

# 现代数字式多功能 CPTU 与中国 CPT 对比试验研究

蔡国军, 刘松玉, 童立元, 杜广印

(东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 首先对国内外不同尺寸探头测试参数的对比研究现状进行综述, 结合不同场地的孔压静力触探(CPTU)和静力触探(CPT)现场试验, 总结江苏典型黏土场地上国际 10 cm<sup>2</sup> 的 CPTU 探头和中国双桥 15 cm<sup>2</sup> 的 CPT 探头试验结果, 对 2 种尺寸探头的测试参数作了详细比较。在划分土层、判别土类方面, 多功能 CPTU 具有较高的分辨率。针对不同土类, 从实用角度建立 CPTU 测试指标与中国 CPT 测试指标的转化关系。研究成果奠定了我国工程实际中应用国际 10 cm<sup>2</sup> 的 CPTU 探头基础, 对推广应用国际标准的 CPTU 技术具有重要意义。

**关键词:** 土力学; 静力触探; 锥尖阻力; 侧壁摩阻力; 净锥尖阻力; 对比

**中图分类号:** TU 413

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)05 - 0914 - 15

## COMPARATIVE STUDY OF MODERN DIGITAL MULTIFUNCTIONAL CPTU AND CHINA'S CPT TESTS

CAI Guojun, LIU Songyu, TONG Liyuan, DU Guangyin

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** The development of cone penetration test(CPT) at home and abroad is introduced in brief; then the status of CPT technology at home and abroad is expounded. Various sizes and configurations of China's double bridge CPT and international piezocone penetration test(CPTU) on Jiangsu clays of China are summarized. According to the CPT and CPTU tests at five sites, parameters measured by the 10 cm<sup>2</sup> CPTU are presented and compared to China's double bridge 15 cm<sup>2</sup> CPT. It is shown that using the 10 cm<sup>2</sup> CPTU rather than the 15 cm<sup>2</sup> CPT can significantly improve the detection of thin silt layers within clay. The conversion relationship between China's double bridge CPT and international CPTU are developed for different soil types. Some conclusions and suggestions are finally put forward. The findings give us the potential use of 10 cm<sup>2</sup> international CPTU in practice.

**Key words:** soil mechanics; cone penetration test(CPT); cone tip resistance; sleeve friction; net tip resistance; comparison

## 1 引言

静力触探(CPT)和带有孔压测试功能的孔压静

力触探(CPTU)是目前工程地质勘察使用最为广泛的原位测试技术<sup>[1~5]</sup>, 但其测试成果受到许多因素的影响, 诸如探头规格、技术标准和操作程序的影响<sup>[6]</sup>。T. Lunne 等<sup>[7]</sup>对 CPT/CPTU 测试成果的影响

**收稿日期:** 2008 - 08 - 26; **修回日期:** 2009 - 01 - 28

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40702047); 东南大学优秀博士学位论文基金资助项目(0714); 江苏省交通科学研究计划资助项目(8821006021)

**作者简介:** 蔡国军(1977 - ), 男, 2001年毕业于南京建筑工程学院土木工程系岩土工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程原位测试技术等方面的研究工作。E-mail: focuscai@163.com

因素进行了系统总结, 并且指出探头的形状及尺寸是影响测试成果的主要因素, 主要表现在: (1) 探头不等端面积影响; (2) 孔压传感器位置、尺寸和饱和程度; (3) 量测精度。S. F. Chung 等<sup>[8]</sup>采用离心模型试验, 研究了软黏土中贯入速率对不同形状、尺寸贯入器的贯入阻力的影响, 并讨论了贯入速率在部分排水和不排水区域对贯入阻力的影响。研究发现: 贯入阻力随着贯入速率的减小而增大, 根据贯入阻力开始增大的贯入速率(由于部分固结)可以用来预测黏土的固结系数。国际土力学与岩土工程协会(ISSMGE)原位测试技术专业委员会(TC16)建议: CPT/CPTU 设备探头锥角 60°, 截面积为 10 cm<sup>2</sup>, 侧壁摩擦筒表面积 150 cm<sup>2</sup><sup>[9]</sup>, 但国内也广泛使用 15 cm<sup>2</sup> 的探头<sup>[10]</sup>, 而且侧壁表面积和国际标准也不一致。这一差异给测试成果的比较和国际学术交流带来很大困难。在同样的土质条件和贯入能力情况下, 10 cm<sup>2</sup> 比 15 cm<sup>2</sup> 的贯入深度更大。《岩土工程勘察规范》建议, 为了向国际标准靠拢, 最好使用锥头底面积为 10 cm<sup>2</sup> 的探头。我国大多数 CPT 相关关系都是基于“单桥”设备的试验结果。目前, 关于探头尺寸效应(锥底截面积和摩擦套筒表面积)对测试结果的影响已有很多研究, 而关于国际 10 cm<sup>2</sup> 的 CPTU 探头和中国 15 cm<sup>2</sup> 的 CPT 探头测试结果的对比研究鲜有报道。本文利用美国多功能数字式 CPTU 和中国 CPT 设备结合典型场地的现场试验, 对 2 种尺寸探头测试结果进行详细对比。针对不同土性得出了 2 种探头测试参数的转化关系, 并考虑了土上覆应力的影响。研究结果对我国实际工程中推广应用 10 cm<sup>2</sup> 国际标准 CPTU 探头具有重要的意义。

## 2 研究现状

刘松玉等<sup>[11-11]</sup>对 CPT 的发展历史作了详细阐述, 但其最重要的发展是 20 世纪 80 年代初成功研制的可测孔压的孔压静力触探(CPTU), 它可以同时测量锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔压, 为了解土的更多工程性质及提高测试精度提供极大的可能性和现实性。国内在 20 世纪 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, 探头规格与国际通用的也不尽相同。比较发现: 国际通常用的 CPT 设备是 10 cm<sup>2</sup> 的摩擦探头, 而我国实际应用的具有 10, 15 和 20 cm<sup>2</sup>

三种探头。单桥探头是我国常用的一种探头, 在我国工程应用中积累了丰富的经验, 同时与标准贯入试验建立了很好的经验关系, 是我国运用得比较成熟的一种探头, 而该种探头在国外则没有应用。随着与国际交流的增多, 近 20 a 来双桥探头在工程中也大量使用, 但一些技术指标与国际标准还存在一定的差异。这给测试成果的比较和国际学术交流造成了很大的困难。而且, 我国采用的 CPT 测试参数通常为实测的锥尖阻力  $q_c$ , 国际 CPTU 往往采用经过孔压修正的锥尖阻力  $q_t$ :

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

式中:  $q_t$  为经孔压修正后的锥尖阻力;  $q_c$  为实测的锥尖阻力;  $u_2$  为锥肩位置量测的孔压;  $a$  为有效面积比, 按下式计算:

$$a = A_a/A_c \tag{2}$$

式中:  $A_a$ ,  $A_c$  分别为顶柱和锥底的横截面积(见图 1)。

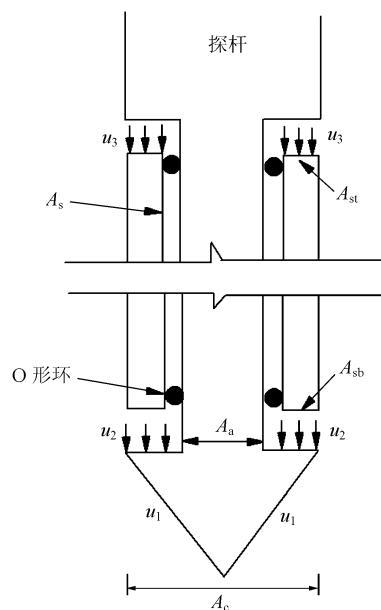


图 1 锥尖阻力  $q_c$  和侧壁摩阻力  $f_s$  修正的不等端面积示意图  
Fig.1 Sketch of unequal end areas of cone used for correcting  $q_c$  and  $f_s$

图 1 中,  $u_1$  为锥面位置量测的孔压,  $a$  通常由室内标定试验确定, 大部分探头  $a = 0.55 \sim 0.90$ , 本文 CPTU 探头中  $a = 0.80$ 。

量测的侧壁摩阻力由于孔压的存在也受到端部面积不等的影 响, 该修正只能在锥肩和摩擦套筒尾部位置孔压都量测的情况下进行, 即

$$f_t = f_s + \frac{u_3 A_{st} - u_2 A_{sb}}{A_s} \tag{3}$$

式中： $f_i$ 为修正后的侧壁摩阻力； $f_s$ 为实测的侧壁摩阻力； $A_s$ 为侧壁摩擦筒表面积； $A_{st}$ 、 $A_{sb}$ 分别为套筒顶部与底部的横截面积(见图 1)； $u_3$ 为在摩擦套筒尾部位置量测的孔压。该修正只能在  $u_2$  与  $u_3$  都量测的情况下才能使用，在黏性土中，孔压的影响非常显著。

关于探头尺寸效应，这是一个已经讨论了很久的问题，国内外对此都进行过研究。对于小尺寸范围的讨论，湖北省水利水电勘测设计院<sup>[12]</sup>曾用 10、15 和 20  $\text{cm}^2$  三种不同面积的探头在软土、一般黏性土及亚砂土地层进行了对比试验研究。研究发现：在上述尺寸范围内，探头尺寸的影响因素可以不予考虑。唐贤强等<sup>[13]</sup>通过对 CPT 应力 - 位移场进行大量模型试验，结果表明，相对于锥尖下方的土体而言，锥尖全断面处上方的土体处于剪切卸荷状态，进一步讨论了孔压测试参数的差异。P. K. Robertson 和 R. G. Campanella<sup>[14]</sup>在探头不同部位设置了量测孔压的元件，对不同状态的土质进行了系统性测试。这些结果经中铁第四勘察设计院集团有限公司在广州、深圳、武汉、徐州、宁波、温州以及连云港等地验证与实测结果相符<sup>[15]</sup>。Y. Tcheng<sup>[16]</sup>以及日本的研究者也曾用不同尺寸的探头在各种土层中做过对比试验，都认为在临界深度以下，尺寸的影响不甚

明显。然而在高度互层土地地，尺寸效应显得不容忽视。R. Vreugdenhil 等<sup>[17]</sup>在层状土层中从理论角度探讨了尺寸效应对锥尖阻力的影响。C. C. Hird 等<sup>[18]</sup>使用 1 和 5  $\text{cm}^2$  的微型 CPTU 探头在进行了室内试验研究，阐释了尺寸效应对孔压的影响。近年来，国外关于不同尺寸探头测试参数的对比试验成果总结如下：

