



T/CECS G: XXXX-2022

中国工程建设标准化协会标准
Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

公路静力触探技术规程

Technical Specification for Cone Penetration Test
of Highway Engineering

(征求意见稿)

2022-XX-XX 发布

2022- XX-XX 实施

中国工程建设标准化协会 发布

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2019年第二批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2019〕22号）的要求，编制组通过广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分 9 章和 7 个附录，主要内容包括：总则，术语和符号，基本规定，静力触探应用，仪器设备，单、双桥静力触探，孔压静力触探，地震波静力触探，电阻率静力触探，附录，条文说明。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会归口管理，由安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈至安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司（地址：安徽省合肥市高新区香樟大道 180 号，邮编：230088，邮箱：470587760@qq.com）。

主 编 单 位： 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司
东南大学

参 编 单 位： 中交第二公路勘察设计研究院有限公司
中交第四航务工程勘察设计院有限公司
南京智探岩土科技有限公司
华设设计集团股份有限公司
福建省交通规划设计研究院有限公司
广东省交通规划设计研究院股份有限公司
天津市市政工程设计研究总院
中国地质大学
温岭市南光地质仪器有限公司
合肥工业大学
南京智慧岩土工程技术研究院有限公司

主 编： 陈修和 刘松玉

主要参编人员：

主 审： 吴万平

参与审查人员：

目 次

1 总则	1
2 术语和符号	4
2.1 术 语	4
2.2 符 号	6
3 基本规定	9
4 静力触探应用	13
4.1 一般规定	13
4.2 路基工程	14
4.3 桥涵工程	15
4.4 隧道工程	19
5 仪器设备	22
5.1 一般规定	22
5.2 探头与量测系统	23
5.3 探头标定	33
5.4 贯入系统	37
6 单、双桥静力触探	44
6.1 准备与测试	44
6.2 资料整理	45
6.3 成果应用	49
7 孔压静力触探	57
7.1 准备与测试	57
7.2 资料整理	65

7.3 成果应用	70
8 地震波静力触探	91
8.1 准备与测试	91
8.2 资料整理	93
8.3 成果应用	94
9 电阻率静力触探	97
9.1 准备与测试	97
9.2 资料整理	97
9.3 成果应用	97
附录 A 公路工程静力触探方法选用	102
附录 B 参数统计方法	103
附录 C 单桥静力触探曲线形态判别土类特征图表	105
附录 D 双桥静力触探曲线形态判别土类特征图表	106
附录 E 单、双桥静力触探参数估算地基土物理力学指标	107
附录 F 单、双桥静力触探参数估算地基承载力的地区经验	112
附录 G 单、双桥静力触探参数估算单桩承载力的地区经验	124
用词说明	133
引用标准名录	134
条文说明	135

1 总则

1.0.1 为指导静力触探技术在公路工程中的应用，保证静力触探测试质量，提升公路工程勘察技术水平，制定本规程。

【条文说明】

1.0.1 静力触探是目前国内应用最为广泛的原位测试方法之一，同时也是一种有效的勘探方法，在公路工程地质勘察中具有不可替代的重要作用，合理的应用可有效提高勘察质量、降低勘察成本，缩短勘察周期。

单桥、双桥静力触探是目前国内应用最为广泛的静力触探技术，配合中型、重型贯入设备，在适宜的地层中基本满足了陆域公路桥梁、工业与民用建筑、铁路等各类工程的勘察要求。编制组在调研过程中发现，本规程编制前，国内很多地区均积累了丰富的单桥、双桥静力触探测试及成果应用经验，多体现在当地的地方标准中。然而，单桥、双桥静力触探成果的应用更多的处于经验的层面，在应用时更依赖于地区经验和使用者的经验。

20 世纪 80 年代，我国引入了孔压静力触探技术后，同济大学、中国地质大学、南京水科院、铁四院等高校和单位随即对该技术进行了有益的探索。近十余年来，东南大学在国内领衔开展了一系列孔压静力触探的应用研究工作，建立了符合国际标准的我国多功能数字式 CPTU 测试技术理论和应用体系，并研发了新一代数字式多功能孔压静力触探（CPTU）测试系统，大力推动了孔压静力触探技术在我国的发展和进一步应用。目前，孔压静力触探日益得到工程界的重视，在陆域的软土地区，以及水域的跨海大桥工程、水下隧道工程、水运工程、海洋工程的勘察中均发挥了重要作用。例如，港珠澳大桥岛隧工程采用了以静力触探为主、钻探为辅的勘察方法，共布置静力触探 383 孔，采用孔压静力触探探头，以海床式设备进行贯入，在土层和土类划分、地基土物理力学性质参数测试方面取得了良好的效果，表现出了速度快、精度高、再现性好的特点。

此外，新型多功能静力触探在我国的研究和应用日益增多，通过调研发现，多功能静力触探的应用需求也在逐步增长。总体而言，国内对其他新型静力触探技术的研究仍相对较少，目前形成的研究成果主要集中在地震波静力触探以及电阻率静力触探两方面，因此本规程对其他新型静力触探技术未详细述及。

表 1 新型静力触探技术

传感器	测量参数	应用情况	研制时间及单位
地震波传感器	波速 V_p 、 V_s	广泛应用，已成熟	加拿大不列颠哥伦比亚大学（UBC，1986）
电阻率传感器	电阻率	有应用，基本成熟	荷兰（1985）
旁压传感器	应力、应变	有应用，未成熟	Fugro（1986）
放射性传感器	重度、含水量	有应用	Delft Geotechnics（1985）
激光荧光传感器	荧光强度	有应用	Hirshfield（1984）
可视化静力触探	图像	有应用	Hryciw, R. D（1997）
热传感器	温度、热传导率	尚未投入使用	Fugro（1986）
侧压力传感器	侧向应力	尚未投入使用	美国加利福尼亚伯克利分校（UCB，1990）

此外，铁道第三勘察设计院集团有限公司研发的“旋转触探”成套技术，解决了静力触探不易穿透较硬地层、测试深度较浅的难题，通过测量锥头贯入阻力、旋转扭矩、排水压力，在地层划分、判别土类、确定地基土参数等方面达到了良好的效果。因旋转触探的机理与静力触探存在显著差异，仪器设备、测试方法、量测参数以及成果应用方法也均不同，因此本规程未将其纳入。

为规范静力触探在公路工程中的应用，统一静力触探的测试技术要求，系统总结公路工程静力触探技术的研究成果和应用经验，推动孔压静力触探及多功能静力触探在公路工程中的进一步应用和发展，并实现确保质量、经济合理的目的，制定本规程。

本规程的制定和施行，对促进行业进步、推动勘察技术现代化、规范从业技术人员对静力触探的操作和应用、提高勘察质量和行业效益，均具有十分重大的现实意义。

1.0.2 本规程适用于各等级公路新建与改扩建工程的静力触探测试。

1.0.3 公路静力触探应做到操作规范、数据可靠、参数合理、评价正确。

【条文说明】

1.0.3 静力触探作为一种原位测试方法和间接的勘探方法，操作规范是获取可靠数据的前提，而可靠的静力触探数据经剔除误差、科学的统计分析后方可形成供工程设计、检测评价等使用的参数。

1.0.4 公路静力触探工作除应符合本规程的规定外，尚应符合国家、行业现行有关规范、标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 静力触探 cone penetration test(CPT)

一种原位测试方法，测试时将一定规格的探头以规定的速率匀速贯入土中，同时按一定深度间距测读探头所受阻力或其他参数。

2.1.2 孔压静力触探 piezocone penetration test(CPTU)

一种原位测试方法，测试时将一定规格的孔压静力触探探头以规定的速率匀速贯入土中，同时按一定深度间距测读探头受到的锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力；贯入过程中断时，还可测量孔隙水压力随时间消散变化的过程值。

2.1.3 地震波静力触探 seismic cone penetration test(SCPT)

一种原位测试方法，测试时将一定规格的地震波静力触探探头以规定的速率匀速贯入土中，按一定深度间距测读探头受到的锥尖阻力、侧壁摩阻力；贯入过程中断时，在地面激发地震波，并测定土层的剪切波波速。

2.1.4 电阻率静力触探 resistivity cone penetration test(RCPT)

一种原位测试方法，测试时将一定规格的电阻率静力触探探头以规定的速率匀速贯入土中，按一定深度间距测读探头受到的锥尖阻力、侧壁摩阻力，以及土层的视电阻率。

2.1.5 探头 probe

探测系统中能测量土层阻力，或兼具孔隙水压力、波速、电阻率、倾斜度等一种或多种参数测量功能的锥形元件，分单桥、双桥、孔压、地震波、电阻率探头及其他多功能探头。

2.1.6 单桥静力触探探头 one-bridge probe

仅可测量比贯入阻力的探头，简称单桥探头。

2.1.7 双桥静力触探探头 two-bridge probe

可同时测得锥尖阻力和侧壁摩阻力的探头，简称双桥探头。

2.1.8 孔压静力触探探头 piezocone probe

可同时测得锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力的探头，简称孔压探头。

2.1.9 地震波静力触探探头 seismic probe

可同时测得锥尖阻力、侧壁摩阻力，并可测得土层剪切波速的探头，简称地震波探头。

2.1.10 电阻率静力触探探头 resistivity probe

可同时测得锥尖阻力、侧壁摩阻力，并可测得土层视电阻率的探头，简称电阻率探头。

2.1.11 圆锥头 cone

静力触探探头顶端的金属元件，用于量测锥尖阻力。

2.1.12 探头有效面积比 cone area ratio

圆锥头顶柱横截面积与圆锥头锥底横截面积的比值。

2.1.13 孔压过滤环 filter element

置于孔压静力触探圆锥头肩部，能将孔隙水压力传递至孔压传感器并维持探头几何形状不变的多孔透水元件。

2.1.14 比贯入阻力 specific penetration resistance

单桥探头贯入土层时所受到的阻力与探头锥底截面积之比。

2.1.15 锥尖阻力 conehead resistance

双桥探头贯入土层时，锥头所受到的阻力与探头锥底截面积之比。

2.1.16 侧壁摩阻力 parictal friction resistance

双桥探头贯入土层时，摩擦筒所受到的摩擦力与摩擦筒侧表面积之比。

2.1.17 摩阻比 friction-resistance ratio

双桥探头贯入土层某一深度时，其侧壁摩阻力与锥尖阻力之比，以百分数表示。

2.1.18 触探孔隙水压力 pore water pressure during penetration

孔压静力触探探头贯入时，土体内部产生的孔隙水压力，包括静水压力和触探超静孔隙水压力。

2.1.19 触探超静孔隙水压力 excess pore water pressure during penetration

触探孔隙水压力中超过静水压力值的水压力。

2.1.20 孔压消散试验 pore pressure dissipation test

孔压静力触探探头贯入过程中，在某一深度停止贯入并保持探头静止时，量测触探孔隙水压力随时间变化过程的试验。

2.1.21 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净锥尖阻力的比值。

2.1.22 净锥尖阻力 net cone resistance

孔压静力触探测试得到的某一深度处经孔压和总上覆应力修正的锥尖阻力。

2.1.23 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净锥尖阻力与竖向有效应力的比值。

2.1.24 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的侧壁摩阻力与净锥尖阻力的比值。

2.1.25 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。

2.1.26 零漂 zero drift

零位受温度影响，以及由于电缆线在静力触探测试过程中随探杆贯入地下或地下水中因电阻、电容与标定时发生变化引起的漂移。

2.1.27 温漂 temperature drift

零位在温度影响下的漂移。

2.1.28 非线性误差 nonlinear drift

电阻应变式探头受制作材质、加工精度、应变片的阻值、粘贴工艺、标定设备等影响，在标定时其满量程应力~应变并不完全符合虎克定律，呈现曲线关系，该曲线与直线之间的最大差值相对满量程的百分率。

2.1.29 重复性误差 repeatability error

探头标定时，重复加荷（或卸荷）至某级荷载时，从仪表上读取的一组输入值的极差相对满量程的百分率。

2.1.30 滞后误差 hysteresis error

探头标定时，重复加荷和卸荷至某级荷载时仪表输出值的极差相对满量程的百分率。

2.1.31 归零误差 zero error

当探头标定卸荷归零时，仪表显示一组不归零值的绝对最大值相对满量程的百分率。

2.1.32 起始感量 starting sense

表征静力触探试验量测系统灵敏度的一个指标，其值为探头标定系数与仪表最小分度值的乘积。

2.2 符 号

2.2.1 静力触探参数

B_q —— 孔压参数比；

f_s —— 侧壁摩阻力；

F_r —— 归一化摩阻比（%）；

I_c —— 土类指数；

p_s —— 单桥探头的比贯入阻力；

q_c —— 锥尖阻力；

q_e ——有效锥尖阻力;
 q_n ——净锥尖阻力;
 q_t ——经孔压修正的锥尖阻力;
 Q_t ——归一化锥尖阻力;
 Q_{tn}^* ——考虑应力水平的归一化锥尖阻力;
 R_f ——摩阻比;
 t_{50} ——孔压消散 50% 所经历的时间;
 t^* ——相应于 t_{50} 的时间因数;
 u_0 ——静水压力;
 u_2 ——锥肩位置测试的孔隙水压力;
 Δu_2 ——触探超静孔隙水压力;
 u_i ——孔压消散试验起始时刻的孔隙水压力;
 u_t ——孔压消散试验 t 时刻的孔隙水压力;
 U ——归一化超孔压比;
 V_s ——剪切波速;
 ρ_s ——视电阻率;
 σ_{v0} ——总上覆应力;
 σ'_{v0} ——有效上覆应力。

2.2.2 土性参数

C_c ——压缩指数;
 C_h ——水平向固结系数;
 D_r ——相对密实度;
 E_s ——压缩模量;
 F_s ——自由膨胀率;
 I_r ——刚度指数;
 k_h ——水平向渗透系数;
 K_0 ——静止侧压力系数;
 OCR ——超固结比;
 S_u^* ——不同试验条件下土的不排水抗剪强度;
 S_t ——灵敏度;

φ' —— 有效内摩擦角；

δ_s —— 湿陷系数。

2.2.3 计算参数

a —— 探头有效面积比；

FS —— 额定荷载下探头及仪表的满量程输出值；

h —— 土层厚度；

K —— 标定系数；

N_{kt} —— 经验圆锥系数；

P_a —— 参考压力值，为 100kPa。

3 基本规定

3.0.1 静力触探可用于下列条件：

- 1 测试深度范围内的土层为素填土、冲填土、软土、黏性土、粉土、砂土、含少量碎石的土、膨胀土、黄土等；
- 2 工作场地所处环境无强磁场干扰。

【条文说明】

3.0.1 本条确定了静力触探的适用土层范围。静力触探以准静态贯入为特点，不适用于坚硬、致密和大颗粒的岩土。当用于砂土和含少量碎石的土时，应结合试验深度要求选择合适的贯入设备，一般宜选用重型静力触探设备。

同时，本条明确了静力触探技术应用于各类公路工程勘察的前提条件，即地层结构应适宜。当地层结构适宜时，在满足相关上位规范要求的前提下，优先考虑采用静力触探进行勘探和原位测试，有利于保证勘察成果质量。

当场地所处环境存在强磁场干扰，影响静力触探试验数据采集时，不宜采用静力触探。

3.0.2 静力触探探头和仪器设备应根据工程需求、测试目的、场地条件、作业条件及环境因素等选用，并应符合下列规定：

- 1 探头性能应满足测试需要，并应定期标定；
- 2 探头类型应按附录 A 选用，饱和软土地基应选用孔压探头，其他地基应优先选用双桥探头；
- 3 贯入设备性能应满足贯入深度、作业水深要求；
- 4 数据采集系统的性能必须稳定可靠，精度和量程应满足工程需要。

【条文说明】

3.0.2 定期对探头进行标定是保证静力触探试验成果质量的基本要求，需要严格执行。

公路工程的场地通常为条带状，且大部分位于非建筑密集区，既有的勘察资料较少，对通过勘察工作揭示土层结构、获取土层物理力学参数的准确性要求更高。

单桥静力触探的成果指标单一，测试精度相对较低，应用时更依赖于长期以来的经验积累。根据调研数据，目前公路行业应用最广泛的是双桥探头，孔压探头等多功能探头也在逐步推广应用。双桥和孔压等多功能静力触探测得的参数更多，更有利于准确地进行土层、土类划分及地基土评价。特别是在饱和软土地基中，准确的评价软土的固结渗透指

标至关重要,结合附录 A 可知,仅有孔压静力触探可实现该功能,故应采用孔压静力触探。在其他地基中,应优先采用双桥探头。对于有特殊测试需求的,可根据需要选用地震波探头、电阻率探头或其他多功能探头。

3.0.3 公路静力触探应按现行行业标准《公路工程地质勘察规范》JTG C20 的勘察阶段要求分别进行,并应与钻探取样、室内试验或其他勘察方法联合使用。

【条文说明】

3.0.3 对于重要工程或缺乏经验的地区,静力触探应与其他勘探、原位测试方法相结合,通过综合勘察的方法取得符合实际的参数,以保证工程的安全性。

3.0.4 重要工程场地或缺乏静力触探使用经验的地区,应进行静力触探和钻探对比试验,对比试验孔数量应与地质条件、工程特性等相适应。

3.0.5 静力触探的安全操作应满足现行国家标准《岩土工程勘察安全标准》GB/T 50585 的有关要求。

3.0.6 公路静力触探宜按准备、测试、资料整理、成果应用的工作程序进行,各阶段工作应符合下列规定:

1 准备工作应包括下列内容:

- 1) 收集工程类型、可能的基础类型及埋深、测试孔位分布、孔深等资料,调查作业区域地形地质条件、作业区域地下管线的分布情况;
- 2) 编制静力触探测试方案;
- 3) 组织人员、选择合适的仪器设备;
- 4) 平整场地;
- 5) 测量定位;
- 6) 安装并检查仪器设备。

2 测试工作应符合下列要求:

- 1) 数据采集应采用自动数据采集仪;
- 2) 测试数据宜实时传输至管理平台;
- 3) 数据存储格式应与后处理软件匹配;
- 4) 静力触探孔与对比试验钻孔的间距不宜大于 2m,并应先进行静力触探后进行其他勘探、测试;
- 5) 测试时应控制探杆垂直度,测试深度应满足勘察、设计要求;

6) 静力触探测试后宜进行封孔。

3 资料整理应符合下列要求：

1) 原始资料、数据应及时汇总、检查、整理；

2) 应绘制单孔静力触探曲线、划分土层界面、统计单孔和场地各土层静力触探参数；

3) 资料整理时应考虑仪器设备、测试方法、操作过程、土层不均匀性等因素对测试结果的影响，并应剔除异常数据。

4 成果应用应符合下列要求：

1) 分析评价岩土工程参数时应结合地区经验；

2) 应同步整理钻探、室内试验及其他测试成果，并进行对比分析；

3) 应收集地区经验资料进行对比分析。

【条文说明】

3.0.6 当进行对比试验时，静力触探孔与对比的勘探孔应位于同一地貌单元中，为尽量减小土的非均质性的影响，间距不宜过大，一般控制在不超过 2m。本条所述间距指勘探孔的中心距。

静力触探测试完成后，应及时对触探孔进行回填，并在孔口采用不透水黏性土封孔，以免地上污水污染地下水。位于隧道结构线范围内的静力触探孔应重视回填封孔，若回填封孔质量较差，将成为地下水涌入隧道的通道，可能对施工造成严重的影响；或者当隧道衬砌背后注浆时，浆液通过钻孔喷出地面，对环境造成污染。

本条中关于静力触探试验资料整理的基本要求，在实际工程中可根据工程需要增加所需内容。出现异常情况时，应及时记录并对因此而产生的异常数据进行当场处理；无法当场处理的，应及时记录相关异常情况，留待室内处理。

静力触探作为一种间接的勘探方法，应用中应强调地区经验的作用。不同地区的土层在成因类型、沉积条件、年代等方面的差异，决定了不同地区土质的独特性，用于解释的经验关系也相应具有明显的地域特征。

3.0.7 静力触探成果可用于下列目的：

1 查明土性变化，划分土层界线；

2 划分土类；

3 评价土的物理力学性质指标；

4 评价地基承载力；

- 5 评价单桩承载力；
- 6 判别场地地基液化。

【条文说明】

3.0.7 单桥和双桥静力触探的应用经验和成果丰富，在划分土层界面、划分土类等方面表现出较高的准确性，在分析评价地基土物理力学性质参数方面也具有较高的参考价值。孔压静力触探测试参数更多，在划分土层界面、划分土类、分析评价地基土物理力学性质参数等方面具有更高的精度。

各地区的地基土天然地基承载力与静力触探参数关系的拟合结果一般均较好，可为勘察设计人员提供有价值的参考。

通过静力触探数据进行土层划分并估算土的物理力学参数后，可结合经验选择土性好的地层作为桩端持力层。同时，通过单桩承载力和静力触探参数关系的拟合，可实现根据静力触探试验成果预估单桩承载力，为设计人员提供参考。

《岩土工程勘察规范》GB 50021 中指出：根据静力触探资料，结合地区经验可进行液化判别；《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018 中也给出了结合静力触探资料进行液化判别的方法。

此外，对采用换填垫层、预压、压实、夯实等方式处理的人工地基，通过静力触探试验可评价处理土的均匀性，进行处理前、后的静力触探参数对比，从而检验地基处理效果。对土方填筑工程，通过静力触探数据与土样的干密度进行关系拟合，从而计算得到填土的压实度，可用于评价土方填筑工程施工质量。鉴于静力触探在检验地基处理效果、评价土方填筑方面的经验仍相对较少，故暂未列入，相关单位在工程实践中可进一步积累应用经验。

4 静力触探应用

4.1 一般规定

4.1.1 公路静力触探应根据勘探目的、任务要求、现场地形地质条件，结合工程类型、基础形式、结构特点和勘察阶段确定测试方案。

4.1.2 一般路基、小型支挡工程、软土路基、涵洞工程等应优先采用静力触探，桥梁工程、桩板式结构工程、隧道工程、膨胀土路基、湿陷性黄土路基等采用静力触探时，应与其他勘探方法联合使用。

【条文说明】

4.1.2 对一般路基、小型支挡工程、软土地基、涵洞工程，在地层结构适宜时采用静力触探可提高勘察精度和效率，当经验不足或需采取土样时可结合钻探手段。对桥梁、隧道、高大支挡工程、特殊土路基，采用钻探与静力触探相结合，有利于准确的揭示地层结构，并通过两者的比较获取更准确的地层参数，从而保证工程的可靠性和安全性。

本条中小型支挡工程指支挡结构高度小于 6m 的支挡工程。

4.1.3 静力触探孔的布置应符合下列要求：

- 1 测试孔位不得有影响安全生产的障碍物，并应避开地下管线、人防工程等地下设施以及影响生产安全的其他潜在因素；
- 2 静力触探孔位附近已有其他勘探孔时，孔位应布置于距原勘探孔 30 倍探头直径以外范围；
- 3 当以静力触探作为主要勘察手段时，每个地貌单元布置的静力触探孔不应少于 3 个；
- 4 地质条件较复杂时宜采用静力触探加密勘探点。

【条文说明】

4.1.3 当已有勘探孔距静力触探孔 30 倍探头直径以外时，原勘探孔对静力触探边界条件的影响已基本可忽略。本条所述间距指勘探孔的中心距。

当以静力触探作为主要勘察手段时，对一般工程，每个场地或地貌单元布置的静力触探孔宜按不少于 6 个控制；对小型工程，应按不少于 3 个控制。

4.1.4 静力触探孔的深度应符合下列要求：

- 1 应根据工程类型、基础类型和地基条件确定；
- 2 作为地基、基础工程勘察的一般性勘探孔时，静力触探孔应进入稳定土层一定深度，并能控制地基主要受力层，作为控制性勘探孔时孔深应满足变形及稳定性计算要求；
- 3 用于查明软弱土层分布时，静力触探孔应穿透软弱土层。

4.2 路基工程

4.2.1 路基工程静力触探应结合路基的工程类型、填挖高度、土体性质等确定测试方案，并应进行下列工作：

- 1 划分土层界面，判定土类；
- 2 分析地基土的天然含水率、重度、压缩系数、黏聚力、内摩擦角，软土的固结系数、不排水抗剪强度等指标；
- 3 评价黏性土、粉土、砂土的状态，并估算天然地基承载力；
- 4 膨胀土地区宜结合曲线形态变化确定大气影响深度；
- 5 湿陷性黄土地区宜结合曲线形态变化确定地下水位。

4.2.2 静力触探用于一般路基初勘应符合下列规定：

- 1 静力触探孔的数量和位置应根据地形地质条件、路基的类型和规模等确定；
- 2 当需对地基土的地基承载力进行检验或需进一步探明深部地质情况时，可优先采用静力触探进行勘探；
- 3 填方段的静力触探孔深度不应小于 5.0m，挖方段的静力触探孔应达到设计高程以下稳定地层中不小于 3.0m；
- 4 有软弱下卧层发育时，静力触探孔应穿过软弱下卧层至硬层内不小于 3.0m。

4.2.3 静力触探用于特殊土路基初勘应符合下列规定：

- 1 静力触探孔的数量和位置应根据地形地质条件、特殊土的性质、路基的类型和规模等确定；
- 2 软土路基工程中，宜进行孔压静力触探，静力触探孔的数量、位置及深度应符合现行行业标准《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02 的有关规定；
- 3 软土地基改建、扩建路基工程中，在充分利用前期勘察资料的基础上，宜进行孔压静力触探；
- 4 膨胀土路基工程中，静力触探孔深度应大于大气影响深度；膨胀土厚度较薄时，孔深应穿透膨胀土层；膨胀土厚度较大时，填方路基孔深应达到设计高程以下 5m~8m，挖

方路基应达到设计高程以下不小于 8m;

5 湿陷性黄土路基工程中,非自重湿陷性黄土场地的孔深应达到基底以下不小于 10m,对自重湿陷性黄土场地,陇西、陇东、陕北、晋西地区孔深不应小于 15m,其他地区不应小于 10m,且不应小于压缩层厚度。

4.2.4 静力触探用于支挡工程初勘应符合下列规定:

1 静力触探孔的数量和位置应根据支挡地段的地形地质条件、支挡工程的类型、规模等确定;

2 挡土墙的墙高大于等于 6.0m 时,宜采用静力触探配合钻探等进行勘探;

3 孔深应满足支挡工程对地基或基础承载力的要求,且应达到基底以下不小于 3.0m。

4.2.5 静力触探用于路基工程详勘应符合下列规定:

1 一般路基详勘宜以静力触探为主,地质条件相同或覆盖层较薄时,可采用简易勘探进行辅助;

2 特殊土路基工程详勘静力触探孔的工作量布置应符合本规程第 4.2.3 条的规定;

3 支挡工程详勘静力触探孔的工作量布置应符合本规程第 4.2.4 条的规定。

4.3 桥涵工程

4.3.1 桥梁工程静力触探应结合桥梁的基础形式、钻孔的布设等确定测试方案,并应进行下列工作:

1 划分土层界面,判定土类;

2 分析地基土的天然含水率、重度、压缩系数、黏聚力、内摩擦角及剪切波速等指标;

3 评价黏性土、粉土、砂土的状态,进行粉土、砂土的液化判别;

4 估算天然地基承载力或单桩极限承载力。

4.3.2 静力触探用于桥梁工程初勘应符合下列规定:

1 静力触探孔的布置应结合桥梁墩台的位置和地貌、地质单元,与其他勘探点沿桥梁轴线或其两侧交错设置,数量应能控制地层等重要地质界限,并满足基础工程的设计要求;

2 对中桥、大桥、特大桥,静力触探孔数量占勘探孔总数量的比例宜符合下表要求:

表 4.3.2 桥梁工程初步勘察中静力触探孔比例

桥梁类型	勘探孔总数量		静力触探孔比例
	工程地质条件简单	工程地质条件较复杂或复杂	
中桥	2~3	2~4	1/3~1/2
大桥	3~6	5~8	1/4~1/2
特大桥	≥6	≥8	1/4~1/2

注：1 大桥、特大桥的勘探点数量尚应根据桥梁规模确定，规模大者宜取大值，规模小者宜取小值；

2 当静力触探孔与钻孔交错布置时，大桥、特大桥的勘探点间距不应大于 200m。

3 对小桥、人行天桥，当工程地质条件简单时，初步了解场地土层分布或具有地区经验的可单独采用静力触探；当工程地质条件较复杂或复杂时，应与钻探配合使用；

4 车行天桥、枢纽互通桥梁的静力触探孔比例宜为 1/3~1/2，匝道桥梁的静力触探孔比例宜为 1/2~2/3；

5 静力触探孔深度应达到基础底面以下不小于 3m 或桩端以下不小于 5m；

6 膨胀土地区桥梁桩基础静力触探的孔深应达到桩端以下不小于 5m，浅基础静力触探的孔深应满足基础对地基承载力的要求，并应大于大气影响深度；

7 黄土地区桥梁桩基础静力触探的孔深应达到持力层的底面，作为控制性勘探点时应达到非湿陷性黄土层顶面。

【条文说明】

4.3.2 对于中桥、大桥、特大桥初步勘察阶段，勘探孔总数量在《公路工程地质勘察规范》JTG C20 所规定的钻孔数量的基础上适当增加，并设置一定比例的静力触探孔。通过相互对比验证，有利于提高勘察成果质量。

目前，安徽省的阜阳至淮滨高速公路、合肥至周口高速公路（寿县至颍上段、颍上至临泉段）、亳州至蒙城高速公路（谯城至涡阳段、涡阳至蒙城段）、徐州至淮北至阜阳高速公路（亳州段、阜阳段）等多条高速公路均采用了本条中的方法，静力触探孔的布置比例总体达到 1/3~1/2，实施效果良好。部分工程初勘的静力触探工作量情况见表 2。

表 2 部分桥梁工程初勘静力触探工作量一览表

序号	项目名称	静力触探工作量 (米/孔)	静力触探孔 数量比例
1	阜阳至淮滨高速公路安徽段 (初勘)	4055/91	48.1%
2	合肥至周口高速公路颍上至 临泉段(初勘)	8899/228	46.5%

3	合肥至周口高速公路寿县至 颍上段（初勘）	3840/130	32.3%
4	亳州至蒙城高速公路谯城至 涡阳段（初勘）	559/14	33.3%
5	亳州至蒙城高速公路涡阳至蒙 城段（初勘）	4099/95	33.8%
6	徐州至淮北至阜阳高速公路亳 州段（初勘）	1879/46	45.1%
7	徐州至淮北至阜阳高速公路阜 阳段（初勘）	3317/80	40.8%

4.3.3 静力触探用于桩板式结构工程初勘应符合下列规定：

- 1 静力触探孔的数量和位置应根据地形地质条件、桩板式结构的跨径和规模等确定；
- 2 静力触探孔可与钻孔沿轴线或其两侧交错布置；
- 3 勘探点间距宜为 100m~200m，地质条件简单时可取大值，地质条件较复杂或复杂时可取小值；
- 4 静力触探孔深度应符合本规程第 4.3.2 条 5~7 款的有关规定。

【条文说明】

4.3.3 桩板式结构是近年来兴起的一种新型公路构筑物，该结构由工厂化预制的板梁、管桩组成框架结构体系，桩的纵向间距一般为 6m~15m，横向间距一般为 3m~5m，其结构形式与高桩式码头或桩基栈桥相似。

4.3.4 静力触探用于涵洞工程初勘应符合下列规定：

- 1 静力触探孔的数量和位置应根据地形地质条件、涵洞的类型和规模等确定；
- 2 砂土地基中，静力触探孔深度宜达到基础底面以下 3.0m~8.0m；
- 3 粉土、黏性土地基中，静力触探孔深度宜达到基础底面以下 4.0m~10.0m；
- 4 特殊土地区的静力触探孔深度应符合本规程第 4.3.2 条相应基础形式的规定。

4.3.5 静力触探用于桥梁工程详勘应符合下列规定：

- 1 静力触探孔的布置应符合下列规定：
 - 1) 工程地质条件简单时，静力触探孔宜与钻孔沿桥梁轴线或其两侧隔墩交错布置；
 - 2) 工程地质条件较复杂时，静力触探孔宜与钻孔逐墩交错布置；
 - 3) 工程地质条件复杂时，应结合现场地质条件及基础工程设计要求确定静力触探孔及钻孔的数量。

2 采用天然地基或浅基础时，静力触探孔的深度应达到基础底面以下不小于 3m；

3 采用桩基础时，静力触探孔的深度应达到桩端以下不小于 5m，特殊土地基中孔深尚应符合本规程第 4.3.2 条 6~7 款的有关规定。

【条文说明】

4.3.5 部分桥梁工程详勘的静力触探工作量情况见表 3。

表 3 部分桥梁工程详勘静力触探工作量一览表

序号	项目名称	静力触探工作量 (米/孔)	静力触探孔 数量比例
1	阜阳至淮滨高速公路安徽段 (详勘)	6209/139	43.0%
2	合肥至周口高速公路颍上至 临泉段(详勘)	15202/344	37.2%
3	合肥至周口高速公路寿县至 颍上段(详勘)	10019/669	55.6%
4	亳州至蒙城高速公路谯城至 涡阳段(详勘)	2599/59	45.7%
5	亳州至蒙城高速公路涡阳至蒙 城段(详勘)	4777/131	38.4%
6	徐州至淮北至阜阳高速公路亳 州段(详勘)	1934/47	37.3%
7	徐州至淮北至阜阳高速公路阜 阳段(详勘)	6100/135	45.6%

在上述平原区高速公路桥梁工程详勘中，静力触探孔的比例总体达到 1/3~1/2，少数甚至超过 1/2。初勘中已基本查明桥梁建设场地地质条件，且进行了静力触探与钻探的对比试验，验证了静力触探在土层划分、确定土层物理力学性质指标等方面的可靠性。因此，相较于初勘，上述工程中大部分在详勘中进一步加大了静力触探的应用比例。对于其中一部分工程，因初勘中发现局部区域分布有大量铁锰质结核或极密实砂层，静力触探难以穿越，故在详勘中减少了用量。

4.3.6 静力触探用于桩板式结构工程详勘应符合下列规定：

1 静力触探孔宜与钻孔沿轴线或其两侧交错布置，勘探点间距宜为 30m~50m，当工程地质条件简单时可取大值，工程地质条件较复杂时可取小值，工程地质条件复杂时宜加密勘探点，间距宜取 15m~25m；

2 当采用打入法或静压法沉桩时，勘探点间距可取较小值，当采用植入法成桩时可

取较大值；

- 3 静力触探孔的数量宜为勘探孔总数的 $1/2 \sim 2/3$ ；
- 4 静力触探孔深度应符合本规程第 4.3.5 条 4~5 款的有关规定。

【条文说明】

4.3.6 《水运工程岩土勘察规范》JTS 133 中规定，对高桩式码头或桩基栈桥，在施工图设计阶段，当岩土层简单时勘探点间距可取 30m~50m，岩土层复杂时勘探点间距可取 15m~25m。本条参考了该标准的上述规定。

4.3.7 静力触探用于涵洞工程详勘应符合本规程第 4.3.4 条的规定。

4.4 隧道工程

4.4.1 隧道工程静力触探应结合隧道类型、隧道埋深等确定测试方案，并应进行下列工作：

- 1 划分土层界面，判定土类；
- 2 分析、估算地基土的天然含水率、重度、压缩系数、黏聚力和内摩擦角等指标；
- 3 评价黏性土、粉土、砂土的状态，进行粉土、砂土的液化判别；
- 4 估算天然地基承载力。

