

# 锤击法与静压法施工预制桩单桩承载力差异分析

杨国权<sup>1</sup>, 刘海波<sup>2</sup>

(1. 上海中建西南勘察设计有限公司, 上海 201206; 2. 甘肃省地矿局第四地质矿产勘查院, 甘肃 酒泉 735000)

**摘要:**目前国内的各种规范在计算预制桩的承载力时都不考虑打桩方式的影响。但在实际施工中,已经有越来越多的例子表明同样条件下锤击法施工比静压法施工得到的桩基承载力要低。从沉桩机理、挤密作用、孔隙水压力及其消散对施工后强度恢复的影响、土体等方面对 2 种方法造成的预制桩单桩承载力差异的原因进行了分析。

**关键词:**粉土; 预制桩; 承载力; 沉桩方式; 锤击法; 静压法

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2009)03-0053-04

**Analysis on the Difference of Prefabricated Single Pile Bearing Capacity between Construction by Hammer-driven and Static-pressure/YANG Guo-quan<sup>1</sup>, LIU Hai-bo<sup>2</sup>** (1. Shanghai China Southwest Geotechnical Investigation & Architecture Design Institute Co., Ltd., Shanghai 201206, China; 2. No. 4 Institute of Geological and Mineral Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Jiuquan Gansu 735000, China)

**Abstract:** According to all of the technical standards in China, bearing capacity of prefabricated pile is calculated without taking into account the piling methods. But more and more engineering cases showed that under the same condition, the bearing capacity of pile foundation would be lower by hammer-driven than by static-pressure. The paper analyzed the difference from the soil mass and the effect on strength recovery after construction according to pile-setting mechanism, extruding function, pore pressure and dissipation.

**Key words:** silt; prefabricated pile; bearing capacity; pile-setting method; hammer-driven; static-pressure

在目前的地基基础施工中,预制桩由于具有效率高、质量保证性较高、形状可以根据要求改变等优点,被广泛的应用。常用的沉桩方式主要有锤击法和液压法 2 种。一般认为:在相同的条件下,2 种沉桩方式得到的单桩极限承载力应该是相同的。但在实际的工程中,却发现存在一些差异,甚至相当大的差别。

## 1 工程实例

### 1.1 地质条件

有甲乙 2 个工地,都位于杭州钱塘江边,且是一墙之隔。2 个工地都采用的预制管桩桩基。土质均是粉土,具体情况如表 1 所列。

表 1 甲乙 2 个工地的地层情况

土层	甲工地				乙工地			
	含水率/%	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	孔隙比 e	α <sub>1-2</sub> /MPa <sup>-1</sup>	含水率/%	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	孔隙比 e	α <sub>1-2</sub> /MPa <sup>-1</sup>
1	28.7	19.4	0.791	0.15	30.0	19.4	0.809	0.15
2	29.7	19.2	0.824	0.12	29.1	19.4	0.796	0.14
3	27.6	19.3	0.785	0.11	28.8	19.6	0.774	0.12
4	30.1	19.0	0.866	0.18	31.0	19.4	0.821	0.19

收稿日期:2008-11-20

**作者简介:**杨国权(1979-),男(汉族),湖北襄樊人,上海中建西南勘察设计有限公司工程师,地质工程专业,从事地基与基础工程、基坑支护工程等施工与研究,上海市金新路 58 号银桥大厦 10F,quanquanyang@sohu.com;刘海波(1966-),男(汉族),河北易县人,甘肃省地矿局第四地质矿产勘查院工程师,探矿工程专业,从事探矿工程、基础工程施工与管理,甘肃省酒泉市解放路 22 号,zhangxfgs@163.com。

从表 1 可以看出,该地层粉土为中密土,中压缩性偏低,接近于或为饱和状态。

### 1.2 施工工艺与检测结果

甲工地采用 PC-600(100) 预应力管桩,静压法施工,桩长 15.0 m,桩端入土 15.7 m,沉桩后 3 天静载荷试验时加载到 2565 kN,沉降量为 20.8 mm,且承载力还有提高的空间。试验结果见图 1。

