



# CPTU数据与其它原位测试试验的相关性分析

祝刘文, 杜宇

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

**摘要:** 孔压静力触探(CPTU)是一种快速准确的原位测试方法,在工程中得到了广泛的应用,同时通过与其他原位测试试验,如标准贯入试验、十字板剪切试验以及波速测试试验的对比分析,可以建立它们之间的相关关系。

**关键词:** CPTU; 标准贯入试验; 十字板剪切试验; 波速测试试验

中图分类号: TU 413

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)07-0022-04

## Correlation analysis of CPTU and other in-situ testing

ZHU Liu-wen, DU Yu

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

**Abstract:** Cone penetration test with pore pressure measurement is a rapid and reliable in-situ test method, which has been applied widely in the world. Meanwhile, according to the analysis on CPTU and other in-situ tests such as SPT, VST and shear wave velocity test, many correlations can be developed.

**Key words:** CPTU; SPT; VST; shear wave velocity

原位测试技术是目前快速发展的一种勘察手段,其中包括标准贯入试验、十字板剪切试验、静力触探试验、波速测试试验和载荷试验等。原位测试相较于钻探、取样及室内试验具有下列明显的优点<sup>[1]</sup>: 1)可在工程场地直接进行试验,不用取样; 2)原位测试涉及的土体积比室内试验样品要大很多,因而更能反映土的宏观结构对土的性质的影响; 3)很多原位测试技术例如静力触探试验可连续进行,能提供沿深度方向上的完整土层剖面及物理力学性质指标; 4)原位测试技术快速、经济、准确。

国内外已经发展了很多基于原位测试数据与土体物理力学性质指标之间的相关关系。而为了更好应用、对比、分析各种原位测试数据,找到它们之间的相关关系成为一种有效的途径。

孔压静力触探试验(CPTU)作为一种发展时间较短而发展速度很快的原位测试手段,有其明

显的优势<sup>[2]</sup>: 1)测试数据连续、快速、效率高、功能多; 2)测试数据精度高、再现性好、重复性误差小。而标准贯入试验、十字板剪切试验及波速测试试验在各自领域已经建立了成熟的数据分析方法,如果能建立CPTU数据与它们之间的相关关系,将为CPTU数据的解译提供良好的基础。

### 1 标准贯入试验

标准贯入试验因其设备简单、操作方便,成为应用范围最广的原位测试方法之一。对于标准贯入试验,其结果受很多因素影响,包括钻孔直径、取样器类型、钻杆长度和能量传输比,其中最重要的影响因素是锤击过程中的能量传输比,国外的大量统计结果表明60%为SPT的历史平均能量传输比<sup>[3]</sup>。

#### 1.1 国外研究现状

Robertson<sup>[3]</sup>通过分析CPTU数据与SPT的结

收稿日期: 2013-05-02

作者简介: 祝刘文(1970—),男,高级工程师,主要从事工程地质勘察及室内试验工作。

果, 得出 $(q_c/P_a)/N_{60}$ 的比值与土体平均粒径 $D_{50}$ 的相关关系(图1)。

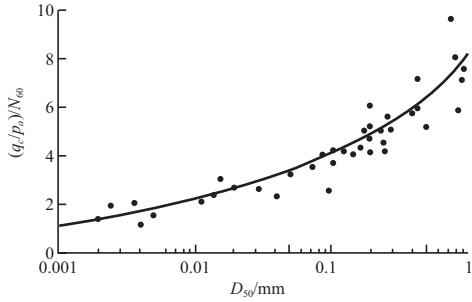


图1 CPTU-SPT与平均粒径相关关系<sup>[3]</sup>

通过图1可以得出: 随着平均粒径的增大,  $(q_c/P_a)/N_{60}$ 的比值也一直增大。土体的平均粒径跟土体类型相关, 因此, Robertson<sup>[3]</sup>针对不同类型土体提出如表1所示的 $(q_c/P_a)/N_{60}$ 建议值。

表1  $(q_c/P_a)/N_{60}$ 建议值

分区	土体类型	$(q_c/P_a)/N_{60}$
1	灵敏性土	2.0
2	有机土	1.0
3	黏土-粉质黏土	1.5
4	黏质粉土-粉质黏土	2.0
5	粉质砂土-砂质粉土	3.0
6	砂土-粉质砂土	5.0
7	砾质砂土-砂土	6.0
8	*砂土-黏质砂土	5.0
9	*坚硬细粒土	1.0

