

# 紧固桩的承载力原理

张永久<sup>1</sup> 李广信<sup>2</sup>

(1. 辽河石油勘探局石油化工总厂, 辽宁盘锦 124022; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

**【摘要】** 介绍了紧固桩的施工设备与工艺;指出了对桩底土及桩周土的加密和桩的周围存在预应力是这种桩承载力提高的主要原因;两处的单桩承载力载荷试验的结果表明这种桩型具有广阔的应用前景。

**【关键词】** 紧固桩;雁翅锥头;土的加密;预应力;基桩承载力

**【中图分类号】** TU 475

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2018.03.010

## Mechanism of Bearing Capacity of Tight Confined Pile

Zhang Yongjiu<sup>1</sup> Li Guangxin<sup>2</sup>

(1. Liaohe Petroleum Exploitation Bureau, Petrochemical General Plant, Panjin 124022, Liaoning, China;

2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**【Abstract】** The construction equipment and technology of tight confined pile are introduced. It is pointed that the increase in bearing capacity of the pile results from the densification of the soil under point of pile and around pile shaft. The results of load test of pile in two sites have shown that the tight confined pile has great potential in engineering application.

**【Key words】** tight confined pile; cone with wing; densification of soil; prestress; bearing capacity of foundation pile

### 0 引言

近年来,在我国各种新的桩型层出不穷,其根本的特点就是在满足桩基础的基本要求条件下,以最小的投入获得较高的承载力。百花齐放各类桩型各自适应不同的土类、场地和建筑物条件。其提高承载力的思路主要集中于三个方面:尽量利用桩端持力层以上的相对好的土层;增加桩侧的摩阻力;减少与消除桩底沉渣和提高桩端土的密度。

充分利用桩端以上相对好的土层的有各种支盘桩<sup>[1]</sup>,倒锥台阶段型桩<sup>[2]</sup>等;提高桩侧阻力的有桩侧后压浆桩<sup>[3]</sup>、螺纹桩<sup>[4]</sup>和水泥土加芯桩等;消除孔底沉渣的有人工挖孔、钻孔后不提钻直接泵浆或压浆等措施;孔底加固加密的有载体桩<sup>[5]</sup>、桩底后压浆及各种夯扩桩。其中紧固桩(亦称变径灌注桩)是一种很有特色的工艺与桩型。它在施工中利用雁翅锥头的反复穿插振动,通过干硬性混凝土同时压实桩端土和挤密桩周土,对桩周土施加预应力,大大提高了基桩的承载力和减小了沉降量。

### 1 设备与施工工艺

#### 1) 主要设备

紧固桩施工设备最具特色的是它的雁翅型锥头,亦称雁翅头,见图1。它为一个圆锥形的锥头,圆锥以上有四排雁翅形突起,施工时锥头插入干硬性混凝土中,靠压力和振动通过干硬性混凝土压密桩端地基土和挤密桩侧地基土。

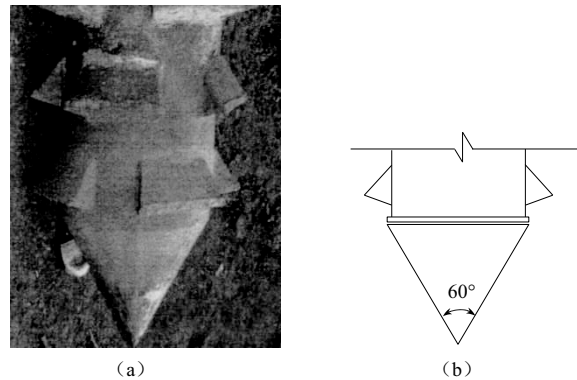
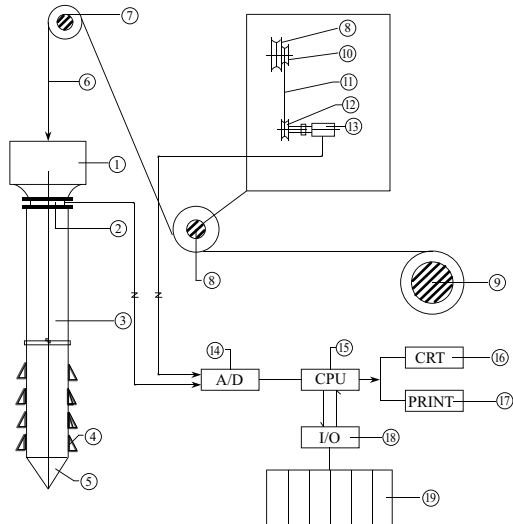


