

“上硬下软”土层既有建筑基础加固方法

杨砚宗

(上海长凯岩土工程有限公司, 上海 200093)

摘要: 广西某工程项目地质条件复杂, 土层力学特性变化明显, 土层刚度呈现“上硬下软”状态, 且分布厚度不一, 多栋建筑封顶后出现不均匀沉降, 本文旨在确定一种基础加固方案能够较好地解决以上问题。针对土层“上硬下软”的特点, 对于沉降较大的区域创新采用“ $\Phi 377+\Phi 127$ 组合钢管桩”进行基础加固, 防止沉降继续发展。浅层硬壳层采用 $\Phi 377$ 钢管桩提供承载力, 深部软土层采用 $\Phi 127$ 钢管桩深入原 CFG 桩下 1~2 m, 结合注浆工艺, 加固松软土体, 对原 CFG 桩桩底进行加固。对于沉降较小的区域创新采用高压注浆深层扰动技术, 增加局部沉降。采用动阻力控制作为终桩条件, 解决土层起伏剧烈地区桩端持力层无法判断的工程难题。“ $\Phi 377+\Phi 127$ 组合钢管桩”极大地提高了原工程桩承载力, 从而解决了坚硬土层难以沉桩、软弱土层承载力不足的工程难题。该基础加固方案成功解决了既有建筑的不均匀沉降工程难题, 积累了宝贵的工程经验, 为“上硬下软”复杂土层既有建筑基础加固提供了新思路, 具有显著的经济效益和社会效益。

关键词: 基础加固; 锚杆静压桩; 组合钢管桩; 不均匀沉降; 高压注浆; 上硬下软土层

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)03-0270-08

Foundation strengthening method for the existing buildings in upper hard and lower soft soil layers

YANG Yan-zong

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

Abstract: The geological conditions of a project in Guangxi are intricate, leading to substantial variations in the mechanical properties of the soil layers. The soil exhibits a ‘upper hard and lower soft’ configuration with varying thickness distributions, resulting in uneven settlement after the construction of numerous buildings. The objective of this work is to work out a foundation reinforcement strategy to address these challenges effectively. Considering the ‘upper hard and lower soft’ characteristic of the soil layers, an innovative approach is proposed in this study, employing ‘ $\Phi 377+\Phi 127$ combined steel pipe piles’ to mitigate further settlement progression. The $\Phi 377$ steel pipe piles at shallow depths provide bearing capacity, while the $\Phi 127$ steel pipe piles, positioned 1-2 meters below the original engineering piles, will reinforce the pile bases through grouting technology. In regions with small settlement, a novel technique involving high pressure grouting with deep disturbance is implemented to induce localized settlement. Dynamic resistance control serves as the criteria for pile length, meeting the challenges in determining the bearing layer at the pile end in areas with significant soil fluctuations. The adoption of ‘combined steel pipe piles’ significantly enhances the load-bearing capacity of the original engineering piles, effectively resolving issues related to pile drilling in hard soil layers and inadequate bearing capacity in soft soil layers. Consequently, this foundation reinforcement scheme successfully rectifies the problem of uneven settlement in existing buildings, offering valuable engineering insights and presenting a novel approach for reinforcing foundations in complex ‘upper hard and lower soft’ soil layers, thus yielding notable economic and societal benefits.

Key words: foundation reinforcement; anchor jacked pile; combined steel pipe pile; uneven settlement; high pressure grouting; upper hard and lower soft stratum

收稿日期: 2023-04-28

作者简介: 杨砚宗 (1982—), 男, 河北石家庄人, 博士, 高级工程师, 主要从事既有建筑加固纠偏、主动抗浮、地基处理、基坑围护设计等工作。E-mail: 27598340@qq.com。