4.4.2 静力触探用于盾构隧道初勘应符合下列规定：

- 1 静力触探孔的位置应结合隧道位置、工程部位和地质、地貌单元，与钻孔等其他勘探点交错设置，数量和深度应能控制地层等重要地质界线；
- 2 隧道洞身的静力触探孔应布置在隧道结构外侧不小于 8m 的位置，单洞时宜与其他勘探点沿洞身两侧交错设置，双洞并行时宜多排交错布置；
- 3 隧道线上的静力触探孔进入隧道底板以下的深度不应小于 2.0 倍隧道的外径；
- 4 每个盾构隧道工作井的静力触探孔数量不宜少于 1 个，静力触探孔与其他勘探点的间距宜为 20m~35m。

4.4.3 静力触探用于沉管隧道初勘应符合下列规定：

- 1 静力触探孔的位置应结合隧道位置、工程部位和地质、地貌单元，与钻孔等其他勘探点交错设置，数量和深度应能控制地层等重要地质界线，并应满足地基基础工程的设计要求；
- 2 海洋沉管隧道勘探点宜优先采用静力触探；
- 3 敞开段、暗埋段的静力触探孔应布置于隧道轴线或其结构边缘外侧 3m~5m 处；
- 4 沉管段的静力触探孔应布置于基槽两侧，当基槽宽度大于 30m 时，基槽中部宜布

设静力触探孔；

5 静力触探孔进入隧道底板以下的深度宜为 0.5~1.0 倍隧道的底宽，且不宜小于河床或海床下 40m。

4.4.4 静力触探用于堰筑隧道初勘应符合下列规定：

1 静力触探孔的位置应结合隧道位置、工程部位和地质、地貌单元，与钻孔等其他勘探点交错设置，数量和深度应能控制地层等重要地质界线，并应满足地基基础工程的设计要求；

2 静力触探孔应布置于基坑两侧，当基坑宽度大于 30m 时，基坑中部宜布设静力触探孔；

3 静力触探孔达到桩底或地下连续墙底以下的深度宜为 5m~10m，并应穿过软土层，当有降水设计需要时，尚应穿过透水层。

4.4.5 静力触探用于盾构隧道、沉管隧道及堰筑隧道详勘时宜符合下列规定：

1 宜采用静力触探加密勘探点，静力触探孔数量占勘探孔总数量的比例、静力触探孔的深度均不宜低于初勘阶段；

2 对地层分布变化较大，或勘探深度范围内有高灵敏度软黏土、饱和砂土的场地，当拥有可靠的地区经验或对比试验数据时，静力触探孔数量占勘探孔总数量的比例宜为 1/2~2/3。

【条文说明】

4.4.5 对于初勘已基本查明桥梁建设场地地质条件，且进行了静力触探与钻探的对比试验，验证了静力触探在土层划分、确定土层物理力学性质指标等方面的可靠性的隧道工程，或者因工程需要以及现场作业条件的限制，钻探不能或难以满足工程要求时，可适当提高静力触探孔的应用比例至 1/2~2/3。

表 4 部分隧道工程静力触探工作量一览表

序号	项目名称	静力触探工作量 (米/孔)	静力触探孔 数量比例
1	港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道 (补勘)	374	82.4%
2	亳州市汤王大道涡河隧道工程 (详勘)	710/24	52.1%

港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道共包含 33 个节段，总长度 5.67km。该工程沉管隧道埋置深度大，管底土层工程性质差异较大，且施工过程中基础土体会经历开挖卸荷、管节沉放、回填再加载的过程，在前期按照《公路工程地质勘察规范》JTG C20 完成的初勘、详

勘已获得的地质参数基础上，需要对沉降分析、承载力、地基刚度、渗透系数评价等进行更有针对性的勘察工作，重点补充及验证相关岩土参数，故安排了进一步的补勘工作。为了降低海床软土土体取样受扰动对勘察结果的影响、减少海上作业与通航运营船舶的相互干扰，补勘中采用了以静力触探 CPTU 为主、传统钻探为辅的勘察技术。其中，布置了 CPTU 孔 374 个、其他原位测试孔 39 个、取样孔 41 个，静力触探孔的比例达到 82.4%，取样孔和其他原位测试孔均布置在 CPTU 孔邻近位置，以进行对比验证。通过高质量的取样及室内、室外试验，对 CPTU 的分析结果进行验证、修正，确保了 CPTU 成果的可靠性和准确性。

亳州市汤王大道涡河隧道位于涡河、洪河河道及河漫滩区域，隧址区第四系松散层厚度巨大，且以砂性土和粉质土为主。隧道全长 1241m，其中敞开段 359m，暗埋段 882m，主体工程为水下隧道，采用围堰明挖法施工。砂土为无黏性散粒结构，不稳定、易扰动，且取原状样困难，通常通过标准贯入试验确定其密实程度，通过室内颗分试验进行定名，但上述常规方法不能满足水下隧道设计的岩土参数要求。因此，该工程详勘中提高了原位测试的比例，共布置了静力触探孔 24 个，钻孔 22 个，并主要依靠静力触探等原位测试方法和工程经验综合确定了砂土的有关参数，取得了很好的效果。

4.4.6 静力触探用于特殊土地区隧道工程初勘和详勘时，应符合现行行业标准《公路工程地质勘察规范》JTG C20 的有关规定。

5 仪器设备

5.1 一般规定

5.1.1 静力触探的仪器设备包括以下组成部分：

1 探头与量测系统：探头、电缆、数据采集仪、深度计、地震仪、触发装置、电阻率测试仪等；

2 贯入系统：主机、探杆、反力装置、测试载体。

【条文说明】

5.1.1 静力触探主机一般有手摇式触探机、液压式触探机及车载式触探机，其基本性能见下表：

表 5 常用静力触探主机类型

主机类型	贯入力	反力装置	特点
手摇式	2t~3t	地锚	轻便灵活、对场地要求低，贯入力较小，常用于道路及其他狭小场地的勘察工作中，应用广泛。
车载式	5t~20t	车载加地锚	作业环境好，对场地要求高，贯入力较大，多用于场地较为开阔、平坦的勘察工作中，应用较少。
液压式	5t~20t	车载加地锚	多为履带式，对场地要求一般，贯入力较大，可用于桥梁勘察工作中，应用广泛。

5.1.2 仪器设备应符合下列规定：

- 1 应符合现行国家标准《土工试验仪器 触探仪》GB/T 12745 的有关要求；
- 2 使用前应进行试用，确认合格后方可使用。

5.1.3 未经标定的探头不得在生产中使用，探头标定应符合下列规定：

- 1 探头标定系数的有效期不得大于 3 个月，逾期应重新标定；
- 2 出厂使用前及在重大工程使用前，宜进行检验性标定；
- 3 在使用中发现触探数据异常时，应及时进行校验标定或重新标定。

5.1.4 地震波、电阻率探头中，力或孔压测试模块的结构、尺寸及性能等应符合本规程单桥、双桥或孔压探头的有关规定。

【条文说明】

5.1.4 为使地震波、电阻率静力触探测得的力和孔压参数能采用现行方法和经验进行分析、计算和应用，上述探头中测试力和孔压模块的结构、尺寸和性能应与标准的单桥、双桥或

孔压探头相同，故可在常规的标准探头后增加配置相应的功能模块。

5.2 探头与量测系统

5.2.1 单桥探头的规格和加工标准应符合表 5.2.1-1 的规定，双桥探头的规格和加工标准应符合表 5.2.1-2 的规定。

表 5.2.1-1 单桥探头的规格和加工标准

探头型号	探头截面积 (cm ²)	探头直径 (mm)	有效侧壁长度 (mm)	锥角 (°)
I-1	10	35.7 ^{+0.18} ₀	57 ±0.28	60 ±1
I-2	15	43.7 ^{+0.22} ₀	70 ±0.35	60 ±1

表 5.2.1-2 双桥探头的规格和加工标准

探头型号	探头截面积 (cm ²)	摩擦筒表面积 (cm ²)	探头直径 (mm)	摩擦筒长度 (mm)	锥角 (°)
II-0	10	150	35.7 ^{+0.18} ₀	134 ±0.70	60 ±1
II-1	10	200	35.7 ^{+0.18} ₀	179 ±0.90	60 ±1
II-2	15	300	43.7 ^{+0.22} ₀	219 ±1.10	60 ±1

【条文说明】

5.2.1 单桥、双桥探头是传统的静力触探探头，目前国内 10cm² 和 15cm² 两种截面积的探头使用均较为广泛。单桥探头的结构如图 1 所示，双桥探头的结构如图 2 所示。

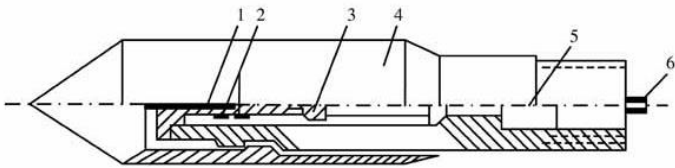


图 1 单桥探头的结构

1-顶柱；2-电阻应变片；3-传感器；4-外套筒；5-密封圈；6-四芯电缆

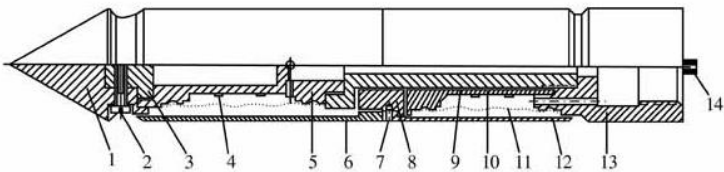


图 2 双桥探头的结构

1-锥尖；2-螺钉；3 压盖；4-应变片；5-下传感器；6-下摩擦筒；7-固定螺钉；8-传力环；9-连接杆；
10-上传感器；11-防水薄膜；12-上摩擦筒；13-传感器盖；14-八芯电缆

5.2.2 当单、双桥探头的尺寸和外形满足下列表格中对应的任一更换条件时，应及时更换：

1 单桥探头

表 5.2.2-1 单桥探头的更换条件

探头断面积 A (cm^2)	更换条件		
	锥头直径 D (mm)	锥高 H (mm)	外形
10	<34.8	<25	(1) 锥面及套筒变形明显，出现刻痕； (2) 锥尖压损； (3) 套筒活动不便。
15	<42.6	<31	

2 双桥探头

表 5.2.2-2 双桥探头的更换条件

探头断面积 A (cm^2)	更换条件			
	锥头直径 D_1 (mm)	摩擦筒直径 D_2 (mm)	锥高 H (mm)	外形
10	<34.8	<34.8	<25	(1) 锥面套筒出现明显变形或多处刻痕； (2) 摩擦筒活动不便； (3) $D_2 < D_1$ 时； (4) 锥尖压损。
15	<42.6	<42.6	<31	

5.2.3 单、双桥探头的性能应符合下列规定：

- 1 应具有高强度、耐磨损的性质；
- 2 锥面不应有明显的刻痕或凹面，双桥探头的侧壁摩擦筒直径不得小于锥头直径；
- 3 应能在 $-10^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$ 的环境温度中正常工作；
- 4 非线性误差、重复性误差、滞后误差、归零误差均应小于 $1.0\%\text{FS}$ ，零位温漂值应小于 $0.05\%\text{FS}/^{\circ}\text{C}$ ；
- 5 绝缘电阻不应小于 $500\text{M}\Omega$ ，且在 500kPa 恒水压下 2h 后绝缘电阻仍不应小于 $500\text{M}\Omega$ ；
- 6 允许过载能力不应小于额定荷载的 1.2 倍。

【条文说明】

5.2.3 探头的技术性能决定了静力触探试验数据的准确性，其内含高灵敏电子元件，应经常对外观、尺寸等进行检查。侧壁摩擦筒的直径不得小于锥头直径，否则会大幅度减小侧壁阻力。

目前国内生产的探头一般能在 $-10^{\circ}\text{C}\sim+45^{\circ}\text{C}$ 温度范围内正常工作。

非线性误差是影响试验精度的重要原因之一，非线性误差、重复性误差、归零误差一般与传感器、应变片的材质及贴片的质量有关，均应小于 $1.0\%\text{FS}$ 。

绝缘电阻过小会导致探头内部的电桥无法平衡，绝缘电阻变小的主要原因是由于地层深部有较大的水压力，水进入探头内部使传感器及应变片受潮。

5.2.4 孔压探头的规格和加工标准应符合表 5.2.4 的规定：

表 5.2.4 孔压探头的规格和加工标准

锥底面积 (cm^2)		10
锥头	锥角 θ	60 ± 1
	公称直径 D_1 (mm)	$35.7 \begin{smallmatrix} +0.18 \\ 0 \end{smallmatrix}$
	圆柱高度 h (mm)	≤ 10
	有效面积比 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)	$35.7 \begin{smallmatrix} +0.35 \\ +0.20 \end{smallmatrix}$
	公称长度 L (mm)	$133.7 \begin{smallmatrix} +0.60 \\ -0.90 \end{smallmatrix}$
	有效表面积 (cm^2)	150
锥头与摩擦筒间距 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)		$D_1-1.1 \leq D_3 \leq D_1-0.3$

注： 1 有效面积比 $a=A_n / A_c$ ， $A_c=0.25\pi D_1^2$ ；

2 探头与摩擦筒间距 e_1 、摩擦筒与探头管间距 e_2 为工作状态下的间距；

3 对同一枚探头， D_2 必须大于 D_1 。

【条文说明】

5.2.4 孔压静力触探探头及其结构组成如图 3 所示。



图 3 孔压静力触探探头

5.2.5 孔压探头的孔压过滤环应安装在圆锥头肩部位置。

【条文说明】

5.2.5 大量测试结果表明，CPTU孔压测量的结果与孔压过滤环的位置密切相关，很多研究者对此进行了系列的理论和试验研究。孔压过滤环位置一般有三种:圆锥头表面(u_1)，圆锥头肩部(u_2)，侧壁摩擦筒后部(u_3)。目前，国际上普遍采用锥肩位置的孔压(u_2)进行测试分析。这是由于：一是透水单元不易损坏；二是易于饱和；三是受孔压元件压缩的影响小；四是孔压消散受贯入过程影响小；五是量测的孔压能直接用于修正锥尖阻力。因此，本规程规定孔压过滤环设置在锥肩位置(u_2)，与国际普遍要求保持一致。本规程中涉及的触探孔隙水压力均为 u_2 。

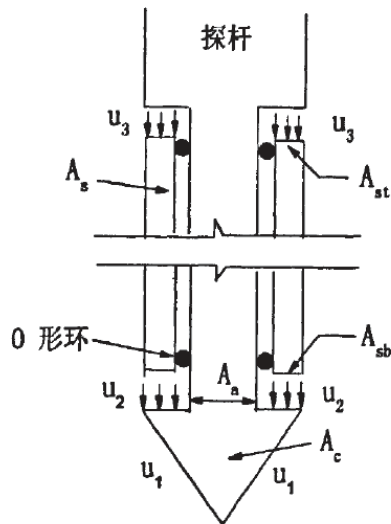


图 4 孔压过滤环在不同位置的孔压示意图

5.2.6 当孔压探头的尺寸和外形满足下列表格中对应的任一更换条件时，应及时更换：

表 5.2.6 孔压探头的更换条件

探头断面积 A (cm^2)	更换条件			
	锥头直径 D_1 (mm)	摩擦筒直径 D_2 (mm)	锥高 H (mm)	外形
10	< 34.8	≤ 34.8	< 31	(1) 锥面或套筒出现明显变形或多处刻痕； (2) 摩擦筒活动不便； (3) $D_2 < D_1$ 时； (4) 锥尖压损； (5) 孔压过滤环与土接触面凹于锥头表面或透水失效

5.2.7 孔压探头的性能应符合下列规定：

- 1 非线性误差、重复性误差、滞后误差、归零误差均不应大于 1.0%FS；
- 2 绝缘电阻不应小于 $500 \text{ M}\Omega$ ，且在 2 MPa 恒水压下 6h 后绝缘电阻仍不应小于 $300 \text{ M}\Omega$ ；
- 3 在满负荷水压条件下，孔压传感器的应变腔的体积变化量不应大于 4 mm^3 ，体积变化率不应大于 0.2%；
- 4 传感器的温度敏感性能应符合表 5.2.7 的规定：

表 5.2.7 传感器温度敏感性能

测试参数	性能指标 (kPa/°C)
锥尖阻力	≤ 2.0
侧壁摩阻力	≤ 0.1
孔隙水压力	≤ 0.05

【条文说明】

5.2.7 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，探头的非线性误差应小于满量程的1%，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，都应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。这两种误差均应小于满量程的1%，在检验时必须排除仪器本身的误差影响，一般可用线性好、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。

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应大于 $500\text{M}\Omega$ ，探头使用后绝缘电阻衰减是允许的，但不能低于 $500\text{M}\Omega$ 。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。

探头的密封质量是影响探头使用寿命的主要因素。在探头贯入过程中，由于地下水有水头压力，若探头密封不好，土中的水就会进入探头内部，使传感器受潮甚至被水浸泡，致使传感器不能正常工作，甚至损坏探头。

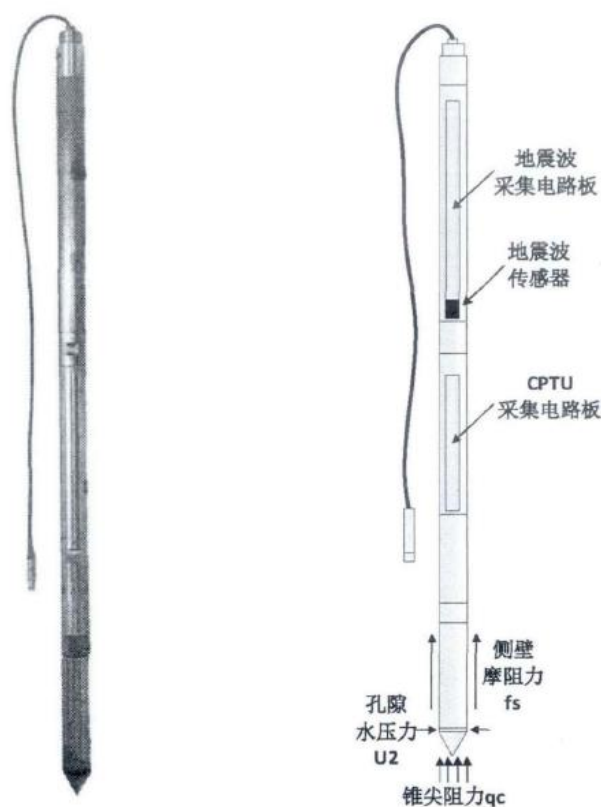
孔压应变腔体(容)积改变量(ΔV)反映土中水进、出于孔压探头的多少， ΔV 值过大将不利于对探头周围土体的固结性质做出正确解释，故将 ΔV 值的上限定为 4mm^3 ，同时规定体积变化率 $\Delta V/V$ 应小于0.2%。该规定旨在使应变腔尽可能大，让微量的蒸发失水不至于造成明显的测试误差；同时，也保证应变腔不可过小，避免孔压变化不明显，以保证标定的灵敏度足够高。

5.2.8 地震波探头的地震波测试模块应符合下列规定：

- 1 地震波传感器宜采用三分量检波器或三轴加速度计；
- 2 检波器的性能应符合下列规定：
 - 1) 固有频率允许偏差为 $\pm 10\%$ ；
 - 2) 振幅允许偏差为 $\pm 10\%$ ；
 - 3) 相位允许偏差为 $\pm 0.5\text{ms}$ ；
 - 4) 失真度不大于 0.2% ；
 - 5) 绝缘电阻不小于 $10\text{M}\Omega$ 。
- 3 加速度计的频率范围宜为 $1\text{Hz}\sim 10\text{kHz}$ 。

【条文说明】

5.2.8 地震波静力触探探头及其结构形式如图 5 所示。地震波传感器一般可采用检波器或加速度计，为使采集的地震波信号具有高清晰度的频谱，例如避免拖尾效应，推荐采用加速度计。当条件许可时，宜采用三轴加速度计。



(a) 地震波静力触探探头实物图 (b) 地震波静力触探探头结构示意图

图 5 地震波静力触探探头

5.2.9 电阻率探头的电阻率测试模块应符合下列规定：

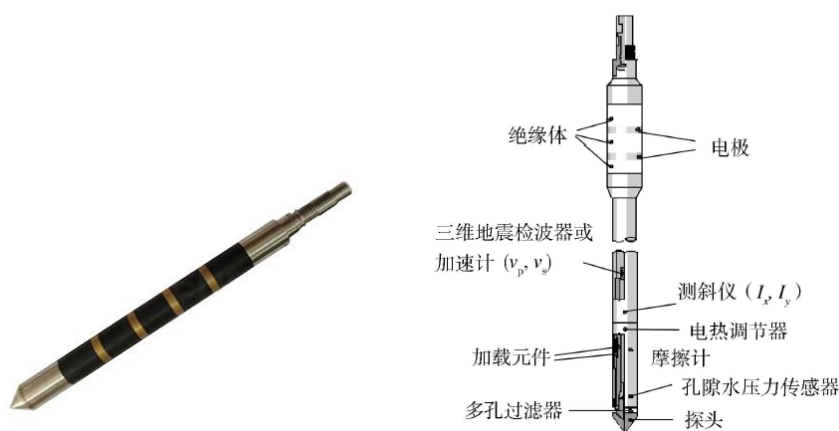
- 1 电极应采用对称四极排列方式设置；

- 2 电极的材质宜为黄铜；
- 3 电极宜为环形，电极环的宽度宜为 5mm~20mm；
- 4 电极的间距应根据电极的布置方式、探头的尺寸等确定，相邻的供电电极和测量电极的距离宜为 10mm~50mm；
- 5 电极之间应设置塑料绝缘体，塑料绝缘体的电阻率不应小于 $20\Omega\cdot\text{m}$ ；
- 6 电阻率测试量程宜为 $(0\sim 5000)\Omega\cdot\text{m}$ 。

【条文说明】

5.2.9 由于探杆周围土中的电场复杂，且边界条件难于控制，使得探头所测得的土电学特征很复杂。通过欧姆定律可得出触探试验的理论方程，土电阻率是通过测试恒定电流下两电极间的电压降 ΔV ，并根据欧姆定律计算出土的电阻 R 的大小而得出的。因此，需要对电阻率探头进行规定。

RCPTU 电阻率测试装置主要由 4 个铜质电极以及内部的电路系统等组成，铜电极之间用绝缘塑料隔离开来，形成 O 型环状密封系统。通过其内部的电路系统与 4 个电极同步、连续地测量内部两电极间的电压变化，并根据欧姆定律原理编制计算程序计算电极周围土体的电阻率大小。电阻率静力触探探头及其结构形式如图 6 所示。



(a) 电阻率静力触探探头实物图

(b) 电阻率静力触探探头结构示意图

图 6 电阻率静力触探探头

5.2.10 探头的精度等级宜根据测试参数的起始感量确定，各精度等级探头的起始感量应符合表 5.2.10 的规定：

表 5.2.10 探头的精度等级

标准 (kPa) / 精度 等级 / 测试参数	I 级	II 级	III 级
比贯入阻力 或锥尖阻力	$Y_0 \leq 20$	$20 < Y_0 \leq 50$	$50 < Y_0 \leq 100$
侧壁摩阻力	$Y_0 \leq 1$	$1 < Y_0 \leq 3$	$3 < Y_0 \leq 5$
孔隙水压力	$Y_0 \leq 2$	$1 < Y_0 \leq 5$	$5 < Y_0 \leq 10$

注： 1 I 级探头宜用于软土、松散的砂土和粉土，且用于软土地基的探头尚应满足：比贯入阻力或锥尖阻力的起始感量小于 10kPa，侧壁摩阻力起始感量小于 0.1kPa；
 2 II 级探头宜用于一般黏性土、中密的砂土和粉土；
 3 III 级探头宜用于硬黏土、密实的砂土和粉土。

5.2.11 探头的粗糙度、表面硬度等应符合下列要求：

- 1 套筒和摩擦筒表面纵向粗糙度应小于 $3.2 \mu\text{m}$ ；
- 2 探头表面硬度 HR 宜为 45~50；
- 3 锥头、摩擦筒与探头管之间的滑动间隙不宜大于 $150 \mu\text{m}$ ；
- 4 锥头、摩擦筒与探头管的同轴度公差为 $\phi 0.2\text{mm}$ 。

5.2.12 探头应放置于防震箱内，并应存放于干燥、阴凉处，避免烈日暴晒和冰冻；带透水元件的孔压探头锥尖，应浸没于脱气液体中并存放在专用密封容器内，脱气液体宜采用水或硅油。

【条文说明】

5.2.12 探头是灵敏性测量部件，其传感器会受到外部环境的影响。因此，探头应贮存应配备防潮、防振的专用探头箱(盒)中，并存放于干燥、阴凉处。事先饱和的孔压过滤环若暴露在空气中，会出现失水蒸发，造成不饱和，因此本条要求饱和的孔压过滤环应贮存于盛有脱气液体(甘油或硅油)的专用密封容器内，使透水元件始终处于饱和状态。

5.2.13 与探头配套使用的电缆应具有良好的绝缘性、防水性和防冻性，各芯之间应相互屏蔽。

5.2.14 数据采集仪应满足下列要求：

- 1 应具有采集、存储及传输数据的功能，并可显示贯入深度和曲线；
- 2 应能在 $-10^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$ 的环境温度中正常工作；
- 3 应全密封设计，并具有防尘、抗湿、抗震等性能。

5.2.15 深度计宜具有自动记录功能，且应符合下列要求：

- 1 量程应满足贯入装置的工作方式与行程要求；
- 2 精度应满足 1.0%FS；
- 3 应能修正液压缸回程、夹具打滑等引起的探杆位移；
- 4 应具备调零复位功能。

【条文说明】

5.2.15 目前应用最广泛的深度记录仪多采用人工打点记录数据的方法，受人为因素影响较大，记录数据的准确性较差，且需专人操作，用工效率较低。

早期采用的自动记录深度装置主要是角机，是将探杆中的传输电缆穿过由夹紧轮和滑动轮组成的系统。滑动轮的轨道深度约为2毫米，并配有触点和微动开关。当探杆穿过时，传动电缆通过与滑轨的摩擦带动滑动轮转动。滑动轮每转动一次，轮上的触点就会撞击微动开关一次，产生脉冲信号，并传输到深度计和数据采集仪器。与人工记录相比，大大节省了人力，提高了记录的准确性。但在实际应用中，发现电缆和滑轮轨道容易出现滑轨现象，滑轮不连续旋转，导致记录深度不准确，需要不断人工校正，降低了测试效率。

目前已出现采用拉绳传感器进行自动记录深度的装置，并具有一定规模的应用，实际应用效果良好。

5.2.16 地震仪除应满足本规程第 5.2.14 条的规定外，尚应符合下列规定：

- 1 接收通道应具有良好的 consistency；
- 2 模/数转换精度不应小于 16 位；
- 3 最小采样间隔不应大于 0.1ms；
- 4 增益动态范围不应小于 96dB；
- 5 通频带范围应为 0.5Hz~4000Hz；
- 6 输入阻抗不应小于 5k Ω ；
- 7 采样长度不应小于 1024 样点/道；
- 8 地震波的最小周期内应能采集不少于 4 个样点。

5.2.17 触发装置应符合下列规定：

- 1 触发信号的延迟时间不应大于 0.05ms；
- 2 应起跳尖锐，振幅应足以触发地震仪内的计时电路。

5.2.18 电阻率测试仪除应满足本规程第 5.2.14 条的规定外，尚应符合下列规定：

- 1 输入阻抗应大于 20 M Ω ；

- 2 对 50Hz 工频抑制应大于 40dB;
- 3 电压通道电平不应低于 5V;
- 4 电压分辨率不应低于 0.01mV;
- 5 电流分辨率不应低于 0.1mA;
- 6 最大电压不应小于 450V;
- 7 最大电流不应小于 3A。

5.3 探头标定

5.3.1 探头标定应采用固定桥压法。

5.3.2 探头力传感器的标定设备应符合下列规定:

- 1 探头标定设备应包括测力计、标定支架及其他辅助设备;
- 2 测力计的额定量程宜为探头额定量程的 1.5 倍~2.0 倍,其精度不得低于三等标准,并应每年标定不少于 1 次;
- 3 标定支架的压力作用线应与探头的中心线同轴;
- 4 在最大加载的情况下标定支架应能保持稳定;
- 5 标定过程中,力的传递误差不应大于 0.5%。

5.3.3 孔压传感器的标定设备应符合下列规定:

- 1 标定设备应采用专用真空饱和率定器;
- 2 真空饱和率定器的数字压力仪表的精度不应低于 0.2 级。

5.3.4 测力传感器标定前应进行下列准备工作:

- 1 标定宜选择在 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 的室温环境下进行;
- 2 对输出模拟信号,应将探头连同配套使用的仪器、电缆一起标定,当现场调整电缆长度时尚应根据实际使用电缆长度进行线长标定系数修正,数字探头可单独标定;
- 3 将探头垂直稳固安置在标定架上,应使标定架的压力作用线与被标定的探头中心线重合,并应不使电缆线受压;
- 4 连接探头与测量仪表,安装标定设备就绪;
- 5 标定静力触探双桥探头侧壁摩阻力传感器时,应卸去锥头,使荷载加在摩擦筒上;
- 6 对首次使用的新探头,在正式标定前应反复预压至额定荷载,直至视零点与最大值稳定为止,预压次数宜为 3 次~5 次。

5.3.5 孔压传感器标定前应进行下列准备工作:

- 1 孔压探头安装在有专门标定装置的饱和容器中进行饱和,饱和后不得将探头从容器

中取出；

2 饱和容器密封抽真空压力宜为-0.1MPa，且保持时间不应少于 60min；负压吸入脱气甘油后，孔压过滤环与孔压传感器的连接通道应充分饱和；

3 连接探头、电缆和测量仪，同时对仪器调零。

【条文说明】

5.3.5 标定孔压传感器是为了得到采集仪表读数与探头所测孔隙水压力之间的关系，从而获得孔压标定系数。标定需要在如图7所示的专门的孔压系统真空饱和器与加压装置上进行。探头饱和和标定后，将饱和室上盖与探头吊筒一起取出，迅速放置在饱和液容器中，并应在饱和液中分离吊筒。在标定试验过程中，应记录逐级加、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非线性误差、滞后误差、重复性误差和归零误差，并给出探头的标定系数。

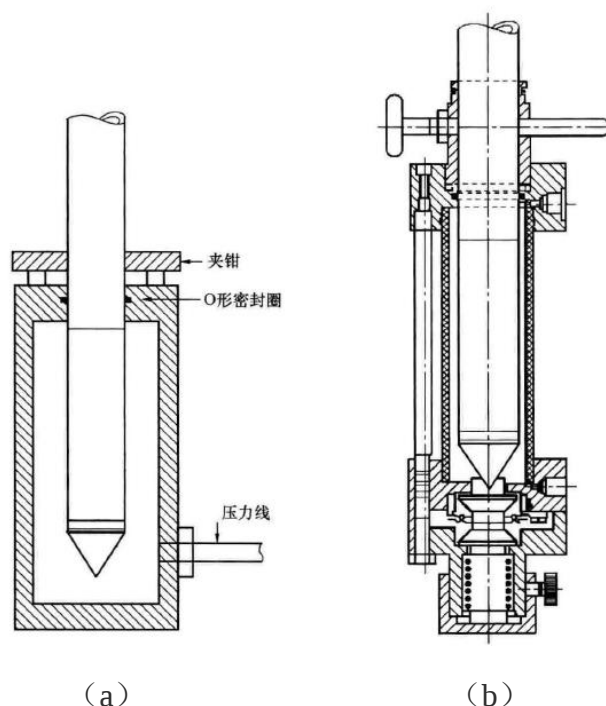


图 7 孔压传感器的标定

5.3.6 测力传感器的标定应按下列步骤进行：

- 1 按预定的最大加载量分成 7~10 级，在第一级荷载区间内，宜进一步细分成 3 级；
- 2 逐级加载并记录仪表的读数；
- 3 加载到最大荷载后，逐级卸载同时记录各级荷载下仪表的读数；
- 4 重复上述加载和卸载过程，不得少于 3 次；
- 5 计算各级荷载下各次加载和卸载的仪表读数平均值 $\bar{X}_i^+$ 和 $\bar{X}_i^-$ ，继而计算第 i 级荷载加卸载的仪表读数平均值 $\bar{X}_i$ ，以荷载 P_i 为纵坐标、加卸荷读数平均值 $\bar{X}_i$ 为横坐标，

绘制荷载（ P ）与读数（ X ）的线性回归直线；

6 探头的标定系数 K 应按下式计算：

$$K = \sum(\bar{X}_i P_i) / [A \sum(\bar{X}_i)^2] \quad (5.3.6)$$

式中： $\bar{X}_i$ — 第 i 级荷载在加卸载时仪表读数的平均值；

P_i — 第 i 级荷载；

A — 标定锥尖阻力传感器时为锥头底面积，标定侧壁摩阻力传感器时为摩擦筒侧壁表面积。

7 计算探头的非线性误差、重复性误差、滞后误差、归零误差和起始感量。

5.3.7 孔压传感器的标定应按下列步骤进行：

1 按预定的最大加载量分成 7~10 级，对探头主机加压，并记录测量仪的输出读数；

2 加载至最大荷载后，逐级卸载同时记录测量仪的输出读数；

3 重复上述加卸荷过程，不得少于 3 遍；

4 计算各级荷载下读数的平均值，以荷载为纵坐标、仪器读数平均值为横坐标绘制线性回归直线；

5 计算非线性误差、重复性误差、滞后误差、归零误差和起始感量。

5.3.8 测斜探头加速度传感器的标定应按下列步骤进行：

1 调整标定架顶角刻度盘的角度为 0，锁紧顶角锁钮；

2 调整方位刻度盘的角度，在方位角为 0、90°、180°、270° 时，分别将标定架的两个水准泡调平，并记录 X、Y、Z 轴的读数；

3 对以上四个不同方位角对应的 X、Y、Z 轴读数值分别计算平均值 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ ，取三轴的各自平均值和理论值的差值作为角度的三轴偏差纠正值；

4 在静力触探采集仪的角度系数写入界面录入该测斜探头的三轴偏差纠正值，然后切换到测量界面；

5 调整顶角刻度盘的角度，在顶角刻度盘角度分别为 0、5°、10°、15°、20°、25°、30°、35°、40°、45°、50°、55°、60° 时，将标定架上的两个水准泡调平，并记录采集仪的角度读数值；

6 重复以上不同角度测量不少于 3 遍，计算各次在不同角度下的采集仪角度读数值的平均值，以标定架设定的角度 0、5°、10°、15°、20°、25°、30°、35°、40°、45°、50°、55°、60° 为横坐标，以采集仪角度读数值的平均值为纵坐标，绘制线性回归直线，得到测斜探头标定直线的斜率和纵轴截距，即为该测斜探头角度的线性校正指标。

5.3.9 传感器的相互干扰检测应符合下列规定：

- 1 当对探头内某一个传感器标定时，应将其他未标定传感器同时连接至测量仪表；
- 2 记录某一个传感器加荷时对其他未加荷传感器的影响；
- 3 传感器相互干扰影响值不应大于 0.3%FS。

5.3.10 探头的温度漂移检验应符合下列要求：

- 1 当探头内部未埋设温度传感器时，应进行探头的温度漂移校验；当探头内部埋设有温度传感器时，可不进行温度漂移校验；
- 2 当进行探头的温度漂移校验时，应将探头放入烘箱内，烘箱起始温度宜为 25℃，以 5℃为温度增量，逐步加热至 45℃，并在各级温度下稳定 24h；
- 3 传感器的温度漂移值不应大于 0.5%FS/10℃。

【条文说明】

5.3.10 CPTU 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(特别是砂土)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。好的温度补偿可将零点漂移限制在满量程的 0.05%以内，并可在标定时定出温度对读数的影响系数，在贯入试验时进行温度修正；操作中，也可在正式试验前将探头在地下 1m 处放置 30min，使探头温度与地下温度平衡，再调节仪器的初始零点。目前，国外很多 CPTU 探头中安装有测温仪，以此来消除温度的影响。

