

后压浆技术在孟加拉国灌注桩施工中的应用

黄玉辉, 丁伟, 赵晓磊, 李雪峰, 李福来, 张西坤, 齐松松

(河北建设勘察研究院有限公司, 河北 石家庄 050031)

摘要:孟加拉国某新建燃煤电厂项目所处场地属于海相沉积地层, 桩基工程采用钻孔灌注桩。为了解决孟加拉国新的施工工况带来的新的施工问题, 按照中国的工程建设标准进行施工, 并采用旋挖钻孔灌注桩后压浆施工技术, 很好地解决了钻孔沉渣和桩侧泥皮对桩基承载力的影响, 提高了桩基承载力, 试验检测结果表明, 达到了Ⅰ类桩的标准。通过后压浆技术在本项目的成功应用, 总结出现场操作控制措施, 为“一带一路”国家钻孔灌注桩后压浆施工技术提供借鉴经验。

关键词:钻孔灌注桩; 承载力; 旋挖钻进; 后压浆; “一带一路”; 孟加拉国

中图分类号: TU473.1⁺4 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2021)05-0119-06

Application of the post grouting process in Bangladesh bored pile construction

HUANG Yuhui, DING Wei, ZHAO Xiaolei, LI Xuefeng, LI Fulai, ZHANG Xikun, QI Songsong

(Hebei Construction Survey and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei 050031, China)

Abstract: The new coal-fired power plant project in Bangladesh is located in marine sedimentary strata, and bored piles are used for the pile foundation. In order to solve the construction problems brought about by the new construction conditions in Bangladesh, the construction was carried out according to the construction standards of China, and rotary drilling bored piles with post grouting were adopted to eliminate the influence of drilling settlements and mud cake around the piles on the bearing capacity of foundation piles; thus improving the bearing capacity of foundation piles. The test results showed that the piles met the Class I standard. Through the successful application of post grouting technology in this project, the field operation control measures are summarized, which can provide reference for bored pile post grouting construction technology in “the Belt and Road” countries.

Key words: bored cast-in-place pile; the bearing capacity; rotary drilling; post grouting; “the Belt and Road”; Bangladesh

1 工程概况

孟加拉国某新建燃煤电厂项目位于吉大港市孟加拉湾东岸, 当地运输条件不良, 小件物资可以通过陆路运输, 大部分物资需通过临时码头运至现场。BOT区域主要构筑物基础下部采用钻孔灌注桩进行施工, 所处场地属于海相沉积地层, 60.00 m深度范围内地层自上而下主要包括: ①杂填土; ②软/中软粉质粘土层; ③坚硬的粉质粘土层; ④松散中密粉砂层; ⑤密实粉砂层, 持续到所有的勘探孔底。勘察结果剖面图如图1所示。

桩基设计极限抗压承载力特征值 < 9000 kN, 设计桩径1000 mm, 桩端持力层为⑤密实粉砂层, 有效桩长 < 52.0 m。项目建设之初建设方要求采用美国工程建设标准来建造。项目所处场地属于海相沉积地层, 根据工程经验, 如果按照美国标准确定桩基的承载力会偏低, 要满足上部结构的荷载要求, 桩基数量会大大增加, 工程造价也随之增加很多。如果按照中国的工程建设标准, 采用后压浆旋挖钻孔灌注桩, 桩基的承载力能大大提高^[1-2], 工程的造价也会随之降低。经与建设方积极沟通, 勉强

收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2021-01-30 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.05.017

作者简介: 黄玉辉, 男, 汉族, 1984年生, 工程师, 从事桩基工程施工与研究, 河北省石家庄市槐安西路555号, 285891120@qq.com。

引用格式: 黄玉辉, 丁伟, 赵晓磊, 等. 后压浆技术在孟加拉国灌注桩施工中的应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(5): 119-124.

HUANG Yuhui, DING Wei, ZHAO Xiaolei, et al. Application of the post grouting process in Bangladesh bored pile construction[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5): 119-124.

