

输电线路工程预应力灌注桩防蚀设计及施工工艺

谈磊¹, 宁帅朋¹, 韩丽婷²

(1. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102;
2. 南京工业大学土木工程学院, 江苏 南京 211800)

摘要:盐渍土地区地下水腐蚀作用会严重降低输电线路工程桩基的耐久性。预应力灌注桩通过桩身增设预应力筋, 采用有粘结后张法施加预应力, 显著地改善了结构的耐久性。通过算例发现预应力筋的增设可以有效提高桩身裂缝控制等级, 减少基础材料用量。采用复合材料护筒代替钢护筒, 降低了工程造价, 减少了现场工作量。本文给出了预应力灌注桩的设计方法、施工流程以及预应力钢筋笼的制作和力筋的张拉与锚固两项关键工艺的施工要点。

关键词:灌注桩; 强腐; 预应力; 玻璃钢护筒; 施工工艺

中图分类号: TU448

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)06-0063-05

0 前言

随着我国特高压线路建设力度加大, 线路不可避免穿越地质环境复杂的特殊地区。江苏近海地区沿线普遍发育盐渍土, 含有大量的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 。 Cl^- 通过混凝土孔隙或微裂缝渗透到钢筋表面, 破坏了钢筋表面的钝化膜, 使钢筋发生锈蚀; SO_4^{2-} 在混凝土表面孔隙和空隙内结晶, 体积膨胀, 在干湿循环作用下, 使混凝土裂缝变大, 形成结晶破坏。盐渍土及地下水腐蚀作用会严重降低线路基础及上部结构的耐久性, 给线路安全埋下隐患。

目前工程应用较多的基础防腐^[1-4]技术包括隔离防腐^[5,6]、抗裂防腐^[7]、密实防腐^[8,9]和钢筋阻锈^[10]等。2012年国家电网直流建设部关于哈密南—郑州±800 kV 特高压直流输电线路工程专门召开基础防腐措施讨论会, 初步形成了线路工程腐蚀地区基础设计方案。对于强腐蚀地区方案要求混凝土强度等级为 C40, 最大水胶比 0.36, 最小水泥用量 340 kg/m^3 ; 开挖基础表面及其垫层顶面全部采用防腐涂层 (HCPE) 进行防护, 厚度不小于 $300 \mu\text{m}$; 垫层混凝土最低强度等级 C25, 最小厚度 100 mm ; 灌注桩基础^[11-13]钢筋混凝土保护层最小厚度 65 mm ; Cl^- 强腐蚀地区的基础混凝土中应添加钢筋阻锈剂。针对强腐蚀地区, 根据工程经验, 在水位变化区域增设钢护筒提高桩基耐久性。

提高混凝土致密性和涂刷防腐涂层是增强桩身耐久性的两种方式, 然而桩身混凝土在拉力或弯

矩作用下出现裂缝, 桩身的耐久性将大打折扣。预应力混凝土结构是改善构件抗裂性的有效途径。预应力在桩基工程中应用较少, 主要为预应力管桩^[14]。预应力管桩现场施工需要大型机械进行送桩, 对于输电线路工程施工成本较高, 不利于推广。天津市建科院^[15]针对沿海地区环境, 首次提出灌注桩施加预应力的施工工艺, 解决建筑物上浮的抗拔桩问题。采用灌注桩与预应力结合的方式能有效降低线路工程施工对大型机械的要求, 降低施工成本。

1 预应力灌注桩概况

预应力灌注桩防腐的设计理念是控制桩身受力, 通过增设预应力筋, 使桩身在受拉力或弯矩作用下混凝土处于持续受压的状态, 不产生受力裂缝, 降低腐蚀水体侵入到混凝土内部的速率, 改善桩身防腐性能。

预应力采用有粘结后张法进行施加。预应力筋孔道注浆, 可以提高预应力筋的耐腐蚀性, 保证力筋的张拉效果, 减少预应力损失。

一般情况下, 在地表 $4\sim 6 \text{ m}$ 以下盐渍土含盐量相对地表的超强盐渍土降低较多。对于桩长较大的灌注桩, 预应力筋可仅布置在桩身上部受弯易开裂且桩身周边土层存在侵蚀水体区域。

2 预应力灌注桩设计

2.1 下压桩设计

2.1.1 单桩竖向极限承载力

单桩竖向极限承载力标准值 Q_{uk} , 可按式(1)计算:

