

· 地基与基础 ·



相邻对拉锚索船闸深基坑变形与受力分析

武坤鹏^{1,2,3}, 温雨眠^{2,4}, 朱明星^{1,2,3}, 温友鹏^{1,2,3}

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000; 4. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510220)

摘要: 针对基坑工程采用数值分析方法变形计算误差大、准确度低的问题, 结合已有监测数据提出了基于 GWO-SVR 的地层参数反演分析方法, 可实现较为精确的基坑变形计算, 尤其适用于出现较大变形的基坑。在此基础上研究了相邻对拉锚索基坑开挖过程中出现大变形的原因, 对两种不同的变形控制处置措施开展了对比计算, 并通过实测数据分析了处置措施的有效性。对拉锚索基坑间距选取对于基坑稳定性及支护结构受力有较大的影响, 采用数值分析方法, 提出了不同基坑间距条件下基坑支护桩变形与内力、锚索力以及桩间土压力的变化规律, 可实现对拉锚索基坑在不同间距条件下支护结构的差异化设计, 为对拉锚索基坑的选型与计算分析提供参考。

关键词: 船闸深基坑; 对拉锚索; 变形控制; 宽深比; 计算模式

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0182-10

Deformation and stress analysis on adjacent deep foundation pits of ship lock with opposite tension anchor cable

WU Kunpeng^{1,2,3}, WEN Yumian^{2,4}, ZHU Mingxing^{1,2,3}, WEN Youpeng^{1,2,3}

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, CCCC, Guangzhou 510230, China;

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China;

4. Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Aiming at the problems of large deformation calculation errors and low accuracy in numerical analysis methods for foundation pit engineering, a geological parameter inversion analysis method based on GWO-SVR is proposed in combination with existing monitoring data, which can achieve more accurate deformation calculation of foundation pits, especially suitable for foundation pits with significant deformation. On this basis, the causes of large deformation during the excavation process of adjacent anchor cable foundation pits are studied, and two different deformation control measures are compared and calculated. The effectiveness of the treatment measures is analyzed through measured data. The selection of the spacing between anchor cable foundation pits has a significant impact on the stability of the foundation pit and the stress of the supporting structure. By using numerical analysis methods, the deformation and internal forces of the foundation pit support piles, anchor cable forces, and soil pressure between piles under different spacing conditions are proposed. This can achieve differentiated design of the supporting structure for anchor cable foundation pits under different spacing conditions, providing reference for the selection and calculation analysis of anchor cable foundation pits.

Keywords: deep foundation pit of ship lock; opposite tension anchor cable; deformation control; width-depth ratio; calculation mode

收稿日期: 2024-09-28

作者简介: 武坤鹏 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事基坑、地基处理、边坡等岩土工程领域的科研、设计与技术咨询工作。

桩锚结构是深基坑工程中较为常用的一种支护形式,当两基坑较为接近时,由于空间限制可采用对拉的方式。与内支撑结构、双排桩结构相比,桩锚结构是一种比较经济支护形式^[1-3],同时基坑内部可获得较大的开挖施工空间,施工速度也较快。但对拉锚索的设计目前还没有专门的技术标准和计算模型,主要还采用传统锚索计算方法或采用有限元方法,对于工程经验的依赖度较高。

刘秋芳^[4]以郑州市北环辅道下穿郑州北站上发场箱桥工程深基坑支护工程为例,按照现行基坑规范采用传统锚索水平设置的方法计算对拉锚索排桩支护结构,避免道路外移增加占地和拆迁,解决了基坑内无法设水平支撑的问题,确保基坑附近大桥的安全。陈海军等^[5]采用有限元方法将相邻深基坑的围护结构与土体连结成有机整体进行分析计算,使得围护结构与围岩协同作用,充分发挥围岩的自稳能力,应用于长沙营盘路湘江隧道基坑,取得了良好的效果。黄玉纯^[6]针对采用对拉锚索的挡土墙结构推导非极限状态下的土压力公式,并根据公式研究分析了锚索高度对挡土墙水平位移的影响以及墙背土压力的影响规律。吴曙光等^[7]自行设计和完成了考虑施工过程的对拉锚索支护结构室内模型试验,其研究表明对拉锚索支护结构支护桩内力及桩顶位移的最大值均出现在施工过程中,而非施工完成后;不同的开挖支护时机对桩身内力及土压力的分布存在较大影响;总结了对拉锚索支护结构桩身内力、土压力以及挡板土压力的分布。袁仲^[8]采用有限元方法对某对拉锚索相邻基坑不同时序的开挖方式进行分析,并采用规范方法理正软件计算结构进行对比验证。王晓卿^[9]采用数值分析方法对煤矿巷道中的对拉锚杆、锚索的承载特性与加固效果开展分析研究,得出不同条件下对拉锚索的受力与变形特性。万利民等^[10]在广州白云国际机场综合交通枢纽项目中采用水平对拉锚索施预埋施工工艺,锚索安装无需成孔,可实现全过程可视化预埋及安装,保证了施工质量与基坑安全。

以往对于对拉锚索基坑的研究大多集中于城市房屋建筑或市政工程中,在水运工程中采用对拉锚索作为基坑支护结构的案例较少。计算分析方法主要采用数值分析,而数值分析的参数取值是影响计算结果的重要因素,目前还没有一套较为完整的适用于大变形结构的参数反分析方法。本文以某相邻船闸基坑为例,对开挖深度不同的对拉锚索基坑产生大变形问题进行分析研究,提出基于 GWO-SVR 的地层参数反演分析方法,并在此基础上对大变形后的处理措施进行研究。此外,基坑间距是影响对拉锚索基坑稳定性与计算模式的重要参数,因此,在对案例基坑分析的基础上,研究对拉锚索基坑不同间距条件下支护桩变形与应力、锚索拉力以及桩间土压力的变化规律,提出了对拉锚索基坑在不同宽深比条件下的计算分析模式,旨在为后续类似基坑的设计与施工提供参考。

