

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.007



# 基于单桥静力触探的静压桩沉桩阻力估算方法

黄凯<sup>a</sup>, 张明义<sup>a,b</sup>, 白晓宇<sup>a,b</sup>, 孙文来<sup>a</sup>

(青岛理工大学 a. 土木工程学院; b. 蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033)

**摘要:** 为了通过单桥静力触探指标比贯入阻力来模拟计算静压桩沉桩阻力, 根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008) 中由比贯入阻力计算的单桩承载力与现场压桩试验所得到的压桩力进行比较, 提出了考虑桩端阻力和桩侧摩阻力的综合修正系数  $\alpha$ 、 $\beta$  来估算静压桩沉桩阻力的计算方法, 给出桩端阻力和桩侧摩阻力的计算公式; 针对不同土层, 给出了不同综合修正系数建议值; 基于自行编制的 Visual Basic 可视化程序, 以曲线的形式将计算结果直观地显示出来。实际工程的模拟计算和压桩力的实测结果进一步表明采用综合修正系数计算沉桩阻力完全可行。

**关键词:** 静力触探; 静压桩; 沉桩阻力; 综合修正系数

**中图分类号:** TU473.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2019)01-0055-07

## Estimation of the penetration resistance of jacked pile based on the single bridge CPT

Huang Kai<sup>a</sup>, Zhang Mingyi<sup>a,b</sup>, Bai Xiaoyu<sup>a,b</sup>, Sun Wenlai<sup>a</sup>

(a. School of Civil Engineering; b. Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China)

**Abstract:** The penetration resistance of jacked pile was calculated by using the specific penetration resistance of single bridge cone penetration test. According to the comparison between estimated bearing capacity from *Technical Code for Building Pile Foundation* (JGJ 94-2008) and measured value, the calculation method of estimating the penetration resistance of jacked pile was put forward, which took comprehensive correction coefficient  $\alpha$  and  $\beta$  of pile tip resistance and skin friction of pile into consideration. Besides, the calculation formula of base resistance and side resistance were also defined. Several suggestions for determination of comprehensive correction coefficient were given for different soil layers. The proposed approach was compiled in the Visual Basic visualization program, and the corresponding results were

**收稿日期:** 2018-03-15

**基金项目:** 国家自然科学基金(51708316、51778312、51809146); 中国博士后科学基金(2018M632641); 山东省重点研发计划(2017GSF1610、2018GSF117008); 山东省自然科学基金(ZR2016EEQ08、ZR2017PEE006); 山东省高等学校科技计划(J16LG02); 青岛市应用基础研究计划(16-5-1-39-jch)

**作者简介:** 黄凯(1991-), 男, 主要从事地基基础研究, E-mail: 1507846371@qq.com.

白晓宇(通信作者), 男, 博士(后), 副教授, E-mail: baixiaoyu538@163.com.

**Received:** 2018-03-15

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51708316, 51778312, 51809146); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M632641); Shandong Key Research and Development Program (No. 2017GSF1610, 2018GSF117008); Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2016EEQ08, ZR2017PEE006); Higher Educational Science and Technology Program of Shandong Province (No. J16LG02); Applied Basic Research Programs of Qingdao (No. 16-5-1-39-jch)

**Author brief:** Huang Kai (1991-), main research interest: foundation, E-mail: 1507846371@qq.com.

Bai Xiaoyu (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: baixiaoyu538@163.com.

displayed in the form of graphics. Through the simulation of specific engineering and test results of pile driving pressure, the results further showed that it was feasible to use the comprehensive correction coefficient to calculate the pile resistance. The obtained results could provide guidances for the design and construction of jacked pile under similar condition in engineering practice.