收稿日期: 2017-07-05; 修回日期: 2017-08-31

基金项目: 江苏省产学研前瞻性联合研究项目 (SBY20160-20488)

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

式中: q_{sik} 为桩侧第*i*层土的极限侧阻力标准值; q_{pk} 为极限端阻力标准值; A_p 为桩底横截面面积; u 为桩身周边长度; l_i 为第*i*层土的厚度。

单桩竖向承载力特征值 R_a ,可按式(2)计算:

$$R_a = Q_{uk}/K \quad (2)$$

式中: K 为安全系数,取 $K=2$ 。

2.1.2 桩身配筋计算

预应力灌注桩的纵向受力钢筋,由普通钢筋以及部分预应力钢筋组成,沿周边间隔均匀布置。对于圆形截面钢筋混凝土桩,其正截面受弯承载力应符合以下规定:

$$M_{max} \leq \frac{2}{3} f_c A r \frac{\sin^3 \pi \alpha}{\pi} + (f_y A_s + f_{py} A_p) r_s \frac{\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha_t}{\pi} \quad (3)$$

$$\alpha f_c A \left(1 - \frac{\sin 2\pi \alpha}{2\pi \alpha} \right) + (\alpha - \alpha_t) (f_y A_s + f_{py} A_p) = 0 \quad (4)$$

$$\alpha_t = 1.25 - 2\alpha \quad (5)$$

式中: M_{max} 为桩身最大弯矩; A 为桩截面面积; r 为桩半径; α 为应于受压区混凝土截面面积的圆心角与 2π 的比值; A_s 为全部纵向普通钢筋的截面积; f_{py} 为预应力筋的抗拉强度设计值; A_p 为全部纵向预应力筋的截面积; r_s 为纵向钢筋重心所在圆周的半径; α_t 为纵向受拉钢筋截面积与全部纵向钢筋截面积的比值。

2.1.3 桩身抗裂验算

结构受力裂缝控制等级分为三级,普通灌注桩桩身裂缝控制等级为三级。预应力灌注桩建议控制等级为一级,即混凝土不产生拉应力进行设计。桩的裂缝验算按式(6)计算:

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

式中: σ_{ck} 为抗裂验算边缘的混凝土法向应力; σ_{pc} 为扣除全部预应力损失后抗裂算边缘混凝土的预压应力。

混凝土法向应力按式(7)计算:

$$\sigma_{ck} = M_{max} / W \quad (7)$$

式中: W 为桩截面惯量。

2.2 上拔桩设计

单桩抗拔竖向极限承载力标准值 T_{uk} ,按式(8)计算:

$$T_{uk} = u \sum \lambda_i q_{sik} l_i \quad (8)$$

式中: λ_i 为抗拔系数。

抗拔桩的配筋计算见公式(9):

$$T \leq f_y A_s + f_{py} A_p \quad (9)$$

式中: T 为桩顶拉力。抗拔桩的抗裂验算与下压桩相同。

2.3 算例

为对比钻孔(挖孔)灌注桩与预应力灌注桩的差异,分别对两种桩型进行配筋计算及抗裂验算,比较分析预应力灌注桩的经济性及抗裂性能。

桩身混凝土采用C40,普通受力钢筋采用HRB335,预应力筋采用预应力螺纹钢筋,屈服强度标准值 f_{pyk} 取1080 N/m²,箍筋采用HPB300。杆塔采用国家电网典型设计的2F4-SJ1,呼高15 m,杆塔的基础作用力如表1所示,工程所在地地质条件如表2所示,设计结果比较如表3所示。表3中 N_{max} 为最大下压力; N_x , N_y 分别为最大下压力对应的*x*,*y*方向的水平力; T_{max} 为最大上拔力; T_x , T_y 分别为最大上拔力对应的*x*,*y*方向的水平力。

表1 杆塔基础作用力

下压/kN			上拔/kN		
N_{max}	N_x	N_y	T_{max}	T_x	T_y
1269	172	196	924	131	143

表2 主要岩土设计参数

层号	土层名称	层厚 /m	重力密度 /($kN \cdot m^{-3}$)	黏聚 力/kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	极限侧阻 力/kPa	极限端阻 力/kPa
1	粉质黏土	0.5	17.3	15	5	20	-
2	粉质黏土	6.7	19.4	40	10.8	40	-
3	粉土	3	18.4	10	26.0	632	-
4	粉质黏土	10	21.0	42	11.2	45	1000

