

水下摄像和**高强灌浆**在**预应力管桩承载力不足**处理中的应用

阮小峰

(河南省地矿局第二地质勘查院, 河南 郑州 450000)

摘要: 高强预应力混凝土管桩(PHC)具有质量预可视、**高强环保**、**施工高效灵活**等特点,在目前雾霾严重的北方高层建筑施工中得到了广泛应用。本文通过河南某小区高层住宅楼管桩工程施工实例,介绍了管桩施工过程中由于施工、地层等原因造成的承载力不足问题,在采用低应变等常规检测手段无法准确判定原因的情况下,利用水下摄像技术准确判定问题所在,并采用复压、**高强灌浆**等方法处理的过程,为类似工程的处理提供一定的参考价值。

关键词: 高强预应力混凝土管桩;承载力不足;低应变检测;水下摄像;高强灌浆

中图分类号: TU473.1 文献标识码: B 文章编号: 2096-9686(2021)09-0100-07

Application of underwater photography and high strength grouting in the treatment of insufficient bearing capacity of prestressed pipe piles

RUAN Xiaofeng

(The Second Geological Prospecting Institute of Henan, Zhengzhou Henan 450000, China)

Abstract: High strength prestressed concrete pipe piles (PHC) have been widely used in the construction of high-rise buildings in heavy-haze shrouded northern China due to its features of pre-visible quality, high-strength, environmental protection, efficient and flexible construction. In reference to a field case of pipe pile construction for a high-rise residential building in Henan province, this paper introduces the problem of insufficient bearing capacity caused by construction, stratum and other factors in the process of pipe pile construction; underwater photography technology used to accurately determine the problem while the conventional detection methods such as low strain cannot accurately determine the causes; and the treatment process of re-pressing, high-strength grouting and other methods. It provides can some reference for the treatment of similar projects.

Key words: high-strength prestressed concrete pipe pile; insufficient bearing capacity; low-strain detection; underwater photography; high-strength grouting

0 引言

近年来,随着绿色施工、绿色建筑的推广,装配式建筑、工厂化生产的预制构件得到了广泛的使用。高强预应力混凝土管桩(PHC)作为预制构件的一种,具有质量预可视、**高强环保**、**施工高效灵活**等特点,在国家的严格环境管控下在高层住宅楼的基础施工中得到了大量采用,尤其在目前雾霾严重

的北方高层建筑施工中得到了广泛应用。管桩施工有静力压桩法和锤击打桩法2种施工工艺^[1]。锤击打桩法由于噪声和空气污染,主要用于郊外的工业厂房、路基加固等的基础施工中^[2],目前市区的管桩施工以静压法施工为主。管桩压桩过程看似简单,实则与施工、地质情况有很大的关系,稍有不慎就可能造成质量问题。压桩过程中如遇饱和土和

收稿日期: 2020-11-19; 修回日期: 2021-02-21 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.09.012

作者简介: 阮小峰,男,汉族,1978年生,注册岩土工程师,高级工程师,从事桩基工程、地基处理、基坑支护等工作,河南省郑州市郑开大道,490478760@qq.com。

引用格式: 阮小峰. 水下摄像和**高强灌浆**在**预应力管桩承载力不足**处理中的应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(9): 100-106.

RUAN Xiaofeng. Application of underwater photography and high strength grouting in the treatment of insufficient bearing capacity of prestressed pipe piles[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(9): 100-106.

粉细砂层,超孔隙水压力未能及时消散,容易造成桩体上浮^[3]、焊口脱开、承载力不足等问题^[4]。现场的桩基检测如静载、高应变、低应变等由于受成本、进度和检测手段的限制,不能及时有效地查找出管桩承载力不足的准确原因。采用清水冲洗管芯、水下摄像技术^[5]及辅助量测手段,能够准确判断桩身完整情况、焊口脱开情况和尺寸,一目了然地解决原因查证问题,最后通过复压和高强灌浆圆满解决管桩的承载力不足问题,清除安全隐患。

