

# 软土地基勘察中静力触探与标准贯入试验对比分析

闫建飞 刘江娅

天津市地质工程勘测设计院有限公司 天津 300191

**摘要：**静力触探（CPT）与标准贯入试验（SPT）是岩土工程勘察中广泛应用的原位测试方法，在软土地区各有优劣。本文详细阐述了二者基本原理、技术特点与适用条件，并从测试机理、数据连续性、参数获取能力等多维度深入对比分析。研究发现，在软土地基勘察中，CPT因连续、高分辨率、无扰动等优势，在土层精细划分等方面表现更佳；SPT在软土中应用受限，但获取扰动土样及关联大量既有工程经验的价值不可替代。本文提出“CPT为主，SPT为辅，二者互补”的综合勘察策略，并结合实例验证，为软土地区勘察提供科学依据。

**关键词：**软土地基；静力触探（CPT）；标准贯入试验（SPT）；对比分析

## 引言

软土是在静水或缓慢流水环境中沉积形成的细粒土，天然含水量高、抗剪强度低等，在我国多地广泛分布，其不良特性易致工程事故，精准高效勘察软土、获取可靠参数是地基处理等工作的基础。原位测试技术能保持土体天然状态、避免取样误差而受青睐，其中静力触探（CPT）和标准贯入试验（SPT）是应用广泛的方法。SPT发展早，设备简单、可获扰动土样，积累了大量数据；CPT兴起于20世纪50年代欧洲，具有连续、快速、高精度特点。但二者在软土地基应用中差异明显，SPT在极软土层难获有效击数、数据离散，CPT对软土层变化敏感，不过SPT土样对土类定名等必不可少。因此，剖析二者异同、明确优劣，对优化勘察等意义重大，本文旨在提供决策支持。

## 1 静力触探（CPT）与标准贯入试验（SPT）基本原理

### 1.1 静力触探（CPT）

静力触探是用液压或机械装置，将圆锥形探头探杆以 $2\text{cm/s}$ 速率匀速压入土中，连续测探头阻力的原位测试法。现代CPT探头多为多功能，可同步测：（1）锥尖阻力（ $q_c$ ）：反映土体强度和密实度的核心指标；（2）侧壁摩阻力（ $f_s$ ）；（3）孔隙水压力（ $u_2$ ）（仅CPTU具备<sup>[1]</sup>）。据此算出摩阻比（ $R_f = f_s/q_c \times 100\%$ ），结合经验式推算土类、不排水抗剪强度（ $S_u$ ）等工程参数。CPT测试连续、无冲击振动，对土体扰动小，适合软黏土。

### 1.2 标准贯入试验（SPT）

标准贯入试验用 $63.5\text{kg}$ 穿心锤从 $76\text{cm}$ 落距自由下落，将标准对开式取土器击入土中。先打入 $15\text{cm}$ 清孔，再记录打入 $30\text{cm}$ 锤击数即N值。SPT是动力冲击式，有振动和挤压扰动。N值反映土体对贯入阻力的综合响应，与土的密实度等有关。其特点是在获取N值同时能取扰动土样用于鉴别土类等，但冲击式贯入对软土结构破坏大，N值离散性大。

## 2 软土地基勘察中CPT与SPT的对比分析

表1 CPT与SPT在软土地基勘察中的综合性能对比

对比维度	静力触探（CPT/CPTU）	标准贯入试验（SPT）
测试原理	静力匀速贯入（ $2\text{cm/s}$ ），无冲击、无振动	重锤自由落体冲击贯入（ $63.5\text{kg}$ , $76\text{cm}$ 落距），动力冲击式
对软土扰动程度	极小，基本保持原状结构	严重，冲击破坏土体结构，易产生应力松弛
数据连续性	连续记录，分辨率可达 $1\text{cm}$	离散点测试，通常每 $1.0\text{--}1.5\text{m}$ 一个数据点
典型软土中数据表现	$q_c: 0.2\text{--}2.0\text{MPa}$ ; $f_s: 5\text{--}30\text{kPa}$ ; $R_f: 2\%\text{--}10\%$ ; $u_2$ 显著（CPTU）	N值: 0–2（多数为0或1），数据离散、重复性差
土类识别能力	高（通过 $q_c$ 、 $f_s$ 、 $R_f$ 及孔压参数 $B_q$ 、 $Q_t$ ，结合Robertson等图表实现连续判别）	中（依赖扰动土样肉眼鉴别，无法连续，极软土中常取不到样）
不排水抗剪强度 $S_u$ 估算	可靠（ $S_u \approx (q_c - \sigma_v)/N_k$ , $N_k = 10\text{--}20$ ; CPTU可通过 $Q_t$ 、 $B_q$ 更精确估算）	不可靠（N值与 $S_u$ 在软土中无显著相关性，经验公式误差大）
压缩模量 $E_s$ 估算	较可靠（ $q_c$ 与 $E_s$ 存在经验关系，如 $E_s = \alpha \cdot q_c$ , $\alpha = 2\text{--}10$ ）	不可靠（N值低， $E_s$ 估算误差极大）

