

# 泥岩持力层的管桩承载力试验研究

徐天平<sup>1</sup> 李素华<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup>广东省建筑科学研究院 广州 510500) (<sup>2</sup>同济大学地下建筑与工程系 上海 200092)

(<sup>3</sup>广东省建设工程质量安全监督检测总站 广州 510500)

**摘要** 对管桩竖向承载性能进行了试验研究和理论分析,结合某管桩基础工程大量施工资料和静载试验桩顶、桩底位移测量结果,探讨了桩端持力层的受力特性,给出了桩端轴力计算的修正公式。根据实测复打前后的静载试验资料,利用预制桩竖向承载性能优化反分析计算程序计算分析了桩周及桩端土阻力参数。最后,综合分析了软岩作为桩端持力层时管桩应用的局限性。

**关键词** 岩土力学,管桩,承载力,桩底位移,持力层

**分类号** TU 473.1\*3

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2004)02-0329-05

## TESTING STUDY ON BEARING CAPACITY OF PIPE PILES WITH BEARING STRATUM OF MUDSTONE

Xu Tianping<sup>1</sup>, Li Suhua<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup>Guangdong Provincial Institute of Construction and Science, Guangzhou 510500 China)

(<sup>2</sup>Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092 China)

(<sup>3</sup>Guangdong Provincial General Station for Supervision and Examination of Quality and Safety of Construction Engineering, Guangzhou 510500 China)

**Abstract** Testing study is made on the bearing capacity of pipe piles socketed in softrock. On the basis of large amount of construction information of driven and redriven pipe piles with the bearing stratum of mudstone, the settlements of pile top and pile bottom under top vertical load are measured for piles subjected to axial loads. An improved formula is given to calculate the axial force of the pile at its bottom. The friction parameters of the soils around pile are calculated by back analyzing method on the basis of measured load-settlement information of static test. The testing study and analysis results indicate that the softrock such as mudstone layer should not be bearing stratum of pipe piles, before effective measures are adopted to eliminate the possible great settlement of buildings.

**Key words** rock and soil mechanics, pipe pile, bearing capacity, pile bottom settlements, bearing stratum

## 1 引言

预应力管桩自20世纪80年代在广东开始应用以来,由于该桩型成桩质量可靠,单桩承载力高,

桩身耐打、穿透力强,可采用打入式或静力压桩的施工工艺,施工速度快,因而,越来越受到欢迎。1998年广东省建筑科学研究院对广东省5种常用桩型(管桩、预制方桩、沉管灌注桩、人工挖孔桩和冲孔桩)进行调查,分析表明<sup>[1]</sup>,管桩是最具有发展

2002年5月19日收到初稿,2003年6月13日收到修改稿。

作者 徐天平 简介:男,1962年生,硕士,1985年毕业于中国科学技术大学近代力学系爆炸力学专业,现任教授级高级工程师、广东省建筑科学研究院副院长,主要从事建筑地基基础研究和工程质量检测工作。E-mail: xtp@163.net。

潜力的桩型。事实上, 80 年代至 90 年代初在珠江三角洲较广泛应用的沉管灌注桩, 近十年来已经逐步被管桩所取代。

由于管桩的重要性, 国内的不少同行对其进行了较多的研究和探讨工作, 如进行试打过程中的承载力监测、试验对比研究等。文[2, 3]给出了预制桩承载性能的理论研究和计算分析方法, 并根据静载试验的试验结果, 反分析出了桩侧和桩端的土力学参数。由于管桩具有较强的穿透力, 所以, 多数以强风化岩层作为持力层, 而对于以软质岩如泥岩作为持力层时所表现出的承载性状, 所进行的理论及试验研究则较少。文[4]指出: 管桩基础宜用于桩端持力层为较厚的强风化或全风化岩层, 坚硬粘性土层, 密实碎石土、砂土、粉土层的场地; 不宜用于下列场地: (1) 土层中含有较多难以清除的孤石、障碍物; (2) 含有不适宜作持力层且管桩又难以贯穿的坚硬夹层; (3) 管桩难以贯入的岩面上无适合作桩端持力层的土层; (4) 持力层较薄且持力层的上覆土层较松软; (5) 管桩难以贯入, 岩面埋藏较浅且倾斜较大。

