

基于BOTDA的砂土地基预应力管桩抗拔静载试验研究

孔洋, 汪璋淳, 何宁, 何斌, 张中流, 周彦章

Investigation of prestressed pipe piles uplift static load test on sandy ground using BOTDA technique

KONG Yang, WANG Zhangchun, HE Ning, HE Bin, ZHANG Zhongliu, ZHOU Yanzhang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20221102003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分布式光纤监测技术的板桩码头试验研究

Experimental study of sheet pile wharf based on distributed optical fiber monitoring technology

水利水电工程学报. 2021(4): 85 <https://doi.org/10.12170/20201106002>

砂土及黏土地钻并船插桩对邻近桩的影响

Influences of spudcan penetration and extraction on adjacent piles in sand and clay

水利水电工程学报. 2018(5): 111 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.016>

基于传感光纤技术的堤坝分布式变形监测

Fibre-optical distributed monitor on the deformation of embankment

水利水电工程学报. 2021(5): 137 <https://doi.org/10.12170/20200828001>

混凝土芯砂石桩振动沉管成桩效应及其累积特性研究

Study on compaction effect and its accumulation characteristics of concrete-core sand-gravel pile with vibrating immersed tube technology

水利水电工程学报. 2019(1): 18 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.003>

路堤深厚软基管桩复合地基数值模拟

Numerical simulation of pipe pile composite foundation of deep soft foundation under embankment

水利水电工程学报. 2018(2): 43 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.02.006>

砂土中钻并船插桩对邻近群桩影响的模型试验

Model tests on effects of spudcan penetration on an adjacent pile group

水利水电工程学报. 2020(3): 75 <https://doi.org/10.12170/20190316001>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20221102003

孔洋, 汪璋淳, 何宁, 等. 基于BOTDA的砂土地基预应力管桩抗拔静载试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2024(1): 149-155. (KONG Yang, WANG Zhangchun, HE Ning, et al. Investigation of prestressed pipe piles uplift static load test on sandy ground using BOTDA technique[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(1): 149-155. (in Chinese))

基于BOTDA的砂土地基预应力管桩抗拔静载试验研究

孔洋¹, 汪璋淳¹, 何宁^{1,2}, 何斌¹, 张中流¹, 周彦章^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要: 针对砂土地基抗拔桩受力性能与荷载传递机理研究不足问题, 将布里渊光时域分析(BOTDA)光纤传感技术应用于长江下游地区厚层砂土地基预应力管桩原位抗拔静载试验研究, 采用特殊设计的桩身刻槽钻孔、光纤粘贴保护、接桩过程连续植纤等技术工艺, 实现了预应力管桩在拉拔过程中桩身受力变形状态的分布式测量与数据精确定位。研究表明: 在上拔荷载作用下, 试验桩桩身轴力沿桩身方向逐渐减小; 桩侧摩阻力在下桩发挥效果较好, 上桩侧摩阻力较小, 全桩长侧摩阻力最大值在桩底; 抗拔桩随上拔荷载的增加, 轴力逐渐向下传递, 向下传递的轴力主要由预制管桩侧摩阻力承担; 分布式光纤应变传感技术能较好地监测预应力管桩桩身贯入施工因素对抗拔承载特性的影响。研究结果可在其他类型抗拔桩受力特性监测项目中推广应用。

关键词: BOTDA; 抗拔桩; 分布式光纤; 静载试验; 砂土地基

中图分类号: TU473.16; TU413.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)01-0149-07

