

# 后插钢筋笼灌注桩后压浆工艺的应用

宇文斌

(中航勘察设计研究院有限公司,北京 100098)

**【摘要】** 结合某工程实例,介绍了后插钢筋笼灌注桩后压浆工艺的优势特点、设计方法和施工工艺。根据压浆前后的桩基载荷试验数据和有限元分析,证明采用该工艺可明显提高桩基承载力,有效减小桩基沉降。对类似工程施工有指导意义。

**【关键词】** 后压浆;后插钢筋笼;灌注桩;桩基础

**【中图分类号】** TU 473.14

**【文献标识码】** B

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2017.04.011

## The Application of Post Grouting Technology for Post-inserted Steel Piles

Yuwen Bin

(AVIC Institute of Geotechnical Engineering Co., Ltd, Beijing 100098, China)

**【Abstract】** Through an engineering example, the paper introduces the advantages and characteristics of post grouting technology for post-inserted steel piles, design method and construction process. According to the comparative analysis of test data before and after the grouting pile foundation, proved that the technology can significantly improve the bearing capacity of pile and reduce the pile settlement. The technology has guiding significance for similar projects.

**【Key words】** post grouting technology; post-inserted steel; bored pile; pile foundation

### 0 引言

后插钢筋笼灌注桩,利用长螺旋钻机钻孔至设计深度,在提钻的同时利用混凝土泵通过钻杆中心通道,以一定压力将混凝土压灌至桩孔中,混凝土灌注到设定标高后,再借助钢筋笼自重或使用专用振动设备将钢筋笼插入混凝土中,形成钢筋混凝土灌注桩。该工艺具有施工速度快、效率高、无泥浆污染等优点,得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。

后压浆工艺能提高单桩承载力及减少沉降,对桩基工程节约成本、节省工期有明显作用<sup>[2]</sup>。若能将后压浆工艺应用到后插钢筋笼灌注桩中,可谓“强强联合”。但是该工艺没有成熟的技术,又无规范可依,工程实践中应用很少,成功的报道更是鲜见。

本文提出了后插钢筋笼灌注桩后压浆工艺,并介绍了其应用实例。提出了工程问题及应对措施。对压浆前后的竖向承载力进行了载荷试验和有限元分析。

### 1 工程概况

拟建项目为焚烧发电厂,选用4台750 t/d机械炉排式生活垃圾焚烧炉及2套30 MW抽凝式汽轮发电机组。上部结构、基础和土总重较大,天然地基承载力不满足要求,采用后压浆灌注桩基础。

#### 1.1 场地条件及地形、地貌

拟建场地地形平坦,北部为荒地,南部为耕地;场地南部有东西走向的河流穿过,现状河道内已干涸;场地东部有人工开挖的沟道,深约0.5~1.0 m;场地东侧与垃圾填埋场紧邻。

#### 1.2 地层结构及岩性构成

在岩土工程勘察的勘探深度范围内的地层,按成因年代可划分为人工堆积层、第四纪沉积层两大类。

表层为一般厚约0.60~2.30 m的黏质粉土素填土、粉质黏土素填土层及碎石填土、房渣土;

