

第四章 原位测试

本章重点：介绍了常见的岩土体野外试验方法及适用范围，试验要点及资料的整理及成果的应用。

学习要求：重点学习载荷试验、静力触探、动力触探、标准贯入试验，对其它试验方法作一般的了解。

第一节 概 述

一、岩土体原位测试的优点

岩土体原位测试是指在岩土工程勘察现场，在不扰动或基本不扰动岩土层的情况下对岩土层进行测试，以获得所测的岩土层的物理力学性质指标及划分土层的一种现场勘测技术。主要手段包括载荷试验、静力触探试验、动力触探试验、标准贯入试验、十字板剪切试验、旁压试验、现场波速测试、岩石原位应力试验等，它和对岩土样品进行室内试验同属于岩土性能测试范畴。原位测试目的在于获得有代表性的、反映现场实际的基本工程设计参数，包括地质剖面的几何参数、岩土原位初始应力状态和应力历史、岩土工程参数等，在工程上有重要的意义和较广泛的应用。原位测试与钻探、取样、室内实验的传统方法比较起来具有下列明显优点：

1. 可在拟建工程场地进行测试，无需取样，避免了因取样带来的一系列问题，如原状样扰动问题。

2. 原位测试所涉及的岩土尺寸较室内试验样品要大得多，因而更能反映岩土的宏观结构（如裂隙等）对岩土性质的影响。

以上优点决定了岩土体原位测试所提供的岩土的物理力学性质指标更具有代表性和可靠性。此外，大部分岩土体原位测试技术具有快速、经济、可连续性等优点，因而，岩土原位测试技术应用越来越广。

原位测试工作主要是在建筑工程设计之前的岩土工程勘察阶段进行的，着眼于获取岩土参数，提供给设计使用。应用原位测试方法时，应根据岩土条件、设计对参数的要求、地区经验和测试方法的适用性等因素选用，原位测试的仪器设备应定期检验和标定。分析原位测试成果资料时，应注意仪器设备、试验条件、试验方法等对试验的影响，结合地层条件，剔除异常数据。根据原位测试成果，利用地区性经验估算岩土工程特性参数和对岩土工程问题做出评价时，应与室内试验和工程反算参数作对比，检验其可靠性。

二、原位测试的种类、适用范围及所提供的参数

当前的岩土工程勘察中，越来越多的依靠原位测试方法提供岩土参数，随着建筑工程规模的不断扩大，岩土原位测试已成为不可缺少的一种勘察手段。要掌握岩土原位测试方法，既要懂的原位测试方法的原理、步骤及要求，又要懂得原位测试的适用条件、测试设备的机理、成果的应用，才会避免测试的盲目性，提高测试的应用效果。表 4 - 1 为各种原位测试方法的适用范围及所能提供的岩土参数。

表 4 - 1 原位测试方法的适用范围

测试方法 \ 适用范围	适用土类							所提供的岩土参数												
	岩 石	碎 石 土	砂 土	粉 土	粘 性 土	填 土	软 土	鉴 别 土 类	剖 面 分 层	物 理 状 态	强 度 参 数	模 量	渗 透 系 数	固 结 特 征	孔 隙 水 压 力	侧 压 力 系 数	超 固 结 比	承 载 力	液 化 判 别	
平板载荷试验 (PLT)	A	B	B	B	B	B	B				A	B					A	B		
螺旋板载荷试验 (SPLT)			B	B	B		A				A	B					A	B		
静力触探 (CPT)			A	B	B	A	B	A	A	A	B							A	B	
孔压静力触探 (CPTU)			A	B	B	A	B	B	B	A	B		A	A	A		A	A	B	
圆锥动力触探 (DPT)		B	B	A	A	A	A											A		
标准贯入试验 (SPT)			B	A	A			B	A	A	A	A						A	B	
十字板剪切试验 (VST)					B		B				B									
预钻式旁压试验 (PMT)	A	A	A	A	B	A					A							B		
自钻式旁压试验 (SBPMT)			A	B	B		B	A	A	A	A	B		B	B	B	A	B	A	
现场直剪试验 (FDST)	B	B			A						B									
现场三轴试验 (ETT)	B	B			A						B									
岩体应力测试 (RST)	B																			
波速试验 (WVT)	A	A	A	A	A	A	A				B									

注：A 适用；B 很适用

第二节 载荷试验

载荷试验是在保持地基土的天然状态下，在一定面积的刚性承压板上向地基土逐级施加荷载，并观测每级荷载下地基土的变形，它是测定地基土的压力与变形特性的一种原位测试方法。测试所反映的是承压板下 1.5~2.0 倍承压板直径或宽度范围内，地基土强度、变形的综合性状。

载荷试验按试验深度分为浅层和深层；按承压板形状分为圆形、方形和螺旋板；按载荷性质分为静力和动力载荷试验；按用途可分为一般载荷试验和桩载荷试验。浅层平板载荷试验适用于浅层地基土；深层平板载荷试验适用于埋深等于或大于 3m 和地下水位以上的地基土；螺旋板载荷试验适用于深层地基土或地下水位以下的地基土。载荷试验可适用于各种地基土，特别适用于各种填土及含碎石的土。本节主要介绍浅层平板静力载荷试验。

一、试验设备及试验要点

(一) 仪器设备

载荷试验设备主要由承压板、加荷装置、沉降观测装置组成：

承压板一般为厚钢板，形状为圆形和方形，面积为 0.1~0.5m²。对承压板的要求为：有足够的刚度，在加荷过程中其本身的变形要小，而且其中心和边缘不能产生弯曲和翘起。

加荷装置可分为载荷台式和千斤顶式两种：见图 4 - 1、4 - 2，载荷台式为木质或铁质载荷台架，在载荷台上放置重物如钢块、铅块或混凝土试块等重物；千斤顶式为油压千斤顶加荷，用地锚提供反力。采用油压千斤顶必须注意两点：一是油压千斤顶的行程必须满足地基沉降要求，二是入土地锚的反力必须大于最大荷载，以免地锚上拔。由于载荷试验加荷较大，加荷装置必须牢固可靠、安全稳定。

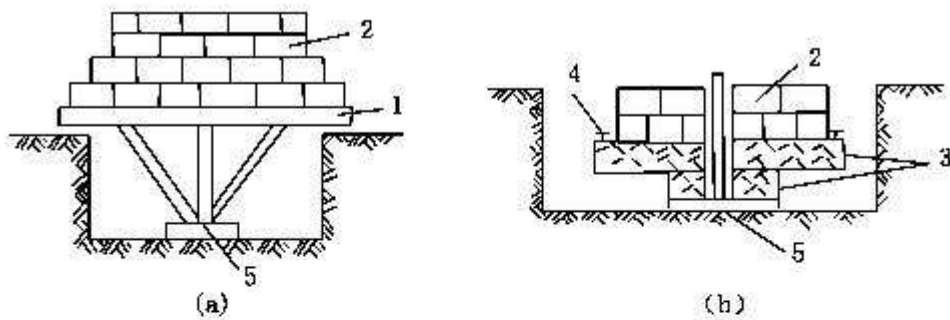


图4-1 载荷台式加压装置

(a) 木质或铁质载荷台；(b) 低重心载荷台；1—载荷台；2—钢锭；3—混凝土平台；4—测点；5—承压板

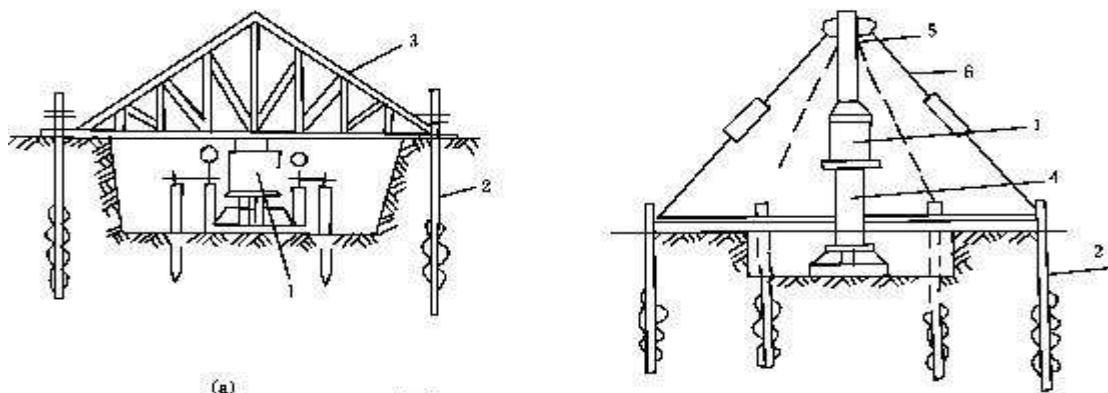


图4-2 千斤顶式加压装置

(a) 钢桁架式装置；(b) 杆柱式装置；1—千斤顶；2—地锚；3—桁架；4—立柱；5—分立柱；6—拉杆

沉降观测装置可用百分表、沉降传感器或水准仪等。只要满足所规定的精度要求及线形特征等条件，可任选一种来观测承压板的沉降变形。

(二) 试验要点

1. 载荷试验应布置在有代表性的地点，每个场地不宜少于3个，当场地内岩土体不均时，应适当增加。浅层平板载荷试验应布置在基础底面标高处。

2. 浅层平板载荷试验的试坑宽度或直径不应小于承压板宽度或直径的三倍；深层平板载荷试验的试井直径应等于承压板直径；当试井直径大于承压板直径时，紧靠承压板周围土的高度不应小于承压板直径。

3. 试坑或试井底的岩土体应避免扰动，保持其原状结构和天然湿度，并在承压板下铺设不超过20mm的中砂垫层找平，尽快安装试验设备；螺旋板头入土时，应按每转一圈下一个螺距进行操作，减少对土的扰动；

4. 载荷试验宜采用圆形刚性承压板，根据土的软硬或岩体裂隙密度选用合适的尺寸；土的浅层平板载荷试验承压板面积不应小于 0.25m^2 ，对软土和粒径较大的填土不应小于 0.5m^2 ；土的深层平板载荷试验承压板面积宜选用 0.5m^2 ；岩石载荷试验承压板的面积不宜小于 0.07m^2 。

5. 载荷试验加荷方式应采用分级维持荷载沉降相对稳定法(常规慢速法)；有地区经验时，可采用分级加荷沉降非稳定法(快速法)或等沉速率法；加荷等级宜取10~12级，并不应少于8级，荷载量测精度不应低于最大荷载的 $\pm 1\%$ 。

6. 承压板的沉降可采用百分表、沉降传感器或电测位移计量测，其精度不应低于土

0.01mm; 10min、15min、15min 测读一次沉降,以后间隔 30min 测读一次沉降,当连续两小时每小时沉降量小于等于 0.1mm 时,可认为沉降已达相对稳定标准,再施加下一级荷载;当试验对象是岩体时,间隔 1min、2min、2min、5min 测读一次沉降,以后每隔 10min 测读一次,当连续三次读数差小于等于 0.01mm 时,可认为沉降已达相对稳定标准,再施加下一级荷载。

7.当出现下列情况之一时,可终止试验:

- (1) 承压板周边的土出现明显侧向挤出,周边岩土出现明显隆起或径向裂缝持续发展;
- (2) 本级荷载的沉降量大于前级荷载沉降量的 5 倍,荷载与沉降曲线出现明显陡降;
- (3) 在某级荷载下 24 小时沉降速率不能达到相对稳定标准;
- (4) 总沉降量与承压板直径(或宽度)之比超过 0.06。

二、试验资料的整理及成果的应用

(一) 试验资料的整理

1.根据原始记录绘制 $p \sim s$ 和 $s \sim t$ 曲线图。

2.修正沉降观测值,先求出校正正值 s_0 和 $p \sim s$ 曲线斜率 C 。 s_0 和 C 的求法有图解法和最小二乘法。

(1) 图解法。在 $p \sim s$ 曲线草图(图 4-3)上找出比例界限点,从比例界限点引一直线,使比例界限前的各点均匀靠近该直线,直线与纵坐标交点的截距即为 s_0 。将直线上任意一点的 s 、 p 和 s_0 代入下式求得 C 值:

$$s = s_0 + Cp \quad (4-1)$$

(2) 最小二乘法。计算式如下:

$$Ns_0 + C \sum p - \sum s' = 0 \quad (4-2)$$

$$s_0 \sum p + C \sum p^2 - \sum ps' = 0 \quad (4-3)$$

解上两式求得

$$C = \frac{N \sum ps' - \sum p \sum s'}{N \sum p^2 - (\sum p)^2} \quad (4-4)$$

$$s_0 = \frac{\sum s' \sum p^2 - \sum p \sum ps'}{N \sum p^2 - (\sum p)^2} \quad (4-5)$$

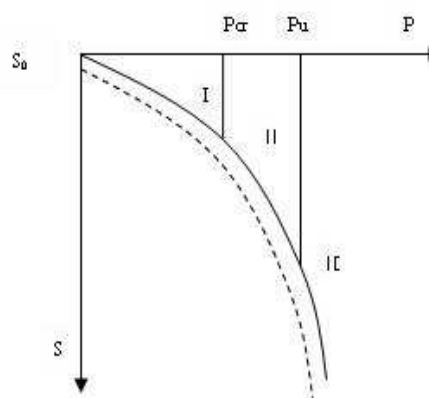


图4-3: P—S曲线修正沉降观测值

式中: N ——加荷次数;

s_0 ——校正值, cm ;

p ——单位面积压力, kPa ;

s' ——各级荷载下的原始沉降值, cm ;

C ——斜率。

求得 s_0 和 C 值后,按下述方法修正沉降观测值 s ,对于比例界限以前各点,根据 C 、 p 值按 $s=Cp$ 计算;对于比例界限以后各点,则按 $s=s - s_0$ 计算。

根据 p 和修正后的 s 值绘制 $p \sim s$ 曲线。

(二) 成果应用

1.确定地基土承载力

(1) 强度控制法

即以比例界限 p_0 作为地基土承载力。这种方法适用于硬塑~坚硬的粘性土、粉土、砂土、碎石土。比例界限的确定方法有以下几种。

①当 $p \sim s$ 曲线上有较明显的直线段时，一般采用直线段的终点所对应的压力即为比例界限。

②当 $p \sim s$ 曲线上无明显的直线段时，可用下述方法确定：

a 在某一荷载下，其沉降量超过前一级荷载下沉降量的 2 倍。即 $\Delta s_n > 2\Delta s_{n-1}$ 的点所对应的压力即为比例界限。

b 绘制 $\lg p \sim \lg s$ 曲线，曲线上转折点所对应的压力即为比例界限。

c 绘制 $p \sim \frac{\Delta s}{\Delta p}$ 曲线，曲线上的转折点所

对应的压力即为比例界限。其中 Δp 为荷载增量， Δs 为相应的沉降增量(如图 4-4 所示)。

(2) 相对沉降量控制法

根据沉降量和承压板宽度的比值 s/b 确定。当承压板面积为 $0.25 \sim 0.5\text{m}^2$ ，可取 $s/b=0.01 \sim 0.015$ 对应的压力为地基承载力。

