1 = \frac{|X_i^+ - X_i^-|_{\max}}{FS} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$

重复性误差 $\delta_r = \frac{(\Delta X_i^\pm)_{\max}}{FS} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$

滞后误差 $\delta_s = \frac{|X_i^+ - X_i^-|_{\max}}{FS} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$

归零误差 $\delta_0 = \frac{(x_0)_{\max}}{FS} \times 100\% \dots\dots\dots (5)$

式中:
 x_i^+ ——加荷至第*i*级荷载时仪表的平均输出值;
 x_i^- ——卸荷至第*i*级荷载时仪表的平均输出值;
 Δx_i^+ ——重复加荷(或卸荷)至第*i*级荷载时仪表输出值的极差;
 x_0 ——卸荷归零时仪表的平均不归零值;
 FS ——在额定荷载下仪表的满量程输出值;

6.2.3 探头的灵敏度宜根据起始感量 (Y_0) 按表 3 规定标准分级。当计算出的 Y_0 值超过本规程表 3 规定数值时, 应提高供桥电压重新标定、计算。

表 3 根据起始感量探头的起始感量 (Y_0) 及灵敏度分级表

触探参数	起始感量 (Y_0) 及灵敏度分级		
	I	II	III
锥尖阻力	$Y_0 \leq 20$	$20 < Y_0 \leq 50$	$50 < Y_0 \leq 100$
侧壁摩阻力	$Y_0 \leq 1$	$1 < Y_0 \leq 3$	$3 < Y_0 \leq 5$
孔隙水压力	$Y_0 \leq 2$	$2 < Y_0 \leq 5$	$5 < Y_0 \leq 10$

6.2.4 起始感量应按公式(6)计算

$Y_0 = K \cdot \Delta x \dots\dots\dots (6)$

式中:

Y_0 ——起始感量;

K ——探头的标定系数,按公式(1)计算;

Δx ——仪表的有效(最小)分度值。

当计算出的 Y_0 值超过表 3 规定数值时,应提高供桥电压重新标定、计算。

6.3 探头的饱和标定

6.3.1 孔压探头饱和标定应采用真空饱和机。

6.3.2 饱和标定准备。探头与电缆相连后接入孔压传感器测量的二次仪表。开启高压气源进入饱和室,饱和液受压,调节微调阀,逐步升压到额定范围(真空压力表指针在 1MPa 以上),再调节微调阀降至零位。如此升降重复 3 次以上,当孔压传感器输出归零稳定,即可开始正式标定。

6.3.3 饱和标定过程。对探头逐级加压、卸压并应同时记录每级加荷时孔压探头对应的输出值,从 0 开始,每级加荷量 100 kPa,直至满载。加卸荷应重复 3 次。

6.3.4 探头饱和检验。加荷、卸荷时,观测孔压传感器数值变化是否与精密压力表数值变化的幅度相同;若数值变化同步且无时间滞后,则探头饱和。

6.3.5 饱和探头存放。探头饱和标定后,将饱和室上盖与探头吊筒一起取出并迅速放置至饱和液容器中,应在饱和液中分离吊筒。

7 现场操作

7.1 一般规定

7.1.1 触探设备的贯入能力必须满足触探设计深度的需要。

7.1.2 安放主机的地面应平整,使用的反力装置应保证触探达到预定深度。

7.1.3 触探孔位附近已有其它勘探孔时,应将触探孔布置在距原勘探孔 30 倍探头直径以外的范围。进行对比试验时,两孔间距不宜大于 2 m,并应先进行触探然后进行其他勘探。

7.1.4 探头、电缆、记录仪器的接插与调试应按有关说明书的要求操作。

7.2 准备工作

7.2.1 现场作业前应了解以下情况:

- 工程类型、名称、孔位分布和孔深要求。
- 作业区地形和交通情况。
- 场地地层概况及勘探史(原有勘探孔位置及孔深、孔径)。
- 作业区地表有无杂物及地下设施(人防工程、地下电缆、管道等)以及它们的确切位置。
- 作业区有无高压电线、强磁场源以及其它可能干扰测试的因素。
- 使用外接电源工作时,了解其供电情况。

7.2.2 电缆应按探杆连接顺序一次穿齐,其长度 L 可按下式估算:

$$L > N \cdot (l + 0.15) + 7 \dots\dots\dots (7)$$

式中:

