

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2024.05.010

【工程应用】

# 超大吨位锚杆静压桩在高层建筑基础加固中的应用

吴文龙

(上海长凯岩土工程有限公司, 上海 200093)

**摘要:** 锚杆静压桩因其施工方便、效果显著, 被广泛应用于高层建筑基础加固工程中。在高层建筑基础加固工程中, 为了减少锚杆静压桩的数量, 控制建筑物的沉降, 需要提高锚杆静压桩的单桩承载力, 这需要提高施工能力, 增大压桩动阻力, 确保桩端到达可靠的持力层。本文以某33层高层建筑基础加固工程为例, 介绍超大吨位锚杆静压桩的设计和施工要点。采用 $\Phi 500$ 钢管桩进行加固, 为了使其穿越深厚砂层, 桩端采用了 $\Phi 273$ 钢管作为桩尖, 并采取桩端减摩措施, 在穿越砂层时注入润滑液来降低摩阻力, 并在压桩到位后再次采用注浆措施提高单桩承载力, 保证了锚杆静压桩的施工质量和基础的加固质量, 成功控制了建筑物的沉降。本案例可为类似工程提供一定的参考。

**关键词:** 锚杆静压钢管桩; 高层建筑; 基础加固; 超大吨位; 减摩; 注浆

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)05-0497-06

## Application of ultra-large tonnage static press anchored piles in the foundation reinforcement of a high-rise building

WU Wenlong

(Shanghai Changkai Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Static press anchored piles are widely applied in the reinforcement of foundations for high-rise buildings due to their convenience in construction and effectiveness. In the foundation reinforcement of high-rise buildings, in order to reduce the number of piles and control the settlement of the buildings, it is essential to enhance the single-pile bearing capacity. This requires improving construction capabilities, increasing dynamic resistance, and ensuring that pile tips reach reliable bearing layers. Taking the foundation reinforcement project of a 33-storey high-rise building as an example, this paper introduced the key points of design and construction for ultra-large tonnage static press anchored piles. For reinforcement, steel pipe piles with diameter 0.5 m were used, and steel pipes with diameter 0.273 m were employed at the pile tips to penetrate deep sand layers. Anti-friction measures were implemented at the pile tips by injecting lubricants to reduce frictional resistance while passing through the sand layers. After the piles were pressed in place, grouting measures were applied again to improve the bearing capacity of the steel piles. The construction quality of static press anchored piles and the reinforcement quality of the foundation were ensured, and the settlement of the building was successfully controlled. This approach provides valuable reference for similar projects.

**Key words:** static press anchored steel pipe pile; high-rise building; foundation reinforcement; ultra-large tonnage; friction reduction; grouting

## 0 引言

部分建筑物在建设或者使用过程中会出现基础承载力不足、沉降过大或者不均匀沉降超限的情

况, 此时需要对建筑物基础进行加固以保证建筑物的正常使用。锚杆静压桩因其具有设备灵活、占用作业面小、能在地下室狭小空间施工、能耗低、无振动、无噪音、无污染等优点<sup>[1]</sup>, 被广泛应用于基础

收稿日期: 2023-11-05

作者简介: 吴文龙(1988—), 男, 甘肃定西人, 本科, 一级注册建造师, 工程师, 主要从事岩土工程及基础加固、纠偏领域的设计和施工工作。

E-mail: 625609082@qq.com。

加固、建筑物纠偏、基础托换等工程中<sup>[2-7]</sup>。但超过 5 000 kN 的超大吨位锚杆静压桩的施工报道较少<sup>[8-9]</sup>，更缺少对相关施工控制要点的总结。

在高层建筑基础加固工程中，因为建筑物荷载大，对基础承载力要求高，为了减少补桩数量，通常需要使用大吨位锚杆静压桩进行加固。本文以某 33 层高层建筑基础加固工程为例，介绍了大吨位锚杆静压桩的设计和施工要点。项目采用  $\Phi 500 \times 14$  mm 钢管桩进行加固，最大压桩力超过 6 000 kN，静载检测单桩承载力极限值达到 6 000 kN，最终建筑物沉降满足要求。