1 工程概况

1.1 设计概况

该住宅楼位于河南省长葛市,地下1层,地上31层,采用PHC桩承台+防水板基础。PHC桩以第8层粉质粘土作为桩端持力层,要求桩端进入持力层深度 ≤ 0.8 m,有效桩长 ≤ 21.0 m。预应力高强混凝土管桩选用《预应力混凝土管桩》(10G409) PHC-400AB95桩型,单桩抗压承载力特征值 ≤ 1050 kN,抗拔承载力特征值 ≤ 320 kN。采用静压法沉桩以达到设计桩端持力层(必要时采用引孔),压桩力按3200 kN施工。要求复压至少3次,保证最后3次复压沉降总量 ≥ 40 mm。施工时以压桩力控制为主,桩长控制为辅。

1.2 工程地质情况

①杂填土(Q_4^{ml}):层底埋深1.1~4.0 m,黄褐色,主要以砖块、混凝土块等建筑垃圾为主,结构松散,力学性质差异较大。局部夹粉土,含植物根系。

②粉土(Q_4^{al}):层底埋深2.1~5.6 m,黄褐色,湿,中密—密实。干强度低,韧性低,无光泽。粘粒含量较高。含蜗牛壳碎片及锈色斑点,局部略有砂感,偶见小粒径钙质结核。局部夹粉质粘土薄层,可塑。

③粉质粘土夹粉土(Q_4^{al}):层底埋深8.6~12.4 m,黄褐、灰褐色,软塑—可塑。干强度中等,韧性中等,切面光滑,稍有光泽。偶见少量蜗牛壳碎片及锈黄色斑块。局部夹粉土,黄褐色,湿,中密。

④粉土夹粉质粘土(Q_4^{al}):层底埋深11.5~14.7 m,黄褐色,湿,中密—密实。干强度低,韧性低,无光泽。粘粒含量较高。含蜗牛壳碎片及锈色斑点,局部略有砂感,夹较多钙质结核。局部夹粉质粘土,黄褐色,可塑。

⑤粉质粘土(Q_4^{al}):层底埋深13.5~17.3 m,黄

褐、棕黄色,可塑。干强度中,韧性中,无光泽。偶见少量蜗牛壳碎片,局部含少量小粒径钙质结核。局部夹粉土,黄褐色,湿,中密—密实。

⑥粉土夹粉质粘土(Q_4^{al}):层底埋深18.0~21.7 m,黄褐色,湿,密实。干强度低,韧性低,无光泽。偶见蜗牛壳碎片,黑色铁锰质斑点。含较多钙质结核,粒径5~30 mm,含少量黑色铁锰质斑点。夹粉质粘土,黄褐色,可塑。

⑦粉质粘土(Q_3^{al+pl}):层底埋深21.0~24.5 m,层底高程48.98~52.63 m,层厚1.3~4.7 m。黄褐色,可塑。切面有光泽,干强度中,韧性中。含少量小粒径钙质结核,黑色铁锰质斑点。局部夹薄层粉土,湿,密实。

⑧粉质粘土(Q_3^{al+pl}):层底埋深31.0~37.8 m,棕红色,可塑—硬塑。切面有光泽,干强度中,韧性中。含少量小粒径钙质结核,黑色铁锰质斑点。

⑧₁细砂(Q_3^{al+pl}):层底埋深32.0~43.4 m,黄褐色,密实、饱和。矿物成分以石英、长石为主。局部夹钙质胶结薄层。

⑨₁细砂(Q_2^{al+pl}):层底埋深41.2~55.0 m,黄褐色,密实、饱和。矿物成分以石英、长石为主。局部夹钙质胶结薄层。

⑨粉质粘土(Q_2^{al+pl}):最大揭露深度约20.0 m,红褐色,局部棕黄色,硬塑。切面光滑,干强度高,韧性高。局部夹粘土。含较多黑色铁锰结核,含较多钙质结核,粒径5~40 mm,局部钙质结核富集成层,岩心呈碎块状。

