

## 基于分布式光纤监测技术的板桩码头试验研究

何宁, 马桂珍, 何斌, 张中流, 汪璋淳, 钱亚俊, 邵翰林

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

HE Ning, MA Guizhen, HE Bin, ZHANG Zhongliu, WANG Zhangchun, QIAN Yajun, SHAO Hanlin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20201106002>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 高桩码头裂缝开合度监测模型研究

Study of monitoring model of crack opening displacement for high-pile wharf

水利水运工程学报. 2017(6): 53 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.008>

##### 深填斜坡中基桩受力变形规律

Deformation of pile foundation in deep filling slope based on ANSYS

水利水运工程学报. 2018(3): 40 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.006>

##### 大型河工模型分布式表面流场测量系统研制及应用

Development and application of measurement system for surface flow field in large-scale river model test

水利水运工程学报. 2018(1): 17 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.003>

##### 基于安全监测的水闸健康诊断体系研究

Analysis of sluice health diagnosis system based on safety monitoring

水利水运工程学报. 2018(5): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.001>

##### 高桩码头对邻近爆破的非线性动力响应分析

Nonlinear dynamic response analysis of blasting to adjacent high-pile wharf

水利水运工程学报. 2018(1): 66 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.010>

##### 盐城港卸荷式地连墙结构码头离心模型试验

Centrifuge modeling of diaphragm wall wharf with relief platform at Yancheng port

水利水运工程学报. 2018(3): 48 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.007>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20201106002

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))

# 基于分布式光纤监测技术的板桩码头试验研究

何宁<sup>1</sup>, 马桂珍<sup>1</sup>, 何斌<sup>1</sup>, 张中流<sup>1</sup>, 汪璋淳<sup>1</sup>, 钱亚俊<sup>1</sup>, 邵翰林<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 南京嘉兆仪器设备有限公司, 江苏南京 210037)

**摘要:** 板桩码头桩体结构受力变形状态是评价其安全运行的重要指标。基于分布式光纤模型试验, 提出了一种新型桩体受力和变形分布式监测技术, 并成功应用于板桩码头钢筋混凝土灌注桩原型试验研究中。结果表明该方法能够准确反映港池开挖过程中板桩码头桩体结构变形、弯矩和受力等分布变化规律, 并能及时对板桩码头的运行及施工情况进行有效监测评估, 可以为板桩码头的持续稳定运行提供安全保障及施工指导。该监测技术能够克服传统点式监测方法分辨率及准确度不足的缺点, 实现桩长范围内全深度及施工过程全周期的实时监测, 具有一定的工程实用价值。

**关键词:** 板桩码头; 分布式光纤; 受力变形监测; 安全运行

中图分类号: TU43 文献标志码: A 文章编号: 1009-640X(2021)04-0085-07

板桩结构是码头三大结构型式之一, 以结构型式简单、造价低廉、施工周期短等优点, 在国外众多港口码头建设中得到广泛应用; 自 2000 年以来, 钢筋混凝土地连墙板桩码头结构设计水平和施工技术在我国得到快速发展, 半遮帘式、全遮帘式和分离卸荷式板桩码头结构先后研发成功, 在渤海湾数十个大型深水泊位建设中得到成功应用<sup>[1]</sup>。

目前对板桩码头工作机理研究主要采用离心模型试验<sup>[2-6]</sup>、室内模型试验<sup>[7]</sup>、数值模拟与计算<sup>[8-9]</sup>和原型监测<sup>[10-12]</sup>等方法。模型试验和原型监测试验均在板桩码头结构的关键和代表性点位布置土压力计、混凝土应变计和钢筋应力计等点式监测仪器, 根据点式监测仪器测值结果计算对应位置板桩码头结构应力、应变、弯矩等, 应用合理假定对点式结果采用合适的关系曲线拟合, 以描述板桩码头结构受力和变形规律并研究板桩码头结构工作机理。但由于板桩码头结构及其地基并不完全为均匀体, 受经济性和空间限制等原因, 同时为了减轻安装监测仪器板桩结构对原有结构特性的影响, 减少仪器安装相互干扰, 一般选择板桩结构的关键位置布置测试监测仪器。但点式监测数据的代表性难免存在不足, 因此以代表性点位点式监测仪器的测值结果为基础研究板桩码头结构工作机理与工程实际产生偏差是不可避免的。分布式光纤传感技术最小空间分辨率可达 0.01 m, 可将传感光纤布置于板桩码头结构中, 对码头结构的应变、应力和变形进行准分布式测量, 基于测得的板桩码头结构的分布式测值, 可实现对板桩码头结构体受力与变形规律的全面测量<sup>[13-14]</sup>, 从而提升板桩码头工作机理研究的科学性。

