



CPTU数据解译在港珠澳大桥勘察中的应用

杜宇, 余红, 代云霞

(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, 目前基于CPTU的数据解译方法, 主要是由大量统计数据得到经验、半经验关系。通过CPTU试验的数据解译在港珠澳大桥勘察工作中进行土体分层、黏性土不排水抗剪强度、砂土内摩擦角及地基均匀性分析方面的应用, 得出一些有益的结论。

关键词: CPTU; 土体分层; 黏性土不排水抗剪强度; 砂土内摩擦角; 地基均匀性

中图分类号: TU 413

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)07-0030-05

Application of CPTU data interpretation in soil investigation of HZMB

DU Yu, SHE Hong, DAI Yun-xia

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

Abstract: Cone penetration test with pore pressure measurement (CPTU) is a rapid in-situ test method. Most interpretation methods are based on empirical correlations through statistical analysis at present. Based on the wide application of CPTU data interpretation on soil classification, undrained shear strength of cohesive soil, friction angle of sandy soil and subgrade uniformity to the soil investigation of Hong Kong-Zhuhai-Macau bridge, some conclusions are drawn.

Key words: CPTU; soil classification; undrained shear strength; friction angle; uniformity analysis

孔压静力触探试验(CPTU)是一种速度快、精度高、再现性好的原位测试方法, 近年来在沿海地区工程勘察中得到广泛的应用。它的原理是借助机械把一定规格的圆锥形探头匀速压入土中, 并测定出锥尖阻力、侧壁摩阻力、孔隙水压力等参数。

孔压静力触探试验主要有以下几个方面的应用^[1]: 土层分类、评价岩土的物理力学参数、直接应用于岩土设计。基于CPTU数据的解译方法大多是基于大量统计数据得到经验、半经验关系。港珠澳大桥的勘察工作采用了大量的CPTU试验, 通过与钻探资料及室内土工资料的对比分析, 可以大大提高CPTU的数据解译精度。

1 CPTU试验的基本数据

孔压静力触探试验的直接数据有锥尖阻力 q_c 。

收稿日期: 2013-05-06

作者简介: 杜宇(1986—), 男, 工程师, 从事工程地质勘察及原位测试工作。

和侧壁摩阻力 f_s 以及孔隙水压力 U , 根据透水石的位置分为 U_1 , U_2 和 U_3 (图1), 一般以测量锥底的孔隙水压力 U_2 最为常见。

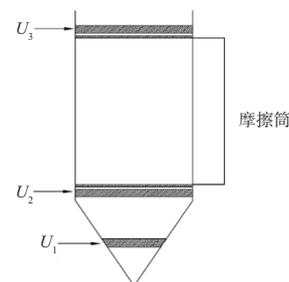


图1 孔隙水压力的不同测量位置^[2]

由于在锥尖后部作用有水压力, 这些水压力会影响锥尖阻力。直接量测得到的 q_c 并不代表实际的锥尖阻力 q_t (图2)。

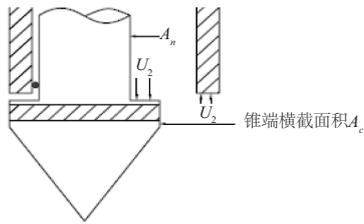


图2 孔隙水压力修正^[2]

因此,需按下式进行孔压修正:

$$q_r = q_c + (1 - \alpha)U_2 \quad (1)$$

$$\alpha = A_n / A_c \quad (2)$$

式中: α 为探头有效面积比; A_n 为探头空心柱截面积; A_c 为锥端截面积。

在饱和和软黏土中,测得的锥尖阻力 q_c 很低,而孔隙水压力 U_2 却较高;而在砂土中,锥尖阻力 q_c 很高,孔隙水压力 U_2 接近静水压力 U_0 。因此孔压修正对于黏性土显得特别重要,而对于砂土修正先后差异并不明显。

2 土层分类

锥尖阻力、侧摩阻力以及孔隙水压力等数据能非常直观地反映土类的变化,因此,土类的划分是CPTU的主要工程应用之一,国内外对基于CPTU的土类划分都发展了许多不同的方法。其中比较常用的包括张成厚土体分类图^[3]、TB 10041—2003铁路工程地质原位测试规程提出的土体分类图^[4]和Robertson土体分类图^[5]。

