

# 根据试桩成果反分析灌注桩的设计参数

贺诗选, 张 娇, 李 强

(北京爱地地质勘察基础工程公司, 北京 100144)

**摘 要:** 利用钻孔灌注桩试桩报告中的静载荷试验原始数据和地层资料, 结合规范, 利用反分析的方法确定各地层的极限端阻力标准值  $q_{pk}$  和极限侧阻力标准值  $q_{sik}$ 。可将试桩成果推广应用到场地附近任意桩长和桩径的桩型设计中。

**关键词:** 钻孔灌注桩; 试桩; 设计参数; 反分析

中图分类号: TU473.1<sup>+</sup>2 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2012)08-0061-04

**Inverse Analysis on Design Parameters of Bored Grouting Pile According to the Pile Testing Results/HE Shi-xuan, ZHANG Jiao, LI Qiang** (Beijing Aidi Geotechnical Investigation & Foundation Engineering Company, Beijing 100144, China)

**Abstract:** Based on the original data of bored pile static loading test and stratigraphic data, combined with the related specifications and using the inverse analysis method, the ultimate end resistance standard value  $q_{sik}$  and ultimate lateral resistance standard value  $q_{pk}$  of each stratum were determined. Pile testing results can be applied to the pile design in any length and any diameter near the construction site.

**Key words:** bored grouting pile; pile testing; design parameter; inverse analysis

## 0 引言

通常试桩工程最终提交的报告为某一种或者某几种特定桩长桩径桩型的承载力, 正式工程中很可能根据建筑物和地层的特点, 采用与试桩时不一样桩长和桩径, 如此就不能直接套用试桩成果数据。这就存在一个如何将试桩成果推广应用到任意桩长桩径桩型的问题。如果能通过试桩确定各个地层的桩基设计参数  $q_{sik}$  和  $q_{pk}$ , 则能很好地解决这一问题。笔者通过工程实例在这方面做了分析研究。

## 1 工程概述

首钢京唐钢铁厂在曹妃甸地区的钻孔灌注桩进行了大型的压桩试验, 分 4 个试验区进行。试验桩设计承载力特征值 35 m  $\varnothing$ 800 mm 桩为 1700 kN, 45 m  $\varnothing$ 800 mm 桩为 2500 kN, 35 m  $\varnothing$ 1000 mm 桩为 2100 kN, 45 m  $\varnothing$ 1000 mm 桩为 3200 kN, 45 m  $\varnothing$ 1200 mm 桩为 4100 kN。

共完成泥浆护壁钻孔灌注桩静载试验 51 组, 试验终止条件和单桩竖向抗压极限承载力的确定均按《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106-2003) 执行, 静载试验成果汇总如表 1。

表 1 静载试验成果汇总表

桩号	桩长 /m	桩径 /mm	承载力特征值/kN	桩号	桩长 /m	桩径 /mm	承载力特征值/kN
A1-1	30.8			A3-4			
A1-2	35.7	800	2465	A3-5	42	800	3750
A1-11	31			A3-6			
A1-5				A3-7			
A1-6	43.8	800	3750	A3-8	30	1000	2940
A1-10				A3-9			
A1-3	30.75			A3-10			
A1-8	35.7	1000	3150	A3-11	42	1000	4650
A1-12	30.96			A3-12			
A1-4				A3-13			
A1-7	43.5	1000	4500	A3-14	42	1200	5750
				A3-15			
A2-1	35.75			A4-1			
A2-2	37	800	2550	A4-2	20	800	2550
A2-11	35.8			A4-3			
A2-5	46.6			A4-4			
A2-6	45.7	800	3600	A4-5	40.5	800	3750
A2-10	47.9			A4-6			
A2-3				A4-7			
A2-8	36	1000	3150	A4-8	20	1000	3045
A2-12				A4-9			
A2-4				A4-10			
A2-7	46	1000	4650	A4-11	40.5	1000	4317
A2-9				A4-12			
A3-1							
A3-2	30	800	2550				
A3-3							

收稿日期: 2012-02-14; 修回日期: 2012-06-21

作者简介: 贺诗选(1978-), 男(汉族), 江西萍乡人, 北京爱地地质勘察基础工程公司工程四处主任、工程师、国家注册岩土工程师、国家一级建造师, 岩土工程专业, 硕士, 从事岩土工程勘察、设计、施工工作, 北京市石景山区晋元庄路 23 号, 80100148@qq.com。

