

富阳地区软土深基坑施工问题分析 及应对措施

竹相^{1,2}, 付耀¹, 胡琦^{1,2}

(1. 东通岩土科技股份有限公司, 浙江 杭州 310021; 2. 浙江浙峰工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310021)

摘要: 本基坑地处杭州市富阳区中心城区, 基坑挖深及影响范围内为深厚软土地层, 周边环绕着地铁盾构区间、城市道路、居民小区, 分布着各类城市管线, 周边环境较为复杂。结合基坑特点, 主要从周边环境较为复杂、承压水位高、淤泥质土层深厚等方面考虑, 基坑支护结构设计采用“分区顺作+围护桩+支撑”的方案。设计单位综合考虑了基坑安全、施工工期及造价等因素, 不同基坑区域采用了不同的围护桩型。在基坑开挖施工过程中, 出现了立柱下沉、南侧地面局部出现裂缝等现象, 及时地采取了加固措施: 比如在已经下沉的立柱旁新打立柱, 对立柱下沉区域内的其他立柱进行与工程桩的焊接加强, 防止立柱的进一步下沉; 增加预应力型钢支撑的预加轴力, 增设型钢换撑来减少周边土体的位移影响, 从而使问题得到了有效解决。此类应急加固措施可为类似工程提供参考借鉴。

关键词: 软土; 深基坑; 施工; 问题分析; 应对措施

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)S1-0085-10

Problems and corresponding solutions in construction of soft soil deep foundation pits in Fuyang area

ZHU Xiang^{1,2}, FU Yao¹, HU Qi^{1,2}

(1. Dongtong Geotechnical Technology Co., Ltd., Hangzhou 310021, Zhejiang, China;

2. Zhejiang Zhefeng Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310021, Zhejiang, China)

Abstract: In the central area of Fuyang District, Hangzhou City, the excavation of the foundation pit was located in a deep soft soil layer. The pit was surrounded by subway shield tunnels, urban roads, residential communities, and various urban pipelines. Considering the main characteristics of the foundation pit, including the complex surrounding environment, high confined water level, and deep silty soil layer, the design of the foundation pit retaining structure adopted a support system scheme of zoned sequential construction + retaining piles + support. The design unit comprehensively considered factors such as foundation pit safety, construction period, cost, and then adopted different types of retaining piles in different foundation pit areas. During the excavation, phenomena such as column sinking and local cracks on the ground on the south side were observed. Timely reinforcement measures were taken, such as driving new columns next to the existing sunken ones, welding and strengthening other columns in the sinking area with engineering piles to prevent further columns sinking, increasing the precompression of prestressed section steel supports and adding section steel for support replacement to reduce the displacement impact of surrounding soil. Finally, the problem has been effectively resolved by these measures, and can provide a reference for similar projects.

Key words: soft soil; deep foundation pit; construction; problem analysis; corresponding solutions

收稿日期: 2024-05-07

作者简介: 竹相(1988—), 男, 浙江杭州人, 硕士, 注册土木工程师(岩土工程), 主要从事基坑设计、结构设计和施工等工作。E-mail: 2252209507@qq.com。

0 引言

浙江省杭州市富阳地区，场地地势开阔，地形平坦，属于冲洪积平原，针对富阳地区的地质分布及运动情况，杨大学^[1]及张鹏等^[2]对该地区的土质分布情况、地质灾害风险评估等做了相应的研究工作。特别是在富阳主城区区域内，存在着深厚淤泥质黏土层，呈流塑状，深度一般在2~20 m，其表层为厚度不等的人工杂填土，软土层下为较硬的卵石层及强风化土层。

这些年众多学者对软土地区深基坑的开挖做了大量研究工作^[3-6]，由于软土地区的土体含水量高、开挖时一般呈流塑或软塑状、土体强度较低、变形较大，因此在软土地区开挖深基坑时，对周边土体扰动较大，尤其是在有重要建筑物和地铁线路经过的区域，会有建筑物开裂和地面下沉的风险存在，如何在开挖深基坑时保护此类设施显得尤为重要^[7-8]。

1 项目概况

本项目位于杭州市富阳区，东侧和北侧为居民小区，东侧和北侧道路宽度分别为22.0 m和13.0 m；

南侧为办公小学，南侧道路宽度为35.5 m；西侧为地铁6号线盾构区间，盾构顶埋深约18.0 m，距离本项目用地红线约15.0 m，本基坑在地铁50.0 m保护线范围内。场地四周为城市道路且市政管线分布众多，沿道路有燃气、污水、给水等城市管线，周边环境复杂。

根据主体单位提供的设计施工图，本项目设置了1幢酒店、4幢办公楼和1幢商业裙房及门厅，均采用框架结构，设计了2层地下室（其中西侧区域为了减少基坑开挖对地铁盾构的影响，在距离地铁盾构边线100.0 m范围内只设计了1层地下室），基坑开挖面积约24 900 m²，挖深5.30~10.35 m，场地内分布着深厚淤泥质软土层，项目围护体平面布置图如图1所示，项目地质剖面图如图2所示。依据图2中岩土工程勘察报告提供的场地土层分布情况，地块场地较平整，表层土为人工填土，其下为透水性较差的深厚淤泥质粉质黏土，厚度为12~18 m，深度在2~20 m，土层开挖过程中土的流动性很强，对周边的原状土体扰动很大。淤泥质粉质黏土层下方为透水性较强的圆砾层，地下承压水水位较高，水头高度约为4 m，在坑中坑等挖深较深区域，有突涌的风险存在，对基坑整体安全会产生一定影响。