表3 桩基设计结果比较

桩型	直径 /m	桩长 /m	纵向 钢筋	钢筋用 量/t	价格 /元	桩身裂 缝/mm
普通灌注桩 (仅受力计算)	1.0	14	20B20	0.83	2 747.3	0.34
普通灌注桩 (控制裂缝)	1.0	14	32B20	1.24	4 104.4	0.19
预应力灌注桩	1.0	14	12A20+14B20	1.01	3 351.7	-

从表3可以看出:

(1) 对于普通灌注桩,可以通过增大配筋面积控制桩身裂缝。在不考虑桩身裂缝的情况下,单桩的钢筋用量为0.83 t。为将桩身裂缝控制在0.2 mm以下,单桩钢筋用量增至1.24 t,增加了将近50%。说明采用增设普通钢筋的方式控制裂缝,以此来提高桩身的耐久性是非常不经济的。

(2) 采用预应力灌注桩,在不开裂的情况下,钢筋用量增至1.01 t,相比于采用增大配筋控制裂缝

的方式,减少了 18% 的钢筋用量。在整个寿命周期,桩身混凝土始终处于受压的状态,显著地改善了桩身的耐久性。

3 GFRP 护筒

对于常规的隔离防腐一般采用钢护筒的形式,成本较高。本文推荐采用玻璃纤维增强塑料(glass-fiber reinforced plastic, GFRP)护筒。

采用 GFRP 护筒的主要作用是将桩基与腐蚀环境隔离,直接降低桩身与腐蚀盐类的接触。同时 GFRP 护筒可以起到稳定孔壁、防止坍孔、固定桩位及保护操作原地面的作用^[16],如图 1 所示。

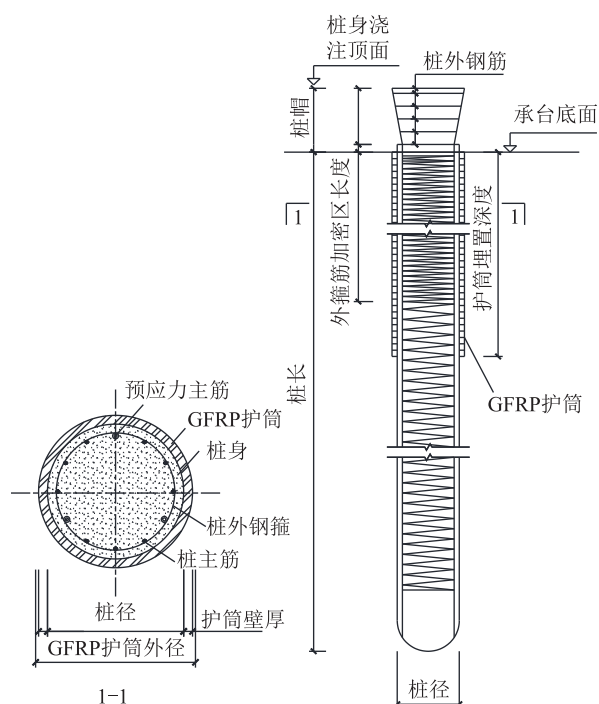


图 1 预应力灌注桩

Fig.1 Prestressed cast-in-place pile

与钢护筒相比,GFRP 材料本身防腐性能较高,表面无需进行防腐处理,减少了现场工作量。对于不同的地质条件,可根据线路环境选择合适的基体材料。

GFRP 护筒埋设深度可根据地质、地下水位、盐渍土竖向的分布确定。一般情况下,在地表 4~6 m 以下盐渍土含盐量相对地表的超强盐渍土降低较多,因此护筒埋设深度建议取 5~8 m。GFRP 护筒厚度可根据桩径和管材规格进行选择,建议壁厚选取在 20~50 mm 之间。GFRP 护筒每米造价仅为钢护筒的 50% 左右。

