

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.07.070

软土地基地下调蓄池深基坑设计研究

郑剑杰

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 主要介绍了上海某软土地基地下调蓄池的深基坑设计方案, 并采用有限元方法计算分析了基坑开挖对周边环境的影响。该基坑开挖深度 16.5~18.1 m, 采用地下连续墙围护, 水平支撑采用一道钢筋混凝土支撑, 三道钢支撑系统, 坑内设置格构立柱。计算结果表明: 基坑支护整体稳定性、抗倾覆稳定性、抗隆起稳定性、抗承压水稳定性安全系数, 围护结构强度和变形满足规范要求。对周边环境影响分析结果表明, 基坑开挖引起周边房屋基础的内力和变形均在规范允许范围内, 基坑施工不会影响周边房屋结构的安全, 基坑设计方案安全可行。

关键词: 深基坑支护; 地下连续墙; 内支撑; 基坑周边环境; 有限元分析; 软土地基

中图分类号: TU473.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)07-0294-05

0 引言

根据排水规划相关文件的要求, 上海地区通过建设地下初雨调蓄池, 解决初期雨水所带来的面源污染问题, 改善生态环境。市中心的调蓄池基坑工程建设通常面临软土地基, 开挖深度大, 用地紧张, 周边环境复杂等问题。为确保地下水池结构施工及基坑周边环境的安全, 避免基坑支护结构产生过大变形, 必须对深基坑侧壁采取支护措施^[1]。目前基坑围护结构有多种类型, 在面对开挖深度超过 15 m 的基坑时, 地下连续墙加内支撑是目前应用较多的支护形式。

本文依托上海市友乐路新建调蓄池工程, 结合场地现状和周边环境, 对地下连续墙+内支撑围护结构体系进行了计算分析。

1 工程概况

工程位于上海市长宁区新泾镇, 西至友乐路, 东至虹桥路, 北至现状绿地空地, 南至春秋航空总部办公楼。新建初雨调蓄池调蓄容积为 6 300 m³。调蓄池为全地下式钢筋混凝土水池结构, 结构平面近似直角梯形, 长度方向 19.7~46.5 m, 宽度 37.8 m, 底板板底埋深 16.4~16.9 m, 局部泵坑位置深度 18.0 m。调蓄池地下一层为设备间, 地下二层为调蓄池水处理

区。水池外墙采用叠合墙形式, 地连墙与内衬墙两墙合一。工程平面布置图如图 1 所示。

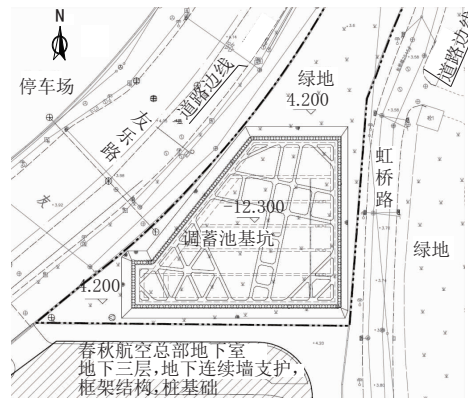


图 1 调蓄池平面布置图

2 地质条件

拟建场地现状主要为绿地, 高于周边场地, 场地相对平坦, 地面标高约在 4.22~5.32 m, 高差为 1.10 m, 场地周边地面标高均低于 4.20。勘察深度范围内地基土为第四纪全新世 Q₄~晚更新世 Q₃ 的沉积层, 主要由填土、粘性土、粉性土等软黏土组成。场地内并无暗浜、暗塘等不良地质条件, 无全新活动发震断裂、滑坡等地质灾害, 无墓穴、空洞、孤石等分布。场地 7 度抗震设防, 基本地震加速度 0.10g。场地主要土层物理力学参数见表 1。

