

应用孔压静力触探 (CPTU) 确定软土压缩模量的试验研究

童立元¹, 涂启柱², 杜广印¹, 蔡国军¹

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 回顾了采用孔压静力触探 (CPTU) 测试参数确定压缩模量 (E_s) 的现有方法, 并在江苏选择 3 个高速公路软土地场进行了 CPTU 试验, 以高质量原状土样固结试验得到的 E_s 值作为参考值评估了各经验方法的预测有效性, 进而提出了新的江苏典型软土锥尖阻力 - 压缩模量 E_s 相关关系; 同时采用不同 CPTU 测试参数计算的 E_s 值预测了某条高速公路软基的沉降量, 并和现场沉降观测值进行了比较, 结果表明: 基于净锥尖阻力 q_n 的 Senneset (1989) 方法能够很好的预测 E_s 值; 同样, 基于 CPTU 测试参数预测的高速公路软基沉降量也接近于现场实测沉降, 验证了应用 CPTU 确定软土 E_s 值进而预测软基沉降的可靠性。

关键词: 孔压静力触探; 软土; 压缩模量; 沉降预测

中图分类号: TU447 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0569-04

作者简介: 童立元 (1975-), 男, 副教授, 博导, 主要从事特殊地基处理、地下工程等方面的科研教学工作。E-mail: seutunnel@gmail.com.

Determination of confined compression modulus of soft clay using piezocene penetration tests

TONG Li-yuan¹, TU Qi-zhu², DU Guang-yin¹, CAI Guo-jun¹

(1. Institution of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210008, China, 2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The existing interpretation methods for piezocene penetration tests (CPTU) are reviewed for prediction of the constrained compression modulus (E_s). Three expressway sites in Jiangsu Province are selected for this study. In each site, CPTU tests are performed supplemented by consolidation tests using high-quality undisturbed soft soil samples. Then, E_s -predicted methods based on the CPTU tests are compared and evaluated. The new correlations are also developed to predict the values of E_s from the cone tip resistance (q_c), corrected cone tip resistance (q_i) and net cone tip resistance (q_n) for soft clay in Jiangsu Province. Furthermore, the correlations are verified by comparing the total settlements predicted from CPTU and the measured settlements for one selected expressway site. The results show that the Senneset et al (1989) method based on the net cone resistance is able to predict E_s better than the other methods. The predicted total settlements based on CPTU parameters show a better agreement with the measured ones. Accordingly, the reliability of the application of CPTU for E_s and settlement prediction is verified.

Key words: piezocene penetration test; soft clay; compression modulus; settlement prediction

0 引言

在软基上修筑高速公路等长大线性工程, 沉降问题至关重要。计算过程中需要的软土压缩模量 (E_s) 等参数可采用室内土工试验和原位测试确定, 或利用现场沉降观测资料反算得到。其中, 孔压静力触探 (CPTU) 作为一种简捷、连续、方便、可靠的新型原位测试技术^[1], 可以沿勘探深度提供多个连续读数剖面: 锥尖阻力 q_i , 侧壁摩阻力 f_s 和孔隙水压力 u_2 ,

得到了广泛的应用, 目前已经建立了多个地区的 CPT 测试参数与土体参数的经验公式, 并列入相应规范。

本文在江苏选择 3 条高速公路进行了软基孔压静力触探 (CPTU) 试验, 并通过与高质量土样室内试验结果的比较, 评价了各种基于 CPTU 测试预测压缩模量 E_s 方法的有效性, 并提出相应的经验公式, 进而

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40702047)

收稿日期: 2013-07-17

表 1 基于 CPTU 锥尖阻力评价土侧限模量的方法汇总^[2-4]Table 1 Summary of different CPTU methods for predicting E_s ^[2-4]

方法	相关关系	CPTU 参数	相关系数	备注
Sanglerat	$E_s = a_c \times q_c$	q_c	a_c 取决于土类和 q_c 大小	
Jones 和 Rust	$E_s = a_c \times q_c$	q_c	$a_c = 2.75 \pm 0.55$	南非冲积相黏土
Senneset 等	$E_s = 2q_t$	$q_t = q_c + u_2(1-a)$	线性关系	$q_t < 2.5 \text{ MPa}$
Senneset 等	$E_s = 4q_t - 5$	$q_t = q_c + u_2(1-a)$	线性关系	$2.5 < q_t < 5 \text{ MPa}$
Senneset 等	$E_{s-oc} = a_o \times q_n$	$q_n = q_t - \sigma_{vo}$	$a_o = 10 \pm 5$	超固结土
Senneset 等	$E_{s-nc} = a_n \times q_n$	$q_n = q_t - \sigma_{vo}$	$a_n = 6 \pm 2$	正常固结土
Kulhawy 和 Mayne	$E_s = 8.25 \times q_n$	$q_n = q_t - \sigma_{vo}$	8.25	

