

短文

# 论我国静力触探技术(CPT) 现状与发展

On the state-of-art and development of CPT in China

刘松玉, 吴燕开

(东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

关键词: 静力触探; 传感器; 原位测试; 孔压静力触探; 可视静力触探

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0553-04

作者简介: 刘松玉(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事地基处理、环境岩土工程等方面研究。

## 1 静力触探技术的发展历史\*

1932 年荷兰工程师 P. Barentsen 进行了世界上第一个静力触探试验, 1935 年荷兰 Delft 土力学实验室第一任主任 T. K. Huizinga 设计并使用了 10 t 的荷兰锥贯入装置, 并开始用于桩承载力试验研究。1948 年, Vermeiden 和 Plantema 改进了荷兰锥, 即在探头上方增加了锥形保护部分, 以阻止土从套管与钢杆之间进入。1953 年, Begemann 设计出可测侧阻力的摩擦套, 并申请了专利。上述这些机械式的静力触探仪由于其简单和方便, 现在仍在一些国家中使用。

1948 年, 荷兰市政工程师 Bakker 研制出世界上第一个电测式探头(Rotterdam cone), 并申请了专利。从 1949 年起, 荷兰 Delft 土力学实验室开始应用电测探头, 并作了大量试验研究, 1957 年他们研制出第一台能测侧阻力的电测式探头, 1965 年荷兰 Fugro 与 TNO 联合推出了一种电测式探头, 其规格也是后来 ISSMFE 标准和许多国家标准的基础。此后世界上不少国家研制出大量不同的电测式触探仪。从 70 年代后期开始, 出现了孔压静力触探(CPTU)、环境静力触探及其它多功能探头等, 静力触探技术得到了广泛应用和进一步的发展。

我国在 30 年代也出现机械式的荷兰静力触探仪。1954 年, 陈宗基教授自荷兰引进该项技术, 并在黄土地区进行了试验研究<sup>[1]</sup>。1964 年, 王钟琦等独立成功地研制出我国第一台电测式触探仪<sup>[2]</sup>。但在 80 年代以后对探头传感器技术改进很少。现主要使用的仍然是“单桥”探头和“双桥”探头, 而且, 探头规格与国际通用也不尽相同, 这给测试成果比较和国际学术交流造成了较大的困难。另外在 CPT 理论研究、CPTU、环境 CPT 等技术方面与先进国家存在明显差距。

## 2 我国与国际 CPT 技术指标及其应用

### 2.1 技术指标

由于上世纪 60 年代初到 70 年代末, 我国与国际

交流较少, 因此在静力触探技术的发展上, 形成了与国际不同的技术标准(见表 1)。

### 2.2 成果应用及其可靠性

对于工程应用来说, 需要确定土的工程性质主要可归结为四个方面: ①土的初始状态; ②变形特性; ③强度特性(抗剪强度); ④渗流与固结。表 2 是国际 CPT 成果应用及其可靠性一览表。表 3 是我国 CPT 成果应用情况表。

通过上述对比不难发现, 我国 CPT 技术的应用与国外有较大差距: ①国际 CPT 测试成果在确定土工程性质的四个方面均有应用, 且成果一致性和可靠性稳定。②指标方面, 我国主要用  $q_c$ 、 $f_s$ 、 $p_u$ , 而国外则已普遍采用  $B_q$ 、 $R_f$ , 即 CPTU 技术已经广泛使用。③国际 CPT 的应用建立在较完善的理论基础之上, 已达到较理性的程度。④国外的 CPT 技术已大量应用在环境岩土工程领域, 而我国在这一方面还是一片空白。

造成国内外差距原因除文献[8]所提到的三点之外还有以下几点: ①《岩土工程勘察规范》没有对 CPT 标准做出严格的规定; ②理论应用研究人员及资金投入相对较少; ③国外 CPTU 的大量应用积累了经验, 而我国的经验相对较少。