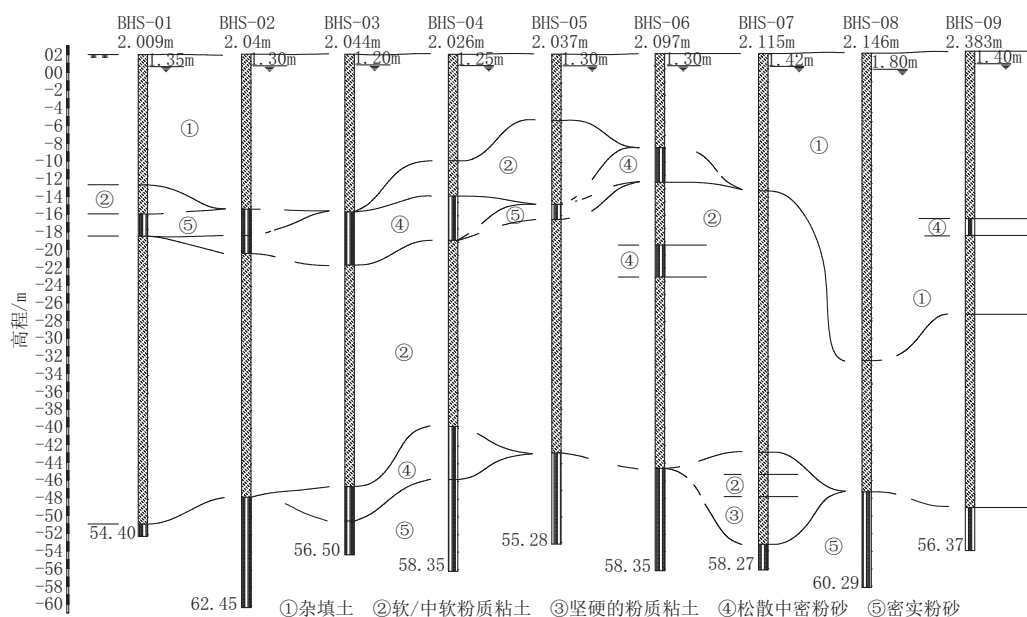


图1 BOT区域勘察结果剖面

Fig.1 Profile of geo-investigation results in the BOT zone

同意采用钻孔灌注桩后压浆施工工艺设计施工。

由于孟加拉国无后压浆类似的施工经验,并且根据美国标准《ACI543R—Design, Manufacture, and Installation of Concrete Piles》^[3]可查阅到的相关内容仅有如下部分:引言部分1.0概述中:“桩安装就位后,可采用后压浆工艺增加桩尖下部土壤的密实度”和1.1.7.5“后压浆桩——混凝土桩中可预埋注浆管,待成桩后,通过压力注浆方法注浆,以增强桩和土壤的结合强度及/或固结桩尖下的土壤”。

由此可见,钻孔灌注桩后压浆施工技术在美国标准的规范中虽然得到了认可,但是由于缺乏相关的工程实践^[4],无法从美国标准的规范中查阅到具体的施工控制措施和采取后压浆施工工艺对桩基承载力提高的参考数据。而钻孔灌注桩后压浆施工技术在中国是一项应用普遍、施工工艺成熟的施工技术,并已编制成规范、标准^[5]。

鉴于上述情况,正式施工前进行试桩工作,以检验后压浆施工效果及取得相关参数。通过参与海外项目施工,并对后压浆施工工艺的逐步推广实施,积累相关工程实践。

2 试桩方案

2.1 试桩要求

试桩区域选在地层具有代表性的位置,分2期

进行施工,第一期采用常规的混凝土灌注桩施工工艺,共施工11根,桩径1000 mm,其中3根试桩、8根锚桩。第二期采用混凝土灌注桩后压浆施工工艺,共施工11根,其中3根试桩、8根锚桩。根据勘测地层情况,确定布置3道注浆管,1道为桩端注浆,2道为桩侧注浆,每道注浆管为2根和2根环管,分别沿桩身对称布置,注浆管长度根据注浆断面位置确定。2处桩侧注浆断面位置分别为②软/中软粉质粘土层和④松散中密粉砂层,绝对高程分别为-19.5 m和-34.5 m。桩位布置详见图2。