2 现场检测情况

该住宅楼共设计预应力管桩284根,其中西部和中部桩在前期静载荷试验中均满足设计承载力要求,东部抽检桩检测中首根承载力即不满足要求,随后在周边扩大检测均不满足要求,向中部和西部抽检又满足要求。经小应变检测,各部位都有异常桩,中西部的小应变异常桩经静载复检均满足设计要求,东部个别小应变异常不明显的桩,承载力检验不合格。为了快速、准确查清原因和做出正确的评判,有专家建议采用水下摄像头探测,对桩身和焊接部位进行“体检”。经过水下探测和少量静载验证,确定承载力不合格桩区域为连续下了几天雨,雨停后马上施工的桩。

现场用水下摄像和小应变检测对所有管桩进行

了大排查,检查了每根桩的接缝位置、竖向是否脱开及脱开距离、小应变信号等,最终确定28根桩存在重大缺陷,需进行处理。具体检测检查情况汇总表1,典型桩小应变曲线、水下摄像及静载曲线见图1~图6,单桩竖向抗压静载试验荷载与沉降关系见表2。

表1 现场问题桩排查情况

Table 1 Problematic piles found out at site

桩号	水下摄像探明问题情况		小应变情况		
	接缝深度/m	接缝处竖向位移/cm	是否异常	类别	位置/m
33	5.4	4	异常	3	4.81
78	12.1	6	异常	3	12.53
80	12.1	8	异常	3	12.40
84	12.5	8	异常	3	12.20
86	12.8	5	异常	3	12.48
97	12.0	7	异常	3	12.16
105	11.0	9	异常	3	11.52
107	11.8	6	异常	3	12.77
117	12.1	4	异常	3	12.04
120	12.2	5	异常	3	11.80
123	12.1	8	异常	3	11.96
127	11.8	8	异常	3	11.47
129	11.8	6	异常	3	11.60
146	12.8	8	异常	3	12.53
152	12.8	5	异常	3	12.65
154	12.4	3	异常	3	12.85
157	13.1	2	异常	3	12.73
160	13.0	3	异常	3	12.89
166	12.7	7	异常	3	11.88
170	12.8	9	异常	3	12.97
183	13.1	4	异常	3	12.77
186	12.8	6	异常	3	12.93
189	12.9	7	异常	3	12.97
191	12.8	4	异常	3	12.65
193	12.7	6	异常	3	12.44
195	12.6	5	异常	3	11.64
211	13.1	6	异常	3	12.69
213	13.0	5	异常	3	12.73

3 原因分析

3.1 施工原因

(1)焊接没有对称满焊,焊缝高度不够,焊接后

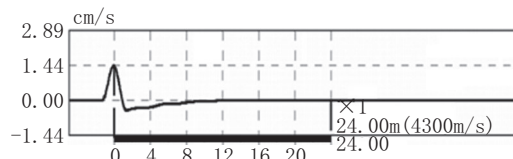


图1 合格桩(115号桩)小应变曲线

Fig.1 Small strain curve of qualified pile (115#)

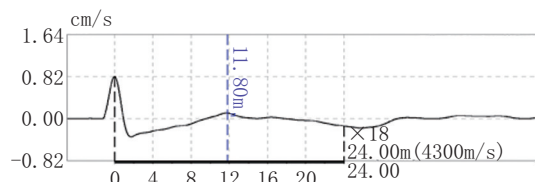


图2 不合格桩(120号桩)小应变曲线

Fig.2 Small strain curve of unqualified pile (120#)



图3 合格桩(115号桩)水下摄像

Fig.3 Underwater photography of qualified pile (115#)



图4 不合格桩(120号桩)水下摄像

Fig.4 Underwater photography of unqualified pile (120#)

停待时间不足或未停待^[6],直接压桩下沉。

(2)压桩速度过快,正常一个班成桩20根左右,最后2天成桩明显过快,每班成桩超30根,导致桩周土体更容易上浮隆起^[7]。

(3)压桩垂直度超规范,焊口受力不均,产生剪应力,容易脱焊。

(4)压桩顺序不当,由于是密集桩群,没有严格按自中间向两个方向或四周对称施打的顺序压桩^[8],而是为了方便,就近密集压桩。

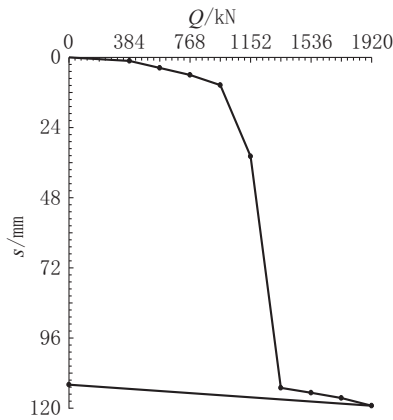


图5 不合格桩(189号桩)Q-s曲线

Fig.5 Q-s curve of unqualified pile (189#)