抗拔桩是建(构)筑物的一种重要基础形式, 预应力抗拔管桩常用于地库抗浮或抗压兼抗拔情况, 具有应用范围广、经济性高与承载性能好等特点^[1]。预应力抗拔管桩需经预应力张拉、离心成型及高温养护等特殊工艺制作, 亦需经过静压法压桩入土、接桩与抱箍焊接等工序施工, 传统桩身应力应变测量元件很难提前预埋, 且成活率较低^[1-3]。分布式光纤传感技术可弥补传统点式测量技术的不足, 满足现代化工程监测与检测的需求, 近十几年来发展迅速, 已在地基基础工程、桥梁隧道工程及水利水电工程中广泛应用^[4-6]。其中, 布里渊光时域分析技术(BOTDA)因其分布式测量、耐久性好、量程范围大、电磁干扰小、可植入性强与实时远程监控等优势^[7-8], 结合特殊植纤工艺, 可保证与测试构件的变形协调一致, 在桩基工程监测领域取得了良好应用效果。目前, BOTDA广泛应用于抗压管桩桩身挠度分布^[9]、灌注桩承载特性^[10]、复合地基承载力分析^[11]、钢板桩施工过程演化规律^[12]等工程领域, 但BOTDA在预应力管桩抗拔承载特性研究方面的文献较少。

本文介绍一种基于BOTDA的管桩抗拔静载试验原位监测方法, 针对长江下游地区特殊厚层砂土地基情况(埋深普遍大于40 m), 将BOTDA应用于抗拔桩原位静载试验研究, 探究桩身荷载传递机理与竖向抗拔受力性能, 分析施工因素对预应力管桩抗拔承载特性的影响。

收稿日期: 2022-11-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3000103); 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2240221); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y321003, Y320013)

作者简介: 孔洋(1989—), 男, 山东宁阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程安全监测技术研究。

E-mail: ykong@nhri.cn 通信作者: 何宁(E-mail: nhe@nhri.cn)

1 桩基抗拔测试原理

布里渊光时域分析技术(BOTDA)是在光纤两端分别注入脉冲光信号与连续探测光,测量布里渊散射光的频移,当布里渊频移与两种注入光信号的频率相等时,制造布里渊放大效应^[7],根据布里渊频移与光纤局部轴向应变、温度变化的线性关系(见式(1))得到光纤沿线温度和应变信息^[2, 10, 13],BOTDA可在温度补偿的工况下得到构件分布式应变测量值。

$$\Delta\nu_B(\varepsilon, T) = \alpha\Delta\varepsilon_B + \beta\Delta T_B \quad (1)$$

式中: $\Delta\nu_B(\varepsilon, T)$ 为布里渊频移量; $\Delta\varepsilon_B$ 、 ΔT_B 分别为光纤的局部应变、温度变化量; α 、 β 分别为传感光纤布里渊频移的应变系数与温度系数。

在抗拔桩的桩身表层布设应变光纤,基于应变光纤与桩身协同变形原理,运用BOTDA测量桩身在分级拉拔荷载作用下的应变分布,经过数据优化处理后,得到桩身轴力分布曲线,并计算桩侧摩阻力分布,抗拔管桩桩身应变光纤测量线路构成示意图见图1。

基于BOTDA获得试验管桩抗拔静载荷试验中每级拉拔荷载作用下的全桩身应变分布,在已知桩身弹性模量、截面积与周长的基础上,可由桩身应变推算各级拉拔荷载作用下桩身轴力与桩侧摩阻力,计算式^[14]如下:

$$N_i = \varepsilon_i E_i A_i \quad (2)$$

$$q_{s,i} = \frac{N_i - N_{i+1}}{ul_i} \quad (3)$$

式中: N_i 为*i*断面的桩身轴力; ε_i 为*i*断面的平均应变; E_i 为*i*断面的弹性模量; A_i 为*i*断面的桩身横截面面积; $q_{s,i}$ 为*i*与*i+1*断面间的桩侧摩阻力; l_i 为*i*与*i+1*断面间的桩长; u 为管桩外壁周长。

2 抗拔静载试验实施方案

本文采用BOTDA分布式光纤传感技术开展长江下游地区厚层砂土地基抗拔管桩竖向抗拔静载试验研究,试验地点位于泰州市海陵区泰州大道东侧、海军大道北侧地段。抗拔试验桩总计3根,分别标号为SYP-1、SYP-2与SYP-3,为同一生产批次的试验桩。如图集《先张法预应力混凝土抗拔管桩》(Q/321183 JH002—2019)所示,该类试验桩型号为PHA 500 AB 110-24,即:管桩外径500 mm、AB桩型(上下桩型)、抱箍式连接、管壁厚110 mm、整桩长24 m。

