

交叉预应力锚索加固损伤支护桩现场试验研究

刘 林¹, 李雅丽^{2,3}, 薛 茜^{2,3}, 张心玥^{2,3}, 赵良杰^{2,3}, 梅 源^{2,3}

(1. 中铁二十局集团第六工程有限公司, 陕西 西安 710032; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 以典型工程为背景, 开展了交叉预应力锚索加固损伤支护桩的现场试验研究, 采用数值模拟与现场监测数据相结合的方法, 对交叉预应力锚索加固湿陷性黄土深基坑损伤支护桩的效果进行了分析, 并对支护桩的桩顶侧移、竖向位移和地表沉降的变化规律进行了研究。研究表明: 采用交叉预应力锚索加固损伤支护桩, 可有效增加桩体的稳定性, 减少基坑开挖或盾构掘进等施工过程对支护桩作用范围内的土体扰动, 且成本低廉、便于施工, 可作为黄土地区城市地下综合体交叉施工过程中桩体破坏加固的有效途径。

关键词: 地下空间工程; 湿陷性黄土; 预应力锚索; 损伤支护桩; 加固技术

中图分类号: TU392.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0024-09

Field test study on reinforcement of damaged supporting pile with cross-prestressed anchor cables

LIU Lin¹, LI Yali^{2,3}, XUE Qian^{2,3}, ZHANG Xinyue^{2,3}, ZHAO Liangjie^{2,3}, MEI Yuan^{2,3}

(1. No. 6 Engineering Corporation Limited of CR20G, Xi'an 710032, China;

2. College of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on a typical project, the field test research on the reinforcement of damaged supporting pile with cross prestressed anchor cable is carried out. By combining numerical simulation with field monitoring data, this paper analyzes the effect of cross prestressed anchor cable strengthening the damaged supporting pile of collapsible loess deep foundation pit, and the variation rules of pile top horizontal displacement, vertical displacement and ground displacement are studied. Results show that the cross prestressed anchor cable can effectively increase the stability of the pile body, reduce the soil disturbance caused by the construction process of foundation pit excavation or shield tunneling, at low cost and is convenient for construction. It can be used as an effective way to reinforce the damaged pile body in the cross construction process of urban underground complex in loess area.

Key words: underground space engineering; collapsible loess; prestressed anchor cable; damaged supporting pile; reinforcement technology

随着地下空间资源的开发利用, 地下工程建设项目的数量和规模也迅速发展。地下隧道在施工过程中常常会遇到既有支护桩等障碍物, 需提前对既有障碍桩进行破除并加固, 施工隐患大, 安全系数低。与无腰梁预应力锚索相比, 交叉预应力锚索加固拟破除障碍桩技术能降低基坑支护工程综合造价, 节约支护工程钢材用量, 施工快捷、便利, 支护结构受力均匀、变形易控制, 可增加基坑内的有效工作面。

Johnson 等^[1]对支护结构和土体进行了数值模

拟, 对土体在承受荷载的情况下的变形规律进行了研究。Yssushi^[2]进行了多种工况土体开挖的受力数值模拟, 并研究了其对基坑变形的影响。Zdravkovic 等^[3]研究了一些土体的经典分析方法, 并对不同的土体本构模型进行了应用评价。李英勇等^[4]利用 FLAC3D 软件进行数值模拟, 研究分析了预应力锚固体应力变化、位移变化规律, 不同因素对锚固体剪应力变化规律的影响, 并拟合了剪应力呈指数函数关系的分布公式。许健等^[5]对桩锚支护结构在黄土地区深大基坑中的应用效果进行了研

究,将数值模拟结果与现场的监测数据进行对比分析,得到了桩体的变形规律.赵文等^[6]通过对某基坑的监测数据进行归纳,对基坑中桩体变形与锚索预应力的变化规律进行了研究.李宝平等^[7]结合某采用桩锚支护的深基坑的监测数据和数值分析结果,对桩体随基坑开挖的变形规律进行了研究,并得出了应在设计阶段考虑时空效应影响的结论.刘永权^[8]介绍了一种能有效控制隧道围岩变形的高性能快速张拉预应力锚索新技术.杨志红^[9]探讨了深基坑桩锚支护体系中锚索预应力荷载的锁定瞬时损失、开挖及锚索施工中锚索预应力荷载变化和基坑侧向变形特性.因此,预应力锚索在基坑支护工程中的应用效能分析具有重要的理论意义和重大的工程应用价值.

为对在黄土地区的深大基坑工程中采用交叉预应力锚索加固拟破除障碍桩技术的工程应用效果进行分析,以某大型地下空间综合体为研究对象,结合数值分析与现场试验数据对其进行深入分析与探讨,拟为类似工程施工提供参考依据.

1 交叉预应力锚索加固技术

1.1 交叉预应力锚索结构形式

锚杆是腰梁传力的产物,因其由水泥注浆体和锚筋组成,具有不易弯曲的特点.锚索由水泥注浆体和钢绞线组成,自由段为柔性较好的钢绞线,将锚杆替换为锚索后,可进行绕桩固定.