5.3.11 探头标定后，应按下列步骤计算标定系数：

- 1 分别计算同级荷载下，各次加载、卸载的平均输出值；
- 2 根据各级荷载下计算的平均输出值，点绘荷载与输出值的关系曲线；
- 3 探头的标定系数，应按下列式计算：

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i p_i}{A \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i)^2} \quad (5.3.11)$$

式中： K — 标定系数；

p_i — 第 i 级荷载值 (kN) ；

A — 探头的工作面积 (cm²) ；

$\bar{x}_i$ — 第 i 级荷载下仪表的平均输出值, $\bar{x}_i = (x_i^+ + x_i^-)/2$, 其中 x_i^+ 为第 i 级荷载加上后仪表的平均输出值, x_i^- 为卸载至第 i 级荷载时仪表的平均输出值。

5.3.12 探头各项检测误差的计算应符合下列规定:

- 1 应将经过原点的符合式 5.3.11 的直线定为最佳直线;
- 2 探头的检测误差应采用极差值, 探头标定曲线及其误差以满量程输出值的百分数表示;
- 3 探头的各项误差应按下列公式计算:

$$\delta_1 = \frac{|x_i^+ - x_i^-|_{\max}}{FS} \times 100\% \quad (5.3.12-1)$$

$$\delta_r = \frac{(\Delta x_i^+)_\max}{FS} \times 100\% \quad (5.3.12-2)$$

$$\delta_s = \frac{|x_i^+ - x_i^-|_{\max}}{FS} \times 100\% \quad (5.3.12-3)$$

$$\delta_0 = \frac{|x_0|}{FS} \times 100\% \quad (5.3.12-4)$$

式中: δ_1 — 非线性误差;

δ_r — 重复性误差;

δ_s — 滞后误差;

δ_0 — 归零误差;

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 (或卸载) 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。

5.3.13 探头的起始感量应按下列公式计算:

$$Y_0 = K \Delta x \quad (5.3.13)$$

式中: Y_0 — 起始感量;

K — 探头的标定系数;

Δx — 仪表的有效 (最小) 分度值。

5.4 贯入系统

5.4.1 陆域静力触探贯入系统可根据工程类型、贯入深度、场地条件等，按表 5.4.1 选用。

表 5.4.1 陆域静力触探贯入设备选用参考表

类型	贯入力
手摇式	2t~5t
液压式	5t~20t
车载式	5t~30t

5.4.2 陆域静力触探贯入系统应符合下列规定：

- 1 贯入系统应能稳定地提供均匀的贯入速率；
- 2 主机的额定贯入力应大于测试最大总贯入力，额定起拔力不应小于额定贯入力的 1.2 倍，贯入和起拔时，力的作用线应垂直于水平面。
- 3 探杆应采用高强度无缝钢管制成，并应符合下列规定：
 - 1) 壁厚不应小于 5mm，屈服强度不宜小于 600MPa，且截面积应与额定贯入力相匹配；
 - 2) 接头处外径应与探杆外径一致，自锥底面起算的紧接探头后 1m 长度范围内，探杆外径应略小于探头直径；
 - 3) 同一套探杆的长度、规格应一致，其长度误差不得大于 0.2%；
 - 4) 探杆弯曲度应小于 0.2%，前 5m 探杆的弯曲度不宜大于 0.1%；
 - 5) 探杆不得有损伤或裂纹；
 - 6) 探杆两端螺纹的同轴度公差应小于 1mm，采用锥形螺纹连接的探杆，连接后不得有晃动现象；采用圆柱形螺纹连接的探杆，拧紧后丝扣的根、肩应密贴。
- 4 反力装置可利用地锚、配重堆载或车载式静力触探的车辆自重，也可组合使用，提供的反力应大于静力触探主机的额定贯入力。

【条文说明】

5.4.2 探杆的外径一般为 25mm~50mm，单根探杆的长度通常为 1m，同一台机器的探杆规格和长度应一致，以便于计算和核查试验深度。在贯入过程中前 3~5 根探杆起导向作用，故对其弯曲度要求更高。探杆的垂直度、探杆间的连接质量对贯入深度有较大影响，一定程度上决定了试验深度能否满足勘察任务要求。

地锚形式包括单叶锚和多叶锚，锚径一般为 250mm~400mm，长度一般为 1.5m，遇到上部松散土层较厚时，可使用加长的地锚。

5.4.3 水域静力触探贯入系统分为海床式、固定式、井下式和浮动式，可根据工程类型、水深、土层条件等按表 5.4.3 选用。

表 5.4.3 水域静力触探贯入设备选用参考表

类型	适用水深（m）	贯入能力与方式
海床式	3~300	一次性连续贯入，无法穿透厚层密实砂层
固定式	0~30	可多次贯入，可配合钻机引孔
井下式	3~300	可多次贯入，可配合钻机引孔
浮动式	0~30	可多次贯入，可配合钻机引孔

5.4.4 水域静力触探贯入系统应满足下列要求：

- 1 应满足作业水深要求；
- 2 贯入力应满足触探设计深度的需要；
- 3 额定起拔力不应小于额定贯入力；
- 4 贯入和起拔时，施力作用线应垂直于基座基准面，垂直度偏差不应大于 0.5° ；
- 5 探杆强度应满足贯入深度的受力要求，且探杆直径自探头锥底起算的 400mm 长度范围内不应大于探头直径；
- 6 反力装置提供的反力应不小于额定贯入力，且能限制主机移动。

5.4.5 海床式贯入系统应满足下列要求：

- 1 海底支架、配重及驱动系统应满足贯入深度的受力要求；
- 2 应具有海底支架的倾斜和总贯入力的监测功能，并应具有触底响应、探头回收到位响应等监测功能；
- 3 测控设备应能控制和监测探杆贯入、停止和回收的过程；
- 4 必要时可根据泥面土层条件、测试深度等配置合适的套管；
- 5 反力宜由配重提供。

【条文说明】

5.4.5 海床式静力触探设备的关键部分是海床机，主要包括海底支架、配重及驱动系统。驱动系统有挤压轮式、链式传动式和液压缸传动式三种驱动方式。

由于海床式静力触探测试方式是将贯入系统吊至泥面进行测试，其贯入反力由海床基座自重提供，因此，要根据已有地质资料大致判断所需贯入系统的轻重类型。海床式贯入

系统类型根据自重一般分为轻型和重型两种，轻型设备重量一般为1t~2t，采用柔性探杆，贯入深度5m~15m；重型设备重量一般为5t~28t，采用刚性探杆，贯入深度一般为20m~60m，最深可达80m。

海床式静力触探测试时，当测试深度较大且上部有深厚软土时，需要配置保护探杆的套管系统，套管的内径一般比探杆外径大 2mm~5mm，以达到好的护壁支护效果。

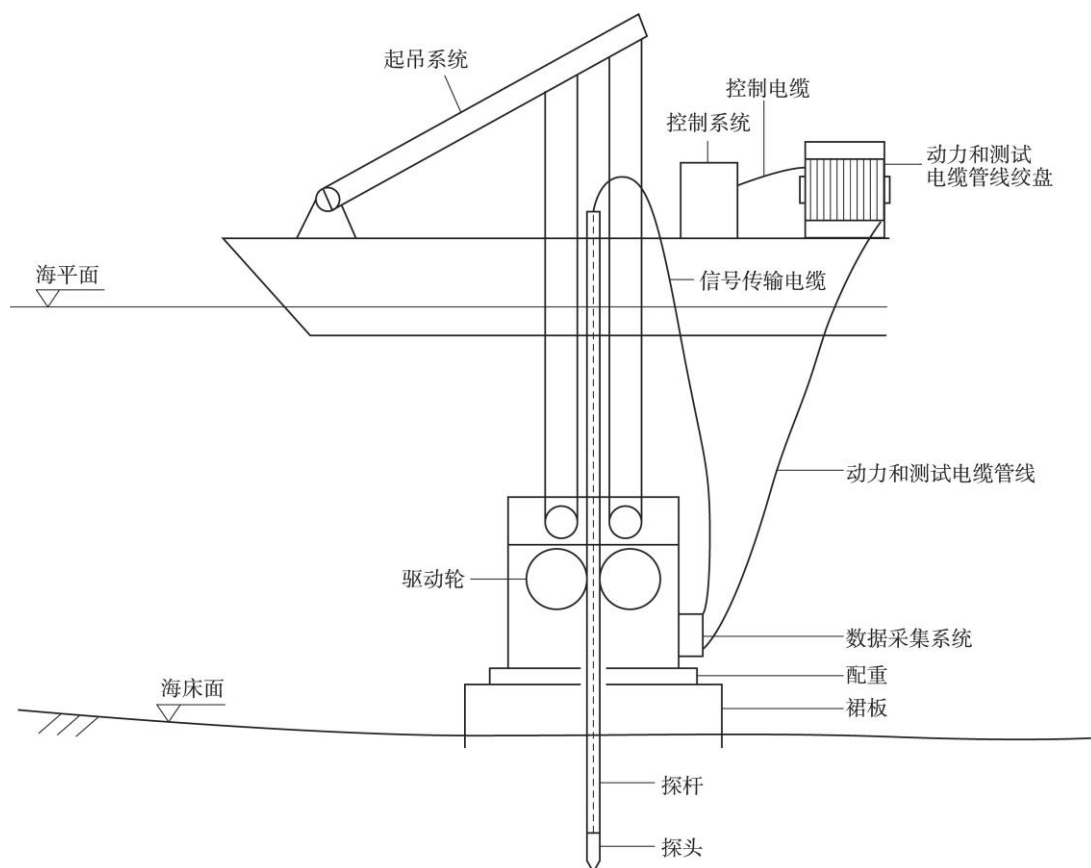


图 8 海床式测试设备示意图

5.4.6 固定式贯入系统应满足下列要求：

- 1 宜配置多层套管；
- 2 反力宜由固定平台提供。

【条文说明】

5.4.6 固定式静力触探测试方式的贯入系统固定于载体平台，该平台采用液压系统能在海平面以上一定范围内自由升降，固定式的贯入系统及操作方式与陆地静力触探测试方式类似。由于固定式静力触探测试方式的贯入系统固定于载体平台，平台至泥面的探杆容易受

波浪的横向作用力而发生弯折，因此需要设置多层套管对探杆进行保护。

由于需要采用多层套管辅助测试，固定式静力触探测试方式的适用水深一般小于 30m。与海床式静力触探测试方式相比，固定式能够通过钻机引孔，在贯入过程中遇到硬层的情况下可以通过钻探引孔实现多次贯入，其贯入能力往往优于海床式。

5.4.7 井下式贯入系统应满足下列要求：

- 1 应配置能辅助钻孔作业并夹紧钻杆的海底基座；
- 2 应配置集成动力与信号传输的脐带缆及推进缸；
- 3 应能实现钻进和静力触探贯入装置的轴向定位；
- 4 应能实现对主机和海底基座的控制；
- 5 反力宜由海底基座提供。

【条文说明】

5.4.7 井下式静力触探测试方式结合了钻机引孔，引孔后可在钻井平台下继续静力触探测试。井下式静力触探测试方式的优点是可与钻机配合工作，实现多次贯入，特别是遇到含有大量砾石土或其他硬层时。一般通过钻机引孔，既保证测试深度又能保护探头不受损坏，与其他方式相比，井下式静力触探测试方式具有更广的场地适用性。

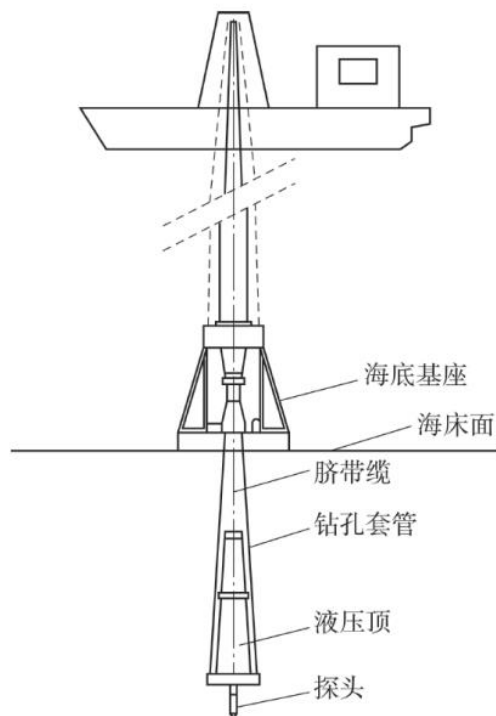


图 9 井下式静力触探测试设备示意图

5.4.8 浮动式贯入系统应满足下列要求：

- 1 宜配置多层套管；
- 2 宜配置外套管扶正装置；
- 3 反力宜由基座提供。

【条文说明】

5.4.8 浮动式静力触探测试方式一般有两种形式，一种是桁架连接式，每节桁架上配有固定在桁架上的隔水套管；另一种是套管连接式，每节套管均可导向探杆，不再另安装隔水套管。两种形式都带能坐落于泥面的反力底座，连接桁架(套管)顶部即为作业平台，其上安装陆地静力触探设备或钻机设备。

浮动式静力触探测试方式的套管尺寸与施工方式见条文说明第7.2节。

浮动式静力触探测试方式在贯入过程中遇到硬层时，一般采用钻机引孔进行多次贯入测试。

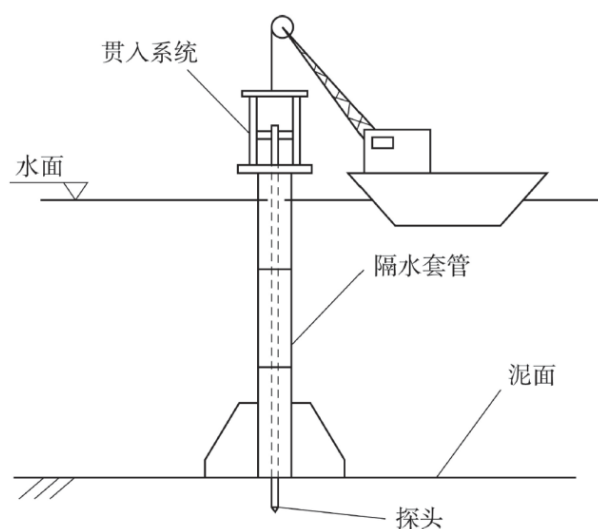


图 10 浮动式静力触探测试设备示意图

5.4.9 水域静力触探测试载体应满足下列要求：

- 1 应能安全承载整套贯入系统、量测系统及测试人员，并可持续至测试结束；
- 2 应配置能吊装和回收贯入系统的专用设备；
- 3 海床式设备采用的测试载体可为满足作业条件的船舶；
- 4 固定式设备采用的测试载体宜为自升式固定平台；
- 5 井下式设备采用的测试载体应为配置月池且满足作业条件的船舶；
- 6 浮动式设备采用的测试载体宜为满足作业条件的船舶。

【条文说明】

5.4.9 对于水域静力触探测试，需要特殊载体将设备运抵测试地点，并能在测试过程中在测试地点停驻，承载测试系统及操作人员开展试验，在试验完成后可将设备回收，并将测试设备及人员运回指定场所。目前我国水域静力触探多采用大型船舶、自升式平台等作为载体开展测试工作。

浮动式静力触探测试方式的测试载体需要将测试设备运至测试位置，并配置起吊系统将测试设备在测试位置安全组装，因此多采用大型驳船。

6 单、双桥静力触探

6.1 准备与测试

6.1.1 测试前应进行下列检查工作：

- 1 应对仪器设备的完好性进行检查，测试系统的现场归零误差应小于 3%FS；
- 2 探头应进行性能检查，并核对探头标定记录、调零试压；
- 3 应逐根检查探杆，探杆应平直，丝扣应完好无裂纹；
- 4 应进行探头、电缆、数据采集仪和深度编码器的插接与调试。

6.1.2 主机安装应满足下列要求：

- 1 主机应与地锚牢固连接，安装应稳定；
- 2 应保持基座水平，并用水平尺或吊锤进行校核；
- 3 应正确连接电路并确保升降操纵装置灵活。

6.1.3 对有缆静力触探，测试前应将探杆顺序放置，并将电缆依次穿入探杆，探杆的总长度应大于预计测试深度不少于 2m。

6.1.4 反力装置的布设应符合下列要求：

- 1 陆域静力触探的地锚应对称布置、避开障碍物、进入坚实土层不小于 0.5m，堆载时配重应堆放均匀、对称；
- 2 水域静力触探的测试平台或基座应确保稳定性，并具有足够的反力。

6.1.5 当地层较硬且需要达到较大的贯入深度时，宜采取下列措施：

- 1 设置减摩阻器，减摩阻器应位于距探头 1m 以上位置；
- 2 采用辅助设备注入润滑剂；
- 3 下护管。

6.1.6 贯入速率宜为 (1.2 ± 0.3) m/min，同一地貌单元的同一地层宜保持同一速率。

6.1.7 单、双桥静力触探测试时的探头归零检查应符合下列规定：

- 1 探头初始贯入土中 1.5m 后应提升 0.05m~0.10m，待零漂稳定后，将仪表调零方可继续贯入；
- 2 在地面下 6m 深度范围内，每隔 2m 应提升一次探头，记录归零读数；
- 3 终孔时应再次记录归零读数。

6.1.8 单桥静力触探测试时应按 0.1m 深度间距记录比贯入阻力、贯入深度，双桥静力触探测试应按 0.1m 深度间距记录锥尖阻力、侧壁摩阻力以及贯入深度，记录深度误差不应大

于测试深度的 1%。

6.1.9 每贯入 2m~4m 应校核记录深度和实际贯入深度，总误差不应大于 0.1m。

6.1.10 初始贯入时，探头及探杆的倾斜角不应大于 0.2°；当采用测斜探头时，探头倾斜角及探头水平偏移距离尚应符合下列规定：

- 1 贯入深度为 10m 时，探头倾斜角不应大于 1.5°；
- 2 贯入深度为 20m 时，探头倾斜角不应大于 2.5°；
- 3 贯入深度大于 30m 时，探头的计算水平偏移距离不应大于贯入深度的 10%。

6.1.11 测试过程中，应详细记录仪器设备和操作过程的异常情况，并分析产生的原因及对测试结果的影响。

6.1.12 特殊情况下的操作应符合下列规定：

- 1 当贯入深度超过 30m，或穿过厚层软土再进入硬土层时，应使用导向护管或测斜探头；
- 2 进行水上作业时，应在刚度较好的金属护管内进行，并确保护管的垂直度和稳定性；
- 3 当贯入 1m~3m，发现探杆有明显偏斜时，应及时停止测试，重新选取测试点；
- 4 贯入过程中出现地锚松动时，应停止贯入，及时紧固螺栓；
- 5 当探头穿越密实粉土、砂土并超过额定量程使用时，事后应及时对探头重新标定。

6.1.13 出现下列情况时，应终止测试：

- 1 反力装置失效，无法继续提供反力；
- 2 探杆出现明显弯曲，有断杆危险；
- 3 主机或探头的负荷超过其额定荷载的 1.2 倍；
- 4 绝缘失效导致探头、记录仪不能正常工作；
- 5 测试数据出现明显异常。

6.1.14 终止测试后应保存测试数据，并应立即上拔探杆，上拔时不得使用电缆线直接提拉探头；拔出后应及时擦洗探头和顶柱，并不得使其暴晒和受冻。

6.2 资料整理

6.2.1 静力触探参数实测值应按照零漂检查的深度间隔采用线性内插法按下式进行平差修正：

$$x'_h = x_h - \Delta x_h \quad (6.2.1)$$

式中： x'_h — 深度 h 处静力触探参数修正值（MPa）；

x_h — 深度 h 处静力触探参数实测值 (MPa);
 Δx_h — 深度 h 处静力触探零漂平差值 (MPa)。

6.2.2 静力触探参数应按式(6.2.2)进行标定系数修正:

$$X_h = K \cdot x'_h \quad (6.2.2)$$

式中: X_h — 某深度 h 处的静力触探参数;
 K — 对应于各静力触探参数的标定系数。

6.2.3 记录深度与实际贯入深度不一致时, 应在出现误差的深度范围内采用等距法进行修正, 该深度范围内多余的读数应根据实际情况予以剔除。

6.2.4 采用测斜探头时, 尚应对贯入深度进行修正, 可按下列公式计算:

$$h = \int_0^l R_h dl \quad (6.2.4-1)$$

单轴测斜仪:

$$R_h = \cos \alpha_1 \quad (6.2.4-2)$$

双轴测斜仪:

$$R_h = (1 + \tan^2 \alpha_2 + \tan^2 \beta)^{-1/2} \quad (6.2.4-3)$$

式中: h — 修正后的实际贯入深度 (m);
 l — 探杆贯入长度 (m);
 R_h — 探杆的倾斜修正系数;
 α_1 — 配置单轴倾斜仪时, 探杆轴向与铅垂线的夹角 ($^\circ$);
 α_2 、 β — 配置双轴倾斜仪时, 探杆在相互垂直的两个方向上的偏斜角 ($^\circ$)。

【条文说明】

6.2.4 导致深度出现误差通常包括下列原因:

- (1) 卡瓦作为夹持器, 容易出现打滑现象;
- (2) 探孔在开孔时就发生明显偏斜, 或在成层土中贯入, 土层软硬相差较大, 以及硬层中含有大颗粒土时, 容易出现触探偏斜。

由于国内设备多将深度计固定于触探主机上, 常造成记录深度大于实际深度。这时, 需要根据操作过程中在记录表中所作的标注, 将卡瓦打滑造成的虚贯入从探杆入土的累计长度(深度)中逐段修正扣除, 将对应于虚贯入的读数予以剔除, 本规程考虑探头测斜装置的使用, 对探孔偏斜造成的深度误差修正见图11。

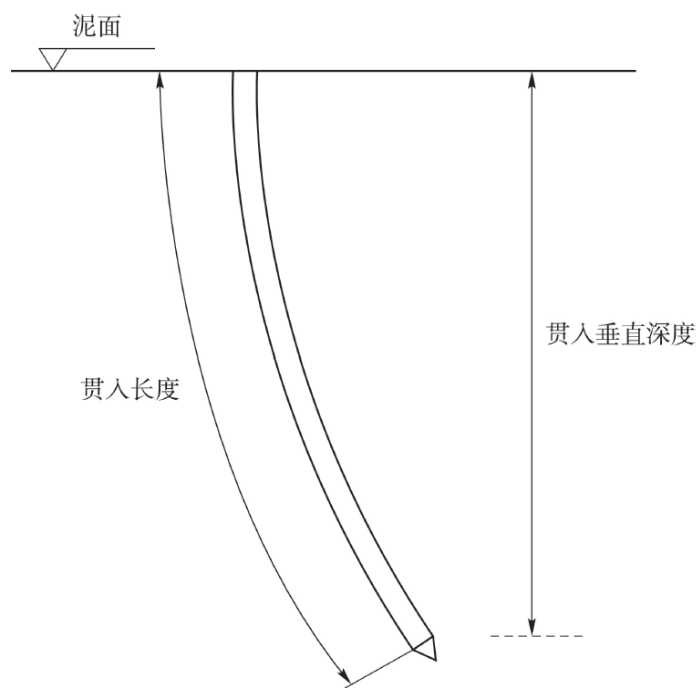


图 11 探头倾斜修正示意图

6.2.5 双桥静力触探的摩阻比 R_f 应按下式计算：

$$R_f = f_s / q_c \times 100 \quad (6.2.5)$$

式中： R_f — 双桥静力触探的摩阻比（%）；
 f_s — 双桥静力触探的侧壁摩阻力（kPa）；
 q_c — 双桥静力触探的锥尖阻力（MPa）。

6.2.6 根据静力触探曲线划分土层界面时，划分的详细程度应以满足工程要求为准，对主要持力层应详细划分，对工程有影响的软弱下卧层应单独划分。

6.2.7 进行单孔力学分层时，每层中最大贯入阻力和最小贯入阻力之比宜符合表 6.2.7 的规定。

表 6.2.7 按贯入阻力变化幅度的力学分层标准

p_s 或 q_c (MPa)	最大贯入阻力和最小贯入阻力之比
≤ 1.0	1.0~1.5
1.0~3.0	1.5~2.0
> 3.0	2.0~2.5

6.2.8 根据单、双桥静力触探曲线划分土层界面时应符合下列规定：

- 1 宜将超前、滞后总深度段中点或中点偏向低端阻值（ q_c 或 p_s ）层 0.10m 处定为土层

界面；

2 上下土层的端阻相差一倍以上，且其中软层的平均端阻小于 2MPa 时，可将软层的最后一个（或第一个） q_c （或 p_s ）小值偏向硬层 0.10m 处定为土层界面；

3 上下土层端阻值差别不明显时，应结合 R_f 、 f_s 值确定土层界面。

6.2.9 单、双桥静力触探测试后应绘制单孔静力触探曲线柱状图，柱状图应符合下列要求：

1 单桥静力触探应以深度 h （m）为纵轴，比贯入阻力 p_s （MPa）为横轴，绘制 $p_s \sim h$ 曲线；

2 双桥静力触探应以深度 h （m）为纵轴，锥尖阻力 q_c （MPa）、侧壁摩阻力 f_s （kPa）和摩阻比 R_f 为横轴，分别绘制 $q_c \sim h$ 曲线、 $f_s \sim h$ 曲线和 $R_f \sim h$ 曲线；

3 双桥静力触探的 $q_c \sim h$ 曲线、 $f_s \sim h$ 曲线和 $R_f \sim h$ 曲线应以不同的线型绘制在同一图形中，并应有相应的标尺；

4 各静力触探参数变化曲线的绘图比例可按表 6.2.9 选用，且双桥静力触探的侧壁摩阻力 f_s 和锥尖阻力 q_c 的数值比例宜为 1:100；

表 6.2.9 绘图比例选用表

项 目	比 例
深度 h	1:100 或 1:200
比贯入阻力 p_s 、锥尖阻力 q_c	1cm 表示 500 kPa、1000 kPa 或 2000kPa
侧壁摩阻力 f_s	1cm 表示 5 kPa、10 kPa 或 20kPa
摩阻比 R_f	1cm 表示 1%、2%

5 应附各土层的层底深度、层底高程、分层厚度，以及各土层的静力触探参数平均值和地基参数值。

6.2.10 测试后应对数据进行统计，提供单孔和场地各土层的静力触探参数的数值范围和平均值，并宜根据土层和数据的特征以及参数的用途等，选择统计算术平均值、厚度加权平均值或最小平均值。

【条文说明】

6.2.10 按工程地质区域或场地选取各土层的单、双桥静力触探参数统计值时，对性质均匀、静力触探数据离散性小的土层，可选用算术平均值或厚度加权平均值；对性质不均、静力触探数据离散性大的土层，宜选用最小平均值。

6.2.11 静力触探参数的统计方法应符合本规程附录 B 的有关规定。

6.2.12 各土层的静力触探参数统计尚应满足下列要求：

- 1 土层厚度大于等于 1m 且土质较均匀时，宜扣除其上部滞后深度和下部超前深度范围内的静力触探参数值后取平均值；
- 2 分层曲线中的异常值不应参与统计；
- 3 互层、夹层土宜分别统计其中各类土层的静力触探参数。

6.3 成果应用

6.3.1 采用单桥静力触探时，可根据比贯入阻力与深度关系曲线形态，按本规程附录 C 判定土类。

6.3.2 采用双桥静力触探时，可按下列方法判定土类：

- 1 可根据锥尖阻力及摩阻比的数值按下图判别：

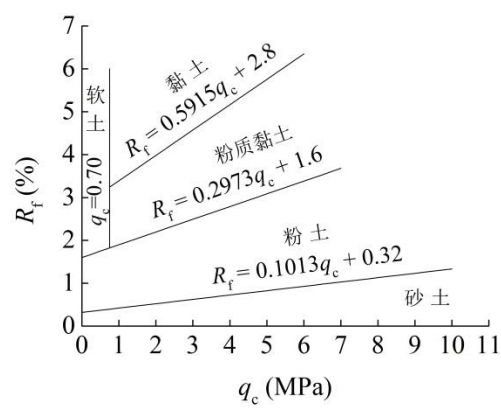


图 6.3.2 双桥静力触探参数划分土类

- 2 可以锥尖阻力与深度关系曲线形态为主，辅以侧壁摩阻力和摩阻比与深度关系曲线形态，按本规程附录 D 进行判别。

【条文说明】

6.3.2 本条引用了现行铁路行业标准《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018 的有关内容。国内各地区的土层分布既具有典型性，也具有其特殊性。总体而言，结核、夹层、互层等均可能对试验数据的统计和分析带来一定影响。在工程实践中，尚应进一步积累静力触探参数判别土类的经验，并加强与钻探等手段的对比验证。

例如，对安徽省淮北平原区，第四系上更新统 Q₃ 的土层主要为黏土、粉质黏土与粉细砂层，有比较明显的韵律层，含铁锰质结核和钙质结核。经该地区部分工程的静力触探测试数据与钻探、试验成果比对，仅采用本规程图 6.4.1 判别土类的准确率约 60%，再结合曲线特征可提高准确率至约 70%。

6.3.3 单桥静力触探比贯入阻力与双桥静力触探锥尖阻力之间的换算应根据当地经验确定，缺少经验时可按下式进行换算：

$$p_s = kq_c \quad (6.3.3)$$

式中：
 p_s — 单桥静力触探比贯入阻力（MPa）；
 k — 换算系数，取 1.05~1.10；
 q_c — 双桥静力触探锥尖阻力（MPa）。

6.3.4 采用单、双桥静力触探参数估算地基土物理力学指标时，应结合地区经验或室内试验、其他原位测试成果综合确定，缺少经验时可参照附录 E。

【条文说明】

6.3.4 本标准编制过程中，发现国内较多区域均建立了采用单、双桥静力触探参数估算地基土物理力学指标的地区经验，并多存在于相应地区的地方标准中。通过对比，发现采用单、双桥静力触探参数估算地基土物理力学指标具有较明显的地区差异，因内容较多，限于篇幅，本规程不再具体摘录。此外，《公路工程地质原位测试规程》JTG 3323-2021、《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018-2018 中基于全国范围的数据统计、分析，给出了若干经验公式，本条进行了引用，供无地区经验时参考使用。

6.3.5 采用单、双桥静力触探参数估算天然地基承载力时，应结合地区经验或其他原位测试成果综合确定，部分地区的经验公式和经验表格见附录 F。

【条文说明】

6.3.5 工程实践中，确定地基承载力的方法主要有：①载荷试验法，利用载荷试验确定地基承载力；②原位测试法，利用载荷试验以外的原位测试方法确定地基承载力，如静力触探、标准贯入试验、圆锥动力触探试验等；③规范表格法，根据土层的某些物理性质指标查阅相关规范中的承载力表格确定地基承载力；④理论公式计算法，根据土层的抗剪强度指标通过理论公式计算确定土层的地基承载力；⑤地区经验法，根据某一地区的工程经验，对于物质组成、工程性质等相同或相近的土层，可采取工程地质类比法确定土层的地基承载力。

一般认为，载荷试验确定地基承载力最为准确可靠，但其试验周期长、成本高。在我国岩土工程行业中，随着经济社会的发展，大量的各类工程的建设 and 投入使用，积累的工程勘察和设计的经验已经足够丰富。在一般工程项目建设中，基本已不再需要通过载荷试验来确定土层的地基承载力了，往往是根据载荷试验以外的其他原位测试、室内试验等结

合地区经验综合确定。现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007 在其条文说明中规定“勘察单位应根据试验和地区经验确定地基承载力等设计参数”，并明确说明可以利用静力触探等原位测试方法结合地区经验确定地基承载力。

静力触探是工程中最为常用的一种原位测试方法，具有测试连续、经济快速、测试结果精度高、再现性好等优点，兼具勘探和测试的双重功能，在工程勘察中得到了广泛应用。对于如何利用静力触探确定地基承载力的研究成果非常丰硕，但由于贯入机理尚不明确，只能通过建立特定地区或特定土类的经验公式等应用于工程实践。这些经验公式往往是通过静力触探与载荷试验成果的对比与统计得到的，应该说，这是建立静力触探确定地基承载力经验公式最可靠的方法。

本标准编制过程中，收集到了国内若干地区采用单、双桥静力触探参数估算地基土天然地基承载力的地区经验，其多存在于相应地区的地方标准中。通过对比，发现采用单、双桥静力触探参数估算天然地基承载力具有较明显的地区差异，难以全部统一。为便于本规程使用者了解各区域经验，并便于其他区域人员在某地区开展勘察工作时综合考虑该地区经验，编制组整理了北京、上海、天津、安徽、山东、河南、河北、吉林、黑龙江、辽宁、山西、四川、甘肃等13个地区的经验公式或经验表格，列入了附录中。

6.3.6 打入法、静压法预制桩的单桩极限承载力可采用双桥静力触探参数，结合地区经验方法计算，部分地区的经验方法见附录 G，缺少经验的可按下列公式进行估算：

$$Q_{uk} = u \sum_{i=1}^n \beta_i \bar{f}_{si} h_i + \alpha q_{cp} A_c \quad (6.3.6-1)$$

式中： Q_{uk} — 单桩竖向抗压极限承载力(kN)；
 u — 桩身周长(m)；
 β_i — 第 i 层土的极限摩阻力综合修正系数；
 $\bar{f}_{si}$ — 第 i 层土的侧壁摩阻力平均值(kPa)；
 h_i — 桩身穿过的第 i 层土的厚度(m)；
 α — 桩端土的极限承载力综合修正系数；
 q_{cp} — 桩底端阻计算值(kPa)；
 A_c — 桩底（不包括桩靴）全断面面积(m²)。

q_{cp} 、 β_i 、 α 应分别按下列要求计算：

1 桩底高程以上 4d 范围内平均端阻 $\bar{q}_{cp1}$ 小于桩底高程以下 4d 范围内平均端阻 $\bar{q}_{cp2}$ 时：

$$q_{cp} = (\bar{q}_{cp1} + \bar{q}_{cp2}) / 2 \quad (6.3.6-2)$$

反之，

$$q_{cp} = \bar{q}_{cp2} \quad (6.3.6-3)$$

2 桩侧第 i 层土的平均端阻 $\bar{q}_{ci} > 2000\text{kPa}$ ，且相应的摩阻比 $\bar{f}_{si} / \bar{q}_{ci} \leq 0.014$ 时：

$$\beta_i = 5.067(\bar{f}_{si})^{-0.45} \quad (6.3.6-4)$$

$\bar{q}_{ci}$ 及 $\bar{f}_{si} / \bar{q}_{ci}$ 不能同时满足上述条件时：

$$\beta_i = 10.045(\bar{f}_{si})^{-0.55} \quad (6.3.6-5)$$

由上两式计算得到 $\beta_i f_{si} > 100\text{kPa}$ 时，宜取 $\beta_i f_{si} = 100\text{kPa}$ 。

3 $\bar{q}_{cp2} > 2000\text{kPa}$ ，且相应的摩阻比 $\bar{f}_{si} / \bar{q}_{ci} \leq 0.014$ 时：

$$\alpha = 3.975(q_{cp})^{-0.25} \quad (6.3.6-6)$$

$\bar{q}_{cp2}$ 及 $\bar{f}_{s2} / \bar{q}_{cp2}$ 不能同时满足上述条件时：

$$\alpha = 12.064(q_{cp})^{-0.35} \quad (6.3.6-7)$$

【条文说明】

6.3.6 静力触探探头可认为是一种小尺寸模型桩，其贯入可视为模型桩的贯入过程。然而探头贯入过程与桩的工作性状存在区别，主要表现在尺寸效应、贯入速率、桩的施工工艺、侧壁摩擦筒位置、土的水平位移和材质差异等方面，在采用静力触探成果预测单桩的承载力时，理论上需要考虑这些因素。单桩极限承载力 Q_u 由桩端承载力 Q_p 与桩侧摩阻力 Q_s 两部分组成，由于桩端截面积与桩侧表面积均仅取决于桩的设计参数（桩截面形状、桩径和桩长等），因此桩承载力的预测研究集中于桩端单位承载力 q_p 和桩侧单位摩阻力 f_p 上。