根据地勘报告,该地区有厚层砂土分布,地层自上而下分别为:①层表土,②层粉土夹粉砂,③-1层粉砂,③-2层粉砂,③-3层粉砂,③-4层粉砂,③-4A层粉土夹粉质黏土,④-1层粉质黏土,④-2层粉质黏土夹黏土,⑤层粉砂夹粉质黏土与⑥层粉细砂。试验场地平整,厂区内无液化土层分布,各土层物理参数见表1(其中: Δh 为层厚, C 为黏聚力, φ 为内摩擦角, w 为含水率, r 为重度, q_c 为锥尖阻力, f_s 为侧壁摩阻力)。

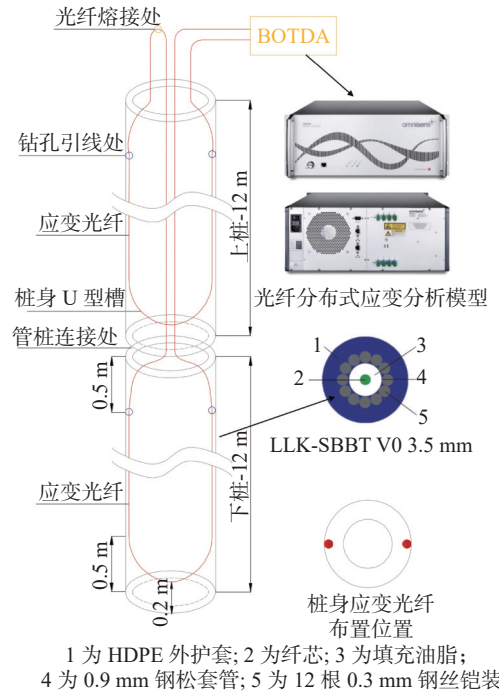


图1 抗拔管桩桩身应变光纤测量线路示意

Fig. 1 Schematic depiction illustrating the process of measuring strain in fiber cycles of anti-uplift piles

表 1 试验段土层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layers within test region

层号	$\Delta h/m$	C/kPa	$\varphi/(\circ)$	$w/\%$	$r/(kN/m^3)$	q_c/MPa	f_s/kPa
①	1.23	6.7	7.6	28.5	17.86	1.862	24
②	2.59	5.9	23.2	28.1	18.61	6.070	62
③-1	3.32	3.9	28.6	29.8	18.19	7.746	64
③-2	2.51	3.7	26.4	30.1	18.14	5.924	48
③-3	4.35	3.7	30.0	29.0	18.53	7.729	63
③-4	10.01	4.5	32.7	27.5	18.84	9.262	93
③-4A	1.42	8.9	17.5	32.6	18.58	4.773	52
④-1	2.67	34.2	12.5	27.5	19.22	2.273	57
④-2	2.86	44.8	14.4	24.4	19.85	3.227	116
⑤	9.58	12.8	22.7	29.1	18.60	9.875	242
⑥	8.90	4.2	31.7	23.8	19.15	16.301	160

针对抗拔静载试验的特殊性, 设计了如下光纤植入工艺:

(1) 桩身布设的分布式应变传感光纤应构成测量回路(见图 1), 试验时在试验管桩 180°方向 2 个位置, 用切割工具在桩身表面沿着管桩加工厂模具拼接缝处开槽(桩底部分开 U 型槽), 槽宽和槽深以能放入光纤为准; 用钻孔工具在桩顶设计位置(距桩顶 50 cm 处)开孔, 孔径以能放入光纤为准, 光纤通过开孔于桩筒内由桩顶引出。

(2) 刻槽内用钢刷与毛刷清洁 2 遍, 保持干净; 光纤布设在刻槽内后用环氧树脂充填入槽内进行光纤粘贴, 使其与桩身结合成一体; 用玻璃胶进行二次填充与表面保护, 防止管桩在贯入时割破光纤; 光纤布设完成后熔接光纤与尾纤, 进行光纤成活性检验。

