

深圳软土地区地下盖挖地铁停车场 桩基工程实践

李文武

(中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 大面积填海区淤泥地层基坑地基沉降变形较难控制, 目前常见的地基加固措施采用复合地基, 一旦复合地基工法选择不当或施工控制不当, 容易产生较大的工后沉降。本文以深圳地铁13号线内湖停车场项目为背景, 重点针对填海淤泥地层盖挖逆作地下结构桩基、地基加固等关键问题进行了研究, 构建了针对深厚淤泥地区基坑“盖挖逆作+疏桩基础+复合地基”的综合安全技术体系, 盖挖逆作工法确保了深大基坑的水平变形控制要求; 疏桩基础+复合地基既解决了淤泥施工过程承载力要求, 以及盖挖逆作工法的承载力要求, 同时满足地下停车场运营期间的承载力和沉降变形要求, 研究成果可为同类工程提供参考借鉴。

关键词: 盖挖逆作; 填海淤泥地层; 疏桩; 沉降控制

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)03-0257-07

Pile foundation practice of metro parking lot in Shenzhen soft soil stratum

LI Wen-wu

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: It is difficult to control the settlement and deformation of foundation pit in silt stratum in large-area reclaimed area. At present, composite foundation is often used for foundation reinforcement. Once the construction method of composite foundation is improperly or the construction control is improper, it is easy to cause large post construction settlement. Taking the Neihu parking lot project of Shenzhen Metro Line 13 as the background, this paper focuses on some key problems such as the underground behavior in covered top-down excavation in reclaimed silt stratum. A comprehensive technology system of 'covered top-down excavation + sparse pile foundation + composite foundation' was proposed in deep silt area. The covered top-down excavation ensures the horizontal deformation requirements of deep foundation. Combined sparse pile foundation + composite foundation not only solves the bearing capacity requirements of sludge, but also meets the bearing capacity and settlement deformation requirements during the operation of underground parking lot. The research of this work can provide some references for similar projects.

Key words: top-down method of covered excavation; reclaimed silt stratum; sparse pile; settlement control

0 引言

随着城市建设的飞速发展, 为充分利用城市建设用地, 越来越多的地下停车场、地下商业广场等地下结构在填海淤泥地层中建造。淤泥地层为静水或缓慢的流水环境中沉积, 并经生物化学作用形成, 具有含水量高、压缩性高、孔隙比高和天然密

度低、抗剪强度低、承载力低的工程特性。淤泥地层不应直接作为结构地基基础持力层, 淤泥地层的桩基设计要求桩的成桩工艺、桩的持力层选择合理, 并根据具体工程情况分析桩侧负摩阻力对基桩的影响。填海淤泥地层常富含碎石土及大粒径块石, 具均匀性差、密实度差、欠固结、高压缩性等不良工程特性, 桩基施工时易导致塌孔、沉渣过厚

等不利影响。

盖挖逆作法施工与常规明挖法施工相比，主要特点有：(1) 不另设支撑体系，降低造价，避免了支撑的设置和拆除，节约资源、降低能耗、体现了低碳经济、绿色施工的时代要求；(2) 围护结构位移小，有利于周围的建筑和管线等环境的保护，具有显著的社会效益^[1]。由于在基坑变形控制、周边建(构)筑沉降控制、施工工期节约等方面具有明显的优势，盖挖逆作法在复杂地质和复杂环境条件下的应用得到了较快的发展^[1-5]。本文以深圳地铁 13 号线内湖停车场项目为背景，对填海淤泥地层盖挖逆作地下结构桩基设计与施工关键问题进行了研究。

1 工程概况

1.1 项目概况

深圳市城市轨道交通 13 号线内湖停车场位于南山区人才公园下方，为地下 1~2 层地下停车场。停车场西侧为科苑大道及深圳湾一号大型商业楼层，南侧为东滨路以及东滨路隧道，东侧为沙河西路以及沙河西路隧道，北侧为深圳湾内湖。停车场基坑全长约 710 m，基坑宽度约为 100~170 m，基坑深度约 12~14 m。停车场内部建筑包括运用库、运转综合楼、综合楼、维修楼、物资仓库、消防水池与泵房、牵引所等 1~2 层全地下建筑物，见图 1。