K. A. Finke 等<sup>[19]</sup>分别采用 10 和 15  $\text{cm}^2$  的 CPTU 探头在美国 Piedmont 地区残积粉土和砂土进行试验，研究了 CPTU 探头贯入时的孔压消散特性、贯入速率对测试参数的影响以及不同尺寸探头测试成果的比较。图 2 给出了在 Opelika 试验场地 2 种不同尺寸 CPTU 探头的测试结果比较<sup>[19]</sup>。研究发现：CPTU 探头尺寸(锥底截面积)对所有的测试参数均有较小的影响。并且针对 15  $\text{cm}^2$  的探头，分别采用 2 和 20  $\text{cm/s}$  来量化贯入速率的影响。图 3 给出了不同贯入速率下 CPTU 试验测试结果<sup>[19]</sup>，由图可知： $q_c$  和  $f_s$  随贯入速率的增加而减小，而孔压明显增加。20  $\text{cm/s}$  贯入速率和标准速率 2  $\text{cm/s}$  相比  $u_1$  增加了约 200  $\text{kPa}$ 。最重要的是，在 20  $\text{cm/s}$  贯入速率下  $u_2$  变成正值(通常达到 200  $\text{kPa}$ )，而标准速率 2  $\text{cm/s}$  下  $u_2$  为负值。

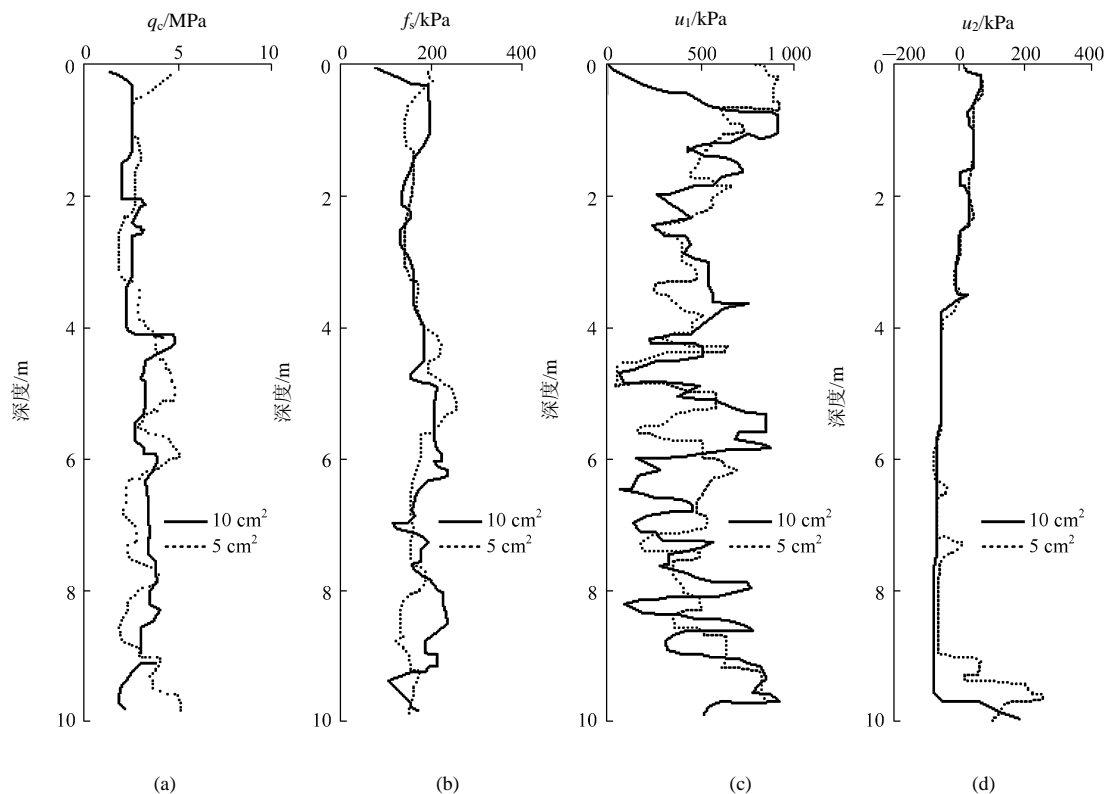


图 2 2 种不同尺寸 CPTU 探头的测试结果比较<sup>[19]</sup>

Fig.2 Comparison of results obtained with piezocones of two different sizes<sup>[19]</sup>

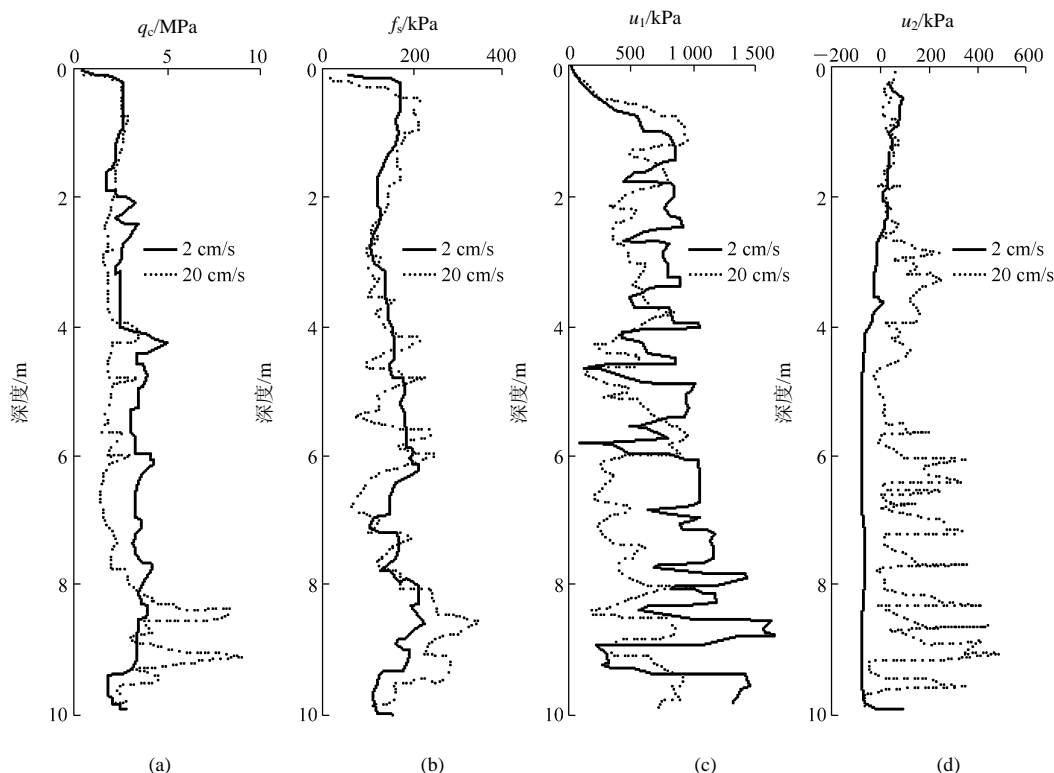


图 3 不同贯入速率下 CPTU 试验测试结果<sup>[19]</sup>

Fig.3 Results of tests performed at penetration rates<sup>[19]</sup>

J. J. M. Powell 和 T. Lunne<sup>[20]</sup>总结了英国 4 个典型黏土场地上 10 和 15 cm<sup>2</sup> 的 CPTU 探头试验结果, 并对不同尺寸、规格 CPTU 探头测试结果进行了比较, 使用的探头规格见表 1, 所有探头的孔压传感器均位于  $u_2$  位置。探头在测试之前经过严格标定。研究发现:  $q_t$ ,  $f_s$ ,  $u_2$  和  $R_f$  沿深度的变化曲线具有很好的—致性; 量测的锥尖阻力  $q_c$  为探头内部几何形状的函数; 当孔压效应被考虑时, 修正后的锥尖阻力  $q_t$  几乎不受探头尺寸的影响; 对 15 cm<sup>2</sup> 的 CPTU 探头, 摩擦筒表面积 200 和 300 cm<sup>2</sup> 的测试结果区别不大; 对所有探头量测的侧壁摩阻力  $f_s$  值非常相似, 表明  $f_s$  不依赖于锥底截面积和摩擦筒表面积; 工程实际中, 基于 10 cm<sup>2</sup> 的探头的相关关系能够用在英国 15 cm<sup>2</sup> 的探头上, 但探头的精度需要考虑。

表 1 J. J. M. Powell 和 T. Lunne<sup>[20]</sup>使用的探头规格

Table 1 Details of cone penetrometers used by J. J. M. Powell and T. Lunne<sup>[20]</sup>

探头	截面积/cm <sup>2</sup>	摩擦筒面积/cm <sup>2</sup>	有效面积比 $a$
1	15	300	0.72
2	10	150	0.76
3	10	150	0.81
4	15	200	0.66
5	10	150	0.89

C. C. Hird 和 S. M. Springman<sup>[21]</sup>使用 5 和 10 cm<sup>2</sup> 的 CPTU 探头在湖相黏土沉积物中进行了试验研究。图 4, 5 分别为 2 种探头测试的修正锥尖阻力和侧壁摩阻力测试曲线(图 5 中, D 指孔压消散试验)。结果表明: 5 和 10 cm<sup>2</sup> 的 CPTU 探头测得锥尖阻力和侧壁摩阻力有很好的—致性, 且可重复性很强。但是, 采用 5 cm<sup>2</sup> 探头可以更好地用于探测粉土薄层或带状黏土。论证了采用 CPTU 探头探测厚度为 2~4 mm 的粉土薄层的可行性。

总之, 国内外学者均对不同规格探头的测试结果进行了研究, 主要研究了 CPTU 或 CPT 探头的尺寸效应。国内研究认为探头尺寸的影响可以不予考虑, 而国外学者认为探头尺寸对测试结果的影响不容忽视, 具体影响结论又取决于不同探头和土类。而关于国际 10 cm<sup>2</sup> 的 CPTU 探头和中国 15 cm<sup>2</sup> 的 CPT 探头测试结果比较没有进行系统研究。

### 3 场地描述和试验设备

#### 3.1 场地描述

CPT 和 CPTU 试验对比的测试结果来自江苏 5 个试验场地, 分别为 1 个连云港海相黏土、2 个长江三角洲太湖冲湖积相黏土、2 个长江低漫滩相沉积黏土场地。黏土场地及基本土性描述见表 2。