## 1 工程概况

建筑物地上有 33 层，地下有 1 层，平面尺寸约为  $40.80 \text{ m} \times 16.25 \text{ m}$ 。建筑物采用剪力墙结构，桩筏基础。筏板厚度为 1.3 m，工程桩采用  $\Phi 800$  钻孔灌注桩，桩数为 102 根。桩端持力层为⑥细砂层，有效桩长为 37.5 m，单桩承载力特征值为 3 400 kN。实际工程桩静载检测结果显示，其单桩承载力特征值最小只有 1 400 kN，不满足原设计要求，需进行基础结构加固。

### 1.1 地质条件

基础底板埋深为 6.3 m，底板位于③<sub>2</sub>淤泥质粉质黏土层中，典型地质剖面见图 1。

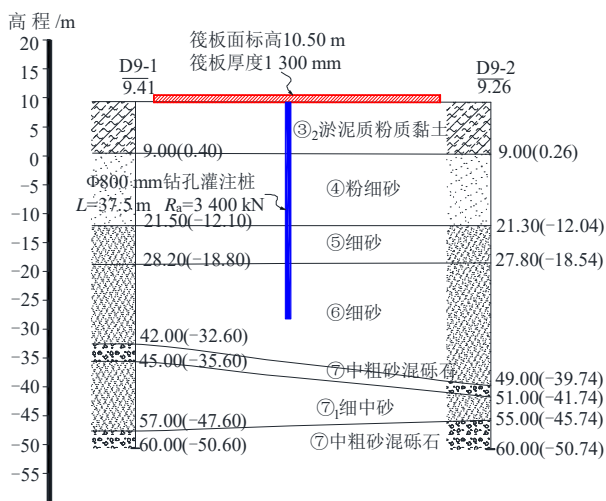


图 1 典型地质剖面

Fig. 1 Typical geological profile

土层主要物理力学性质见表 1。

潜水赋存于②粉质黏土层、③<sub>2</sub>淤泥质粉质黏土层及其下部砂土层中，具微承压性，受气候影响小，水量丰富，勘探期间测得混合地下水位（静止）埋深为 0.30~5.20 m，相应的水位（静止）标高为

8.25~10.92 m，即地下水位约位于筏板位置。

表 1 土层主要物理力学性质

Table 1 Main physical and mechanical properties of the soil layers

层号	土层名称	状态	泥浆护壁钻孔灌注桩	
			$q_{sik}$ /kPa	$q_{pk}$ /kPa
③ <sub>2</sub>	淤泥质粉质黏土	流塑-软塑	22	—
④	粉细砂	稍密	72	—
⑤	细砂	中密	105	1 600 (15≤L<30) 1 800 (30<L)
⑥	细砂	密实	140	1 800
⑦	中粗砂混砾石	密实	180	2 400

注：表中 L 为桩长，m。

### 1.2 工程桩检测情况

工程桩施工完成后，随机抽检的两根工程桩静载检测结果见图 2。通过 Q-s 曲线可以看出，工程桩加载至 3 400 kN 时，沉降已超过 40 mm，单桩承载力特征值仅有 1 400 kN，不能满足设计要求。

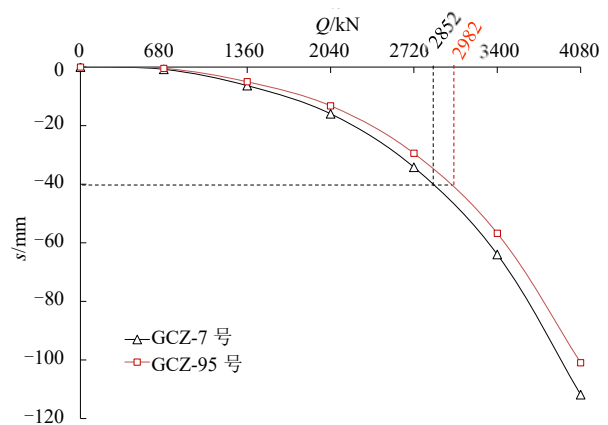


图 2 工程桩静载检测曲线图

Fig. 2 Q-s curves of engineering piles

### 1.3 原因分析

该工程为项目首开区，从施工单位进场至施工结束共 15 d 施工周期，施工质量管控存在重大缺陷。工程桩长度范围内多为砂层，工程性质良好，但是钻孔灌注桩施工时护壁泥浆的黏度、比重和含砂率等指标未能得到有效控制，且浇筑混凝土之前未进行有效的二次清孔措施，导致桩端沉渣和桩侧泥皮过厚，严重影响单桩承载力。