图 1 内湖停车场总平面图

Fig. 1 Plan view of Neihu parking lot

1.2 工程地质

内湖停车场位于深圳湾内湖填海区，场地揭露地层主要有第四系全新统人工填土层 (Q_4^{ml})、第四系全新统海陆交互沉积层 (Q_4^{mc})、第四系全新统冲洪积层 (Q_4^{al+pl})、第四系残积层 (Q^{el})、燕山四期 ($\gamma\beta^5\kappa_1$)花岗岩。

主要地层岩性特征如下：

- ①₋₁ 素填土，欠固结、可塑状，平均 5.5 m；
- ①₋₂₋₁ 填碎石土，粒径 2~18 cm，含量 50%~70%，

稍密~中密状，平均 8.4 m；①₋₂₋₂ 填块石，粒径 20~40 cm，含量 50%~70%，稍密~中密状，平均 5.4 m；④₋₁₋₂ 淤泥，灰黑色、流塑性为主，标贯击数平均值 $N=2.1$ 击，平均 7.5 m；⑧₋₁₋₂ 硬塑砾质黏性土，硬塑状、含 20%~25%砂砾，平均 6.76 m；⑩₋₁ 全风化黑云母花岗岩，褐红色，褐黄色夹灰白色，各种矿物已风化为黏性土，呈坚硬土柱状，遇水软化、崩解，平均 8.16 m。代表地质钻孔地层剖面见图 2，厚度见表 1。

钻孔编号：SM13Z3-NHTCC-172

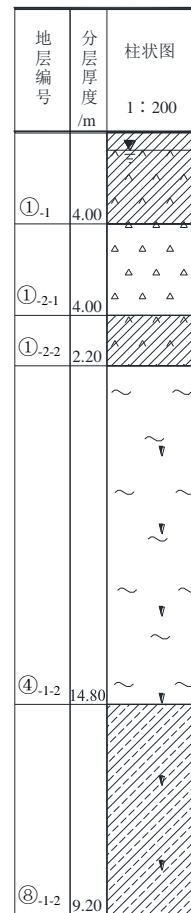


图 2 代表地质钻孔图

Fig. 2 Representative geological borehole map

表 1 代表地质钻孔地层厚度

Table 1 Thickness of representative geological borehole

地层	厚度/m
① ₋₁	4.0
① ₋₂₋₁	4.0
① ₋₂₋₂	2.2
④ ₋₁₋₂	14.8
⑧ ₋₁₋₂	9.2

1.3 方案概况

内湖停车场主体结构采用盖挖逆作法施工，基

坑深约 14 m, 围护结构采用 $\Phi 1\ 500@1\ 100\ \text{mm}$ 套管咬合桩 (荤桩、素桩间隔), 如图 3。顶板逆作施工同时兼作围护结构第一道支撑, 竖向支撑构件采用钢格构柱, 钢格构柱下设桩基础, 采用一柱一桩设计, 桩间距 8.4~11.5 m。基坑围护结构内力及变形计算如图 4, 围护桩计算水平位移为 28.48 mm。基础采用扩底钻孔灌注桩, 设计桩身直径 1 200 mm, 桩底扩孔直径 1 800~2 200 mm, 桩底持力层为全风化、强风化黑云母花岗岩 (土状), 桩长 28~33 m。

主体结构顶板施工后, 盖挖至基坑底并顺筑施工底板、侧墙、中柱、中板和内部结构等, 后期顶

板覆土厚度 2~5 m。施工阶段, 竖向支撑构件采用钢格构柱。使用阶段, 主体结构中柱采用型钢混凝土柱 (在格构柱基础上浇筑一圈钢筋混凝土), 施工工序如图 5 所示。