将CPTU数据投影到土体分类图上,结果见图3~6。

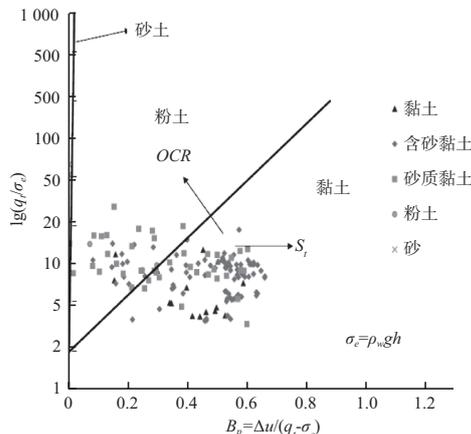


图3 张成厚分类图分类结果

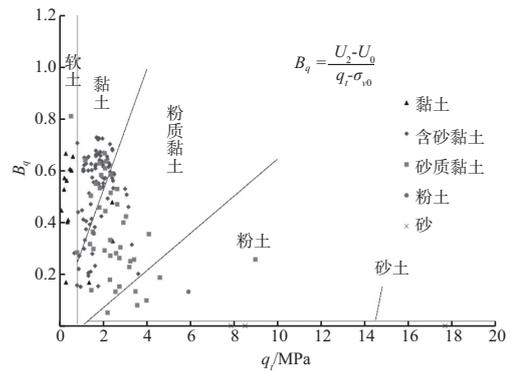
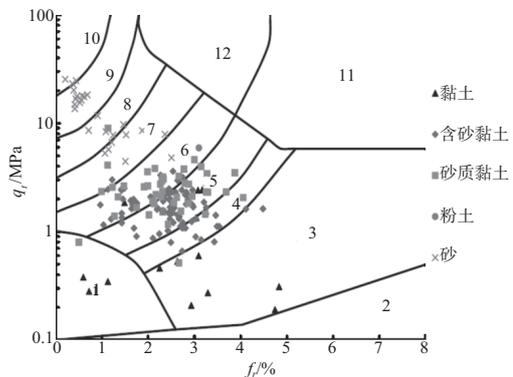
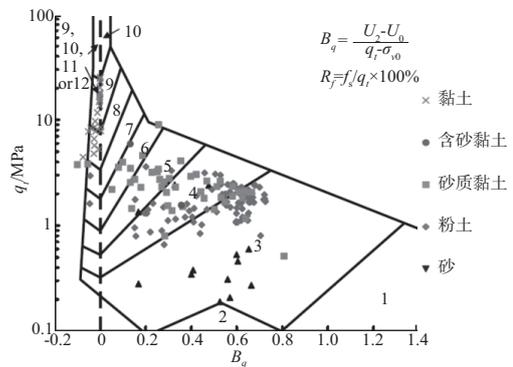
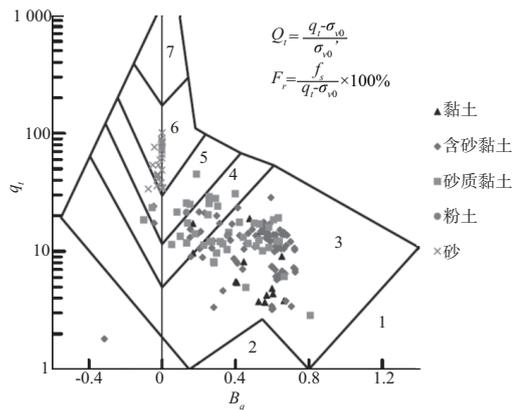


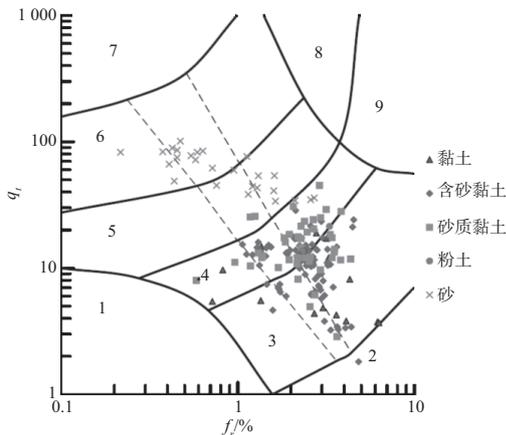
图4 铁路TB 10041—2003分类图分类结果



注: 1. 灵敏性土, 2. 有机质土, 3. 黏土, 4. 粉质黏土-黏土, 5. 粘质粉土-粉质黏土, 6. 砂质粉土-黏质粉土, 7. 粉质砂土-砂质粉土, 8. 砂土-粉质砂土, 9. 砂土, 10. 砾质砂土-砂土地, 11. 坚稠细粒土, 12. 砂土-黏质砂土。

