

南水厂深度处理改造工程基坑围护分析与应用

李 波, 朱彩平, 王伟涛

(上海宏渠工程咨询监理有限公司, 上海市 201301)

摘 要: 针对上海南水厂深度处理改造工程周边环境复杂,老水厂仍在运行,设计构筑物平面毗邻、基底不一的情况,科学、系统的对基坑围护方案进行了分析、论证,并结合通水节点目标进行了方案的优化与调整,并达到了预期的效果。为今后自来水厂、污水污泥处理厂等类似工程提供一点参考性建议。

关键词: 基坑围护;换撑;土体加固;结构同步实施

中图分类号:

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)10-0153-06

0 引 言

基坑工程是一个古老而又具有时代特点的岩土工程课题,最早的放坡开挖及简单木桩围护可追溯到远古时代^[1]。伴随着时代的发展与工程实践的深入,基坑围护已经成为了一项系统、关键性的工程。基坑围护主要指对实地开挖的基坑进行支护,是为保证地下结构施工及基坑周边环境的安全,对基坑侧壁及周边环境采用的支挡、加固与保护措施^[2]。基坑形式多种多样,有排桩支护,地下连续墙支护,灌注桩搅拌桩支护等等,使土体在支护结构、地下水以及周边建筑物等共同作用下,能够安全、稳定,以及坑内正常作业。尤其是有地铁、隧道等地下结构的基坑围护,有高楼大厦超深基坑围护等等,基坑一旦失稳,造成的损失将是无法估量。

本文主要针对上海南水厂深度处理改造工程,在地下水位高,周边环境复杂,原水管道影响的情况下,从基坑围护方案的优化调整分析、计算、确立,到实施、后期监测展开论述,以期今后类似工程提供一点参考性建议。

1 工程概况

南水厂深度处理改造工程,建设规模为 44 万 m³/d,采用臭氧生物活性炭深度处理工艺,与水厂现有常规处理规模相匹配。主要内容包括新建预臭氧接触池、中间提升泵房及后臭氧接触池、活性炭滤池及接触消毒池、反冲洗泵房及臭氧发生器间、回收水池、液氧站,以及现状 20 万 m³/d 砂滤池出水总渠、

收稿日期: 2021-04-18

作者简介: 李波(1973—),男,本科,高级工程师,主要从事工程建设管理工作。

鼓风机房及加氯加氨间局部改造等内容。

工程共有 4 个单体采用基坑围护施工,分别为活性炭滤池、中间提升泵房及后臭氧接触池、回收水池、反冲洗泵房;活性炭滤池基坑平面尺寸 50.92 m × 97.56 m,开挖深度在 6.30 m 左右;提升泵房及后臭氧接触池基坑平面尺寸 41.90 m × 40.80 m,开挖深度在 6.70 m 左右;回收水池基坑平面尺寸 44.20 m × 15.45 m,开挖深度在 3.2 m 左右;反冲洗泵房基坑平面尺寸 20.97 m × 13.00 m,开挖深度在 3.15 m 左右。围护结构选型:活性炭滤池、中间提升泵房及后臭氧接触池、回收水池均采用钻孔灌注桩 + 三轴搅拌桩止水 + 一道钢筋混凝土结构支撑的形式,反冲洗泵房采用水泥土搅拌桩或高压旋喷桩重力式坝体围护结构。

2 围护方案分析论证

2.1 周边环境情况

南汇南水厂深度处理改造工程建设场地主要位于厂区东北角,活性炭滤池、中间提升泵房及后臭氧接触池、回收水池、反冲洗泵房四个单体构筑物相互临近。

如图 1 所示,拟建活性炭滤池边线距离东侧的房屋 11.5 ~ 26.0 m;距南侧的二级泵房 13.0 ~ 27.0 m;距北侧的房屋 35.0 ~ 40.0 m;西侧为该次新建回收水池、反冲洗泵房、臭氧发生间及配电间和提升泵房及后臭氧接触池用地。拟建回收水池、臭氧发生间和提升泵房及后臭氧接触池边线:距离北侧的房屋 40.0 ~ 46.0 m;距南侧的清水约 18.7 m;距西侧的反冲洗废水调节池 10.5 ~ 12.3 m;东侧为该次新建活性炭滤池用地。

