

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.07.070

软土超深基坑开挖对紧邻结构影响分析

南文文

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 海市北横通道筛网厂盾构工作井及相邻暗埋段基坑位于典型软土地层, 基坑深达 32.5 m, 坑边 6.7 m 处存在一栋五层商业建筑物, 基坑开挖及回筑过程须确保建筑物结构安全。以该基坑为例, 针对建筑物健康状况、保护要求、地质条件及周边环境, 采取针对性措施, 降低基坑开挖对紧邻建筑物影响。介绍了基坑设计方案, 同时对照基坑监测结果, 验证方案有效性, 研究了超深基坑开挖对周边土体及紧邻建构筑物影响规律, 提出了包括坑内外土体加固、增设临时钢支撑等在内的增加坑边建构筑物安全性的有效措施, 结论可供同类工程参考借鉴。

关键词: 超深基坑; 建筑保护; 环境影响; 基坑变形控制

中图分类号: TU753

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)07-0298-06

0 引 言

近年来, 城市地下道路、轨道交通等大型基础设施工程规模更大, 基坑深度更深, 市区施工周边环境更为复杂, 经常面临基坑周边存在建构筑物需要保护的工况, 以上海北横通道为例, 北横通道全长约 19.6 km, 主要为盾构隧道段, 全线共设置 7 座工作井, 深度均为 30 m 左右, 均为超深基坑且位于上海市核心区, 基坑开挖过程中须保护的周边建构筑物众多, 北横通道工作井概况见表 1。

表 1 上海市北横通道工作井概况表

工作井 编号	基坑 深度 /m	平面尺寸 / (m × m)	主要保护建构筑物
①	28.3	25.4 × 24.4	苏州河防汛墙、上海跨国采购会展中心、泸定泵站、化工研究院
②	30.9	70 × 25~34	御花园酒店、兆丰别墅
③	32.5	27.9 × 27.8	五层商业建筑、玉佛城
④	29.9	72.4 × 22.4~32.4	舟山渔村、九龙宾馆、超高压电力管等
⑤	31.5	72.4 × 22.4~32.9	两港截流管、安国路 287 弄老旧小区、大中华宾馆
⑥	30.5	72.4 × 22.4~32.9	杨浦小企业园区、1 000 给水管
⑦	26.9	23×22	别克 4S 店、宜必思酒店、1 000 给水管

国内关于软土地层超深基坑开挖过程中围护结构及周边环境变形和环境影响的研究还相对较少, 研究案例中基坑深度约 20 m, 较少涉及 30 m 以上

超深基坑案例。丁克胜等根据天津地区某工程实例, 就土压力和墙体侧移的关系进行研究, 分析了不同深度下土压力及墙体侧移情况, 与理论值进行对比研究^[1]; 江晓峰等根据上海市多个超过 19 m 的超深基坑监测数据, 分析了基坑围护结构水平位移和墙后地表沉降规律^[2]; 李彦东等结合离心模型试验设计方案和三维有限元数值模拟, 分析了上海某紧邻地铁超深基坑的变形特性^[3]; 沈雯等采用实测数据分析的方法研究了某超深基坑开挖对临近地铁站及区间的影响, 指出基坑施工期间车站和区间盾构变形规律^[4]。

超深基坑开挖过程中, 周边建构筑物会随基坑开挖发生一定程度的沉降、倾斜, 如果变形过大, 轻则产生较大裂缝或倾斜影响建构筑物的正常使用, 重则发生坍塌等灾害, 严重影响人员及财产安全。软土地区相对普通地质条件而言, 基坑开挖时, 地基土变形程度更大, 引起的安全隐患也更为严重, 采取有针对性的措施, 减小开挖过程中周边建构筑物的沉降及倾斜, 意义重大。

本文以上海北横通道筛网厂盾构工作井及相邻暗埋段基坑为例, 介绍基坑设计方案, 同时结合开挖过程的实测数据分析, 研究软土地区超深基坑开挖对周边紧邻建构筑物的影响, 供同类工程参考借鉴。