以江苏南通某通用码头工程中板桩码头原型结构为研究对象, 根据模型试验和应用研究<sup>[13-14]</sup>, 提出基于分布式应变传感光纤技术的桩体受力和变形分布式监测技术, 并应用于板桩码头钢筋混凝土灌注桩原型试验研究中。基于原型桩中传感光纤的分布式监测资料, 分析港池开挖过程板桩码头桩体变形和受力, 研究板桩码头工作特性并对其安全特性进行评价。

收稿日期: 2020-11-06

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1508505)

作者简介: 何宁(1969—), 男, 江西高安人, 正高级工程师, 主要从事岩土工程领域研究。E-mail: nhe@nhri.cn

# 1 原型试验码头工程概况

## 1.1 场区地质情况

选择江苏南通拟建码头工程开展原型试验,该码头工程位于海门市一内河西岸,该内河与黄海相通,河流呈南北走向,场地属长江下游冲积平原区滨海平原,地貌单一,地陆时间较晚,主要覆盖第四纪松散沉积物,地貌类型属长江下游冲积平原区滨海平原,以粉土、粉砂为主。拟建码头处为人工吹填形成现状岸线,地形较平坦,相对高差较小,一般小于 0.50 m。场区勘探深度 65.00 m 以内地基土体,根据其物理力学性质、岩性、成因等差异,可划分为 8 个工程地质层(表 1)。

表 1 地基土层主要物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of foundation soil layer

层号	土层名称	厚度/m	含水率/%	土重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	孔隙比	压缩性		强度指标	
						$a_{0.1-0.2}/\text{MPa}^{-1}$	$E_{s0.1-0.2}/\text{MPa}$	$C_{cq}/\text{kPa}$	$\varphi_{cq}/^\circ$
1	冲填土	2.20~5.20							
2-1	淤泥质粉质黏土混粉砂	2.00~5.60	41.3	17.6	1.174	0.76	3.00	13.7	7.4
2-2	粉砂夹粉质黏土	1.20~8.20	30.8	19.0	0.842	0.24	7.85	6.6	26.2
3	粉砂夹粉土	2.40~6.20	27.2	19.5	0.747	0.14	12.96	4.6	30.6
4	粉土夹粉质黏土	6.50~13.40	32.1	18.4	0.926	0.34	5.92	12.1	21.9
5	粉砂夹粉土	5.90~11.10	28.1	19.4	0.772	0.18	10.16	7.0	28.6
6	粉砂	2.30~5.20	25.7	20.2	0.667	0.11	15.56	2.3	33.9
7	粉砂夹粉土	9.70~20.10	27.3	19.7	0.731	0.13	13.94	4.3	31.2

## 1.2 码头工程基本情况

码头工程位于南通港吕四港区的海岸线上,布置 2 个 20 000 t 级码头泊位。码头泊位总长 390 m,宽 30 m,码头面高程为 5.2 m,码头前沿设计泥面标高为-13.8 m,码头采用板桩结构,为密排灌注桩板桩墙结构形式,板桩墙采用  $\varphi 1\ 200@1\ 300$  密排灌注桩,桩长 31 m,桩顶标高为 0 m,上部结构为现浇胸墙;板桩墙后设置 2 排  $\varphi 900@600$  高压旋喷桩作为止水帷幕,桩长 15.8 m,桩顶标高为-1.2 m;其后陆域地基采用复合地基法进行加固处理,复合地基桩长 16.0 m,桩顶标高为-1.0 m;锚碇结构为单锚杆加现浇锚碇墙形式,锚杆采用直径 70 mm@1 500 的 Q390 钢拉杆,锚碇墙前采用码砌块石,锚碇墙与板桩墙间距为 33 m。两条平行的门机轨道梁总长均为 379 m,轨道梁顶面标高为 5.2 m,前轨距码头前沿的距离为 3.5 m,轨距为 10.5 m,现浇轨道梁的桩基础的直桩采用预应力管桩 HKFZ-X500(300)(AB)@3000,直桩桩顶标高为 3.82 m,桩底标高为-30.18 m。