## 2 处理方案

采用锚杆静压桩对建筑物进行加固，采用大吨位压桩设备将桩端压入⑥细砂层，深度超过原工程桩 0.5 m，并通过锚杆静压桩进行桩端注浆，水泥浆

液扩散后加固周边原钻孔灌注桩桩底沉渣，同时锚杆静压桩压桩时的挤土效应及注浆将缓解原工程桩泥皮过厚的情况，共同起到提升原钻孔灌注桩承载力的作用。

### 2.1 补桩计算

补桩设计时，考虑到新补的钢管桩注浆对原工程桩的加固作用，估算原工程桩承载力可提高 1.6 倍，即原工程桩承载力特征值取 2 250 kN。根据类似工程经验及本项目地层验算，新补钢管桩单桩承载力特征值取 3 000 kN。加固施工完成后通过静载检测检验原工程桩与新补钢管桩承载力能否达到设计要求。

考虑原工程桩检测的数量局限性、质量不确定性，新补钢管桩采用均匀布置、重点突出的布置方式，保证建筑物整体的稳定性，主要布置在筏板的周边和重要的剪力墙附近。

计算采用 PKPM 软件，根据类似工程经验，桩基刚度按承载力的 50~100 倍取值。原工程桩单桩刚度取  $2 \times 10^5$  kN/m，钢管桩刚度取  $3 \times 10^5$  kN/m。

经计算，补桩数量为 40 根，补桩平面图见图 3。

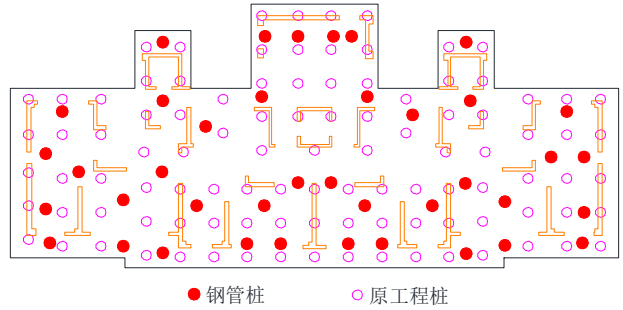


图 3 补桩平面图

Fig. 3 Plan view of supplementary piles

加固后单桩承载力验算见图 4。

加固后建筑物沉降见图 5。

注：承载力单位为 kN；括号外数字为承载力计算值；()内数字为桩基编号；[]内数字为承载力设定值； $N_{k,avg}$  为桩顶平均竖向力标准值； $N_{k,max}$  为桩顶最大竖向力标准值； $R_a$  为单桩竖向承载力特征值。