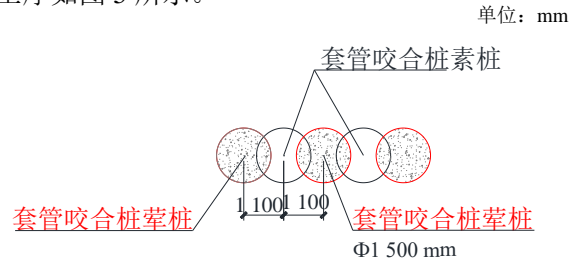


图 3 围护结构平面图

Fig. 3 Plan of enclosure structure

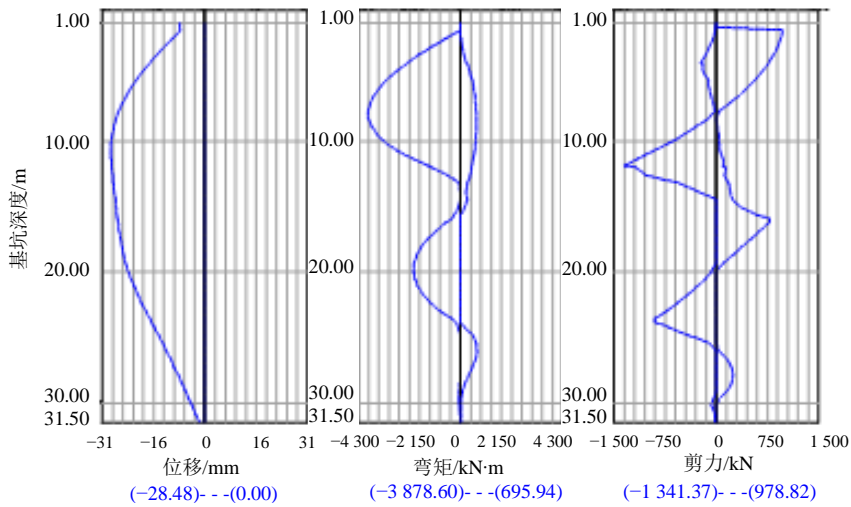


图 4 围护结构内力变形包络图

Fig. 4 Envelope diagram of internal force and deformation of enclosure structure

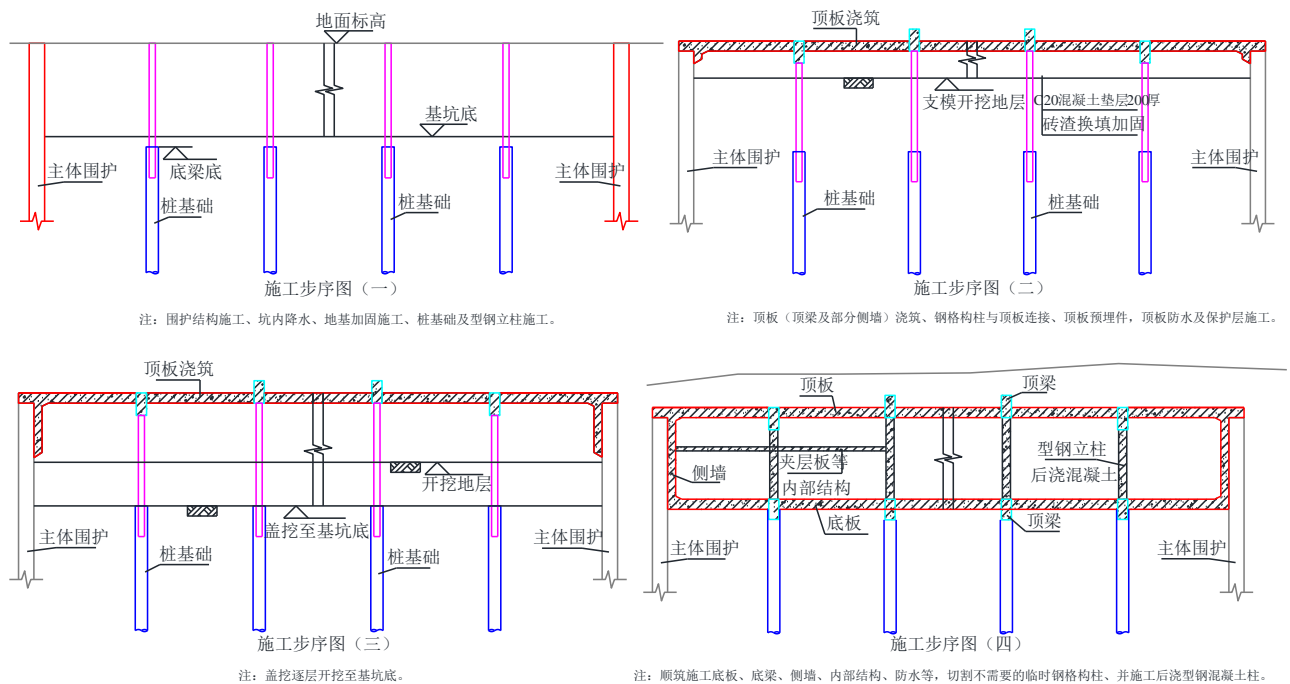


图 5 施工工序图

Fig. 5 Construction process

2 桩基结构受力分析

杨学林^[6]提出，竖向支承体系的设计是基坑“逆作法”设计的关键环节之一。在地下室逆作期间，由于基础底板尚未封底，地下室墙、柱等竖向结构构件尚未形成，地下各层和地上计划施工楼层的结构自重及施工荷载均需由竖向支承体系承担。

填海淤泥地层盖挖逆作施工地下结构桩基结构受力分析的关键问题有两个：(1) 需要根据盖挖逆作施工工序及桩基结构竖向受压、抗拔的不同要求，分别分析施工期间临时立柱桩基受压承载力、使用期间永久柱桩基受压承载力、使用期间永久柱桩基抗拔承载力要求。主体结构计算水土压力全部采用分算，计算单桩竖向承载力时应考虑地下水的有利作用取低水位，计算单桩抗拔承载力时应考虑地下水的不利作用取高水位。(2) 桩基结构受力分析，如何考虑淤泥地层的影响。由于本工程基坑底面以下为厚度约2~10 m的淤泥地层，因此设计要求桩基施工前采用高压旋喷桩、三轴搅拌桩对软土地基进行加固，以满足基坑底面盖挖施工场地要求。针对深厚填海淤泥地层基坑构建了“盖挖逆作+疏桩基础+复合地基”组合技术措施^[7-9]。

