

软土地区高层建筑桩基加固技术的应用研究

李明

(上海勘察设计研究院(集团)股份有限公司, 上海 200093)

摘要: 软土地区高层建筑通常采用桩筏基础、独立承台桩基等形式。由于地层浅部土质软弱、施工速度过快、工序安排不合理、施工质量缺陷等原因, 通常会造成桩基出现偏位、断桩等问题。建筑在施工完成后出现不均匀沉降, 同时伴随着墙体开裂、倾斜等质量问题, 后续使用存在安全隐患。本文通过对某高层建筑的基础形式、不均匀沉降原因进行研究分析, 采用锚杆静压桩进行桩基加固, 并针对桩基加固设计施工中遇到的技术难题提出了综合治理方法, 解决了高层建筑桩基加固过程中涉及到的大吨位锚杆桩施工、低净空狭小空间压桩、独立承台桩基础无补桩空间、高地下水位封桩易渗漏等技术难题, 取得了良好的效果。

关键词: 软土地区; 锚杆静压桩; 独立承台桩基; 狭小空间; 高地下水位

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)06-0512-07

Application and research on pile foundation strengthening technology of high-rise building in soft soil area

LI Ming

(SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: Pile raft foundation, independent cap pile foundation and other forms are generally adopted for high-rise buildings in soft soil regions. Owing to the low-quality soil in the shallow strata, excessively rapid construction, ill-structured work procedures, and construction defects, issues like pile foundation deflection and breakage frequently arise. Subsequently, uneven settlement emerges post-construction, accompanied by issues like wall cracks and tilting, which pose safety risks in the future use of the building. In this work, the foundation form of a high-rise building and the cause of uneven settlement are analyzed. We further employ static anchor piles to fortify the pile foundation and offer a comprehensive solution to address technical challenges in the design and execution of pile foundation reinforcement. The study successfully resolves technical challenges in the high-rise building pile foundation reinforcement process, encompassing aspects like constructing high-capacity anchor piles, managing pile foundations within confined spaces, dealing with independent cap pile foundations lacking fill pile space, and mitigating the risk of sealed pile leakage in high groundwater conditions.

Key words: soft soil area; anchor statically pressed pile; independent cap pile foundation; narrow space; high groundwater level

0 引言

软土地区地下水埋深浅, 且浅部有较厚的软弱土, 高层建筑多采用预制桩、灌注桩等桩基础。由于桩基施工质量缺陷, 施工速度过快, 或者基坑变形过大、滑坡等原因, 造成桩基偏位、脱节, 甚至断桩等问题^[1-3]。桩基质量缺陷往往会造成高层建筑

发生不均匀沉降, 进而引发建筑倾斜、结构开裂等问题, 给建筑的正常使用带来安全隐患。

目前在治理既有建筑不均匀沉降、桩基加固补强、基础托换等工程中采用锚杆静压桩是行之有效的方法^[4-9]。但对于桩基加固过程中存在的施工空间狭小、独立承台桩基无补桩空间、高地下水位封桩易渗漏等问题, 依然是技术难点。

收稿日期: 2022-12-31

作者简介: 李明(1990—), 男, 河南信阳人, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程勘察、设计及既有建筑加固设计施工的研究工作。E-mail: lm_1215@126.com。

本文通过对某高层建筑的不均匀沉降原因进行研究分析,针对桩基加固设计施工中遇到的上述技术难题提出了综合治理方法,取得了良好的效果。

1 工程概况

1.1 建筑物概况

某高层建筑为地上11层住宅楼,建筑长52.80 m,宽15.30 m,高32.55 m。

基础形式为独立承台桩基础,基础承台厚800 mm。桩采用预制钢筋混凝土方桩,桩长包括33.0 m、32.0 m、31.0 m,桩端持力层为⑤₂粉砂夹粉土层,单桩抗压承载力特征值取1 500 kN。独立承台埋深约5.50 m,无地下室。基础桩位图见图1。

