

孔压静力触探试验的应用

张诚厚 施 健 戴济群
(南京水利科学研究院, 210024)

文 摘 本文简要地介绍了孔压静力触探试验在国内的应用现状。文中包括 5 项内容: ①探头的性能及操作; ②土分类图的检验及由此所得土层柱状图的可靠性; ③固结系数的确定及其与室内试验、现场原位观测推求值的比较; ④利用孔压静力触探试验指标进行沉降量的计算; ⑤判定土结构性的可能性。上述内容以三个工程实例加以说明。

关键词 孔隙压力, 静力触探试验, 土分类, 固结系数, 沉降分析。

1 前 言

在过去几十年间, 静力触探试验(CPT)得到广泛的应用, 已成为钻孔原位测试技术的重要方法之一。60 年代, 开始应用孔隙压力探头测孔隙压力及其消散; 至 70 年代末, 将孔隙压力传感器与电测静力触探仪结合起来, 命名为孔压静力触探试验(CPTU)。由于该项技术的突出优点, 在国际上得到迅速的发展, 大有取代静力触探之势。

在我国, 自 80 年代初期即利用进口设备研究此项技术; 至 80 年代后期开始研制设备, 并逐步加以利用; 时至今日, 对土的分类鉴别、固结系数的确定及沉降计算应用等方面均积累了一定的经验。本文将着重介绍上述三方面的成果。此外, 还介绍了所用设备的基本性能以及利用该项技术判定土结构性的可能性。全部成果以三个工程实例加以讨论。

2 探头性能及操作特点

探头能测定三项参数, 即孔隙压力、圆锥阻力及侧壁摩阻力。三个传感器要反应灵敏、相互无影响, 对孔隙压力传感器的要求更加严格。为此, 在探头设计中采取下述措施: ①各部件, 包括传感器及透水元件, 都是硬质、低压缩性的材料; ②孔隙压力传感器采用硅应变计或性能良好的应变计, 透水元件采用硬的不锈钢元件; ③为保证透水元件的饱和, 在孔压测量系统中灌以硅油; ④3mm 厚的透水元件位于紧靠圆锥的肩部。

我院与自动化研究院共同研制了孔压静力触探探头, 其特性指标列于表 1。

表 1 探头的特性指标

测试项目	量程(FS) (MPa)	非线性(FS) (%)	传感器型式	阻抗 (Ω)	桥压 (V)	输出 (mV/V)	温度范围 (℃)	直径 (mm)	夹角 (°)	面积 (cm ²)	计算面积修正 (%)
锥尖	6, 10, 30	< 1	应变片	390	8	1.5	5~ 45	36.0	60	—	84
摩擦套筒	0.3	< 1	应变片	390	8	1.5	5~ 45	36.0	—	150	100
孔隙压力	2.0	< 1	应变片	1000	8	9.5	5~ 45	—	—	—	100

该仪器的操作特点是:

a) 贯入速率采用国际通用标准, 即 2cm/s。

b) 孔压静力触探试验最重要的是保持孔压测量系统的饱和。如果系统中夹气则会影响孔隙压力的最大值及消散历时。一般, 在室内将探头放入高真空容器内连续抽真空数小时, 以保证系统的饱和。此外, 我们还设计了专用的轻便真空容器, 可在现场进行饱和。

c) 应按下式对实测圆锥阻力 q_c 进行修正, 以求得修正后的圆锥阻力 q_t 。

$$q_t = q_c + u(1 - a)$$

(1)

式中 净面积比值 a 等于 0.84。

d) 以微机采集、存储并绘制实测圆锥阻力 q_c 、修正的圆锥阻力 q_t 、孔隙压力 u 、侧壁摩阻力 f_s 等值沿深度分布图, 计算并绘制土分类参数 N_h 沿深度分布图。在消散试验中, 可绘出消散过程线并算出固结系数。

3 土分类的鉴别

在文献[1~ 4]/ 中, 曾提出过 4 张土分类鉴别图。笔者的研究表明, 文献[1~ 2]/ 的分类图在应用上有些困难, Robertson 图[3]/ 虽较前两图好些, 但有时还难以进行正确的判定。为此, 笔者提出了一张新的分类图[4]/。

笔者认为, 修正后的圆锥阻力 q_t 及超孔隙压力 Δu 是确定土分类的主要参数, 考虑到前三张图的最大缺点是没有考虑深度对参数的影响, 所以引进与深度有关的参考压力 σ_e , 将 q_t 及 Δu 进行归一化处理, 使其成为无量纲数。参考压力 σ_e 的定义为

$$\sigma_e = 10h$$

(2)