对④₁₋₂淤泥的加固复合地基设置了两种方案，在上覆①₁填土区域采用双排Φ850搅拌桩格栅加固，如图6；在上覆有①_{2.2}填块石地层区域，采用Φ600双重管旋喷桩格栅加固，如图7。格栅中间采用Φ600双管旋喷桩点状加固。加固范围为基底以下整个淤泥层范围(4~12 m)。盖挖立柱位于格栅加固的条带内，从而确保了立柱的稳定性。

在桩基受力分析时，刘鹏等^[10]提出了考虑桩、土变形协调的软土刚性桩复合地基设计计算方法。本工程计算模型考虑桩-土-地基共同作用，计算地层物理力学参数根据复合地基检测值选用。

2.1 计算模型

本工程采用荷载-结构模型，通用有限元软件ANSYS 10.0 进行分析计算。计算分析剖面，结构模型如图8~9所示，设计顶板厚1.0 m，中板厚0.4 m，底板厚1.0 m，侧墙厚0.8 m，型钢中柱截面0.8 m×1.2 m(临时钢立柱截面0.6 m×0.6 m)、柱纵向间距8.4 m，桩基直径1.2 m。墙、板、柱采用梁单元模拟，地层采用弹性非受压弹簧单元模拟，桩基采用杆单元模拟，受力计算考虑桩-土-结构共同作用。地基持力层主要为④₁₋₂淤泥等软弱土层，根

据地基处理后试验段检测数据，并参考地区经验取处理后地基垂直基床系数 $K_v=15 \text{ MPa/m}$ ，侧向约束地层主要以①₁素填土、④₁₋₂淤泥层为主，根据勘察报告取水平基床系数 $K_h=5 \text{ MPa/m}$ 。

