

实验室用小型单桥静力触探探头的标定

陈建峰^{1,2}, 柳军修², 马君²

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为了测试实验室模型试验土的力学性质, 制作了小型化单桥静力触探探头, 对其进行了量测系统的标定试验, 比贯入阻力与土的不排水抗剪强度统计关系研究, 并与生产用静力触探测试结果和现有经验公式作了对比分析. 试验和研究结果表明: 本静力触探探头量测系统标定曲线呈线性, 其灵敏度为 $262 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$; 本静力触探与生产用静力触探测得的比贯入阻力接近, 且前者的灵敏度高于后者; 得出的饱和重塑黏性土比贯入阻力与不排水抗剪强度统计关系公式与交通部一航局的经验公式很接近. 本静力触探探头可用于实验室饱和重塑软黏性土力学性质的比较及不排水抗剪强度值的测试.

关键词: 静力触探试验; 单桥探头; 标定; 土工模型试验; 经验公式

中图分类号: TU41

文献标识码: A

Calibration of a Miniature Cone Penetrometer for Geotechnical Model Test

CHEN Jianfeng^{1,2}, LIU Junxiu², MA Jun²

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A miniature single bridge cone penetrometer was manufactured to measure the mechanical properties of soils in the geotechnical model tests. Such tests and researches were carried out to calibrate this miniature penetrometer as calibration of the penetrometer's measuring system, investigation of statistical relationship between specific penetration resistance (p_s) and undrained shear strength (c_u), contrast of penetration test results between the miniature and standard penetrometers, and comparison of this statistical relationship with current empirical equations. The results show that the calibration curve of the miniature penetrometer's measuring system is linear with $262 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ of its sensitivity. Penetration resistance-depth curve for

a remoulded clay foundation by the miniature penetrometer is close to, but more delicate than the curve by standard penetrometer. The p_s - c_u relationship obtained by authors is consistent with an empirical equation proposed by China Communication First Design Institute of Navigation Engineering. Thus, this miniature penetrometer can be used for comparison of the mechanical properties of saturated remoulded clays in laboratory as well as measuring their undrained shear strength values.

Key words: cone penetration test; single bridge cone penetrometer; calibration; geotechnical model test; empirical equation

岩土工程中, 土体力学性质指标可以通过两个途径获得: 一是取土进行变形和强度试验; 二是采用原位测试手段在不扰动土样的情况下进行测试. 但实验室土工模型试验通常采用相似比例缩小尺寸, 模型土体体积小、成样不均匀, 取土进行变形和力学试验存在土样少、代表性差、无法在模型试验过程中进行测试等问题, 且存在取土过程中土样扰动和应力释放的缺点. 因此, 取模型试验土进行土工试验测试土的力学性质指标并不理想.

若直接采用工程勘察生产用的原位测试仪器对土工模型试验土体进行原位测试也不合适. 生产用的原位测试仪器一般尺寸较大, 对有限厚度土体不能取得足够的代表性数据, 并存在挤土扰动问题. 因此, 需考虑将原位测试仪器小型化. 英国剑桥大学的学者在采用小型化十字板仪(板头直径 18 mm, 高度 14 mm)测试离心模型试验中模型地基土力学性质方面已作了一些尝试: Davies 等^[1]采用小型十字板仪测试填筑路堤离心模型试验中软土地基的不排水抗剪强度, 据此分析路堤的稳定性; Phillips 和 Springman^[2-3]通过小型十字板仪测试, 得出桩在横

向受荷下地基土不排水抗剪强度、竖向有效应力以及超固结比之间的经验公式; Sharma 等^[4]为保证 3 组离心模型试验地基土力学性质的一致性,采用小型十字板仪对各组模型地基土进行了测试。

十字板仪仅能获得不连续点上的数据,而相比较而言,静力触探仪适用土类范围较广,测试灵敏度高,可以对地基土进行连续贯入,并可获得贯入深度范围内的连续测试值。目前,国内外对静力触探在勘察中的应用研究已作过很多研究^[5-12],而将静力触探小型化并用于实验室土工模型试验土力学性质的测试研究还尚未见报导。

静力触探仪的主要器件是静力触探探头。本课题制作了小型化单桥静力触探探头,进行了量测系统的标定、比贯入阻力与饱和重塑软黏土不排水抗剪强度统计关系研究,以及与生产用静力触探测试结果和现有经验公式作了对比分析,以便能将其用于实验室土工模型试验土的力学性质测试。