(3) 将已布设好应变光纤的试验管桩按上下桩顺序依次打入, 在桩基施工对接时, 首先将下桩光纤穿入上桩内腔, 由人工悬线牵引并随上桩贯入, 通过上桩桩筒内由桩顶引出。

针对预应力混凝土管桩无法提前预埋测量元件的特殊情况, 以高强环氧树脂为粘结材料, 通过特殊设计的植纤工艺, 可最大限度保证分布式光纤与测试构件的变形协调一致, 保障植入光纤变形监测的有效性。抗拔管桩桩身应变光纤植入工艺如图 2 所示。

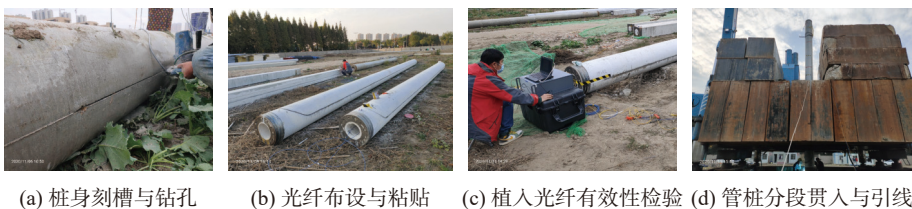


图 2 抗拔管桩桩身应变光纤植入工艺

Fig. 2 Methods for embedding strain fibers into anti-uplift pipe piles

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2018), 砂土地基抗拔试验休止期为 7 d。管桩竖向抗拔承载特性试验执行标准为《建筑桩基检测技术规范》(JGJ 106—2014), 原位试验基于支墩-反力架装置, 由千斤顶反力加载, 大量程百分表测读桩顶上拔位移量的试验方法, 采用慢速维持法进行分级加卸载试验。根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011), 由表 1 计算得到试桩单桩竖向抗拔承载力设计值为 1 030 kN, 在管桩抗拔静载试验中, 每级加载为预定最大荷载的 1/10, 故各分级荷载均为 103 kN。

3 试验结果与分析

3.1 桩顶荷载-位移曲线特征

桩顶轴向位移 S 与上拔荷载 Q 的关系曲线见图 3。由图 3 可知, 试桩桩顶位移 S 随上拔荷载增加而增大, 当荷载 $Q < 300$ kN 时, 3 根试验桩 $Q-S$ 曲线基本一致, 此时曲线基本为线性发展阶段; 当荷载 $Q > 300$ kN 时, 随荷载增加, 3 根试验桩非线性发展趋势逐渐显著。

抗拔试验桩的桩顶轴向位移与上拔荷载关系曲线形式符合突变型发展曲线, 即当 SYP-1、SYP-2 与 SYP-3 管桩的最大上拔荷载分别为 1 030、1 133 与 1 030 kN 时, 试验桩的抗拔极限承载力 Q_t 为前一级荷载, 即分别为 927、1 030 与 927 kN。3 根试验管桩中, 仅 SYP-2 管桩达到竖向抗拔承载力设计值, 下文将对试验结果的影响因素进行分析。

3.2 轴力与摩阻力分布特征

图 4 为试验管桩在不同上拔荷载等级工况下轴力与摩阻力分布曲线。在各级荷载作用下, 试验桩桩身轴力沿着桩身方向逐渐减小, 且桩侧摩阻力随着桩顶荷载的增加而逐渐增大。

通过分析试验桩轴力和侧摩阻力曲线特征, 可知:

(1) 在较低的上拔荷载作用下, 轴力沿桩身的递减曲线较为均匀, 随上拔荷载的增加, 桩身轴力的递减曲线变得不再均匀, 同时斜率越来越大, 桩身下部表现得尤为明显。根据上述分析可知, 抗拔桩随上拔荷载的增加, 轴力逐渐向下传递, 向下传递的轴力主要由桩身侧摩阻力承担。