0 引 言

在软土地区，由于地质条件、设计缺陷、沉桩施工质量、基坑事故、上部结构改造等原因，既有高层建筑物在施工或后期使用过程中易出现承载力不足或不均匀沉降等问题^[1-3]。其中建筑物纠倾加固是一项难度大、综合性强的工程技术，特别是高层桩基础建筑物的纠倾加固^[4]。建筑物纠倾加固在桩基处理设计、施工过程中，应充分考虑不同桩型的共同作用、狭小空间对施工设备及桩型限制等多种问题^[5]。众多建筑物纠倾加固方法中，锚杆静压桩以其施工便捷、承载力高等诸多优势在新建或已建多层建筑物的地基加固、托换、纠偏工程中得到广泛应用^[6-7]。为保证建筑物安全，基础加固方案中多采用“钢管桩+后注浆”以补偿部分承载力并控制不均匀沉降^[8-9]。锚杆静压桩结合地层加固注浆不仅能够提高地基承载力，降低施工过程中产生的附加沉降，还能优化地基承载结构，稳压封桩有效控制桩体回弹^[10]。以往的工程基础加固方案较为全面，工艺较为成熟，涉及工程中大部分工况，但是对于广西岩溶地区“上硬下软”且分布厚度不一的土层还鲜有研究。

本文结合广西某工程，针对此类工程问题，旨在确定一种切实可行的基础加固方案，能够有效解决“上硬下软”土层中坚硬土层难以沉桩、软弱土层承载力不足的工程难题，为类似工程提供新思

路、新方法。

1 工程概况

1.1 项目概况

广西某工程包括 15 栋 17 层住宅楼、配套商铺及地下车库。原设计方案采用的结构形式为框架剪力墙结构，基础形式采用筏板基础，设计承载力不足区域采用 CFG 桩进行地基处理，桩径 600 mm，桩间距 1.8 m，满堂布置，桩端进入稍密圆砾层不少于 3.5 m，有效桩长不少于 6.5 m，单桩竖向承载力特征值为 650 kN，处理后复合地基承载力特征值为 300 kPa。由于原设计方案判断失误，桩长太短，根据监测数据显示，3 号楼建筑物封顶后沉降量及差异沉降较大，且无收敛趋势，迫切需要基础加固处理。

1.2 地质条件

根据区域地质资料，勘察场地内及附近无影响场地稳定性的地质构造带通过，场地区域稳定性好。场地地层主要有第四系人工堆积成因（ Q_4^m ）的①杂填土、第四系全新统冲积成因（ Q_4^a ）的②粉质黏土、③细砂、④圆砾（④₂中密圆砾和④₃密实圆砾多分布在浅层，称为“硬壳层”；④₁稍密圆砾和④₄松散圆砾多分布在深层，称为“软弱土层”）、⑤含砾石黏土（局部分布的夹层），下伏泥盆系上统融县组⑥石灰岩。各土层分布情况及主要物理力学指标见表 1，典型地质剖面见图 1。

表 1 岩土层主要物理力学指标

Table 1 Main physical and mechanical indexes of rock and soil layers

编号及地层名称	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	f_{ak}/kPa	E_s/MPa	c_k/kPa	$\varphi_k/(\text{°})$	长螺旋 CFG 桩	
						桩的极限侧阻力 标准值 q_{sik}/kPa	桩的极限端阻力 标准值 q_{pk}/kPa
①杂填土	15.0	30	2.0	5.0	10.0	—	—
② ₁ 可塑粉质黏土	18.0	150	5.6	32.0	11.0	65	1 200
② ₂ 软塑粉质黏土	16.5	80	3.6	10.0	4.8	45	700
③细砂	18.5	100	8.0	5.0	16.0	50	1 000
④ ₁ 稍密圆砾	19.5	230	16.5	—	35.0	85	1 400
④ ₂ 中密圆砾	20.5	450	24.5	—	40.0	120	2 300
④ ₃ 密实圆砾	22.5	650	28.5	—	55.0	150	3 200
④ ₄ 松散圆砾	18.5	120	10.0	—	25.0	40	1 000
⑤ ₁ 含砾石可塑黏土	17.0	160	5.8	23.0	30.0	65	1 400
⑤ ₂ 含砾石软塑黏土	16.0	90	3.7	17.0	10.0	40	900
⑥ ₁ 破碎石灰岩	—	1 500	—	—	—	—	4 000
⑥ ₂ 较完整石灰岩	—	3 000	—	—	—	—	10 000