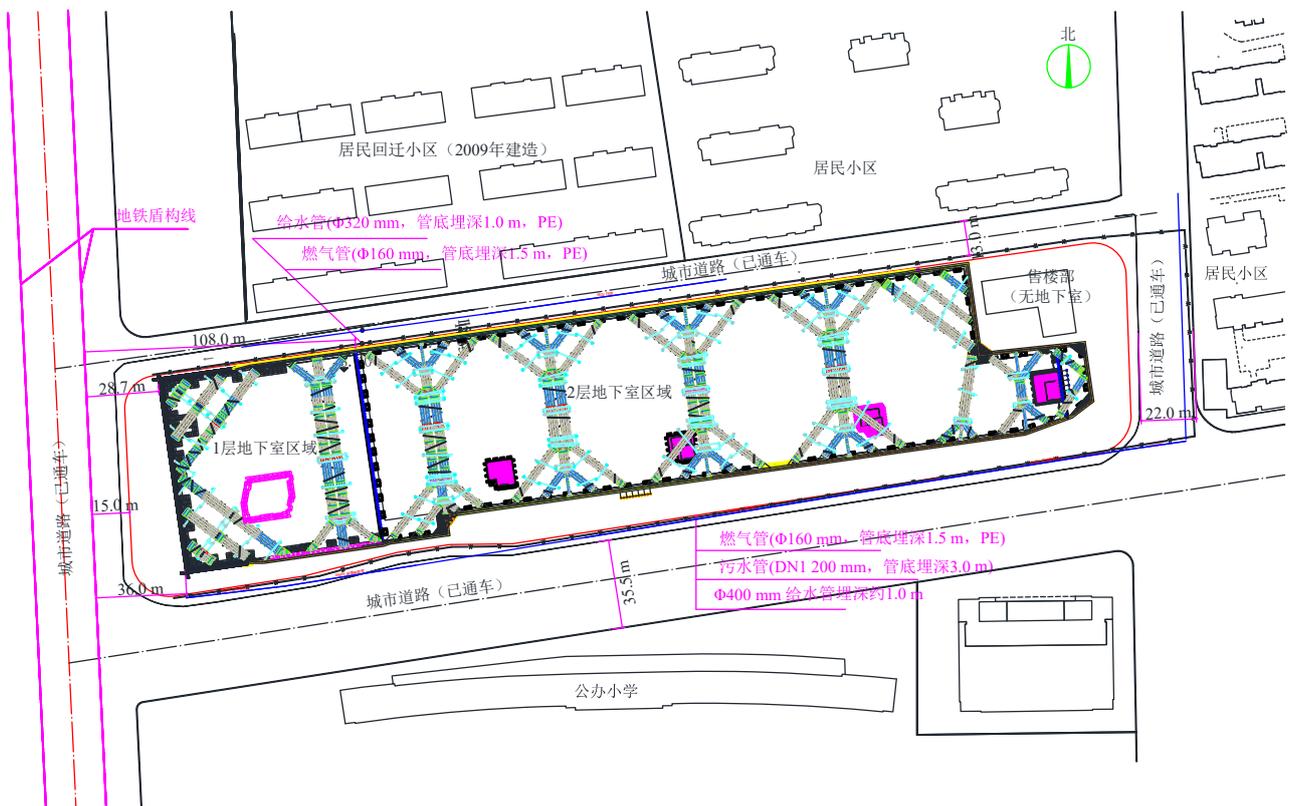


图1 项目围护体平面布置图

Fig. 1 Plan of retaining structure of the project

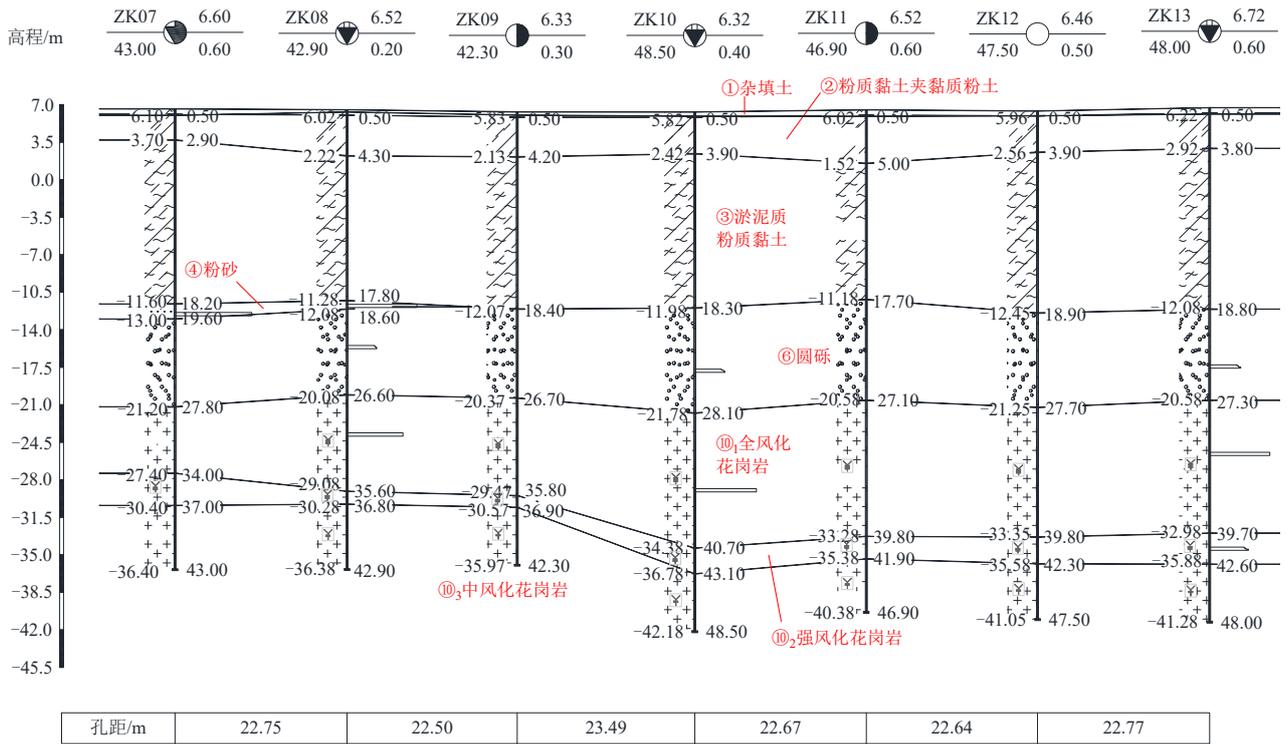


图 2 项目地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of the project

2 设计基坑支护方案

在竖向围护桩的设计上采用了钻孔灌注桩加三轴水泥搅拌桩止水、钻孔灌注桩加地下连续水泥土墙止水和三轴水泥搅拌桩内插 H700 型钢的围护方案。在水平支撑体系上采用预应力型钢组合内支撑体系：水平支撑采用 H350×350 型钢，支撑之间用盖板、槽钢等构件通过高强螺栓连接，架设在型钢横梁上，通过型钢立柱把支撑上的重力传递给立柱下的土体；型钢横梁和立柱均采用 H300×300 型钢，直接用机械手插入土体中，靠与土体间的摩擦力来承担支撑的重力，插入长度采用双控，即底板以下插入深度为 10 m 且进入⑥号土层不小于 1.0 m。型钢立柱详图如图 3 所示。