1 概况

1.1 工程概况

本文基坑位于上海市市区靠近苏州河, 由工作井基坑和相邻的暗埋段基坑组成, 整体呈“凸”字形, 其中工作井为地下 5 层结构, 底板埋深约 32.5 m, 东西

收稿日期: 2022-12-13

作者简介: 南文文(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事隧道结构设计工作。

向长度 27.9 m,南北向长度 27.8 m;工作井东侧相邻暗埋段长度约 21.3 m,结构形式为地下 4 层箱涵结构,基坑深度为 25~26 m,宽度为 13 m。基坑南侧存在一 5 层商业建筑,基坑平面布置及周边环境见图 1。

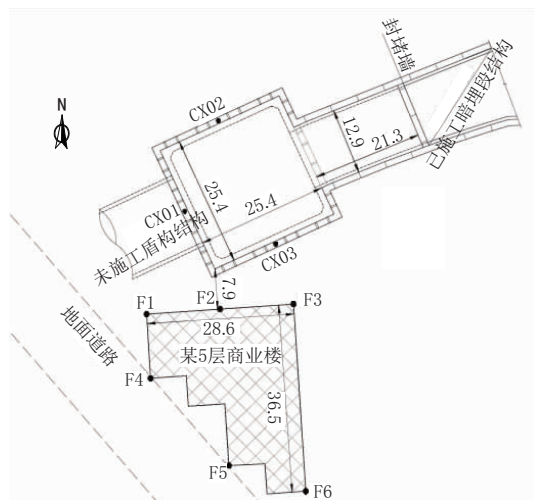


图 1 环境平面图

本段基坑与相邻基坑实施顺序为:先施工基坑东侧暗埋段基坑,待该段隧道主体结构完成并覆土,再施工工作井及相邻暗埋段也即本基坑。坑边建筑物在基坑实施前进行健康检测,基坑开挖及回筑过程中不投入商业运营,待隧道结构回筑完成,经健康检测及加固后再投入运营。

1.2 坑边结构概况

工作井南侧存在一 5 层商业建筑,基坑实施时,须对该建筑物进行保护,建筑物距离基坑仅 7.9 m,远小于 1 倍基坑深度,基坑开挖时应予以重点监测和保护。

建筑物为 5 层框架结构,平面形式不规则,纵向 6 跨,跨度 6 m,横向 4 跨,跨度 7 m;东西向总长为 28.24 m,南北向总长为 36.24 m。房屋一层层高为 5.00 m,二至四层层高均为 4.30 m,五层层高为 4.5 m。墙体主要采用砖、砂浆砌筑,楼面及屋面为钢筋混凝土现浇板,房屋基础采用柱下独立基础,基础埋深 1.5 m 左右。建筑平面布置图及南立面见图 2、图 3。

根据房屋检测报告,房屋南北向上最大倾斜率为向北 2.5‰,东西方向上最大倾斜率为向西 2.0‰,未超出相关规范^[5]规定的危险限制(10‰)。房屋结构基本完好,仅局部墙体及阳台顶板存在细微裂缝。

1.3 水文地质条件

本基坑位于上海市普陀区靠近苏州河,沿线地形较平坦,本基坑整平地面标高(吴淞高程,后同)为 3.8 m,按上海地貌单元分区图,属滨海平原地貌类

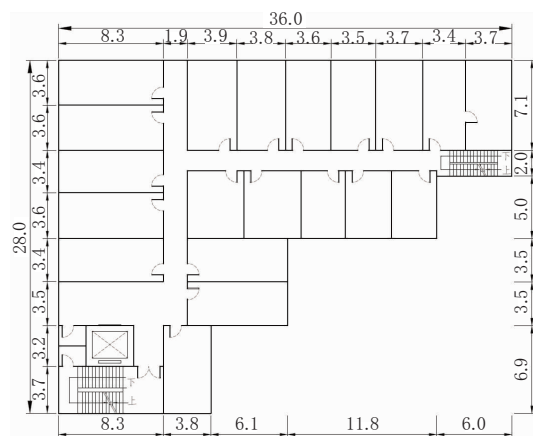


图 2 建筑物平面布置图(单位:m)



图 3 建筑物南立面

型。基坑位于正常沉积区,场地内分布的土层自上而下可划分为九大层及若干亚层,各土层工程特性及分布特征自上而下如下:

①₁ 填土,层顶底标高 3.8~0.5,为松散的杂填土,含砖块、碎石,结构松散,均匀性较差。

②₃ 黄~灰色砂质粉土,层顶底标高 0.5~-6.9,松散~稍密,含云母,夹黏性土,土质不均。

④ 灰色淤泥质黏土,层顶底标高 -6.9~-13,流塑,夹薄层粉砂,含有机质。

⑤₁ 灰色粉质黏土,层顶底标高 -13~-21.7,软塑~流塑,含有机质、腐植物、钙结核。

⑥ 暗绿色粉质黏土,层顶底标高 -21.7~-25.4,可塑~硬塑,含氧化铁斑点、铁锰质结核。

⑦₁ 草黄~灰色粉砂,层顶底标高 -25.4~-31.5,中密,含云母,夹薄层黏土。

⑦₂ 草黄~灰色粉细砂,层顶底标高 -31.5~-39.8,密实,含石英、长石、云母等矿物,土质较均匀致密。

⑧₁₋₁ 灰色黏土,层顶底标高 -39.8~-55,软塑~可塑,夹薄层粉砂,含有机质。

⑧₁₋₂ 灰色粉质黏土夹粉砂,层顶底标高 -55~-62.5,软塑~可塑,含云母、腐植物,具交错层理,局

部夹粉砂较多,土质不均。

⑧₂ 灰色粉砂与粉质黏土互层,层顶底标高 -62.5~-66.9,密实,含云母、腐植物,具交错层理,黏性土与砂互层,呈千层饼状,局部以黏性土为主。

⑨ 灰色粉细砂,未揭穿,密实,由云母、石英、长石细等颗粒组成,土质较均匀。

影响本工程的承压(微承压)水主要为赋存于⑦层、⑧₂ 及⑨层。根据实测结果,承压水水头埋深约 6~9 m。方案设计按埋深 3 m 计算,本段工作井抗⑦层、⑧₂ 层、⑨层承压水稳定性不满足要求,基坑开挖到相应深度后须按需降承压水。土层物理力学指标见表 2。

表 2 土层主要物理力学指标

岩土名称	含水量 $\omega_0 / \%$	重度 $\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	压缩模量 E_s / MPa
① ₂ 杂填土	—	—	—	—	—
④ ₁ 粉质黏土	26.4	18.9	443	18.3	8.0
④ ₂ 粉质黏土夹 黏质粉土	30.9	18.4	20.1	13.6	7.5
⑤ ₁ 淤泥质 粉质黏土	41.6	17.5	15.2	5.9	4.0
⑥ 粉质黏土	26.1	19.1	47.6	19.1	9.0
⑦ 粉质黏土	30.7	18.5	23.8	11.8	5.0
⑧ ₁ 粉质黏土夹 粉砂	24.9	19.4	15.6	15.2	7.5
⑧ ₃ 圆砾	—	—	—	—	45.0

1.4 环境保护要求

保护建筑物距离基坑仅 7.9 m,小于 1 倍基坑深度(32.5 m),因此基坑西侧及南侧环境保护等级为一级,按照规范^[6]要求,酒店所在位置地面最大沉降量不大于 0.15% H ,围护墙最大水平位移不大于 0.18% H (H 为基坑深度)。

2 基坑支护方案

2.1 围护结构方案

工作井基坑深 32.5 m,除高低坑以外区域围护采用 1 200 mm 地墙,经基坑稳定性计算,围护墙入土深度约 34.5 m,插入比 1:1.06。工作井与暗埋段衔接处基坑高差约 6.5 m,围护采用 1 000 厚地墙(兼做后期挡水墙),经稳定性计算,地墙插入深度 6.5 m,插入比 1:1。暗埋段基坑深度 26.0 m,围护采用 1 200 mm 地墙,经稳定性验算,地墙插入深度 18.0 m,插入比 1:0.7。

2.2 支撑方案

工作井深度大,且为开口矩形,采用刚度及稳定

性较大的混凝土支撑型式,根据计算、工程类比^[7],采用 6 道支撑,为便于内部结构施工和减少支撑拆除量,第一、三道围檩与顶中框架结合,围护施工阶段作为围檩使用,主体结构实施时作为结构框架永久保留。