通过将基于 CPTU 预测沉降值与实测沉降值的比较，对试验结果进行了验证。

1 方法综述

目前，已经提出了许多方法来建立CPT/CPTU 测试参数（如锥尖阻力 q_c ，修正锥尖阻力 q_t ，净锥尖阻力 q_n ）和压缩模量 E_s 之间的相关关系，如表1所示。

2 试验结果与分析

2.1 试验概况

在江苏连盐、淮盐与连临高速3个试验场地进行了 CPTU 试验及现场取样室内试验。取样时，要求在 CPTU 试验孔附近采用固定活塞式薄壁取土器取出高质量的土样，沿深度每1 m 的间隔进行取样用于室内固结测试。

现场试验采用美国引进的多功能数字式车载 CPTU 系统。探头规格为：锥角 60° ，锥底截面积 10 cm^2 ，侧壁摩擦筒表面积 150 cm^2 ，孔压元件厚度 5 mm ，位于锥肩位置 (u_2 位置)，探头的有效面积比 $a = 0.8$ 。下图1为连盐高速 CPTU 典型试验曲线。

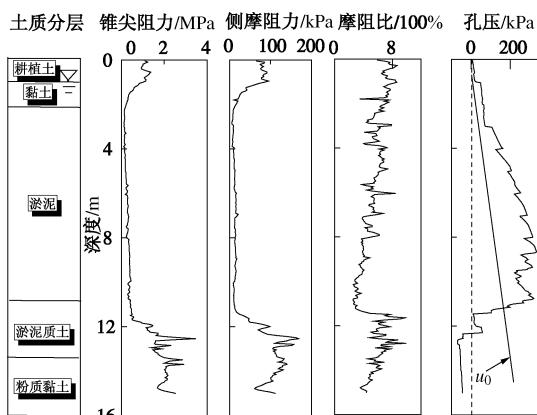


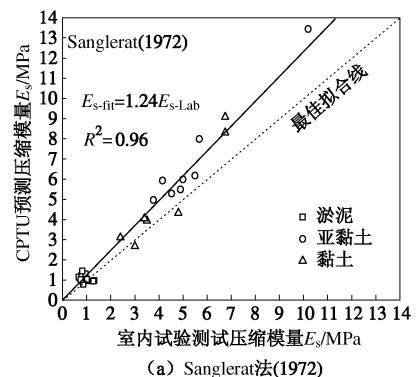
图 1 连盐高速场地典型 CPTU 试验结果

Fig. 1 Typical piezocone profiles at Lianyungang-Yancheng highway site

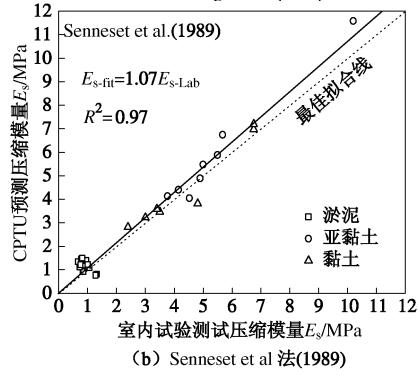
2.2 试验结果分析

在 CPTU 试验孔附近取高质量的土样，通过室内

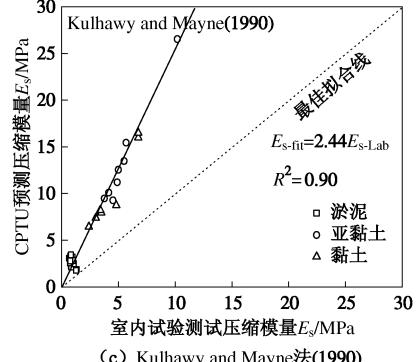
一维固结试验得到不同土层的压缩模量 E_{s-Lab} ，并根据 CPTU 测试的锥尖阻力值，采用表1中不同的 CPTU 预测方法在相同深度预测压缩模量 E_{s-P} 值。上述试验及预测结果的比较见图2 (a) ~ (d)。图中也提供了 E_{s-P} 对 E_{s-Lab} 的最佳拟合线 E_{s-fit} 和相应的相关系数 R^2 ， R^2 表示的是线性回归模型的测定系数，其在 0~1 范围内，越接近 1 说明拟合程度越好。



(a) Sanglerat法(1972)



(b) Senneset et al 法(1989)



(c) Kulhawy and Mayne法(1990)