本项目根据不同的开挖深度、周围环境以及土质情况，同时结合工程造价和施工工期，对以上的几种方案采取了不同的组合形式。

2.1 北侧区域

基坑北侧紧靠一条宽 13.0 m 左右的道路，邻近一居民回迁小区（2009 年建造），靠近道路一侧为沿街商铺，道路靠近基坑一侧分布着给水管、燃气管，小区住宅距离用地红线约 15.0 m。为了确保北侧小区居民的正常生活，减少基坑施工时带来的噪音影响，同时保护好周边道路及管线，北侧采用刚

度较强的钻孔灌注桩（Φ800 mm@1 000 mm，长 20.45 m）结合三轴水泥搅拌桩止水（Φ850 mm@600 mm，长 15.65 m）的围护形式，同时钻孔灌注桩底进入圆砾层不小于 2.0 m。在坑内被动区设置双轴水泥搅拌桩（Φ700 mm@1 000 mm）进行加强，厚度为 3.6 m，可以有效减少基坑开挖过程中土体的扰动，从而减少对北侧道路及管线的影响。北侧剖面图如图 4 所示。

在水平支撑上采用了 2 道预应力型钢组合内支撑，没有采用传统工艺上的钢筋混凝土支撑，一方面是考虑到施工工期，型钢支撑没有浇注和养护时间，只通过快速的拼装即可完成，大大减少了工期；另一方面是考虑到钢筋混凝土支撑拆除时有噪音污染，型钢支撑拆除时没有这一方面的困扰^[9-10]。

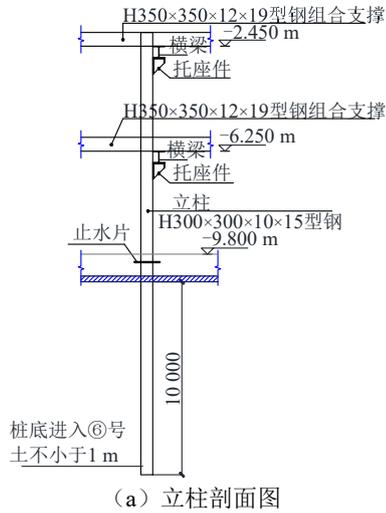
2.2 东侧和南侧区域

基坑东侧和南侧紧靠城市道路，道路宽度在 20.0 m 以上，虽然道路另一侧有建筑物存在，但距离基坑较远，建筑物距离本项目用地红线约 50.0 m，经过综合评估，项目施工过程中对这两侧的道路及建筑物影响较小。结合造价与工期考虑，围护桩采用 SMW 工法桩，即三轴水泥搅拌桩内插 H700 型钢的围护形式^[11-13]。同时考虑到这两侧道路上分布的城市管线众多，有给水、燃气、电力、污水管线等，为了进一步控制位移，在坑内被动区设置了三

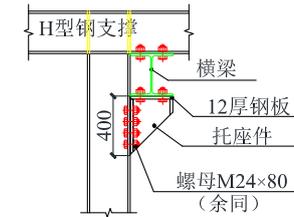
轴水泥搅拌桩加固墩进行加强,这样可以有效减少基坑开挖过程中对周边原状土体的扰动影响。

在水平支撑上,为了基坑整体受力均匀且合理,采用的支撑形式和北侧区域相同,均采用2道预应力型钢组合内支撑,其余两侧剖面图如图5所

示。SMW 工法桩采用三轴水泥搅拌桩(Φ850 mm@1 200 mm)内插 H700 型钢,型钢间距采用插二跳一,长度为22 m,同时型钢桩底插入圆砾层不小于1.5 m;坑内被动区采用双轴水泥搅拌桩(Φ700 mm@1 000 mm),厚度为3.6 m。