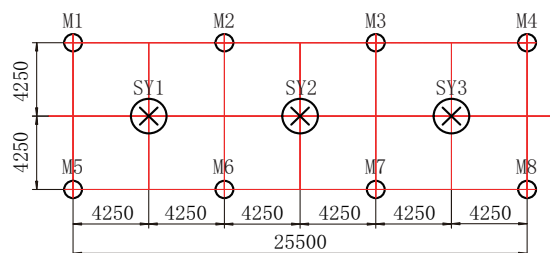


图2 试桩区桩位平面布置

Fig.2 Layout of the pile location in the test area

2.2 灌注桩施工

2.2.1 钻孔施工

选用旋挖成孔施工工艺,采用国产SR235型旋挖钻机。钻进时,根据地层情况适时更换采用挖泥钻头、挖砂钻头,清孔时采用挖砂钻头。本工程选用

3 m长度的钢护筒,由厚度为8 mm的钢板制作而成,护筒内径比桩径大100 mm,护筒顶部开设1个溢浆孔,钻孔过程中钻具下放时通过此溢浆孔可使孔内的泥浆流入缓浆池,钻具提升时使缓浆池的泥浆流向孔内,随时保持孔内泥浆液面高度,同时减少泥浆对孔壁和护筒外侧与土层接触部分的冲刷。埋设护筒采用人工配合旋挖钻机完成,护筒埋设具体步骤:首先由旋挖钻机钻头中心对准桩位中心挖孔约1 m,再用人工配合钻机将护筒放入钻孔中,并利用引出的4个控制点进行护筒对位^[6],位置放正后,用钻机钻杆将钢护筒压至预设深度。

泥浆采用优质膨润土+火碱+纤维素,使用3PNL型搅浆泵进行充分循环搅拌^[7],使其性能指标控制在密度1.05~1.07 kg/L、粘度39~60 s(美国标准)、含砂率 $\leq 2.5\%$ (美国标准)。每根桩开孔前均对泥浆性能指标进行测定,不满足上述指标要求不得进行旋挖成孔。每根桩完成后均需将原有泥浆按规定清理排放,重新搅拌新泥浆,以确保泥浆各项性能指标能够达到上述标准。

根据施工经验,为保证成孔质量,避免坍塌现象,钻进过程中泥浆面高出地下水位1.0 m以上,受水位涨落影响时,泥浆面高出最高水位1.5 m以上^[8]。

2.2.2 桩端持力层控制

本项目钻孔灌注桩设计要求以⑤层密实粉砂层作为桩端持力层,为确保桩端全断面进入持力层深度满足设计要求,施工过程中按以下程序进行控制:

(1)施工前要认真分析岩土工程勘察资料,根据试桩区域勘探资料提供的地质柱状图或剖面图,统计每根桩持力层层顶预计埋置深度,并向现场工序工程师详细交底。成孔施工过程中,以统计的每根桩持力层层顶预计埋置深度为指导,通过所挖出的渣样与勘察报告中对持力层的描述性状进行对比判断,以准确判断钻孔是否进入持力层。

(2)是否已经钻入持力层面需通过挖出的渣样来判断。通过挖出的渣样,判断持力层面埋深,与勘察资料提供的持力层面埋深对比,如果两者一致,即可判定准确的持力层面埋深,如果两者相差较大,应及时通知甲方和监理单位与勘察单位联系,同时该孔暂停施工,待确认持力层面后再进行施工。确定了持力层面以后,根据设计图纸对桩端进入持力层深度的要求和持力层埋深,计算出设计

终孔孔深,加以控制,实际终孔孔深不小于设计值。

2.2.3 钢筋笼制安

钢筋笼根据桩长分节制作,主筋焊接时采用搭接焊,在钢筋笼制作场地采用双面搭接焊,在孔口采用单面搭接焊。保证搭接长度符合规范要求。钢筋焊接前,根据施工条件进行试焊,合格后方可正式施焊。钢筋笼制作完成后,采用人工配合旋挖钻机运至桩孔附近再用25 t(250 kN)汽车吊吊装下放至桩孔内。在运输过程中应采取措施,以保证入孔前钢筋笼主筋的平直,防止出现永久性变形^[9]。