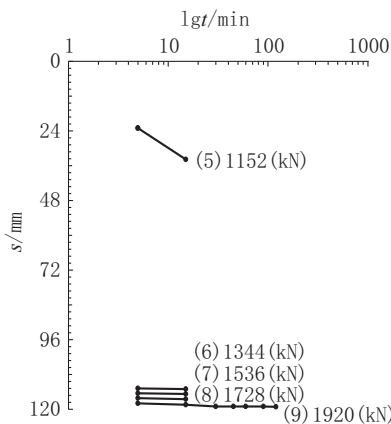


图6 不合格桩(189号桩)s-lgt曲线

Fig.6 s-lgt curve of unqualified pile (189#)

表2 单桩竖向抗压静载试验荷载与沉降关系

Table 2 Relationship between load and settlement of single pile vertical compression static load test

级数	荷载/ kN	本级位 移/mm	累计位 移/mm	本级历 时/min	累计历 时/min
1	384	1.12	1.12	0	0
2	576	2.42	3.54	0	0
3	768	2.40	5.94	0	0
4	960	3.44	9.38	0	0
5	1152	24.34	33.72	15	15
6	1344	79.29	113.01	15	30
7	1536	1.65	114.66	15	45
8	1728	1.75	116.41	15	60
9	1920	2.63	119.04	120	180
10	0	-7.12	111.92	0	180

最大加载量 1920 kN,最大位移量 119.04 mm,最大回弹量 7.12 mm,回弹率 6.0%

3.2 地质原因

(1)压桩场地为开挖后基坑,在东部压桩过程中前期连续降雨几天,为了赶工期,前期场地内的降排水设施还未完善,导致场地被雨水浸泡,上部土层处于饱和状态。

(2)饱和土中沉桩速度过快及桩的卸荷回弹。拟建场地桩周土层强度不高,处于饱和状态,由于桩对土的挤压,在土中产生超孔隙水压力,其随着土体的隆起和侧向位移慢慢消失。如果压桩速度过快,超孔隙水压力和土体变形未充分消散,此时的粘性土表现为弹塑性变形特征,土体卸压恢复过程中桩身被抬起,导致上节桩脱焊(多节桩)或桩尖脱离持力层(单节桩)。从检测结果来看,总沉降量超过 40 mm 陡降后继续加载,Q-s曲线又出现缓降段,说明上下节桩脱开或桩端上浮后造成桩底脱空,上下节桩接触或桩端上浮消除后,荷载正常传递、桩端土重新发挥作用。因此,需对已完成的桩进行二次复压,才能较好地传递承载力,以满足上部荷载的要求^[9]。

(3)表层作业面粉土被水浸泡后形成橡皮泥,桩机行走困难,容易陷机,上层泥土的挤压流动对已完成桩造成较大的水平推力,容易导致上节桩脱焊^[10]。

3.3 其它原因

(1)天气原因造成场地积水,焊口在未充分冷却情况下压桩,容易形成水淬现象,导致焊口抗拉力和抗剪力减小^[11]。

(2)大风天气焊接,没能采用很严密的遮挡措施,造成焊接困难,焊接质量下降^[12]。

4 缺陷桩处理

4.1 处理方案^[13]

(1)对所有桩进行低应变检测(现场条件许可时,可全部辅之以孔内摄像),根据低应变检测结果采用孔内摄像等方法进行检查验证,并做好详细记录(接头的深度及接头处水平、竖向相对位移和桩身缺陷情况)。