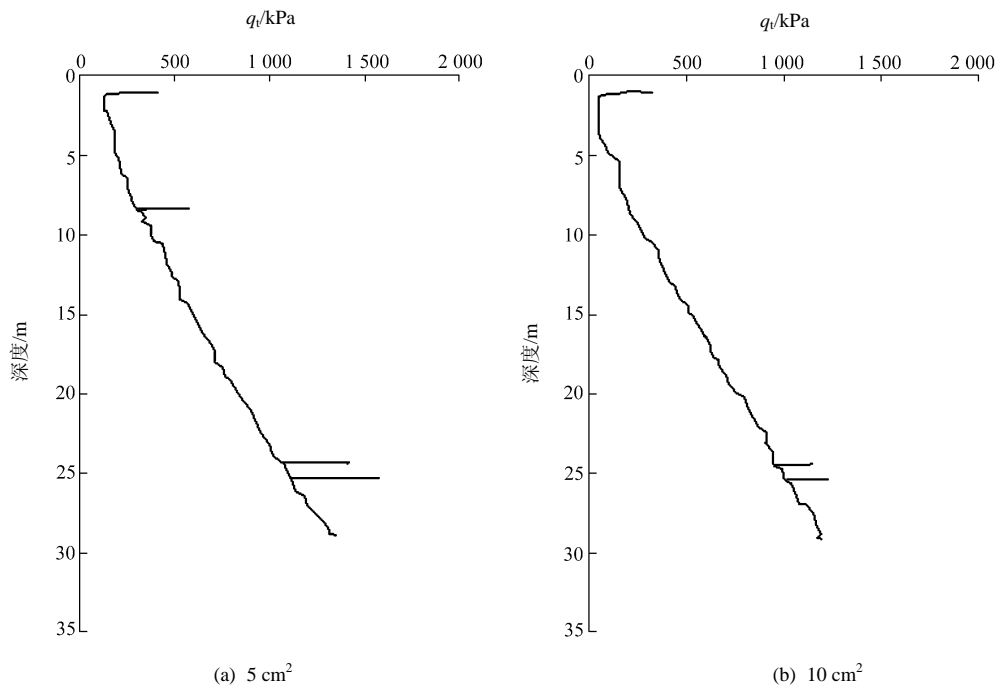


图 4 2 种不同尺寸 CPTU 探头的修正锥尖阻力测试曲线<sup>[21]</sup>  
 Fig.4 Corrected cone resistance profiles of two different cone-size CPTUs<sup>[21]</sup>

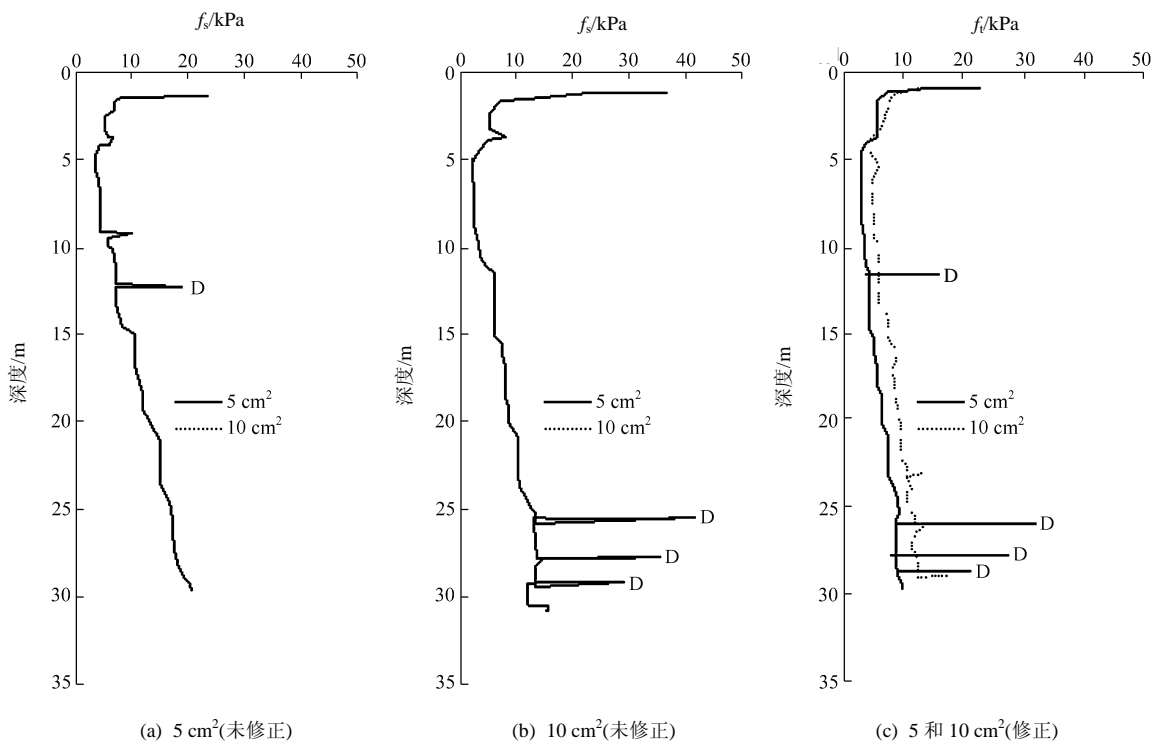


图 5 2 种不同尺寸 CPTU 探头侧壁摩阻力测试曲线<sup>[21]</sup>  
 Fig.5 Sleeve friction profiles of two different cone-size CPTUs<sup>[21]</sup>

### 3.2 试验设备

试验所用 CPTU 为美国原装进口多功能数字式车载 CPTU 系统, 探头规格符合国际标准, 锥角 60°, 锥底截面积 10 cm<sup>2</sup>, 锥底直径 35.7 mm, 透水石厚度 5 mm, 位于锥肩位置( $u_2$  位置)。探头贯入速

率 20 mm/s, 测试深度间隔 5 cm。采用的 CPT 设备为国产手摇机械式双桥静力触探, 探头规格为: 锥底截面积 15 cm<sup>2</sup>, 侧壁摩擦筒面积 300 cm<sup>2</sup>, 测试深度间隔 10 cm。表 3 为使用的 CPT/CPTU 探头规格。2 种探头的尺寸如图 6 所示。

表 2 黏土地地及基本土性描述  
Table 2 Soil properties and description of clay sites

场地	土层描述	含水量 w/%	塑限 w <sub>p</sub> /%	液限 w <sub>L</sub> /%	塑性 指数 I <sub>p</sub>	孔隙比 e	重度 γ (kN·m <sup>-3</sup> )
金陵图书馆新馆	长江低漫滩相沉积场地; 0.0~2.0 m 填土, 灰黄~灰褐色, 稍湿, 松散, 主要成份为回填的建筑垃圾和少量生活垃圾混以粉质黏土;	41~	20~	37~	16~	1.187~	17.3~
	2.0~6.5 m 淤泥质土, 灰~深灰色, 以淤泥质粉质黏土为主, 饱和, 流塑, 高压缩性;	43	22	39	17	1.206	17.8
	6.5~9.0 m 粉土, 青灰色, 饱和, 松散, 中压缩性;						
	9.0~16.5 m 粉细砂, 青灰色, 饱和, 中密						
连盐高速(灌云三标 K14+140 断面)	海相黏土沉积场地; 0~0.5 m 耕植土, 黄灰色, 以黏性土为主, 夹植物根茎;	74~	37~	63~	23~	1.992~	15.3~
	0.5~1.7 m 黏土, 灰黄色, 见铁锰质氧化斑;	76	39	65	25	2.116	16.6
	1.7~10.4 m 淤泥, 灰色, 饱和, 流塑, 见腐植物;						
	10.4~11.8 m 淤泥质土, 灰色, 流塑; 11.8~15.1 m 亚黏土, 黄褐色, 软塑, 局部硬塑						
宁常高速(金坛四标 K62+401 断面)	长江三角洲太湖堆积平原区; 0~0.7 m 素填土, 黄灰色, 可塑;	23~	19~	38~	17~	0.603~	19.4~
	0.7~4.7 m 亚黏土, 灰黄色, 夹铁锰结核, 硬塑, 中等压缩性;	25	22	39	18	0.733	19.9
	4.7~11.4 m 粉砂, 灰色, 饱和, 稍密状态;						
	11.4~17.8 m 黏土, 灰黄色, 夹铁锰结核, 中偏低压缩性; 17.8 m 以下, 亚黏土夹粉砂, 灰色, 软-流塑, 以亚黏土为主						
沪苏浙高速 7 合同段 K30+290~K30+420 附近场地	长江三角洲太湖湖积平原区; 0~0.5 m 耕植土, 植物根系发育;	53~	21~	41~	18~	1.005~	15.3~
	0.5~3.4 m 亚黏土, 褐灰-灰色, 夹亚砂土薄层, 软塑-硬塑;	54	23	43	20	2.093	18.5
	3.4~13.6 m 淤泥质黏土, 灰色, 流塑;						
	13.6~18.0 m 黏土, 灰-灰黄色, 硬塑; 18.0 m 以下, 亚黏土夹粉砂, 褐黄色夹灰绿色, 硬塑						
泰州长江公路大桥场地	长江漫滩相沉积场地; 北锚 CPTU 分层: 0~1.05 m 亚黏土, 1.05~2.85 m 亚砂土, 2.85~4.95 m 淤泥质亚黏土, 4.95 m 以下粉砂;	37~	18~	30~	12~	1.056~	17.6~
	南锚 CPTU 分层: 0~1.45 m 亚黏土, 1.45~5.5 m 淤泥质亚黏土, 5.5~6.75 m 亚黏土夹粉砂, 6.75~37.6 m 粉砂, 37.6~38.6 m 细砂, 38.6 m 以下粉砂	39	20	32	13	1.185	17.8

表 3 使用的 CPT/CPTU 探头规格

Table 3 Details of cone/piezcone penetrometers used

探头类型	锥角 (°)	锥底截 面积 /cm <sup>2</sup>	锥底 直径 /mm	侧壁摩擦 筒长度 /mm	侧壁摩擦筒 表面积 /cm <sup>2</sup>	备注
国际 CPTU	60	10	35.7	133.7	150	a = 0.80
中国双桥 CPT	60	15	43.7	218.5	300	

## 4 对比试验情况及统计结果

### 4.1 试验情况

#### (1) 对比试验数据的选择

考虑到土层性质的横向变异性和触探孔在贯入过程中对周围土体的压缩作用, 将对比孔间距控制在 1~2 m 内, 目的在于进行 CPT 与 CPTU 测试指标的对比分析, 研究 CPT 测试的  $q_c$  与 CPTU 测试的  $q_t$  的互换关系, 要求对比试验土层的单层厚度不