基于静力触探的单桩承载力计算方法分为直接方法和间接方法两类。直接方法中桩端单位承载力 q_p 通过锥尖阻力 q_c （或 q_t ）得到，而桩侧单位摩阻力 f_p 取决于估算方法的不同，可以通过锥尖阻力 q_c （或 q_t ）或侧壁摩阻力 f_s 得到。间接方法首先采用贯入阻力确定土的强度参数，如黏性土不排水抗剪强度 S_u 和无黏性土内摩擦角 φ' ，然后采用强度参数通过半理论或半经验公式估算 q_p 和 f_p 。间接法忽视了水平应力、土压缩性和应变软化问题，具有很大的不确定性。因此，国内外根据静力触探参数计算桩基承载力的方法主要采用直接法。

表7列出了国内目前所采用的基于双桥静力触探的直接法。

表 7 国内标准中预测预制桩承载力的静力触探直接法

方法来源	q_b (单位面积端阻)	f (单位面积侧阻)
《公路桥涵地基与基础设计规范》 JTG 3363	$q_{rk} = \beta_r \bar{q}_r$ (1) 桩端平面以上 4D 范围内平均端阻 $\bar{q}_{r1}$ 小于桩端平面以下 4D 范围平均端阻 $\bar{q}_{r2}$ 时, $\bar{q}_r = (\bar{q}_{r1} + \bar{q}_{r2}) / 2$; 否则, $\bar{q}_r = \bar{q}_{r2}$ (2) 桩端平面以下 4D 范围 $\bar{q}_{r2} > 2000$ 且 $\bar{q}_i / \bar{q}_{r2} \leq 0.014$ 时: $\beta_r = 3.975(\bar{q}_r)^{-0.25}$ 否则, $\beta_r = 12.064(\bar{q}_r)^{-0.35}$	$q_{ik} = \beta_i \bar{q}_i$ 土层平均端阻 $\bar{q}_r > 2000$ kPa 且 $\bar{q}_i / \bar{q}_r \leq 0.014$ 时: $\beta_i = 5.067(\bar{q}_i)^{-0.45}$; 否则, $\beta_i = 10.045(\bar{q}_i)^{-0.55}$
《铁路工程地质原位测试规程》 TB 10018	$q_b = \alpha q_{cp}$ (1) 桩端平面以上 4D 范围内平均端阻 $\bar{q}_{cp1}$ 小于桩端平面以下 4D 范围平均端阻 $\bar{q}_{cp2}$ 时, $q_{cp} = (\bar{q}_{cp1} + \bar{q}_{cp2}) / 2$; 否则, $q_{cp} = \bar{q}_{cp2}$ (2) 桩端平面以下 4D 范围 $\bar{q}_{cp2} > 2000$ 且 $\bar{f}_s / \bar{q}_{cp2} \leq 0.014$ 时: $\alpha = 3.975(q_{cp})^{-0.25}$ 否则, $\alpha = 12.064(q_{cp})^{-0.35}$	$f = \beta f_s$ 土层平均端阻 $\bar{q}_{ci} > 2000$ kPa 且 $\bar{f}_{si} / \bar{q}_{ci} \leq 0.014$ 时: $\beta_i = 5.067(\bar{f}_{si})^{-0.45}$; 否则, $\beta_i = 10.045(\bar{f}_{si})^{-0.55}$ 当计算所得 $\beta f_s > 100$ kPa 时, 取 $\beta f_s = 100$ kPa
《建筑桩基技术规范》 JGJ 94	$q_b = \alpha q_c$ q_c 为桩端平面以下 4D 和桩端平面以上 1D 范围内双桥探头锥尖阻力加权平均值; α 为桩端阻力修正系数, 对黏性土、粉土取 2/3, 对砂土取 1/2	$f = \beta f_s$ 对黏性土、粉土: $\beta = 10.04(f_s)^{-0.55}$ 对砂土: $\beta = 5.05(f_s)^{-0.45}$
《静力触探试验规程》 YS/T 5223	$q_b = \alpha q_c$ (1) 桩端平面以上 4D 范围内平均端阻 $\bar{q}_{c1}$ 小于桩端平面以下 4D 范围平均端阻 $\bar{q}_{c2}$ 时, $q_c = (\bar{q}_{c1} + \bar{q}_{c2}) / 2$; 否则, $q_c = \bar{q}_{c2}$ (2) 桩端平面以下 4D 范围 $\bar{q}_{c2} > 2000$ 且 $\bar{f}_s / \bar{q}_{c2} \leq 0.014$ 时: $\alpha = 3.975(q_c)^{-0.25}$ 否则, $\alpha = 12.064(q_c)^{-0.35}$	$f = \beta f_s$ 土层平均端阻 $\bar{q}_{ci} > 2000$ kPa 且 $\bar{f}_{si} / \bar{q}_{ci} \leq 0.014$ 时: $\beta_i = 5.067(\bar{f}_{si})^{-0.45}$; 否则, $\beta_i = 10.045(\bar{f}_{si})^{-0.55}$ 当计算所得 $\beta f_s > 100$ kPa 时, 取 $\beta f_s = 100$ kPa

《上海市地基基础设计规范》	见附录	
台湾《建筑物基础结构设计规范》(2017)	$q_b = 0.5q_{ca}$ q'_{c2} 为桩端平面以下 1.5D 和桩端平面以上 1.5D 范围内双桥探头锥尖阻力加权平均值；将桩端平面以下 1.5D 和桩端平面以上 1.5D 范围内大于 $1.3q'_{c2}$ 的 q_c 以 $1.3q'_{c2}$ 代替；桩端平面以上 1.5D 范围内小于 $0.7q'_{c2}$ 的 q_c 以 $0.7q'_{c2}$ 代替；桩端平面以下 1.5D 和桩端平面以上 1.5D 范围内修正后的 q_c 加权平均值为 q_{ca}	$q_c \leq 5000 \text{ kPa}$: $f_s = q_c / 60 \text{ kPa}$; $5000 \leq q_c \leq 12000 \text{ kPa}$: $f_s = q_c / 100 \text{ kPa}$; $q_c > 12000 \text{ kPa}$: $f_s = q_c / 150 \text{ kPa}$ 且 $f_s \leq 150 \text{ kPa}$

本条引用了现行铁路行业标准《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018的有关条文内容，经计算对比，估算值与载荷试验实测值的偏差一般不大于20%，在初步设计时可参照使用，但应用时尚应不断积累数据及经验。

需要指出的是，《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG 3363-2019中也给出了采用静力触探试验测定沉桩的桩侧摩阻力和桩端土承载力的方法，该方法总体与《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018相同，差异仅在于当计算得到的极限侧摩阻力大于100kPa时，未设置限值为100 kPa。编制组认为，对于密实砂层，尤其是中粗砂，当仅根据本条中公式计算时，所得到的极限侧摩阻力标准值往往高于《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG 3363-2019中按砂土密实状态查表所得参数，可能偏于不安全，因此推荐按《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018，设置相应的限值。

本规程编制过程中开展的12根预制管桩的试验数据表明，采用本条中方法所得计算结果的安全度能满足要求。但受试验的地域、桩长、土层等因素的局限，就全国范围而言，仍需不断积累各区域、不同土层、桩长等情况下的数据和经验。

此外，具有较成熟的地区经验时，也可根据地区经验方法进行估算。编制组收集了北京、上海、天津、浙江、江苏、安徽等地区的根据单桥或双桥静力触探指标估算预制桩承载力的方法，列入了附录中，可供本规程使用者参考。

6.3.7 混凝土钻孔灌注桩的单桩极限承载力可按式 6.3.6-1 估算，但式中的综合修正系数应按下列公式计算：

$$\beta_i = 18.24(\overline{f_{si}})^{-0.75} \quad (6.3.7-1)$$

$$\alpha = 130.53(q_{cp})^{-0.76} \quad (6.3.7-2)$$

【条文说明】

6.3.7 本条引用自行业标准《公路工程地质原位测试规程》JTG 3223-2021。

6.3.8 有可能液化的饱和砂土或饱和粉土地层，可采用单、双桥静力触探参数按下列方法进行判别：

1 实测计算贯入阻力 p_s 或 q_c 小于或等于单桥静力触探液化临界贯入阻力 p'_s 或双桥静力触探液化临界贯入阻力 q'_c 时，应判为液化土；

2 实测计算贯入阻力 p_s 或 q_c 应按下列规定取值：

1) 土层厚度大于 1m 时应取该层土的贯入阻力平均值 $\overline{p_s}$ (或 $\overline{q_c}$)，土层厚度小于 1m 且上、下层的贯入阻力较小时应取该层土贯入阻力较大值；

2) 土层厚度较大、根据力学性质和 $\overline{p_s}$ 、 $\overline{q_c}$ 可明显分层时，应分层计算 p_s 或 q_c 值；

3) 双桥静力触探时，应确定各分层的计算侧阻值 f_s ，并计算各分层土的摩阻比 $R_f = f_s / q_c$ 。

3 液化临界贯入阻力可按下列公式计算：

$$p'_s = p_{s0} \alpha_1 \alpha_3 \alpha_4 \quad (6.3.8-1)$$

$$q'_c = q_{c0} \alpha_1 \alpha_3 \alpha_4 \quad (6.3.8-2)$$

$$\alpha_1 = 1 - 0.065(d_w - 2) \quad (6.3.8-3)$$

$$\alpha_3 = 1 - 0.05(d_u - 2) \quad (6.3.8-4)$$

式中： p_{s0} — $d_w=2m$ 、 $d_u=2m$ 、 $\alpha_4=1$ 时可液化土层的单桥静力触探临界贯入阻力(MPa)，可按表 6.3.8-1 取值；

q_{c0} — $d_w=2m$ 、 $d_u=2m$ 、 $\alpha_4=1$ 时可液化土层的双桥静力触探临界贯入阻力(MPa)，可按表 6.3.8-1 取值；

α_1 — 地下水埋深 d_w 修正系数，地面常年有水且与地下水有水力联系时 $\alpha_1=1.13$ ；

α_3 — 上覆非液化土层厚度 d_u 修正系数，对于深基础恒取 $\alpha_3=1$ ；

α_4 — 黏粒含量百分比修正系数，可按表 6.3.8-2 取值；

d_w — 地下水位深度 (m)；

d_u — 上覆非液化土层厚度 (m)，计算时应将淤泥和淤泥质土层厚度扣除。

表 6.3.8-1 可液化土层临界贯入阻力基本值

基本地震动 峰值加速度	0.10g	0.15g	0.20g	0.30g	0.40g
p_{s0} (MPa)	5.0	8.0	11.5	14.5	18.0
q_{c0} (MPa)	4.5	7.0	10.0	13.0	16.0

表 6.3.8-2 α_4 取值

土类	砂土	粉土	
R_f (%)	≤ 0.4	$0.4 < R_f \leq 0.9$	> 0.9
α_4	1.00	0.60	0.45

【条文说明】

6.3.8 饱和砂土液化的判别方法主要有两种。一是经验法，即以地震现场液化调查资料为依据，给出判定液化的条件和界限，它不仅直观，而且可自动考虑一些影响液化的重要因素。故我国《建筑抗震设计规范》将其纳入；二是试验-分析法，即以液化试验和土体地震反应分析结果为依据进行判定，主要用于大型建筑物地基和土工结构物的饱和砂土液化判别，其可靠性取决于液化试验和土体地震反应分析结果的可信程度。但当某些影响因素未加以考虑或考虑不恰当时，就需要根据实际经验予以修正。目前较典型的液化判别方法有两种，即我国的规范方法和美国 Seed 的简化方法。

本条给出的是我国的规范判别方法，属于经验法，该方法已纳入《铁路工程抗震设计规范》GB 50111 和《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018，并曾列入《岩土工程勘察规范》GB 50021-1994，适用于饱和砂土和饱和粉土的液化判别。

7 孔压静力触探

7.1 准备与测试

7.1.1 孔压探头的饱和处理应符合下列规定：

1 孔压过滤环应采用室内真空抽吸法进行饱和，真空饱和容器的压力应达到-0.1MPa，抽真空时间不得少于 24h；

2 孔压传感器应变腔可采用注射器注入脱气液体进行饱和，也可采用室内真空抽吸法进行饱和，真空饱和容器的压力应达到-0.1MPa，并应保持压力不少于 30min。

【条文说明】

7.1.1 孔压元件的饱和是影响孔压静力触探测试精度的关键因素。孔压探头若不饱和，即孔压通道中含气，由于气体易压缩，在水压传导过程中相当于一个缓冲层，当探头周围的超孔隙水压力急剧变化时便会减缓这种变化。若根据孔隙水压力随深度的变化分层，分层界线不明显，且比实际深一些；若进行孔压消散试验，则其超孔隙水压力峰值偏小，消散偏缓慢。探头不饱和程度越高，这种滞后效应越明显。因此，在进行CPTU测试前一定要使孔压元件饱和。一般采用真空抽吸法饱和孔压元件(见图12)。

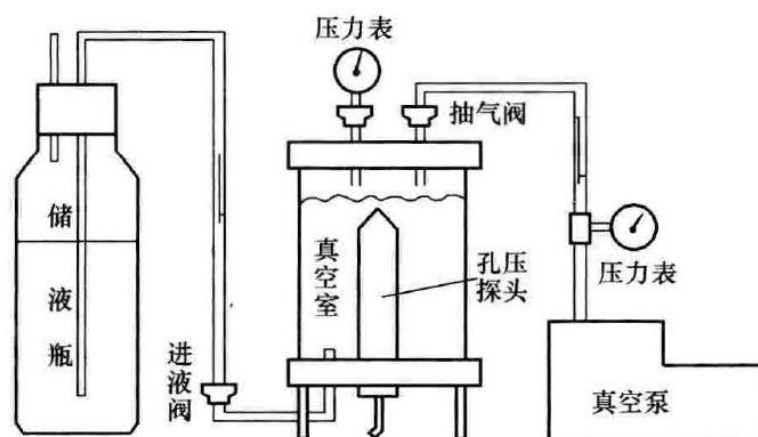


图 12 真空抽吸法饱和系统示意

饱和液推荐使用具有与孔压元件表面黏着力好、黏滞度合适、排气速度快等优点的甘油、硅油等。

室内真空抽吸法通常按下列步骤进行：

- (1) 首先将孔压元件放入真空室里，旋紧开关，使各部分密封；
- (2) 关闭进液阀，打开真空泵和抽气阀，在储液瓶里注满脱气液体；

(3) 抽气30s之后关闭抽气阀，根据真空表读数是否变化来确定密封的效果；若读数不变化，说明密封良好，否则需重新密封；

(4) 充分抽气后关闭抽气阀，保持10min，若真空度不下降，打开进液阀，液体被吸进真空室，并没过锥肩透水石结构，然后关闭进液阀，打开抽气阀继续抽吸，至关闭抽气阀后，真空度依然不下降为止；

(5) 至此，饱和结束，探头留在真空室里供测试时取出使用。

加荷、卸荷时，要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。

7.1.2 孔压探头的归零操作应满足下列要求：

- 1 应在空载的情况下调零，调零时探头温度宜与地面温度相同；
- 2 测试零点应在探头刚好贯入土层时读取。

【条文说明】

7.1.2 现场探头的测试零点一般在探头刚好贯入土层时读取。对于海床式，测试零点为泥面；对于井下式，测试零点为每次引孔底部。见图13。

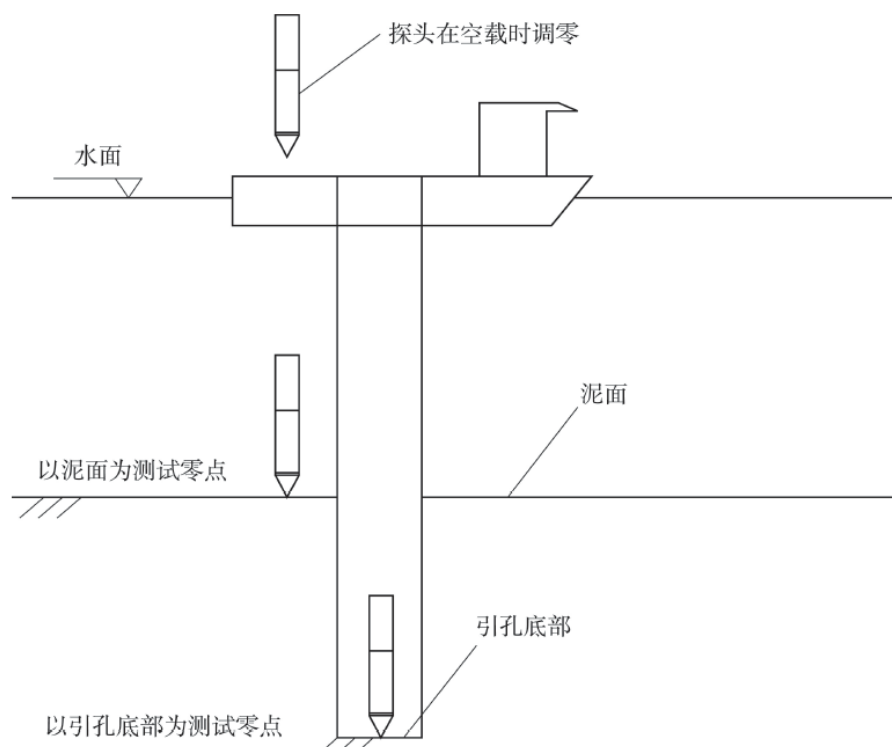


图 13 测试零点读取示意图

7.1.3 孔压探头的贯入应符合下列规定：

- 1 正常贯入过程中不得提拔探杆；
- 2 探头贯入应匀速，贯入速率应为 $(1.2 \pm 0.3) \text{ m/min}$ ；
- 3 贯入过程中，探头的垂直度偏差不应大于 10° 。

【条文说明】

7.1.3 孔压探头的贯入速率对贯入阻力测试结果有明显的影响，其原因主要是对孔隙水压力和土结构引起变化。因此，现有国内外测试规程一般规定：标准贯入速率为 1.2 m/min ，其误差极限为 $\pm 25\%$ 。现场孔压静力触探试验结果表明，锥尖阻力随着贯入速率的增加而减小，而超孔压随着贯入速率的增加而增加。孔压静力触探测试在此标准贯入速率下，对于砂土等粗粒土(渗透系数 $k \geq 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$)，相当于排水条件下的贯入试验；对于蒙古土等细粒土(渗透系数 $k \leq 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$)，相当于不排水条件下的贯入试验；对于中等粒径土，如粉土等，则相当于部分排水条件下的贯入试验。以往的专门试验表明，以 1.2 m/min 标准速率为基准，贯入速率每改变1个量级， q_c 和 λ 值将改变 10% 左右，而孔压的改变量将更大。因此，在孔压静力触探试验中，一定要严格控制探头贯入速率。

不得提拔探杆是为了保证探头所处的土体始终处于一定的固结排水应力状态下。若探头提升，孔底将处于负压状态，消散数据将会失真。

7.1.4 孔压静力触探测试应记录锥尖阻力、侧壁摩阻力、孔隙水压力、贯入深度，并应符合下列规定：

- 1 每贯入 0.05 m 宜采集一次测试数据；
- 2 记录深度误差不应大于 1% 。

7.1.5 软黏土中的孔压静力触探测试应进行孔压消散试验，记录孔压消散测试数据，并应符合下列规定：

- 1 试验持续时间不应少于超静孔隙水压力消散达到 50% 的时间；
- 2 在预定深度进行孔压消散试验时，应从探头停止贯入时起，记录不同时刻的孔压值和端阻值等参数；
- 3 试验数据的记录时间间隔，应符合表 7.1.5 的规定：

表 7.1.5 孔压消散试验数据记录时间间隔

孔压消散时间阶段 (min)	记录时间间隔 (s/次)
0~1	0.5
1~10	1
10~100	2
>100	5

4 试验过程中不得松动、碰撞探杆，也不得施加使探杆上、下位移的力；

5 当测试场地地下水位未知时，应至少在一个触探孔中进行孔压消散试验直至消散稳定值为止。

【条文说明】

7.1.5 能够确定土的原位渗透系数和固结系数是孔压静力触探技术的突出优点，而确定软黏土渗透系数和固结系数往往是软土地基工程设计的关键。为充分发挥孔压静力触探的作用，本条规定在软黏土中孔压静力触探测试应做孔压消散试验，以确定软黏土的原位渗透系数和固结系数。

孔压消散的时间与土体的排水固结快慢有关，在粉土、砂土中需要几分钟至1h左右，在黏性土中，最长可达数小时之久。为保证孔压消散试验成果能够用于确定渗透系数和固结系数，其终止时间采用孔压消散的程度进行确定，要求固结度至少要达到50%方可，固结度可按照归一化超孔压比 U 按下式计算：

$$U = \frac{u_t - u_0}{u_i - u_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

u_t — t 时刻的孔压 (kPa) ；

u_0 — 静水压力 (kPa) ；

u_i — 开始消散时的初始孔压 (kPa) 。

孔压消散程度是以稳定的孔压值为计算依据的。在天然地基中，试验土层的孔压稳定值即土层在该试验深度的静止孔隙水压力值，因此需要确定场地的地下水位，一般可根据临近钻孔确定。当场地没有钻孔时，可根据场地区域资料或其他简易方法估算，也可根据孔压静力触探测试的孔压曲线进行估算。在最初贯入深度范围内的某位置处，当孔压由负值或零值增大为正值且随着探头的贯入持续增加时，该位置即为地下水位线。对于地下水位未知的场地试验，为获得可靠的静水压力，至少应有一孔完全消散试验，以为后续试验提供参考。完全消散试验的稳定标准为2h内孔隙水压力测试值稳定不变。

7.1.6 终止单孔测试后，除应满足本规程第 6.1.14 条的规定外，尚应将探头重新调零、更

换孔压过滤环并进行真空饱和。

【条文说明】

7.1.6 当移位至另一孔压静力触探孔时，应立即清洗探头，必须采用注射器往探头内部的孔压通道注入甘油，排出其内部空气，确保探头的应变腔饱和。然后，更换事先饱和好的孔压过滤环。

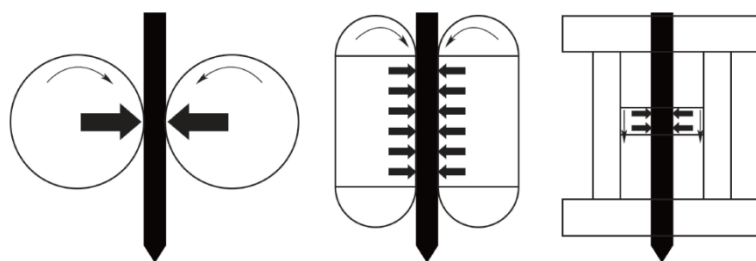
7.1.7 海床式设备的操作应符合下列规定：

- 1 吊放设备应满足作业要求，总起吊力不应小于海底回收时最大荷载的4倍；
- 2 吊放作业时，应采取有效措施避免设备旋转、设备偏移、探杆倾倒和电缆缠绕；
- 3 驱动系统应将探杆完全锁紧，在整个贯入和回收过程中不应出现打滑现象；
- 4 设备在吊放至泥面过程中，应监测探头锥尖阻力和孔隙水压力的变化，设备到达泥面后，应静置不小于10min直至稳定，并采用水深测量法或数据分析法量测探头与泥面距离，设备的倾斜角度大于允许值时，应重新放置；
- 5 驱动系统应在设备稳定后启动贯入，达到终孔条件后，应及时启动驱动系统进行探杆回收并上提设备；
- 6 探杆在贯入过程中可采用一次或多次连接方式；
- 7 当测试深度较深且海床表面存在深厚的软土层时，宜采用套管辅助贯入。

【条文说明】

7.1.7 在回收海床机时，由于水底淤泥的掩埋与吸附作用，造成回收所用的拉力大于设备自重，所以规定总起吊力不应小于海底回收时最大载荷的4倍。吊放作业时，为防止设备旋转、设备偏移、探杆倾倒和电缆缠绕，通常采用恒拉力卷扬机。

海床机的驱动系统有轮驱式、链式传动式和液压缸传动式三种方式，如图14所示，在静力触探测试过程中通过监测驱动系统保证探杆完全锁紧。



(a) 挤压轮传动式

(b) 链式传动式

(c) 液压缸传动式

图 14 海床式静力触探设备驱动方式

海床式静力触探测试是根据下列公式监测探头锥尖阻力和孔隙水压力的变化：

$$q_c = 10h_w a \quad (2)$$

$$u_2 = 10h_w \quad (3)$$

式中: q_c — 实测锥尖阻力 (kPa) ;
 h_w — 水深 (m) ;
 a — 有效面积比, 大部分探头的 a 为 0.30~0.90;
 u_2 — 在锥肩位置量测的孔隙水压力 (kPa) 。

探头与泥面距离量测一般采用水深测量法或数据分析法。

水深测量法原理见图15。在与探头等高的位置固定一根水头绳, 当设备放到泥面上时, 同时通过两条水头绳测量甲板到探头及泥面的距离, 则探头到泥面的距离 L 通过下式得出:

$$L = L_2 - L_1 \quad (4)$$

式中: L_1 — 探头到甲板的距离 (m) ;
 h_w — 泥面到甲板的距离 (m) 。

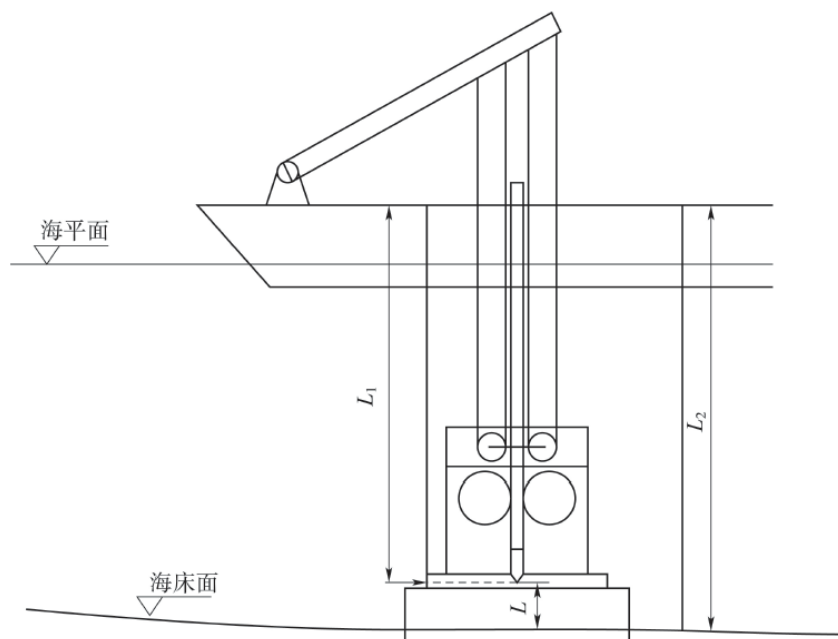


图 15 水深测量法示意图

数据分析法是根据探头在进入泥面时, 孔隙水压力及锥尖阻力会发生明显的突变来判断探头与泥面的距离。原始数据按照以泥面为测试零点进行修正。

目前部分海床机配备有可调节倾斜角度的底座, 调节范围为 20° 。

一次连接的探杆连接方式是将所有测试探杆全部连接好后再下放海床机到泥面进行

测试，这种方法适用于对贯入深度小于15m静力触探测试；多次连接的探杆连接方式是在海床机下放到泥面和探杆贯入过程中逐步在载体甲板面人工搭接探杆进行测试，这种方法适用于贯入深度深大于15m的静力触探测试。

由于海底的表层沉积物较软，在通过软层后一旦遇到较硬地层时，由于探杆链路上下受力，中间缺少径向约束，极易造成探杆链路中间弯曲变形，以至于发生探杆折断的事故。因此可从泥面贯入套管(图 16)，直至压入较硬地层，尽量降低探杆折断的风险。

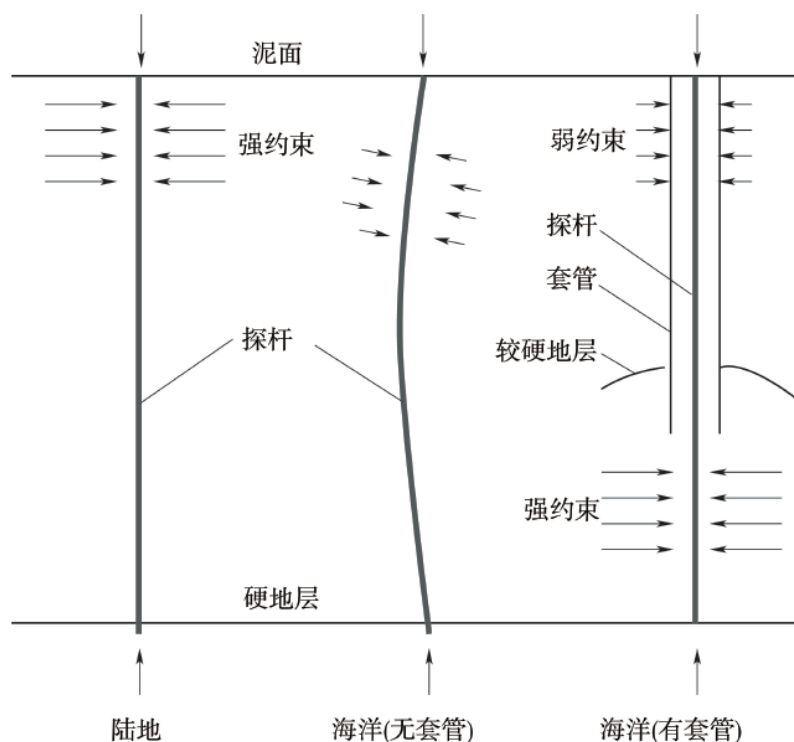


图 16 深层静力触探试验套管示意图

7.1.8 固定式设备的操作应符合下列规定：

- 1 测试载体应满足贯入所需的反力要求；
- 2 测试开始前应调整测试载体水平度和高度；
- 3 作业过程中应实时监控测试载体的稳定性；
- 4 遇到硬层无法贯入或探头倾斜达到限定值时，应采取下列措施：
 - 1) 应停止贯入并回收探头和探杆；
 - 2) 当需要继续贯入时，宜采用钻机引孔方式穿过硬层后继续进行贯入测试；
 - 3) 可增加多层套管进行辅助；
 - 4) 应剔除引孔段的测试数据，并拼接测试段的数据。

【条文说明】

7.1.8 固定式静力触探方式的测试载体在测试开始前要调整到离水面一定高度处，以防止测试过程中潮差对测试载体的影响。

固定式静力触探套管尺寸及作用见表 8：

表 8 固定式静力触探套管尺寸及作用

套管类型	套管外径 (mm)	套管内径 (mm)	入泥面深度	套管作用
第一层套管	219	205	5m~10m	支护海水中的内套管和探杆
第二层套管	146	137	穿透表层软土层， 进入硬土层	支护表层软土层中的 内套管和探杆
第三层套管	108	99.5	穿透静力触探无法 贯入的硬层	支护硬层中的内套管 和探杆
第四层套管	55	38	与静力触探探杆一起 贯入直至无法贯入	支护探杆

7.1.9 井下式设备的操作应符合下列规定：

- 1 测试过程中海底基座不应出现相对位移，基座应能有效夹持钻杆并保持钻杆竖直；
- 2 海底基座和钻杆提供的反力应满足贯入要求；
- 3 贯入系统和探头放至孔底后，应和底部钻具形成一体；
- 4 贯入过程中当锥尖阻力达到探头极限值时应停止贯入并回收设备，并启动钻机进行引孔作业；
- 5 钻机引孔作业判定地层满足测试条件时，宜停止钻进并继续进行测试；
- 6 每个贯入行程开始前应校验探头归零误差，并检查探头饱和状态和完好情况；
- 7 非连续贯入过程应详细记录测试行程与试验顺序。

【条文说明】

7.1.9 井下式静力触探设备一般与绳索取芯的钻探设备相结合使用，如果需要采取原状样品，则将孔压静力触探探头换成取样器，将液压缸通过脐带缆沿着钻孔套管放入孔底，通过液压缸静压采取原状土样。因此，需要详细记录静力触探测试行程与取样试验顺序。

7.1.10 浮动式设备的操作应符合下列规定：

- 1 反力底座底面积宜能根据海床土质情况进行调整，反力底座及连接桁架或套管重量应满足测试反力的要求，反力底座宜有防滑移结构；
- 2 吊放设备应固定在载体船舶上，总起吊力不应小于反力底座及连接桁架或套管总重量的 4 倍；

3 载体船舶应准确锚泊定位于测试点位，作业过程中应实时监控载体锚绳松紧情况，并及时进行微调；

4 吊放安装时应避开大风、急流时段，应采取避免设备旋转、保证基底安装平稳对中孔位的有效措施；

5 应设置连接桁架或套管扶正系统，扶正系统宜与连接桁架或套管动态连接；

6 测试系统安装好后，静置时间不应小于 10min 直至稳定，连接桁架或套管的倾斜角度大于允许值时，应重新放置；

7 遇到硬层无法贯入或探头倾斜达到限定值时，应按本规程第 7.1.8 条执行。

【条文说明】

7.1.10 浮动式静力触探套管系统尺寸及作用见表 9。

表 9 浮动式静力触探套管尺寸及作用

套管类型	套管外径 (mm)	套管内径 (mm)	入泥面深度	套管作用
第一层套管	146	137	穿透表层软土层， 进入硬土层	支护表层软土层中的 内套管和探杆
第二层套管	108	99.5	穿透静力触探无法 贯入的硬层	支护硬层中的内套管 和探杆
第三层套管	55	38	与静力触探探杆一起 贯入直至无法贯入	支护探杆

7.2 资料整理

7.2.1 锥尖阻力应按下式进行孔压修正：

$$q_t = q_c + (1 - a)u_2 \tag{7.2.1}$$

式中：
 q_t — 孔压修正后的锥尖阻力（kPa）；
 q_c — 实测锥尖阻力（kPa）；
 u_2 — 锥肩部位测试的孔隙水压力（kPa）；
 a — 探头的有效面积比，取 0.8。

【条文说明】

7.2.1 q_c 、 f_s 和 u_2 是孔压静力触探的三个基本触探参数，连同孔压消散试验数据在内，是据以进行土层划分、定名、确定地基持力层、给定地基参数的依据，必须根据计算公式逐点算出，以便绘制触探曲线。

R_f 、 B_q 和 q_t 则是通过参数变换计算得到的，其中， R_f 和 B_q 是土层的两个特征参数。

由定义式 $B_q = \Delta u / (q_t - \sigma_{v0})$ 可知, B_q 与 Skempton 孔压系数 A_f 类似。它反映了探头贯入时周围土的孔隙水压力状态。中铁第四勘察设计院集团有限公司曾使用有效面积比 $\alpha=0.21$ 的孔压探头贯入淤泥质土中, 常出现 $u_d \geq 0.5q_c$ 甚至 $q_c < u_d$ 的情况。因为锥尖以丝扣与探头本体相连, 由于结构上的需要, 锥尖的全断面与探头本体存在间隙(中以挡泥圈相隔), 水可以自由进出。丝扣连接部截面积为有效面积, 间隙所占的环状面积则完全暴露于水中或者与土中水存在水力联系。探头贯入时, 特别是在欠固结和正常固结黏土中, 环状面积受到一个与贯入同向的水压力, 使得锥尖阻力减小。因此, q_c 应按本规程式(7.2.1) 修正, 以利于成果的通用和解释。