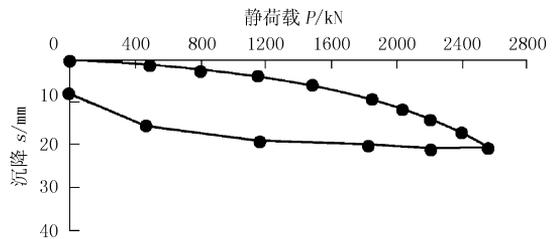


图 1 甲工地静载荷试验 P-s 曲线

乙工地采用 PC-600(70) 预应力管桩,锤击法施工,桩长 15 m,桩端入土 15.8 m,成桩后 15 天进行静载荷试验,普遍的极限承载力只有 1500~1700 kN,有一根桩桩顶荷载加至 1336 kN 时已沉了 60 mm,加至 1503 kN 时桩顶沉降达 102 mm。14 天后

再复测,承载力也没有多大的提高,在1503 kN压力下,沉降51 mm。试验结果见图2。

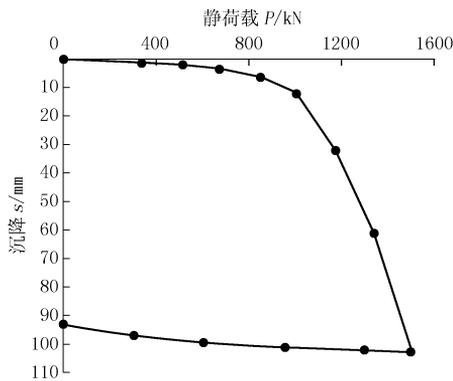


图2 乙工地静荷载试验  $P-s$  曲线

2个工地一墙之隔,土质条件几乎相同,桩身条件也基本相同,有着可比性,但其承载力却相差如此之大,原因何在?在排除乙桩为断桩的可能且测试数据真实可靠后,笔者试图从以下几个方面进行分析。

## 2 原因分析

### 2.1 沉桩机理

乙工地为锤击法施工。通过给桩头不断的冲击力作用,会产生一种振动波,该波以3种形式在土中传播,即压缩波、剪切波和表面波。波动的最大强度主要取决于桩锤的锤击速度。土体在这种激振力的作用下,受到振动作用。有资料显示:在振动作用下,当土的塑性指数  $I_p > 10$  时,静动强度比一般在2.5左右;而塑性指数接近或小于10时,静动强度比会急剧增大。因此,锤击法在施工过程中,桩底及桩周附近的土的抗剪强度急剧降低,当桩底土强度加上桩周土对桩的摩擦阻力还不足以抵抗上部施加的激振力和桩的自重后,土体就破坏,桩得以下沉。

当然,对于一定的土体,其强度的振动破坏,与激振力和振动次数、振动频率有关。激振力越大,所需的振动次数就少;而振动次数越多,材料(包括土体)就越容易疲劳,土体的强度下降得越厉害(最终会趋近与一个定值)。这也是施工中要求“重锤少击”的一个原因。

而静压法施工,可以看作是一个静态过程。它对土体强度的影响较复杂。一方面,桩端土在加载作用下,经过压密阶段、局部剪切破坏阶段直至产生刺入性破坏;另一方面,桩周的土会被桩体带着下沉,甚至桩体与部分土体脱离,因而造成沉桩时摩阻力变小,这样桩体才容易下沉。这点可以从压桩过程中油压表的读数来证实。一般而言,该读数不随

深度的增加而增加,只随着桩端土体的抗剪阻力而浮动。另外终压力不等于桩的承载力,也可以说明这个现象。

### 2.2 挤密作用程度

锤击法和静压法都属于挤土桩。沉桩过程中,桩尖处的土体向下和向周侧挤压。在地表处土体会向上隆起,但在地下深处,由于上覆压力的作用,土体向四周挤压,根据小孔扩张理论,这种横向挤压力最多可达7.5倍原土体强度之多。在这种扩张力作用下,土体的空隙率减少,强度得以提高。但由于沉桩机理不同,两者的挤密效果也不尽相同。