图1 中华紧固桩锥头与断面

这种桩型的施工全套设备见图2。可见这种桩是信息化施工,施工中通过传感器量测雁翅头对于干硬性混凝土施加的压力,通过中央处理单元按照预先规定的数值调整外加的振动荷载与压力。



①振动锤,②传感器,③振动杆,④雁翅,⑤锥头,⑥钢丝绳,⑦定滑轮,⑧下部定滑轮,⑨主卷扬机,⑩码盘传动轮,⑪三角带,⑫码盘传动轮,⑬码盘,⑭转换器,⑮中央处理单元,⑯显示器,⑰打印机,⑱输入输出线,⑲信号显示器

图2 紧固桩设备系统图

目前,紧固桩有两种规格,是根据雁翅头外径尺寸而定的。第一种雁翅头外径尺寸600 mm,对应的钻孔直径为1.0 m,半径扩张0.06 m;第二种雁翅头外径尺寸为377 mm,对应钻孔直径为0.46 m,半径扩张0.03 m。哈尔滨市的试验桩就是用外径尺寸600 mm雁翅头和钻孔直径为1.0 m制作的。将桩体开挖出半立面,用钢尺量测桩孔半径平均扩张0.06 m,而且桩表面凹凸不平。

## 2) 施工工艺

这种桩的桩距 $S \geq 6d$ ( $d$ 为孔径),以避免振动挤密引起对邻桩的扰动;在干硬性混凝土中加入缓凝剂,使其初凝时间为6~8 h,以防止在打邻桩时对已成桩产生不良影响;钢筋可通长设置或设置桩长的一半。由于钢筋笼内径与雁翅头外径距离约150 mm,所以雁翅头的反插运行对钢筋笼没有影响。图3表示了紧固桩的主要施工程序:

①螺旋钻成孔,将振动杆雁翅头沉入孔底。

②向孔内填入干硬性混凝土垫层(C30,维勃稠度大于100秒),填入高度比第四层雁翅高2~3 m,见图3(a)。

③提升雁翅头,上行1.5 m,垫层干硬性混凝土自动落入雁翅头腾出的空间,见图3(b)。

④开启振动锤,下行1.5 m,将填入的干硬性混凝土驱向桩端与孔壁,见图3(c)。

⑤第二次提升雁翅头1.5 m,干硬性混凝土又自动落入雁翅头腾出的空间,见图3(d)。

⑥雁翅头第二次下行1.5 m,将第二次回填的干硬性混凝土驱向桩端与孔壁,见图3(e)。

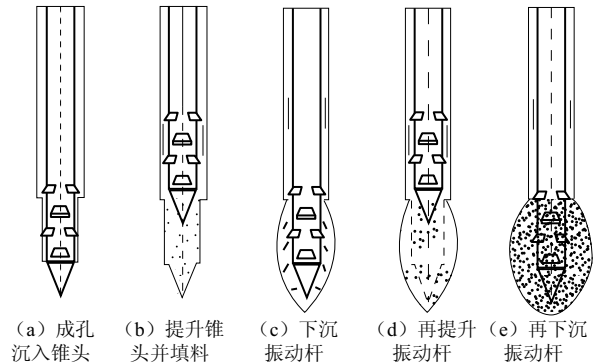


图3 桩的扩径施工

如此经过6~7次回填再压缩,即达到设计加载压力1 MPa,当第一扩径段制作完毕,计算机监控反馈自动进入第二扩径段制桩。第二段以后各段制作过程均与第一段相同。

⑦当扩径段达到距离地面一定距离时(一般为2 m),向孔内回填普通混凝土,标号与干硬性混凝土相同,坍落度4~6 cm,用2.2 kW振捣棒振实。在两种混凝土接茬处留振1~2分钟,养生28天后即可做静载荷试验。