1 小型单桥静力触探探头

静力触探仪探头分双桥探头和单桥探头。双桥探头能同时测出锥尖阻力 q_c 和侧壁摩阻力 f_s 。单桥探头结构简单一些,只测定比贯入阻力 p_s ,其大小为探头贯入土中时锥尖和侧壁所受的合力(F)与锥头截面面积之比,反映了锥尖阻力和侧壁摩阻力的共同作用。单桥探头在我国发展较早,在工程勘察生产中得到广泛应用,已积累了较丰富的经验。表 1 为生产中常用的单桥静力触探探头规格。

表 1 常用的静力触探单桥探头规格

Tab.1 The dimensions of single bridge cone penetrometers

类型	锥底直径/ mm	锥底面积/ cm ²	有效侧壁长度/ mm	锥角/(°)
I	35.7	10	57	60
II	43.7	15	70	60
III	50.4	20	81	60

本课题制作的小型单桥静力触探探头如图 1 所示。其锥底直径为 25.2 mm,锥头面积 5 cm²,有效侧壁长度 40.3 mm,锥角 60°。

2 探头标定

2.1 量测系统标定

小型静力触探探头采用全桥电路电阻应变式。

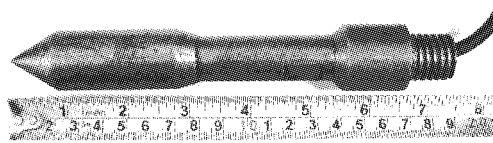


图 1 小型静力触探探头

Fig.1 Miniature cone penetrometer

将小型静力触探探头放到专用的测力计上进行标定,获得力 F 与电阻应变仪输出的应变值 ϵ 之间的线性关系,如图 2 所示,标定公式为

$$F = 1.9072 \times 10^{-6} \epsilon \quad (1)$$

将式(1)中力按探头锥头面积 5 cm² 换算成应力值,则可得到本小型静力触探探头灵敏度为 262×10^{-12} Pa⁻¹。

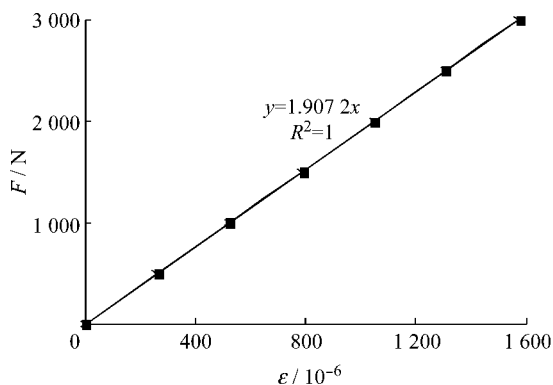


图 2 量测系统标定曲线

Fig.2 Calibration curve of measurement system of the penetrometer

2.2 比贯入阻力与不排水抗剪强度统计关系

静力触探的贯入速率较快,在饱和软黏土中贯入时土体处于不排水状态(即内摩擦角 $\varphi_u = 0$),因此用其量测黏性土的不排水抗剪强度是一种可行的方法。目前,国内多家勘察单位通过大量的现场工程勘察测试数据,归纳出单桥静力触探比贯入阻力 p_s 与黏性土不排水抗剪强度 c_u 之间的统计关系,其相关性都很理想。表 2 列出了这些勘察单位提出的经验公式^[10]。

为建立小型静力触探比贯入阻力与土工模型试验土不排水抗剪强度之间的统计关系,本课题采用上海地区第③层淤泥质粉质黏土制备重塑土进行该统计关系的标定试验。将粉质黏土风干粉碎后过孔径为 2 mm 的筛子,风干后土的相对密度为 2.73,含水率为 3%,孔隙比为 1.71。对风干粉质黏土进行击实试验,击实试验曲线见图 3,测得最优含水率为 18.7%,最大干密度为 $1.74 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

表2 比贯入阻力与不排水抗剪强度之间的经验公式

Tab.2 Empirical equation between specific penetration resistance and undrained shear strength kPa

关系式	适用条件	关系式来源
① $c_u = 0.069 6 p_s - 2.7$	$300 \leq p_s \leq 1\ 200$	武汉联合小组
② $c_u = 0.054 3 p_s + 4.8$	$100 \leq p_s \leq 800$	四川建筑研究所
③ $c_u = 0.050 0 p_s + 1.6$	$p_s < 1\ 500$	铁道部第四设计院
④ $c_u = p_s / 20$	$p_s < 1\ 200$	铁道部第三设计院
⑤ $c_u = 0.030 8 p_s + 4.0$	$100 \leq p_s \leq 1\ 500$	交通部一航局

