

# 基于 BOTDA 分布式光纤传感技术的 双排圆形桩变形特性及内力研究

胡 杨<sup>1</sup>, 郭通达<sup>1</sup>, 龙万学<sup>2</sup>, 姜 波<sup>2</sup>, 何 健<sup>2</sup>

(1. 贵阳市城市轨道交通集团有限公司, 贵州 贵阳 550081; 2. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** 为了解双排圆形桩在基坑支护中的变形规律和内力分布特性, 结合 BOTDA 分布式光纤传感技术和深层位移监测技术对双排桩在基坑开挖过程中的变形及内力响应进行测试。通过在前、后排桩分别布设传感光缆, 采集了从基坑开挖过程到稳定后的应变对双排桩的变形特性及内力, 并引入数值模拟与之对比分析。研究结果表明: 光纤监测推算的桩身挠度与相应位置的测斜监测的桩身侧向位移曲线规律基本一致, 基坑整体变形较小且处于稳定状态, 双排圆形桩起到了很好的支护效果; 通过监测应变能真实反映桩身内力分布及传递规律, 对比数值模拟成果, 双排桩实测弯矩剪力值明显小于模拟值, 分布规律基本一致, 在前、后排桩上的系梁连接点及坑底以下 2 m 附近的弯矩较大, 后排桩分担的荷载大于前排桩的; 基坑开挖完成后, 坑底以上土压力的分布形式呈现“上下部小, 中部大”的中凸特征, 实测土压力值也小于经典土压力法理论计算值。

**关键词:** 双排圆形桩; 分布式光纤传感技术; 应变; 内力分析

**中图分类号:** U445.55

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2021)05-0692-08

## Research on deformation characteristics and internal forces of double-row circular piles based on BOTDA distributed optical fiber sensing technology

HU Yang<sup>1</sup>, GUO Tongda<sup>1</sup>, LONG Wanxue<sup>2</sup>, JIANG Bo<sup>2</sup>, HE Jian<sup>2</sup>

(1. Guiyang Urban Rail Transit Group Co. Ltd., Guiyang 50081, China;

2. Guizhou Transportation Planning Survey and Design Academe Co., Ltd., Guiyang 550001, China)

**Abstract:** In order to understand the deformation laws and internal force distribution characteristics of the double-row circular piles in the foundation pit support, the deformation and internal force response of double-row piles in the process of foundation pit excavation are tested by means of BOTDA distributed optical fiber sensing technology and deep displacement monitoring technology. By laying sensing optical cables in the front and rear piles respectively, the strain from the excavation process to the stability of the foundation pit is collected to study the deformation characteristics and internal forces of the double-row piles, and the numerical simulation is introduced for comparative analysis. The result shows that the pile disturbance calculated by the optical fiber monitoring is basically consistent with the pile lateral displacement curve of the corresponding position inclination monitoring. The overall deformation of the foundation pit is small and in a stable state, and the double-row circular piles have a good supporting effect. By monitoring the strain energy, the internal force distribution and transfer law of the pile body are truly reflected. Compared with the numerical simulation results, the measured bending moment and shear force values of the double-row piles are significantly smaller than the simulated values, and the distribution law is basically the same. The bending moment at the connecting point of the tie beams on the front and rear piles and near 2m below the bottom of the pit is larger, and the load shared by the rear piles is greater than that of the front piles. After the excavation of the foundation pit is completed, the distribution of earth pressure above the bottom of the pit shows a convex characteristic of "small in upper and lower parts and large in middle parts". The measured earth pressure value is also less than the theoretical value calculated by classical earth pressure method.

收稿日期: 2021-04-06

修改稿日期: 2021-09-24

基金项目: 贵阳市轨道交通 1 号线工程科研课题“近邻深基坑开发项目对城市轨道交通结构影响机制与控制措施研究”

第一作者: 胡杨(1986—), 女, 大学本科, 工程师, 研究方向为轨道交通建设与管理。E-mail: 369263699@qq.com

通讯作者: 姜波(1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为山区高速公路地质灾害治理与岩土工程勘察设计。E-mail: 479634279@qq.com

**Key words:** double-row circular piles; BOTDA; strain; internal force analysis

双排圆形桩<sup>[1]</sup>是由系梁将前、后排圆形桩连接而成的一种新型组合式支护结构,比单桩<sup>[1]</sup>有更大的整体刚度,因其结构的空问特性,双排圆形桩<sup>[2-3]</sup>能有效解决深基坑、高悬臂、变形要求苛刻等的基坑工程问题,是常用的基坑支护形式,但其受力计算复杂<sup>[4]</sup>,而现场监测能真实准确地反应双排圆形桩在基坑支护中的变形规律和内力分布,这必然会更加符合工程实际。

常用的基坑支护桩监测技术大多是基于点式监测原理的,如钢筋计、应变片等,该类监测技术测试数据误差、离散性大,仅能测得有限的几个点的应力应变值,难以计算桩身弯曲变形,同时在地下环境中传感器难安装、寿命低、耐久性差,与监测对象兼容性差,难以实现长时间、长距离及分布式的监测目标。