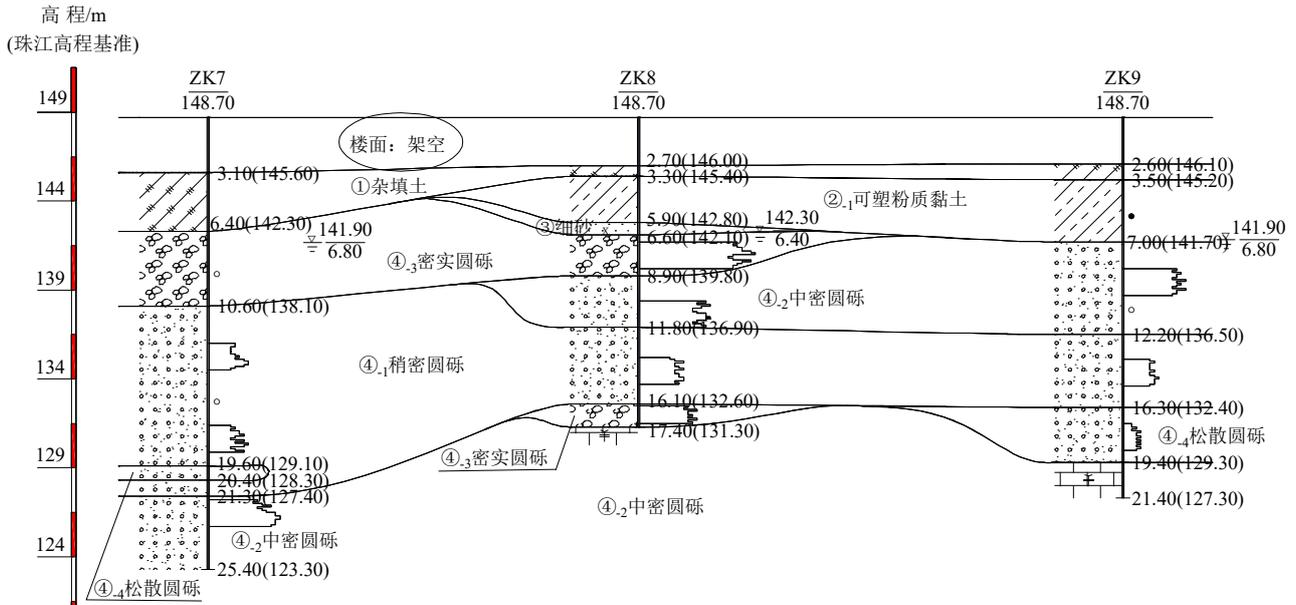


图1 典型地质剖面

Fig. 1 Typical geological profile

1.3 沉降监测结果

根据主体结构施工期间的沉降观测数据并结合施工情况可知,3号楼主体结构施工期间随着荷载增加沉降持续增加,沉降差已达3.07‰(西单元沉降大于东单元),超过结构设计要求(3‰),且未趋于收敛。3号楼沉降观测点平面布置如图2所示,截止至2017年2月底的监测点沉降曲线如图3所示。

由图3可知,3号楼封顶后,最大沉降量为104 mm,最大沉降速率为2.22 mm/d,远远大于沉降稳定速率0.01~0.04 mm/d的要求,并且后续约有30%的荷载未施加,迫切需要进行基础加固处理。

1.4 项目特点和难点

综合建筑物的规模、地质条件、已施工桩基的现状、施工工期等因素,本工程特点和难点如下:

- (1) 沉降未达稳定,施工工期紧;
- (2) 地质条件复杂,土层力学特性变化明显,土层上层硬土层以密实-中密圆砾为主,下层软土层以稍密-松散圆砾或

黏土为主,且起伏较大,土层刚度呈现明显“上硬下软”状态,补桩持力层难以判断;(3)地质条件复杂,施工场地局限性大,施工难度大,基础下已有满堂布置的CFG桩,桩间距为1800 mm,补桩平面位置受到很大的限制,并且地下室层高较低,施工空间狭小,给补桩设计施工带来极大的挑战;(4)自身环境恶劣,施工期间正值雨季,地下室积水严重,存在土体坍塌隐患。