2.2 基坑围护方案初步分析

该工程基坑规模中等,形状规则,开挖深度普遍

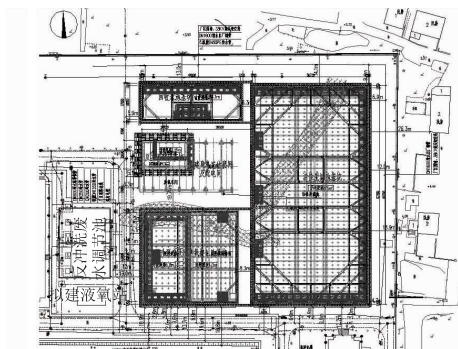


图1 工程周边地形图

在7 m之内,但经过现场实地查看分析,认为依然存在一定的复杂、困难之处:

(1)场地环境复杂,环境保护要求高。周边有关乎水厂安全运行的出厂管、二号泵房、高压线缆等限制了施工场地;

(2)水池类构筑物基坑,不同于房建基坑、地铁基坑,水池类构筑物基坑中间没有层间板,不方便设置换撑,常规多采用重力坝围护,但该工程基坑深度超过重力坝使用范围,周边又有需保护的管线限制,且保护要求高,受场地及环境限制,无法采用重力坝等无内支撑的围护方式;

(3)水池类构筑物闭水试验与施工工艺的矛盾。地上、地下部分需整体浇筑完成,一次性做闭水试验,这要求施工地上部分时,基坑还不能回填,且基坑内最好无水平支撑体系,以免影响水池上部施工;

(4)该工程四个单体构筑物集中在一处,相互毗邻,基坑深浅不一。同时,底板高程不在一个水平面上,采用一个大基坑在底板处换撑困难。

结合场地实际情况、施工工艺特点,并考虑到活性炭滤池单体构筑物基坑及主体结构工程总量较大、工艺复杂,而且是该工程的关键工序,计划在完成活性炭滤池主体结构施工并满水实验合格后,再开展毗邻构筑物施工。基于总工期控制考虑,初步决定采用四个基坑分别围护、同步实施,各基坑土方开挖及构筑物施工要先后有序、分步进行的方案。

2.3 基坑围护方案调整、优化

随着炭滤池下部结构的进展,发现如果按照原先的施工方案实施,毗邻的提升泵房、后臭氧接触池、回收水池三个单体,按原方案实施则存在一定安全隐患且无法确保按期完工。为此,经分析研究调整、优化方案如下:

(1)原滤池-3.0 m混凝土传力带采用钢筋混凝土构造措施,由于混凝土的养护时间处在关键线路上,调整为钢支撑支护的形式,可以有效缩短工期。水平

钢支撑和土体加固平面图如图2所示,A-A及B-B剖面如图3所示。

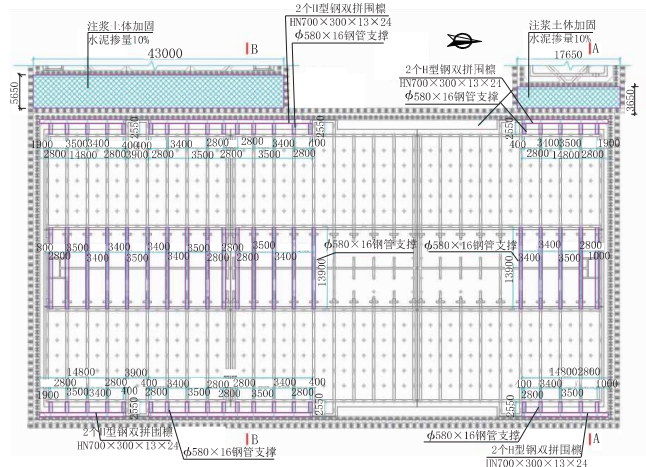


图2 水平钢支撑和土体加固平面图

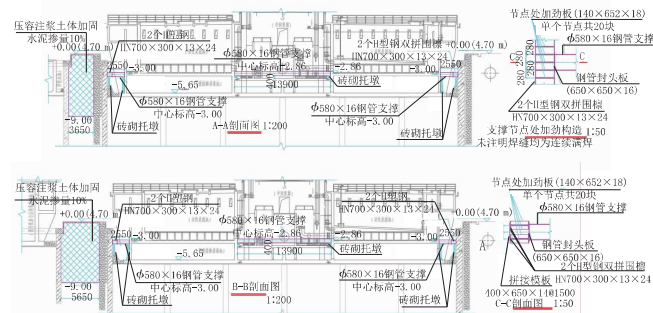


图3 水平钢支撑和土体加固剖面图

(2)滤池围护与回收水池以及提升泵房土体之间加固的措施,由原来单液水泥注浆,调整为水泥-水玻璃双液注浆。水玻璃不但可以提高时效,亦可提高结石率(可达98%~100%),并且可提高结石的抗压强度^[3]。调整目的主要是提高水泥加固的早期强度,确保基坑间力的有效传递以及后续工序的提前介入。

(3)如图4所示,调整基坑开挖工况之后的施工顺序:考虑到基坑之间的受力平衡,科学设置换撑后方可展开后续施工。所谓换撑,指在稳定的条件下采用一定的技术措施来逐步取代内支撑结构体系,从而保证临时内支撑拆除后,工程能安全保质地继续施工,其实质是应力的安全有序的调整、转移和再分配^[4]。待活性炭滤池-3.0 m层间板、管廊-2.86 m换撑以及钢支撑完成,同时活性炭滤池围护结构与回收水池、提升泵房围护结构之间土体加固完成并达到设计强度之后进行相邻提升泵房、回收水池基坑开挖与后续结构施工。

在提升泵房与回收水池基础底板混凝土达到设计要求,满足拆撑条件时(此处拆撑条件是指提升泵房与回收水池的底板混凝土并包含基础换撑混凝土

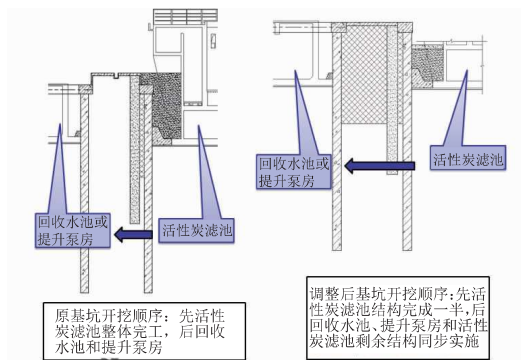


图 4 基坑开挖顺序对比图

达到设计强度要求)方可进行拆撑。为节约工期特优化浇筑安排:将底板混凝土与换撑混凝土同时浇筑,并增大换撑混凝土与围护结构的有效接触面积使受力最优。从施工计划安排来看,当时三个单体的支撑混凝土在同一施工阶段浇筑的,所以拆撑的必须以底板与换撑混凝土强度控制为准。当底板与换撑混凝土同时达到设计强度时,具备拆撑的同时也创造了相邻基坑同步平行施工的进度控制优势。

后续提升泵房与回收水池混凝土支撑拆除与活性炭滤池的钢支撑换撑拆除同步进行。至此,各基坑支撑体系全部拆除,分别按计划开展后续施工。

2.4 理论计算分析

(1) 加设临时钢支撑

当提升泵房基坑开挖深度达 6.85 m,产生的水土压力通过顶撑传递到炭滤池基坑的悬臂支护结构,导致炭滤池基坑悬臂支护结构不稳定。

对炭滤池和提升泵房的围护桩按双排桩的模型进行模拟(见图 5 和图 6),考虑双排桩悬臂结构支挡提升泵房的水土压力(三角形分布水土压力),计算模拟施工荷载取 30 kPa(据规范并结合施工现场情况选取)。根据计算结果,按双排桩悬臂支护模型计算,支护结构位移不能满足要求,如图 7 所示。

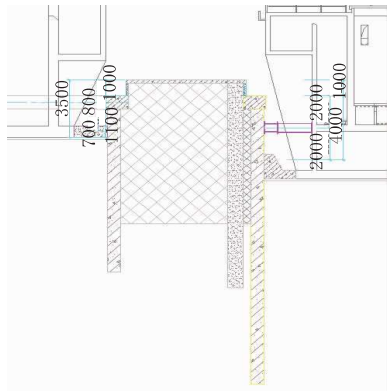


图 5 结构图(单位:mm)