交叉预应力锚索双向支座的两个面用来固定支护桩两侧的钢绞线,一个面的用于将钢绞线所受到的合力传递给护坡桩.该支座呈梯形,尺寸较小,重量较轻^[10-11],且该三个面均为承压面,具有较好的受力条件,图1为交叉预应力锚索结构示意图.图2和图3为交叉预应力锚索的两种支护型式,分别为“一桩一锚”和“一桩两锚”.

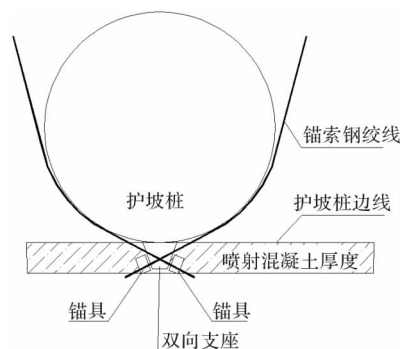


图1 交叉预应力锚索示意图

Fig.1 Schematic diagram of cross prestressed anchor cable

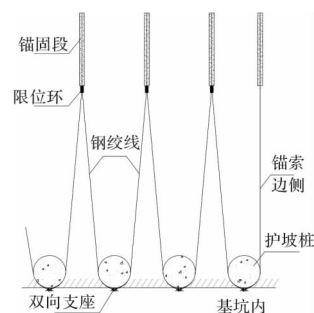


图2 一桩一锚结构形式示意图

Fig.2 Schematic diagram of one pile and one anchor structure

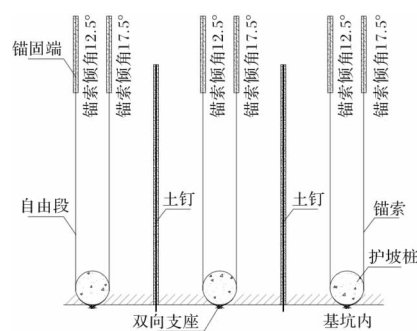


图3 一桩两锚结构形式示意图

Fig.3 Schematic diagram of one pile with two anchors

1.2 交叉预应力锚索加固技术施工工艺及特点

桩锚支护结构广泛应用于基坑施工的过程中,与其他支护形式相比较,优点明显.与地下连续墙相比,造价更低,经济性好;可达到的支护深度大,符合基坑工程施工技术发展的要求;与内支撑相比,支护结构体系简单,且要求的施工工作面小,能有效提高施工效率;与土钉支护体系相比,减小土体位移的效果更佳.而交叉预应力锚索加固技术与传统的桩锚支护结构相比,优势显著,其主要特点如下:

- (1)施工方便,减少人力投入;
- (2)肥槽空间占用少,减少开挖和回填量;
- (3)用钢量大幅减少;
- (4)受力条件好,能较好控制土体变形.

交叉预应力锚索加固拟破除障碍桩技术的施工过程为:①施工准备;②施作微型桩;③搭建施工平台;④开挖及支护初始井;⑤浇筑导轨;⑥设备安装;⑦加固支护桩;⑧对障碍桩进行破除;⑨顶进施工及监测.

1.3 工程实例背景

某基坑支护工程中,基坑长11.7 km,施工过程中均采用悬臂支护桩,约5 800根,其中采用交叉预应力锚索施工的约4 600根,工字钢腰梁+OVM型锚索支护桩约1 200根.本次研究的基坑

南北走向长 340 m, 东西走向长 137 m. 图 4 为交叉预应力锚索的加固位置及方式示意图, 施工现场如图 5 所示.

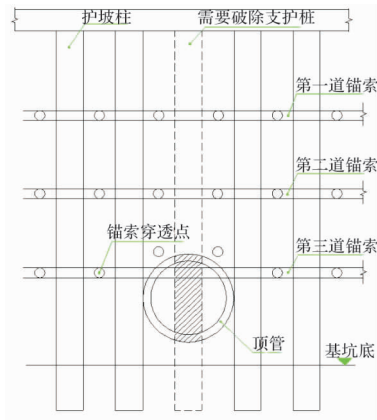


图 4 交叉预应力锚索加固示意图

Fig. 4 Site reinforcement diagram of cross prestressed anchor cable



图 5 交叉预应力锚索现场图

Fig. 5 Site drawing of cross prestressed anchor cable

2 数值分析

2.1 有限元模型的建立

2.1.1 设定与参数取值

数值模拟应用岩土工程专业有限元软件 MI-DAS GTS NX. 实际施工中的影响因素众多, 难以建立与实际情况完全相同的模型, 因此为得到较好的模拟结果, 对建立的有限元模型进行简化处理, 做出如下设定:

- (1)本次数值分析的对象为该基坑支护结构的某一段;
- (2)土体采用莫尔-库伦本构(M-C)模型;
- (3)各土层厚度水平均匀;
- (4)锚索采用植入式桁架单元、支护桩采用梁单元进行模拟;
- (5)基坑开挖前和过程中采取了止水和降水的措施, 故在数值模拟中没有将地下水的影响计算在内.

结合地质勘察情况, 对模型土体进行分层并设置参数. 模型土体分为七层, 从上到下分别为杂填土、素填土、黄土、古土壤、黄土、粉质黏土、中粗砂. 土体均采用莫尔-库伦弹塑性材料; 支护桩采用弹性材料, 设置为梁单元, 材质为 C30 混凝土, 桩径分为 0.8 m 和 1 m 两种; 预应力锚索采用植入式桁架单元, 弹性模量设为 196 GPa, 截面积为 0.000 14 m². 进行数值分析时土层的物理参数取值如表 1 所示, 支护桩参数如表 2 所示, 锚索的参数设置见表 3.