小于 2 m。相应于 CPT 和 CPTU 的同一深度试验点, 组成一组数对( $q_c, q_t$ )或( $f_{s-CPT}, f_{s-CPTU}$ )。试验地层均属于江苏第四纪黏土沉积土层, 其间偶夹薄层粉砂或粉土。凡遇这类夹层, 在其上、下的测试值不参与对比分析, 以增加对比结果的可靠性。

#### (2) 试验地区与测试结果

试验数据收集所涉及的地方有南京、连云港、常州、苏州和泰州等地。中国双桥 CPT 可测  $q_c, f_s$ , 而 CPTU 除可测试  $q_c, f_s$  以外, 还可提供孔压测试参数  $u$ 。通常也提供摩擦比( $R_f = q_c / f_s \times 100\%$ )随深度变化图。根据以上讨论结果,  $q_c$  需进行孔压修正转化为  $q_t$ 。由于 CPTU 试验中  $u_3$  没有测试, 侧壁摩擦力  $f_s$  不需要修正。双桥 CPT 与国际 CPTU 测试结果见图 7~11。

### 4.2 对比分析与统计结果

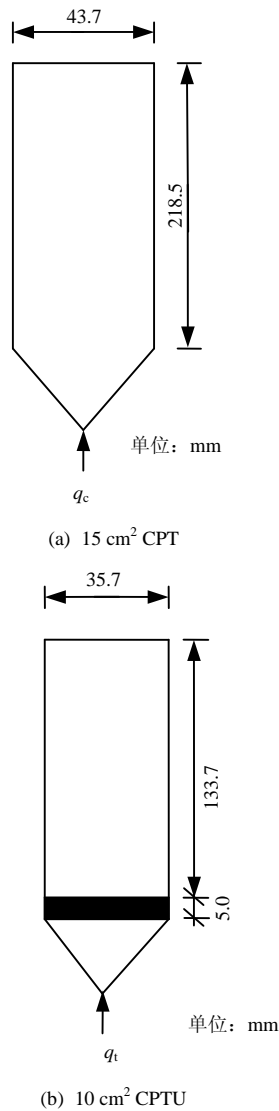


图6 中国双桥 CPT 和国际 CPTU 探头尺寸

Fig.6 China's double bridge CPT and piezocone dimensions

(1) 土层划分的敏感性比较

在地基土层的划分方面，CPTU 具有较高的分辨率。CPTU 所测的超孔压与土渗透性密切相关，黏性土中产生的超孔压很大，而孔压探头从黏性土层进入砂性土层中时，超孔压急剧下降，在密实的砂土中，由于剪胀作用，还会使超孔压为负值，因而在区分砂层和黏性土层时，分辨率极高。由图 7，11 可见，2 种探头对于河漫滩沉积物的夹层构造地基土以及软硬土层界面敏感性的差异。

南京金陵图书馆场地(见图 7)根据 CPTU 试验曲线形状和数值大小，可以清楚地将土层分为 4 层：① 0.0~1.0 m 的硬壳层；② 1.0~6.5 m 的淤泥质土层；③ 6.5~10.0 m 的粉土层；④ 10.0 m 以下为粉细砂层。而第④层的锥尖阻力较大且呈锯齿状，是否是砂层？采用双桥 CPT 说明不了这个问题，而采用 CPTU 则明显地显示了此层的超孔压值较小，该层可能是砂层或粉细砂层，采用钻探取样也证实了这一点。连盐高速公路场地(见图 8)根据 CPTU 试验曲线形状和数值大小，将土层分为 4 层：① 0.0~2.0 m 的硬壳层；② 2.0~8.2 m 的淤泥层；③ 8.2~11.0 m 的淤泥质土层；④ 11.0 m 以下为亚黏土层。第②和③层锥尖阻力  $q_t$  都很小，但其超孔压却相差很多，这说明这两层土的性质相差较大，钻孔取样表明，第②层为流塑状的淤泥层，第③层为可塑状的淤泥质土层，采用双桥 CPT 是分不出第②层和第③层的区别的。