而实际工程中的,2 排桩之间并未刚性连接,没有形成双排桩支护结构,且水土压力不是三角形分

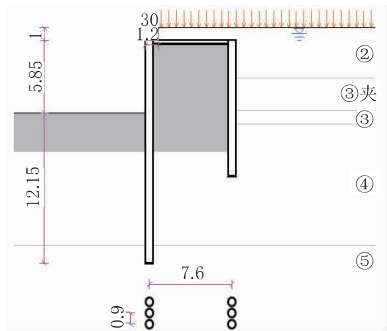


图 6 计算简图(单位:m)

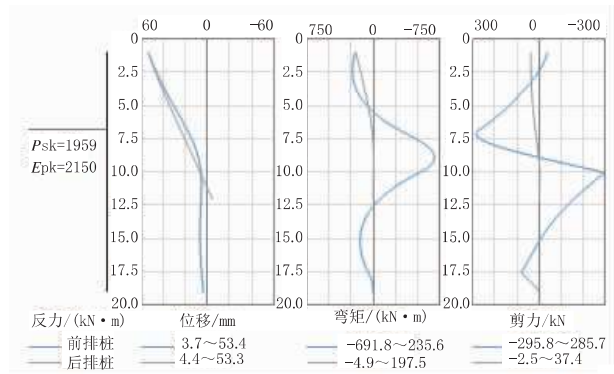


图 7 双排桩计算结果简图

布,而是顶部集中荷载,所以变形会更大。

为了控制基坑变形量,在炭滤池基坑悬臂支护结构中加一道临时钢支撑,目的控制基坑变形。按单排桩双跨连续梁建模计算,连续梁设计(活性炭滤池基坑围护桩悬臂):

根据该工程基坑围护计算结果,基坑顶圈梁最大支撑反力为 200 kN/m。

活性炭滤池基坑西侧围护桩桩径 $\phi 700$ mm,桩间距 900 mm,按连续梁计算,取梁截面 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ (面积约等于 $\phi 700$ mm 桩),取梁跨为 3 m+2 m。

荷载:取梁端以下 1 m 集中力 200 kN,取基坑围护计算结果中的水土压力和施工荷载 20 kPa 产生的水平力,梁顶端为 0 kN,梁底端为 65 kN。为减少增设钢支撑处的支座反力,取支座为弹性铰支座,支座刚度 300 MN/m,梁(基坑顶)顶端位移控制在 30 mm 以下。计算简图如图 8 所示。

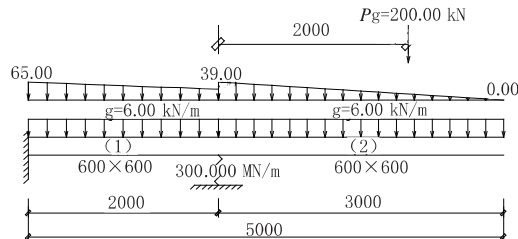


图 8 几何尺寸及荷载标准值简图(单位:mm)

计算结果表明,结构安全,符合设计与规范要求,具体计算过程不再赘述。

(2) 钢连续梁计算(加设双拼 H 型钢围檩)