1 工程概况

某船闸由于修建时间较早,已不能满足当前的航运需求,需要在原有的一线船闸旁修建二线船闸,同时对原有的供电管道进行改造升级。受用地条件限制,新建二线船闸与电缆管道距离较近,且由于工期限制,船闸基坑与电缆管道基坑须同时进行施工,两基坑中间需留出一定的宽度作为临时道路。2个基坑的相互关系见图1。其中船闸基坑开挖深度12.8 m,电缆管道基坑开挖深度6.3 m。为获得较大的内部施工空间,船闸基坑采用桩锚支护形式,支护桩采用荤素结合的咬合桩,桩径1.2 m,电缆管道基坑桩径0.8 m,经过方案比选两基坑相邻部分上部采用对拉锚索支护,闸室基坑下部采用锚索施工,可为两基坑留出较大的施工空间。根据现场规划,两基坑中间预留8.5 m作为现场的临时道路。

项目场地地貌为海陆交互冲积平原,以河口三角洲为基本特征。地形平坦,堤后原始地面主要为水塘、荒地、藕池。建设范围内自上而下主要分布杂填土、粉质黏土、粗砂、全风化花岗岩、

强风化花岗岩等。

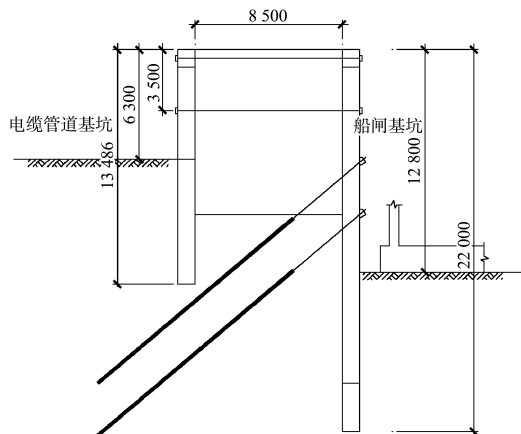


图1 两相邻基坑开挖断面 (单位: mm)

Fig. 1 Cross section of two adjacent foundation pits (unit: mm)

实际施工中2个基坑进行交替开挖,左侧电缆管道基坑先开挖至坑底,此时左侧电缆管道基坑支护桩最大位移为43.3 mm,位于桩顶部,右侧船闸基坑最大变形为35.9 mm,位于桩体中上部。船闸基坑继续下挖至9.5 m时,基坑发生了较大位移,深层水平位移达到83 mm,桩顶位移60 mm。而左侧电缆管道基坑发生了向右侧船闸基坑一侧的变形,桩体最大位移减小至24.8 mm,且最大位移下移到桩顶以下3 m的位置,见图2。

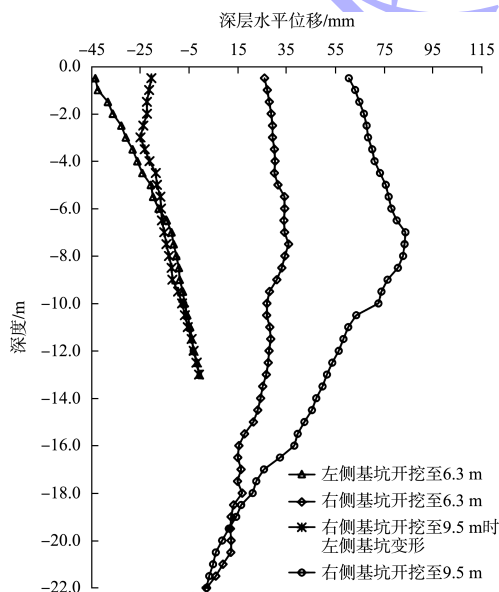


图2 基坑开挖至9.5 m 支护桩变形

Fig. 2 Deformation of support piles when the foundation pit is excavated to 9.5 m

2 基坑开挖过程分析及处理措施

2.1 参数反分析

为了对相邻对拉锚索基坑变形原因进行分析,并提出合理的处置方法以控制基坑变形,开展了施工开挖过程的分析研究。由于目前对拉锚索基坑没有相关的规范可以作为参考,因此采用数值方法开展研究。模型的计算参数对于有限元计算结果至关重要,由于勘察报告提供的参数均为扰动土样参数,和现场原位土体存在一定的差异,同时也无法完全对应施工过程中的开挖卸荷与加载状态。若要得到合理的计算结果需要结合已有的监测数据对计算参数进行反演。

对于岩土工程地层参数反演,已知的实测物理量为沉降、分层沉降、水平位移、孔隙水压、周边环境的变形等,参数反演的目的是使得参数计算结果与实际吻合,并对后续的施工过程进行预测分析。在反演过程中,取土层参数变量为 $\{(x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^n), (x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^n), \dots, (x_l^1, x_l^2, \dots, x_l^n)\}$, 其中 n 为变量维数, l 为样本点数目,进行反演分析时,样本点数目需与时间序列的维数保持一致。反演过程通常以实测响应值与响应值预估值之间的累计残差作为目标函数,见式(1),合理的土层参数反演值应该使得残差和 J 最小。

$$J = \sum_{i=1}^n (S_i - S_i^*)^2 \quad (1)$$

式中: n 为实测响应数据点个数; S_i 为实测响应值; S_i^* 响应预估值,其值可以通过将土层参数变量代入数值计算模型计算特定点的响应。

由于每层土参数下的模型响应计算需要将土层参数代入数值模型中,单个样本点的响应计算可能需要耗时数小时。基于此,首先利用拉丁超立方在样本空间内抽样,然后采用少量样本点响应去构造样本点响应函数,能够提高样本点响应的计算效率。本文拟利用少量样本点构造 SVR 代理模型,利用代理模型替代任意土层参数值下的模型响应计算,并采用灰狼搜索算法(GWO)对残差平方和 J 寻优,具体方法见图3。