分布式光纤传感技术是近年来随着光纤通信技术的发展而发展起来的一种感知(应变、温度)和传输外界信号的新型传感技术,该技术根据散射类型可分为瑞利散射(OTDR)、拉曼散射(ROTDR)、布里渊散射(BOTDR、BOTDA、BOFDA),其中 OTDR 主要用于变形位移监测,其特点为单端测试、便携快速,但测试时受干扰因素多且精度低;ROTDR 主要用于温度、水位监测,其特点为测试距离长、对温度敏感,但空间分辨率低、精度低;BOTDA 是受激布里渊散射光时域分析技术,可以感测应变、温度、位移、变形、抗度,可以实现双端测量,具有全分布式、精度高、寿命长、抗干扰能力强、耐腐蚀、长距离监测等优势,目前广泛应用于滑坡支挡结构应力应变、隧道围岩应力、桩基测试、大体积混凝土温度变化等监测中。

本文以宴官基坑工程为例,结合 BOTDA 分布式光纤传感技术和深层位移监测技术应用到双排圆形桩的桩身变形及应变监测中,从安装到采集基坑开挖过程中前后排桩不同深度的水平变形和结构微应变<sup>[5]</sup>。探讨了双排圆形桩在实际工程中的变形规律及结构力学响应特点,为双排圆形组合式支护桩的设计和施工提供工程应用经验。

## 1 基于 BOTDA 支护桩受力变形监测

BOTDA 是基于受激布里渊光散射的一种分布式光纤传感技术,其利用光纤中的布里渊背向散射光的频移与温度和应变变化间的线性关系<sup>[6-7]</sup>实现感测,当光纤受外界因素(如变形、温度、应力

等)影响时,光波在光纤中的传播过程中,布里渊频率发生漂移,即可通过频移量与光纤应变和温度的线性关系,分布式测试沿传感光纤的应力应变及温度<sup>[8-10]</sup>,见式(1)。

$$\nu_B(\epsilon, T) = \nu_B(0) + \frac{d\nu_B(\epsilon)}{d\epsilon}\epsilon + \frac{d\nu_B(T)}{dT}(T - T_0) \quad (1)$$

式中:  $\nu_B(0)$  为应变、温度初始值时的布里渊频率;  $\nu_B(\epsilon, T)$  为应变  $\epsilon$  和温度  $T$  的布里渊频率;  $d\nu_B(T)/dT$  和  $d\nu_B(\epsilon)/d\epsilon$  分别为温度、应变系数;  $(T - T_0)$  为温度变化值;  $\epsilon$  为光纤应变。

分布式光纤传感技术在双排圆形支护桩的变形监测示意图 1。光纤变形受支护桩自重重力影响小,可忽略,因此在支护桩任意横截面上的正应力  $\delta_z$  可认为是作用在横截面上的轴向应力<sup>[11]</sup>。根据欧拉-伯努利梁理论可知,支护桩在轴向应力作用下受弯产生的截面弯矩  $M(x)$  如下式。

$$M(x) = \frac{E\epsilon_x I_y}{x} \quad (2)$$

支护桩浇筑受材料的不均一性及施工等因素影响,桩身前后侧光缆位置距离中性面为  $x_1$ 、 $x_2$ ,桩截面见图 3,光缆相对中性轴的力矩平衡,那么支护桩在轴向应力作用下受弯产生的截面弯矩  $M(x)$  可表示为

$$M(x) = \frac{E\epsilon_{x_1} - E\epsilon_{x_2}}{x_1 - x_2} I_y \quad (3)$$

剪力  $Q(x)$  则可根据材料力学对弯矩求一阶导。土抗力  $F(x)$  可表示为

$$F(x) = M(x)'' \quad (4)$$

传感光缆固定在桩内前后侧的受力主筋上,如图 1、3 所示。

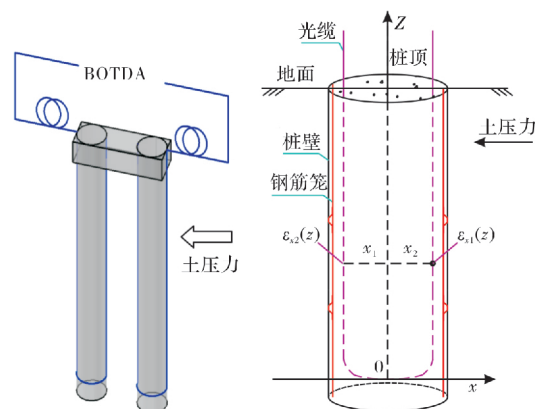


图 1 排桩纵断面-监测原理示意图

Fig. 1 Vertical section of row of piles-Schematic diagram of monitoring principle



图 2 窰官基坑平面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Douguan foundation pit

