



# CPTU数据与土体物理指标的相关性分析

杜宇, 黄志伟

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

**摘要:** 根据港珠澳大桥勘察工程中应用的大量孔压静力触探试验数据与室内土工试验结果进行统计对比研究, 发现CPTU数据与土体的细粒含量、天然密度、黏性土含水量、孔隙比和液性指数之间存在很好的相关关系。基于这些相关关系, 为该区域利用CPTU数据评估土体的物理指标提供了一种新的途径。

**关键词:** CPTU; 细粒含量; 天然密度; 黏性土含水量; 黏性土孔隙比; 塑性指数; 液性指数

中图分类号: TU 143

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)07-0026-04

## Correlation analysis of CPTU data and soil physical parameters

DU Yu, HANG Zhi-wei

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** According to the correlation analysis between CPTU data and laboratory testing data in the soil investigation of Hong Kong-Zhuhai-Macau bridge, some good correlations between CPTU data and fine content, unit weight, moisture content, void ratio, plasticity index and liquidity index are developed. Based on these correlations, a new method to evaluate soil physical parameters through CPTU test is provided.

**Key words:** CPTU; fine content; unit weight; moisture content; void ratio; plasticity index; liquidity index

孔压静力触探试验(CPTU)作为一种快速准确的原位测试方法, 在国内外勘察工程中得到了广泛的应用。而土体的物理指标主要包括密度、细粒含量、孔隙比、黏性土的液性指数和塑性指数等参数, 目前这些指标主要依靠室内土工试验获得。为了提高勘察效率, 国内外通过分析静力触探数据与高质量土工试验成果, 建立了一些基于大量统计得到的经验、半经验公式, 并得到了较好的应用<sup>[1-3]</sup>。

本次港珠澳大桥岛隧工程应用了大量孔压静力触探试验和高标准的钻探取样工艺, 获取了可靠的试验数据, 通过对CPTU试验与室内土工试验的对比分析, 建立了适用于本工程的经验公式<sup>[4]</sup>。

### 1 细粒含量

Robertson等<sup>[5-6]</sup>提出通过土体类型指标参数 $I_c$

评估土体的细粒含量:

$$\begin{cases} \text{当 } I_c < 1.26 \text{ 时, } FC(\%) = 0 \\ \text{当 } 1.26 \leq I_c < 3.5 \text{ 时, } FC(\%) = 1.75I_c^{3.25} - 3.7 \\ \text{当 } I_c \geq 3.5 \text{ 时, } FC(\%) = 100 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $FC$ 为细粒含量(%);  $I_c$ 为土体类型指标, 通过下式进行计算:

$$I_c = [(3.47 - \lg Q_m)^2 + (\lg F_r + 1.22)^2]^{0.5} \quad (2)$$

式中:  $Q_m$ 为标准化的锥尖阻力;  $F_r$ 为标准化的摩阻比, 按下式计算:

$$Q_m = \left( \frac{q_t - \sigma_{v0}}{P_{a2}} \right) \left( \frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (3)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $q_t$ 为修正后的锥尖阻力;  $P_{a2}$ ,  $P_a$ 为一个标准大气压,  $P_{a2}$ 单位与 $q_t$ 相同,  $P_a$ 单位与 $\sigma'_{v0}$ 相同;  $n$ 值与土体类型相关, 当土类为黏性土时,  $n$ 值接近

收稿日期: 2013-05-02

作者简介: 杜宇(1986—), 男, 工程师, 从事工程地质勘察。

1; 当土类为砂土时,  $n$ 值接近0.5。Robertson<sup>[5]</sup>提出当 $n < 1$ 时与 $I_c$ 及 $\sigma'_{v0}$ 的变化关系为:

$$n = 0.381I_c + 0.05(\sigma'_{v0}/P_a) - 0.15 \quad (5)$$

由于存在循环计算关系, Robertson提出当 $\Delta n \leq 0.01$ 停止循环计算。

将Robertson等的经验公式的评估结果与室内土工试验的成果进行对比分析, 结果见图1。

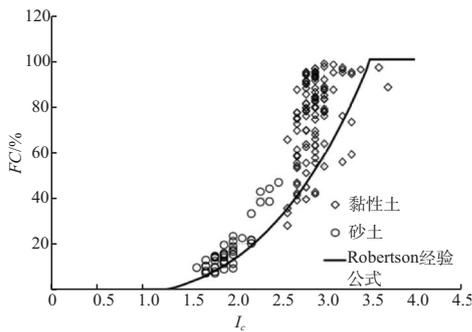


图1 Robertson经验公式与土工试验对比

从上述分析结果可以得出:

细粒含量 $FC$ 与土体类型指标 $I_c$ 之间存在较好的相关关系。 $I_c$ 越大, 土体的细粒含量 $FC$ 越大。

通过Robertson等的经验公式换算的 $FC$ 与本次土工试验结果整体趋势一致。特别是针对砂层, 其结果还是能很好地反映砂土的细粒含量。

鉴于Robertson等的经验公式的评估结果与土工试验实测值有一定偏差, 通过统计分析, 提出适用于港珠澳大桥区域的CPTU数据与 $FC$ 的相关关系如下:

$$\begin{cases} \text{当 } I_c < 1.26 \text{ 时, } FC(\%) = 0 \\ \text{当 } 1.26 \leq I_c < 3.17 \text{ 时, } FC(\%) = 1.31I_c^{3.76} \\ \text{当 } I_c \geq 3.17 \text{ 时, } FC(\%) = 100 \end{cases} \quad (6)$$

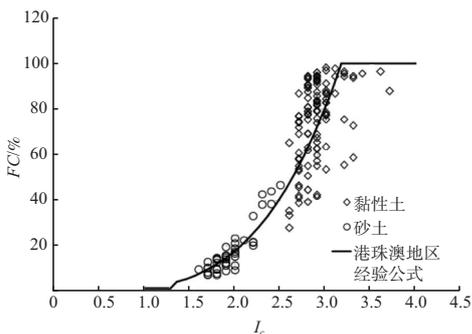


图2 细粒含量与土体类型指标相关关系

通过上述经验公式, 在没有室内土工试验数据的时候就可以通过CPTU数据解译土体的细粒含量。

## 2 天然密度

土体的密度是CPTU一个重要的解译参数, 因为在土体分类以及强度参数的解译过程中都需要计算土层的上覆压力 $\sigma_{v0}$ 。

Robertson<sup>[5]</sup>提出基于摩阻比和锥尖阻力换算土体密度的经验公式:

$$\rho/\rho_w = 0.27 \lg R_f + 0.36 \lg (q_t/P_a) + 1.236 \quad (7)$$

式中:  $R_f$ 为摩阻比(%);  $P_w$ 为水的密度;  $P_a$ 为一个标准大气压; 单位与 $q_t$ 一致。

与室内土工试验结果的对比见表1。

表1 CPTU数据解译与土工试验成果对比

$q_c /$ MPa	$f_s /$ kPa	$U_2 /$ kPa	土体密度/( $t \cdot m^{-3}$ )		偏差/%
			土工试验	CPTU换算	
0.33	11.0	308.1	1.559	1.547	0.8
0.41	14.9	380.5	1.596	1.590	0.4
1.66	39.7	1 409.3	1.769	1.755	0.8
0.35	14.0	193.6	1.558	1.572	0.9
2.51	63.6	1 014.2	1.799	1.820	1.2
2.69	81.7	996.3	1.840	1.851	0.6
2.97	61.7	815.7	1.830	1.821	0.5
3.85	75.6	1 316.9	1.834	1.855	1.2
2.56	70.8	445.7	1.802	1.829	1.5
8.48	77.1	1 241.9	1.876	1.885	0.5

黏性土的密度随着锥尖阻力的增加而增加, 基于CPTU数据的密度解译值与土工试验有较好的一致性。

## 3 黏性土含水量

含水量是黏性土的一个重要物理指标, 通过对比大量室内土工试验成果与CPTU数据, 黏性土的含水量与锥尖阻力一般有如下关系: 锥尖阻力越大, 黏性土对应的含水量越小, 对比结果见图3。

根据对比结果, 黏性土的含水量与锥尖阻力之间有良好的相关性, 推荐按下式进行评估:

$$\omega = -26.25 \lg q_t + 45.288 \quad (8)$$

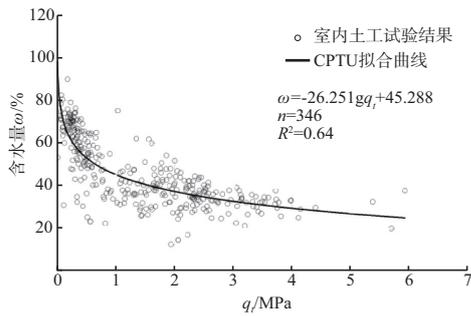


图3 含水量与锥尖阻力的相关关系

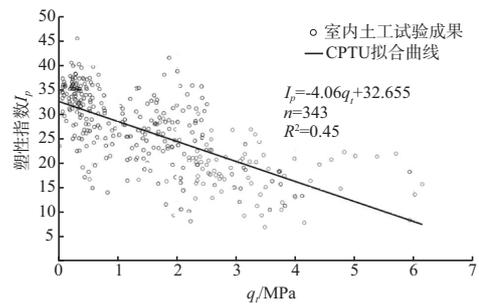


图5 塑性指数与锥尖阻力的相关关系

### 4 黏性土的孔隙比

黏性土的孔隙比是计算沉降量的重要土体指标，通过对比大量室内土工试验成果与CPTU数据，黏性土的孔隙比与锥尖阻力一般有如下关系：锥尖阻力越大，黏性土对应的孔隙比越小，对比结果见图4。