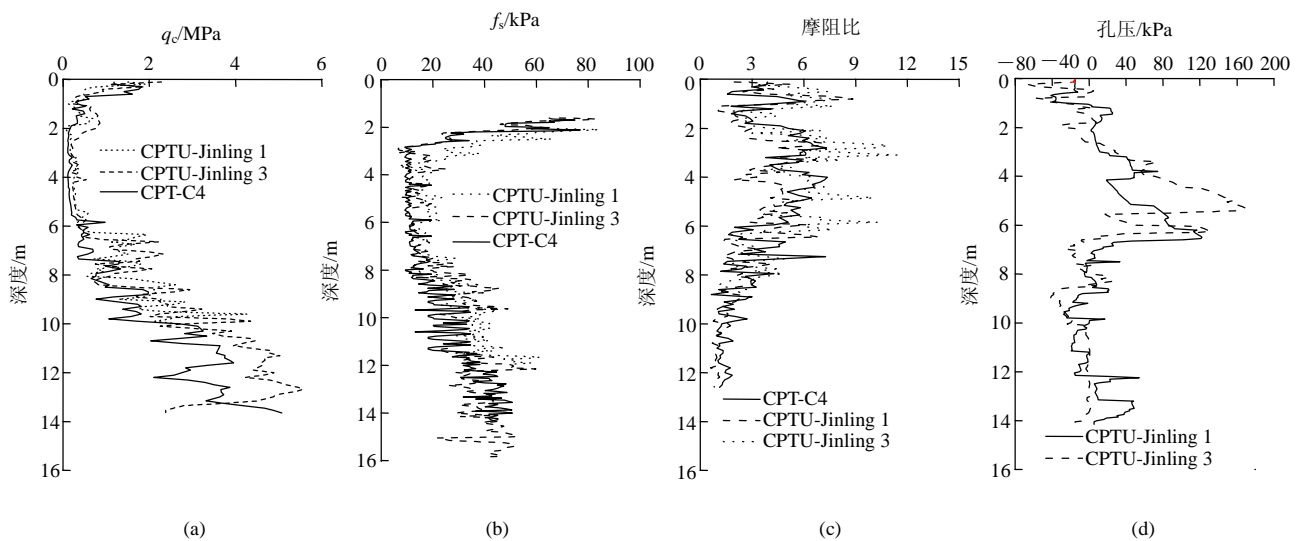


图7 南京金陵图书馆场地测试结果

Fig.7 Testing results of Nanjing Jinling library site

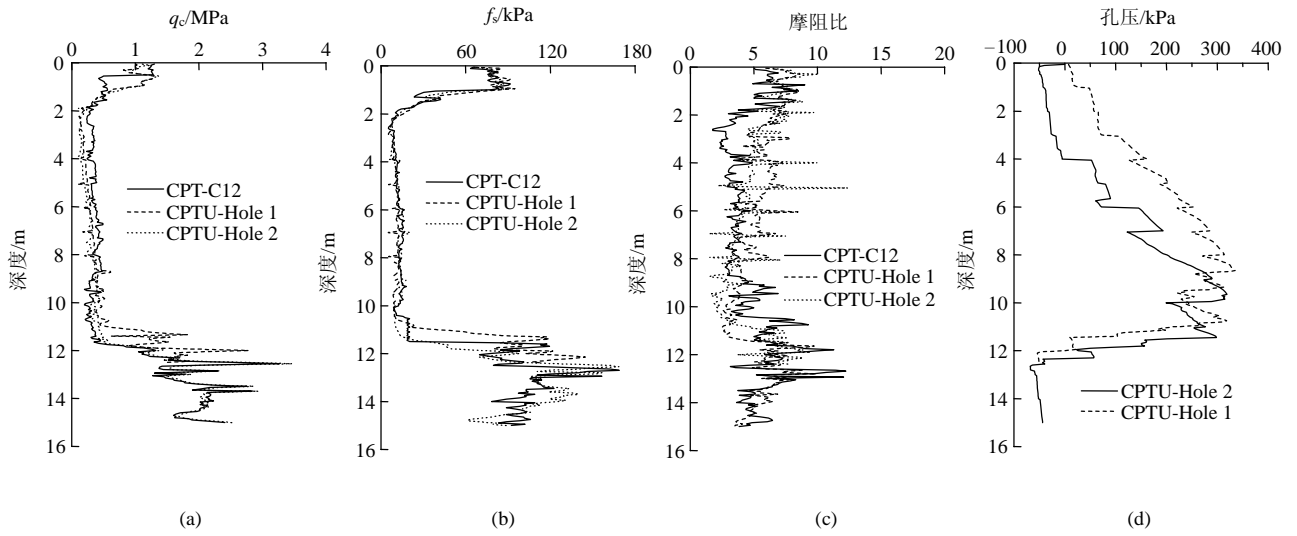


图 8 连盐高速公路场地测试结果

Fig.8 Testing result of Lianyungang—Yancheng Expressway site

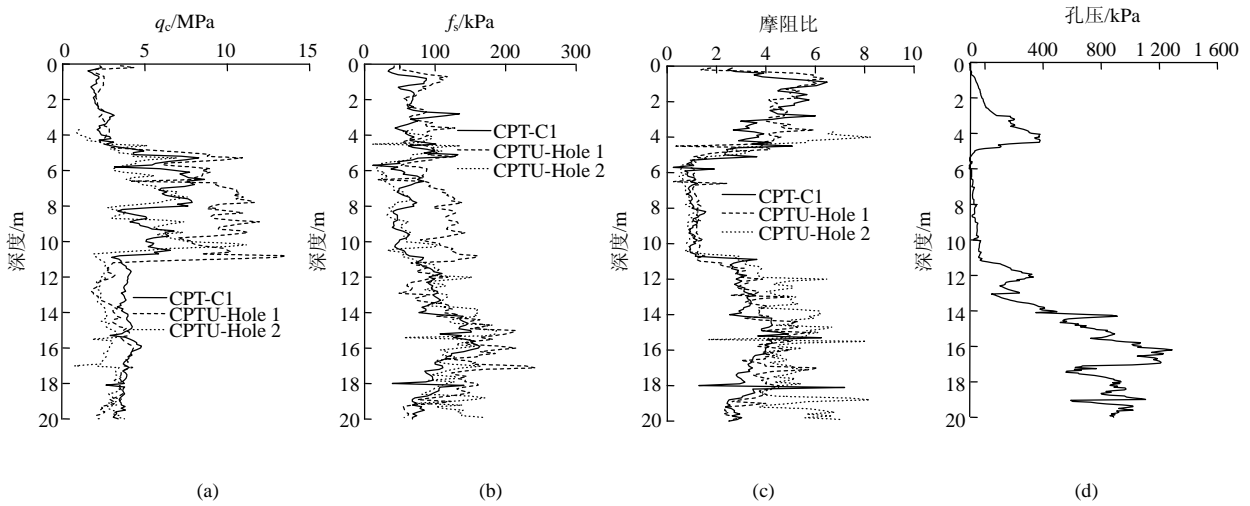


图 9 宁常高速公路场地测试结果

Fig.9 Testing result of Nanjing—Changzhou Expressway site

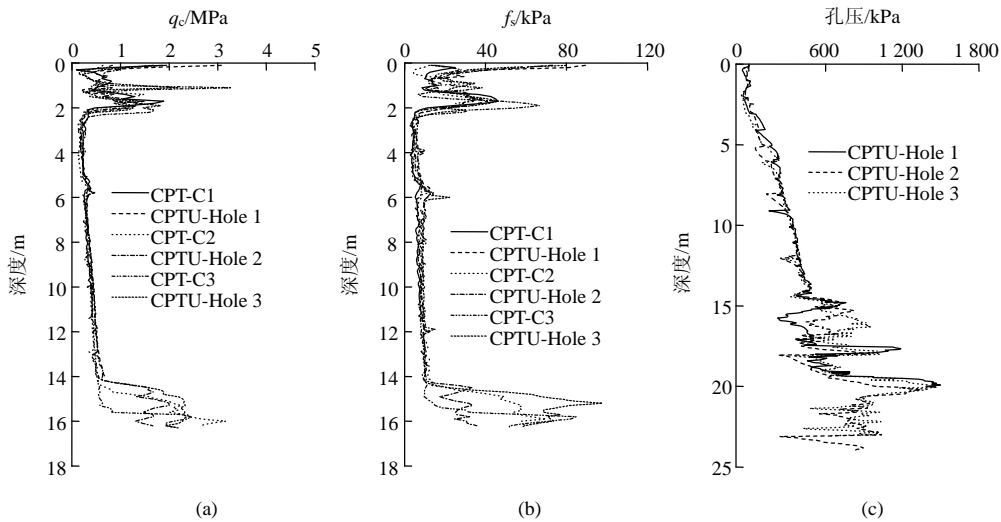


图 10 沪苏浙高速公路场地测试结果

Fig.10 Testing result of Shanghai—Jiangsu—Zhejiang Expressway site



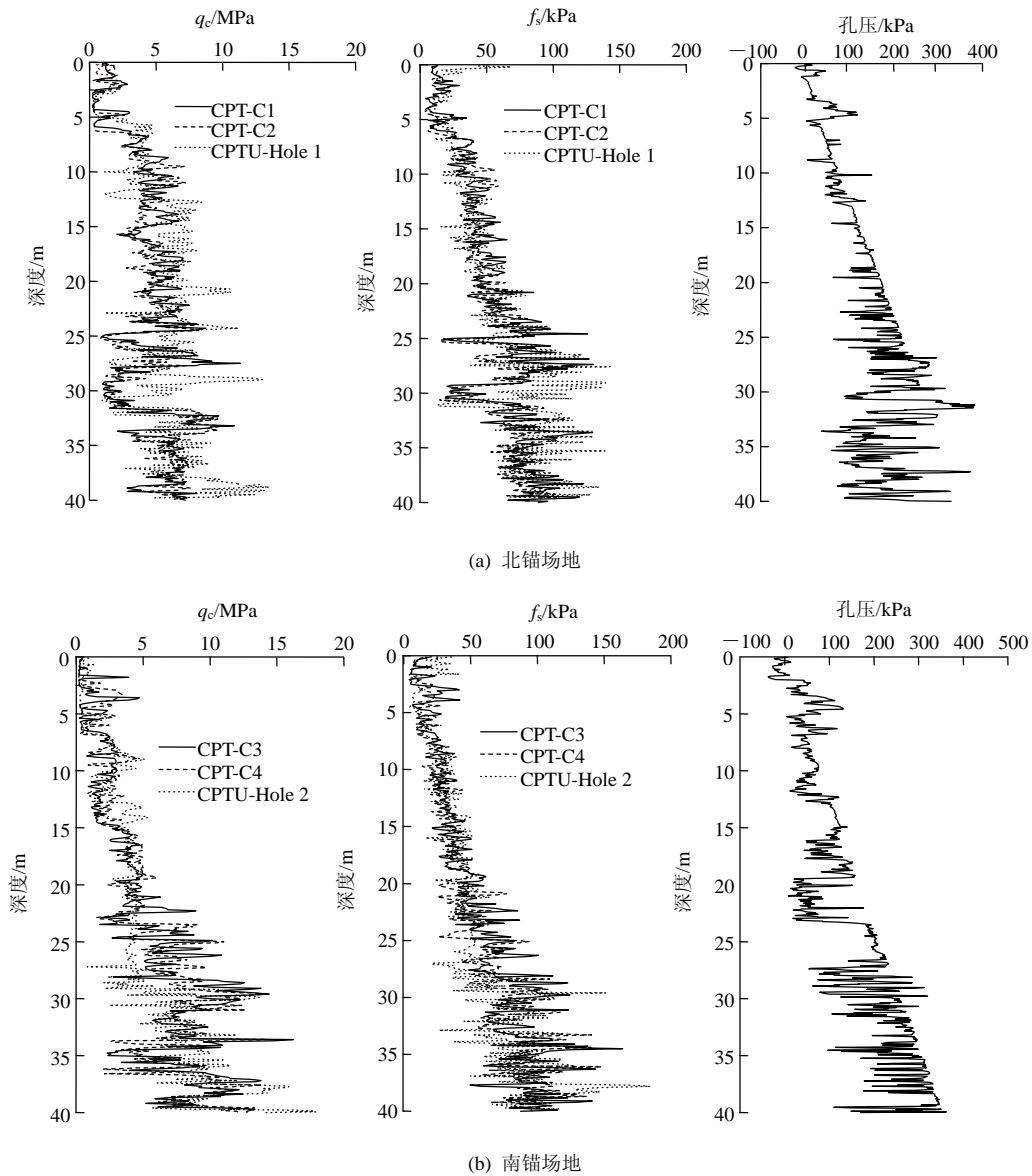


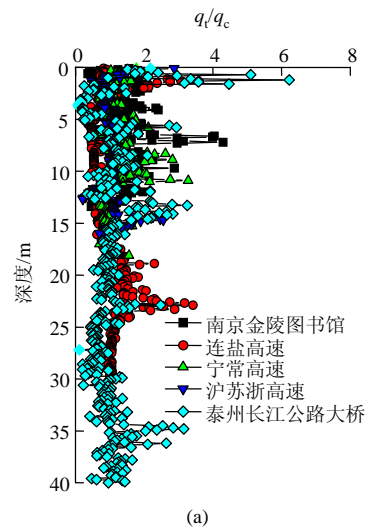
图 11 泰州长江公路大桥场地测试结果

Fig.11 Testing result of Taizhou Yangtze River highway bridge site

与钻探、取样、室内试验相比，用 CPTU 划分土层剖面具有省时、经济、分辨率更高的优点。实践证明，在孔压曲线上，凡是孔压急剧减少的地方，常常是含砂量较大的薄夹层的地方。而这些地方在钻孔地质编录是很容易漏掉的，而 CPTU 则会忠实地、准确地探测地基土的详细情况，这是钻探法、单桥和双桥 CPT 所无法比拟的<sup>[22]</sup>。

(2) CPT 与 CPTU 测试的  $q_c, f_s$  对比

将 CPTU 测试参数(锥尖阻力、侧摩阻力)与 CPT 测试参数之比定义为测试参数比。5 个场地测试参数比随深度变化情况见图 12。就总的趋势而言，锥尖阻力比和侧摩阻力比基本在数值 1 上下浮动。不同场地的变化趋势不同，CPTU 和 CPT 测试参数比



(a)

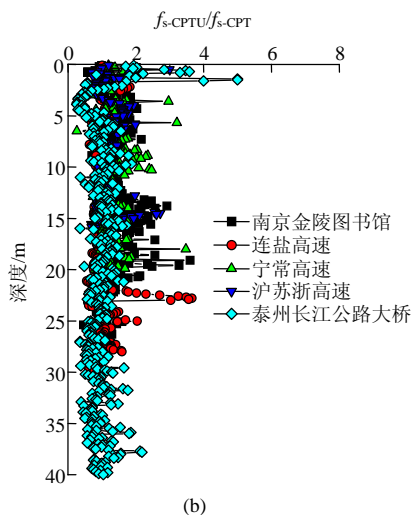


图 12 测试参数比随深度变化

Fig.12 Variation of measurement parameter ratio with depth

的平均值为 0.75~1.25, 并且不同场地测试参数比值的变异系数为 8%~28%。值得指出的是, 各个场地的表层土分别为填土或耕植土, 土质较不均匀。因此, 锥尖阻力比和侧摩阻力比随着深度的变异性较大。个别点比值较大可能是由于土层性质的水平变异性造成的。当然, 探头贯入对周围土体有一定的压缩作用, 这也是引起图 12 的锥尖阻力比波动的原因之一。

### (3) CPTU 与 CPT 测试参数的转换关系

为了进一步了解 CPTU 和 CPT 测试参数的变化情况, 按不同土质类型进行对比。并找出不同土类的测试参数的转化关系。根据 5 个场地, 对比的土质类型为软土(淤泥、淤泥质土)、一般黏性土(黏土)、硬黏土(亚黏土、粉质黏土)、粉土和粉砂。将试验数据进一步整理得到图 13~22。

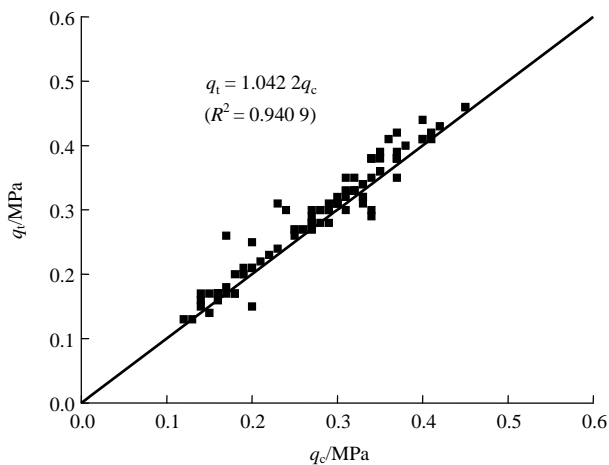


图 13 软土的 CPTU 和 CPT 测试的锥尖阻力比较  
Fig.13 Measured cone resistance of soft soils of CPTU and CPT