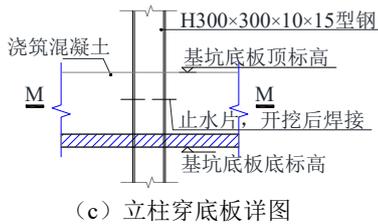


单位: mm

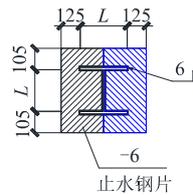


- (1) 横梁和托座件均采用H300x300x10x15型钢;
- (2) 立柱横梁与每道支撑之间必须至少用两颗高强螺栓连接。

(b) 立柱托座安装详图



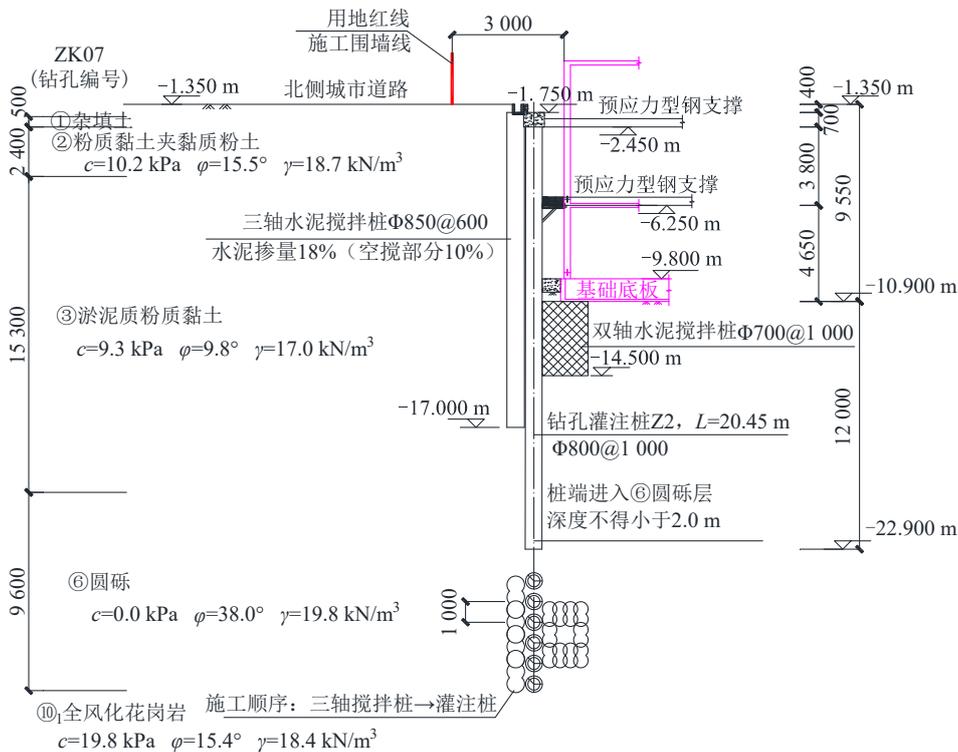
(c) 立柱穿底板详图



(d) M-M 止水钢板详图

图3 型钢立柱详图

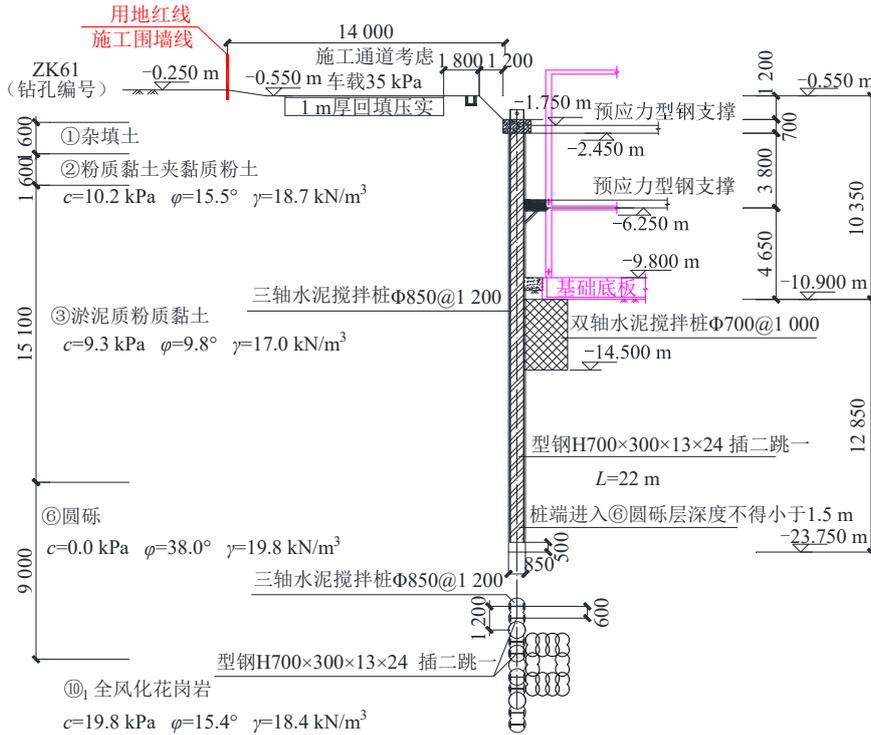
Fig. 3 Detailed drawing of steel column



单位: mm

图4 北侧剖面图

Fig. 4 Profile of the north side



单位: mm

图 5 其余两侧剖面图

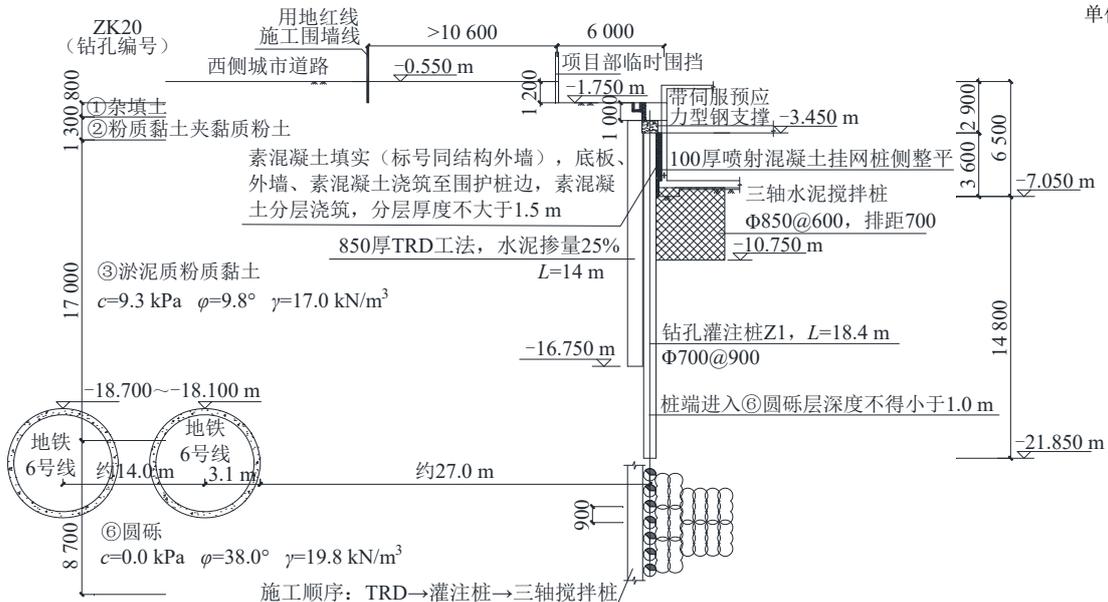
Fig. 5 Profile of other two sides

2.3 西侧区域

基坑西侧靠近地铁, 围护桩边线距离地铁盾构边线 27.0 m, 设置 1 层地下室, 开挖面积约 6 000 m², 开挖深度为 6.85 m。

为了控制周边土体沉降, 围护桩采用了刚度较强的钻孔灌注桩 (Φ700 mm@900 mm, 长 18.4 m) 结合 850 mm 厚的地下连续墙体止水 (水泥掺量 25%, 长 14 m) 的围护形式, 同时要求钻孔灌注桩底进入圆砾层不小于 1.0 m。在坑内被动