单根 H 型钢荷载标准值取上述连续梁计算结果中支座反力的一半:615/2/1.27=242 kN/m。

计算结果见表 1~ 表 4。

表 1 端部 H 型钢围檩计算结果

跨号	部位单位	左	中	右
1	上部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	131.483 9	525.935 6
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	剪力 /kN	0.000 0	-284.289 5	-568.579 0
2	上部弯矩 /(kN·m)	525.935 7	1.529 0	101.214 6
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	34.586 1	0.000 0
	剪力 /kN	586.984 4	149.025 0	-288.934 5
3	上部弯矩 /(kN·m)	101.214 6	0.000 0	158.918 9
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	110.814 1	0.000 0
	剪力 /kN	361.093 3	-23.081 7	-407.256 7
4	上部弯矩 /(kN·m)	158.918 9	0.000 0	123.550 7
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	45.125 5	0.000 0
	剪力 /kN	354.150 4	16.076 4	-321.997 5
5	上部弯矩 /(kN·m)	123.550 7	0.000 0	203.075 0
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	78.440 8	0.000 0
	剪力 /kN	352.365 3	-31.809 7	-415.984 6
6	上部弯矩 /(kN·m)	203.075 0	0.000 0	24.586 9
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	58.278 7	0.000 0
	剪力 /kN	455.570 3	71.395 3	-312.779 7
7	上部弯矩 /(kN·m)	24.587 1	6.146 7	0.000 0
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	0.000 0	0.000 1
	剪力 /kN	122.936 5	61.468 5	0.000 6

表 2 端部 H 型钢围檩各跨最大应力

跨号	正应力(上侧)/(N·mm ⁻²)	正应力(下侧)/(N·mm ⁻²)
1	150.73	0.00
2	150.73	9.91
3	39.82	31.76
4	45.55	12.93
5	52.35	22.48
6	58.2	38.55
7	7.05	0.00

(3)支撑压弯构件强度与稳定计算(加设的钢管支撑)

单根钢管支撑荷载标准值取上述钢连续梁计算结果中最大支座反力的两倍 1 140.2×2/1.27=1 795.6≈1 800 kN。钢管支撑计算长度取最大长度 14 m。

按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012),通过计算,构件稳定、强度均满足要求。

绕 X 轴弯曲:

长细比:λ_x = 66.75;

轴心受压构件截面分类(按受压特性): b 类;

轴心受压整体稳定系数: φ_x=0.770;

最小稳定性安全系数: 2.16;

最大稳定性安全系数: 2.16;

最小稳定性安全系数对应的截面到构件顶端的距离: 0.000 m;

表 3 中间 H 型钢围檩计算结果

跨号	部位	左	中	右
1	上部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	6.146 8	24.587 3
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	剪力 /kN	-0.000 1	-61.468 1	-122.936 1
2	上部弯矩 /(kN·m)	24.587 3	0.000 0	286.978 7
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	159.693 2	0.000 0
	剪力 /kN	336.564 8	-93.711 2	-523.987 2
3	上部弯矩 /(kN·m)	286.978 7	0.000 0	317.418 9
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	175.271 0	0.000 0
	剪力 /kN	550.322 6	-8.953 0	-531.431 0
4	上部弯矩 /(kN·m)	317.418 9	0.000 0	273.747 3
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	175.271 0	0.000 0
	剪力 /kN	550.322 6	12.477 7	-525.367 2
5	上部弯矩 /(kN·m)	273.747 3	0.000 0	150.286 0
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	92.333 0	0.000 0
	剪力 /kN	474.369 4	44.093 3	-386.182 7
6	上部弯矩 /(kN·m)	150.286 0	0.000 0	150.286 1
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	58.278 7	0.000 0
	剪力 /kN	358.051 1	-0.000 0	-358.051 1
7	上部弯矩 /(kN·m)	150.286 1	0.000 0	273.747 3
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	92.311 7	0.000 0
	剪力 /kN	386.182 8	-44.093 3	474.369 3
8	上部弯矩 /(kN·m)	273.747 3	0.000 0	317.418 8
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	175.267 4	0.000 0
	剪力 /kN	525.367 4	-12.477 5	-550.322 4
9	上部弯矩 /(kN·m)	317.418 8	0.000 0	286.978 7
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	142.025 1	0.000 0
	剪力 /kN	531.430 8	8.952 9	-513.525 0
10	上部弯矩 /(kN·m)	286.978 7	0.000 0	24.586 9
	下部弯矩 /(kN·m)	0.0000	159.662 1	0.000 0
	剪力 /kN	523.987 3	93.711 4	-336.564 5
11	上部弯矩 /(kN·m)	24.586 9	6.146 7	0.000 0
	下部弯矩 /(kN·m)	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	剪力 /kN	122.936 0	61.468 1	0.000 2