## 3 孔压静力触探(CPTU) 及其应用

最早的电测式孔压静力触探由挪威土工研究所(NGI)的 Janbu 和 Senneset(1974) 研制成功的。与此同时, 瑞典的 Torstensson(1975) 和美国的 Wissa 等(1975) 也研制出了能测孔压的 CPT。1980 年以后, 出现了不少同时测孔压和侧阻力的研究成果, 并在工程实践中应用。1989 年, ISSMFE 推荐采用透水石位于锥尖后的孔压  $u_2$ , 此后, CPTU 关于孔压测试位置主要以此为准。

据 CPTU 的测试结果, 在岩土工程领域已得到广

表 1 我国与国际 CPT 技术规格比较表

Table 1 The dimensional comparison of Chinese CPT with international typical CPT

机构名称	规格				
	锥角 /(°)	锥底截面积 /cm <sup>2</sup>	锥底直径 /mm	摩擦筒(侧壁) 长度/mm	摩擦筒(侧壁) 面积/cm <sup>2</sup>
ISSMFE( IRTF, 1989)	60	10	34.8~ 36.0	133.7	150
瑞典岩土工程协会推荐标准(SGF1993)	60	10	35.4~ 36.0	133.7	150
挪威岩土工程协会(NGF, 1994)	60	10	34.8~ 36.0	133.7	150
ASTM( 1995)	60	10	35.7~ 36.0	133.7	150
荷兰标准( 1996)	60	10	35.7~ 36.0	未规定, 按实际面积	
法国标准(NFP94- 113, 1989)	60	10	34.8~ 36.0	133.7	150
日本岩土工程协会( 1994)	60	10	35.7	未规定	
中国	单桥	10	35.7	57	64
		15	43.7	70	96
		20	50.4	81	128
	双桥	10	35.7	178.3	200
		15	43.7	218.5	300
		20	50.4	189.5	300