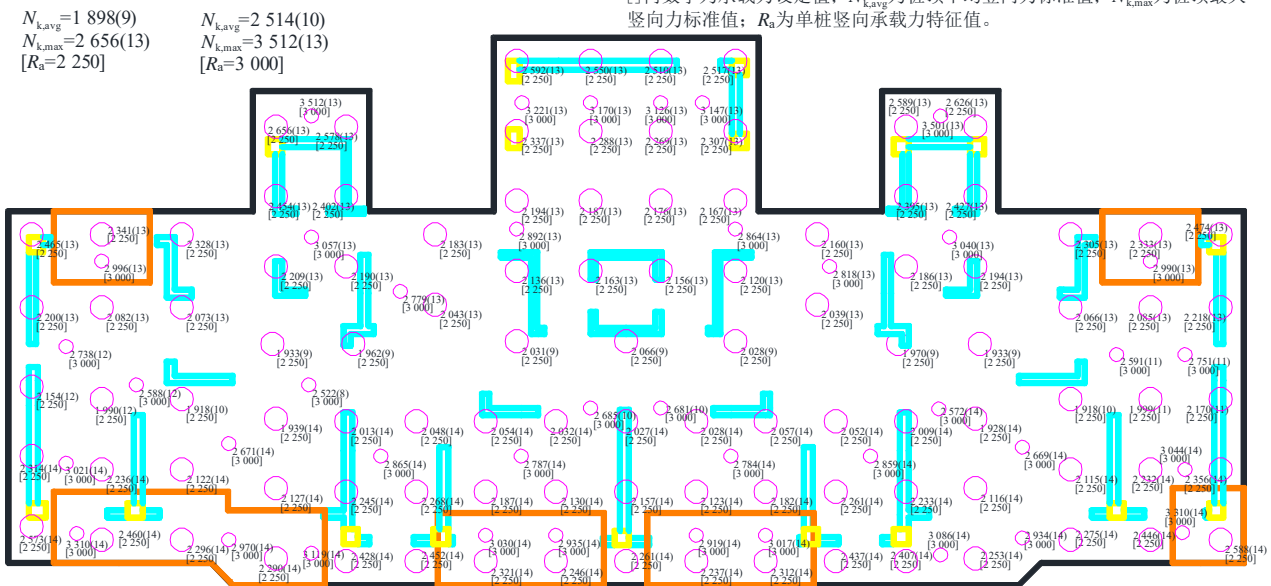


图 4 加固后单桩承载力验算

Fig. 4 Checking calculation of single pile bearing capacity after reinforcement

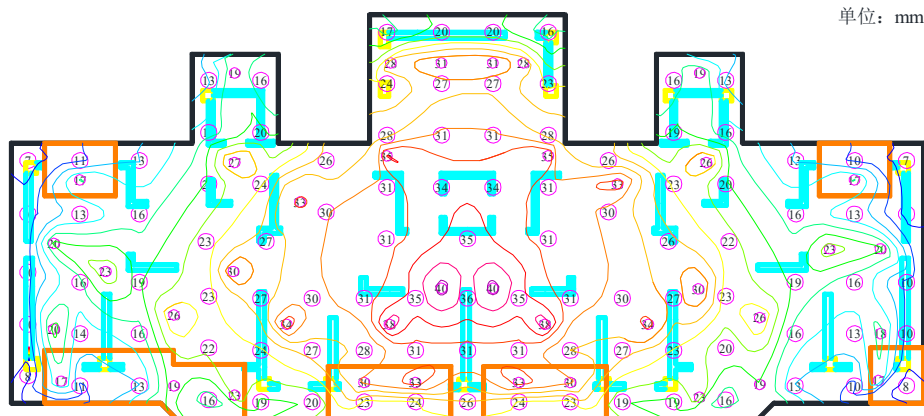


图 5 加固后建筑物沉降图

Fig. 5 Settlement of the building after reinforcement

可见, 补桩后单桩竖向承载力和建筑物沉降均满足原设计要求。

## 2.2 钢管桩设计

根据以上分析, 钢管桩承载力特征值需达到 3 000 kN, 考虑到钢管材料强度及施工时钢管桩的稳定性, 采用 Q345 级  $\Phi 500 \times 14$  mm 钢管进行加固。钢管桩桩端超过原工程桩桩端深度 0.5 m, 钢管桩有效长度为 38.0 m。钢管桩需穿过深厚的④粉细砂层及⑤细砂层, 进入⑥细砂层, 该砂层为密实状态, 根据地层分布情况, 可预见压桩动阻力极大, 可能导致压桩设备及建筑物底板受损。为确保压桩顺利进行, 需采用减摩助沉的方法。具体做法为在钢管桩端部设置 6 m 长的  $\Phi 273$  钢管作为桩尖, 端部第 1 节钢管开注浆孔, 在穿越砂层过程中压桩动阻力过大时, 通过注浆孔注入润滑液, 减少压桩阻力, 在钢管桩压到设计标高后, 通过注浆孔进行注浆, 提高钢管桩承载力, 同时对原工程桩进行加固。减摩钢管桩尖如图 6 所示。

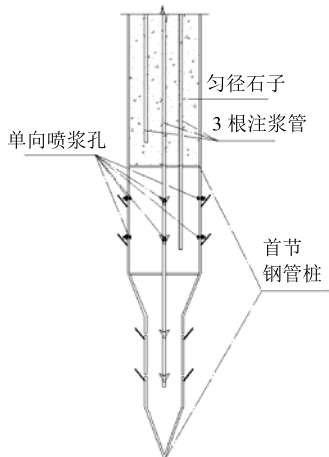


图 6 减摩钢管桩尖示意图

Fig. 6 Schematic diagram of friction reducing pile tip

## 2.3 压桩施工

本项目钢管桩长度为 38.0 m, 共分 19 节进行压桩, 每节长度为 2 m, 钢管桩长度长, 节数多, 务必要严格控制垂直度、焊接质量、接桩端口平整度等才能保证钢管桩的质量, 确保钢管在承受高达 5 000 kN 的压桩力时不会在接缝处绷断。每施工 1 节, 钢管桩内注浆管相应接长。

