

# 钢筋混凝土抗拔灌注桩的抗裂设计

姚梅红

(福建船政交通职业学院 道路工程系, 福建 福州 350007)

**摘要:**通过对不同直径的抗拔灌注桩在不同抗拔荷载、不同裂缝控制等级下的抗裂设计及其纵筋用钢量与造价的对比分析,说明桩纵筋采用普通非预应力钢筋时,因受裂缝宽度的限制,其纵筋拉应力水平明显偏低,桩承受的抗拔力越大,纵筋的应力越小,相比普通钢筋混凝土桩,采用预应力螺纹钢筋的抗拔桩不仅可显著减少用钢量,当抗拔力较高时,还可节省约40%~50%的纵筋造价;同时进一步探讨抗拔桩预应力筋的配置及有效预应力的控制方法。

**关键词:**抗拔灌注桩; 预应力; 预应力螺纹钢筋; 裂缝控制; 用钢量

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2016)06-0518-08

## Anti-crack design for reinforced concrete anti-uplift cast-in-place pile

Yao Meihong

(Road Construction Department, Fujian Chuangzheng Communications College, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** The anti-cracking design for different uplift cast-in-place piles was analysed in the perspective of consumption and cost of the longitudinal bars. The variables of aforementioned piles include different diameters, different anti-pulling load and different crack control level. Since the experimental results indicate that the longitudinal bars of pile have a significantly inadequate pulling stress level because of its limitation of maximum crack width, it is concluded that the stress of the longitudinal bar will be lower when the uplift force of the pile is stronger. Compared with common reinforcement concrete piles, the uplift piles containing prestressed screw bar not only reduce the consumption of steel significantly, but also save about 40%~50% of the longitudinal reinforcement cost when the anti-uplift force is high. Moreover, the arrangement for prestressed reinforcement and the control method of the effective prestress are also discussed.

**Keywords:** anti-uplift cast-in-situ pile; prestress; prestressing screw bar; crack control; steel consumption

随着地下空间开发力度的与日俱增,各种类型的地下广场、人防工程、地下商场、地下车库等工程越来越多,其中大多数作为高层建筑群的大底盘连体地下室的形式出现,因没有上部结构、自重较轻的缘故,其抗浮是设计者不可疏忽的问题。

目前,抗浮设计通常采用抗拔桩或抗浮锚杆,对于软土层较厚的沿海地区,锚杆需锚固于地层

较深处,同时由于其杆体直径小,每延米长度的锚杆所能提供的抗拔承载力普遍较小,但造价却高达150元/m左右,且目前国家及地方均没有相应的规程。如何检测、验收及保证施工质量都成问题。高强管桩虽可作为抗拔桩,但因桩头与结构基础连接部位节点薄弱,单节管桩长度有限,采用焊接拼接时节点质量难以保证,采用专用接头则

造价高昂。此外其单桩所能提供的抗拔力也很有限,况且在软土层较厚地区,管桩因自身抵抗水平作用的能力较弱本就受限制使用;现场浇注的灌注桩,因其广泛适用于各类岩土层且可通过各种变径技术或桩侧后注浆技术来提高桩周地基土的抗拔承载力<sup>[1-2]</sup>,但是作为永久性的抗浮构件,《建筑桩基技术规范》JGJ94-2008<sup>[3]</sup>(以下简称《桩规》JGJ94-2008)对其裂缝的宽度有严格限制,对于普通非预应力抗拔灌注桩而言,要提高其桩身抗裂承载力,通常需要配置大量的纵向钢筋。由于钢筋数量太多,往往需加大钢筋的直径或加大桩的直径来解决桩中的布筋问题,造成施工难度和造价的增加。为了解决这一问题,采用预应力技术是最佳的选择,目前已有不少设计工作者克服了施工技术上的问题,成功地在一些工程中顺利实施<sup>[4-5]</sup>。影响抗拔桩的造价因素很多方面,本文仅探讨抗拔灌注桩的优化设计及预应力技术应用的经济效益,对整个抗拔桩基的优化问题并非本文讨论的重点,不在探讨之列。

## 1 抗拔桩的承载力设计

### 1.1 抗拔桩的正截面承载力

《桩规》JGJ94-2008规定,钢筋混凝土轴心抗拔桩的正截面受拉承载力应符合以下计算公式要求:

$$N \leq f_y A_s + f_{py} A_p \quad (1)$$

式中: $N$ 为荷载效应基本组合下桩顶轴向拉力设计值; $f_y$ 、 $f_{py}$ 为普通钢筋、预应力钢筋的抗拉强度设计值; $A_s$ 、 $A_p$ 为普通钢筋、预应力钢筋的截面积。

非常明显:式(1)中抗拔桩的正截面承载力由钢筋材料的抗拉强度和配筋数量决定,与桩的截面面积无关,采用高强度的钢筋可减少钢筋用量。

### 1.2 抗拔桩的地基承载力

《桩规》JGJ94-2008规定,承受拔力的桩基,应同时验算群桩基础呈整体破坏和呈非整体破坏时基桩的抗拔承载力,其计算公式如下:

$$N_k \leq T_{gk}/2 + G_{gp} \quad (2)$$

$$N_k \leq T_{uk}/2 + G_p \quad (3)$$

式中: $N_k$ 为按荷载效应标准组合计算的基桩拔力; $T_{gk}$ 为群桩呈整体破坏时基桩的抗拔极限承载力标准值; $T_{uk}$ 为群桩呈非整体破坏时基桩的抗拔极限承载力标准值; $G_{gp}$ 为群桩基础所包围体积的