# 2 原型试验分布式光纤监测系统

为研究密排灌注桩板桩码头板桩墙的工作机理与安全特性,在码头分别安装土压力计、钢筋应力计和锚杆拉力计等点式监测仪器及活动测斜仪和测斜管开展原型监测,并同步采用分布式传感光纤对板桩墙灌注桩全长开展变形、受力的分布式监测,以获取更全面的原型监测数据。在码头板桩墙选择相邻 2 根灌注桩(编号 1#桩、2#桩)布置传统原型监测仪器和分布式光纤监测系统(图 1)。传统监测仪器设计为:1#桩仅布置测斜管 1 套,2#桩布置土压力计、钢筋应力计和锚杆拉力计,其中土压力计和钢筋应力计分别沿桩身布置 3 层;2 根原型试验灌注桩各布

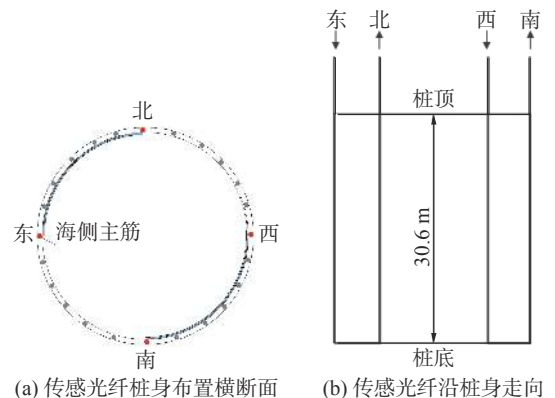


图 1 板桩墙灌注桩传感光纤布置示意

Fig. 1 Layout of sensing optical fiber in the pile

置1套分布式光纤监测系统,其应变传感光纤布置型式为:在灌注桩的东、西、南、北向沿桩身布置4条相互平行的传感光纤,呈“十”字对角构成“东西”“南北”两组方向的监测系统(如图1(a))。为便于测量,相邻向光纤经桩底折返引至桩顶,形成两条“U”型回路(如图1(b))。应变传感光纤选用V0型应变传感光纤,通过捆扎在钢筋笼垂直主筋上进行定位和保护,数据采集使用瑞士OMNISENS公司产的DiTeSt分布式光纤监测系统,其应变测量最小空间分辨率0.1 m,准确度为 $\pm 10 \times 10^{-6}$ 。

### 3 板桩墙灌注桩变形与受力

原型灌注桩1#桩2020年1月14日开始浇筑混凝土并于当日成桩完成,2#桩2020年1月15日成桩完成,桩顶冠梁5月7日开始浇筑至15日结束。6月28日码头前沿港池开始开挖,0 m高程以上墙前土体采用陆上开挖方式进行,0 m高程以下水下部分采用吸泥船进行搅吸处理,至7月10日2根原型试验桩前沿港池开挖全部完成,港池泥面达到设计的-13.8 m高程。港池开挖过程中,对板桩墙的灌注桩内应变传感光纤进行监测。监测结果显示:2根原型桩各自在东、西、南、北4个方向沿桩身的应变分布规律两两对应,一致性较好。分别以1#桩东西向光纤和2#桩南北向光纤监测结果为例,其在港池开挖过程中的桩身应变分布变化规律如图2。