紧固桩的设计施工与传统工艺有很大区别:①紧固桩桩端下设有均一的垫层,垫层厚度1~2 m,垫层强度达1~2 MPa,解决了桩端虚土和桩端土端承载力不足的问题;②扩径段采用回填再压缩措施给孔壁土预先施加高围压。

## 2 承载力提高机理

中华紧固桩同时加固了桩端与桩侧土。其中在桩端设有厚度为1~2 m垫层,垫层在雁翅锥头的下插与振动作用下,将桩底土体向外扩张,形成扩底,干硬性混凝土中的竖直应力与水平应力可达到 $\sigma_{vb} \approx \sigma_{hb} \approx 1 \sim 2$  MPa,使地基土加密,端承载力提高。这与载体桩十分相似。由于桩底应力的扩散作用,对于具有不同承载力的桩底原状土持力层,端承载力特征值几乎均可以达到1~2 MPa。

桩侧的地基土受到干硬性混凝土的挤压,其径向水平应力大大提高,土的密度增加。在图4中,紧靠混凝土桩身外是互相渗透层,亦即土与混凝土混杂,桩表面凹凸不平。

图4表示的是一个圆孔扩张情况。在第一压缩层处,内侧的径向应力 $\sigma_{hb}$ 远高于地基土的静止土压力 $\sigma_h = K_0 \gamma z$ 。其中竖向应力 $\sigma_z = \gamma z$ , $z$ 为从原地面起算的深度;在弹性范围内,在半径 $r$ 处的径向应力 $\sigma_r$ 与切向应力 $\sigma_\theta$ 为<sup>[6]</sup>:

$$\sigma = \frac{R^2 K_0 \gamma z - r_i \sigma_{hb} \pm R^2 r_i^2 (\sigma_{hb} - K_0 \gamma z)}{R^2 - r_i^2} \quad (1)$$

式中: $r_i$ 为扩张孔的内径; $\sigma_{hb}$ 为 $r_i$ 处的径向应力; $R$ 为影响半径; $K_0 \gamma z$ 为 $R$ 处的水平应力。

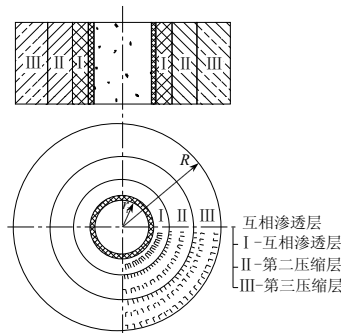


图4 桩周挤密的示意图

图5反映 $\varphi = 30^\circ$ 的正常固结地基土在施工过程中被挤压的桩周土的应力路径,其中 $p$ 为平均主应力, $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$ ;  $q$ 为广义剪应力,

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2};$$

$K_f$ 为其强度线(破坏主应力线); $K_0$ 为对应于静止土压力线。

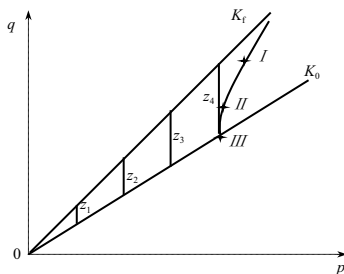


图5 桩孔扩张时桩周土挤密应力路径

图中 $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$ 、 $z_4$ 是表示距地面不同深度处的桩周土,深度小于 $z_i$ 时不振动挤压,只浇灌普通混凝土;图中竖直向上的与强度线相连的路径表示的是土为线弹性-理想塑性模型计算的应力路径。由于这种应力路径垂直于 $p$ 轴,亦即 $dp = 0$ ,所以在弹性阶段不会挤密桩周土。以 $z_4$ 为例绘出了土的弹塑性模型的计算应力路径,见I,II,III,这表明随着在孔径内振动加载,桩周土被扩张,也被挤密压实。其中在III层以外,半径为 $R$ ,内压的影响已经很微弱,可以认为是原状土;II区是被高压压缩与扩张的紧靠桩身的土