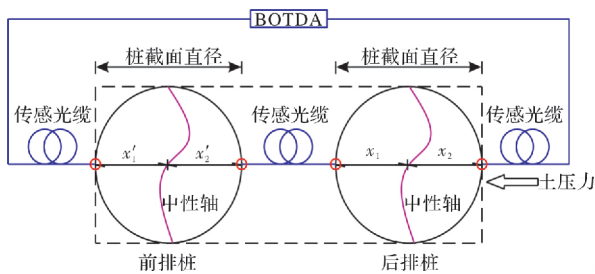


图 3 排桩横截面-监测原理示意图

Fig. 3 Cross section of row of piles-Schematic diagram of monitoring principle

在基坑土体压力的作用下,支护桩受弯变形,沿支护桩轴向方向上的点  $y(z)$  距相应位置的中性面处的一点由弯曲产生的应变  $\varepsilon_m(z)$  与曲率半径  $\rho(z)$  之间的关系见式(5).

$$\frac{y(z)}{\rho(z)} = -\varepsilon_m(z) \quad (5)$$

其中,  $y(z)$  为应变测点与弯曲中性轴间的距离, 又

$$\frac{1}{\rho(z)} = \frac{d^2 \omega(z)}{dz^2} \quad (6)$$

联解(5)、(6)式可得出支护桩挠度值  $\omega(z)$ .

支护桩桩底嵌于中风化灰岩内, 假定桩底固定, 可简化为悬臂梁结构, 据边界条件可知常数  $M$ 、 $N$  为零, 则支护桩桩身水平位移与应变关系简化为

$$\omega(z) = \int_0^z \int_0^z -\frac{\varepsilon_{x_1}(z) - \varepsilon_{x_2}(z)}{x_1 - x_2} dz dz \quad (7)$$

其中:  $E$  为支护桩弹性模量;  $I_y$  为横截面相对中性轴的惯性矩;  $x$  为监测点距中性轴的距离;  $z$  为支护桩桩身长度;  $\varepsilon_{x_1}(z)$  和  $\varepsilon_{x_2}(z)$  为单根支护桩某一横截面上对称位置的光缆应变测值. 将光缆所测应变代入式(7)中进行积分计算, 即可求得桩身

不同位置处的挠曲变形<sup>[12]</sup>.

## 2 工程实例分析

### 2.1 工程概况

窰官基坑项目位于贵阳市观山湖区, 长约 440 m, 宽约 60 m, 开挖深度约为 9.5~12 m, 基坑南侧及西侧紧邻轨道交通 1 号线, AB 段为轨道交通 1 号线挡墙, BC 段有轨道交通 1 号线高架桥(如图 2 所示). AB 段及 BC 段高架桥墩台位置在基坑边界线外设置双排桩, 并采用冠梁、连梁进行连接, 冠梁及连梁宽为 1.4 m, 冠梁高 1 m, 连梁高 1.2 m, 排桩直径 1.4 m; AB 段考虑变形控制要求, 排桩间距为 2.2 m, 排距为 2.3 m, 其余位置排桩间距为 2.6 m, 排距为 2.5 m, 排桩桩间采用桩间板进行封闭处治, 厚度为 20 cm, 见图 4 窰官基坑典型断面 1.

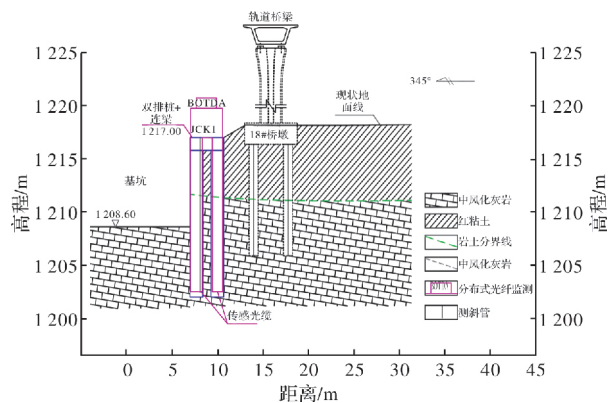


图 4 窰官基坑典型断面 1

Fig. 4 Typical section of Douguan foundation pit 1

根据钻探揭露情况, 场地上覆土层主要有第四系杂填土及残坡积层红黏土, 厚度为 11~16 m,



下伏基岩为三叠系下统大冶组深灰、灰色,薄~中厚层灰岩,局部含泥质。

为了准确地掌握基坑开挖的变形变化特征,在了解基坑地形地貌、工程地质、水文地质条件等基础上,结合先进的分布式光纤传感技术和常规监测手段,分别对基坑的应力应变场、变形场进行监测,而左侧 18#墩为轨道路基与桥梁衔接位置,且该位置覆盖层厚度相对较大,支护桩受基坑开挖受力相对敏感,故选取距轨道桥梁 18#墩左侧 2.3 m 的双排桩进行监测,支护桩参数见表 1 所示。

表 1 支护桩参数取值

Tab. 1 Parameter values of supporting pile

双排圆形 支护桩	截面 半径/m	弹性 模量/GPa	桩长/m	悬臂 段长/m
后排桩	0.7	30	15	8.5
前排桩	0.7	30	15	8.5

2.2 基坑开挖过程光纤监测

图 5 为光缆在双排支护桩前、后排桩的布设图。光缆在后排桩及前排桩内各埋设 U1、U2 回路,绑扎在支护桩受侧向土压力方向上迎土侧和背土侧的主筋上,U1、U2 回路串联外接光纤调制解调仪。