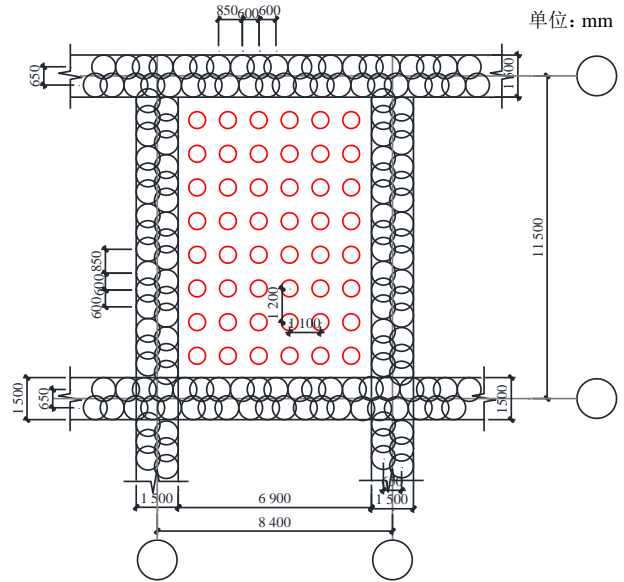


图6 搅拌桩加固大样图

Fig. 6 Diagram of deep mixing pile

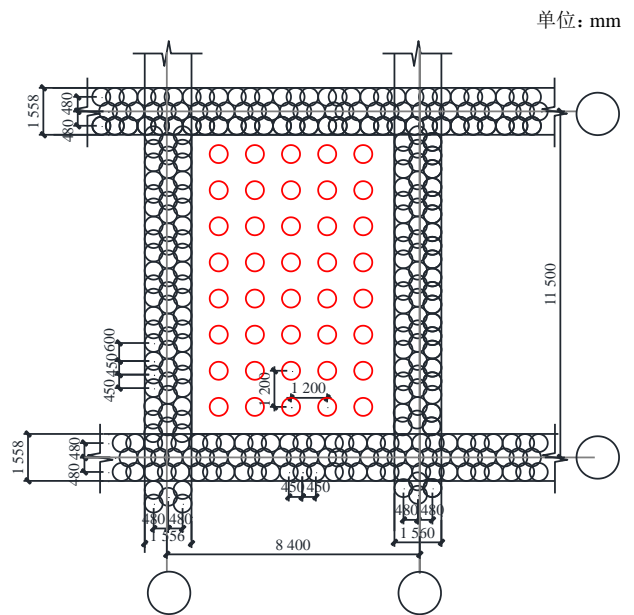


图7 旋喷桩加固大样图

Fig. 7 Diagram of rotary jet grouting pile

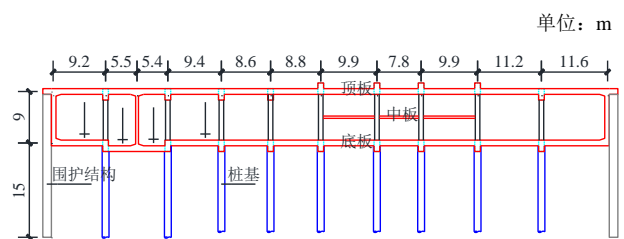


图8 受力分析计算剖面图

Fig. 8 Structure profile for stress analysis

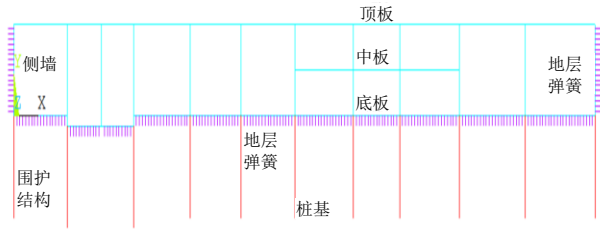


图9 受力分析计算模型图
Fig. 9 Model of stress analysis

2.2 计算结果

(1) 单桩竖向承载力

施工阶段，仅浇筑结构顶板，顶板保护覆土取0.5 m，施工期间地下水位降至地面2 m以下，施工荷载取20 kPa。使用阶段，结构整体已浇筑施工，顶板覆土取不利厚度3 m，计算地下水位取底板以下1 m（有利荷载），计算结果如图10~11所示，图中所示轴力为断面每延米的计算值。根据计算结果，桩基最大竖向力标准值 $N_k=653 \times 8.4=5\ 485.2$ kN。