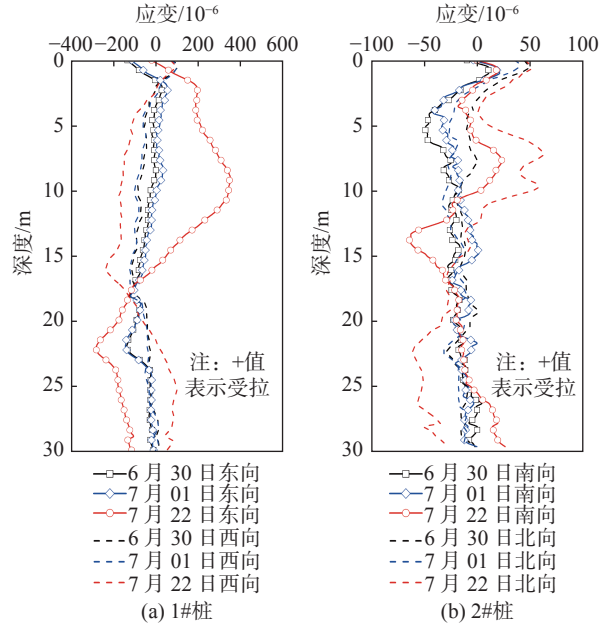


图2 灌注桩钢筋混凝土应变测量结果

Fig. 2 Measured strain of the pile in different directions

图2 桩身应变测量结果对应港池开挖不同阶段:6月30日港池前沿开挖至-4 m高程,7月1日开挖至-8 m高程,此时板桩前沿顶部保留4 m宽度土体,下部土体保留自然稳定边坡。测得1#、2#原型桩桩体东、西、南、北4个方向的桩身总应变较小,且拉压应变的变化范围基本小于 $50 \times 10^{-6}$ ,这表明板桩码头的密排灌注桩板桩结构受力主要是由于两侧土体压力变化引起,板桩结构前沿保留一定宽度土体仍可对板桩码头的桩体起到较好支撑作用;7月10日港池开挖全部完成,港池泥面整体达到设计的-13.8 m高程后,该高程以上码头前沿土体支撑作用消失,7月22日测得原型桩泥面以上高程桩身应变4个方向均出现明显变化,且桩体东西向(偏海陆侧)的光纤应变测量值变化更明显,呈现更好得规律性:灌注桩海侧桩身应变上部受拉增加,下部受压增加,陆侧变化趋势与海侧相反。

#### 3.1 变形分析

基于码头港池开挖过程中1#和2#原型桩应变测量结果,采用合理反映受弯结构受力变形特性的拟合方法对灌注桩东西和南北方向应变差值进行拟合得其拟合曲线,同时基于测得的原型灌注桩东西和南北向应变差值拟合曲线,根据材料力学受弯结构变形理论,由式(1)可积分算得1#、2#桩沿深度方向水平位移分布曲线<sup>[13-14]</sup>,1#桩中心位置埋设测斜管监测结果对比见图3。

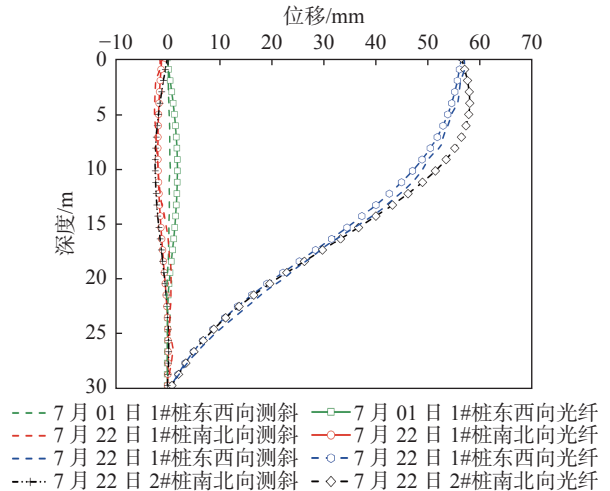


图3 灌注桩水平位移沿深度分布曲线

Fig. 3 Horizontal displacement and settlement of the pile



$$y(x) = - \int \left[ \int \frac{(\varepsilon_1(x) - \varepsilon_2(x))}{Y} dx \right] dx + C_1 x + C_2 \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_1(x)$ 、 $\varepsilon_2(x)$ 为某深度下桩身横截面对角2条光纤的应变测量值;  $Y$ 为2根光纤之间的间距, 这里指桩的直径;  $C_1$ 、 $C_2$ 为待求参数可根据桩身位移的边界条件求得, 一般假定桩端嵌固在基岩中, 水平位移为零, 桩顶位移可由全站仪或活动测斜仪测出。

分布式光纤监测系统测得港池开挖全过程灌注桩水平位移主要发生在码头海陆侧东西方向, 平行码头岸线的南北向水平位移较小。码头前沿港池开挖到设计泥面高程-13.80 m后, 分布式光纤监测系统测得的1#桩东西向最大水平位移为56.4 mm(海侧为正), 位于桩顶, 2#桩东西向最大水平位移为57.5 mm, 位于桩顶以下4.85 m; 港池开挖到设计泥面以后测得南北向最大水平位移为2.3 mm(南向为正), 位于桩顶以下9.92 m。分布式光纤监测系统测得的灌注桩在东西向和南北向的水平位移与活动测斜仪测量结果吻合良好, 具体表现为: 在港池开挖全过程中, 二者在桩体水平位移沿深度方向的分布规律和增长变化规律基本吻合, 测得的桩体水平位移量基本一致。以7月22日1#桩东西向水平位移测量结果为例, 活动测斜监测系统与分布式光纤监测系统在全深度范围内测得的水平位移最大相差2.8 mm, 并与相邻2#桩中分布式光纤测得的水平位移最大相差仅4.6 mm, 其误差水平与目前最高测量精度的活动测斜仪整体精度为 $\pm 3$  mm/30 m相当<sup>[15-16]</sup>, 这表明基于分布式光纤的板桩码头墙体结构变形监测技术具备较高的测量精度, 结合码头结构变形与受力关系理论可实现对板桩码头结构受力的准确分析。