人工堆积层以下为第四纪沉积的矿质粉土、粘质粉土、粉质黏土夹细中砂、粉细砂。桩身范围内地层情况见图1。

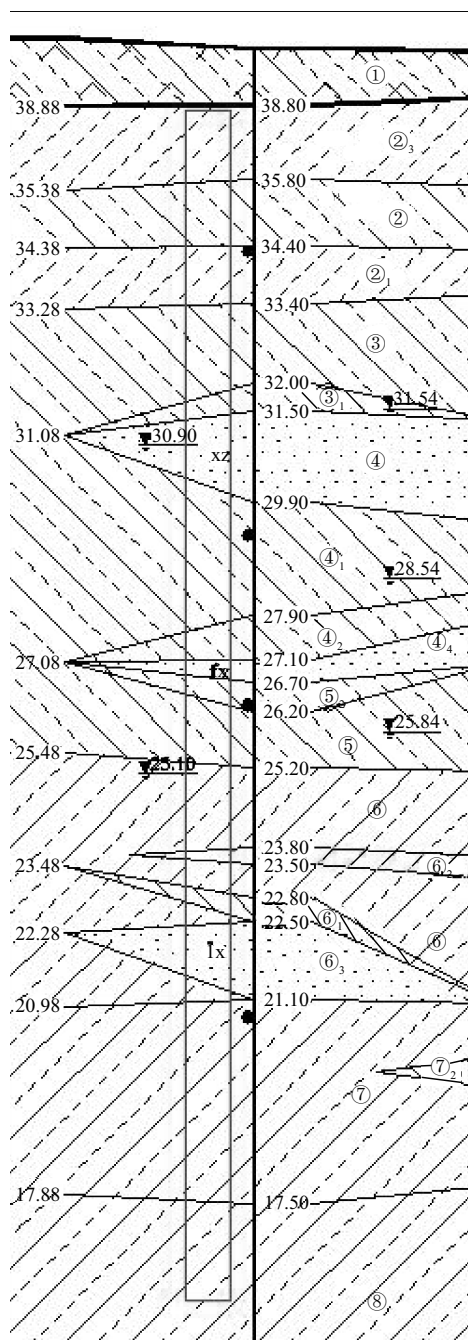


图1 桩身地层分布图

### 1.3 地下水情况

勘察期间于钻孔中揭露4层地下水,各层地下水的类型、埋深、标高见表1。

表1 地下水情况一览表

序号	地下水类型	稳定水位埋深/m	稳定水位标高/m
1	潜水	6.00~7.20	30.90~32.05
2	层间水	7.30~10.00	27.79~30.53
3	层间水	11.70~15.30	22.63~26.31
4	承压水	35.60(水头)	2.41

拟建工程场区的历史高水位在地面下0.5 m左右。

## 2 桩基方案选择

### 2.1 桩基参数

本项目上部结构、基础和土总重非常大,单桩承载力特征值达到1800 kN方可满足基础承载力要求。根据结构设计要求及地质勘察报告,桩基可采用以下两个方案。

方案1 非后压浆钻孔灌注桩:桩径0.6 m,桩长通过单桩承载力特征值  $R_a = \frac{1}{2} Q_{uk} = 1800$  kN,采用公式(1)反算。

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

由公式(1)计算得,桩长  $L_1 = 27$  m;

方案2 后压浆钻孔灌注桩方案:桩径0.6 m,采用桩端、桩侧复式后压浆。桩长通过单桩承载力特征值  $R_a = \frac{1}{2} Q_{uk} = 1800$  kN,采用公式(2)反算。

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{gsk} + Q_{gpk} = u \sum q_{sjk} l_j + u \sum \beta_{si} q_{sik} l_{gi} + \beta_p q_{pk} A_p \quad (2)$$

由公式(2)计算得,桩长  $L_2 = 21$  m;

由以上计算可知,若采用桩端、桩侧复式后压浆工艺,桩长可比非后压浆桩减小6 m/根。如此,本工程桩基可减少工程量约为7000 m<sup>3</sup>。按照概算定额估计灌注桩单方成本约为1100元/m<sup>3</sup>,节约成本约770万元。因增加后压浆工艺,增加费用按照1300元/根计算,该工程桩基4276根,增加成本约为556万元。因此,采用后压浆工艺节约桩基工程成本约214万元。

根据桩基参数计算本项目后压浆桩基工程量约为25800 m<sup>3</sup>。若采用循环钻机成孔,水下灌注混凝土工艺,含混凝土材料的单方施工费用约为795元/m<sup>3</sup>;采用后插钢筋笼灌注桩工艺,含混凝土材料的单方施工费用约为690元/m<sup>3</sup>。因此,采用后插钢筋笼灌注桩工艺,可节省成本约271万元。

通过了解周边项目施工情况,泥浆护壁钻孔灌注桩,采用循环钻机施工效率约为75 m<sup>3</sup>/台天。采用旋挖钻机施工效率约为90 m<sup>3</sup>/台天。而采用后插钢筋笼灌注桩施工效率约为200 m<sup>3</sup>/台天,大大快于泥浆护壁灌注桩施工。

为保证在合同规定工期内完成桩基工程施工任务,经过技术咨询及方案讨论,决定采用后插钢筋笼灌注桩后压浆工艺。

## 2.2 后压浆参数

桩基压浆采用桩侧、桩端复式后压浆。桩端压浆:设置1根 $\phi 25$  mm焊管绑扎于钢筋笼上,注浆钢管底端安装1个单向压浆阀。压浆阀应伸出钢筋笼底收口端部10 cm。预估桩端压浆水泥为1.5 t/根;桩侧压浆:桩侧设置1道压浆阀,设置于桩顶下9 m处。注浆导管下端通过三通接口与桩侧注浆管阀相连。预估桩侧压浆水泥为0.5 t/根。注浆钢管为 $\phi 25$  mm焊管,壁厚3 mm,采用管箍连接方式。