压桩时每 0.5 m 记录 1 次压桩动阻力, 典型的压桩动阻力曲线见图 7。通过与地层对比可以看出, 钢管桩进入砂层后, 压桩力显著增加, 在入土 16 m 左右, 压桩力已达到 5 000 kN, 此时开始注入润滑液以减小压桩阻力。可以看出, 在入土 16~36 m 深度区间内, 压桩力基本控制在 5 000~6 000 kN, 最后 1 节钢管桩压桩时停止注入润滑液, 最终压桩力超

过 6 000 kN, 最大压桩力达到 6 785 kN。这也验证了锚杆静压桩在穿越深厚砂层时采用润滑液降低压桩阻力是有效的。

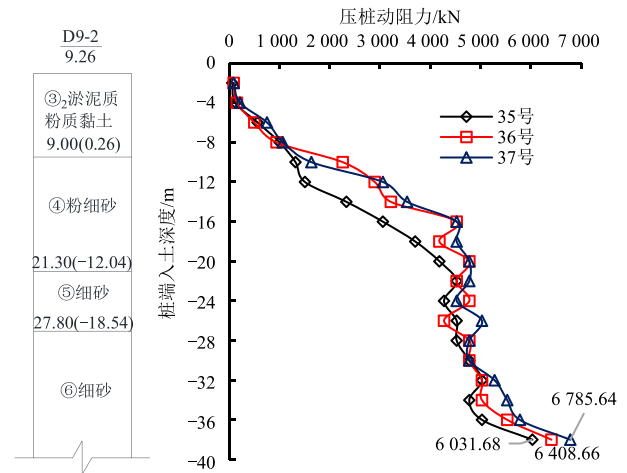


图 7 典型压桩动阻力曲线

Fig. 7 Typical pile-pressing dynamic resistance curve

## 2.4 注浆施工

为保证桩端注浆质量, 同时为了节约水泥用量, 仅在第 1 节钢管桩桩侧设置注浆孔, 在第 1 节钢管桩上部设置端板, 避免浆液流入第 2 节及以上的钢管桩。第 2 节及以上的钢管桩内填碎石以增大钢管桩刚度。注浆管随压桩进度分段连接至基础顶面, 压桩完成后进行注浆。注浆采用纯水泥浆液, 水灰比为 0.5~0.6, 注浆采用分 2 次, 每次间歇 60 min 慢速注浆, 注浆流量不大于 50 L/min, 单桩注浆水泥用量 6.0 t。

## 3 加固效果分析

### 3.1 钢管桩承载力检测

注浆完成后休止满 28 d, 采用慢速加载法对钢管桩竖向承载力进行检测。抽检数量为 3 根, 最大加载量为 6 000 kN, 钢管桩静载检测曲线见图 8,

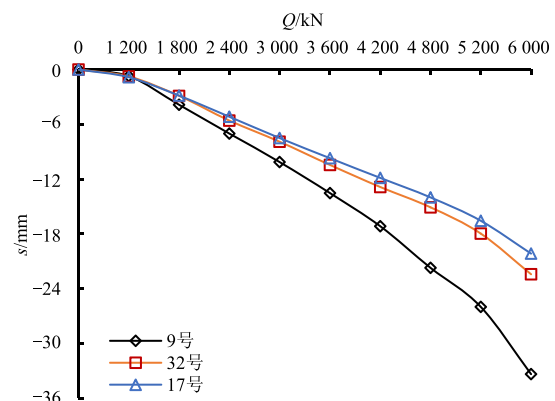


图 8 钢管桩静载检测曲线图

Fig. 8  $Q$ - $s$  curves of steel pipe piles

可以看出  $Q-s$  曲线均较平缓，未出现陡降段，这表明检测桩在 6 000 kN 荷载作用下均未达到极限状态，则单桩抗压承载力特征值均高于 3 000 kN，能够满足加固要求。

