

推广孔压静力触探技术的意义^{*}

The significance of piezocone penetration test

孟高头 张德波 刘事莲 张迎春
(中国地质大学工程学院, 武汉, 430074) (广东省航务工程总公司岩土公司, 广州, 510230)

文 摘 单桥静力触探仅能测一个参数, 分辨率低, 只在我国应用, 不利于国际竞争与交流, 建议逐步加以淘汰, 而应大力推广国际通用的孔压静力触探技术。该技术能测多个参数, 在划分土类、求取土层固结系数等方面精度高, 特别适宜在软土地区推广使用。

关键词 单桥静力触探, 双桥静力触探, 孔压静力触探

中图法分类号 P 642. 16 **文献标识码** A **文章编号** 1000- 4548(2000) 03- 0314- 05

作者简介 孟高头, 1944年生, 教授, 1969年毕业于北京地质学院, 现主要从事岩土工程、土体原位测试等方面的科研与教学工作。

Meng Gaotou Zhang Debo Liu Shilian

Zhang Yingchun

(Engineering College, China University of Geosciences, Wuhan, 430074) (Navigation Engineering Ltd. of Guangdong province in China, Guangzhou, 510230)

Abstract Single bridge cone penetration test should be gradually eliminated because it measures only one parameter with low accuracy, and only used in China, unsuitable for international competition and interchange; while piezocone penetration test (CPTU) can measure many useful parameters with high accuracy in determining soil types, consolidation coefficient, etc. It is also widely used in the world. So it should be energetically spreaded in China, especially in soft soil area.

Key words single bridge cone penetration test, double bridge cone penetration test, piezocone penetration test(CPTU)

1 引 言

静力触探作为一种轻便、快速、效率高的原位测试技术, 在土体工程勘察和岩土工程监测、检测方面得到了广泛应用。我国早在1964年就研制了电测式单桥静力触探, 并很快得到推广和普及。在长期的理论研究和工程实践过程中, 人们将比贯入阻力 p_s 和众多的土的工程性质参数建立起了相关的经验关系。但是必须指出, 单桥静力触探与现有的双桥和孔压两种静力触探相比, 不仅功能单一, 分辨率不高, 而且和国际不接轨, 不利于开展国际工程合作与交流, 特别是在我国加入WTO后, 竞争与合作同时存在, 这些现状促使我们认识到向国际标准靠拢的必要性和紧迫性, 因此我们建议逐步淘汰单桥静力触探, 大力推广孔压静力触探新技术。

2 我国静力触探技术的应用现状

目前, 我国工程勘察界应用静力触探的现状可用下列三句话来表述: 单桥静力触探占统治地位; 双桥静力触探应用已经开始, 但发展缓慢; 孔压静力触探只有少数单位在应用。造成这种现状的主要原因可以从以下几方面来说明: ①应用历史和经验。单桥静力触探应用历史长, 相关经验式多, 相关规范早已将其列入其

中, 而双桥和孔压静力触探在我国应用历史短, 相关经验式少, 90年代才被相关规范承认。②勘察市场现有状况的制约。就勘察精度与功能来说, 孔压静力触探优于双桥静力触探, 双桥静力触探优于单桥静力触探。但是, 精度和功能与勘察费用基本上是成正比的。单桥静力触探费用低, 也最简单, 孔压静力触探最复杂, 费用最高。但按其价格效益比来说, 孔压静力触探费用却是很低的。目前国内工程勘察市场饱和, 个体户大量存在, 勘察费用被一压再压, 勘察效益下滑, 勘察质量严重滑坡。在这种情况下, 很难促使人们采用新技术来提高勘察质量。③探头制造技术方面的原因。80年代国内少数单位曾引进国外孔压静力触探技术和设备, 并进行了仿制。目前, 我国已有一些单位仿制成功, 有的已开始商品化生产孔压探头, 但质量有待提高。我国的单桥探头制造技术已经过关, 探头质量有保证, 价格便宜。由于以上三种原因, 使孔压静力触探技术在国内的推广进展缓慢, 和发达国家差距拉得很大。这种情况亟待改变。