### 3.2 受力分析

根据材料力学梁弯矩理论有: 平行布设结构体两侧应变差与结构体本身弯矩关系可用式(2)表达, 对结构体弯矩拟合函数求导即可求得结构的水平向剪力分布。

$$M(x) = \frac{EI_z [\varepsilon_1(x) - \varepsilon_2(x)]}{Y} \quad (2)$$

式中:  $E$ 为桩身弹性模量;  $I_z$ 为桩身惯性矩; 其他参数含义与式(1)相同。

结合试验用光纤解调仪的测量精度指标, 对捆扎埋在灌注桩钢筋笼东侧和西侧主筋处应变传感光纤测得的应变差值进行去噪光滑处理后, 以深度为变量对应应变差值进行低阶曲线拟合, 应用式(2)计算灌注桩的主要受力方向(东西向)弯矩如图4(a), 对弯矩曲线求导得沿深度方向密排板桩墙的灌注桩钢筋混凝土的剪力分布曲线如图4(b)所示。

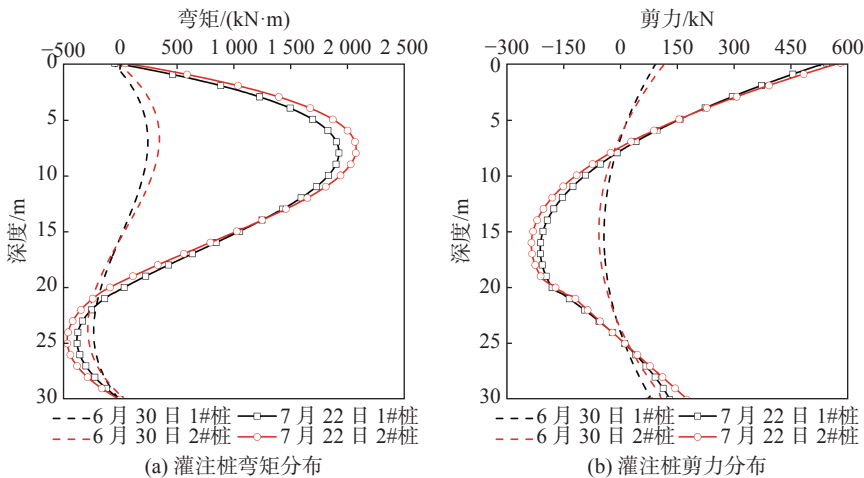


图4 灌注桩弯矩、剪力分布

Fig. 4 Distribution of bending moment and shear force of the pile

分布式光纤监测系统测得灌注桩弯矩分布呈现的规律是: 6月30日港池开挖前期(吸泥到-4.0 m高程), 板桩墙上部正弯矩与下部负弯矩基本上下反对称, 最大弯矩在 $\pm 300$  kN·m左右; 随着港池开挖深度增

加,板桩墙上半部分的正弯矩快速增长,明显高于下部负弯矩的增长速度,至墙前港池泥面开挖到设计高程 $-13.8\text{ m}$ 高程后,7月22日测得板桩墙最大正弯矩值达 $2\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ (距桩顶约 $10\text{ m}$ ),为最大负弯矩绝对值(距桩底约 $5\text{ m}$ )的4~5倍,此时上部墙体海侧受拉,下部墙体陆侧受拉;经比较,相同工况下相邻1#、2#两根灌注桩的弯矩分布规律和量值一致性良好,其弯矩分布规律与离心模型试验结果规律相同<sup>[2]</sup>。