由于城镇直埋供热管道外壳一般为“玻璃钢”,材料属性与 GFRP 属性近似,所以 GFRP 护筒区域侧阻力计算方法建议参照“GJJ/T81—2013 城镇直

埋供热管道工程技术规程”关于管道摩擦力的计算方法进行设计校核。GFRP 护筒与土层之间单位长度的侧阻力计算见式(10)和式(11):

$$F = \mu \frac{1 + K_0}{2} \pi D_h \gamma g \quad (10)$$

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (11)$$

式中: F 为单位长度摩擦力; μ 为摩擦系数; D_h 为护筒外径; K_0 为土压力系数; φ 为土内摩擦角; γ 为土的重度,地下水位线以下取浮重度。

GFRP 管材管壁的粗糙度较低,为提高 GFRP 护筒桩的侧阻力,可以通过一些构造措施,如增设表面凹槽,提高护筒与土体及混凝土之间的机械咬合力。

对于人工挖孔桩,GFRP 护筒的埋设可以采用挖坑埋设法;对于钻孔灌注桩,可以采用扩孔放置法。挖坑埋设 GFRP 护筒的过程为:

(1) 开挖埋设 GFRP 护筒的土层,开挖时以桩中心为圆心,开挖半径取 GFRP 护筒半径 200~300 mm,挖至设计埋深。

(2) 人工配合吊机吊放 GFRP 护筒就位,可采用十字交叉法校正 GFRP 护筒的位置,控制 GFRP 护筒中心线偏位 ≤ 50 mm,垂直度偏差 $\leq 1\%$ 。轻压就位后的护筒,使其顶面水平、四周稳固。

(3) GFRP 护筒内浇筑混凝土,在此过程中不断校核 GFRP 护筒的平面位置和垂直度,直至埋设结束。

GFRP 护筒桩扩孔放置法施工流程与挖坑埋设法的不同之处在于,先钻孔,后放置 GFRP 护筒:

(1) 旋挖钻机钻孔,对于埋设 GFRP 护筒的土层,钻孔时以桩中心为圆心,半径取 GFRP 护筒半径 200~300 mm。

(2) 同挖坑埋设法的步骤(2)和(3)。

成桩后,GFRP 护筒作为结构防腐的一部分,不得取出,且其顶部应与设计桩头平齐,即确保 GFRP 护筒伸入承台中且深度不小于 100~150 mm。GFRP 护筒的顶端宜高出地面 300 mm。

利用管约束核心混凝土,除具有高效、施工便捷及耐腐蚀性好等优点外,还表现出:(1) 管的约束作用使核心混凝土处于三向受力状态,横向变形受到限制,承载能力得到了提高;(2) 混凝土能缓解管这种薄壁构件的屈曲^[16]。

4 预应力灌注桩施工工艺

预应力灌注桩施工工艺流程见图 2。与常规灌注桩相比,其主要区别在于预应力钢筋笼的制作及

力筋的张拉与锚固。

4.1 钢筋笼制作及放置

预应力筋外套波纹管与普通钢筋、箍筋一同绑扎。预应力筋和普通钢筋沿桩周均匀间隔布置。波纹管需用定位筋固定牢固,每40 cm设置一道U字形架立筋,以免在混凝土浇筑过程中发生移位。

预应力筋底部可采用螺丝端杆锚具,保证后续能有效张拉预应力。力筋与孔道要求完全对中,且与桩身长度方向完全平行。波纹管底部需进行密封,防止混凝土浇筑过程中,进入波纹管内。锚具涂刷油漆类防腐涂料进行防腐处理。