式中 h 为试验点深度, m; σ_e 的单位为 kPa。

对超孔隙压力 Δu , 采用超孔隙压力系数 B_p 表达。

$$B_p = \frac{\Delta u}{(q_t - \sigma_e)}$$

(3)

式中 Δu 为超孔隙压力, kPa; 其它符号同前。

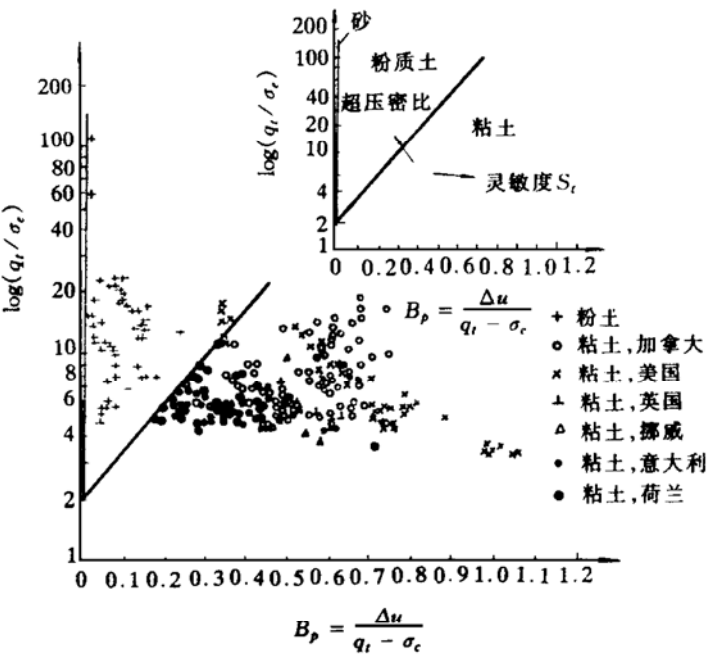


图 1 张及 Greeuw 土分类图

笔者将分布于世界各地的 52 孔试验资料绘于 $\log(q_t/\sigma_e) - B_p$ 图上, 发现砂、粉质土及粘性土的试验点分别落于图上的不同区域, 见图 1。由分界线可定义出土分类参数 N_h 值,

$$N_h = \frac{500B_p}{\log \frac{q_t}{2\sigma_e}}$$

(4)

各种土类的 N_h 界限值为: ①粘性土, $220 < N_h < \infty$; ②粉质土, $3.3 < N_h < 220$; ③砂, $0 < N_h < 3.3$ 。

下面通过工程实例来检验上述界限值是否适用于中国土类。

[例 1] 沪宁高速公路昆山试验段

为研究沪宁高速公路的软基加固问题, 曾在昆山市郊进行过 13 种加固方案的研究工作^[5]。该地区为河相及海相冲积平原, 地基土层可大致划分为 5 层, 各土层的物理力学性指标见表 2。

表 2 各土层物理力学指标

土 层	粉质亚粘土 ①	淤泥质粘土 ②	粉质亚粘土 ③	淤泥质粘土 ④	粉砂层 ⑤
$w(\%)$	27	40~ 60	23~ 31	40	30
$\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	19.0	17~ 19	~ 20	18	19
$w_L(\%)$	$> w$	$< w$	$> w$	$< w$	—
$I_P(\%)$	~ 14	12~ 19	10~ 15	~ 18	—
$c_v(\text{cm}^2/\text{s})$	1.5×10^{-3}	$(3 \sim 6) \times 10^{-4}$	$(1 \sim 9) \times 10^{-3}$	$(2 \sim 10) \times 10^{-4}$	—
C_s	0.063	0.22~ 0.6	0.07~ 0.1	0.18	—
C_c	0.22	0.3~ 0.7	0.15~ 0.2	0.26	0.11
$p_c(\text{kPa})$	130	< 100	~ 200	—	340
$c'(\text{kPa})$	—	0	5~ 10	0	—
$\phi(^{\circ})$	—	27~ 31	29~ 32	27	—

将 20 孔 CPTU 试验资料绘于 $\log(q_t/\sigma_e) - B_p$ 图中, 其分界线与国外资料是一致的, 见图 2。

为判定由土分类图所得的土柱状图的可靠性, 在 CPTU 试验孔的近旁进行原状取土及十字板试验, 典型成果见图 3^[6]。由图 3 看出, 所得结果是一致的, 它表明由土分类图所得土柱状图是可靠的。