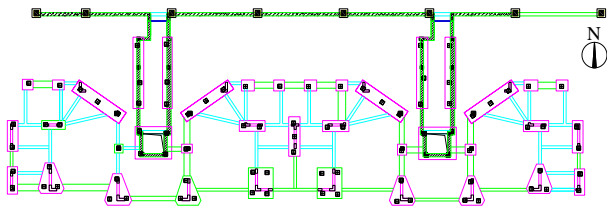


图1 基础桩位图

Fig. 1 Foundation and pile position

根据检测资料,文中建筑在基坑开挖后出现了部分偏位桩,低应变检测结果I类桩31根,II类桩8根(总桩数89根,检测数量39根),检测报告显示桩身在桩顶以下10.0~13.0 m左右存在着轻微缺陷。

原设计单位根据规范要求,结合桩基偏位情况,调整了基础承台及连梁的布置,并选取了部分桩进行静载试验,检测结果满足规范要求。

1.2 工程地质条件

本工程拟建场地80.5 m深度内除表层为素填土外,其余均为第四系全新统-晚更新统滨海-河口相、滨海-浅海相及河口-湖沼相形成的黏性土、粉(砂)性土。根据场地内土层结构、岩性、成因等差异,可分为9个层次。

本工程涉及地层包括①素填土、①素填土、②₁淤泥、②₂淤泥质粉质黏土、③₁黏土夹粉质黏土、③₂粉质黏土夹粉土、③₃粉质黏土、④₁黏土夹粉质黏土、⑤₁粉土、⑤₂粉砂夹粉土。一般呈水平层理分布。典型地质剖面见图2。

根据岩土工程勘察报告,土层分布及主要物理力学性质如表1所示。

1.3 建筑变形分析

文中建筑在安装电梯时,因井道倾斜超过限值导致电梯无法安装。根据房屋沉降监测数据,建筑北侧沉降基本收敛,但南侧沉降仍不稳定。

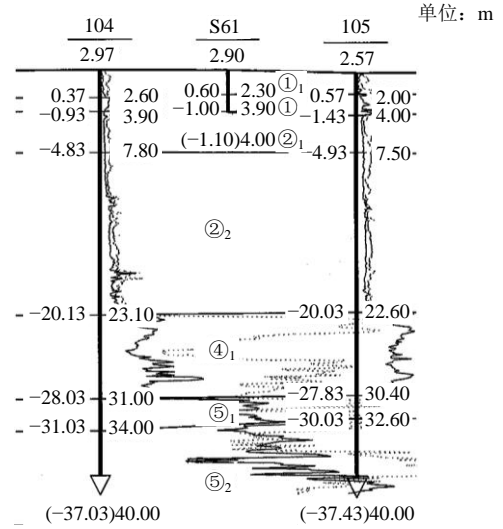


图2 典型地质剖面图

Fig. 2 Typical geological profile

表1 土层分布及主要物理力学性质一览表

Table 1 Main physical and mechanical properties of soil

层号	土层名称	厚度/m	重度/ (kN/m ³)	预制桩	
				f _s /kPa	f _p /kPa
① ₁	素填土	0.20~7.00	—	—	—
①	素填土	0.70~3.20	—	—	—
② ₁	淤泥	2.20~6.10	16.3	12	—
② ₂	淤泥质粉质黏土	0.80~15.50	17.4	15	—
③ ₁	黏土夹粉质黏土	1.50~2.40	19.4	60	—
③ _{2A}	粉土夹粉质黏土	0.70~9.50	18.3	45	1 200
③ ₂	粉质黏土夹粉土	0.80~11.30	18.8	45	1 200
③ ₃	粉质黏土	0.60~10.80	18.5	35	800
④ ₁	黏土夹粉质黏土	3.20~12.50	19.5	85	3 200
⑤ ₁	粉土	0.60~6.50	18.3	85	5 000
⑤ _{1A}	粉质黏土	0.30~1.90	18.9	50	—
⑤ _{2A}	粉质黏土	0.40~1.10	18.6	60	2 000
⑤ ₂	粉砂夹粉土	17.00~25.60	18.3	95	8 000
⑥	粉质黏土	1.70~6.70	18.8	55	—