钢筋笼吊放时采用三点起吊,以防止钢筋笼产生永久变形。在钢筋笼外部每隔4 m设置一道圆柱状混凝土垫块,每道4个,垫块采用混凝土滚轴式定位轮,定位轮中间使用箍筋贯通,焊接在主筋上,充分保证保护层厚度满足75 mm的要求。

在下放钢筋笼过程中,钢筋笼要保持竖直,钢筋笼中心线与桩中心尽量重合,向下安放时速度要慢,减少钢筋笼对孔壁的刮蹭,遇阻时不得强行下放,就位后要立即固定。钢筋笼安放时采用双吊筋装置,将钢筋笼固定至设计标高,防止钢筋笼掉落孔底。钢筋笼安放偏差应满足:横向偏差 ≤ 20 mm;竖向偏差 ≤ 50 mm。钢筋笼下设完毕后在桩顶加强圈位置对称焊接4个耳筋,以有效控制横向偏差。

2.2.4 混凝土灌注

本工程钻孔灌注桩混凝土强度等级5000 psi(国标C35),采用现场搅拌工艺。所有原材料按项目施工组织设计中规定的频率和项目进行试验,未经检验的原材料不得使用。不同规格的砂石料应分别堆放,在试桩工程开工前,采用JS150型搅拌机进行试搅拌1盘(0.105 m³),并在现场测量其坍落度及坍损值,并留设试块2组,分别检验其7天及28天抗压强度,坍落度及坍损值满足水下混凝土灌注要求且抗压强度满足设计强度后方可进行正式生产。

每根桩灌注工作开始前,根据人员分组情况对所有人员进行现场技术交底。搅拌机放置在成孔的桩位附近,工人分组按照下列顺序进行投料:水及外加剂(1/2)→碎石(1/2)→粗砂(1/2)→水泥(1袋)→水及外加剂(1/4)→碎石(1/2)→粗砂(1/2)→水及外加剂(1/4)。混凝土搅拌所用粗细骨料按照预定投料顺序投入搅拌机进行搅拌,每盘混凝土搅拌90s后倒入转运专用大料斗中,使用三脚架将其起吊并卸放到灌注用大料斗进行混凝土的灌注^[10-11]。

采用导管法灌注混凝土,导管直径250 mm,壁厚 ≤ 3 mm,两节导管之间用丝扣连接,提升机械采用汽车式吊车及三脚架,提升时不得碰挂钢筋笼。

本工程水下灌注采用的是双密封圈丝扣连接方式的导管,该类型导管密封性能良好,不容易出现漏水现象。导管单节长度为2.6 m,底节长度不宜小于4.0 m,另配备若干0.5~1.0 m短节,以便配置导管。

导管使用前要进行试拼接和试压,检验其垂直度和密封性,试水压力可取0.6~1.0 MPa,检验合格的导管方能使用。

导管下设总长度根据混凝土灌注前实际孔深确定,保证导管下端距孔底300~500 mm,导管埋入混凝土深度宜为2~6 m,配管原则:导管总长=孔内管长+孔外管长,孔外管长为施工留置长度,一般为500 mm左右。

导管下设完成后及时测量沉渣厚度,必须确保灌注前孔底沉渣厚度满足设计要求。若沉渣厚度超标,则采用正循环工艺进行二次清孔。

初灌时使用球胆或篮球作为隔水塞,隔水塞直径应比导管内径小10~20 mm,确保初灌混凝土质量和混凝土的顺利灌注。清孔完成后将隔水塞放入导管内,混凝土运至孔口后,应先检查混凝土的和易性和坍落度,满足设计要求的混凝土即可灌入孔内。

灌注过程中要及时用测绳测量混凝土面升高高度,计算导管埋置深度,确定导管拆卸长度。水下混凝土灌注时每次灌混凝土应有足够的数量,保证导管埋深 ≤ 2 m,严禁导管提出混凝土面,同时也不能埋管太深(≥ 7.5 m),以免提管困难。灌注时应有专人测量导管埋深及管内外混凝土面的高差,填写水下混凝土灌注记录。