(3) 极限荷载法

当 $p \sim s$ 曲线上的比例界限点出现后，土很快达到极限荷载，即比例界限 p_0 与极限荷载 p_u 接近时，将 p_u 除以安全系数 $F_s(F_s=2 \sim 3)$ 作为地基承载力；当比例界限 p_0 与极限荷载 p_u 不接近时，可按下式计算：

$$f_k = p_u + \frac{p_u - p_0}{F_s} \quad (4-6)$$

式中： f_k ——地基土承载力，kPa；

p_0 ——比例界限，kPa；

p_u ——极限荷载，kPa；

F_s ——安全系数，一般取 3~5。

(4) 极限荷载的确定方法

当荷载试验加载至破坏荷载，则取破坏荷载的前一级荷载为极限荷载 p_u 。

(5) 承载力特征值的确定应符合的规定

①当 $p \sim s$ 曲线上有比例界限时，取该比例界限所对应的荷载值。

②满足终止试验前三条终止加载条件之一时，其对应的前一级荷载为极限荷载，当该值小于对应比例界限的荷载值的 2 倍时，取荷载极限值的一半。

③不能按上述两款要求确定时，可取 $s/b=0.01 \sim 0.05$ 所对应的荷载值，但其值不应大于最大加载量的一半。

④同一土层参加统计的试验点不应少于三点，当试验实测值的极差不超过平均值的 30% 时，取此平均值作为该土层的地基承载力特征值 f_{ak} 。

2. 计算变形模量

变形模量可用下式计算

$$E_o = 10(1 - \nu^2) \frac{P}{sd} \quad (4-7)$$

式中： E_o ——土的变形模量，MPa；

ν ——土的泊松比，碎石土取 0.25，砂土和粉土取 0.30，粉质粘土取 0.35，粘土取 0.42；

p ——承压板上的总荷载，kN；

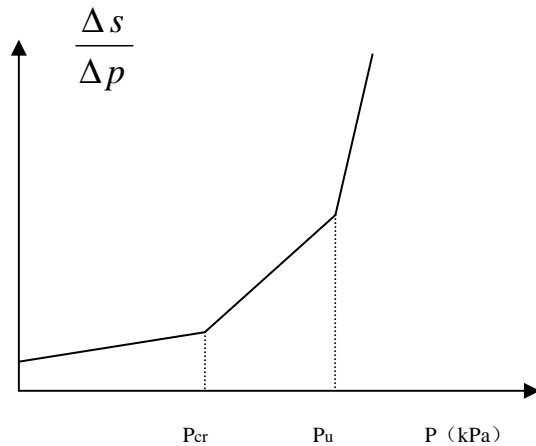


图 4-4: $p - \frac{\Delta s}{\Delta p}$ 曲线

s——与荷载 p 相应的沉降量；

d——承压板直径，cm。

第三节 静力触探试验

静力触探试验是用静力将探头以一定的速率压入土中，利用探头内的力传感器，通过电子量测仪器将探头受到的贯入阻力记录下来。由于贯入阻力的大小与土层的性质有关，因此通过贯入阻力的变化情况，可以达到了解土层的工程性质的目的。

静力触探试验可根据工程需要采用单桥探头、双桥探头或带孔隙水压力量测的单、双桥探头，可测定比贯入阻力(p_s)、锥尖阻力(q_c)、侧壁阻力(f_s)和贯入时的孔隙水压力(u)。静力触探试验适用于软土、一般粘性土、粉土、砂土和含少量碎石的土。

以下就静力触探试验的设备构造、试验方法及成果应用作一介绍。

一、静力触探的试验设备

静力触探设备试验由加压装置、反力装置、探头及量测记录仪器等四部分组成：

(一) 加压装置

加压装置的作用是将探头压入土层中，按加压方式可分为下列几种。

1.手摇式轻型静力触探。利用摇柄、链条、齿轮等用人力将探头压入土中。用于较大设备难以进入的狭小场地的浅层地基土的现场测试。

2.齿轮机械式静力触探。主要组成部件有变速马达(功率 2.8~3kW)、伞形齿轮、丝杆、稻香滑块、支架、底板、导向轮等。其结构简单，加工方便，既可单独落地组装，也可装在汽车上，但贯入力小，贯入深度有限。

3.全液压传动静力触探。分单缸和双缸两种。主要组成部件有：油缸和固定油缸底座、油泵、分压阀、高压油管、压杆器和导向轮等。目前在国内使用液压静力触探仪比较普遍，一般最大贯入力可达 200kN。

(二) 反力装置

静力触探的反力用三种形式解决：

1.利用地锚作反力。当地表有一层较硬的粘性土覆盖层时，可以是使用 2~4 个或更多的地锚作反力，视所需反力大小而定。锚的长度一般 1.5m 左右，叶片的直径可分成多种，如 25、30、35、40cm，以适应各种情况。

2.用重物作反力。如地表土为砂砾、碎石土等，地锚难以下入，此时只有采用压重物来解决反力问题，即在触探架上压以足够的重物，如钢轨、钢锭、生铁块等。软土地基贯入 30m 以内的深度，一般需压重物 40~50kN。

3.利用车辆自重作反力。将整个触探设备装在载重汽车上，利用载重汽车的自重作反力。贯入设备装在汽车上工作方便，工效比较高，但由于汽车底盘距地面过高，使钻杆施力点距地面的自由长度过大，当下部遇到硬层而使贯入阻力突然增大时易使钻杆弯曲或折断，应考虑降低施力点距地面的高度。

触探钻杆通常用外径 $\Phi 32\sim 35\text{mm}$ 、壁厚为 5mm 以上的高强度无缝钢管制成，也可用 $\Phi 42\text{mm}$ 的无缝钢管。为了使用方便，每根触探杆的长度以 1m 为宜，钻杆接头宜采用平接，以减小压入过程中钻杆与土的摩擦力。

(三) 探头

1. 探头的工作原理

将探头压入土中时，由于土层的阻力，使探头受到一定的压力。土层的强度愈高，探头所受到的压力愈大。通过探头内的阻力传感器(以下简称传感器)，将土层的阻力转换为电讯号，然后由仪表测量出来。为了实现这个目的，需运用三个方面的原理，即材料弹性变形的虎克定律、电量变化的电阻率定律和电桥原理。

传感器受力后要产生变形。根据弹性力学原理，如应力不超过材料的弹性范围，其应变的大小与土的阻力大小成正比，而与传感器截面积成反比。因此，只要能将传感器的应变大小测量出，即可知土阻力的大小，从而求得土的有关力学指标。

如果在传感器上贴上电阻应变片，当传感器受力变形时，应变片也随之产生相应的应变从而引起应变片的电阻产生变化，根据电阻定律，应变片的阻值变化与电阻丝的长度变化成正比，与电阻丝的截面积变化成反比，这样就能将传感器的变形转化为电阻的变化。但由于传感器在弹性范围内的变形很小，引起电阻的变化也很小，不易测量出来。为此，在传感器上贴一组电阻应变片，组成一个电桥电路，使电阻的变化转化为电压的变化，通过放大，就可以测量出来。因此，静力触探就是通过探头传感器实现一系列量的转换：土的强度—土的阻力—传感器的应变—电阻的变化—电压的输出，最后由电子仪器放大和记录下来，达到测定土强度和其他指标的目的。

2.探头的结构

目前国内用的探头有三种(如图4-5所示)，一种是单桥探头，另一种是双桥探头。此外还有能同时测量孔隙水压的两用($p_s \sim u$)或三用($q_c \sim u \sim f_s$)探头，即在单桥或双桥探头的基础上增加了能量侧孔隙水压力的功能。

(1)单桥探头：单桥探头由外套筒的锥头、弹性元件(传感器)、顶柱和电阻应变片组成，锥底的截面积规格不一，常用的探头型号及规格见表4-2，其中有效侧壁长度为锥底直径的1.6倍。

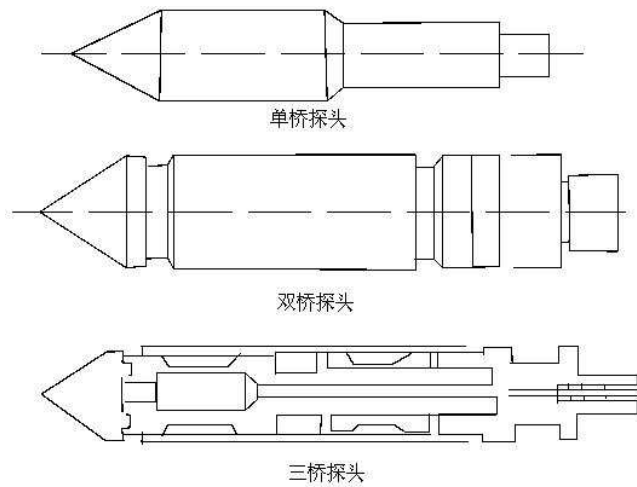


图4-5静力触探探头示意图

表4-2 单桥探头的规格

型号	锥底直径 Φ (mm)	锥底面积 A (cm^2)	有效侧壁长度 L (mm)	锥角 α ($^\circ$)
I~1	35.7	10	57	60
I~2	43.7	15	70	60
I~3	50.4	20	81	60

(2)双桥探头。单桥探头虽带有侧壁摩擦套筒，但不能分别测出锥头阻力和侧壁摩擦阻力。双桥探头除锥头传感器外，还有侧壁摩擦传感器及摩擦套筒。侧壁摩擦套筒的尺寸与锥底面积有关。双桥探头结构见图4-5，其规格见表4-3。

(3)探头的密封及标定

要保证传感器高精度地进行工作，就必须采取密封、防潮措施，否则因传感器受潮而降低其绝缘电阻，使零飘增大，严重时电桥不能平衡，测试工作无法进行。密封方法有包裹法、堵塞法、充填法等。用充填法时应注意利用中性填料，且填料要呈软膏状，以免对应变片产生腐蚀或影响讯号的传递。

表4-3 双桥探头的规格

型号	锥底直径 Φ (mm)	锥底面积 A (cm^2)	有效侧壁长度 L (mm)	锥角 α ($^\circ$)
II~1	35.7	10	200	60
II~2	43.7	15	300	60
II~3	50.4	20	300	60

目前国内较常用的密封防水方法是在探头丝扣接口处涂上一层高分子液态橡胶,然后将丝扣上紧。在电缆引出端,用厚的橡胶垫圈及铜垫圈压紧,使其与电缆紧密接触,起到密封的作用,而摩擦传感器则采用自行车内轮胎的橡胶膜套上,两端用尼龙线扎紧,对于摩擦传感器与上接头连接的伸缩缝,可用弹性和密封性能都好的704硅橡胶填充。

密封好的探头要进行标定,找出探头内传感器的应变值与贯入阻力之间的关系后才能使用。标定工作可在特制的磅秤架上进行,也可在材料实验室利用50~100kN的压力机进行,但最好是使用30~50kN的标准测力计,这样能在野外工作过程中随时标定,方便且精度较高。

每个传感器需标定3~4次,每次需转换不同方位。标定过程应耐心细致,加荷速度要慢。将标定结果绘在坐标纸上,纵坐标代表压力,横坐标代表输出电压(mV)或微应变($\mu\epsilon$)。在正常情况下,各标定的点应在一通过原点的直线上,如不通过原点,且截距较大时,可能是应变片未贴好,或探头结构上存在问题,应找出原因后采取措施。

(四)量测记录仪器

目前我国常用静力触探的量测记录仪器有两种类型,一种为电阻应变仪,另一种为自动记录仪。

1.电阻应变仪

电阻应变仪由稳压电源、振荡器、测量电桥、放大器、相敏检波器和平衡指示器等组成。应变仪是通过电桥平衡原理进行测量的。当触探头工作时,传感器发生变形,引起测量电桥电路的电压平衡发生变化,通过手动调整电位器使电桥达到新的平衡,根据电位器调整程度就可确定应变的大小,并从读数盘上直接读出。

2.自动记录仪

自动记录仪是由通用的电子电位差计改装而成,它能随深度自动记录土层贯入阻力的变化情况,并以曲线的方式自动绘在记录纸上,从而提高了野外工作的效率和质量。它主要由稳压电源、电桥、滤波器、放大器、滑线电阻和可逆电机组成。由探头输出的信号,经过滤波器以后,产生一个不平衡电压,经放大器放大后,推动可逆电机转动,与可逆电机相连的指示机构,就沿着有分度的标尺滑行,标尺是按讯号大小比例刻制的,因而指示机构所显示的位置即为被测讯号的数值。近年来已有将静力触探试验过程引入微机控制的行列。即在钻进过程中可显示和存入与各深度对应的 q_c 和 f_s 值,起拔钻杆时即可进行资料分析处理,打印出直观曲线及经过计算处理的各土层的 q_c 、 f_s 平均值,并可永久保存,还可根据要求进行力学分层。

二、静力触探现场试验要点

(一)试验前的准备工作

试验前的准备工作有:

- 1.设置反力装置(或利用车装重量)。
- 2.安装好加压和量测设备,并用水准尺将底板调平。
- 3.检查电源电压是否符合要求。
- 4.检查仪表是否正常。
- 5.检查探头外套筒及锥头的活动情况,并接通仪器,利用电阻挡调节度盘指针,如调节比较灵活,说明探头正常。

(二)现场试验

现场试验步骤如下:

- 1.将仪表与探头接通电源,打开仪表和稳压电源开关,使仪器预热15min。
- 2.根据土层软硬情况,确定工作电压,将仪器调零,并记录孔号、探头号、标定系数、工作电压及日期。

3.先压入 0.5m, 稍停后提升 10cm, 使探头与地温相适应, 记录仪器初读数 ε_0 。试验中每贯入 10mm 测记读数 ε_1 一次。以后每贯入 3~5m, 要提升 5~10cm, 以检查仪器初读数 ε_0 。

4.探头应匀速垂直压入土中, 贯入速度控制在 1.2m/min。

5.接卸钻杆时, 切勿使入土钻杆转动, 以防止接头处电缆被扭断, 同时应严防电缆受拉, 以免拉断或破坏密封装置。

6.防止探头在阳光下暴晒, 每结束一孔, 应及时将探头锥头部分卸下, 将泥沙擦洗干净, 以保持顶柱及外套筒能自由活动。

(三)静力触探试验的技术要求

静力触探试验的技术要求应符合下列规定:

1.探头圆锥锥底截面积应采用 10cm^2 或 15cm^2 , 单桥探头侧壁高度应分别采用 57mm 或 70mm, 双桥探头侧壁面积应采用 $150\sim 300\text{cm}^2$, 锥尖锥角应为 60° 。

2.探头测力传感器应连同仪器、电缆进行定期标定, 室内探头标定测力传感器的非线性误差、重复性误差、滞后误差、温度漂移、归零误差均应小于 1%FS, 现场试验归零误差应小于 3%, 绝缘电阻不小于 $500\text{M}\Omega$ 。

3.深度记录的误差不应大于触探深度的 $\pm 1\%$ 。

4.当贯入深度超过 30m 或穿过厚层软土后再贯入硬土层时, 应采取措施防止孔斜或断杆, 也可配置测斜探头, 量测触探孔的偏斜角, 校正土层界线的深度。

5.孔压探头在贯入前, 应在室内保证探头应变腔为已排除气泡的液体所饱和, 并在现场采取措施保持探头的饱和状态, 直至探头进入地下水位以下的土层为止。在孔压静探试验过程中不得上提探头。

6.当在预定深度进行孔压消散试验时, 应量测停止贯入后不同时间的孔压值, 其计时间隔由密而疏合理控制; 试验过程中不得松动探杆。

三、试验成果整理

(一)单孔资料的整理

1.初读数的处理

初读数是指探头在不受土层阻力的条件下, 传感器的初始应变的读数。影响初读数的因素很多, 最主要的是温度。因为现场工作过程的地温与气温同探头标定时温度不一样。消除初读数影响的办法, 可采用每隔一定深度将探头提升一次, 在其不受力的情况下将应变仪调零一次, 或测定一次初读数。后者在进行应变计算时, 按下式消除初读数的影响

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_0 \quad (4-8)$$

式中: ε ——应变, $\mu\varepsilon$;

ε_1 ——探头压入时的读数 $\mu\varepsilon$;