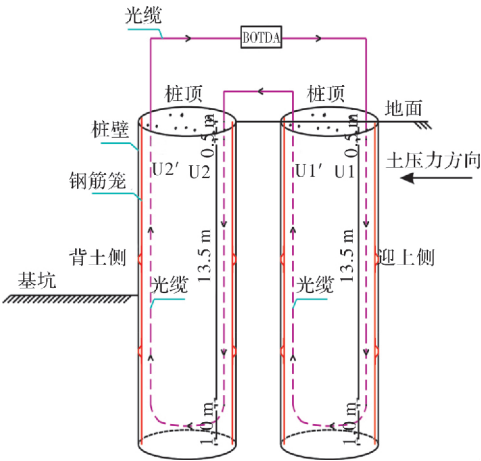


图 5 支护桩桩内光缆布设图

Fig. 5 Optical cable layout diagram in the supporting pile

支护桩的混凝土保护层厚度为 5 cm,钢筋笼半径为 65 cm,故绑扎在单桩前后对称主筋上的光纤间距 $\Delta x$ 为 130 cm,U1、U2 回路有效测试长度为 13.5 m,为距桩顶 0.5~14 m 范围内。混凝土浇筑完全凝结后,应变光缆与支护桩实现完全耦合、协调变形。光纤现场绑扎、熔接及测试见图 6。

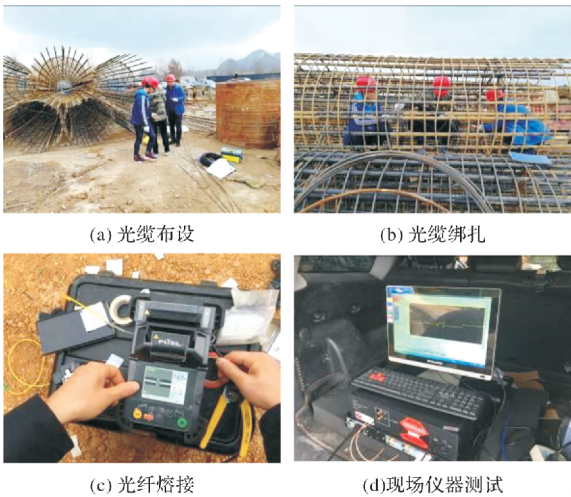


图 6 现场测试图

Fig. 6 Field test diagram

2.3 光纤测试结果分析

基坑双排圆形支护桩浇筑完成后,至 2020 年 12 月 30 日,共对支护桩的桩身应变有效监测 7 次,通过光纤调制解调仪分别读取桩身的测试数据,经式(1)换算整理得桩身应变曲线,图 7 为后排桩身应变曲线,图 8 为前排桩桩身应变曲线。

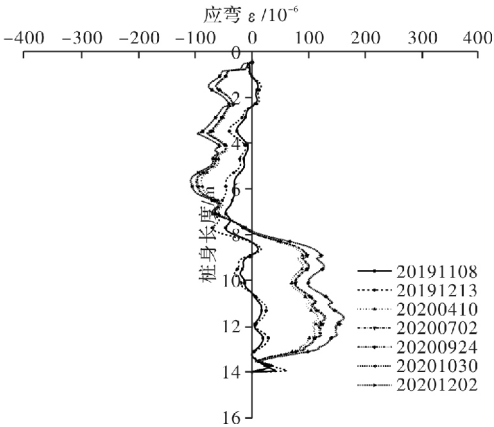


图 7 后排桩应变分布曲线

Fig. 7 Strain distribution curve of the rear piles

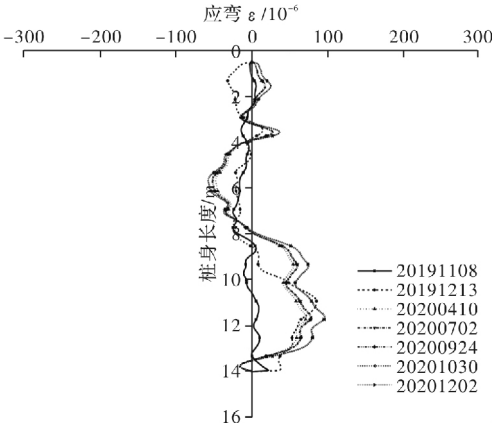


图 8 前排桩应变分布曲线

Fig. 8 Strain distribution curve of front row piles

### (1) 后排桩光纤测试

在整个基坑开挖阶段, 桩身在土压力作用下, 受弯变形, 轴向上产生较大的拉应变, 2019 年 12 月初基坑开挖全部见底, 后排桩最大应变量达  $156 \times 10^{-6}$ , 且趋于稳定。