### 3.2 工程桩加固效果检测

钢管桩注浆完成后，对原工程桩再次进行了检测，检测所得的  $Q-s$  曲线见图 9。可以看出，在加载至 4 500 kN 时，工程桩沉降量不超过 16 mm，沉降仍为线性状态，预估其极限承载力超过 5 000 kN，表明通过锚杆静压桩注浆对原工程桩进行加固起到了较

好的效果。加固后的工程桩承载力达到了设计要求。

### 3.3 建筑物沉降监测

建筑物沉降监测数据如图 10 所示。项目于 2021 年 12 月 21 日封顶，封顶时的最大沉降量为 26.33 mm，至 2022 年 7 月 19 日，最大沉降量为 30.06 mm，封顶后沉降速率为 0.018 mm/d，沉降速率趋于稳定，且未出现不均匀沉降。建筑物沉降速率满足《建筑变形测量规范》(JGJ 8—2016) [10] 允许的沉降速率 (0.01~0.04 mm/d)，表明建筑物沉降已收敛，证明本项目的加固设计和施工达到了预期的效果。

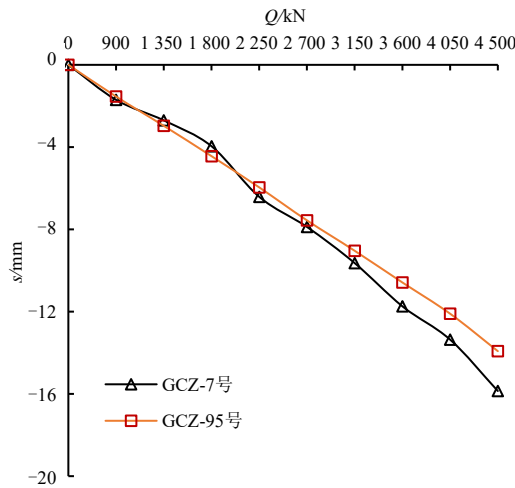


图 9 加固后原工程桩静载检测曲线图

Fig. 9  $Q-s$  curves of engineering piles after reinforcement

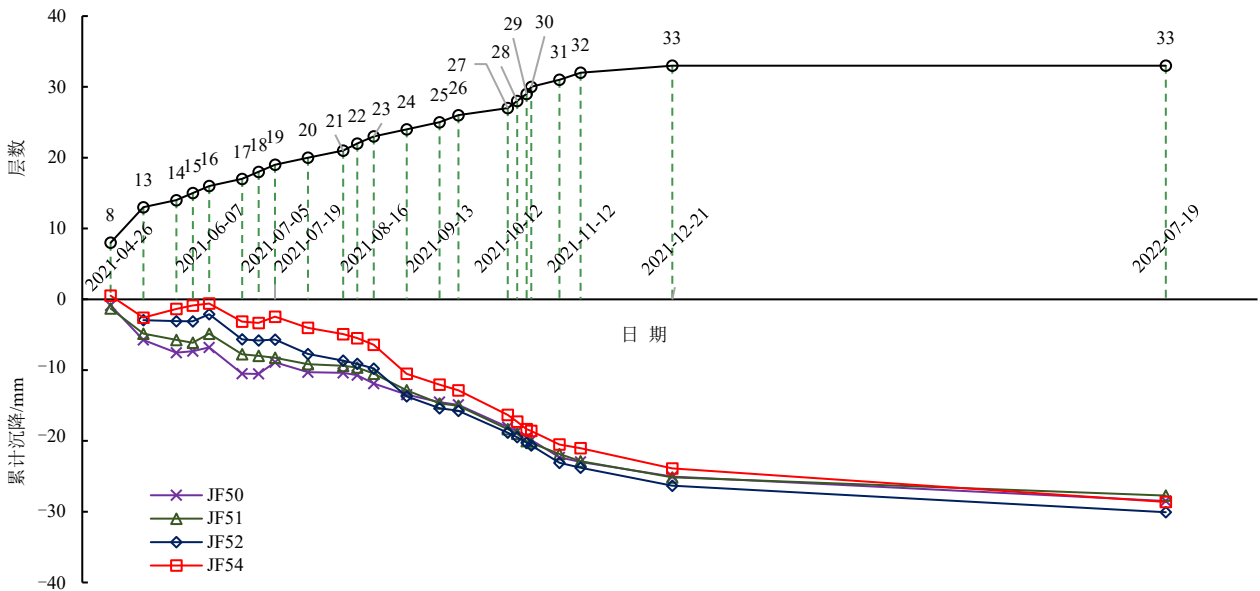


图 10 建筑物沉降监测数据

Fig. 10 Building settlement monitoring data

## 4 结 论

(1) 在砂层中施工钻孔灌注桩时，务必要严格

控制护壁泥浆的质量，浇筑混凝土前应严格进行二次清孔，必要时建议增加桩端注浆工艺，以保证工程桩质量，避免造成严重质量事故。

(2) 当原基础不能满足设计要求时, 可以采用锚杆静压桩对其进行加固。进行基础加固时, 考虑到原工程桩检测的数量局限性和质量不确定性, 新补钢管桩采用均匀布置、重点突出的布置方式, 保证建筑物整体的稳定性。

(3) 大吨位锚杆静压桩施工时, 可采取注入润滑液减摩助沉, 保证达到设计标高, 满足加固要求。压桩到位后, 再通过钢管桩注入水泥浆以提高钢管桩承载力, 同时可对原工程桩进行加固。

## 参考文献

- [1] 周志道. 锚杆静压桩法[J]. 工业建筑, 1984(1): 43-47.  
ZHOU Zhidao. Anchor static pressure pile method[J]. Industrial Construction, 1984(1): 43-47.
- [2] 王俊淞. 注浆结合钢管桩在岩溶地区不良地基处理中的应用[J]. 土工基础, 2019, 33(3): 246-249.  
WANG Junsong. Application of grouting combined with the steel pipe pile method in poor soils in Karst[J]. Soil Engineering and Foundation, 2019, 33(3): 246-249.
- [3] 李明. 软土地区高层建筑桩基加固技术的应用研究[J]. 地基处理, 2023, 5(6): 512-518.  
LI Ming. Application and research on pile foundation strengthening technology of high-rise building in soft soil area[J]. Journal of Ground Improvement, 2023, 5(6): 512-518.
- [4] 骆敏, 叶彬. 超长锚杆静压桩在建筑加层改造工程中的应用[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 252-255.  