图5 Robertson(1986)分类图分类结果





注：1. 灵敏性土，2. 有机质土，3. 黏土-粉质黏土，4. 黏质粉土-粉质黏土，5. 粉质砂土-砂质粉土，6. 砂土-粉质砂土，7. 砾质砂土-砂土，8. 砂土-黏质砂土，9. 坚硬细粒土。

图6 Robertson(1990)分类图分类结果

1) 张诚厚分类图和铁路TB 10041-2003分类图对黏性土的分类结果比较理想，但由于 B_q 和 B_p 的取值限制（分类图中两者的取值都必须大于0），导致其对砂土的分类结果较差。但张诚厚法仅需知道锥尖阻力和孔隙水压力就可以进行土体分类，是一种比较简单的方法，适用于现场初步的土体分类判断。

2) Robertson和Robertson分类图对黏性土和砂土的分类结果都比较理想，能较好反映土体特性。并且Robertson分类图采用了归一化的参数，考虑了上覆压力对土类的影响，能更准确地判别砂土。因此，Robertson和Robertson分类图适合对土类进行精细判别。

3 黏性土的不排水抗剪强度

国内外通过大量理论研究，得出黏性土的不排水抗剪强度与CPTU的锥尖阻力有如下关系^[4,6]：

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (3)$$

式中： q_t 为经过孔压修正后的锥尖阻力（kPa）； σ_{v0} 为上覆总土压力（kPa）； N_{kt} 为经验参数，一般在10~18，平均值为14。并且 N_{kt} 随着塑性指数的增大而增大，随着灵敏度的增大而减小。