注浆材料为素水泥浆液,采用P.O 42.5水泥,水灰质量比为0.55~0.65。注浆压力控制在1.5~5.0 MPa左右,注浆终止压力不小于1.5 MPa。

注浆施工时间及顺序:注浆起始时间可在成桩后2天内进行;先桩侧压浆后桩端压浆,先外围桩基压浆后内部桩基压浆,多断面桩侧注浆应先上层后下层;桩侧桩端注浆间隔时间不小于2 h。采用注浆量和注浆压力双控法,即注浆量达到设计要求,或注浆压力未达到要求,注浆压力满足条件。以水泥压入量控制为主,注浆压力控制为辅。

## 3 施工中常见问题预防及应对控制

尽管后插钢筋笼灌注桩后压浆工艺技术和经济优势明显,但该工艺没有成熟的技术,又无规范可依。应用于工程实践较少,成功的报道更是鲜见。针对后插钢筋笼工序施工中经常出现的问题采取如下应对措施。

### 3.1 钢筋笼起吊、穿振动杆困难及应对措施

由于钢筋笼长度较长,柔性大,起吊及穿震动杆困难,并且容易毁坏钢筋笼导致返工,影响施工质量及进度。

应对措施:采用我公司专利技术,施工前制作穿钢筋笼用的竖井。钢筋笼采用多吊点起吊,翻身过程中确保钢筋笼不发生较大弯曲。在空中翻身,下放至竖井中。另一台履带吊车调运振动杆竖直穿进钢筋笼中,钢筋笼与振动锤连接固定后起吊。

钢筋笼穿振动杆后先行起吊,等待钻孔混凝土压灌完成。钻机移位后立即进行后插钢筋笼作业,减少桩身混凝土等待时间。

### 3.2 钢筋笼下放不到位问题及应对措施

由于该工艺先成孔压灌混凝土,再后插钢筋笼施工。桩身混凝土对钢筋笼的阻力要比护壁泥浆大得多,容易发生钢筋笼后插不到位的情况。

应对措施:通过试验桩施工时积累的经验,搅拌站已经熟悉该场地地层情况及施工工艺。压灌混凝土工艺要求,混凝土粗骨料粒径 $\leq 2.5$  cm,砂率

$\geq 45\%$ ,保证到场混凝土塌落度不小于18 cm,初凝时间控制在6 h。

据该项目4200余根基础桩的施工经验,采取以上措施基本可以保证钢筋笼能够后插至设计标高。

### 3.3 桩基钢筋笼不居中问题及应对措施

后插钢筋笼容易出现钢筋笼偏向一侧孔壁的情况,导致该部位桩基主筋的保护层厚度不够。

应对措施:钢筋笼制作过程中,保证钢筋笼主筋顺直,分布均匀;钢筋笼吊运过程,轻取轻放;每个钢筋笼制作4块“弓”字形保护块,对称焊接于钢筋笼顶下第二个加劲筋位置。与置于桩尖位置的振动杆形成合力,确保钢筋笼居于钻孔中心位置;在下放钢筋笼过程中安排专人,实时修正钢筋笼在桩身混凝土中的位置,确保其位于桩身中央。

### 3.4 压浆设备破坏问题及应对措施

由于后插钢筋笼施工,压浆管、压浆阀等后压浆设备在后插进混凝土的过程中,受到阻力要比泥浆护壁灌注桩大得多,容易导致压浆设备破坏。

应对措施:后压浆注浆管采用高强度的钢管,采用管箍连接,保证其强度不低于钢筋笼主筋。安装时,注浆管与加强筋及主筋连接牢固。钢筋笼底部收口位置,注浆管两侧设置保护钢筋;桩侧压浆管采用带钢丝加强的PVC管制作,可抵抗砂石等硬质物的刮撞而不致使管阀受损。

### 3.5 桩侧压浆管及桩端压浆阀打不开问题及应对措施

根据试验桩经验,合理控制注浆开始时间。混凝土压灌完成后2天内开始进行注浆作业,保证桩端压浆阀能够打开;使用满足注浆压力要求的注浆泵,确保注浆压力;

由于封闭不严密造成桩侧压浆管不能压浆时,加大桩端的压浆量,确保单桩压浆量满足要求;

