

文章编号: 1001-4888 (2005) 02-0207-06

# 微型触探仪的研制及粉质粘土中的 静力触探试验研究

崔新壮<sup>1,2</sup>, 丁 桦<sup>1</sup>, 金 青<sup>2</sup>, 段祝平<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080; 2 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

**摘要:** 研制了一种新型的微型触探仪, 该仪器能对贯入阻力与贯入深度数据进行自动采集。同时为了进行微型静力触探试验研究, 研制了一套新颖的土样制作装置。通过用微型触探仪对粉质粘土进行静力触探试验发现, 触探曲线与锥头锥角没有必然的联系, 而且其初始段为直线段。对粉质粘土, 当锥头贯入到一定深度时, 锥头阻力将趋于稳定, 这是由不同围压下土体的不同破坏机理引起的。通过对触探曲线上的特征值与土力学参数之间的关系进行分析发现, 无量纲锥头阻力系数和  $\tan \phi$  ( $\phi$  为土的内摩擦角) 成近似的线性关系。另外, 还得到了锥头极限阻力与临界深度之间的经验关系。

**关键词:** 静力触探; 微型触探仪; 锥头阻力; 临界深度

**中图分类号:** TU413 **文献标识码:** A

## 1 引言

土作为一种地质材料, 其强度较低, 在取样过程中易受到扰动, 致使室内试验结果与土的实际参数之间有较大出入, 所以原位测试方法是获得土性参数的较准确的方法。静力触探试验 (static cone penetration test), 简称 CPT, 它将带有锥头的锥杆匀速贯入土中, 从而得到锥头阻力、侧摩阻力及锥头周围孔隙水压力等, 这里的锥头阻力  $q_c$  是指锥头单位最大横截面积上的阻力, 侧摩阻力是指锥杆上单位面积的摩擦力。利用测试结果, 静力触探可以作土层划分、辨别土性、确定土的物理力学性质及确定基础的承载力等, 并有较高的精度, 而且测试连续、快速、精度高, 所以成为目前应用最广泛的一种原位测试技术。笔者曾对前人在锥头阻力研究方面取得的一些重要研究成果和近期的进展进行了分析综述<sup>[1]</sup>。

但在对浅层土进行勘察时, 大型触探仪就显得笨重, 精度不易控制, 而且经济上也不划算。如在高速公路路基施工中, 路基被分层碾压, 为了对每层土进行跟踪测试, 传统的方法是, 不断地取土样, 进行室内实验, 不仅费时费力, 延误工期, 而且易对土样产生扰动, 影响测试精度。因为每层土厚度都不大, 所以用大型触探仪是不切实际的, 但若用微型触探试验 (简称 MCPT), 就能方便地对许多工程的质量进行跟踪控制与评估。所以很有必要研究一种令人满意的微型触探原位测试系统。

微型触探仪与大型触探仪的根本区别是锥头小, 一般靠人力就可贯入。由于尺寸效应等原因, 对微型触探仪, 不能照搬大型触探仪的触探规律。而且, 无论在实验还是应用方面, 目前对微型触探仪及其触探规律的研究相对较少, 特别在国内还很少有人对其进行较系统的研究。但国外已认识到它的重要性, 并做了一些研究与应用。早在 80 年代中期, 挪威土工所的 Rad 等 (1986)<sup>[2]</sup> 就用一种微型触探仪

\* 收稿日期: 2004 - 06 - 03; 修订日期: 2004 - 11 - 05

基金项目: 国家 973 项目 (2002CB412706) 和国土资源部三峡库区滑坡塌岸专题研究项目 4 - 5 资助

通讯作者: 崔新壮 (1974 - ), 男, 博士, 主要从事原位测试和桩基工程等方面的研究。E-mail: cuixz@sdu.edu.cn

来研究砂中水泥含量对贯入阻力的影响。近年来对微型触探仪的研究呈上升趋势。Kurup (1998)<sup>[3]</sup>研究了一种面向交通工程的电子微型触探仪,所用锥头的最大面积为  $2\text{cm}^2$ ,并将现场实测结果与  $10\text{cm}^2$  的标准锥头的结果进行了比较,发现锥头阻力提高了约 10%,而侧摩阻力及摩阻比(侧摩阻力与锥头阻力的比值)分别降低了 12%与 23%,并根据试验数据建立了锥头阻力系数与土不排水剪切强度的关系。Mohammad等(1999)<sup>[4]</sup>曾用  $2\text{cm}^2$  锥头来研究路基土的回弹模量,并发现与室内实验结果吻合很好。Bolton等(1999)<sup>[5]</sup>还将微型触探仪用在了离心机上。但是,以上研究都是针对土的某一特定参数来进行的,并没有对触探规律进行较深入的研究。所以,本文首先对原有的一种机械式微型触探仪进行了改进,然后用它对粉质粘土进行了一系列触探试验,并对触探规律进行了分析。