注: 对于CPTU数据,  $q_c$ 用修正后的 $q_t$ 代替; \*代表超固结或胶结。

Jefferies和Davies<sup>[3]</sup>提出基于土体类型指标 $I_c$ 的CPT-SPT相关关系:

$$I_c = [(3.47 - \lg Q_t)^2 + (\lg F_r + 1.22)^2]^{0.5} \quad (1)$$

$$\frac{(q_t/P_a)}{N_{60}} = 8.5 \left(1 - \frac{I_c}{4.6}\right) \quad (2)$$

式中:  $Q_t$ 为标准化的锥尖阻力;  $F_r$ 为标准化的摩阻比(%). 该公式适用于 $I_c < 4.06$ 的土体。

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0} \quad (3)$$

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

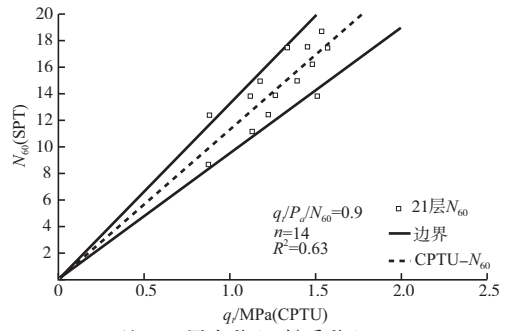
### 1.2 港珠澳大桥区域成果

港珠澳大桥岛隧勘察工程采用英国标准(BS)进行标准贯入试验, 国内已经对BS标贯设备与GB标贯设备有一定的研究<sup>[4]</sup>, 其最主要的影响因素为锤击能量。根据港珠澳大桥岛隧工程SPT试验的能量校正结果, 全区SPT平均能量传输比

ETR为75%。具体转换公式如下:

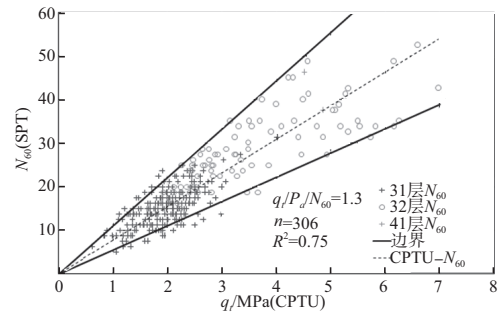
$$N_{60} = N_{\text{实测}} \times \frac{75\%}{60\%} = 1.25 N_{\text{实测}} \quad (5)$$

将港珠澳大桥岛隧工程的SPT试验结果与CPTU数据进行对比分析, 可得出如图2所示的相关关系。



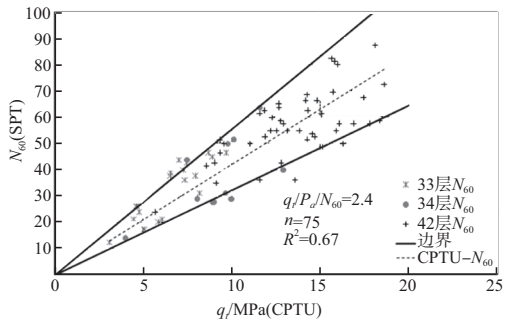
注: 21层为黏土-粉质黏土。

a) 21层



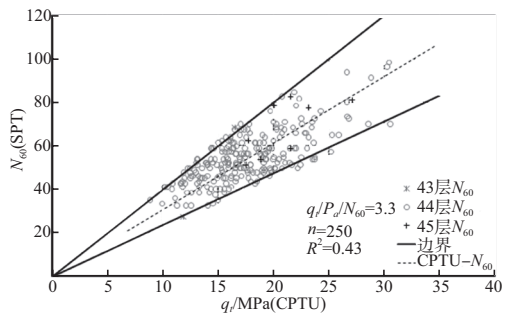
注: 31, 32, 41层为黏土-粉质黏土夹砂层。

b) 31, 32, 41层



注: 33, 34, 42层为粉细砂、中砂混少量黏土层。

c) 33, 34, 42层



注: 43, 44, 45层为中粗砂。

d) 43, 44, 45层

图2  $q_t$ 与 $N_{60}$ 相关关系

由上述对比分析结果可得港珠澳大桥区域土层CPTU-SPT相关关系(表2)。

表2 港珠澳大桥区域CPTU-SPT相关关系

地层编号	土体类型	$(q_t/P_a)/N_{60}$	
		边界值	平均值
21	黏土-粉质黏土	0.75~1.05	0.9
31,32,41	黏土-粉质黏土, 夹薄层细砂	0.9~1.8	1.3
33,34,42	粉细砂, 中砂, 混少量黏土	1.8~3.1	2.4
43,44,45	中粗砂	2.5~4.2	3.3

