

## 钢板桩垂直护岸结构的反演分析及实测研究

张晓阳<sup>1</sup>,张福海<sup>1,2</sup>,赵伏田<sup>1</sup>,陈翔<sup>1</sup>

(1. 河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098;2. 河海大学 岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

**摘要:**以钢板桩+锚杆作为护岸结构的苏南运河常州西段“四改三”航道升级改造工程为实例,通过反演分析得到合理的土体计算参数,同时在反演分析的基础上,引入动态反演分析的方法,结合工程实际,对施工过程中的三个主要阶段逐次进行分析,并与现场实际监测位移值进行对比分析,为每一个阶段的变形提供可靠保证。对比结果表明模拟值与实测值吻合较好,表明反演结果是可信的,可为类似的工程提供参考。

**关键词:**钢板桩;土体参数;动态反演分析;数值模拟

**中图分类号:**U617.8

**文献标识码:**A

### Numerical analysis and field trials research of vertical steel sheet pile supporting structure

Zhang Xiao-yang<sup>1</sup>, Zhang Fu-hai<sup>1,2</sup>, Zhao Fu-tian<sup>1</sup>, Chen Xiang<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Transportation, Hohai University, Jiangsu Nanjing, 210098;

2. Geotechnical Institute, Hohai University, Jiangsu Nanjing, 210098)

**Abstract:** Based on the Su'nan canal “four to three” channel upgrading project in Changzhou, and its revetment structure composed of vertical steel sheet pile and anchor, the reasonable calculation parameters of soil has been obtained through inversion analysis. Based on the result of the inverse analysis, dynamic construction factors was considered. Also, three work progresses have been analyzed successively combined under practical engineering condition. Monitoring displacement of the piles was compared with the analyzed result to make sure the safety of each work progress. The results show that the simulation results are in good agreement with the measured values, which indicates that the inversion results are credible and can provide reference for similar projects.

**Key words:** steel sheet pile; soil parameters; dynamical inverse analysis; numerical simulation

随着内河航运的快速发展,对原有河道进行改造升级逐渐提上日程,而选用施工速度快、效率高、占地面积小的护岸方式为急需解决的问题。钢板桩于20世纪初在欧洲开始生产利用,具有高效、便捷、安全等特点,常用于深基坑支护、施工围堰、航道整治等工程,起到挡土、防渗作用<sup>[1-2]</sup>,上世纪50年代初引进国内。反演分析在基坑监测、边坡稳定以及围护结构监测中运用广泛<sup>[3-7]</sup>。但这些反演分析中,大都根据工程结束后监测数据来进行反演分析,不能实时预测围护变形。因此,在每一阶段结束后,即根据结构变形进行反演分析,即采用动态反演分析的方法,实时预测结构变

形,从而实现施工过程中的信息化,为每一阶段施工提供可靠保证。本文基于苏南运河常州西段“四改三”航道升级改造工程中采用钢板桩+锚杆作为护岸结构。在施工过程中,根据实际所得的监测数据为基础,通过动态反演分析得到较为合理的土体力学参数,并利用得到的参数对护岸的钢板桩水平位移进行数值模拟。同时将模拟数据与现场监测水平位移进行比较,论证了反演分析的正确性,为类似工程提供参考依据。

### 1 工程概况及试验方案

收稿日期:2015-08-19

基金项目:教育部博士点基金资助项目(20100094110002)

作者简介:张晓阳(1991-),男,安徽阜阳人,硕士,主要从事岩土研究工作。

### 1.1 工程概况

苏南运河试验段各土层,具体物理力学指标见表1。

表1 不同土层土体的物理力学性质指标

Tab.1 Physical and mechanical properties of different soil layer

土层编号	厚度 /m	$\gamma$ /kN·m <sup>-3</sup>	$c$ /kPa	$\phi$ /°	$E$ /MPa	$\nu$
①	3	19.4	11.2	17.1	7.51	0.30
②	4	17.8	9	12.8	7.63	0.30
③	4.5	18.9	38.6	17.0	8.26	0.30
④	5.5	19.4	14.0	29.1	11.09	0.30
⑤	13	20.3	38.2	15.6	7.63	0.30

护岸的加固方案为10 m钢板桩+锚杆(设置高程2.0 m),钢板桩选用冷弯帽型钢板桩,桩顶标高为3.80 m,桩尖标高为-6.2 m,桩长为10 m,横截面宽度650 mm,高度480 mm,每延米的截面抗弯模量为1 500 cm<sup>3</sup>/m,钢材强度等级为Q345。