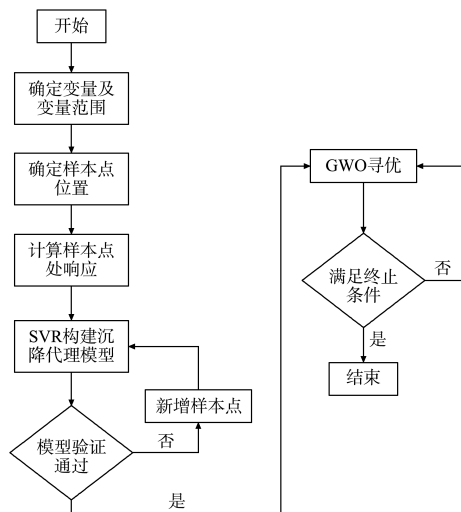


图 3 参数反演优化方法

Fig. 3 Optimization method for parameter inversion

2.1.1 拉丁超立方抽样

拉丁超立方抽样 (Latin hypercube sampling, LHS) 是 McKay 等于 1979 年提出的一种从多元参数分布中近似随机抽样的方法。在抽样数不多的情况下, 随机抽样不能很好地将样本分散到整个区间。与随机抽样不同, 拉丁超立方抽样具有均匀分层的特性, 以及可以在较少抽样的情况下得到尾部的样本值等优点。

算法的收敛速度和精度在一定程度上受到 GWO 初始种群好坏的影响, 随机产生的初始种群无法保证搜索空间分布的合理性以及种群的多样性, 而拉丁超立方抽样的均匀分层和等概率抽样的特点可以保证其产生的变量覆盖整个分布空间, 所以将拉丁超立方抽样应用于算法的初始化可以使初始种群个体尽可能地覆盖整个搜索空间, 以提高初始种群的多样性, 从而提升算法的寻优性能。

首先将每个参数 (如黏聚力、摩擦角等) 取值范围分成多个 (本文取 50 个) 连续区间, 在每个区间内随机抽样, 将抽样的变量值随机组合得到 50 个样本。

样本 1 (重力密度 1, 黏聚力 1, 摩擦角 1, 模量 1, ……)

样本 2 (重力密度 2, 黏聚力 2, 摩擦角 2, 模量 2, ……)

……

样本 50 (重力密度 50, 黏聚力 50, 摩擦角 50, 模量 50, ……)

其次建立分析模型, 将上述参数逐一输入模型汇总进行基坑开挖过程模拟, 并对结构响应进行计算分析, 根据项目实际情况建立的数值分析模型见图 4。

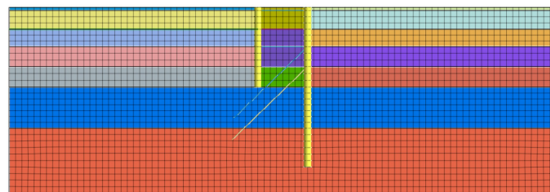


图 4 对拉锚索分析模型

Fig. 4 Analysis model for opposite tension anchor cable

2.1.2 SVR 代理模型

在用 GWO 搜索土层参数时, 需要用代理模型输出任意参数下的样本点响应, 因此, 采用支持向量回归 (SVR) 构造代理模型。同时考虑随机误差及噪声的影响, 训练样本代入预测模型中, 可以求解预测模型参数, 函数值可以用如下决策函数计算:

$$S^* = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x_j) + b \quad (2)$$

式中: $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i)$ 为拉格朗日向量乘子; x_i, x_j 为样本值; b 为偏置; α_i^* 为样本计算值。

考虑到模型响应与土层参数变量之间呈现高度非线性, 通过引入核函数把低维样本数据映射到高位特征空间中, 需要采用核函数为径向基核函数, 如下所示:

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中: σ 为样本标准差。

在求解过程中, 由于数值就计算和沉降观测都具有一定的误差, 为了提高预测模型的泛化能力, 并考虑随机误差的影响, 本模型中引入不敏感带损值 ε , 假定所有的样本到回归函数的距离都小于 ε , 此时回归函数式 (2) 的求解可以转化为 1 个凸二次优化的问题。

部分样本点数值模型计算的水平变形最大值与支持向量回归出的水平变形最大值的对比见表 1。

由于模型参数相互独立且物理意义明确，因此，采用支持向量回归得到的水平变形与数值模型计算的水平误差整体较小。

表 1 反演位移对比 (部分)
Tab. 1 Comparison of inverted displacement (partial)

样本号	数值计算水平 变形最大值/mm	SVR 回归变形 最大值/mm	相对 误差/%
1	-88.11	-83.97	4.93
2	-92.30	-87.10	5.97
3	-82.91	-77.74	6.65
4	-93.15	-88.14	5.68
5	-97.07	-91.99	5.52
6	-83.89	-79.83	5.09
7	-87.36	-82.30	6.15
8	-87.30	-83.27	4.84
9	-79.56	-75.55	5.31
10	-89.32	-84.31	5.94