[例 2] 南京炼油厂石埠桥油库

该工程^[7]位于长江南岸, 在地基表面 2m 为人工填土层; 其下为深厚的淤泥质粘土, 该土层含水量高达 50%, 孔隙比为 1.1~ 1.5, 为高压缩性土层; 再下为砂性较重的土类。几次勘探都认为淤泥质粘土层可分为两个亚层, 但 CPTU 试验表明第二个亚层的底部 2m 厚度范围内 u 值降低, q_c 有所增大, 见图 4。后发现, 在此深度的孔压消散试验所得的 c_h 值较上部大 3 倍, 而且室内试验也表明其压缩性较小, 固结系数较大。因此, 设计计算时改为 3 个亚层, 从而使设计更符合实际。

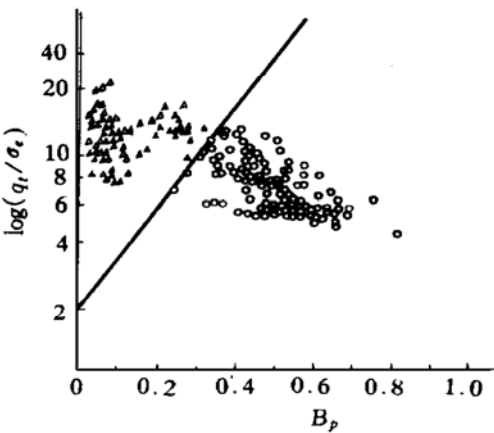


图 2 昆山软粘土检验张及 Greuw 分类图

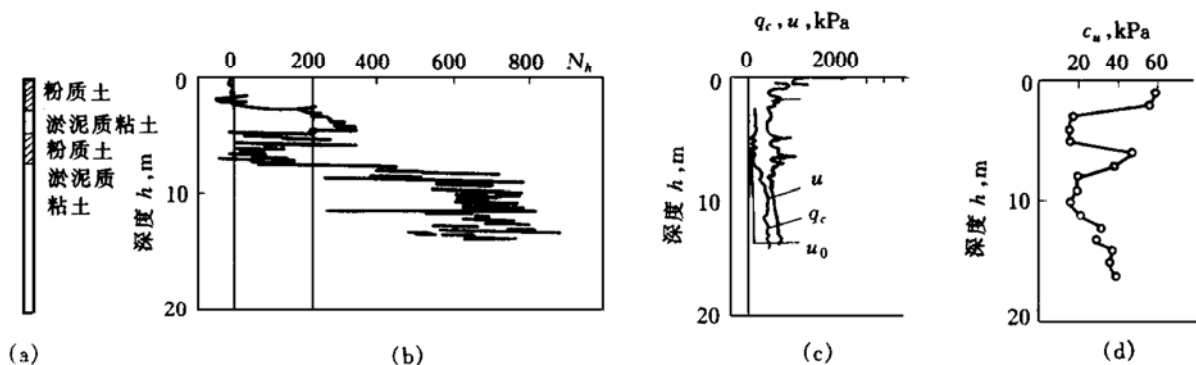
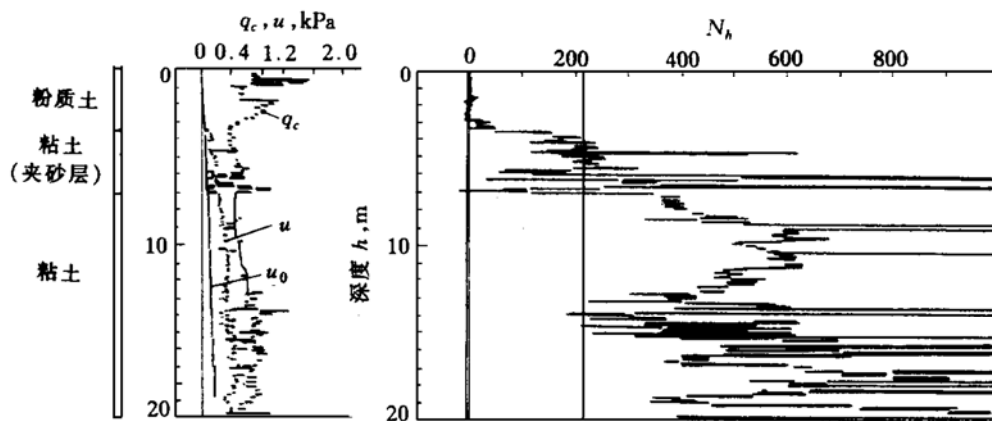