工程实践表明, 对于持力层为软质岩, 如泥岩等遇水容易崩解软化, 不宜采用管桩基础; 万一采用管桩基础时, 应采取有效措施, 以消除施工质量隐患。文[5]利用静载试验和高应变检测法对泥岩地基中的灌注桩的竖向承载性能进行了试验研究, 根据实测的桩身轴力得出了桩周土阻力分布情况, 推算出桩侧摩阻力与桩土滑移的关系。本文针对某综合医院扩建工程在基础施工和检测过程中出现的异常情况, 对以泥岩为持力层的管桩承载性能进行了大量的试验研究; 结合复打前后实测桩底和桩顶荷载沉降关系, 对管桩桩身变形及其承载特性进行了探讨, 给出了桩端轴力计算的修正公式, 并综合分析了泥岩作为持力层的局限性。

## 2 问题的提出

### 2.1 工程概况

广州某综合医院扩建工程, 住院楼 16 层, 框架结构, 采用预应力管桩基础, 62 kN 柴油锤共施打  $\phi 500$  mm 壁厚 125 mm 的管桩 307 根, 单桩承载力标准值 2 000 kN。典型施工记录见表 1。

场地位于广州市区东缘的珠江与东江交汇处附近, 地貌属珠江三角洲海陆交互冲击平原。典型地质条件(ZK21 孔, 位于 221<sup>#</sup> 桩附近)如下: 0~2.4 m 为素填土; 2.4~6.0 m 为淤泥; 6.0~9.0 m 为含粘性土粉砂; 9.0~13.9 m 为中砂, 饱和、松散、含淤质; 13.9~21.5 m 为淤泥质土; 21.5~23.5 m 为强风化粉砂质泥岩; 23.5 m 以下为中风化粉砂质泥岩。

### 2.2 异常情况处理措施

桩施工完成后, 随机抽查了 3 根桩进行单桩竖向抗压静载试验。根据试验结果, 19<sup>#</sup> 和 112<sup>#</sup> 桩总沉降量分别为 18.22 和 17.78 mm, 极限承载力大于等于 4 000 kN, 满足设计要求; 3 月 24 日对 221<sup>#</sup> 桩静载试验时, 发现沉降量过大, 承载力不满足设计要求, 决定对桩进行复打。3 月 27 日开始, 至 4 月 17 日完成 300 余根桩的复打, 复打时对有关信息进行了详细观测记录, 包括复打锤击数、桩复打时的下沉量、桩复打开始时的三阵(每阵 10 锤)锤的入土深度、桩复打完成时的贯入度等(见表 2)。虽然桩在首次施工时的贯入度是已经满足设计要求的, 桩间距是符合规范要求的, 地面没有明显的隆起, 但复打发现所有的桩很容易被打动。第 1 次复打时桩沉降 50~374 mm, 大多数为 100~300 mm, 复打锤击数为 70~360 击, 大多数为 150~250 击。

根据有关方的要求, 4 月 30 日对部分桩进行了第 2 次复打(见表 2), 对 19 根桩的观测记录表明,

表 1 部分桩的施工记录

Table 1 Construction records of some piles

桩号	桩径 /mm	入土桩长 /m	每米锤击数/击										总锤击数 /击	最后三阵锤贯入度 /mm		
			1~15	16	17	18	19	20	21	22	23					
19 <sup>#</sup>	500	23.0	13	3	4	3	7	13	81	243	444	811	4	4	3	
112 <sup>#</sup>	500	21.7	10	1	2	2	2	3	85	251		356	8	7	6	
221 <sup>#</sup>	500	22.9	31	11	14	18	16	20	28	87	285	510	8	7	6	

表 2 住院楼桩基础管桩施工及复打情况汇总表

Table 2 The construction and redriving records of pipe piles for a inpatient building