**Keywords:** cone penetration test; jacked pile; penetration resistance; comprehensive correction coefficient

在中国,随着土木工程建设进度的不断向前推进,静压桩以其诸多优点被广泛应用到桩基工程中。在静压桩施工前估算出沉桩阻力,就可以解决桩基设计施工过程中对桩端持力层和桩机型号的选择以及对沉桩可能性的判断等诸多难题。由于静力触探过程与静力压桩过程十分相似,因此,采用静力触探试验对静压桩沉桩阻力进行估算不失为一种有效方法<sup>[1-4]</sup>。

静力触探试验(cone penetration test, CPT)是采用特定的机械压入装置,用一定的静力将触探探头按一定速度匀速压入土中,同时,利用探头内部装有的力学传感器或机械测量仪表将探头受到的贯入阻力实时记录保存下来。根据触探探头所测得的贯入阻力情况分析土层的物理力学性质,从而达到划分土层、评价地基土承载力、选择桩基持力层、估算单桩承载力的目的。静力触探试验相比其他原位试验和室内试验具有连续贯入、施工快速、测量结果准确等优点,且能直接测得土体在原始状态下的物理力学参数<sup>[5-8]</sup>。

目前,对于用静力触探来模拟计算沉桩阻力的方法研究,已有很多学者做了相关工作<sup>[9-14]</sup>。静力触探过程与静力压桩过程极为相似,静力触探试验可以看作小型化的静压沉桩过程,二者的差别主要在于横向尺寸及纵向尺寸的大小不同。因此,对于静力触探的研究可采用与静力压桩相同的贯入理论和方法<sup>[15-16]</sup>。利用静力触探指标可以很好地对单桩承载力进行估算,但因金属探头和混凝土桩在外形尺寸、材料以及压入速度等方面所存在的差异,利用静力触探得到的力学参数不能直接用来估算沉桩阻力,需要对其进行修正处理。本文依据单桥静力触探资料得到的比贯入阻力,分桩端阻力和桩侧摩阻力两部分来估算沉桩阻力,同时,采用综合修正系数对端阻和侧阻进行修正,并自主编制了 Visual Basic 可视化计算程序,使计算更加方便快捷且直观。

## 1 用单桥静力触探 $p_s$ 值估算压桩力

单桥静力触探试验只能得到一个测试指标,即比贯入阻力  $p_s$ ,它能综合反映锥尖阻力和侧壁摩阻

力的大小,能够与静压桩沉桩阻力建立某种联系。但由于土的类型、成因及年代等不同,不能用同一个函数式来推导压桩力。中国各相关规范规程中也给出了相应的规定,介绍了用静力触探成果来确定桩基承载力的方法。本文以《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)中用单桥静力触探确定单桩承载力的方法为基础模拟计算沉桩阻力,提出考虑综合修正系数的承载力计算公式。

《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)<sup>[17]</sup>中给出了没有地区经验时的单桩承载力计算公式,如式(1)所示。

$$Q_{uk} = u \sum q_{sik} l_i + \alpha \cdot p_{sk} A_p \quad (1)$$

式中: $u$ 为桩身周长,m; $q_{sik}$ 为由比贯入阻力  $p_{ssi}$  值估算得到的桩周第  $i$  层土的极限侧摩阻力标准值,kPa; $l_i$ 为第  $i$  层土的厚度,m; $\alpha$ 为桩端阻力修正系数; $p_{sk}$ 为桩端附近的比贯入阻力平均值,kPa; $A_p$ 为桩端面积,m<sup>2</sup>。

由式(1)可以看出,桩承载力包括两部分,侧摩阻力和端阻力,因此式(1)可写成

$$Q_{uk} = Q_s + Q_b = u \sum \frac{p_{ssi}}{C_i} l_i + \alpha \cdot p_{sk} A_p \quad (2)$$

式中: $Q_s$ 为总的极限侧摩阻力,kN; $Q_b$ 为总的极限端阻力,kN; $p_{ssi}$ 为第  $i$  层土的比贯入阻力,kPa; $C_i$ 为第  $i$  层土的侧摩阻力换算系数。

由式(2)可以看出,利用比贯入阻力  $p_s$  值分桩侧摩阻力和桩端阻力两部分来估算压桩力,这样更有利于对静压桩施工过程中的沉桩阻力变化进行分析。

## 2 桩端阻力和桩侧摩阻力估算

### 2.1 桩端阻力估算

由(2)式可知,桩端阻力  $Q_b$  的计算公式为

$$Q_b = \alpha \cdot p_{sk} A_p \quad (3)$$

由式(3)可知,桩端阻力与桩端附近的比贯入阻力有关, $p_{sk}$ 的取值问题包括取值范围和取值方法两个方面。取值范围是应该在桩端平面上下多大范围内取值,此处令桩端平面以上取值范围为  $d_1$ ,以下为  $d_2$ ;取值方法是如何按  $d_1$  范围内的比贯入阻力  $p_{sk1}$  和  $d_2$  范围内的比贯入阻力  $p_{sk2}$  来计算桩端总的比贯入阻力  $p_{sk}$ 。取值范围和取值方法的确定主要