(2)由检测单位对所有桩低应变再次进行研判,根据检测、检查结果,对缺陷桩进行分类,提供准确的判别结果作为后期处理依据。

①低应变研判无异常,孔内摄像无异常的桩,可不进行处理。

②低应变研判异常,辅以孔内摄像,若孔内摄像无异常,根据该类桩静载试验验证结果,承载力满足

设计要求,可直接采用加长灌芯的方法进行处理。

③无论低应变研判是否异常,若孔内水下摄像异常,根据二次压桩的施工记录,二次压桩压入深度与前期水下摄影观测结果应基本一致。根据二次压桩曲线情况,可推测二次压桩后的桩承载力应该可以保证,待二次压桩全部结束、孔内摄像无异常后进行加长灌芯处理。

(3)桩基复压完成后需进一步进行孔内摄像观测,确定上下节桩接口位置有无偏心,并进行记录。

(4)根据复压后桩的偏心情况,结合设计单位意见进行进一步处理。处理意见如下:

①若存在较大偏心情况(具体偏心极限值需设计单位确定),需进一步论证处理方案。

②若偏心较小或未偏心,则采用混凝土或灌浆料进行灌芯处理(具体配筋及灌芯高度需设计单位确定)。

(5)对处理后的桩进行全数低应变检测,并对处理完成后的桩进行承载力检测,检测结果满足设计要求后出具检测报告,并与处理记录一并作为交工验收资料。

4.2 处理过程

4.2.1 施工准备

(1)准备施工设备,压桩钢梁2套,千斤顶3台套,高压油泵2台及混凝土配重若干,35 t(350 kN)吊车1台,施工图纸,桩号分类图,灌浆料,钢筋等。

(2)对现场桩进行分类,需要复压灌芯和小应变异常灌芯的进行分类标记,并在每根桩头写上桩号并做好标记。

4.2.2 复压施工

现有施工场地为开挖完成的基坑,管桩桩头已切除,场地已开挖至设计标高,现场周边主楼地库已经施工,不具备采用大型设备(如静压桩机)复压的条件,只有采用现有的静载设备及配重进行二次压桩,也方便观测桩的沉降情况及最终承载力。

在现有开挖标高直接进行复压。根据会议确定的复压桩,在现场再次确认后,把制作好的桩头箍安装到桩头上,待千斤顶就位后吊装试块。

对于需要处理的桩顶,进行现场打磨处理(见图7)。为保证准确对准桩顶,复压全程使用专用钢抱箍,上部用钢抱箍抱紧,桩头处填充沙子,千斤顶准确对位(见图8)。

逐桩进行复压(见图9)。由堆重平台提供试验



图7 桩头打磨整平

Fig.7 Grinding and leveling of the pile head



图8 钢抱箍抱紧桩头

Fig.8 Steel hoop was used to hold the pile head tightly

反力,通过次梁、主梁、千斤顶把荷载作用力施加到桩头箍上,采用1~2台液压千斤顶对试桩施加荷载,千斤顶通过高压油管与一台DBD型高压油泵相联接组成加载系统,通过高压油泵对千斤顶进行供油,施加荷载的大小通过与加载系统相联的油压传感器进行控制,油压传感器已进行过标定,复压施工压桩力取极限承载力的80%,即1920 kN。当复压压力达到并且沉降量稳定后,根据沉降情况稳压1~2 h^[14]。



图9 不合格桩复压施工

Fig.9 Re-pressing of unqualified piles

现场静载仪器做好复压数据记录和整理,汇总后报监理部。

复压过程中要采取必要的加强措施,以避免桩头桩身遭到破坏。

4.2.3 偏心检查

对缺陷桩全部进行复压后,利用水下摄像技术对桩的接头位置进行了偏心情况检查,所有桩的接头位置已充分接触,接头错位 ≥ 2 cm,符合设计单位的要求,均可采用灌芯加以处理。

4.2.4 钢筋笼制作及安放

严格按设计变更图纸加工钢筋笼。锚固连接筋的长度和箍筋必须按设计要求施工。钢筋加工的误差要在规定范围内,保证钢筋的绑扎间距且平整顺直。对于每根钢筋笼按照水下摄像确定的焊缝位置及小应变异常位置下部增加2 m,确定钢筋笼长度,钢筋笼均为全笼,主筋为5根 $\text{O}22$ mm三级钢,箍筋为 $\text{O}8$ mm@200 mm三级钢,在钢平台上加工制作。