3 三种静力触探技术在测试功能和精度上的比较

单桥静力触探为中国独有, 它只能得到一个参数, 即比贯入阻力 p_s 。双桥静力触探可得到两个测试参

^{*} 广东省科委资助项目(粤交科函(1998)40号)
到稿日期: 1999- 09- 12

数, 即锥尖阻力 q_c 和侧壁摩阻力 f_s , 还可以得到一个计算参数, 即摩阻比 F_R ($F_R = f_s / q_c \times 100\%$)。孔压静力触探可以得到三个测试参数, 即比双桥静力触探多测一个土层参数(孔隙水压力 u , 以下简称孔压)。以上的每个测试参数, 都有各自的功能: 一般来讲, 所测参数越多, 功能越多, 分辨率越高。静力触探有两项测试功能: 一是根据静力触探测试数据及曲线划分土层、判别土类; 二是求取土的工程性质参数。因此三种静力触探技术可以从以下两个方面进行比较。

3.1 在划分土层 判别土类方面的比较

目前, 三种探头所测土层或土类参数均可用来划分土层、判别土类, 但各自的分辨率有很大差别。

(1) 单桥探头法

由于单桥探头只能测 p_s , 也就只能根据 p_s-h 的曲线形态变化和 p_s 值的大小进行土的分层分类。而往往同是一类土, 由于其形成时代、成因、受荷历时不同, 其 p_s 值可以差别很大。同时, 不同土层可有相同的 p_s 值, 如老粘土和砂层。这样, 在只有一个参数的情况下, 其划分土层土类的分辨率毫无疑问是比较低的。到目前为止, 还没有一种只按 p_s 值来划分土类的分类图。在实际工作中, 往往只能凭借和钻孔取样对比获得的经验来划分土层。

(2) 双桥探头法

前已述及, 双桥探头可测出 q_c 和 f_s , 又可计算出摩阻比 F_R , 由此可划分土类。曲线有两条(q_c-h, f_s-h), 可进行对比分析, 分辨率自然就高得多。而且 F_R 值也是划分土类极好的参数, 一般砂类土 $F_R \leq 1\%$, 而粘性土常大于 2% 。目前已有多种按 q_c, F_R 和 f_s 判

别土类的分类图, 利用这些土的分类图可以较方便地划分土层和判别土类。

(3) 孔压探头法

孔压探头除能测出锥尖阻力 q_t (与双桥探头所测的 q_c 稍有区别, 见下文) 和侧壁摩阻力 f_s , 还有孔压 u , 因而划分土层土类的分辨率又比双桥静力触探有很大提高。特别是在区分砂层和粘性土层时, 分辨率极高。其主要原因是孔压探头所测的超孔隙水压力值 Δu (以下简称超孔压, $\Delta u = u - u_w$, u_w 为静水压力) 的大小直接和土的渗透性密切相关。譬如在粘土层中触探时所生成的超孔压很大, 而在孔压探头从粘性土层进入砂层中时, 超孔压 Δu 急骤下降, 往往为负超孔压。这是因为孔压触探贯入时, 在粘性土中产生的超孔压值很高而消散得很慢, 但在砂层中消散极快。在密实砂土中, 由于剪胀作用, 还会使超孔压为负值。根据此种现象, 很容易将粘性土与砂土区分开来。实践证明, 在确定粘性土与砂土层的分界面时, 孔压静力触探比费用高得多的钻探取样还要准确。这是因为土芯采取率很难做到 100% , 特别是在软土和砂层取样更难做得到。同时, 钻孔编录也很难做到准确无误。这一特性也是其它静力触探方法所无法比拟的。另外, 采取孔压参数比来划分土类也是一种极好的方法。孔压参数比有多种

表达形式, 如 $\frac{u_{\max}}{u_0}$ 、 $\frac{u_{\max} - u_0}{q_t - \sigma_{v0}}$ 等, 其中后者常用 B_q 表示。目前, 已有多种用孔压静力触探参数划分土类的图表, 使用方便, 分辨率也高^[1]。