与桩端土的类型和破坏机理有关,桩端土的类型和破坏机理不一样,其确定方法也不一样。

取值范围方面,一些规范给出了相应的建议值,如表1所示。

表1 取值范围建议值

Table 1 The recommended value of value range

取值范围	印度	美国		前苏联	挪威	铁道部	同济地质	一机勘	交通部 四航局
		松砂	中密砂						
$d_1$	3.75B	3.75B	8B	1B	5B	4B	4B	4B	4B
$d_2$	1B	1B	3.5B	4B	3B	4B	1B	1B	4B

注:  $B$  为方桩的边长或圆桩的直径。

取值方法方面,有3种情况:

1) 认为桩端平面上下取值范围内的比贯入阻力对桩端阻力的影响相同,此时,桩端的比贯入阻力可按式(4)计算。

$$p_{sk} = \frac{p_{sk1} + p_{sk2}}{2} \quad (4)$$

2) 当  $p_{sk1} \leq p_{sk2}$  时,  $p_{sk} = \frac{p_{sk1} + p_{sk2}}{2}$ ; 当  $p_{sk1} >$

$p_{sk2}$  时,  $p_{sk} = p_{sk2}$ 。

3) 比贯入阻力根据取值范围大小取加权平均值,按式(5)计算。

$$p_{sk} = \frac{p_{sk1}d_1 + p_{sk2}d_2}{d_1 + d_2} \quad (5)$$

## 2.2 桩侧摩阻力估算

由式(2)可知,桩侧摩阻力  $Q_s$  的计算公式为

$$Q_s = u \sum \frac{p_{ssi} l_i}{C_i} \quad (6)$$

桩单位侧摩阻力  $f_i$  的大小主要与桩周土的类型有关,  $f_i$  需借助常规土工试验指标(如:土类、塑性指数及液性指数等),根据土的类别、埋藏深度、排列次序进行取值。此外,桩基规范中对于桩侧单位极限摩阻力的取值也给出了一定的说明。因此,根据土层情况,运用比贯入阻力对各土层的单位侧摩阻力  $f_i$  进行估算可分为以下几种情况:

1) 灰色淤泥质黏土或灰色黏土,这两类土颗粒较细,静力触探曲线线型较为平顺,起伏较小,可按式(7)估算单位桩侧摩阻力  $f_i$ 。

$$f_i = \frac{p_{ssi}}{20} \quad (7)$$

2) 暗绿色黏土、坚硬或裂隙黏性土,为高度超压密土,这类土的静力触探曲线略有起伏,可按式(8)估算  $f_i$ 。

$$f_i = 0.25 + 0.025 p_{ssi} \quad (8)$$

3) 粉砂、细砂和中砂,这几类土颗粒较粗,其静力触探曲线起伏较大,可按式(9)估算  $f_i$ 。

$$f_i = \frac{p_{ssi}}{50} \quad (9)$$

4) 粉质黏土和粉土,这两类土介于黏土和砂土之间,颗粒相对较粗,可塑性稍差,静力触探曲线与上述砂类土相似,可按式(9)估算  $f_i$ 。

5) 当桩端穿透砂层底面时,由式(9)计算得到的侧摩阻力值偏大,此时可考虑采用一折减系数  $\eta$  按式(10)估算  $f_i$ 。

$$f_i = \eta \frac{p_{ssi}}{50} \quad (10)$$

实际工程中,土层的性质较为复杂,采用上述计算公式有时并不能保证沉桩阻力的计算精度。因此,计算时可根据土层的实际情况,采用调节系数  $\beta$  对按比贯入阻力  $p_s$  估算的单位桩侧摩阻力进行修正,那么压桩力的计算公式为

$$Q_{uk} = Q_s + Q_b = \beta u \sum f_i l_i + \alpha \cdot p_{sk} A_p \quad (11)$$