当所有的注浆管都不能后压浆时,可沿桩周一定范围,采用小口径钻孔至桩底标高置安注浆管阀,封堵后进行后注浆。

### 3.6 注浆过程因故中断问题应对措施

压浆工作应连续进行,若因故中断,可按以下原则处理:

1)尽量缩短注浆中断时间,恢复注浆工作;

2)注浆中断时间超过0.5 h,应立即使用清水冲洗设备和注浆管路,防止水泥浆在设备和管路中固化而导致管路堵塞;

3)恢复注浆后,可先用清水疏通管路,再采用水泥浆液压浆。

## 4 压浆效果

### 4.1 泥皮的固化效果

尽管长螺旋钻孔不使用泥浆护壁,受地下水和钻杆叶片反复切削土体的影响,致使桩身混凝土与土体结合部位产生泥皮。通过后注浆工艺,该部分泥皮被水泥浆置换或与水泥浆结合。现场开挖桩身泥皮固化效果见图2、图3。



图2 深层水泥浆包裹桩身图



图3 浅层水泥浆包裹桩身图

### 4.2 劈裂加筋效应效果

注浆压力作用下,黏性土、粉土等细粒土因水泥浆的劈裂注入,形成强度和刚度较高的网状加筋复合土体。现场开挖后可见明显的“加筋体”(见图4、图5),“加筋体”厚约3~6 mm不等。



图4 水泥浆劈裂立面图



图5 水泥浆劈裂平面图

## 5 桩基检测

### 5.1 桩身完整性检测

本工程选取703根基桩进行了低应变试验桩身完整性检测。经检测,本工程基础桩I类桩696根(99%);II类桩7根(1%)。

### 5.2 静载荷试验

后插钢筋笼灌注桩(未后压浆)及后插钢筋笼后压浆灌注桩荷载试验 $Q-s$ 曲线对比结果见图6。

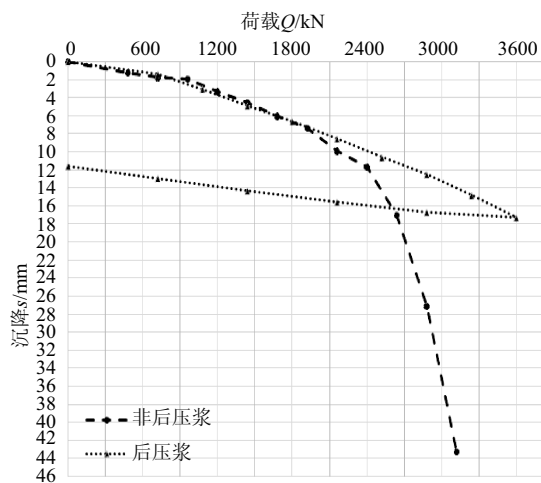


图6 荷载试验数据对比

图中粗虚线为未进行后压浆的灌注桩荷载试验 $Q-s$ 曲线,属于陡降形曲线。在施加2400 kN的荷载之后,桩基位移发生明显的陡降。因此可判断,单桩竖向承载力 $Q_u=2400$  kN。单桩承载力特征值取极限值的一半, $R_a=1200$  kN;

图中细虚线为后压浆后插钢筋笼灌注桩单桩竖向承载力试验 $Q-s$ 曲线。曲线平滑,试验最大加载为3600 kN时,桩基未发生明显的沉降。因此取单桩竖向承载力 $Q_u>3600$  kN。单桩承载力特征值取极限值的一半, $R_a>1800$  kN。由数据对比可知采取后压浆对单桩承载力的提高倍数与设计预估值基

本一致。

由图 6 的数据对比,可以分析同等变形条件下后压浆前后的单桩承载力。分别取图上沉降为 2.30 mm、4.85 mm、8.07 mm、12.0 mm、16.6 mm 变形条件下的承载力见表 2。

表 2 相同变形条件下承载力对比

沉降量 /mm	承载力		
	未后压浆 /kN	后压浆 /kN	提高倍数
2.30	1021	1200	1.18
4.85	1491	1800	1.21
8.07	1984	2400	1.21
12.00	2412	3000	1.24
16.60	2621	3600	1.37