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 17 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 u_2 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 u_2 , 并仅对锥尖阻力 q_c 进行修正。

为了便于与传统的单、双桥静力触探测试数据和成果进行相互验证和比较, 孔压静力触探的修正后的锥尖阻力可与单桥静力触探比贯入阻力按 $q_t = p_s$ 进行换算。

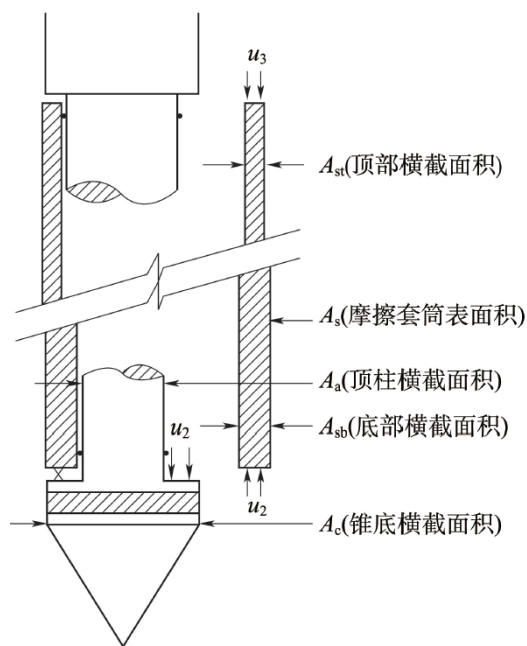


图 17 锥尖阻力不等端面积示意图

7.2.2 孔压消散测试值 u_i 应按下列要求修正:

- 1 应以孔压消散值 u_i 为纵轴, 时间对数值 $\lg t$ 为横轴, 绘制孔压消散 $u_i - \lg t$ 曲线;
- 2 当孔压消散曲线初始段出现陡降现象时, 可用曲线板拟合其后段曲线修正测

试段，并让其通过陡降段终点而与纵轴相交；

3 当孔压消散曲线初始段出现上升现象时，宜略去其上升段，以曲线峰值点作为该孔压消散曲线的计量起点，重新绘制孔压消散曲线。

7.2.3 孔压静力触探的基本参数可按下列公式计算：

$$\sigma_{v0} = \sum \gamma_i h_i \quad (7.2.3-1)$$

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0 \quad (7.2.3-2)$$

$$\Delta u_2 = u_2 - u_0 \quad (7.2.3-3)$$

式中： σ_{v0} — 总上覆应力（kPa）；
 γ_i — 第 i 层土的平均天然重度（kN/m³）；
 h_i — 第 i 层土的厚度（m）；
 σ'_{v0} — 有效上覆应力（kPa）；
 u_0 — 静水压力（kPa）；
 Δu_2 — 触探超静孔隙水压力（kPa）；
 u_2 — 锥肩位置测试的孔隙水压力（kPa）。

7.2.4 摩阻比 R_f 和归一化摩阻比 F_r 可按下列公式计算：

$$R_f = \frac{f_s}{q_t} \times 100\% \quad (7.2.4-1)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \times 100\% \quad (7.2.4-2)$$

式中： R_f — 摩阻比（%）；
 f_s — 侧壁摩阻力（kPa）；
 q_t — 经孔压 u_2 修正的锥尖阻力（kPa）；
 F_r — 归一化摩阻比（%）；
 σ_{v0} — 总上覆应力（kPa）。

7.2.5 归一化锥尖阻力 Q_t 可按下列公式计算：

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0} \quad (7.2.5)$$

式中： Q_t — 归一化锥尖阻力；
 q_t — 经孔压 u_2 修正的锥尖阻力（kPa）；
 σ_{v0} — 总上覆应力（kPa）；

σ'_{v0} — 有效上覆应力 (kPa)。

7.2.6 孔压参数比 B_q 可按下式计算:

$$B_q = \frac{\Delta u_2}{q_t - \sigma'_{v0}} \quad (7.2.6)$$

式中: B_q — 孔压参数比;

Δu_2 — 触探超静孔隙水压力 (kPa);

q_t — 经孔压 u_2 修正的锥尖阻力 (kPa);

σ'_{v0} — 总上覆应力 (kPa)。

7.2.7 净锥尖阻力 q_n 可按下式计算:

$$q_n = q_t - \sigma'_{v0} \quad (7.2.7)$$

式中: q_n — 净锥尖阻力 (kPa);

q_t — 经孔压 u_2 修正的锥尖阻力 (kPa);

σ'_{v0} — 总上覆应力 (kPa)。

7.2.8 有效锥尖阻力 q_e 可按下式计算:

$$q_e = q_t - u_2 \quad (7.2.8)$$

式中: q_e — 有效锥尖阻力 (kPa);

q_t — 经孔压 u_2 修正的锥尖阻力 (kPa);

u_2 — 锥肩位置测试的孔隙水压力 (kPa)。

7.2.9 孔压消散试验的归一化超孔压比 U 可按下式计算:

$$U = \frac{u_t - u_0}{u_i - u_0} \quad (7.2.9)$$

式中: U — 归一化超孔压比;

u_t — 消散试验 t 时刻的孔隙水压力 (kPa);

u_0 — 静水压力 (kPa);

u_i — 消散试验起始时刻的孔隙水压力 (kPa)。

【条文说明】

7.2.4~7.2.9 任何对应力增加的归一化均应考虑水平应力的改变, 这是由于贯入阻力很大程度上受到有效水平应力的影响, 然而在当前工程实践中很少做如此考虑, 主要原因在于难以预先确定土体的原位水平应力。即便仅仅是采用有效上覆应力进行归一化, 也需要了

解土体的重度与地下水条件。孔压静力触探参数的解译应当基于无量纲变量，以利用连续介质力学中的比例法则，因此本规程规定贯入阻力和孔隙水压力归一化应力计算可按式(7.2.4)~式(7.2.9)进行。

7.2.10 土类指数 I_c 可按下列公式计算：

$$I_c = \sqrt{[3.47 - \lg(Q_m^*)]^2 + [\lg(F_r) + 1.22]^2} \quad (7.2.10-1)$$

$$Q_m^* = C_N q_t / p_a \quad (7.2.10-2)$$

$$C_N = \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^\alpha \quad (7.2.10-3)$$

$$\alpha = 1.338 - 0.249(Q_m^*)^{0.264} \quad (7.2.10-4)$$

式中： I_c — 土类指数；

Q_m^* — 考虑应力水平的归一化的锥尖阻力；

F_r — 归一化摩阻比（%），计算时取百分数的分子；

C_N — 应力修正系数，大于 1.7 时取 1.7；

q_t — 经孔压 u_2 修正的锥尖阻力（kPa）；

p_a — 压力参考值，取 100kPa；

σ'_{v0} — 有效上覆应力（kPa）；

α — 应力指数。

【条文说明】

7.2.10 本条基于 Robertson 所提出的土分类指数，该分类指数在国际范围内已得到广泛认可。同时，本规程采用 Q_m^* 替代了 Q_m 。与 Robertson（2009）建议的归一化锥尖阻力 Q_m 相比， Q_m^* 的主要特点为限制了应力修正系数 C_N 的上限值(即 $C_N \leq 1.7$)。该方法由 Idriss 和 Boulanger(2004)提出，具有如下特点：（1）能够充分避免近地表浅部上覆压力过低导致修正锥尖阻力过大；（2）在深度较大的土体中，能够充分考虑上覆压力的影响而对锥尖阻力作出修正。土类指数公式需要进行迭代计算，给定初始 $C_N = 1$ ，代入式(7.2.10-2)计算 Q_m^* ，代入式(7.2.10-4)计算应力指数 α ，再代入式(7.2.10-3)中计算应力修正系数 C_N 。如此往复，直到迭代满足精度要求即止。现有数据采集系统一般均可以进行自动计算生成。

7.2.11 孔压静力触探测试后应绘制单孔静力触探曲线柱状图，柱状图应符合下列要求：

1 应包括以深度 h 为纵轴，孔压修正后锥尖阻力 q_t 、侧壁摩阻力 f_s 、孔隙水压力 u_2 、摩阻比 R_f 、孔压参数比 B_q 为横轴的 $q_t \sim h$ 曲线、 $f_s \sim h$ 曲线、 $u_2 \sim h$ 曲线、 $R_f \sim h$ 曲线、 $B_q \sim h$

曲线;

2 深度 h 的比例尺宜取1:100或1:200,侧壁摩阻力 f_s 、孔隙水压力 u_2 、修正后锥尖阻力 q_t 三者的数值比例关系宜取1:10:100,孔压参数比 B_q 和摩阻比 R_f 的数值比例关系宜取10:1。

7.2.12 进行孔压消散试验后,应绘制下列成果曲线:

- 1 应以孔隙水压力 u_t 为纵轴,以时间 t 的对数 $\lg t$ 为横轴的孔压消散曲线;
- 2 应提供以超孔压比 U 为纵轴,以时间 t 的对数 $\lg t$ 为横轴的归一化超孔压消散曲线;
- 3 宜提供锥尖阻力虽时间变化的曲线。

7.2.13 根据孔压静力触探曲线划分土层界面时应符合下列规定:

- 1 孔隙水压力和孔压参数比虽深度曲线的突变点位置宜确定为土层界面;
- 2 当上、下土层的锥尖阻力值相差1倍以上时,宜将锥尖阻力超前深度和滞后深度的中点位置确定为土层界面;
- 3 当上、下土层的锥尖阻力值相差不超过1倍时,宜结合摩阻比和侧壁摩阻力值确定土层界面。

【条文说明】

7.2.13 探头在成层土中贯入,即使各土层是绝对均质的,也会因上下土层间密度、状态及土质不同,使得触探参数特别是端阻值在土层界面上下一一定深(高)度内出现提前变大或变小的现象,称为土层的界面效应。下卧土层对上覆土层贯入阻力的影响高度称为超前深度;上覆土层对下卧土层贯入阻力的影响深度称为滞后深度。界面效应的实质与探头对土的破坏机理有关。在界面上下,探头贯入时,土的破坏一般以剪切(或冲切)为主,在超前深度以上和滞后深度以下则多以压密破坏为主。这一机理现象对桩尖持力层的选择、沉桩可能性判断及深基础(桩)承载力计算均有重要意义。工程实践和模型试验证明,贯入阻力是土强度及变形性质的综合反映,而端阻又是最为常用的一个参数。不同土层可能有相同的端阻,而孔压值和侧阻可大不相同。因此在划分土层时,要求以端阻为主,结合孔压、孔压参数比及摩阻比等参数予以划分,以同一分层内的触探参数基本相近为原则。

7.3 成果应用

7.3.1 土类划分可根据孔压静力触探参数按表 7.3.1 或图 7.3.1 进行。

表 7.3.1 土的分类表

分区	土类定名	$Q_m^* - F_r$ 分类	$Q_m^* - \Delta u_2 / \sigma'_{v0}$ 分类	q_n 分类
1	淤泥	—	—	$q_n \leq 0.35\text{MPa}$
2	淤泥质土	—	—	$0.35\text{MPa} < q_n \leq 0.68\text{MPa}$
3	黏土	$I_c \geq 2.9$ 且 $q_n > 0.68\text{MPa}$	$Q_m^* \leq 20.3 - 7.6\exp(-\Delta u_2 / \sigma'_{v0} / 6.23)$ 且 $q_n > 0.68\text{MPa}$	—
4	粉质黏土	$2.6 \leq I_c < 2.90$ 且 $q_n > 0.68\text{MPa}$	$Q_m^* > 20.3 - 7.6\exp(-\Delta u_2 / \sigma'_{v0} / 6.23)$ 且 $Q_m^* \leq 31.0 - 11.6\exp(-\Delta u_2 / \sigma'_{v0} / 6.23)$ 且 $q_n > 0.68\text{MPa}$	—
5	粉土	$2.32 \leq I_c < 2.60$ 且 $q_n > 0.68\text{MPa}$	$Q_m^* > 31.0 - 11.6\exp(-\Delta u_2 / \sigma'_{v0} / 6.23)$ 且 $Q_m^* \leq 30\exp(0.255 \Delta u_2 / \sigma'_{v0})$ 或 $\Delta u_2 / \sigma'_{v0} > 2$ 且 $q_n > 0.68\text{MPa}$	—
6	粉砂~细砂	$1.87 \leq I_c < 2.32$	$-2 \leq \Delta u_2 / \sigma'_{v0} \leq 2$ 且 $Q_m^* > 30\exp(0.255 \Delta u_2 / \sigma'_{v0})$ 且 $Q_m^* \leq 70\exp(0.226 \Delta u_2 / \sigma'_{v0})$	—
7	中砂~粗砂	$1.47 \leq I_c < 1.87$	$-2 \leq \Delta u_2 / \sigma'_{v0} \leq 2$ 且 $Q_m^* > 70\exp(0.226 \Delta u_2 / \sigma'_{v0})$ 且 $Q_m^* \leq 140\exp(0.226 \Delta u_2 / \sigma'_{v0})$	—
8	砾砂	$I_c < 1.47$	$-2 \leq \Delta u_2 / \sigma'_{v0} \leq 2$ 且 $Q_m^* > 140\exp(0.226 \Delta u_2 / \sigma'_{v0})$	—

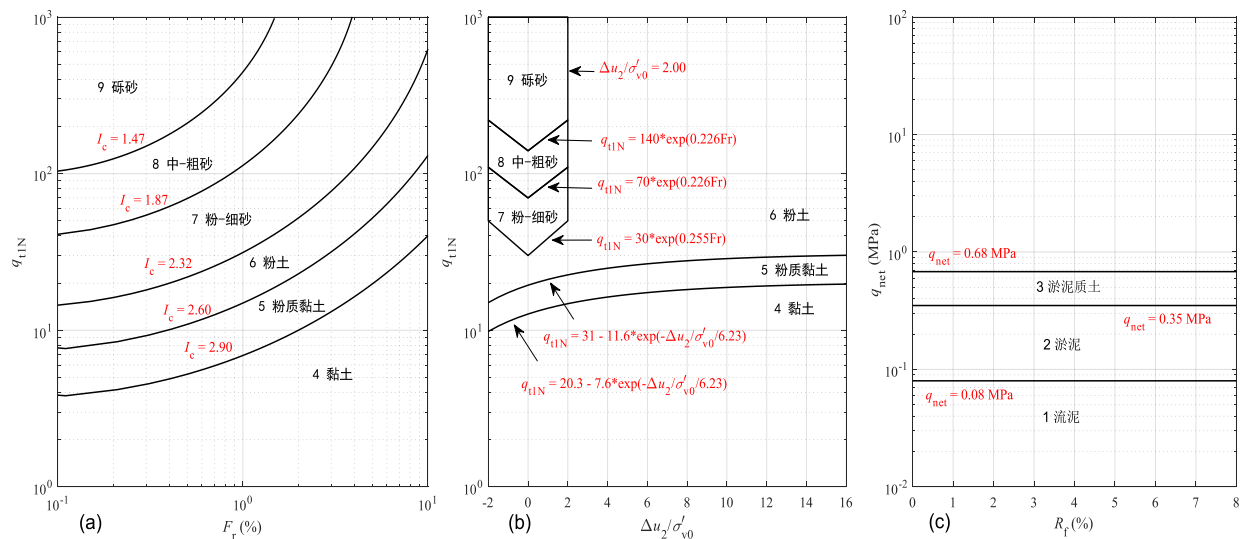


图 7.3.1 土的分类图

(a) $Q_m^* - F_r$ 分类图; (b) $Q_m^* - \Delta u_2 / \sigma'_{v0}$ 分类图; (c) q_n 分类图

【条文说明】

7.3.1 土分类一直是孔压静力触探测试的主要工程应用之一，国内外对基于CPTU/CPT的土类划分方法进行了大量研究。国外采用的土类名称和分类方法主要是根据美国《统一土

分类体系》ASTM D2487，与我国《公路工程地质勘察规范》JTG C20的土类名称及划分标准存在较多差异，不能直接应用到我国公路工程。

国内目前提出基于CPTU测试成果进行土类划分的标准主要有《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018、《孔压静力触探测试技术规程》T/CCES 01、《水运工程静力触探技术规程》JTS/T 242。

其中，《铁路公路地质原位测试规程》TB 10018采用总锥尖阻力及超孔压比进行判别。

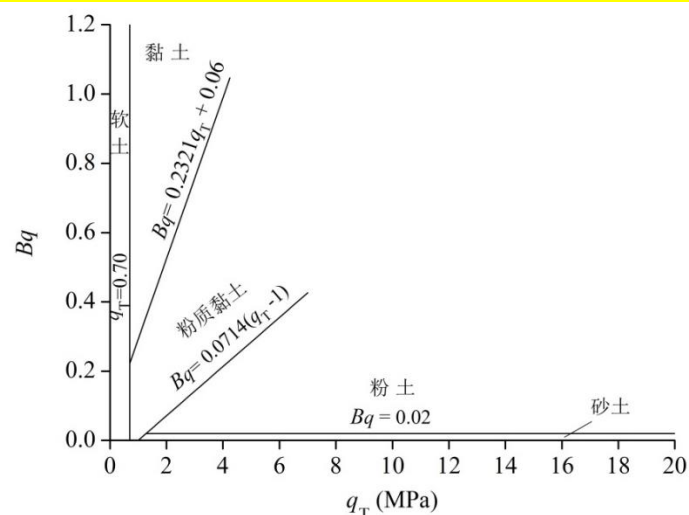


图 18 《铁路工程地质原位测试规程》土类划分方法

《孔压静力触探测试技术规程》T/CCES 01采用了基于Robertson（2009）土类指数进行修正的分类方法，将 $Q_m - F_r$ 空间划分为6个区域，其对应的土类名称与《公路工程地质勘察规范》JTG C20的土分类一致，经江苏地区各种土类及对应的CPTU数据共计370组数据验证，划分的准确率均达90%以上。

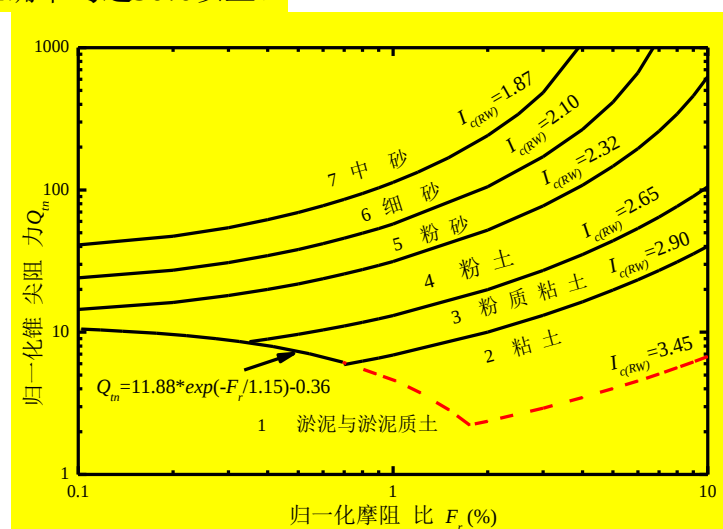


图 19 《孔压静力触探测试技术规程》土类划分方法

《水运工程静力触探技术规程》JTS/T 242 根据我国的水运工程土分类标准，通过收集

中国广东、香港、澳门、海南、福建、浙江、江苏、马来西亚、斯里兰卡及尼日利亚沿海 49 个水运工程项目共计 1892 组土类样本和对应的 CPTU 数据,提出以 $Q_m^* - F_r$ 图判别为主,以 $Q_m^* - \Delta u_2 / \sigma'_{v0}$ 图为辅,对黏土、粉质黏土、粉土、粉砂、细砂、中砂、粗砂、砾砂进行划分,并通过 q_n 对淤泥、淤泥质土进行划分的方法。根据数据对比分析结果,从统计意义上说,该方法能够使每种土类被正确识别的概率达到 79% 以上,大部分土类的正确识别率可达 85% 以上,细粒土与粗粒土的识别率可达 95% 以上,可满足工程需要。

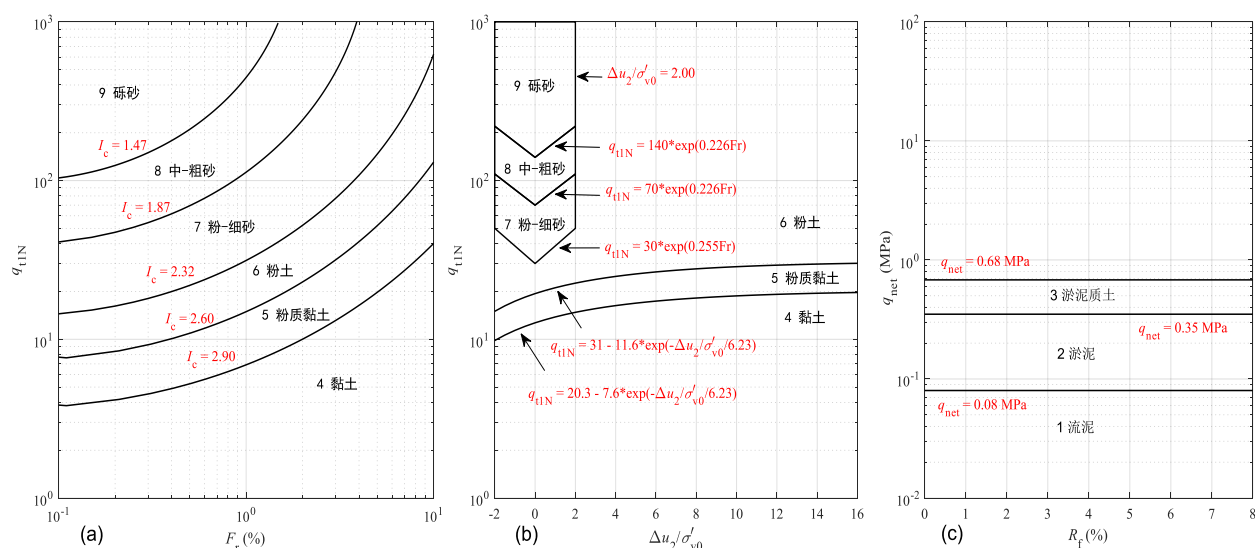


图 20 《水运工程静力触探技术规程》土类划分方法

鉴于《水运工程静力触探技术规程》JTS/T 242 的土分类方法是在收集国内外更多地区的资料,并在《孔压静力触探测试技术规程》T/CCES 01 划分方法的基础上发展而来,同时《公路工程地质勘察规范》JTG C20 与《水运工程岩土勘察规范》JTS133 对黏土、粉质黏土、粉土、粉砂、细砂、中砂、粗砂、砾砂的划分标准基本一致,区别仅在于《公路工程地质勘察规范》JTG C20 对“软土”细分为“淤泥质土”($1 < e < 1.5$)、淤泥($e > 1.5$),而《水运工程岩土勘察规范》JTS133 将“淤泥性土”细分为“淤泥质土”($1 \leq e < 1.5$)、淤泥($1.5 \leq e < 2.4$)、流泥($e \geq 2.4$)。由上述划分标准可知,《水运工程岩土勘察规范》JTS133 中定义的“流泥”,按《公路工程地质勘察规范》JTG C20 也属于“淤泥”的范畴。

因此,在《水运工程静力触探技术规程》JTS/T 242 提出的基于 CPTU 的土分类方法的基础上,通过归并淤泥和流泥的分区范围后,在公路工程中仍可以 $Q_m^* - F_r$ 图判别为主,以 $Q_m^* - \Delta u_2 / \sigma'_{v0}$ 图为辅,对黏土、粉质黏土、粉土、粉砂、细砂、中砂、粗砂、砾砂进行划分,并通过 q_n 对淤泥、淤泥质土进行划分。

7.3.2 无黏性土的有效内摩擦角可按下列方法估算:

1 粉砂、细砂

$$\varphi' = 3.65 \ln(q_n) + 27.1 \quad (7.3.2-1)$$

式中: φ' — 有效内摩擦角($^{\circ}$);
 q_n — 净锥尖阻力(MPa)。

2 中砂、粗砂、砾砂

$$\varphi' = 3.30 \ln(q_n) + 29.5 \quad (7.3.2-2)$$

式中: φ' — 有效内摩擦角($^{\circ}$);
 q_n — 净锥尖阻力(MPa)。

【条文说明】

7.3.2 本条引用自《水运工程静力触探技术规程》。该标准基于珠三角地区水运工程项目的 72 组中砂~中砂以及 33 组粉砂~细砂样品的三轴固结排水剪切试验成果与对应的 CPTU 数据统计分析得出, 见图 21。

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, 本条内容不适用于钙质砂和碳质砂。

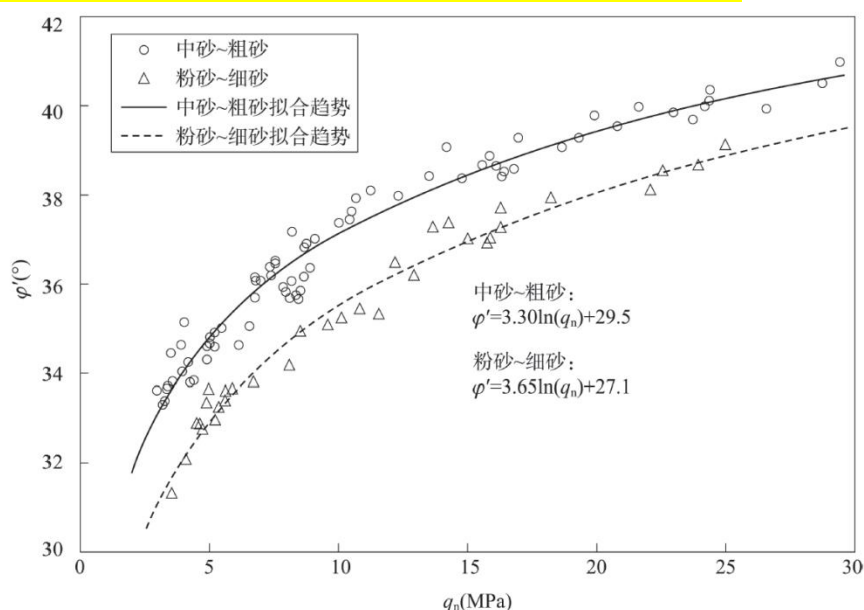


图 21 无黏性土有效内摩擦角与净锥尖阻力的关系

7.3.3 无黏性土的相对密实度可按式估算:

$$D_r = [31.78 \ln(q_t) - 13.98] / 100 \quad (7.3.3)$$

式中: D_r — 相对密实度(%);
 q_t — 经孔压 u_2 修正的锥尖阻力(kPa)。

【条文说明】

7.3.3 本条引用自《水运工程静力触探技术规程》。该标准根据港珠澳大桥岛隧工程 84 组石英质砂样室内土工试验与对应的 CPTU 数据统计分析得出。首先通过室内土工试验，得到砂样的最大最小干密度，然后结合现场内置环刀取砂器的原状砂样得到原位砂土的干密度，进而计算出原位砂土的相对密实度。通过与对应 CPTU 数据的分析，随着 CPTU 锥尖阻力增大，砂土的相对密实度也逐渐增大，整体表现出非线性的特征。

相对密实度与锥尖阻力的关系还受到土的压缩性和胶结等因素的影响，这些因素导致探头贯入过程中可能出现颗粒破碎等情况，使得相同相对密实度条件下的砂土具有不同的锥尖阻力。因此，本条内容不适用于钙质砂和碳质砂。

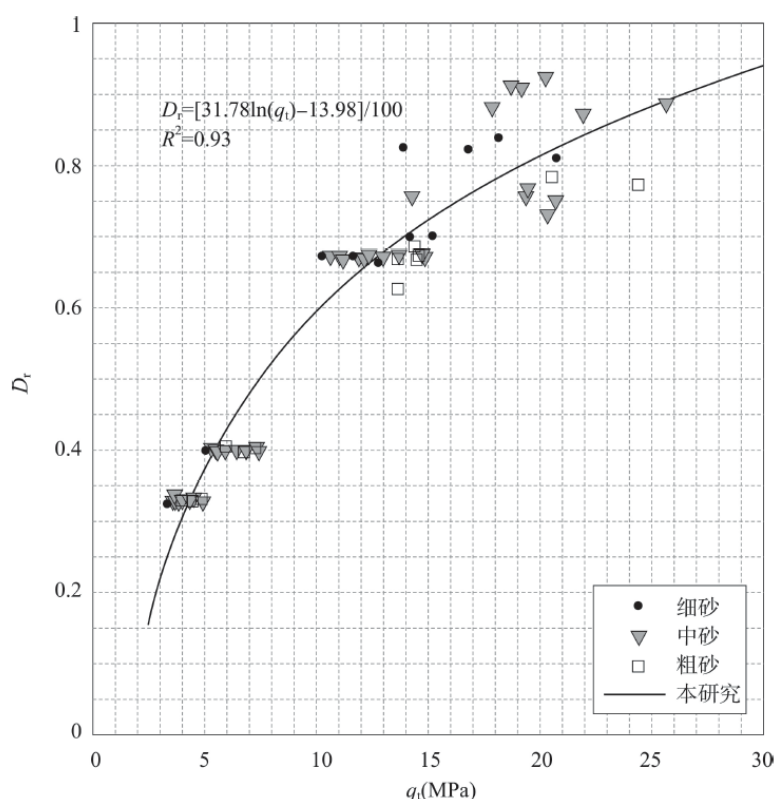


图 22 无黏性土相对密实度与锥尖阻力的关系

7.3.4 黏性土的不排水抗剪强度可按式估算：

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (7.3.4)$$

式中： S_u — 不排水抗剪强度(kPa)；

q_t — 经孔压 u_2 修正的锥尖阻力(kPa)；

σ_{v0} — 总上覆应力(kPa)；

N_{kt} — 经验圆锥系数，宜结合土工试验和地区经验确定，缺少地区经验时可按

表 7.3.4 取值。

表 7.3.4 经验圆锥系数 N_{kt}

剪切试验条件		直剪 快剪	固结 快剪	三轴不固结 不排水剪	三轴固结 不排水剪	K_0 三轴固结 不排水剪	无侧限抗压 强度试验	现场十字板 剪切试验
N_{kt}	范围值	10~25	12~25	18~35	9~17	7~14	22~42	10~23
	统计平均值	20	17.9	23.8	13	10	30	15.5

【条文说明】

7.3.4 黏性土的不排水抗剪强度与试验方法有关，包括剪切模式、边界条件、剪切速率、围压水平、初始应力状态和其他因素等，因此不同试验方法将会得到不同的不排水抗剪强度。常用的剪切试验包括直剪试验、三轴试验、无侧限抗压强度试验和十字板剪切试验等几大类，直剪试验和三轴试验具体又分为固结（各项同性或各向异性）和不固结等。

CPTU测试是一种对现场原位土体的破坏试验过程，为了与室内不同试验方法的试验结果进行对比分析，将所有试验结果都统一到黏性土原位应力状态下的抗剪强度指标：

- （1）直剪快剪试验的 S_u 取土样在上覆总应力为正压力条件下的不排水抗剪强度值；
- （2）固结快剪试验的 S_u 取土样在上覆有效应力条件下固结完成后以其为正压力条件下的不排水抗剪强度值；
- （3） UU 试验的 S_u 取土样在上覆总应力为围压条件下的不排水抗剪强度值；
- （4） CU 试验的 S_u 取土样在上覆有效应力为围压条件下固结完成后以其为围压条件下的不排水抗剪强度值；
- （5） CK_0UC 试验先对试验样品进行 K_0 固结（竖向应力取前期固结压力，在固结过程中保持样品水平向无变形），完成固结后再进行不排水剪切，以此时的不排水抗剪强度值定义 S_u 。