(2) 单桩抗拔承载力

使用阶段，结构整体已浇筑施工，顶板覆土取平均厚度2 m，计算抗浮水位取地面以下约0.5 m。基坑围护结构与主体结构顶板连接，参与抗浮受力验算，计算结果如图12所示，最大抗拔力标准值 $N_{ak}=228 \times 8.4=1\ 915.2$ kN。

(3) 复合地基承载力

使用阶段，竖向承载力验算考虑桩-土-结构共同作用，复合地基根据等效土弹簧刚度模拟。

扣除地层弹簧应力集中段（如墙角处），底板跨中有计算不利轴力约104 kN。折算地层应力 $p_k=104/1$ （计算长度）/0.5（单元宽度）=208 kPa。考虑深宽修正后的复合地基承载力特征值需满足： $f_{spk}+1.0 \times 10 \times (10-0.5) \geq 208$ kPa，即要求 $f_{spk} \geq 113$ kPa。

2.3 疏桩基础

本工程桩基础采用疏桩设计理念，利用盖挖逆作法格构柱下的桩基础，采用一柱一桩设计。钻孔桩桩径1.2 m，桩间距8.4~11.5 m，桩长28~33 m，基底持力层为全风化、土状强风化黑云母花岗岩。

管自立等^[11]提出了刚-柔性复合桩基设计思想主要是“长桩疏布、高强复合”。本工程桩疏桩间距大于7倍桩距，桩长28~33 m，桩底进入全、强风化岩（土状），有效防止和减少桩间土的压缩下沉对主体桩的下拉作用。采用双重管旋喷桩、深层搅拌桩作复合体，桩长4~12 m，作承载力“高强

复合”进行补偿。柔性短桩与刚性长桩形成两个空间层面的应力状态，既充分发挥桩间土复合地基的承载力，又充分发挥刚性长桩承载力和控制沉降的功能。

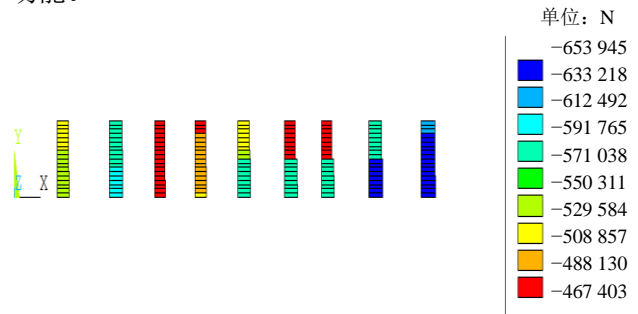


图10 施工阶段标准组合桩基轴力图
Fig. 10 Axial force of pile foundation in construction stage

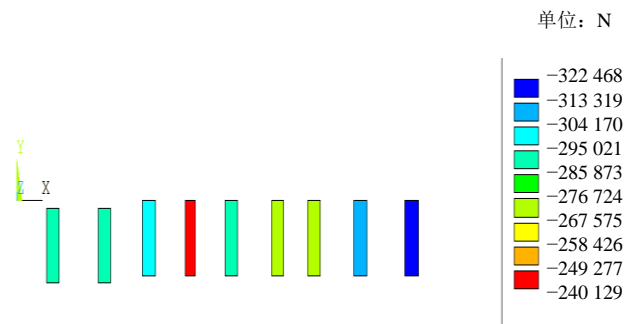


图11 使用阶段标准组合桩基轴力图
Fig. 11 Axial force of pile foundation in use stage

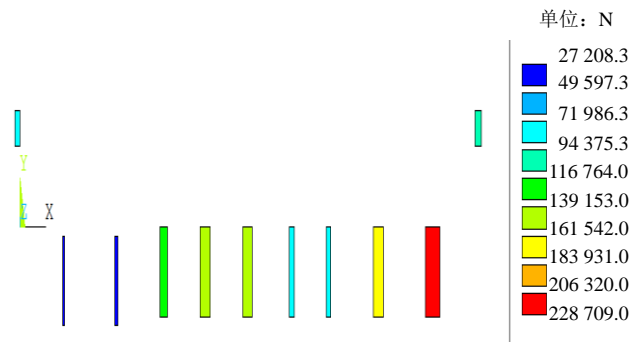


图12 使用阶段标准组合桩基抗拔力图
Fig. 12 Uplift resistance of pile foundation in service stage

3 桩基施工技术

3.1 桩端孔桩

根据勘察报告整个场地基底以下60 m深度范围内均为全-强风化花岗岩（土状），且桩身穿越淤泥质土层最大厚度可达10 m，常规成桩工艺难以满足设计单桩竖向承载力要求。本工程采用桩底扩孔设计，如图13，设计桩身直径1 200 mm、桩底扩孔直径1 800~2 000 mm，旋挖扩孔钻头机械扩孔