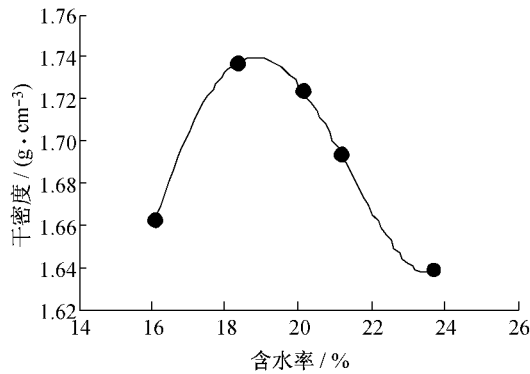


图3 击实试验曲线

Fig.3 Compaction test curves

将风干粉质黏土分层填入直径为 150 mm、长为 300 mm 制样筒中,按拟定的含水率添加水,采用击实仪以不高于该含水率下最大干密度所需击实能量进行均匀击实.如此获得不同含水率和密度的共 27 个重塑土试样.将重塑土试样进行抽真空饱和.

对每一饱和重塑土试样,用小型静力触探仪以 $1.2\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率贯入其中,同时计算机自动记录静态应变仪的读数.根据前述量测系统标定曲线获得比贯入阻力 p_s .由于每一重塑土试样制样均匀,在贯入过程中,比贯入阻力测值也很均匀.对每一饱和和重塑土试样同时用环刀取样进行快剪试验,获得不排水抗剪强度 c_u 值.

将 27 个试样的比贯入阻力及其不排水抗剪强度值点绘于图 4 中,采用最小二乘法拟合得到室内饱和和重塑土的比贯入阻力与不排水抗剪强度之间的统计关系式如下:

$$c_u = 0.027 2 p_s + 4.927 2 \quad (2)$$

其相关性 $R^2 = 0.915 6$.

2.3 与生产用静力触探测试结果比较

将小型静力触探探头与生产用静力触探探头对同一重塑土地基进行连续贯入对比试验.采用的生产用静力触探探头为表 2 中 I 型规格.

仍采用前述风干粉质黏土,在尺寸为 $60\text{ cm} \times 40$

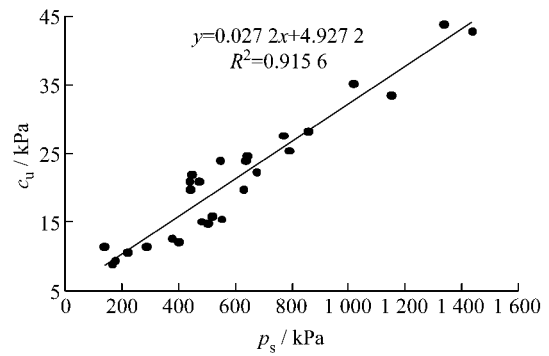


图4 饱和重塑土比贯入阻力与不排水抗剪强度统计关系
Fig. 4 Statistical relationship between specific penetration resistance and undrained shear strength for saturate remoulded clay

$\text{cm} \times 50\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高)模型箱中制备成饱和和重塑土地基,再在其表面施加 8 kPa 左右均布荷载进行重塑土地基的固结.固结后的重塑土地基物理力学性质指标如表 3 所示.

表3 重塑土地基物理力学性质

Tab.3 Physico-mechanical properties of foundation soil

名称	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水率 $w / \%$	塑性指数 I_P	抗剪强度 c_u / kPa
地基土	1.774	46.5	16.1	8.5

将小型静力触探探头和生产用静力触探探头分别以 $1.2\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率贯入重塑地基土中进行对比试验.图 5 为重塑土地基静力触探对比试验图.

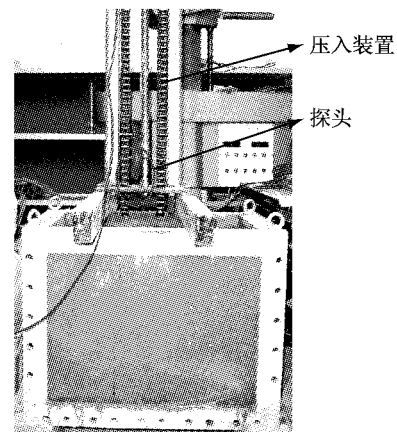


图5 重塑土地基静力触探对比试验图

Fig.5 Comparative penetration tests in remoulded foundation

图 6 为小型静力触探和生产用静力触探两者比贯入阻力对比曲线,图中也列出了两者的差值曲线.由图可见,小型静力触探比贯入阻力略小于生产用静力触探值,两者差值平均约为 20 kPa.将该差值代

入公式(2),可以看到其引起的不排水抗剪强度的变化值仅 0.5 kPa 左右,影响很小.另外还可以从图 6 中看到,小型静力触探比贯入阻力变化多成折线状,而生产用比贯入阻力变化成阶梯状,显示前者的灵敏度高于后者.

