



孔压静力触探测试数据 在桩基承载力评估中的应用

何智敏, 孔明, 马秋柱

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

摘要: 阐述了主要的桩基承载力CPTU评估方法, 并分别对其适用性进行探讨。结合港珠澳大桥区域的地层特性, 采用修正后的CPTU锥尖阻力与侧摩阻力数据与试桩资料中的单位桩端阻力与单位桩侧摩阻力进行对比分析, 提出该区域的桩基承载力CPTU初步评估方法。该法以修正后的参数为基础, 能更真实地预测单桩承载力, 且具有较好的工程实用性与可操作性。

关键词: 孔压静力触探; 桩端承载力; 桩侧摩阻力; 锥尖阻力

中图分类号: TU 413

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)07-0035-04

Application of CPTU data on pile bearing capacity assessment

HE Zhi-min, KONG Ming, MA Qiu-zhu

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

Abstract: This paper elaborates main methods for pile capacity assessment based on CPTU, and analyzes the applicability of them. Combining with the regional soil layer's engineering property, this paper analyzes the corrected CPTU data and two pile load testing results, and proposes a new regional pile capacity prediction method, based on CPTU, which may serve as reference for the engineering design. Due to the use of the corrected CPTU data, this method can predict more accurately the pile capacity. Moreover, it also has good engineering practicality and operability.

Key words: piezocone penetration test (CPTU); bearing capacity of pile; shaft resistance of pile; tip resistance

利用原位测试结果评估桩基的承载力是当今岩土工程界一个重要的研究课题。静力触探因其试验机理与桩的作用机理类似, 能较好地模拟沉桩过程, 已被广泛应用于评价桩基的单桩承载力^[1]。静力触探试验机理是借助机械将一定规格的圆锥探头匀速压入土中, 以连续测定探头阻力、侧壁摩阻力、孔隙水压力等参数, 当试验采用测孔压探头时即称为孔压静力触探(CPTU)。

1 桩基承载力评估基本思路

目前国内外基于CPTU数据评估桩基承载力的

方法有很多, 但基本思路都是以下式为基础:

$$Q_u = Q_p + Q_f = q_p A_p + f_p A_s \quad (1)$$

式中: Q_u 为单桩极限承载力; Q_p 为桩端承载力; Q_f 为桩侧摩阻力; q_p 为单位桩端承载力; f_p 为单位桩侧摩阻力; A_p 为桩端受力面积; A_s 为桩侧受力面积。

2 主要桩基承载力评估方法

Almeida等^[2]基于8个黏土地地的CPTU与桩载荷试验资料提出以净锥尖阻力 q_{net} 计算桩的单位侧摩阻力和单位桩端阻力。即:

收稿日期: 2013-05-02

作者简介: 何智敏(1984—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事水运工程勘察设计工作。

单位桩端承载力:

$$q_p = (q_t - \sigma_{v0}) / k_2 = q_{net} / k_2 \quad (2)$$

式中: $k_2 = N_{kt} / 9$, N_{kt} 为圆锥系数。

单位桩侧摩阻力:

$$f_p = (q_t - \sigma_{v0}) / k_1 = q_{net} / k_1 \quad (3)$$

其中:

$$k_1 = 12 + 14.9 \lg[(q_t - \sigma_{v0}) / \sigma_{v0}] \quad (4)$$

Eslami等^[3]提出直接利用CPTU测试结果来估算桩的承载力。通过修正锥尖阻力 q_t 减去孔压值 u_2 ,使锥尖阻力转化成有效锥尖阻力 q_e ,即:

单位桩端承载力:

$$q_p = C_p q_{eq} \quad (5)$$

式中: C_p 是桩的相关系数, $C_p = 1$; q_{eq} 是 q_c 在影响区域上有效锥尖阻力 q_e 的几何平均值。

单位桩侧摩阻力:

$$f_p = C_s q_e \quad (6)$$

式中: C_s 是桩身相关系数,可以通过土层剖面图确定; q_e 是经过锥肩孔压修正和有效应力校正的有效锥尖阻力。

Takesue等^[4]提出:对于黏土,单位桩端阻力可以直接由有效锥尖阻力得到;桩的单位侧摩阻力通过CPTU测试的侧摩擦力估算,侧壁摩阻力根据CPTU测试的超孔隙水压力(Δu)而变化。即:

单位桩端承载力:

$$\text{对于黏性土, } q_p = q_t - u_2 \quad (7)$$

$$\text{对于砂土, } q_p = 0.1q_t \quad (8)$$

单位桩侧摩阻力:

$$\begin{cases} \text{当 } \Delta u < 300 & f_p = \left(\frac{\Delta u + 950}{1250}\right) f_s \\ \text{当 } 300 < \Delta u < 1250 & f_p = \left(\frac{\Delta u - 1000}{200}\right) f_s \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\Delta u = u_2 - u_0$ 。