## 2 场地工程及水文地质条件

### 2.1 地形地貌

厂区地貌上属于滨海浅滩。曹妃甸一带为滦河三角洲平原海岸,具有双重岸线特征,其中内侧大陆岸线为沿滦河古三角洲前沿发育的冲积海积平原。吹填后地面标高3~3.5 m。

### 2.2 地层岩性特征

根据勘察报告,在深度80 m范围内,地基土主要由第四系全新世海相沉积和第四系上更新世海陆交互沉积的粘性土、粉土和砂类土所组成,其地层岩性如表2所示。

表2 场地地层物理力学指标

层号	岩土名称	参数平均值	评价	$q_{sia}$ /kPa	$q_{pa}$ /kPa
①	吹填砂(夯前)	$N=8.7$	松散~中密		
①	吹填砂(夯后)	$N=21$	中密~密实		
③	细砂	$N=12.8$	松散~稍密	10	
④	细砂	$N=27.4$	中密~密实	20	350
⑤ <sub>1</sub>	粉质粘土	$I_L=1.14,$ $a_{1-2}=0.46 \text{ MPa}^{-1}$	流塑、中~ 高压缩性	10	
⑤ <sub>2</sub>	粉质粘土	$I_L=0.75,$ $a_{1-2}=0.31 \text{ MPa}^{-1}$	软塑、中压 缩性土	15	
⑥	粉质粘土	$I_L=0.5,$ $a_{1-2}=0.30 \text{ MPa}^{-1}$	可塑、中压 缩性土	20	
⑥ <sub>3</sub>	粉土	$e=0.675,$ $a_{1-2}=0.22 \text{ MPa}^{-1}$	中密~密实	25	
⑦	细砂	$N=42.1$	密实	25	550

### 2.3 地层岩性特征

根据勘察报告,各试验分区的地层分布如表3所示。

表3 各试验区地层厚度及深度汇总表

地层	A1区		A2区		A3区		A4区	
	层厚 /m	底深 /m	层厚 /m	底深 /m	层厚 /m	底深 /m	层厚 /m	底深 /m
①	4.5	4.5	5.8	5.8	5	5	5.4	5.4
③	5.5	10	5.2	11	4	9	8.6	14
④	5	15	7.3	18.3	11.5	20.5	12.4	26.4
⑤ <sub>1</sub>	10	25	8	26.3	6	26.5		
⑤ <sub>2</sub>	8	33	6.7	33	7	33.5	7	33.4
⑥			5	38				
⑥ <sub>3</sub>	8.5	41.5	6	44	5	38.5	5	38.4
⑦	8.5	50	6	50	11.5	50	10.4	48.8

## 3 试验成果数据的选取

为了便于计算,有代表性地从表1中成对地选取桩长相同但桩径不同的8对16根桩的数据进行计算,4个试验区每个区各选了2对,一对长桩一对短桩。选取的桩参数如表4。

表4 选取的16根桩参数

桩号	桩长 /m	桩径 /mm	极限承载 力 $Q_{uk}$ /kN	桩号	桩长 /m	桩径 /mm	极限承载 力 $Q_{uk}$ /kN
A1-5	43.8	800	7500	A3-1	30	800	5100
A1-4	43.5	1000	9000	A3-9	30	1000	6300
A1-11	31	800	5100	A3-4	42	800	7500
A1-12	31	1000	6300	A3-10	42	1000	9300
A2-11	35.8	800	5100	A4-1	20	800	5100
A2-12	35.7	1000	6300	A4-7	20	1000	6300
A2-6	45.7	800	7200	A4-4	40.5	800	7500
A2-4	45.8	1000	9300	A4-11	40.5	1000	8633

## 4 计算公式及分析方法

灌注桩的竖向抗压承载力公式为:<sup>[1]</sup>

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum \psi_{si} q_{sik} l_i + \psi_p q_{pk} A_p \quad (1)$$

式中: $Q_{sk}$ 、 $Q_{pk}$ ——分别为单桩总极限侧阻力和总极限端阻力标准值; $u$ ——桩身周长; $l_i$ ——桩穿越第*i*层土的厚度; $A_p$ ——桩端面积; $q_{sik}$ ——桩侧第*i*层土的极限侧阻力标准值; $q_{pk}$ ——桩径为800 mm的极限端阻力标准值; $\psi_{si}$ 、 $\psi_p$ ——大直径桩侧阻、端阻尺寸效应系数,如表5。

