

深基坑工程支护桩侵限切除及加固处理研究

房江锋, 严 树, 刘国栋, 赵鑫波, 李 静, 王传龙

(深圳宏业基岩土科技股份有限公司, 广东 深圳 518029)

摘要: 咬合桩在深基坑工程中已得到广泛应用, 受到地质条件、施工组织、操作能力等因素的影响, 支护桩侵限事故经常发生。本文通过纤维模型有限元计算程序, 计算了侵限处理前、后支护桩的受弯承载力, 同时结合桩身深层水平位移监测反分析结果, 论证了采用粘钢加固方法处理侵限支护桩的可行性。利用基坑的空间效应, 采用分序跳桩施工对侵限支护桩进行切割和加固, 基坑处于安全稳定状态; 对加固处理后的监测成果及桩身受弯情况进行分析, 结果显示截面承受的弯矩值小于截面受弯承载力。本项目加固施工取得了良好的效果, 有效解决了基坑支护桩侵限的处理难题, 可为同类项目提供借鉴。

关键词: 支护桩; 侵限桩; 空间效应; 粘钢加固; 深基坑

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)01-0147-07

Study on the invasion limit excision and support piles reinforcement in deep foundation pit

FANG Jiangfeng, YAN Shu, LIU Guodong, ZHAO Xinbo, LI Jing, WANG Chuanlong

(Shenzhen Hongyeji Geotechnical Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518029, China)

Abstract: The interlocking pile has been widely used in deep foundation pit engineering, and accidents of support piles invasion often occur due to factors such as geological conditions, construction organization, and operational ability. This article uses a fiber model finite element calculation program to calculate the bending bearing capacity of support piles before and after the invasion treatment. At the same time, combined with the back analysis results of the deep horizontal displacement monitoring of the pile, it is demonstrated that the use of adhesive steel reinforcement method to treat the invasion support piles is feasible. Using the spatial effect of the foundation pit, the step-by-step pile jumping construction is used to cut and reinforce the invasion support piles, and the foundation pit is in a safe and stable state. Analysis of the monitoring results after reinforcement treatment and bending condition of pile body shows that the bending moment value borne by the section is less than the bending bearing capacity of the section. The reinforcement construction of this project has achieved good results, effectively solving the invasion limit problem of the support piles in foundation pits, which can provide reference for similar projects.

Key words: support pile; invasion limit pile; spatial effect; steel plate adhesion reinforcement; deep foundation pit

0 引言

随着城市化建设的不断深入, 城市建设用地越来越紧张, 逐步出现了越来越多的项目面临周边环境复杂、毗邻地铁、高压电缆、地下室结构无退线等困境, 该类项目对基坑支护桩施工的精度和垂直度

要求极高, 由此给深基坑施工带来了新的难点。深圳地区深基坑支护多采用咬合桩, 而咬合桩施工中采用旋挖硬咬合工艺的较多。硬咬合施工受到地质条件、施工工序、素桩强度、钻具导向性、操作人员技术水平等诸多因素影响, 经常会出现支护桩对

收稿日期: 2023-05-24; 修回日期: 2023-09-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.01.020

第一作者: 房江锋, 男, 汉族, 1984年生, 高级工程师, 岩土工程专业, 硕士, 主要从事深基坑、桩基础施工工作, 广东省深圳市南山区桃园街道怡然天地居4A301, fangjf@foxmail.com。

引用格式: 房江锋, 严树, 刘国栋, 等. 深基坑工程支护桩侵限切除及加固处理研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 147-153.

FANG Jiangfeng, YAN Shu, LIU Guodong, et al. Study on the invasion limit excision and support piles reinforcement in deep foundation pit[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 147-153.