如芯孔无需全部灌满,先灌芯区域钢筋笼底部需焊接托盘,主筋与托盘需焊接牢固,主筋外侧需焊接定位钢筋,先、后灌芯区域钢筋笼主筋均需预留锚固长度,需满足设计要求且不少于 $30d$ (d 为钢筋直径)。

钢筋笼采用塔吊放入芯孔中,吊放时应保持垂直状态,对准孔位徐徐轻放,严禁强制性下放,造成钢筋笼变形。先灌芯区域钢筋笼在塔吊配合下安放至距桩顶1.5 m处,用2根钢丝吊着固定在桩顶;后灌芯钢筋笼就位后,顶端用3根固定筋固定在桩头上,钢筋笼要居中放置。

4.2.5 灌芯

灌芯材料采用C60强度等级高强无收缩灌浆料(通用型),参数见表3。

钢筋笼下放及灌芯前,需先用清水将芯孔内清洗干净。放入芯孔的钢筋笼需居中放置并固定牢靠,自检合格并报业主和监理单位签字同意后,方可进行灌浆料浇筑。

现场用砂浆搅拌机将灌浆料搅拌均匀并及时灌入桩芯,停留时间不宜超过30 min。灌芯长度要求下部延伸至上下两段桩连接位置处以下至少2 m,且不少于小应变检测出现异常处以下至少2 m;通体灌芯至桩顶,灌芯可分2次,第一次灌芯至桩顶标高下1.5 m,待桩承载力检测完成后,再浇筑至桩顶。

灌浆料应严格按照说明书上13%~15%质量

表3 灌芯材料参数

Table 3 Parameters of filling material

检 验 项 目	检 验 结 果	技 术 指 标 (Ⅲ类)	本 项 判 定
流动度/mm	初始值	328	≥ 290 合格
	30 min保留值	289	≥ 260 合格
竖向膨胀率/%	3 h	0.14	0.1~3.5 合格
	24 h与3 h线 胀值之差	0.07	0.02~0.5 合格
抗压强度/MPa	1 d	32.2	≥ 20.0 合格
	3 d	51.9	≥ 40.0 合格
	28 d	71.6	≥ 60.0 合格

比控制搅拌水量,然后将搅拌好的灌浆料下入孔内,先灌至距孔口1.5 m处,检测合格后灌至孔口,灌浆料要用振动棒振捣密实。使用振捣器时,要快插慢拔,不得漏振,高度间距300~400 mm,时间20~30 s,每一振捣的延续时间应使灌浆料的表面呈现浮浆和不再沉落。

浇筑灌浆料时应经常观察钢筋笼等有无移动、变形或孔内堵塞情况,发现问题应立即停止浇筑,并在已浇筑的灌浆料初凝前修正完毕。

4.3 处理结果

本工程根据缺陷桩的分类,分别采用了灌芯或静载复压+灌芯的处理措施。处理后又由检测单位对处理的桩进行了双倍检测数量的静载抽检^[15],均达到了设计要求,在完善资料后最终顺利通过了竣工验收,消除了建筑物的安全隐患。

5 结语

(1)从本工程处理情况看,承载力不足主要是为上节桩上浮引起的。对于非淤泥或淤泥质土地层,施工中要勤观察,对于桩长较长的桩,桩整体上浮的可能性不高,中间脱焊是大概率事件,要引起重视。

(2)对于场地软弱,容易引起陷机,桩距较近的情况,要做好排水工作(下雨前要进行覆盖),尽可能避免土体被泡软,减少桩上部受到的水平力,降低桩焊接面脱开的可能性。

(3)在饱和土压桩过程中,要放慢压桩速度,尽量不要使用桩机的快压功能。压桩结束后,要进行复压抽检,发现问题后要全部进行复压,以消除焊口

脱悍造成的承载力传递不畅。

参考文献 (References):