ε_0 ——初读数 $\mu\varepsilon$ 。

2.贯入阻力的计算

将电阻应变仪测出的应变 ε , 换算成比贯入阻力 p_s (单桥探头), 或锥头阻力 q_c 及侧壁摩擦力 f_s (双桥探头), 计算公式如下:

$$p_s = a\varepsilon$$

$$q_c = a_1\varepsilon_q$$

$$f_s = a_2\varepsilon_f$$

(4-9)

式中: a 、 a_1 、 a_2 ——应变仪标定的单桥探头、双桥探头的锥头传感器及摩擦传感

器的标定系数, MPa;

ε 、 ε_q 、 ε_f ——单桥探头、双桥探头的锥头及侧壁传感器的应变变量, $\mu\varepsilon$ 。

自动记录仪绘制出的贯入阻力随深度变化曲线,其本身就是土层力学性质的柱状图,只需在其纵、横坐标上绘制比例标尺,就可在图上直接量出 p_s 或 q_c 、 f_s 值的大小。

3. 摩阻比的计算

摩阻比是以百分率表示的双桥探头的各对应深度的锥头阻力和侧壁摩擦力的比值,即

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \times 100 \% \quad (4-10)$$

式中: R_f ——摩阻比。

(二) 原始数据的修正

1. 深度修正

当记录深度与实际深度有出入时,应按深度线性修正深度误差。若触探的同时量测触探杆的偏斜角 θ (相对铅垂线),也需要进行深度的修正。假定偏斜的方位角不变,每 1m 测一次偏斜角,则深度修正 Δh_i 为:

$$\Delta h_i = 1 - \cos\left(\frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{2}\right) \quad (4-11)$$

式中: Δh_i ——第 i 段深度修正值;

θ_i 、 θ_{i-1} ——第 i 次及第 $i-1$ 次实测的偏斜角。

到深度 h_n 处,总的深度修正值为 $\sum_{i=1}^n \Delta h_i$,实际的深度应为 $h_n - \sum_{i=1}^n \Delta h_i$ 。

2. 零飘修正

一般根据归零检查的深度间隔按线性内插法对测试值加以修正。

(三) 绘制触探曲线

单桥和双桥探头应绘制 $p_s \sim z$ 曲线、 $q_c \sim z$ 曲线、 $f_s \sim z$ 曲线、 $R_f \sim z$ 曲线;孔压探头尚应绘制 $u_i \sim z$ 曲线、 $q_t \sim z$ 曲线、 $f_t \sim z$ 曲线、 $B_q \sim z$ 曲线和孔压消散 $u_t \sim \lg t$ 曲线。见图 4-6。

其中, R_f ——摩阻比;

u_i ——孔压探头贯入土中量测的孔隙水压力(即初始孔压);

q_t ——真锥头阻力(经孔压修正);

f_t ——真侧壁摩阻力(经孔压修正);

B_q ——静探孔压系数, $B_q = \frac{u_f - u_o}{q_t - \sigma_{vo}}$;

u_i ——试验深度处总静水压力(kPa);

σ_{vo} ——试验深度处总上覆压力(kPa);

u_t ——孔压消散过程时刻 t 的孔隙水压力。

(四) 划分土层界限

根据静力触探曲线对土进行力学分层,或参照钻孔分层结合静探曲线的大小和形态特征进行土层工程分层,确定分层界线。

土层划分应考虑超前与滞后的影响,其确定方法如下:

1. 上下层贯入阻力相差不大时,取超前深度和滞后深度的中点,或中点偏向小阻值土层 5~10cm 处作为分层界面。

2. 上下层贯入阻力相差 1 倍以上时,当由软层进入硬层或由硬层进入软层时,取软层最后一个(或第一个)贯入阻力小值偏向硬层 10cm 处作为分层界面。

3. 上下层贯入阻力无甚变化时,可结合 f_s 或 R_f 的变化确定分层界面。

(五)分层贯入阻力

计算单孔各分层的贯入阻力，可采用算术平均法或接触探曲线采用面积法，计算时应剔除个别异常值(如个别峰值)，并剔除超前、滞后值。计算勘察场地的分层阻力时，可按各孔穿越该层的厚度加权平均计算场地分层的平均贯入阻力，或将各孔触探曲线叠加后，绘制低值与峰值包络线，以便确定场地分层的贯入阻力在深度上的变化规律及变化范围。

四、成果应用

(一)应用范围

静力触探试验的应用范围有：

1.查明地基土在水平方向和垂直方向的变化，划分土层，确定土类别。

2.确定建筑物地基土的承载力和变形模量以及其他物理力学指标。

3.选择桩基持力层，预估单桩承载力，判别桩基沉入的可能性。

4.检查填土及其他人工加固地基的密实程度和均匀性，判别砂土的密度及其在地震作用下的液化可能性。

5.湿陷性黄土地区用来查找浸水湿陷事故的范围和界线。

(二)按贯入阻力进行土层分类

1.分类方法。利用静力触探进行土层分类，由于不同类型的土可能有相同的 ps 、 qc 或 fs 值，因此单靠某一个指标，是无法对土层进行正确分类的。在利用贯入阻力进行分层时，应结合钻孔资料进行判别分类。使用双桥探头时，由于不同土的 qc 和 fs 值不可能都相同，因而可以利用 qc 和 fs/qc (摩阻比)两个指标来区分土层类别。对比结果证明，用这种方法划分土层类别，效果较好。

2.利用 qc 和 fs/qc 分类的一些经验数据，如表 4 - 4。

3.铁道部《静力触探技术规则》(1989年)使用双桥探头资料，可按图 4 - 7 划分土类。

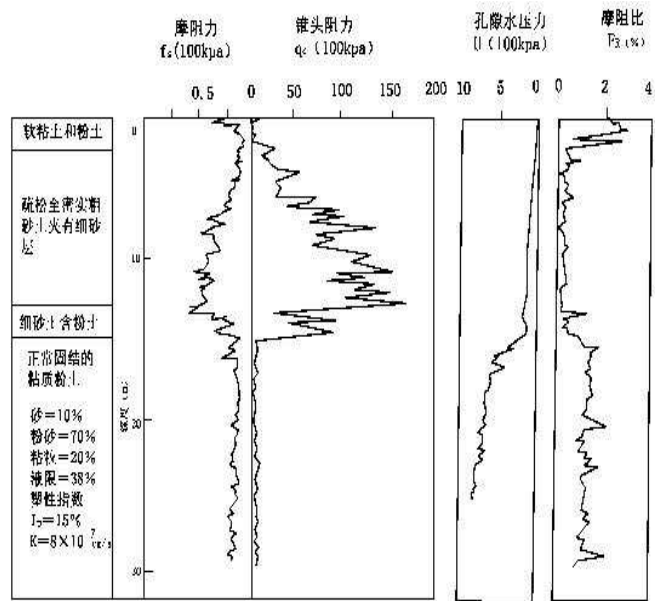


图4-6 静力触探成果曲线

表 4 - 4 按静力触探指标划分土类

土的名称	单 位, 国 名							
	铁道部		交通部一航局		一机部勘察公司		法国	
	$q_c, f_s/q_c$ 值							
	q_c (MPa)	f_s/q_c (%)	q_c (MPa)	f_s/q_c (%)	q_c (MPa)	f_s/q_c (%)	q_c (MPa)	f_s/q_c (%)
淤泥质土及软粘性土	0.2~1.7	0.5~3.5	<1	10~13	<1	>1	≤6	>6
粘土	1.7~9	0.25~5	1~1.7	3.8~5.7	1~7	>3	>30	4~8
粉质粘土			1.4~3	2.2~4.8				
粉土			3~6	1.1~1.8				
砂类土	2~32	0.3~1.2	>6	0.7~1.1	<1.2	<1.2	>30	0.6~0.2

(三)确定地基土的承载力

目前，为了利用静力触探确定地基土的承载力，国内外都是根据对比试验结果提出经验公式，以解决生产上的应用问题。

建立经验公式的途径主要是将静力触探试验结果与载荷试验求得的比例界限值进行对比，并通过对比数据的相关分析得到用于特定地区或特定土性的经验公式。

对于粉土则采用下式：

$$f_0 = 36p_s + 44.6 \quad (4 - 12)$$

式中： f_0 —地基承载力基本值，kPa；

p_s —单桥探头的比贯入阻力，单位为 MPa。

(四)确定不排水抗剪强度 C_u 值

用静力触探求饱和软粘土的不排水综合抗剪强度(C_u)，目前是用静力触探成果与十字板剪切试验成果对比，建立 p_s 与 C_u 之间的关系，以求得 C_u 值，其相关式见表 4 - 5。

表 4 - 5 软土 C_u (kPa) 与 p_s 、 q_c (MPa) 相关公式

公式	适用范围	公式来源
$C_u = 30.8p_s + 4$	$0.1 \leq p_s \leq 1.5$ 软粘土	交通部一航局
$C_u = 50p_s + 1.6$	$p_s < 0.7$	《铁路触探细则》
$C_u = 71q_c$	镇海软粘土	同济大学
$C_u = (71 \sim 100)q_c$	软粘土	日本

(五)确定土的变形性质指标

1.基本公式

Buisman 曾建议砂土的 $E_s \sim q_c$ 关系式为

$$E_s = 1.5q_c \quad (4 - 13)$$

式中： E_s ——固结试验求得的压缩模量，MPa。

这个公式是由下列假设推出来的：

- (1)触探头类似压进半无限弹性压缩体的圆锥。
- (2)压缩模量是常数，并且等于固结试验的压缩模量 E_s 。
- (3)应力分布的 Boussinesq 理论是适用的。
- (4)与土的自重应力 σ_0 相比，应力增量 $\Delta\sigma$ 很小。

由于土在产生侧向位移之前首先被压缩，在压入高压土层中的触探头与上述假设条件之间存在着相似性。因此，从理论上考虑，是在探头阻力与土的压缩性之间建立相关关系的经验公式。

2.经验式

E_0 、 p_s 和 E_s 、 p_s 的经验式列于表 4 - 6。

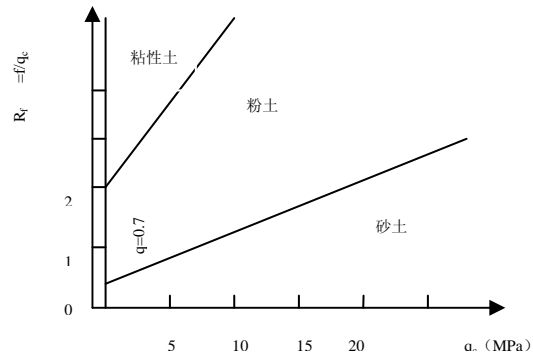


图 4-7 用双桥探头划分土类

表 4 - 6 按比贯入阻力 p_s 确定 E_0 和 E_s

序号	公式	适用范围	公式来源
1	$E_s=3.72p_s+1.26$	$0.3 \leq p_s < 5$	《工业与民用建筑工程地质勘察规范》(TJ21 - 77)
2	$E_0=9.79p_s - 2.63$ $E_0=11.77p_s - 4.69$	$0.3 \leq p_s < 3$ $3 \leq p_s < 6$	
3	$E_s=3.63(p_s+0.33)$	$p_s < 5$	交通部一航局设计院
4	$E_s=2.17p_s+1.62$ $E_s=2.12p_s+3.85$	$0.7 < p_s < 4$ 北京近代土 $1 < p_s < 9$ 北京老土	北京市勘察院
5	$E_s=1.9p_s+3.23$	$0.4 \leq p_s \leq 3$	四川省综合勘察院
6	$E_s=2.94p_s+1.34$	$0.24 < p_s < 3.33$	天津市建筑设计院
7	$E_s=3.47p_s+1.01$	无锡地区 $p_s=0.3 \sim 3.5$	无锡市建筑设计院
8	$E_s=6.3p_s+0.85$	贵州地区红粘土	贵州省建筑设计院

(六)估计饱和粘性土的天然重度

利用静力触探比贯入阻力 p_s 值, 结合场地或地区性土质情况(含有机物情况、土质状态)可估计饱和粘性土的天然重度, 见表 4 - 7。

表 4 - 7 按比贯入阻力 p_s 估计饱和粘性土的天然重度 γ

p_s (MPa)	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0	1.6
γ (kN/m ³)	14.1~15.5	15.6~17.2	16.4~18.0	17.2~18.9	17.5~19.3	18.2~20.0
p_s (MPa)	2.0	2.5	3.0	4.0	≥ 4.5	
γ (kN/m ³)	18.7~20.5	19.2~21.0	19.5~20.7	20.0~21.4	20.3~22.2	

(七)确定砂土的内摩擦角

砂土的内摩擦角可根据静力触探参数参照表 4 - 8 取值。

表 4 - 8 按比贯入阻力 p_s 确定砂土的内摩擦角 φ

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

(八)估算单桩承载力

静力触探试验可以看做是一小直径桩的现场载荷试验。对比结果表明, 用静力触探成果估算单桩极限承载力是行之有效的。通常是双桥探头实测曲线进行估算。现将采用双桥探头实测曲线估算单桩承载力的经验式介绍如下。

按双桥探头 q_c 、 f_s 估算单桩竖向承载力计算式如下:

$$p_u = a q_c A + U_p \sum \beta_i f_{si} l_i \quad (4 - 14)$$

式中: p_u ——单桩竖向极限承载力, kN;

a ——桩尖阻力修正系数, 对粘性土取 2/3, 对饱和砂土取 1/2;

q_c ——桩端上下探头阻力, 取桩尖平面以上 4d(d 为桩的直径)范围内按厚度的加权平均值, 然后再和桩尖平面以下 1d 范围的 q_c 值平均, kPa;

f_{si} ——第 i 层土的探头侧壁摩阻力, kPa;

i ——第 i 层土桩身侧摩阻力修正系数, 按下式计算:

$$\text{对于粘性土 } \beta_i = 10.05 f_{si}^{-0.55} \quad (4-15)$$

$$\text{对于砂土 } \beta_i = 5.05 f_{si}^{-0.45} \quad (4-16)$$

式中： U_p ——桩身周长（m）；
其余符号意义同前。

确定桩的承载力时，安全系数取 2~2.5，以端承力为主时取 2，以摩阻力为主时取 2.5。

第四节 圆锥动力触探试验

一、概述

圆锥动力触探是利用一定的锤击能量，将一定尺寸、一定形状的圆锥探头打入土中，根据打入土中的难易程度(可用贯入度、锤击数或单位面积动贯入阻力来表示) 来判别土层的变化，对土层进行力学分层，并确定土层的物理力学性质，对地基土作出工程地质评价。通常以打入土中一定距离所需的锤击数来表示土层的性质，也有以动贯入阻力来表示土层的性质。其优点是设备简单、操作方便、工效较高、适应性强，并具有连续贯入的特点。对难以取样的砂土、粉土、碎石类土等土层、对静力触探难以贯入的土层，圆锥动力触探是十分有效的勘探测试手段。圆锥动力触探的缺点是不能采样对土进行直接鉴别描述，试验误差较大，再现性较差。如将探头换为标准贯入器，则称标准贯入试验。利用圆锥动力触探试验可以解决如下问题：

1.划分不同性质的土层。当土层的力学性质有显著差异，而在触探指标上有显著反映时，可利用动力触探进行分层和定性评价土的均匀性，检查填土质量，探查滑动带、土洞和确定基岩面或碎石土层的埋藏深度等。

2.确定土的物理力学性质。确定砂土的密实度和粘性土的状态，评价地基土和桩基承载力，估算土的强度和变形参数等。

二、适用范围

圆锥动力触探和标准贯入试验的适用范围见表 4 - 9。

表 4 - 9 动力触探和标准贯入试验的适用范围

类型		砂土、粉土、粘性土				砂土					碎石土		
		砂土	粘土	粉质粘土	粉土	粉砂	细砂	中砂	粗砂	砾砂	圆砾	卵石	漂石
动力触探	轻型		+	++	+								
	中型		+	++	+								
	重型					+	+	++	++	++	++	+	
	超重型									+	++	++	+
标准贯入试验				+	++	++	++	++	+				