地下室外墙的侵限事故。孙玉辉等^[1]根据侵限程度,提出了接桩法、补桩法、力传递法、增设锚索法等处理方法。谢军等^[2]在地铁车站围护结构侵限处理中对比了钻孔灌注桩+MJS旋喷桩支护、钻孔灌注桩+高压旋喷桩支护、钻孔咬合桩及高压旋喷桩支护等处理方案,认为MJS旋喷桩施工所需场地小、桩长大、桩间咬合充分,在粉土粉砂层中成桩质量有保证,止水效果好,工程可实施性强。孙一鸣^[3]按围护桩侵限程度不同将侵限事故划分为轻微、较严重、严重、极严重等4类,并计算了桩身截面损失引起的承载力变化规律,并提出了不同程度下的处理措施。丁晓军^[4]使用二次逼近法,对工程建设中常见的支护结构侵限问题处理而引起的削桩问题,建立了支护桩局部破除混凝土后的正截面抗弯承载能力计算方法,并与现场实施的工程项目相结合,对侵限削桩后的支护结构体系安全性进行了分析。

本文研究的工程所面对的问题涉及到周边无施工空间、管廊等级高、建设方用地面积狭小等综合因素,同时出现连续侵限的情况,处理难度较大;而目前研究的成果均无可借鉴案例。通过借鉴结构加固的施工方法和经验,对桩截面切削和加固后承载力进行计算,对处理前的深层水平位移监测数据进行反分析、充分考虑基坑体系的空间效应,最终形成粘钢加固处理方案。处理过程中,加强基坑监测频次,同时对加固后桩身的深层水平位移监测结果、裂缝等进行分析,讨论了桩身刚度变化及土压力重分布对桩身受力的影响,为今后类似的工程提供借鉴。

1 工程概况

1.1 基坑支护概况

项目位于深圳前海片区,红线内占地2911.25 m²,场地极为狭小。基坑支护采用咬合桩+3道内支撑,基坑开挖深度19.6~22.3 m。北侧及东西侧采用 $\varnothing 1.2$ m(东南段1.4 m)、间距1.8 m的荤素咬合桩结合3道钢筋混凝土内支撑的支护方式;南侧在利用在建项目咬合桩的基础上,增加了1排 $\varnothing 1.2$ m、间距1.8 m的灌注桩加挂网喷锚支护(本项目比南侧在建基坑深3.2~5.4 m)。基坑西侧邻近在建的深圳地铁13号线后海站,位于地铁安全保护区范围内;北侧分布有110 kV高压电缆,电缆管沟侵入红线内;东侧沿红线分布有高压电缆及临建。因用地紧张,设计肥槽仅预留15~30 cm,基坑典型剖面见图1。