- [1] 史佩栋. 桩基工程手册(桩和桩基础手册)[M]. 北京:人民交通出版社,2008.
SHI Peidong. Pile Foundation Engineering Manual (Pile and Pile Foundation Manual)[M]. Beijing: People's Communications Press, 2008.
- [2] 杨军海. 预应力管桩在广东高速公路地基处理中的应用[D]. 西安:长安大学,2014.
YANG Junhai. Application of prestressed pipe piles in foundation treatment of Guangle Expressway [D]. Xi'an: Changan University, 2014.
- [3] 曹小飞,黄宇. 西安地区PHC管桩上浮问题初探及预防[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(1):66-69.
CAO Xiaofei, HUANG Yu. Preliminary study on upfloat of PHC pipe pile in Xi'an area and the prevention[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(1):66-69.
- [4] 高大钊. 实用土力学(下)[M]. 北京:人民交通出版社,2014.
GAO Dazhao. Practical Soil Mechanics (Part 2)[M]. Beijing: People's Communications Press, 2014.
- [5] 黄沛,王宇,朱德华. 水下电视探测技术在工程桩完整性检测中的应用[J]. 中国港湾建设,2006(4):24-29.
HUANG Pei, WANG Yu, ZHU Dehua. Application of underwater television detecting technique in testing of integrity of working piles[J]. China Harbour Construction, 2006(4):24-29.
- [6] 陈国庆. 静压预应力管桩施工质量控制[J]. 消费导刊,2019(46):14.
CHEN Guoqing. Construction quality control of static pressure prestressed pipe piles[J]. Consume Guide, 2019(46):14.
- [7] 张琳. 建筑工程建设中静压预应力管桩施工技术探讨应用[J]. 科技创新导报,2020,17(2):143-144.
ZHANG Lin. Discussion and application of static pressure prestressed pipe piles construction technology in construction engineering[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2020, 17(2):143-144.
- [8] 郑思光,冯士广,纪燕祥,等. 组合桩在唐山沿海地区的试验应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(11):71-77.
ZHENG Siguang, FENG Shiguang, JI Yanxiang, et al. Experimental application of composite pile in Tangshan coastal area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(11):71-77.
- [9] 林建辉. 建筑工程施工中静压预应力管桩施工技术[J]. 四川建材,2018,44(8):87,92.
LIN Jianhui. Construction technology of static pressure prestressed pipe pile in construction engineering[J]. Sichuan Building Materials, 2018,44(8):87,92.
- [10] 王刚,赵建粮,王烁.PHC与CFG复合桩在郑州航空港区的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):59-63.
WANG Gang, ZHAO Jianliang, WANG Shuo. Application of PHC and CFG composite piles in the Zhengzhou Aviation Port area [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(3):59-63.
- [11] 顾浩然. 预应力管桩在地基处理中的应用分析[J]. 工程建设与设计,2018(21):50-51.
GU Haoran. Analysis of the application of prestressed pipe piles in foundation treatment[J]. Construction & Design for Project, 2018(21):50-51.
- [12] 肖祖伟. 浅析建筑工程施工中静压预应力管桩的特点与施工技术[J]. 建筑工程技术与设计,2018(30):378.
XIAO Zuwei. Analysis of the characteristics and construction technology of static pressure prestressed pipe piles in construction engineering [J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2018(30):378.
- [13] 陈小龙. 高强预应力管桩工程中桩基承载力达不到设计要求时的分析及处理方案[J]. 建筑工程技术与设计,2019(20):1119.
CHEN Xiaolong. Analysis and treatment scheme of pile foundation bearing capacity failing to meet design requirements in high strength prestressed pipe piles engineering[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2019(20):1119.
- [14] 张华明,李志江. 昆明地区静压桩承载力的探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(5):78-85.
ZHANG Huaming, LI Zhijiang. Bearing capacity of jacked piles in the Kunming region[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(5):78-85.
- [15] 李作勤. 摩擦桩的荷载传递及承载力的一些问题[J]. 岩土力学,1990(4):1-12.
LI Zuoqin. Some problems concerning load transfer and bearing capacity of friction piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 1990(4):1-12.

(编辑 周红军)