

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。原位测试技术因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2cm/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）^[1]。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63.5kg穿心锤从76cm落距自由下落，将标准对开式取土器击入土中。先打入15cm清孔，再记录打入30cm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（2cm/s），无冲击、无振动	重锤自由落体冲击贯入（63.5kg，76cm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1cm	离散点测试，通常每1.0–1.5m一个数据点
典型软土中数据表现	q_c : 0.2–2.0MPa; f_s : 5–30kPa; R_f : 2%–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（ $S_u \approx (q_c - \sigma_{vo})/N_k$, $N_k = 10-20$; 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 $E_s = \alpha \cdot q_c$, $\alpha = 2-10$ ）	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≥10cm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（1-2m/min，日进尺可达200-300m）	低（软土中需护壁、清孔，日进尺约30-50m）
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，产生的超孔隙水压力可以被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、u2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^[2]。SPT则是离散点测试，通常每1.0-1.5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（Su）、压缩模量（Es）、固结系数（Cv）等。（1）土类识别：CPT借qc、fs和Rf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（Su）：正常固结软黏土中，CPT的qc与Su有良

好经验关系（如 $Su = (qc - \sigma_{v0})/Nk$ ），CPTU借孔压参数（Bq、Qt）估算更精准。SPT的N值与Su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Es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Es，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^[3]。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1-2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 、 E_s ）进行校准，建立本地化的经验关系^[4]。（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 E_s 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 q_c 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.