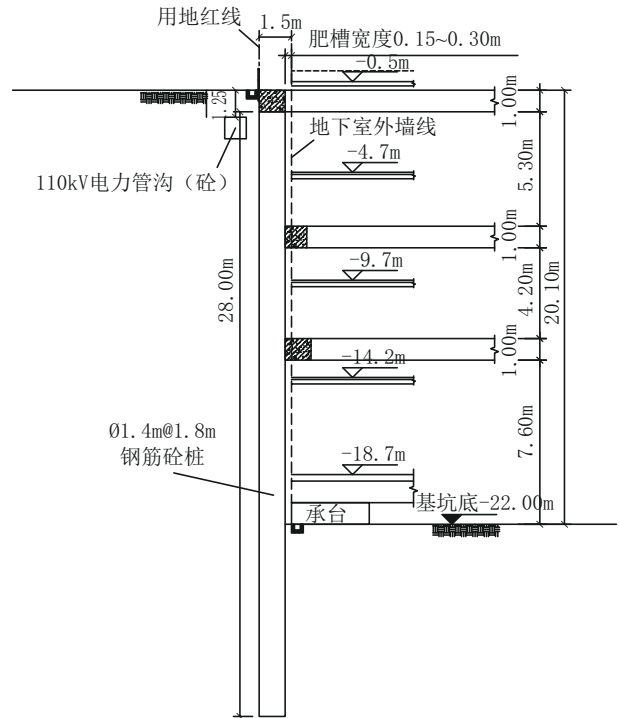


图1 典型设计剖面

Fig.1 Typical design profile

1.2 侵限情况统计

开挖至基坑底后,利用全站仪分别在坑底及第三道支撑梁施放地下室外墙控制线,使用量尺对每一根支护桩进行了测量,东侧剖面统计的侵限桩位示意图见图2。

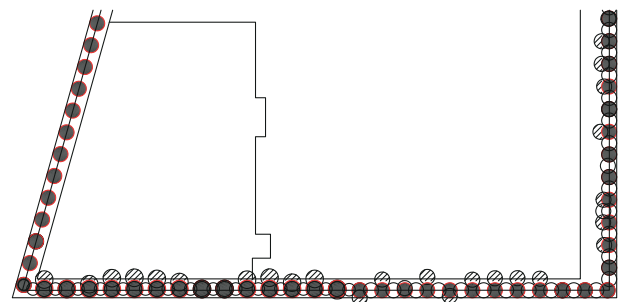


图2 侵限桩示意

Fig.2 Schematic diagram of invasion limit pile

经现场测量,东侧支护桩在底板处桩身侵入地下室结构为20~81 cm,侵限支护桩为16根。

2 处理方案比选

在土方开挖过程中,随着土方开挖进度,分别测量每层支撑标高处的侵限情况。经对比、分析结构

图纸和测量数据,侵限影响严重的区段为第三道支撑至基坑底部区段;第三道支撑以上部分,侵限程度较低。因此,本次处理的重点区域为第三道支撑以下段的支护桩。结合地质条件、周边场地条件、地下室结构设计等多种因素,论证了基坑外侧补桩+注浆方案^[5-7]、地下室外墙退线方案和粘钢加固方案^[8-10]。从地下室面积损失、建筑使用功能、施工可行性、经济损失等方面综合考虑,采用粘钢加固方案处理为最优方案。

3 计算分析

3.1 异形截面建模

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(2015年版)^[11]和《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[12]等相关规范仅提供了圆截面承载力计算相关理论,尚无法计算桩切除后形成的异形断面及张贴钢板后截面的承载能力,因此需进行选取适当的计算工具进行复核计算。

纤维模型有限元计算程序广泛应用于异形截面分析领域,可以对任意截面进行全过程截面分析。工程中常用来分析各种截面(如异形柱、组合截面等)的非线性特征点及承载力校核。本次采用纤维模型有限元计算程序对支护桩截面进行计算复核。切除侵限部分、粘钢加固后截面模型见图 3。

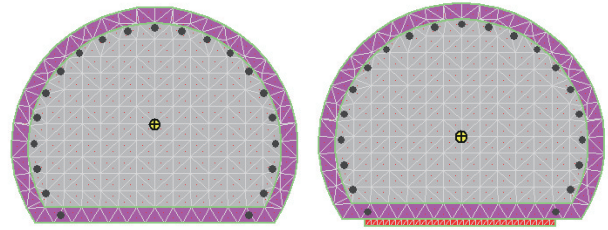


图 3 计算模型

Fig.3 Calculation model

本文利用纤维模型有限元计算程序计算支护桩极限受弯承载力设计值,因此材料强度均取用设计值。混凝土结构设计规范给出的单轴受压应力-应变曲线可以考虑箍筋约束作用、应变梯度等因素,通过对抗压强度代表值、峰值压应变、曲线形状参数适当修正而得到对应本构关系;钢筋本构模型采用不考虑强化阶段的双直线型模型,详见《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)附录 C 及条文说明^[11]。

3.2 承载力分析

计算选取东侧剖面支护桩进行计算,该部位原设计支护桩桩径为 1.4 m,混凝土为水下 C30,桩内钢筋为 28 根 C28、HRB400 钢筋。由原设计可知,在开挖至坑底工况下,支护桩桩身弯矩最大出现在基坑底与第三道支撑之间,弯矩值为 3068.70 kN·m,如图 4 所示。