L ——电缆长度, m;

l ——每根探杆长度, m;

N ——探杆根数。

7.2.3 检查使用的探头是否符合规定。核对探头标定记录，调零试压。探头在贯入前应用特制抽气泵对孔压传感器的应变腔抽气并注入脱气液体（硅油或甘油），至应变腔无气泡出现为止。

7.2.4 将触探机就位后，应调平机座并使用水平仪校准，使之与反力装置衔接、锁定。当触探机不能按指定孔位安装时，应将移动后的孔位和地面高程记录清楚。

7.3 试验要点

7.3.1 主机贯入速率应符合本规程第 5.2 条的规定。

7.3.2 在整个贯入过程中不得提升探头。

7.3.3 贯入过程中应采取有效措施保证垂直度符合要求。

7.3.4 遇下列情况之一者，应停止贯入：

- a) 触探主机负荷达到其额定荷载的 120%时；
- b) 贯入时探杆出现明显弯曲；
- c) 反力装置失效；
- d) 探头负荷达到额定荷载时；
- e) 记录仪器显示异常。

7.3.5 贯入中需同时严格记录 q_c 、 f_s 、 u_2 及贯入深度 h 的变化值。

7.3.6 孔压消散试验应符合下列规定：

- a) 当贯入到预定深度进行孔压消散试验时，应从探头停止贯入之时起，记录不同时刻的孔压值。在此试验过程中，不得松动、碰撞探杆，也不得施加使探杆产生上、下位移的力。
- b) 孔压消散试验数据的记录频率应符合表 4 的规定。

表 4 孔压消散试验数据记录频率

持续时间（分）	记录频率（秒/次）
0 ~ 1	0.5
1 ~ 10	1
10 ~ 100	2
> 100	5

c) 孔压消散试验的持续时间至少为对应超静孔隙水压力消散达到 50%的时间 t_{50} 。

d) 对于需要做孔压消散试验的土层，若地下水位未知或不确定，则至少应有一孔对该土层做到孔压消散达稳定值为止。其他各孔、各试验点的孔压消散程度，可视地层情况和设计要求而定。

7.3.7 贯入结束并起拔探杆、取回探头，应符合下列规定：

- a) 完全拔出探头后，应检查探头。摩擦筒应能够用手顺利旋转 360°。
- b) 将探头自由地挂在空中或水中并避免阳光直射，读取基线读数。并将此次基线读数与初始基线读数对比。
- c) 探头拔出地面后，应对探头进行清理。
- d) 触探完成后应封孔。

7.3.8 当移位至另一孔压静力触探孔时，探头的应变腔必须重新进行饱和，同时应更换饱和好的孔压过滤环。

7.4 数据采集

7.4.1 测试数据宜采用合适的数据采集仪自动实现。

7.4.2 测试数据采集内容包括贯入深度、锥尖阻力、侧壁摩阻力、孔隙水压力和孔压消散测试等数据。当配备其他多功能探头时，数据采集仪应具有相应的测试数据采集功能。

7.4.3 测试数据采集前数据采集仪应先调零，测试数据应以合适的格式保存输出。

7.4.4 数据采集软件应具有调零复位功能。

8 原始数据处理

8.1 一般规定

8.1.1 应对每个孔 CPTU 资料进行数据处理。

8.1.2 单孔 CPTU 图件应包括以下内容：

- a) 各触探参数随深度的分布曲线（简称 CPTU 曲线）；
- b) 土层名称、地下水位；
- c) 各层土的触探参数值和地基参数值；
- d) 孔压消散试验应附孔压随时间变化的过程曲线。

8.2 原始数据修正

8.2.1 用采集仪取得的原始数据，应按下列步骤及要求修正：

- a) 当记录有锥头倾斜度时，其贯入深度可按式(8)进行深度修正：

$$z = \int_0^l C_{inc} dl \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

z ——贯入深度（单位为 m）；

l ——触探杆贯入长度（单位为 m）；

C_{inc} ——触探杆的倾斜修正系数。

倾斜修正系数的计算公式如下：

对于非定向的倾斜仪：

$$C_{inc} = \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

α 为触探杆轴向与铅垂线的夹角（°）。

对于定向的倾斜仪：

$$C_{inc} = (1 + \tan^2 \alpha + \tan^2 \beta)^{-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