根据施工记录,地下一层于2017年7月完成覆土回填,屋面结构于2017年7月7日施工,基础上部主要荷载施加完成。截至2017年10月18日,建筑累计沉降21.41~25.06 mm,沉降变形速率为0.05~0.07 mm/d。

根据监测数据,2018年4月19日至2018年6月9日累计沉降量为1.86~4.27 mm,其中南侧为2.97~4.27 mm,北侧为1.86~2.50 mm,南北向累计差异沉降为0.77~2.41 mm,且差异沉降仍然处于进一步增大趋势。建筑南侧测点的沉降速率超过规范^[10]要求的建筑物稳定标准,沉降变形不收敛。

1.4 不均匀沉降原因分析

文中建筑南北向存在不均匀沉降和倾斜,南侧

沉降不收敛,表明南侧部分桩基实际承载力未达到原设计要求。桩基承载力不足主要与地层条件、桩基施工、基坑土方施工等因素有关,分析如下:

(1) 场地浅部填土、淤泥及淤泥质粉质黏土土质极差,预制桩沉桩施工,如场地处理不到位,打桩机在沉桩施工时易出现陷机、倾斜等,可能造成桩身受损甚至破坏,进而导致桩基承载力不足。

(2) 预制桩沉桩过快产生挤土效应,挤土引起的超孔隙水压力对预制桩产生水平推力,可能使桩基偏斜、脱节甚至断桩,如接头质量不好更易脱开。

(3) 本工程基坑开挖深度约 3.5 m 左右,场地浅部土质条件差,如基坑围护存在变形过大,土方开挖未按要求实施,也会造成桩基偏位、倾斜,甚至断桩。

1.5 项目的特点及技术难点

(1) 原工程桩施工质量不确定性:本工程原有部分桩基发生偏位,原设计单位根据桩基检测和桩位复测结果,调整了承台尺寸和连系梁布置。根据检测报告,桩基检测为合格,建筑在结构封顶后南北向出现不均匀沉降,桩基实际质量情况不明,具有不确定性。

(2) 狭小空间基坑围护施工:本工程主楼南侧建筑物外墙距临时围墙最近约 4.8 m,距电缆井最近约 4.0 m;西侧建筑物外墙距临时围墙最近约 3.0 m,距电缆井和水管约 0.8 m。周边环境复杂,基坑围护施工空间狭小。

(3) 狭小空间土方开挖:本工程基础承台上部已回土至地面标高,覆土厚约 4.7 m,其中一层梁板底面距基础承台顶面净空高度约 4.0 m。基础加固前需要挖除覆土,土方开挖在地下一层结构影响范围内,环境复杂且施工空间狭小,施工难度大。

(4) 独立承台上新增叠合板:本工程基础为独

立承台桩基础,承台之间布置连系梁,无法直接在原有承台上开孔补桩,根据刚度平衡原理,补桩需对称布置在原有承台两侧,需要新增叠合板传力,使补桩与原有承台桩基共同承担上部荷载,以及提供压桩反力。

(5) 电梯井区域水位高:本工程所处地区地下水丰富,潜水水位埋深约 0.5 m,电梯井底板埋深约 5.5 m,底板底水头高约 5.0 m。补桩施工前需要在电梯井底板进行开孔泄压,将地下水降至底板底以下,保证补桩施工顺利进行。

2 狭小空间高层建筑桩基加固方案

2.1 桩基加固方法

本工程根据沉降观测数据进行反演分析,可对南侧沉降大侧进行补桩,补桩数量少。采用锚杆静压钢管桩 $\Phi 426 \times 12$,桩长 33 m,以 $\textcircled{5}_2$ 粉砂夹粉土作为桩基持力层,单桩竖向抗压承载力特征值取 1 500 kN,钢管桩节之间通过钢套管焊接连接。

为了提高南侧基础的整体性,提供补桩平台,在原有承台和连梁上新增叠合板,保证新补桩与原有基础、上部结构之间荷载传递。新增筏板及钢管桩布置图见图 3。桩顶反力计算结果见图 4。

