

# 软土地基构筑物纠倾加固技术研究

张震<sup>1</sup>, 崔军<sup>1</sup>, 王鸿运<sup>1</sup>, 冯家齐<sup>1</sup>, 刘黎明<sup>1</sup>, 张家源<sup>2</sup>

(1. 中冶武勘工程技术有限公司, 湖北 武汉 430080; 2. 宝钢德盛不锈钢有限公司, 福建 福州 350600)

**[摘要]** 软土地区常因地基处理不当,在构筑物使用寿命内出现倾斜和不均匀沉降,存在严重的安全隐患。以沿海地区某软土地基构筑物纠倾加固工程为例,提出水平顶推+外扩承台+补桩加固联合方案。研究表明,水平顶推对软土地区构筑物纠倾作用明显,纠偏前后最大倾斜率差值达到 15.59‰。外扩承台和新增锚杆静压桩可加固地基基础,工后沉降速率 $\leq 0.04\text{mm/d}$ ,满足相关要求。

**[关键词]** 地基;软土;锚杆静压桩;纠倾;加固;沉降

**[中图分类号]** TU753.8

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2025)11-0058-05

## Rectification and Reinforcement Technology for Structures on Soft Soil Foundation

ZHANG Zhen<sup>1</sup>, CUI Jun<sup>1</sup>, WANG Hongyun<sup>1</sup>, FENG Jiaqi<sup>1</sup>, LIU Liming<sup>1</sup>, ZHANG Jiayuan<sup>2</sup>

(1. MCC Wukan Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430080, China;

2. Baosteel Desheng Stainless Steel Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350600, China)

**Abstract:** In the soft soil area, due to improper foundation treatment, tilt and uneven settlement often occur during the service life of the structure, and there exist serious safety hazards. Taking the rectification and reinforcement project of a soft soil foundation structure in a coastal area as an example, a combined scheme of horizontal jacking + external expansion of pile cap + supplementary pile reinforcement is proposed. The results indicate that the horizontal jacking has an obvious rectification effect on the structure in soft soil areas, and the maximum inclination rate difference reaches 15.59 ‰ before and after rectification. The expanded pile caps and the newly added anchor static pressure piles can reinforce the foundation. And the post-construction settlement is less than or equal to 0.04mm/d, which meets the relevant requirements.

**Keywords:** foundation; soft soil; anchor rod static pressure pile; inclination rectification; reinforcement; settlement

## 0 引言

随着国内建设活动的全面提速,在特殊性岩土上构筑物越来越多。部分构筑物受多种因素影响出现了不同层次的倾斜、沉降、弯曲、开裂等小病害<sup>[1-3]</sup>。对于倾斜和沉降的建筑物而言,当主要受力构件没有发生严重损坏时,可采取合理的纠倾加固措施恢复建筑的正常使用功能并延长使用寿命,避免花费更多的人力、物力等拆除重建<sup>[4]</sup>。目前建筑物纠倾方法及加固技术较多,包括迫降纠倾法、顶升纠倾法、综合纠倾法、锚杆静压桩加固法、树根

桩加固法、注浆加固法等,不同的技术措施适用于不同的地基情况、场地条件以及病害程度等<sup>[5]</sup>。本文以福建某深厚软土地区厂房构筑物纠倾工程为例,综合考虑地质条件、周边环境、场地施工条件、施工经济性等因素,提出水平顶推+外扩承台+补桩加固的综合处理方案,提高地基基础承载力,降低构筑物不均匀沉降,保障构筑物在使用寿命内的可靠性和安全性。

## 1 工程概况

### 1.1 项目概况

沿海某软土地区厂房基础采用 8 桩和 9 桩承台,埋深 3.5m,桩基为 PHC 管桩,桩径 500mm,桩长约 52m。作为精炼厂房,内设起重机轨道,运行起重

机总重 50.1t。自投产后,受多年负荷生产、地质条件较差等因素影响,立柱出现倾斜和不均匀沉降变形现象,最大倾斜率达 17.5‰,导致起重机轨道扭曲变形,轨距宽窄不一,局部出现起重机卡轨现象,存在脱轨的隐患,对车间安全生产造成较大影响(见图 1)。根据可靠性鉴定结论,结合 GB 50144—2019《工业建筑可靠性鉴定标准》,该建筑物可靠性评定为三级,已严重影响整体安全,不宜正常使用,须采取措施进行纠倾加固处理。