暗埋段基坑深度大,采用混凝土和钢支撑相结合的支撑型式,根据计算采用 7 道支撑,全部支撑和围檩均为临时结构,主体结构回筑时拆除。

工作井和暗埋段支撑、围檩信息见表 3,支撑平面及纵断面布置见图 4~图 6,基坑围护横断面布置见图 7。

表 3 支撑、围檩信息 单位:mm

支撑道数	工作井		暗埋段	
	围檩	支撑	围檩	支撑
第一道支撑	2 200 × 1 200	800 × 800	1 400 × 900	800 × 800
第二道支撑	1 400 × 900	1 000 × 800	—	φ609 × 16 钢管
第三道支撑	3 200 × 1 500	1 300 × 1 100	1 400 × 1 200	1 000 × 1 000
第四道支撑	1 900 × 1 200	1 300 × 1 100	—	φ800 × 16 钢管
第五道支撑	2 000 × 1 300	1 400 × 1 200	—	φ609 × 16 钢管
第六道支撑	1 900 × 1 200	1 300 × 1 100	1 400 × 1 200	1 000 × 1 000
第七道支撑	—	—	—	φ609 × 16 钢管

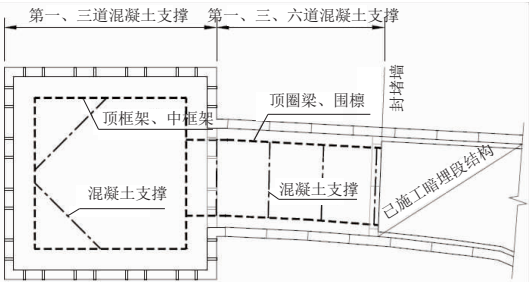


图 4 支撑平面布置图一

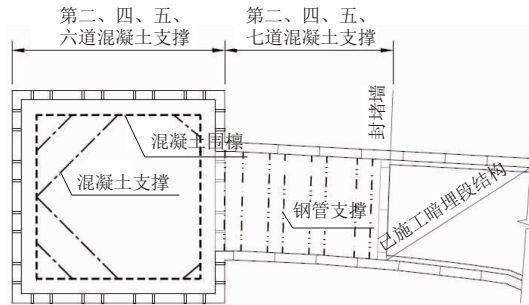


图 5 支撑平面布置图二

2.3 加固方案

根据相关工程实例和有限元分析结果^[8,9],基坑加固及空间效应对围护结构变形有显著影响。为减

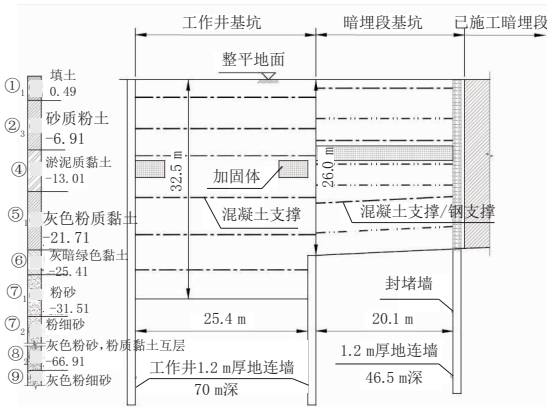


图 6 支撑纵断面布置图

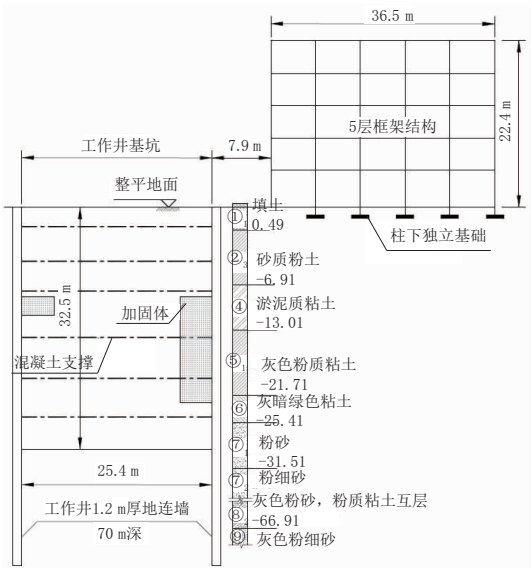


图 7 围护横断面布置图

小基坑开挖过程中地墙侧向变形,提高基坑稳定性,工作井及暗埋段基坑采用坑内加固,主要加固范围为层淤泥质土,同时为控制坑边建构筑物变形,建筑物侧基坑坑内加固深度加大至第 1 层土层底。坑内加固采用高压旋喷桩 $\Phi 1\ 000@700$,水泥掺量 25%,加固体 28 d 无侧限抗压强度大于 1.0 MPa。