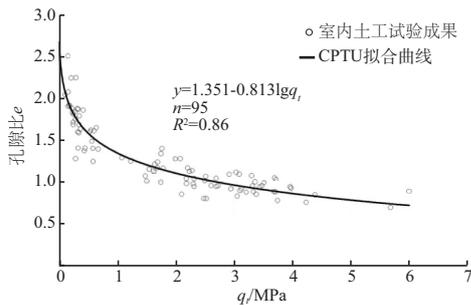


图4 孔隙比与锥尖阻力的相关关系

根据对比结果，黏性土的孔隙比与锥尖阻力之间有很好的相关性，推荐按下式进行评估：

$$e = 1.351 - 0.813 \lg q_t \quad (9)$$

### 5 黏性土的塑性指数

塑性指数 $I_p$ 是细粒土物理性能的重要指标，在一定程度上综合反映黏性土的物质组成。通过对比大量室内土工试验成果与CPTU数据，黏性土的塑性指数与锥尖阻力的相关性不强，大致存在随着锥尖阻力增加塑性指数降低的趋势，对比结果见图5。

根据对比成果，塑性指数与锥尖阻力的相关性不强，大致反映出塑性指数随着锥尖阻力的增大而减小的趋势。推荐按下式粗略评估黏性土的塑性指数：

$$I_p = 32.655 - 4.06q_t \quad (10)$$

### 6 黏性土的液性指数

液性指数 $I_L$ 是判断黏性土软硬程度的重要指标。通过对比大量室内土工试验结果与CPTU数据，黏性土的液性指数与锥尖阻力一般有如下关系：锥尖阻力越大，黏性土对应的液性指数越小，对比结果见图6。

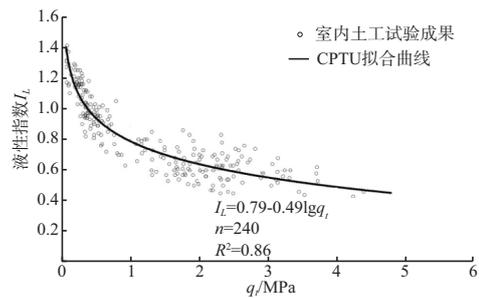


图6 液性指数与锥尖阻力的相关关系

根据上述对比成果，液性指数与锥尖阻力有较好的相关性，推荐按下式评估黏性土的液性指数：

$$I_L = 0.79 - 0.491 \lg q_t \quad (11)$$

### 7 结论

孔压静力触探试验（CPTU）作为一种快速、精度高、再现性好、重复性误差小的原位测试方法已经在工程中得到了广泛的应用。从最早期单一的土层划分，到现在进行土体物理力学指标的解译，孔压静力触探试验已经体现其特有的优势。

对于取样困难的土层，利用CPTU数据进行土体物理参数的解译，成为一种有效的途径。不仅如此，当取得大量基于CPTU数据的解译经验后，可以采用CPTU试验取代传统的钻孔、取样加室内试验的勘察手段，大幅度提高勘察效率。

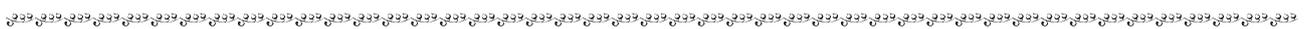
本文基于港珠澳大桥岛隧工程的大量CPTU数据与室内土工试验成果的对比分析, 总结出了CPTU数据与细粒含量、天然密度、黏性土含水量、孔隙比、塑性指数、液性指数等物理指标的相关关系, 为CPTU试验在该地区的应用提供了较好的解译基础。

**参考文献:**

[1] 孟高头. 土体原位测试机理, 方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997.  
 [2] Lunne T, Robertson P K, Powell J J M. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice[M]. Norge: Blakie Academic & Professional, 1997.

[3] National Cooperative Highway Research program, Cone Penetration Testing[M]. Atlanta Botanical:Transportation Research Board, 2007.  
 [4] 中交公路规划设计院有限公司, 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 港珠澳大桥主体工程岛隧工程补充地质勘察工程地质勘察报告[R]. 北京: 中交公路规划设计院有限公司, 2011.  
 [5] Robertson P K. Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering[M]. 4th Edition. California: Gregg Drilling & Testing, Inc, 2010.  
 [6] Robertson P K, Fear C E. Liquefaction of sands and its evaluation[C]. Tokyo: First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1995.

( 本文编辑 武亚庆 )



**· 消 息 ·**

**四航局一科研项目达到国际领先水平**

近日, 四航局参与联合攻关的科研项目“冰冻海域全寿命周期的桥梁结构耐久性关键技术研究”, 经交通部西部交通建设科技项目管理中心鉴定, 项目成果总体达到国际领先水平。

项目依托四航局参建的青岛海湾大桥工程, 针对附近海域环境特点, 从结构耐久性设计、耐腐蚀混凝土配制、施工质量控制、耐久性监测评估及科学管养等方面, 开展成套技术研究。四航局结合自身相关技术优势和实践经验, 开展了“冰冻海域耐腐蚀混凝土及配套施工技术”、“基于在线监测技术的新一代暴露实验和传统暴露实验”等子课题的研究, 并取得了相关技术成果。

目前, 该项目相关科研成果已经在山东海即跨海大桥、南北长山连岛大桥等工程中得到推广应用, 取得了显著的社会、经济和环境效益。

摘编自《中国交通建设网》