区设置三轴水泥搅拌桩 (Φ850 mm@600 mm) 进行加强, 厚度为 4 m, 可以有效减少基坑开挖过程中土体的扰动, 从而减少对西侧轨道及其上方道路和管线的影响。在水平支撑上采用 1 道带伺服的预应力型钢组合支撑, 可以实时控制支撑轴力, 这就使得当土体沉降位移的监测数据显示过大时, 可以通过增加支撑轴力的方式来减少相应的土体位移, 从而确保基坑能顺利施工, 西侧剖面图如图 6 所示。



单位: mm

图 6 西侧剖面图

Fig. 6 Profile of the west side

2.4 坑中坑区域

在基坑中部区域设置有电梯井，此处挖深近13 m，与周边基坑底高差达3 m，采用较经济的双轴水泥搅拌桩进行支护。在坑中坑底部区域，位于淤泥质粉质黏土层中，该层为承压含水层，呈强透水性，坑中坑开挖后还有一定厚度的软土层构成了承压水含水层顶板，承压水水头埋深约4 m且水量较大，因隔水层较薄需要对该区域进行抗突涌验算^[14-15]。坑中坑区域剖面图详见图7（图中所示为绝对标高）。

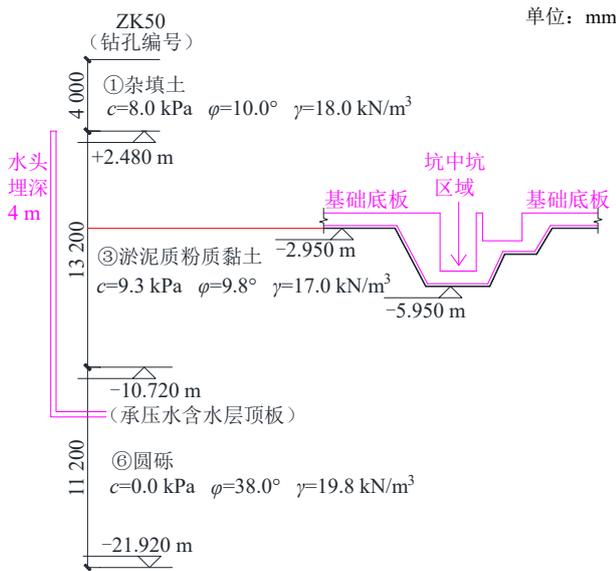


图7 坑中坑区域剖面图

Fig. 7 Profile of pit-in-pit area

选取坑中坑部位处 ZK50 号孔进行验算，按3层土层计：杂填土层厚4 m，底标高为+2.480 m；淤泥质粉质黏土层厚13.2 m，底标高为-10.720 m，重度按17.0 kN/m³计；圆砾层厚11.2 m，底标高为-21.920 m。基坑底板底标高为-2.950 m，坑中坑底标高为-5.950 m，承压水含水层顶板绝对标高为-10.720 m，水头埋深4 m。根据浙江省《建筑基坑工程技术规程》(DB33/T 1096—2014)^[16]第13.5.2款第1条相关规定，其计算公式为：

$$\frac{D\gamma}{h_w\gamma_w} \geq k_w \quad (1)$$

式中： D 为承压水含水层顶面至坑底的土层厚度，m； γ 为承压水含水层顶面至坑底土层的重度，kN/m³； h_w 为承压水含水层顶面的压力水头高度，m； γ_w 为水的重度，kN/m³； k_w 为安全系数，不小于1.1。

按式(1)代入数据后得：

$$\frac{D\gamma}{h_w\gamma_w} = \frac{(10.720 - 5.950) \times 17.0}{(10.720 + 2.480) \times 10} = 0.614 \quad (2)$$

经验算，安全系数小于1.1，抗突涌稳定性验算不满足设计要求，存在突涌的可能，必须采取抗突涌措施。根据邻近项目的施工经验，对2层区域内的电梯井坑中坑采用高压旋喷桩满堂封底的加固方案，坑中坑区域加固平面图和剖面图如图8~9所示。