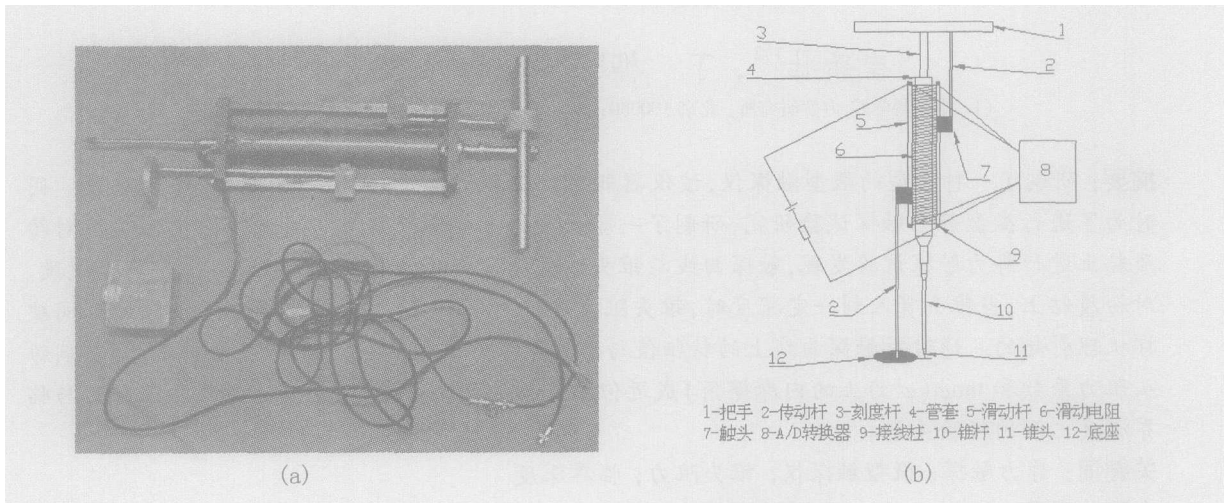


图 1 微型触探仪

Fig 1 Miniature cone penetrometer

## 2 微型触探仪的研制及其原理

原有机式微型触探仪不能对贯入阻力及贯入深度数据进行自动采集,不便对整个触探过程进行跟踪,故我们对其进行了改进,改进后的仪器如图 1所示。图 1中的 2、5、6、7、8、9、10、12等部件是新增制的,目的是为了对贯入阻力及贯入深度数据进行自动采集。A/D转换器插入计算机插槽,通过软件来控制数据采集。管套 4内置一弹簧,弹簧的压缩系数事先已经标定好。试验时,在人力作用下,把手 1及刻度杆 3下移,压缩弹簧。同时靠近把手的触头 7要沿滑动电阻 6相对滑动,滑动量等于弹簧的压缩量,它们可以通过触头的电位变化换算得到,最终可由弹簧的压缩系数得到贯入阻力。为了得到贯入深度,试验前将底座 12平放于地面上,试验时随着锥头的向下贯入,靠近底座的触头将相对于滑动电阻向上运动,通过测量该触头的电位变化就可得到贯入深度值。该仪器已申请了国家专利(专利号为:00264891.1),它非常轻便,总重为 3.5kg,锥杆直径为 7.3mm,长度为 150mm,锥头可更换。

## 3 土样的制作

试验所用土样取自北京四环路保福寺段路基,其最优含水量为 14.2%,最大干密度为  $1.68\text{g}/\text{cm}^3$ ,塑限为 15.15%,塑性指数为 10.87,根据建筑地基基础设计规范应为粉质粘土。试验时,用孔径为 5mm 的筛子对土样进行了筛选。通过改变含水量和压实度来得到不同的土样。