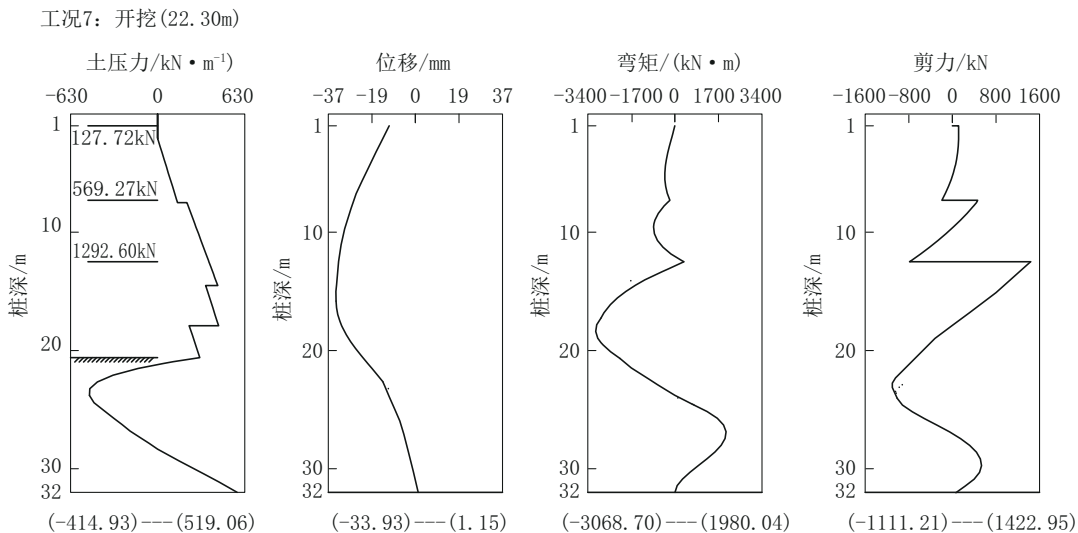


图 4 支护桩设计弯矩

Fig.4 Bending moment diagram of support pile

经统计分析,采用粘钢加固法处理,桩身切除量最大为 500 mm,选取该桩作为最不利工况进行计

算。此时该桩将切除 11 根钢筋,经计算切除后该桩剩余截面的弯矩-曲率(M-φ)曲线如图 5 所示,钢板

材质为Q355,规格为1000 mm×10 mm。计算结果显示,桩身切除500 mm,主筋切除11根,桩身抗弯承载力降低为原桩的31.3%;粘钢加固后,桩身抗弯承载力为原桩的71.7%,且大于设计工况下桩身弯矩。从各截面的 $M-\varphi$ 曲线可知,各截面发挥出有效弯矩抗力时对应的曲率不同,即桩身切除、加固后相较于原桩身的变形将有所增大。

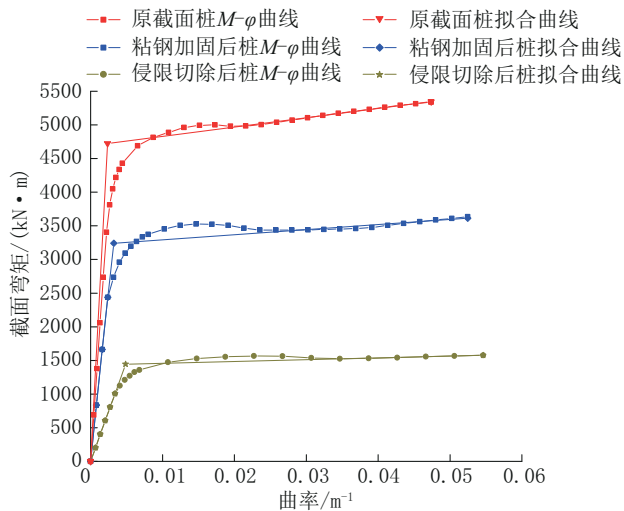


图5 各截面 $M-\varphi$ 曲线

Fig.5 $M-\varphi$ curves of each section

3.3 监测数据分析

(1)基坑支护桩主要承受侧向土压力,为受弯构件。桩身变形曲线和变形曲率之间的关系可以用如下公式表示:

$$\varphi(x) = \frac{f^2(x)}{x^2} \approx -\frac{1}{R} = -\varphi \quad (1)$$

式中: x ——支护桩沿着基坑深度方向坐标数据; R ——函数图象的曲率半径; φ ——函数曲率。

基于弹性地基梁的假设,对支护桩受力进行分析,可以采用如下的微分方程求解支护桩的变形曲线方程:

$$EI \frac{f^4(x)}{dx^4} + kf(x) + p(x) - q(x) = 0 \quad (2)$$

根据材料力学纯弯构件假设,杆件结构的变形函数、变形曲率和杆件所受弯矩 M 间的关系如下:

$$M = EI\varphi \quad (3)$$

式中: EI ——杆件截面抗弯刚度; M ——截面弯矩。

根据式(3)可以计算出支护桩各个截面上所受弯矩值。

王佳贺等^[13]研究了基于深层水平位移监测监测曲线的基坑围护桩弯矩反分析,通过反分析可以充分掌握桩身实际受力情况。李文广等^[14]提出了光滑样条拟合围护墙变形求曲率的计算方法,将计算得到的弯矩,与通过钢筋应力计推算得到的弯矩进行对比分析,发现与通过钢筋应力计推算得到的弯矩有着相当好的吻合性。王焯晟等^[15]研究了多项式拟合法作为基坑围护结构弯矩反分析的方法,多项式拟合的关键在于选择合理的拟合次数,一般取值范围为5~8次为宜。

(2)根据该剖面的深层水平位移监测成果,选取第三道支撑以下的桩身深层水平位移监测数据,采用多项式拟合,拟合次数为7次,拟合结果如图6所示。

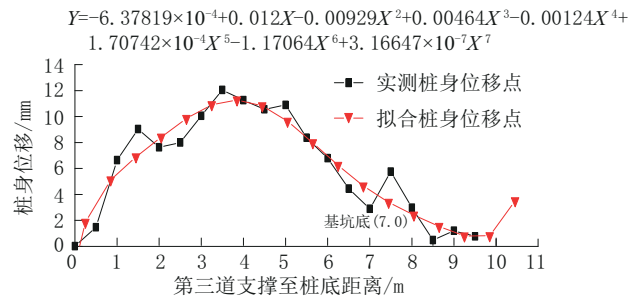


图6 处理前深层水平位移实测曲线与拟合曲线的对比

Fig.6 Comparison of measured curve and fitting curve of deep horizontal displacement before treatment

由拟合结果可见,桩身最大弯矩出现在第三道支撑梁下3.0~4.0 m之间,该位置与图4所示位置相近。对该拟合曲线求导并计算曲线在弯矩最大点的曲率,代入公式(3),可求得该位置桩身的弯矩约为1382.12 kN·m,该弯矩值小于图4所示的设计弯矩值。

3.4 分析结果

经对加固前、后桩身抗弯承载力计算分析可知,通过粘钢加固的方法对侵限支护桩进行补强,可以补偿因截面和钢筋损失造成的承载力损失。同时,经对桩身深层水平位移监测成果的反分析,判断在开挖至坑底工况下,桩身实际承受的弯矩较计算值偏小。

经参建各单位多次论证分析,采取粘钢加固方案可以满足建设单位地下室功能需求、基坑安全及施工可行性要求,为最优方案。经基坑设计单位复

核计算,最终确定需要切除侵限部分的支护桩13根,粘钢加固支护桩为4根;充分考虑基坑的空间效应,施工时需要采取分序、跳桩施工。

4 侵限处理施工

4.1 侵限处理原则

4.1.1 分层分序处理,确保基坑安全

充分利用支护体系的空间效应,结合侵界支护桩的分布情况,地下室结构范围内支护桩分为4序施工,一序支护桩凿除完成后,在凿除桩表面粘贴10 mm厚Q355钢板进行加固,加固完成后凿除二序侵界支护桩,二序侵界桩凿除完成桩身加固后,凿除三序侵界桩并完成桩身加固后,凿除四序侵界桩并进行加固(见图7)。