(2) 试验管桩侧摩阻力在下桩发挥效果较好, 其上桩侧摩阻力值较小(最大值均小于 20 kPa), 全桩长侧摩阻力最大值在桩底。沿桩身方向, 侧摩阻力分布总体呈现缓增-平稳-陡增的三阶段曲线形式。以最大上拔荷载与抗拔极限承载力工况为例, SYP-1 管桩的侧摩阻力最大值分别为 66.85 与 57.81 kPa; SYP-2 管桩的分别为 74.58 与 68.72 kPa; SYP-3 管桩的分别为 60.95 与 56.20 kPa。

(3) 试桩桩顶附近一定范围均存在负摩阻力, 当上拔荷载作用于桩顶时, 桩周土体的累积位移将使土体在近地表处对试桩产生向上的摩阻力, 使其轴力在一定范围内上升, 即产生负摩阻力; 土体累积

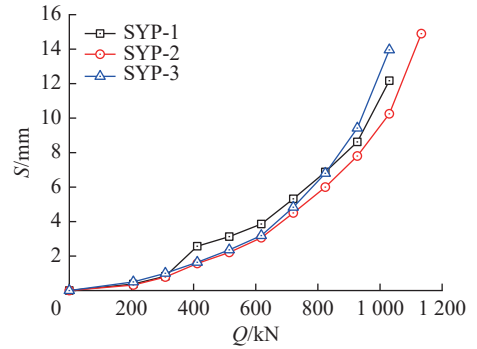


图 3 桩顶轴向位移 S 与上拔荷载 Q 关系曲线
Fig. 3 The correlation curve depicting the relationship between axial displacement (S) and uplift load (Q) at the top of the pile

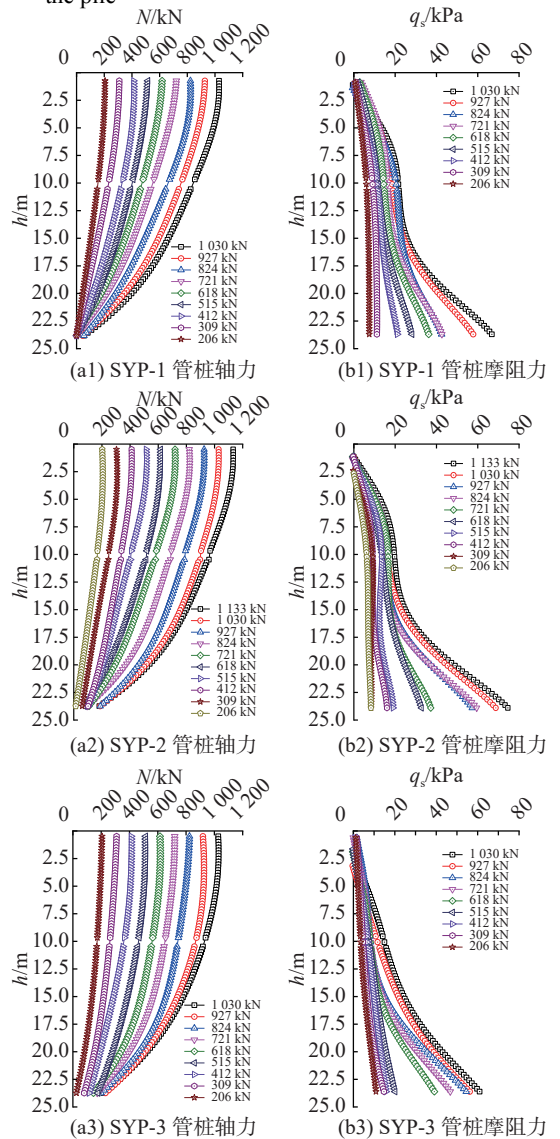


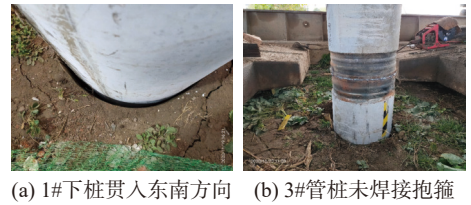
图 4 管桩轴力与摩阻力分布曲线
Fig. 4 Curves illustrating the distribution of axial force and sidelateral soil resistance along the piles