注：++适合，+部分适合

三、圆锥动力触探试验设备

(一)动力触探类型及规格

圆锥动力触探试验的类型，可分为轻型、重型和超重型三种。其规格和适用土类应符合表 4 - 10 的规定。

(二)试验仪器设备

圆锥动力触探试验设备主要分四大部分：

探头：为圆锥形，锥角 60° ，探头直径为 $40\sim 74\text{mm}$ 。见图 4 - 8。

穿心锤：钢质圆柱形，中心圆孔略大于穿心杆 $3\sim 4\text{mm}$ 。

提引设备：轻型动力触探采用人工放锤，重型及超重型动力触探采用机械提引器放锤，提引器主要有球卡式和卡槽式两类。

探杆：轻型探杆外径为 25mm ；重型探杆外径为 42mm 钻杆；超重型探杆外径为 60mm 重型钻杆。

表 4 - 10 动力触探、标准贯入试验的设备规格及适用的土层

类型		轻型	重型	超重型
落锤	锤的重量 (kg)	10	63.5	120
	落距 (cm)	50	76	100
探头	直径 (mm)	40	74	74
	锥角 ($^\circ$)	60	60	60
探杆直径 (mm)		25	42	50~60
指标		贯入 30cm 的锤击数 N_{10}	贯入 10cm 的锤击数 $N_{63.5}$	贯入 10cm 的锤击数 N_{120}
主要适用岩土		≤ 4 米的填土、砂土、粘性土	沙土、中密以下的碎石土、极软岩	密实和很密的碎石土、软岩、极软岩

(三)技术要求

圆锥动力触探试验技术要求应符合下列规定：

- 1.采用自动落锤装置。
- 2.触探杆最大偏斜度不应超过 2% ，锤击贯入应连续进行；同时防止锤击偏心、探杆倾斜和侧向晃动，保持探杆垂直度；锤击速率每分钟宜为 $15\sim 30$ 击。
- 3.每贯入 1m ，宜将探杆转动一圈半；当贯入深度超过 10m ，每贯入 20cm 宜转动探杆一次。
- 4.对轻型动力触探，当 $N_{10} > 100$ 或贯入 15cm 锤击数超过 50 次时，可停止试验；对重型动力触探，当连续三次 $N_{63.5} > 50$ 时，可停止试验或改用超重型动力触探。

四、试验要点

(一) 轻型动力触探

- 1.适用范围：一般用于贯入深度小于 4m 的一般粘性土和粘性素填土层。
- 2.实验步骤：先用轻便钻具钻至试验土层标高，然后对土层连续进行触探，使穿心锤自由下落，将触探杆竖直打入土层中，记录每打入土层 30cm 锤击数 N_{10} 。

(二) 重型动力触探

- 1.适用范围：一般适用于砂土和碎石土。
- 2.实验步骤：
 - (1)贯入前，触探架应安装平稳，保持触探孔垂直。试验时穿心锤应自由下落并应尽量连续贯入，锤击速率宜为 $15\sim 30$ 击/min。

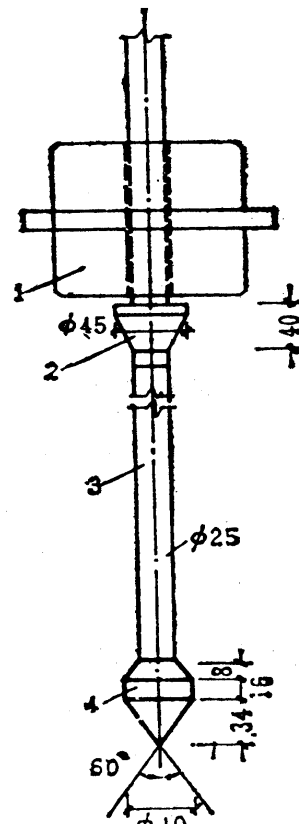


图 4-8 轻型动力触探仪

1. 穿心锤 2. 锤垫 3. 探杆 4. 圆锥头

(2)量尺读数。除了及时记录贯入深度外,对触探指标(锤击数)有下列两种量读方法:

①记录一阵击的贯入量及相应的锤击数,并由式(4-17)算得每贯入 10cm 所需锤击数 $N_{63.5}$ 。一般以 5 击为一阵击,土较松软时应少于 5 击。

$$N = \frac{10K}{S} \quad (4-17)$$

式中: N ——每贯入 10cm 的实测锤击数;

K ——一阵击的锤击数;

S ——相应于一阵击的贯入量, cm。

②当土层较为密实时(5 击贯入量小于 10cm 时)可直接记读每贯入 10cm 所需的锤击数。

3.影响因素的校正

(1)侧壁摩擦影响的校正。对于砂土和松散~中密的圆砾、卵石,触探深度在 1~15m 的范围内时,一般可不考虑侧壁摩擦的影响。

(2)触探杆长度的修正。当触探杆长度大于 2m 时,需按下式校正:

$$N_{63.5} = \alpha N \quad (4-18)$$

式中: $N_{63.5}$ ——重型动力触探试验锤击数;

N ——贯入 10cm 的实测锤击数;

α ——触探杆长度校正系数,可按规范确定。

(3)地下水影响的校正。对于地下水位以下的中、粗、砾砂和圆砾、卵石,锤击数可按下列式修正:

$$N_{63.5} = 1.1N'_{63.5} + 1.0 \quad (4-19)$$

式中: $N_{63.5}$ ——经地下水影响校正后的锤击数;

$N'_{63.5}$ ——未经地下水影响校正而经触探杆长度影响校正后的锤击数。

(三)超重型动力触探

1.适用范围:一般用于密实的碎石土或埋深较大、厚度较大的碎石土。

2.试验步骤:

(1)贯入时应使穿心锤自由下落,地面上的触探杆的高度不应过高,以免倾斜和摆动过大。

(2)贯入过程应尽量连续,锤击速率宜为 15~20 击/min。

(3)贯入深度一般不宜超过 20m。

3.影响因素的校正

(1)触探杆长度影响的校正。当触探杆长度大于 1m 时,锤击数可按下列式进行校正:

$$N_{120} = \alpha N \quad (4-20)$$

式中: N_{120} ——超重型触探试验锤击数;

α ——杆长校正系数,可按表 4-11 确定。

(2)触探杆侧壁摩擦影响的校正:

$$N_{120} = F_n N \quad (4-21)$$

式中: F_n ——触探杆侧壁摩擦影响校正系数,可按规范确定。

式(4-20)与式(4-21)可合并为下列式,因此,触探杆长度和侧壁摩擦的校正可一次完成。

$$N_{120} = \alpha F_n N \quad (4-22)$$

式中: αF_n ——综合影响因素校正系数,可按规范确定。

表 4-11 超重型动力触探试验触探杆长度校正系数 F_n

N	1	2	3	4	6	8~9	10~12	13~17	18~24	25~31	32~50	>50
F_n	0.92	0.85	0.82	0.80	0.78	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.70

五、资料整理

(一)触探指标

1. 锤击数 N 值。以贯入一定深度的锤击数 N (如 N_{10} 、 $N_{63.5}$ 、 N_{120}) 作为触探指标, 可以通过 N 值与其他室内试验和原位测试指标建立相关关系式, 从而获得土的物理力学性质指标。这种方法比较简单、直观, 使用也较方便, 因此被国内外广泛采用。但它的缺陷是不同触探参数得到的触探击数不便于互相对比, 而且它的量纲也无法与其他物理力学性质指标一起计算。近年来, 国内外倾向于用动贯入阻力来替代锤击数。

2. 动贯入阻力 q_d 。欧洲触探试验标准规定了贯入 120cm 的锤击数和动贯入阻力两种触探指标。我国《岩土工程勘察规范》虽然只列入锤击数, 但在条文说明中指出, 也可以采用动贯入阻力作为触探指标。

以动贯入阻力作为动力触探指标的意义在于: ①采用单位面积上的动贯入阻力作为计量指标, 有明确的力学量纲, 便于与其他物理量进行对比; ②为逐步走向读数量测自动化(例如应用电测探头)创造相应条件; ③便于对不同的触探参数(落锤能量、探头尺寸)的成果资料进行对比分析。

荷兰公式是目前国内外应用最广泛的动贯入阻力计算公式, 我国《岩土工程勘察规范》和水利电力部《土工试验规程》都推荐该公式。该公式是建立在古典牛顿碰撞理论基础上的, 它假定: 绝对非弹性碰撞, 完全不考虑弹性变形能量的消耗。在应用动贯入阻力计算公式时, 应考虑下列条件限制: ①每击贯入度在 0.2~5.0cm; ②触探深度一般不超过 12cm; ③触探器质量 M' 与落锤质量 M 之比不大于 2。其公式为

$$q_d = \frac{M}{M + M'} \cdot \frac{MgH}{A \cdot e} \quad (4 - 23)$$

式中: q_d ——动力触探动贯入阻力, MPa;

M ——落锤质量, kg;

M' ——触探器(包括探头、触探杆、锤座和导向杆)的质量, kg;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

H ——落距, m;

A ——圆锥探头截面积, cm^2 ;

e ——贯入度, cm, 等于 D/N , D 为规定贯入深度, N 为规定贯入深度的击数。

(二)触探曲线

动力触探试验资料应绘制触探击数(或动贯入阻力)与深度的关系曲线。触探曲线可绘成直方图。见图 4-9。根据触探曲线的形态, 结合钻探资料, 可进行土的力学分层。但在进行土的分层和确定土的力学性质时应考虑触探的界面效应, 即“超前”和“滞后”反应。当触探探头尚未达到下卧土层时, 在一定深度以上, 下卧土层的影响已经超前反应出来, 叫做“超前反应”; 当探头已经穿过上覆土层进入下卧土层中时, 在一定深度以内, 上覆土层的影响仍会有一些反应, 这叫做“滞后反应”。

据试验研究, 当上覆为硬层下卧为

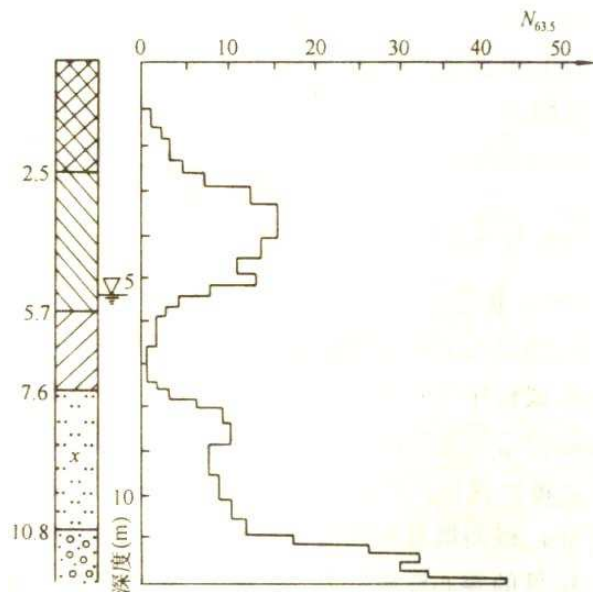


图4-9 动力触探直方图及土层划分

软层时，对触探击数的影响范围大，超前反应量(一般为 0.5~0.7m)大于滞后反应量(一般为 0.2m)；上覆为软层下卧为硬层时，影响范围小，超前反应量(一般为 0.1~0.2m)小于滞后反应量(一般为 0.3~0.5m)。在划分地层分界线时应根据具体情况作适当调整：触探曲线由软层进入硬层时，分层界线可定在软层最后一个小值点以下 0.1~0.2m 处；触探曲线由硬层进入软层时，分层界线可定在软层第一个小值点以上 0.1~0.2m 处。根据各孔分层的贯入指标平均值，用厚度加权平均法计算场地分层贯入指标平均值和变异系数。

六、成果应用

根据圆锥动力触探试验指标和地区经验，可进行力学分层，评定土的均匀性和物理性质(状态、密实度)、土的强度、变形参数、地基承载力，单桩承载力，查明土洞、滑动面、软硬土层界面，检测地基处理效果等。应用试验成果时是否修正或如何修正，应根据建立统计关系时的具体情况确定。

(一)评价碎石土密度

碎石土的密度可根据圆锥动力触探锤击数确定(见表 1-16、表 1-17)，表中的 $N_{63.5}$ 和 N_{120} 应进行修正；当采用重型圆锥动力触探确定碎石土密实度时，锤击数 $N_{63.5}$ 应按式修正：

$$N_{63.5} = a_1 \cdot N'_{63.5} \quad (4-24)$$

式中： $N_{63.5}$ ——修正后的重型圆锥动力触探锤击数；

a_1 ——修正系数，按规范规定取值；

$N'_{63.5}$ ——实测重型圆锥动力触探锤击数。

当采用超重型圆锥动力触探确定碎石土密实度时，锤击数 N_{120} 应按式修正：

$$N_{120} = a_2 \cdot N'_{120} \quad (4-25)$$

式中： N_{120} ——修正后的超重型圆锥动力触探锤击数；

a_2 ——修正系数(可查表)；

N'_{120} ——实测超重型圆锥动力触探锤击数。

(二)确定地基土承载力

利用圆锥动力触探成果确定地基土的承载力，应根据不同地区的试验成果资料进行必要的统计分析，并建立经验公式后使用。以往我国《建筑地基基础设计规范》(JGJ7—89)结合全国各地有关测试成果资料建立了统一的承载力计算公式，现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002)则重视强调区域性及行业性经验公式的建立，使利用圆锥动力触探成果确定地基土承载力的方法更加科学、合理。故在实际应用过程中，应结合必要的区域及行业使用成果，统计分析后确定地基承载力。

关于以往经验性做法及相关成果，在《工程地质手册》(第三版)中有详细的列举，本书不再赘述。

(三)确定抗剪强度和变形模量

1. 依据铁道部第二勘测设计院的研究成果(1988 年)，圆砾、卵石土地基变形模量 E_o (MPa)可按式(4-26)或表 4-12 取值。

$$E_o = 4.48 N_{63.5}^{0.7554} \quad (4-26)$$

表 4-12 用动力触探 $N_{63.5}$ 确定圆砾、碎石土的变形模量 E_o

击数平均值 $\bar{N}_{63.5}$	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14
碎石土	140	170	200	240	280	320	360	400	470	540
中、粗、砾砂	120	150	180	220	260	300	340	380		
击数平均值 $\bar{N}_{63.5}$	16	18	20	22	24	26	28	30	35	40
碎石土	600	660	720	780	830	870	900	930	970	1000

2.依据冶金部建筑科学研究所和武汉冶金勘察公司资料,重型动力触探的动贯入阻力 q_d 与变形模量的关系如式(4-27)、式(4-28)。

对于粘性土、粉土:

$$E_o = 5.488q_d \quad (4-27)$$

对于填土:

$$E_o = 10(q_d - 0.56) \quad (4-28)$$

式中: E_o ——变形模量, MPa;

q_d ——动贯入阻力, MPa。

(四)确定单桩承载力

沈阳市桩基础试验研究小组资料:在沈阳地区用重型动力触探与桩载荷试验测得的单桩竖向承载力建立相关关系,得到经验公式:

$$p_a = \alpha \sqrt{\frac{Ll}{Ee}} \quad (4-29)$$

$$\text{或 } p_a = 24.3\bar{N}_{63.5} + 365.4 \quad (4-30)$$

式中: p_a ——单桩竖向承载力, kN;

L ——桩长, m;

l ——桩进入持力层的长度, m;