场地内砂质粉土较厚,地墙成槽难度较大,为减小地墙施工开槽对周边环境的影响,同时为提高槽壁稳定性,地墙两侧采用槽壁加固:设计要求施工单位在砂质粉土范围采用槽壁加固,槽壁加固采用 $\Phi 850@600$,搭接 250 mm,深度为地面至砂质粉土底下 1 m。加固平面布置见图 8。

2.4 降水及承压水控制方案

根据场地内勘察成果,潜水埋深一般为 0.3~1.5 m,承压(微承压)水主要为赋存于⑦层、⑧₂及⑨层中的承压水(大部分地段⑧₂及⑨层连通)。本基坑围护墙较深,潜水及第层中承压水主要通过围护墙隔断后疏干处理,但由于第⑧₂及⑨层土中的承压含水层很

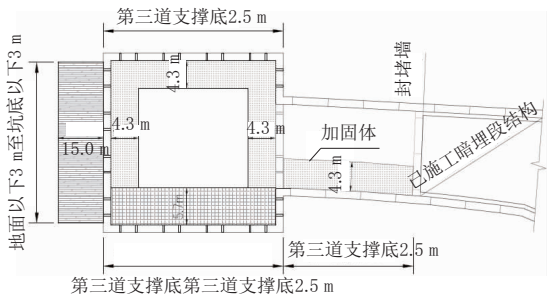


图 8 加固平面布置图

深(大于 80 m),难以隔断,采用悬挂止水帷幕。

- (1)根据计算,基坑开挖深度达到 26.0 m 后,需要降第⑧₂层承压水;
- (2)工作井底板封闭后,可以停止降压;
- (3)基坑实施前进行降水试验,通过试降水检验地墙的隔水效果,必要时在墙缝外侧旋喷止水;
- (4)降水方案按“适时、适量”的原则,按需抽取承压水,并加强观测,避免过度抽取对周边环境造成不利影响。

3 基坑施工过程监测数据分析

3.1 监测方案及原则

本基坑开挖过程中,为保证基坑及周边建构筑物安全,及时掌握基坑、构筑物变形及稳定情况,减少安全隐患。根据相关规定制定了监测方案,主要监测内容有:

- (1)围护墙变形;
- (2)保护建构筑物竖向沉降、倾斜;
- (3)地下水位变化;
- (4)支撑、围檩、立柱等变形及受力监测。

基坑围护墙布置 3 个测斜监测点 CX01~03,建构筑物布置 6 个沉降监测点 F1~6,测点布置见图 1。监测自基坑施工围护墙开始,自结构回筑完成并覆土后结束。

本文主要分析基坑开挖对周边建构筑物的影响,重点分析引起周边建构筑物变形的主要施工阶段,也即基坑开始开挖至开挖至坑底期间围护墙及保护建构筑物的变形。

基坑采用分层开挖的方案,主要的工序及时间见表 4。

3.2 监测结果

3.2.1 地墙水平位移

基坑开挖过程中,记录了每个工况结束后的地墙水平位移最大值,各测点监测结果见图 9;基坑开挖至坑底时,围护墙水平位移检测值见图 10;CX03

表 4 施工工序及内容

施工工序编号	天数	施工内容
0	0	基坑围护体施工
1	117	TRD 施工完成
2	195	第一道混凝土支撑施工完成
3	220	基坑开挖
4	233	第二道混凝土支撑施工完成
5	258	第三道混凝土支撑施工完成
6	282	第四道混凝土支撑施工完成
7	355	第五道混凝土支撑施工完成
8	389	第六道混凝土支撑施工完成
9	400	垫层浇筑完成
10	409	底板浇筑完成
11	501	结构回筑完成