表 1 土层的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of soil layer

土层名称	土层厚度/m	内摩擦角 $\varphi/^{\circ}$	泊松比 μ	重度 $\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	粘聚力 c/kPa	压缩模量/MPa
①-1 杂填土	0.8	11	0.30	17.8	—	6
①-2 素填土	0.6	15	0.30	16.4	11	4
②黄土	10.1	21	0.29	15.4	24	10
③古土壤	4.2	22	0.31	17.4	25	10
④黄土	7.9	21	0.28	16.2	24	7
⑥-1 粉质黏土	3.9	19	0.28	19.6	25	6
⑥-2 中粗砂	2.7	32	0.30	20.5	—	22

表 2 支护桩参数

Tab. 2 Parameters of supporting pile

桩型	混凝土强度	弹性模量/MPa	重度 $\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	泊松比 μ	桩径/m	桩长/m
X1 护坡桩	C30	3×10^4	24	0.2	0.8	15
X5 护坡桩					1.0	21

表 3 锚索参数
Tab. 3 Anchor parameters

桩型	锚索类型	层数	水平间距/m	入射角/°	总长/m	锚固段长度/m	弹性模量/MPa	预应力/kN	
X1 护坡桩	交叉预应力锚索	1	2	15	13	5	1.96×10^5	600	
		2	2	15	13	4	1.96×10^5	620	
X5 护坡桩		1	2.2	15	16	7	1.96×10^5	600	
		2	2.2	15	16	5	1.96×10^5	620	
		3	2.2	15	16	4	1.96×10^5	650	

在进行此次模型建立和计算的过程中, 截取了包含典型桩型施工的基坑部分, 该基坑支护采用桩锚支护结构, 基坑的长宽深分别设为 20 m、15 m 以及 14 m. 如图 6 所示, 土体长度为 45 m, 深度取为 30 m. 得到的数值模型单元个数为 29 155 个, 节点个数为 31 513 个.

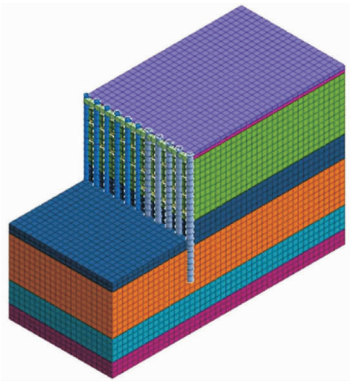


图 6 土体及支护桩模型

Fig. 6 Soil and supporting pile model

模型的边界条件为水平方向不允许移动, 竖直方向可进行移动; 土体模型底面为固定支座约束.

对模型施加荷载时, 只算入自重, 不计入其他附加荷载, 重力加速度设为 9.8 m/s^2 .

2.1.2 施工过程模拟

在模拟过程中, 为对施工过程进行更为实际的模拟, 利用“钝化”和“激活”命令来模拟开挖过程, 模拟的工况如表 4 所示. 该基坑采用明挖顺作法施工, 开挖一层土体, 施加一层支撑, 如此循环, 直至完成整个基坑工程的施作.

表 4 数值分析工况表

Tab. 4 Numerical analysis table

工况	工况描述
一	地应力平衡
二	支护桩施工
三	第一层土体开挖(4 m)
四	第二层土体开挖(3 m), 第一道锚索施作
五	第三层土体开挖(3 m), 第二道锚索施作
六	第四层土体开挖(4 m), 第三道锚索施作
七	障碍桩破除

2.2 模拟结果分析

2.2.1 桩身侧移结果分析

交叉预应力锚索加固支护桩效果的重要指标之

一就是其桩身侧移, 在计算模型中分别设定了 X1 型桩 6 根及 X5 型桩 5 根, 对图 7 中由左上到右下依次编号为桩①②③④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪, 且桩⑨和④为破除桩. 图 7 为支护桩桩身侧移云图, 图 8 和图 9 分别为桩④(X1 型桩)和桩⑨(X5 型桩)的支护桩桩身侧移曲线图(向坑内位移为正, 反之为负).