笔者在京珠高速公路广珠段横沥试验段应用了以上三种静力触探技术, 图1为某断面的三种静力触探技术划分土层的对比图及钻孔柱状图。

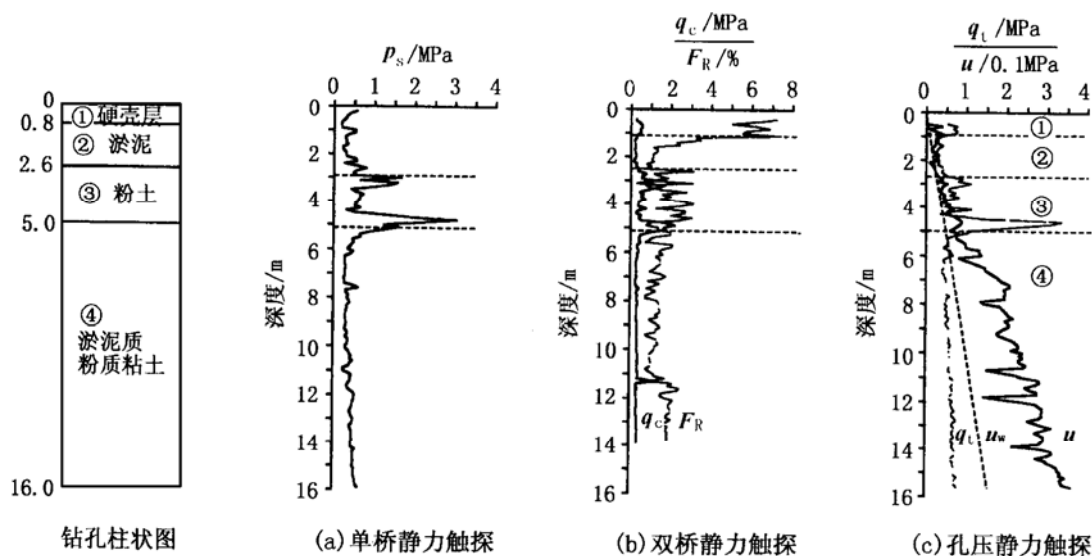


图1 三种静力触探技术划分土层对比图

Fig. 1 Contrast profiles determined by three kinds of CPT

从图 1 中可以看出, 三种静力触探曲线根据其形状和数值大小可以分为几段, 其中以孔压静力触探曲线(图 1(c))最为清楚。将孔压静力触探 q_t-h 和 $u-h$ 曲线配合看, 可以清楚地将土层划分为 4 层: ①0~1.0 m 的硬壳层; ②1.0~2.5 m 的淤泥层; ③2.5~5.0 m 的粉土层; ④5.0 m 以下的粘性土层。虽然第 ②层和第 ④层的锥尖阻力 q_t 都很低, 但其超孔压 Δu 却相差很多, 说明这两层土的性质相差较大, 钻探取样表明, 第 ②层为流塑状的淤泥层, 第 ④层为可塑状的淤泥质粉质粘土层。而单桥(图 1(a))和双桥静力触探曲线(图 1(b))是分不出第 ②层和第 ④层的区别的。第 ③层的锥尖阻力较大且呈锯齿状, 是否砂层呢? 单桥静力触探曲线说明不了这个问题, 而孔压静力触探曲线则明显地显示出此层的超孔压很小, 该层有可能是砂层或粉土层, 钻探取样也证实了这一点。图 1 左为钻孔柱状图, 它和由孔压静力触探曲线划分的土层相一致。

从孔压静力触探曲线图上还可以看出, 孔压曲线($u-h$)变化明显, 经钻探证实, 凡是孔压急剧减小的地方, 也是含砂量大的薄夹层的地方。如不仔细进行钻孔地质编录, 是很易将这些薄夹层漏掉的。在珠江三角洲地区, 软土层广泛存在, 土芯采取率很难达到 100%, 地质编录时, 漏层也是经常发生的。而孔压静力触探则会忠实地、准确地记录下地基土层的详细情况, 再加上可从触探参数求出土的工程性质指标, 这更是钻探本身所无法比拟的。由于单桥和双桥静力触探测不出触探时所产生的超孔压, 所以其在划分土层及求取土的工程性质指标方面大大受到限制。