### 1.2 实验方案

现场为研究钢板桩的自身变形,在钢板桩两侧不同深度处安装应变计。测试仪器为XP-02型振弦式频率计,应变计型号为EBJ-A,现场试验单元测点平面布置图如图1。

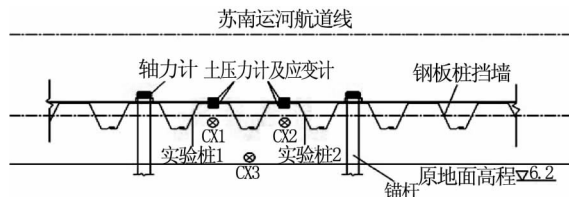


图1 试验现场测点布置

Fig.1 Arrangement of measuring points in test site

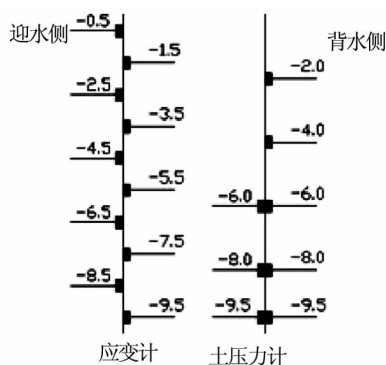


图2 传感器安装及布置方式

Fig.2 The sensor installation and arrangement on field

根据测点布置部位与钢板桩打设深度确定预埋导线的长度。传感器的安装工序为:开孔及定

点,焊接传感器,绑扎电线,焊接保护槽钢,装线完成安装。试验桩上应变计应在钢板桩打设前一个星期内完成安装,随钢板桩一起打入土体的传感器至少预留一个月的稳定期。现场试验选取桩的土压力计与应变计埋设及布置见图2。

## 2 土体反演参数分析

### 2.1 计算模型的建立及反演参数的选取

岸坡地基土模型水平方向为60 m,竖直方向30 m,上部的斜坡坡高2.4 m,坡比为2.4:1,下部的斜坡坡高2 m,坡比1:5,两斜坡中间的直立开挖深度为4.4 m,下部斜坡与中间直立边坡之间有个1 m宽的平台。图3为岸坡的有限元计算模型,其中钢板桩的长度为10 m,锚杆锚固位置为桩顶以下2.0 m,长度为20 m,倾角为150°。

本文模拟选取的土体物理力学指标如表1所示。钢板桩的力学性质参数如表2所示。钢板桩假定为矩形截面,弹性模量 $E=210$  GPa,泊松比 $\nu=0.3$ ,桩厚为单位厚度,矩形截面宽度根据不同的抗弯刚度值折算为0.09 m。为了减小岸坡土体在模拟开挖过程中的回弹现象,本节岸坡土体弹性模量取值随着岸坡土体深度的增加而增加。锚杆的弹性模量为 $E=200$  GPa,泊松比为 $\nu=0.3$ 。

模拟的施工过程如下:打入钢板桩,土体开挖至2.5 m深度;在桩顶以下1.5 m处打设锚杆并添加预应力;土体开挖至设计标高4.4 m。

### 2.2 土体参数位移反分析模型

利用直接反分析法反演一个岩土结构的特征参数首先是建立一个正分析模型,然后建立反演优化目标及寻找一种高效的最优化方法。实际上就是建立一个优化数学模型。反分析模型建立的关键是建立一个合理的反演优化目标函数 $f(X)$ , $X$ 为待反演的参数集。在钢板桩护岸结构的反演分析中,可以以有限元计算结果同观测点各指定时刻实测位移残差的平方和作为参数反演优化问题的目标函数

$$f(X) = \sum_{i=1}^{T_i} \sum_{j=1}^{N_j} (u_{ij} - u_{ij}^*)^2$$

式中, $T_i$ 为施工步, $i=1,2,3$ ;  $N_j$ 为观测点数, $j=1,2,3,4,5$ ;  $u_{ij}$ 为第施工步下第 $j$ 测点的计算位移;  $u_{ij}^*$ 为第 $i$ 施工步下第 $j$ 测点的观测位移;