E ——打桩贯入度,采用最后10击的每一击贯入度, cm;

e ——动力触探在桩尖以上10cm深度内修正后的平均每击贯入度, cm;

$\bar{N}_{63.5}$ ——由地面至桩尖处,重型动力触探平均每10cm修正后的锤击数;

α ——经验系数。

第五节 标准贯入试验

标准贯入试验是动力触探的一种,它是利用一定的锤击动能(重型触探锤重63.5kg,落距76cm),将一定规格的对开管式的贯入器打入钻孔孔底的土中,根据打入土中的贯入阻力,判别土层的变化和土的工程性质。贯入阻力用贯入器贯入土中30cm的锤击数 N 表示(也称为标准贯入锤击数 N)。

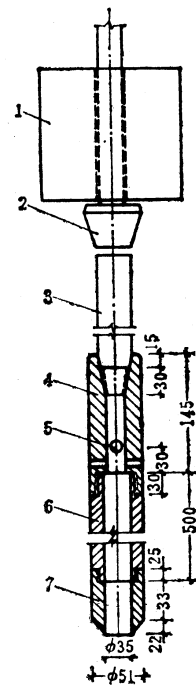
标准贯入试验要结合钻孔进行,国内统一使用直径42mm的钻杆,国外也有使用直径50mm的钻杆或60mm的钻杆。标准贯入试验的优点在于设备简单,操作方便,土层的适应性广,除砂土外对硬粘土及软土岩也适用,而且贯入器能够携带扰动土样,可直接对土层进行鉴别描述。标准贯入试验适用于砂土、粉土和一般粘性土。

一、试验仪器设备

标准贯入试验设备基本与重型动力触探设备相同,主要有标准贯入器、触探杆、穿心锤、锤垫及自动落锤装置等组成。所不同的是标准贯入使用的探头为对开管式贯入器,对开管外径 51 ± 1 mm,内径 35 ± 1 mm,长度大于457mm,下端接长度为 76 ± 1 mm、刃角 $18^\circ \sim 20^\circ$ 、刃口端部厚1.6mm的管靴;上端接一内外径与对开管相同的钻杆接头,长152mm。见图4-10。

二、试验要点

1.标准贯入试验孔采用回转钻进,并保持孔内水位略高于地



(单位: mm)

1—穿心锤; 2—锤垫; 3—触探杆; 4—贯入器头; 5—出水孔; 6—由两半圆形管并合而成的贯入器身; 7—贯入器靴

图4-10 标准贯入试验设备

下水位。当孔壁不稳定时，可用泥浆护壁。钻至试验标高以上 15cm 处，清除孔底残土后再进行试验。

2.采用自动脱钩的自由落锤法进行锤击，并减小导向杆与锤间的摩阻力，避免锤击时其偏心 and 侧向晃动，保持贯入器、探杆、导向杆连接后的垂直度，锤击速率应小于 30 击/min。

3.贯入器打入土中 15cm 后，开始记录每打入 10cm 的锤击数，累计打入 30cm 的锤击数为标准贯入试验锤击数 N。当锤击数已达 50 击，而贯入深度未达 30cm 时，可记录 50 击的实际贯入深度，按下式换算成相当于 30cm 的标准贯入试验锤击数 N，并终止试验。

$$N = 30 \times \frac{50}{\Delta S} \quad (4 - 31)$$

式中： ΔS ——50 击时的贯入度，cm。

4.拔出贯入器，取出贯入器中的土样进行鉴别描述。

三、影响因素及其校正

(一)触探杆长度影响

当用标准贯入试验锤击数按规范查表确定承载力或其他指标时，应根据规范规定按下式对锤击数进行触探杆长度校正：

$$N = \alpha N' \quad (4 - 32)$$

式中：N——标准贯入试验锤击数；

N'——实测贯入 30cm 的锤击数；

α ——触探杆长度校正系数，可按表 4 - 13 确定。

表 4 - 13 触探杆长度校正系数

触探杆长度 (m)	≤3	6	9	12	15	18	21
校正系数 α	1.00	0.92	0.86	0.81	0.77	0.73	0.70

(二)土的自重压力影响

20 世纪 50 年代美国 Gibbs 和 Holtz 的研究结果指出，砂土的自重压力(上覆压力)对标准贯入试验结果有很大影响，同样的击数 N 对不同深度的砂土表现出不同的相对密度。一般认为标准贯入试验的结果应进行深度影响校正。

美国 Peck(1974)得出砂土自重压力对标准贯入试验的影响为

$$N = C_N \cdot N' \quad (4 - 33)$$

$$C_N = 0.771g \frac{1960}{\bar{\sigma}_v} \quad (4 - 34)$$

式中：N——校正为相当于自重压力等于 98kPa(1t/ft²)的标准贯入试验锤击数；

N'——实测标准贯入试验锤击数；

C_N ——自重压力影响校正系数；

$\bar{\sigma}_v$ ——标准贯入试验深度处砂土有效垂直上覆压力，kPa。

(三)地下水的影晌

美国 Terzaghi 和 Peck(1953)认为：对于有效粒径 d_{10} 在 0.1~0.05mm 范围内的饱和粉、细砂，当其密度大于某一临界密度时，贯入阻力将会偏大，相应于此临界密度的锤击数为 15，故在此类砂层中贯入击数 N' 大于 15 时，其有效击数 N 应按下式校正：

$$N = 15 + \frac{1}{2}(N' - 15) \quad (4 - 35)$$

式中：N——校正后的标准贯入击数；
N'——未校正的饱和粉、细砂的标准贯入击数。

四、资料整理与成果应用

(一)绘制 N~H 曲线

绘制标准贯入击数 N 与深度 H 的关系曲线图。

(二)成果应用

1.确定地基承载力

国外关于依据标准贯入击数计算地基承载力的经验公式：

①Peck、Hanson 和 Thornburn(1953)的计算公式：

$$\text{当 } D_w \geq B \text{ 时 } f_k = S_a \left(1.36 \bar{N} - 3 \right) \left(\frac{B + 0.3}{2B} \right)^2 + \gamma_2 D \quad (4-36)$$

$$\text{当 } D < B \text{ 时 } f_k = S_a \left(1.36 \bar{N} - 3 \right) \left(\frac{B + 0.3}{2B} \right)^2 \left(0.5 + \frac{D_w}{2B} \right) + \gamma_2 D \quad (4-37)$$

式中：D_w——地下水离基础底面的距离，m；

f_k——地基土承载力，kPa；

S_a——允许沉降，cm；

\bar{N} ——地基土标准贯入锤击数的

平均值；

B——基础短边宽度，m；

D——基础埋置深度，m；

γ_2 ——基础底面以上土的重度，
kN/m³。

②Peck 和 Tezaghi 的干砂极限承载力公式：

条形、矩形基础 $f_u = r(DN_D + 0.5BN_B)$ (4-38)

方形、圆形基础 $f_u = r(DN_D + 0.4BN_B)$ (4-39)

式中：f_u——极限承载力，kPa；

D——基础埋置深度，m；

B——基础宽度，m；

r——土的重度，kN/m³；

N_D、N_B——承载力系数，取决于砂
的内摩擦角 φ。

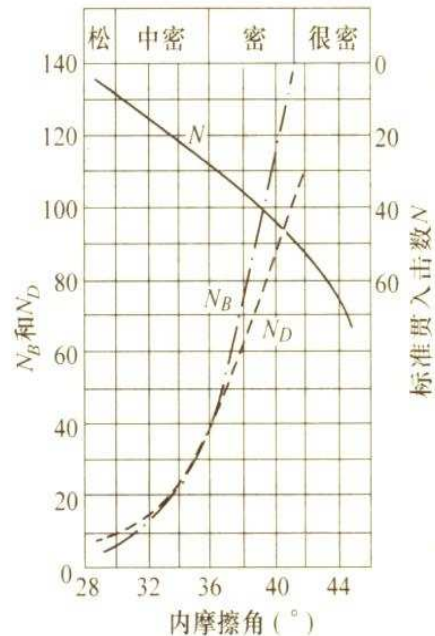


图4-11 内摩擦角、承载力系数、和锤击数N值的关系

图 4 - 11 所示为标准贯入击数 N 与 φ、N_D、N_B 的关系，利用这些关系得出的 N_D、N_B 值，代入上述极限承载力式(4 - 38)和式(4 - 39)，即可求得砂土地基的极限承载力。

2.确定粘性土、砂土的抗剪强度和变形参数

(1)确定抗剪强度。砂土的标准贯入试验锤击数与抗剪强度指标的关系见表 4 - 14、表 4 - 15。

表 4 - 14 国外用 N 值推算砂土的剪切角 φ(°)

研究者	N				
	<4	4~10	10~30	30~50	>50
Peck	<28.2	28.5~30	30~36	36~41	>41
Meyerhof	<30	30~35	35~40	40~45	>45

注：国外用 N 值推算 φ 角，再用 Terzaghi 公式推算砂土的极限承载力

表 4 - 15 粘性土 N 与 C、φ 的关系

N	15	17	19	21	25	29	31
C (kPa)	78	82	87	92	98	103	110
φ(°)	24.3	24.8	25.3	25.7	26.4	27.0	27.3

粘性土标准贯入试验锤击数与抗剪强度指标间的关系见表 4 - 16。

(2)确定土的变形参数 E_0 、 E_s 。原西德 E.Schultze&H.Menzenbach 的经验关系为

$$N > 15, \quad E_s = 4.0 + C(N - 6)$$

$$N < 15, \quad E_s = C(N + 6) \quad (4 - 40)$$

或 $E_s = C_1 + C_2 N \quad (4 - 41)$

式中： E_s ——压缩模量，MPa；

C、 C_1 、 C_2 ——系数，由表 4 - 16、表 4 - 17 确定。

表 4 - 16 不同土类的 C 值

土名	含砂粉土	细砂	中砂	粗砂	含砾砂土	含砂砾土
C (MPa/击)	0.3	0.35	0.45	0.7	1.0	1.2

表 4 - 17 不同土类的 C_1 、 C_2 值

土名	细砂		砂土	粉质砂土	砂质粘土	松砂
	地下水位以上	地下水位以下				
C_1	5.2	7.1	3.9	4.3	3.8	2.4
C_2	0.33	0.49	0.49	1.18	1.05	0.53

3. 评价饱和砂土、粉土的地震液化

《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)规定对饱和土液化的判别用标准贯入试验的方法。具体见第八章内容。

第六节 十字板剪切试验

十字板剪切试验是将插入软土中的十字扳头，以一定的速率旋转，在土层中形成圆柱形的破坏面，测出土的抵抗力矩，从而换算其土的抗剪强度。十字板剪切试验可用于原位测定饱和软粘土($\varphi_b=0$)的不排水抗剪强度和估算软粘土的灵敏度。试验深度一般不超过 30m。

为测定软粘土不排水抗剪强度随深度的变化，十字板剪切试验的布置，对均质土试验点竖向间距可取 1m，对非均质或夹薄层粉细砂的软粘性土，宜先作静力触探，结合土层变化，选择软粘土进行试验。

一、试验仪器和设备

目前我国使用的十字板有机械式和电测式两种。机械十字板每作一次剪切试验要清孔，费工费时，工效较低；电测十字板克服了机械式十字板的缺点，工效高，测试精度较高。

机械式十字板力的传递和计量均依靠机械的能力，需配备钻孔设备，成孔后下放十字板进行试验。

电测式十字板是用传感器将土抗剪破坏时力矩大小转变成电信号，并用仪器量测出来，常用的为轻便式十字板、静力触探两用，不用钻孔设备。试验时直接将十字板头以静力压入土层中，测试完后，再将十字板压入下一层上继续试验，实现连续贯入，可比机械式十字板测试效率提高 5 倍以上。见图 4 - 12。

试验仪器主要由下列四部分组成：

1.测力装置。开口钢环式测力装置。

2.十字板头。国内外多采用矩形十字板头，径高比为 1:2 的标准型。板厚宜为 2~3mm。常用的规格有 50mm×100mm 和 75mm×150mm 两种。前者适用于稍硬粘性土。图 4 - 13 为十字板头。

3.轴杆。一般使用的轴杆直径为 20mm。

4.设备。设备主要有钻机、秒表及百分表等。

二、试验要求及试验要点

(一) 试验的一般要求为：

1.钻孔要求平直，不弯曲，应配用 $\Phi 33\text{mm}$ 和 $\Phi 42\text{mm}$ 专用十字板试验探杆。

2.钻孔要求垂直。

3.钢环最大允许力矩 $80\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

4.钢环半年率定一次或每项工程进行前率定。率定时应逐级加荷和卸荷，测记相应的钢环变形。至少重复 3 次,以 3 次量表读数的平均值(差值不超过 0.005 mm)。

5.十字板板头形状宜为矩形，径高比 1:2，板厚宜为 2~3mm。

6.十字板头插入钻孔底的深度不应小于钻孔或套管直径的 3~5 倍。

7. 十字板插入至试验深度后，至少应静止 2~3min，方可开始试验。

8.扭转剪切速率宜采用(1 度~2 度)/10s，并应在测得峰值强度后继续测记 1min。

9.在峰值强度或稳定值测试完后，顺扭转方向连续转动 6 圈后，测定重塑土的不排水抗剪强度。

10.对开口钢环十字板剪切仪，应修正轴杆与土间的摩擦力的影响。

(二)试验要点

这里主要介绍机械式十字板剪力仪试验要点，电测式十字板剪力仪试验要点可参考以下内容及有关规范。

1.在试验地点，用回转钻机开孔(不宜用击入法)，下套管至预定试验深度以上 3~5 倍套管直径处。

2.用螺旋钻或提土器清孔，在钻孔内虚土不宜超过 15cm。在软土钻进时，应在孔中保持足够水位，以防止软土在孔底涌起。

3.将板头、轴杆、钻杆逐节接好，并用牙钳上紧。然后下入孔内至板头与孔底接触。

4.接上导杆，将底座穿过导杆固定在套管上，将制紧螺栓拧紧。将板头徐徐压至试验深度，管钻不小于 75cm，螺旋钻不小于 50cm，若板头压至试验深度遇到较硬夹层时，应穿过夹层再进行试验。

5.套上传动部件，用转动摇手柄使特制键自由落入键槽，将指针对准任一整数刻，装上百分表并调整到零。

6.试验开始，开动秒表，同时转动手柄，以 10s 一度的转速转动，每转一度测记百分表

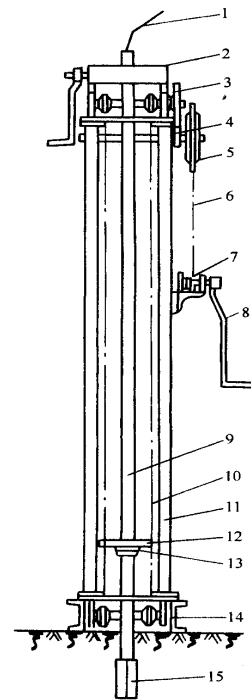


图 4-12 电测式十字板剪切仪的构造

1—电缆 2—施加扭力装置 3—大齿轮
4—小齿轮 5—大链条 6、10—链条
7—小链条 8—摇把 9—探杆 11—支架立杆
12—山形板 13—垫压板 14—槽钢 15—十字板头

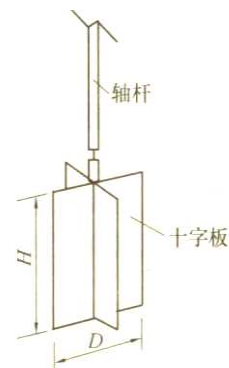


图 4-13 十字板头

读数一次，当测记读数出现峰值或读数稳定后，再继续测记 1min，其峰值或稳定读数即为原状土剪切破坏时百分表最大读数 ε_y ，(0.01mm)。最大读数一般在 3~10min 内出现。