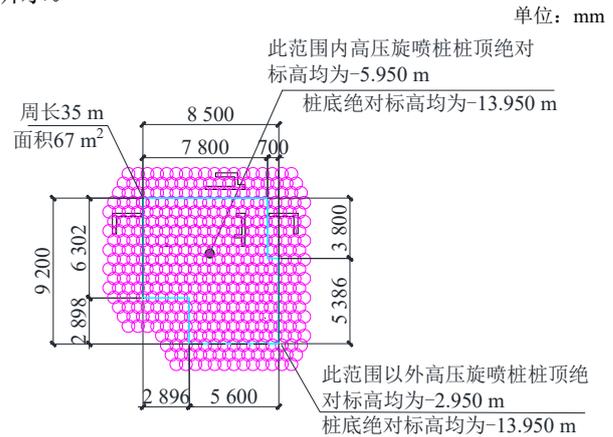


图8 坑中坑区域加固平面图

Fig. 8 Reinforcement plan of pit-in-pit area

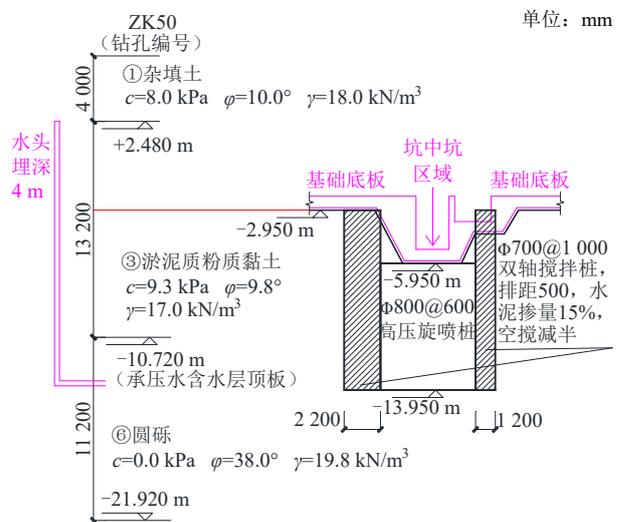


图9 坑中坑区域加固剖面图

Fig. 9 Reinforcement profile of pit-in-pit area

坑中坑底部加固厚度为8 m（封底底面绝对标高为-13.950 m），高压旋喷桩水泥掺量为15%，加固后的重度按22.0 kN/m³考虑，与坑中坑重力式挡墙双轴搅拌桩之间的黏结力取15 kPa，坑中坑按小基坑考虑，其周长 $L=35$ m，面积 $S=67$ m²，根据浙江省《建筑基坑工程技术规程》(DB33/T 1096—2014)^[16]第13.5.2款第2条相关规定，其计算公式为：

$$\frac{D\gamma + \alpha\beta c}{h_w\gamma_w} \geq k_w \quad (3)$$

式中: α 为折减系数, 取 0.5; β 为空间效应系数, 按 $\beta = (l_s D)/S$ 计算, 其中 l_s 为基坑平面周长, m, S 为基坑平面面积, m^2 ; c 为破裂面土层的内聚力, kPa; k_w 为安全系数, 不小于 1.2。其余参数同式(1)。

满堂封底底面处抗突涌验算按式(3)计算:

$$\frac{D\gamma + \alpha\beta c}{h_w\gamma_w} = \frac{8 \times 22 + 0.5 \times (35 \times 8/67) \times 15}{(13.950 + 2.480) \times 10} = 1.262 \quad (4)$$

经验算, 安全系数大于 1.2, 此方案加固后满足抗突涌计算要求。

3 施工过程中问题分析及解决措施

项目施工过程中总体比较顺利, 但难免会遇到问题, 本节选取了几个比较典型的问题, 对其进行分析, 并提供了相应的解决措施^[17]。

3.1 型钢立柱局部下沉

在基坑中部区域, 第二道型钢支撑全部安装完成并施加了一定的预应力后, 在最后 1 层土方开挖过程中, 其中 1 根型钢立柱出现了约 20 cm 的沉降, 致使立柱上方的水平支撑也发生了一定程度的下沉现象。现场采取了以下加固措施。

(1) 补打新的型钢立柱

立柱下沉半小时后利用挖机重新运来 1 根 12 m 长的型钢立柱, 在下沉立柱旁 1 m 处, 通过机械手迅速施压, 代替已下沉的立柱。同时在新打立柱上焊接托座, 把原横梁架设到新的托座上, 用高强螺栓连接固定。补打型钢立柱如图 10 所示。



图 10 补打型钢立柱

Fig. 10 Additional steel column

(2) 加强既有型钢立柱

对相邻立柱(经后期仪器测量, 下沉 9 cm)进行加强, 通过角钢与周边工程桩的钢筋焊接, 使之

成为受力支点, 防止立柱继续下沉。

(3) 增加监测频率

对新补打的立柱进行沉降监测; 加强对基坑测斜、地表沉降的监测, 监测频率由每日 1 次改为每日 3 次, 要求第三方监测单位对基坑周边的位移数据进行重新测量并增加监测频率, 早中晚各 1 次, 并及时反馈监测结果。

(4) 重新施加预应力

通过大型挖机对下沉的型钢水平支撑进行纠平, 原立柱下沉后与型钢横梁的空隙处用 20~30 mm 厚的钢垫块塞满, 对支撑标高重新复核后, 再通过油压千斤顶对型钢支撑重新加压, 如图 11 所示。



图 11 型钢支撑纠平后重新加压

Fig. 11 Repressurization of steel support after leveling

(5) 险情原因分析

补打立柱完成后, 每小时对其标高进行测量, 从补打立柱当天的 18 点到第 2 天的 18 点, 24 h 内立柱标高从原先的黄海标高 6.400 m 变为 6.388 m, 合计下沉 12 mm。水平支撑重新加压后, 立柱标高稳定在 6.386 mm 左右, 符合设计要求的 3 mm/d 的变化速率。监测数据表明了应急措施的有效性。

a) 设计方面, 进一步复核该区域的土层分布情况, 对立柱长度进行了复核。立柱长度验算按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[18] 式 5.3.5 计算, 其计算公式为:

$$Q_{uk} = u \sum q_{sik} l_i \quad (5)$$

式中: Q_{uk} 为总极限侧阻力标准值, kPa; u 为桩身周长, m; q_{sik} 为桩周第 i 层土的极限侧阻力标准值, kPa, 对于本项目, 从偏于安全方面考虑, 不考虑立柱桩端的端阻力标准值, 根据周边工程设计经验及《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[18] 表 5.3.5-1 所列的数值, 对于土层中的淤泥质粉质黏土, 极限侧阻力标准值取 30 kPa; l_i 为桩周第 i 层土的厚度, m, 在本项目中可以看成是型钢立柱的

长度。

型钢立柱承受的荷载为支撑的重量及支撑水平向对竖向产生的分量,水平支撑轴力对立柱的影响按轴力的1/60考虑,依据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[19]式7.5.1-1计算。水平支撑轴力根据支撑平面计算,每根支撑水平轴力为3 000 kN。

型钢立柱间隔以10 m考虑,每根立柱承受的力包括钢支撑构件、盖板自重及水平向轴力产生的附加竖向力。钢支撑的重量为137 kg/m,上下2层钢支撑,共16根型钢支撑;盖板的重量为324.5 kg/块,共12块;竖向力为 $3\,000/60=50$ kN,其总重量为:

$$G = \left[(16 \times 10 \times 137 + 12 \times 324.5) \times 10 \times 0.001 + 50 \right] / 2 = 154.1 \text{ kN}$$