在对土进行静力触探试验前,先进行了三轴剪切试验,以便得到土的强度指标  $c$ 和  $\phi$ 。静力触探试验时所用土样的含水量和压实度须保证与三轴剪切试验中所用的相同,为此特研制了一套试样制作设备,该设备包括盛土器与捣土器两部分。

盛土器和捣土器的装配简图如图 2所示。盛土容器是一个内径为 190mm,高为 240mm的圆桶。捣土器是在加工有螺纹的圆管下端焊接一直径为 190mm的捣土圆钢板,除此之外,螺纹圆管从下到上还有能够转动的导向圆板、控制圆板及背母圆板。导向圆板的直径比盛土器的内径略小,其作用是防止

捣土器在捣土时发生歪斜导致土压实不均;控制圆板的直径比盛土器的直径大,通过对它旋转可控制每层土压实后的高度,若已知土的含水量及要求的压实度,就可算得每层土的重量;背母圆板在控制圆板之上,起一个背母的作用,以压紧控制圆板,防止捣土时控制圆板轻微转动。试验所用土样总高度为 20cm,分 10 次压实。土样制作时,根据土的含水量及压实度算得每层土的重量,然后将它倒入盛土器并铺平,调整好导向板及控制板的位置,使背母板压紧控制板,然后在捣土器最上端放一铁块,用锤打击,使捣土器下沉来压实盛土器内的土,直到控制板与盛土器完全接触为止。另外,在铺上层土之前需要将下层土打毛。

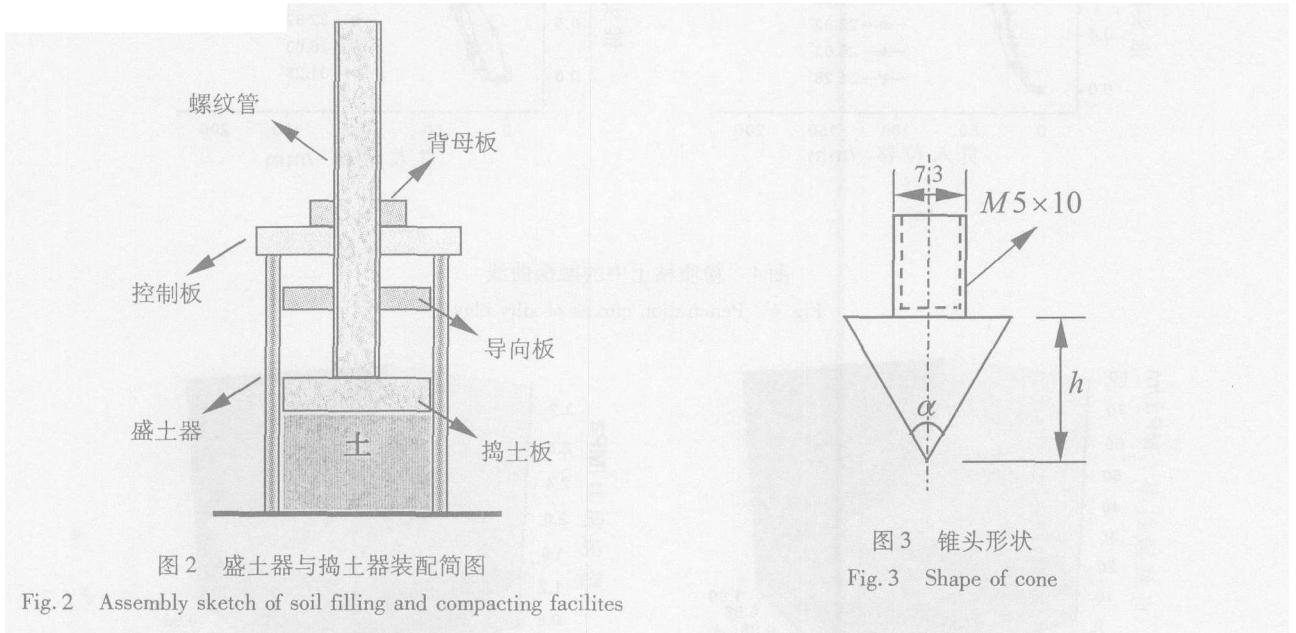


图 2 盛土器与捣土器装配简图

Fig. 2 Assembly sketch of soil filling and compacting facilities

图 3 锥头形状

Fig. 3 Shape of cone

### 4 试验结果及规律分析

触探试验所用锥头的几何形状如图 3 所示。试验中共用到四种锥头,最大直径都为 14mm,锥角分别为 19.85、22.62、26.03 及 31.28 度。因为锥头最大直径大于锥杆直径,所以锥杆上的侧摩阻力可以忽略。另外,盛土器与锥头的直径比约为 13.6,故盛土器的边界影响可以忽略。