图 3 [例 1]取土孔、CPTU 及十字板试验成果

图 4 [例 2]的 q_c , u , N_h 沿深度分布线

4 固结系数的确定

固结系数是变形分析及软土地基加固设计的关键参数。长期以来, 是以原状土样进行室内试验来测定固结系数的, 由此所得的固结系数与实际偏差较大。当存在较多夹层时, 尤为严重。另一种方法是利用在设计荷载作用下的孔隙压力消散过程线推求地基的固结系数。虽然该方法能较好地反映土层的实际状态, 但只能验证设计参数的正确性, 而不能为本项工程提供设计参数。CPTU 试验在勘探阶段就能测定固结系数。因此, 积累孔压消散试验的经验, 特别是积累 CPTU 试验与室内试验、现场观测成果之间的关系, 是有实用意义的。

4.1 固结系数 c_h 值的计算方法

利用 CPTU 试验测定固结系数的基本原理是, 在圆锥停止贯入后, 由于圆锥贯入而产生的孔隙压力开始消散, 由消散速率可求得固结系数。

为了与理论曲线相比较, 可将 CPTU 测定的超孔隙压力归一化为超孔隙压力水平 $\overline{\Delta u}^{[8]}$, 其定义为

$$\overline{\Delta u} = \frac{u_t - u_0}{u_i - u_0} \quad (5)$$

式中 u_t , u_i 及 u_0 相应为某时的、起始的及静止的孔隙压力值。

将归一化的观测曲线与理论曲线相拟合, 使二者尽量相吻合, 由此可以确定任一消散水平

的实际时间 t 及相应的时间因素 T , 之后利用下式计算任意超孔隙压力水平的固结系数

$$c_h = \frac{R^2 T}{t \sqrt{\frac{200}{I_r}}} \quad (6)$$

式中 R 为圆锥半径; $I_r = \frac{G}{c_u}$, 为刚度指数 (G 为剪切模量, c_u 为不排水强度); 200 为参考刚度指数。

一般选取超孔隙压力水平为 50% 的 c_h 值作为设计值。

4.2 三种 c_h 测定法的比较

我们曾对昆山试验段[例 1]的 5 个断面以三种方法测定固结系数, 即 CPTU 试验、室内试验及在荷载作用下由孔隙压力消散推求法, 所得结果列于表 3^[9]。

表 3 三种方法测定的 c_h 值

测定方法	$c_h (\times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s})$				
	1 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]
①CPTU	1.57	3.20	3.30	3.30	3.00
②室内试验	0.028	0.33	0.20	0.23	0.22
③现场测定	0.95	1.12	1.18	1.60	1.30
①③	1.65	2.86	1.75	2.10	2.30

由表 3 可以看出, 室内测定的竖向固结系数 c_v 值偏低, 较由现场孔压消散过程推求的 c_h 值低一个数量级; CPTU 试验测定值相当均匀, 与现场孔压消散过程推求的 c_h 值相差不大, 只差 2~3 倍。

我们对南京炼油厂石埠桥油库工程[例 2]的淤泥质粘土进行了较多的研究, 室内试验结果很分散, c_v 值约 $(1 \sim 7) \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, CPTU 试验所得 c_h 值很均匀, 平均值等于 $1.25 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$, 两种试验相差一个数量级。

[例 3] 南京市一高层建筑物

该处在地基表面 5m 范围内为人工填土, 5~10m 为淤泥质粘土。室内试验表明, 淤泥质粘土的固结系数 c_v 值为 $3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。CPTU 的孔压消散试验得到的典型曲线如图 5 所示, 此土层 CPTU 所得的固结系数 c_h 为 $2.83 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$, 此值较室内试验大 2 个数量级。