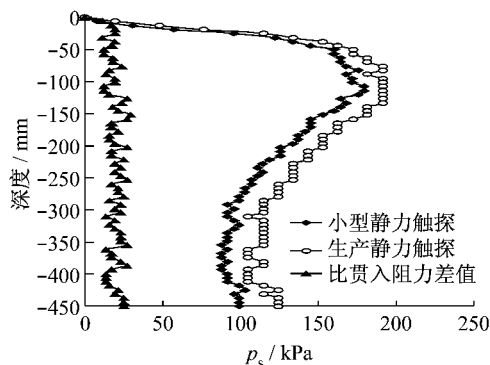


图 6 比贯入阻力对比曲线

Fig. 6 Comparison of specific penetration resistances measured by the miniature and standard cone penetrometers

2.4 与现有经验公式比较

图 7 为本文得出的公式(2)与表 2 中现有经验公式的比较曲线.由图可见,当比贯入阻力 $p_s > 200$ kPa 时,本文经验公式小于现有经验公式,但与交通部一航局的经验公式很接近.交通部一航局经验公式是对位于天津塘沽新港地区的软土进行静力触探获得的.天津塘沽的软土灵敏度高,强度低^[11-12],这与本文淤泥质粉质黏土制备的重塑土有一定的相似性,故两者较接近.当比贯入阻力 $p_s < 200$ kPa 时,本文经验公式与表 2 中③,④,⑤经验公式都较接近.

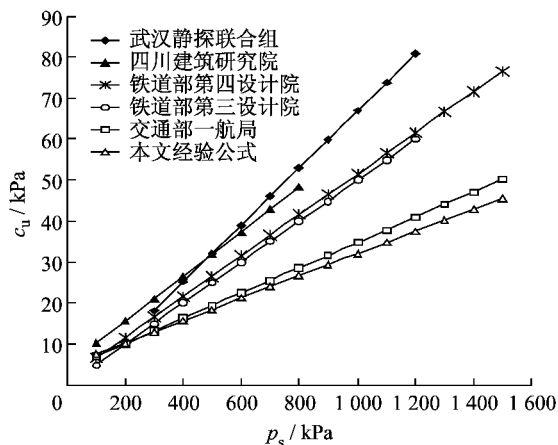


图 7 各经验公式比较曲线

Fig. 7 Comparison of empirical relationships between specific penetration resistance and undrained shear strength

将图 6 中小型静力触探所测得的比贯入阻力值分别代入表 2 中③,④,⑤经验公式和本文公式,获得如图 8 所示的不排水抗剪强度对比曲线.由图 8 可见,本文公式与现有 3 种经验公式接近,其中与交通部一航局经验公式基本吻合.

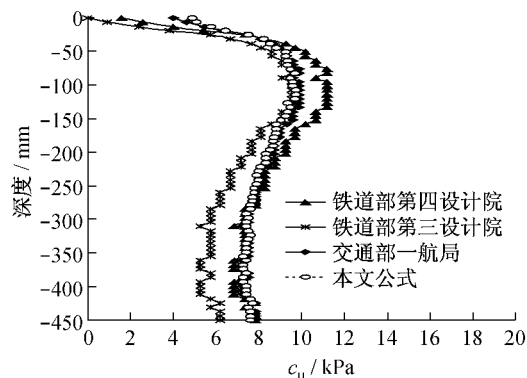


图 8 不排水抗剪强度对比曲线

Fig. 8 Comparison of undrained shear strengths values from various empirical relationships

3 结论

本文对一种小型化单桥静力触探探头进行了量测系统的标定、比贯入阻力与饱和重塑软黏土不排水抗剪强度统计关系研究,以及与生产用静力触探测试结果和现有经验公式作了对比分析,得出如下结论:

(1) 通过对 27 个饱和重塑土试样比贯入阻力与不排水抗剪强度测试,采用最小二乘法拟合得到两者之间的统计关系为 $c_u = 0.0272 p_s + 4.9272$,相关性很好.

(2) 通过小型静力触探探头与生产用静力触探探头对同一饱和重塑土地基进行连续贯入对比试验,显示小型静力触探与生产用静力触探测得的比贯入阻力值接近,且前者的灵敏度高于后者.

(3) 本文经验公式与交通部一航局的经验公式很接近.这与两者试验土样高灵敏度、低强度特性有一定关系.

(4) 该小型单桥静力触探探头可用于实验室饱和重塑软黏土力学性质的比较及不排水抗剪强度值的测试.今后将采用本探头对其他土性的测试及其适用性作进一步研究.

(下转第 588 页)