分布式光纤监测系统测得灌注桩剪力分布呈现的规律为:7月22日港池开挖至 $-13.8\text{ m}$ 高程,密排灌注桩板桩墙剪力最大值约 $550\text{ kN}$ ,位于桩顶,这表明墙体顶部受锚杆集中拉力,自墙顶开始板桩墙剪力呈线性减小,至桩顶以下约 $17\text{ m}$ 深度(开挖泥面以下 $3.2\text{ m}$ )剪力递减到最大负值约 $-220\text{ kN}$ ,剪力变化拐点上下各有 $3\sim 5\text{ m}$ 长度范围呈非线性变化,该深度以下剪力恢复到线性增加,此时海侧土体作用于板桩墙的被动土压力开始大于陆侧土体作用的主动土压力<sup>[7]</sup>,至桩底剪力回到一定正值,这表明板桩墙底部土体在此形成有集中作用力。经比较,相邻两根灌注桩承受剪力在变化规律和量值上均保持良好一致性,且与锚杆应力计、锚杆拉力计推算的板桩墙剪力量值相当,可见该光纤监测技术可以满足板桩码头受力监测工作需要。

图5为灌注桩混凝土竖向应变沿深度的分布曲线,显示港池开挖后灌注桩桩体上部受拉,下部受压,随着墙前港池开挖进程,灌注桩上部受拉段长度增加,拉应变也增大,同时受压段最大压应变明显增大。至开挖到设计泥面,测得灌注桩竖向应变结果具体为:1#桩上部最大拉应变为 $96\times 10^{-6}$ ,受拉段全长约 $12\text{ m}$ ,其中上部约 $10\text{ m}$ 长度受拉程度基本相当,承受较大拉应变,下部最大压应变为 $-129\times 10^{-6}$ , $15\sim 22\text{ m}$ 约 $7\text{ m}$ 长度范围桩体均处于与最大压应变数值相当的受压状态,深度 $25\sim 30\text{ m}$ 约 $5\text{ m}$ 长度范围桩体处于较小压应变状态;2#桩上部最大拉应变为 $85\times 10^{-6}$ ,桩体上部受拉段长度约 $9\text{ m}$ ,灌注桩下部受压段长度超过 $2/3$ 桩长( $20\text{ m}$ ),最大压应变约为1#桩的 $2/3$ ( $-80\times 10^{-6}$ ),桩体承受较大压应变的长度也较短,约 $5\text{ m}$ 长度(深度范围为 $10\sim 15\text{ m}$ ), $15\text{ m}$ 深度以下约 $1/2$ 桩长度范围桩体处于较小压应变(约 $-30\times 10^{-6}$ )状态。

### 3.3 密排灌注桩板桩码头安全特性分析

根据《港口工程荷载规范》(JTS 144-1—2010)的要求,按照实际可能出现的受力情况,分承载能力极限状态和正常使用极限状态两种设计工况,对基于分布式光纤监测技术开展试验研究的原型码头板桩结构承载力进行计算,计算结果如下:承载能力极限状态和正常使用极限状态的最大桩身弯矩分别为 $2\,097.10$ 和 $1\,439.61\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,板桩墙最大位移为 $52.61\text{ mm}$ ,最大剪力为 $514.33\text{ kN}$ 。

码头前沿港池开挖到泥面设计高程 $-13.8\text{ m}$ 后,安装于密排灌注桩板桩码头结构的1#、2#试验桩内传感光纤监测资料计算结果为:1#桩向海侧最大水平位移 $56.4\text{ mm}$ ,2#桩向海侧最大水平位移 $57.5\text{ mm}$ ,超过设计计算得板桩墙最大位移 $52.61\text{ mm}$ ;1#桩最大桩身弯矩 $1\,916\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,2#桩最大桩身弯矩 $2\,066\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,超过板桩密排灌注桩正常使用极限状态的最大桩身弯矩设计值 $1\,439.61\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,基本达到板桩密排灌注桩承载力极限状态的最大桩身弯矩设计值 $2\,097.10\text{ kN}\cdot\text{m}$ ;1#桩最大剪力 $541\text{ kN}$ ,2#桩最大剪力 $579\text{ kN}$ ,超过板桩密排灌注桩的最大剪力设计值 $514.33\text{ kN}$ ;1#桩桩身竖向最大拉应变 $96\times 10^{-6}$ ,接近桩身混凝土材料的极限拉应变,且桩身受较大拉应变的长度较长,约 $10\text{ m}$ ,2#桩桩身竖向最大拉应变 $85\times 10^{-6}$ ,桩身承受拉应变大于 $50\times 10^{-6}$ 的桩段长度相对较小,约 $5\text{ m}$ 。