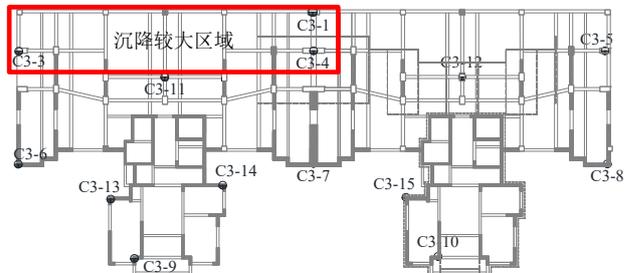


图2 3号楼沉降观测点平面布置

Fig. 2 Layout of settlement observation points of No.3 building

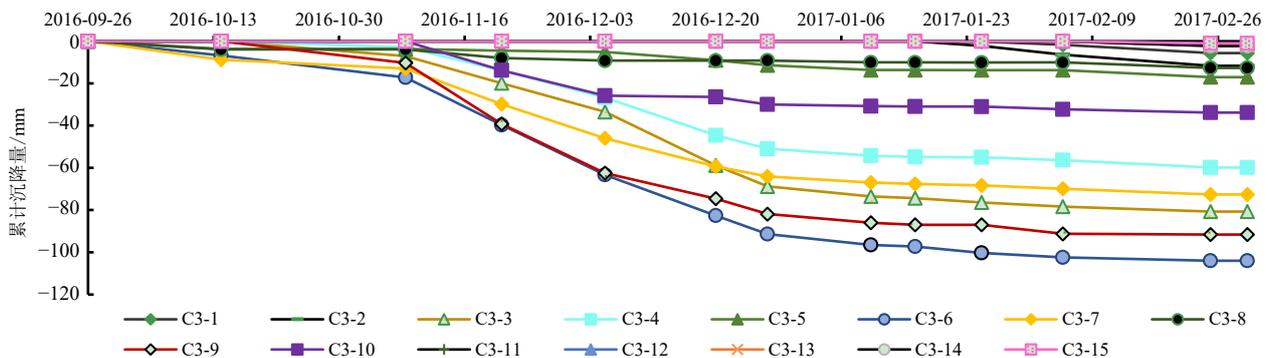


图3 3号楼监测点沉降曲线

Fig. 3 Settlement curves of monitoring points of No.3 building

2 基础加固设计方案

2.1 组合桩方案

本工程为既有建筑加固，常规施工工艺受到很大限制，根据工程特点和相关经验，采用锚杆静压钢管桩进行加固处理。根据建筑物加载情况，结合原 CFG 桩检测结果以及沉降观测结果，设计采用钢管桩承担后续新增全部荷载。

针对土层“上硬下软”的特点，采用“Φ377+Φ127 组合钢管桩”进行基础加固，并在 Φ127 钢管桩端开设梅花形注浆孔，通过注浆对桩端持力层进行加固。该方案充分利用浅层硬壳层为 Φ377 钢管桩提供承载力，深部软土层采用 Φ127 钢

管桩深入原 CFG 桩下 1~2 m，结合注浆工艺，加固松软土体，对原工程桩桩底进行加固，提高原工程桩承载力，从而解决坚硬土层难以沉桩、软弱土层承载力不足的工程难题，组合钢管桩地基加固示意图如图 4 所示。

Φ377 钢管桩设计桩长约 4~7 m，一般桩端持力层为④₂ 中密圆砾，设计单桩承载力特征值为 1 500 kN，采用动阻力控制，Φ127 注浆钢管桩设计桩长约 9~14 m，深入原 CFG 桩下 1~2 m，一般桩端持力层为④₁ 稍密圆砾，采用桩长控制，对沉降较大区域进行补桩，若遇溶洞或极软土层，Φ377 钢管桩将持续打至基岩（超长桩）。钢材选用 Q345B 钢，大钢管内填芯采用 C35 微膨胀混凝土，小钢管下部可注浆形成桩端扩大头。