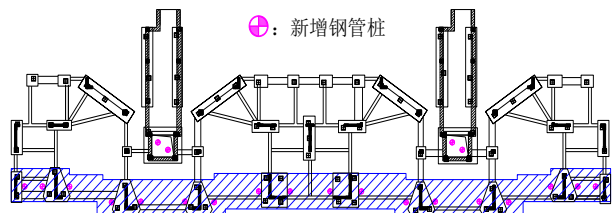


图 3 新增筏板(阴影部分)及钢管桩布置图

Fig. 3 Layout of new raft (shaded part) and steel pipe pile

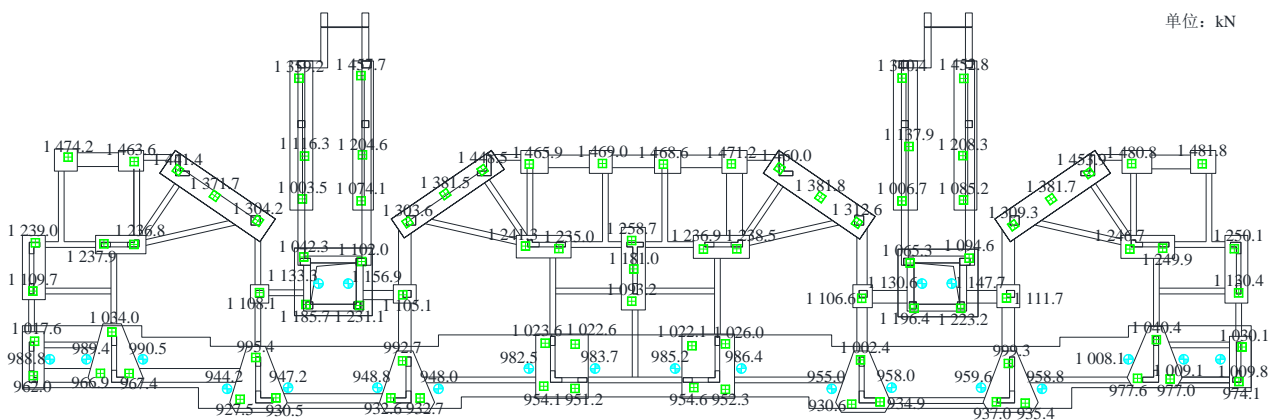


图 4 桩顶反力计算结果

Fig. 4 Calculation results of pile top reaction force

2.2 狭小空间基坑围护施工技术

文中建筑基础加固施工前,需要将承台上的覆

土挖除,卸土前要进行基坑围护。建筑南侧外墙紧邻挡土墙、临时围墙及电缆井,西侧外墙紧邻临时

围墙、电缆井和市政水管, 周边环境复杂, 围护施工空间狭小。

围护方案充分利用住宅楼南侧原有重力坝及挡土墙挡土, 将回填土卸土至重力坝压顶板。西侧采用长度 12 m 的 32a 槽钢围护, 水平设 H400×400 型钢

支撑。北侧空间相对宽松, 采用两级大放坡开挖卸土。东侧场地未回填, 浅部为建筑垃圾, 挖深约 2.7 m, 采用一级放坡, 局部区域借助建筑剪力墙挡土。基坑围护平面布置见图 5, 南侧土方开挖剖面见图 6, 西侧土方开挖剖面见图 7, 南侧土方开挖现场见图 8。

