

基于孔压静力触探测试 (CPTU) 数据计算土的压缩模量

王孟林

(湖南建投交通建设有限公司, 湖南 长沙 410005)

摘要: 压缩模量 E_s 是评价土的压缩性和计算地基沉降的基本参数, 可提高地基土压缩模量测试结果的可靠性, 对准确进行土类判别和土层划分具有非常重要的意义。文章通过对湖南省某高速公路路基土采用孔压静力触探仪进行了原位测试, 并取不同深度处的原状土样在室内测定其压缩模量。根据 CPTU 测试数据及压缩模量测试结果, 进行了土层的划分、评价了基于 CPTU 采集数据计算土的压缩模量的经验公式的适用性, 进而建立了压缩模量与 CPTU 锥尖阻力之间的相关关系。计算结果表明: 采用 CPTU 原位探测数据进行土层划分是比较可靠的, 本文建立的基于 CPTU 原位测试数据计算土压缩模量的计算公式具有较高的精度, 可供工程应用参考。

关键词: 孔压静力触探 (CPTU); 土体原位测试; 压缩模量; 土层划分

中图分类号: TU413

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)06-0028-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.06.071

Calculation of soil compression modulus based on pore pressure cone penetration test (CPTU) data

WANG Menglin

(HNCIG Communications Construction Co., Ltd., Changsha 410005, Hunan, China)

Abstract: The compression modulus E_s is a fundamental parameter for evaluating soil compressibility and calculating foundation settlement. Enhancing the reliability of the test results of the compression modulus of foundation soil is of great significance for accurately classifying soil types and dividing soil layers. This article conducted in-situ testing on the subgrade soil of a certain expressway in Hunan province using a pore pressure static cone penetration test (CPTU), and took undisturbed soil samples at different depths to measure their compressive modulus indoors. Based on CPTU test data and compression modulus test results, soil layers were divided and the applicability of multiple existing empirical formulas for calculating soil compression modulus based on CPTU collected data was evaluated. Furthermore, a correlation between compression modulus and CPTU cone tip resistance was established. The results show that using CPTU in-situ detection data for soil layer division is relatively reliable. The calculation formula for soil compression modulus based on CPTU in-situ test data established in this paper has high accuracy and can be used as a reference for engineering applications.

Key words: static cone penetration test (CPTU); in situ testing of soil; compressive modulus; soil layer division

孔压静力触探测试 (CPTU) 是一种方便、高效、可靠的多功能原位测试技术, 它可以在钻进过程中连续测量锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力, 然后获得这 3 个参数沿深度的连续变化值。目前, CPTU 原位测试技术主要被应用在划分土层类型、

土类判别、求取土体的渗透系数、固结系数、动力参数和压缩模量等方面, 其功能的多样性对于软土路基性能的确有着实质性的提升^[1-3]。

马海鹏等^[4]认为在不扰动原位土体状态的情况下进行 CPTU 测试, 已经成为国内外重要的原位测

收稿日期: 2025-01-18

基金项目: 湖南省交通运输厅科技项目(201905)

作者简介: 王孟林(1973—), 男, 高级工程师, 从事公路工程施工技术与管理方面的工作。

试方法之一。压缩模量是路基沉降计算中的一项重要指标, 反应了土体在压缩条件下对压缩变形的抵抗能力。姬付全等^[5]得到了启东地区地基土压缩模量与淤泥质土、粉土粉砂净锥尖阻力的经验系数。李君韬^[6]认为采用 CPTU 原位测试技术来推算土体压缩模量更接近工程实际, 更具有针对性。童立元等^[7]验证了应用 CPTU 来确定软土压缩模量进而预测软基沉降的可靠性。由于 CPTU 是在不扰动土样的情况下进行原位测试, 其测试数据相比取样试验误差较小, 因此, 采用 CPTU 试验数据来计算实际工程中土体压缩模量具有重要意义。

本文将通过在钻孔邻近区域不同深度处部位取土, 室内试验测定其压缩模量, 根据 CPTU 测试结果及室内测定的压缩模量进行土层划分, 验证分析已有的基于 CPTU 实测参数计算土体压缩模量的经验公式的适用性, 并建立针对该地区地基土的压缩模量计算公式, 以期对相关工程提供参考。