α 、 β 分别为触探杆在相互垂直的两个方向上的偏斜角（°）。

- b) 当零漂值在该深度测试值的 10% 以内时，可将此零漂值依归零检查的深度间隔，按线性内插法对测试值予以平差。当零漂值大于该深度测试值的 10% 时，宜在相邻两次归零检查的时间间隔内，按贯入行程所占时间段落依比例进行线性平差。

- c) 各深度的测试值按下式修正：

$$x_d' = x_d - \Delta x_d \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

x_d' ——某深度 d 读数的修正值；

x_d ——该深度 d 的测试值（读数）；

Δx_d ——相应深度 d 的零漂修正量（平差值），分正、负。

8.2.2 各深度的触探读数应按以下步骤计算：

a) 标定系数修正

$$X_d = K \cdot x_d' \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

X_d ——某深度 d 的触探参数(q_c 、 f_s 和 u_2)；

K ——对应于各触探参数的标定系数；

b) 锥尖阻力孔压修正：

$$q_t = q_c + (1-a) \cdot u_2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中：

q_c ——实测锥尖阻力；

q_t ——孔压修正后的锥尖阻力；

u_2 ——锥肩部位实测孔隙水压力；

a ——有效面积比($=A_n/A_c$)=0.8；

A_n 、 A_c ——锥尖底座和锥尖后的横截面积， $A_n=8 \text{ cm}^2$ 、 $A_c=10 \text{ cm}^2$ 。

c) 上覆应力修正：

$$Q_m = ((q_t - \sigma_{v0}) / p_a) \cdot (p_a / (\sigma'_{v0}))^n \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$R_f = (f_s / q_t) \cdot 100\% \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$F_r = f_s / (q_t - \sigma_{v0}) \cdot 100\% \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$I_c = [(3.47 - \log Q_m)^2 + (\log F_r + 1.22)^2]^{0.5} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中：

Q_m ——归一化锥尖阻力；

σ_{v0} ——土总上覆应力， $\sigma_{v0} = \sum \gamma_i \cdot h_i$ ；

γ_i ——第 i 层土的平均天然重度，单位为 kN/m^3 ；

h_i ——第 i 层土的厚度或测试点与上层面的深度差，单位为 m ；

p_a ——标准大气压，取 100 kPa ；

σ'_{v0} ——土有效上覆应力， $\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$ ，单位为 kPa ；

B_q ——孔压参数比；

u_0 ——静水压力， $u_0 = \gamma_w \cdot (h_t - h_0)$ ，单位为 kPa ；

γ_w ——水的重度，单位为 kN/m^3 ；

h_0 ——地下水埋深，单位为 m ；

R_f ——摩阻比，单位为 $\%$ ；

F_r ——归一化摩阻比；

I_c ——土类指数；

n ——应力指数， $n = 0.381 \cdot I_c + 0.05 \cdot (\sigma'_{v0} / p_a) - 0.15$ 。

9 成果整理

9.1 土层划分及触探参数计算

9.1.1 CPTU 资料分析应根据场地地质情况及当地工程经验，针对建筑物类型和工程设计需要，进行成果整理与应用。

9.1.2 使用 CPTU 资料划分土层，应结合钻探资料或当地经验，确定土层名称、状态等特性。

9.1.3 土层划分应满足 GB50021 的要求，对持力层要详细划分；对工程有影响的软弱下卧层应单独划出。

9.1.4 分层后各层土的孔压静力触探代表值应按下列方法取值：

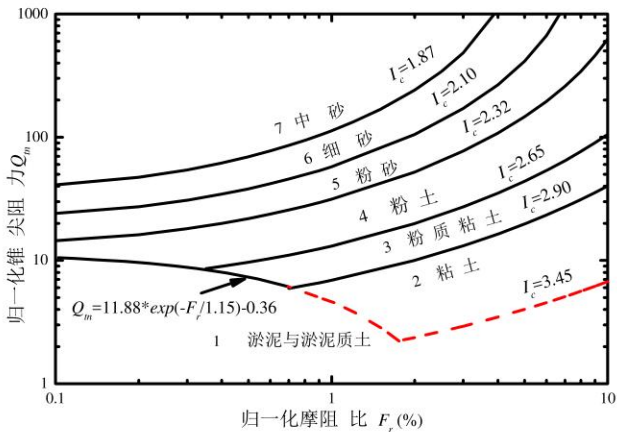
- a) 当分层厚度大于 1m 且土质比较均匀时，应扣除其上部滞后深度和下部超前深度范围的孔压静力触探参数值，然后计算各土层触探参数的平均值；
- b) 对分层厚度不足 1m 的土层，软层应取其最小值，其它土层应取较大值；
- c) 各分层的曲线幅值变化时，将其划分为若干小层，按下式计算平均值；分层曲线中遇异常值时，应予剔除后计算平均值。