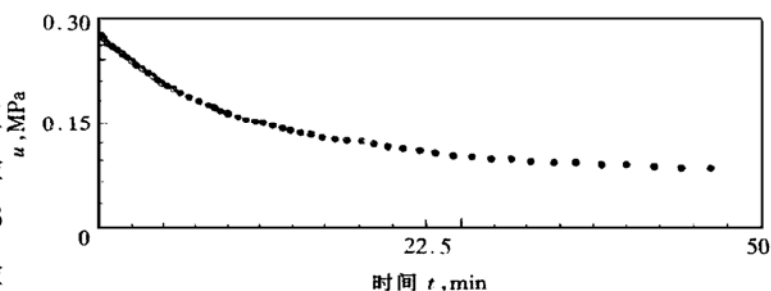


图 5 淤泥质粘土孔压消散曲线

5 沉降量计算方法

5.1 基本概念

以切线模量表达土的变形特性^[10], 其定义

$$M = \frac{dp'}{d\varepsilon} \quad (7)$$

式中 dp' , $d\varepsilon$ 分别为有效应力增量及相应的应变增量。 M 值反映了土体抗变形的能力。

由孔压静力触探试验可测定圆锥阻力 q_c 。当已知各深度的总上覆压力 γh , 则净圆锥阻力 $q_n = q_c - \gamma h$ 。

根据挪威经验, 净圆锥阻力与切线模量有下述经验关系式:

$$M = mq_n$$

(8)

式中 m 为经验系数。

由切线模量的定义出发, 如土层的起始厚度为 dh , 当土层应力由自重应力 p_0' 增大到 $p_0' + \Delta p$ 时(Δp 为附加应力), 在垂直向应变变化为 $d\varepsilon$, 其沉降量为

$$dS = d\varepsilon \cdot dh = \frac{dp' \cdot dh}{M}$$

(9)

总沉降量为

$$S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i' \cdot \Delta h_i}{(q_c - \gamma h)_i}$$

(10)

式中 $\Delta p_i'$ 为各土层承受的附加应力, kPa; Δh_i 为各土层厚度, m; $(q_c - \gamma h)_i$ 为各土层净圆锥阻力, kPa。

利用某已定工程实例, 已知 $\Delta p_i'$, Δh_i , $(q_c - \gamma h)_i$ 值, 以实测的沉降值反算出系数 m 值。再利用此 m 值计算其他工程的沉降值, 并与实测的沉降量进行对比, 以检验方法的可靠性。

5.2 工程实例

我们在[例 1]中选取 4 个地段, 其中 1[#], 2[#] 的外加荷载属低应力水平($p_0' + \Delta p < p_c$); 3[#], 4[#] 为高应力水平($p_0' + \Delta p > p_c$)。 p_c 为视先期固结压力, 各地段各土层的净圆锥阻力如表 5 所示。

表 5 各土层净圆锥阻力

土 层	q_n (kPa)			
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
粉质亚粘土硬壳层	396	410	505	520
淤泥质粘土	229	240	301	326
粉质粘土	458	540	600	463

由 1[#], 4[#] 的实测最终沉降量 S_∞ , $q_c - \gamma h$, Δh , Δp_i 值, 可算出 1[#], 4[#] 断面的 m 值分别为 6.0 及 6.75。

按应力水平的不同, 采用上述 m 值, 分别计算 2[#], 3[#] 断面的沉降量, 结果见表 6。由表 6 看出, 计算沉降量与实测沉降量相差 18% 以内。它表明, 此计算方法具有足够的精度, 可满足沉降计算的要求。

表 6 2[#] 及 3[#] 断面沉降量计算

断 面	m 值	计算 S_∞ (cm)	实测 S_∞ (cm)	误差 (%)
	①	②	③	$\frac{③-②}{②}$
2 [#]	6.0	27.5	23.4	17.5
3 [#]	6.75	112.4	120.0	6.3

6 判定土结构性的可能性

[例 1] 的研究表明, 在土的压缩曲线上呈现明显的屈服点, 此屈服应力 p_c 称“视先期固结压力”, 此值与有效上覆压力 p_0' 之比(p_c/p_0')称为“视超压密比 OCR”。图 6 绘出了 OCR 沿深度的分布图。该图表明, 硬壳层的 OCR= 6.8, 淤泥质粘土的 OCR 值, 自 2m 处的 3.0 降至 9m 处的 1.0。

由 CPTU 试验可得超孔隙压力 Δu 与修正后的圆锥阻力 q_t 的比($\Delta u/q_t$)。绘出 $\Delta u/q_t$ 沿深度分布图, 见图 7。虽然试验点稍有分散, 但变化趋势还是明显的。在深度 2m 范围内该值为 0, 逐渐增大至 9m 处达 0.5, 更深处数值为常数。