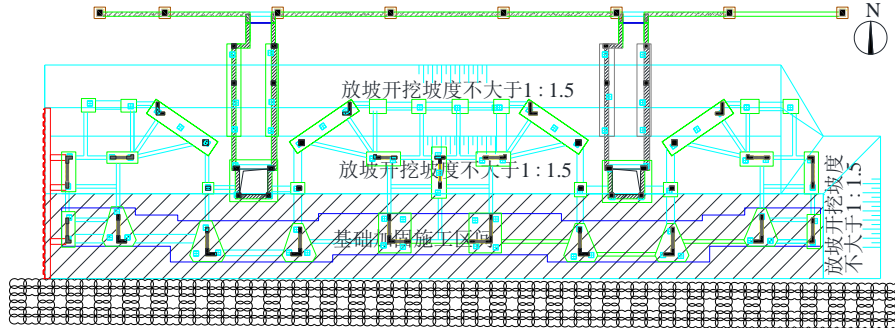


图 5 基坑围护平面布置图

Fig. 5 Plan of foundation pit enclosure

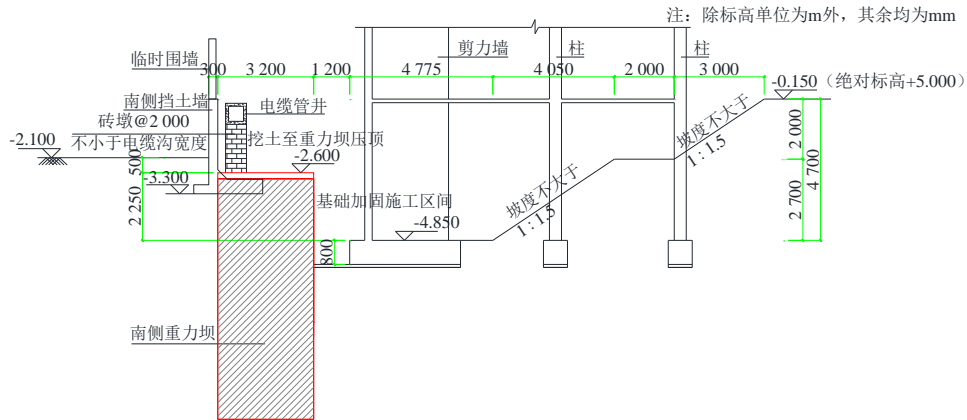


图 6 南侧土方开挖剖面图

Fig. 6 Profile of earth excavation on the south side

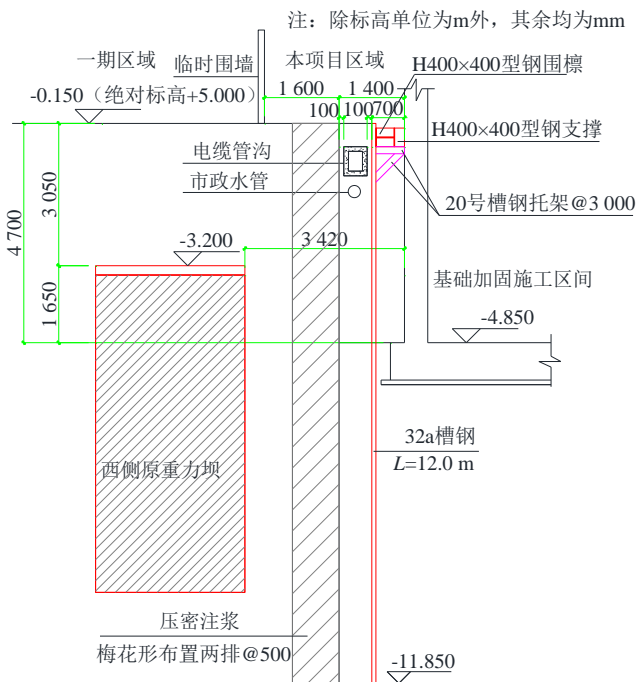


图 7 西侧土方开挖剖面图

Fig. 7 Profile of earth excavation on the west side



图 8 南侧土方开挖现场图

Fig. 8 Site map of earth excavation on the south side

2.3 独立承台桩基础新增叠合板加固技术

原有建筑基础形式为两桩、三桩和四桩承台加桩基, 独立承台无法补桩, 补桩施工前需要新增筏板将原有承台基础和锚杆静压桩连为整体。

根据监测数据, 本工程南侧沉降不稳定, 仅需在南侧补桩, 补桩区域增加叠合板, 板厚 800 mm。

新增叠合板主要承受桩顶反力、上覆土荷载。通常可通过在承台顶面、侧面进行植筋, 顶面植筋提供抗拔力, 侧面植筋承担剪力, 植筋间距和深度根据所需抗拔力进行计算确定。本工程在承台上表