$$\overline{X} = \sum_{i=1}^n (\overline{x_i} \cdot h_i) / \sum_{i=1}^n h_i \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中：
 $\overline{X}$ ——各孔压静力触探参数层平均值；
 h_i ——第 i 小层厚度；
 $\overline{x_i}$ ——第 i 小层孔压静力触探参数平均值。

9.2 土的工程分类与状态参数确定

9.2.1 宜采用土类指数，按图 2 进行土的工程分类。



分区	我国国标土分类	土类指数 I_c
1	淤泥与淤泥质土	$I_c > 3.45$ 或 $Q_m < 11.8 \cdot \exp(-F_r/1.15) - 0.36$
2	粘土	$2.9 < I_c < 3.45$ 且 $Q_m > 11.8 \cdot \exp(-F_r/1.15) - 0.36$
3	粉质粘土	$2.65 < I_c < 2.90$
4	粉土	$2.32 < I_c < 2.65$
5	粉砂	$2.10 < I_c < 2.32$
6	细砂	$1.87 < I_c < 2.10$
7	中砂	$I_c < 1.87$

图 2 基于土类指数的土工程分类

9.2.2 天然重度宜按式 (20) 计算：

$$\gamma = 1.81 \cdot \gamma_w \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma_{atm}} \right)^{0.05} \cdot \left(\frac{q_t - \sigma'_{v0}}{\sigma_{atm}} \right)^{0.017} \cdot \left(\frac{f_s}{\sigma_{atm}} \right)^{0.073} \cdot (B_q + 1)^{0.16} \dots\dots\dots (20)$$

式中:

γ_w ——水的重度, 单位为 kN/m^3 ;

σ'_{v0} ——土有效上覆应力, 单位为 kPa ;

σ_{atm} ——标准大气压, 取 100 kPa ;

B_q ——孔压参数比。

9.2.3 对饱和粘性土, 可按下式计算侧压力系数 K_0 :

$$K_0 = 0.10 \cdot (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma_{v0} \dots\dots\dots (21)$$

9.3 土的物理力学指标确定

9.3.1 对黏性土, 可按下式计算小应变剪切模量 G_0 :

$$G_0 = 11.3 \cdot q_t^{1.28} \cdot (1 + B_q)^{4.59} \dots\dots\dots (22)$$

式中:

q_t ——孔压修正锥尖阻力, 单位为 MPa 。

对饱和和无粘性土, 小应变剪切模量可由下式估算:

$$G_0 = 1634 \cdot q_c \cdot \left(\frac{q_c}{\sigma'_{v0}} \right)^{-0.75} \dots\dots\dots (23)$$

式中:

G_0 ——小应变剪切模量, 单位为 kPa ;

q_c ——锥尖阻力, 单位为 kPa 。

9.3.2 根据孔压消散试验结果, 可采用下式计算饱和粘性土水平固结系数:

$$c_h = \frac{T^* \cdot r^2 \cdot \sqrt{I_r}}{t_{50}} \dots\dots\dots (24)$$

式中:

c_h ——水平向固结系数, 单位 cm^2/s ;

r ——探头半径, 取值 1.785cm ;

I_r ——刚度指数, $I_r = G/S_u$;

t_{50} ——超孔压消散达 50% 时的时间, 单位为 s , 在绘制的归一化超孔压曲线上查取;

T^* ——相应于 t_{50} 的时间因数, 可据表 5 取值。

表 5 时间因数 T^*

固结度	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
时间因数 T^*	0.038	0.078	0.142	0.245	0.439	0.804	1.600