### (2) 前排桩测试光纤

在基坑开挖初期, 前排桩受后排桩通过连系梁传递的力的作用, 受压变形, 随着基坑的开挖, 前排桩悬臂长度增加, 逐渐受桩间土压力作用, 受弯变形, 拉应变增大, 最大拉应变达  $100 \times 10^{-6}$ 。

(3) 对比分析前后排桩的应变分布曲线, 基坑开挖初期, 后排支护桩直接承受基坑侧向土压力, 通过系梁, 前排支护桩间接分担少部分土压力, 后排桩身应变大于前排桩身应变, 而随基坑挖至基底, 前后排桩存在桩间土, 前排桩逐渐分担后排桩所受土压力, 前排桩应变增大, 而后排桩应变趋于平稳。

在该过程中, 桩土应力在不断地重分布, 至基坑开挖完成后, 前后桩变形基本稳定, 表明了双排圆形支护桩起到了很好的基坑支护效果。

## 2.4 基坑开挖过程深层位移监测

根据基坑特点, 支护桩中测斜孔重点选择了 A97 双排支护桩, 布置了 JCK1 在前排桩内, 监测孔深 14.5 m, 位置如上图 4 所示, 主要是用以观测基坑开挖过程中基坑支护结构的稳定性及变形位移量与时间关系, 分析基坑开挖变形是否收敛及稳定性评价<sup>[14]</sup>。

据深层位移监测曲线—时间曲线, 见图 9。基坑支护桩等结构施工完成后, 基坑 AC 侧施工监测结果显示: 2019 年 3 月受基坑初期开挖降水影响, 支护桩桩顶位移缓慢增大; 2019 年 3 月至 5 月, 随着基坑进一步开挖, 支护桩桩顶变形速率增大; 截止至 2019 年 12 月, 基坑开挖已全部见底, 变形趋于平稳, 支护桩累计位移为 2.3 mm, 整体变形较小, 基坑处于稳定状态。桩内测斜管的变形主要出现在桩身 0~9 m 范围内, 该段位置相对变形较明显, 该区域为受荷段, 9~14.5 m 范围内桩身变形趋于零, 该区域为锚固段未发生明显变形。

通过对比分析前排桩的深层位移监测曲线与由分布式光纤监测桩身应变推算(式 10)的桩身侧向位移曲线可知: 两者曲线分布规律及数值大小基本一致, 表明了光纤在基坑支护桩受力应变的长期监测中是有一定的可靠性和准确性的如图 10。

根据基坑施工过程的深层位移监测, 可知 AC 侧基坑开挖变形到变形收敛的一个完整过程, 基本上掌握了其变形规律, 如变形位置、位移大小、

速率及方向及稳定状况等, 观测成果可以作为基坑安全监控的重要依据。

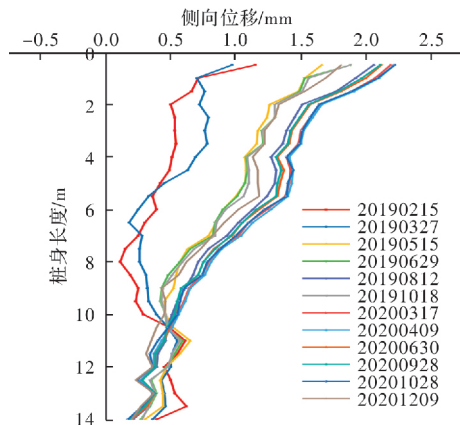


图 9 深层位移监测曲线

Fig. 9 Monitoring curve of deep-seated displacement

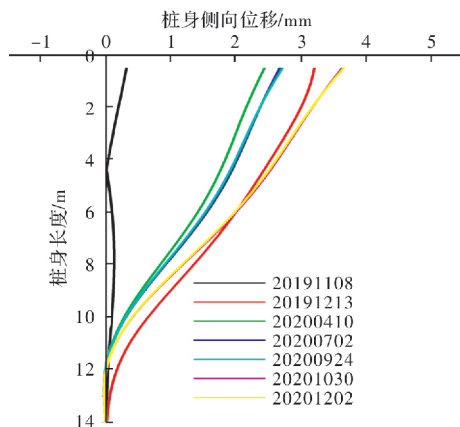


图 10 光纤测试侧向位移曲线

Fig. 10 Lateral displacement curve of fiber test

## 3 光纤测试内力成果分析

### 3.1 桩身弯矩剪力

根据前、后排桩的桩身-应变曲线, 通过式(2)~(4)得基坑稳定时双排桩的内力分布情况, 建立桩身内力-桩身长度关系曲线, 成果见图 11 和图 12。

根据分布式光纤监测成果可知:

(1) 从图 11 曲线可以看出, 后排桩受土压力作用, 发生弯曲变形, 在基坑底面以下约 2 m 位置, 弯矩最大为  $1\,430 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ; 后排桩通过系梁及桩间土将力传递至前排桩及稳定地基, 产生抗力, 系梁连接处及锚固段为负弯矩, 最大负弯矩为  $680 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ; 前排桩桩身 11.5 m 位置弯矩最大, 为  $845 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