以上数据可以看出,随着变形数据增大,即桩顶荷载向下传导,桩身侧摩阻力逐渐发挥。后压浆工艺对于桩基侧摩阻力的提高作用明显。

由图 6 的数据对比,可以分析相同荷载条件下后压浆前后的桩基变形情况。分别取图上荷载为 1200kN、1800kN、2400kN 条件下的变形情况见表 3。

表 3 相同荷载作用下桩基沉降对比

荷载作用 /kN	沉降量		
	未后压浆 /mm	后压浆 /mm	减小/%
1200	3.33	2.3	31
1800	6.73	4.85	28
2400	11.74	8.07	31

以上数据可看出,相同桩顶荷载作用下,后压浆桩基桩顶沉降明显小于非后压浆桩基。相同荷载条件下,后压浆桩基沉降变形较非后压浆桩基沉降减小约 30%。后压浆工艺对于减小桩基沉降作用明显。

## 6 有限元分析

有限元模型基本假设:

- 1)地基土为各向同性均质弹塑性连续体,不考虑排水固结作用。桩为弹性材料,符合虎克定律;
- 2)非挤土桩,不考虑桩施工对桩周土体强度等指标的影响;
- 3)桩身与桩侧土体的接触界面采用接触面单元模拟。

### 6.1 计算参数

桩基参数为桩径 0.6 m、桩长 21 m 的钢筋混凝土桩。模型具有轴对称的特点,土体计算范围在水

平方向取 20 d 即 12 m,垂直方向取桩端向下 1 L 即 21 m。根据岩土本构关系、上述假设以及结构特点,建立桩-土相互作用的三维有限元模型。桩顶自由,桩侧与桩周土体建立接触关系(Contact),桩端与下部土体也进行绑定(Tie)。

对同一根桩进行压浆前和压浆后数值模拟,计算中桩的参数保持不变,混凝土的力学参数见表 4。土体的变形模量  $E_s$  为 10 MPa,泊松比  $\mu$  为 0.45,密度  $\rho$  为 1800 kg/m<sup>3</sup>。根据现场钻孔结果,土体定义为多层土。不同的土层,其桩土界面的参数定义也不同。

表 4 混凝土的力学参数

材料名称	弹性模量 E/Pa	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	泊松比 $\mu$
混凝土	$3.5 \times 10^{10}$	2400	0.167

### 6.2 载荷分析

试验桩阶段,对 3 根未进行后压浆和 6 根后压浆的后插钢筋笼灌注桩进行了静载荷试验。未后压浆桩荷载分级加载,初始荷载为 480 kN,以后每级增加 240 kN。后压浆桩荷载分级加载,初始荷载为 720 kN,以后每级增加 360 kN。根据载荷试验  $Q-s$  曲线,未压浆桩单桩极限承载力为 2400 kN,后压浆桩单桩极限承载力为 3600 kN。

数值模拟状态下,初始荷载和分级加载情况同试验桩静载试验加载。

### 6.3 桩身轴力对比

图 7、图 8 分别为压浆前后模拟计算值桩身轴力分布图。对比压浆前后桩身轴力分布的异同,可发现后压浆桩的轴力曲线的斜率明显大于非后压浆桩的轴力曲线斜率。可见,后压浆桩的桩侧摩阻力高于未后压浆桩。说明后压浆对于桩侧阻力的提高作用明显。

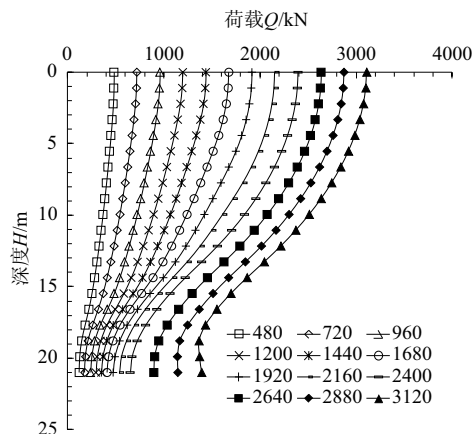


图 7 桩身轴力分布(未压浆桩)

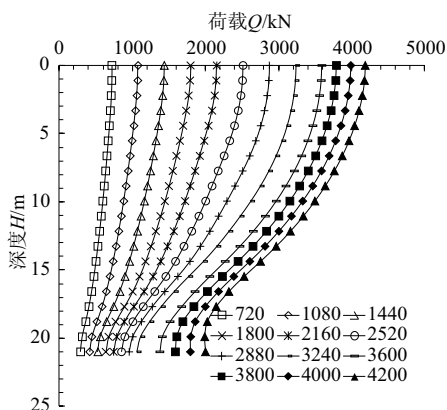


图8 桩身轴力分布(压浆桩)