测点从工况 3- 工况 11 的水平位移见图 11。

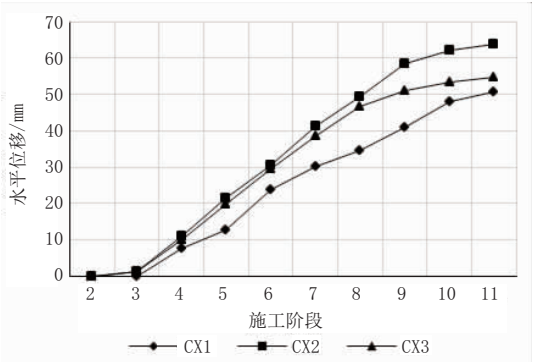


图 9 地墙侧向最大水平位移监测结果(单位:mm)

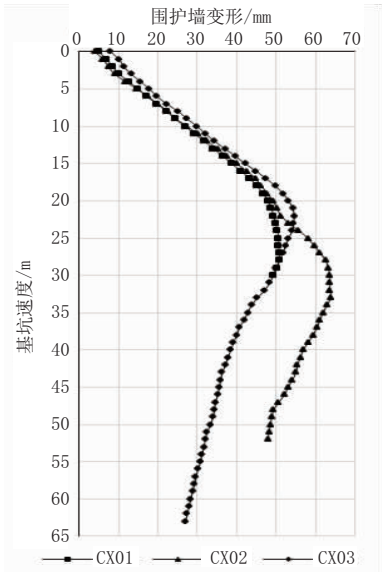


图 10 地墙侧向水平位移监测结果(结构回筑完成)(单位:mm)

3.2.2 建筑物沉降监测结果

随基坑开挖,建筑物周边布置的测点沉降随基坑开挖工况变化的结果见图 12;沿远离基坑的方向,F2、F4、F5、F5 四个测点随开挖工况变化见图 13。

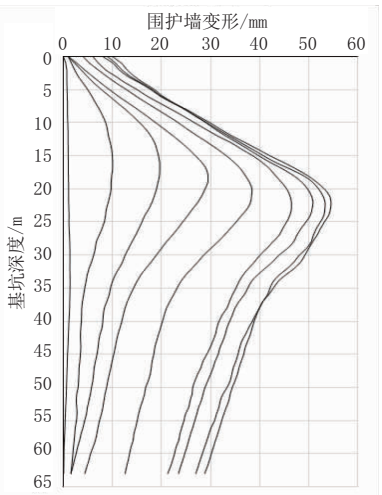


图 11 CX03 测点侧向水平位移监测结果(单位:mm)

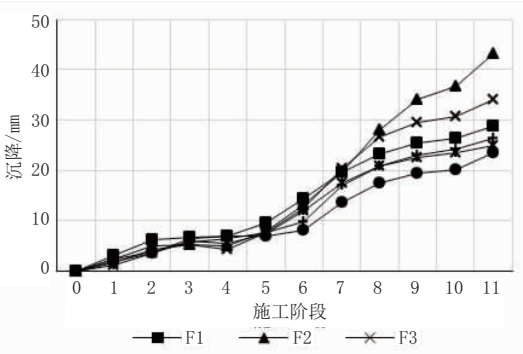


图 12 建筑物沉降监测结果一(单位:mm)

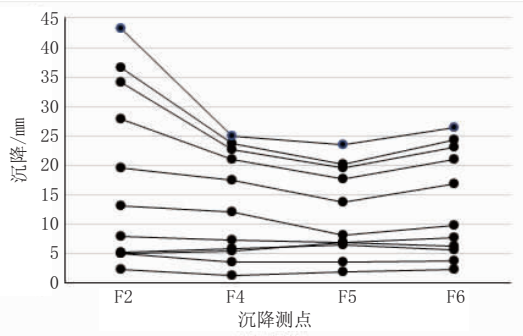


图 13 建筑物沉降监测结果二(单位:mm)

3.3 实测结果分析

随基坑开挖,地墙水平位移呈接近线性增大的趋势,底板浇筑完成后围护墙水平位移趋于稳定,结构回筑阶段变化较小,底板完成时围护变形量占总变形量的 98%,施工过程中应重点关注基坑开挖至坑底的过程。

由于盾构进出洞加固的作用,CX01 测点围护水平变形最小;因 CX03 测点围护内侧设置坑内加固,CX03 测点较 CX02 测点水平变形小,CX02 测点水平变形最大;坑内及坑外加固对控制围护墙水平变形有较为显著的效果。