(2) 从图 12 桩身剪力分布曲线可知, 前后排桩在 8.6 m (基坑底部) 区域的剪力最大, 后排桩的最大剪力值为  $570 \text{ kN}$ , 前排桩为  $290 \text{ kN}$ , 前后排桩在 11~14 m 区域的剪力为负, 剪力方向与土压力方向相反, 表明排桩在该位置受岩土抗力起到抗滑作用。

(3)对比分析前后排桩受侧向土压力作用产生的弯矩可知,后排桩最大弯矩大于前排桩的,最大弯矩比值约 1.7,前后排桩设计参数一致的情况下,可认为后排桩所分担的荷载<sup>[15]</sup>大于前排桩的。

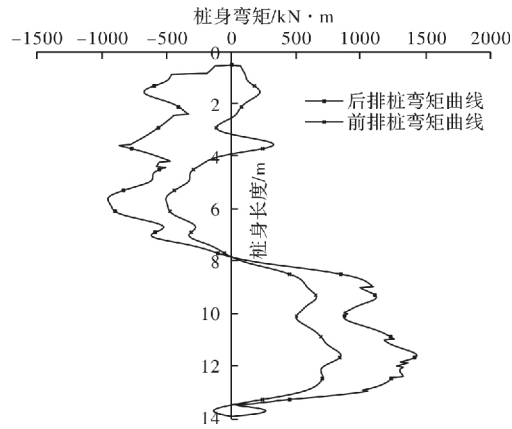


图 11 桩身弯矩分布曲线

Fig. 11 The bending moment distribution curve of the pile

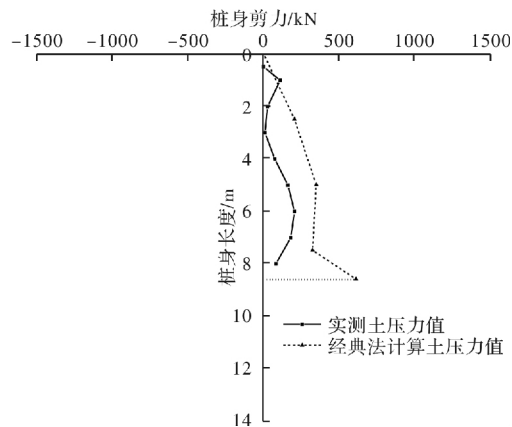


图 12 桩身剪力分布曲线

Fig. 12 Shear force distribution curve of pile

3.2 土压力

通过式(6)反推出得基坑稳定时双排桩的土压力分布情况,成果见图 13。

从图 13 曲线可知,在基坑开挖完成后,双排桩所受实际土压力值明显小于经典法理论计算值,且土压力的分布形式呈“上下小,中部大”的特征,与理论上的存在一定差别,其主要是受基坑开挖和前排桩反力的作用影响。从上述研究以及本文的现场实测值来看,经典理论计算结果往往偏大。

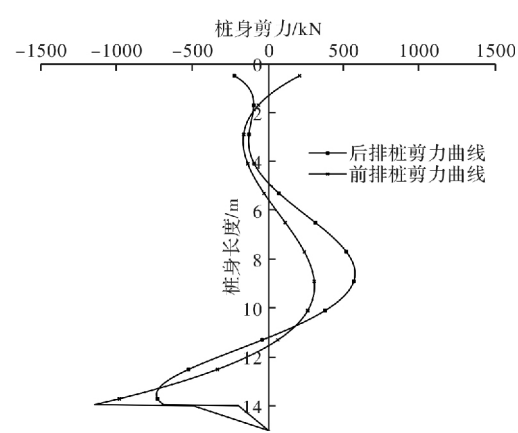


图 13 开挖完成后土压力实测值与理论值的对比

Fig. 13 Comparison between measured value and theoretical value of earth pressure after excavation