## 3 综合修正系数建议值

运用比贯入阻力  $p_{sk}$  计算沉桩阻力时,计算值的精度与综合修正系数  $\alpha$ 、 $\beta$  值有关,正确选用  $\alpha$ 、 $\beta$  值可使沉桩阻力计算值获得满意的结果。经研究分析可知,采用综合修正系数  $\alpha$ 、 $\beta$  对单桩承载力的计算进行修正是完全可行的。通过对端阻和侧阻在沉桩阻力中所占比例的分析可知,当桩的入土深度较浅时,侧摩阻力没有完全发挥,此时桩端阻力占主要部分;随着桩贯入深度的增加,桩侧摩阻力逐渐积累,所占的比例也逐渐增大。当桩端进入硬土层时,端阻会明显提高,同时,由于土层埋深较大,此时的侧摩阻力累计值已较大,因此,侧阻在沉桩阻力中仍可占很大。 $\alpha$ 、 $\beta$  值与土的类型及性质有关,通过对4个静压桩工程的计算,对比分析了压桩力计算值与实测值,得出了每个工程中各层土的综合修正系数取值,如表2所示。根据4个工程中的修正系数值,经过进一步的归纳与分析,提出了不同土类的  $\alpha$ 、 $\beta$  建议值,见表3。

表 2 各工程的综合修正系数取值  
Table 2 The comprehensive correction coefficient of each project

土类	工程 1		工程 2		工程 3		工程 4	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
人工填土	1.00	0	1.00	0	0.90~1.00	0	1.00	0
粉质黏土	0.70~0.80	0.50~0.60	0.70~0.85	0.50~0.75			0.76	0.61
淤泥质粉质黏土	0.70~0.79	0.45~0.73	0.72~0.76	0.52~0.80			0.74	0.61
淤泥质黏土			0.71~0.78	0.55~0.67	0.80	0.61		
黏土					0.70~0.80	0.47~0.64	0.70~0.80	0.41~0.52
砂质粉土	0.86	0.52	0.78~0.86	0.53~0.71	0.85	0.70	0.85	0.60
黏质粉土	0.85~0.90	0.45~0.53	0.81~0.87	0.41~0.49				
粉砂					1.00	0.70	0.90	0.60
中粗砂					1.00	0.97		

表 3 土类的综合修正系数建议值

Table 3 The comprehensive correction coefficient recommended value of soil

土类	土的状态	$\alpha$	$\beta$
人工填土		1.00	0
淤泥		1.00	1.00
黏土、粉质黏土	软塑~硬塑	0.70~0.80	0.40~0.50
粉土	稍密~密实	0.75~0.90	0.45~0.55
粉细砂	松散~密实	0.80~0.90	0.55~0.65
粉砂~中砂	稍密~密实	1.00	0.70~1.00
砂岩		0.90	0.80

从表中的综合修正系数建议值可以看出,对于人工填土和淤泥, $\alpha$ 、 $\beta$ 基本为一常数;对于从黏性土开始的土颗粒不断变粗的土, $\alpha$ 、 $\beta$ 大体上随着土颗粒粒径的增大而增大,说明土颗粒越粗、土层强度越大,沉桩阻力计算值就越接近实测值。对于同类土的不同状态,当土由软变硬或由松散变密实时, $\alpha$ 、 $\beta$ 也相应变大,说明土质越硬越密实,沉桩阻力计算值与实测值的差异就越小。此外,对于除淤泥以外的其他土类, $\alpha$ 均比 $\beta$ 大,说明端阻的修正比例侧阻的修正要小,与实际情况相符。

### 4 Visual Basic 可视化程序的编制

为了使计算结果和测试结果的对比分析更加方便快捷,自主编制了 Visual Basic 计算程序,对沉桩阻力进行调试计算。程序计算时,以  $\alpha$ 、 $\beta$  为可变量,根据所测得的静力触探数据,采用式(11)模拟计算在不同深度下的沉桩阻力。Visual Basic 程序做了可视化处理,能够把复杂的数据计算结果转变成可视化的数据曲线,便于和实测曲线进行对比分析,直