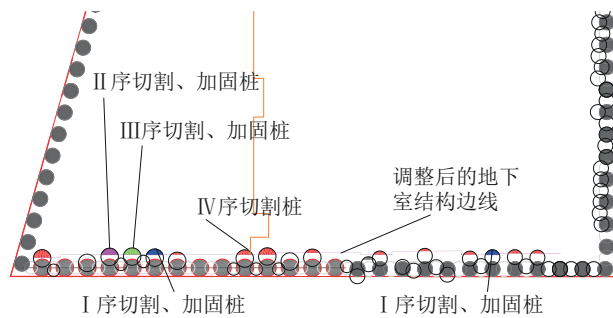


图7 分序施工示意

Fig.7 Schematic diagram of step-by-step construction

4.1.2 加强监测,信息化施工

施工期间除原基坑监测项目外,新增加了桩后土体深层水平位移、粘贴钢板应变监测,对凿桩期间的变形进行监测。根据监测数据判断监测对象是否安全、是否需要采取紧急措施,以确保基坑工程安全以及工程建设的顺利实施。

4.2 粘钢加固施工

4.2.1 止水帷幕加强

为防止基坑支护桩在切除及加固过程中,桩身咬合量较小或者开叉部位土体流失造成渗漏,采用在基坑内侧增加超前小导管注浆的方式预防桩间渗漏。超前小导管注浆施工现场见图8。

4.2.2 侵限切除

支护桩侵限处理根据侵限支护桩分布情况,分为4序进行切桩后加固施工,参见图7。

切桩施工采用锯绳切割,人工风镐辅助的破除形式。切桩工艺如下:施工准备→支撑脚手架搭设



图8 超前小导管注浆施工现场

Fig.8 Advanced small pipe grouting construction site

→划线定位→水钻钻孔→定位切割→混凝土块吊装→场地清理→支架拆除。

4.2.3 粘钢施工

因受现场工作面及吊装设备的限制,将加固的钢板分割为30~40 cm的条带状,更有利于现场组织施工。

粘钢施工工艺如下:基层处理、打磨→定位、放线→压条及钢板钻孔→下料、制作→安装、焊接→化学锚栓植入固定→封口→密封检查→浆料调配→灌浆→空鼓检验→空鼓位置处理。加固施工现场见图9。

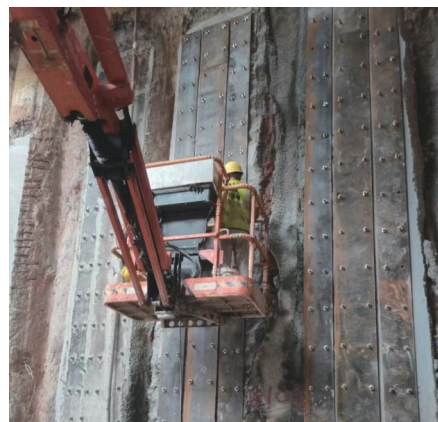


图9 加固施工现场

Fig.9 Reinforcement construction site

粘钢施工的关键在于保证钢板与桩身切面之间的有效粘结。因此,待结构胶固化后,应采用小锤敲击钢板,进行空鼓检验,若无空洞声,表示灌浆密实。灌浆的密实度应 $>95\%$,否则应在适当部位钻

孔补灌,直到满足要求。

4.3 施工期间监测结果

4.3.1 裂缝监测

支护桩侵限部分被切除后,桩身截面发生改变,桩身刚度退化,该桩外侧土体应力重新分布,桩身发生变形,荷载向相邻桩转移,直至达到新的平衡状态。部分桩切割后在切面上出现水平裂缝,为桩身刚度退化、变形所致。裂缝出现后,在裂缝位置设置裂缝监测点,裂缝宽度均比较稳定,未进一步发展。

4.3.2 加固施工期间基坑监测

支护桩切除和加固施工时间为2022年8月6—29日,选取该侧基坑(第三道支撑至基坑底部)的深层水平位移监测成果(如图10所示)分析,由监测成果可知,支护桩在侵限切除期间,桩身截面改变、刚度退化,水平位移发生变化,待桩后土体应力重分布完成后,位移即收敛稳定,最大水平位移约为21.79 mm,小于深层水平位移控制值(桩体深层水平位移控制值40 mm,报警值32 mm)。施工期间,基坑稳定性良好。