2.1.3 参数反演

得到代理模型后，利用灰狼优化算法(GWO)对构造的目标函数(式(1))进行寻优，其中， S 响应为基坑的实测深层水平变形， S^* 为 SVR 水平位移代理模型。GWO 算法寻优过程见图 5，其中灰狼数目为 200，迭代次数为 200。在 140 次迭代时，算法达到收敛，即搜索到了全局最优值。得到的最终优化参数见表 2。为了验证参数值的准确性，将该参数值输入有限元模型中，计算模型的响应并与实际工程监测数据进行对比。实测基坑深层水平变形与模型计算水平变形对比见图 6，可见水平位移非常接近。

表 2 模型反演参数
Tab. 2 Model inversion parameters

土层	重力密度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
素填土	17.2	5.1	12.5	10.5
粉质黏土	17.9	8.6	15.6	14.2
粗砂	18.0	25.0	0.7	33.1
粉质黏土	18.5	3.5	15.3	10.2
全风化花岗岩	20.2	30.3	42.1	36.4
强风化花岗岩	22.6	35.1	82.3	44.2

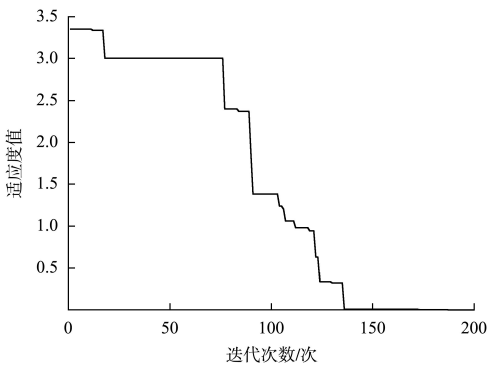


图 5 GWO 算法寻优过程
Fig. 5 Optimization process of GWO algorithm

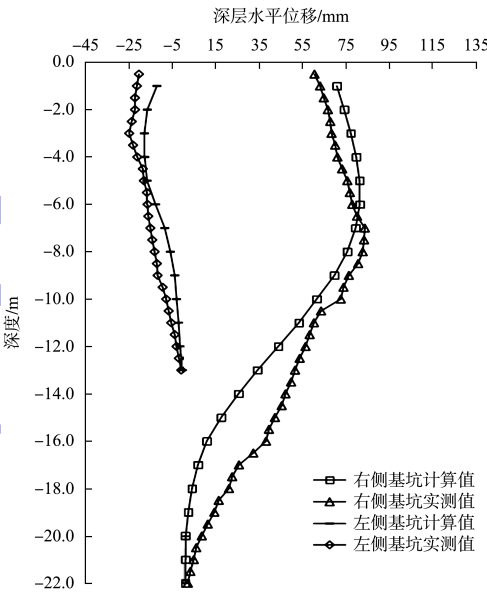


图 6 数值分析与现场实测值对比
Fig. 6 Comparison between numerical analysis and on-site measured values

2.2 加固措施分析

由上述计算分析可知，数值分析结果较好地再现了开挖施工情况，与实际监测值较吻合。在此基础上研究采取不同措施对基坑变形控制的作用。基坑发生较大变形后项目组织召开专家咨询会，根据现场的实际情况提出了 3 种不同的加固措施：1) 在相邻两基坑之间进行旋喷桩加固，提高相邻两排桩之间土体的强度；2) 在上部及底部各增加一道锚索来控制变形，但应避开电缆管道基坑的支护桩；3) 先开挖远离基坑支护桩的土体，待开挖至坑底后设置斜抛撑，再进行靠近基坑支护桩附近的土体开挖，由于现场施工锚索在旋喷桩的实施需要避开锚索，施工难度较大、风

险较高, 因此本文主要针对增加锚索以及预留土体+斜抛撑 2 个方案(图 7)开展分析研究, 以确定合理的加固方式。

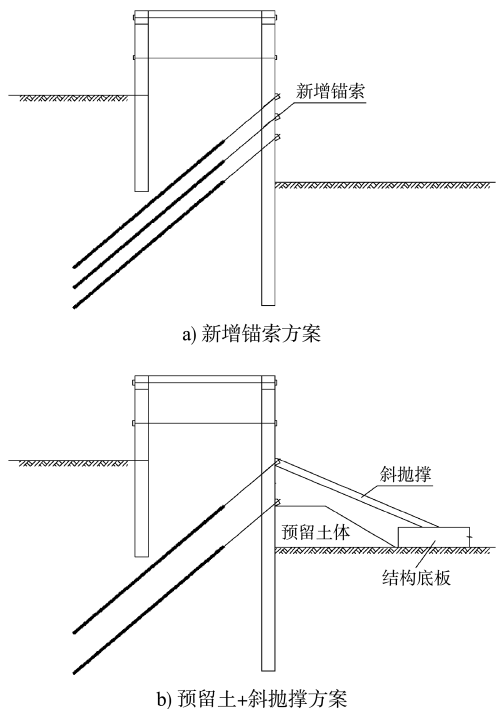


图 7 加固措施
Fig. 7 Reinforcement measures

在上述分析模型的基础上进行加固方案计算, 首先对于抛撑方案, 分析预留土体宽度分别为 2、4、6、8 m 时对于支护结构变形的影响, 斜抛撑间距取 4 m, 计算结果见表 3。综合考虑支护结构变形、造价、坑内施工空间以及工期的影响, 预留土体宽度及抛撑间距均取 4 m。