观性强。程序的具体计算流程如图 1 所示。

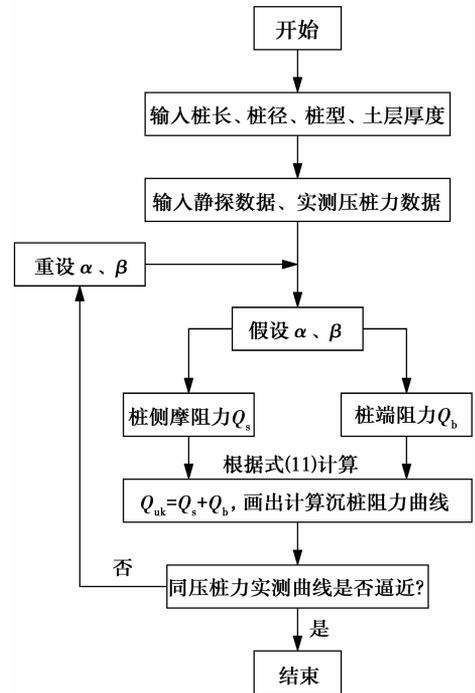


图 1 程序计算流程图

Fig. 1 The chart of program calculation

计算程序开始调试前,一般先假设初始  $\alpha$ 、 $\beta$  都为 1。输入试验参数和数据进行模拟计算,将初步模拟的结果与实测曲线进行对比,根据不同土层的分类,自上而下逐层调节系数的大小,直至计算曲线逼近实测曲线。调试计算时,先对上层土进行调节,待上层土满足计算要求后方可对下层土进行调节,通过不断地调整每层土的修正系数  $\alpha$ 、 $\beta$  值,使模拟曲线与实测曲线相逼近,最终确定出不同土层的  $\alpha$ 、 $\beta$  值。积累相关经验后,可为不同地区的相似静压桩工程提供价值参考。

### 5 工程实例计算分析

为了进一步验证式(11)计算沉桩阻力的可行性,以及对比分析实测阻力与模拟阻力的关系,引用了上海地区的两个静压桩工程实测压桩资料进行分析,整个计算过程由程序完成,测试结果以曲线的形

式给出。

#### 5.1 工程实例计算

1)上海市某水暖气材厂静压桩工程,桩长 35.0 m,桩截面 400 mm×400 mm,各土层的参数指标及综合修正系数见表 4,计算曲线与实测曲线如图 2 所示。

表 4 土层参数及综合修正系数值

Table 4 The data of test pile and the comprehensive correction

层次	土层名称	层底深度/m	厚度/m	土质颜色	平均值 $p_s$ /MPa	$\alpha$	$\beta$
1	人工填土	2.00	2.00	灰黄色	1.21	1.00	0
2	粉质黏土	4.00	2.00	褐黄色	1.06	0.80	0.50
3	淤泥质粉质黏土	9.10	5.10	灰色	0.64	0.70	0.45
4	砂质粉土	10.10	1.00	灰色	1.69	0.85	0.75
5	淤泥质粉质黏土	17.30	7.20	灰色	0.62	0.90	0.90
6	粉质黏土	24.00	6.70	灰绿色	2.20	0.70	0.50
7	粉质黏土	27.30	3.30	暗绿色	1.22	0.70	0.60
8	粉质黏土夹黏质粉土	35.00	7.70	灰色	3.40	0.85	0.85