施工,经现场检测成桩质量及桩基承载力均满足设计要求。如某计算桩基竖向承载力要求不小于 5 485 kN,根据建筑桩基技术规范,设计桩长 31 m,当采用 1 200 mm 等直径灌注桩时,计算承载力仅 3 139 kN,不满足承载力要求;当采用桩底扩孔 2 000 mm 设计时,计算承载力可达 5 795 kN,承载力提高约 84.6%,满足承载力要求。

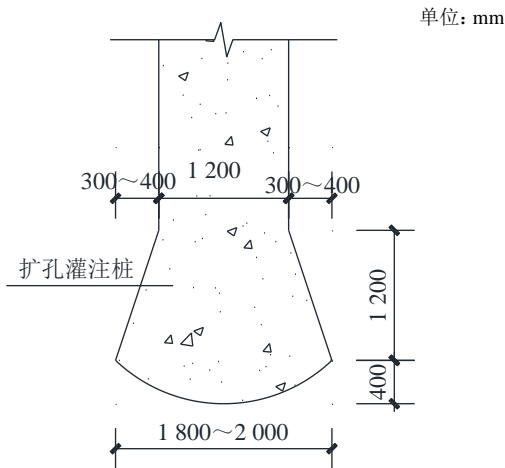


图 13 桩端扩孔大样图

Fig. 13 Detail drawing of pile tip reaming

3.2 塌孔及桩底沉渣控制

场地填海淤泥地层,桩身钻孔易塌孔、缩径,经现场试桩建议采用全护筒跟进,直至穿越淤泥层及回填块石层。本工程桩基为摩擦型端承桩,设计要求桩底沉渣厚度控制值 50 mm,为保证施工质量,浇筑水下混凝土前应严格检查沉渣厚度,如沉渣厚度超出规范要求,则利用导管进行二次清孔。同时为增强桩基差异沉降安全储备,桩底预埋一根注浆管,预留桩端后注浆条件。根据现场施工过程中临时立柱沉降监测结果最大-12.2 mm 及桩基承载力试验结果满足设计值,本项目未实施桩端后注浆试验段。

3.3 一桩一柱调垂施工

王允恭^[1]提出的精细严密的“一柱一桩”的调垂定位技术,使逆作法竖向支承系统构造简单施工便捷,在开挖施工结束后可全部作为永久结构使用。

型钢立柱后期现浇混凝土兼永久立柱,桩基施工过程中需采取专门的措施对型钢立柱进行定位和调垂。本工程采用校正架机械调垂法,施工时首先将校正架中心与桩位轴线校正一致,再用 $\Phi 20$ 钢膨胀螺栓将校正架底部固定在钢筋混凝土地坪上,利用校正架上的校正螺栓来调整格构柱的中心线和垂直度,如图 14。



图 14 型钢立柱对中校正架图

Fig. 14 Alignment frame of steel column

3.4 监测成果

内湖停车场盖挖逆作主体结构已于 2021 年 10 月底全部施工完成,期间进行了自动化监测(见表 2)。

表 2 监测数据总表

Table 2 Summary of monitoring data

监测项目	地表沉降	建筑物沉降	污水管沉降	桩顶水平位移	桩体水平位移
监测值/mm	-19.8	-10.5	-11.4	-9.4	-15.5

对疏桩的监测分为两个阶段,当底板施工完后沉降监测最大值为-12.2 mm,待顶板覆土水位回升后为 10.9 mm(上浮)。监测结果表明,内湖停车场(地下一层层高 9 m)在深厚软土地层(14.8 m 淤泥地层)采用盖挖逆作法能有效的控制基坑水平变形。