1 现场原位触探与室内试验

1.1 场地描述

根据依托工程途经区域的地形、地貌, 以及区域的工程地质勘探数据, 以及《公路工程地质勘察规范》(JTG C20—2011)^[8], 选取在 K52 + 450 处进行 CPTU 原位探测。该段为山沟地段, 沟内分布有水田和池塘, 覆盖层较薄。勘探深度范围内的岩土具体描述如下:

(1) 种植土: 褐色, 褐黄色, 松散, 含植物根系。系水田、旱地表土, 厚度为 0.20 ~ 0.50 m 左右, 分布广泛。

(2) 淤泥质土: 杂色, 结构较松散。含碎石、块石、粉质黏土。厚度一般为 0 ~ 0.3 m, 主要分布于沟谷地段。

(3) 粉质黏土: 褐黄色, 褐红色, 冲破积而成, 可塑 ~ 硬塑状, 层厚 0 ~ 3.0 m, 主要分布在沟谷地段。

(4) 碎石: 杂色, 松散 ~ 稍密, 碎石成分主要为板岩、砂岩、花岗岩, 粒径多为 2 ~ 3 m, 呈棱角或次棱角状, 其质量分数约为 50% ~ 80%, 层厚一般为 0 ~ 5.0 m, 山坡坡脚及沟谷中有分布。

1.2 原位测试

采用的 CPTU 设备为溧阳市某公司生产的 KE -

2103 型孔压静力触探仪, 探头规格符合国际标准 (锥角为 60°, 锥底截面积 10 cm², 探头的有效面积比 $\alpha = 0.8$)。在进行触探之前, 探头需要进行真空饱和。在触探过程中, 为保证测试数据的准确性, 探头应匀速贯入, 贯入速率为 20 mm/s, 系统每隔 10 cm 采集一次数据。当钻探位置为 3.8 m 时, 探头难以钻进, 根据地质勘探报告, 此深度以下被碎石所覆盖, 所以终止测试。路基土原位 CPTU 探测的不同深度处的实测锥尖阻力 q_c (MPa)、侧壁摩阻力 f_s (kPa) 及孔隙水压力 μ (kPa)。如图 1 所示。

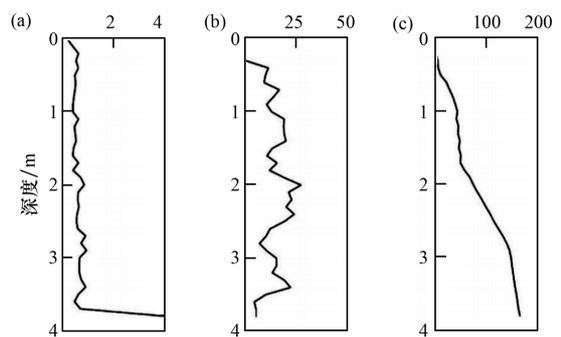


图 1 K52 + 450 处的 CPTU 原位探测结果

1.3 室内试验

在 CPTU 钻孔附近通过活塞式取土器取得不同深度处的高质量原状土样 (沿深度每隔 10 cm 取样一次), 然后根据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)^[9]通过试验测试其含水率、重度、孔隙比、液塑限等基本的物性参数; 对不同深度处的土样进行固结试验, 测定其压缩模量。

2 试验结果分析

2.1 土层划分

根据 JTG E40—2007 进行试验测试, 得到该处不同土的基本物性参数, 如表 1 所示。

表 1 土的基本性质

名称	含水率/%	土容重/(kN·m ⁻³)	孔隙比	液限	塑限
淤泥质土	54.9	17.8	1.1	49.6	26.0
粉质黏土	26.3	19.8	0.7	43.5	28.9

根据 CPTU 测试数据, 参照《孔压静力触探测试技术规程》(T/CCES 1—2017)^[10]计算土类指数, 进行土的工程分类。其土类划分标准如表 2 所示, 测试数据应力按计算公式(1) ~ (5)进行修正。

表 2 基于土类指数确定土的工程分类

分区	土分类名称	土类指数 I_c
1	淤泥与淤泥质土	$3.45 < I_c$ 或 $Q_m \leq 11.8e^{-\frac{F_r}{1.15}} - 0.36$
2	黏土	$2.90 < I_c < 3.45$ 且 $Q_m > 11.8e^{-\frac{F_r}{1.15}} - 0.36$
3	粉质黏土	$2.65 < I_c < 2.90$ 且 $Q_m > 11.8e^{-\frac{F_r}{1.15}} - 0.36$
4	粉土	$2.32 < I_c < 2.65$ 且 $Q_m > 11.8e^{-\frac{F_r}{1.15}} - 0.36$
5	粉-细砂	$1.87 < I_c < 2.32$
6	中-粗砂	$I_c < 1.87$

$$Q_m = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{p_a} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (1)$$

$$I_c = \sqrt{3.47 - \lg[Q_m]^2 + [\lg(F_r) + 1.22]^2} \quad (2)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\sigma_{v0} = \sum r_i \cdot h_i \quad (4)$$