## 2 十字板剪切试验

十字板剪切试验是软土地层常用的原位测试手段, 国外通过大量理论研究, 得出十字板剪切试验的不排水抗剪强度与CPTU数据的锥尖阻力有如下关系<sup>[3]</sup>:

$$C_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}} \quad (6)$$

式中:  $C_u$ 为十字板原状不排水剪切强度(kPa);  $q_t$ 为修正后的锥尖阻力(kPa);  $\sigma_v$ 为测试点上覆压力(kPa);  $N_{kt}$ 为相关性系数, 一般在10~18, 均值为14。

根据港珠澳大桥区域现场电测式十字板试验结果与对应CPTU数据的对比分析, 得出如图3所示的相关关系。

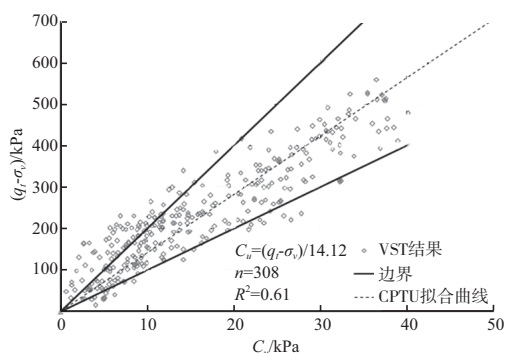


图3  $C_u$ 与CPTU锥尖净阻力相关关系

对于港珠澳大桥区域的软土,  $N_{kt}$ 在10~20, 最优取值为14.12。

此外, 对于表层的软黏土, 由于 $q_t$ 值的不确定性, 也可通过超静孔隙水压力 $\Delta u$ 评估其不排水抗剪强度<sup>[3]</sup>:

$$C_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} = \frac{U_2 - U_0}{N_{\Delta u}} \quad (7)$$

式中:  $U_2$ 为实测孔隙水压力(锥尖后)(kPa);  $U_0$ 为静水压力(kPa);  $N_{\Delta u}$ 为修正系数, 一般在4~10。

根据现场十字板试验结果与对应CPTU数据的对比分析, 得出如图4所示的相关关系。

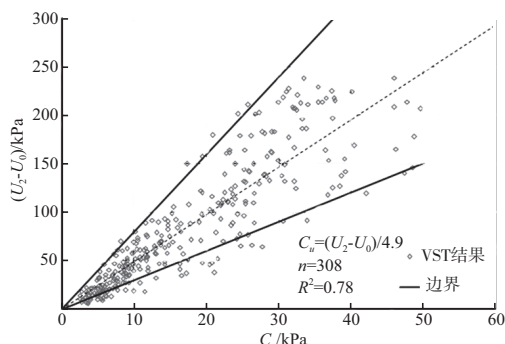


图4  $C_u$ 与CPTU超静孔隙水压力相关关系

对于港珠澳大桥区域的软土,  $N_{\Delta u}$ 在3~8, 最优取值为4.9。

对于重塑土的不排水抗剪强度, 国外研究<sup>[3]</sup>认为其近似等于CPTU试验中的侧壁摩阻力 $f_s$ , 将现场电测式十字板试验结果与CPTU数据进行对比分析, 得出如图5所示的相关关系。

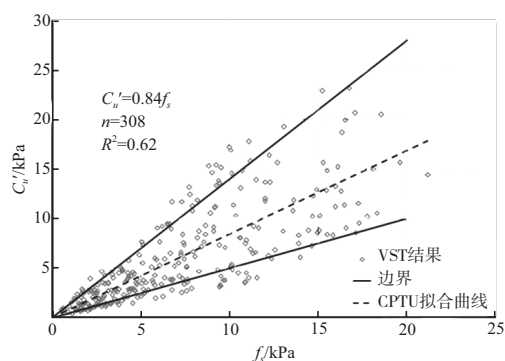


图5  $C_u'$ 与CPTU侧摩阻力 $f_s$ 相关关系

对于港珠澳大桥区域的软土, 重塑土的不排水抗剪强度 $C_u'$ 与CPTU试验中的侧壁摩阻力 $f_s$ 的比值在0.5~1.4, 最优取值为0.84。

## 3 波速测试试验

剪切波速 $v_s$ 是工程领域常用的测量参数之一, 可以通过不同的现场原位测试方法得出, 其中包括悬挂式P-S波速试验、单孔地震波试验、跨孔地震波试验和SCPT(带地震波传感器)。国外对 $v_s$ 与CPTU数据的相关关系做了大量研究。