3 个测点围护墙最大变形深度均位于每个开挖工况的坑底附近,平均最大变形量为 54.51 mm,约

为基坑深度 0.17%,满足相关标准的要求,基坑设计方案达到变形控制目标。

建筑物最大沉降点发生在距离基坑最近的 F2 测点处,最大沉降量为 43.23 mm,最小沉降点发生在建筑物距离基坑最远端,最小沉降量为 23.44 mm,平均沉降量为 27 mm,超过设计要求值。

建筑物随基坑开挖过程持续沉降,基坑开挖至坑底后,围护结构变形趋于稳定,但建筑物持续沉降直至结构回筑完成,可见基坑周边土体变形是持续且缓慢达到稳定状态。

建筑物沉降变形受测点和基坑距离影响较为敏感,尤其是 0.5 倍基坑深度范围内,F2 测点沉降值较 F4~F6 平均值大 73%。

地墙水平位移变形随基坑开挖深度呈接近线性增大的趋势,但建筑物各沉降观测点在围护墙施工期间及基坑开挖至 10 m (约为建筑物与基坑之间间距)以下时沉降速度较大;表明基坑周边受影响最大的范围约为 1 倍基坑深度范围内。围护结构及加固实施期间的沉降约占建筑物总沉降量的 22%。

围护墙及加固实施期间,建构筑物均较为明显的沉降,且各测点沉降比较均匀;基坑开挖至第三道支撑以下后,靠近基坑的测点明显较远离基坑的测点沉降明显;因此,围护墙及加固实施对周边环境的影响应加强关注。

基坑开挖至第三道支撑后,建筑物沉降速度明显加快,是基坑设计施工中应重点关注的阶段。

4 结 论

本文以上海市某明挖法隧道基坑为例,根据基坑开挖过程中的实测数据分析了软土环境超深基坑开挖对坑边建筑物的影响,同时还分析了基坑本身以及开挖对基坑周边土体的影响。结果表明:

(1)基坑开挖及回筑过程中,围护墙变形主要在基坑开挖至基坑阶段发展,底板浇筑完成后,围护变形趋于稳定;周边建构筑物的沉降在基坑开挖及回

筑过程中都有明显发展;

(2)基坑坑内加固可以显著地降低围护墙的水平变形,可在软弱土层设置加固体,降低对周边环境的影响;

(3)混凝土支撑刚度形成周期较长,软弱土层处施工时,可设置临时钢支撑,降低支撑施工期间围护墙水平变形;

(4)基坑周边 1 倍基坑深度范围内的建构筑物在基坑开挖过程中会受到明显地影响,软土地质条件下,浅基础沉降控制难度较大,应根据基坑及建筑物型式,采取坑内外加固、增设临时钢支撑等措施减小影响;

(5)围护墙和加固施工对周边环境有明显影响,同时具有影响范围大的特点,应采用先进的技术设备、高效的施工管理,降低环境影响。

软土地区基坑开挖周边环境的影响范围大,周边建构筑物沉降控制难度大,除技术手段外,应采用相关管理手段,降低可能的灾害风险,确保人员及重要财产安全。

参考文献:

- [1] 丁克胜,张宜佳.天津地区超深基坑地下连续墙侧向变形与土压力关系研究[J].岩土工程学报,2008,30(1):9-11.
- [2] 江晓峰,刘国彬,张伟立,等.基于实测数据的上海地区超深基坑变形特性研究[J].岩土工程学报,2010,32(2):570-573.
- [3] 李彦东,梁发云,褚峰.软土地区深基坑变形特性三维数值模拟与验证[J].地下空间与工程学报,2011,7(6):1072-1120.
- [4] 沈雯,沈蓉,孙廉威.超深基坑分区开挖对侧方地铁影响的实测分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(1):354-360.
- [5] JGJ 125—2016,危险房屋鉴定标准[S].
- [6] DGTJ 08-61—2018,基坑工程技术标准[S].
- [7] 程琪,刘国彬,张伟立.上海地区地铁超深基坑及深基坑变形有限元分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(2):1497-1502.
- [8] 吴旭君,郑平,赵伟,等.滨海地区软土地层超深基坑支护设计实例[J].岩土工程学报,2010,32(1):388-391.
- [9] 胡展飞,周健,杨林德.深基坑基底软土稳定性研究[J].土木工程学报,2001,34(2):84-88.