桩土总自质量除以总桩数,地下水位以下取浮重度; $G_p$ 为基桩自质量,地下水位以下取浮重度。

在式(2)、(3)中,不论抗拔桩是整体还是非整体破坏都取决于地基土层的物理力学性能及桩体的截面形状、大小和长度等,即桩周土体所提供的侧阻力和桩端扩头的抗拔力,而这些因素均与桩的配筋毫无关系。

### 1.3 抗拔桩的抗裂设计

《桩规》JGJ94-2008对于抗拔桩的裂缝控制计算有如下规定:

在荷载效应标准组合下对于不允许出现裂缝的预应力混凝土基桩,应符合式(4)-式(7)要求:

对一级裂缝控制等级:

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq 0 \quad (4)$$

对二级裂缝控制等级:

(1)在荷载效应标准组合下:

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq f_{tk} \quad (5)$$

(2)在荷载效应准永久组合下:

$$\sigma_{cq} - \sigma_{pc} \leq 0 \quad (6)$$

对于允许出现裂缝的三级裂缝控制等级的普通钢筋混凝土基桩,按荷载效应标准组合计算的最大裂缝宽度应符合下列规定:

$$w_{max} \leq w_{lim} \quad (7)$$

式中: $\sigma_{ck}$ 、 $\sigma_{cq}$ 为荷载效应标准组合、准永久组合下正截面法向应力; $\sigma_{pc}$ 为扣除全部应力损失后,桩身混凝土的预应力; $f_{tk}$ 为混凝土轴心抗拉强度标准值; $w_{max}$ 为按荷载效应标准组合计算的最大裂缝宽度,按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010计算; $w_{lim}$ 为最大裂缝宽度限值。

从《桩规》JGJ94-2008规定的抗拔桩抗裂设计公式中不难发现,对于预应力混凝土抗拔桩是通过限制桩身混凝土拉应力来满足裂缝控制等级的;而对于普通钢筋混凝土抗拔桩是通过控制最大裂缝宽度来满足环境要求的,因此抗裂设计与场地地基的物理力学性能指标无关。在配筋方面,对于预应力混凝土抗拔桩来说影响造价的因素是钢筋的强度和价格,但对于普通钢筋混凝土抗拔桩,因影响裂缝宽度的因素很多,因此有必要在经济方面探讨其应用合理性,从而明确在何种情况下应该采用预应力混凝土抗拔桩。

需要指出的是:《桩规》JGJ94-2008的上位规范是《混凝土结构设计规范》GB50010-2002,而现行的《混凝土结构设计规范》GB50010-2010<sup>[6]</sup>

(以下称《混规》GB 50010-2010)取消了式(6)的要求,对钢筋混凝土构件明确其最大裂缝宽度 $w_{\max}$ 可按荷载准永久组合并考虑长期作用影响的效应计算。

## 2 抗拔桩配筋的设计

### 2.1 普通钢筋混凝土抗拔桩

如果不考虑抗拔桩基的承载力优化问题,仅仅从抗拔桩的配筋方面探讨优化的问题,那么桩的抗裂设计是唯一的影响因素,现行的桩基设计规范并没有针对抗拔桩的裂缝计算公式,其裂缝计算是套用《混规》GB 50010-2010的公式计算的,对于允许出现裂缝的三级裂缝控制等级基桩,按荷载准永久组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度,应符合以下规定:

$$w_{\max} = \alpha_{cr} \varphi \frac{\sigma_{sq}}{E_s} \left( 1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (8)$$

$$\varphi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{sk}} \quad (9)$$

$$\rho_{te} = A_s / A_{te} \quad (10)$$

$$\sigma_{sq} = N_q / A_s \quad (11)$$

$$\sigma_{cq} = N_q / A_{te} \quad (12)$$

式中: $\alpha_{cr}$ 为构件受力特征系数,对轴心受拉钢筋混凝土构件,取2.7; $\varphi$ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数;当 $\varphi < 0.2$ 时,取 $\varphi = 0.2$ ;当 $\varphi > 1$ 时,取 $\varphi = 1$ ; $\sigma_{sq}$ 为按荷载准永久组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉普通钢筋的应力; $E_s$ 为钢筋弹性模量; $c$ 为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离(mm);当 $c < 20$ 时,取 $c = 20$ ;当 $c > 65$ 时,取 $c = 65$ ; $\rho_{te}$ 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率;在最大裂缝宽度计算中,当 $\rho_{te} < 0.01$ 时,取 $\rho_{te} = 0.01$ ; $A_{te}$ 为有效受拉混凝土截面面积;对轴心受拉构件,取构件截面面积; $A_s$ 为受拉区纵向非预应力钢筋截面面积; $d_{eq}$ 为受拉区纵向钢筋的等效直径(mm); $N_q$ 为按准永久组合计算的轴向力值。

抗拔桩的抗裂设计属于桩的正常使用极限状态问题,按现行国家《混规》GB 50010-2010的环境类别规定,在中国南方地区绝大都数情况下属于二类b的环境类别,对于裂缝控制等级为三级的普通钢筋混凝土抗拔桩,其最大裂缝宽度限值为0.2 mm。据此,以裂缝控制宽度为0.2 mm、纵筋净距不小于60 mm、不考虑多层钢筋笼和不同