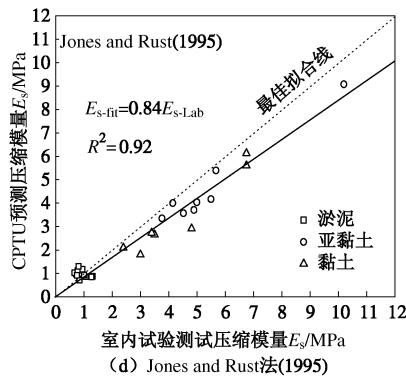


图 2 基于 CPTU 预测压缩模量 E_{s-p} 值和室内试验压缩模量 E_{s-Lab} 测试值比较

Fig. 2 Comparison of E_{s-p} values predicted from CPTU and E_{s-Lab} values from consolidation tests

根据试验场地 CPTU 测试资料, 对 E_{s-p}/E_{s-Lab} 的算术平均值和标准差进行了计算, 见表 2。分析说明: Sanglerat 法与 Kulhawy 和 Mayne 法过高的预测了 E_s 值, 尤其是 Kulhawy 和 Mayne 法, 其 $E_{s-fit}/E_{s-Lab}=2.44$, $R^2=0.90$, 从 E_{s-p}/E_{s-Lab} 的平均值也可以看出该方法过高的预测了 E_s 值; Jones 和 Rust 法过低地预测 E_s 值, $E_{s-fit}/E_{s-Lab}=0.84$, $R^2=0.92$; Senneset 法能够很好的预测 E_s 值, 其 $E_{s-fit}/E_{s-Lab}=1.07$, $R^2=0.97$ 。但是, 利用 CPTU 测试预测压缩模量, 其相关系数很大程度上依赖于锥尖阻力的范围和土类, 具有地区性。

表 2 不同 CPTU 方法预测 E_s 结果汇总

Table 2 Summary of E_s values predicted by different CPTU methods

方法	最佳拟合结果		E_{s-p}/E_{s-Lab}	
	E_{s-fit}/E_{s-Lab}	R^2	平均值	标准差
Sanglerat	1.24	0.96	1.20	0.26
Senneset 等	1.07	0.97	1.17	0.34
Kulhawy 和 Mayne	2.44	0.90	2.68	0.77
Jones 和 Rust	0.84	0.92	0.93	0.27

为了更好的检验 CPTU 资料评价压缩模量 E_s 的方法, 在图 3 中对锥尖阻力 q_c , 修正的锥尖阻力 q_t 和净锥尖阻力 q_n 与室内试验测得的压缩模量值 E_s 之间的

表 3 连盐高速公路 CPTU 预测沉降量与实测沉降的比较
Table 3 Comparison of predicted total settlements from CPTU and measured settlements

观测断面	实测最终沉降 S/mm	室内试验预测沉降		$a_c=3.12$		$a_t=3.22$		$a_n=3.54$	
		预测沉降 $S/S_{lab}/mm$	$S/S_{qc}/mm$	预测沉降 $S/S_{qc}/mm$	$S/S_{qt}/mm$	预测沉降 $S/S_{qt}/mm$	$S/S_{qn}/mm$	预测沉降 $S/S_{qn}/mm$	$S/S_{qn}/mm$
K17+000	616	433	1.42	754	0.82	665	0.93	634	0.97
K20+800	282	374	0.75	311	0.91	299	0.94	266	1.06
K21+200	760	573	1.33	866	0.88	801	0.95	754	1.01
K27+550	343	375	0.91	414	0.83	365	0.94	355	0.97
K28+900	421	373	1.13	460	0.92	396	1.06	393	1.07
K30+000	392	227	1.72	457	0.86	370	1.06	395	0.99
平均值			1.21		0.87		0.98		1.01

注: 表中实测最终沉降为基于实测沉降推求的最终沉降量^[6]; 室内试验预测沉降基于勘察报告提供的压缩模量等资料作出。

相关性进行了拟合, 得到如下关系式:

$$E_s = 3.12q_c \quad R^2 = 0.9 \quad , \quad (1)$$

$$E_s = 3.22q_t \quad R^2 = 0.95 \quad , \quad (2)$$

$$E_s = 3.54q_n \quad R^2 = 0.97 \quad . \quad (3)$$

上述式 (1), E_{s-p}/E_{s-Lab} 的算术平均值和标准差分别是 1.09 和 0.45; 式 (2) 式 E_{s-p}/E_{s-Lab} 的算术平均值和标准差分别是 1.13 和 0.40; 式 (3) E_{s-p}/E_{s-Lab} 的算术平均值和标准差分别是 1.08 和 0.31。拟合结果清楚表明: 试验场地 CPTU 测试参数锥尖阻力 q_c , 修正的锥尖阻力 q_t 和净锥尖阻力 q_n 与室内试验测得的压缩模量 E_s 之间具有良好的相关性。同时需要注意的是, 提出的 3 个相关关系式中, 式 (1) 的相关系数 3.12 与 Jones 和 Rust 法类似, 而式 (1)、(3) 相关系数与表 1 中 Senneset 等方法、Kulhawy 和 Mayne 都有较大的不同, 说明试验场地的区域性对预测的结果有较大的影响, 因此, 应根据当地的 CPTU 试验结果, 对已有的 CPTU 参数与不同土的参数 (如压缩模量) 之间的关系式进行分析验证, 进而得出适合当地的相关关系。