图 1 轨道基础东侧下沉

Fig. 1 Subsidence on the east side of the track foundation

1.2 工程地质及水文地质条件

场地存在较大厚度软土层,从上而下依次为填土①、淤泥②、黏土③、淤泥质黏土④<sub>1</sub>、黏土④<sub>2</sub>、砂砾卵石⑤、黏土⑥、卵石⑦、强风化花岗岩⑧<sub>1</sub>、中风化花岗岩⑧<sub>2</sub>,相关参数如表 1 所示。场地内地下水主要为上部滞水和承压水。上部滞水主要赋存于填土层之中,大气降水渗入为其主要补给来源,稳定水位埋深为 0.20~1.40m,承压水主要赋存于卵石层。在干湿交替的情况下,场内地下水对混凝土结构具有弱腐蚀性,在无干湿交替的情况下具有微腐蚀性。在干湿交替的情况下,均内地下水对钢筋混凝土结构中的钢筋具有强腐蚀性,在长期浸水的情况下具有微腐蚀性。

表 1 地质参数

Table 1 Geological parameters

| 岩土层                  | 状态  | 层厚/<br>m | 压缩<br>模量/MPa | 地基承载力<br>特征值/kPa |
|----------------------|-----|----------|--------------|------------------|
| 填土①                  | 松散  | 8.4      | —            | 80               |
| 淤泥②                  | 流塑  | 15.8     | 1.5          | 40               |
| 黏土③                  | 可塑  | 3.7      | 4.5          | 130              |
| 淤泥质黏土④ <sub>1</sub>  | 软塑  | 4.1      | 2.0          | 75               |
| 黏土④ <sub>2</sub>     | 可塑  | 6.0      | 3.5          | 105              |
| 砂砾卵石⑤                | 中密  | 6.6      | 25.0         | 380              |
| 黏土⑥                  | 可塑  | 1.5      | 5.0          | 170              |
| 卵石⑦                  | 密实  | 13.1     | 30.0         | 550              |
| 强风化花岗岩⑧ <sub>1</sub> | 强风化 | 13.7     | 32.0         | 600              |
| 中风化花岗岩⑧ <sub>2</sub> | 中风化 | —        | —            | 3 000            |

2 倾斜与沉降原因分析

1)地基受到地坪堆载的影响向两侧偏移,堆载

区立柱呈八字形。

2)厂房范围内上部地层为填土,厚 4~12m,下部为深厚淤泥层,厚 12~21m,在填土荷载的作用下,淤泥层蠕变变形导致基础产生变形。

3)基础强度储备不足,基础下方的 PHC 管桩之间单桩承载力相差较大,致使整体基础受力不均,桩基反力中心与上部结构质量中心存在明显的偏心效应,且上部较大的活动荷载加剧了构筑物倾斜与沉降速率。

3 纠倾加固方案设计

根据厂房间立柱倾斜情况,结合构筑物结构特点及地质条件,提出水平顶推+外扩承台+补桩加固的基本思路,一方面利用反力基座和千斤顶对立柱倾斜侧进行水平顶推,达到回倾目的,另一方面通过植筋扩大筏板基础底板面积,配合锚杆静压桩进行桩基托换,对纠倾后的立柱起到补强与加固作用,基本原理如图 2 所示。纠倾加固的目标为立柱倾斜率≤3‰,加固完成后,最后 100d 的沉降速率≤0.04mm/d。

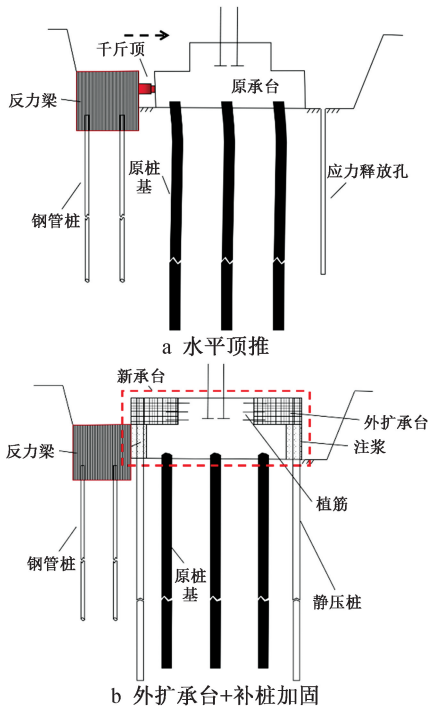


图 2 基础纠偏

Fig. 2 Foundation rectifying deviation

3.1 反力基座设计

反力基座应尽量利用现有地坪,当无反力基础或尺寸不符合要求时,需新浇筑钢筋混凝土反力基座。反力基座包括反力梁与钢管桩两部分,反力梁作为水平顶推的反力支座,提供反向作用力对立柱进行纠倾,而钢管桩起到防止顶推过程中反力梁受