4 支护结构数值分析

4.1 模型建立

采用 Midas GTS 有限元软件在考虑基坑实际地层状况的基础上对基坑南侧(轨道 1 号线)进行建模分析见图 14。

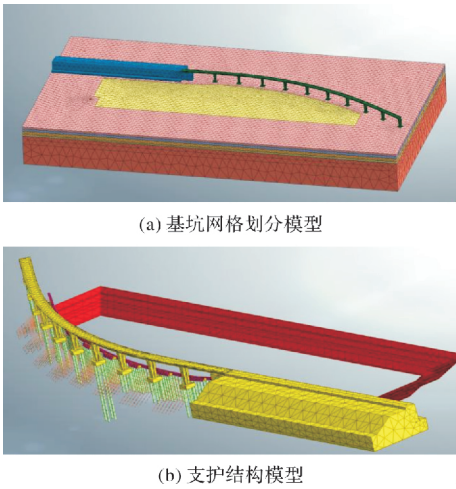


图 14 Midas 数值分析模型

Fig. 14 Midas numerical analysis model

计算荷载主要有土体自重、轨面荷载,其中作用于轨面荷载总值 22.4 kPa 包含恒载与活载。

据钻探揭露,基坑土体为第四系崩坡积及残破积层,下伏基岩为三叠系大冶组灰岩,详见表 2。

表 2 土层力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of soil layer

编号	土层	本构模型	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$C/\text{kPa}$	$\Phi/(^{\circ})$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\mu_{\text{ur}}$	$m$	$K_0$	$P^{\text{ref}}/\text{kPa}$
①	杂填土	MM-C	19	5	15	10	10	40	0.33	0.5	0.74	100
②	硬塑状红黏土	MM-C	17.8	31.7	9.1	90	90	270	0.3	0.5	0.84	100
③	可塑状红黏土	MM-C	17.1	29.8	6.6	70	70	210	0.35	0.6	0.88	100
④	软塑状红黏土	MM-C	16.8	21.5	3.8	40	40	120	0.4	0.8	0.93	100
⑤	大冶组灰岩	MM-C	27.1	250	36.2	300	300	900	0.26	0.5	0.40	100

支护结构参数及单元类型见表 3.

表 3 支护结构参数及单元类型

Tab. 3 Supporting structure parameters and unit types

编号	支护结构	单元类型	本构模型	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$E/\text{GPa}$	$\mu_{\text{ur}}$
①	支护桩、冠、连梁	梁单元	弹性本构	24.5	30	0.30
②	锚索自由段	桁架	弹性本构	78	200 000	0.20
③	锚索锚固段	梁单元	弹性本构	78	200 000	0.20
④	桩间板	板单元	弹性本构	24	26 000	0.33
⑤	混凝土锚喷	板单元	弹性本构	24	260 00	0.33

#### 4.2 计算分析

据支护方案, 基坑开挖计算分析步见表 4.

表 4 数值分析计算步

Tab. 4 Numerical analysis calculation step

计算荷载步	分析内容
①	初始地应力平衡
②	位移清零
③	施作支护桩、冠梁、连梁
④	第一层土体开挖
⑤	施作第一排锚索、第一层桩间板及第一层锚喷
⑥	第二层土体开挖
⑦	施作第二排锚索、第二层桩间板及第二层锚喷
⑧	第三层土体开挖
⑨	施作第三排锚索、第三层桩间板及第三层锚喷
⑩	第四层土体开挖
⑪	施作第四层桩间板及第四层锚喷

选取与分布式光纤相对应的支护桩进行内力对比分析, 图 15、16 分别为 18# 桥墩位置处支护桩弯矩剪力实测值与模拟值对比分析曲线.

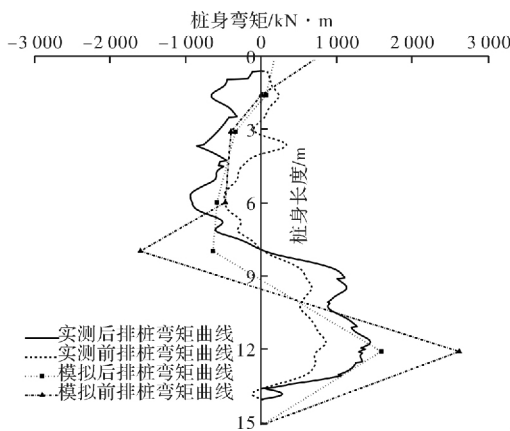


图 15 桩身弯矩分布曲线

Fig. 15 Distribution curve of pile bending moment

由此可知, 在基坑开挖完成后, 双排桩实测弯矩剪力值明显小于模拟值, 弯矩剪力的实测值与模拟值分布规律不一致, 其主要是实际土压力

相对设计土压力偏小且分布形式不同造成的.

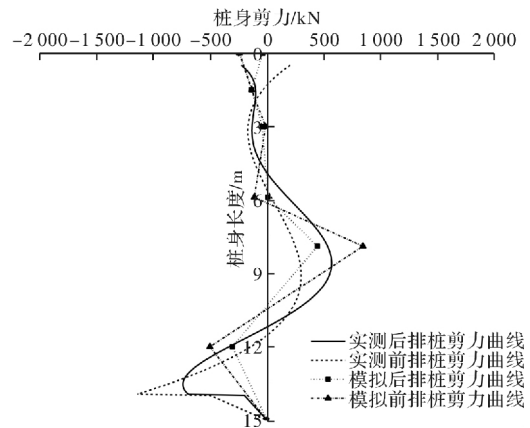


图 16 桩身剪力分布曲线

Fig. 16 Shear force distribution curve of pile body

#### 5 结论

本文以处治窰官基坑的双排圆形支护桩为研究对象, 利用 BOTDA 技术结合深层位移监测, 反推了双排支护桩的内力分布及变形特性, 得出以下结论:

(1)BOTDA 光纤传感技术能准确地获取双排圆形支护桩不同位置和深度的应变, 可推算出更加符合工程实际的双排圆形支护桩的内力和挠度分布情况, 经深层位移监测对比验证, 该技术可靠性高, 是目前新型组合式支护结构受力机理研究可靠的应力应变监测手段之一;