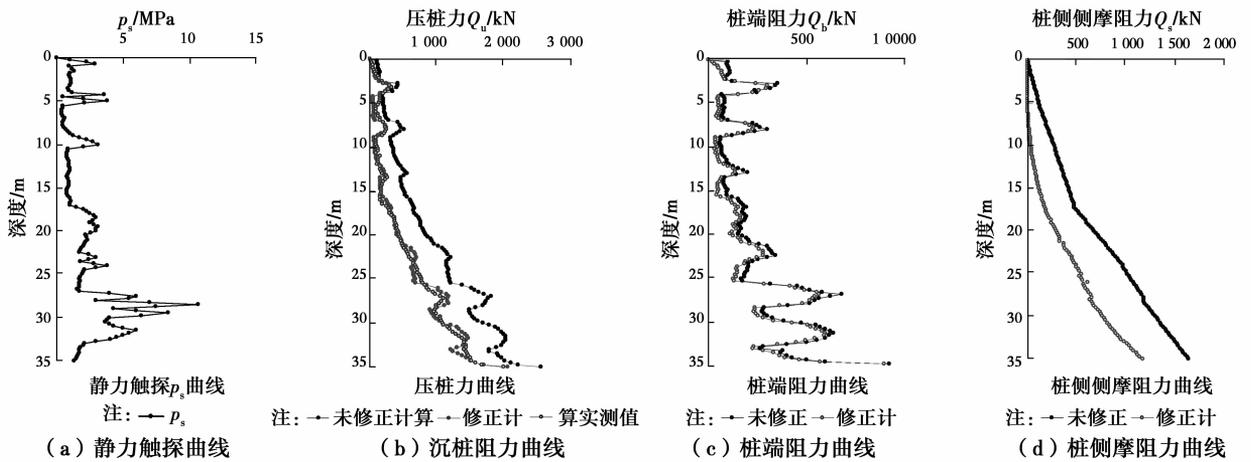


图 2 上海某水暖气材厂静压桩工程的实测曲线与计算曲线

Fig. 2 The measured curve and calculated curve of pile foundation engineering of a gas plumbing material factory in Shanghai

2)上海市某大厦静压桩工程,桩长 36.0 m,桩截面 400 mm×400 mm,各土层的参数指标及综合

修正系数见表 5,计算曲线与实测曲线如图 3 所示。

表 5 土层参数及综合修正系数值

Table 5 The data of test pile and the comprehensive correction

层次	土层名称	层底深度/m	厚度/m	土质颜色	平均值 $p_s$ /MPa	$\alpha$	$\beta$
1	吹填土	2.60	2.60	黄色	2.25	1.00	0
2	吹填土	3.00	0.40	灰色	0.51	0.80	0.50
3	砂质粉土	15.00	12.00	灰色	6.08	0.85	0.70
4	淤泥质黏土	19.60	4.60	灰色	0.84	0.90	0.85
5	黏土	24.10	4.50	灰色	0.82	0.80	0.75
6	黏土	27.90	3.80	暗绿色	2.72	0.70	0.50
7	粉砂	36.00	8.10	草黄色	10.60	1.00	0.70

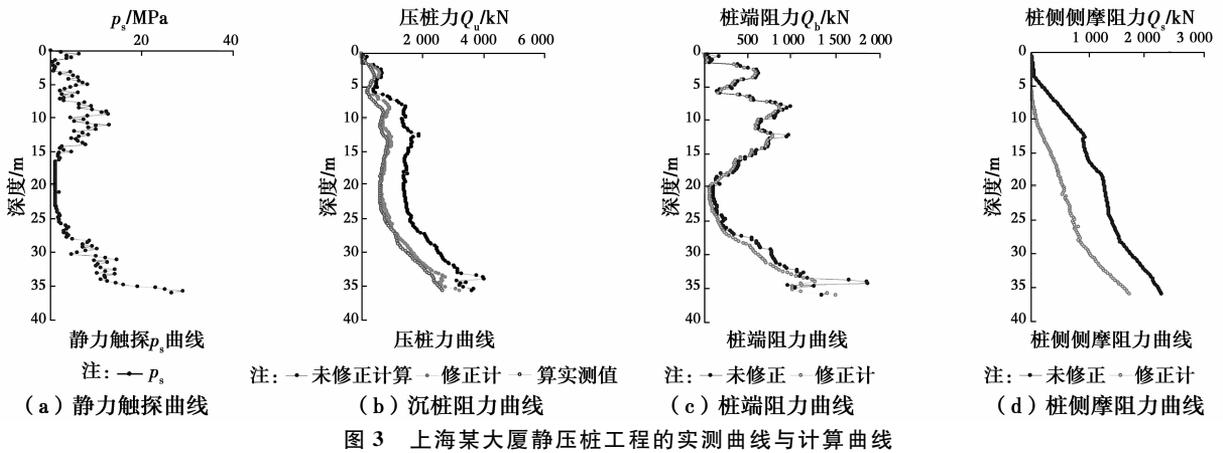


Fig. 3 The measure curve and calculated curve of pile foundation engineering of a building in Shanghai