锤击法施工靠的是冲击振动。在这种作用下,砂土、粉土等土体中,桩侧及桩底的土体会依次形成流态区、过渡区和挤密区,后2个区的土体才会有显著的挤密效果。而土体颗粒越细,越容易产生宽广的流态区。本工程中土质为粉土,则流态区就必然相对较大,这样在开口管桩的沉桩过程中,流态区的一些土体会“流进”管桩的内腔中,分散一部分的挤压作用。同时,由于流态作用,内腔中的土体与管壁的结合处不会是非常的紧密,因此在同等条件下,其闭塞效应系数应该比常规的偏小。

而静压法施工是一种静态作用,无论是什么土体,即使沉桩时存在着拖带桩侧土体下沉、局部桩侧土与桩身脱离、桩侧摩阻力变小的情况,但不存在锤击法产生的流态区,因而桩底及附近的土体全是被挤进内腔中的,闭塞效应应该非常的明显。本工程桩基进入持力层的深度与管桩直径的比值达到8~9,闭塞效应系数应可以达到或接近1。

由此可以知道,本工程中由于是粉土,锤击振动有着流态区的存在,会削弱桩周摩擦阻力和桩端阻力,使得挤密作用力也较小。这也造成锤击法与静压法在承载力上的一个差别。

### 2.3 孔隙水的影响

本工程为粉土,其渗透系数较小,由于单根桩的施工时间较短(一般30 min左右可以完成一根),可以认为必然会产生超孔隙水压力。

锤击法是一种振动作用,产生的是一种动水压力作用,孔隙水压力随着振动的循环而逐渐累加,水压力的增大是一个持续的过程。但在某一次的循环过程中,孔隙水压力是逐渐增大,再逐渐减小的,对土体的作用力也就忽大忽小,就像是不断的快速加卸载作用。在这种反复作用下,当逐步聚集起来的孔隙水压力等于或大于上覆土的有效应力时,土粒之间的土粒结构发生崩解,相互不接触而悬浮于水

中,就产生了液化。一旦液化,土体的有效强度就为零。根据研究,在动荷载作用下,粉土是很容易液化的土层。且本工地的桩长埋深范围15余米,土体的初始有效约束应力不是很大,因此,也为液化的产生提供了有利条件。

锤击法施工中,由于液化,桩底及桩侧的土体就像流水一样,会流进开口的管桩内腔中,然后在内腔中靠自重沉积,这就使得管桩内腔中及桩端的土体的密实性远不及静压桩,其最终抗剪强度也就较低。

静压法由于贯入过程近乎匀速,可以看作为一种持续的静力作用,土体始终处于平衡状态。由于排水条件不畅,同样会产生超孔隙水压力。但这种水压力是一种静水压力作用,对土粒除了浮力作用外,只会使土粒本身受到静水压力作用,不会积累增加。即使在刚加压的某一瞬时,也可能产生孔隙水压力等于或超过上覆土的有效应力,但由于“水裂”作用的存在,这种作用时间非常的短暂,不像动荷载作用下可以较长时间的存在。此后,就开始超孔隙水压力的消散,土体开始再固结作用。

因此,本工程中超孔隙水压力的影响,尤其是液化的可能性,也是2种施工方法承载力产生较大差别的一个原因。

#### 2.4 孔隙水压力消散对施工后强度恢复的影响

施工后桩体的承载能力都会随着孔隙水压力的消散、有效应力的逐步提高而逐渐加强。由于沉桩过程中的挤密作用,桩端及桩侧的土体受到的总应力都比原始状态的应力较高,最高达7.5倍(当然,桩的中心距不能过小,否则会使桩间土体的挤压力叠加,应力过大后使土体彻底劈裂破坏,应力被释放掉,这点规范中都有明确的桩间距要求,施工中基本可以避免这种情况的发生)。由于总应力高,最终的有效应力也会比原来的要高,这点已被业界证实和接受。俄国就有过非常明显的例子:过106年后桩的承载力为打桩初期的2.5倍。