对于表层淤泥类软土层，由于 q_t 值的不确定性，也可通过超静孔隙水压力 Δu 评估其不排水抗剪强度^[6]：

$$S_u = \frac{u_2 - u_0}{N_{\Delta u}} \quad (4)$$

式中： u_2 为锥底处测量的孔隙水压力； u_0 为静水压力； $N_{\Delta u}$ 为经验参数，一般在4~10。

而为了更好地反映原位状态下土体的不排水抗剪强度，本次勘察采用了异向固结不排水三轴剪切试验（CAU）获取黏性土的不排水抗剪强度。

将CAU试验得出的不排水抗剪强度与CPTU数据进行对比分析，得出以下相关关系，见图7~9。

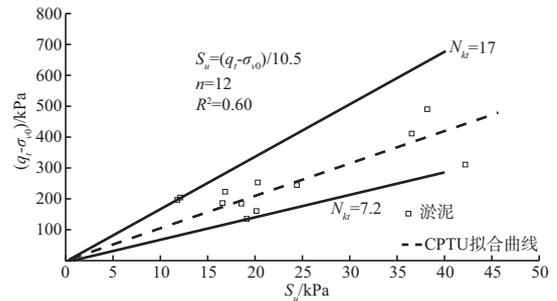


图7 淤泥类软土 S_u 与 q_t 相关关系

对于淤泥类软土， N_{kt} 在7.2~18，平均值为10.5。

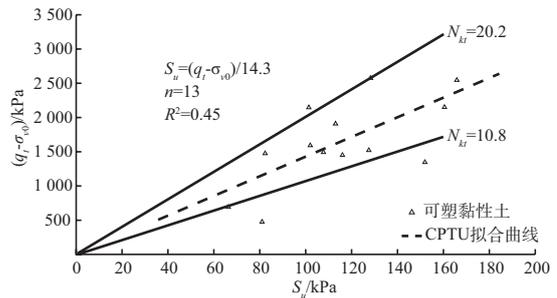


图8 可塑状黏性土 S_u 与 q_t 相关关系

对于可塑状黏性土， N_{kt} 在10.8~20.2，平均值为14.3。

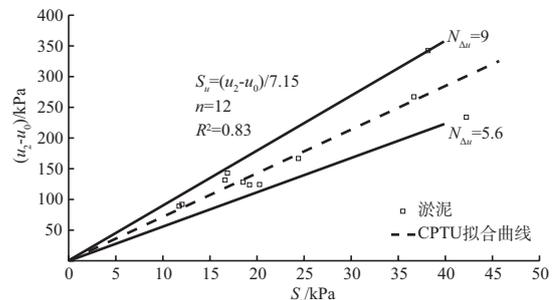


图9 淤泥类土 S_u 与 Δu 相关关系

对于表层淤泥类土11层， $N_{\Delta u}$ 在5.6~9，平均值为7.15。

4 砂土的摩擦角

国内外基于CPTU数据与砂土摩擦角的相关关

系研究主要有以下3个方法:承载力理论、孔穴扩张理论、基于试验槽标定试验的经验方法。

但目前应用最广的还是基于试验槽标定试验的经验方法。Robertson等^[6]根据试验槽标定试验提出适用于评估新近沉积,中等压缩性,非胶结石英砂摩擦角的经验公式:

$$\phi' = \arctan[0.1 + 0.38 \lg(q_t / \sigma'_{v0})] \quad (5)$$

式中: σ'_{v0} 为上覆有效压力。

Kulhawy等^[6]提出了适用于磨圆度好的非胶结石英砂的摩擦角评估经验公式:

$$\phi' = 17.6^\circ + 11 \lg\left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sqrt{\sigma'_{v0} P_a}}\right) \quad (6)$$

式中: P_a 为一个标准大气压; 单位与一致 σ'_{v0} ; ϕ' 的单位为 ($^\circ$)。

TB10041—2003《铁路工程地质原位测试规程》^[4]推荐按表1估算砂类土的内摩擦角。

表1 砂类土的内摩擦角估算

P_s/MPa	1	2	3	4	6	11	15	30
$\phi/(\text{^\circ})$	29	31	32	33	34	36	37	39

注: 孔压静力触探数据可按 $P_s = q_t$ 进行换算。

上述各个公式的解译结果见表2。

通过上述对比分析可得: 1) Robertson公式的评估结果与其它两种方法的评估结果差别较大,且不能反映出砂土内摩擦角随强度增大而增大的趋势,不适用于本工程的砂土。2) Kulhawy公式的评估结果普遍比TB 10041—2003估算表的评估

表2 砂类土内摩擦角解译结果

土性	q_t 平均值/ MPa	CPTU内摩擦角解译值			标贯试验解 译成果 ^[6]
		Robertson 公式	Kulhawy 公式	TB 10041— 2003表	
中砂	1.49	35.67	32.85	30.00	
粉细砂	3.92	35.79	35.22	32.92	35.30
粉细砂	6.48	35.54	36.40	34.19	36.20
中砂	9.49	36.80	37.69	35.40	37.60
粉细砂	10.76	34.48	37.13	35.90	36.70
含砾细砂	14.67	35.69	38.19	36.92	36.80
中砂	17.20	37.05	39.19	37.29	37.80

结果大 2° 左右。3) 在 $q_t < 12$ MPa 的评估结果对比中, Kulhawy公式的评估结果与标贯试验的结果一致性较好; 而在 $q_t > 12$ MPa 的评估结果对比中, TB 10041—2003的评估结果与标贯试验的一致性较好。4) 可以结合上述两种方法, 综合对比标贯试验的结果对砂土的内摩擦角进行评估。

5 地基的均匀性

CPTU试验可以提供沿地层深度方向的连续曲线, 这就给地基的均匀性分析提供了大量的基础数据库。根据港珠澳大桥沉管隧道预估的基槽开挖深度, 对隧道底板处的CPTU数据进行均匀性分析。