## 5.2 计算结果分析

从图 2 和图 3 的沉桩阻力曲线可以看出,沉桩阻力估算曲线与静力触探比贯入阻力曲线沿深度方向的变化规律相似;未经修正的沉桩阻力计算曲线与压桩力实测曲线沿深度方向的变化规律大致相同,但计算值均偏大,且在不同土层中二者相差的程度也不一样。经过综合修正系数修正后的沉桩阻力计算曲线与压桩力实测曲线基本上相吻合,说明采用综合修正系数,利用静力触探指标预测沉桩阻力完全可行。在桩端进入持力层之前,沉桩阻力随贯入深度增加提高的幅度并不大,甚至在部分土层中出现压桩力下降的趋势;桩端开始进入持力层时,沉桩阻力增加较快,当桩端到达设计位置时沉桩阻力也达到最大值。此外,沉桩阻力与桩穿过土层的类型有关,对于土性相似的不同深度的土层,土层埋深越大,沉桩阻力也越高。

从桩端阻力曲线图可以看出,桩端阻力曲线与静力触探曲线及沉桩阻力曲线的变化规律一致,修正后的端阻力曲线与未修正的端阻力曲线相差不大,基本上相吻合,说明采用静力触探资料估算桩端阻力可靠度较高,端阻综合修正系数对桩端阻力的修正较小,未经修正的桩端阻力甚至可直接用来计算沉桩阻力。此外,桩端阻力不随深度线性增大,只有在桩端进入软硬程度不同的土层时才会发生突变。在同一层土中,随贯入深度的增加,桩端阻力提高的幅度并不大,此时沉桩阻力的提高主要来源于桩侧摩阻力的积累。

从桩侧摩阻力曲线图可以看出,桩侧摩阻力曲线与沉桩阻力曲线相似,但变化规律相差较大;未经修正的桩侧摩阻力计算值沿深度方向增加较快,与修正值相差较大,在沉桩阻力计算时若采用未修正值将导致沉桩阻力计算值过大,与实际情况不符。

经过修正后的桩侧摩阻力随深度增加较慢。同时,由于浅部土层为人工填土或吹填土,土质疏松,地表以下 5 m 范围内的侧摩阻力修正值较小,几乎为零,此时的沉桩阻力主要由桩端阻力提供。此外,由于材料性质的不同,静力触探的侧壁摩阻力与桩的侧摩阻力在土层中的变化也不同,调整的幅度也不一样。

## 6 结论

1)从静力触探资料入手,对比了静力触探和静力压桩的关系,提出了由单桥静力触探比贯入阻力  $p_s$  值估算沉桩阻力的计算公式。公式分桩端阻力和桩侧摩阻力两部分,同时,采用综合修正系数  $\alpha$ 、 $\beta$  对沉桩阻力进行修正,经修正后的沉桩阻力与实测值误差较小。实际工程中,利用单桥静力触探资料估算压桩力,可解决桩基设计中的诸多问题。

2)通过对几个工程的分析,提出了适用于不同土层的综合修正系数建议值,可为类似工程提供借鉴与参考。同时,自主编制了 Visual Basic 可视化计算程序,把复杂的测试数据转变成可视化曲线,使计算分析更加方便快捷、直观。

3)通过 2 个实际静压桩工程的计算,对沉桩阻力、桩端阻力和桩侧摩阻力在土层中的变化规律进行了分析,进一步验证了利用单桥静力触探比贯入阻力,采用综合修正系数,分桩端阻力和桩侧摩阻力计算沉桩阻力的可行性。

## 参考文献:

- [1] 徐同悦. 沛屯地区静力触探确定预制管桩竖向承载力的方法探讨[J]. 工程勘察, 2014, 42(4): 30-33.  
XU T Y. Study on determination of bearing capacity of prestressed concrete pile by cone penetration test in Peitun area [J]. Geotechnical & Surveying, 2014, 42