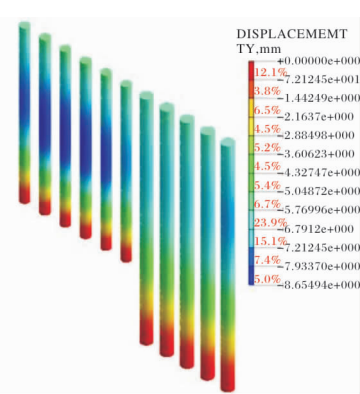


图 7 桩身侧移云图

Fig. 7 Lateral displacement nephogram of pile

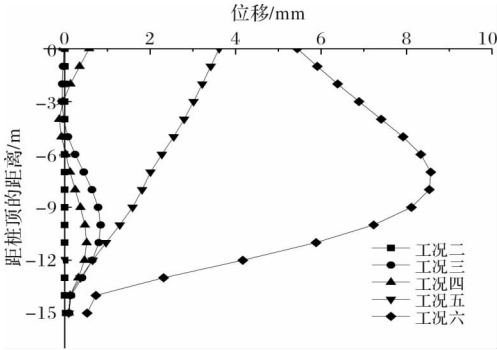


图 8 桩④桩身侧移曲线图

Fig. 8 Lateral displacement curve of pile 4

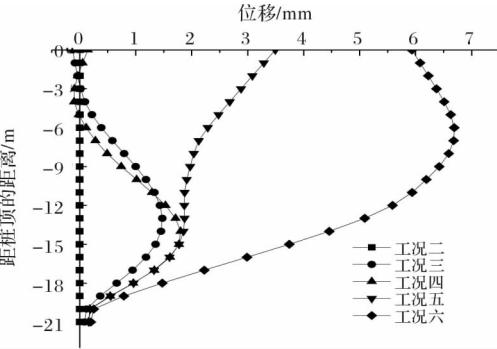


图 9 桩⑨桩身侧移曲线图

Fig. 9 Lateral displacement curve of pile 9

根据图 8 和 9, 工况三(开挖第一层土 4 m)时桩④和桩⑨的侧移曲线近“S”型, 桩④在桩顶向下 10 m 位置处发生了最大侧移, 其值为 0.839 7 mm, 其倾斜于内侧基坑, 而距桩顶 0~4 m 位置处, 桩身倾向于基坑外侧; 工况三, 桩⑨在桩顶向下 13 m 位置处发生了最大侧移, 其值为 1.469 8 mm, 其倾斜于内侧基坑, 而距桩顶 0~2 m 位置处, 桩身倾向于基坑外侧。造成该现象的原因是土体的开挖卸荷导致基坑内外土体应力分布不均, 土压力作用于支护桩导致桩身产生了位移变化。

工况四(开挖第二层土 3 m, 距桩顶 4 m 处施作第一道锚索), 桩④和桩⑨桩身侧移曲线整体仍近“S”型, 桩④在桩顶处产生了最大的侧移, 其值为 0.574 9 mm, 桩⑨在距桩顶 14 m 位置处产生了最大的侧移, 其值为 1.801 1 mm。

工况五(开挖第三层土 3 m, 距桩顶 7 m 处施作第二道锚索)中, 桩④和桩⑨的桩身侧移曲线近“三角形”型, 两桩均在桩顶处产生了最大侧移, 其值分别为 3.624 9 mm、3.501 1 mm。

工况六(开挖第三层土 4 m, 距桩顶 10 m 处施作第三道锚索)中, 桩④和桩⑨的桩身侧移曲线近“抛物线”型; 桩④在桩顶向下 7 m 处产生了桩身最大侧移, 其值为 8.570 1 mm; 桩⑨在桩顶向下 6 m 处产生了桩身最大侧移, 其值为 6.690 4 mm。

2.2.2 桩顶侧移结果分析

如图 10 所示, 为桩④和桩⑨的桩顶侧移随工况变化曲线图(向坑内位移为正, 反之为负)。

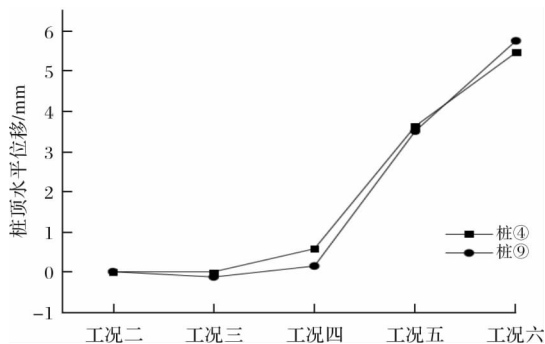


图 10 支护桩桩顶侧移随工况变化曲线图

Fig. 10 Curve of lateral displacement of supporting pile top changing with working condition

由图 10 知, 随工况进行, 桩④和桩⑨的桩顶侧移出现了增大趋势。工况三(即第一步开挖)中, 桩④和桩⑨均产生了向基坑外的位移, 工况四由于进行了第一道锚索的施作, 因此桩④和桩⑨的桩顶侧移趋势被改变, 产生了向基坑内的位移; 随着工

况进行, 开挖深度和锚索都在增加, 桩顶侧移值仍在增长, 但增加幅度减小; 在工况五和六, 桩顶侧移有了明显增加, 这是由于随着开挖深度较大, 桩身的插入比逐渐减小, 同时预应力锚索的加固位置与桩顶距离也越来越大, 导致锚索的约束效果逐渐不明显。桩④和桩⑨的最终桩顶侧移值分别为 5.45 mm 和 5.74 mm, 均为向基坑内侧偏移。

2.2.3 桩顶竖向位移结果分析

图 11 为桩④和桩⑨的桩顶竖向位移随工况变化曲线图。

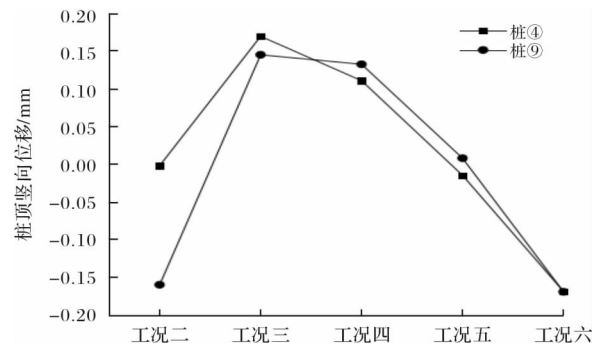


图 11 桩顶竖向位移随工况变化曲线

Fig. 11 Variation curve of vertical displacement of pile top with working condition