3.2 在求取土的工程性质指标方面的比较

在求取土的工程性质指标方面, 单桥和双桥静力触探所能做得到的, 孔压静力触探都可以做到, 如求地基承载力、压缩模量、软土不排水抗剪强度等, 此外, 孔压静力触探还可以求取土层的固结系数和渗透系数, 这是其它静力触探方法做不到的。土层固结系数, 是估算沉降与时间关系的重要参数, 是软土地基处理方案设计与计算中不可缺少的土的工程性质参数指标。由于难以取得高质量的非扰动软土样以及受其它许多因素的影响, 用室内试验测固结系数, 难以取得满意成果。而孔压静力触探法则可很好解决这一问题, 为快速准确有效地在原位测定土层的固结系数提供了一条切实可行的方法。具体求固结系数要做超孔压消散试验。即孔压探头到某一深度后停止贯入, 立即记录孔压值 u 随时间的变化。然后, 求出超孔压消散一半所需的时间 t_{50} 。按下式求水平向固结系数^[1]:

$$C_h = \frac{T_{50} r_0^2}{t_{50}} \quad (1)$$

式中 C_h 为土层水平方向的固结系数, cm^2/s ; T_{50} 为时间因数, 其值查表 1^[2]; r_0 为透水滤器半径, 当透水滤器位于锥底时即为锥头底面半径, cm ; t_{50} 为超孔压达到 50% 的消散度所需时间(s), 可以从实测归一化超孔压消散曲线中获得, 如图 2 所示。

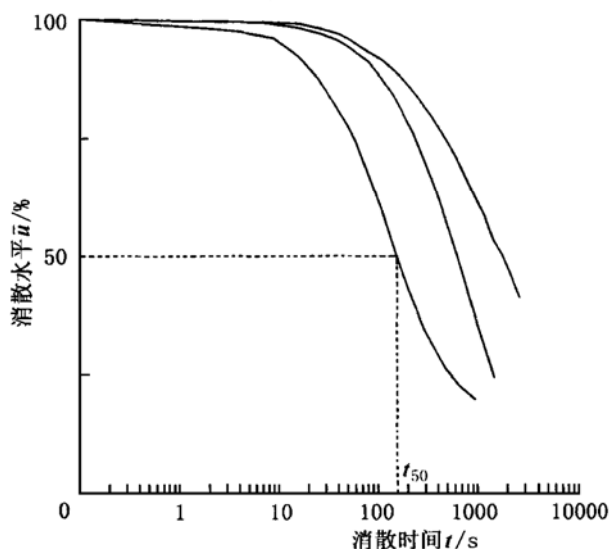


图 2 归一化超孔压消散曲线

Fig. 2 Dissipation curve of excess pore water pressure

表 1 T_{50} 的确定

Table 1 Determination of T_{50}

A_f	T_{50}			
	$I_r = 10$	$I_r = 50$	$I_r = 100$	$I_r = 200$
$\frac{1}{3}$	1.145	2.487	3.524	5.025
$\frac{2}{3}$	1.593	3.346	4.761	6.838
1	2.095	4.504	6.447	9.292
$\frac{4}{3}$	2.622	5.931	8.629	12.79

注: A_f 、 I_r 分别为 Skempton 孔压系数、刚性指数, 确定方法参阅文献[2]。

根据土的固结系数还可估算出土的渗透系数 K_h (Baligh 和 Levadoux, 1980)^[1]:

$$K_h = \frac{\gamma_w \cdot RR \cdot C_h}{2.3 \sigma'_{v0}} \quad (2)$$

式中 γ_w 为水的重力密度, kN/m^3 ; σ'_{v0} 为有效上覆压力, kPa ; RR 为土的再压缩系数。

另外也可利用所测的孔压值大致估计软粘土的不排水抗剪强度, 经统计、回归分析得到如下经验公式:

$$c_u = 0.0401(q_t - \Delta u) + 2.52 \quad (\text{kPa}) \quad (3)$$

其中, 统计数 $n = 114$, 相关系数 $r = 0.758$, $160.5 \leq q_t \leq 771.5 \text{ kPa}$, $q_t = q_c + u(1 - \alpha)$, α 为净面积比值, 等于 $0.840^{[3]}$ 。