- (4); 30-33. (in Chinese)
- [2] LEE J W, KIM M K, KYUNG D Y. Estimation of lateral load capacity of rigid short piles in sands using CPT results [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(1): 48-56.
- [3] LEE J W, PAIK K H, KIM D H, et al. Estimation of axial load capacity for bored tapered piles using CPT results in sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(9): 1285-1294.
- [4] 路家峰, 顾国荣, 杨石飞. 静力触探估算单桩极限承载力计算方法研究[J]. *建筑结构*, 2015, 45(Sup2): 217-220.  
LU J F, GU G R, YANG S F. Study on ultimate bearing capacity calculation of pile based on static cone penetration test [J]. *Building Structure*, 2015, 45(Sup2): 217-220. (in Chinese)
- [5] 沈小克, 蔡正银, 蔡国军. 原位测试技术与工程勘察应用[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(2): 98-120.  
SHEN X K, CAI Z Y, CAI G J. Applications of in-situ tests in site characterization and evaluation [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(2): 98-120. (in Chinese)
- [6] 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力相关关系研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(2): 536-542.  
MA H P, CHEN Z Y, YU S. Correlations of soil shear strength with specific penetration resistance of CPT in Shanghai area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(2): 536-542. (in Chinese)
- [7] 罗金满, 刘伟. 静力触探在岩土工程勘察中的应用[J]. *施工技术*, 2012, 41(Sup): 14-18.  
LUO J M, LIU W. Application of cone penetration test in geotechnical investigation [J]. *Construction Technology*, 2012, 41(Sup): 14-18. (in Chinese)
- [8] 吴波鸿, 王贵和, 刘宝林, 等. 静力触探在渤海某海上平台场址工程中土层划分的应用研究[J]. *施工技术*, 2016, 45(Sup): 915-919.  
WU B H, WANG G H, LIU B L, et al. Application of CPT on soil classification in a offshore platform project of Bohai sea [J]. *Construction Technology*, 2016, 45(Sup): 915-919. (in Chinese)
- [9] MIAO Y H, CAI G J, LIU S Y. Predicting the ultimate bearing capacity of single piles based on CPTU [C]//*Advanced Materials Research*, 2011, 243: 4402-4407.
- [10] ABU-FARSAKH M Y, TITI H H. Assessment of direct cone penetration test methods for predicting the ultimate capacity of friction driven piles [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(9): 935-944.
- [11] LI Z Z, TANG L S, HU Y Q, et al. A new estimation method for penetration depth of displacement pile based on a new type cone penetration test [C]//*Applied Mechanics and Materials*, 2011, 90: 234-244.
- [12] 张明义, 刘俊伟, 王静静, 等. 计算静压桩沉桩阻力的综合调节系数法[J]. *重庆建筑大学学报*, 2007, 29(6): 35-38.  
ZHANG M Y, LIU J W, WANG J J, et al. Adjusting-coefficient method to calculate penetration resistance of jacked piles [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2007, 29(6): 35-38. (in Chinese)
- [13] 贾沼霖, 闫澍旺, 杨爱武, 等. 静力触探在大直径超长桩溜桩分析中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(Sup1): 3274-3282.  
JIA Z L, YAN S W, YANG A W, et al. Application of cone penetration test for the analysis of pile-run of long and large diameter piles in offshore geotechnical engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Sup1): 3274-3282. (in Chinese)
- [14] 黎志中, 李兆源, 杨然. 三桥静力触探在桩基中的应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4): 846-854.  
LI Z Z, LI Z Y, YANG R. Application of triple-bridge cone penetration test in pile foundation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 846-854. (in Chinese)
- [15] SAGASETA C, HOULSBY G T, NORBURY J, et al. Quasi-static undrained expansion of a cylindrical cavity in clay in the presence of shaft friction and anisotropic initial stresses [R]. *Department of Engineering Science, University of Oxford*, 1984.
- [16] 王宗文, 尤苏南. 静力触探成果在估算单桩承载力方面的应用分析与研究[J]. *建筑技术*, 2014, 45(Sup): 85-89.  
WANG Z W, YOU S N. Application and analysis of static cone penetration results in estimating bearing capacity of single pile [J]. *Architecture Technology*, 2014, 45(Sup): 85-89. (in Chinese)
- [17] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
Technical code for building pile foundation: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)