正常浇灌时,严格控制进料速度,匀速灌注,减小混凝土对孔壁的冲击力并保持混凝土面均匀连续上升;水下混凝土必须连续灌注,每根桩的灌注时间按初盘混凝土的初凝时间控制,对灌注过程中的一切故障均应记录备案。

在灌注将近结束时,核对混凝土的灌注数量和桩顶灌注高度。为保证桩顶混凝土质量,应严格控制最后一次灌注量,桩顶超灌高度满足设计要求,凿除的泛浆高度必须保证暴露的桩顶混凝土达到强度设计等级。混凝土冲去翻出的浮浆体,当确认混凝土面高度满足要求后才可提拔最后一节导管。

灌注完毕混凝土面达到要求之后要立即将孔内

导管缓慢匀速拔出,避免速度太快在桩顶形成“软芯”。灌注完成后,清理出护筒上的吊环,套上钢丝绳套,利用三脚架缓缓提出护筒,防止落入大土块,影响桩顶混凝土质量。混凝土终凝后将桩顶空孔回填。

2.3 后压浆施工工艺

注浆管规格:注浆管采用内径为25 mm的普通钢管,钢管壁厚 ≤ 2.75 mm。注浆管应在钢筋笼制作时绑扎在钢筋笼上^[12-13]。

注浆环管:采用 $\varnothing 30$ mm优质塑料管,侧壁按梅花形设置出浆水孔,孔径为6 mm。环管用胶带、橡胶膜等包裹好,然后在塑料管外套专用黑胶皮袋。防止混凝土灌注过程中漏浆导致注浆管堵塞。

浆液配比:浆液水灰比0.55,水泥采用42.5 MPa强度等级复合水泥。

注浆终止压力:桩侧2.5 MPa,桩端3.5 MPa,注浆流量 ≥ 75 L/min。

注浆量:桩端 ≤ 2 t,桩侧每个断面处1.0~1.2 t。

注浆顺序:自上而下,先进行桩侧上部注浆,再进行桩侧下部注浆,最后再进行桩底注浆。

注浆方法及注浆具体措施如下:

(1)使用专用注浆泵,桩灌注完成12 h后应及时“开环”,一般情况下“开环”压力为1~2 MPa,用高压清水将压浆管打开,“开环”完成后将注浆管口封闭,防止异物掉入管内;

(2)成桩48 h后应及时压浆,按照自上而下的顺序逐个管依次进行;

(3)当某管压力达到设计最大值而压浆量达不到设计值时,可暂停压浆5~10 min,当压力减小后再进行压浆,如果压浆量仍达不到设计要求,停止压浆,将剩余浆液注入另一压浆管。

图3为后压浆施工现场。



图3 后压浆施工现场

Fig.3 Construction site of post grouting

3 试桩结果分析

2批试桩完成后按照《ASTM D 1143—07 “Standard test methods for deep foundations under static axial compressive load”》(深基础竖向静载标准试验方法)和《ASTM D 4945—00 “Standard test method for high-strain dynamic testing of piles”》(深基础高应变动力测试标准试验方法),分别对3根试桩的承载力进行试验^[14-17],测试结果如下:

(1)未注浆灌注桩最大加载量8800 kN,最大位移量127.44 mm,最大回弹量10.62 mm,最大回弹率8.38%(详见图4)。

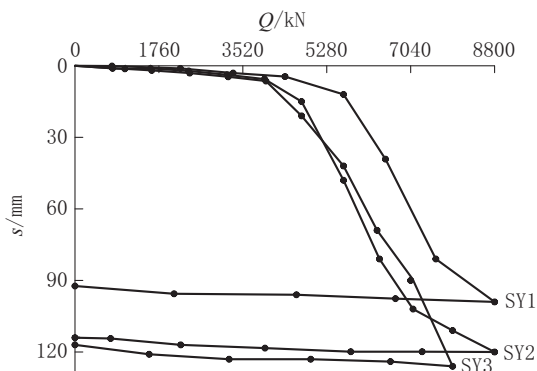


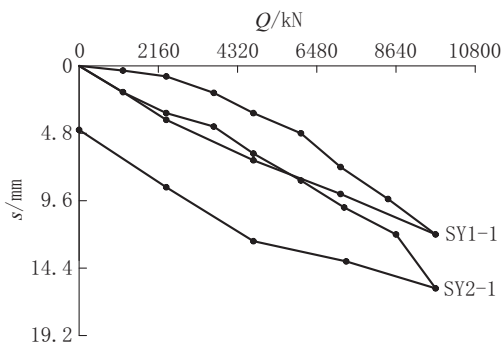
图4 未注浆灌注桩竖向抗压静载试验曲线

Fig.4 Curve of the vertical compression test of without grouting piles

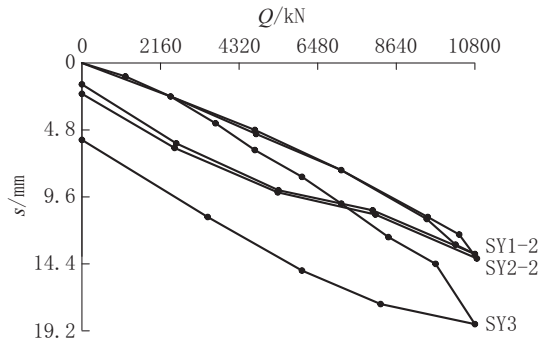
(2)后压浆灌注桩静载试验分2次分别进行,第一次仅对SY1和SY2两根试桩进行试验,最大加载量9600 kN,最大位移量15.32 mm,最大回弹量12.29 mm,最大回弹率100%。第二次分别对3根桩进行试验,最大加载量10800 kN,最大位移量18.62 mm,最大回弹量12.98 mm,最大回弹率87.90%。试验曲线如图5所示。

(3)测试的3根桩 $Q-s$ 曲线均呈缓变形态,属渐变型特征。2批试桩均结合高应变测试结果动静承载力对比基本一致,桩身完整性描述为桩身完整,判定类别为I类。2批试桩测试的单桩抗压允许承载力取定结果见表1和表2。

试验结果分析:试桩单桩竖向抗压允许承载力范围值为5400~5400 kN,平均值为5400 kN,极差/均值为0%,结果离散性在可接受的范围内(极差/均值在30%以内),该组桩型试桩单桩允许承载力可取均值5400 kN。



(a)第一次试验



(b)第二次试验

图5 后压浆灌注桩静载试验曲线

Fig.5 Curve of the static load test of post grouting piles

表1 未注浆单桩抗压允许承载力测试结果

Table 1 Test results of allowable bearing capacity of the single pile without grouting

桩号	0.1d 对应 荷载值 $R_{0.1d}/\text{kN}$	12 mm 对 应荷载值 R_{12}/kN	单桩抗压允许承载力取定/kN		
			$(1/2)R_{0.1d}$	$(2/3)R_{12}$	单桩允许 承载力
SZ1	8800	5543	4400	3695	3695
SZ2	7084	4543	3542	3029	3029
SZ3	7398	4329	3699	2886	2886

表2 注浆后单桩抗压允许承载力测试结果

Table 2 Test results of allowable bearing capacity of the single pile after grouting

桩号	12 mm 对 应荷载值 R_{12}/kN	单桩抗压允许承载力取定/kN		
		$(1/2)R_{\max}$	$(2/3)R_{12}$	单桩允许 承载力
SY1	9468	5400	6312	5400
SY2	8368	5400	5579	5400
SY3	8153	5400	5435	5400

4 工程应用情况

2次试桩的测试结果表明,后压浆工艺对改善

常规钻孔灌注桩的固有缺陷、提高基桩承载力和控制沉降有显著的作用。并且与常规钻孔灌注桩施工工艺相比,采取后压浆施工工艺具有降低施工难度、节省工期和造价的优点。该电厂项目所有灌注桩共计6600余根,项目建设方和投资方果断采用了后压浆工艺,并在2020年新冠病毒对全球造成影响的大环境下加快了项目建设速度。