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0 \quad (5)$$

式中： Q_m 为归一化锥尖阻力； F_r 为归一化摩阻比； σ_{v0} 为总上覆应力，kPa； q_t 为经孔压 U_2 修正的锥尖阻力，MPa； u_0 为静水压力，kPa； γ_i 为第 i 层土的平均天然重度，kN/m³； h_i 为第 i 层土的厚度，m； p_a 为标准大气压，取 100 kPa； σ'_{v0} 为有效上覆应力，kPa。

根据实测的土的基本物性参数(表 1)，计算得到 CPTU 探测区域不同深度处土体的土类指数 I_c 值与归一化锥尖阻力 Q_m 值，如表 3 所示。

由表 3 可知：当地下钻探深度分别为 2.7 m 和 3.4 m 时， I_c 值和 Q_m 值满足粉质黏土的土层分类数值要求。因此可以判定，该场地 2.7 m 和 3.4 m 局部深度土层为粉质黏土，厚度约为 20 cm。其余各深度锥尖阻力普遍较小， I_c 值或 Q_m 值均满足淤

表 3 不同深度土样的 I_c 值、 Q_m 值与参考值

深度/m	I_c	Q_m	$11.8e^{-\frac{F_r}{1.15}} - 0.36$
0.5	2.69	6.32	11.17
1.0	2.75	5.3	11.02
1.5	2.61	7.62	11.04
2.0	2.38	10.7	11.07
2.5	2.58	7.8	11.03
2.7	2.73	13.8	11.31
3.0	2.5	9.86	11.18
3.4	2.68	13.9	11.17
3.5	2.56	9.25	11.25

泥质土的分类要求，这是因为淤泥质土的含水量比较高，孔隙比大。因此，依托工程原地基土可以分成 3 层：第一层为种植土，厚度为 0.3 m；第二层为淤泥质土，厚度为 3.2 m；中间局部深度分布有 0.2 m 厚的粉质黏土。土层划分结果与实地钻探结果相吻合。这说明，采用 CPTU 数据进行土层划分是可靠的。

2.2 土体压缩模量的计算

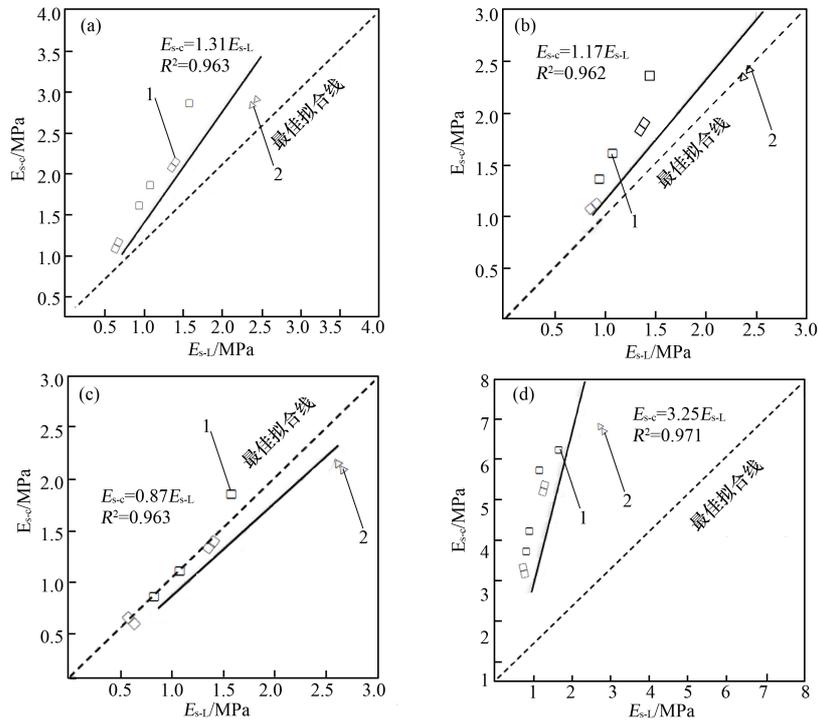
目前已有多种经验公式来表征压缩模量 E_S 与孔压静力触探测试锥尖阻力 q_c (MPa)、经孔压修正后的锥尖阻力 q_t (MPa)、净锥尖阻力 q_n (MPa)，锥肩位置测试的孔隙水压力 u_2 (kPa) 之间的关系。 a 为经验系数，无量纲，根据选择的方法和土类不同而有所差别。如表 4 所示^[11-13]。