位移越大, 负摩阻力现象也越明显, 但因浅层土体自身承载力较小, 负摩阻力无法进一步提升。因此, 表现为负摩阻力随上拔荷载增大而影响范围增加, 但峰值变化不大。

(4) SYP-1 管桩下桩贯入过程照片(如图 5(a) 东南方向)直观反映了施工过程中机械振动与摆动产生的部分扩孔效应, 砂土地层在休止期满后, 变形未恢复, 因此其侧摩阻力发挥效果差于 SYP-2 管桩。SYP-3 管桩因未焊接抱箍(如图 5(b) 所示), 荷载传递受到显著影响, 其桩身全长范围内侧摩阻力值均明显低于 SYP-1 与 SYP-2 管桩。

3.3 施工因素对侧摩阻力测试结果的影响

SYP-2 试桩施工较为严格, SYP-1 与 SYP-3 试桩的侧摩阻力沿桩长范围与 SYP-2 试桩相比有一定程度的降低。以 SPY-2 试桩试验结果为基准, 将 SYP-1 与 SYP-3 试桩桩侧摩阻力与 SPY-2 试桩的桩侧摩阻力相对误差值计为离散性值, 给出试桩在相同荷载条件下的侧摩阻力离散性分布曲线(图 6)。



(a) 1#下桩贯入东南方向 (b) 3#管桩未焊接抱箍

图 5 管桩抗拔承载性能施工影响因素

Fig. 5 The impact of construction factors on the bearing characteristics of anti-uplift pipes

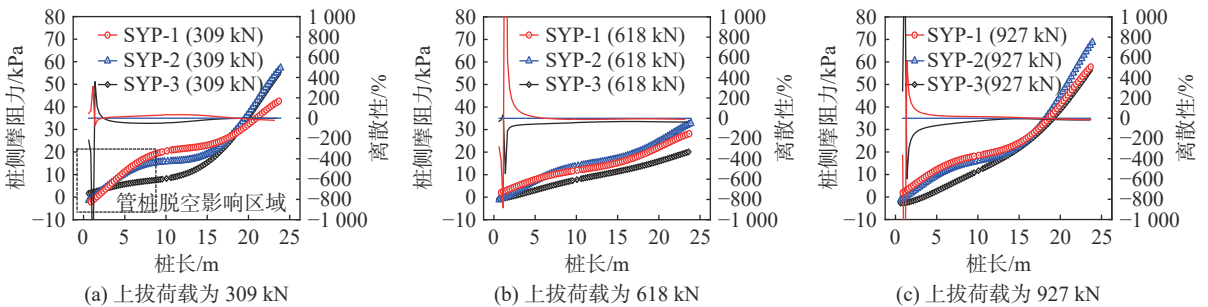


图 6 试桩侧摩阻力离散性分析

Fig. 6 Analysis of the discretization of side soil resistance in the test pile

由图 6 可见, 试桩测量差异性主要集中于桩顶 1~3 m 内, 这主要是由于桩顶侧摩阻力较小, 且施工、加载等因素对桩顶扰动影响最为明显, 因此该段桩身侧摩阻力表现出显著离散性; 随着测量深度的增加, 侧摩阻力离散性逐步减小。但不同上拔荷载作用下, 桩身侧摩阻力离散性也存在一定差异, 主要表现为: 整体离散性随上拔荷载的增加而减小。其中, 荷载为 309 kN 时, 桩身侧摩阻力离散性最大, 桩身 3~10 m 范围内 SYP-1 侧摩阻力与 SYP-2 相比离散性增加约 30%, 而 SYP-2 与 SYP-3 相比离散性增加约 40%, 主要是因为小荷载条件下, 试桩施工误差及桩身所在土层非均质性对测量结果影响较大; 当荷载为 618 kN 时, STP-1 与 SYP-2 相比离散性增加约为 20%, SYP-2 与 SYP-3 相比离散性增加约 30%; 当达到 927kN 时, SYP-1 与 SYP-2 相比离散性增加 10%, SYP-2 与 SYP-3 相比离散性增加约 20%, 说明随着荷载的增加, 地层非均质性及施工误差所造成的测量误差逐渐弱化。