孟加拉国吉大港南部沿海地区,海相沉积地层通过采用后压浆工艺,单桩竖向抗压允许承载力由3203 kN可提高至5400 kN,提高比例高达68%,降低了工程造价。

5 结语

通过本次海外实践,证明我国在工程建设标准的建设和管理上,已形成比较完整的体系,对比发达的美国和邻国印度,我国的工程建设标准并不落后,我们也有自己的优势。通过此次在“一带一路”沿线国家中参与的工程项目,我们也将逐步向国外推介中国的工程建设标准。此工程作为一个非常成功的案例,值得我们宣传和推广。

参考文献(References):

- [1] 肖坚,赵刚.后压浆提高钻孔灌注桩承载力的试验研究[J].岩土工程技术,2011,25(1):10-12,16.
XIAO Jian, ZHAO Gang. Experimental study on bearing capacity of bored pile using post-grouting technology[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2011, 25(1): 10-12, 16.
- [2] 冯定波.桩端后压浆对提高钻孔灌注桩承载力的作用机理分析[J].中外建筑,2009(6):198-199.
FENG Dingbo. Analysis on the mechanism of post-grouting pile to improve the bearing capacity of bored piles[J]. Chinese and Overseas Architecture, 2009(6): 198-199.
- [3] ACI543R—Design, manufacture, and installation of concrete piles[S].
- [4] 胡云鑫,张时斌,袁江川.后压浆技术国内研究现状分析[J].北方交通,2018(8):22-25.
HU Yunxin, ZHANG Shibin, YUAN Jiangchuan. Analysis on the research status of post-grouting technology in China[J]. Northern Communications, 2018(8): 22-25.
- [5] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].
JGJ 94—2008, Technical code for building pile foundation[S].
- [6] 张慧.后压浆灌注桩在天津超高层建筑基础中的应用分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(3):84-86.
ZHANG Hui. Application analysis on post grouting pile in super high-rise building foundation of Tianjin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(3): 84-86.
- [7] 王德武,张辉义.杭州滨江区钻孔灌注桩桩端后压浆施工实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):54-56.
WANG Dewu, ZHANG Huiyi. Construction practice of bored cast-in-place pile post grouting in Hangzhou[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(12): 54-56.
- [8] 胡胜华,张所邦,韩朝,等.灌注桩后压浆技术的工程实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(12):71-74.
HU Shenghua, ZHANG Suobang, HAN Chao, et al. Engineering practice of post-grouting in cast-in-situ pile[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(12): 71-74.
- [9] 张淑娟,李洪厂.中钢天津响螺湾工程后压浆钻孔灌注桩施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(3):68-72,79.
ZHANG Shujuan, LI Hongchang. Construction technology of post-grouting bored pile for Xiangluowan project of Sinosteel in Tianjin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(3): 68-72, 79.
- [10] 彭仕奇.桩底后压浆浆液扩散问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(6):73-76.
PENG Shiqi. Study on grout diffusion of pile-bottom post grouting[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(6): 73-76.
- [11] 陈飞,陈雄志.旋挖钻进工艺在钻孔灌注桩后压浆工程中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(12):57-59.
CHEN Fei, CHEN Xiongzh. Application of rotary drilling in post pressure grouting of bored grouting pile[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(12): 57-59.
- [12] 李友东,杨生彬,邵卫信.后压浆钻孔灌注桩施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(4):49-52.
LI Youdong, YANG Shengbin, SHAO Weixin. Construction technology of post-grouting cast-in-place pile[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(4): 49-52.
- [13] 彭仕奇.苏通大桥超长桩桩底后压浆试验及效果[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(11):54-58.
PENG Shiqi. Test of pile bottom post grouting for super long pile in Sutong Bridge and the effect[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(11): 54-58.
- [14] 丁伟,王伟,聂庆科,等.中美印关于桩基静载试验检测标准应用对比研究[J].河北水利电力学院学报,2020,30(1):30-33,73.
DING Wei, WANG Wei, NIE Qingke, et al. Comparative research on the testing standards application of static load test for pile foundation among China, America and India[J]. Journal of Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, 2020, 30(1): 30-33, 73.
- [15] ASTM D 1143—07, Standard test methods for deep foundations under static axial compressive load[S].
- [16] Bangladesh national building code—2010[S].
- [17] ASTM D 4945—00, Standard test method for high-strain dynamic testing of piles[S].

(编辑 周红军)