LUO Min, YE Bin. Application of the anchor jacked overlength-piles in the engineering of building addition and reinforcement[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(3): 252-255.
- [5] 胡建昌, 梁志荣. 锚杆静压桩在软土地区既有建筑基础加固中的应用[J]. 地基处理, 2020, 2(3): 241-244.  
HU Jianchang, LIANG Zhirong. Application of statically pressed anchoring pile in improvement of foundation of existing building in soft soils[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(3): 241-244.
- [6] 逯焕波, 刘俊生, 陈昌师, 等. 软土地区锚杆静压桩地基加固应用实例研究[J]. 地基处理, 2020, 2(2): 137-142.  
LU Huanbo, LIU Junsheng, CHEN Changshi, et al. Study on the application of anchor static pressure pile for foundation reinforcement in soft soil area[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(2): 137-142.
- [7] 李晓勇. 既有高层建筑物纠偏及桩基补强案例分析[J]. 地基处理, 2020, 2(2): 143-147.  
LI Xiaoyong. Case study on rectification and pile foundation reinforcement for existing high-rise buildings[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(2): 143-147.
- [8] 王俊淞, 李福锋, 李福清, 等. 大吨位锚杆静压桩在高层建筑纠偏加固中的设计及工程实践[J]. 建筑科学, 2023, 39(9): 155-161.  
WANG Junsong, LI Fufeng, LI Fuqing, et al. Design and engineering practice of large tonnage anchor static pressure pile in rectification and reinforcement of high-rise buildings[J]. Building Science, 2023, 39(9): 155-161.
- [9] 杨砚宗. 超大吨位锚杆静压桩加固超高层建筑实践[J]. 工程勘察, 2023, 51(7): 30-35.  
YANG Yanzong. Practice of super high-rise buildings reinforced with super large tonnage anchor static pressure pile[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2023, 51(7): 30-35.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑变形测量规范: JGJ 8—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Deformation Measurement of Building and Structure: JGJ 8—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.