对比分析原型板桩码头结构内力计算结果与实测结果表明,码头前沿港池开挖到泥面设计高程 $-13.8\text{ m}$ 后,密排灌注桩板桩码头结构的板桩试验段墙体水平位移、试验监测桩的桩身弯矩和桩体剪力均已接近或

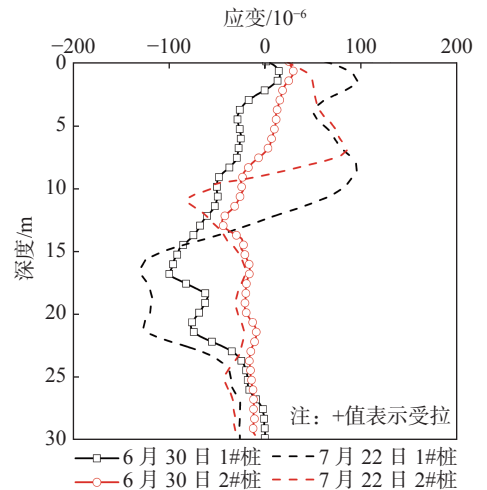


图5 灌注桩混凝土竖向应变分布

Fig. 5 Vertical strain distribution of concrete along the pile

超设计指标值, 试验桩的桩体上部桩段混凝土承受拉应变接近材料极限, 需关注原型板桩码头结构工作状态并加强监测以保证其安全运行。

## 4 结 语

本文介绍了基于分布式光纤传感技术的板桩码头结构变形和受力监测方法在密排灌注桩板桩墙的工程应用情况, 对码头前沿港池开挖过程监测结果进行了详细分析和讨论, 得出以下主要结论:

(1) 对比活动测斜仪监测结果, 基于分布式光纤传感技术的板桩码头墙体变形监测方法具有较高测量精度, 所得的板桩码头墙体受力监测结果与板桩码头离心模型试验和数值计算的规律性结果一致性好;

(2) 基于分布式光纤传感技术的板桩码头墙体变形和受力监测方法可满足板桩码头工程监测实际需要, 并能实现分布式监测, 在板桩码头工程设计、建设和研究工作中具有良好推广应用前景;

(3) 该港池前沿开挖完成后测得的密排灌注桩原型板桩码头结构的板桩墙体水平位移、桩身弯矩和桩体剪力均已接近或超设计指标值, 试验桩的桩体上部混凝土承受拉应变接近材料极限, 需关注原型板桩码头结构工作状态并加强监测以保证其安全运行。

## 参 考 文 献:

- [1] 刘永绣. 板桩式岸壁结构的设计理论与方法[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014: 1-20. (LIU Yongxiu. Design theories and methods for sheet-pile bulkhead[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2014: 1-20. (in Chinese))
- [2] 徐光明, 任国峰, 顾行文, 等. 新型板桩码头群桩基础被动段桩侧压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 502-511. (XU Guangming, REN Guofeng, GU Xingwen, et al. Experimental study on lateral pile-soil pressure on passive part of pile groups in innovative sheet-pile wharf[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 502-511. (in Chinese))
- [3] 徐光明, 任国峰, 顾行文, 等. 盐城港卸荷式地连墙结构码头离心模型试验[J]. 水利水运工程学报, 2018(3): 48-56. (XU Guangming, REN Guofeng, GU Xingwen, et al. Centrifuge modeling of diaphragm wall wharf with relief platform at Yancheng port[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(3): 48-56. (in Chinese))
- [4] 徐光明, 蔡正银, 曾友金, 等. 一种新型板桩码头结构的离心模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊1): 48-52. (XU Guangming, CAI Zhengyin, ZENG Youjin, et al. Centrifuge modeling for an innovative sheet-pile bulkhead of diaphragm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Suppl1): 48-52. (in Chinese))
- [5] 徐光明, 李士林. 板桩码头中群桩基础联接型式的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊1): 3365-3371. (XU Guangming, LI Shilin. Experimental study of head fixity conditions of pile group in sheet-pile bulkhead[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Suppl1): 3365-3371. (in Chinese))
- [6] 李景林, 蔡正银, 徐光明, 等. 遮帘式板桩码头结构离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1182-1187. (LI Jinglin, CAI Zhengyin, XU Guangming, et al. Centrifuge modelling test on covered sheet-piled structure of wharf[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1182-1187. (in Chinese))
- [7] 张昊, 邓永锋, 刘夫江, 等. 遮帘式板桩码头结构土压力特性模型试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(6): 1175-1179. (ZHANG Hao, DENG Yongfeng, Liu Fujiang, et al. Model experiment study on soil pressure characteristics of sheet-pile barrier wharf structure[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(6): 1175-1179. (in Chinese))
- [8] 邹鹏旭, 丁建军, 王馨. 钢管板桩结构影响因素数值模拟分析[J]. 港工技术, 2018, 55(6): 56-60. (ZOU Pengxu, DING Jianjun, WANG Xin. Numerical simulation analysis on influence factors of steel tubular and sheet pile structure[J]. Port Engineering Technology, 2018, 55(6): 56-60. (in Chinese))
- [9] 施忠良. 遮帘式板桩码头力学性能分析[J]. 水运工程, 2019(7): 86-92. (SHI Zhongliang. Mechanical properties analysis of covered type of sheet pile wharf[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(7): 86-92. (in Chinese))
- [10] 焦志斌, 蔡正银, 王剑平, 等. 遮帘式板桩码头原型观测技术研究[J]. 港工技术, 2005(增刊1): 56-59. (JIAO Zhibin, CAI