通过收集广东、海南、福建等地区的室内土工试验成果及 CPTU 测试成果，各种试验成果与 CPTU 净锥尖阻力的相关性见图 23~图 29。

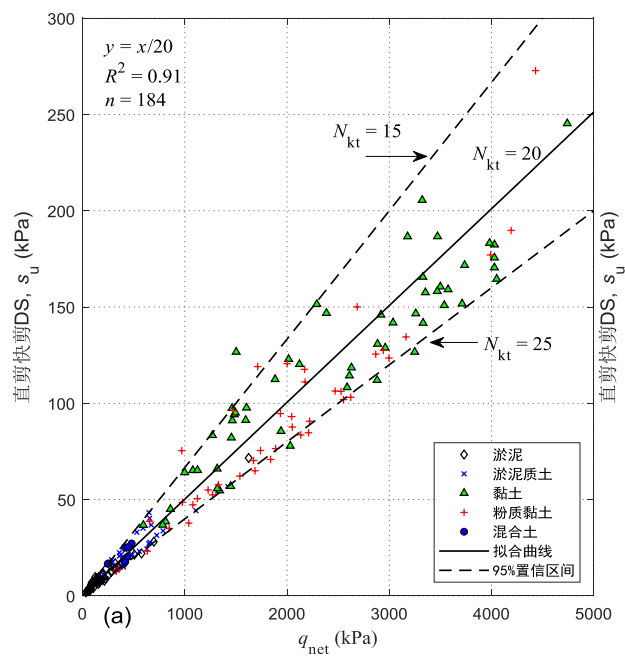


图 23 直剪快剪强度与净锥尖阻力的关系

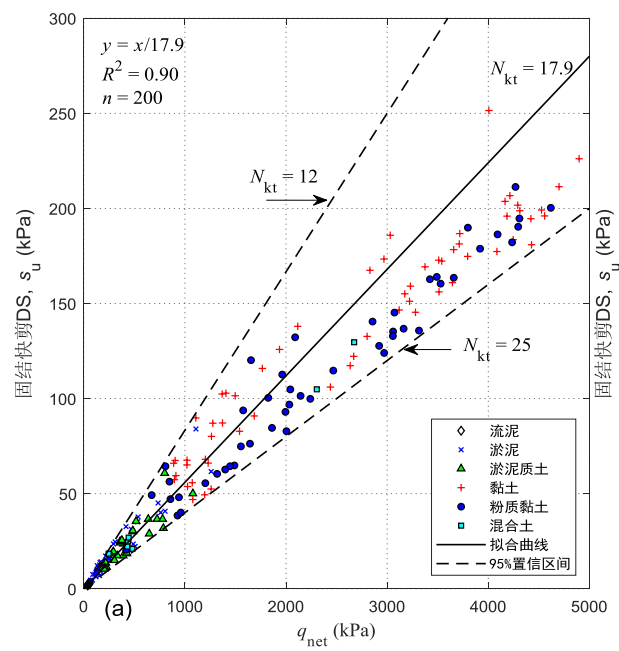


图 24 固结快剪强度与净锥尖阻力的关系

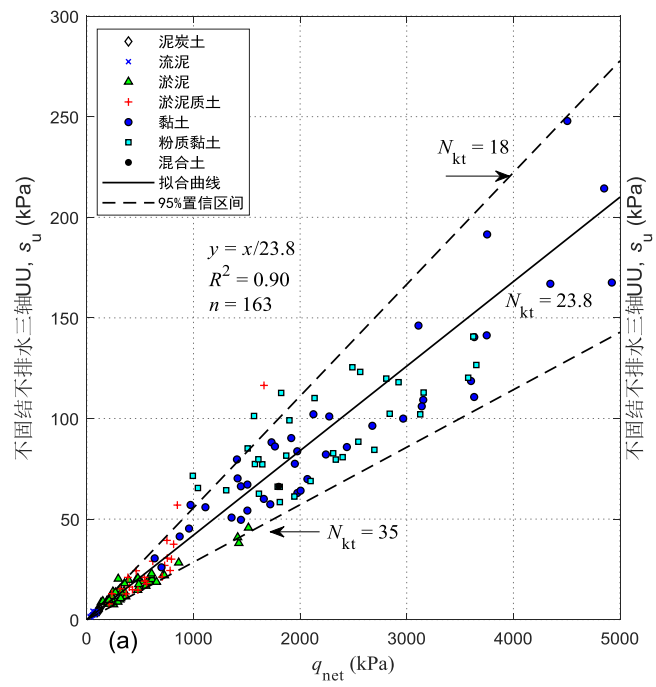


图 25 三轴不固结不排水剪切强度与净锥尖阻力的关系

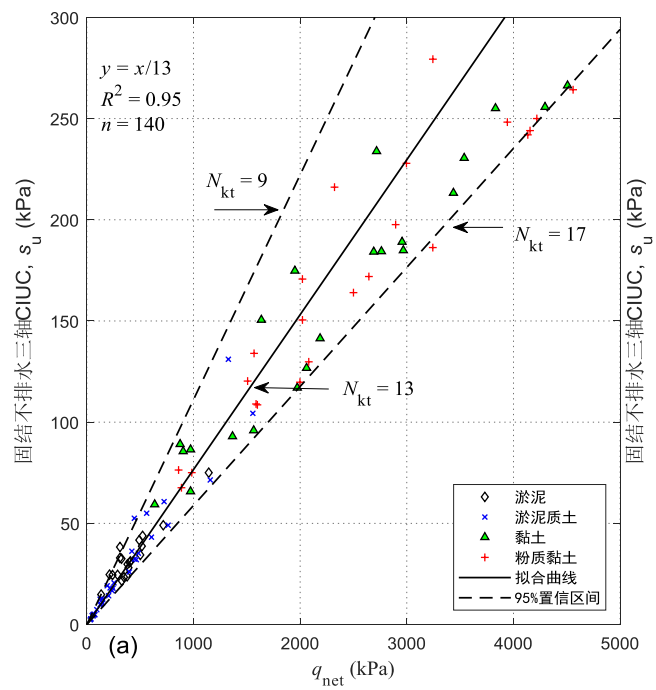


图 26 三轴固结不排水剪切强度与净锥尖阻力的关系

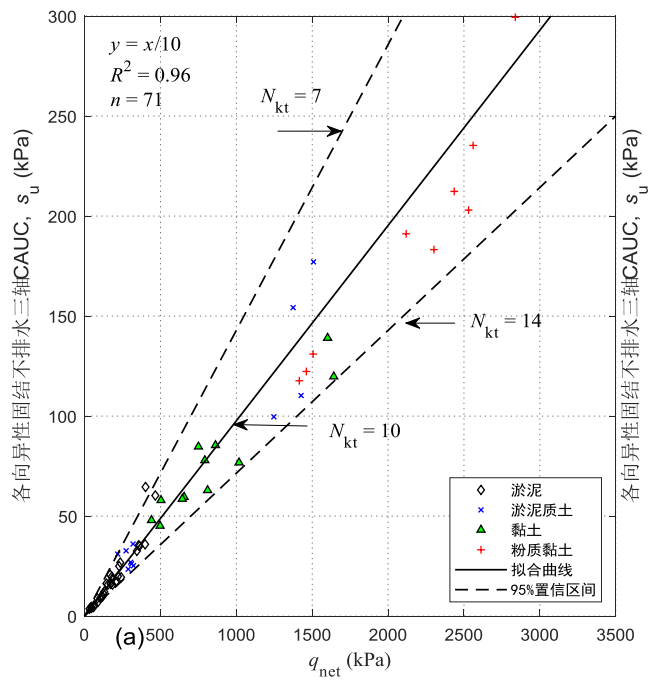


图 27 K_0 三轴固结不排水剪切强度与净锥尖阻力的关系

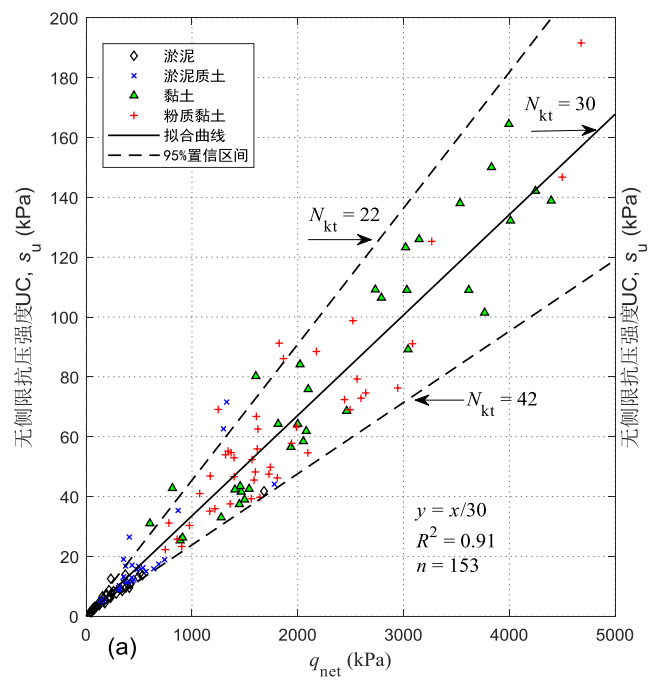


图 28 无侧限抗压强度与净锥尖阻力的关系

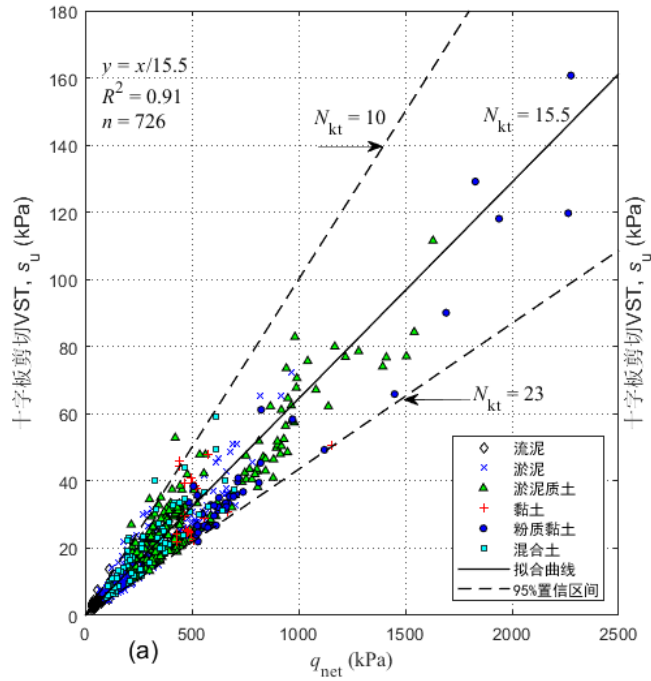


图 29 十字板剪切强度与净锥尖阻力的关系

7.3.5 黏性土的静止土压力系数可按式估算：

$$K_0 = 0.10 \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad (7.3.5)$$

式中： K_0 — 静止土压力系数；

q_t — 经孔压 u_2 修正的锥尖阻力（kPa）；

σ_{v0} — 总上覆应力(kPa)；

σ'_{v0} — 有效上覆应力(kPa)。

7.3.6 黏性土的水平向固结系数可按下列公式估算：

$$C_h = \frac{t^* r^2 \sqrt{I_r}}{t_{50}} \quad (7.3.6-1)$$

$$I_r = \frac{G_0}{S_u} \quad (7.3.6-2)$$

$$G_0 = \frac{\gamma}{g} V_s^2 \quad (7.3.6-3)$$

式中： C_h — 土的水平向固结系数(cm^2/s)；

t^* — 相应于 t^* 的时间因数，取 0.245；

- r — 孔压探头半径，取 1.785cm；
- I_r — 刚度指数；
- t_{50} — 超静孔隙水压力消散达到 50%时对应的时间；
- G_0 — 小应变剪切模量(kPa)；
- S_u — 不排水抗剪强度(kPa)；
- γ — 土的天然重度(kN/m³)；
- g — 重力加速度，取 9.81m/s²；
- V_s — 剪切波速(m/s)。

【条文说明】

7.3.6 本条根据 Houlsby 和 Teh（1988）提出的孔压消散试验理论解，经过大量工程实践检验，得到国内外普遍认可。

7.3.7 黏性土的水平向渗透系数可按式估算：

$$k_h = (251t_{50})^{-1.25} \tag{7.3.7}$$

式中： k_h — 土的水平向渗透系数(cm/s)；
 t_{50} — 超静孔隙水压力消散达到 50%时对应的时间。

【条文说明】

7.3.7 本条根据 Parez 和 Fauriel（1988）推荐的经验公式，经过大量工程实践检验，得到国内外普遍认可。

Jamiolkowski 等提出了通过水平渗透系数 k_h 评价竖向渗透系数 k_v 的关系表，见表 10。

表 10 原位状态下黏土的 k_h / k_v 取值范围表

黏土特性	k_h / k_v
无微结构或少量微结构发育	1~1.5
微结构发育的沉积物，如黏土中含有透水性强的透镜体	2~4
有明显夹层的黏土，间夹透水层	3~15

7.3.8 黏性土的超固结比可按式估算：

$$OCR = k_{OCR} Q_t \tag{7.3.8}$$

式中： OCR — 超固结比；
 k_{OCR} — 经验系数，宜结合土工试验和地区经验确定，缺少地区经验时可取 0.16；

Q_t — 归一化锥尖阻力。

7.3.9 黏性土的灵敏度可按式估算：

$$S_t = N_s / F_r \quad (7.3.9)$$

式中： S_t — 黏性土的灵敏度；

N_s — 经验系数，宜结合土工试验和地区经验确定，缺少地区经验时可取 6.3；

F_r — 归一化摩阻比(%), 计算时取百分数的分子。

【条文说明】

7.3.9 本条是基于广东、福建、海南、江苏等地区若干工程项目的 366 组黏性土无侧限抗压强度试验及现场十字板测试得出的灵敏度与对应的 CPTU 数据统计分析得出。

7.3.10 黏性土的压缩模量可按下列方法估算：

1 当 $q_n \leq 3.4\text{MPa}$ 时：

$$E_s = 3.61q_n^{0.56} \quad (7.3.10-1)$$

式中： E_s — 100kPa~200kPa 压力段的地基土压缩模量(MPa)；

q_n — 净锥尖阻力(MPa)。

2 当 $3.4\text{MPa} < q_n \leq 5.0\text{MPa}$ 时：

$$E_s = 0.47q_n^{2.23} \quad (7.3.10-2)$$

式中： E_s — 100kPa~200kPa 压力段的地基土压缩模量(MPa)；

q_n — 净锥尖阻力(MPa)。

【条文说明】

7.3.10 本条是基于广东、福建、海南、江苏等地区若干工程项目的 214 组黏性土固结试验成果与对应的 CPTU 数据统计分析得出（见图 29）。黏性土的压缩模量与净锥尖阻力有较好的相关性。

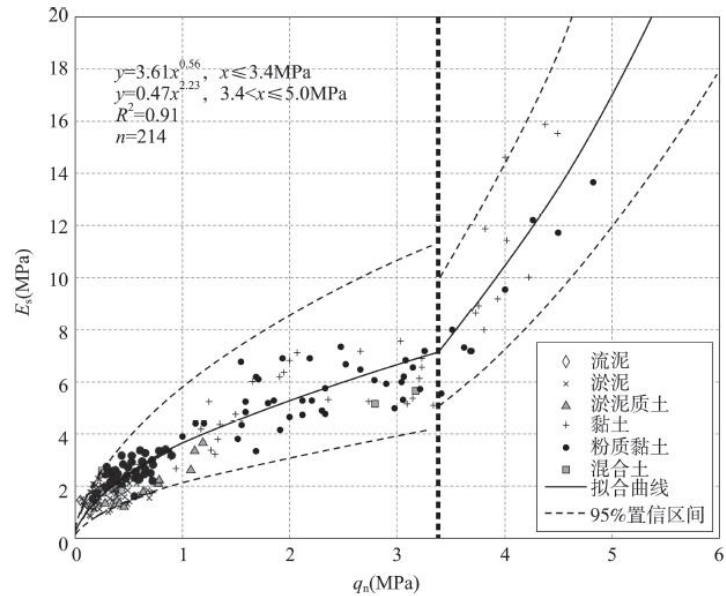


图 30 压缩模量与净锥尖阻力的关系

7.3.11 土层的剪切波速可按下列方法估算：

1 黏性土

$$V_s = 157.39q_t^{0.39} \quad (7.3.11-1)$$

式中： V_s — 土层的剪切波速(m/s)；

q_t — 经孔压 u_2 修正的锥尖阻力(kPa)。

2 无黏性土

$$V_s = 208.83q_t^{0.13} \quad (7.3.11-2)$$

式中： V_s — 土层的剪切波速(m/s)；

q_t — 经孔压 u_2 修正的锥尖阻力(kPa)。

【条文说明】

7.3.11 本条是基于广东、福建地区工程项目的 194 组黏性土和 31 组无黏性土单孔波速测试成果与对应 CPTU 数据统计分析得出（见图 31）。

其中，黏性土包括淤泥性土、黏土、粉质黏土和粉土，无黏性土包括粉砂、细砂、中砂和粗砂。如图 30，黏性土中剪切波速 V_s 表现出随 q_t 增大而显著增加的趋势，这是由于黏性土的剪切波速与锥尖阻力受到应力历史和密实状态等共同因素作用而产生了一致的变化规律；然而在无黏性土中这一增加趋势并不显著，这是无黏性土的剪切波速还受到粒间接触和颗粒定向排列等其他因素控制所致。

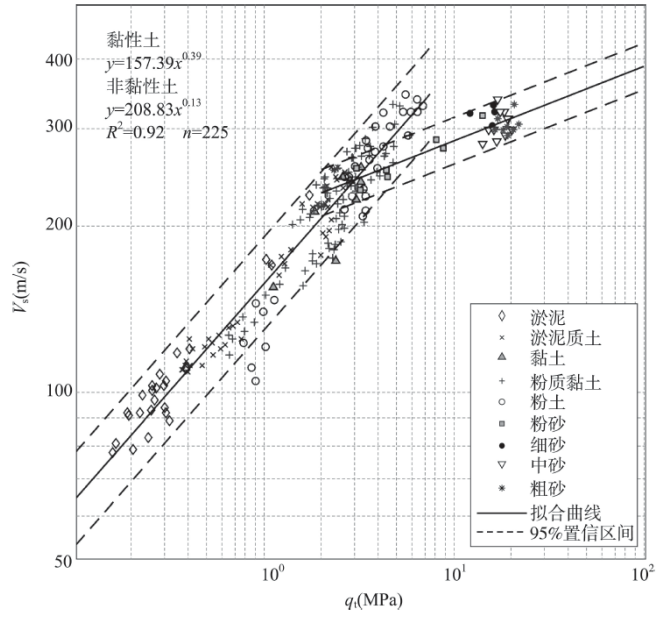


图 31 剪切波速与锥尖阻力的关系

7.3.12 打入法、静压法预制桩的单桩竖向极限承载力可根据孔压静力触探成果按下列公式估算：

$$Q_{uk} = u \sum_{i=1}^n f_{pi} h_i + q_p A_p \quad (7.3.12-1)$$

$$f_{pi} = \frac{q_{ci}}{\xi_{fi}} \quad (7.3.12-2)$$

$$q_p = \xi_p q_{ca} \quad (7.3.12-3)$$

式中： Q_{uk} — 单桩竖向极限承载力(kN)；

u — 桩身周长(m)；

f_{pi} — 第 i 层土的单位桩侧面积极限摩阻力(kPa)；

h_i — 桩身穿过的第 i 层土的厚度(m)；

q_p — 单位桩端面积的极限端阻力(kPa)；

A_p — 桩端横截面面积(m²)；

q_{ci} — 第 i 层土的实测锥尖阻力统计值(kPa)；

ξ_{fi} — 第 i 层土的侧摩阻力系数，按表 7.3.12 确定；

ξ_p — 端阻力系数，按表 7.3.12 确定；

q_{ca} — 桩端附近等价平均锥尖阻力(kPa)，取桩端上下 $1.5d$ 范围内，舍弃

$q_c > 1.3\bar{q}_{ca}$ 以及桩端以上 $q_c < 0.7\bar{q}_{ca}$ 之后的 q_c 平均值 ($\bar{q}_{ca}$ 为桩端上下 $1.5d$ 范围内的 q_c 平均值)。

表 7.3.12 端阻力系数和侧摩阻力系数取值

土类	q_c (kPa)	端阻力系数 ξ_p	侧摩阻力系数 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	>5000	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_{pi} 最大极限值取括号内的值。

【条文说明】

7.3.12 表11列出了国内目前所采用的基于孔压静力触探的直接法。

表 11 国内标准中预测预制桩承载力的静力触探直接法

方法来源	q_b (单位面积端阻)	f (单位面积侧阻)
《孔压静力触探测试技术规程》 T/CCES 1	$q_p = \xi_p q_{ca}$ q_{ca} 取桩端上下 $1.5d$ 范围内，舍弃 $q_c > 1.3\bar{q}_{ca}$ 以及桩端以上 $q_c < 0.7\bar{q}_{ca}$ 之后的 q_c 平均值 ($\bar{q}_{ca}$ 为桩端上下 $1.5d$ 范围内的 q_c 平均值)； 软黏土、淤泥 ($q_c < 1000$ kPa)： $\xi_p = 0.5$ ； 黏性土 ($q_c = 1000 \sim 5000$ kPa)： $\xi_p = 0.45$ ； 粉土、松散砂土 ($q_c \leq 5000$ kPa)： $\xi_p = 0.5$ ； 密实粉土 ($q_c > 5000$ kPa)： $\xi_p = 0.55$ ； 中密砂土 ($q_c = 5000 \sim 12000$ kPa)： $\xi_p = 0.5$ ； 密实砂土： ($q_c > 12000$ kPa)： $\xi_p = 0.4$	$f_{pi} = \frac{q_{ci}}{\xi_{fi}}$ 软黏土、淤泥 ($q_c < 1000$ kPa)： $\xi_f = 90$ ， $f_{pmax} = 15$ kPa； 黏性土 ($q_c = 1000 \sim 5000$ kPa)： $\xi_f = 40$ ， $f_{pmax} = 35$ kPa (施工质量控制 较好时取 80kPa)； 粉土、松散砂土 ($q_c \leq 5000$ kPa)： $\xi_f = 60$ ， $f_{pmax} = 35$ kPa； 密实粉土 ($q_c > 5000$ kPa)： $\xi_f = 60$ ， $f_{pmax} = 35$ kPa (施工质量控制较好时取 80kPa)； 中密砂土 ($q_c = 5000 \sim 12000$ kPa)： $\xi_f = 100$ ， $f_{pmax} = 80$ kPa (施工质量控

		制较好时取 120kPa); 密实砂土: ($q_c > 12000$ kPa): $\xi_f = 150$, $f_{p\max} = 120$ kPa (施工质量控制较好时 取 150kPa)
--	--	--

表12列出了国外目前所采用的静力触探直接法。

表 12 国外预测预制桩承载力的静力触探直接法

方法来源	q_b (单位面积端阻)	f (单位面积侧阻)
Schmertmann	$q_b = (q_{c1} + q_{c2}) / 2 \leq 15 \text{ MPa}$ q_{c1} 为桩尖以下 (0.7~4) D 范围内 q_c 平均值的最小值; q_{c2} 为桩尖以上 8D 范围内 q_c 平均值的最小值	对黏土: $f = k_c f_s \leq 120 \text{ kPa}$, $k_c = 0.2 \sim 1.25$ 对砂土: $Q_s = k \left[\sum_{d=0}^{8D} \frac{d}{8D} f_s A_s + \sum_{d=8D}^L f_s A_s \right]$, k 值取决于 d/D
De Ruiter 和 Beringen(1979) (欧洲法)	黏土: $q_b = N_c S_u \leq 15 \text{ MPa}$, $N_c = 9$ $S_u = q_{ca} / N_k$, $N_k = 15 \sim 20$ 砂土: 与 Schmertmann (1978) 方法相似	对黏土: $f = \alpha f_s \leq 120 \text{ kPa}$ NC 黏土, $\alpha = 1$; OC 黏土, $\alpha = 0.5$ 对砂土: $f = \min \left[f_s, \frac{q_{ca}}{300} (\text{抗压}), \frac{q_{ca}}{300} (\text{抗拔}), 120 \right]$
LCPC (Bustamante 和 Gianceselli, 1982) (法国法)	$q_b = \xi_c q_{eq}$ $\xi_c = 0.15 \sim 0.60$, 取决于地基土类和桩的施工形式, q_{eq} 为桩尖上下各 1.5D 范围内 q_{c2} 等价平均值	$f = q_c / \xi_f$ $\xi_f = 30 \sim 150$, 取决于地基土类、桩的类型和施工方法
Tumay 和 Fakhroo (1982)	与 Schmertmann 方法相似	$f = m f_{ca} \leq 72 \text{ kPa}$ $m = 0.5 + 9.5e^{-0.09 f_{ca}}$ f_{ca} 为侧壁摩阻力平均值

Aoki 和 De Alencar (1975)	$q_b = q_{ca} / F_b \leq 15 \text{ MPa}$ F_b 取决于桩的类型, 对 PPC 打入桩为 1.75	$f = q_{ca} \alpha_1 / F_{s2} \leq 120 \text{ kPa}$ $\alpha_1 = 1.4 \sim 6$, 取决于地基土类; F_{s2} 取决于桩的类型, 对 PPC 打入桩为 3.5
Price 和 Wardle (1982)	$q_b = k_{b2} q_{ca}$ k_{b2} 取决于桩的类型, 对打入桩为 3.5	$f = \alpha_2 f_s$ α_2 取决于桩的类型, 对打入桩为 0.53
Philipponnat (1980)	$q_b = k_{b3} q_{ca}$ k_{b3} 取决于土类, 砂土为 0.4, 粉土为 0.45, 黏土为 0.5	$f = q_{ca} \alpha_3 / F_{s2}$ α_3 取决于桩的类型, 对 PPC 打入桩为 1.25; $F_{s2} = 50 \sim 200$, 取决于地基土类
Penpile (Clisby 等, 1978)	$q_b = \begin{cases} 0.25 q_{ca} & (\text{黏土中的桩}) \\ 0.125 q_{ca} & (\text{砂土中的桩}) \end{cases}$	$f = \frac{f_s}{1.5 + 14.47 f_s}$ 单位为 MPa

注: 1 D 为桩的外径;

2 q_{ca} 取桩端为指定区域的等价平均锥尖阻力。

目前主要应用的方法有 LCPC 法(法国法)、De Ruiter 和 Beringen 法(欧洲法)、Meyerhof 法、Schmertmann 和 Nottingham 法、Tumay 和 Fakhroo 法。

国际上许多学者比较了国外 CPT 确定桩竖向承载力的方法与室内实验及其他原位测试确定桩竖向承载力的方法。这些比较是基于大量的桩基测试和可靠的 CPT 方法进行的。

Briaud (1988) 评价了六种 CPT 方法, 选择了 98 根不同土质条件的压入桩和 7 根黏土中的钻孔桩作为静载试验的数据库, 结果发现: LCPC 法估算的桩承载力与实测桩的承载力拟合得最好。

Robertson 等(1988)根据 8 根桩端封闭或者不封闭的打入管桩的试验数据,评价了 6 种 CPT 直接方法和 7 种间接方法。由于大部分间接的方法都是利用 CPT 数据,却没有特定公式,因此不可能把预测与实测桩的承载力之间的任何差异归咎于这些方法本身。Robertson 等(1988)发现 LCPC 法、De Ruiter 和 Beringen 法(欧洲法)、Schmertmann 法预测的结果最能符合静载试验结果。

Sharp 等(1988)将 28 根打入无黏性土的预应力混凝土桩的静载试验结果与 2 种 CPT 方法和 3 种标准贯入试验 SPT 预测方法估算结果进行了比较,发现所有的预测方法均高估了桩的承载力,但 CPT 预测方法估算的结果与静载试验结果最接近,其中 LCPC 法最准。

Tand 和 Funegard (1989)把一组 9 根桩群桩及 10 根贯入硬黏土的桩的静载试验结果,与 4 种 CPT 方法和 4 种传统的预测方法估算的桩承载力进行了比较,得出的结论是 De Ruiter 和 Beringen 法预测的结果与静载试验实测桩的承载力最为接近。

Almeida 等(1996)根据 CPT 或 CPTU 试验数据对 8 个黏性土地 43 根打入和静压钢桩的静载试验结果进行了分析。试验场地沉积层从软黏土到硬黏土变化,桩径从 0.102m 到 0.812m 变化。大部分的静载试验是在抗拔条件下进行的,以此来评价桩身侧摩阻力。为了评价桩的竖向承载力,他们利用净修正锥尖阻力 q_{net} 计算得到桩身单位摩阻力和桩端单位阻力。

Abu-Farsakh 和 Titi (2004)利用 8 种直接 CPT 方法预测正方形预制预应力混凝土打入摩擦桩的极限承载力。对 35 根不同桩径、不同桩长的静压摩擦桩进行了分析和评价,这 35 根桩的静载试验一直做到破坏。数据分析结果显示:包括 LCPC 方法、De Ruiter 和 Beringen 法的 CPT 方法预测结果最佳,根据 4 种评价标准,准确度排名第一。

综上所述,根据国外学者的比较研究,LCPC 法提供了最为准确的桩承载力预测结果,De Ruiter 和 Beringen 法、Schmertmann 法、Tumay 法和 Fakhroo 等方法也能对桩承载力做出良好的预测。工程实践中可采用多种方法与少量的静载荷试验进行对比分析,选择最适合特定场地的桩承载力预测方法。

7.3.13 地面以下 20m 范围内土层的液化判别,可根据孔压静力触探指标按下列方法进行:

1 根据 CPTU 指标计算的周期阻力比 $CRR_{7.5}$ 小于等效周期应力比 $CRR_{7.5}$ 时,应判为液化;

2 周期阻力比 $CRR_{7.5}$ 可按下列公式计算:

$$CRR_{7.5} = \begin{cases} 93(Q_{\text{tncs}}/1000)^3 + 0.08 & I_c < 2.7 \text{ 且 } 50 < Q_{\text{tncs}} \leq 160 \\ 0.833(Q_{\text{tncs}}/1000) + 0.05 & I_c < 2.7 \text{ 且 } Q_{\text{tncs}} \leq 50 \\ 0.0477Q_{\text{tn}} & I_c > 2.7 \text{ 且 } 50 < Q_{\text{tncs}} \leq 160 \end{cases} \quad (7.3.13-1)$$

$$Q_{\text{tncs}} = \rho_c Q_{\text{tn}} \quad (7.3.13-2)$$

$$\rho_c = \begin{cases} 1.0 & I_c \leq 1.64 \\ 1.0 & 1.64 < I_c \leq 2.36 \text{ 且 } F_r < 0.5\% \\ -0.403I_c^4 + 5.58I_c^3 - 21.63I_c^2 + 5.58I_c - 17.88 & 1.64 < I_c \leq 2.50 \\ 6 \times 10^{-7} I_c^{16.76} & 2.50 < I_c \leq 2.70 \end{cases} \quad (7.3.13-3)$$

式中: $CRR_{7.5}$ — 周期阻力比;

Q_{tncs} — 等效纯净砂归一化锥尖阻力;

Q_{tn} — 归一化锥尖阻力;

ρ_c — 细粒含量修正系数。

3 等效周期应力比 $CSR_{7.5}$ 可按下列公式计算:

$$CSR_{7.5} = 0.65 \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \left(\frac{a_{\text{max}}}{g} \right) \left(\frac{r_d}{MSF} \right) \quad (7.3.13-4)$$

$$r_d = \begin{cases} 1.000 - 0.00765z & z \leq 9.15m \\ 1.174 - 0.0267z & 9.15m < z \leq 20m \end{cases} \quad (7.3.13-5)$$

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5} \right)^{-2.56} \quad (7.3.13-6)$$

式中: $CSR_{7.5}$ — 等效周期应力比;

σ_{v0} — 总上覆应力(kPa);

σ'_{v0} — 有效上覆应力(kPa);

a_{max} — 地震动峰值加速度(m/s^2);

g — 重力加速度(m/s^2), 取 9.8;

r_d — 应力折减系数;

z — 计算点所处深度(m);

MSF — 震级比例系数;

M_w — 地震矩震级, 可根据里氏震级按表 7.3.13 取值。

表 7.3.13 地震矩震级取值

里氏震级 (M_L)	<6.20	6.40	6.60	6.80	7.00	7.20	≥ 7.40
地震矩震级 (M_w)	$= M_L$	6.52	6.87	7.25	7.66	8.24	10.00

【条文说明】

7.3.13 本条给出了基于 CPTU 的修正的 Seed 简化判别法,其实质是将砂土中由振动作用产生的剪应力与产生液化所需的剪应力(即在相应动力作用下砂土的抗剪强度)进行比较。虽然该方法较好的结合了砂土液化的机理,但上述两种剪应力较难准确的确定。为此,简化为等效周期应力比 CSR 与地基土的周期阻力比 CRR 的比较。如果 $CRR > CSR$,则可判别为不液化;如果 $CRR < CSR$,则可判别为液化。该方法属于试验-分析法。

本条给出的 CSR 计算方法由 Seed and Idriss 提出,其中考虑了地震震级的影响,通过震级比例系数将 CSR 转换为震级 $M=7.5$ 下的等效 $CSR_{7.5}$ 。

周期阻力比 CRR 评价了震级 $M=7.5$ 、有效上覆应力 $\sigma'_{v0} = p_a = 100 \text{ kPa}$ 时土的抗液化能力,与等效周期阻力比 $CSR_{7.5}$ 对应。Seed 简化法的提出最初基于标贯试验结果,采用标贯击数 N 计算 CRR,后来扩展至采用四种不同的原位测试成果进行计算。目前基于 CPT/CPTU 的 CRR 评价方法较多,可分为确定性方法和概率方法两类,确定性方法采用安全系数 FS 评价土的液化潜能。FS 定义为 CRR 与 CSR 之比,若 $FS \leq 1$,则将会发生液化,反之则不液化。而概率方法认为,由于模型和参数存在不确定性, $FS > 1$ 并不代表一定不会发生液化,而 $FS \leq 1$ 也不代表必然发生液化。

Robertson 法和 Olsen 法是较新的液化判别经验方法。刘松玉和蔡国军根据济宁-徐州高速公路的孔压静力触探测试结果,结合国内规范法判别结果,比较了 Robertson 法和 Olsen 法进行液化判别的成功率。结果表明:Robertson 法和 Olsen 法在全部数据分析点预测液化阻力时相当精确。Robertson 法在预测 CRR 时比 Olsen 法更加保守,在预测液化发生时具有更高的成功率,在预测非液化发生时具有更低的成功率。因此,本规程同样采用由 NCEER 推荐的 Robertson 液化判别方法。

8 地震波静力触探

8.1 准备与测试

8.1.1 准备工作应符合下列规定：

1 剪切波的激发应符合下列规定：

- 1) 震源板宜采用木板或 L 型铁板，震源板上应压重物使之与地面应紧密接触；
- 2) 木板的长向中垂线应对准触探孔中心，孔口与震源板边线的距离宜为 1m；
- 3) L 型铁板应设置于贯入设备两侧支撑柱底盘下方，铁板与支撑柱底盘间应支垫木板；
- 4) 激震锤宜采用人工锤或机械摆动锤。

2 测点的布置应符合下列规定：

- 1) 根据工程情况及地质分层，每隔 1m~2m 应测试一点；
- 2) 最上部测点的深度不应小于震源板至孔口的距离。

【条文说明】

8.1.1 采用水平锤击木板或 L 型铁板法能产生较纯的剪切波，但也会有少量压缩波产生。震源板必须与地面紧密接触，因此通常在震源板上压重物，所压重物的重量不宜小于 500kg。实际测试时，有将木板底钉有钉尺片的做法，其激振效果优于未经处理的普通板。此外，在测试位置的地面泼水或洒灰浆，也可增大板与地面接触的紧密程度。当地面不平时，宜采用刮平的方式，不宜采用回填的方式。

当采用木板时，木板应坚硬，并具有良好的弹性和韧性。木板长度宜为 2m~3m，宽度宜为 0.30m，厚度宜为 0.05m~0.10m。当震源板离触探孔太近时，往往在浅处收到剪切波和前面的压缩波挨得太近，而不能很好的确定其初至时间。此外，若靠近地表的地层为低速层，下有高速层时就会产生折射波；当震源板离触探孔足够远时，如仍按直达波计算第一层的波速将产生误差。因此，地震波静力触探时，触探孔孔口与震源板的距离不宜太近，也不宜太远，宜取 1m。

采用 L 型铁板时，地震波静力触探现场测试情况如图 32 所示。

测试点的间隔宜根据地层界面情况确定。通常的做法是地下水位以上平均每 1m~2m 一个测试点，地下水位以下测试间隔可适当加大。界面处的测点应重复测试。

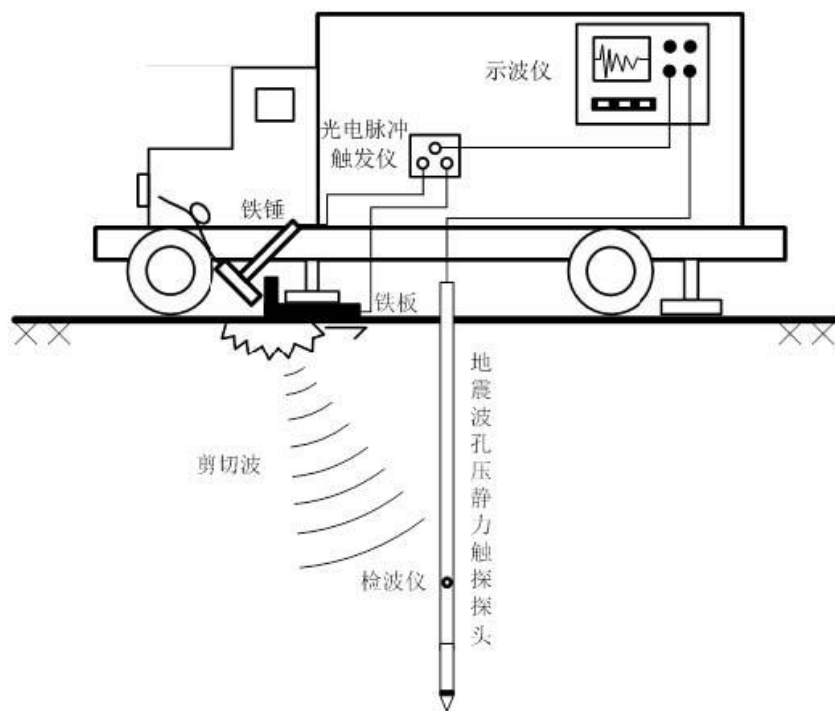


图 32 地震波静力触探现场测试示意图

激震锤可采用人工锤或机械摆动锤，如图 33 和图 34 所示。采用机械摆动锤可提高信号的重复性，每次激震时将大锤提到装置标示高度，让大锤在自身重力作用下击打木板端面即可激发地震波。