由图 11 可知, 随工况的进行, 桩④和桩⑨的桩顶竖向位移呈“上抛物线”型。第一层土开挖后, 土体应力释放, 坑底土隆起, 引起支护桩上浮。工况四中, 由于进行了第一道锚索的施作, 锚索对桩身产生了向下的力, 对桩体的上浮造成了限制, 因此桩顶的竖向位移有所减小, 且随着工况的进行, 施作了后续锚索, 因此桩顶的竖向位移也随之减小, 在工况六产生了沉降效果。桩④和桩⑨的最终桩顶竖向位移值均为 0.170 mm; 桩④和桩⑨的桩顶最大上浮值分别为 0.170 mm 和 0.145 mm。桩④和桩⑨的桩顶最大上浮值和沉降值在所有工况中均不超过 0.2 mm, 因而可知, 基坑支护桩采用交叉预应力锚索进行加固, 对桩顶的竖向位移控制有较好效果。

2.2.4 地表竖向位移结果分析

图 12 为基坑土体的地表竖向位移云图, 图 13 为根据模型结果取沿基坑长度中心线的地表竖向位移曲线。

由图 13, 地表沉降随着距基坑距离增加而减小, 工况七产生了所有工况中的最大地表竖向位移, 其值为 -13.21 mm; 在工况四产生了最大的地表隆起, 其值为 5.90 mm。工况二在距基坑边

15 m 以外位置处, 地表位移接近于零; 工况三、四和五中, 在距坑边 15 m 范围内, 地表呈隆起状态, 且随距离的增加有所减小, 其原因是桩体的上浮摩擦导致了地表土体的向上位移, 而距坑边 15 m 范围外, 地表产生了沉降, 且随距离增大有所增加, 但其值较小; 工况六, 地表竖向位移随着距离增大而有所增长, 在 3 m 位置产生拐点, 随距离增大有所减小, 并在 15 m 外趋于平缓; 其他工况中, 地表的竖向位移随距离增加有所减小, 并在 15 m 外趋于平缓; 工况七中, 随着坑外距离的增大地表沉降有所增大, 在 6 m 位置产生拐点, 随后随距离增大有所减小, 并在 15 m 外趋于平缓. 这一规律一致于前述桩顶竖向位移.

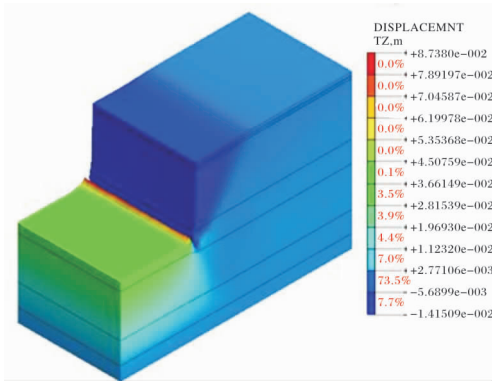


图 12 地表竖向位移云图

Fig. 12 Vertical displacement nephogram

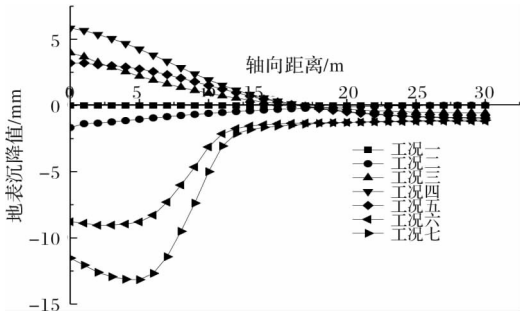


图 13 各工况地表竖向位移模拟结果曲线

Fig. 13 Simulation results of surface vertical displacement under various working conditions

3 工程实例分析

3.1 监测方案

以紧邻幸福北路的障碍桩 X1 桩为对象, 进行位移规律研究. 图 14 为测点布置示意. 其中, W347 为桩顶水平位移测点, Z347 为桩顶竖向位移测点, 测点 3581、3582、3583 为拟破除桩 X1 桩临边的地表竖向位移观测点, 分别距离基坑边缘 8 m、13 m、18 m.

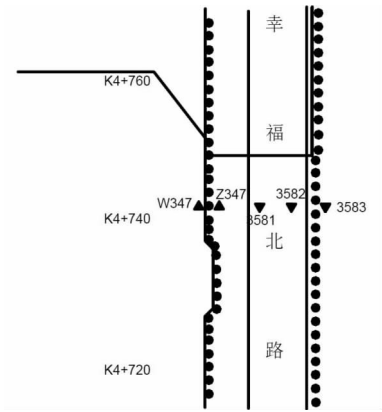


图 14 测点布置示意

Fig. 14 Layout of monitoring points

表 5 为基坑工程基坑开挖及支护桩加固工况进展说明.