表 3 不同预留土体宽度条形基坑支护结构变形 Tab. 3 Deformation of strip foundation pit support structures with different reserved soil width		
宽度/m	船闸基坑最大位移/mm	电缆基坑最大位移/mm
2	145.1	24.3
4	136.7	21.8
6	132.3	20.5
8	125.6	19.8

预留土+斜抛撑、增加锚索以及两种方法同时使用 3 种方案的基坑支护结构变形分析结果见图 8。为了确保基坑安全开挖, 考虑采用增加锚索和斜抛撑 2 种方法结合的形式控制变形, 同时对两坑之间的临时道路进行封闭, 不允许车辆通行。并在开挖过程中密切关注支护结构的变化情况。

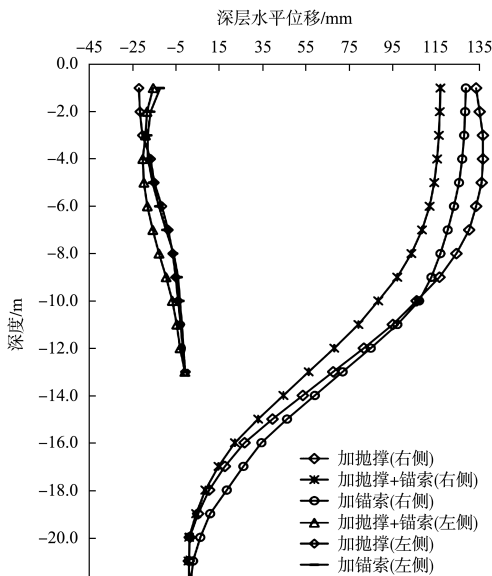


图 8 3 种方案计算值对比
Fig. 8 Comparison of calculated values under three schemes

当船闸基坑开挖至坑底时其深层水平位移仍然达到 121 mm, 桩顶位移达到 93 mm。此时左侧电缆管道基坑进一步向船闸基坑变形, 桩体最大位移减小至 10.1 mm, 且最大位置下移至桩体中部。施工过程中的基坑变形见图 9。

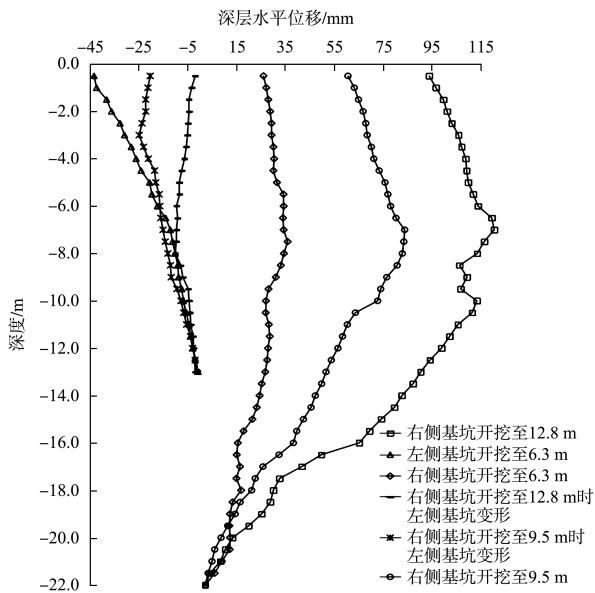


图 9 开挖至坑底实测值
Fig. 9 Actual measurement value after excavation to bottom of pit

根据设计文件, 新增加的锚索力设计值为 530 kN, 船闸基坑开挖至坑底时锚索力实测值为 155~187 kN, 新增加的锚索并未发挥较大的作用。这是由于锚索

发挥作用需要一定的位移,而斜抛撑与反压土体已经对基坑位移起到了一定的限制作用,锚索并未充分发挥作用,而是起到了一定的预留储备。斜抛撑和预留土体对于基坑变形起了主要的抑制作用。

3 不同对拉锚索基坑间距影响分析

根据相关工程经验,对拉锚索基坑的间距对其变形及使用情况关系密切,是该类基坑设计的一个重要条件。由于土质条件、空间条件等的限制,对拉锚索不一定适用于所有的情况。有学者认为在满足一定的宽高比条件下对拉锚索可按重力式结构进行设计;也有学者认为可按照单侧桩锚结构进行设计。本文所述的船闸基坑在设计方案确定阶段对于对拉锚索的间距也存在一定争议,综合考虑场地条件及工程造价确定间距为 8.5 m。因此根据基坑的实际情况,对不同基坑间距条件下的对拉锚索相邻基坑的变形与受力进行探究,可为后续类似项目提供技术参考。

3.1 分析模型

分别建立基坑间距为 4、8、12、20 m 的对拉锚索基坑分析模型,分为左右 2 个基坑,基坑深度均为 12.8 m,共设置 4 道对拉锚索,支护结构采用 1.2 m 直径的钻孔灌注桩。鉴于采用对拉锚索的相邻基坑深度大多基本接近,本文所述的两侧不同的情况较为少见,因此本节对前述船闸基坑进行适当的改变,着重研究基坑深度相同的情况,分析支护结构变形、锚索应力变化以及桩间土体的土压力与地层变形,以使得结论更具有推广性,建立的分析模型见图 10。采用第 2 节反演得到的参数进行计算。