式(3) 适用于珠江三角洲地区的软粘性土。式中 c_u 是在珠江三角洲地区测试的十字板不排水抗剪强度。

4 三种静力触探技术在设备动力需求方面的比较

三种静力触探技术所需设备主要是由 3 部分构成: ①静力触探探头; ②量测记录仪表; ③贯入系统。不同之处仅在于探头类型及电缆线等配套设备。它们的贯入系统完全一样, 所用动力也相同, 可见在设备无多大改变的情况下, 孔压、双桥比单桥能测出更多参数, 功能更多。随着计算机技术在这一领域的普及应用, 孔压静力触探在数据采集、数据处理、图形分析等方面均已实现自动化、系统化, 从而变得简便、快速且实用。

5 孔压静力触探技术在珠江三角洲的应用研究

笔者依托两大工程, 即京珠高速公路广珠段与广东西部沿海高速公路, 对孔压静力触探试验进行了长达两年的实测与室内研究。在试验中, 我们采用浙江南光地质仪器厂生产的两用孔压探头(可测 q_t, u), 该型探头锥角为 60° , 锥底面积为 10 cm^2 , 透水滤器位于探头圆柱面紧靠锥底处。以下就是本次研究的几点成果。

(1) 用孔压静力触探快速划分地基土层是可行的, 其分辨率较高, 它尤其适用于地下水水位埋藏浅的土

层, 如珠江三角洲地区的土层。建议大量采用此方法来划分土层、判别土类, 使之在全国加以推广应用。

(2) 与钻探、取样、室内试验相比, 用孔压静力触探划分土层剖面具有省时间、省经费、分辨率更高(划分更细)的优点。即孔压静力触探试验可快速、可靠地测定土的柱状图, 并可准确地测出土层中的薄砂夹层。

(3) 本次采用孔压静力触探试验得到了珠江三角洲地区的土的分类图, 见图 3。建议将此图进一步应用于今后软土地基的勘探中。通过原位取土孔、十字板试验孔划分土层的成果图和孔压静力触探试验所得土的柱状图的对比, 证明应用该图划分土层是可靠的。随着测试资料的积累和研究的深入, 用孔压静力触探进行工程勘察和监测必将更精确, 应用更广泛。

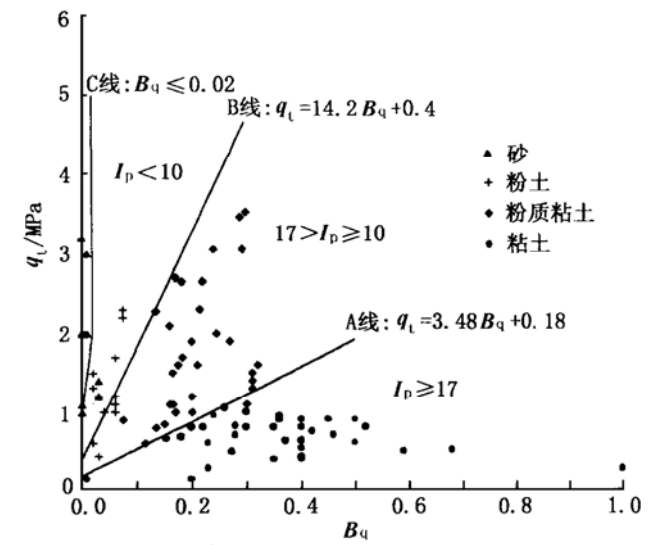


图 3 土的分类图(孔压静探法)

Fig. 3 Soil classification chart(CPTU method)

(4) 估算土层固结系数的公式采用式 $C_h = T_{50} r_0^2 / t_{50}$ 。表 2 表示在京珠高速公路广珠段和广东西

表 2 三种方法估算土层固结系数的结果对比

Fig.2 Comparison of soil consolidation coefficient obtained by three ways

测定方法	广珠段							台山段	
	K23+ 850	K28+ 765	K28+ 940	K28+ 995	K29+ 040	K35+ 305	K41+ 105	K22+ 190	K22+ 240
①	11.6	8.81	16.4	10.1	15.8	18.4	10.2	8.4	12.5
②	3.7	1.28	—	2.99	—	2.65	2.28	0.49	0.49
③	5.1	12.4	11.7	10.3	11.0	7.5	8.3	5.6	8.0
①/ ②	3.1	6.9	—	3.3	—	6.9	4.5	17.1	25
①/ ③	2.3	0.7	1.4	0.98	1.4	2.5	1.2	1.5	1.6