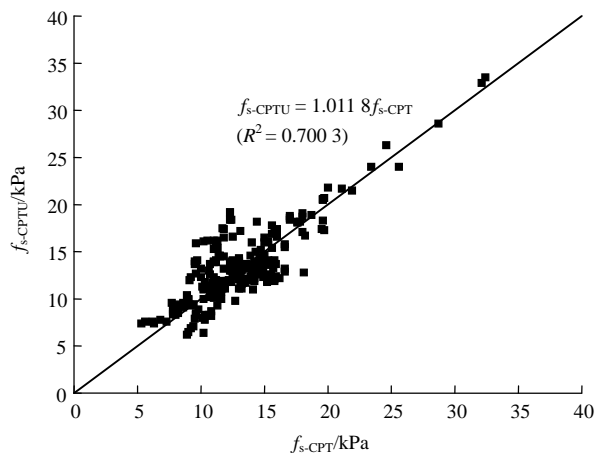


图 14 软土的 CPTU 和 CPT 测试的侧摩阻力比较  
Fig.14 Measured sleeve friction of soft soils of CPTU and CPT

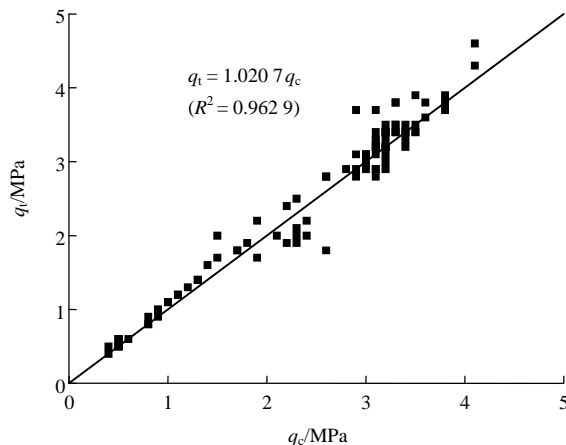


图 15 一般黏性土的 CPTU 和 CPT 测试的锥尖阻力比较  
Fig.15 Measured cone resistance of clays of CPTU and CPT

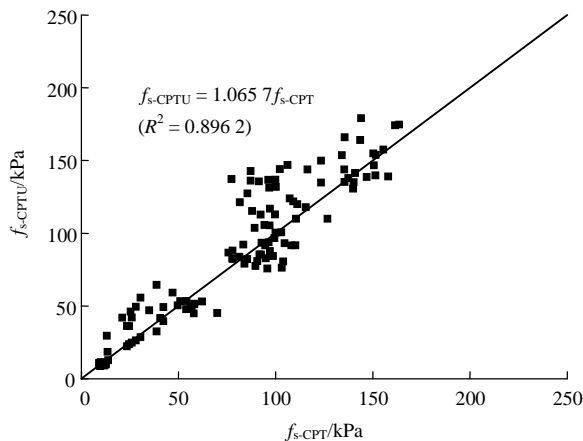


图 16 一般黏性土的 CPTU 和 CPT 测试的侧摩阻力比较  
Fig.16 Measured sleeve friction of clays of CPTU and CPT

由图 13 可见, 软土层中取 99 组( $q_c, q_t$ )对比数据, 得出 CPTU 测试的锥尖阻力  $q_t$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系为:  $q_t = 1.0422q_c (R^2 = 0.9409)$ 。由图 15 可见, 一般黏性土中, CPTU 测试的锥尖阻力  $q_t$  和

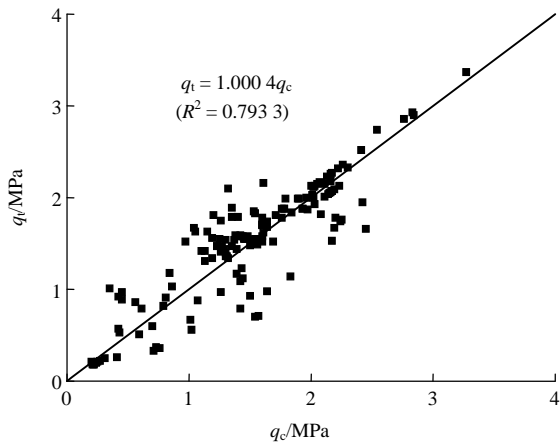


图 17 硬黏土的 CPTU 和 CPT 测试的锥尖阻力比较  
Fig.17 Measured cone resistance of stiff clays of CPTU and CPT

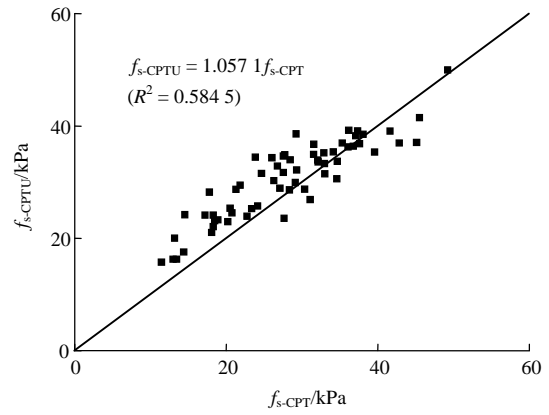


图 20 粉土的 CPTU 和 CPT 测试的侧摩阻力比较  
Fig.20 Measured sleeve friction of silts of CPTU and CPT

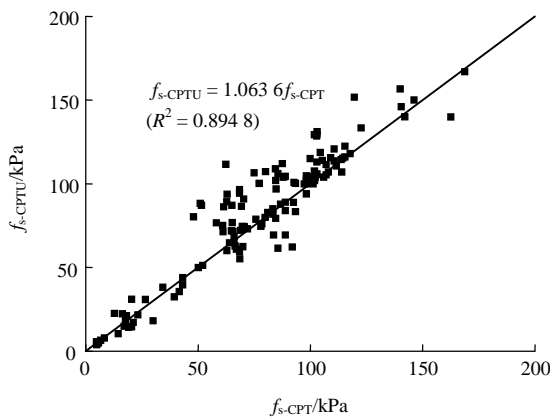


图 18 硬黏土的 CPTU 和 CPT 测试的侧摩阻力比较  
Fig.18 Measured sleeve friction of stiff clays of CPTU and CPT

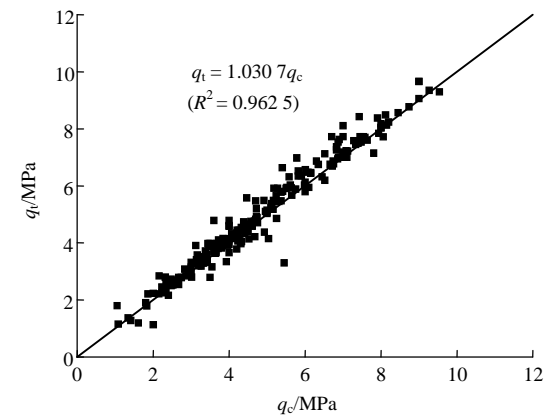


图 21 粉砂的 CPTU 和 CPT 测试的锥尖阻力比较  
Fig.21 Measured cone resistance of silty sands of CPTU and CPT

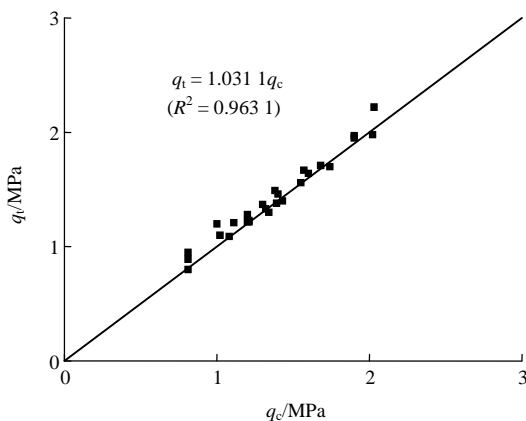


图 19 粉土的 CPTU 和 CPT 测试的锥尖阻力比较  
Fig.19 measured cone resistance of silts of CPTU and CPT

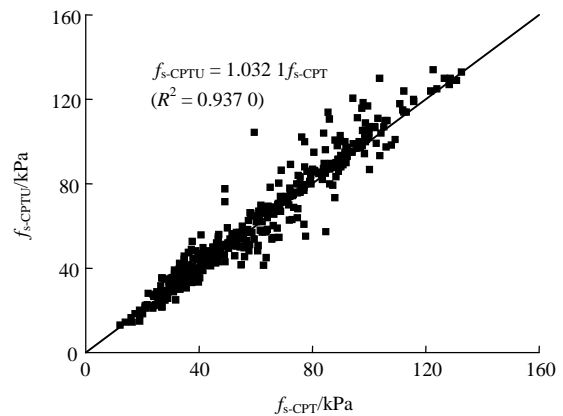


图 22 粉砂的 CPTU 和 CPT 测试的侧摩阻力比较  
Fig.22 Measured sleeve friction of silty sands of CPTU and CPT

CPT 测试的  $q_c$  换算关系为:  $q_t = 1.0207q_c (R^2 = 0.9629)$ 。由图 17 可见,硬黏土中,CPTU 测试的锥尖阻力  $q_t$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系为:  $q_t = 1.0004q_c (R^2 = 0.7933)$ 。由图 19 可见,粉土中,CPTU

测试的锥尖阻力  $q_t$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系为:  $q_t = 1.0311q_c (R^2 = 0.9631)$ 。由图 21 可见,粉砂中,CPTU 测试的锥尖阻力  $q_t$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系为:  $q_t = 1.0307q_c (R^2 = 0.9625)$ 。CPTU 测试的  $q_t$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系见表 4。

表 4 CPTU 测试的  $q_t$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系

Table 4 Conversion relationships of CPTU and CPT measured cone resistance

土类	样本数	$q_c/\text{MPa}$	回归方程	$R^2$
软土	99	0.13~0.45	$q_t = 1.042 2q_c$	0.940 9
一般黏性土	104	0.40~4.10	$q_t = 1.020 7q_c$	0.962 9
硬黏土	150	0.21~3.27	$q_t = 1.000 4q_c$	0.793 3
粉土	28	0.81~2.03	$q_t = 1.031 1q_c$	0.963 1
粉砂	223	1.08~9.00	$q_t = 1.030 7q_c$	0.962 5