力而后移破坏的作用,增大了反力基座水平方向顶推的稳固性。因厂区地下管线复杂、施工场地条件有限,反力梁尺寸为  $7.6\text{m}\times 2\text{m}\times 1.5\text{m}$ ,反力基座打设 12 根  $\phi 325\times 10$  钢管桩,桩长 12m。

### 3.2 外扩承台设计

据工程分析及设计经验,立柱倾斜率为  $3\text{‰}\sim 8\text{‰}$ ,桩基础还可承担上部荷载的  $80\%\sim 90\%$ ,仅需进行纠偏处理。立柱倾斜率  $\geq 8\text{‰}$ ,桩基础发生弯曲变形,竖向承载力损失超  $50\%$ ,还需采用刚性桩托换加固补强。

增补筏板通过原承台接触面凿毛植筋构建钢筋骨架,并预留锚杆静压桩桩孔,预埋锚杆。承台边缘在倾斜方向线上外扩 600mm,高 900mm。承台植筋采用 HRB400 钢筋,通过锚固计算公式计算出植筋钢筋轴向受拉承载力设计值为 92kN。经综合考虑后,锚固深度设计值取 300mm,植筋间距取 500mm,植筋边距为 200mm。

### 3.3 锚杆静压桩设计

托换加固锚杆静压桩采用  $\phi 273\times 8$  钢管桩,单节桩长 2m。桩长通过公式计算设计为 56m,要求单桩承载力特征值  $\geq 500\text{kN}$ 。

## 4 纠倾加固施工

### 4.1 测量定位

根据建设单位提供的水准点和坐标控制点建立测量控制网,施工基准水准点布置在受施工影响小且不易破坏的地方,用红色三角标记,为防止后期水准点的破坏,宜在场外设置 3 个水准点。各水准点之间要相互校核,并做好保护。

### 4.2 顶推施工

顶推施工顺序:拆除地坪→打设钢管→基槽开挖→制作反力梁→布置应力释放孔→安装千斤顶→分级顶推→稳定监测→解除千斤顶。

当反力基座浇筑后,为避免反力基座强度不足产生裂缝及后移现象,需利用回弹仪测定混凝土强度,待其达到 90% 设计强度后,方可开展顶推纠偏工序。顶推过程中,首先解除原承台移动方向上一侧的土压力,采用应力释放孔的形式降低顶推阻力;然后在反力梁和承台之间安装千斤顶,进行试顶推。顶推时观测承台是否移动,若反力基座后退,应停止施工,进一步挖除原承台周边土方,降低阻力后再行试推,分 10 次对目标承台进行千斤顶顶推纠倾,每级顶推位移可按  $10\sim 20\text{mm}$  控制。每 10min 监测立柱倾斜率,30min 内无变化进行下一级顶推,直至倾斜率满足设计要求。

双向纠偏施工时,应先纠偏位移较大的方向,

然后施工位移较小的方向。顶推施工前应检查立柱节点焊接、螺栓连接情况,必要时进行加固处理。顶推过程中应注意密切监测立柱及厂房结构是否有变形、异响,必要时进行内力卸载处理。

### 4.3 外扩承台施工

外扩承台施工流程:原承台凿毛、植筋→核对钢筋半成品→钢筋绑扎→预留压桩孔位→预埋锚杆→制作、安装模板→浇筑混凝土→养护。

根据 JGJ 145—2023《混凝土结构后锚固技术规范》进行植筋拉拔承载力检验,匀速加载至试验荷载 92kN,总加荷时间 3min,持荷 2min,承台基座没有产生破坏,锚杆无滑移,且持荷期间检验荷载降低程度均  $\leq 5\%$ ,可判定拉拔承载力检测合格。植筋拉拔检测合格后方可进行钢筋绑扎,在绑扎施工中埋设压桩锚杆、预留压桩孔位。每根锚杆静压桩配备 4 根压桩锚杆,采用长 1.2m 的 M32 精轧螺纹钢,预埋深度为 800mm;压桩孔位采用预留的木模板,孔位上下端口分别为 350,400mm 的方形,高度结合原基础承台埋深情况设置为 1m。浇筑混凝土将外扩承台与原承台连为整体。