表 5 基坑开挖及支护桩加固进度表

Tab. 5 Schedule of excavation of foundation pit and reinforcement of retaining piles

工况	进度	天数/d
二	支护桩施作	13
三	第一层土开挖(4m)	32
四	第二层土开挖(3m), 第一道锚索施作	33
五	第三层土开挖(3m), 第二道锚索施作	71
六	第四层土开挖(4m), 第三道锚索施作	105
七	障碍桩破除	247

3.2 桩顶侧移变化规律分析

选取桩顶侧移测点中拟破除桩 X1 桩的观测点 W347 进行分析. 观测点 W347 自 2018 年 5 月 22 日开始, 至 2019 年 2 月 11 日为止, 共观测了 89 次. 桩顶水平位移历时曲线如图 15 所示(向坑内位移为正, 反之为负).

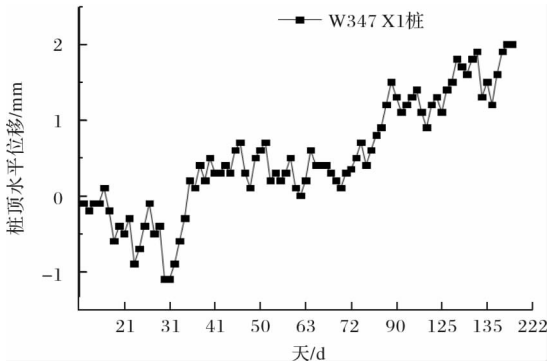


图 15 X1 桩桩顶水平位移历时曲线

Fig. 15 Horizontal displacement duration curve of X1 pile top

由图 15 可知, 障碍桩桩顶水平位移随基坑开挖深度的增加而增大, 产生了先向外后向内的变形. 产生该现象的原因是, 周边土对桩身的作用会随着工程的进行差异逐渐增大, 从而导致了桩顶侧

移增加;在所有锚索的施作过程中,锚索加固会导致桩顶侧移趋向平缓,但随着基坑开挖及锚索预应力损失,桩顶侧移又会有所增大,因此曲线呈阶梯状反复;开挖最终步,桩身插入比减小,同时锚索加固处距桩顶较远,对桩顶的加固效果减弱,因此桩顶侧移增大;桩破除后,X1 桩的桩顶侧移仍增加,最终值达 2 mm,其最大变形速率约为 0.7 mm/d. 该值在监控预警标准值范围内,因此交叉预应力锚索加固基坑支护桩可行,施工效果较好.

3.3 桩顶竖向位移变化规律分析

选取 X1 桩测点 Z347 作为分析对象. 测点 Z347 自 2018 年 5 月 1 日开始,至 2019 年 2 月 8 日为止,共观测了 91 次. 桩顶竖向位移历时曲线如图 16 所示.

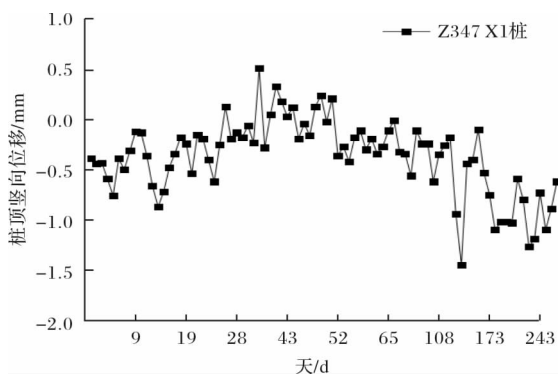


图 16 X1 桩桩顶竖向位移历时曲线

Fig. 16 Vertical displacement duration curve of X1 pile top

由图 16,桩顶竖向位移曲线呈“上凸”型. 土体第一步开挖中,桩身由沉变浮,其原因为第一层土体开挖产生的应力释放导致了坑底土隆起,从而带动桩体向上位移;土体第二步开挖中,由于施加了预应力锚索,桩顶由浮变沉;随着基坑的继续开挖和锚索施作,桩顶产生稳定的向下位移,且在最后一个开挖步,产生了较大的增长幅度,桩顶向下的位移达到了最大值,这是由于此处锚索距离桩顶较远,因此对桩顶影响较小. 破除桩破桩阶段的桩顶最大竖向位移值为-0.61 mm,最大变形速率约为 0.58 mm/d,其值均在预警范围内,且安全储备较大,因此交叉预应力锚索在加固深基坑损伤支护桩的应用中可以有效控制桩顶位移.

3.4 地表竖向位移变化规律分析地表竖向位移监测

由图 17 可知,地表竖向位移随基坑开挖深度的增加而增大,地表位移先负后正. 第一道锚索施作后,地表位移由负到正,同时在后续工况中,随锚索施作地表沉降逐渐稳定,变形曲线出现平稳段,直到障碍桩破除后,地表沉降发生了较大波

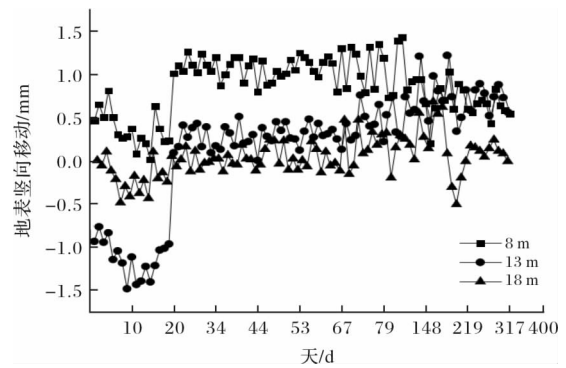


图 17 距基坑边缘不同距离测点地表竖向变形历时曲线

Fig. 17 Vertical deformation duration curve of ground surface at different distance from the edge of foundation pit
随着工况进行,离基坑越远,地表隆起便越小;最大地表沉降点位于距基坑 13m 处,这与文献[12]中的现象相一致,其值为-1.51 mm;距基坑 18 m 处出现地表最大隆起,其值为 1.42 mm;地表最大变形速率为 1.05 mm/d. 地表最大竖向位移与变形速率值均在预警范围内,且安全储备较大,因此交叉预应力锚索在加固深基坑损伤支护桩的应用中可以有效控制地表变形.