4 结 语

将 BOTDA 分布式光纤传感技术应用于厚层砂土地基 PHA 混凝土抗拔管桩原位静载试验, 在上拔荷载作用下, 试验桩桩身轴力沿桩身方向逐渐减小; 桩侧摩阻力在下桩发挥效果较好, 上桩侧摩阻力值较小, 全桩长侧摩阻力最大值在桩底。沿桩身方向, 试验桩侧摩阻力分布总体呈现缓增-平稳-陡增的三阶段曲线形式; 抗拔桩随上拔荷载的增加, 轴力逐渐向下传递, 向下传递的轴力主要由预应力管桩桩侧摩阻力承担。

上拔过程桩顶附近存在负侧摩阻力,其影响范围随荷载增加而增加,但峰值变化不大,本文工况下,负摩阻力对试桩承载力影响较小。

研究表明,分布式光纤应变光纤传感技术实现了预应力管桩在拉拔过程中桩身受力变形状态的分布式测量与数据精确定位,该测试方法可在其他类型抗拔桩监测项目中推广应用。建议厚层砂土地基场区使用混凝土桩尖一体化管桩,并减小抱箍厚度,桩身施工中应注意控制桩身贯入垂直度、严格遵循操作工艺。

参 考 文 献:

- [1] 马加骁,王永洪,张明义,等.基于光纤布拉格光栅传感器的PHC管桩现场静压贯入试验研究[J].光学学报,2020,40(12): 90-98. (MA Jiaxiao, WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, et al. Static-pressure penetration field test of PHC pipe pile based on fiber Bragg grating sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 90-98. (in Chinese))
- [2] 魏广庆,施斌,贾建勋,等.分布式光纤传感技术在预制桩基桩内力测试中的应用[J].岩土工程学报,2009,31(6): 911-916. (WEI Guangqing, SHI Bin, JIA Jianxun, et al. Application of distributed optical fiber sensing to testing inner force of prefabricated piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6): 911-916. (in Chinese))
- [3] 江宏. PPP-BOTDA分布式光纤传感技术及其在试桩中应用[J].岩土力学,2011,32(10): 3190-3195. (JIANG Hong. PPP-BOTDA distributed fiber optic sensing techniques and its application to pile tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3190-3195. (in Chinese))
- [4] MONSBERGER C M, LIENHART W. Distributed fiber optic shape sensing along shotcrete tunnel linings: Methodology, field applications, and monitoring results[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2021, 11(2): 337-350.
- [5] 吴海颖,朱鸿鹄,朱宝,等.基于分布式光纤传感的地下管线监测研究综述[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(6): 1057-1070. (WU Haiying, ZHU Honghu, ZHU Bao, et al. Review of underground pipeline monitoring research based on distributed fiber optic sensing[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(6): 1057-1070. (in Chinese))
- [6] 何宁,马桂珍,何斌,等.基于分布式光纤监测技术的板桩码头试验研究[J].水利水运工程学报,2021(4): 85-91. (HE Ning, MA Guizhen, HE Bin, et al. Experimental study of sheet pile wharf based on distributed optical fiber monitoring technology[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(4): 85-91. (in Chinese))
- [7] 丁勇,王平,何宁,等.基于BOTDA光纤传感技术的SMW工法桩分布式测量研究[J].岩土工程学报,2011,33(5): 719-724. (DING Yong, WANG Ping, HE Ning, et al. New method to measure deformation of SMW piles based on BOTDA[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 719-724. (in Chinese))
- [8] 张磊,施斌,张丹,等.基于BOTDR的滑坡抗滑桩工作状态评价及分析[J].工程地质学报,2019,27(6): 1464-1472. (ZHANG Lei, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Evaluation and analysis of working state of anti-slide pile with BOTDR technology[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(6): 1464-1472. (in Chinese))
- [9] 童恒金,施斌,魏广庆,等.基于BOTDA的PHC桩挠度分布式检测研究[J].防灾减灾工程学报,2014,34(6): 693-699. (TONG Hengjin, SHI Bin, WEI Guangqing, et al. A study on distributed measurement of PHC pile deflection based on BOTDA[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(6): 693-699. (in Chinese))
- [10] 刘波,席培胜,郭杨,等.基于BOTDA光纤传感技术的螺旋挤土灌注桩承载特性现场试验[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(3): 779-786. (LIU Bo, XI Peisheng, GUO Yang, et al. Field test study of soil displacement screw pile using distributed optical fiber based on BOTDA technique[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(3): 779-786. (in Chinese))
- [11] 陶景晖,金如元,陆飞,等.岩溶地区高层建筑刚性桩复合地基现场试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(6): 163-174. (TAO Jinghui, JIN Ruyuan, LU Fei, et al. Field testing of rigid pile composite foundation for high-rise buildings in Karst area[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6): 163-174. (in Chinese))
- [12] 刘立新,任祥瑞,雷志强,等.基于分布式光纤传感技术的钢板桩施工全过程演化规律[J].中外公路,2020,40(3): 119-124. (LIU Lixin, REN Xiangrui, LEI Zhiqiang, et al. Evolution process of steel sheet pile construction using distributed optical fiber technology[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2020, 40(3): 119-124. (in Chinese))
- [13] 万飞,邓清禄,张申,等.基于BOTDA的光纤传感技术在抗滑桩变形监测中的应用[J].安全与环境工程,2014,21(3): 36-