注: 1. ①、②、③分别代表孔压静力触探超孔压消散试验、室内试验和实测沉降资料反算法;
2. 室内试验采用竖向固结系数, 实测沉降资料反算法采用水平向固结系数;
3. ①/ ②、①/ ③均表示固结系数之比。

部沿海高速公路台山段,分别用超孔压消散试验、室内试验和实测沉降资料反算法三种方法求取的土层固结系数。

从表2中可知:

a) 由孔压静力触探超孔压消散试验估算的固结系数 C_h 值比室内试验的 C_v 值约大1~2个数量级。

b) 由孔压静力触探超孔压消散试验估算的土层固结系数与实测沉降资料反算值较为接近,二者在同一个数量级上。建议在工程中对孔压静力触探超孔压消散试验估算的土层固结系数 C_h 乘以一个小于1的经验系数予以修正,具体值依各地区而定;珠江三角洲软土地区的经验系数建议采用0.85。

6 孔压静力触探技术的社会效益和经济效益

孔压静力触探具有轻便、快速、功能多、分辨率高等许多优点,有很高的经济效益和社会效益,如普及应用,可节省大量的工程勘察和监测费用。特别是象珠江三角洲软土分布范围这样广的地区,孔压静力触探更加有用武之地,社会效益和经济效益更加明显。

(1) 费用较低。与常规钻探及室内试验相比,孔压静力触探所需费用低得多,约为前者50%或更少。

(2) 功能全面,可靠性好。孔压静力触探能准确地划分土层,确定土的强度、土层固结系数等软基处理设计及施工所需的参数。由于采用原位测试方法,消除了采取、运输对土样的扰动、试验时试验操作人员的经验等人为因素的影响,试验结果的可靠性和可比性较高。

(3) 设备轻便,使用方便,操作简单。在道路通畅、交通发达的地区,可用静力触探车进行测试,所有设备

人员均可装载在客车式触探车上。在河网密布的低地、水田上,可用轻便式孔压静力触探设备,设备总重在100 kg左右,又可以分解为重几千克至几十千克的几部分,三、四个人就可以完成搬迁及测试工作。

(4) 勘探周期短。从钻探取样、室内试验到结果的获取,最快需要10 d左右的时间,而孔压静力触探可以进行实时控制,即边采集,边处理数据,从而当场(或当天)计算出测试参数。孔压静力触探的推广不但缩短了勘探周期,还为一些急难问题的解决奠定了基础,如工程抢险。

(5) 设备不昂贵,易于推广。孔压静力触探设备,特别是轻便孔压静力触探设备市值仅三、四万元,多数勘探及施工单位均有能力自行购置。

7 结语及建议

综上所述,单桥静力触探只能测一个参数,应用分辨率低,国际不通用,且所需贯入压力和其它静力触探相同,即不省力,故建议逐步加以淘汰,而应换用双桥和孔压静力触探,在地下水位浅的土层覆盖地区,更应推广国际上普遍应用的孔压静力触探技术,即优先采用,并建议在相应规范中写明,以大幅度提高静力触探在我国的应用水平和扩大应用范围,提高工程勘察与监测的精度,尽快赶超世界先进水平。

参考文献

- 1 孟高头. 土体原位测试机理、方法及其工程应用. 北京:地质出版社,1997
- 2 唐贤强,谢 瑛,谢树彬等. 地基工程原位测试技术. 北京:中国铁道出版社,1993
- 3 张诚厚,施 健,戴济群. 孔压静力触探试验的应用. 岩土工程学报,1997,19(1): 50~ 57

量、单位及名词术语字母小写体规则

1. 一般计量单位符号;
2. 等于、小于 10^3 的SI词头符号;
3. 外国人姓名中的附加词;
4. 附在中译名后的普通名词原文(德文除外);
5. 由3个(含3个)字母组成的前置词、连词、冠词等。