由图 14 可见, 软土层中根据 CPTU 和 CPT 测试的侧摩阻力( $f_{s-CPTU}$ ,  $f_{s-CPT}$ )对比数据, 得出 CPTU 测试的锥尖阻力  $f_{s-CPTU}$  和 CPT 测试的  $f_{s-CPT}$  换算关系为:  $f_{s-CPTU} = 1.011 8 f_{s-CPT}$  ( $R^2 = 0.700 3$ )。由图 16 可见, 一般黏性土中, 换算关系为:  $f_{s-CPTU} = 1.065 7 f_{s-CPT}$  ( $R^2 = 0.896 2$ )。由图 18 可见, 硬黏土中, 换算关系为:  $f_{s-CPTU} = 1.063 6 f_{s-CPT}$  ( $R^2 = 0.894 8$ )。由图 20 可见, 粉土中, 换算关系为:  $f_{s-CPTU} = 1.057 1 f_{s-CPT}$  ( $R^2 = 0.584 5$ )。由图 22 可见, 粉砂中, 换算关系为:  $f_{s-CPTU} = 1.032 1 f_{s-CPT}$  ( $R^2 = 0.937 0$ )。CPTU 测试的  $f_{s-CPTU}$  和 CPT 测试的  $f_{s-CPT}$  换算关系见表 5。

表 5 CPTU 测试的  $f_{s-CPTU}$  和 CPT 测试的  $f_{s-CPT}$  换算关系

Table 5 Conversion relationships of CPTU and CPT measured sleeve friction

土类	样本数	$f_s/\text{kPa}$	回归方程	$R^2$
软土	99	8.90~32.40	$f_{s-CPTU} = 1.011 8 f_{s-CPT}$	0.700 3
一般黏性土	104	9.87~179.17	$f_{s-CPTU} = 1.065 7 f_{s-CPT}$	0.896 2
硬黏土	150	5.67~167.00	$f_{s-CPTU} = 1.063 6 f_{s-CPT}$	0.894 8
粉土	28	11.45~50.00	$f_{s-CPTU} = 1.057 1 f_{s-CPT}$	0.584 5
粉砂	223	12.00~133.00	$f_{s-CPTU} = 1.032 1 f_{s-CPT}$	0.937 0

不同土类, CPTU 测试的锥尖阻力和侧摩阻力与 CPT 测试值的转化关系是不同的。但是, 从实用角度可取  $q_t = 1.03q_c$ ,  $f_{s-CPTU} = 1.05 f_{s-CPT}$ 。

为了更好地评价 CPTU 和 CPT 测试指标的差别, 采用相对差别进行评价。5 个场地静力触探测试值和参数  $E_R$  的定义见表 6。值得指出的是, 对某些 CPT/CPTU 测试的异常值或某些有明显错误的数数据, 已经采用三倍标准差方法(极限误差法)将其舍弃。从图 7~11 可以看出, 双桥 15 cm<sup>2</sup> 探头和 10 cm<sup>2</sup> CPTU 探头所测锥尖阻力和侧壁摩阻力变化趋势基本一致, 可以反映出场地土层随深度的空间变异性。

总之, 从表 6 可以看出, 5 个场地由 CPTU(锥底面积为 10 cm<sup>2</sup>)测试的锥尖阻力值比中国双桥

表 6 5 个场地的中国 CPT 和国际 CPTU 测试值比较表

Table 6 Comparison of measured parameters of modern CPTU and Chinese double bridge CPT of five sites

场地	锥尖阻力 $q_c/\text{MPa}$		相对差别 $E_R/\%$	侧摩阻力 $f_s/\text{KPa}$		相对差别 $E_R/\%$	备注
	CPTU 测试值①	CPT 测试值②	(①-②)/①	CPTU 测试值③	CPT 测试值④	(③-④)/③	
南京金陵图书馆	1.31	1.25	11	18.51	14.97	21	长江低漫滩相
连盐高速	0.87	0.82	7	57.64	52.59	12	连云港海相
宁常高速	3.23	2.82	10	94.21	74.65	22	太湖冲积相
沪苏浙高速	1.25	1.09	10	50.90	37.19	27	太湖冲积相
泰州长江公路大桥	4.39	3.71	13	36.39	31.81	11	长江漫滩相(北锚场地)
	5.57	5.25	11	61.01	55.68	10	长江漫滩相(南锚场地)

CPT(锥底面积为 15 cm<sup>2</sup>)测试值要大, 相对差别  $E_R$  为 7%~13%, 最大差值达 13%。侧壁摩阻力测试值平均差别为 17.2%, 最大差别为 27%。孟高头<sup>[23]</sup>指出: 目前, 国内外已普遍规定静力触探的锥头为圆锥形, 其顶角为 60°, 所不同的是锥头底面积。国际上建议锥头底面积一般为 10 cm<sup>2</sup>, 便于测试结果的对比与应用。只有在坚硬土层中, 才使用 15 cm<sup>2</sup> 或 20 cm<sup>2</sup> 的锥头。经过多家试验证明: 锥头阻力  $q_c$  及侧壁摩阻力  $f_s$  皆随锥底截面积的增大而减小。侧壁摩擦筒长度增大, 即摩擦套筒表面积增大, 会使锥尖阻力增大, 使侧壁摩阻力减小。用 10 cm<sup>2</sup> 探头所测的  $q_c$  或  $f_s$  与用 15 cm<sup>2</sup>(或 20 cm<sup>2</sup>)探头所测的  $q_c$  或  $f_s$  的差值, 各家试验值不同。日本经试验对比证明, 用底面积为 10 和 20 cm<sup>2</sup> 的锥头进行测试时, 其最大差值达 8%<sup>[16]</sup>。本文通过 2 种不同尺寸的探头测试参数对比研究发现: 侧壁摩擦筒长度增大时, 会使  $q_c$  增大, 使  $f_s$  减小。因此, 侧壁摩擦筒长度也应有统一的规定为好。国外普遍使用直径相同的锥头、摩擦筒及探杆。国内现有的探头规格标准不统一, 未来应该向着统一的方向发展。

(4)  $q_c$  和净锥尖阻力  $q_n$  的转换关系

C. P. Wroth<sup>[24]</sup>指出, 不排水条件下最大剪应力和 2 个总应力的差异有关。在一个均质土层中  $q_t$  随着深度和总应力的增加而增加。因此, 国外采用 CPTU 解译岩土参数时常常考虑上覆应力的影响。净锥尖阻力定义如下:

$$q_n = q_t - \sigma_{v0} = q_t - \gamma h \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{v0}$  为竖向总应力,  $h$  为贯入深度。

5 个场地对比的土质类型为软土(淤泥、淤泥质土)、一般黏性土(黏土)、硬黏土(亚黏土、粉质黏土)、

粉土和粉砂。5种土类的净锥尖阻力  $q_c$  和 CPT 测试  $q_n$  典型测试值统计关系如图 23~27 所示。图 28 为

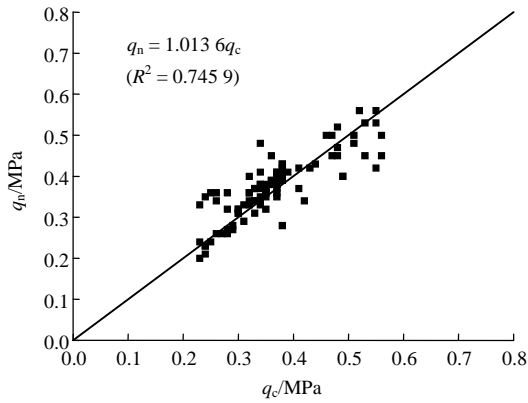


图 23 软土的实测锥尖阻力与净锥尖阻力比较  
Fig.23 CPT measured versus CPTU net cone resistance of soft soils

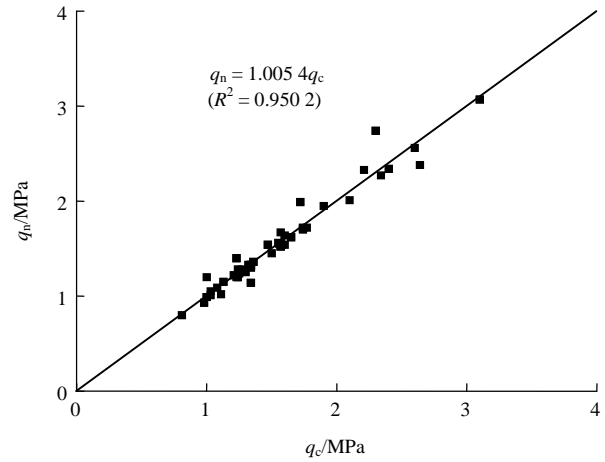


图 26 粉土的实测锥尖阻力与净锥尖阻力比较  
Fig.26 CPT measured versus CPTU net cone resistance of silts

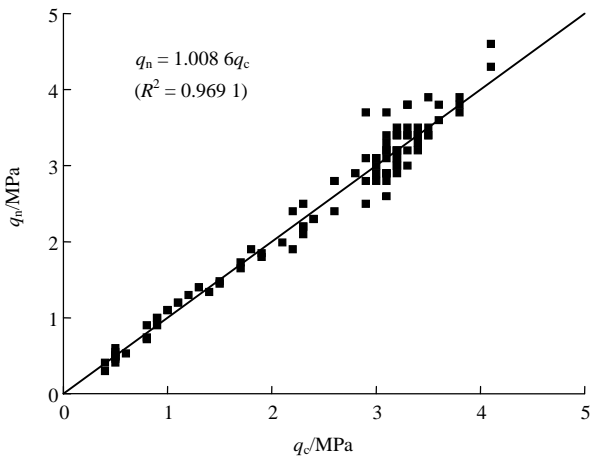


图 24 一般黏性土的实测锥尖阻力与净锥尖阻力比较  
Fig.24 CPT measured versus CPTU net cone resistance of clays

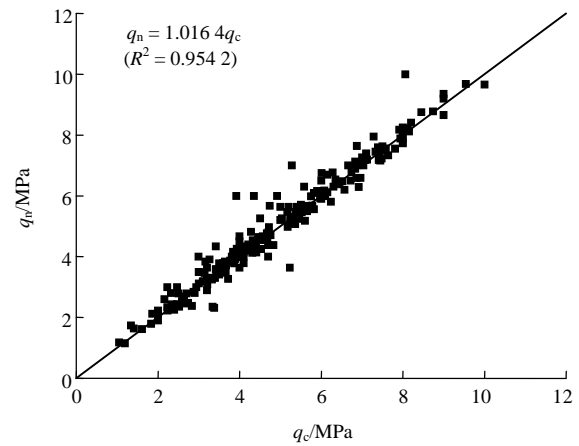


图 27 粉砂的实测锥尖阻力与净锥尖阻力比较  
Fig.27 CPT measured versus CPTU net cone resistance of silty sands