用微型触探仪进行触探试验时,用人力将锥头以大约 2cm/s 的速度贯入土中。图 4 所示是由粉质粘土中的静力触探试验得到的典型触探曲线,即贯入阻力一位移曲线。可以发现,对粉质粘土,触探曲线与锥角关系不大,无明显的依赖规律。据前人的试验知<sup>[3]</sup>:对砂土,锥头阻力随锥角会稍有变化。这可能是因为不同的锥角引起破坏区内土的围压不一样,最终导致由砂土内摩擦角引起的土的强度发生一些变化。但对粉质粘土,内摩擦角相对较小,这种变化就不很明显。

锥头未完全进入土中时,触探规律较差,在此不予考虑。锥头完全进入土中以后,触探曲线的初始段是直的。直线段斜率随含水量增大而减小,随压实度增大而增大,如图 5 所示。

前人对锥头阻力  $q_c$  的研究主要是对砂土和不排水饱和粘土进行的<sup>[1]</sup>。我们通过用微型触探仪对粉质粘土进行触探试验发现,与大型触探仪在砂土中触探一样<sup>[1]</sup>,锥头阻力同样存在“临界深度”现象,即当锥头贯入到一定深度后,锥头阻力将不再增加或增加变缓。这一深度称为临界深度  $h_{cr}$ ,对应的锥头阻力称为锥头极限阻力  $q_{ci}$ 。 $q_c$  随含水量增大而减小,随压实度增大而增大,如图 6 所示。

临界深度的出现与不同围压下硬粉质粘土的破坏机制不同有关。图 7 所示分别是无侧限与围压为 3kPa 两种情形对应的土应力—应变曲线及破坏性状。可见,在无侧限情形下,试样沿某剪切带发生局部剪切破坏,在剪切带最终形成后,材料失去稳定性,属脆性破坏,土体沿剪切带发生整体滑移,并伴随着剪胀发生;而在围压为 3kPa 情形下,土体发生塑性流动,无剪切带形成。由此,我们可以推断,锥头在浅贯入时,由于围压较小,土体发生局部剪切,整体向侧上方移动,并伴有剪胀;而当锥头贯入到一定深度时,土体主要靠发生压缩变形来提供锥头贯入排开的体积。所以土体在浅贯入与深贯入两种情形下