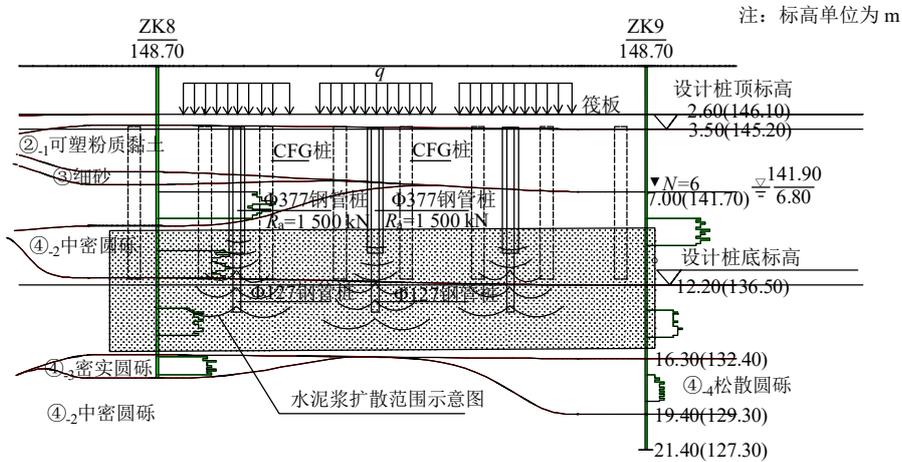


图 4 组合钢管桩地基加固示意图

Fig. 4 Schematic diagram of combined steel pipe pile foundation reinforcement

2.2 深层扰动方案

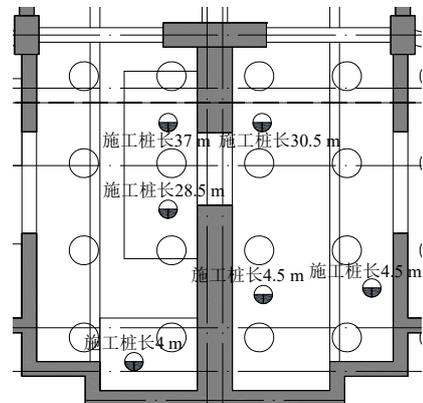
对于沉降较小的区域，采用高压注浆深层扰动技术，结合信息化监测，对建筑物进行迫降，效果显著。

高压注浆深层扰动技术的原理是通过定点高压喷射注浆扰动深层土体，从而达到加速地基沉降的目的。在施工过程中，通过沉降监测软件实时反映房屋沉降曲线，了解各点之间的沉降差异，确保沉降曲线呈线性增长，同时定时观测上部结构裂缝发展情况。整个纠偏过程中的迫降回倾速率控制在 3 mm/d 以内，且各测点间的不均匀沉降差异控制在 0.5‰之内。

2.3 动阻力控制方案

该项目地处典型喀斯特地貌地区，场地地层起伏和层厚变化很大，由动阻力控制桩长的 Φ377 钢管桩施工长度也相应变化明显。如局部区域施工 6 根桩，最长施工桩长 37 m，最短施工桩长 4 m，桩长最大差异达 33 m，局部区域钢管桩施工情况如图

5 所示。若按照原设计的统一桩长，部分工程桩桩端处于较差土层，会影响工程桩承载力，而采用动阻力控制终桩条件，可以较好地控制工程桩进入持力层的深度，并保证工程桩的承载力。



图例：○ CFG桩（原工程桩）
● Φ377+Φ127组合钢管桩

图 5 局部区域钢管桩施工情况

Fig. 5 Construction of steel pipe piles in local area

3 方案计算分析

3.1 桩基沉降计算

对新增钢管桩桩基沉降进行验算如下：

(1) 主要计算数据

新增钢管桩桩型为 $\Phi 377+\Phi 127$ 组合钢管桩，桩长为 9~12 m，桩数为 44 根，新增钢管桩单桩承载力特征值为 1 500 kN。

(2) 沉降计算结果

3 号楼各钢管桩桩顶沉降计算结果如图 6 所示，桩顶沉降范围为 2.7~37.3 mm，最大沉降量为 37.3 mm，建筑加固后的沉降计算值满足规范对建筑物地基变形的要求。