钢筋组合为标准,以工程上常见的直径 $\phi 600$ 、 $\phi 700$ 、 $\phi 800$ 、 $\phi 900$ 和 $\phi 1\ 000$ ,C35混凝土,保护层厚度50 mm的钢筋混凝土抗拔灌注桩为例,分别计算了在不同抗拔荷载等级作用下HRB400级钢筋的用量、配筋率和钢筋的应力发挥程度,其中常用的 $\phi 800$ 桩计算结果见表1,纵筋配筋率和应力比见图1。

表1  $\phi 800$ 普通抗拔桩不同轴向拉力下的计算结果  
Tab.1 Calculation result of  $\phi 800$  common uplift pile under different axial tensile forces

| $N_q /$<br>kN | $\sigma_{cq} /$<br>$f_{tk}$ | 桩身实<br>配钢筋   | $A_s /$<br>mm <sup>2</sup> | $\rho_{te} /$<br>% | $\sigma_{sq} /$<br>MPa | 纵筋<br>应力比 | $w_{\max} /$<br>mm |
|---------------|-----------------------------|--------------|----------------------------|--------------------|------------------------|-----------|--------------------|
| 110           | 0.10                        | 7 $\Phi$ 10  | 550                        | 0.11               | 200                    | 0.56      | 0.182              |
| 550           | 0.50                        | 25 $\Phi$ 12 | 2 827                      | 0.56               | 195                    | 0.54      | 0.183              |
| 880           | 0.80                        | 30 $\Phi$ 14 | 4 618                      | 0.92               | 191                    | 0.53      | 0.186              |
| 1 000         | 0.90                        | 28 $\Phi$ 16 | 5 630                      | 1.12               | 178                    | 0.49      | 0.191              |
| 1 110         | 1.00                        | 27 $\Phi$ 18 | 6 871                      | 1.37               | 162                    | 0.45      | 0.198              |
| 1 380         | 1.25                        | 26 $\Phi$ 22 | 9 883                      | 1.97               | 140                    | 0.39      | 0.201              |
| 1 660         | 1.50                        | 22 $\Phi$ 28 | 13 547                     | 2.70               | 123                    | 0.34      | 0.197              |
| 1 940         | 1.75                        | 21 $\Phi$ 32 | 16 889                     | 3.36               | 115                    | 0.32      | 0.194              |
| 2 210         | 2.00                        | 19 $\Phi$ 36 | 19 340                     | 3.85               | 114                    | 0.32      | 0.203              |
| 2 490         | 2.25                        | 22 $\Phi$ 36 | 22 393                     | 4.46               | 111                    | 0.31      | 0.194              |
| 2 760         | 2.50                        | 20 $\Phi$ 40 | 25 133                     | 5.00               | 110                    | 0.31      | 0.198              |
| 3 040         | 2.75                        | 22 $\Phi$ 40 | 27 646                     | 5.50               | 110                    | 0.31      | 0.196              |
| 3 320         | 3.00                        | 16 $\Phi$ 50 | 31 416                     | 6.25               | 106                    | 0.29      | 0.200              |
| 3 590         | 3.25                        | 17 $\Phi$ 50 | 33 379                     | 6.64               | 108                    | 0.30      | 0.203              |

表1的计算结果表明:当轴心拉力 $N_q$ 小于1 100 kN时,其素混凝土的抗拉承载力已满足混凝土不开裂的要求,即满足了《混规》GB50010-2010抗裂设计等级为二级的控制标准,但按其裂缝宽度公式计算的受拉钢筋配筋率高达1.37%,远远高于截面的最小配筋率,这是非常不合理的。作者认为对于轴心受拉的抗拔桩,当抗拔荷载小于 $f_{tk}A$ 时,不宜套用现行规范的裂缝计算公式,按正截面受拉承载力及构造的要求配筋即可。图2为 $\phi 800$ 桩按两种裂缝控制等级在各级荷载作用下所需钢筋量,显然混凝土开裂前按《混规》GB50010-2010裂缝公式来计算配筋是不合理

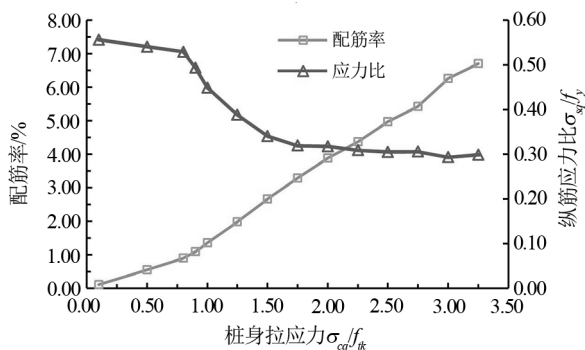


图 1  $\phi 800$  桩纵筋配筋率和应力比随荷载变化趋势  
Fig.1 The tendency of longitudinal reinforcement ratio and stress ratio with load for  $\phi 800$  uplift pile

的,但如果普通混凝土抗拔桩按二级裂缝控制标准设计,其用钢量是工程上不能接受的。因为《混规》GB50010-2010 的裂缝计算公式是简支梁受弯构件裂缝宽度计算的公式,将其应用于沿截面周边均匀配置纵筋的抗拔桩这类轴心受拉构件是不成熟的,而采用预应力技术可以把这些问题全部解决。