的破坏机理不同,导致试验中所用的非饱和硬粉质粘土在触探时会有“临界深度”现象发生。

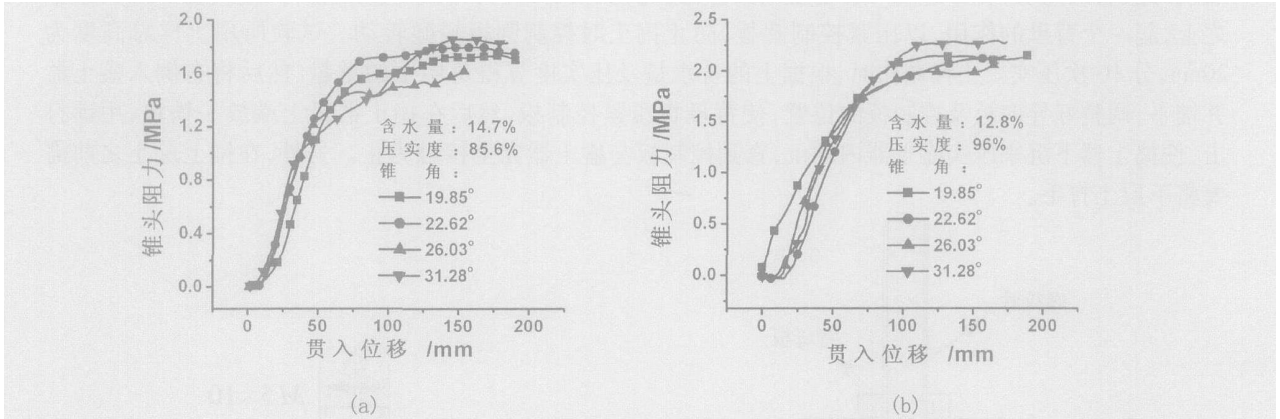


图4 粉质粘土中的触探曲线  
Fig.4 Penetration curves of silty clay

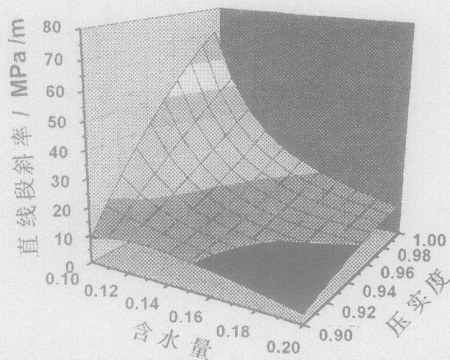


图5 直线段斜率与含水量及压实度的关系  
Fig.5 Relations of slope of straight segment with water content and compaction degree

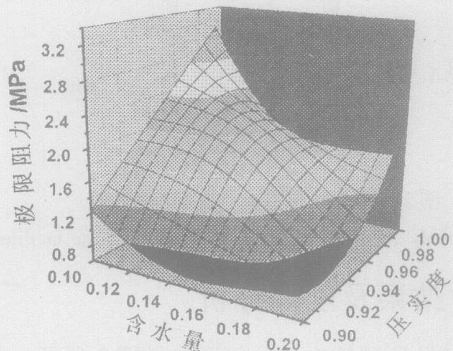


图6 极限贯入阻力与含水量及压实度的关系  
Fig.6 Relations of limit penetration resistance with water content and compaction degree

将触探曲线的直线段斜率用土的容重除,可得到无量纲锥头阻力系数  $N_q$ 。对试验数据分析发现,  $N_q$  和  $\tan \phi$  成近似的线性关系,如图8所示。

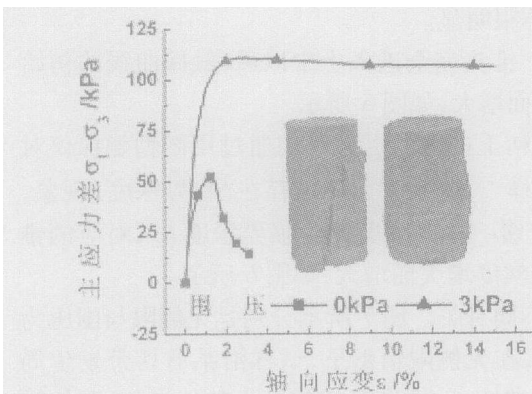


图7 土的应力-应变关系及破坏形态  
Fig.7 Stress-strain relation and failure conformation of soil

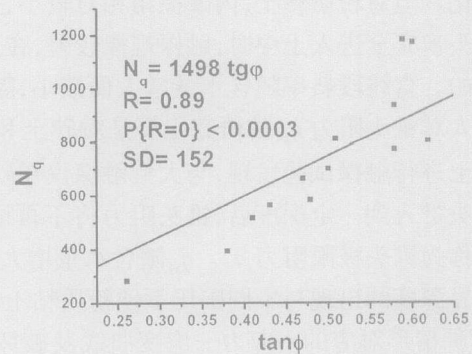


图8  $N_q$  与  $\tan \phi$  的关系  
Fig.8 Relation between  $N_q$  and  $\tan \phi$

临界深度与极限阻力之间有密切的关系,法国 Grenoble 大学的学者<sup>[6]</sup>与国内魏杰等<sup>[7]</sup>曾分别给出了大型触探仪在砂土中贯入对应的  $q_{cl}$  与  $h_{cr}$  之间的关系。

在对粉质粘土的触探试验中,影响  $q_{cl}$  的因素,可以用下面函数来表示:

$$q_{cl} = F(c, \dots, h_{cr}) \tag{1}$$

对上式无量纲化,得:

$$\frac{q_{cl}}{c} = f\left(\frac{h_{cr}}{c}, \tan \dots\right) \tag{2}$$

根据试验数据,对上式进行拟合可得:

$$\frac{q_{cl}}{c} = -26.98 + 481.5 \frac{h_{cr}}{c} + 152.27 \tan \dots \tag{3}$$