场地潜水稳定水位埋深在 1.55~2.48 m, 场地存在第⑤₂层微承压水与第⑦、⑨层承压水, 水位埋深的变化幅度一般在 2~7 m。

收稿日期: 2023-09-10

作者简介: 郑剑杰(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事结构设计工作。

表1 主要地层物理力学参数

层号	土层名称	土层平均厚度 /m	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	固结快剪		土试渗透系数 建议值 $K/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
				C/kPa	$\varphi/(\circ)$	
① ₁₋₁	杂填土	2.47	18.0	10	10.0	-
① ₁₋₂	素填土	1.21	18.0	10	10.0	-
②	粉质黏土	1.63	18.2	23	17.5	5.0×10^{-6}
③	淤泥质粉质黏土	7.95	17.1	12	19.5	4.0×10^{-6}
④	淤泥质黏土	4.48	16.9	14	11.0	4.0×10^{-7}
⑤ ₁₋₁	黏土	3.10	17.8	18	13.5	5.0×10^{-7}
⑤ ₁₋₂	粉质黏土	4.40	18.4	22	21.0	2.00×10^{-5}
⑤ ₂	砂质粉土	4.82	18.8	3	31.5	6.0×10^{-4}
⑤ ₃	粉质黏土	23.41	18.3	22	22.5	4.0×10^{-5}

表2 调蓄池基坑周边环境一览表

开挖深度 /m	方位	距坑边距离 /m	建构筑物或管线名称	结构形式	基础形式	环境保护等级
16.5/ 18.1	南	9.7	春秋地块办公楼地下室	地下3层; 地下连续墙支护, 两墙合一, 钢筋混凝土框架结构	钻孔灌注桩基础, 桩长 45~55 m	二级
	南	32.4	春秋地块办公楼塔楼	地上高层建筑 27.2 m, 地下三层, 钢框架 + 中心支撑结构	钻孔灌注桩基础, 桩长 45~55 m	
	东	19.8	门卫	1层钢筋混凝土框架结构	浅基础	三级
	东	11.8	D300 污水管, 埋深 1.56 m	—	天然基础	
	东	8.4	D600 雨水管, 埋深 1.4 m	—	天然基础	
	西	19.3	现状进水管检查井内径 12 m	钢筋混凝土池体结构, 池壁壁厚 400, 底板厚 500,	筏板基础	
	西	8.4~8.9	综合排管 pe110, 军通排管 pe110, 埋深 1.2 m	—	天然基础	二级
	西	6.6	D300 污水管, 埋深 2.65 m	—	天然基础	
	西	10.3	D600 雨水管, 埋深 2.6 m, 拆排	—	天然基础	
	西	29.7	21孔电力排管埋深 4.5 m	—	天然基础	

本工程基坑形状不规则, 若结合主体结构布置钢筋混凝土支撑则存在大量混凝土支撑与围檩斜交(夹角过小)的情况, 造成支撑和围檩受力不合理。调蓄池的地下一层的内部功能复杂, 结合主体结构布置支撑较为困难, 不利于内部空间、楼板开洞布置。综合考虑, 经过比选, 本工程首道支撑采用钢筋混凝土支撑, 下部各道支撑采用临时钢支撑系统, 以方便主体结构施工。

本基坑采用 31 m 的 1.0 m 厚地下连续墙, 基坑开挖前平整场地标高至 4.20。基坑内部设置格构柱和 4 道水平支撑。第一道设置在 2.20 m 标高处, 采用 700 mm × 700 mm 钢筋混凝土支撑, 1 000 mm × 800 mm 钢筋混凝土冠梁。其余三道为钢围檩 + 钢支撑, 围檩采用双拼 HN800 mm × 300 mm 型钢, 支撑

3 基坑围护设计方案

调蓄池基坑采用地下连续墙支护形式, 基坑长度方向约 19.7~46.5 m, 宽度 37.8 m, 基坑深度 16.5~17.0 m, 局部落底处深 18.1 m。基坑安全等级一级。坑底较浅处位于第④层淤泥质黏土, 较深处位于⑤₁₋₁层黏土中, 采用明挖顺作法施工。