2.3 试验结果的验证

以连盐高速公路为例, 在 CPTU 试验断面附近分别进行了实际沉降观测, 同时采用文中提出的压缩模量预测式 (1) ~ (3), 结合分层总和法^[5]对 6 个沉降观测断面进行了沉降量的预测, 并将预测值与实测的沉降观测值进行了比较, 具体见表 3 所示。

由表 3 可知, 通过室内试验得到的压缩模量来预测沉降的精度很差, 离散性大, S/S_{lab} 最大值达到 1.42, 最小值为 0.75, 平均值为 1.21; 用 CPTU 参数 q_c , q_t 和 q_n 得到的压缩模量预测的沉降与实测较符合, 离散性小, 其中直接利用锥尖阻力 q_c 预测沉降的精度稍差, 而利用修正锥尖阻力 q_t 和净锥尖阻力 q_n 预测的沉降比较准确, 尤其是利用净锥尖阻力 q_n 预测的沉降更为准确 S/S_{qn} 最大值为 1.07, 最小值为 0.97, 平均值为 1.01。

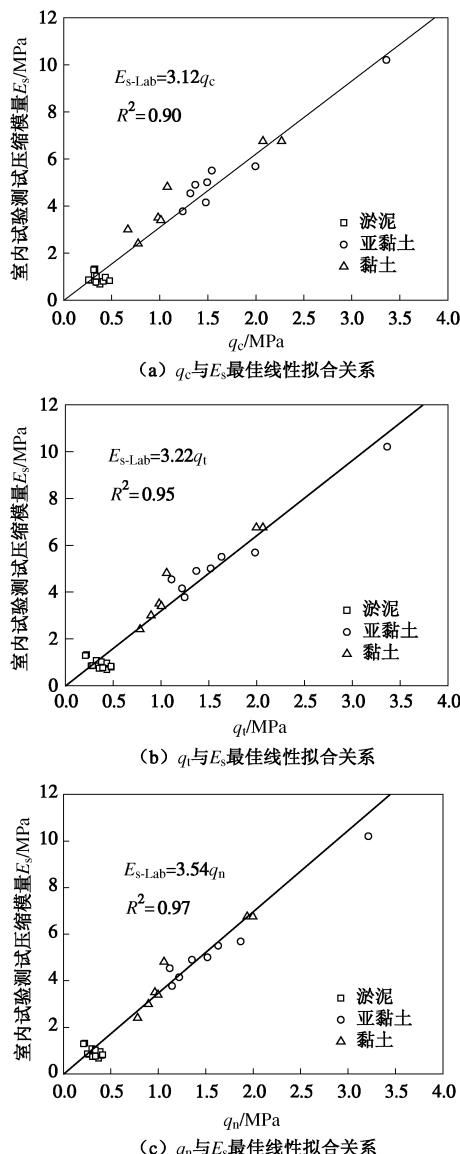


图 3 不同锥尖阻力 (q_c , q_t , q_n) 与 E_s 最佳线性拟合关系

Fig. 3 Correlations between E_s and different cone resistances

(q_c , q_t and q_n)

3 结语

目前, 基于 CPTU 测试参数 q_c , q_t 和 q_n 提出了许多计算压缩模量 E_s 的方法, 进而计算软土地基的沉

降。本文选取了 3 个江苏高速公路典型软土地基进行了 CPTU 试验, 并且比较了不同解译方法预测 E_s 值与室内试验测试 E_s 值, 评价了现有方法的可靠性。然后, 针对试验场地典型软土, 提出了基于 CPTU 的压缩模量经验计算公式, 并综合比较试验场地沉降观测资料、室内试验预测的沉降量和 CPTU 预测的沉降量, 验证了采用 CPTU 测试参数预测压缩模量 E_s 进而预测软基沉降的可靠性, 结果表明: 基于 CPTU 测试的压缩模量 E_s 预测方法及其在软基沉降计算中的应用具有良好的工程实用价值^[6]。

参考文献:

- [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 Song-yu, WU Yan-kai. 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] SANGERAT G. The penetrometer and soil exploration[M]. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1972.
- [3] SENNESET K, SANDVEN R, JANBU N. The evaluation of soil parameters from piezocone tests[J]. Transportation Research Record, 1989: 24 - 37.
- [4] KULHAWY F H, MAYNE P W. Manual on estimating soil properties for foundation design[R]. Palo Alto: Report EL-6800 Electric Power Research Institute, 1990.
- [5] GB50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [6] LIU Song-yu, JING Fei. Settlement prediction of embankments with stage construction on soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 228 - 232. (in English)

(本文责编 黄贤沙)