体,施工时达到 $\sigma_r \approx \sigma_{hb}$ ,这也是摩阻力提高的主因。

这类桩的承载力提高另一个因素是其中的预应力。由于对干硬性混凝土的反复加载,使它被压缩,在它凝固以后就保留了预应力。这种预应力一种是周边土对桩身的紧固力,它远大于正常固结桩周土的土的静止土压力 $\sigma_h = K_0 \gamma z$ ;第二种预应力是当混凝土桩身硬化后有回弹的趋势,但它被桩周土的负摩阻所限制。其原理见图6。

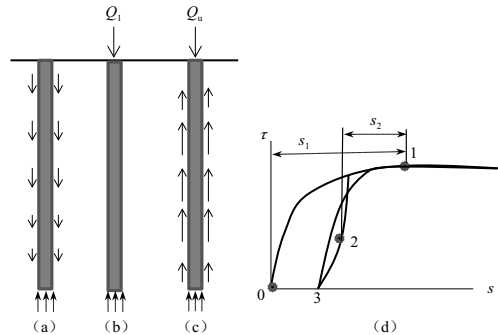


图6 桩周的预应力

图6(a)表示的是成桩后桩周土对桩身的预应力——负摩阻力,与一般负摩阻不同,它是由于桩的回弹趋势形成的;图6(b)表示的是在施加一定桩顶荷载 $Q_1$ 后,由于桩身压缩、下移使负摩阻消失;图6(c)表示在极限荷载下的情况。图6(d)表明,在没有预应力情况,加到极限荷载桩周与土的剪应力达到极限,需要位移 $s_1$ ,由于存在预应力,从图6(a)到图6(c)发生的位移仅为 $s_2$ 。图7表示的是在哈尔滨某黏性土地地进行的载荷试验,2#桩为常规灌注桩,3#为同样孔径的紧固桩,一方面可见承载力的提高;另一方面可见在初始阶段的沉降明显减小,这应与桩身的预应力有关。

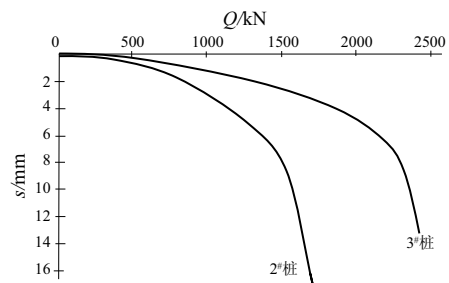


图7 两个桩的载荷试验 $Q-s$ 曲线

### 3 载荷试验的结果与对比

2002年在保定中转站沥青罐的地基基础采用这种桩型,在现场进行了3根基桩的载荷试验。同时也按照与井孔直径相同的灌注桩,利用《建筑桩基设计规范》(JGJ 94—2008)给出的摩阻力与端阻力

计算极限承载力,与试验结果进行比较。表1为场地土层分布,表2为试桩结果。

表1 保定某场地土层主要参数

土层编号	土名称	状态	底部深度 /m	承载力特征值 /kPa	标贯击数 N	压缩模量 $E_s$ /MPa
①	素填土	较软	0.6			
②-2	粉质黏土	硬塑-可塑	1.6	90	2.1	2.7
②-1	粉土	稍湿,中密	3.5	120	7.4	11.9
③	细砂	稍密	7.0	110	8.8	
④	粉质黏土	可塑	9.5	150	6.7	4.8

表2 保定某工程试桩的结果

试桩编号	桩长 /m	孔径 /mm	极限承载力 $Q_u$ /kN	对应沉降 /mm	按规范计算 $Q_u$ /kN
1#	5	440	1800	7.13	425
2#	5	440	1800	6.52	425
3#	5	440	1800	6.96	425