表 2 国外 CPT 应用及可靠性<sup>[3,4]</sup>

Table 2 The applications and reliabilities of CPT in western countries

类别	内 容		所用指标及公式(方法)	公式来源	可靠性	
分类	分层土		$f_s, q_c, R_f, u$		I ~ II	
	土质分类		$B_q, q_t$	Senneset & Janbu( 1984)	II ~ III	
			$B_q, Q_t, R_f$	Robertson & ampanella( 1986)		
岩土工程性质指标	状态	$\gamma$ (容重)	$q_t, B_q$ 查表法	Larsson & Mulabdic( 1991)	III- IV	
		$K_0$ (静止土压力系数)	$K_0 = 0.1( q_t - \sigma_0)/ \sigma_0'$	Kulhawy & Mayne( 1990)	IV~ V	
		OCR	OCR= 0.66+ 1.43(PPD)	Sully et al( 1988)	II ~ III	
			OCR= $2[( q_t - u_2)/( \sigma_0'( 1.95M + 1) )^{1.33}]$	Mayne( 1991)		
		$S_t$ (灵敏度)	$S_t = N_s/R_f$	Schmertmann( 1978)	II~ III	
	粘性土	强度	$q_c = N_e \cdot S_u + \sigma_0$	理论公式	I ~ II	
			$S_u$ (不排水强度)	$S_u = q_c/N_{ke} = ( q_t - u_2)/N_{ke}$		Campanella( 1982)
				$S_u = \Delta u/N_{\Delta u}( \Delta u = u_2 - u_1)$		Campanella( 1985)
		$\phi$ (有效内摩擦角)	$\phi = \arctan[ 0.1 + 0.38\log( q_c/ \sigma_0') ]$	Robertson&Campanella( 1983)		
	变形	$E_s$ (压缩模量)	$E_s = \alpha_n \cdot q_c$	Sanglerat( 1976)	IV~ V	
			$E_s = 8.25( q_t - \sigma_0)$	Kulhawy & Mayne( 1990)		
		$G_0$ (前切模量)	$G_0 = 99.5( p_a)^{0.305}( q_t)^{0.695}/( e_0)^{1.130}$	Mayne & Rix( 1993)		
	渗透性	$k_h$ (水平渗透系数)	$k_h = \gamma_w \cdot RR \cdot c_h/( 2.3 \cdot \sigma_0')$	Baligh & Levadoux( 1980)	III- IV	
		$c_h$ (水平固结系数)	$c_h = ( m/D_u)^2( I_r)^{1/2} \cdot d^2$	Teh( 1987)	II~ III	
	砂土	状态	$D_r$ (相对密度)	$D_r = \ln( q_c/( C_0( \sigma')^{C_1} ) )/ C_2$	Baldi et al. ( 1986)	II~ III
				$D_r^2 = q_{ci}/( 305Q_e \cdot Q_{OCR} \cdot Q_A)$	Kulhawy & Mayne( 1990)	
		$K_0$ (静止土压力系数)	$K_{0(oc)}/K_{0(nc)} = OCR^{m1}$	Lunna&Christophersen( 1983)	IV~ V	
		强度	$\phi$ (有效内摩擦角)	$\phi = 17.6 + 11\log[ q_c/( \sigma_0')^{0.5} ]$	Kulhawy & Mayne( 1990)	II
		变形	$E_s$ (压缩模量)	$E_s = 4q_c, q_c < 10 \text{ MPa}$ $E_s = 2q_c + 20 \text{ (MPa)}, 10 < q_c < 50 \text{ MPa}$ $E_s = 120 \text{ (MPa)}, q_c > 50 \text{ MPa}$	Lunna&Christophersen ( 1983) 正常固结的砂	III- IV
$G_0$ (剪切模量)			$G_0 = \rho \cdot V_s^2$		II~ III	
岩土工程设计	桩基础	承载力	$Q_u = q_{cs}A_s/k_1 + q_{cs}A_p/k_2$	Almeida et al. ( 1996)	I ~ II	
	浅基础	承载力	$q_u = k_q rDN_q + ( k_r rBN_r)/2$	terzaghi	I ~ II	
		沉降量	$s = d_1 d_2 \Delta p \sum_1^n \frac{I_{xi} \Delta z}{x q_{ci}}$	Schmertmann( 1978)	II ~ III	
	抗液化分析	液化评判	$( q_c)_{cr} = d_3 \left  50 + 200 \frac{(\frac{\gamma}{\gamma} \sigma_0') - 0.1}{(\frac{\gamma}{\gamma} \sigma_0') + 0.1} \right $	Teparaksa( 1991)	I ~ II	
	与 SPT 关系		$( q_c/p_a)/N_{60} = 8.5( 1 - I_c/4.6)$	Jefferies and Davies( 1993)	I ~ II	