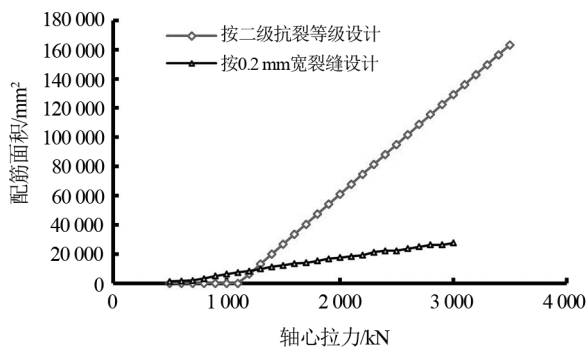


图 2  $\phi 800$  抗拔桩按两种裂缝控制等级配筋曲线  
Fig.2 Curves of reinforcement for  $\phi 800$  uplift pile according to two crack control levels

不同桩径在各级荷载下的纵筋配筋率及其应力发挥程度见图 3、图 4。为便于不同桩径间的比较,将拉拔荷载换算成桩身拉应力并作为相互间比较的标准。从图 3、图 4、表 1 可以看出:当拉拔力对应的桩身混凝土拉应力  $\sigma_{eq} > 1.0 f_{tk}$  时,随着上拔力的增加,满足抗裂要求的配筋率稳步增长,纵筋应力比在  $\sigma_{eq} = 1.0 \sim 1.5 f_{tk}$  区间自 0.45 左右急剧下降,随后缓步减小并稳定在 0.3 上下,随桩身直径的增大——在同等桩身应力水平下——纵筋配

筋率略有增加而其应力比略有下降,纵筋的应力水平和变化状态表明,由于普通非预应力抗拔桩受混凝土裂缝宽度的限制,其纵筋强度得不到充分的发挥。图 5 为不同直径桩身配筋面积随荷载的变化曲线,曲线变化趋势表明随抗拔力的不断增加桩的配筋量越来越接近,即在相同的拉拔力作用下通过加大桩径不能达到有效降低配筋量的目的,只能增加钢筋的摆放根数进而提高单桩的抗拔承载力。由此可见,对普通钢筋混凝土抗拔桩来说增加桩径和提高钢筋的强度对减少钢筋用量的作用微乎其微。

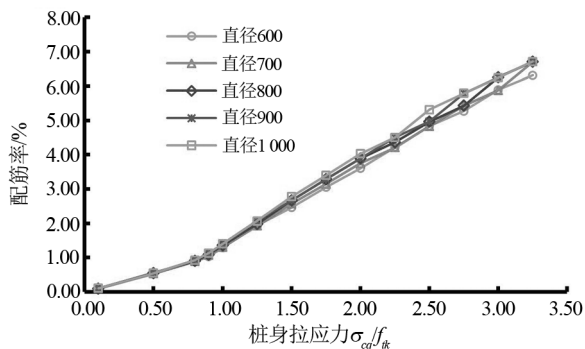


图 3 不同桩径抗拔桩配筋率变化曲线

Fig.3 Reinforcement ratio curve for different diameter uplift piles

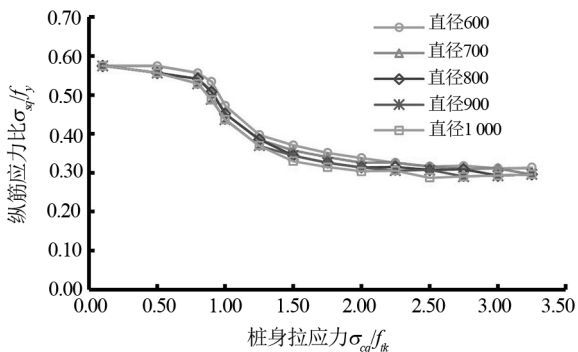


图 4 不同桩径抗拔桩纵筋应力比变化曲线

Fig.4 Longitudinal reinforcement stress ratio curves for different diameter uplift piles

## 2.2 预应力钢筋混凝土抗拔桩

对于钢筋混凝土抗拔桩来说,采用预应力技术可以避开裂缝宽度计算的问题,通过在桩身上施加预压力以限制其抗拔状态下的拉应力以满足裂缝控制等级的要求,从根本上改变普通灌注桩必需通过增加纵筋配筋量达到控制裂缝宽度的作