4 结 论

以深圳地铁 13 号线内湖停车场项目为背景,对填海淤泥地层盖挖逆作地下结构桩基设计与施工关键问题提出以下建议与结论。

(1) 针对深厚淤泥地区深大基坑可采用“盖挖逆作+疏桩基础+复合地基”综合安全技术体系,盖挖逆作工法确保了基坑的水平变形控制要求;疏桩基础+复合地基既解决了淤泥施工过程承载力要求,以及盖挖逆作工法的承载力要求,同时满足地下停车场运营期间的承载力和沉降变形要求。

(2) 填海淤泥地层盖挖逆作地下结构桩基设计,建议采用桩-土-结构共同受力模型,分析不同工况下的桩基受力,同时淤泥层地基处理需满足施工过程中承载力和结构沉降要求。

(3) 复合地基设计首先需满足承载力要求,包括施工期机械行走要求和使用期承载力要求。变形

检算时,应使桩、土刚度相对协调,使桩、土应力理想发挥,合理确定桩间土承载力值,从而优化桩基设计及投资。

(4)填海淤泥地层桩基设计,应采取措施提高桩基承载力。内湖停车场工程实践表明,当桩端位于全-强风化花岗岩(土状)地层,采用扩孔灌注桩承载力提高约84.6%。同时针对现场沉渣控制难度大的特点,建议增设桩端后注浆措施增强结构安全储备,困难条件下桩基承载力可考虑20~30%的提高作用。

(5)地填海淤泥地层,桩身钻孔易塌孔、缩径、偏位,建议施工采用全护筒跟进,直至穿越淤泥层及回填块石层。对于型钢立柱兼永久立柱的结构做法,施工过程中可采用机械校正架来保证平面及垂直误差。

参考文献

- [1] 王允恭. 逆作法设计施工与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
WANG Yong-gong. Design, Construction and Example of Top-Down Method[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [2] 陈星, 罗赤字, 向前. 地下建筑逆作法与组合结构新技术工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
CHEN Xing, LUO Chi-yu, XIANG Qian. Top-Down Construction Method of Underground Building and Application of New Technology of Composite Structure[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007.
- [3] 董年才. 逆作法施工关键问题及处理措施[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
DONG Nian-cai. Key Problems and Treatment Measures of Top-Down Construction Method[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017.
- [4] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JG J94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Ministry of construction of the PRC. Technical Code for Building Pile Foundations: JG J94—2008[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.
- [5] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
GONG Xiao-nan. Foundation Treatment Manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.
- [6] 杨学林, 周平槐. 逆作地下室设计中的若干关键问题[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 238-244.
YANG Xue-lin, ZHOU Ping-huai. Some key problems in design of basements using top-down method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 238-244.
- [7] 薛元, 崔维秀, 封志军, 等. 滇池地区铁路软土地基加固处理技术[J]. 铁道工程学报, 2015(8): 35-40.
XUE Yuan, CUI Wei-xiu, FENG Zhi-jun, et al. The reinforcement technology of railway's soft soil foundation in Dian Lake area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015(8): 35-40.
- [8] 徐林荣, 王宏贵, 左王申, 等. 高速铁路沉降控制复合桩基的性状试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2605-2612.
XU Lin-rong, WANG Hong-gui, ZUO Wang-shen, et al. Test study of performance of composite pile foundation of high-speed railway controlling settlement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2605-2612.
- [9] 龚晓南, 等. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
GONG Xiao-nan, et al. Theory and Engineering Application of Composite Foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.
- [10] 刘鹏, 杨光华. 考虑桩土变形协调的软土刚性桩复合地基设计计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 4039-4046.
LIU Peng, YANG Guang-hua. Designed calculation of rigid-pile composite foundation in soft soil ground considering deformation compatibility of pile and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 4039-4046.
- [11] 管自立, 金国平, 张清华. 刚-柔性复合桩基的特性分析及工程设计[J]. 建筑结构, 2009, 39(8): 117-121.
GUAN Zi-li, JIN Guo-ping, ZHANG Qing-hua. Characteristic analysis and engineering design of rigid-flexible composite pile foundation[J]. Building Structure, 2009, 39(8): 117-121.