### 4.4 锚杆静压桩施工

锚杆静压桩施工流程:清除孔下障碍物→立压桩架→压桩→接桩→施工至设计桩长→卸除千斤顶→封桩。

顶推完成稳定后,方可进行静压桩施工。压桩锚杆配合螺母固定反力架,千斤顶通过承压钢板将  $\phi 273\times 8$  钢管穿过压桩孔洞压入地基。锚杆静压桩施工时以承台沉降观测数据为指导,压桩力控制为主,桩长控制为辅,达到设计深度后,随机抽样进行单桩竖向静载试验,待承载力达到设计值后终止压桩。压桩完成后,桩顶采用交叉钢筋与压桩锚杆焊接,钢管桩内全长灌注 C30 混凝土,采用微膨胀早强 C50 混凝土浇筑桩帽完成封桩。

## 5 施工监测与结果分析

### 5.1 施工监测

该工程属于特种工程,危险系数高、场地条件复杂、地下管线错综分布,为实时反馈纠倾加固施工过程中各部位参数的变化情况,采用“动态设计+信息化施工”量化管理,根据施工监测数据动态调整施工技术方案。根据纠偏的基础布置,沿着基础 ⑧、⑨ 轴共设置 16 个沉降和倾斜监测点(见图 3)。

### 5.2 沉降分析

沉降可分为工期间沉降和工后沉降,前者为从纠偏加固施工到施工完成后 7d,后者为从纠偏加固施工完成后 7d 开始至沉降稳定结束。厂房 ⑧、⑨ 轴



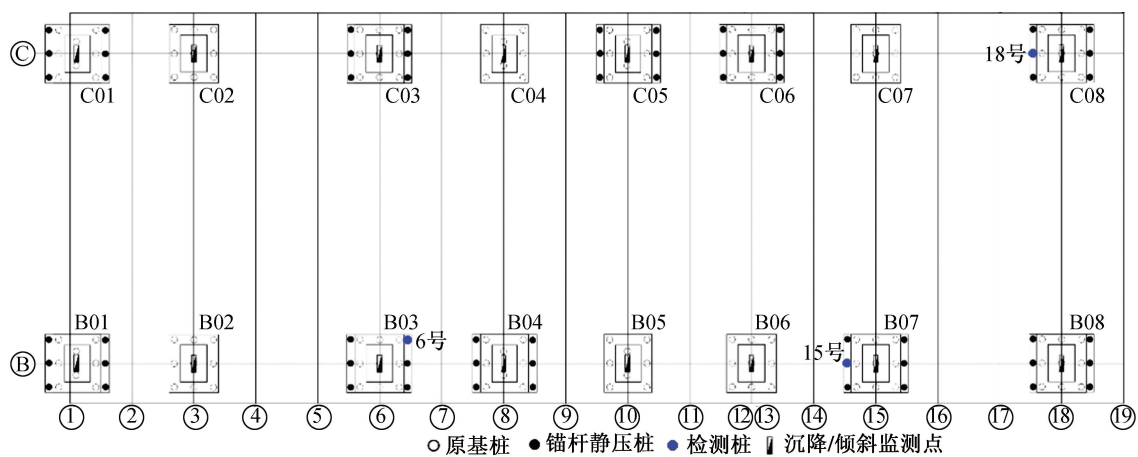


图3 监测点平面布置与桩位

Fig. 3 Monitoring point layout and pile location

监测点沉降变化曲线如图4所示。施工期最终累积沉降为1~50mm,最大沉降点为B06。B02,B03,B06,B07,C02,C03,C05,C06,C07测点沉降在施工期间均出现跌落式差异,由于在纠偏加固施工过程中为不影响生产线正常运行,该区域受行车以及起重机轨道运行产生的动荷载影响,短期内出现快速沉降。工后沉降即200~300d沉降为0.5~2.5mm,日均沉降为0.005~0.025mm,小于设计与施工要求的0.04mm/d,可认定该基础沉降已达到稳定状态。