7.逆时针方向转动摇手柄，拔下特制键，导杆装上摇把，顺时针方向转动 6 圈，使板头周围土完全扰动，然后插上特制键，按步骤(6)进行试验，测记重塑土剪切破坏时百分表最大读数 ε_c (0.01mm)。

8.拔下特制键和支爪，上提导杆 2~3cm，使离合齿脱离，再插上支爪和特制键，转动手柄，测记土对轴杆摩擦时百分表稳定读数 ε_g ，(0.01mm)。

9.试验完毕，卸下传动部件和底座，在导杆吊孔内插入吊钩，逐节取出钻杆和板头，清洗板头并检查板头螺丝是否松动，轴杆是否弯曲，若一切正常，便可按上述步骤继续进行试验。

三、资料整理

(一)计算原状土的抗剪强度 C_u

原状土十字板不排水抗剪强度 C_u 值，其计算公式如下：

$$C_u = KC (\varepsilon_y - \varepsilon_g) \quad (4 - 42)$$

式中： C_u ——原状土的不排水抗剪强度 (kPa)；

C ——钢环系数 (kN/0.01mm)；

ε_y ——原状土剪损时量表最大读数 (0.01mm)；

ε_g ——轴杆与土摩擦时量表最大读数 (0.01mm)；

K ——十字板常数 (m^{-2})，可下式计算。

$$K = \frac{2M}{\pi D^2 H \left(1 + \frac{D}{3H}\right)} \quad (4 - 43)$$

(二)计算重塑土的抗剪强度 C'_u

重塑土十字板不排水抗剪强度 C'_u 值，其计算公式为

$$C'_u = KC (\varepsilon_c - \varepsilon_g) \quad (4 - 44)$$

式中： C'_u ——重塑土的不排水抗剪强度 (kPa)；

ε_c ——重塑土剪损时量表最大读数 (0.01mm)。

(三)计算土的灵敏度

土的灵敏度可用下式计算：

$$S_n = \frac{C_u}{C'_u} \quad (4 - 45)$$

(四)绘制抗剪强度与试验深度的关系曲线

图 4 - 14 为抗剪强度随深度的变化曲线，通过此曲线可了解土的抗剪强度随深度的变化规律。

四、成果应用

十字板剪切试验成果可按地区经验，确定地基承载力、单桩承载力、计算边坡稳定，判定软粘性土的固结历史。

(一)计算地基承载力

1.中国建筑科学院、华东电力设计院公式：

$$f_k = 2C_u + \Gamma h \quad (4 - 46)$$

式中： f_k ——地基承载力，kPa；

C_u ——修正后的十字板抗剪强度，kPa；

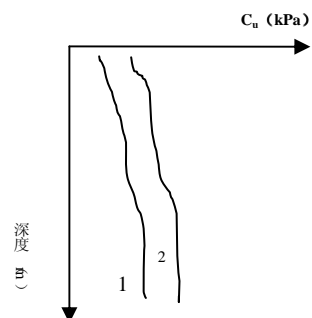


图 4-14 抗剪强度随深度变化曲线
1. 重塑土 2. 原状土

r ——土的重度, kN/m^3 ;

h ——基础埋置深度, m ;

2.Skempton 公式(适用于 $D/B \leq 2.5$):

$$f_u = 5C_u \left(1 + 0.2 \frac{B}{L}\right) \left(1 + 0.2 \frac{D}{B}\right) + p_o \quad (4-47)$$

式中: f_u ——极限承载力, kPa ;

B 、 L ——基础底面宽度、长度, m ;

D ——基础埋置深度, m ;

p_o ——基础底面以上的覆土压力, kPa 。

(二)估算单桩极限承载力

单桩极限承载力计算公式如下:

$$Q_{u\max} = N_o C_u A + U \sum_{i=1}^n C_{ui} L \quad (4-48)$$

式中: $Q_{u\max}$ ——单桩最终极限承载力, kN ;

N_o ——承载力系数, 均质土取 9;

C_u ——桩端上的不排水抗剪强度, kPa ;

C_{ui} ——桩周土的不排水抗剪强度, kPa ;

A ——桩的截面积, m^2 ;

U ——桩的周长, m ;

L ——桩的入土深度, m 。

(三)分析斜坡稳定性

应用十字板剪切试验资料作为设计依据, 按 $\varphi = 0$ 的圆弧滑动法进行斜坡稳定性分析, 一般认为比较符合实际 (图 4-15)。稳定系数可采用下式计算:

$$K = \frac{W_2 d_2 + C_u LR}{W_1 d_1} \quad (4-49)$$

式中: W_1 ——滑体下滑部分土体所受重力, kN/m ;

W_2 ——滑体抗滑部分土体所受重力, kN/m ;

d_1 —— W_1 对于通过滑动圆弧中心铅直线的力臂, m ;

d_2 —— W_2 对于通过滑动圆弧中心铅直线的力臂, m ;

C_u ——十字板抗剪强度, kPa ;

L ——滑动圆弧全长, m ;

R ——滑动圆弧半径, m 。

(四) 检验地基加固改良的效果

对于软土地基预压加固工程, 可用十字板剪切试验探测加固过程中地基强度的变化, 检验地基加固的效果。例如, 天津新港供油站油罐地基采用预压加固后, 用十字板测得的地基土的不排水抗剪强度, 并用 Skempton 公式计算(承压系数采用 6), 经 3 次预压, 承载力由 60kPa 提高到 127kPa 。

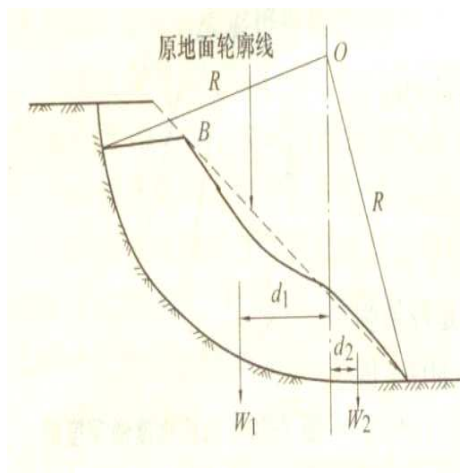


图 4-15 圆弧滑动示意图

第七节 旁压试验

一、旁压试验的原理及优点

旁压试验是通过旁压器在竖直的孔内加压，使旁压膜膨胀，并由旁压膜（或护套）将压力传给周围土体（或软岩），使土体产生变形直至破坏，并通过量测装置测得施加的压力与岩土体径向变形的关系，从而估算地基土的强度、变形等岩土工程参数的一种原位试验方法。旁压试验适用于粘性土、粉土、砂土、碎石土、残积土、极软岩和软岩等。

旁压试验可理想化为圆柱孔穴扩张课题，典型的旁压曲线见图 4-16。旁压曲线可分为三段：AB 段为初始段，反映孔壁扰动土的压缩；BC 段为似弹性阶段，压力与体积变化为直线关系；CD 段为塑性阶段，压力与体积变化成曲线关系，随着压力的增大，体积变化越来越大，最后急剧增大，达破坏极限。AB 与 BC 段的界限压力 p_0 相当于初始水平应力；BC 与 CD 段的界限压力 p_f 相当于临界塑压力。

旁压试验的和静力载荷试验比较起来，其优点是：它可以在不同的深度上进行试验，特别是地下水以下的土层；所求的地基承载力数值与平板载荷试验相近，试验精度高；设备轻便、测试时间短。其缺点是受成孔质量影响较大。

二、旁压试验的仪器设备

旁压试验按将旁压器设置土中的方式可分为预钻式旁压试验、自钻式旁压试验和压入式旁压试验。预钻式旁压试验是在土中预先钻一竖向钻孔，再将旁压器下入孔内试验标高处进行旁压试验。自钻式旁压试验是在旁压器下端组装旋转切削钻头和环形刀具，用静压方式将其压入土中，同时用钻头将进入刀具的土破碎，并用泥浆将碎土冲带到地面。钻到预定试验位置后，由旁压器进行旁压试验。压入式旁压试验又分圆锥压入式和圆筒压入式两种试验方法。圆锥压入式是在旁压器的下端连接一圆锥，利用静力触探压力机，以静压方式将旁压器压到试验深度进行旁压试验。在压入过程中，对周围有挤土影响。圆筒压入式是在旁压器的下端连接一圆筒（下有开口），在钻孔底以静压方式压入土中一定深度进行旁压试验。

旁压仪（预钻式横压仪），它主要由旁压器、控制加压系统和孔径变形量测系统三部分组成，见图 4-17。

1. 旁压器

旁压器为圆筒状可膨胀的探头，按压力作用方式分以下两种类型：

- (1) 受液压作用使橡胶膜膨胀，以“均匀分布的压力”对土体施加径向压力。
- (2) 以两个对开的刚性金属半圆筒，以“等变位”方式对土体施加径向压力。

旁压器有多种尺寸，早期一般尺寸较大 ($D=20\sim 30\text{cm}$, $L=1\sim 2\text{m}$)，以后趋于改用较小尺寸 ($D=5\sim 8\text{cm}$, $L=50\sim 80\text{cm}$)。旁压器分单腔式和三腔式。三腔的内压力相等，上下腔（辅助腔）充压后能对中腔提供有利的边界条件，使中腔（测量腔）接近于平面轴对称的加荷条

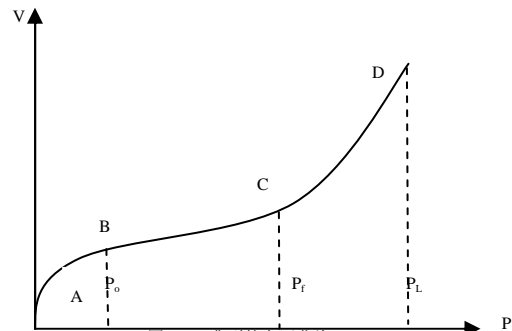


图 4-16 典型的旁压曲线

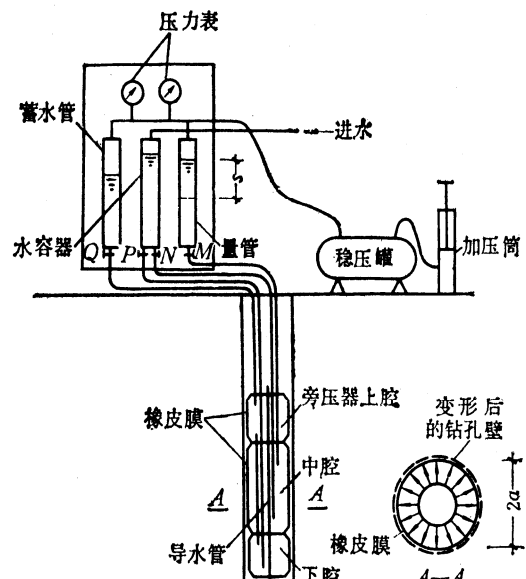


图 4-17 旁压仪构造示意

件。

2.控制加压系统

加压采用液压方式，以高压气瓶或手动气泵作为动力源。由调压阀及压力表控制所加的压力。由于橡胶膜有约束力，在试验前，应先测定约束力与量测腔容积的关系，以便整理资料时修正约束力。

3.孔径变形量测系统

孔径变形量测系统有两种方式：一种是沿轴向装置几组测定径向变形的电测位移计，直接测出径向变形；另一种是由测量注入量测腔的液体(水或油)的量(体积)来计算径向变形。要注意，加压连接管在各级压力下均有变形，整理资料时，应加以修正。当使用高压时，更应注意。

三、旁压试验的技术要求与试验要点

(一)旁压试验的要求

1.旁压试验应在有代表性的位置和深度进行，旁压器的量测腔应在同一土层内。试验点的垂直间距应根据地层条件和工程要求确定，但不宜小于 1m，试验孔与已有钻孔的水平距离不宜小于 1m。

2.预钻式旁压试验应保证成孔质量，钻孔直径与旁压器直径应良好配合，防止孔壁坍塌；自钻式旁压试验的自钻钻头、钻头转速、钻进速率、刀口距离、泥浆压力和流量等应符合有关规定。

3.加荷等级可采用预期临塑压力的 1/5~1/7，初始阶段加荷等级可取小值，必要时，可作卸荷再加荷试验，测定再加荷旁压模量。

4.每级压力应维持 1min 或 2min 后再施加下一级压力。维持 1min 时，加荷后 15、30、60s 测读变形量；维持 2min 时，加荷后 15、30、60、120s 测读变形量。

5.当量测腔的扩张体积相当于量测腔的固有体积时，压力达到仪器的容许最大压力时，应终止试验。

(二)试验要点

1. 试验前，应先平整试验场地，可先钻1~2个钻孔，以了解土层的分布情况。

2. 将水箱贮满蒸馏水或干净的冷开水，在整个试验过程中最好将水箱安全阀一直打开，然后接通管路。

3. 向旁压器和变形测量系统注水。将旁压器竖立立于地面，开始注水。为了顺畅注水，应向水箱稍加压力(0.01~0.02MPa)；同时，摇晃旁压器和拍打尼龙管，排出滞留在旁压器和管道内的空气。待测管和辅管中的水位上升到15cm时，应设法缓慢注水。要求水位达到零刻度或稍高于零位时，关闭注水阀和中腔注水阀，停止注水。

4. 成孔。成孔应符合下列要求：①钻孔直径比旁压器外径大2~6毫米(可根据地层情况和所选用的旁压器而定)，孔壁土体稳定性好的土层，孔径不宜过大；②尽量避免对孔壁土体的扰动，保持孔壁土体的天然含水量；③孔呈规则的圆形，孔壁应垂直光滑；④在取过原状土样和经过标贯试验的孔段以及横跨不同性质土层的孔段，不宜进行旁压试验；⑤最小试验深度、连续试验深度的间隔、离取原状土钻孔或其他原位测试孔的间距，以及试验孔的水平距离等均不宜小于1米；⑥钻孔深度应比预定的试验深度深35厘米(试验深度自旁压器中腔算起)。

5. 调零和放入旁压器。将旁压器垂直举起，使旁压器中点与测管零刻度相水平；打开调零阀，把水位调整到零位后，立即关闭调零阀、测管阀和辅管阀；然后把旁压器放入钻孔预定测试深度处；此时，旁压器中腔不受静水压力，弹性膜处于不膨胀状态。

6. 进行测试。①打开测管和辅管阀。此时，旁压器内产生静水压力，该压力即为第一级压力。稳定后，读出测管水位下降值。②可采用高压打气筒加压和氮气加压两种方式，逐级

加压，并测记各级压力下的测管水位下降值。③加压等级，宜取预估临塑压力的1/5~1/7，以使旁压曲线大体上有10个点左右，方能保证测试资料的真实性。如果不宜估计，可按表4-18确定。另外，在旁压曲线首曲线段和尾曲线段的加压等级应小一些，以便准确测定 p_0 和 p_r 。④变形稳定标准。各级压力观测时间的长短或加压稳定时间的确定是旁压试验的一个重要问题。规范推荐采用一分钟和两分钟，按一定时间顺序测记测管水位下降值。这样，对粘性土来说，基本上相当于不排水快剪。

7. 终止试验。旁压试验所要描述的是土体从加压到破坏的一个过程，试验的 $p\sim s$ 曲线要尽量完整。因此试验能否终止，一般取决于仪器的两个条件，当量测腔的扩张体积相当于量测腔的固有体积时，或压力达到仪器的容许最大压力时，应终止试验。试验终止后，应使旁压器里的水返回水箱和排尽，使弹性膜恢复至原来状态，必须等待2~3分钟后，方可从小到大用力，慢慢上提，并取出旁压器。