面及剪力墙上植筋，植筋采用 $\Phi 20@200$ ，承台植入深度 500 mm。植筋完成后，承台上表面新老混凝土

土接触面进行凿毛处理，预留桩孔新浇筑叠合板。承台植筋节点见图 9。新增承台叠合板见图 10。

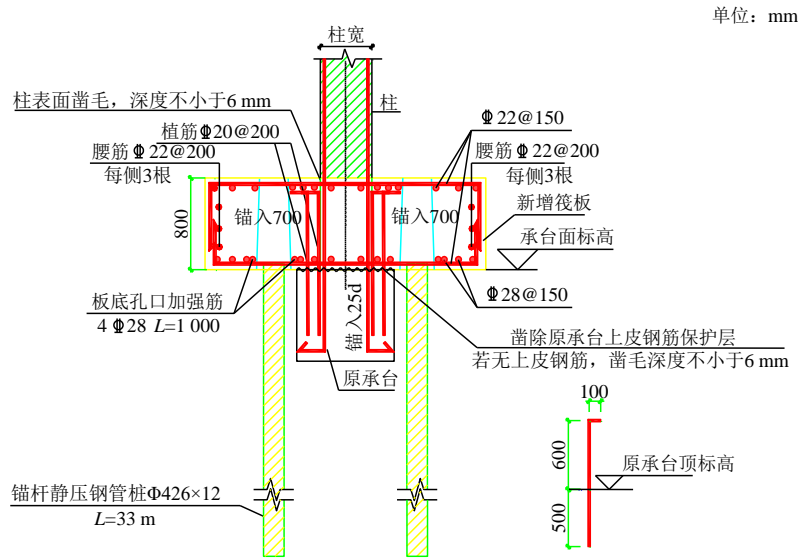


图 9 承台植筋节点图

Fig. 9 Node of bonded rebar of cushion cap



图 10 新建承台叠合板

Fig. 10 New cap composite plate

2.4 低净空狭小空间土方开挖技术

本工程基坑挖深 4.7 m，建筑物一层梁板底面距基础承台顶面净空高度约 4.0 m。周边邻近管沟、

挡土墙，施工空间狭小。不同于常规土方开挖工作，在建筑内部进行土方开挖必须充分考虑既有结构内部环境对土方开挖作业的影响，要保证挖土施工的便利，也要保护好既有建筑结构。

适用于低净空狭小空间的土方开挖，需要采用小型机械将开挖土方转运至出土位置，挖土过程中注意避让剪力墙、梁柱等结构构件，有条件可采用水平履带式出土或立体式出土。

结合现场条件，本工程最终采用多台小型挖土机械，从西到东，依次退挖施工。外侧采用中型挖土设备及土方车进行出土驳运。挖土路线见图 11。挖土施工过程中采用明排水及时排除积水。

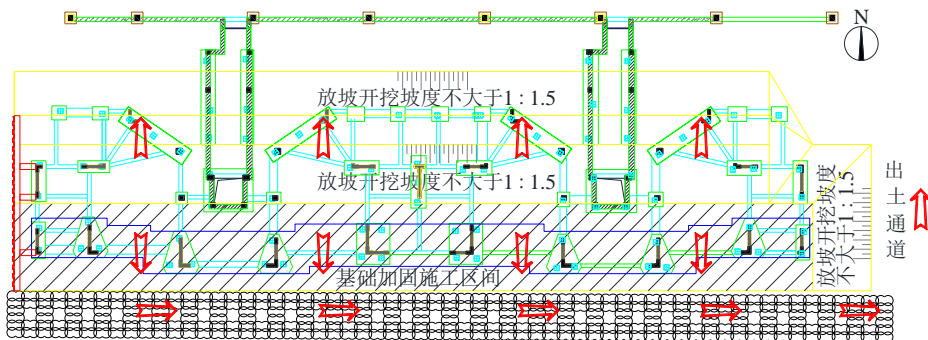


图 11 挖土路线图

Fig. 11 Excavation roadmap

2.5 地下水控制及高水位封桩技术

本工程场地潜水地下水水位埋深 0.5 m 左右，电梯井板底埋深为 5.50 m，水位差为 5.0 m，地下水位高。补桩施工前，需要将地下水泄压至底板底。

本工程在每个电梯井内各开设 1 个泄压孔，采用井内明排水泄压，并在紧邻电梯井外侧新增 1 个临时集水深坑，同步排水泄压，达到了预期的效果。为防止补桩封桩后地下室出现渗漏，本工程采