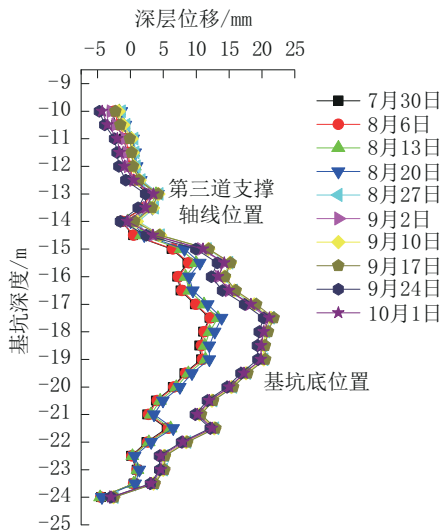


图10 深层水平位移监测成果

Fig.10 Deep horizontal displacement monitoring data

4.3.3 加固处理后基坑监测结果分析

按照前文3.3节所述的分析方法,对粘钢加固施工完成后的深层水平位移监测成果(以2022年10月1日监测成果作为分析对象)进行拟合分析,拟合次数为7次,拟合结果如图11所示。由拟合结果可见,桩身最大弯矩位置与处理前基本一致,位于第三

道支撑梁下3.5~4.5 m之间。对图10所示拟合曲线求导并计算曲线在弯矩最大点的曲率,代入式(3),可求得该区段内桩身的弯矩约为2437.00~2737.00 kN·m,由前述3.2节分析可知,该区段内弯矩值小于粘钢加固后截面的受弯承载力。

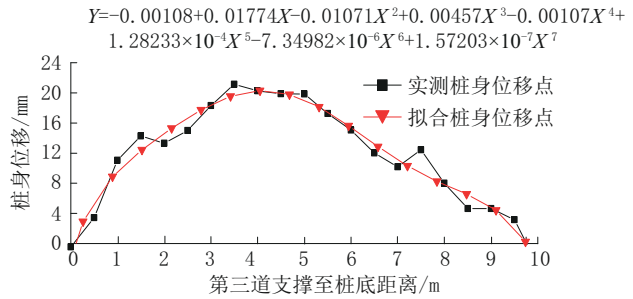


图11 处理后深层水平位移实测曲线与拟合曲线的对比
Fig.11 Comparison of measured curve and fitting curve of deep horizontal displacement after treatment

5 结论

经过对侵限支护桩原桩、切除侵限、粘钢加固等形态的抗弯承载力分析,并结合基坑监测结果进行反分析,确定了粘钢加固的处理方案,并有效实施,取得良好实践效果,同时得到如下结论及成果:

(1)支护桩截面和钢筋的切除对受弯承载力影响显著,且随着切除量的增加承载力损失呈非线性增加。支护桩受截面形态和钢筋分布影响,工作状态下受力极为复杂。处理方案论证阶段,建议对桩身深层水平位移等监测数据进行分析,利用构件截面的M-φ关系,对桩身受力状态进行研究,为侵限处理提供计算支持。

(2)采用粘钢加固方法处理切除侵限的支护桩,可以补偿因桩身截面和钢筋损失造成的承载力损失。施工监测数据表明,桩身侵限切除后,受桩身截面及刚度发生改变、土体应力重分布的影响,水平位移值有所增大。经对加固后截面的M-φ关系分析可知,支护桩桩身弯矩也随之增大,但仍小于加固处理后支护桩的承载力,基坑处于安全状态。

(3)对于连续侵限的支护桩处理,应充分利用基坑体系的空间效应,合理安排工序,分序、跳桩进行切除和加固施工。施工期间,应加密基坑监测频率,根据监测结果信息化指导施工。

参考文献(References):