8. 试验记录。进行旁压试验，应在现场做好检查记录。其内容包括：工程名称、试验孔号、深度、作用旁压器型号，弹性膜编号及其率定结果、成孔工具、土层描述、地下水位、正式试验时的各级压力及相应的测管水位下降值等。

表 4 - 18 旁压试验加荷等级表

土 的 特 征	加荷等级 (kPa)	
	临塑压力前	临塑压力后
淤泥、淤泥质土、流塑粘性土和粉土、饱和和松散的粉细砂	≤15	≤30
软塑粘性土和粉土、疏松黄土、稍湿很湿粉细砂、稍密中粗砂	15~25	30~50
可塑~硬塑粘性土和粉土、黄土、中密~密实很湿粉细砂、稍密~中密中粗砂	25~50	50~100
坚硬粘性土和粉土、密实中粗砂	50~100	100~200
中密~密实碎石土、软质岩	≥100	≥200

四、旁压试验的资料整理及成果应用

(一)旁压试验的资料整理

旁压试验的试验数据包括压力表读数 p_m 和旁压器的体积变形量（或量管水位的下降值） V_m 。资料整理时，要分别对 p_m 和 V_m 作有关的校正。

1. 压力校正

压力校正可用下式计算：

$$p = (p_m - p_w) - p_i \quad (4 - 50)$$

式中： p ——校正后的压力，kPa；

p_w ——静水压力， $p_w = (H+z)r_w$ ，kPa；

p_i ——弹性膜约束力，kPa，由总压力 $(p_m + p_w)$ 对应的体积查弹性膜约束力校正曲线求得。

2. 体积校正

体积校正可用下式计算

$$V = V_m - a(p_m + p_w) \quad (4 - 51)$$

式中： V ——校正后的体积变形量， cm^3 ；

a ——仪器综合变形校正系数， cm^3/kPa 。

3. 绘制 $p\sim V$ 曲线或 $p\sim\Delta V_{30\sim60}$ 曲线

$p\sim V$ 曲线即旁压曲线，表示压力与体积变形量的关系， $p\sim\Delta V_{30\sim60}$ 曲线即各级压力下 30~60s 的体积变形增量。 $p\sim V$ 、 $\Delta V_{30\sim60}$ 与压力 p 的关系曲线(图 4 - 18)。

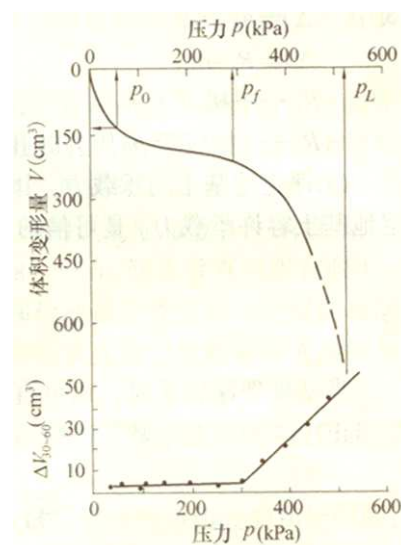


图 4-18 旁压曲线

4. 确定各特征压力(p_0 , p_f , p_L)

(1) 延长 $p \sim V$ 曲线直线段与 V 坐标轴相交得截距 V_0 , $p \sim V$ 曲线上与 V_0 相应的压力即 p_0 。

(2) $p \sim V$ 曲线直线的终点或 $p \sim \Delta V_{30 \sim 60}$ 关系曲线上的拐点对应的压力即 p_f 。

(3) $p \sim V$ 曲线上与 $V=2V_0+V_c$ 对应的压力即 p_L 。或作 $p \sim 1/V$ (压力大于 p_f 的数据) 关系(近似直线), 取 $1/(2V_0+V_c)$ 对应的压力为 p_L 。

5. 计算 E_M 或 G_M

根据压力与体积曲线的直线段斜率, 按下式计算旁压模量 E_M 或旁压剪切模量 G_M :

$$E_m = 2(1+\nu) \left(V_c + \frac{V_0 + V_f}{2} \right) \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (4-52)$$

$$G_M = \left(V_c + \frac{V_0 + V_f}{2} \right) \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (4-53)$$

式中: E_m ——旁压模量, kPa;

G_M ——旁压剪切模量, kPa;

ν ——泊松比;

V_c ——旁压器量测腔初始固有体积, cm^3 ;

V_0 ——与初始压力 p_0 对应的体积, cm^3 ;

V_f ——与临塑压力 p_f 对应的体积, cm^3 ;

$\Delta p/\Delta V$ ——旁压曲线直线段的斜率, kPa/cm^3 。

(二) 旁压试验成果的应用

1. 利用 E_M/p_L^* 可划分土类($p_L^*=p_L - p_0$)。

2. 估算土的强度参数。利用上面的有关公式可估算粘性土的不排水抗剪强度, 分析砂土的剪胀角 ψ 和内摩角 φ' 等强度参数。Menard 研究中心(1970)建议用下式估算砂土的 φ' :

$$\varphi' = 5.77 \ln \left(\frac{p_L^*}{250} \right) + 24 \quad (4-54)$$

式中: $p_L^*=p - p_0$, (kPa)。

3. 估算土的变形参数。铁路工程地基土旁压测试技术规则编制组通过旁压试验与平板载荷试验对比, 得到以下估算变形模量 E_0 (kPa)的经验关系:

$$\text{对黄土} \quad E_0 = 3.723 + 0.00532G_M \quad (4-55a)$$

$$\text{对粘性土} \quad E_0 = 1.836 + 0.00286G_M \quad (4-55b)$$

$$\text{对硬粘土} \quad E_0 = 1.026 + 0.004 \quad (4-55c)$$

通过旁压试验与室内土工试验的对比, 得以下估算压缩模量 E_s (MPa)的经验关系:

$$\text{对黄土埋深} < 3\text{m} \quad E_s = 1.797 + 0.00173G_M \quad (4-56a)$$

$$\text{埋深} > 3\text{m} \quad E_s = 1.485 + 0.00143G_M \quad (4-56b)$$

$$\text{对粘性土} \quad E_s = 2.092 + 0.00252G_M \quad (4-56c)$$

4. 估算土的侧向基床反力系数 K_m (kN/m^3):

$$K_m = \Delta p / \Delta R \quad (4-57)$$

式中: $\Delta p = p_f - p_0$;

$\Delta R = R_f - R_0$;

R_f ——相应于 p_f 压力时孔穴的半径, m;

R_o ——相应于 p_o 压力时孔穴的半径, m。

5. 评定地基土的承载力。国内在这方面做过大量工作, 用旁压试验的 p_f 和 p_L 确定地基土容许承载力 f 是可信的, 而且关系式简单, 即

$$f = p_f - p_o \quad (4 - 58)$$

$$\text{或 } f = \frac{p_L - p_u}{k} \quad (4 - 59)$$

当基础埋深较深时, 也可直接用 p_f 或 p_L/k 作为该深度处的承载力(不必再作深度修正), k 为安全系数, 一般可取 2.0~3.0。

第八节 扁铲侧胀试验

扁铲侧胀试验(简称扁胀试验)是用静力(有时也用锤击动力)把一扁铲形探头贯入土中, 达到试验深度后, 利用气压使扁铲侧面的圆形钢膜向外扩张进行试验, 测量膜片刚好与板面齐平时的压力和移动 1.10mm 时的压力, 然后减少压力, 测的膜片刚好恢复到与板面齐平时的压力。这三个压力, 经过刚度校正和零点校正后, 分别以 p_o 、 p_1 、 p_2 表示。根据试验成果可获得土体的力学参数, 它可以作为一种特殊的旁压试验。它的优点在于简单、快速、重复性好和便宜。故在国外近年发展很快。扁胀试验适用于一般粘性土、粉土、中密以下砂土、黄土等, 不适用于含碎石的土、风化岩等。

一、扁胀试验的基本原理

扁胀试验时膜向外扩张可假设为在无限弹性介质中在圆形面积上施加均布荷载 Δp , 如弹性介质的弹性模量为 E , 泊松比为 μ , 膜中心的外移为 s , 则

$$s = \frac{4 \cdot R \Delta p (1 - \mu^2)}{\pi E} \quad (4 - 60)$$

式中: R 为膜的半径($R=30\text{mm}$)。

如把 $E/(1 - \mu^2)$ 定义为扁胀模量 E_D , s 为 1.10mm, p_1 为扁铲膜中心外移 1.10mm 时所需的初始压力, 则式(4 - 60)变为

$$E_D = 34.7 \Delta p = 34.7 (p_1 - p_o) \quad (4 - 61)$$

而作用在扁胀仪上的原位水平应力为 p_o 。水平有效应力 p'_o 与竖向有效应力 σ_{vo} 之比, 可定义为水平应力指数 K_D :

$$K_D = p'_o / \sigma_{vo} \quad (4 - 62)$$

式中: $p'_o = (p_o - u_o)$, u_o 为土的原始孔隙水压力。

而膜中心外移 1.10mm 所需的压力($p_1 - p_o$)与土的类型有关, 定义扁胀(或土类)指数 I_D 为

$$I_D = (p_1 - p_o) / (p_o - u_o) \quad (4 - 63)$$

可把压力 p_2 当作初始的孔压加上由于膜扩张所产生的超孔压之和, 故可定义扁胀孔压指数 U_D 为

$$U_D = \frac{p_2 - u_o}{p_o - u_o} \quad (4 - 64)$$

可以根据 E_D , K_D , I_D 和 U_D 确定土的一系列岩土技术参数, 并为路基、浅基、深基等岩土工程问题作出评价。

二、扁胀试验设备

扁铲形探头的尺寸为长 230~240mm、宽 94~96mm、厚 14~16mm。铲前缘刃角为 12° ~

16°在扁铲的一侧面为一直径60mm的钢膜(图4-19)。探头可与静力触探的探杆或钻杆连接,对探杆的要求与静力触探相同。

三、扁胀试验要点

1. 试验时,测定三个钢膜位置的压强 A, B, C。压强 A 为当膜片中心刚开始向外扩张,向垂直扁铲周围的土体水平位移 0.05(+0.02, - 0.00)mm 时作用在膜片内侧的气压。压强 B 为膜片中心外移达 1.10±0.03mm 时作用在膜片内侧的气压。压强 C 为在膜片外移 1.10mm 后,缓慢降压,使膜片内侧到刚启动前的原来位置时作用在膜片内的气压。当膜片到达所确定的位置时,会发出一电信号(指示灯发光或蜂鸣器发声),测读相应的气压。一般三个压强读数 A, B, C 可在贯入后 1min 内完成。

2. 由于膜片的刚度,需通过在大气压下定标膜片中心外移 0.05mm 和 1.10mm 所需的压强 ΔA 和 ΔB, 标定应重复多次。取 ΔA, ΔB 的平均值。

则据压强 B 修正为 p_1 (膜中心外移 0.10mm)的计算式为

$$p_1 = B - z_m - \Delta B \quad (4-65)$$

式中: z_m 为压力表的零读数(大气压下)。

把压强 A 修正为 p_0 (膜中心无外移时,既外移 0.00mm)的计算式为

$$p_0 = 0.05(A - z_m - \Delta A) - 0.05(B - z_m - \Delta B) \quad (4-66)$$

把压强 C 修正为 p_2 : (膜中心外移后又收缩到初始外移 0.05mm 的位置)的计算式为

$$p_2 = C - z_m + \Delta A \quad (4-67)$$

3. 当静压扁胀探头入土的推力超过 5t (或用标准贯入锤击方式,每 30cm 的锤击数超过 15 击)时,为避免扁胀探头损坏,建议先钻孔,在孔底下压探头至少 15cm。

4. 试验点在垂直方向的间距可为 0.15~0.30m,一般采用 20m。

5. 试验全部结束,应重新检验 ΔA 和 ΔB 值。

6. 若要估算原位的水平固结系数 C_h 。可进行扁胀消散试验,从卸除推力开始,记录压强 C 随时间 t 的变化、记录时间可按 1, 2, 4, 5, 15, 30, ...min 安排。直至 C 压强的消散超过 50% 为止。

四、扁胀试验的资料整理及成果应用

(一) 试验的资料整理

1. 根据且 A, B, C 压强及 ΔA, ΔB 计算 p_0 , p_1 和 p_2 , 并绘制 p_0 , p_1 , p_2 与深度的变化曲线。

2. 绘制 E_D , I_D , K_D 和 U_D 与深度的变化曲线。

(二) 扁胀试验的应用

1. 划分土类

(1) Marchetti(1980)提出依据扁胀系数 I_D 可划分土类,见表 4-19。

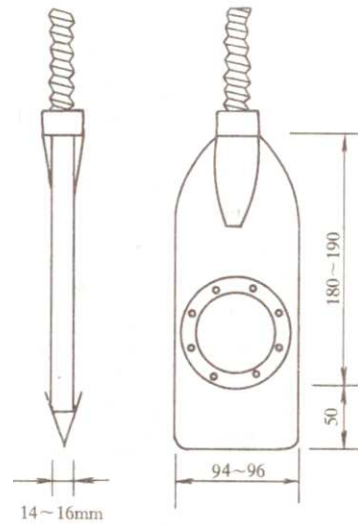


图 4-19 扁铲侧胀仪

表 4-19 据扁胀指数 I_D 划分土类

I_D	0.1	0.35	0.6	0.9	1.2	1.8	3.3
泥炭及灵敏性粘土	粘土	粉质粘土	粘质粉土	粉土	砂质粉土	粉质砂土	砂土

(2) Davidson 和 Boghrat (1983) 提出用扁胀系数和扁胀仪入土 1min 后超孔压的消散百分率 (可由压力的消散试验得到), 可划分土类 (见图 4-20)

2. 计算静止侧压力系数

扁胀探头压入土中, 对周围土体产生挤压, 故不能由扁胀试验直接测定原始初始侧向应力。但经过试验可建立静止侧压力系数与水平应力指数的关系式。

(1) Marchetti(1980)根据意大利粘土的试验经验, 提出

$$K_o = \left(\frac{K_D}{1.5} \right)^{0.47} \quad (0.6 \leq I_D \leq 1.2) \quad (4-68)$$

(2) Lunnc 等 (1990) 补充资料后, 得出对新近沉积粘土:

$$K_o = 0.34 K_D^{0.54} \quad (c_u / \sigma_{ov} \leq 0.5) \quad (4-69)$$

对于老粘土:

$$K_o = 0.68 K_D^{0.54} \quad (c_u / \sigma_{ov} > 0.8) \quad (4-70)$$

3. 确定粘性土的应力历史

Marchetti(1980)建议, 对无胶结的粘性土 ($I_D \leq 1.2$), 可采用 K_D 评定土的超固结比 (OCR)

$$OCR = 0.5 K_D^{1.56} \quad (4-71)$$

4. 土的变形参数

Marchetti(1980)提出压缩模量 E_s 与 E_D 的关系如下:

$$E_s = R_M \cdot E_D \quad (4-72)$$

式中: R_M 为与水平应力指数 K_D 有关的函数。

$$\text{当 } I_D \leq 0.6 \text{ 时} \quad R_M = 0.14 + 2.36 \lg K_D$$

$$\text{当 } I_D \geq 3.0 \text{ 时} \quad R_M = 0.5 + 2 \lg K_D$$

$$\text{当 } 0.6 < I_D < 3.0 \text{ 时} \quad R_M = R_{M0} + (2.5 - R_{M0}) \lg K_D$$

$$R_{M0} = 0.14 + (I_D - 0.6)$$

$$\text{当 } I_D > 10 \text{ 时} \quad R_M = 0.32 + 2.18 \lg K_D$$

$$\text{一般} \quad R_M \geq 0.85$$

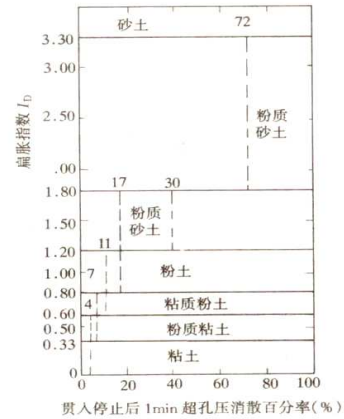


图 4-20 土类划分

第九节 波速测试

土的动弹性参数, 在工程抗震设计和动力基础反应等方面有着广泛的用途, 其测定方法可分为室内试验和现场波速试验两大类, 后者应能保持岩土体的天然结构构造和初始应力状态, 测试成果实际应用价值大, 因而更受到工程勘察单位的重视。