用二次封桩技术, 设两道止水条, 封桩节点见图 12。第一次封桩至底板一半厚度, 振捣密实, 混凝土初凝后, 查验桩孔是否有渗漏点, 并及时对渗漏点进行堵漏。待无渗漏点后, 采用高强灌浆料封桩至底板面平, 确保底板后续无渗漏问题。

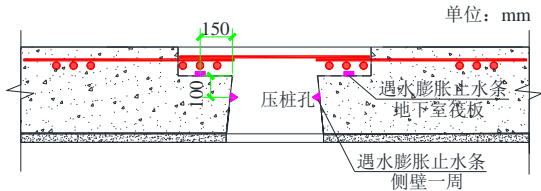


图 12 封桩节点
Fig. 12 Pile sealing joint

3 加固效果分析

本工程通过动态监测, 为加固设计及施工提供依据, 分析了建筑在补桩加固前后的变形情况。建筑四周共布置了 8 个监测点, 沉降监测点 (1~8) 布置见图 13。各监测点的累计沉降速率曲线见图 14, 南侧和北侧的监测点平均沉降速率曲线见图 15, 图中数据为负表示下沉, 数据为正表示上抬。

补桩施工前 (2018-07-01—2018-08-10), 南侧承台施工区域进行卸土开挖, 基础承台上部荷载减

小, 局部区域出现上抬变形。

补桩施工期间 (2018-09-01—2018-10-22), 南侧累计沉降变形-4.23~-1.28 mm, 最大沉降变形为-4.23 mm (监测点 5), 平均沉降变形为-2.46 mm, 2018 年 10 月平均沉降变形速率为-0.10 mm/d。

补桩施工后 (2018-10-23—2018-12-25), 南侧累计沉降变形-7.12~-7.05 mm, 最大沉降变形为-7.12 mm (监测点 7), 平均沉降变形为-7.10 mm, 2018 年 12 月平均沉降变形速率为-0.03 mm/d。

补桩完成后, 受覆土回填扰动以及上部二次结构和装修施工影响, 基础上部荷载有所增加, 11 月份沉降有所增大, 12 月份后趋于稳定。其中, 9 月份南侧卸土施工, 部分点位不具备观测条件无法观测, 监测点 8 受回填土施工影响, 数据有所偏差。住宅楼自补桩后至今沉降稳定, 达到预期加固效果。



图 13 沉降监测点 (1~8)
Fig. 13 Settlement monitoring points (1-8)