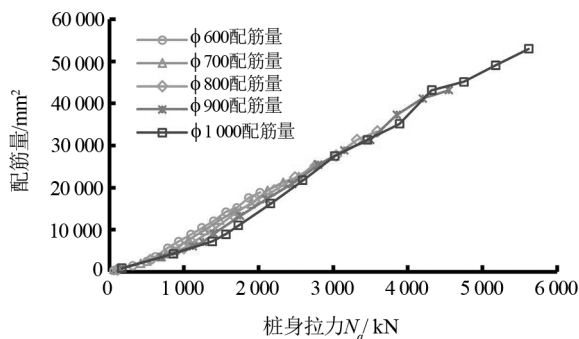


图 5 不同桩径抗拔桩配筋量变化曲线

Fig.5 Reinforcement quantity curves for different diameter uplift piles

法。因为抗拔桩是埋入地下的受拉构件,至少要按二级裂缝控制标准,也就是在正常使用时,荷载效应标准组合下桩身混凝土的拉应力不能大于其轴心抗拉强度标准值  $f_{tk}$ 。由于抗拔灌注桩往往是水下作业工程,其钢筋笼的制作不同于地上的预制或现浇构件,如果采用高强钢绞线施工上有一定的难度,为了便于施工可采用预应力螺纹钢作为抗拔桩的桩身无粘结预应力纵筋,根据《预应力混凝土用螺纹钢》GB/T 20065-2006<sup>[7]</sup>,PSB930 级预应力螺纹钢屈服强度标准值为  $f_{pyk}=930$  MPa,强度虽不及钢绞线和高强钢丝,但其张拉端锚具变形及钢筋松弛引起的应力损失较小,钢筋笼制作和接长非常方便,因此,本文以工程上常用的 PSB930 级  $\phi^T25$  预应力螺纹钢作为分析的对象,其抗拉强度设计值  $f_{py}=770$  MPa,按《桩规》JGJ94-2008 二级裂缝控制等级设计,则所需的预应力纵筋为:

$$A_p \geq \frac{\max(\sigma_{ck} - f_{tk}\sigma_{cq})A_n + \sigma_{l5}A_s}{\sigma_{pe}} \quad (13)$$

式中:  $\sigma_{l5}$  为在预应力筋合力点处混凝土收缩和徐变引起的预应力损失值;  $A_n$  为桩身净截面面积,即扣除孔道、凹槽等削弱部分以外的混凝土全部截面面积及纵向非预应力筋截面面积换算成混凝土的截面面积之和;  $\sigma_{pe}$  为预应力筋的有效预应力。

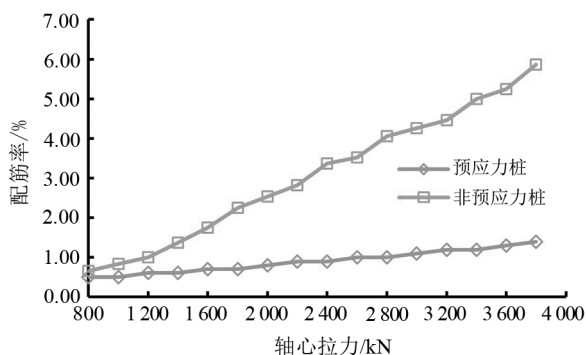
因预应力抗拔桩宜按无粘结设计,且进行极限抗拔力验算时不考虑混凝土的抗拉强度,因此必须增设非预应力钢筋,通常非预应力钢筋采用 HRB400 钢筋且配筋率不小于 0.2%,其用量还应满足下式要求:

$$A_s \geq \frac{1.2N_k - f_{py}A_p}{f_y} \quad (14)$$

一般地,预应力筋的张拉控制应力为  $0.85 f_{pyk}$ ,施加预应力时的混凝土立方体抗压强度不低于  $0.75 f_{cu,k}$ ,同时需要考虑张拉端锚具变形、预应力筋与孔道壁之间的摩擦、预应力钢筋的应力松弛、混凝土的收缩和徐变引起的应力损失,这些应力损失值可按《混规》GB50010-2012 的相关条文计算。

为便于比较按以上公式计算不同轴心拉力作用下  $\phi 800$ 、C35 长度 30 m 的预应力抗拔桩的配筋,此处假定拉拔荷载的准永久值为标准值的 80%,计算结果见表 2。

观察表 2、表 1 不难发现预应力混凝土抗拔桩的配筋率远小于普通混凝土抗拔桩,其用钢量随荷载增加的增长速率也小很多,上拔荷载越大,两者间的差值也越大,对比图见图 6。图 7 为不同直径桩随抗拔荷载增加预应力筋与非预应力筋用钢量的变化曲线,由于预应力抗拔桩主要是依靠预压力来平衡上拔荷载,因而在相同的拉拔力作用下通过加大桩径不能达到降低预应力筋用量的目的,但加大桩径可容许施加更大的预压力进而提高单桩的抗拔承载力;非预应力钢筋的用量基本上按 0.2% 的配筋率配置即可,总的来说通过增加断面来减少配筋是不明智的。

图 6  $\phi 800$  抗拔桩两种配筋方案配筋率变化曲线Fig.6 Curves of reinforcement ratio for  $\phi 800$  uplift pile according to two reinforcement schemes

### 2.3 桩身混凝土有效预应力的控制

虽然可以预压应力来抵消抗拔桩桩身拉应力,但显然需要有合理的度,桩身有效预压应力  $\sigma_{pc}$

表 2  $\phi 800$  预应力抗拔桩不同轴向拉力下的配筋计算结果

Tab.2 Calculation result of reinforcement for  $\phi 800$  prestressed uplift pile under different axial tensile forces