注: 表中  $f_s$  为侧阻力;  $a_e$  为锥尖阻力;  $u$  为由 CPTU 测得的孔隙水压力(  $u_2$  );  $R_f = (f_s/a_e) 100\%$  , 为摩阻比;  $F_r = f_s/(a_t - a_0)$  , 为修正摩阻比. 式中  $q_t = q_c + u(1 - a)$  ,  $a$  为修正系数;  $Q_t = (q_t - a_0)/a_0'$  , 式中  $a_0$  为原位竖向应力,  $a_0'$  为原位有效竖向应力;  $B_q = (u - u_0)/(q_t - a_0)$  , 为孔压比, 式中  $u_0$  为静水应力; PPD 为孔隙压力差,  $PPD = (u_1 - u_2)/u_0$  ,  $u_1$  ,  $u_2$  分别为探头锥尖和锥肩所测出孔隙水压力;  $M = 6\sin\phi/(3 - \sin\phi)$  ;  $N_s$  为实验常数, 一般取 5~ 10;  $N_c$  为理论锥尖因子, 可查文献[8] 中表 5.5 取得;  $a_0$  为土体原位总应力,  $a_0 = a_0$  ;  $q_e$  为净锥尖阻力,  $q_e = q_t - u_2$  ;  $N_{ke}$  为锥尖因子, 正常固结粘土取 10~ 15, 超固结土取 15~ 19;  $N_{\Delta u}$  为实验常数, 可查文献[8] 表 5.25 求得;  $a_m$  为修正系数, 可根据土性和  $q_e$  值查文献[9] 中表 5.8 取值;  $p_a$  为参考应力( 100 kPa) ;  $\gamma_w$  为水的容重; RR 为超固结范围内的再压缩比, 一般  $0.005 < RR < 0.02$  ;  $c_h$  为水平固结系数;  $d$  为探头半径( 17.8 mm) ;  $I_r$  为刚度系数(  $G/s_u$  ) ;  $D_u$  为探头透水石位置修正系数, 当透水石在锥尖时取  $D_u = 1.63$  , 在锥肩时取  $D_u = 1.15$  , 在大于 5 倍半径以上时取 0.62;  $m$  为孔隙水压力消散与时间开平方线性关系的梯度;  $C_0$  ,  $C_1$  ,  $C_2$  为土的常数, 查图表求得;  $q_{cl}$  为无量纲锥尖阻力,  $q_{cl} = (q/p_a)/(a_0'/p_a)$  ;  $Q_c$  为压缩因子,  $0.91 < Q_c < 1.09$  ;  $Q_{OCR}$  为超固结因子,  $Q_{OCR} = OCR^{0.18}$  ;  $Q_A$  为结构因子;  $K_{(oc)}$  ,  $K_{(nc)}$  分别为超固结土和正常固结土的侧向压力系数  $K_{(nc)} = 1 - \sin\phi$  ;  $m_1$  常数等于 0.45;  $\rho$  为土密度;  $V_s$  为剪切波波速;  $q_{cs} = q_t - a_0$  ;  $k_1$  ,  $k_2$  为经验系数, 可由经验公式求得;  $A_s$  ,  $A_p$  分别为桩及桩间土的面积;  $k_q$  ,  $k_r$  为基础修正系数, 可查图表求得;  $D$  为基础埋深;  $B$  为基础的宽度;  $N_r$  ,  $N_q$  为容许承载力因子,  $N_r = N_q = 1.25q_c$  ,  $q_c = \sqrt{q_{cl} \times q_{c2}}$  ,  $q_{cl}$  为基础下 0~ 0.5B 间的锥尖阻力平均值,  $q_{c2}$  为基础下 0.5B~ 1.5B 间锥尖阻力平均值;  $d_1$  为基础埋置深度修正系数;  $d_2$  为端变沉降修正系数;  $d_3$  为校正系数;  $\Delta p$  为基础底部压力增量;  $I_{zi}$  为第  $i$  层土应变影响因子, 可查表求出;  $\Delta z$  为计算土层的厚度;  $q_{ci}$  为第  $i$  层土的锥尖阻力;  $x$  为模数, 对方形基础为 2.5, 对条形基础取 3.5;  $I_c$  为土性能指数;  $N_{60} = E_m C_\beta C_{RN}/0.60$  , 为标准化的标贯击数, 式中  $E_m$  为锤击效率: 自由落锤时取 0.6, 卷筒吊绳落锤取 0.5,  $C_\beta$  为孔径修正系数, 孔径为 65~ 115 mm 时取 1.0,  $N$  为实测标贯击数,  $C_R$  为杆长修正系数:  $L = 3 \sim 4$  m,  $C_R = 0.75$  ,  $L = 4 \sim 6$  m,  $C_R = 0.85$  ,  $L = 6 \sim 10$  m,  $C_R = 0.95$  , 当  $L > 10$  m,  $C_R = 1.0$  , 对于采用卷筒吊绳落锤的常规标准贯入试验,  $N_{60} = C_R N/1.2$  ; 可靠性分级: I = 很可靠; II = 可靠; III = 较可靠; IV = 一般可靠; V = 可靠性低。