对于多节钢筋笼,可将首节钢筋笼下放至钻孔,于孔位位置焊接普通钢筋,套筒连接预应力筋,同时保证波纹管连接的密实性。

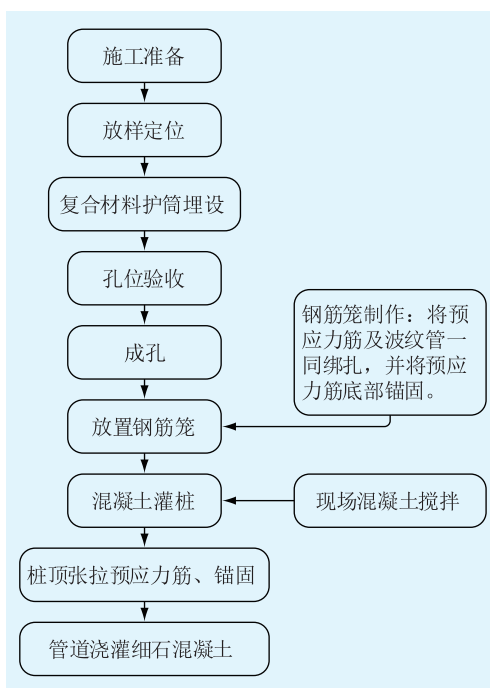


图2 预应力灌注桩施工流程

Fig.2 Construction flow of prestressed cast-in-place pile

4.2 力筋的张拉与锚固

对于预应力灌注桩,由于桩身完成浇筑后,底部锚具无法再调整,对底部锚具的安全性要求较高。

待混凝土强度达到设计强度的70%方可进行力筋的张拉。张拉前必须对混凝土强度、构件端部预埋件等进行全面校核。

预应力灌注桩上部张拉端一般采用带锥孔锚板的夹片锚具,如图3所示。张拉时,每个锥孔穿进一根钢筋,张拉后各自采用夹片将孔中的钢筋抱夹锚固,每个锥孔各自成为一个独立的锚固单元。

预应力的张拉采用双控,以张拉力控制为主,校核钢筋实际伸长量。张拉顺序采用分批对称张

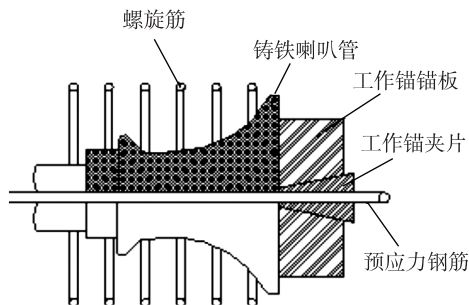


图3 夹片锚具配套示意图

Fig.3 Schematic diagram of clip anchor

拉。锚固阶段锚具和力筋的内缩量应符合设计要求。

力筋张拉完成后,孔道注浆。注浆液采用高强、微膨胀水泥基注浆液,注浆压力大于2 MPa。在高应力作用下,预应力筋容易生锈,力筋张拉完成后,应尽快注浆。

5 结语

预应力灌注桩采用后张法有粘结预应力的工艺对灌注桩施加预应力,主要有以下优点:(1) 桩身混凝土持续处于受压的状态,不产生受力裂缝;降低腐蚀水体侵入到混凝土内部的速率,显著地提高了桩身防腐性能。(2) 增设 GFRP 护筒,将桩基与腐蚀环境隔离,与钢护筒相比,造价降低50%左右。(3) 增设预应力筋,减少桩身混凝土和钢筋的用量,降低工程造价。

参考文献:

- [1] 黄勇祥,张卫东,林芳,等. 特高压工程灌注桩基础防腐措施研究[J]. 山东电力技术, 2016(5): 76-78.
HUANG Yongxiang, ZHANG Weidong, LIN Fang, et al. Anti-corrosion measures of cast-in-situ pile foundations for UHV projects[J]. Shandong Electric Power, 2016(5): 76-78.
- [2] 高彬,冯衡,包永忠,等. 盐渍土地区输电杆塔基础防腐措施研究[J]. 电力勘测设计, 2015(A2).
GAO Bin, FENG Heng, BAO Yongzhong, et al. Research on anti-corrosion measures of the transmission line foundation in saline soil area [J]. Electric Power Survey & Design, 2015 (A2).
- [3] 闫生,郑丽敏. 输电线路灌注桩基础防腐措施经济性研究[J]. 山西建筑, 2015(34): 91-92.
YAN Sheng, ZHENG Limin. Economic research on anti-corrosion measures of bored pile on transmission lines [J]. Shanxi Architecture, 2015(34): 91-92.
- [4] 辛自洋,崔连友,杨利全,等. 高 SO_4^{2-} 离子腐蚀区钻孔灌注桩防腐措施[J]. 森林工程, 2004(1): 64-66,69.
XIN Ziyang, CUI Lianyou, YANG Liguang, et al. Antisepsis measure of drilling picket through strong SO_4^{2-} rot areas[J]. Forest Engineering, 2004(1): 64-66, 69.