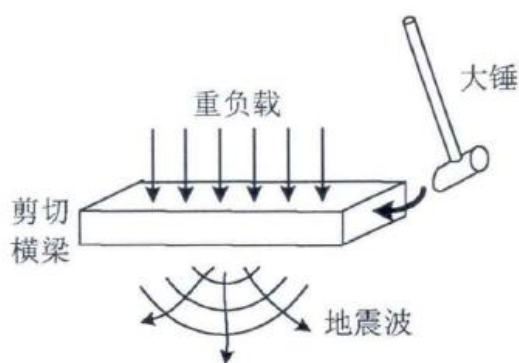


图 33 人工锤击激振示意图

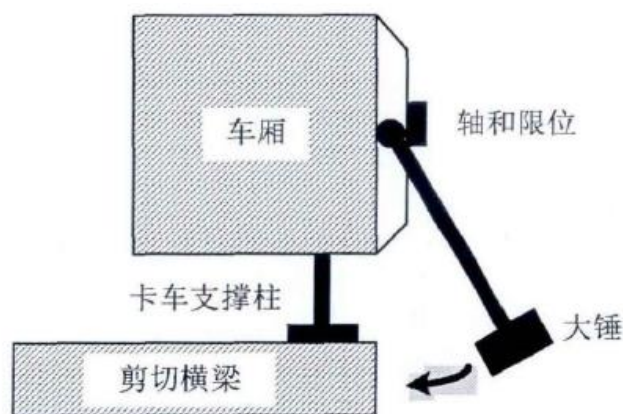


图 34 机械摆动锤锤击激振示意图

8.1.2 测试工作应符合下列规定：

- 1 探头及探杆的垂直度偏差不应大于 2° ；
- 2 宜在贯入过程中按自上而下的顺序进行波速测试；
- 3 测试时，应沿震源板纵轴方向分别水平击打木板的两端或 L 型钢板的端面，并记录相位相反的两组剪切波波形；
- 4 应根据测试情况作重复测试。

8.2 资料整理

8.2.1 剪切波从震源到达测点的时间，应采用水平传感器记录的波形确定。

8.2.2 剪切波从震源到达测点的时间，应按下列公式进行斜距校正：

$$T = \eta_s T_L \quad (8.2.2-1)$$

$$\eta_s = \frac{H + H_0}{\sqrt{L^2 + (H + H_0)^2}} \quad (8.2.2-2)$$

式中： T — 剪切波从震源到达测点经斜距校正后的时间（s）；

η_s — 斜距校正系数；

T_L — 剪切波从震源到达测点的实测时间（s）；

H — 测点的深度（m）；

H_0 — 震源与孔口的高差（m），当震源低于孔口时， H_0 为负值。

L — 从板中心到测试孔的水平距离（m）。

8.2.3 剪切波从震源到达测点的距离宜按测斜数据进行校正。

【条文说明】

8.2.2~8.2.3 由于木板离孔口一定距离，在计算时不能直接用测试深度差除以波到达测点的时间差而得出该测试间隔的波速值，而必须进行斜距校正。斜距校正的方法有多种，其原理大都是把波从震源到接收点的传播途径当作直线，再按三角关系进行校正。

8.2.4 波速层的划分应结合地质情况，按时距曲线上具有不同斜率的折线段确定。

8.2.5 各波速层的剪切波速应按下式计算：

$$V_s = \frac{\Delta H}{\Delta T_s} \quad (8.2.5)$$

式中： V_s — 剪切波波速（m/s）；

ΔH — 波速层的厚度（m）；

ΔT_s — 剪切波传到波速层顶面和底面的时间差（s）。

8.2.6 地震波静力触探测试后应绘制单孔静力触探曲线柱状图，柱状图除应符合本规程第 6 章、第 7 章的有关规定外，尚应符合下列要求：

1 应包括以深度 h 为纵轴，土层剪切波速 V_s 为横轴的 $V_s \sim h$ 曲线；

2 深度 h 的比例尺宜取 1:100 或 1:200，剪切波速 V_s 与侧壁摩阻力 f_s 的数值比例关系宜取 1:1。

8.3 成果应用

8.3.1 地面下 15m 范围内饱和砂土和粉土的液化判别，也可采用剪切波速按下列方法进行：

1 根据地震波静力触探实测的剪切波速大于按下式计算的临界剪切波速时，可判为不液化；

2 临界剪切波速可按下式计算：

$$V_{scr} = V_{s0} (d_s - 0.0133d_s^2)^{0.5} \left[1.0 - 0.185 \left(\frac{d_w}{d_s} \right) \right] \left(\frac{3}{\rho_c} \right)^{0.5} \quad (8.3.1)$$

式中： V_{scr} — 饱和砂土或饱和粉土的液化剪切波速临界值（m/s）；

V_{s0} — 与烈度、土类有关的经验系数（m/s），可按表 8.4.1 取值；

d_s — 剪切波速测点深度（m）；

d_w — 地下水位深度（m）。

表 8.3.1 与烈度、土类有关的经验系数 V_{s0}

土类	V_{s0} (m/s)		
	7 度	8 度	9 度
砂土	65	95	130
粉土	45	65	90

【条文说明】

8.3.1 本条中关于临界剪切波速的计算方法是石兆吉根据 Dobry 刚度法原理及我国现场资料推演所得，所采用的资料包括 68 组砂土，其中液化 20 组，未液化 48 组；粉土 145 组，其中液化 93 组，不液化 52 组。《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001 的条文说明中曾介绍了该方法，各区域在应用时尚应结合当地情况，并不断积累经验。

地面以下 20m 范围内土层的液化判别，也可结合测试得到的剪切波速，采用周期阻力比法进行。周期阻力比 $CRR_{7.5}$ 可按式（5）~式（6）计算，等效周期应力比 $CSR_{7.5}$ 可按本规程第 7.3.13 条计算。

$$CRR_{7.5}=0.02\left(\frac{V_{sl}}{100}\right)^2+2.8\left(\frac{1}{V_{slc}-V_{sl}}-\frac{1}{V_{slc}}\right)$$

(5)

$$V_{sl}=\frac{V_s}{(\sigma'_{v0}/P_a)^{0.25}}$$

(6)

式中:

$CRR_{7.5}$

—

周期阻力比;

V_{sl}

—

经上覆应力修正的剪切波波速(m/s);

V_{slc}

—

与细粒含量相关的 V_{sl} 上限值(m/s), 当细粒含量小于 5%时取 215m/s, 细粒含量大于 35%时取 200m/s;

V_s

—

土体的剪切波波速(m/s);

σ'_{v0}

—

有效上覆应力(kPa);

P_a

—

参考压力(kPa), 取大气压力, 为 100。

8.3.2 土体的动剪切模量可按下式估算:

$$G_d=\rho V_s^2$$

(8.3.2)

式中:

G_d

—

土层的动剪切模量 (kPa) ;

ρ

—

土体的密度 (g/cm³) ;

V_s

—

土体的剪切波波速 (m/s) 。

8.3.3 软土的压缩模量可按下式估算：

$$E_s = 0.176 V_s^{2.003} \quad (8.3.3)$$

式中： E_s — 土层的压缩模量（kPa）；
 V_s — 土体的剪切波波速（m/s）。

【条文说明】

8.3.3 东南大学研究团队针对长江河漫滩地区的软土，对其剪切波速和室内试验获得的压缩模量进行回归分析，得到了本条中给出的压缩模量与剪切波速的经验关系，并通过 SCPT 的波速测试结果进行了预测和验证，效果良好。该方法可作为评价软土压缩模量的手段之一，但不同地区在应用时仍应通过一定的试验数据进行验证或校正，以便更可靠的确定所在地区软土的压缩模量。

9 电阻率静力触探

9.1 准备与测试

9.1.1 准备工作应符合下列规定：

- 1 电阻率静力触探宜采用四级电测深法；
- 2 测试前应对探头中四个电极的安装情况进行检查，确认无窜线后方可使用；
- 3 电阻率测试仪的四组接头应与电阻率探头中的对应电极相连接；
- 4 供桥电压的工作电流应调整至小于电阻应变片的容许值。

9.1.2 测试时，应先使探头贯入至电极没入土层中，暂停 1min~2min，待电阻率测试仪稳定后，记录读数或进行调零，方可正式开始贯入。

9.1.3 每贯入 0.05m 宜测读一次土层的视电阻率值。

9.2 资料整理

9.2.1 土层视电阻率应按下列公式计算：

$$\rho_s = K \frac{\Delta V}{I} \quad (9.2.1-1)$$

$$K = \pi(a^2 - b^2) / 2b \quad (9.2.1-2)$$

式中： ρ_s — 土层的视电阻率（ $\Omega \cdot m$ ）；

K — 装置系数，与供电电极及测量电极的间距有关（m）；

ΔV — 测量电极间的电位差（mV）；

I — 供电回路的电流强度（mA）；

a — 两个供电电极的距离的一半（m）；

b — 两个测量电极的距离的一半（m）。

9.2.2 电阻率静力触探测试后应绘制单孔静力触探曲线柱状图，柱状图除应符合本规程第 6 章、第 7 章的有关规定外，尚应符合下列要求：

- 1 应包括以深度 h 为纵轴，土层视电阻率 ρ_s 为横轴的 $\rho_s \sim h$ 曲线；
- 2 深度 h 的比例尺宜取 1:100 或 1:200，土层视电阻率 ρ_s 与侧壁摩阻力 f_s 的数值比例关系宜取 1:1。

9.3 成果应用

9.3.1 在膨胀土地区，可采用电阻率静力触探成果预判土的膨胀性，自由膨胀率可结合土的视电阻率值、土工试验成果及地区经验确定。

9.3.2 在黄土地区，可采用电阻率静力触探成果预判黄土的湿陷性，湿陷系数可结合土的视电阻率值、土工试验成果及地区经验确定。

【条文说明】

9.3.1~9.3.2 土的电阻率是表征土体导电性的基本参数，是土的固有物性参数之一，取决于土的孔隙率、孔隙形状、孔隙液电阻率、饱和度、含水量、固体颗粒成分、形状、定向性、胶结状态等。因此，土的电阻率及其相关指标的变化规律可以反映土体物理力学性质指标的变化规律，并可反映土的一些特殊性质，如膨胀性、湿陷性等。

（一）膨胀土评价

在膨胀土地区，目前在评价膨胀土的胀缩性质时有直接法和间接法两种，前者是在室内或野外作膨胀收缩试验，直接测定其在实际受力条件下的胀缩量，成果较为可靠，但费工、费时和费钱，不便大量采用；后者则通过某些容易测定的指标间接评价其胀缩性，虽然精度不如直接法高，但可以省去许多试验工作量，具有较大的经济意义。由于同质土的膨胀势与湿度和密度关系密切，所以凡是能较好地反映土内湿度-密度状态的指标，都能用来间接地评价膨胀潜势的强弱，其中静力触探试验因迅速简便和复现性好，是较好的一种间接评价手段。

国内外膨胀土分类方法很多，所选用的指标和标准也多有不同，各行业各自选用了一些与膨胀土的膨胀和收缩性直接或间接相关的一些指标，对膨胀土进行了分类，如自由膨胀率、液限、塑性指数、小于 $2\mu\text{m}$ 的黏粒含量、蒙脱石含量、比表面积、阳离子交换量、胀缩特性指标等等，导致分类结果也有较大的区别。状态指标在很大程度上受土体的天然存在状态的影响，因此，膨胀土的分类判别采用非状态指标更为合理。但膨胀土的膨胀率试验通常较为麻烦，无法快速的得出相应膨胀土的膨胀率，且变异性较大，同一土样不同研究者往往会得出不同结论。这些因素都影响了该指标在现场鉴别中的使用，尤其在渠道、路堑工程的开挖过程中，及时准确的判别膨胀土及其胀缩等级，对于工程设计和施工具有十分重要的意义。

东南大学研究团队采用室内电学试验研究了人工膨胀土和天然膨胀土的电学参数与工程特性的关系，结果表明，人工膨胀土和天然膨胀土的电阻率随着含水率、密度、饱和度、自由膨胀率、液限、塑性指数、黏粒含量、PH值的增大而呈幂函数减小，随孔隙率增大而呈幂函数增大，且均有比较好的拟合关系。研制了原位测试电阻率探头，该探头采用四极垂向电测深测试方法，适用于地面以下50m内的土层电阻率测试。采用室内模型试验

和现场试验对膨胀土的电阻率进行了测试。测试表明，模型试验所测电阻率变化规律与室内Wenner四电极法所测电阻率变化规律相同，即电阻率随含水率的增加而降低，随自由膨胀率的增大而降低；现场试验所测电阻率随深度增加而减小，根据电阻率计算的自由膨胀率值与实测值比较吻合。所得到的自由膨胀率和电阻率的关系如式（7）所示：

$$F_s = (133.31 / \rho_s)^{0.66} \quad (7)$$

此外，东南大学研究团队根据膨胀土基本电学试验和膨胀土吸水膨胀及相应横纵向电阻率实时测试试验研究发现，膨胀土的膨胀性能与电阻率结构参数吻合很好，可通过电阻率相关指标对膨胀土的膨胀特性进行预测，并建立了上覆压力为0时的土样最终膨胀率和初始电阻率的经验关系，如式（8）所示：

$$F_s = 18.18 - 29.84 \exp(-\rho_{\text{initial}} / 24.99) \quad (8)$$

合肥工业大学研究团队针对合肥地区的弱~中等膨胀土，测试了164组天然原状土土样、饱和原状土样、重塑土样、饱和重塑土样对应的电阻率值，并对上述电阻率值与自由膨胀率、液限、塑性指数这3个膨胀性判别指标进行了相关性研究，研究发现：上述电阻率值与各判别指标均表现出不同程度的相关性，其中饱和原状土样电阻率、饱和重塑土样电阻率的离散度较低，显示出了饱和土样电阻率值与各判别指标有着较好的线性相关性。其中，电阻率与自由膨胀率的关系如图35所示。另外，在区分膨胀土与非膨胀土时，自由膨胀率指标与多指标综合判别下的判别结果一致度达97.5%，高于其他指标；在区分弱膨胀土与中等膨胀土时，自由膨胀率指标与多指标综合判别下的判别结果一致度为92%，而液限指标为99%，塑性指数指标为96%。

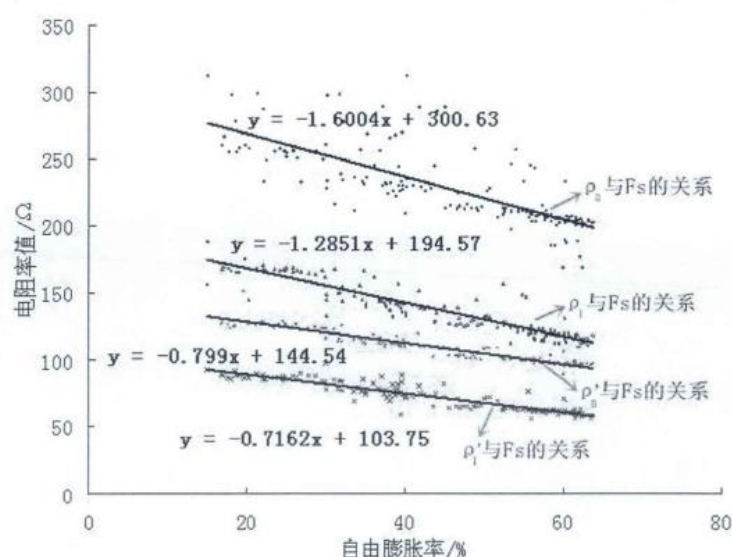


图 35 电阻率与自由膨胀率的关系

《公路工程地质勘察规范》JTG C20中采用自由膨胀率 F_s 、塑性指数 I_p 、标准吸湿含

水率 w_f 多指标定量分类评价标准。鉴于《岩土工程勘察规范》GB50021、《膨胀土地区建筑技术规范》GB50112中均采用自由膨胀率作为判别指标，因此推荐各区域可建立自由膨胀率与电阻率的地区经验关系。

(二) 湿陷性黄土评价

在甘肃、山西、青海等西部省份进行公路工程建设时，不可避免的会遇到大范围深厚黄土分布区。黄土湿陷等级的评价是开展湿陷性黄土处理的首要工作，如何准确的获取黄土的湿陷系数至关重要，尤其是在项目的前期勘测阶段，如何从宏观上预判场地黄土的湿陷性特征尤为重要。

较多学者的研究均表明，黄土的湿陷系数与电阻率存在着良好的对应关系。

电阻率静力触探作为一种新型的原位测试技术，可以精确地测试土的电阻率参数。因此，预先建立区域性的黄土湿陷系数与电阻率的经验关系，再通过电阻率静力触探获得土的原位电阻率，可在勘察过程中快速地预判黄土的湿陷性。

东南大学王厚宇以重塑黄土为研究对象，开展了湿陷试验及电阻率测试，研究了电阻率参数与黄土湿陷特性共同影响因素，并结合已有的电阻率模型和试验结果，建立了黄土的电阻率模型，得到了黄土电阻率与物理指标的关系，同时通过湿陷试验构建了黄土湿陷系数与物理指标的关系，最后通过消去物理参数得到了黄土湿陷系数与电阻率参数之间的相关关系，如式（9）和图 36 所示，可用于无相应地区经验时参考使用。

$$\delta_s=366.08d^{-12.13}\rho_s^{-2.44}-645.78d^{-13.48}\rho_s^{-2.72}$$

(9)

式中:

δ_s

—

黄土的湿陷系数;

d

—

土的密度（ g/cm^3 ）;

ρ_s

—

由电阻率静力触探测得的土层视电阻率（ $\Omega\cdot\text{m}$ ）。

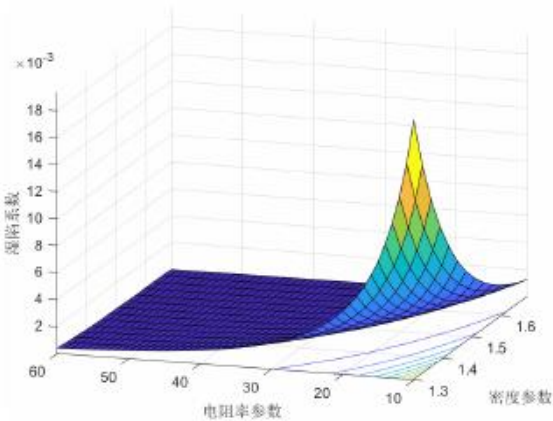


图 36 湿陷系数与电阻率及密度的关系

(三) 污染土评价

电阻率静力触探是评价土壤污染和地下水污染特征的有效手段。根据相关研究与工程实践，土的电阻率与土的孔隙率、饱和度、温度和离子浓度等多种因素有关。特定类型的土都有相对固定的电阻率，其电阻率的变异可能意味着受到污染。

通常情况下，受有机物污染的土，其电阻率会增大；受重金属污染的土，其电阻率会降低。因此，采用电阻率探头获取土层电阻率，再与区域背景值比较，可快速诊断场地土是否受到污染。

Davis 和 Campanella 总结了典型污染土的体积电阻率与孔隙流体电阻率的数值范围，见表 13，可供参考。

表 13 典型污染土的电阻率表

场地类型	体积电阻率 ρ_b	流体电阻率 ρ_f
受盐水入侵影响的三角洲砂土	2	0.5
典型的垃圾沥出液	1~30	0.5~1.0
尾矿或氧化硫化物沥出液	0.01~20	0.005~15
无氧化硫化物沥出液的尾矿	20~100	15~50
砷污染砂砾土	1~10	0.5~4
工业场地：无机污染砂土	0.5~1.5	0.3~0.5
工业场地：碳酸污染淤泥土和砂土	200~1000	75~450
工业场地：木材腐烂类污染的黏质粉土	300~600	80~200

在污染区或可能污染区进行静力触探测试后起拔探杆时，在地面可通过静力触探探杆注入清洁且低渗透的材料，以封堵探杆拔出后在土层中留下的孔洞，防止探孔成为污染物迁移的通道，尤其是污染物在不同含水层之间的迁移，避免造成污染扩散。

因公路工程建设中极少涉及污染土场地，因此本章未对电阻率静力触探用于污染土地评价进行详述。

附录 A 公路工程静力触探方法选用

表 A 静力触探方法选用一览表

测试方法	量测参数	测试目的									场地类型	
		划分土层界面	判定土类	估算物理力学性质指标	估算固结、渗透指标	估算地基承载力	估算单桩极限承载力	液化判别	膨胀性判别	湿陷性判别	陆域	水域
单桥静力触探	比贯入阻力	Δ	Δ	Δ	×	Δ	Δ	Δ	×	×	O	Δ
双桥静力触探	锥尖阻力 侧壁摩阻力	O	O	O	×	O	O	Δ	×	×	O	O
孔压静力触探	锥尖阻力 侧壁摩阻力 孔隙水压力	O	O	O	O	O	O	O	×	×	O	O
地震波静力触探	锥尖阻力 侧壁摩阻力 剪切波速	O	Δ	O	×	Δ	Δ	O	Δ	×	O	Δ
电阻率静力触探	锥尖阻力 侧壁摩阻力 视电阻率	O	Δ	Δ	×	×	×	Δ	O	Δ	O	×

注：O 表示适用，Δ 表示较适用，× 表示不适用或尚无充分证据表明适用。

附录 B 参数统计方法

B.0.1 各单孔可按下式计算各土层静力触探参数的算术平均值。

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{B.0.1})$$

式中: $\bar{X}$ — 单孔静力触探测试参数按层统计的算术平均值 (p_s 、 q_c 、 f_s 、 R_f) ;

x_i — 单孔静力触探同一土层不同深度处测试值;

p_s — 单桥探头的比贯入阻力 (MPa) ;

q_c — 双桥探头的锥尖阻力 (MPa) ;

f_s — 双桥探头的侧壁摩阻力 (kPa) ;

R_f — 摩阻比;

n — 单孔同一土层参与统计的数据数量。

B.0.2 各土层静力触探参数的场地统计值可按下列公式计算。

1 算术平均值

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{B.0.2-1})$$

式中: $\bar{Y}$ — 按场地统计的该土层静力触探测试数据算术平均值 (p_s 、 q_c 、 f_s 、 R_f) ;

y_i — 该土层第 i 个静力触探测试单孔数据的算术平均值;

n — 该土层参与场地统计的单孔数据数量。

2 最小平均值

$$\bar{Y}_{\min} = \frac{\bar{Y} + Y_{\min}}{2} \quad (\text{B.0.2-2})$$

式中: $\bar{Y}_{\min}$ — 按场地统计的该土层静力触探测试数据最小平均值 (p_s 、 q_c 、 f_s 、 R_f) ;

$Y_{\min}$ — 场地内该土层的单孔静力触探测试数据算术平均值的最小值;

$\bar{Y}$ — 按场地统计的该土层静力触探测试数据算术平均值。

3 厚度加权平均值

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^n (y_i \cdot h_i) / \sum_{i=1}^n h_i \quad (\text{B.0.2-3})$$

式中: $\bar{Y}$ — 场地该土层静力触探测试数据的厚度加权平均值 (p_s 、 q_c 、 f_s 、 R_f) ;

y_i — 第 i 孔该土层的静力触探测试数据算术平均值；

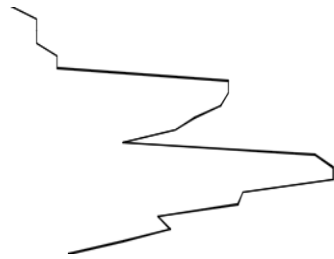
h_i — 第 i 孔该土层的厚度（m）；

n — 该土层参与场地统计的单孔数据数量。

附录 C 单桥静力触探曲线形态判别土类特征图表

C.0.1 当使用单桥静力触探时，可按表 C.0.1 定性判别土类。

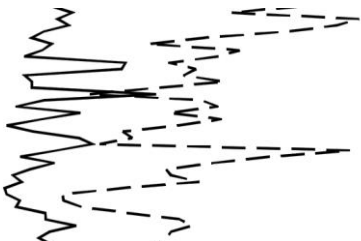
表 C.0.1 单桥静力触探各土层曲线特征图表

土层名称	曲线特征	曲线形态
淤泥、 淤泥质黏性土	p_s 值小于 0.75MPa 的平缓曲线，基本无突变现象（遇贝壳等时偶有突变）	
黏土、 粉质黏土	p_s 值较高的平缓曲线，有缓慢的波形起伏；黏土层由于结核存在，有时呈个别突变现象	
粉土	曲线驼背状起伏较大，其波峰和波谷呈圆形（地下水位以下起伏较小），变化频率不大	
砂土	曲线起伏较大，类似粉土，变化频率大，波峰和波谷呈现尖形	

附录 D 双桥静力触探曲线形态判别土类特征图表

D.0.1 当使用双桥静力触探时，可按表 D.0.1 定性判别土类。

表 D.0.1 双桥静力触探各土层曲线特征图表

土层名称	曲线特征	曲线形态 (实线为 q_c ，虚线为 f_s)
淤泥、 淤泥质黏性土	q_c 曲线较平直， f_s 曲线在 q_c 曲线右侧（较接近），曲线基本无起伏	
黏 土	q_c 曲线起伏变化缓慢， f_s 曲线在 q_c 曲线右侧（距离较远）	
粉质黏土	q_c 曲线起伏变化缓慢，局部略有突峰， f_s 曲线大部位于 q_c 曲线右侧（距离较近），当土质不均时局部交叉越过 q_c 曲线	
粉 土	q_c 值较大，曲线呈短锯齿状，齿峰较缓， f_s 曲线一般位于 q_c 曲线右侧，局部间隔较大，偶尔和 q_c 曲线左右穿插	
砂 土	q_c 值较大，曲线呈长锯齿状， f_s 曲线一般和 q_c 曲线间隔较小，曲线尖峰处大部分位于 q_c 曲线左侧；砂类土颗粒不均匀时 q_c 曲线和 f_s 曲线的尖齿更为剧烈，局部呈不规则的、残破的大锯齿状	

附录 E 单、双桥静力触探参数估算地基土物理力学指标

E.0.1 饱和黏性土的重度可按下列公式估算：

1 $p_s < 400\text{kPa}$ ：

$$\gamma = 8.23 p_s^{0.12} \quad (\text{E.0.1-1})$$

2 $400\text{kPa} < p_s < 4500\text{kPa}$ ：

$$\gamma = 9.56 p_s^{0.095} \quad (\text{E.0.1-2})$$

3 $p_s \geq 4500\text{kPa}$ ：

$$\gamma = 21.3 \quad (\text{E.0.1-3})$$

式中： γ — 土的重度 (kN/m^3) ；

p_s — 比贯入阻力 (kPa) 。

【条文说明】

E.0.1 本条引用交通行业标准《公路工程地质原位测试规程》JTG 3323-2021 第 5.5.9 条的有关内容。

E.0.2 黏性土的塑性状态可按下表判定：

表 E.0.2 单桥静力触探参数判别黏性土的塑性状态

p_s (MPa)	5~6	2.7~3.3	1.2~1.5	0.7~0.9	<0.5
I_L	0	0.25	0.50	0.75	1

【条文说明】

E.0.2 本条引用交通行业标准《公路工程地质原位测试规程》JTG 3323-2021 第 5.5.10 条的有关内容。

E.0.3 石英质砂类土的密实程度可按下表判定：

表 E.0.3 石英质砂土的密实程度

p_s (MPa)	D_r	密实程度
$p_s \geq 14$	$D_r \geq 0.67$	密实
$6.5 < p_s < 14$	$0.40 < D_r < 0.67$	中密
$2 \leq p_s \leq 6.5$	$0.33 \leq D_r \leq 0.40$	稍密
$p_s < 2$	$D_r < 0.33$	松散

【条文说明】

E.0.3 本条引用铁路行业标准《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018-2018 第 9.5.13 条的有关内容。

E.0.4 对灵敏度为 2~7、塑性指数为 12~40 的软黏性土，不排水抗剪强度可按下列公式估算：

$$c_u = 0.9(p_s - \sigma_{v0}) / N_k \quad (\text{E.0.4-1})$$

$$N_k = 25.81 - 0.75S_t - 2.25 \ln I_p \quad (\text{E.0.4-2})$$

缺乏 S_t 、 I_p 数据时，可按下式估算：

$$c_u = 0.04p_s + 2 \quad (\text{E.0.4-3})$$

式中：
 c_u — 不排水抗剪强度（kPa）；
 σ_{v0} — 土的总自重应力（kPa）；
 s_t — 土的灵敏度；
 I_p — 土的塑性指数；
 p_s — 比贯入阻力（kPa）。

【条文说明】

E.0.4 本条引用交通行业标准《公路工程地质原位测试规程》JTG 3323-2021 第 5.5.11 条的有关内容。

E.0.5 砂类土的内摩擦角 φ 可按下表确定：

表 E.0.5 砂类土的内摩擦角

p_s (MPa)	1	2	3	4	6	11	15	30
φ (°)	29	31	32	33	34	36	37	39

【条文说明】

E.0.5 本条引用交通行业标准《公路工程地质原位测试规程》JTG 3323-2021 第 5.5.12 条的有关内容。

E.0.6 正常固结和超固结比 $OCR \leq 2$ 的轻度超固结软黏性土，当贯入阻力 q_c 随深度呈线性递增时，其固结快剪内摩擦角可按下列公式估算：

$$\tan \varphi_{cu} = 1.4 \Delta c_u / \Delta \sigma'_{v0} \quad (\text{E.0.6-1})$$

$$\Delta \sigma'_{v0} = \Delta \sigma_{v0} - \gamma_w \Delta d \quad (\text{E.0.6-2})$$

$$\Delta \sigma_{v0} = \gamma \Delta d \quad (\text{E.0.6-3})$$

式中： φ_{cu} — 固结快剪内摩擦角(°)；
 Δd — 线性化触探曲线上任意两点间的深度增量(m)；
 Δc_u — 对应于的不排水抗剪强度增量(kPa)；
 $\Delta \sigma_{v0}$ — 土的自重压力增量(kPa)。

【条文说明】

E.0.6 本条引用铁路行业标准《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018-2018 第 9.5.11 条的有关内容。

E.0.7 土层的压缩模量可按下表取值：

表 E.0.7 土的压缩模量 E_s (MPa)

土层名称	p_s (MPa)					
	0.1	0.3	0.5	0.7	1	1.3
软土、一般黏性土	0.9	1.9	2.6	3.3	4.5	5.7
粉土	-	-	1.8~3.5	2.2~3.7	2.8~4.2	3.5~5.2
饱和砂土	-	-	2.6~5.0	3.2~5.4	4.1~6.0	5.1~7.5

续表 E.0.7

土层名称	p_s (MPa)					
	1.8	2.5	3	4	5	6
软土、一般黏性土	6.7	10.5	12.5	16.5	20.5	24.4
粉土	4.2~6.3	5.2~7.1	6.3~8.0	8.0~9.1	9.1~10.5	10.5~11.5
饱和砂土	6.0~9.0	7.5~10.2	9.0~11.5	11.5~13.0	13.0~15.0	15.0~16.5
土层名称	p_s (MPa)					
	7	8	9	11	13	15
软土、一般黏性土	-	-	-	-	-	-
粉土	11.5~12.9	12.9~14.0	14.0~15.7	16.8~18.9	19.6~21.7	24.5
饱和砂土	16.5~18.5	18.5~20.0	20.0~22.5	24.0~27.0	28.0~31.0	35.0

注：1 E_s 为压缩曲线上 $p_1=0.1\text{MPa}\sim p_2=0.2\text{MPa}$ 压力段的压缩模量。

2 Q_3 及以前的黏性土和新近堆积土应根据当地经验取值或采用原状土样进行压缩试验。

3 表内数值可以线性内插，不可外延。

【条文说明】

E.0.7 本条引用交通行业标准《公路工程地质原位测试规程》JTG 3323-2021 第 5.5.15 条的有关内容。

E.0.8 土层的变形模量可按下列公式进行估算：

1 p_s 为 3MPa~6MPa 的老黏性土 ($Q_1\sim Q_3$)：

$$E_0 = 11.78p_s - 4.69 \quad (\text{E.0.8-1})$$

2 p_s 为 0.085MPa~2.5MPa 的软土或饱和黏性土 (Q_4)：

$$E_0 = 6.03p_s^{1.45} + 0.8 \quad (\text{E.0.8-2})$$

3 p_s 为 1MPa~20MPa 的细砂、粉砂、粉土：

$$E_0 = 3.57p_s^{0.684} \quad (\text{E.0.8-3})$$

式中： E_0 — 变形模量 (MPa)；
 p_s — 比贯入阻力 (MPa)。

【条文说明】

E.0.8 本条引用交通行业标准《公路工程地质原位测试规程》JTG 3323-2021 第 5.5.15 条的

有关内容。

附录 F 单、双桥静力触探参数估算地基承载力的地区经验

F.0.1 北京地区的地基土承载力特征值，可根据静力触探参数按下列表格取值：

表 F.0.1-1 静力触探参数估算北京地区一般第四纪黏性土及粉土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	1.0	1.3	2.0	3.1	4.6	6.2	7.7	9.2	11.0	12.5	14.0
f_{ak}	120	160	190	210	230	250	270	290	310	330	350

表 F.0.1-2 静力触探参数估算北京地区新近沉积黏性土及粉土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.5	2.9	3.3
f_{ak}	50	80	100	110	120	130	150	160	180	190

表 F.0.1-3 静力触探参数估算北京地区一般第四纪粉、细砂地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	12	15	18	21	24	27.5
f_{ak}	180	230	280	330	380	420

表 F.0.1-4 静力触探参数估算北京地区新近沉积粉、细砂地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	3.3	4.6	6.5	7.7	10
f_{ak}	90	110	140	160	180

表 F.0.1-5 静力触探参数估算北京地区素填土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	0.5	0.9	1.4	2.0	2.6	3.1
f_{ak}	60~80	75~100	90~120	105~135	120~155	135~170

【条文说明】

F.0.1 本条引用北京市地方标准《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》DBJ 11-501-2009 的有关内容。

F.0.2 上海地区的地基土极限承载力标准值，可根据静力触探参数按下表进行估算：

表 F.0.2 上海地区根据静力触探估算地基极限承载力标准值

土性	经验公式	适用范围
黏性土	$f_k = 68 + 0.13p_s$ $f_k = 68 + 0.15q_c$	滨海平原区： $p_s > 1500\text{kPa}$ 时取 1500kPa $q_c > 1300\text{kPa}$ 时取 1300kPa 湖沼平原 I -1 区： $p_s > 3000\text{kPa}$ 时取 3000kPa $q_c > 2700\text{kPa}$ 时取 2700kPa
淤泥质土	$f_k = 50 + 0.12p_s$ $f_k = 50 + 0.14q_c$	$p_s > 800\text{kPa}$ 时取 800kPa $q_c > 700\text{kPa}$ 时取 700kPa
粉性土	$f_k = 72 + 0.09p_s$ $f_k = 72 + 0.10q_c$	$p_s > 2500\text{kPa}$ 时取 2500kPa $q_c > 2200\text{kPa}$ 时取 2200kPa
素填土	$f_k = 54 + 0.10p_s$ $f_k = 54 + 0.12q_c$	$p_s > 1500\text{kPa}$ 时取 1500kPa $q_c > 1300\text{kPa}$ 时取 1300kPa
冲填土	$f_k = 40 + 0.08p_s$ $f_k = 40 + 0.09q_c$	$p_s > 1000\text{kPa}$ 时取 1000kPa $q_c > 900\text{kPa}$ 时取 900kPa

【条文说明】

F.0.2 本条引用上海市地方标准《静力触探技术规程》DG/TJ08-2189-2015 及《岩土工程勘察规范》DGJ 08-37-2012 的有关内容。

F.0.3 天津地区的地基土天然地基承载力特征值，可根据静力触探参数按下列表格取值：

表 F.0.3 静力触探参数估算天津地区地基承载力特征值 f_{ak}

$\frac{\alpha}{R_f}$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
5.0	74	86	97	107	116	124	131	137	142	146	149	151	152	160	168																			
4.5	73	85	96	106	115	123	130	136	141	145	148	150	151	159	167																			
4.0	72	84	95	105	114	122	129	135	140	144	147	149	151	159	166																			
3.5	71	83	94	104	113	121	128	134	139	143	146	148	150	158	165																			
3.0	70	82	93	103	112	120	127	133	138	142	145	147	149	157	164	171	177	182	186	189														
2.5	69	81	92	102	111	119	126	132	137	141	144	146	148	156	163	169	174	179	183	187	191	194	196	198										
2.0	68	80	91	101	110	118	125	131	136	140	143	145	147	155	162	168	173	178	182	186	190	193	195	197	201	205	208	211	214	217	219	221	223	225
1.5	65	77	87	97	105	113	120	125	129	133	135	137	138	145	151	156	161	166	170	173	177	180	182	184	188	192	195	198	201	203	205	207	209	211
1.1	64	75	85	95	103	110	117	122	126	129	131	133	134	140	145	150	155	160	164	167	170	173	176	179	183	187	190	193	196	199	201	203	205	207
0.8	63	74	84	93	101	108	114	119	123	126	128	129	130	135	140	145	150	154	158	161	164	167	170	172	176	180	183	186	189	192	194	196	198	200
0.5	62	73	83	92	100	107	113	118	122	125	127	128	129	134	139	144	149	153	157	160	163	166	169	171	175	179	182	185	188	191	193	195	197	199
0.3	61	72	82	91	99	106	112	117	121	124	126	127	128	133	138	143																		