分别统计各个管节底板下0~1 m深度土层的修正后锥尖阻力 q_t 的平均值, 绘制出沿隧道走向的 q_t 分布云图和三维图(图10, 11)。

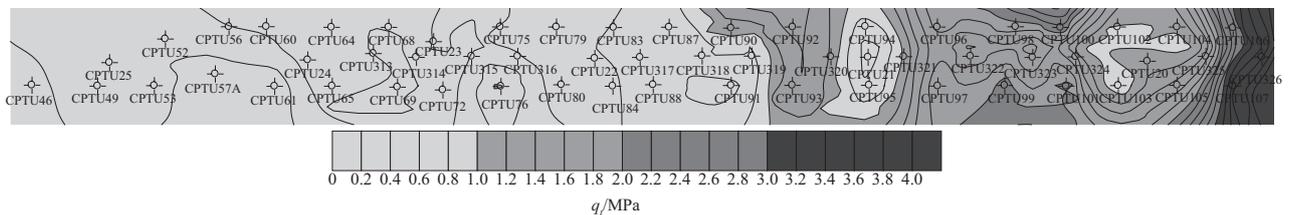


图10 隧道基底土体 q_t 分布云图

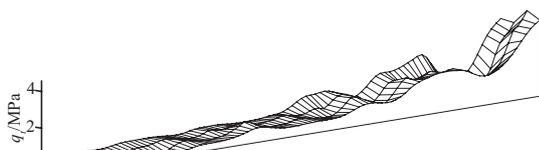


图11 隧道基底土体 q_t 分布三维网格图

通过上述基于CPTU数据的隧道基底土体 q_t 分布云图和三维图, 可以非常直观地了解沿隧道轴

线方向上基底土体的强度变化情况。

6 结论

1) 国内常用的张诚厚分类图和铁路TB 10041—2003分类图对黏性土的分类结果比较理想, 对砂土分类结果较差, 但这两种方法分类简单, 可以对现场土体进行快速初步分类。

2) 国际上通用的Robertson分类图的分类结果与钻探资料非常一致, 适用于对土体的精细判别。

3) 港珠澳大桥区域内黏性土的不排水抗剪强度可以根据CPTU数据进行评估, 其中针对表层软弱淤泥土层, N_{kt} 在7.2~18, 平均值为10.5; $N_{\Delta u}$ 在5.6~9, 平均值为7.15。针对一般可塑状黏性土, N_{kt} 在10.8~20.2, 平均值为14.3。

4) 对于砂土的内摩擦角, 当 $q_t < 12$ MPa时, 可以应用Kulhawy经验公式进行评估; 当 $q_t > 12$ MPa时, 可以应用TB10041—2003推荐的估算表进行评估。

5) CPTU试验能提供沿地层深度方向的连续曲线, 可以为地基的均匀性分析提供大量的基础数据库。通过绘制锥尖阻力分布云图及三维网格图的方法, 为评估地基的均匀性提供了一个有效的途径。

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] ISSMGE 1999 (corrected 2001). International Reference Test Procedure for the Cone Penetration Test (CPT) and the Cone Penetration Test with pressure (CPTU)[S].

[3] 张诚厚. 利用孔压静力触探试验快速测定软土地基柱状图的研究[J]. 港口工程, 1994(2): 41-47.

[4] TB 10041—2003 铁路工程地质原位测试规程[S].

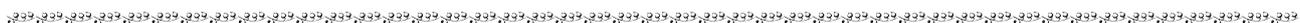
[5] Lunne T, Robertson P K, Powell J J M. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice[M]. Norge: Blakie Academic & Professional, 1997.

[6] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

[7] Robertson P K. Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering[M]. 4th Edition. California: Gregg Drilling & Testing, Inc., 2010.

[8] National Cooperative Highway Research program, Cone Penetration Testing[M]. Atlanta Botanical:Transportation Research Board, 2007.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

上航局签约乌拉圭液化气疏浚合同

6月27日, 上航局与乌拉圭萨雅格煤气股份有限公司签署乌拉圭液化气疏浚合同。中国驻乌拉圭大使馆、乌拉圭萨雅格煤气股份有限公司和上航局相关负责同志参加了签约仪式。工程将于今年8月1日开工, 工期18个月, 合同总额约4 000万美元。

萨雅格煤气股份有限公司由乌拉圭能源领域的UTE和ANCAP两家国有公司(双方各占50%的股份) 联合创建, 目的是打造乌拉圭国家液化天然气储存与再气化的第一终站。项目分疏浚工程和再气化终端服务两部分, 上航局中标疏浚工程。工程位于蒙得维的亚港以西5 km, 施工内容为港池、航道疏浚, 工程量为1 700万 m^3 。

该项目的签订, 为上航局更好地参与乌拉圭基础设施建设打下基础, 对公司进一步开拓拉美市场, 巩固中乌两国的传统友谊具有积极意义。

摘编自《中国交通建设网》