表5 大直径灌注桩侧阻、端阻尺寸效应系数  $\psi_{si}$ 、 $\psi_p$

土类别	粘性土、粉土	砂土、碎石土
$\psi_{si}$	$(0.8/D)^{1/5}$	$(0.8/D)^{1/3}$
$\psi_p$	$(0.8/D)^{1/4}$	$(0.8/D)^{1/3}$

为了分析的方便,引入2个物理量  $q_{sk}$  和  $q_{skk}$ :令  $q_{sk} = (\sum q_{sik} l_i) / l$ ,即桩的全长平均极限侧阻力标准值;令  $q_{skk} = (\sum \psi_{si} q_{sik} l_i) / l$ ,即考虑尺寸效应系数的全长平均极限侧阻力标准值。所以公式(1)也可以表示为:

$$Q_{uk} = u q_{skk} l + \psi_p q_{pk} A_p \quad (2)$$

承载力极限值  $Q_{uk}$ 、桩长  $l$ 、桩周长  $u$ 、桩截面积  $A_p$  为已知条件, $\psi_p$  可通过规范中的公式计算得到,这样公式(2)中有2个未知数  $q_{skk}$  和  $q_{pk}$ 。

理论上是可以建立二元一次方程组求解的,但是必须要认识到试桩得出的数据并不是达到破坏的极限值,且因为每根桩都是分10级加荷载的,所以真正的极限值很难测得,用方程组求解出来的  $q_{skk}$  和  $q_{pk}$  值不可能精确。

因为首钢曹妃甸厂区的灌注桩均为长度超过30 m的长桩,侧阻力在总承载力中占绝对优势, $q_{sk}$  对结果的影响大于85%。所以不妨先根据规范和经验确认影响较小的端阻力  $q_{pk}$  的值,代入公式(2)中,即可求出比较合理的  $q_{skk}$ 。

### 5 端阻力的确定

依据规范,根据经验和本次试验的抗压承载力测试值,先确定本次试验区各地层的极限端阻力标准值,如表 6。

表 6 估算的各地层的端阻力  $q_{pk}$

桩端持力层	$q_{pk}$ /kPa	直径 /mm	$\psi_p$ /	桩端持力层	$q_{pk}$ /kPa	直径 /mm	$\psi_p$ /
④	1400	0.8	1	⑥ <sub>3</sub>	950	0.8	1
		1	0.928			1	0.946
⑤ <sub>2</sub>	800	0.8	1	⑦	1600	0.8	1
		1	0.946			1	0.928
⑥	900	0.8	1				
		1	0.946				

### 6 反算全长平均侧阻力

将  $\psi_p$  及表 6 中的  $q_{pk}$  和表 4 中的桩长和桩径代入公式(2),求得 16 根试验桩的考虑尺寸效应的全长平均极限侧阻力标准值  $q_{sks}$  值,如表 7。

表 7 考虑尺寸效应的全长平均极限侧阻力标准值  $q_{sks}$  值

桩号	$q_{sks}$ /kPa	桩号	$q_{sks}$ /kPa	桩号	$q_{sks}$ /kPa	桩号	$q_{sks}$ /kPa
A1-5	61.74	A2-6	51.38	A3-1	62.31	A4-1	87.46
A1-4	58.39	A2-4	49.88	A3-9	60.54	A4-7	84.02
A1-11	59.65	A2-11	55.68	A3-4	63.43	A4-4	65.78
A1-12	57.82	A2-12	56.53	A3-10	61.64	A4-11	58.68

由  $q_{sk} - q_{sks} = \frac{\sum q_{sik} l_i}{l} - \frac{\sum \psi_{si} q_{sik} l_i}{l}$ , 所以得出:

$$q_{sk} = q_{sks} + \sum \frac{(1 - \psi_{si}) q_{sik} l_i}{l} \quad (3)$$

求出  $q_{sk}$  的条件是必须要有各地层的  $q_{sik}$ 。考虑到  $1 - \psi_{si}$  的值当桩径为 800 mm 时为 0, 桩径 1000 mm 是砂层为 0.072, 土层为 0.044, 数值比较小, 即使  $q_{sik}$  值存在一定的误差, 最终对  $q_{sk}$  的影响也非常有限。所以根据规范假定一组  $q_{sik}$  值, 如表 8 所示, 将其与表 7 中的  $q_{sks}$  值代入公式(3)中, 可以求得比较准确的  $q_{sk}$ 。将同一个试验区相同桩长的  $q_{sk}$  值求取平均数, 计算结果见表 9。