9.3.3 根据孔压消散试验结果, 可采用下式计算饱和粘性土水平渗透系数 k_h :

$$k_h = (251 t_{50})^{-1.25} \dots\dots\dots (25)$$

式中:

k_h ——水平渗透系数, 单位为 cm/s;
 t_{50} ——超孔压消散达 50% 时的时间, 单位为 s。

9.3.4 无粘性土的相对密实度可采用下式估算:

$$D_r = -98 + 66 \cdot \log_{10} \left[\frac{(q_c \times 100)}{\sqrt{\sigma'_{v0}} / 10} \right] \dots\dots\dots (26)$$

式中:
 q_c 单位为 MPa;
 σ'_{v0} 单位为 kPa。

9.3.5 饱和和无粘性土的状态参数可采用下式计算:

$$\psi = 0.485 - 0.314 \cdot \log Q_{m,cs} \dots\dots\dots (27)$$

式中:

$Q_{m,cs} = K_c \cdot Q_m$, K_c 为细粒含量修正系数。

$$K_c = \begin{cases} 1.0 & I_c \leq 1.64 \\ 5.581 \cdot I_c^3 - 0.403 \cdot I_c^4 - 21.63 \cdot I_c^2 + 33.75 \cdot I_c - 17.88 & I_c > 1.64 \end{cases} \dots\dots\dots (28)$$

9.3.6 饱和和无粘性土的有效内摩擦角可采用下式计算:

$$\phi' = 17.6 + 11 \cdot \log(q_c / \sqrt{\sigma'_{v0}}) \dots\dots\dots (29)$$

式中:
 ϕ' 为有效内摩擦角, 单位为度(°);
 q_c 和 σ'_{v0} 单位为 kPa。

9.3.7 土的其它物理力学指标确定方法参见附录 B。

9.4 地基土液化判别

9.4.1 对有可能液化的饱和地基土进行判别, 当 CPTU 实测计算的周期阻力比 CRR 小于等效周期应力比 $CSR_{7.5}$, 可判别为液化土, 否则为非液化土。

9.4.2 等效周期应力比 $CSR_{7.5}$ 可按下列公式计算:

$$CSR_{7.5} = 0.65 \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma_{v0}} \right) \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot (r_d) / MSF \dots\dots\dots (30)$$

$$r_d = 1.000 - 0.00765z \text{ 当 } z \leq 9.15\text{m 时} \dots\dots\dots (31)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \text{ 当 } 9.15 < z \leq 23\text{m 时} \dots\dots\dots (32)$$

$$MSF = 10^{2.24} / M^{2.56} = \left(\frac{M}{7.5} \right)^{-2.56} \dots\dots\dots (33)$$

式中:

σ_{v0} 、 σ'_{v0} ——地基土总上覆应力和有效上覆应力, 单位为 kPa;

a_{max} ——地震动峰值加速度, 单位为 m/s^2 ;

g ——重力加速度, $g=9.8\text{m/s}^2$;

r_d ——应力折减系数;

MSF ——震级比例系数;

z ——计算点所处的深度, 单位为 m;

M ——地震震级, 可根据里氏震级(M_L)按表 6 取值; 里氏震级根据地震安全评价和工程的重要性, 取周边 150km 或 200km 范围内历史上发生地震的最大震级。

表 6 地震震级取值

里氏震级 (M_L)	< 6.20	6.40	6.60	6.80	7.00	7.20	≥ 7.40
地震震级 (M)	M_L	6.52	6.87	7.25	7.66	8.24	10.00

9.4.3 周期阻力比 CRR 按下列规定计算:

a) 考虑细粒含量对锥尖阻力的影响,按下式计算等效纯净砂归一化锥尖阻力 Q_{mcs} :

$$Q_{mcs} = K_c \cdot Q_m \quad \dots\dots\dots (34)$$

式中:

 Q_{mcs} ——等效纯净砂归一化锥尖阻力; Q_m ——归一化锥尖阻力 K_c ——细粒含量修正系数,按下列诸式计算:当 $I_c \leq 1.64$ 时,取 $K_c = 1.0$;当 $1.64 < I_c < 2.50$ 时,按下式计算:

$$K_c = 5.58 \cdot I_c^3 - 0.403 \cdot I_c^4 - 21.63 \cdot I_c^2 + 33.75 \cdot I_c - 17.88 \quad \dots\dots\dots (35)$$