桩号	首次施工情况						第 1 次复打情况				4 月 30 日第 2 次复打情况				
	时间	入土深度 /m	入岩深度 /m	最后 1 m 锤击数/击	总锤击数/击	贯入度 /mm	时间	锤击数 /击	贯入度 /mm	复打下沉量 /mm	前三阵入土深度/mm	锤击数	贯入度 /mm	复打下沉量/mm	前三阵入土深度 /mm
48 <sup>#</sup>	223	23.0	1.5	442	822	4, 3, 2	4.2	140	6, 4, 3	188	52				
51 <sup>#</sup>	219	22.3	1.5	540	656	5, 4, 3	4.2	160	5, 4, 3	167	52				
55 <sup>#</sup>	2.18	22.0	1.5	491	734	5, 4, 3	4.12	210	5, 4, 3	199	48	180	6, 5, 4	177	49
60 <sup>#</sup>	2.19	22.5	1.5	590	767	4, 3, 2	4.12	150	6, 4, 4	174	54	130	7, 5, 4	163	55
61 <sup>#</sup>	2.19	22.6	1.6	525	638	5, 5, 4	4.12	200	5, 4, 3	163	40	210	6, 4, 3	223	60
62 <sup>#</sup>	2.19	22.7	1.5	624	726	3, 3, 2	4.12	170	5, 5, 4	189	55	120	6, 4, 3	106	35
127 <sup>#</sup>	2.16	22.7	1.6	421	588	5, 4, 3	4.1	250	5, 4, 3	160	未测	140	6, 5, 4	152	60
142 <sup>#</sup>	2.11	22.5	1.5	320	473	5, 4, 3	4.13	210	5, 5, 3	181	42	180	5, 4, 3	176	65
157 <sup>#</sup>	2.25	23.0	1.5	443	770	5, 4, 3	4.12	180	5, 5, 3	220	54	170	4, 3, 3	130	40
159 <sup>#</sup>	2.25	23.0	1.5	411	750	5, 4, 3	4.12	180	6, 5, 4	198	50	230	4, 4, 3	249	50
161 <sup>#</sup>	2.25	23.0	1.5	503	800	4, 3, 3	4.12	200	5, 4, 3	193	54	170	5, 4, 3	160	45
170 <sup>#</sup>	2.25	23.0	1.6	648	750	5, 4, 3	4.11	230	6, 5, 4	233	52	150	7, 6, 5	170	65
171 <sup>#</sup>	2.26	22.7	1.5	603	775	4, 3, 2	4.11	150	5, 4, 4	163	53	250	8, 8, 7	286	47
214 <sup>#</sup>	2.12	22.8	1.5	438	548	4, 3, 2	3.27	160	4, 4, 3	82	51	150	5, 4, 3	102	27
215 <sup>#</sup>	2.13	21.4	1.6	401	581	7, 6, 5	3.27	160	3, 3, 1	170	未测	106	6, 5, 4	109	42
221 <sup>#</sup>	2.12	22.9	1.5	370	510	5, 4, 3	4.14	275	5, 5, 3	265	55				
232 <sup>#</sup>	2.14	22.1	1.5	386	671	5, 4, 3	4.14	220	5, 4, 3	228	65	90	5, 4, 3	60	22
249 <sup>#</sup>	2.16	22.8	1.5	610	786	5, 4, 3	4.12	190	5, 4, 3	190	48	80	2, 2, 1	29	12
250 <sup>#</sup>	2.15	22.7	1.5	600	750	4, 3, 2	4.14	220	6, 6, 5	203	52	130	5, 4, 3	101	40
268 <sup>#</sup>	2.17	22.9	1.6	590	684	4, 3, 2	4.14	210	5, 5, 4	215	47	110	4, 3, 2	89	50
286 <sup>#</sup>	2.18	22.6	1.5	550	715	4, 3, 2	4.14	280	6, 5, 4	239	52	250	8, 7, 6	267	63
288 <sup>#</sup>	2.18	22.7	1.6	503	646	5, 4, 3	4.14	180	5, 5, 4	198	50	140	6, 5, 4	101	28

注：55<sup>#</sup>和 215<sup>#</sup>配桩为两节 11 m，表中其余各桩配桩为 9 m+7 m+7 m。柴油锤施打，锤重 62 kN，落距 2.2~2.4 m。