调蓄池基坑用地范围内的通信管线搬迁, 其周边主要建构筑物及重要管线情况见表 2。

根据全国及上海市基坑工程有关规范规定^[2-3], 综合考虑周边环境, 确定本基坑的环境保护等级: 基坑西侧、南侧环境保护等级二级, 基坑东侧、北侧环境保护等级三级。

采用 $\phi 800 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 钢管支撑。坑内降水至坑底以下 0.5 m, 计算时选取地面下 0.5 m 作为坑外侧水位深度。

基坑的支撑体系平面布置图详如图 2 和图 3 所示, 局部深坑处的基坑支护剖面如图 4 所示。

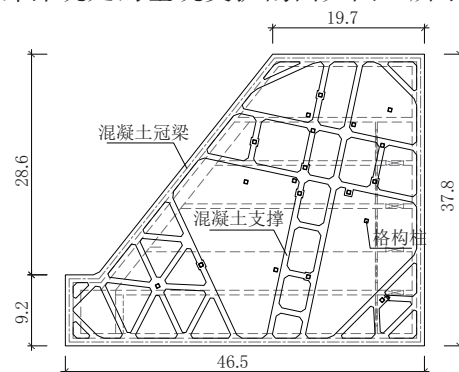


图2 首道钢筋混凝土支撑平面布置图(单位:m)

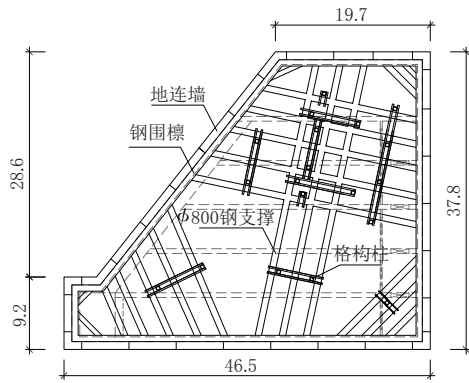


图3 第2-4道钢支撑平面布置图(单位:m)

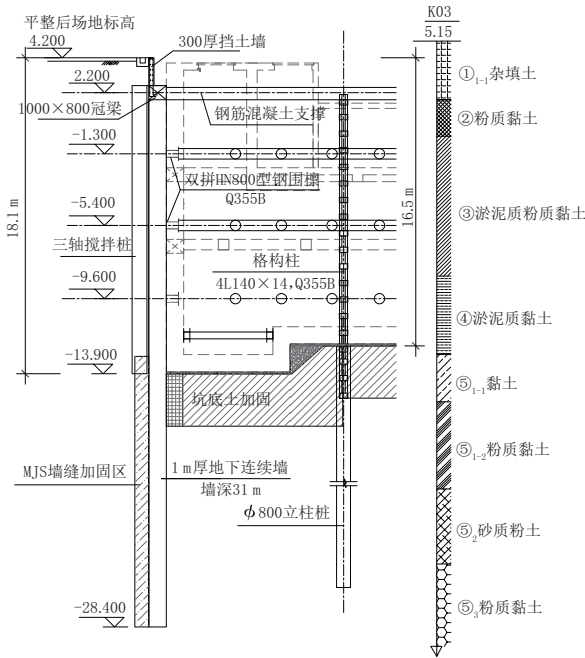


图4 局部深坑处支护结构剖面图(单位:m)

4 基坑剖面计算

基坑剖面的计算采用平面竖向弹性地基梁法,考虑基坑开挖、加撑、换撑、拆撑等施工步骤,对地连墙结构按竖向连续梁进行内力、变形分析,并将各工况计算的变形、内力结果进行包络后,验算各围护结构构件的强度、稳定^[4]。围护结构内力计算结果见表3。