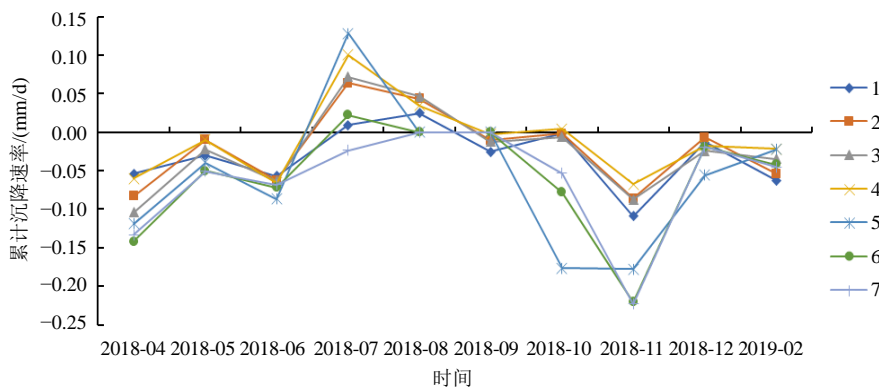


图 14 累计沉降速率曲线
Fig. 14 Cumulative settlement rate curves

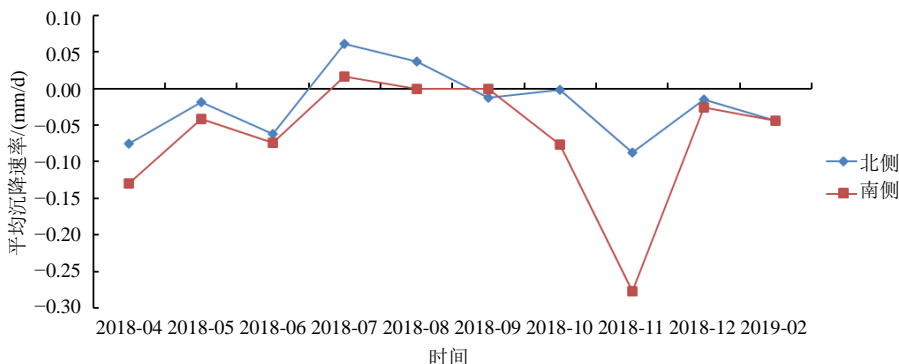


图 15 平均沉降速率曲线
Fig. 15 Average settlement rate curves

4 结 论

既有建筑周边环境日益复杂, 桩基事故原因多样, 涉及狭小空间、精细化施工等技术的应用需求将会日益增多。本文通过对某高层建筑基础加固案例的分析, 针对软土地区高层建筑桩基加固中遇到的独立承台桩基补桩、狭小空间基坑围护设计施工、高水位封桩等技术难题提出了解决方案, 取得了良好的效果, 以期为类似工程提供参考。

参考文献

- [1] 周晓龙, 萧凡, 廖红, 等. 软土地区预应力管桩施工质量事故分析及处理[J]. 工业建筑, 2015, 45(10): 191-195, 47.
ZHOU Xiao-long, XIAO Fan, LIAO Hong, et al. Analysis and disposal of construction quality accident for prestressed concrete pipe piles in soft soil area[J]. Industrial Construction, 2015, 45(10): 191-195, 47.
- [2] 朱奎. 桩基质量事故分析与对策[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
ZHU Kui. Analysis and Countermeasures of Pile Foundation Quality Accidents[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [3] 张忠苗, 张乾青, 刘俊伟, 等. 软土地区预应力管桩偏位处理实例分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 975-980.
ZHANG Zhong-miao, ZHANG Qian-qing, LIU Jun-wei, et al. Treatment of sloping prestressed pipe piles in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 975-980.
- [4] 吴江斌, 王向军, 宋青君. 锚杆静压桩在低净空条件下既有建筑地基加固中的应用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 2): 162-165.
WU Jiang-bin, WANG Xiang-jun, SONG Qing-jun. Application of foundation reinforcement by anchor-jacked piles under low clearance[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 162-165.
- [5] 陆秋生, 许宝田, 野本太, 等. 软土地基新型地固件加固方法[J]. 工程勘察, 2019, 47(10): 35-41.
LU Qiu-sheng, XU Bao-tian, YEBEN Tai, et al. Reinforcement technique with new reinforcement components for soft soil foundation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019, 47(10): 35-41.
- [6] 周汉香, 周越洲. 某高层建筑桩基加固设计[J]. 建筑结构, 2019, 49(20): 99-103.
ZHOU Han-xiang, ZHOU Yue-zhou. Pile foundation consolidation design of a tall building[J]. Building Structure, 2019, 49(20): 99-103.
- [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 Xiao-yong. 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] 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 Jian-chang, LIANG Zhi-rong. 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.
- [9] 娄荣, 张祎民, 沈重, 等. 利用锚杆静压桩加固筏板基础的设计方法研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊 1): 2174-2177.
LOU Rong, ZHANG Yi-min, SHEN Zhong, et al. Research on the reinforcement design method of raft foundation with anchor jacked pile[J]. Building Structure, 2022, 52(S1): 2174-2177.
- [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.