在直接反分析法过程中,由于计算机的截断、舍入误差的积累、正分析模型自身的不完善性等

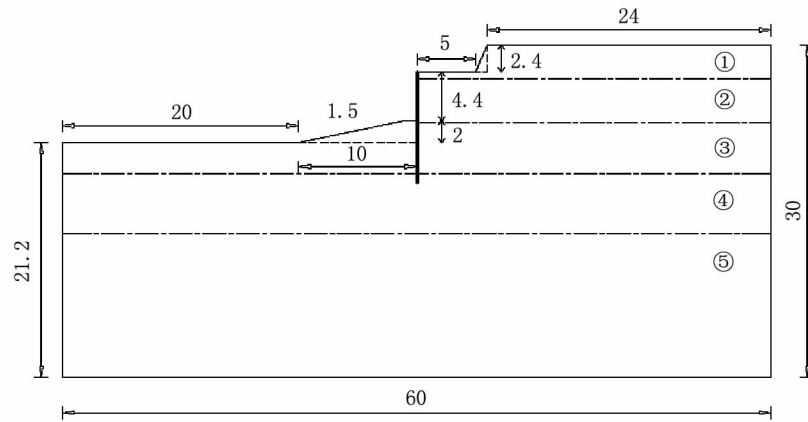


图3 岸坡有限元计算模型 (单位: m)

Fig.3 The finite element calculation model of the slope (unit:m)

原因,常常导致最终分析结果不稳定、不唯一,特别当反演参数较多时,这一问题更为突出。从物理角度来看,符合条件的解必然是唯一存在的。因此,从工程实际出发,根据参数的实际物理意义需要给优化问题加上一些定解条件,比如根据室内试验结果及现场的实测结论,可以得到各特征参数的粗略估计值  $X^0$ 。可以确信,各参数的真实值必定满足:

$$X^* \subset X' = X^0 \pm \Delta X$$

式中,  $X^*$  为参数真实值;  $X'$  为允许解集;  $\Delta X$  为参数合理的波动范围。

这样允许解集大大缩小,有效的避免了不稳定性,提高了寻优效率。在反演分析中,既要保证各参数在各自常用范围内变化,又要保证各参数之间的协调合理,符合物理、力学规律,还要保证各测点以外的坝体其它区域不出现不符合规律的应力应变情况,这样所得的参数组合才是所寻求的。

根据上述分析,土体参数位移反分析最优化模型为:

$$\text{求设计变量 } \{X\} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

$$\text{使目标函数 } f(X) = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^{N_j} (u_{ij} - u_{ij}^*)^2 \rightarrow \min$$

$$\text{满足约束 } a_i \leq x_i \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中,  $a_i$ 、 $b_i$  为第个待求参数的上下限,即为反演参数的合理变化范围。

### 3 反演结果及分析

应用优化反分析方法,一次可以只对一个参数进行优化,也可以对几个参数的组合进行优化。

一般来说,每次只对类型或数值相同或相近的参数同时进行优化,这时假定其他参数不变。具体计算时所选反演参数为土体的弹性模量,其初始值如表 2 所示,搜索区间取上下 20%,表 2 为各土层弹性模量的反演计算结果。

表 2 各层土体弹性模量的初始值与反演值

Tab.2 The initial and inversion value of soil elasticity modulus in each layer

参数	土层 1	土层 2	土层 3	土层 4	土层 5
	弹模 E1	弹模 E2	弹模 E3	弹模 E4	弹模 E5
设计采用值	7.03	7.05	8.26	11.09	7.63
反演值	6.53	8.05	9.86	12.39	8.63
相对变化率	-7.1%	14.2%	19.3%	11.7%	11.6%

利用反推出的各层土体的弹性模量再进行正演分析,所得板桩的水平位移模拟值与实测值的对比分析如下图 4 所示。工况一中,钢板桩施工完成后,土体开挖 2.5 m,导致钢板桩沿背离河岸方向发生位移,板顶处位移最大,且位移沿钢板桩从上而下逐渐较小,钢板桩底部位移最小,实际监测数据此处为零,而模拟中此处应有位移,这表明,板桩底部位移的发展是一个缓慢的过程,这在工况二、三种可以体现出来;在工况二中,由于在桩顶以下 1.5 m 处做锚杆,施加一定的锚杆初始拉力,从而使板桩位移向里发展,这点在模拟和实际监测数据中均有明显体现;在工况三中,锚杆施工完成后,继续向下开挖至设计标高,由于主动土压力的慢慢增加,钢板桩顶部的位移逐渐较小,几乎为零,满足设计要求。