通过对18.1 m局部深坑处基坑剖面单元计算可知,基坑在向下开挖的过程中不需在局部深坑处额外设置钢支撑。但在基坑回筑阶段,拆第4道钢支撑的计算工况中,因局部深坑底板(坑底-13.90 m)与第三道支撑(中心标高-5.40 m)间距过大,导致地下室外墙的弯矩和剪力过大,1 m厚地连墙的截面抗剪不足,因此拆第四道支撑前,局部深坑处在-11.90 m标高增设临时钢支撑。该道临时钢支撑可缩小拆撑时地连墙的竖向计算跨度,减小地墙内力,

表3 围护结构计算结果汇总表

验算内容	西南角局部深坑处	西侧	北侧、东侧、南侧
基坑挖深/m	18.1	17	16.5
地连墙入土深度/m	14.5	15.6	16.1
环境保护等级	二级	二级	二级/三级
整体稳定性	1.77	1.91	1.96
抗倾覆稳定性	1.62	1.85	1.94
墙底隆起稳定性	4.23	4.48	4.6
坑底隆起稳定性	2.27	2.46	2.54
抗渗流稳定性	3.34	3.64	3.42
抗承压水稳定性	1.28	1.32	1.34
围护墙水平位移/mm	33.9(54.3)	31.1(51.0)	29.4(49.5)
地面沉降/mm	27.1(45.25)	24.8(42.50)	23.5(41.25)
地连墙最大正弯矩 $M_1 / (kN \cdot m \cdot m^{-1})$	1 996.6	1 896.6	1757
地连墙最大剪力 Q_2 / kN	-756.9	-739.8	-693.3
首道支撑 $N_{max} / (kN \cdot m^{-1})$	257.6	258.3	262.9
第2道钢支撑 $N_{max} / (kN \cdot m^{-1})$	714.3	701.4	686.8
第3道钢支撑 $N_{max} / (kN \cdot m^{-1})$	838.8	806	756.8
第4道钢支撑 $N_{max} / (kN \cdot m^{-1})$	795.2	599	506.1

注:括号内为限值。
使地连墙截面抗剪满足要求。该支撑在底板浇筑完成后设置,可以降低施工难度。

计算结果显示,各方向围护结构水平位移29.4~33.9 mm,地面沉降23.5~27.1 mm,均能满足上海市基坑工程技术标准关于环境保护等级二级的变形控制要求。基坑支护结构的整体稳定(安全系数>1.25)、抗倾覆(安全系数>1.20)、坑底抗隆起(安全系数>2.20)稳定性等均满足规范要求。地下连续墙每延米最大弯矩为1 996.6 kN·m,最大剪力为756.9 kN,经过计算,1 m厚地连墙截面的抗弯、抗剪能力可以满足设计需求。

5 水平支撑系统计算

围护墙按平面竖向弹性地基梁法计算时需先确定弹性支座的刚度,即水平支撑系统刚度。由于支撑平面布置较为复杂,本工程按单位压应力反算基坑变形确定支撑刚度。计算得到混凝土支撑体系,钢支撑系统的平均刚度见表4。

计算得到支撑系统刚度,再通过基坑剖面计算得到各道支撑的反力。再将此反力作用在支撑平面杆系结构之上,求得各支撑杆件的内力和位移,见表5。

表4 支撑系统刚度计算结果

项目	$P/(kN \cdot m^{-1})$	$\delta/(kN \cdot m^{-1})$	$K/(MN \cdot m^{-2})$
混凝土支撑	1	0.008	125
钢支撑	1	0.011	90

表5 支撑杆件计算结果

支撑	围檩最大弯矩 / ($kN \cdot m$)	支撑最大弯矩 / ($kN \cdot m$)	支撑最大 轴力 / kN	支撑最大 剪力 / kN
混凝土支撑	1 623	29	2 349	138
钢支撑	2 008	516	4 739	313