### 7 反算各地层的侧阻力

#### 7.1 采用试算的方法

桩的全长平均极限侧阻力标准值公式:

$$q_{sk} = (\sum q_{sik} l_i) / l \quad (4)$$

由于绝大部分的桩长都大于 30 m, 穿过 5 个土层, 所以有 5 个未知数  $q_{sik}$ , 最多的是穿过 8 个土层。因此无法用解方程的方法确定各层  $q_{sik}$ 。

表 8 为了求  $q_{sk}$  而假定的  $q_{sik}$  值

地层	状态	规范值/kPa	取值/kPa
① <sub>前</sub>	松散	<22	22
① <sub>后</sub>	中密	46~64	60
③	松~稍	22~46	40
④	中~密	46~86	80
⑤ <sub>1</sub>	$I_L = 1.14$	<38	35
⑤ <sub>2</sub>	$I_L = 0.75$	53	55
⑥ <sub>3</sub>	$e = 0.675$	62~82	75
⑥	$I_L = 0.5$	68	70
⑦	密实	64~86	85

表 9 各试验区  $q_{sk}$  试桩值

试验区	桩长/mm	$q_{sk}$ /kPa	试验区	桩长/mm	$q_{sk}$ /kPa
A1	43.5	60.50	A3	42	62.90
	31	59.20		30	62.04
A2	45.8	56.65	A4	40.5	62.88
	35.8	51.16		20	86.24

这里采用试算的方法, 参考规范的推荐值, 拟定一组比较合理的  $q_{sik}$ , 代入公式(3), 看试算得出的  $q_{sk}$  值与表 9 的  $q_{sk}$  的吻合情况。然后以第一组  $q_{sik}$  值为基准进行调整得到多组  $q_{sik}$  值, 均代入公式(4), 试算得出的  $q_{sk}$  值与表 9 的  $q_{sk}$  的吻合情况最好的一组即为最符合要求的一组。

#### 7.2 试算的 $q_{sik}$ 值

以《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008) 为主要参考依据, 先取一组  $q_{sik}$  值, 如表 10 第 1 组, 代入公式(3), 试算结果见表 11 第 1 组, 从试算结果可以看出, 这组  $q_{sik}$  数据比较保守, 所以  $q_{sk}$  的试算值均比试桩值要小。

以这组数据为基础进行调整, 又试算了 4 组  $q_{sik}$  值, 如表 10, 试算结果见表 11。

第 1 组和第 4 组的试算结果与表 9 的数据相差较大, 第 2、3、5 组则较接近, 综合考虑规范建议值, 取第 2 组试算值作为这次逆向分析的成果参数。

表 10 试算的 5 组  $q_{sik}$  值

地层	状态	规范值 /kPa	$q_{sik}$ /kPa				
			第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组
① <sub>前</sub>	松散	<22	22	22	22	22	22
① <sub>后</sub>	中密	46~64	60	65	65	50	65
③	松~稍	22~46	30	45	50	45	45
④	中~密	46~86	70	80	80	70	80
⑤ <sub>1</sub>	$I_L = 1.14$	<38	35	40	45	38	48
⑤ <sub>2</sub>	$I_L = 0.75$	53	50	50	50	53	48
⑥ <sub>3</sub>	$e = 0.675$	62~82	70	72	72	80	65
⑥	$I_L = 0.5$	68	68	70	65	65	60
⑦	密实	64~86	80	85	80	90	85

表 11 各试验区  $q_{sk}$  试桩法及参数试算法确定的  $q_{sk}$  值

试验区	桩长	试算 $q_{sk}$ 值/kPa				
		第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组
A1 区	43.5	53.17	57.59	58.16	54.23	57.10
	31	47.26	52.90	55.40	49.05	55.10
A2 区	45.8	51.20	55.32	55.91	54.23	54.35
	35.8	45.78	50.34	52.18	49.04	51.21
A3 区	42	58.10	63.39	63.57	58.90	62.42
	30	54.25	61.33	63.00	54.95	61.87
A4 区	40.5	57.85	64.93	65.04	59.88	64.65
	20	51.50	61.15	63.15	53.90	63.80

## 8 结论

(1)本次灌注桩试验区地层的极限端阻力标准值  $q_{pk}$  和极限侧阻力标准值  $q_{sik}$  如表 12 所示。

表 12 灌注桩试桩极限端阻力标准值  $q_{pk}$  和极限侧阻力标准值  $q_{sik}$ 

地层	$q_{pk}/kPa$	$q_{sik}/kPa$	地层	$q_{pk}/kPa$	$q_{sik}/kPa$
① <sub>后</sub>		65	⑤ <sub>2</sub>	800	50
① <sub>前</sub>		22	⑥ <sub>3</sub>	950	72
③		45	⑥	900	70
④	1400	80	⑦	1600	85
⑤ <sub>1</sub>		40			