桩的下沉量在 29~286 mm，平均下沉量为 150 mm；复打锤击数为 80~250 击，平均为 157 击。

### 3 试验研究及理论分析

预应力管桩在正常施工情况下，成桩质量和承载力是比较有保证的；对于桩间距较近的群桩基础，可能因为挤土效应，造成地面隆起，桩上浮，而一般经过一次复打后可消除质量隐患。但分析表明，该工程的桩间距较大，而地面并未隆起，也就是说，挤土效应并不明显，为什么桩复打时有明显的下沉量呢？甚至第 2 次复打时同样有明显的下沉量？

复打后，抽查了其中 48<sup>#</sup>，51<sup>#</sup> 桩进行静载试验，

并对复打前首次静载试验结果不满足设计承载力要求的 221<sup>#</sup> 桩再次进行了静载试验。为了对桩底承载机理进行探讨，同时对桩底位移进行了测量。3 根桩桩顶和桩端的试验结果见图 1~3。

#### 3.1 试验结果分析

(1) 从表 2 中的管桩施工及复打结果可以看出，管桩在施工时已经满足设计要求的贯入度收锤标准的情况下，经过一段时间后，桩底承载力变得很弱，以至于一次复打以及二次复打。这种现象说明，泥岩层的遇水软化现象比较严重，以及泥岩作为桩端持力层所存在的安全隐患。

(2) 从 221<sup>#</sup> 桩的 2 次静载试验结果可以看出，桩在复打后承载力有着明显的提高，如图 3。

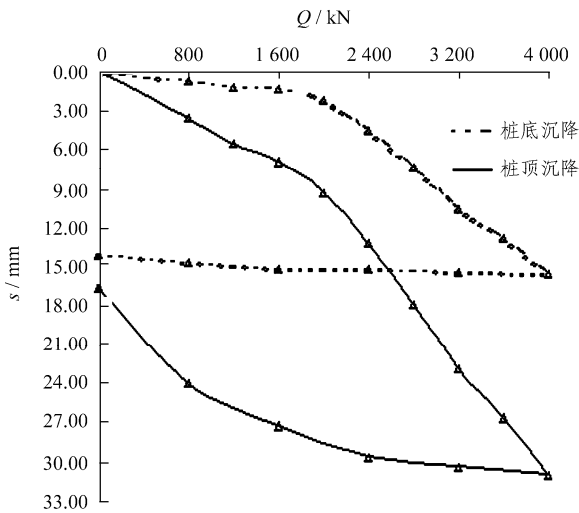


图1 48#桩实测桩顶荷载和桩顶桩底沉降的  $Q-s$  曲线  
 Fig.1 Measured  $Q-s$  curves of pile top and pile bottom under static load test for pile 48#

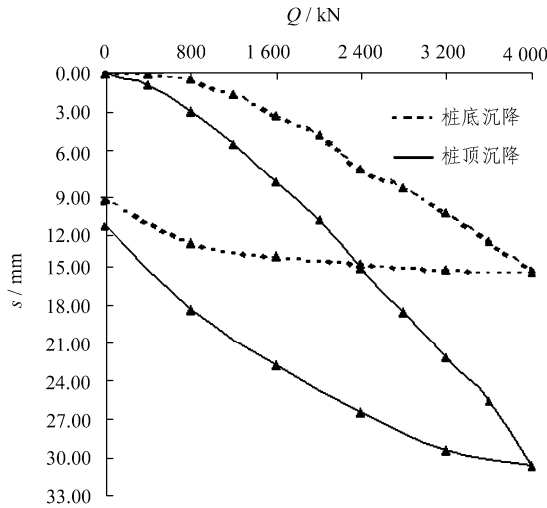


图2 51#桩实测桩顶荷载和桩顶桩底沉降的  $Q-s$  曲线  
 Fig.2 Measured  $Q-s$  curves of pile top and pile bottom under static load test for pile 51#