计算结果显示,水平支撑结构的内力、整体位移处于合理范围,设计的支撑构件截面满足受力需求。

表6 抗承压水稳定性计算结果

承压含水层	开挖深度 / m	承压水顶板埋深 / m	水位 / m	含水层顶至坑底土重 P_{cz} / kPa	水压力 P_{wy} / kPa	P_{cz} / P_{wy}	突涌评价
⑤ ₂	18.1	25.05	2.0	126.8	230.5	0.55	突涌
⑦	18.1	53.05	3.0	641.3	500.5	1.28	不突涌

经过计算,⑤₂层承压水按不利水头估算,对调蓄池基坑有突涌风险。为避免坑底突涌,需对⑤₂层微承压水采取隔断措施,地下连续墙穿透⑤₂层,深入至下层⑤₃粉质黏土内不小于2 m。并在基坑内⑤₂层中布置减压/观测井降水井。

地连墙结构自身可兼顾止水,地连墙外侧采用三轴搅拌桩槽壁加固兼顾止水加强,坑底以下墙体接缝处采用MJS桩止水加固。坑内采用管井梳干降水,维持地下水位低于基坑底面以下0.5 m。

7 基坑周边环境影晌分析

调蓄池基坑距离南侧春秋地块办公楼地下室最近约9.7 m,该侧基坑环境保护等级二级。

由于临近现状房屋方向的基坑宽度、深度大且距离房屋在1倍挖深范围内,基坑开挖极易扰动周边土层,造成现状房屋发生沉降变形、水平位移,影响房屋安全。

本工程采用启明星基坑开挖环境影响分析软件JK-3E,以有限元数值模拟方法分析基坑开挖施工对临近春秋地块房屋的影响。

选取局部深坑处18.1 m基坑支护单元,建立分析模型,模型中输入现状房屋的桩基础和地下室,以及上部建筑的荷载。模型简图如图5所示。

模型的施工工况按实际基坑开挖、设置支撑的顺序输入。在基坑开挖至坑底时,围护结构侧移、周边地表沉降、临近基础沉降、临近房屋基础的内力和变形达到最大值,结果汇总见表7。周边环境变形云

6 基坑降水

本场地存在第⑤₂层微承压水与第⑦、⑨层承压水。第⑤₂层微承压水水位埋深的变化幅度在2~5 m。承压水水位埋深按最不利因素考虑取2.0 m。第⑦、⑨层承压水属于连通层,故按同一承压水考虑,水位埋深的变化幅度一般在3~7 m。承压水水位埋深取3.0 m。

对调蓄池基坑坑底抗承压水稳定性进行计算,计算结果见表6。

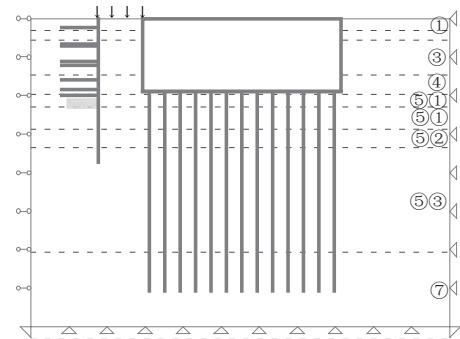


图5 计算模型图

图如图6和图7所示。

表7 周边环境影晌分析结果汇总

项目	计算值	允许值	是否满足
围护结构水平位移 / mm	31.3	54.30	满足
地表沉降 / mm	13.1	45.25	满足
邻近房屋基础沉降 / mm	1.3	—	—
邻近房屋基础倾斜 / $\%$	0.1	3	满足
桩最大水平位移 / mm	14.0	—	—
桩最大弯矩 /($kN \cdot m$)	371.6	—	—
桩最大剪力 / kN	301.4	—	—

根据基坑开挖环境影响分析计算可以得出以下结论。

(1)调蓄池基坑南侧的春秋航空高层建筑房屋,地面沉降位移最大值为13.1 mm,满足上海市标准《基坑工程技术标准》(DG/TJ08-61-2018)对环境保护等级为二级的基坑相关要求;基础最大倾斜0.1‰,远小于《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)