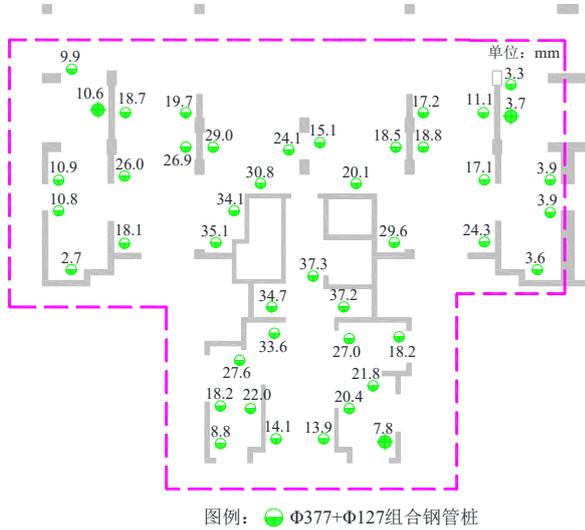


图 6 3 号楼桩顶沉降计算结果

Fig. 6 Calculated settlement of pile top of No. 3 building

3.2 桩帽构造

本基础加固方案创新采用蘑菇头状桩孔结合上桩帽进行封桩，钢管桩封桩孔节点如图 7 所示。

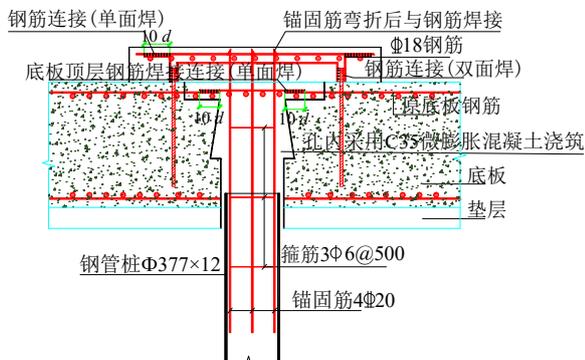


图 7 钢管桩封桩孔节点

Fig. 7 Sealing hole node of steel pipe pile

经计算，采用该封孔措施时，钢管桩顶端对底板的冲切以及蘑菇头底部混凝土对底板的冲切均

满足规范要求。

4 施工过程

(1) 进场施工准备，确定施工范围，对施工区域采取必要的临时加固和围挡。

(2) 在底板对应位置开设压桩孔。

(3) 压桩孔附近植入压桩锚杆，安装压桩架。

(4) 分节压入 $\Phi 127\times 12$ 钢管桩至指定深度，钢管桩节与节之间通过外套管焊接，桩尖选用锥形实心“子弹头”，便于穿透浅部较硬土层。

(5) 分节压入 $\Phi 377\times 12$ 钢管桩，钢管桩节与节之间通过外套管焊接，压至满足压桩动阻力要求后停止压桩；第一节 $\Phi 377\times 12$ 钢管焊接“喇叭口”导向管，控制土塞高度；压桩过程中根据沉降情况调整压桩顺序，在沉降较大区域采用“跳压”和尽快封桩的措施控制拖带沉降。

(6) $\Phi 377\times 12$ 钢管桩内混凝土填芯。

(7) 底板封孔并留置注浆孔。

(8) 在沉降较小区域加大并加快桩端注浆，使深层土体受到扰动，根据沉降观测速率调整注浆点位和注浆量。

(9) 封堵注浆孔。施工过程中加大沉降监测频率，根据沉降结果调整压桩顺序、封桩时间、注浆节点等工况，并指导上部荷载的加载情况。基础加固与迫降纠偏两部分内容穿插进行，相辅相成，最终确保房屋沉降值和倾斜度均满足国家规范要求。

5 基础加固效果分析

5.1 单桩承载力满足设计要求

该基础加固方案充分利用浅部持力层，采用 $\Phi 377$ 钢管桩提供承载力，解决承载力不足的问题，采用 $\Phi 127$ 钢管桩深入原 CFG 桩下 1~2 m，利用注浆工艺，加固松软土体，对原工程桩桩底进行加固，减少压缩变形，解决沉降问题，双管齐下。

钢管桩压桩动阻力曲线如图 8 所示，从图 8 中可以看出， $\Phi 377$ 钢管桩进入中密圆砾土层后压桩动阻力迅速增加至 3 000 kN 以上，上层“硬壳层”可作为 $\Phi 377$ 钢管桩的可靠持力层； $\Phi 127$ 钢管桩穿透上层“硬壳层”时压桩动阻力不大于 1 500 kN，可进入深层软弱层；通过 $\Phi 127$ 钢管桩桩端注浆可加固深层软弱土层，减少后期深层土体沉降。