续表:

对比维度	静力触探 (CPT/CPTU)	标准贯入试验 (SPT)
固结特性测定	可直接测定 (CPTU孔压消散试验可得水平固结系数 Ch)	无法测定
薄层识别能力	强 (可识别厚度 $\geq 10\text{cm}$ 的砂层、粉土夹层)	弱 (易遗漏)
设备与操作	设备较复杂, 需液压系统; 自动化程度高, 人为误差小	设备简单, 操作直观; 人为因素 (锤击能量、计数) 影响大
单孔测试效率	高 ( $1\text{-}2\text{m/min}$ , 日进尺可达 $200\text{-}300\text{m}$ )	低 (软土中需护壁、清孔, 日进尺约 $30\text{-}50\text{m}$ )
单孔综合成本	中高 (设备投入大, 但软土中无需护壁、取样少, 综合成本可控)	表面低 (设备便宜), 但软土中护壁、无效测试多, 实际成本可能更高
与既有规范/经验关联	较新, 需本地化校准; 国际应用广泛, 国内规范逐步纳入	极强, 全球大量工程经验、规范公式基于 N 值 (但在软土中适用性差)
适用软土类型	淤泥、淤泥质黏土、软塑-流塑黏性土 (效果极佳)	硬塑黏土、粉土、砂土 (在软土中基本失效)

## 2.1 测试机理与对土体的扰动

这是二者最根本的差异。CPT采用静力匀速贯入, 其过程模拟了基础缓慢加载的工况, 产生的超孔隙水压可以被CPTU精确捕捉, 这对于分析软土的固结特性和不排水强度至关重要。整个过程对土体的结构性扰动极小, 能够真实反映原位土体的状态。相比之下, SPT的重锤冲击过程对土体造成了剧烈的扰动。在软土中, 这种冲击不仅会瞬间破坏土的天然结构, 还会在取土器周围产生显著的应力松弛区, 导致测得的N值严重偏低, 甚至无法贯入 (“打滑” 现象), 使得数据失去工程意义。因此, 从测试机理上看, CPT显然更适合于对扰动高度敏感的软土地基。

## 2.2 数据连续性与分辨率

CPT的最大优势之一是其连续性。它可以以厘米级甚至毫米级的间隔连续记录 $qc$ 、 $fs$ 、 $u_2$ 等参数, 形成高分辨率的剖面图。这使得工程师能够精细地划分土层, 识别薄夹层 (如砂透镜体), 准确判定软土层的顶底板深度, 这对于桩基持力层选择和地基处理深度控制至关重要<sup>[2]</sup>。SPT则是离散点测试, 通常每  $1.0\text{-}1.5\text{米}$  进行一次。在软土地区, 由于N值普遍偏低且变化不大, 这种离散的数据点很难准确刻画软土层内部的细微变化, 容易遗漏关键的地质信息, 导致勘察精度不足。

## 2.3 获取工程参数的能力

软土地基勘察核心工程参数有土类、不排水抗剪强度 ( $S_u$ )、压缩模量 ( $E_s$ )、固结系数 ( $C_v$ ) 等。(1) 土类识别: CPT借  $qc$ 、 $fs$  和  $R_f$  构建的图表 (如 Robertson 图表) 可连续判别土类, CPTU模式下结合孔压消散曲线, 区分黏性土与粉土更准。SPT靠扰动土样肉眼鉴别, 直观但无连续剖面, 极软土可能取不到有效样。(2) 不排水抗剪强度 ( $S_u$ ): 正常固结软黏土中, CPT的  $qc$  与  $S_u$  有良

好经验关系 (如  $S_u = (qc - \sigma v_0)/N_k$ ), CPTU借孔压参数 ( $Bq, Qt$ ) 估算更精准。SPT的N值与  $S_u$  在软土中相关性差, 难建可靠换算关系。(3) 压缩与固结特性: CPT的  $qc$  值与  $E_s$  有较好相关性, 可用经验公式估算, CPTU孔压消散试验能现场测  $Ch$ , SPT无法做到。SPT主要靠N值间接估算  $E_s$ , 软土中误差极大。

## 2.4 对软土的适应性

这是决定测试方法选择的关键因素。CPT专为软弱土层设计, 其贯入能力在软土中表现优异, 能够轻松穿透数十米厚的淤泥层, 并提供高质量的数据。现代CPT设备甚至可以在水上平台进行作业, 适应性极强。SPT在软土中的适应性则很差。当N值小于2时, 测试结果的可靠性和重复性急剧下降<sup>[3]</sup>。在流塑状淤泥中, 锤击往往只能使取土器下沉几厘米, N值记录为“0”或“1”, 这样的数据对于工程设计几乎没有价值。此外, SPT在软土中还容易发生孔壁坍塌, 需要下套管护壁, 增加了测试的复杂性和成本。