4 模拟与实测对比分析

数值模拟为实际施工前的预分析,通过模拟施工过程,分析支护桩和地表的变形规律,为实际工程提供指导. 为验证模型的有效性,以期对此后同类工程提供借鉴,有必要对模拟结果与实测数据进行对比分析.

4.1 桩顶侧移对比分析

各工况下桩顶水平位移数值模拟和监测数据变化对比曲线图如图 18 所示(“+”为基坑内,“-”为基坑外).

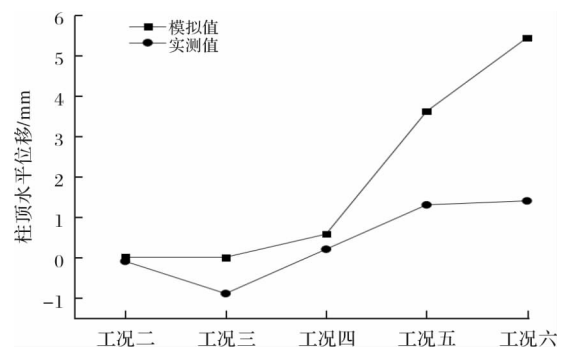


图 18 桩顶侧移对比曲线

Fig. 18 Comparison curve of pile top lateral displacement

由图 18 知,桩顶侧移的模拟与实测曲线具有相一致的变化趋势. 模拟与实测中的桩顶侧移在工况三(第一层土开挖)时均向坑外位移,在工况四

(第一道锚索施作), 向基坑内侧偏移, 随着工况进行, 桩顶侧移继续增大, 最终桩顶位移的数值模拟结果和监测结果分别为 5.45 mm、1.39 mm。模拟结果较大于实测数据, 且变化幅度也较监测数据的变化幅度更加明显, 这是由于在模拟过程中未考虑实际工程中的施工荷载、土层的不均匀分布以及其他不确定因素。所有结果均小于工程监测给出的控制值和预警值, 说明模型能够较好的模拟桩顶水平位移的变化。

4.2 桩顶竖向位移对比分析

各工况桩顶竖向位移数值模拟和监测数据变化对比曲线图如图 19 所示。

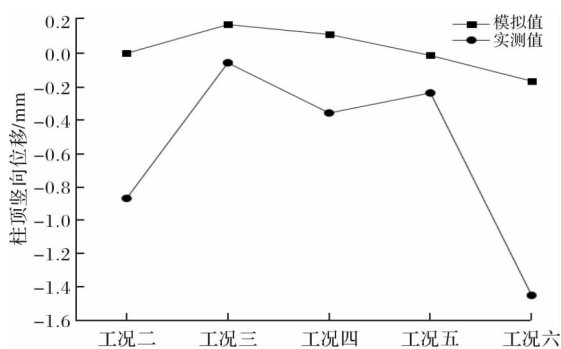


图 19 桩顶竖向位移对比曲线图

Fig. 19 Comparison curve of vertical displacement of pile top

由图 19 知, 桩顶竖向位移的模拟与实测曲线具有相一致的变化趋势, 均先减小后增大, 数值模拟曲线整体相对监测曲线变化幅度较小, 最大桩顶沉降的模拟和实测结果分别为 0.17 mm、1.45 mm, 且在实测中, 桩顶没有发生上浮现象, 模拟结果中桩顶上浮最大值为 0.17 mm, 说明在工程现场基坑的安全稳定工作起到了良好的作用。模拟及实测结果在工程控制要求之内, 桩顶竖向位移最大值数值模拟结果均较工程实际监测结果小得多, 这是由于在模拟过程中未考虑实际工程中的施工荷载、土层的不均匀分布以及其他不确定因素。总体上, 模型能够较好的模拟桩顶竖向位移的变化趋势, 能较为准确的反映交叉预应力锚索加固拟破除障碍桩技术在工程施工过程中对桩顶水平位移的控制效果。

4.3 地表竖向位移对比分析

模拟与实测地表竖向位移变化对比曲线图如图 20 所示。

由图 20 知, 地表竖向位移的模拟与实测曲线具有相一致的变化趋势, 地表变形在工况三开挖一阶段由沉降变为隆起, 且在工况四(第一道锚索施作), 变形减小或增幅变缓; 离基坑越远变形越小,