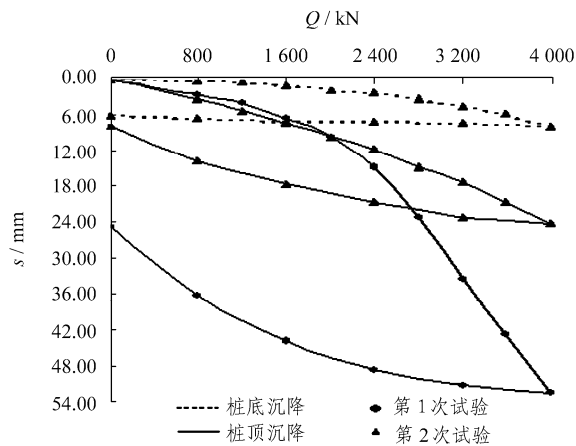


图3 221#桩实测桩顶荷载和桩顶桩底沉降的  $Q-s$  曲线  
 Fig.3 Measured  $Q-s$  curves of pile top and pile bottom under static load test for pile 221#

(3) 由图 1~3 中可以看出, 随着桩顶试验荷载的增加, 桩顶和桩端的沉降差逐渐增大, 两曲线间距离逐渐拉开, 说明桩身变形随着压应力的增大而增大; 卸载时, 随着桩顶荷载的减小, 桩顶位移逐渐恢复, 而桩端位移则恢复得较为缓慢, 当卸载完成后, 即桩顶试验荷载为零时, 桩顶位移仍有较大部分没有恢复(称为残余位移)。已经恢复的桩顶位移即为桩身的弹性变形, 此时残留的桩顶位移由 2 部分组成: 桩端残余位移和桩身残余变形。

### 3.2 桩身变形机理分析

桩身变形由桩身弹性变形和塑性变形 2 部分组成, 塑性变形包括桩身混凝土正常情况下的塑性变形和桩身缺陷(如裂缝、接缝, 灌注桩还有夹泥、蜂窝离析等)引起的塑性变形。因此, 桩顶沉降量  $s$  由以下几部分组成:

$$s = s_e + s_p + s_u + s_b \quad (1)$$

式中:  $s$  为静载试验测得的桩顶沉降量;  $s_e$  为桩身混凝土弹性压缩量;  $s_p$  为桩身混凝土塑性压缩量;  $s_u$  为桩身缺陷引起的塑性压缩量;  $s_b$  为静载试验测得的桩底位移量。

塑性变形产生的原因是由桩身钢筋混凝土的应力-应变特性所致, 一般计算假设钢筋混凝土材料是弹性材料, 而实际钢筋混凝土的应力-应变关系如图 4 所示, 曲线上任意一点的应变均由弹性应变和塑性应变组成, 当荷载较小(应力小于 0.3 倍抗压强度)时, 桩身混凝土应力-应变关系接近于直线  $OA$  段, 基本处于弹性阶段; 但荷载较大时, 特别是在静载试验的最后几级荷载作用时, 凝胶体的粘性流动不断增大, 微裂缝不断发展, 塑性应变在总应变中所占的比例越来越大, 桩身混凝土已处于弹塑性工作阶段  $AB$  段; 当应力大于 0.8 倍的抗压强度时, 微裂缝贯通, 应力-应变曲线斜率急剧减小趋于水

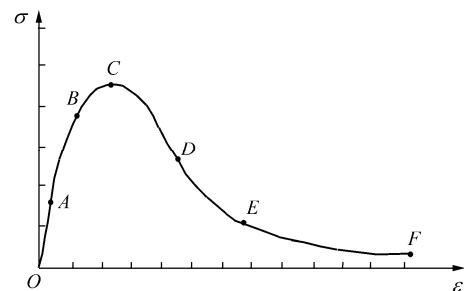


图4 钢筋混凝土应力-应变曲线  
 Fig.4 The stress-strain curves of reinforced concrete

平, 塑性变形更为显著, 如图 BC 段。也正是由于在轴向大荷载作用下忽略了混凝土的塑性变形, 导致桩身内力测试分析结果偏离实际情况。

显然, 对于桩身质量完好的桩( $s_0 = 0$ ), 卸载为零时, 桩顶与桩底的位移差即为桩身塑性压缩量, 对于本工程, 测量结果表明, 桩身塑性压缩量为 2.1~2.8 mm。桩身混凝土弹性压缩量可根据桩顶沉降的测量值(从最大荷载至卸载为零)估算, 但准确计算必须考虑桩底位移的回弹, 从图 1~3 可以看出, 桩底的回弹量为 1.5~5 mm。