表 4 中间 H 型钢围檩各跨最大应力

跨号	正应力(上侧) / (N·mm ⁻²)	正应力(下侧) / (N·mm ⁻²)	剪应力 / (N·mm ⁻²)
1	7.05	0.00	25.62
2	82.25	525.367 4	-12.477 5
3	90.97	40.69	110.73
4	83.20	50.23	111.46
5	78.46	26.46	109.47
6	43.07	16.69	80.47

最大稳定性安全系数对应的截面到构件顶端的距离:0.000 m。

绕 X 轴最不利位置稳定应力按《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)公式 5.1.2-1。

$$\frac{N}{\phi_x A} = \frac{2\ 286\ 000}{0.770 \times 29\ 807} = 99.605\ 5\ \text{N/mm}^2 \quad (1)$$

式中: N 为钢管所受轴力, kN; φ_x 为轴心受压整体稳定系数; A 为截面积, mm。

绕 Y 轴弯曲:
长细比: $\lambda_y=66.75$ 。
轴心受压构件截面分类(按受压特性): b 类。
轴心受压整体稳定系数: $\phi_y=0.770$ 。
最小稳定性安全系数: 2.16。
最大稳定性安全系数: 2.16。
最小稳定性安全系数对应的截面到构件顶端的距离: 0.000 m。

最大稳定性安全系数对应的截面到构件顶端的距离: 0.000 m。

绕 X 轴最不利位置稳定应力按《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)公式 5.1.2-1。

$$\frac{N}{\phi_y A} = \frac{2\,286\,000}{0.770 \times 29\,807} = 99.605\,5\text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

式中: N 为钢管所受轴力, kN; ϕ_y 为稳定系数; A 为截面积, mm^2 。

强度信息:
最大强度安全系数: 2.80。
最小强度安全系数: 2.80。
最大强度安全系数对应的截面到构件顶端的距离: 0.000 m。
最小强度安全系数对应的截面到构件顶端的距离: 0.000 m。

计算荷载: 2 286.00 kN。
受力状态:轴压。
最不利位置强度应力按《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)公式 5.1.1-1。

$$\frac{N}{A_n} = \frac{2\,286\,000}{29\,807} = 76.692\,3\text{ N/mm}^2 \quad (3)$$

式中: N 为钢管所受轴力, kN; A 为截面积, mm^2 。

3 施工与后期监测

基坑围护施工严格按照优化后的方案,围绕炭滤池施工这一关键工序全面展开。在增加下部支撑、调整工序以及压密注浆等措施后,回收水池顶板混凝土于 2021 年 3 月 28 日完成混凝土浇筑,比原计划提前了 60 d。提升泵房基础于 2021 年 2 月 2 日完成混凝土浇筑,比原计划提前了 50 d。

同时,施工期间请有资质的监测单位开展了沉降、位移等监测,如图 9 所示,监测内容为:围护结构墙顶位移、立柱垂直位移、地表沉降、坑外土体深层水平位移、围护墙深层水平位移、坑外潜水水位、支撑轴力、周边环境监测等。表 5、表 6、表 7 为设置钢支撑 1 周后的典型日报数据,从监测数据分析看,日

变化量数据及累计位移数据均在设计允许范围内,未发生报警,且符合基坑围护变形的一般规律:围护结构的水平位移随着深度增加而增大,到一定深度又逐渐减小;并随着时间增加逐渐变小,最终趋于稳定。