| 上拔荷载标准值/kN | 实配预应力螺纹筋       | 预应力筋用量 $A_p/\text{mm}^2$ | 实配非预应力筋     | 非预应力筋量 $A_s/\text{mm}^2$ | 配筋率 $\rho_{te}/\%$ | 预应力损失值 $\sigma_l/\text{MPa}$ | 桩身上拔荷载应力 $\sigma_{ck}/\text{MPa}$ | 桩身有效预压应力 $\sigma_{pc}/\text{MPa}$ | 预应力度 (应力比) | $\frac{f_y A_s + f_{ps} A_p}{1.20}$<br>/kN |
|------------|----------------|--------------------------|-------------|--------------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------|--|
| 800        | 3 $\phi^T$ 25  | 1 473                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 0.50               | 154.6                        | 1.572                             | 1.686                             | 1.073      | 1 270                                      |
| 1 000      | 3 $\phi^T$ 25  | 1 473                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 0.50               | 154.6                        | 1.965                             | 1.686                             | 0.858      | 1 270                                      |
| 1 200      | 4 $\phi^T$ 25  | 1 964                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 0.60               | 161.9                        | 2.357                             | 2.262                             | 0.960      | 1 580                                      |
| 1 400      | 4 $\phi^T$ 25  | 1 964                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 0.60               | 161.9                        | 2.750                             | 2.262                             | 0.823      | 1 580                                      |
| 1 600      | 5 $\phi^T$ 25  | 2 455                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 0.70               | 169.1                        | 3.141                             | 2.826                             | 0.900      | 1 900                                      |
| 1 800      | 5 $\phi^T$ 25  | 2 455                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 0.70               | 169.1                        | 3.534                             | 2.826                             | 0.800      | 1 900                                      |
| 2 000      | 6 $\phi^T$ 25  | 2 945                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 0.80               | 176.2                        | 3.925                             | 3.378                             | 0.861      | 2 210                                      |
| 2 200      | 7 $\phi^T$ 25  | 3 436                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 0.90               | 183.3                        | 4.316                             | 3.919                             | 0.908      | 2 530                                      |
| 2 400      | 7 $\phi^T$ 25  | 3 436                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 0.90               | 183.3                        | 4.709                             | 3.919                             | 0.832      | 2 530                                      |
| 2 600      | 8 $\phi^T$ 25  | 3 927                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 1.00               | 190.2                        | 5.099                             | 4.448                             | 0.872      | 2 840                                      |
| 2 800      | 8 $\phi^T$ 25  | 3 927                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 1.00               | 190.2                        | 5.492                             | 4.448                             | 0.810      | 2 840                                      |
| 3 000      | 9 $\phi^T$ 25  | 4 418                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 1.09               | 197.0                        | 5.882                             | 4.967                             | 0.844      | 3 160                                      |
| 3 200      | 10 $\phi^T$ 25 | 4 909                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 1.19               | 203.7                        | 6.272                             | 5.475                             | 0.873      | 3 470                                      |
| 3 400      | 10 $\phi^T$ 25 | 4 909                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 1.19               | 203.7                        | 6.664                             | 5.475                             | 0.822      | 3 470                                      |
| 3 600      | 11 $\phi^T$ 25 | 5 400                    | 7 $\Phi$ 14 | 1 078                    | 1.29               | 210.4                        | 7.053                             | 5.972                             | 0.847      | 3 790                                      |

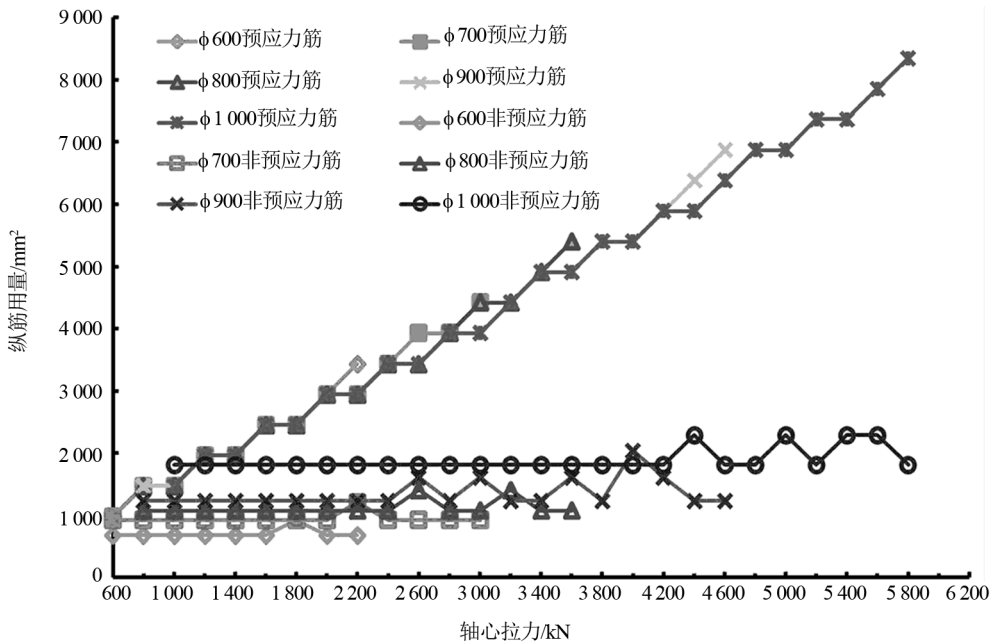


图 7 不同直径预应力抗拔桩配筋量变化曲线

Fig.7 Curves of reinforcement quantity for prestressed uplift piles with different diameters

不宜太小, 否则起不到抑制裂缝的作用, 建议  $\sigma_{pc}$  不小于 1.0 MPa; 同时  $\sigma_{pc}$  也不宜太高, 否则虽然