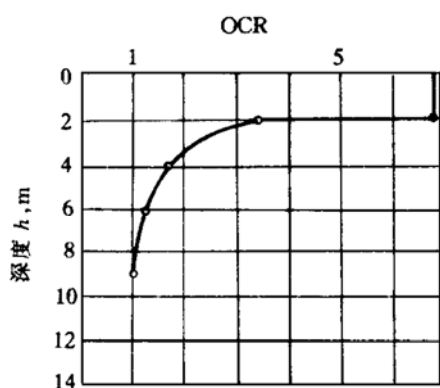


图 6 OCR 沿深度分布图

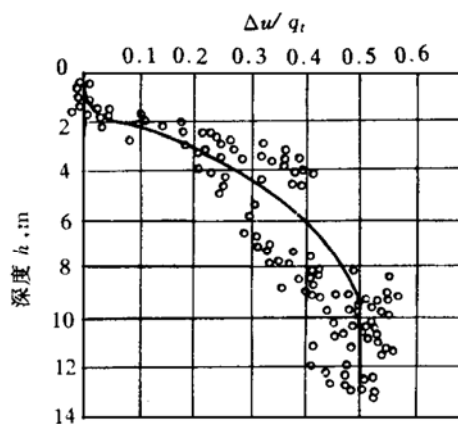


图 7 $\Delta u/q_t$ 沿深度分布线

比较图 6, 7 可以发现, 其数值变化的分界线是一致的, 这是否意味着 CPTU 试验有可能定性地确定土的结构性, 有待于进一步的研究。

7 结 论

(1) CPTU 试验在我国正逐步得到应用, 并在实际工程中发挥作用。

(2) 笔者提出的土分类图已得到检验, 证明适用于中国土类。由土分类参数 N_h 值所得到的土层柱状图与原状取土孔及十字板试验是一致的。

(3) 对同一土层而言, CPTU 消散试验确定的固结系数变化很小, 其值较室内试验结果大 1~2 个数量级, 较由现场荷载作用下的孔隙压力过程线推求的 c_h 值大 2~3 倍。如果将孔压消散试验测定的固结系数除以 2~3 作为设计值将是合适的。

(4) 以净圆锥阻力 q_n 进行沉降计算方法是合理的, 所得结果良好, 但经验系数值的确定还有待积累地区性的经验。

(5) 少量的经验表明, 由 CPTU 试验所得的 $\Delta u/q_t$ 值沿深度分布图有可能用以判定土结构性的强弱。如积累更多的使用经验, 此方法将比现行技术更为有效。

参 考 文 献

- 1 Senneset K, Janbu N, Sran Φ G. Strength and Deformations from Cone Penetration Tests. Proc of the 2nd ESOPT. 1982, **2**: 863~ 870.
- 2 Jones Gary A, Rust Elen. Piezometer Probe(CPTU) for Subsoil Identification. International Symposium Soil and Rock Investigation by Irr-situ Testing. Paris, 1983. 1~ 19.
- 3 Campanlla R G. Robertson P K. Current Status of Pizocone Test. Proc ISOPT-1. 1988. **1**: 93~ 116.
- 4 Zhang Cheng-hou, et al. A New Classification Chart for Soft Soils Using the Piezocone Test. Engineering Geology, 1990, **29**: 31~ 47.
- 5 张诚厚, 叶芳美, 施健. 昆山试验段软土工程特性的试验研究[研究报告]. 南京水利科学研究院, 1993.
- 6 张诚厚. 利用孔压静力触探试验快速测定软土地基柱状图的研究[研究报告]. 南京水利科学研究院, 1993.
- 7 张诚厚. 南京炼油厂石埠桥油库区地基土工程特性的试验研究[研究报告]. 南京水利科学研究院, 1995.
- 8 张诚厚, Greeuw G. 由孔压圆锥消散试验测定固结系数的方法. 岩土工程学报, 1991, **13**(2): 51~ 62.
- 9 施健, 张诚厚. 用孔压圆锥消散试验测试固结系数的研究[研究报告]. 南京水利科学研究院, 1993.
- 10 张诚厚, 戴济群, 施健. 利用孔压静力触探试验指标计算路基沉降量的新方法[研究报告]. 南京水利科学研究院, 1993.

The Application of Piezocone Tests in China

Zhang Cheng-hou Shi Jian Dai Ji-qun

(Nanjing Hydraulic Research Institute, 210024)

Abstract The experiences from piezocone tests in China were introduced in this paper. There were five sections : (1) probe and its operation, (2) the classification chart proposed by author and the reliability of the soil profile, (3) determination of coefficient of consolidation c_h and its comparison with those measured by laboratory and field observation, (4) the method of settlement analysis using CPTU tests parameters, and (5) the possibility for interpreting the soil structure. Three examples were used to illustrate the reliability of these results.

Key words pore pressure, static cone penetration test, soil classification, coefficient of consolidation, settlement analysis.