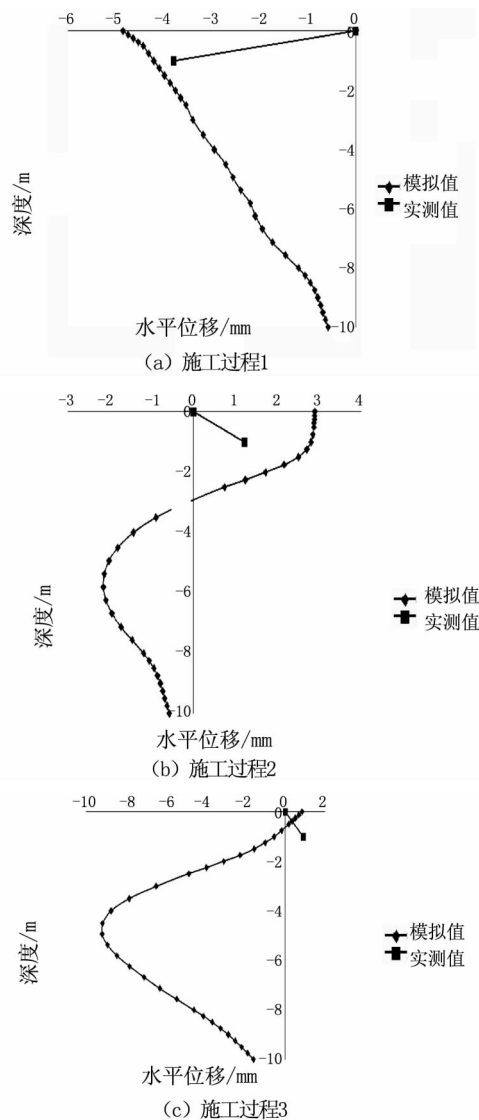


图4 板桩水平位移实测值与反演值对比分析

Fig.4 The analysis of measured horizontal displacement values and the inversion value

## 4 结论

1) 在第一个施工中,随着土体的开挖,钢板桩发生背离河岸的水平位移,在第二个施工过程中

由于施工锚杆,使得板桩位移向里发展,之后随着土体的继续开挖,板桩位移继续背离河岸发展,顶端位移逐渐为零,满足设计要求。

2) 根据每个施工过程的监测位移值进行动态的反演分析,得到合理的土体参数,以反演所得数据为依据,对钢板桩水平位移进行数值模拟,且模拟结果与监测结果吻合较好,表明反演结果具有可信性。

3) 采用钢板桩+锚杆的柔性结构作为护岸,在施工过程中,数值模拟以及实际监测数据均表明其具有良好的工程特性,但作为永久护岸结构,板桩位移的发展与传统刚性护岸结构的差异仍待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 许开成,袁志华. 钢板桩在深基坑支护中的应用[J]. 江西建材,2000(4):34-36.
- [2] 赵伏田,张福海,张永立. 钢板桩护岸结构数值模拟分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(5):12-16.
- [3] 余颖慧,刘明玉. 粉煤灰基坑支护结构的反演分析与实测研究[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(Z1):1336-1339.
- [4] 谢晓健,蒋永生,陈忠范等. 深基坑支护结构的反演分析与实测研究[J]. 工业建筑,2000,30(3):12-16.
- [5] 李晓龙,王复明,尚向阳. 支护结构荷载反演研究现状及相关问题探讨[J]. 人民黄河,2009,31(3):76-79.
- [6] 汤罗圣,殷坤龙,周丽,等. 基于数值模拟与位移监测的滑坡抗剪强度参数反演分析[J]. 水文地质工程地质,2012,39(4):32-37.
- [7] 王萍. 地铁基坑开挖中建筑物差异沉降影响分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(1):25-28.

(特约编辑 李军)

(上接第14页)

- [5] 张文福,赵文艳,张素梅. 混凝土双向压弯截面非线性分析算法[J]. 黑龙江工程学院学报,2001(2):13-16.
- [6] 伍凯,曹平周,薛建阳等. 型钢混凝土应力传递与黏结破坏机理分析[J]. 河海大学学报,2013(1):37-42.
- [7] 方志,IVAN T, Campbell. 不锈钢和CFRP混合配筋预应力混凝土梁的延性和变形性能[J]. 工程力学,2005(3):190-197.

- [8] 卢召红,王振,宫成欣. 高强钢筋混凝土梁裂缝性能有限元分析[J]. 大庆石油学院学报,2006(5):59-61.
- [9] 张智梅,白世桦,张振波. AFRP加固二次受力RC梁抗弯性能有限元分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2013,30(4):38-42.
- [10] 陈曦,周德源. 五种本构模型在钢管混凝土有限元中的比较[J]. 工程力学,2009(6):116-121.

(特约编辑 李军)