40, 45. (WAN Fei, DENG Qinglu, ZHANG Shen, et al. Application of optical fiber sensing technology to monitoring the deformation of slide-resistant pile based on BOTDA[J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(3): 36-40, 45. (in Chinese))

- [14] 缪长健, 施斌, 郑兴, 等. 海上超长PHC管桩BOFDA内力测试[J]. 南京大学学报(自然科学), 2018, 54(6): 1057-1063. (MIAO Changjian, SHI Bin, ZHENG Xing, et al. The inner force test of super-long PHC pile at sea based on BOFDA[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2018, 54(6): 1057-1063. (in Chinese))

Investigation of prestressed pipe piles uplift static load test on sandy ground using BOTDA technique

KONG Yang¹, WANG Zhangchun¹, HE Ning^{1,2}, HE Bin¹, ZHANG Zhongliu¹, ZHOU Yanzhang^{1,2}

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Key Laboratory of Reservoir Dam Safety of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Due to limited research on the mechanical behavior and load transfer mechanism of uplift piles on sandy ground, the Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) fiber optic sensing technology is utilized in the field testing of prestressed pipe piles on thick sand ground in the lower region of the Yangtze River. This involves employing specialized techniques such as grooving drilling of the pile body, protective measures for attaching optical fibers, and continuous fiber installation during pile connection. These processes enable distributed measurements and accurate data positioning of stress and deformation in the prestressed pipe pile during the uplift process. The study findings indicate a gradual decrease in axial force along the length of the test pile under the uplift load. The soil resistance on the sides of the pile exhibits effective support in the lower portion, while the upper section experiences less soil resistance. The maximum soil resistance is observed at the bottom of the pile. As the uplift load increases, the axial force gradually transfers downward, predominantly relying on the soil resistance of the prefabricated pipe pile. The use of distributed optical fiber strain sensing technology allows for better monitoring of the impact of construction factors on the uplift bearing characteristics during the penetration of prestressed pipe piles. These research results can be applied to other monitoring projects involving different types of uplift pile bearing characteristics.

Key words: BOTDA; uplift pile; distributed optical fiber; static load test; sand ground