蔡国军等^[5]提出采用修正锥尖阻力并考虑孔压效应来预测桩基承载力,通过在淤泥、淤泥质土、黏土和粉质黏土等土层条件下的CPTU试验和桩基资料反演相关系数。通过有效锥尖阻力计算单位桩端阻力

$$q_p = C_q q_e \quad (10)$$

式中: C_q 为单位桩端阻力系数, C_q 可以与承载力因素 N_c 和经验圆锥系数 N_{ke} 建立关系。而 N_{ke} 通常可

以用于计算不排水抗剪强度。

$$S_u = \frac{q_c}{N_{ke}} \quad (11)$$

Senneset等^[6]得出 N_{ke} 值为6~12。Lunne等^[7]说明 N_{ke} 在1~13内变化,似乎和孔压比 B_q 具有相关性,因此

$$C_q = \frac{N_c}{N_{ke}} \quad (12)$$

根据文献[8-9],砂土中桩单位端阻力(q_p)与CPT锥尖阻力 q_c 具有一对一的关系。对试验桩,可以由桩尖深度处的 q_e 计算单位桩端阻力系数:

$$C_q = \frac{Q_p}{q_e A_p} \quad (13)$$

C_q 反分析结果见表1。表中 N_{ke} 值基于桩尖位置十字板不排水抗剪强度 S_u 值采用方程 $S_u = q_c / N_{ke}$ 计算。得到的 N_{ke} 值与Lunne等计算结果具有很高的一致性。 N_c 值采用方程 $C_q = N_c / N_{ke}$ 计算。

表1 C_q 和 N_c 反分析值

方法	C_q	N_{ke}	N_c
打入式PTC-500	0.49	16.5	8.0
打入式PTC-400	0.54	18.9	10.2
套管法CFG-400	0.61	17.8	10.9
静压法PHC-600	0.39	14.8	5.8

单位桩侧阻力(f_p)可以由侧壁摩阻力(f_s)和超孔压(Δu_2)获得。对于黏土和粉质黏土中打入式PHC管桩和静压式的PTC管桩,相关关系如图1所示。土中拐点主要受土性的影响,黏土中的孔压高于砂土。超孔压(Δu_2)和 f_p / f_s 具有良好的相关关系,二者呈线性增长趋势。相关关系为:

$$\begin{cases} \Delta u_2 < 200 \text{ kPa} & f_p = \left(\frac{\Delta u_2 + 324}{250}\right) f_s \\ 200 \text{ kPa} < \Delta u_2 < 1000 \text{ kPa} & f_p = \left(\frac{\Delta u_2 + 100}{125}\right) f_s \\ \Delta u_2 = u_2 - u_0 \end{cases} \quad (14)$$

CPTU测试的侧摩阻力 f_s 取决于贯入速率和摩擦套筒的表面粗糙程度。打桩方式和CPTU贯入速率的差异以及桩和摩擦套筒间的差异可能是 f_p / f_s 大于1的主要因素。

上述方法从研究思路区分,基本可归纳为两类:文献[2-3]是采用修正后的CPTU锥尖阻力预测单位桩端承载力(q_p)与单位桩侧摩阻力

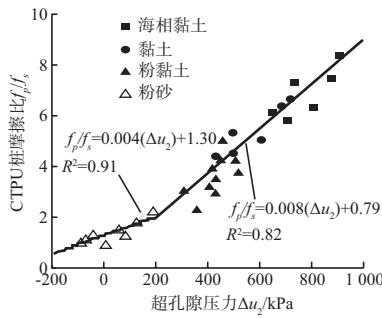


图1 由 f_s 和 Δu 来确定桩侧摩阻力 f_p

(f_p), 其区别主要在于对锥尖阻力修正方法上的差异; 而文献[4-5]的方法中则是分别采用修正后的CPTU锥尖阻力与侧摩阻力预测单位桩端阻力与单位桩侧摩阻力。从适用性上分类: 文献[2-3]主要适用于黏性土地层; 文献[4-5]的方法适用于黏性土、砂土等地层。

3 基于CPTU的桩基承载力评估

港珠澳大桥在西人工岛与青州航道桥附近的分别由天津港湾工程质量检测中心有限公司与广东省长大公路工程有限公司联合体进行了桩基载荷试验, 桩端持力层选择在更新世砂层或强风化岩层中。在试桩附近2 m范围内四航院进行了CPTU试验(XDSZ, CPTU1, CPTU2), 为CPTU与桩基承载力分析研究提供数据支持。由于CPTU

设备的能力所限, 试验只能贯入更新世砂层, 故本文对于桩基承载力的分析主要结合桩端位于砂层的试桩资料进行。

上述桩基承载力评估方法中仅文献[4-5]的方法在砂土中具有适用性。因此本研究借鉴上述两种方法的研究思路, 结合试桩资料与CPTU测试数据, 分别对桩端阻力与桩侧摩阻力进行分析, 并对上述方法进行修正, 提出了港珠澳大桥工程的初步经验关系。