本工程中粉土在沉桩过程中发生液化,孔隙水压力急剧增高到总应力的程度,液化后粉土颗粒有变得更密实的趋势,孔隙比进一步减小,则渗透系数同样变小,孔隙水压力彻底消散需要的时间也就更长。目前的检测规范一般都规定休止期为15~30天(偏向于保守),乙工地再休止14天后复测,桩基承载力并没有什么提高,可能是时间差还不是很大的原因。

静压法施工,同样条件下沉桩过程中需要的能量仅为锤击法的10%~20%,远比锤击法要小,因

而产生的超孔隙水压力也较小。这样在同等条件下,超孔隙水压力消散所需要的时间也就比锤击法要少得多,强度恢复的也就较快。这也解释了为什么甲工地停工后3天测试承载力就很高,而乙工地30天后还很低的原因。

另外,由于锤击法使土体液化的原因,使得锤击法的环向挤压力不如静压法,即桩侧和桩端土体在沉桩中受到的总应力较小,超孔隙水压力消散后的有效强度也较低,造成桩的承载能力也会较低。

#### 2.5 土质本身的影响

本工程地层是粉土,其工程性质非常的特别。众所周知,粉土很容易液化,液化是影响承载力的一个非常重要的原因。影响粉土液化的因素很多,如含水量、密实度、周围应力、动荷载大小及频率,等等。但是对于桩基,更应关注液化后重塑土的强度恢复问题,而其中的粘粒含量就是一个很关键的因素。

有资料显示:当粘粒含量为10%时,重塑后粉土的抗液化强度损失近一半;当粘粒含量为1.5%时,损失约10%;有人经过实验还得到粘粒含量1.1%时,重塑土的强度甚至略高于原状土的结果。这也解释了并不是所有的锤击桩桩基承载力都不合要求的现象。

当粘粒含量超过10%时,主要起着稳定、镶嵌作用。随着粘粒的增多, $I_p$ 增大,粘粒对粉粒的胶结作用和自身结构的调整也就不断增强;粘粒含量小于10%时,主要起着润滑作用。随着粘粒的减少, $I_p$ 减小,粘粒的润滑作用也就逐渐变小,颗粒之间的摩擦就逐步增大。因此,以粘粒含量10%为界,无论是粘粒含量增大还是减小,粉土的强度都在增强。这就解释了为什么同样是粉土,有些在锤击沉桩过程中会发生液化承载力降低,而有些却不会的现象。因此,不能完全否定锤击法在粉土中的应用。

而静压法就只有纯粹的挤压作用,不存在振动影响,也就不会存在液化现象。单纯从这个意义上讲,在粉土中施工,同等条件下,静压法应比锤击法要有保障一些。

#### 2.6 其他方面的影响

与静压法相比,锤击法施工对土体的扰动作用要强,产生的超孔隙水压力较大,因而土体的有效强度会低,同等条件下桩的承载力也较低。但在各类规范及文献中并没有给出两者的区别,笔者认为原因是目前相关的勘查技术、检测技术上一些不规范操作以及现行规范趋于保守,在一定程度上掩盖了

这种区别。

目前的勘察技术,很多方面还要靠人手操作,比如液限塑限实验时采用搓条法,要求搓到3 mm左右时段裂成若干段,此时的含水量即为塑限。但在实际操作中,部分勘察单位为省事,比如搓到5 mm就断了,就取这时的含水量为塑限,从而使得塑限值偏低,假设液限值准确,则可知这样求得的液限指数偏高,在计算桩基摩阻力时取值就会偏低,设计单位往往会在这种已经偏低的情况下,为安全起见,再打个折扣,这样的计算就更偏向保守。

规范作为一个全国必须遵守的准则,其给定的各类承载力表也都是最保守的。

同时,国内的很多承载力静载荷实验是一种验证性质的,一般取最大加载量为设计要求的单桩承载力特征值的2倍。由于设计时的保守取值,可能该值并没有达到桩基极限承载力,使此时锤击法和静压法的表现一样。另外,很多工地并不会2种沉桩方式都出现,缺少比较的条件。