桩身抗拔承载力满足要求了, 却可能造成桩身混凝土预压应力偏高, 当地下水位下降至基础底面

以下时,叠加上竖直向下荷载产生的压应力,桩身混凝土主压应力标准值就会超过规范限值。

中国现行《建筑地基基础设计规范规范》GB50007-2011<sup>[8]</sup>中,预应力桩的桩身抗压承载力标准值参照美国统一建筑法规(UBC)规定取为:

$$R_a = 0.25(f_{cuk} - \sigma_{pc}) A_{ps}, \quad (15)$$

式中: $R_a$ 为基桩竖向抗压承载力特征值; $f_{cuk}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值; $\sigma_{pc}$ 为桩身混凝土有效预压应力; $A_{ps}$ 为桩身截面面积。

当桩身有效预压应力 $\sigma_{pc}$ 不大于 $0.3 f_{ck}$ 时,与基桩竖向抗压承载力特征值 $R_a$ 对应的桩身混凝土压应力标准值不低于 $0.3 f_{ck}$ ,两者相当。同时,在最不利情况下,桩身混凝土主压应力标准值也不超过 $0.6 f_{ck}$ ,满足《混规》GB50010-2010对严格要求和一般要求不出现裂缝的预应力构件主压应力的限值要求。

考虑荷载分项系数及混凝土强度设计值 $f_c$ 与 $f_{cuk}$ 间的关系,根据上式可推导出预应力桩桩身抗压强度设计值:

$$Q = \psi_c f_c A_{ps} - 0.34 \sigma_{pc} A_{ps}, \quad (16)$$

式中: $Q$ 为基桩桩身抗压强度设计值; $\psi_c$ 为基桩成桩工艺系数,取 $0.6 \sim 0.7$ ; $f_c$ 为混凝土轴心抗压强度设计值。

由于抗拔灌注桩桩身有效预压应力 $\sigma_{pc}$ 不超过 $0.3 f_{ck}$ ,因此其抗压强度设计值仅比普通灌注桩降低 $20\% \sim 25\%$ ,这对于以承受拉力为主的抗拔桩而言是适宜的。

### 3 预应力抗拔灌注桩的经济性分析

表3是根据表2  $\phi 800$  预应力抗拔桩实配纵筋及对应的普通钢筋混凝土抗拔桩实配纵筋的用钢量及造价的对比分析,其中HRB400钢筋、 $\phi^T 25$ 预应力螺纹钢的现行市场综合单价按《福建省建筑工程消耗量定额》(FJYD-101-2005)<sup>[9]</sup>(包括接头、锚固件、人工费、管理费及利润等)分别为3 600元/t、6 000元/t进行统计的,图8为不同直径的抗拔桩采用预应力配筋方案与普通非预应力配筋方案的造价比随荷载的变化曲线,从图8可以

表 3  $\phi 800$  抗拔桩两种配筋方案的经济比较

Tab.3 Economic comparison between two reinforcement schemes of  $\phi 800$  uplift pile

| 上拔荷载标准值/kN | $\sigma_{ck}/f_{tk}$ | 无粘结预应力抗拔桩                                  |  |   | 普通钢筋混凝土抗拔桩   |   |   |
|------------|----------------------|--|--|---|--------------|---|---|
|            |                      | 预应力筋用量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ ) | 非预应力筋量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ ) | 纵筋造价/( $\text{元} \cdot \text{m}^{-1}$ ) | 实配纵筋         | 纵筋用钢量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ ) | 纵筋造价/( $\text{元} \cdot \text{m}^{-1}$ ) |
| 800        | 0.72                 | 12.3                                       | 8.5  | 104                                     | 29 $\Phi 12$ | 25.7                                      | 93                                      |
| 1 000      | 0.90                 | 12.3                                       | 8.5  | 104                                     | 27 $\Phi 14$ | 32.6                                      | 117                                     |
| 1 200      | 1.09                 | 16.4                                       | 8.5  | 129                                     | 25 $\Phi 16$ | 39.5                                      | 142                                     |
| 1 400      | 1.27                 | 16.4                                       | 8.5  | 129                                     | 27 $\Phi 18$ | 53.9                                      | 194                                     |
| 1 600      | 1.45                 | 20.5                                       | 8.5  | 153                                     | 28 $\Phi 20$ | 69.1                                      | 249                                     |
| 1 800      | 1.63                 | 20.5                                       | 8.5  | 153                                     | 23 $\Phi 25$ | 88.6                                      | 319                                     |
| 2 000      | 1.81                 | 24.6                                       | 8.5  | 178                                     | 26 $\Phi 25$ | 100.2                                     | 361                                     |
| 2 200      | 1.99                 | 28.7                                       | 8.5  | 203                                     | 23 $\Phi 28$ | 111.2                                     | 400                                     |
| 2 400      | 2.17                 | 28.7                                       | 8.5  | 203                                     | 21 $\Phi 32$ | 132.6                                     | 477                                     |
| 2 600      | 2.35                 | 32.8                                       | 8.5  | 227                                     | 22 $\Phi 32$ | 138.9                                     | 500                                     |
| 2 800      | 2.53                 | 32.8                                       | 8.5  | 227                                     | 20 $\Phi 36$ | 159.8                                     | 575                                     |
| 3 000      | 2.71                 | 36.9                                       | 8.5  | 252                                     | 21 $\Phi 36$ | 167.8                                     | 604                                     |
| 3 200      | 2.89                 | 41.0                                       | 8.5  | 276                                     | 22 $\Phi 36$ | 175.8                                     | 633                                     |
| 3 400      | 3.07                 | 41.0                                       | 8.5  | 276                                     | 20 $\Phi 40$ | 197.3                                     | 710                                     |
| 3 600      | 3.26                 | 45.1                                       | 8.5  | 301                                     | 21 $\Phi 40$ | 207.2                                     | 746                                     |
| 3 800      | 3.44                 | 49.2                                       | 8.5  | 326                                     | 15 $\Phi 50$ | 231.2                                     | 832                                     |