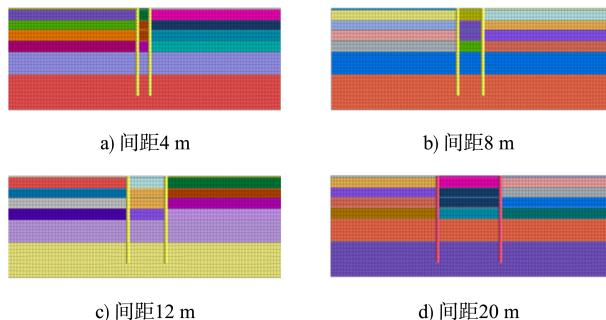


图 10 不同基坑间距分析模型

Fig. 10 Analysis models for different foundation pits spacing

由于对拉锚索基坑需要先开挖至锚索底部后才能进行对应深度的锚索施工,因此分析工况设置为两侧基坑交替开挖,先开挖左侧基坑第 1 层土体,再开挖右侧第 2 层土体,此时施工第 1 道锚索,依次类推,具体开挖工况见表 4。

表 4 计算分析开挖工况

Tab. 4 Calculation and analysis of excavation conditions

步骤	施工工况描述
1	左侧基坑开挖至 0.5 m
2	右侧基坑开挖至 0.5 m, 打设第 1 道锚索
3	左侧基坑开挖至 3.5 m
4	右侧基坑开挖至 3.5 m, 打设第 2 道锚索
5	左侧基坑开挖至 6.3 m
6	右侧基坑开挖至 6.3 m, 打设第 3 道锚索
7	左侧基坑开挖至 9.5 m
8	右侧基坑开挖至 9.5 m, 打设第 4 道锚索
9	左侧基坑开挖至 12.8 m
10	右侧基坑开挖至 12.8 m

3.2 支护结构受力分析

对不同间距的 2 个对拉锚索基坑进行分析,由计算结果可知开挖完成后,由于两侧基坑土体应力的释放,在桩间土体作用下,两侧支护桩呈现向坑内挤压变形的形态,并总体上向先开挖一侧倾斜。

由于锚索的连接作用,在一侧开挖后,另外一侧支护桩的变形和内力均有所降低,随着开挖的不断进行,左侧(先开挖一侧)支护桩的变形表现出波动上升的趋势,见图 11a),随着基坑间距的增大,弯矩的增加幅度也不断减小,见图 11b),如基坑间距 12 和 20 m 时的弯矩已经十分接近。而右侧基坑由于后开挖,其支护桩在每次开挖前由于左侧基坑的卸载已经有了一定向外侧的变形,因此支护桩的变形并没有呈现波动上升的趋势,而是出现正负交替的情况,见图 11c)。

对于支护桩弯矩,左侧(先开挖)支护桩弯矩在相同开挖深度下大于右侧支护桩弯矩。两侧基坑开挖深度小于 4 m(宽深比大于 1/3)时,支护桩弯矩变化幅度均较小,间距大于 4 m(宽深比小于 1/3)时后随着基坑间距的不断增大,支护桩弯矩则呈现出逐步增加的趋势。由于左侧基坑先开挖,

其支护桩弯矩随基坑间距的增大呈现出波动上升的趋势, 而右侧基坑支护桩弯矩则呈现出整体上升的趋势; 当间距增加到一定程度时, 这种趋势逐渐变缓, 见图 11d)。

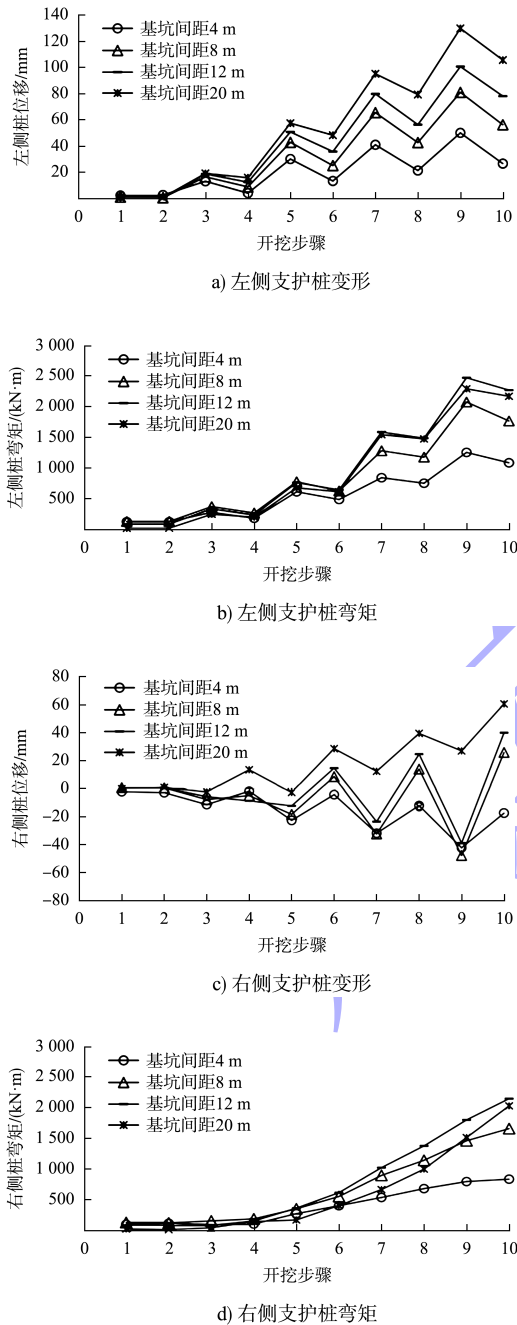


图 11 支护桩变形、弯矩随基坑间距变化

Fig. 11 Variation of deformation and bending moment of support pile under different foundation pits spacing