- [5] 刘竞, 邓德华, 赵腾龙, 等. 提高海洋环境钢筋混凝土构筑物耐久性措施综述[J]. 腐蚀与防护, 2008(6): 329-333.
LIU Jing, DENG Dehua, ZHAO Tenglong, et al. A review on measures for prolonging the service life of marine concrete construction[J]. Corrosion & Protection, 2008(6): 329-333.
- [6] 贾顺利. 大直径袋装混凝土灌注桩在强盐渍土地区的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
JIA Shunli. Application research on large diameter bored concrete pile in sack in super salty soil region [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [7] 郑扬. 盐沼泽腐蚀区桥梁桩基竖向承载特性分析及其防腐技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
ZHENG Yang. Analysis of the pile foundation vertical bearing characteristic in salt marsh area and research on its anti-corrosive [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [8] JTJ 272—2000 海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
JTJ 272—2000 Corrosion prevention technical specifications for concrete structures of marine harbor engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [9] GB/T 50476—2008 混凝土结构耐久性设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
GB/T 50476—2008 Code for durability design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [10] 张宝胜, 干伟忠, 陈涛. 杭州湾跨海大桥混凝土结构耐久性解决方案[J]. 土木工程学报, 2006(6): 72-77.
ZHANG Baosheng, GAN Weizhong, CHEN Tao. Strategies to ensure durability of concrete structure for Hangzhou Bay Bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2006(6): 72-77.
- [11] 张生亮, 张孟奇, 李晋珍. 特高压输电线路灌注桩基础的发展趋势[J]. 世界科技研究与发展, 2012, 34(6): 961-963.
ZHANG Shengliang, ZHANG Mengqi, LI Jinzhen. Development tendency of pile foundations of UHV transmission line [J]. World Sci-Tech R&D, 2012, 34(6): 961-963.
- [12] 袁敬中, 韩斐, 李中, 等. 输电线路灌注桩基础在强腐蚀地区应用性研究[J]. 华北电力技术, 2017(1): 32-39.
YUAN Jingzhong, HAN Fei, LI Zhong, et al. Application of pile in transmission line in strong corrosion area [J]. North China Electric Power, 2017(1): 32-39.
- [13] 柏广林, 刘国涛, 姜峰. 送电线路灌注桩的设计要点[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(3): 61-63.
BO Guanglin, LIU Guotao, JIANG Feng. Alpha and omega of pouring piles design in transmitting line [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26(3): 61-63.
- [14] 王杰. 预应力管桩设计理论及其工程应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
WANG Jie. Research on design theory of prestressed pipe pile and its application in engineering [D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [15] 郑秀娟, 王定乾, 佟林, 等. 有黏结后张预应力钻孔灌注桩施工技术[J]. 施工技术, 2015(9): 98-101.
ZHENG Xiujuan, WANG Dingqian, TONG Lin, et al. Construction technology of post-tensioned prestressed bored cast-in-situ pile [J]. Construction Technology, 2015(9): 98-101.
- [16] 秦国鹏. GFRP管钢筋混凝土构件力学性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
QIN Guopeng. Mechanical behaviors study on GFRP tube filled with reinforced concrete members [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.

作者简介:



谈磊

谈磊(1974—),男,江苏南京人,高级工程师,从事输电线路杆塔结构设计及研究(E-mail:lvjian@jspdi.com.cn);

宁帅朋(1993—),男,河南新乡人,助理工程师,从事线路结构设计(E-mail:ningshuaipeng@163.com);

韩丽婷(1971—),女,江苏南京人,副教授,从事土木工程领域科研及教学工作(E-mail:han-liting@163.com)。

Anti-corrosion Design and Construction Technology for Prestressed Cast-in-place Pile with Serious Corrosion in Transmission Line Towers

TAN Lei¹, NING Shuaipeng¹, HAN Liting²

(1. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: Due to serious corrosion of ground water in saline soil area, the durability of pile foundation is seriously reduced in transmission line towers. Prestressed cast-in-place pile, which was reinforced with prestressing tendon in pile body and applied prestress by the post tension method, provides significant improvement in construction durability. Through numerical examples, it is found the additional prestressing tendon can effectively increase pile body crack-control level and reduce material dosage in foundations. The advantage of GFRP guard barrel replacing steel guard barrel are narrated with the reduction of the construction costs and the local workload. The design method of prestressed cast-in-place pile, construction process and manufacture method of prestressed steel cage with tensioning and anchoring constructions control points are recommend in the paper.

Key words: cast-in-place pile; serious corrosion; GFRP guard barrel; construction technology

(编辑 陈娜)