施工结束后，按照设计要求、桩基设计规范以及桩基检测规范对桩基进行检测，检测结果表明施

加至组合钢管桩上的荷载达到 3 000 kN 时，最大沉降约 12~17 mm（见图 9），满足设计与规范要求。

5.3 建筑加固前后对比

本工程 2017 年 3 月—7 月加固施工期间，3 号楼沉降量增加约 3 cm，加固完成后 3 号楼加固区域平均沉降趋于稳定，2017 年 9 月—2018 年 3 月，6 个月沉降量增加约 3 mm，平均沉降速率小于 0.02 mm/d，沉降稳定，平均沉降量和平均沉降速率观测曲线分别见图 10 和图 11。

如图 12 所示，梁柱交接处的裂缝以及圆圈中裂缝都是加固前已产生的裂缝，加固完成后在圆圈中裂缝处贴了白纸，经过 100 d 观测，白纸无撕裂，证明裂缝不再继续发展。

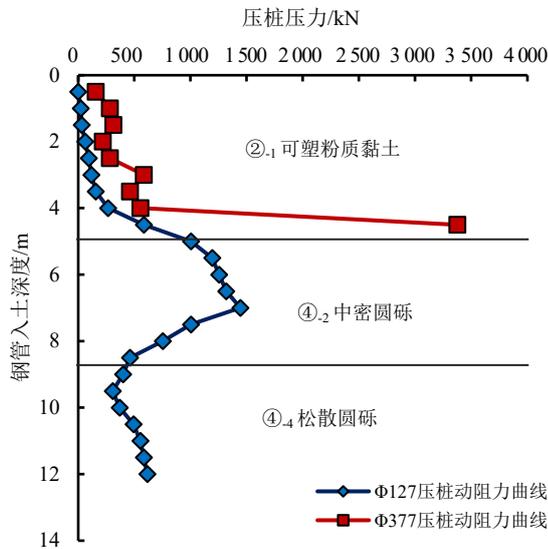


图 8 钢管桩压桩动阻力曲线

Fig. 8 Dynamic resistance curves of steel pipe pile under pressure

5.2 基础沉降变形稳定

为保证建筑物使用安全，监测单位从加固施工开始（2017 年 3 月）至加固施工结束（2017 年 7 月）加强了该栋建筑的沉降观测，数据表明，基础加固完成后该栋建筑物沉降基本趋于稳定。