3.3 锚索受力分析

总体上 4 道锚索随着开挖深度的增加, 轴力也不断增加(图 12), 对于第 1 和第 2 道锚索, 基

坑间距越大锚索内力也越大, 其中第 1 道锚索内力随基坑间距增大其增加幅度较大, 第 2 道锚索增加幅度较小。第 3 道锚索在基坑间距超过 8 m (宽深比 2/3) 后轴力变化较小, 几乎保持稳定状态。第 4 道锚索在基坑间距超过 8 m 后保持稳定状态, 但在基坑间距 20 m (宽深比 3/2) 时又小幅度地降低。因此下层的 2 道锚索对于基坑间距的敏感性较低, 而上层 2 道锚索对于基坑间距的变化较为敏感。

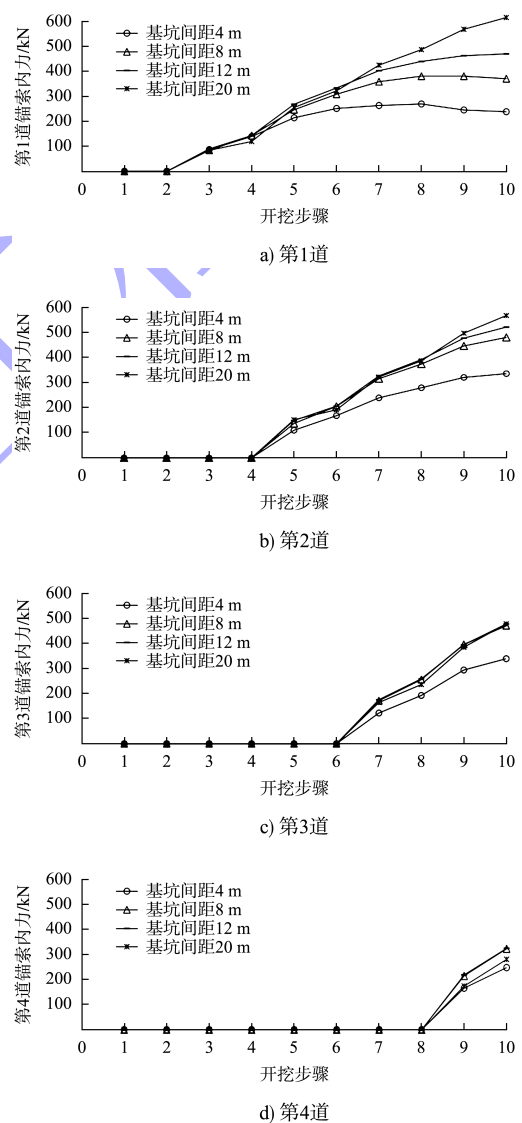


图 12 锚索内力随基坑间距及开挖步骤的变化

Fig. 12 Variation of internal force of anchor cable under different spacing between foundation pits and excavation steps

3.4 桩间土压力分析

从土压力分布上来看, 依然呈现类似三角形

分布的形态,但是存在锚索的高程处土压力有明显的降低。相对于先开挖的左侧,后开挖的右侧支护结构上土压力相对略大,但幅度较小。横向对比相同深度处不同基坑间距的土压力情况,随着基坑间距的增大,在某一深度处土压力总体上呈现增加的趋势。且随深度的增加,土压力增加的幅度也不断增大。对比两基坑的支护桩,先开挖一侧支护桩的土压力随深度增加的幅度也略大于后开挖一侧,见图 13。

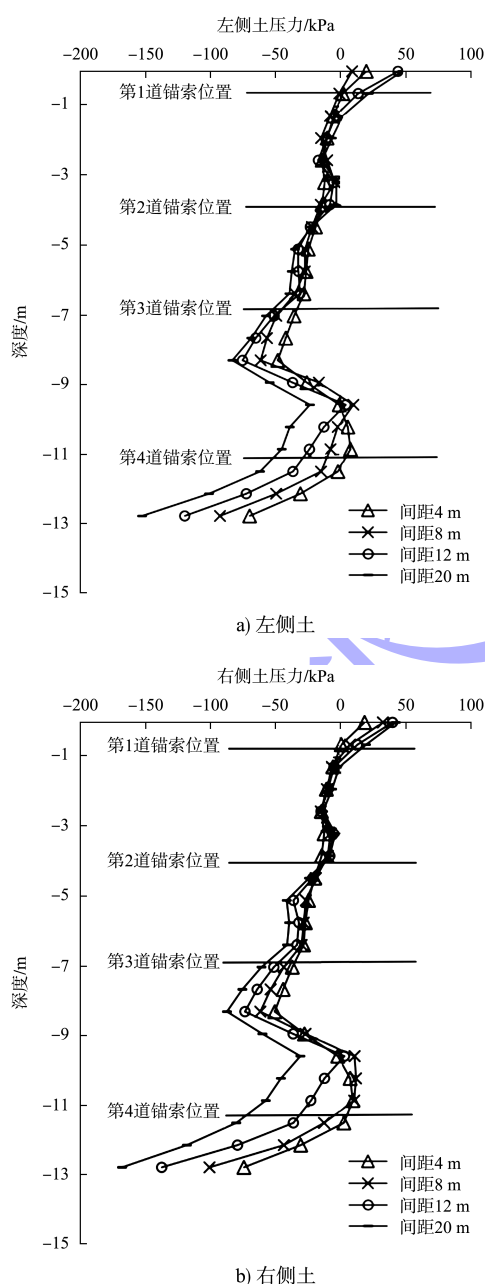


图 13 不同基坑间距条件下土压力分布
Fig. 13 Distribution of soil pressure under different pit spacing conditions