当 $1.64 < I_c < 2.36$ 且 $F_r < 0.5\%$ 时,取 $K_c = 1.0$;当 $2.50 < I_c < 2.70$ 时,按下式计算:

$$K_c = 6 \times 10^{-7} \cdot I_c^{16.76} \quad \dots\dots\dots (36)$$

当 $I_c > 2.70$ 时,不需计算 K_c 。

b) 按下列诸式计算周期阻力比 CRR:

$$CRR = 93 \cdot \left(\frac{Q_{mcs}}{1000} \right)^3 + 0.08 \quad I_c < 2.7 \text{ 并且 } 50 \leq Q_{mcs} \leq 160 \quad \dots\dots\dots (37)$$

$$CRR = 0.833 \cdot \left(\frac{Q_{mcs}}{1000} \right) + 0.05 \quad I_c < 2.7 \text{ 并且 } Q_{mcs} \leq 50 \quad \dots\dots\dots (38)$$

$$CRR = 0.0477 \cdot Q_m \quad I_c > 2.7 \quad \dots\dots\dots (39)$$

9.5 单桩竖向承载力的计算

9.5.1 单桩竖向极限承载力宜按下式计算确定:

$$Q_u = q_p \cdot A_p + \pi D \sum_{i=1}^n f_{pi} \cdot d_i \quad \dots\dots\dots (40)$$

式中:

 Q_u ——单桩竖向极限承载力, kN; q_p ——单位桩端极限阻力, kPa; A_p ——桩端横截面积, m^2 ; D ——桩径, m; f_{pi} ——第 i 层土的单位桩侧极限摩阻力, kPa。 d_i ——桩身穿过的第 i 层土的厚度, m;9.5.2 单位桩端极限阻力 q_p 宜按下式计算确定。

$$q_p = \xi_c \cdot q_{ca} \quad \dots\dots\dots (41)$$

式中:

 ξ_c ——端承系数,根据桩的类型和土类锥尖阻力,按表 7 确定; q_{ca} ——桩端附近等价平均锥尖阻力。计算桩端深度处上、下 1.5 倍桩径范围内 q_c 的平均值 $\bar{q}_{ca}$,并舍弃大于 $1.3\bar{q}_{ca}$ 和桩顶 1.5 倍桩径深度范围内低于 $0.7\bar{q}_{ca}$ 的 q_c 值后的 q_c 平均值 (图 3)。

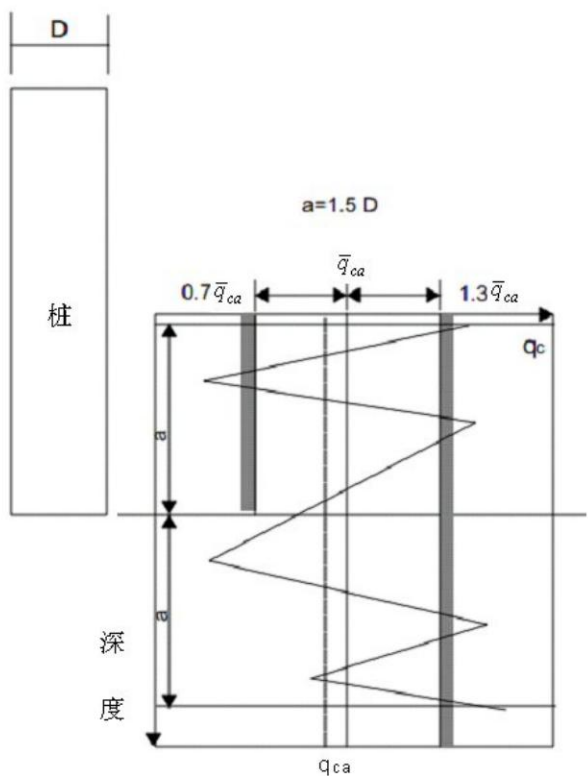


图 3 等价平均锥尖阻力 q_{ca} 计算简图

表 7 端承系数 k_c 与摩阻力系数 k_f 取值列表

土类	$q_c(\text{kPa})$	端承系数 ξ_c	摩阻力系数 ξ_f	f_p 最大极限值(kPa)
软黏土、淤泥	<1000	0.5	90	15
黏性土	1000~5000	0.45	40	35(80)
粉土、松散砂土	≤ 5000	0.5	60	35
密实粉土	>50000	0.55	60	35(80)
中密砂土	5000~12000	0.5	100	80(120)
密实砂土	>12000	0.4	150	120(150)