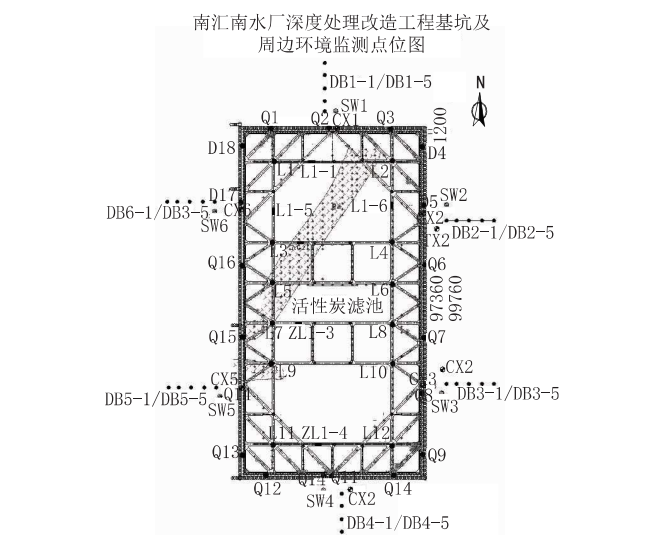
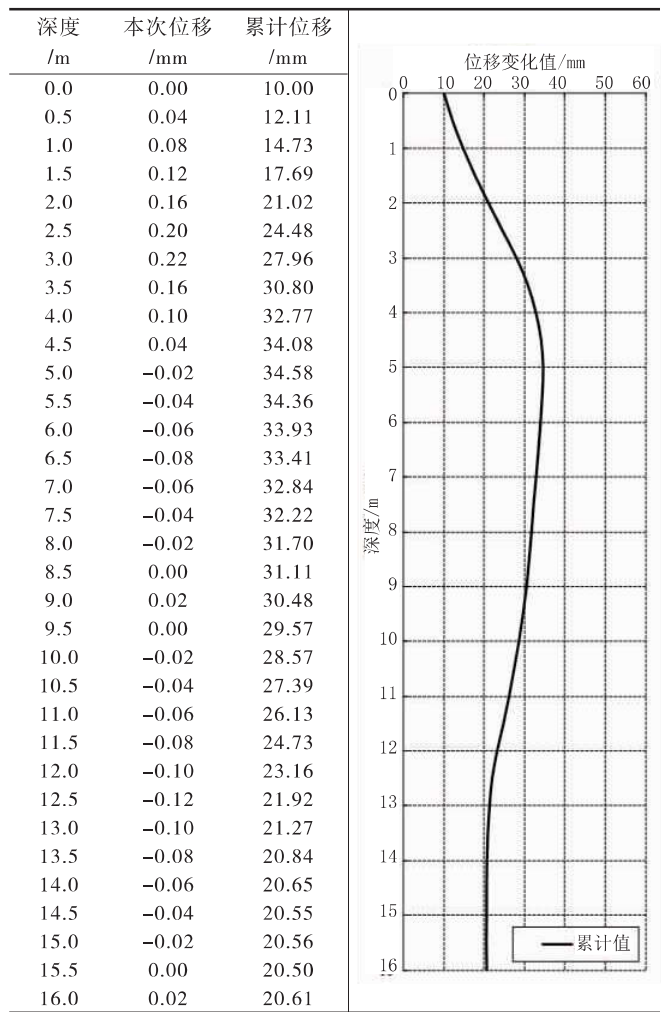