注：1、 f_{ak} —土层承载力特征值(kPa)； q_c —锥尖阻力(×100kPa)； R_f —摩擦比 $f_s/q_c(\%)$ ； f_s —侧摩阻力(×100kPa)；

A—淤泥类土区；B—黏土区；C—粉质黏土区；D—粉土区；

2、表中 q_c 、 f_s 采用平均值。

【条文说明】

F.0.3 本条引用于天津市地方标准《天津市岩土工程勘察规范》DB/T29-247-2017 的有关内容。

F.0.4 安徽地区的地基土天然地基承载力特征值，可根据静力触探参数按下列表格进行估算：

表 F.0.4-1 静力触探参数估算淮北平原区黏性土和粉土地基承载力特征值 f_{ak}

土类	地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)	$\overline{p_s}$ 范围 (MPa)
黏性土	$f_{ak}=78.91\overline{p_s}+43.20$	$1.0 \leq \overline{p_s} < 3.0$
	$f_{ak}=329.36-173.74/\overline{p_s}$	$3.0 \leq \overline{p_s} \leq 6.0$
粉 土	$f_{ak}=40.55\overline{p_s}+44.67$	$1.0 \leq \overline{p_s} < 4.0$
	$f_{ak}=34.00\ln(\overline{p_s})+155.00$	$4.0 \leq \overline{p_s} \leq 24.0$

表 F.0.4-2 静力触探参数估算江淮波状平原区黏性土地基承载力特征值 f_{ak}

土类	地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)	$\overline{p_s}$ 范围 (MPa)
黏性土	$f_{ak}=68.21\overline{p_s}+28.69$	$1.0 \leq \overline{p_s} \leq 3.5$
	$f_{ak}=79.40\ln(\overline{p_s})+171.12$	$3.5 < \overline{p_s} \leq 6.0$

表 F.0.4-3 静力触探参数估算沿江丘陵平原区黏性土地基承载力特征值 f_{ak}

土类	地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)	$\overline{p_s}$ 范围 (MPa)
黏性土	$f_{ak}=55.76\overline{p_s}+38.17$	$1.0 \leq \overline{p_s} < 4.5$
	$f_{ak}=36.56\overline{p_s}+124.75$	$4.5 \leq \overline{p_s} \leq 6.0$

【条文说明】

F.0.4 本条引用安徽省地方标准《静力触探应用技术规程》DB34/T 3944-2021 的有关内容。

F.0.5 湖北地区的地基土天然地基承载力特征值，可根据静力触探参数按下列表格取值：

表 F.0.5-1 静力触探参数估算湖北地区淤泥质土、一般黏性土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	0.3	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	2.9
f_{ak}	40	60	80	100	120	150	180	210	240	270	290

表 F.0.5-2 静力触探参数估算湖北地区老黏性土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	3	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1
f_{ak}	320	360	400	450	500	560	610	660

表 F.0.5-3 静力触探参数估算湖北地区粉土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
f_{ak}	90	100	110	130	150

表 F.0.5-4 静力触探参数估算湖北地区砂土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
粉细砂	110	130	150	170	190	210	230
中粗砂	140	180	220	260	290	320	350
p_s	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	-
粉细砂	250	270	290	310	330	350	-
中粗砂	380	410	440	470	500	530	-

【条文说明】

F.0.5 本条引用湖北省地方标准《岩土工程勘察工作规程》DB42/169-2003 及《建筑地基基础技术规范》DB42/242-2003 的有关内容。

F.0.6 山东地区的地基土天然地基承载力特征值，可根据静力触探参数按下列表格取值：

表 F.0.6-1 静力触探参数估算山东地区淤泥质土、一般黏性土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0
f_{ak}	35~45	65~75	95~105	120~135	145~165	175~195	200~225	230~255	260~290	290~310

表 F.0.6-2 静力触探参数估算山东地区老黏性土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	3	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1
f_{ak}	290~310	320~340	350~380	380~410	410~440	440~470	470~500	500~530

表 F.0.6-3 静力触探参数估算山东地区粉、细砂地基承载力特征值 f_{ak}

q_c	5	6	7	8	9	10
f_{ak}	135~145	155~165	180~190	200~210	220~230	240~250
q_c	11	12	13	14	15	16
f_{ak}	265~275	290~300	310~320	330~340	350~360	370~380

表 F.0.6-4 静力触探参数估算山东地区中、粗砂地基承载力特征值 f_{ak}

q_c	5	6	7	8	9	10
f_{ak}	135~145	155~165	180~190	200~210	220~230	240~250

【条文说明】

F.0.6 本条引用山东省地方标准《建筑岩土工程勘察设计规范》DB37/5052-2015 的有关内容，使用者也可参考山东省地方标准《山东省公路工程地基承载力标准》DB37/T2839-2016。

F.0.7 河南地区的地基土天然地基承载力特征值，可根据静力触探参数按下列表格取值：

表 F.0.7-1 静力触探参数估算河南地区黏性土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0
f_{ak}	60	90	120	140	170	200	230	250	280	310
p_s	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	6.0
f_{ak}	340	370	400	430	460	490	520	550	580	610

表 F.0.7-2 静力触探参数估算河南地区粉土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.31.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5	2.7
f_{ak}	70	76	83	90	98	105	112	120	126	134	141	148
p_s	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	-
f_{ak}	155	162	170	180	190	200	210	220	240	250	260	-

表 F.0.7-3 静力触探参数估算河南地区砂土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
粉细砂	90~100	110~120	130~140	150~160	170~180	190~200	210~220
中粗砂	-	140~160	180~200	220~240	260~280	290~310	320~340
p_s	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0
粉细砂	230~240	250~260	270~280	290~300	310~320	330~340	350~360
中粗砂	350~370	380~400	410~430	440~460	470~490	500~520	530~550

【条文说明】

F.0.7 本条引用河南省地方标准《河南省建筑地基基础勘察设计规范》DBJ41/138- 2014 的有关内容。

F.0.8 河北地区的地基土天然地基承载力特征值，可根据静力触探参数按下列表格取值：

表 F.0.8-1 静力触探参数估算河北地区山前平原区新近沉积黏性土、粉土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	0.5	0.9	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9	3.3
f_{ak}	70	85	100	115	130	145	155	165

表 F.0.8-2 静力触探参数估算河北地区山前平原区黏性土、粉土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8
f_{ak}	105	130	155	180	205	230	255	280

表 F.0.8-3 静力触探参数估算河北地区山前平原区中、粗砂地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	10	12	14	16	18	20	22
f_{ak}	170	190	215	240	265	290	315

表 F.0.8-4 静力触探参数估算河北地区内陆平原区、滨海平原区软土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
f_{ak}	50	60	70	80	90	100	105	110	115

表 F.0.8-5 静力触探参数估算河北地区内陆平原区、滨海平原区黏性土、粉土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
f_{ak}	70	85	100	115	125	135	145	155

【条文说明】

F.0.8 本条引用河北省地方标准《河北省建筑地基承载力技术规程》（试行）DB13(J)/T48-2005 的有关内容。

F.0.9 吉林地区的地基土天然地基承载力特征值，可根据静力触探参数按下表进行估算：

表 F.0.9 静力触探参数估算吉林地区地基土地基承载力特征值 f_{ak}

土类	地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)	范围
黏性土	$f_{ak} = \alpha(191.11\sqrt{p_s} - 16)$	-
	$f_{ak} = \alpha(60 + 126q_c)$	$f_s < 20\text{kPa}$
	$f_{ak} = \alpha(125 + 82q_c)$	$20\text{kPa} \leq f_s < 60\text{kPa}$
	$f_{ak} = \alpha(188 + 48q_c)$	$f_s \geq 60\text{kPa}$
粉、细砂	$f_{ak} = \alpha(20p_s + 60)$	$4.0\text{MPa} < \overline{p_s} < 15.0\text{MPa}$
中、粗砂	$f_{ak} = \alpha(35p_s + 51)$	$4.0\text{MPa} < \overline{p_s} < 12.0\text{MPa}$

注： 1 α 可取 0.75~0.95；

2 采用双桥静力触探锥尖阻力估算粉、细砂承载力时，可将 p_s 替换为 $1.1q_c$ ；

3 采用双桥静力触探锥尖阻力估算中、粗砂承载力时，可将 p_s 替换为 $1.05q_c$ 。

【条文说明】

F.0.9 本条引用吉林省地方标准《岩土工程勘察技术规程》DB22/JT 147-2015 的有关内容。

F.0.10 黑龙江地区的地基土天然地基承载力特征值，可根据静力触探参数按下表进行估算：

表 F.0.10 静力触探参数估算黑龙江地区一般黏性土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	0.5	1	2	3	4	5	6
f_{ak}	100	120	155	195	230	270	300

【条文说明】

F.0.10 本条引用黑龙江省地方标准《建筑地基基础设计规范》DB23/902-2005 的有关内容。

F.0.11 辽宁地区的地基土天然地基承载力特征值，可根据静力触探参数按下表进行估算：

表 F.0.11 静力触探参数估算辽宁地区地基土地基承载力特征值 f_{ak}

q_c	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	12.0
淤泥质土	60	75	80	85	90	95	-	-	-	-	-	-	-
黏性土	75	95	115	125	135	145	155	160	170	-	-	-	-
饱和粉土	-	70	75	80	85	90	95	110	130	170	-	-	-
粉、细砂	-	-	100	105	110	115	120	125	135	145	160	180	240
中、粗砂	-	-	-	-	130	140	150	160	200	240	260	280	340

【条文说明】

F.0.11 本条引用辽宁省地方标准《岩土工程勘察技术规程》DB21/T1564.1~14-2007 的有关内容。

F.0.12 山西地区的地基土天然地基承载力特征值，可根据静力触探参数按下表进行估算：

表 F.0.12 静力触探参数估算山西地区地基土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s		0.1	0.3	0.5	0.8	1	1.5	2	3
老黏性土 ($Q_1 \sim Q_2$)		-	-	-	-	-	-	-	300
一般黏性土(Q_4)		-	-	-	115	135	180	210	270
粉土及饱和砂土 (Q_4)		-	-	-	-	80	100	120	150
软 土		20	40	60	80	95	-	-	-
新近 堆积 土	$I_p > 10$	-	-	60	80	95	120	140	180
	$I_p \leq 10$	-	-	50	65	75	100	120	150
新黄土 (Q_3 、 Q_4)		-	-	-	-	80	100	120	160
老黄土 (Q_1 、 Q_2)		-	-	-	-	-	-	-	215

续表 F.0.12

p_s		4	5	5.5	6	6.5	10	16	24
老黏性土 ($Q_1 \sim Q_2$)		400	500	550	600	-	-	-	-
一般黏性土(Q_4)		320	365	-	-	-	-	-	-
粉土及饱和砂土 (Q_4)		180	200	210	220	230	300	410	520
软 土		-	-	-	-	-	-	-	-
新近 堆积 土	$I_p > 10$	215	250	265	275	-	-	-	-
	$I_p \leq 10$	180	210	225	235	250	325	-	-
新黄土 (Q_3 、 Q_4)		200	240	260	280	300	-	-	-
老黄土 (Q_1 、 Q_2)		265	315	340	365	390	565	-	-

【条文说明】

F.0.12 本条引用山西省地方标准《建筑地基基础勘察设计规范》DBJ04-258-2008 的有关内容。

F.0.13 四川地区的地基土天然地基承载力特征值，可根据静力触探参数按下列表格取值：

表 F.0.13-1 静力触探参数估算四川地区砂土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	2	3	4	5	6	7	8
中、粗砂	100~120	140~160	180~200	220~240	260~280	290~310	320~340
粉、细砂	90~100	110~120	130~140	150~160	170~180	190~200	210~220

表 F.0.13-2 静力触探参数估算四川地区粉土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	1	2	3	4	5
砂质粉土	100	120	140	160	180
黏质粉土	110	135	160	185	210

表 F.0.13-3 静力触探参数估算四川地区黏性土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
f_{ak}	80	120	160	200	240	280	310	340

【条文说明】

F.0.13 本条引用四川省地方标准《四川省建筑地基基础检测技术规程》DBJ51/T 014-2013 的有关内容。

F.0.14 甘肃地区的地基土天然地基承载力特征值，可根据静力触探参数按下表进行估算：

表 F.0.14-1 静力触探参数估算甘肃地区地基土地基承载力特征值 f_{ak}

p_s	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	12.0	15.0	20.0
黏性土	80	135	175	210	270	320	360	400	-	-	-	-	-
砂土、粉土	60	80	100	120	150	180	200	220	270	300	345	390	470
西北新黄土	60	85	110	135	155	205	285	335	-	-	-	-	-

表 F.0.14-2 静力触探参数估算甘肃地区黄土地基承载力特征值 f_{ak}

区域	地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)	p_s 范围 (MPa)
东部区、南部区	$f_{ak}=87.8p_s+24.36$	$0.80 \leq p_s \leq 2.5$
西部区、陇西北部丘陵区	$f_{ak}=80p_s+31.8$	$0.80 \leq p_s \leq 2.5$
陇东北部梁峁区、河西走廊区	$f_{ak}=50p_s+35$	$0.65 \leq p_s \leq 3.5$

【条文说明】

F.0.14 本条引用甘肃省地方标准《岩土工程勘察规范》DB62/T25-3063-2012 的有关内容。

F.0.15 缺少地区经验时，可按下列公式估算地基土的天然地基承载力特征值：

1 $p_s \leq 6000\text{kPa}$ 的一般黏性土 (Q_4)：

$$f_{ak} = 5.8\sqrt{p_s} - 46 \quad (\text{F.0.15-1})$$

2 $2700\text{kPa} \leq p_s \leq 6000\text{kPa}$ 的老黏性土 ($Q_1 \sim Q_3$)：

$$f_{ak} = 0.1p_s \quad (\text{F.0.15-2})$$

3 $p_s \leq 24000 \text{kPa}$ 的粉土、砂土：

$$f_{\text{ak}} = 0.89 p_s^{0.63} + 14.4 \quad (\text{F.0.15-3})$$

4 $85 \text{kPa} \leq p_s \leq 800 \text{kPa}$ 的软土：

$$f_{\text{ak}} = 0.012 p_s + 5 \quad (\text{F.0.15-4})$$

5 $500 \text{kPa} \leq p_s \leq 5000 \text{kPa}$ 的东南带新黄土 (Q_3 、 Q_4)：

$$f_{\text{ak}} = 0.05 p_s + 65 \quad (\text{F.0.15-5})$$

6 $650 \text{kPa} \leq p_s \leq 5500 \text{kPa}$ 的西北带新黄土 (Q_3 、 Q_4)：

$$f_{\text{ak}} = 0.05 p_s + 35 \quad (\text{F.0.15-6})$$

7 $1000 \text{kPa} \leq p_s \leq 6500 \text{kPa}$ 的北部边缘带新黄土 (Q_3 、 Q_4)：

$$f_{\text{ak}} = 0.04 p_s + 40 \quad (\text{F.0.15-7})$$

式中： f_{ak} — 地基承载力特征值 (kPa)；

p_s — 比贯入阻力 (kPa)。

【条文说明】

F.0.15 本条引用交通行业标准《公路工程地质原位测试规程》JTG 3323-2021 的有关内容。

附录 G 单、双桥静力触探参数估算单桩承载力的地区经验

G.0.1 北京地区可根据静力触探测试成果，按下列方法估算预制桩单桩承载力特征值：

$$R_a = u \sum q_{si} l_i + q_p A_p \quad (\text{G.0.1})$$

式中： R_a — 单桩竖向承载力特征值（kN）；
 u — 桩身周长（m）；
 q_{si} — 桩侧第 i 层土的侧摩阻力特征值（kPa）；
 l_i — 桩身穿过第 i 层土的厚度；
 q_p — 桩端阻力特征值（kPa）；
 A_p — 桩端横截面面积（m²）。

表 G.0.1 静力触探参数估算预制桩桩端阻力特征值 q_p 与桩侧阻力特征值 q_s

土类	p_s	q_s	q_p
黏性土	0.5~1.0	15~20	-
	1.0~1.5	20~25	-
	1.5~2.0	25~30	-
	2.0~3.0	30~35	-
粉 土	1.0~3.0	20~35	1000~1500
	3.0~6.0	35~45	1500~2000
砂 土	5.0~15.0	20~30	1800~2200
	15.0~25.0	30~40	2200~3200
	25.0~30.0	40~45	3200~4200

【条文说明】

G.0.1 本条引用北京市地方标准《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》DBJ 11-501 -2009 的有关内容。

G.0.2 上海地区可根据静力触探测试成果，按下列方法估算预制桩单桩承载力：

$$R_d = \frac{R_{sk}}{\gamma_s} + \frac{R_{pk}}{\gamma_p} = \frac{U_p \sum f_{si} l_i}{\gamma_s} + \frac{\alpha_b p_{sb} A_p}{\gamma_p} \quad (\text{G.0.2-1})$$

式中： R_d — 单桩竖向抗压承载力设计值（kN）；
 R_{sk} — 桩侧总极限摩阻力标准值（kN）；

R_{pk} — 桩端极限阻力标准值 (kN) ;
 f_{si} — 桩周各土层的极限摩阻力标准值 (kPa) ;
 α_b — 桩端阻力修正系数, 可按表 G.0.2-1 取用;
 p_{sb} — 桩端附近的静力触探比贯入阻力平均值 (kPa) ;
 γ_s 、 γ_p — 分项系数, 可根据 ρ_p 按表 G.0.2-2 取用, $\rho_p = R_{pk} / (R_{sk} + R_{pk})$ 。

表 G.0.2-1 桩端阻力修正系数 α_b

桩端入土深度 h (m)	$h \leq 15$	$15 < h \leq 30$	$h > 30$
黏性土	1/2	2/3	1
粉性土	2/3	1	1.2
砂 土	1	1.2	1.4

表 G.0.2-2 分项系数 γ_s 、 γ_p

ρ_p	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
γ_s	2.09	2.16	2.18	2.13	2.03	1.88	1.73
γ_p	1.08	1.20	1.37	1.61	1.93	2.34	2.83

1 桩端附近的静力触探比贯入阻力平均值可按下列公式计算:

$$\text{当 } p_{sb1} \leq p_{sb2} \text{ 时} \quad p_{sb} = (p_{sb1} + \beta p_{sb2}) / 2 \quad (\text{G.0.2-2})$$

$$\text{当 } p_{sb1} > p_{sb2} \text{ 时} \quad p_{sb} = p_{sb2} \quad (\text{G.0.2-3})$$

式中: p_{sb1} — 桩端全断面以上的 8 倍桩径范围内的比贯入阻力平均值 (kPa) ;

p_{sb2} — 桩端全断面以下的 4 倍桩径范围内的比贯入阻力平均值 (kPa) ;

β — 折减系数, 按 p_{sb2} / p_{sb1} 的值查表 G.0.2-3 取用。

表 G.0.2-3 折减系数 β

p_{sb2} / p_{sb1}	<5	5~10	10~15	>15
β	1	5/6	2/3	1/2

2 采用静力触探比贯入阻力估算各层土的极限侧摩阻力时, 应结合土工试验资料、土层的埋藏深度及性质, 分别按下列情况考虑:

1) 地表下 6m 范围内的浅层土

$$f_s = 15 \quad (\text{G.0.2-4})$$

2) 黏性土

$$\text{当 } p_s \leq 1000 \text{ kPa 时} \quad f_s = p_s / 20 \quad (\text{G.0.2-5})$$

$$\text{当 } p_s > 1000 \text{ kPa 时} \quad f_s = p_s / 40 + 25 \quad (\text{G.0.2-6})$$

3) 粉性土

$$f_s = p_s / 60 \quad (\text{G.0.2-7})$$

4) 砂土

$$f_s = p_s / 80 \quad (\text{G.0.2-8})$$

式中: f_s — 桩身所穿越土层的极限侧摩阻力标准值 (kPa);

p_s — 桩身所穿越土层的比贯入阻力平均值 (kPa)。

3 采用静力触探估算的极限端阻力值不宜超过 8000kPa, 桩侧极限摩阻力值不宜超过 120kPa; 对于比贯入阻力为 2500kPa~6500kPa 的浅层粉性土或稍密的砂土, 估算桩端阻力和桩侧摩阻力时应结合土的密实程度以及类似工程经验综合确定;

4 在湖沼平原区, 对埋深 3m~12m 的第⑥₁层暗绿色~草黄色黏性土及第⑥₂层黄~灰色粉性土或砂土, 其桩侧极限摩阻力可按式 G.0.2-4~式 G.0.2-8 估算值的 0.7 倍考虑。

【条文说明】

G.0.2 本条引用上海市地方标准《静力触探技术规程》DG/TJ08-2189-2015的有关内容。

G.0.3 天津地区可根据静力触探测试成果, 按下列方法估算预制桩单桩竖向极限承载力:

$$Q_{uk} = \alpha q_{cd} A + u \sum L_i \beta_i f_{si} \quad (\text{G.0.3-1})$$

$$q_{cd1} \leq q_{cd2} \text{ 时} \quad q_{cd} = (q_{cd1} + q_{cd2}) / 2 \quad (\text{G.0.3-2})$$

$$q_{cd1} > q_{cd2} \text{ 时} \quad q_{cd} = q_{cd2} \quad (\text{G.0.3-3})$$

式中: Q_{uk} — 单桩竖向抗压极限承载力标准值 (kN);

q_{cd} — 桩端静力触探锥尖阻力 (kPa), 按式 G.0.3-2、式 G.0.3-3 取值;

A — 桩身横截面面积 (m²);

- u — 桩身周长 (m) ;
- L_i — 桩在第 i 层土中的长度 (m) ;
- f_{si} — 第 i 层土的静力触探侧壁摩阻力, 同一层土 f_s 值有变化时, 取厚度加权平均值, 参加同一层计算的 f_{smax} / f_{smin} 宜不大于 2, 桩顶以下 3m 内的杂填土不计算桩侧摩阻力;
- α 、 β_i — 分别为桩端土类修正系数与桩侧土类修正系数, 其土类划分标准可按表 G.0.3-1 进行, 取值可按表 G.0.3-2 计算;
- q_{cd1} — 桩端以上 $4d$ 范围内, 按分层厚度加权的 q_c 平均值 (kPa) ;
- q_{cd2} — 桩端以下 $4d$ 范围内, 按分层厚度加权的 q_c 平均值 (kPa) 。

表 G.0.3-1 土类划分

桩端	同时满足 $q_{cd} > 2000 \text{ kPa}$ 及 $f_{sd} / q_{cd} < 0.018$ 时划分为 II 类土, 否则为 I 类土
桩侧	同时满足 $q_{ci} > 2000 \text{ kPa}$ 及 $f_{si} / q_{ci} < 0.018$ 时划分为 II 类土, 否则为 I 类土

表 G.0.3-2 α 、 β_i 取值

土类	α	β_i
I 类土	$\alpha = (59.83 / q_{cd})^{0.05}$	$\beta_i = (1212 / f_{si})^{0.2}$
II 类土	$\alpha = (0.053 / q_{cd})^{0.02}$	$\beta_i = (14.77 / f_{si})^{0.1}$

注: 式 G.0.3-1~式 G.0.3-3 的适用条件为: 1 桩端入土深度 $\leq 30\text{m}$ 、桩径 $\leq 0.45\text{m}$; 2 土层 f_s 值 $\leq 210\text{kPa}$ 、I 类土 q_c 值 $\leq 5500\text{kPa}$ 、II 类土 q_c 值 $\leq 12000\text{kPa}$; 3 单桩极限承载力标准值 $Q_{uk} \leq 3600\text{kN}$; 4 适用于无软土分布区、软土厚度小的区域。

【条文说明】

G.0.3 本条引用天津市地方标准《天津市岩土工程勘察规范》DB/T29-247-2017的有关内容。

G.0.4 浙江地区可根据静力触探测试结果, 按下列方法估算预制桩单桩竖向抗压承载力特征值:

$$R_a = q_{pa} A_p + u \sum q_{sia} l_i \quad (\text{G.0.4})$$

式中: R_a — 单桩竖向承载力特征值 (kN) ;

q_{pa} — 桩端阻力特征值 (kPa) ;

- A_p — 桩端横截面面积 (m^2) ;
- u — 桩身周长 (m) ;
- q_{sia} — 桩侧第 i 层土的侧摩阻力特征值 (kPa) ;
- l_i — 桩身穿过第 i 层土的厚度。

表 G.0.4-1 预制桩侧摩阻力特征值 q_{sa} (kPa)

土类	第一指标	第二指标	地层深度 (m)				
	土的状态	q_c (kPa)	5~10	10~20	20~30	30~40	≥ 40
填 土	-	800~1500	4~12				
淤 泥	-	<350	3~5	4~5	5~6	6~7	7~8
淤泥质土	-	350~650	4~7	5~8	6~9	7~10	8~12
	-	650~1000	5~8	7~9	9~12	10~14	12~16
黏性土	$1.0 < I_L \leq 1.2$	1000~1300	7~11	9~12	12~15	14~18	16~20
	$0.75 < I_L \leq 1.0$	1300~1800	9~14	12~16	15~19	18~23	20~27
	$0.5 < I_L \leq 0.75$	1600~2500	11~18	16~21	19~25	23~30	27~36
	$0.25 < I_L \leq 0.50$	2000~3500	14~22	20~25	25~30	30~36	36~42
	$0 < I_L \leq 0.25$	3000~4000	17~27	25~30	30~35	35~40	40~48
	$I_L \leq 0$	>4000	22~34	30~40	35~45	40~50	48~60
粉 土	松散	<2000	7~10	8~11	11~14	14~17	17~20
	稍密	2000~4000	9~12	10~13	13~17	17~21	20~25
	中密	4000~6000	11~16	13~17	17~21	21~25	25~30
	密实	>6000	14~20	17~21	21~25	25~30	30~36
粉、细砂	稍密	3000~6000	11~20	17~22	21~25	25~30	30~36
	中密	6000~12000	15~23	21~25	25~30	30~35	35~40
	密实	>12000	20~27	25~30	30~35	33~40	40~48

表 G.0.4-2 预制桩端阻力特征值 q_{sa} (kPa)

土类	第一指标	第二指标	地层深度 (m)				
	土的状态	q_c (kPa)	5~10	10~20	20~30	30~40	≥ 40
黏性土	$0.75 < I_L \leq 1.0$	1300~1800	260~410	330~550	520~700	670~850	830~1100
	$0.5 < I_L \leq 0.75$	1600~2500	350~650	500~700	670~900	800~1350	1000~1800
	$0.25 < I_L \leq 0.50$	2000~3500	500~850	670~900	850~1350	1200~1900	1600~2600
	$0 < I_L \leq 0.25$	3000~4000	750~1250	850~1350	1300~2500	1800~2800	2500~3600
粉 土	稍密	2000~4000	300~500	330~550	500~850	600~900	800~1200
	中密	4000~6000	400~800	500~900	800~1100	950~1350	1150~1600
	密实	>6000	750~1200	850~1250	1050~1500	1300~1800	1500~2250
粉、细砂	稍密	3000~6000	450~1200	900~1300	1150~1500	1400~1800	1700~2250
	中密	6000~12000	900~1500	1250~1800	1400~2000	1700~2250	2150~2700
	密实	>12000	1300~1900	1700~2000	1900~2250	2100~2600	2600~3300

【条文说明】

G.0.4 本条引用浙江省地方标准《浙江省工程建设岩土工程勘察规范》DB33/T 1065—2019的有关内容。

G.0.5 江苏地区可根据静力触探测试成果，按下列方法估算预制桩单桩竖向极限承载力标准值：

$$Q_{uk} = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \quad (\text{G.0.5-1})$$

$$q_{sik} = k_1 C_{1i} \beta_i p_{s1i} \quad (\text{G.0.5-2})$$

$$q_{pk} = k_2 C_2 \alpha p_{s2} \quad (\text{G.0.5-3})$$

式中： Q_{uk} — 单桩竖向极限承载力标准值 (kN)；

u — 桩身周长 (m)；

q_{sik} — 桩侧第 i 层土的极限侧摩阻力标准值 (kPa)；

l_i — 桩身穿过第 i 层土的厚度；

q_{pk} — 桩端土极限端阻力标准值 (kPa)；

- A_p — 桩端横截面面积 (m^2) ;
 k_1 — 桩侧土桩型系数, 混凝土预制桩取 1.0;
 C_{1i} — 桩侧土固结特征调整系数, 可按表 G.0.5-1 取用;
 β_i — 桩侧极限阻力修正系数, 可按表 G.0.5-2 取用;
 p_{sli} — 桩侧第 i 层土的静力触探比贯入阻力平均值 (kPa) ;
 k_2 — 桩端土桩型系数, 混凝土预制桩取 1.0;
 C_2 — 桩端土固结特征调整系数, 可按表 G.0.5-1 取用;
 α — 桩端土极限端阻力修正系数, 可按表 G.0.5-2 取用;
 p_{s2} — 桩端上下各 $4d$ 范围的比贯入阻力平均值 (kPa) 。

表 G.0.5-1 土的固结调整系数 C_1 、 C_2

沉积特征	Q_3 及以前、超固结土	Q_4 、正常固结土	新近沉积土、欠固结土
C_1 、 C_2	1.25~1.05	1.0	0.75~0.95

表 G.0.5-2 桩侧极限侧摩阻力修正系数 β 与桩端土极限端阻力修正系数 α

土类	p_s (MPa)	β	α			
			$L=5\text{m}$	$L=10\text{m}$	$L=20\text{m}$	$L \geq 30\text{m}$
软 土	<0.6	0.050	0.25	0.40	0.50	0.53
	0.6~1.0	0.045				
黏性土	1.0~1.5	0.040	0.50	0.80	1.00	1.10
	1.5~2.0	0.035	0.55	0.85	1.10	1.20
	2.0~4.0	0.030	0.60	0.95	1.20	1.30
	>4.0	0.025	0.65	1.00	1.25	1.38
粉 土	1.0~5.0	0.015~0.010	0.30	0.42	0.50	0.56
砂 土	<5.0	0.009	0.30	0.38	0.45	0.49
	5.0~8.0	0.008	0.27	0.34	0.40	0.44
	8.0~12.0	0.007	0.24	0.30	0.35	0.39
	12.0~16.0	0.006	0.20	0.26	0.30	0.34
	16.0~20.0	0.005	0.17	0.22	0.25	0.29
	>20.0	0.004	0.14	0.17	0.20	0.23
黏性土与砂	2.0~5.0	0.020~0.015	0.42	0.58	0.70	0.80

性土互层	>5.0	0.015~0.010	0.30	0.42	0.50	0.56
------	------	-------------	------	------	------	------

【条文说明】

G.0.5 本条引用江苏省地方标准《岩土工程勘察规范》DGJ32/TJ 208-2016 的有关内容。

G.0.6 安徽地区可根据静力触探测试成果，按下列方法估算预制桩单桩竖向极限承载力标准值：

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + \gamma \alpha p_{sk} A_p \quad (\text{G.0.6-1})$$

式中： Q_{uk} — 单桩竖向抗压极限承载力标准值（kN）；
 Q_{sk} — 单桩总极限侧摩阻力标准值（kN）；
 Q_{pk} — 单桩总极限端阻力标准值（kN）；
 u — 桩身周长（m）；
 q_{sik} — 桩侧第 i 层土的极限侧摩阻力标准值（kPa）；
 l_i — 桩身穿过第 i 层土的厚度；
 γ — 桩端修正常量，对黏性土取 1.647，粉土、砂土取 0.971；
 α — 桩端阻力修正系数，可按表 G.0.6-1 确定；
 p_{sk} — 桩端附近的静力触探比贯入阻力平均值（kPa）；
 A_p — 桩端横截面面积（m²）。

表 G.0.6-1 桩端阻力修正系数 α 值

桩长	$L < 15\text{m}$	$15\text{m} \leq L \leq 30\text{m}$	$L \geq 30\text{m}$
α	0.75	0.75~0.90	0.90

1 桩端附近的静力触探比贯入阻力平均值可按下列公式计算：

$$p_{sk1} \leq p_{sk2} \text{ 时} \quad p_{sk} = (p_{sk1} + \beta p_{sk2}) / 2 \quad (\text{G.0.6-2})$$

$$p_{sk1} > p_{sk2} \text{ 时} \quad p_{sk} = p_{sk2} \quad (\text{G.0.6-3})$$

式中： p_{sk1} — 桩端全截面以上 $8d$ 桩径范围内的比贯入阻力平均值（kPa），对密实砂土，当该值大于 20MPa 时，应乘以表 G.0.6-2 中的系数 C 折减后取用；
 β — 折减系数，可按表 G.0.6-3 确定；
 p_{sk2} — 桩端全截面以下 $4d$ 桩径范围内的比贯入阻力平均值（kPa）对密实砂土，当该值大于 20MPa 时，应乘以表 G.0.6-2 中的系数 C 折减后取用。

表 G.0.6-2 系数 C

p_s (MPa)	20~30	35	>40
C	5/6	2/3	1/2

表 G.0.6-3 折减系数 β

p_{sk2} / p_{sk1}	≤ 5	7.5	12.5	≥ 15
β	1	5/6	2/3	1/2

2 采用静力触探比贯入阻力估算各层土的极限侧摩阻力时，应结合土工试验资料、土层的埋藏深度及性质，分别按下列情况考虑：

1) 地表下 6m 范围内的浅层土

$$q_{sik}=15 \quad (G.0.6-4)$$

2) $p_s \leq 0.8 \text{ MPa}$ 的黏性土

$$q_{sik}=0.05p_s \quad (G.0.6-5)$$

3) 粉土及砂土土层以上（或无粉土及砂土的场地） $p_s > 0.8 \text{ MPa}$ 的黏性土

$$q_{sik}=0.02p_s + 25 \quad (G.0.6-6)$$

4) 粉土及砂土土层以下（或无粉土及砂土的场地） $p_s > 0.8 \text{ MPa}$ 的黏性土

$$q_{sik}=0.022p_s + 20 \quad (G.0.6-7)$$

5) 粉土、砂土

$$q_{sik}=0.01p_s \quad (G.0.6-8)$$

【条文说明】

G.0.6 本条引用安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司、合肥工业大学研究成果的有关内容。

用 词 说 明

为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

本规程引用下列标准。其中，注日期的，仅对该日期对应的版本适用本规程；不注日期的，其最新版适用于本规程。

《岩土工程勘察规范》 GB 50021

《土工试验仪器 触探仪》 GB/T 12745

《公路工程地质原位测试规程》 JTG 3223

《公路工程地质勘察规范》 JTG C20

《公路工程物探规程》 JTG/T 3222

《水运工程静力触探技术规程》 JTS/T 242

《铁路工程地质原位测试规程》 TB 10018

《静力触探技术标准》 CECS 04

《孔压静力触探测试技术规程》 T/CCES 1

中国工程建设标准化协会标准

公路静力触探技术规程

T/CECS G: XXXX-2022

条文说明