表 3 我国的 CPT 应用情况<sup>[5~ 7]</sup>  
Table 3 The applications of CPT in China

应用类别	内 容	计算公式	来源
分层与土质分类	分层	$q_c, R_f, B_q$	文献[5~ 7]
	土质分类 <sup>[9]</sup>	$q_c, R_f, B_q$	文献[5~ 7]
岩土工程性质指标	状 态 指 标	$\gamma$ ( 容重) $\gamma = 14.3(p_s/100)^{0.12}$ ( $\text{kN/m}^3$ ) ( $p_s < 0.4$ MPa) $\gamma = 14.8(p_s/100)^{0.095}$ ( $0.4 < p_s < 4.5$ MPa)	铁四院
		$S_t$ ( 灵敏度)	$S_t = 100R_f$ 中国地质大学
	强 度 指 标	$S_u$ ( 不排水强度)	$S_u = 0.0714q_c + 1.28$ ( $q_c < 0.7$ MPa 滨海相软粘土) $S_u = 0.05p_s + 1.6$ ( $p_s < 1.5$ MPa) 同济大学 铁道部
		$c$ ( 内聚力)	$c = a \cdot (f_s)^{1/2} - b$ 孟高头
		$\phi$ ( 有效内摩擦角)	国内仅有对砂土的内摩擦角的查表
		$E_s$ ( 压缩模量)	$E_s = 3.11p_s + 1.44$ ( 东南沿海粘土) $E_s = 3.72p_s + 1.26$ ( $0.3 < p_s < 5$ MPa 淤泥一般粘性土) 同济大学 武汉联合试验组
	变 形 指 标		$E_0 = 6.03p_s^{1.45} + 0.8$ ( $p_s < 2.5$ MPa) 铁四院 粘性土
		$E_0$ ( 变形模量)	$E_0 = 9.79p_s - 2.63$ ( $0.3 < p_s < 3$ MPa 淤泥一般粘性土) $E_0 = 11.77p_s - 4.69$ ( $3 < p_s < 6$ MPa 老粘土) 武汉联合试验组
			$E_0 = 2.5q_c$ ( 冲积饱和中 细砂) 辽宁煤矿院
		$E_u$ ( 饱和粘土的不排水模量)	$E_u = 11.0p_s + 0.12p_s < 1.0$ MPa 铁道部《静力触探技术规则》
岩土工程设计	桩基础	单桩承载力	$R_k = \frac{1}{k} ( a_0 p_{sb} A_p + u_p \sum_{i=1}^n f_{si} l_i )$ ( 单桥) $R_k = \frac{1}{k} ( \bar{\alpha} q_c A_p + u_p \sum_{i=1}^n f_{si} l_i \beta_i )$ ( 双桥) 建筑桩基技术规范( JGJ94—94)
	浅基础	地基承载力	$f_0 = (p_s)^{1/2} - 0.046$ ( $0.35 < p_s < 5$ MPa, $I_p > 1$ ) $f_0 = 0.89p_s^{0.63} + 14.4$ $p_s < 24$ , $I_p < 10$ 一般粘性土 铁三院 铁道部《静力触探技术规则》
	抗液化	液化评判	$p'_s = p_{s0} [ 1 - 0.065(H_w - 2) ] [ 1 - 0.05(H_0 - 2) ]$ 铁道部三设计院
单桥探头与双桥探头间关系			$q_c = 0.91p_s$ ( 各类土层) 铁道科学院
			$q_c = 0.815p_s + 0.05$ ( 粘性土、砂性土) 上海城建局设计院, 华东电力设计院

注: 表中  $p_s$  为单桥静力触探比贯入阻力;  $q_c$  为双桥探头锥尖阻力;  $f_s$  为侧摩阻力;  $R_f$  为摩阻比;  $a$  ,  $b$  为系数, 与土类有关, 当  $16 < f_s < 80$  kPa 时,  $a = 12.14$  ,  $b = 32.77$  , 当  $1 < f_s < 9$  kPa 时,  $a = 5.47$  ,  $b = 3.810$  ;  $R_k$  预制桩、单桩竖向承载力标准值( kN) ;  $k$  为安全系数, 一般取 2;  $a_0$  为桩端阻力修正系数, 可查表;  $p_{sb}$  为桩端附近单桥探头静力触探比贯入阻力平均值;  $A_p$  为桩身横截面积(  $\text{m}^2$  ) ;  $u_p$  为桩身周长( m) ;  $f_i$  为用单桥探头静力触探比贯入阻力  $p_s$  值估算的桩周各层土的极限摩阻力标准值;  $l_i$  为第  $i$  层土中桩身高度;  $\alpha$  为桩尖阻力修正系数, 对粘性土取 2/3, 对饱和砂土取 1/3;  $\bar{q}_c$  为桩端上、下探头阻力( kPa) ;  $\beta_i$  为第  $i$  层土桩身侧摩阻力修正系数, 当为粘性土时,  $\beta_i = 10.043f_{si}^{-0.55}$  , 砂性土时,  $\beta_i = 5.045f_{si}^{-0.45}$  ;  $f_{si}$  为第  $i$  层土探头的侧摩阻力( kPa) ;  $p_{s0}$  为砂临界贯入阻力;  $H_w$  为地下水位深度;  $H_0$  为上覆层厚度。