基础加固完成后 7 个月（2017 年 8 月—2018 年 3 月）内的沉降观测数据显示，加固后沉降速率不大于 0.02 mm/d，沉降稳定。

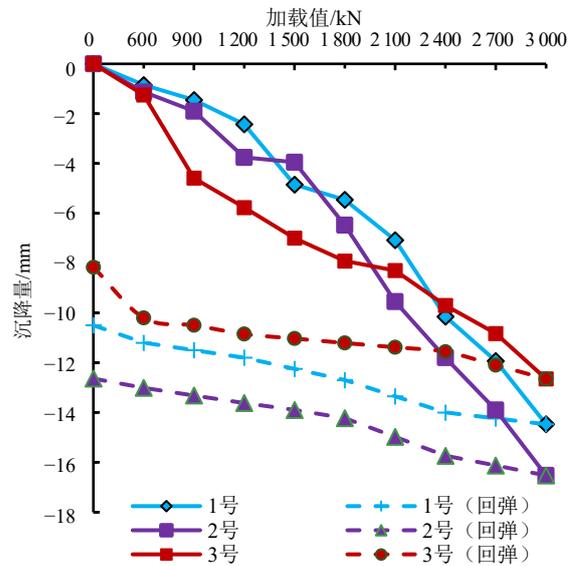


图 9 桩静荷载试验 Q-s 曲线

Fig. 9 Q-s curves of pile static loading test

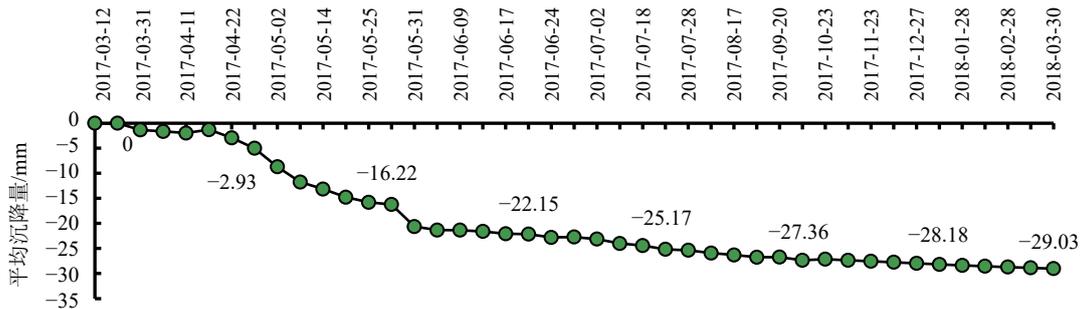


图 10 建筑物平均沉降量观测曲线

Fig. 10 Observation curve of average settlement of building

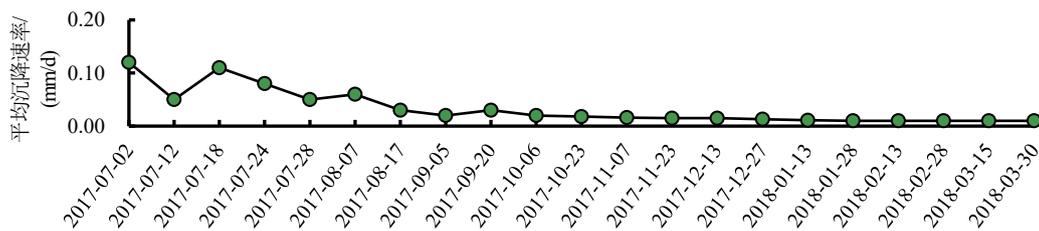


图 11 建筑物平均沉降速率观测曲线

Fig. 11 Observation curve of average settlement rate of building



图 12 加固后裂缝区域

Fig. 12 Crack area after reinforcement

6 结 论

本文针对“上硬下软”复杂土层区域建筑封顶后出现不均匀沉降的工程难题,提出了采用组合钢管桩、高压注浆深层扰动等技术进行基础处理的方法,使桩基承载力和建筑沉降均满足设计与规范要求。取得主要成果如下:

(1) 组合钢管桩方案充分利用浅部持力层,采用 $\Phi 377$ 钢管桩提供承载力,解决承载力不足的问题,采用 $\Phi 127$ 钢管桩深入原 CFG 桩下 1~2 m,结合注浆工艺,加固松软土体,对原工程桩桩底进行加固,减少压缩变形,减少沉降,从承载力、沉降两方面入手,解决了该项目承载力不足及沉降不稳定的问题。

(2) 高压注浆深层扰动技术可保障建筑目标位置的沉降呈平滑线性增长,过程安全可控。

(3) 喀斯特地貌地区创新采用动阻力控制作为终桩条件,有效解决土层起伏剧烈地区桩端持力层无法判断的工程难题。

组合钢管桩、高压注浆深层扰动等技术的成功运用,为建设单位挽回了巨大的损失,为“上硬下软”且起伏变化较大土层的岩土工程设计提供了一种新思路,取得了显著的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] 李晓勇. 软土地区既有高层建筑物基础加固的方法分析[J]. 工程勘察, 2020, 48(6): 33-38.
LI Xiao-yong. Analysis of foundation reinforcement methods for the existing high-rise buildings in soft soil area[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2020, 48(6): 33-38.
- [2] 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.

- [3] 詹金林, 水伟厚, 宋美娜, 等. 软土地区锚杆静压桩施工问题及解决方案[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 566-569.

ZHAN Jin-lin, SHUI Wei-hou, SONG Mei-na, et al. Attention to jacked pile construction in soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 566-569.

- [4] 朱彦鹏, 王海明, 杨奎斌, 等. 桩基础高层建筑纠倾加固方法及工程实践[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(3): 87-94.

ZHU Yan-peng, WANG Hai-ming, YANG Kui-bin, et al. Rectifying and strengthening method for pile foundation of high-rise building and engineering practice[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(3): 87-94.

- [5] 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.

- [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 Huan-bo, LIU Jun-sheng, CHEN Chang-shi, 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] 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.

- [8] 唐君, 闫双跃, 段启伟, 等. 掏土法与锚杆静压桩联合纠倾技术在某高层住宅的工程应用[J]. 建筑科学, 2021, 37(7): 131-138.

TANG Jun, YAN Shuang-yue, DUAN Qi-wei, et al. Technology of drawing out soil united with anchor jacked pile and its application in improvement for tilt rectifying