(2)测试结果表明, 在前、后排桩上的系梁连接点及基坑底部以下约 2 m 位置的弯矩相对最大; 后排桩的桩身内力显然是大于前排桩的, 最大比值约 1.7, 其所分担的荷载相应地大于前排桩, 类似工程设计中, 应加强后排桩, 优化前排桩;

(3)排桩上作用的土压力由开挖前的静止土压力渐变为主动力, 基坑开挖完成后, 坑底以上土压力的分布形式呈现“上下部小, 中部大”的中凸特征. 双排支护桩上作用的土压力值小于经典土压力理论计算值;

(4)对比支护桩内力的有限元分析模拟值和光

纤实测值可知,双排桩内力实测值明显小于模拟值,分布规律也不一致,这是由于设计土压力偏大且分布形式与实际存在差别。

本研究利用 BOTDA 技术的高抗干扰、高空间分辨率、高精度、分布式的优势,提高了深基坑监测的精度,使监测值贴近实际工程,改进了基坑支护工程原有的监测体系。

## 参考文献 References

- [1] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等.边坡与滑坡工程治理[M].北京:人民交通出版社,2007:394-397.  
ZHEN Yingren, CHEN Zuyu, WANG Gongxian. Engineering treatment of slope & landslide[M]. Beijing: China Communications Press, 2007:394-397.
- [2] 熊治文等.全埋式双排抗滑桩的受力分布[J].路基工程,2002,3:5-11.  
XIONG Zhiwen. Forcing distribution of buried double row antislid piles[J]. Subgrade Engineering, 2002, 3: 5-11.
- [3] 罗刚.大直径圆形抗滑桩受力机理及施工技术[J].工程技术研究.2020,5(11):64-65.  
LUO Gang. The mechanical mechanism and construction technology of large-diameter circular anti-slide piles[J]. Metallurgical Collections. 2020, 5(11): 64-65.
- [4] 郑刚,朱晓蔚,程雪松,等.悬臂排桩支护基坑连续破坏控制理论及设计方法研究[J].岩土工程学报.2021,43(6):981-990.  
ZHENG Gang, ZHU Xiaowei, CHENG Xuesong, et al. Study on the control theory and design method of progressive collapse in excavations retained by cantilever piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2021, 43(6):981-990.
- [5] 索文斌,程刚,卢毅,等.深基坑支护桩布里渊光时域分布式监测方法研究[J].高校地质学报.2016,22(4):724-732.  
SUO Wenbin, CHENG Gang, LU Yi, et al. Study on distributed monitoring method of deep foundation pit retaining pile based on the brillouin optical time domain technology[J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(4):724-732).
- [6] RAVET F, BAO X, ZOU L, et al. Accurate strain detection and localization with the distributed Brillouin sensor based on a phenomenological signal processing approach [D] // 13th International Symposium on Smart Structures and Materials and NDE for Health Monitoring and Diagnostics. San Diego, California, United States: SPIE, 2006.
- [7] BILLINGTON R. Measurement methods for stimulated raman and brillouin scattering in optical fibres, USA[R]. NPL Report COEM 31. UK: NPL,1999.
- [8] THEVENAZ L, NIKLE M, FELLAY A, et al. Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibets[C]//SPIE 5th Annual international symposium on smart structures and materials. 1998, San Diego, California, United States: SPIE, 1998.
- [9] WAIT P C, NEWSON T P. Measurement of Brillouin scattering coherence length as a function of pump power to determine Brillouin line width[J]. Optics Communications, 1995, 117(1/2): 142-146.
- [10] COTTER D. Observation of stimulated Brillouin scattering in low loss silica fibre at 1.33  $\mu\text{m}$ [J]. Electronics. Letters, 1982, 18(12): 495-496.
- [11] 罗勇,姜波,李淳风,等. h 型抗滑桩滑坡治理中的变形特性及内力研究[J]. 地下空间与工程学报. 2017, 13(6):1702-1710.  
LUO Yong JIANG Bo, LI Chunfeng, et al. Research on the deformation and internal force characteristics of h-type antislid piles in landslide treatment[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(6):1702-1710.
- [12] 高俊启,施斌,张巍,等. BOTDR 检测钢筋混凝土梁分布式应变的试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9):74-79.  
GAO Junqi, SHI Bing, ZHANG Wei, et al. An experimental study for measuring the distributed strain of reinforced concrete beam using BOTDR[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(9): 74-79.
- [13] 申永江,孙红月,尚岳全,等. 基于测斜数据的抗滑桩工作状态的评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3591-3596.  
SHEN Yongjiang, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Evaluation of state of anti-slide piles based on inclinometer data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3591-3596.
- [14] 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, 2018, 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. 2018, 27(6): 1464-1472.
- [15] 申永江,孙红月,尚岳全,等. 滑坡推力在悬臂式双排抗滑桩上的分配[J]. 岩石力学与工程学报. 2012(S1): 2668-2673.  
SHEN Yongjiang, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Distribution of landslide thrust on cantilever double-row anti-sliding piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012(S1), 2668-2673.

(编辑 沈 波)