分析不同基坑间距下不同深度处的土体压力分布可知,顶部受到锚索的约束作用呈现出向两排桩之间的挤压效应,并随着深度的增加这种挤压效应逐渐被土压力抵消。在第 3 道与第 4 道锚索之间出现土压力的一个较大值,经过第 4 道锚索的约束以后,土压力又以较大的斜率不断增加。

随着基坑间距的增大,锚索力均逐渐增加,这是由于间距较小时相邻基坑有协同变形的趋势,即一侧基坑变形带动土体及另外一侧基坑变形较为明显,土体重力不足以抵挡基坑的变形,此时类似于双排桩结构。当基坑间距增加时,桩间土压力逐渐增大,土体自身重力发挥了主要作用,并向两侧进行挤压,呈现出类似重力式结构的变形形态。

4 结论

1) 建立 GWO-SVR 地层参数反演方法,利用支持向量回归(SVR)构建了基坑深层水平位移与地层参数之间的代理模型,利用灰狼优化算法(GWO)最小化代理模型计算水平位移与实测基坑深层水平位移之间的平方和,得到地层参数值,获得与实测大变形数据接近的计算值。

2) 采用对拉锚索支护,当两相邻基坑深浅不一致时宜先开挖较浅基坑。应控制交替开挖的分层厚度尽量小于 2 m 或先在对拉侧的远端开挖。可采用预留土体反压的施工方法,控制基坑变形,对拉锚索基坑发生较大变形时,采用斜抛撑对变形较大一侧进行变形控制,并可适当增加锚索作为安全储备。

3) 对于两侧基坑深度接近的对拉锚索基坑,宽深比大于 1/3 时,基坑间距对于支护桩弯矩变化的影响较小;宽深比小于 1/3 时后随着基坑间距的不断增大,支护桩弯矩则呈现逐步增加的趋势。先开挖一侧,支护桩弯矩随基坑间距的增大呈波动上升趋势,后开挖一侧呈整体上升趋势。

4) 对拉锚索基坑开挖深度一半以上的锚索内力对于基坑间距的变化较为敏感,随着基坑间距

的增加锚索内力增长率较大,下部锚索这种趋势较弱。间距较小时锚索内力变化较大,间距较大时锚索内力变化较小。与土压力变化对照可知,基坑宽深比小于 $2/3$ 时,呈现双排桩的特性,可按双排桩设计,宽深比在 $2/3 \sim 3/2$ 时可按重力式结构设计,宽深比大于 $3/2$ 时可按常规桩锚结构设计。

参考文献:

- [1] 杨彦飞. 相邻不同支护形式结合处的基坑侧壁稳定性研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.
- YANG Y F. Study on the stability of side walls of foundation pit at the joint of adjacent different support forms[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023.
- [2] 胡敏云, 夏佳莉, 寿树德, 等. 相邻基坑围护结构变形及控制的模拟与实测[J]. 浙江工业大学学报, 2023, 51(5): 497-503, 552.
- HU M Y, XIA J L, SHOU S D, et al. Simulation and measurement on the deformation and control effect of adjacent foundation pit excavations [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2023, 51(5): 497-503, 552.
- [3] 顾正瑞, 徐中华. 缓冲区宽度对同步开挖基坑群变形影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(S1): 269-277, 293.
- GU Z R, XU Z H. Analysis on the effect of buffer width on deformation of simulations excavation foundation pit group [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2023, 19(1): 269-277, 293.
- [4] 刘秋芳. 对拉锚索排桩支护结构在顶进箱桥深基坑中的应用[J]. 铁道勘察, 2013, 39(1): 27-29.
- LIU Q F. The application of pulling row pile anchor supporting structure in the box bridge feeding in deep foundation[J]. Railway investigation and surveying, 2013, 39(1): 27-29.
- [5] 陈海军, 郝国鹏. 对拉结构在邻近深基坑中的应用[J]. 隧道建设, 2013, 33(3): 215-219.
- CHEN H J, HAO G P. Application of cross structures in neighboring foundation pits [J]. Tunnel construction, 2013, 33(3): 215-219.
- [6] 黄玉纯. 对拉锚索位置对路基挡墙土压力的影响分析[C]//2022年工业建筑学术交流会论文集. 北京: 中冶建筑研究总院有限公司, 2022: 982-985.
- HUANG Y C. Analysis of the effect of the position of the tie anchor on the earth pressure of the roadbed retaining wall[C]//Proceedings of the 2022 Industrial Architecture Academic Exchange Conference. Beijing: Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, 2022: 982-985.
- [7] 吴曙光, 彭朋, 韩培宇, 等. 对拉锚索支护结构室内模型试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(6): 24-29.
- WU S G, PENG P, HAN P Y, et al. Indoor model test of pulling anchor supporting structure [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2016, 35(6): 24-29.
- [8] 袁仲. 某相邻深基坑间水平对拉锚索支护设计与数值模拟研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- YUAN Z. Supporting design and numerical simulation study of horizontal pulling anchor between adjacent deep foundation pits [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020.
- [9] 王晓卿. 对拉锚杆、锚索的承载特性与加固效果分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S2): 430-438.
- WANG X Q. Analysis for bearing characteristics and reinforcement effect of counter-pulled bolts and cables[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S2): 430-438.
- [10] 万利民, 刘勇, 袁光辉, 等. 广州白云国际机场T2航站楼隧道水平对拉锚索施工技术[J]. 施工技术, 2017, 46(14): 4-6.
- WAN L M, LIU Y, YUAN G H, et al. Horizontal pulling anchor cable construction technology of Guangzhou Baiyun international airport terminal No. 2 tunnel[J]. Construction technology, 2017, 46(14): 4-6.

(本文编辑 赵娟)