看出:当拉拔力对应的桩身混凝土拉应力  $\sigma_{ck} \geq 1.5f_{tk}$  时,预应力方案的纵筋的造价仅为普通非预应力方案的 40% ~ 50%,拉拔力越大,造价比越低。以直径  $\phi 800$  mm、C35 预应力抗拔灌注桩为例,当  $\sigma_{ck} = 2.5f_{tk}$ 、 $N_k = 2\ 800$  kN 时,相对于普通抗拔桩每延米可节约纵筋造价约 350 元,若桩长 30 m,每根桩节省纵筋造价约 7 500 元,经济效益相当可观。

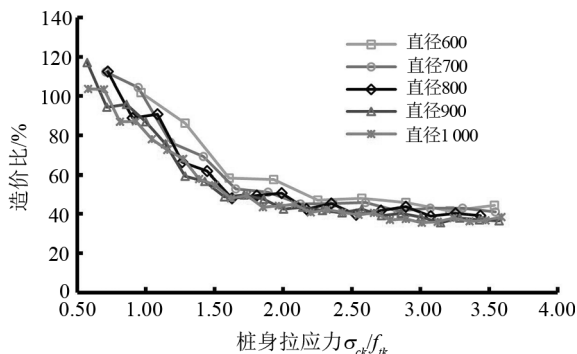


图8 不同直径抗拔桩两种配筋方案造价比变化曲线  
Fig.8 Curves of cost ratio for different diameter uplift piles according to two reinforcement schemes

福州五一路某商业广场,设三层地下室,共布置 395 根长度 35 m 的  $\phi 900$  mm、C35 钢筋混凝土抗拔灌注桩,桩身纵筋为 30  $\Phi 25$  (115.6 kg/m),满足三级裂缝控制等级  $\omega_{\max} = 0.2$  mm 的要求,单桩抗拔承载力特征值 2 000 kN。若按本文采用后张无粘结预应力技术,桩身只要配置 6 $\Phi^T 25$  (24.6 kg/m) 预应力螺纹钢筋再加 8  $\Phi 14$  (9.7 kg/m)

HRB400 钢筋即可满足二级裂缝控制等级及桩身抗拉承载力的要求,按现行市场综合单价计算,每延米桩纵筋可省造价 234 元,整个工程桩纵筋可节省 323.5 万元。

## 4 结论

(1) 对于承受轴心拉力的抗拔桩,当要求的抗拔力准永久值小于桩身混凝土抗拔承载力标准值时,采用《混规》GB 50010-2010 最大裂缝宽度计算公式来进行配筋设计是不妥的。

(2) 普通钢筋混凝土抗拔桩因受裂缝宽度的限制,钢筋的应力程度较低,当与抗拔荷载准永久值对应的桩身混凝土拉应力不小于  $1.5f_{tk}$  时,钢筋的应力程度不足  $0.4f_y$ ,即只发挥了不到 40%。

(3) 抗拔桩采用预应力配筋时,桩身有效预应力  $\sigma_{pc}$  不宜小于 1.0 MPa,不应超过  $0.3f_{ck}$ 。

(4) 不论是预应力还是普通钢筋混凝土抗拔桩,加大桩的直径对减少钢筋用量的作用很小,从造价来说是得不偿失的。

(5) 将预应力技术用于钢筋混凝土抗拔灌注桩对于减少钢筋用量是非常有效的。

(6) 采用预应力高强螺纹钢作为抗拔桩的预应力钢筋,可大大减小钢筋笼重量和纵筋根数,提高施工效率和桩身混凝土的质量。

(7) 对于抗拔灌注桩,当拉拔力对应的桩身混凝土拉应力  $\sigma_{ck} \geq 1.5f_{tk}$  时,采用预应力螺纹钢筋方案的纵筋造价仅为普通非预应力方案的 40% ~ 50%,拉拔力越大,造价比越低,经济效益相当可观。

## 参考文献:

- [1] 滕延京,王卫东,康景文,等.基础工程技术的新进展[J].土木工程学报,2016,49(4):1-21.
- [2] 刘波,徐薇,胡和涛,等.大直径扩底嵌岩桩抗拔承载性状试验与分析[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2015,35(2):1-5.
- [3] 中华人民共和国建设部.建筑桩基技术规范:JGJ94-2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [4] 迟铃泉,赵志民,刘金砺,等.抗拔灌注桩后张预应力技术研究与工程应用[C]//刘金砺.桩基工程技术进展 2009.北京:中国建筑工业出版社,2009:260-267.
- [5] 刘金砺,高文生,邱明兵.建筑桩基技术规范(JGJ94-2008)应用手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2010,115-127.
- [6] 中华人民共和国建设部.钢筋混凝土设计规范:GB 50010-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [7] 中国国家标准化管理委员会.预应力混凝土用螺纹钢筋:GB/T 20065-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [8] 中华人民共和国建设部.建筑地基基础设计规范:GB 50007-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [9] 福建省建设工程造价管理总站.福建省建筑工程消耗量定额:FJYD-101-2005[S].北京:中国计划出版社,2005.