1998年在哈尔滨香坊区对这种桩型进行了4个桩的载荷试验,结果见表3与表4。

表3 哈尔滨某场地土层主要参数

土层编号	土名称	状态	底部深度 /m	含水量 $w$ /%	液性指数 $I_L$	压缩模量 $E_s$ /MPa
①	杂填土	较软-中	0.4			
②	粉质黏土	硬塑	2.5	18.5	0.03	5.9
③	黏质粉土	可塑	5.7	25.0	0.49	28.0
④	粉质黏土	硬塑	7.0	19.6	0.01	31.0
⑤	粉质黏土	可塑	12.0	24.8	0.51	20.0

表4 哈尔滨某工程试桩的结果

试桩编号	桩长 /m	孔径 /mm	极限承载力 $Q_u$ /kN	对应沉降 /mm	按规范计算 $Q_u$ /kN
1#	2	1000	1350	43.8	1178
2#	4	1000	1700	23.9	1750
3#	4	1000	2600	41.4	1750
4#	5	1000	5400	42.1	2645

从以上载荷试验可以看出:

1)这种桩型可极大提高基桩承载力,例如保定的3根桩单桩承载力提高了4倍以上。

2)哈尔滨的三根基桩,情况各不相同,1#桩只有2m深,利用干硬性混凝土用雁翅头振动加压,但毕竟太浅,不能提供足够填料与约束。2#桩基本就是常规的灌注桩,试验结果符合计算结果;而桩长孔径相同的3#桩,承载力提高了53%;4#桩承载力提高一倍以上。总的看这里的土质含水量偏高,可能挤密效果差些。

#### 4 单桩承载力与桩基的沉降计算

由于这种桩型的实用案例还不多,没有形成技术标准,其承载力与沉降计算的方法尚不成熟。它

只要适用于地下水位以上的可加密土层,根据已有的现场载荷试验其单桩承载力的估算方法建议如下:

1)单桩的桩径可分别按扩径  $\Delta R_1 = 30$  mm(桩径460 mm)和  $\Delta R_2 = 60$  mm(桩径1000 mm)计算;

2)桩的侧阻力除最上部2m以外,其下部土层可按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)的表5.3.5-1取值后扩大  $K_p/K_0$  倍,其中  $K_p$  为被动土压力系数,  $K_0$  为静止土压力系数;

3)桩端位于粉土、砂、砾层时,其端阻力可按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)的表5.3.5-2的“密实状态”取值;

4)桩端位于黏性土层时,其端阻力可根据其含水量,按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)的表5.3.5-2,将其状态提高1~2级取值。

这样估算的单桩承载力与载荷试验值相当接近。

由于其桩距  $S \geq 6d$ ,可按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)中的5.5.14进行疏桩基础沉降计算。即将沉降计算点水平面影响范围内各个基桩对压力计算点产生的附加应力叠加,采用单向压缩分层总和法计算土层的沉降,并计入桩身压缩  $s_c$ 。

#### 5 结论

1)对在地下水以上,排水性与压缩性好的土层,紧固桩具有很大的提高承载力、降低沉降的潜力。

2)紧固桩可以同时压密桩端和桩周土,设计理念是很先进的。

3)这种桩型可用于小型的建筑物桩基础,也可用于复合地基中的单桩。

4)这种桩还有一些有待研究的问题,也具有很大的提升空间,例如对于干硬性混凝土所加振动荷载的范围及其与深度间的关系,需要总结经验,进一步实现信息化施工。

5)需要努力推广,在实际工程应用中积累和总结经验。

#### 参考文献

- [1] JGJ 171—2009 三岔双向挤扩灌注桩设计规程[S].
- [2] DB13(J)/T 166—2014 倒锥台阶型桩复合地基设计规程[S].
- [3] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].
- [4] JGJ/TX—2016 螺纹桩技术规程[S].
- [5] JGJ 135—2007 载体桩设计规程[S].
- [6] 李广信. 土的三维本构关系的探讨与模型验证[D]. 北京:清华大学,1985.