根据《建筑与市政地基基础通用规范》(GB 55003—2021)^[20]式5.2.1-1计算,型钢立柱的计算长度可由下式计算:

$$G \leq \frac{Q_{uk}}{2} \quad (6)$$

$$\text{则 } 154.1 \leq \frac{0.3 \times 4 \times 30 \times L}{2}$$

得立柱长度 $L \geq 8.56$ m。故在蓝图中型钢立柱坑底以下埋深长度取10 m是满足承载力要求的。

b) 施工方面,立柱长度均为现场焊接,经监理方确认长度及焊接质量合格后再施工打入土体内,垂直度及深度均满足设计要求。

c) 在其他方面,对现场型钢立柱下沉区域周边进一步勘察时发现,有一处距离下沉立柱不到3 m的地方有水不间断地冒出,后经复核此为前期地勘单位施打的勘探孔没有封闭发生了局部管涌,与下沉立柱下的土形成了流通通道,带走了周边一部分的淤泥土,致使型钢立柱下沉。经过封堵完成后,立柱再没有发生过下沉现象。同时工程部对场地内其他的勘探孔封堵情况进行了系统检查,还发现了另外两处没有封闭,也及时进行了封堵,避免此类现象再次发生。

3.2 南侧地面局部开裂

在南侧施工场地内,2道型钢支撑已经安装完成并施加了一定的预应力,在施工垫层过程中南侧的两处深层土体位移累计值分别达到了33.8 mm、34.6 mm,与设计的报警值35 mm非常接近,同时观察到在南侧施工道路路面出现约10 m多长、30 mm宽的裂缝。

针对此类现象采取了以下应急措施:

(1) 加快施工底板

加快施工垫层及底板,靠近围护桩处优先施工,3 d内完成该区域的底板施工。

(2) 严禁堆载

基坑周边严禁堆载和停车,避免再次增加附加荷载。

(3) 增加支撑轴力

在设计上重新复核了该道型钢组合支撑轴力,原先设计的支撑轴力为3 000 kN,根据理正深基坑软件计算后得到该剖面的主动土压力最大值为252.97 kN/m,呈三角形分布,计算时可按平均值计算,即主动土压力取 $252.97/2=126.485$ kN/m,理正软件计算剖面(开挖到底后的计算工况)如图12所示。

根据土力学的相关知识,该组支撑的预应力在围护桩纵向对土体所产生的影响范围约为56 m,该组支撑所受到的集中土反力约为:

$$N = 252.97/2 \times 56 = 7\,083.2 \text{ kN} \quad (7)$$

式中: N 为该道型钢组合支撑受到的集中力。

工况5——开挖(10.35 m)

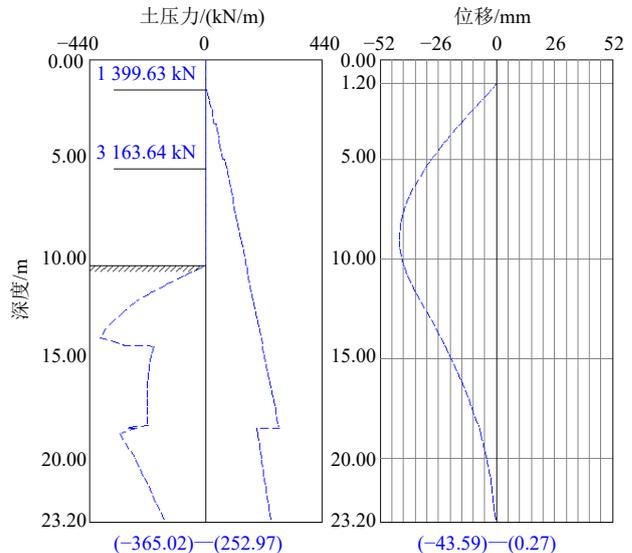


图12 理正软件计算剖面(开挖到底后的计算工况)

Fig. 12 Calculation profile of Lizheng software (after excavated to the bottom)

支撑预应力按集中土反力的90%考虑,同时扣除原先施加的轴力3 000 kN,则再需施加的预应力为:

$$F = 7\,083.2 \times 0.9 - 3\,000 = 3\,374.88 \text{ kN} \quad (8)$$

数值取整,同时结合安全性考虑,支撑预加力在原来的基础上再增加3 000 kN。

通过此措施后再对这两个监测孔进行监测,发现深层土体位移累计值变为31.4 mm、32.1 mm,与

原来相比减少了 2 mm 左右。

(4) 增设型钢换撑

由于再次施加了支撑预加轴力, 在支撑拆除时受压的土体会有回弹的现象, 考虑在支撑拆除前设置型钢斜换撑, 故在施工结构底板时预埋了钢板, 为后期施工型钢斜撑做好准备。增设型钢换撑如图 13 所示。



图 13 增设型钢换撑

Fig. 13 Adding section steel for support replacement

经过以上措施, 南侧的深层土体位移日变量保持在 0.2 mm/d 以内, 南侧施工道路的地面裂缝没有增大, 也没有新增裂缝, 各项指标趋于收敛, 基坑处于安全状态, 报警解除。

(5) 分析险情原因

针对此类事故, 分析其出现裂缝的原因, 主要是由于深层土体位移过大引起的, 按每天位移累加的变化趋势, 经若干天位移就超过报警值了。

分析位移过大的原因: a) 前期由于施工速度过慢, 外露土体在重力作用下, 深层土体累计位移以 1 mm/d 的速度持续增加; b) 土方开挖没有依照设计文件中一次开挖边线长度不大于 15 m、深度不大于 2 m 的要求; c) 出现裂缝的地方有施工便道, 有钢材、型钢构件、重型车辆等停放, 超过了设计文件中要求的坑边堆载不大于 20 kPa 的要求。

4 结 论

杭州市富阳区中心城区, 面临周边环境复杂、淤泥质土层深厚、承压水位高等不利环境。本基坑开挖 2 层地下室, 采用钻孔灌注桩/SMW 工法+2 道型钢组合支撑的围护形式, 造价经济, 施工周期缩短, 取得了一定的经济效益和社会效益。

然而在施工过程中也面临了一些挑战, 比如立柱下沉、地面局部出现裂缝等, 通过采取相应的急救措施: 补打立柱、加强既有立柱、增加预应力、增设型钢换撑等, 问题得到了有效解决, 确保了基