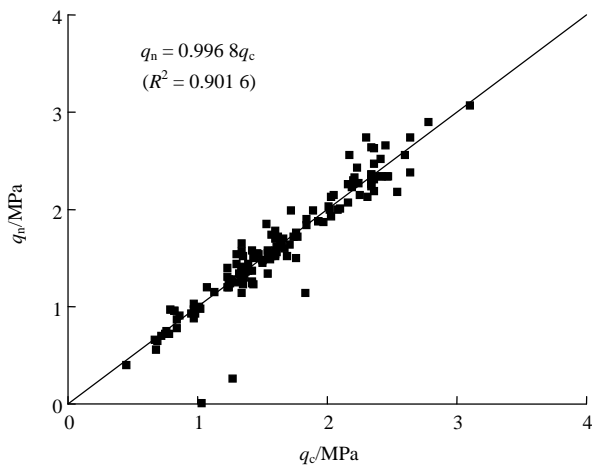


图 25 硬黏土的实测锥尖阻力与净锥尖阻力比较  
Fig.25 CPT measured versus CPTU net cone resistance of stiff clays

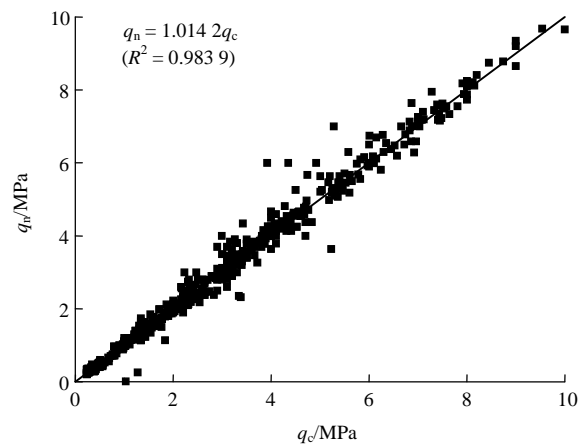


图 28 所有场地的实测锥尖阻力与净锥尖阻力比较  
Fig.28 CPT measured versus CPTU net cone resistance of all sites

所有场地的实测锥尖阻力与净锥尖阻力比较。

由图 23 可见, 软土层中取 108 组( $q_c$ ,  $q_n$ )典型对比数据, 得出 CPTU 测试的净锥尖阻力  $q_n$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系为:  $q_n = 1.013 6q_c (R^2 = 0.745 9)$ 。由图 24 可见, 一般黏性土中, CPTU 测试的净锥尖阻力  $q_n$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系为:  $q_n = 1.008 6 q_c (R^2 = 0.969 1)$ 。由图 25 可见, 硬黏土中, CPTU 测试的净锥尖阻力  $q_n$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系为:  $q_n = 0.996 8q_c (R^2 = 0.901 6)$ 。由图 26 可见, 粉土中, CPTU 测试的净锥尖阻力  $q_n$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系为:  $q_n = 1.005 4q_c (R^2 = 0.950 2)$ 。由图 27 可见, 粉砂中, CPTU 测试的净锥尖阻力  $q_n$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系为:  $q_n = 1.016 4q_c (R^2 = 0.954 2)$ 。由图 28 可见, 5 个场地所有土类的 CPTU 测试的净锥尖阻力  $q_n$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系为:  $q_n = 1.014 2 q_c (R^2 = 0.983 9)$ 。CPTU 测试的  $q_n$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系见表 7。

表 7 CPTU 测试的  $q_n$  和 CPT 测试的  $q_c$  换算关系  
Table 7 Conversion relationships of CPTU and CPT measured cone resistance

土类	样本数	$q_n$ 值域/MPa	回归方程	$R^2$
软土	108	0.15~0.52	$q_n = 1.013 6q_c$	0.745 9
一般黏性土	121	0.46~5.37	$q_n = 1.008 6q_c$	0.969 1
硬黏土	143	0.32~3.46	$q_n = 0.996 8q_c$	0.901 6
粉土	67	0.76~2.36	$q_n = 1.005 4q_c$	0.950 2
粉砂	220	0.99~10.01	$q_n = 1.016 4q_c$	0.954 2
所有土类	633	0.15~10.01	$q_n = 1.014 2q_c$	0.983 9

总之, 不同土类 CPTU 测试的净锥尖阻力与 CPT 测试值的转化关系是不同的。但是, 从实用角度, 可取  $q_n = 1.01q_c$ 。

## 5 结 论

(1) 量测的锥尖阻力  $q_c$  是探头内部几何形状的函数, 由于 CPTU 探头端部面积的不等, 实测的锥尖阻力应进行孔压修正, 以利成果的通用与解释。

(2) 在划分土层、判别土类方面, 多功能 CPTU 具有较高的分辨率。根据不同土类 CPTU 测试的锥尖阻力和侧摩阻力与 CPT 测试值的对比数据, 得

出不同土类的两者的转化关系。但是, 从实用角度, 可取  $q_t = 1.03 q_c$ ,  $f_{s-CPTU} = 1.05 f_{s-CPT}$ 。

(3) 国外实际工程应用中, 常常采用净锥尖阻力  $q_n$  解译岩土参数。净锥尖阻力考虑了土上覆应力的影响。不同土类 CPTU 测试的净锥尖阻力与 CPT 测试值的转化关系是不同的。实用工程应用中, 可取  $q_n = 1.01q_c$ 。

(4) 锥头阻力  $q_c$  和侧壁摩阻力  $f_s$  皆随锥底截面积的增大而减小, 摩擦筒面积的增加也会减小侧摩阻力  $f_s$  量测值。在软土、正常固结土和细粒土中, 由于仪器设计差别引起的误差是不容忽视的。

(5) 在相同的土质条件和贯入能力的情况下, 10 比 15  $\text{cm}^2$  的探头贯入深度更大。为了向国际标准靠拢, 实际工程中最好使用锥头底面面积 10  $\text{cm}^2$  的探头。

## 参考文献(References):

- [1] 刘松玉, 吴燕开. 论我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 553 - 556.(LIU Songyu, WU Yankai. On the state-of-art and development of CPT in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 553 - 556.(in Chinese))
- [2] CAI G J, LIU S Y, TONG L Y, et al. Assessment of direct CPT and CPTU methods for predicting the ultimate bearing capacity of single piles[J]. Engineering Geology, 2009, 103(3): 211 - 222.
- [3] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 基于 CPTU 测试的连云港海相黏土的固结和渗透特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 846 - 852.(CAI Guojun, LIU Songyu, TONG Liyuan, et al. Study on consolidation and permeability properties of Lianyungang marine clay based on piezocone penetration test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 846 - 852.(in Chinese))
- [4] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 基于 CPT 测试的国内外砂土液化判别方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1 019 - 1 027.(CAI Guojun, LIU Songyu, TONG Liyuan, et al. Evaluation of liquefaction of sandy soils based on cone penetration test(CPT)[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 1 019 - 1 027.(in Chinese))
- [5] LIU S Y, CAI G J, TONG L Y, et al. Approach on the engineering properties of Lianyungang marine clay from piezocone penetration tests[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2008, 26(7): 189 - 210.
- [6] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 孔压静力触探(CPTU)测试成果影响因素及原始数据修正方法探讨[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5):

- 632 - 636.(CAI Guojun, LIU Songyu, TONG Liyuan, et al. General factors affecting interpretation and corrections of primary data for the piezocone penetration test(CPTU) data[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(5): 632 - 636.(in Chinese))
- [7] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Blackie Academic and Professional, 1997: 45 - 50.
- [8] CHUNG S F, MARK F R, SCHNEIDER J A. Effect of penetration rate on penetrometer resistance in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(9): 1 188 - 1 196.
- [9] ISSMGE. International reference test procedure(IRTP) for the cone penetration test(CPT) and the cone penetration test with pore pressure (CPTU)[C]// Proceedings of the XIIth ECSMGE. Amsterdam: [s. n.], 1999: 2 195 - 2 222.
- [10] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50021 - 2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50021 - 2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.(in Chinese))
- [11] TONG L Y, LIU S Y, DU G Y, et al. Current status of the cone penetration test in China and its future development[C]// Proceedings of Sessions of GeoShanghai 2006. Shanghai: [s. n.], 2006: 220 - 229.
- [12] 湖北省水利水电勘测设计院. 静力触探三种不同锥底面积探头对比试验报告[R]. 武汉: 湖北省水利水电勘测设计院, 1975.(Hubei Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Design. Comparison of three different base areas of cone penetration test[R]. Wuhan: Hubei Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Design, 1975.(in Chinese))
- [13] 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.(TANG Xianqiang, XIE Ying, XIE Shubin, et al. In-situ testing in ground engineering[M]. Beijing: China Railway Press, 1993.(in Chinese))
- [14] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G. Guidelines of geotechnical design using CPT and CPTU[R]. Columbia: University of British Columbia, 1988.
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10018 - 2003/J261 - 2003 铁路工程地质原位测试规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB10018 - 2003/J261 - 2003 Code for in-situ measurement of railway engineering geology[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003.(in Chinese))
- [16] TCHENG Y. Force portante des pieux[C]// Proceedings of the 5th ICSMFE. Paris: [s. n.], 1961: 201 - 211.
- [17] VREUGDENHIL R, DAVIS R, BERRILL J. Interpretation of cone penetration tests in multilayered soils[J]. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1994, 18(9): 585 - 599.
- [18] HIRD C C, JOHNSON P, SILLS G C. Performance of miniature piezocones in thinly layered soils[J]. Geotechnique, 2003, 53(10): 885 - 900.
- [19] FINKE K A, MAYNE P W, KLOPP R A. Piezocone penetration testing in Atlantic Piedmont residuum[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, 127(1): 48 - 54.
- [20] POWELL J J M, LUNNE T. A comparison of different sized piezocones in UK clay[C]// Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Osaka: [s. n.], 2005: 729 - 734.
- [21] HIRD C C, SPRINGMAN S M. Comparative performance of 5 cm<sup>2</sup> and 10 cm<sup>2</sup> piezocones in a lacustrine clay[J]. Geotechnique, 2006, 56(6): 427 - 438.
- [22] 孟高头, 张德波, 刘事莲, 等. 推广孔压静力触探技术的意义[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 314 - 318.(MENG Gaotou, ZHANG Debo, LIU Shilian, et al. The significance of piezocone penetration test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 314 - 318.(in Chinese))
- [23] 孟高头. 土体原位测试机制、方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997.(MENG Gaotou. Mechanism, method and engineering application of in-situ testing in soils[M]. Beijing: Geology Press, 1997.(in Chinese))
- [24] WROTH C P. The interpretation of in-situ soil tests[J]. Geotechnique, 1984, 34(4): 449 - 489.