将 CPTU 探测得到的不同深度处的锥尖阻力 q_c 、修正锥尖阻力 q_t ，净锥尖阻力 q_n 值采用表 4 列举的经验公式计算了不同深度处的土压缩模量 E_{s-c} ，并将其与室内试验实测的压缩模量 E_{s-l} 进行了比较，如图 2 所示。

由图 2 可以看出：采用 Sanglerat 法与 Kulhawy

表 4 CPTU 锥尖阻力评价土压缩模量的方法

方法	相关关系	CPTU 参数	相关系数	备注
Sanglerat (1972)	$E_S = a_c \times q_c$	q_c	a_c 取决于土类和 q_c 大小	—
Jones 和 Rust (1995)	$E_S = a_c \times q_c$	q_c	$a_c = 2.75 \pm 0.55$	南非冲积相黏土
Senneset 等 (1998)	$E_S = 2q_t$	$q_t = q_c + u_2(1 - a)$	线性关系	$q_t < 2.5$ MPa
	$E_S = 4q_t - 5$	$q_t = q_c + u_2(1 - a)$	线性关系	$2.5 < q_t < 5$ MPa
Senneset 等 (1989)	$E_S - o_c = a_0 \times q_n$	$q_n = q_t - \sigma_{v0}$	$a_0 = 10 \pm 5$	超固结土
	$E_S - n_c = a_0 \times q_n$	$q_n = q_t - \sigma_{v0}$	$a_0 = 6 \pm 2$	正常固结土
Kulhawy and Mayne	$E_S = 8.25 \times q_n$	$q_n = q_t - \sigma_{v0}$	8.25	—



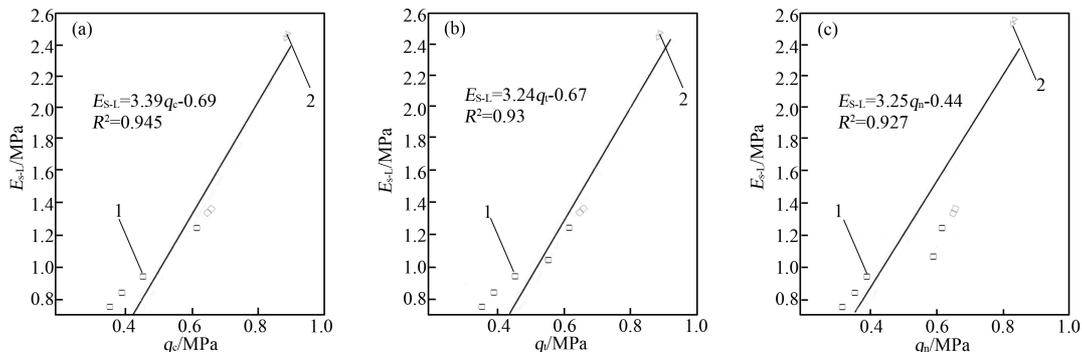
1—淤泥质土；2—粉质黏土。

图 2 室内试验实测压缩模量 E_{s-L} 值与 CPTU 预测压缩模量 E_{s-c} 值比较

和 Myne 法的经验公式过高的预测了实际依托工程中的压缩模量 E_s 值，其中 Kulhawy 和 Mayne 方法 ($E_{s-c} = 3.25E_{s-L}$, $R^2 = 0.971$) 的预测值更高；Sanglerat 法得到的粉质黏土压缩模量值距离最佳拟合线较近。而从图 2 (b) 可以发现，基于 Jones 和 Rust 法 ($E_{s-c} = 1.17E_{s-L}$, $R^2 = 0.962$) 预测淤泥质土 (E_{s-c} 值高于室内固结试验测试值，粉质黏土的 (E_{s-c} 值和 E_{s-L} 值经过最佳拟合线，这说明采用 Jones 和 Rust 法可以较好地预测实际工程粉质黏土压缩模量值，但淤泥质土值偏大。由图 2 (c) 可以看出 Senneset 等人的预测方法 ($E_{s-c} = 0.87E_{s-L}$, $R^2 = 0.963$) 可以较好地预测淤泥质土的压缩模量