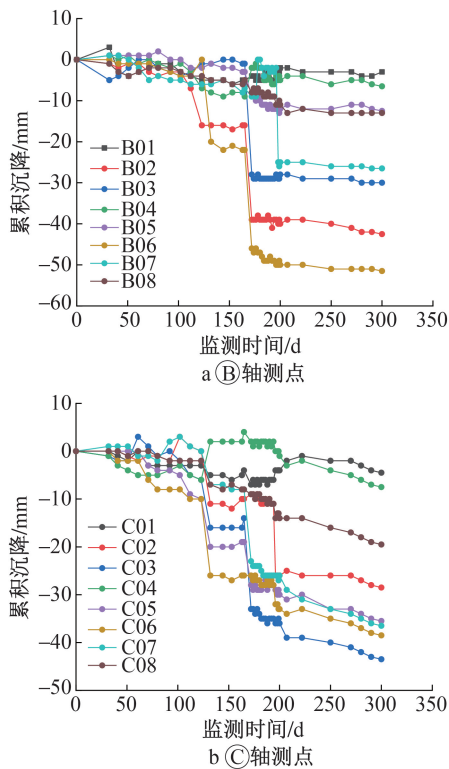


图4 累积沉降变化曲线

Fig. 4 Cumulative settlement change curves

5.3 倾斜率分析

厂区B,C轴监测点倾斜率变化曲线如图5所示,图中倾斜率陡降段为完成纠倾阶段,即施工第100~200d,倾斜率分布区间0.55‰~1.91‰,满足规范要求的倾斜率≤3‰,表明该构筑物水平顶推纠倾作用显著,达到设计和规范要求,其中最大倾斜率由纠17.5‰回偏到纠偏后的1.91‰;在完工后100d(即第300d左右),立柱倾斜率分布区间0.56‰~1.93‰,与纠偏完成后的倾斜率相近,滞后回倾效应较低,即构筑物在纠倾后一直保持稳定。

6 单桩竖向承载力检测

根据JGJ 106—2014《建筑基桩检测技术规范》要求的检测数量,加固桩施工结束后,现场由建设单位随机均匀抽样3根锚杆静压桩进行单桩竖向抗压承载力检测,检测结果如图6,7所示,在最大试验荷载1000kN作用下,3根锚杆静压桩在整个加荷过程中趋势曲线变化平缓,没有出现明显的陡降阶段,在每级竖向荷载作用下,桩顶沉降较稳定,表明在检测过程中没有达到极限状态,即承载力极限值>1000kN,单桩竖向承载力特征值>500kN,满足加固桩设计要求。由图6,7可知,单桩竖向静载试验总历时1500min,分9级加荷和5级卸荷,加荷差、卸荷差分别为100,200kN,累积沉降位移依次为10.94,19.92,18.70mm,残余变形依次为2.56,5.93,5.08mm,变形率分别为23.4%,29.8%,27.2%。

7 结语

1)采用水平顶推+外扩承台+补桩加固联合方案对基础进行纠偏加固,施工期总沉降和变化趋势受外部动荷载和软土层厚度等影响较大,不同观测点沉降曲线具有分区性。工后沉降曲线变化基本一致,受外