注：对施工质量控制较好的工程， f_p 最大极限值取括号内的值。

9.5.3 单位桩侧极限摩阻力 f_p 按下式计算确定。

$$f_p = q_c / \xi_f \dots\dots\dots (42)$$

式中：
 q_c —— 实测锥尖阻力，kPa；
 ξ_f —— 摩阻力系数，根据土类按表 7 确定。

附录 A
(资料性附录)

A.1 孔压探头形状示意图见图 A.1。

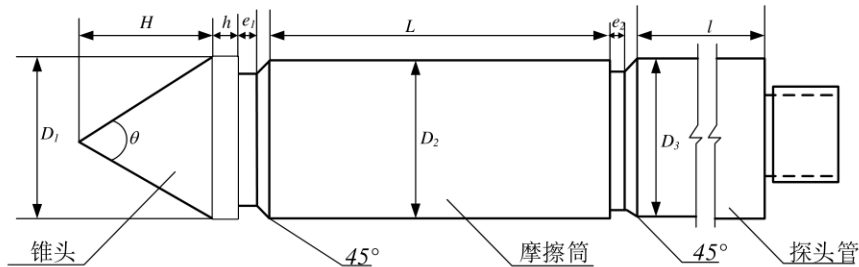


图 A1 孔压探头形状示意图

A.2 孔压探头规格、各部加工公差及更新标准见表 A2。

表 A.2 孔压探头规格、各部加工公差及更新标准

锥底面积 (cm ²)		10
锥 头	锥角 θ (°)	60±1
	公称直径 D_1 (mm)	35.7
	直径公差 (mm)	+0.18, 0
	圆柱高度 h (mm)	≤10
	有效面积比 ^① a	0.8
	孔压过滤环与土接触面积 (cm ²)	≥5.6
摩 擦 筒	公称直径 D_2 (mm)	35.7
	直径公差 (mm)	+0.35, +0.20
	公称长度 L (mm)	133.7
	长度公差 (mm)	+0.60, -0.90
	有效表面积 (cm ²)	150
锥头与摩擦筒间距 ^② e_1 (mm)		≤5
摩擦筒与探头管间距 e_2 (mm)		≤3
孔压探头全长 (mm)		$h+e_1+L+e_2+l \geq 430$
探头管直径 D_3 (mm)		$(D_1-1.1) \leq D_3 \leq (D_1-0.3)$
更新标准	D_1 (mm)	<34.8
	D_2 ^③ (mm)	≤34.8
	锥高 H (mm)	<31
	外形	(1) 锥面/套筒出现明显变形或多处刻痕, 摩擦筒活动不便, $D_2 < D_1$ (2) 锥尖压损, 孔压过滤环与土接触面凹于锥头表面或透水失效
注 1: 表中 $a = A_n/A_c$, $A_c = 1/4\pi D_1^2$; 注 2: e_1 , e_2 为工作状态下的间距; 注 3: 对同一枚探头, D_2 必须大 D_1 ; 注 4: 孔压探头形状见附图 A.1。		

附录 B
(资料性附录)
土的其它物理力学指标确定

B.1 对饱和粘性土，超固结比 OCR 宜按下式计算：

$$OCR = k \cdot \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} \right)$$

式中：

k 取值 0.36~0.46，江苏粘性土可取 0.42。

B.2 饱和粘性土的不排水抗剪强度 S_u 可按下式计算：

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}}$$

式中：

q_t 和 σ_{v0} 单位为 kPa； N_{kt} 取值范围为 11~19，取其平均值 16。

B.3 饱和粘性土的灵敏度 S_t 可按下式计算：

$$S_t = \frac{N_s}{R_f}$$

式中：

R_f 为摩阻比，单位为%； N_s 取值范围为 5~10，取其平均值 7.5。

B.4 饱和粘性土的压缩模量 E_s 可按下式估算：

$$E_s = \alpha_m \cdot (q_t - \sigma_{v0})$$

式中：

q_t 和 σ_{v0} 单位为 MPa； α_m 取值范围为 3~8，对长江三角洲地区粘性土建议取值 3.54。