## 2.5 测试效率与成本

CPT测试速度极快, 每分钟可贯入  $1\text{-}2\text{米}$ , 一个工作日能完成数百米测试。自动化数据采集减少人为误差、提升效率。CPT设备初始购置成本高, 但软土地区单孔测试成本常低于SPT, 因省去取样、护壁等环节。SPT测试繁琐, 含清孔、锤击计数等多步, 单孔耗时久, 软土中因需频繁护壁和处理 “打滑”, 效率更低。其设备成本低, 但软土地区综合成本 (时间、人力、护壁材料) 未必有优势。

## 2.6 参数间的换算关系与经验积累

SPT优势在于经验积累深厚, 全球大量工程案例、规范和经验公式基于其N值建立, 在砂土和硬塑黏土中历史惯性使其仍占重要地位。CPT发展快, 但经验关系式较

“年轻”，不同地区、土类经验系数有差异，需本地化校准。不过，软土领域CPT经验关系式日趋成熟可靠。需注意，软土中建立CPT与SPT直接换算关系危险且不推荐，因二者测试机理不同，SPT数据在软土中可靠性存疑。

### 3 综合应用策略与工程案例

#### 3.1 “CPT为主，SPT为辅，二者互补”的勘察理念

基于上述对比分析，在软土地基勘察中，应摒弃单一依赖SPT的传统模式，转而采用以CPT为核心的综合勘察策略：（1）以CPT作为主力：利用其连续、高效、高精度的优势，进行大面积的网格化测试，快速查明场地软土的空间分布、厚度变化及物理力学参数的纵向和横向变异规律。（2）辅以SPT和钻探取样：在CPT测试孔附近或关键位置（如拟建建筑物角点、地质条件复杂区）布置少量钻孔，进行SPT测试并采取I、II级土样。SPT主要用于验证CPT的土类判别结果，而高质量的原状土样则用于室内试验，对CPT推算的关键参数（如 $S_u, Es$ ）进行校准，建立本地化的经验关系<sup>[4]</sup>。（3）结合其他测试手段：如十字板剪切试验（FVT）直接测定原位 $S_u$ ，扁铲侧胀试验（DMT）等，形成多方法相互验证的体系，进一步提高勘察成果的可靠性。

#### 3.2 案例分析

##### 3.2.1 项目概况

某沿海城市拟建一幢30层高层住宅，场地属典型的海相沉积软土区，地表下0-25米主要为淤泥和淤泥质黏土，含水量高达60%-80%，天然强度极低。

##### 3.2.2 传统SPT勘察方案

按常规每30米布置一个钻孔，孔内每1.5米进行一次SPT。测试结果显示，0-20米深度内N值普遍为0-2，数据离散且无规律。勘察报告对软土层的划分模糊，对关键参数 $S_u$ 和 $Es$ 的取值主要依赖于有限的几个原状土样试验结果，代表性不足，给后续的桩基设计（桩长、单桩承载力）带来了很大的不确定性。

##### 3.2.3 优化后的CPT综合勘察方案

在场地内按20米×20米网格布置CPTU测试孔16个。在CPTU孔附近选择4个代表性位置布置钻孔，进行SPT测

试并采取高质量原状土样。对比分析CPTU数据与室内土工试验结果。

#### 3.2.4 成果与效益

CPTU连续剖面清晰揭示了场地内存在两层厚度约0.5-1.0米的粉砂薄夹层，这是SPT完全无法发现的，该夹层对桩基负摩阻力的计算至关重要。利用CPTU的 $qc$ 和孔压参数，结合4个钻孔的室内 $S_u$ 试验值，成功标定了本地化的 $S_u$ 计算公式，使得整个场地的 $S_u$ 分布图精度大大提高。基于高精度的CPTU数据，设计方优化了桩基方案，将预估桩长从55米缩短至50米，单桩承载力提高了10%，为项目节约了数百万元的造价。整个勘察周期缩短了40%，效率显著提升。该实例充分证明了在软土地基勘察中，以CPT为核心、多方法综合应用的优越性。

### 5 结论

对软土地基勘察中的CPT与SPT对比分析可知：CPT静力贯入对软土扰动小，能反映原位状态，SPT动力冲击易使软土数据失真；CPT提供连续高分辨率剖面，可精细刻画软土层，SPT离散数据点难有效表征；CPT（尤其是CPTU）能高效获取软土关键参数，SPT的N值与软土参数相关性差；软土地区CPT测试效率高、成本优。因此，不应完全弃用SPT，应将其作为辅助，确立“CPT为主、SPT为辅、钻探取样校准、多方法互补”的现代软土勘察理念。随着岩土工程数字化，CPT主导地位将更突出，技术人员应更新知识，提升软土勘察水平。

### 参考文献

- [1]邹智军,贺迎喜.静力触探试验在软土地基沉降推算分析中的应用[J].中国港湾建设,2022,42(02):95-98+103.
- [2]刘亚军.静力触探试验在杞麓湖软土地基勘察中的应用[J].西部探矿工程,2022,34(02):5-6+9.
- [3]王相扶.岩土工程勘察中标准贯入试验的应用实践[J].散装水泥,2024,(05):222-224.
- [4]侯向阳,王振军,孙巍,等.标准贯入试验在黄河流域砂土液化地层判别中的应用[J].建筑技术开发,2024,51(07):65-67.