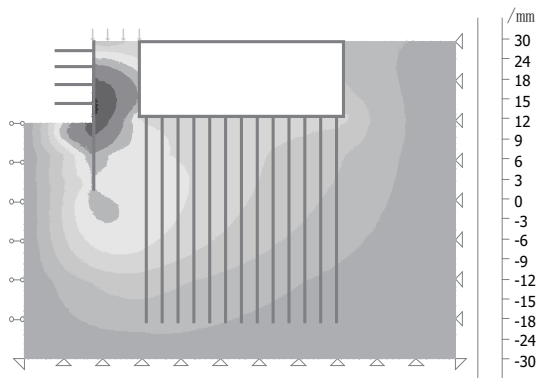


图6 周边环境水平变形云图(单位:mm)

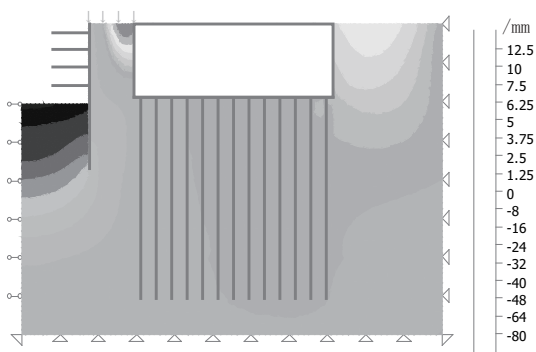


图7 周边环境竖向变形云图(单位:mm)

中多层高层建筑基础的整体倾斜变形允许值3%,房屋安全。

(2)调蓄池基坑施工引起的临近房屋钻孔灌注桩发生内力和变形,其中引起桩身最大弯矩 371.6 kN·m、最大剪力 301.4 kN,如图8所示,位于现状钻孔灌注桩桩顶。现状钻孔灌注桩混凝土 C35,其中地下室范围为 $\phi 700$ 抗拔桩,塔楼范围为 $\phi 800$ 抗压桩。对抗拔桩按纯弯构件复核截面纵筋,对抗压桩按压弯构件复核截面纵筋,经验算现状桩基纵筋可满足基坑施工引起的受弯需求,现状桩身箍筋满足基坑施工引起的剪力需求。基坑施工不会影响春秋航空房屋桩

基础安全。

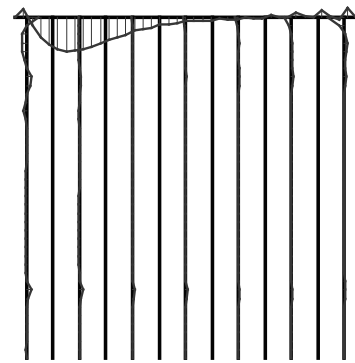


图8 邻近基础弯矩图(单位:kN·m)

(3)春秋地块原设计为地下连续墙支护(墙深41 m),地下室外墙为叠合墙两墙合一,该地下连续墙可作为隔离桩,有效减少调蓄池基坑开挖对春秋地块的影响。

8 结语

本工程调蓄池位于软土地区,基坑采用地下连续墙+内支撑支护形式,内部设置格构立柱。计算结果表明,西侧、南侧围护结构最大位移 31.1~33.9 mm,北侧、东侧围护结构最大位移 29.4 mm,均能满足规范关于环境保护等级二级的位移控制要求。基坑支护各项稳定性安全系数满足规范要求,围护结构强度满足使用要求。周边环境影响分析结果表明,基坑施工不会影响春秋航空房屋基础的安全。本工程基坑设计方案安全可行。

参考文献:

- [1] 张瑾.基于实测数据的深基坑施工安全评估研究[D].上海:同济大学,2008.
- [2] JGJ 120—2012,建筑基坑支护技术规程[S].
- [3] DG/TJ 08-61—2018,基坑工程技术标准[S].
- [4] 刘国斌,王卫东.基坑工程手册(第2版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com