表 4 CPT 主要新传感器一览表

Table 4 The primary sensor of CPT<sup>[3]</sup>

传感器名称	测量参数	应用情况	研制时间及单位
侧压力传感器(Lateral Strees)	侧向应力	尚未投入使用	美国 UCB, (1990)
静探旁压仪(Cone Pressuremeter)	应力, 应变确定模量	有应用, 未成熟	Fugro (1986)
振动传感器(Vibro CPT)	波速 $v_p$ $v_s$	有应用, 基本成熟	加拿大哥伦比亚大学 (UBC, 1986)
电阻率传感器(RCPT)	电阻率	有应用	荷兰 (1985)
热传感器	热传导率	尚未投入使用	Fugro (1986)
放射性传感器	容重、含水率	有应用	Delft Geotechnics, (1985)
激光荧光器传感器(LIF)	荧光强度	试验成功, 有应用	Hirshfield (1984)
可视化静力触探(VisCPT)	图象、能量、波谱	试验成功	Hryciw, R. D. (1997)

泛应用(见表 2), 其中主要包括四个方面: ①修正锥尖阻力, 使锥尖阻力真正反映土的性质; ②评价渗流、固结特性; ③区分排水、部分排水、不排水贯入方式, 以满足不同需要; ④提高土分层与土质分类的可靠性。

研究成果表明, CPTU 用于工程勘察具有以下优点:

①能更加准确地划分地层; ②能更加准确地对土质进行分类; ③很经济地测试土的固结系数等土力学参数。

## 4 CPT 传感器技术的发展

从 80 年代中期开始, 国际上不少机构研制开发了用于 CPT 的新传感器。表 4 是国际上已研制成功的 CPT 传感器情况。

## 5 结 论

(1) 国际 CPT 技术一直处于快速发展之中, 我国 CPT 技术在早期基本上与国际水平同步发展, 但由于技术规格与国际常用的不一致和国际交流的限制, 80 年代后期始, 我国的 CPT 技术无论在观念方面还是从理论研究与应用方面已明显落后于国际水平。

(2) 应加强和推广国际标准规格的“双桥静力触探”技术的应用研究, 建立相应的技术标准。

(3) 尽快研制与国际常用规格一致的 CPTU, 并在

工程应用中推广。

(4) 电阻率静力触探(RCPT)和振动静力触探(VibroCPT), 具有良好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 陈强华, 俞调梅. 静力触探在我国的发展[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(1): 84-85.
- [2] 王钟琦. 我国的静力触探及动静触探的发展前景[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 517-522.
- [3] Lunne T, Robertson P K, Powell J J M. Cone penetration Testing in Geotechnical Practice[M]. Chapman & Hall, 1997.
- [4] U S Department Of Transportation Federal Highway Administrator. The Cone Penetration test (Publication NO FHWA-SA-91-04) [M]. 1992.
- [5] 《工程地质手册》编写委员会. 工程地质手册(第 3 版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [6] 唐贤强, 谢 瑛, 谢树彬, 等. 地基工程原位测试技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
- [7] 孟高头. 土体原位测试机理方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [8] 孟高头, 张得波, 等. 推广孔压静力触探的意义[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 314-318.
- [9] 张诚厚. 一种用孔压圆锥贯入试验测定软土的新分类图[J]. 水利水运科学研究, 1990, (4): 427-438.