试验前, 桩身的弹性变形量也可根据最大试验荷载由式(2)估算。对于本工程, 管桩横截面积为  $0.147 \text{ m}^2$ , 最大试验荷载为 4 000 kN, 管桩桩身弹性模量取  $3.92 \times 10^4 \text{ MPa}$ , 计算得桩长 23 m 时桩的弹性变形量约为 15 mm, 与实测结果相符。

$$s_e = \frac{QL}{AE} \quad (2)$$

式中:  $Q$  为最大试验荷载,  $L$  为有效桩长,  $A$  为桩横截面积,  $E$  为桩身弹性模量。

### 3.3 桩侧、桩端阻力计算

文[6]指出, 根据桩顶和桩底位移测量结果, 可由下式对桩端轴力  $Q_b$  进行估算:

$$Q_b = \frac{2AE(s - s_b)}{L} - Q \quad (3)$$

根据本工程测量数据, 直接应用式(3)计算, 桩端轴力  $Q_b$  达 3 600 kN 左右, 计算结果比实测结果偏大许多, 原因是式(3)中右边的第一项对应的是桩的弹性变形, 而计算时将桩的弹塑性变形代替桩的弹性变形, 导致计算结果明显偏大。正确计算方法应扣除桩的塑性变形, 修正后的计算公式如下:

$$Q_b = \frac{2AE(s - s_b - s_p)}{L} - Q \quad (4)$$

应用式(4)计算结果表明, 最大试验荷载 4 000 kN 作用下, 221# 桩桩端支承力约为 2 800 kN, 桩侧阻力约为 1 200 kN; 51# 和 48# 桩桩端支承力约为 2 500 kN, 桩侧阻力约为 1 500 kN; 对应桩端持力层的应力为 12~14 MPa, 与中风化泥岩强度相当。总的来说, 桩侧土阻力较小, 这与地质勘察报告相一致。

### 3.4 泥岩持力层承载机理分析

为什么桩复打甚至第 2 次复打时有明显的下沉呢? 虽然采用封闭桩尖(观察表明桩管内并没有进水), 由于场地地表水非常丰富, 随着时间增长, 地表水沿着桩外侧表面向强风化泥岩渗透, 泥岩由于自身特性, 遇水发生软化。所以, 如果桩端进入泥岩较浅, 则桩端持力层强度会降低, 桩的受力机理由端承桩变为摩擦型桩(利用文[2]中所介绍的优化反分析计算程序对 221# 桩复打前后的 2 次静载试验结果进行分析计算, 所得桩侧及桩端的土阻力分布也明显地说明这点), 从而导致单桩竖向抗压承载力不满足设计要求。也正因为这个原因, 间歇一段时间后对桩进行复打时, 桩仍有明显的沉降量。

一些岩土亲水性较强, 遇水极易崩解软化, 强度迅速降低, 这是基础设计施工中应十分注意的问题。如佛山某电力调度大楼, 采用人工挖孔灌注桩基础, 持力层为泥岩, 在浇注混凝土前对桩底进行岩基静载试验, 试验表明, 泥岩遇水浸泡后强度降低极大。

## 4 结 语

(1) 地下水丰富, 桩端持力层为遇水容易软化的软质岩, 不宜选用管桩基础, 如果确定采用管桩基础, 桩端应进入岩层足够深度并应采用封口桩尖。

(2) 根据桩顶和桩底沉降测试数据计算桩端轴力时, 应扣除桩的塑性变形, 否则计算结果偏大。

## 参 考 文 献

- 1 韩金田, 郭贱苟, 邓浩等. 广东省桩基应用调查分析研究[J]. 广东土木与建筑, 1999, (4): 11~16
- 2 李素华, 杨位洗. 预制桩竖向承载力性能设计理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 256~261
- 3 李素华, 周健, 杨位洗等. 复杂地基地中桩基承载机理计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1571~1577
- 4 广东省建筑设计研究院. 广东省标准预应力混凝土管桩基础技术规范(DBJ/T15-22-98)[S]. [s. l.]: [s. n.], 1998
- 5 何剑. 泥岩地基地中灌注桩竖向承载力性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1573~1577
- 6 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995