- [1] 孙玉辉,孙增伟,白朝旭,等.基坑围护桩侵限成因分析与处理[J].工程勘察,2014(3):20-23.
SUN Yuhui, SUN Zengwei, BAI Chaoxu, et al. Analysis on causes of the invasion limit of retaining pile in foundation pit[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014(3):20-23.
- [2] 谢军,徐长胜.地铁站围护结构侵限处理方案比选[J].广东土木与建筑,2021,28(11):33-36.
XIE Jun, XU Changsheng. Comparison and selection of treatment schemes for boundary invasion of subway station[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2021,28(11):33-36.
- [3] 孙一鸣.城际铁路联络线工程围护结构侵限的问题处理分析[J].建筑结构,2021,51(S2):1748-1754.
SUN Yiming. Analysis on the problem of the limit of invasion of the envelope structure of intercity railway line project[J]. Building Structure, 2021,51(S2):1748-1754.
- [4] 丁晓军,姜灵程.基坑围护桩侵限处理计算与应用[J].港工技术与管理,2018(2):1-4.
DING Xiaojun, JIANG Chengling. Calculation and application of foundation pit retaining pile invasion limit treatment[J]. Port Harboui Technology Engineering, 2018(2):1-4.
- [5] 孙剑,范民浩,李鑫.护坡桩+微型钢管桩复合土钉墙联合支护体系研究应用[J].钻探工程,2021,48(10):116-124.
SUN Jian, FAN Minhao, LI Xin. Combined supporting system of the slope protection pile and the compound soil nail wall with micro steel pipe piles[J]. Drilling Engineering, 2021,48(10):116-124.
- [6] 胡朝彬,宋冠樟,片磊,等.灌注桩后注浆技术应用研究及承载力影响分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):100-105.
HU Chaobin, SONG Guanzhang, PIAN Lei, et al. Post grouting technology and its influence on the bearing capacity of bored piles[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(7):100-105.
- [7] 邵晨晨.复杂地质条件和敏感环境中基坑设计实践及关键技术[J].钻探工程,2021,48(6):102-108.
SHAO Chenchen. Design practice and key technology for the foundation pit in complex geology and sensitive environments[J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):102-108.
- [8] 张勇,何腊平,龙照,等.钢筋混凝土环形围檩在黄土地区小尺寸深基坑中的应用[J].钻探工程,2023,50(2):100-108.
ZHANG Yong, HE Laping, LONG Zhao, et al. Application of circular reinforced concrete purlins in the small-size deep foundation pit in the loess area[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):100-108.
- [9] 杜高恒,何世鸣,刘武军.预应力锚杆肋板墙支护技术在北京某深基坑工程中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(12):78-81.
DU Gaocheng, HE Shiming, LIU Wujun. Application of support technology of pre-stressed anchor and ribbed plate wall in deep excavation engineering in Beijing[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(12):78-81.
- [10] 徐永波.粘钢加固技术的应用和研究现状[J].安徽建筑,2015(4):52-54.
XU Yongbo. Application of bonding steel strengthen technique and research status[J]. Anhui Architecture, 2015(4):52-54.
- [11] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范(2015年版)[S].
GB 50010—2010, Code for design of concrete structures (2015 edition)[S].
- [12] JGJ 120—2012,建筑基坑支护技术规程[S].
JGJ 120—2012, Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S].
- [13] 王佳贺,刘杰.基于测斜监测曲线的基坑围护桩弯矩反分析与应用[J].兰州工业学院学报,2013,20(1):36-42.
WANG Jiahe, LIU Jie. Back analysis and application of bending moment of fender pikes based on lateral deformation[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2013,20(1):36-42.
- [14] 李文广,张修成,刘国彬,等.基于监测数据的围护墙弯矩反分析研究[J].山东理工大学学报(自然科学版),2006,20(3):31-39.
LI Wenguang, ZHANG Xiucheng, LIU Guobin, et al. Study on back analysis for bending moment of retaining wall based on monitoring data[J]. Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2006,20(3):31-39.
- [15] 王焯晟,陈文华,吴勇.地铁深基坑围护结构变形——内力反分析研究[J].现代隧道技术,2016(5):71-77.
WANG Yesheng, CHEN Wenhua, WU Yong. Back-analysis on the retaining structure deformation/internal force of a subway deep foundation pit[J]. Modern Tunnel Technology, 2016(5):71-77.

(编辑 王文)