- Zhengyin, WANG Jianping, et al. Study on prototype observation technique of semi-covered type of sheet pile[J]. Port Engineering Technology, 2005(Suppl1): 56-59. (in Chinese))
- [11] 焦志斌,刘永绣. 地下连续墙测试中弯矩的计算方法探[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊1): 1485-1488. (JIAO Zhibin, LIU Yongxiu. Calculation methods of bending moment in diaphragm wall tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Suppl1): 1485-1488. (in Chinese))
- [12] 郭继业,周宝江,范建兵. 遮帘式板桩码头结构原位测试研究[J]. 港工技术, 2012, 49(1): 47-50. (GUO Jiye, ZHOU Baojiang, FAN Jianbing. In-situ measuring research on covered type sheet pile wharf structure[J]. Port Engineering Technology, 2012, 49(1): 47-50. (in Chinese))
- [13] 许滨华,何宁,何斌,等. 基于分布式光纤传感器的管道受弯变形监测试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 20-30. (XU Binhua, HE Ning, HE Bin, et al. Experiment study on pipeline bending deformation monitoring based on distributed optical fiber sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 20-30. (in Chinese))
- [14] 何斌,何宁,许滨华,等. 混凝土面板堆石坝面板挠度分布式监测试验[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 837-844. (HE Bin, HE Ning, XU Binhua, et al. Tests on distributed monitoring of deflection of concrete faces of CFRDs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 837-844. (in Chinese))
- [15] DGSi. Digitilt classic inclinometer system specifications[EB/OL]. [2020-11-01] <https://durhamgeo.com/product/digitilt-classic-inclinometer-system>.
- [16] Specifications of digital inclinometer model GK-604D[EB/OL]. [2020-11-01] <https://www.geokon.com/GK-604D>.

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

HE Ning<sup>1</sup>, MA Guizhen<sup>1</sup>, HE Bin<sup>1</sup>, ZHANG Zhongliu<sup>1</sup>, WANG Zhangchun<sup>1</sup>, QIAN Yajun<sup>1</sup>, SHAO Hanlin<sup>2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Nanjing CaZor Instruments Co., Ltd., Nanjing 210037, China)

**Abstract:** The stress and deformation state of the sheet pile wharf is an important factor to evaluate its safe operation. This paper presents a new distributed optical fiber monitoring technology for stress and deformation of piles based on the model test, which has been successfully applied to the prototype test of reinforced concrete cast-in-situ piles for sheet pile wharf. The results show that this method can accurately reflect the distribution of deformation, bending moment and stress along the pile length during the whole process of harbor basin excavation. It can effectively monitor and evaluate the operation and construction conditions in time, which can provide safety guarantee and construction guidance for the continuous stable operation of the sheet pile wharf. This monitoring method can realize the real-time monitoring for pile structure in full depth and full period of construction, thereby overcoming the shortcomings of traditional point monitoring methods in terms of resolution and accuracy, which has certain engineering practical significance.

**Key words:** sheet pile wharf; distributed optical fiber sensing technology; stress and deformation monitoring; safety operation