拟合效果如图 9 所示。可见,式 (3) 的拟合效果是令人满意的。

### 5 结论

本文首先对原有的一种机械式微型触探仪进行了改进,改进后的仪器能对贯入阻力及贯入深度数据进行自动采集,而且,为了能用微型触探仪进行试验,研制了一套土样制作设备。通过对粉质粘土进行触探试验发现,触探曲线与锥头的锥角关系不大。粉质粘土中触探曲线的初始段为直线段,但锥头贯入到一定深度后,锥头阻力将趋于稳定,即存在“临界深度”现象。通过分析知,“临界深度”现象的产生与不同围压下土体的破坏机制不同有关。无量纲锥头阻力系数  $N_q$  和  $\tan$  成近似的线性关系。另外,还得到了锥头极限阻力与临界深度等的经验关系。

### 参考文献:

- [1] 崔新壮,丁桦. 静力触探锥头阻力的近似理论与实验研究进展 [J]. 力学进展, 2004, 34 (2): 251 ~ 262 (Cui Xinzhuang, Ding Hua Approximate Theoretical and Experimental Research Development of Cone Penetration Resistance in Static Cone Penetration Test Advances in Mechanics, 2004, 34 (2): 251 ~ 262 (in Chinese))
- [2] Rad N S, Tuncay, M T Effect of Cementation on the Cone Penetration Resistance of Sand [C]. In: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Proceedings of In Situ 86, Blacksburg Rotterdam: A A Balkema Publisher, 1986: 926 ~ 948
- [3] Kurup P U. Calibration of a Miniature Cone Penetrometer for Highway Applications [J]. Transportation Research Record, 1998, 2 (1614): 8 ~ 13
- [4] Mohammad L N, Titi H H, Herath A. Evaluation of Resilient Modulus of Subgrade Soil by Cone Penetration Test [J]. Transportation Research Record, 1999, 1 (1652): 236 ~ 245
- [5] Bolton M D, Gui M W, Gamier J F, et al Centrifuge Cone Penetration Tests in Sand [J]. Geotechnique, 1999, 49 (4): 543 ~ 552
- [6] 唐贤强,叶启民. 静力触探 [M]. 北京:中国铁道出版社, 1981 (Tang Xianqiang, Ye Qimin Cone Penetration test Beijing: China Railway Publishing House, 1981 (in Chinese))
- [7] 魏杰. 砂土静力触探探头阻力增量弹塑性混合解 [J]. 水利学报, 1993, 9, 增刊: 23 ~ 29 (Wei Jie Incremental Elastoplastic Mixture Solution of Cone Resistance in CPT for Sand Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 9, Supplement 23 ~ 29 (in Chinese))

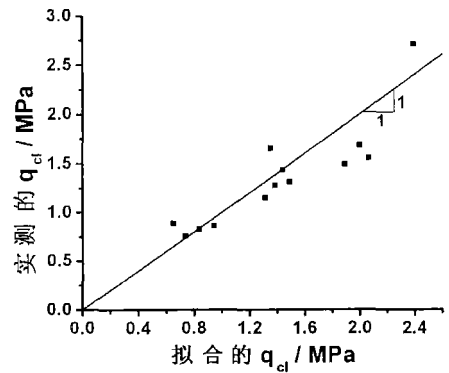


图 9 拟合效果  
Fig 9 Fitting effect

## Development of Miniature Cone Penetrometer and Study on MCPT in Silty Clay

CUIXin-zhuang<sup>1,2</sup>, DNGHua<sup>1</sup>, JNQing<sup>2</sup>, DUANZhu-ping<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** A new kind of miniature cone penetrometer was developed in order to acquire automatically the cone penetration resistance and depth in MCPT. At the same time, a new experimental facility was developed to make soil samples for MCPT. A series of penetration tests for silty soil were carried out with the miniature cone penetrometer. It is found that the penetration curve has no relation with the angle of cone and its initial segment is straight. For silty clay, cone penetration resistance will tend to be changeless when the penetration depth attains to a certain value. This is caused by the different failure mechanism of soil under different lateral compressive stresses. The relation between the characteristic values of penetration curve and soil mechanics parameters was analyzed. It is found that the dimensionless cone resistance factor is linear with  $\tan \varphi$  where  $\varphi$  is the internal friction angle of soil. In addition, the experiential relation between limit cone penetration resistance and critical depth is obtained.

**Key words:** CPT; miniature cone penetrometer; cone penetration resistance; critical depth