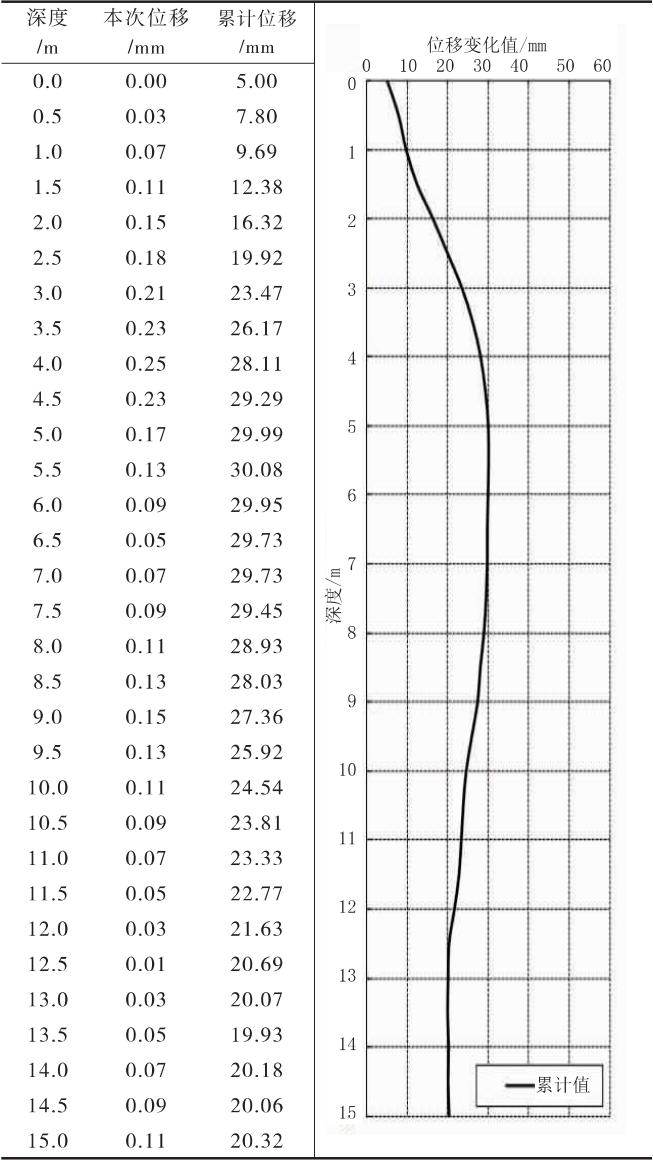
图 9 碳滤池监测点平面布置图

表 5 CX5 墙体侧向水平位移



注:1.正值表示向基坑内侧方向位移;负值表示向基坑外侧方向位移。
2.日变量超过 5 mm,累计超过 40 mm。

表6 CX6墙体侧向水平位移



注:1.正值表示向基坑内侧方向位移;负值表示向基坑外侧方向位移。
2.日变量超过5 mm,累计超过40 mm。

4 结 语

该工程调整的围护结构所涉及到的钢支撑施工,围护体系中间土体加固,支撑的同步拆除,相邻结构的同步实施等。确保了工程得以按调整的计划

表7 围护桩顶监测报表

垂直位移				水平位移			
点号	本次变 量 /mm	累计变 量 /mm	变化速率 / (mm·d ⁻¹)	点号	本次变 量 /mm	累计变 量 /mm	变化速率 / (mm·d ⁻¹)
Q1	-0.19	-5.27	-0.05	Q1	0.0	5.0	0.0
Q2	0.28	-3.38	0.07	Q2	0.0	6.0	0.0
Q3	0.16	-9.38	0.04	Q3	0.0	5.0	0.0
Q4	0.15	-3.81	0.04	Q4	0.0	7.0	0.0
Q5	0.19	-8.88	0.05	Q5	0.0	10.0	0.0
Q6	-0.20	-7.76	-0.05	Q6	0.0	9.0	0.0
Q7	0.26	-3.35	0.06	Q7	0.0	5.0	1.0
Q8	-0.01	-4.91	0.00	Q8	0.0	5.0	1.0
Q9	-0.35	-5.49	-0.09	Q9	0.0	4.0	0.0
Q10	-0.12	-4.02	-0.03	Q10	0.0	8.0	1.0
Q11	-0.33	-4.43	-0.08	Q11	0.0	8.0	1.0
Q12	0.02	-3.66	0.01	Q12	0.0	7.0	1.0
Q13	0.05	-2.22	0.01	Q13	0.0	4.0	1.0
Q14	-0.30	-3.72	-0.08	Q14	0.0	5.0	1.0
Q15	0.19	-5.07	0.05	Q15	0.0	5.0	1.0
Q16	-0.11	-0.96	-0.03	Q16	0.0	9.0	0.0
Q17	0.11	-3.15	0.03	Q17	0.0	7.0	0.0
Q18	0.02	-6.31	0.01	Q18	0.0	7.0	0.0

注:1.Q表示围护桩顶监测点。
2.沉降监测负数表示测点下沉,正数则反之。水平位移数据负数表示基坑外侧位移,正数则反之。

有序开展,工程质量、安全、工期得到了保证,为通水节点目标的实现创造了先决条件。

参考文献:

[1] 王振平.谈深基坑工程的发展历程[J].呼伦贝尔学院学报,21(3):110-111.
[2] JGJ 120—2012,建筑基坑支护技术规程[S].
[3] 崔可荣.压密注浆在建筑物地基加固中的应用研究[D].天津:天津大学,2005.
[4] 池文忠,吕秋生.深基坑工程的换撑施工技术[J].浙江建筑业,2010(2):32-36.