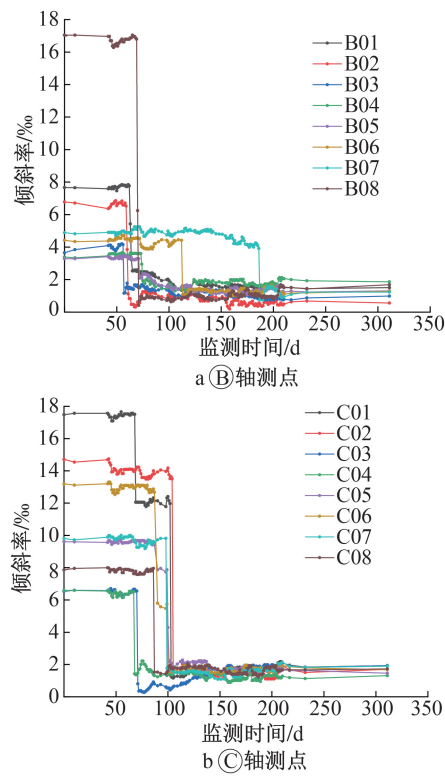


图 5 倾斜率变化曲线  
Fig. 5 Slope rate variation curves

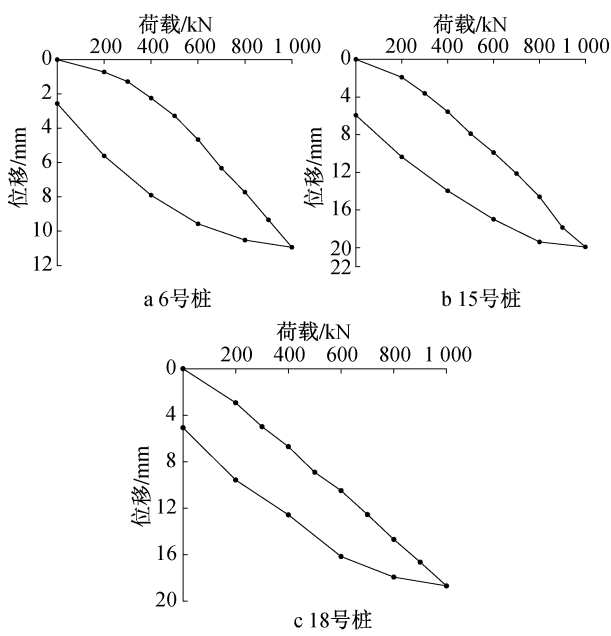


图 6 锚杆静压桩荷载-位移曲线  
Fig. 6  $Q$ - $s$  curves of anchor rod static pressure piles

部影响较小,整体沉降控制在 0.5~2.5mm。

2)施工完成后桩基承载力经检测满足加固桩要求,在最大试验荷载 1 000kN,总历 1 500min 的静载试验中,逐级加荷卸荷作用下,应力应变变化趋势稳定,累积沉降低于规范要求。

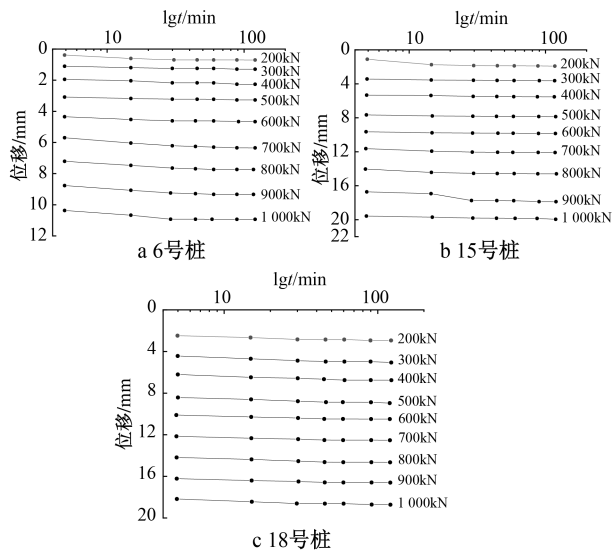


图 7 锚杆静压桩位移-时间曲线  
Fig. 7  $s$ - $lgt$  curves of anchor rod static pressure piles

3)水平顶推+外扩承台+补桩加固联合方案在软土地基实施中具有纠倾方便、沉降稳定易于控制、工后再次沉降偏低的特点。

参考文献:

[ 1 ] 郭晓军. 顶升法在房屋纠偏加固中的实际应用 [ D ]. 南京: 东南大学, 2019.  
GUO X J. The practical application of jacking method in the rectification and reinforcement of buildings [ D ]. Nanjing: Southeast University, 2019.

[ 2 ] 孟雄飞. 既有建筑物工程事故分析及顶升纠偏技术研究 [ D ]. 北京: 中国地质大学, 2020.  
MENG X F. Analysis of existing building engineering accidents and research on jacking correction technology [ D ]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.

[ 3 ] 唐君, 雷飞龙, 江宁. 微型桩技术在既有建筑地基基础加固改造工程中的应用 [ J ]. 施工技术(中英文), 2022, 51(2): 79-82.  
TANG J, LEI F L, JIANG N. Application of micropile technology in the reinforcement and renovation of existing building foundations [ J ]. Construction technology, 2022, 51(2): 79-82.

[ 4 ] 李阳. 框架结构断柱顶升纠偏方案优化与力学性能研究 [ D ]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2020.  
LI Y. Optimization and mechanical performance study on the deviation correction plan for broken columns in frame structures by jacking [ D ]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2020.

[ 5 ] 顾晓捷. 大直径锚杆静压钢管桩加固纠偏软土地基建筑应用技术研究 [ D ]. 南京: 东南大学, 2021.  
GU X J. Research on the application technology of large diameter anchor rod static pressure steel pipe pile strengthening and rectification of soft soil foundation buildings [ D ]. Nanjing: Southeast University, 2021.