通过以上几个原因的分析,笔者认为打桩引起的粉土液化,是造成承载力偏低的主要原因,因为液化对土体强度的影响最大。

### 3 其他工程例证

鉴于该工程的结果较出人意料,笔者又比较了一些有可比性的预制桩承载力的检测结果,发现承载力的差异现象并不是特例。在杭州钱塘江沿岸、江苏徐州等地的粉土中施工,也有这种情况。

徐州某工地采用400 mm × 400 mm 预制桩桩基,桩长15 m,桩端入土18.5 m,并部分采用锤击法施工,部分采用静压法施工。场地内17 m以浅为稍密~中密状态的粉土;其下为中~低压缩性的老粘性土。最终检测承载力见表2。

### 4 结论与建议

通过以上的分析和实例可以得到以下结论与建议:

表2 徐州某工地锤击法与静压法施工承载力对比

桩号	最终加载量 /kN	相应沉降量 /mm	容许承载力 /kN	相应沉降量 /mm	备注
1	1560	46.29	660	2.27	锤击法
2	1440	47.73	600	5.05	锤击法
4	1320	43.50	600	2.30	锤击法
3	1800	16.99	900	2.35	静压法
5	1800	13.12	900	4.00	静压法

议:

(1)在粉土地层中,同样的预制桩基,锤击法施工得到的桩基极限承载力会比静压法施工得到的要低,所低幅度超过50%。

(2)在其他容易液化的地层(如饱和粉砂、细砂等)中,锤击法施工的桩基极限承载力也有可能比静压法的低。

(3)在同等条件下,静压法施工对桩基承载力更有保证。因此,建议条件允许的情况下,优先选用静压法施工。

(4)由于2种沉桩方式可能导致承载力不同,因此,建议同一个工地同一栋建筑物不要同时采用2种沉桩方式,否则有可能由于不均匀沉降造成严重的工程质量事故。

### 参考文献:

- [1] 汪文韶.土的动力强度和液化特性[M].北京:中国电力出版社,1996.
- [2] Braja M. Das. 土动力学原理[M].吴世明,顾晓章,译.杭州:浙江大学出版社,1982.
- [3] 史佩栋.深基坑工程特殊技术问题[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [4] 高大钊.土力学与基础工程[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [5] 赵明华,等.土力学地基与基础疑难释义[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [6] 编委会.地基处理手册(第一版)[M].北京:中国建筑工业出版社,1988.
- [7] JGJ 94-94,建筑桩基础技术规范[S].
- [8] JGJ 106-2003,建筑基桩检测技术规范[S].
- [9] 黄博,陈云敏,殷建华,等.粉土和粉砂的动力特性实验研究[J].浙江大学学报(工学版),2002,(3).

## 勘探所负责实施的2009年地质调查工作项目设计审查圆满完成

本刊讯 按照中国地质调查局科外部的安排,2009年3月9~11日在廊坊召开了由中国地质科学院勘探技术研究所负责实施的地质调查计划项目《2000 m以内地质钻探技术研究和应用示范》所属工作项目设计评审会,对2009年度新开工作项目总体设计和年度设计、续作工作项目的年度工作方案进行了评审。地调局科外部叶建良主任和何凯涛副处长到会指导工作。

评审专家在听取13个工作项目的20个工作内容汇报后,对20个设计报告进行了审查,评出了2009年度工作项目设计4个优秀、9个良好。优秀项目为:深孔膨胀套管护壁技术研究(勘探所)、地质钻

探铝合金钻杆研制(勘探所)、复杂地层高效钻进技术研究(探工所)和地质钻探技术综合研究与应用示范(勘探所)。

该地质调查计划项目所属工作项目和工作内容承担单位包括勘探所、探工所、工艺所、地大(北京)、地大(武汉)、吉林大学和成都理工大学等7个单位。

专家组对2009年度工作项目和工作内容的设计总体表示满意。计划项目负责人张金昌教授高级工程师对各工作项目下一步的任务进行了布置。

(冉恒谦 供稿)