现场波速测试的基本原理, 是利用弹性波在介质中的传播速度与介质的动弹模量、动剪切模量、动泊松比及密度等的理论关系, 从测定的传播速度入手求取土的动弹性参数。在地基土振动问题中弹性波有体波和面波。体波分纵波 (P 波) 和横波 (S 波), 面波分为瑞利波 (R 波) 和勒夫波 (Q 波)。在岩土工程勘察中主要利用的是直达波的横波速度。所以测定波速测定前, 先要钻探成孔。波速测试适用于测定各类岩土体的压缩波、剪切波或瑞利波的波速, 可根据任务要求, 采用单孔法、跨孔法或面波法。

一、波速测试的技术要求

1. 单孔法波速测试的技术要求应符合: ①测试孔应垂直; ②将三分量检波器固定在孔内预定深度处, 并紧贴孔壁; ③可采用地面激振或孔内激振; ④应结合土层布置测点, 测点的垂直间距取 1~3m。层位变化处加密, 并宜自下而上逐点测试。

2. 跨孔法波速测试的技术要求应符合: ①振源孔和测试孔应布置在一条直线上; ②测试

孔的孔距在土层中宜取 2~5m，在岩层中宜取 8~15m，测点垂直间距宜取 1~2m；近地表测点宜布置在 40%孔距的深度处，震源和检波器应置于同一地层的相同标高处；③当测试深度大于 15m 时，应进行激振孔和测试孔倾斜度和倾斜方位的量测，测点间距宜取 1m。

3.面波法波速测试可采用瞬态法或稳态法，宜采用低频检波器，道间距可根据场地条件通过试验确定。

4.波速测试成果分析应包括：①在波形记录上识别压缩波和剪切波的初始时间；②计算由振源到达测点的距离；③根据波的传播时间和距离确定波速；④计算岩土小应变的动弹性模量、动剪切模量和动泊松比。

二、波速试验仪器设备

波速测试试验设备主要有激震器、检波器和放大记录系统三大部分组成。

1.激震器：弹性波激发装置(简称震源)，一般为机械振源。单孔法常采用在地面敲击木板或钢板的方法激发剪切波，板的尺寸一般为 $250 \times 30 \times 6 \text{cm}^2$ ，上压重物(>500kg)，用大铁锤敲击板的侧面。跨孔法可以采用标准贯入器激发剪切波，但更理想的激振器是“井下波锤”。

2.检波器

单孔测试时，要求既能观察到波的竖直分量记录，又能观察到波的两个水平分量记录，所以一般都采用三分量检波器检测弹性波的到达。这种三分量检波器是由三个单个检波器按相互垂直(X、Y、Z)的方向固定并密封在一个无磁性的圆形筒内。在钻孔内一定要将竖向检波器平行于钻孔轴线，它可以接受纵波；另两个水平检波器接受横波。

跨孔法测试时，接收孔中一般只安置一个竖向检波器，它接受水平传播的横波的竖向分量 S_v 波。也可用三分量检波器，此时两个水平检波器还可分别接受纵波(P 波)和横波的水平分量 S_H 波。

3.放大记录系统

主要采用多道地震仪，特别是信号增强型多道地震仪。此种仪器进口和国产的皆有，可以选用。

三、试验要点

(一)单孔法

1.现场布置

在指定测试地点打钻孔，垂直度要求与一般勘探孔一样。离开孔口 1~1.5m 布置激振装置。如要测试孔斜，钻孔内需设置 PVC 套管，管内有 4 个槽口，以备测斜仪沿槽口移动。见图 4-21。

如果被测土层不厚、较硬或泥浆护壁后不会坍塌，测试前可将钻机移走，否则，钻机应留在孔位上备用。如孔内检波器无在孔壁上的固定装置，就需钻机协助。

2.孔内测点布置原则

(1)每一土层都应有测点，每个测点宜设在接近每一土层的顶部或底部处，尤其对于薄层，更不能将测点设在土层的中点。

(2)若土层厚度小于 1m，可以忽略。若土层厚度超过 4m，需增加测点，通常 1~2m 间隔设置一测点。

(3)测点设置需考虑土性特点，如各土层相对均匀，可以考虑等间隔布置；否则，只能不等间隔布置。

3.测试步骤

(1)向孔内放置检波器，在预定深度固定(气压固定，机械固定)在孔壁上。

(2)测点布置。根据最小测试深度 h_1 、测点间隔 dh 和测点个数 n ，可确定各测点的坐标

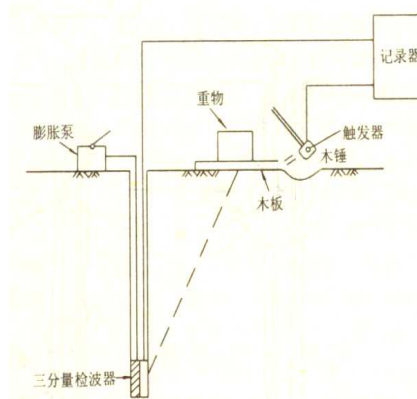


图 4-21 单孔法测试装置示意图

h_i :

$$h_i = h_1 + (i - 1) dh \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4-73)$$

(3)激发。距钻孔口距离为 1~1.5m 处埋设一厚木板，用大锤分别锤击木板的两端，产生正、反向的剪切波。

(4)接收。采用三分量检波器，在钻孔的不同深度 h_i 处分别记录正、反向剪切波的波形，检查记录波形的完整性及可判读性。

(5)将孔内检波器移至下一测点，否则重做，直至正常为止。

(二)跨孔法

1.现场布置

在测试点打 2~3 个垂直的互相平行的钻孔，一个为激发孔，其他为接收孔，如图 4-22 所示。孔距选择与土性有关。对于松软土地区，激发孔与接收孔之间的距离不宜超过 4m，不然接收到的波形较难分析。如果激发能量大一些，孔距可适当放大。钻孔垂直度的保证，是取得真实波速值的基础，因此，对钻孔进行倾斜度的测试是必要的。

2.孔内测点布置原则

(1)一般原则与单孔法相似。

(2)由于激发孔与接收孔相距 4m 左右，而且是水平传播，因此，软、硬土层交界面的影响更为突出。要防止测试中剪切波通过在硬土层中折射，先于软土层中直达剪切波到达检波器结果测到的是折射剪切波速度，而造成硬土层错位。

3.测试步骤

(1)将激发器与接收器同时分别放入两个孔内至预定的测点标高，并予以固定。

(2)调试仪器至正常状态。

(3)驱动锤击激发器，检查接收信号是否正常，如正常即予以储存。由接收到信号算得剪切波在土中的传播时间。

(4)初步验算 v_s 值，检验是否在合理范围之内。如一切正常，继续进行下一点测试。

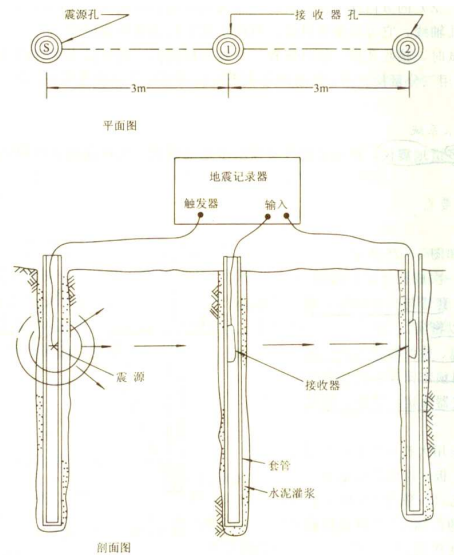


图 4-22 跨孔法测试装置示意图

四、波速测试试验的资料整理及成果应用

(一)测试资料整理

1.波形识别

波形识别的关键是要正确地判定 S 波初至点，根据 S 波速度较 P 波慢，频率低，振幅大的特点，在地震仪记录上可以将波幅成倍增高和周期成倍拉长的位置作为 S 波的初至点。若采用反向激振的话，则可用重叠法找出第一个 S 波起跳的交点作为 S 波的初至点。

2.波速计算

(1)单孔法

因激振板离孔口有一段距离(1~1.5m)，直达波行程是斜距，采用垂距计算波速时应将斜距读时校正为垂距读时。校正公式为：

$$t' = t \frac{h}{\sqrt{x^2 + h^2}} \quad (4-74)$$

式中：t——斜距读时；

t'——垂距读时；

h ——垂直距离；
 x ——激振板至孔口的距离。

经读时校正后，可按式计算横波速度：

$$v_s = \frac{h_2 - h_1}{t'_2 - t'_1} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (4 - 75)$$

式中： h_2 、 h_1 ——分别为土层顶、底面的深度；
 t'_1 、 t'_2 ——分别为横波到达土层顶、底面的时间。

(2)跨孔法

$$v_s = \frac{x}{\Delta t} \quad (4 - 76)$$

式中： x ——经过测斜校正后两接收孔的实际间距；
 Δt ——弹性波到达两接收孔的时间差。

(二)调试成果的应用

(1)计算确定地基土小应变的动弹性参数剪切模量、弹性模量、泊松比和动刚度。一旦测出 P 波和 S 波的波速及土的密度，根据弹性理论公式，土的上述弹性参数就可以确定了。

(2)在地震工程中的应用。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)的规定，由剪切波速度(v_s)划分场地土类别，并进一步划分建筑场地类别。

(3)判别砂土或粉土地震液化。国内外都有判别地震液化的临界剪切波速经验判别式。

第十节 岩体原位测试

岩体原位测试是在现场制备岩体试件模拟工程作用对岩体施加外荷载，进而求取岩体力学参数的试验方法，是岩土工程勘察的重要手段之一。岩体原位测试的最大优点是对岩体扰动小，尽可能的保持了岩体的天然结构和环境状态，使测出的岩体力学参数直观、准确；其缺点是试验设备笨重、操作复杂、工期长、费用高。另外，原位测试的试件与工程岩体相比，其尺寸还是小得多，所测参数也只能代表一定范围内的力学性质。因此，要取得整个工程岩体的力学参数，必须有一定数量试件的试验数据用统计方法求得。这里，我们仅介绍一些常用岩体原位测试方法的基本原理。

一、岩体的变形试验

岩体变形试验测试参数的方法有静力法和动力法两种。静力法的基本原理是：在选定的岩体表面、槽壁或钻孔壁面上施加一定的荷载，并测定其变形；然后绘制出压力~变形曲线，计算岩体的变形参数。据其方法不同，静力法又可分为承压板法、狭缝法、钻孔变形法及水压法等。动力法是用人工方法对岩体发射或激发弹性波，并测定弹性波在岩体中的传播速度，然后通过一定的关系式求岩体的变形参数。据弹性波的激发方式不同，又分为声波法和地震法。

承压板法是通过刚性承压板对半无限空间岩体表面施加压力并量测各级压力下岩体的变形；按弹性理论公式计算岩体变形参数的方法。该方法的优点是简便、直观，能较好的模拟建筑物基础的受力状态和变形特征。

狭缝法又称为刻槽法。一般是在巷道或试验平硐底板或侧壁岩面上进行。其基本原理是：在岩面开一狭缝，将液压枕放入，再用水泥砂浆填实；待砂浆达到一定强度后，对液压枕加压；利用布置在狭缝中垂线上的测点量测岩体的变形，进而利用弹性力学公式计算岩体的变形模量。该方法的优点是设备轻便、安装较简单，对岩体扰动小，能适应于各种方向加压，且适合于各类坚硬完整岩体，是目前工程上经常采取的方法之一。它的缺点是当假定条件与实际岩体有一定出入时，将导致计算结果误差较大，而且随测量位置不同测试结果有所不同。

二、岩体的强度试验

岩体的强度试验所获参数是工程岩体破坏机理分析及稳定性计算不可缺少的，目前主要依据现场岩体力学试验求得。特别是在一些大型工程的详勘阶段，大型岩体力学试验占有非常重要的地位，是主要的勘察手段。原位岩体强度试验主要有直剪试验、单轴和三轴的抗压试验等。由于原位岩体试验考虑了岩体结构及其结构面的影响，因此其试验成果较室内岩块试验更符合实际。

岩体原位直剪试验一般在平硐中进行，如在试坑或在大口径钻孔内进行，则需设置反力装置。其原理是在岩体试件上施加法向压应力和水平剪应力，使岩体试件沿剪切面剪切。直剪试验一般需制备多个试件。在不同的法向应力作用下进行试验。岩体直剪试验又可细分为抗剪断试验、摩擦试验及抗切试验。

岩体原位三轴试验一般是在平硐中进行的，即在平硐中加工试件，并施加三向压力，使其剪切破坏，然后根据摩尔理论求岩体的抗剪强度指标。

三、岩体的应力测试

岩体的应力测试，就是在不改变岩体原始应力条件的情况下，在岩体原始的位置进行应力量测的方法。岩体应力测试适用于无水、完整或较完整的均质岩体，分为表面、孔壁和孔底应力测试。一般是先测出岩体的应变值，再根据应变与应力的关系计算出应力值。测试的方法有应力解除法和应力恢复法。

应力解除法的基本原理是：岩体在应力作用下产生应变，当需测定岩体中某点的应力时，可将该点的单元岩体与其分离，使该点岩体上所受的应力解除，此时由应力作用产生的应变即相应恢复，应用一定的量测元件和仪器测出应力解除后的应变值，即可由应变与应力关系求得应力值。

应力恢复法的基本原理是：在岩面上刻槽，岩体应力被解除，应变也随之恢复；然后在槽中埋入液压枕，对岩体施加压力，使岩体的应力恢复至应力解除前的状态；此时液压枕施加的压力即为应力解除前岩体受到的压力。通过量测应力恢复后的应力和应变值，利用弹性力学公式即可解出测点岩体中的应力状态。

四、岩体现场简易测试

岩体现场简易测试主要有岩体声波测试、岩石点荷载强度试验及岩体回弹锤击试验等几种。其中岩石点荷载强度试验及岩体回弹锤击试验是对岩石进行试验，而岩体声波测试是对岩体进行试验。

岩体声波测试是利用对岩体试件激发不同的应力波，通过测定岩体中各种应力波的传播速度来确定岩体的动力学性质。此项测试有独特的优点：轻便简易、快速经济、测试内容多而且精度易于控制，因此具有广阔的发展前景。

岩石点荷载强度试验是将岩块试件置于点荷载仪的两个球面圆锥压头间，对试件施加集中荷载直至破坏，然后根据破坏荷载求岩石的点荷载强度。此项测试技术的优点是，可以测试岩石试件以及低强度和分化严重岩石的强度。

岩体回弹锤击试验其基本原理是利用岩体受冲击后的反作用，使弹击锤回跳的数值即为回弹值。此值越大，表明岩体弹性越强、越坚硬，反之，说明岩体软弱，强度低。用回弹仪测定岩体的抗压强度具有操作简便及测试迅速的优点，是岩土工程勘察对岩体强度进行无损检测的手段之一。特别是在工程地质测绘中，使用这一方法能较方便的获得岩体抗压强度指标。