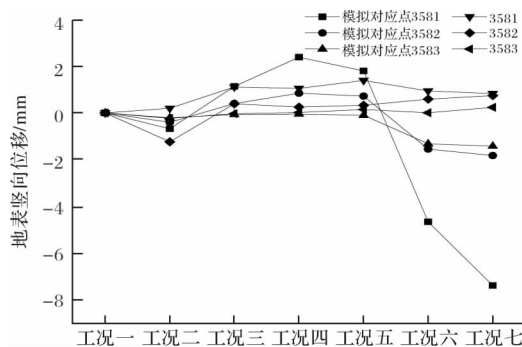


图 20 地表竖向位移对比曲线图

Fig. 20 Comparison curve of surface vertical displacement

且多为沉降; 距基坑 18 m 处最大地表竖向位移的数值模拟结果和监测结果分别为 1.42 mm、0.23 mm, 最大地表隆起值的监测结果为 0.24 mm, 模拟结果在此处则无隆起。模拟结果普遍大于实测结果, 其原因为模拟中未考虑实际工程中的施工荷载、土层的不均匀分布以及其他不确定因素。但从整体看, 实测与模拟结果相差不大且趋势一致, 同时所有结果均在工程预警值之内, 说明模型能够较好的模拟地表竖向位移的变化。

综上所述, 数值模拟结果较好的贴近了实测数据, 在数值上两者差异不大, 在变化规律上两者有相同趋势。因此, 采用 MIDAS GTS NX 进行交叉预应力锚索加固损伤支护桩施工的数值模拟, 并采用前述设定和参数取值, 可以取得较好的模拟效果, 并对实际工程进行指导。

5 结论

以实际工程为背景, 针对湿陷性黄土深基坑采用交叉预应力锚索加固损伤支护桩的应用效果进行了现场实测和数值模拟, 得到如下结论:

- (1)通过分析实测数据, 得到交叉预应力锚索加固深基坑损伤支护桩过程中, 桩顶侧移、竖向位移及地表沉降随施工进行的变化规律。
- (2)通过建立施工过程数值模型, 分析了交叉预应力锚索加固深基坑损伤支护桩过程中, 桩顶侧移、桩身侧移、桩顶竖向位移及地表沉降随施工进行的变化规律, 并与实测数据进行对比, 验证了模型的有效性, 可为同类工程提供参考。

参考文献 References

- [1] JOHNSON K, LEMCKE P, KARUNASENA W, et al. Modelling the load-deformation response of deep foundations under oblique loading [J]. Environment Modelling & Software, 2006, 21(9): 1375-1380.
- [2] YSSUSHI A, OSAMU K, OSAMU M, et al. A nu-

- merical study on ground displacement and stress during and after the installation of deep circular diaphragm walls and soil excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(5): 791-807.
- [3] ZDRAVKOVIC L, CARTER J. Constitutive and numerical modelling[J]. Thomas Telford, 2008, 58(5): 1-8.
- [4] 李英勇, 张顶立, 王松根. 预应力锚索锚固作用机理的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(S2): 921-925.
LI Yingyong, ZHANG Dingli, WANG Songgen. Research on numerical simulation of anchoring mechanism of prestressed anchor cables[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S2): 921-925.
- [5] 许健, 杨少飞, 吴海洋, 等. 黄土地区深大基坑桩锚支护结构监测与数值分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 517-524.
XU Jian, YANG Shaofei, WU Haiyang, et al. Monitoring and numerical analysis of pile-anchor supporting structure for deep and large foundation[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 517-524.
- [6] 赵文, 韩健勇, 李慎刚, 等. 砂土地层深基坑桩锚支护体系的受力与变形[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015(4): 576-580, 595.
ZHAO Wen, HAN Jianyong, LI Shengang, et al. Stresses and deformations in pile-anchor support system of deep foundation pit in sandy layers[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015(4): 576-580, 595.
- [7] 李宝平, 张玉, 李军. 桩锚式支护结构的变形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007(S1): 1291-1294.
LI Baoping, ZHANG Yu, LI Jun. Research on the deformation character of anchor piles retaining structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007(S1): 1291-1294.
- [8] 刘永权, 刘新荣, 杨忠平, 等. 不同类型预应力锚索锚固性能现场试验对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 275-283.
LIU Yongquan, LIU Xinrong, YANG Zhongping, et al. Field test on anchorage performance of different types of prestressed cables[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 275-283.
- [9] 杨志红, 郭忠贤. 深基坑加固锚索预应力荷载变化规律的监测分析[J]. 岩土工程学报, 2012(S1): 145-148.
YANG Zhihong, GUO Zhongxian. Monitoring analysis of pre-stressed load of anchor cables for deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012(S1): 145-148.
- [10] 韩凤霞. 一种支撑横向受力桩的省料装置: CN201320526248. 2[P]. 2014-03-12.
HAN Fengxia. A material saving device for supporting laterally loaded piles: CN201320526248. 2[P]. 2014-03-12.
- [11] 韩凤霞, 田树玉, 杨晓鹏. 一种桩锚连接的新方法——双向支座法[J]. 岩土工程技术, 2015, 29(1): 46-50.
HAN Fengxia, TIAN Shuyu, YANG Xiaopeng. A new method of pile anchor connection-bilateral support method[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2015, 29(1): 46-50.
- [12] MEI Yuan, LI Yali, WANG Xueyan, et al. Statistical analysis of deformation laws of deep foundation pits in collapsible loess[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44: 8347-8360.

(编辑 沈 波)