(2)根据表 12 的参数对本次试验的桩型进行计算,桩长超过 30 m 时,桩端阻力在承载力中的比

例不超过 14%,影响承载力的主要因素是桩侧摩擦阻力。在⑦层砂缺失或不稳定的情况下,灌注桩的桩端持力层可以选择⑥层土和⑦层的土层。

(3)以表 12 中的参数为基础,根据土工试验和原位测试数据,可以比较准确地估计曹妃甸地区其它地层的灌注桩设计参数。

(4)本文反算的参数对后期的正式工程中的桩基设计能起到较好的参考作用,使试桩成果得出的不仅仅是某一个特定桩型的承载力,根据表 12,可将试桩成果推广应用到任意桩长桩径的灌注桩设计。

## 参考文献:

- [1] JGJ 94 - 2008, 建筑桩基技术规范[S].
- [2] JGJ 106 - 2003, 建筑基桩检测技术规范[S].
- [3] GB 50021 - 2001, 岩土工程勘察规范[S].
- [4] 常士骧,张苏明. 工程地质手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [5] 雷晓艳. 工程反分析问题及应用[J]. 华东交通大学学报, 1996. 9(3): 1 - 8.
- [6] 张苏明. 工程地质手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.

## 达拉特旗树林召地热深井成功出水

本刊讯 从内蒙古地矿局获悉,由自治区地质勘查基金管理中心出资,水勘二院实施的达拉特旗树林召地热深井成功出水。该项目 2010 年 3 月立项,于 2011 年 10 月 8 日下达任务,2011 年 11 月 12 日开钻,并于 2012 年 6 月 30 日终孔成井,终孔孔深 2601.88 m。

经估算,这一孔深 2601.88 m 的地热井,每年出水量释放的热能相当于 4 万余吨标准煤释放的热能。

根据物探检测和抽水试验,该地热井热储层在 1880 ~ 2600 m 之间的第三系砂岩、砂质泥岩中,累计厚度 440 m,形成时间距今约 6700 万年。

该井承压自流,静水头 +55 m,自流量 2472 m<sup>3</sup>/天,水温

61℃;下入热泵抽水,降深 50 m(自地面起算)时出水量达 5000 m<sup>3</sup>/天,水温 67℃。有关地热专家研究表明,该地热井具有“三最两高一低”的特点,即该井是目前内蒙古中西部地区已施工地热井中水头最高、水量最大和温度最高(三最)、偏硅酸和氟含量高(两高)、矿化度低(一低)的地热温泉井。

根据水质分析,该地热水矿化度 2.81 g/L,是目前内蒙古地区已施工地热井矿化度最低的 1 眼。水中偏硅酸和氟含量高,分别为 49.40 和 2.60 mg/L,均达了理疗热矿水命名指标;另外微量元素锶、溴、碘含量也较高,这些元素的天然组合,使该温泉水具有很好的理疗、保健之功效。

## 安徽省副省长倪发科提出突出重点矿种重点区域勘查开发

《中国国土资源报》消息(2012-08-20) 8月16日,安徽省国土资源厅、安徽省发展改革委、安徽省科技厅、安徽省财政厅召开全省找矿突破战略行动动员部署电视电话会议。副省长倪发科出席会议并提出,要突出重点矿种和重点区域的勘查开发,深入开展找矿工作,力争实现“358”目标。

倪发科强调,各地、各有关部门要高度重视,加强组织领导,明确工作职责,完善政策措施,优化工作环境,加强工作督查,切实把找矿突破战略行动各项任务落到实处;要突出重点矿种和重点区域的勘查开发,加大对煤、铁、铜、钨、铜等

优势矿产资源和浅层地温能、页岩气等新兴资源的勘查开发力度,围绕长江中下游成矿带、钦杭成矿带和桐柏大别山成矿带以及 7 个整装勘查区、42 个重点勘查区,深入开展地质找矿工作,力争实现“358”目标;加强对矿产资源的宏观调控,尽快建立重要矿产资源的政府储备制度,合理规划省内矿山总数和重要矿种年度开采总量,充分发挥市场配置资源的基础性作用,建立以市场为主导,与矿业权人生产能力、资信相匹配的资源配置新机制,促进资源开发利用和管理方式的转变。