坑的安全和工程顺利完成。

参考文献

- [1] 杨大学. 基于 GIS 的杭州市富阳区地质灾害风险评价[D]. 安徽淮南: 安徽理工大学, 2024.
YANG Da-xue. Geological hazard risk assessment of Fuyang District, Hangzhou based on GIS[D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science & Technology, 2024.
- [2] 张鹏, 张媛媛, 马志江, 等. 萧山-球川断裂富阳-建德段第四纪活动性研究[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(4): 959-967.
ZHANG Peng, ZHANG Yuan-yuan, MA Zhi-jiang, et al. Characteristic of Quaternary activities of Fuyang-Jiande segment of Xiaoshan-Qiuchuan fault[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(4): 959-967.
- [3] 翁其平, 王卫东. 软土超深基坑工程关键技术问题研究[J]. 地基处理, 2024, 6(1): 38-46.
WENG Qi-ping, WANG Wei-dong. Key technical problems of super-deep foundation pit engineering in soft soils[J]. Journal of Ground Improvement, 2024, 6(1): 38-46.
- [4] 宋卓华, 任宝双, 郁志伟, 等. 软土深基坑分区开挖对周边环境的影响研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊 2): 2488-2493.
SONG Zhuo-hua, REN Bao-shuang, YU Zhi-wei, et al. Research on environmental impact of zoned excavation of deep foundation pit in soft soil stratum[J]. Building Structure, 2023, 53(S2): 2488-2493.
- [5] 徐伟, 太俊, 温永凯, 等. 软土基坑被动区加固强度参数试验研究及变异性分析[J]. 岩土工程技术, 2024, 38(1): 110-115.
XU Wei, TAI Jun, WEN Yong-kai, et al. Experimental study and variability analysis of strength parameters in passive zone reinforcement of soft foundation pit[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2024, 38(1): 110-115.
- [6] 夏天, 岑维杰, 赵华. 杭州某软土基坑工程开挖对地铁的影响研究[J]. 地基处理, 2023, 5(增刊 1): 60-68.
XIA Tian, CEN Wei-jie, ZHAO Hua. Research on the influence of excavation of a soft soil foundation pit in Hangzhou on subway[J]. Journal of Ground Improvement, 2023, 5(S1): 60-68.
- [7] 韩梅, 俞涛, 徐山岱, 等. 邻近地铁基坑围护结构的设计及变形控制措施[J]. 地基处理, 2019, 1(1): 57-62.

- HAN Mei, YU Tao, XU Shan-dai, et al. Design and deformation control measures for enclosure structure of foundation pit adjacent to subway[J]. Chinese Ground Improvement, 2019, 1(1): 57-62.
- [8] 徐银锋, 张宏建, 赵华, 等. 杭州某深基坑工程施工对地铁隧道的影响研究[J]. 地基处理, 2023, 5(增刊 1): 97-104, 111.
- XU Yin-feng, ZHANG Hong-jian, ZHAO Hua, et al. Study on the influence of construction of a deep foundation pit project on subway in Hangzhou[J]. Journal of Ground Improvement, 2023, 5(S1): 97-104, 111.
- [9] 康璞, 王烁, 吴梦龙, 等. SMW 工法桩与组合型钢支撑在软土地区的应用[J]. 绿色科技, 2023, 25(8): 255-258.
- KANG Pu, WANG Shuo, WU Meng-long, et al. Application of SMW construction method pile and combined steel support in soft soil area[J]. Journal of Green Science and Technology, 2023, 25(8): 255-258.
- [10] 高洋. 组合式型钢支撑在城区复杂环境基坑工程中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(11): 128-130.
- GAO Yang. Application of combined steel support in foundation pit engineering in complex environment of urban area[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2023(11): 128-130.
- [11] 郭成田. SMW 工法桩施工工艺技术研究[J]. 中国设备工程, 2024(1): 103-105.
- GUO Cheng-tian. Study on construction technology of SMW pile[J]. China Plant Engineering, 2024(1): 103-105.
- [12] 牛文韬. SMW 工法在软土基坑支护工程中的应用[J]. 勘察科学技术, 2023(6): 25-28, 34.
- NIU Wen-tao. Application of SMW construction method in soft soil foundation pit support project[J]. Site Investigation Science and Technology, 2023(6): 25-28, 34.
- [13] 郭世巧, 刘云鹏. SMW 工法在软土地区施工工艺研究[J]. 科学技术创新, 2023(27): 141-144.
- GUO Shi-qiao, LIU Yun-peng. Study on SMW construction technology in soft soil area[J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(27): 141-144.
- [14] 黄茂松, 刘奕晖, 俞剑, 等. 承压水地层基坑抗突涌稳定性的计算方法[J]. 岩土力学, 2023, 44(11): 3071-3081.
- HUANG Mao-song, LIU Yi-hui, YU Jian, et al. Calculation method of stability against inrush of excavation overlying a confined aquifer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(11): 3071-3081.
- [15] 高京生, 程乐, 宗二凯, 等. 超深富水基坑开挖工程突涌以及变形分析[J]. 山西建筑, 2024, 50(1): 81-85, 93.
- GAO Jing-sheng, CHENG Le, ZONG Er-kai, et al. Analysis of surge and deformation of ultra-deep water-rich foundation pit excavation[J]. Shanxi Architecture, 2024, 50(1): 81-85, 93.
- [16] 浙江省住房和城乡建设厅. 建筑基坑工程技术规程: DB33/T 1096—2014[S]. 杭州: 浙江工商大学出版社, 2014.
- Zhejiang Provincial Department of Housing and Urban Rural Development. Technical Specification for Building Foundation Excavation Engineering: DB33/T 1096—2014[S]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University Press, 2014.
- [17] 张振海. 浅谈基坑工程的一些教训和经验[J]. 地基处理, 2022, 4(4): 354-360.
- ZHANG Zhen-hai. Case studies and lessons of excavation experience[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(4): 354-360.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Building Pile Foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑与市政地基基础通用规范: GB 55003—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. General Code for Foundation Engineering of Building and Municipal Projects: GB 55003—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.