在极限荷载作用下,未压浆桩桩身末端轴力,即桩端阻力约为750 kN;后压浆桩桩身末端轴力,即桩端阻力约为1450 kN。桩端压浆对于桩端阻力的提高作用明显,提高幅度约为93%,接近1倍。

#### 6.4 桩侧摩阻力对比

图9、图10分别为未后压浆、后压浆桩侧平均摩阻力分布图。未后压浆桩侧最大侧摩阻力为79.2 kPa,后压浆桩侧最大摩阻力为101.7 kPa,后压浆桩侧摩阻力明显高于未后压浆桩,后压浆对桩侧摩阻力的提高幅度约为28%。

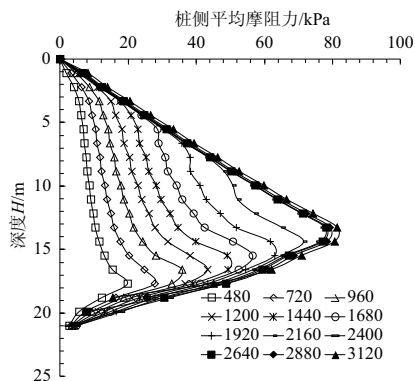


图9 桩侧摩阻力分布(未压浆)

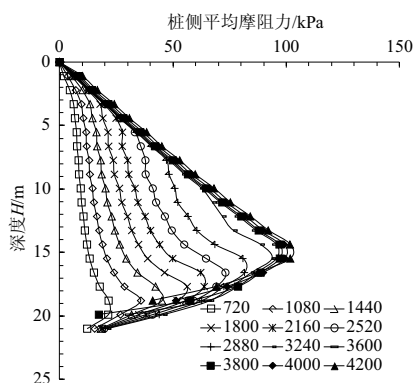


图10 桩侧摩阻力分布(后压浆)

图中数据,自桩顶向下15 m,桩侧摩阻力随着埋置深度线性增大,符合《建筑桩基技术规范》中对于桩侧摩阻力的计算。桩侧摩阻力在桩顶下15 m处达到最大值,之后迅速呈近似线性减小。一方面是因为轴力作用减小,桩身压缩变形减小;另一方面随着桩侧摩阻力向下扩散,桩端附近土体压缩变形增大。桩身与桩侧土体的相对位移减小,因此桩侧平均摩阻力成近似直线减小。当桩与桩侧土体相对位移为零的时刻,桩侧摩阻力将减小为零。

未后压浆桩在极限荷载作用下,接近桩端位置时,桩侧摩阻力接近为零,说明桩侧摩阻力全部发挥出来,此时桩侧阻力合计约为1650 kN。后压浆桩在极限荷载作用下,接近桩端位置处桩侧摩阻力约为20 kPa,说明桩侧摩阻力并未全部发挥出来,此时桩侧阻力合计约为2150 kN。后压浆对于桩侧阻力的提高作用约为30%。表明桩身后压浆的增强范围几乎为全桩长。

## 7 结论

1)后插钢筋笼灌注桩施工不使用泥浆,减小泥皮的润滑效应;通过混凝土泵进行压力灌注,对桩侧土有明显挤压作用,提高桩侧阻力;通过中空钻杆灌注混凝土,基本不存在桩端沉渣,利于桩端阻力的发挥。成孔提钻与灌注混凝土过程同时完成,比泥浆护壁灌注混凝土节约105元/m<sup>3</sup>,本工程节约271万元;

2)后压浆工艺不仅可以固化桩底沉渣和桩侧泥皮,还通过渗入、劈裂、加筋等作用使桩周一定范围土体得到加固,从而提高单桩承载力,降低施工成本。本工程采用后压浆可减小桩长工程量约7000 m<sup>3</sup>,除去增加的后压浆费用,节省工程造价约214万元。

3)采用后插钢筋笼灌注桩后压浆工艺,集合了后插钢筋笼灌注桩和后压浆工艺的优点,为高承载力桩基的设计优化提供了一个新的途径。

4)采用后插钢筋笼灌注桩后压浆工艺时,容易发生钢筋笼不到位等情况,从而导致固定在钢筋笼上的后压浆设备失效。某项目桩基工程实践表明,采取预防及控制措施可以解决该问题。后插钢筋笼灌注桩后压浆工艺可行,并且该工艺具有推广价值。

## 参考文献

- [1] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [2] 桩基工程手册(桩与桩基础手册)[M].北京:人民交通出版社,2008.