值，但是却过低地预测了粉质黏土的 E_s 值。因此，利用 CPTU 探测数据，采用不同的经验公式预测得到的土的压缩模量值具有差异性，这种差异性和土类及地区性有关。因此，有必要针对不同地区的不同土类，将实地工程勘测的 CPTU 数据与室内固结试验测定的压缩模量进行分析，建立适合当地水文地质状况的不同路基土的压缩模量计算公式。

将路基土室内试验实测的压缩模量 E_s 与孔压静力触探锥尖阻力 q_c ，经孔压修正的锥尖阻力 q_t 以及净锥尖阻力 q_n 等数据进行作图并采用线性关系进行拟合，如图 3 所示。



1—淤泥质土；2—粉质黏土。

图 3 CPTU 实测 q_c 、 q_t 、 q_n 与实测压缩模量 E_{s-L} 间的关系

由图 3 可以看出:路基土 CPTU 原位探测的不同锥尖阻力(q_c 、 q_t 、 q_n 值)与室内试验测定的土压缩模量 E_s 值间具有良好的线性相关关系如式(6)~式(8)所示。

$$E_{s-L} = 3.39q_c - 0.69, R^2 = 0.945 \quad (6)$$

$$E_{s-L} = 3.24q_t - 0.67, R^2 = 0.930 \quad (7)$$

$$E_{s-L} = 3.25q_n - 0.44, R^2 = 0.927 \quad (8)$$

因此,对于邻近依托工程区域的土体,采用 CPTU 进行原位探测后,可以采用上述方程式计算出土的压缩模量。

3 结 论

通过对湖南省某高速公路路基工程的原地基采用 CPTU 进行原位测试,并取土进行了室内试验,经对测试数据进行了分析,得到了研究结论如下:

(1) 采用 CPTU 触探数据计算土类指数,进行土层划分是可靠的。

(2) 采用 Sanglerat 法、Jones 和 Rust 法与 Kulhawy 和 Myne 法的经验公式会过高预测土的压缩模量 E_s 值,而 Senneset 等人的方法预测的压缩模量值较低。

(3) 通过分析建立了针对依托工程中地基土的压缩模量值与 CPTU 原位探测时的锥尖阻力 q_c 、经孔压修正的锥尖阻力 q_t 或净锥尖阻力 q_n 间的相关关系,可供工程应用中根据 CPTU 测试结果计算土的压缩模量时参考。

参考文献:

[1] 王蒙,蔡国军,刘文亮,等. 基于 CPTU 测试的高速公

路改扩建新老地基土工程特性评价研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(增刊2):81-84.

- [2] 童立元,涂启柱,刘松玉,等. 基于孔压静力触探测试的改进分层总和法在软基沉降预测中的应用研究[J]. 岩土力学,2011,32(增刊2):679-682.
- [3] 鲁少宏,姜珂. 用孔隙水压力静力触探求软基土的固结系数[J]. 公路,2000(7):24-28.
- [4] 马海鹏,陈祖煜,于沐. 上海地区土体抗剪强度与静力触探比贯入阻力相关关系研究[J]. 岩土力学,2014,35(2):536-542.
- [5] 姬付全,经纬,刘志彬,等. 孔压静力触探(CPTU)确定地基土压缩模量方法研究[J]. 工程地质学报,2011,19(6):882-886.
- [6] 李君韬. 基于旁压试验和静力触探估算地基承载力和压缩模量[D]. 北京:中国地质大学(北京),2016.
- [7] 童立元,涂启柱,杜广印,等. 应用孔压静力触探(CPTU)确定软土压缩模量的试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(增刊2):569-572.
- [8] 公路工程地质勘察规范:JTG C20—2011. 北京:人民交通出版社,2011.
- [9] 公路土工试验规程:JTG E40—2007. 北京:交通运输部公路科学研究院,2007.
- [10] 孔压静力触探测试技术规程:T/CCES 1—2017. 北京:中国土木工程学会,2017.
- [11] SANGLERAT G. The penetrometer and soil exploration [M]. Amsterdam:Elsevier,1972.
- [12] SENNESET K,SANDVEN R,JANBU N. The evaluation of soil parameters from piezocone tests [J]. Transportation Research Record,1989:24-37.
- [13] 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.