### 3.1 国外研究现状

Baldi 等<sup>[5]</sup>提出基于锥尖阻力和上覆有效土压力的剪切波速评估公式:

$$v_s = 277(q_t)^{0.13}(\sigma'_{v0})^{0.27} \quad (8)$$

式中:  $v_s$ 单位取m/s;  $q_t$ 单位取MPa;  $\sigma'_{v0}$ 单位取MPa。上述公式适用于非胶结新近沉积砂层。

Mayne等<sup>[5]</sup>提出基于锥尖阻力的剪切波速评估公式:

$$v_s = 1.75(q_t)^{0.627} \quad (9)$$

式中:  $v_s$ 单位取m/s;  $q_t$ 单位取kPa。上述公式适用于黏性土层。

Hegazy等<sup>[5]</sup>提出基于锥尖阻力和侧壁摩阻力的剪切波速评估公式:

$$v_s = [10.11 \lg q_t - 11.4]^{1.67} [100 f_s / q_t]^{0.3} \quad (10)$$

式中:  $v_s$ 单位取m/s;  $q_t$ ,  $f_s$ 单位取kPa。上述公式适用于所有土层。

Mayne<sup>[5]</sup>提出基于侧壁摩阻力的剪切波速评估公式:

$$v_s = 118.8 \lg(f_s) + 18.5 \quad (11)$$

式中:  $v_s$ 单位取m/s;  $f_s$ 单位取kPa; 上述公式适用于所有土层。

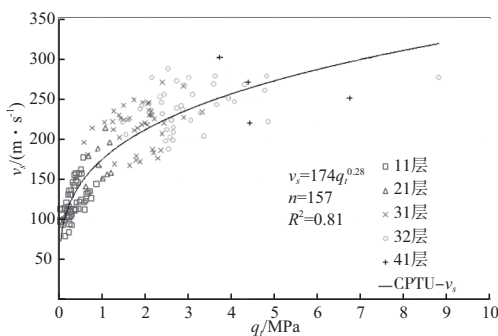
Robertson<sup>[3]</sup>提出基于土体类型指标 $I_c$ 的剪切波速 $v_s$ 与锥尖阻力相关关系如下:

$$v_s = [10^{(0.55I_c + 1.68)}(q_t - \sigma_{v0})/P_a]^{0.5} \quad (12)$$

式中:  $v_s$ 单位取m/s;  $q_t$ ,  $\sigma_{v0}$ ,  $P_a$ 单位一致为kPa。上述公式适用于非胶结的全新世-更新世土层。

### 3.2 港珠澳大桥区域成果

对于黏性土, 剪切波速 $v_s$ 与锥尖阻力 $q_t$ 有很好的相关关系, 见图6。



注: 11,21,31,32,41层均为黏性土层。

图6 黏性土 $q_t$ 与剪切波速 $v_s$ 相关关系

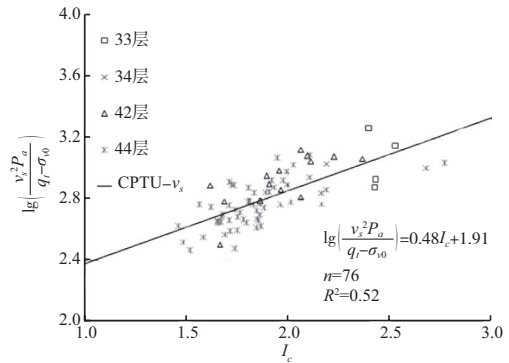
而对于砂类土, 根据港珠澳大桥区域的实测结果对Robertson公式进行修正, 将Robertson经验公式进行变换, 如下所示:

$$\lg\left(\frac{v_s^2 P_a}{q_t - \sigma_{v0}}\right) = 0.55I_c + 1.68 \quad (13)$$

将实测数据代入上述公式, 可得修正后的相关关系(图7)。

修正后的砂类土剪切波速与CPTU数据相关关系如下:

$$v_s = [10^{(0.48I_c + 1.91)}(q_t - \sigma_{v0})/P_a]^{0.5} \quad (14)$$



注: 33,34,42,44层均为砂类土层。

图7 修正后的Robertson经验公式与剪切波速 $v_s$ 相关关系

## 4 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。而它相对于其他原位测试方法的最大优势就在于它能提供沿深度方向上连续的曲线数据。通过对比分析CPTU数据与其他原位测试方法如标准贯入试验、十字板剪切试验、波速测试试验数据之间的相关关系, 就可以利用各种原位测试手段的优点对土层的物理力学性质进行更全面的分析。

## 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]. London:Blakie Academic & Professional, 1997.
- [3] Robertson P K. Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering [M]. 4th Edition.Martinez CA: Gregg Drilling & Testing Inc., 2010.
- [4] 廖先斌, 郭晓勇, 杜宇. 英标和国标标贯设备试验结果相关性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 143-147.
- [5] National Cooperative Highway Research program. Cone Penetration Testing [M]. Washington DC:Transportation Research Board, 2007.

(本文编辑 武亚庆)