3.1 桩端阻力评估

根据文献[5], 单位桩端阻力 q_p 通过有效锥尖阻力 q_e 计算:

$$q_p = C_q q_e \quad (15)$$

式中: C_q 为桩端阻力系数;

根据文献[8-9]的研究, 砂土中桩单位端阻力 q_p 与CPT锥尖摩阻力 q_e 具有一对一的关系。因此根据桩尖深度处的 q_e 反算单位桩端阻力系数 C_q , 计算公式如下:

$$C_q = \frac{Q_p}{1000q_e A_p} \quad (16)$$

式中: Q_p 为桩端阻力(kN); A_p 为桩端截面面积(m^2)。

根据上式, 结合港珠澳大桥试桩数据, 对砂土中的单位桩端阻力系数 C_q 进行反演计算结果如表2所示。

表2 C_q 反演计算结果

桩号	Q_p /kN	桩径/m	A_p/m^2	桩端形式	桩底高程/m	桩端地层	q_e /MPa	C_q
M4	1904	1.2	1.1304	开口	-56.3	粗砾砂	20.8	0.08
M5	1895	1.2	1.1304	开口	-56.3	粗砾砂	20.8	0.08
J1	1783	1.2	1.1304	开口	-47.3	粗砾砂	17.2	0.09
J2	1778	1.2	1.1304	开口	-47.3	粗砾砂	17.2	0.09

由表2计算结果可知, 单位桩端阻力系数 C_q 为0.08~0.09。

3.2 桩侧摩阻力评估

单位桩侧阻力(f_p)由侧壁摩阻力(f_s)和超孔压(Δu_2)获得。结合试桩数据对超孔压(Δu_2)和 f_p/f_s 进行分析, 结果如图2所示。图中显示超孔压(Δu_2)和 f_p/f_s 具有良好的相关性, 二者呈线性增长趋势。相关关系为:

$$\begin{cases} \Delta u_2 < 110 \text{ kPa} & f_p = (0.0036\Delta u_2 + 0.48)f_s \\ 110 \text{ kPa} < \Delta u_2 < 500 \text{ kPa} & f_p = (0.0125\Delta u_2 - 0.5)f_s \\ \Delta u_2 = u_2 - u_0 & \end{cases} \quad (17)$$

4 结语

1) 与其他原位测试相比, 静力触探的试验机理能更好地模拟成桩过程, 且现场操作受人为因素影响小, 测试结果稳定, 其应用于预测单桩承

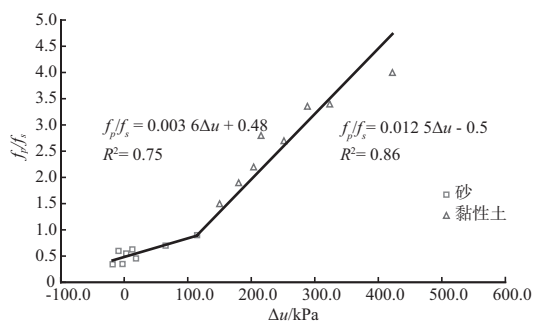


图2 f_p/f_s 与 Δu 相关关系

承载力更为可靠。

2) 以港珠澳大桥区域范围内的CPTU数据和试桩资料为基础, 提出该区域的桩基承载力CPTU评估方法, 为工程设计及优化提供一种新的参考依据, 有助于促进工程可靠性与经济性的平衡。

3) 受研究数据量的限制, 本文所提出的桩基承载力的CPTU评估方法, 只是一个初步模型, 还有待进一步验证与完善。

参考文献:

[1] 张诚厚. 孔压静力触探应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 15-26.

[2] Almeida M S S, Danziger F A B, Lunne T. Use of the piezocone test to predict the axial capacity of driven and jacked piles in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996,33(1): 23-41.

[3] Eslami A, Fellenius B H. Pile capacity by direct CPT and CPTU methods applied to 102 case histories[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 886-904.

[4] Taksue K, Sasao H, Matsumoto T. Correlation between ultimate pile skin friction and CPT data[M]// Paul W. Mayne, Peter Kay Robertson. Geotechnical Site Characterization. Rotterdam: Balkema,1998: 1 177-1 182.

[5] 蔡国军, 刘松玉. 基于CPTU测试的桩基承载力预测新方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 479-482.

[6] Senneset K, Sandven R, Janbu N. Evaluation of soil parameters from piezocone tests transportation research record No.1235[R]. Washington D C: Transportation Research Board, National Research Council, 1989: 24-37.

[7] Lunne T, Christophersen H P, Tjelta T I. Engineering use of piezocone data in North Sea clays[C]. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco: Balkema Pub (Rotterdam), 1985: 907-912.

[8] De Beer E E. The scale effect in the transposition of the results of deep sounding tests on the ultimate bearing capacity of piles and caisson foundations[J]. Géotechnique, 1963, 8(1): 39-75.

[9] Salgado R. Analysis of penetration resistance in sands [D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 1993.

(本文编辑 武亚庆)

~~~~~

### 著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。