

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.06.39

# 上海某深基坑开挖变形及对环境影响监测研究

归浩杰

(上海地矿工程勘察有限公司, 上海 200072)

**摘要:** 结合大量现场实测数据,通过对基坑开挖过程中围护墙体测斜、周边地表沉降以及围护墙顶变形进行了监测。监测结果显示:在开挖过程中围护墙体的整体变形形状呈中间大、两头小,随着基坑开挖深度的不断增加,围护墙体变形不断增大,且变形呈现持续、缓慢的变化态势;周边地表沉降监测点累计垂直变化基本呈现下沉,虽然有部分地表沉降监测点有累计下沉量超出报警值范围而报警的情况发生,但从地表沉降监测点的沉降变化曲线看,沉降呈现持续、缓慢的变化态势,未见突变情况发生,沉降变化曲线较平稳;围护墙顶垂直方向沉降呈现持续、缓慢的变化态势,沉降变化曲线较平稳,水平方向围护墙顶监测点的累计平面位移基本呈现向基坑内侧位移,且各监测点水平位移变化范围在0~+9 mm之间。结论对在密集建筑群中软土地基上基坑设计和开挖具有一定的实用价值和借鉴意义。

**关键词:** 深基坑开挖;变形监测;地表沉降;围护墙体侧斜;围护墙顶变形;街坊改造

中图分类号:TU473.2

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)06-0219-07

## Research on monitoring of the deformation of a deep foundation pit excavation and its impact on the environment in Shanghai

GUI Haojie

(Shanghai geological & mineral engineering investigation Co. Ltd., Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Based on a large number of field data, this paper monitors the deformation of the retaining wall during the excavation of the foundation pit, the settlement of the surrounding surface and the deformation of the wall roof. The monitoring results show that the overall deformation of the retaining wall during excavation is large in the middle and small in the two ends. With the increasing excavation depth of the foundation pit, the deformation of the wall is increasing and the monitoring hole shows a continuous and slow change trend. The cumulative vertical changes of the surface subsidence monitoring point basically show a sinking trend. Although there is a partial subsidence monitoring point where the accumulated subsidence amount exceeds the alarm value range and the alarm condition occurs, from the settlement curve of the surface subsidence monitoring point, the monitoring point shows a continuous and slow change trend, and no mutation occurs. And the sedimentation curve is stable. The vertical monitoring points of the roof are showing a continuous and slow change trend, and the sedimentation curve is smooth. The cumulative plane displacement of the monitoring points in the horizontal direction of the wall is basically displaced toward the inside of the foundation pit, and the horizontal displacement of each monitoring point ranges from 0 to +9mm. The conclusion is of practical value and provides reference for the design and excavation of foundation pit on soft soil foundation in intensive buildings.

**Key words:** deep foundation pit excavation; deformation monitoring; ground surface settlement; retaining wall deformation; deformation of the wall roof; neighborhood transformation

随着城市建设的不断发展,对高层建筑、大型市政设施及地下空间的开发建设大大增加。对于上海这样土地资源紧缺的城市,特别是中心城区,为了有

效利用土地,建筑物不断向高空、向地下发展,由此各种深大基坑也不断涌现。基坑开挖会造成周围土体的扰动,从而引起土体位移,导致邻近地下管线产

收稿日期:2017-06-08; 修回日期:2017-07-18

作者简介:归浩杰(1979-),男,上海人,大学本科,学士,工程师,主要从事岩土工程勘察与监测工作。

生程度不同的受力与位移,严重的甚至会引起管线的开裂破坏,这势必对邻近建筑物和地下管网的安全产生影响<sup>[1-2]</sup>。在上海地区出现了大量的深基坑工程,深基坑工程技术复杂,为了保障建筑基础的施工及周围已有建筑物的安全,必须对基坑变形以及周围的地表沉降等进行实时监测。使其在满足自身强度要求的基础上,尽可能控制对周边土体的扰动变形<sup>[3-4]</sup>。

深基坑开挖是一项复杂工程,在开挖的同时还要注意基坑支护结构和周围地表的变形,它关系到相邻建筑及各种管道的安全<sup>[5-6]</sup>。因此,当基坑周围环境复杂时,基坑设计稳定性问题仅是必要条件,大多数情况下的主要控制条件是变形,从而使基坑工程的设计从强度控制转向变形控制<sup>[7-8]</sup>。基坑的监测主要包括周边地表沉降监测、围护墙体测斜、围护墙顶变形监测、周围地下管线沉降监测等几个方面<sup>[9-10]</sup>。围护墙体测斜监测对基坑监测工程有着重要意义,测斜监测可以测量挡土墙及排桩变性后的形状和深度土体位移,监测土体是否有失稳预兆及现象<sup>[11-12]</sup>。测斜能够较全面地反映基坑状态,因此,测斜成为众多深大基坑施工监测工作中至关重要的一部分<sup>[13-15]</sup>。

本文主要结合上海市黄浦区109街坊改造基坑施工过程中的大量监测数据,总结了基坑开挖过程

中维护墙体和周边地表沉降的规律并试图分析其原因,提出了减小变形的措施,以期为类似工程的设计和施工提供借鉴。

## 1 工程概况及地质条件

### 1.1 工程概况和周边环境

工程工区位于上海市黄浦区凤阳路、六合路、西藏中路及芝罘路之间。本工程主体结构包括地上17层主楼,为酒店客房用、6层裙房,为餐饮服务及办公用、地下部分设计为6层,地下一、二层主要为商业用房,地下三~六层主要功能为设备机房及地下停车库。基坑平面大致呈梯形,南北向边长65~110 m,东西向边长约53 m,基坑周长286 m,面积约5 153 m<sup>2</sup>。西藏中路侧基坑开挖深度为23.30 m,其余三侧一般基坑开挖深度为22.90 m,坑边集水井等局部深坑深度约1.1~1.5 m,电梯井(基坑中部)深坑深度约2.3 m。

### 1.2 地质概况

1.2.1 工程地质概况 拟建场地位于上海市黄浦区,场地地貌形态单一,地势平坦,沿周边道路原状标高一般在2.33~2.75 m之间(绝对标高),地貌类型属滨海平原。本工程基坑开挖面位于第⑤<sub>1-1</sub>黏土层中。与基坑围护结构有关的土层情况见表1所示。

表1 土层物理力学性质参数

层序	地层名称	层底标高/m	层厚/m	状态
①	填土	0.33 (绝对标高)	2.35	由碎砖、碎石、混凝土石块及黏性土组成。
②	粉质黏土	-0.77	1.10	局部夹黏土,土质上硬下软,无摇震反应,土面光滑无光泽,干强度中~高等,韧性高等。
③	淤泥质粉质黏土	-6.40	5.65	含云母及少量有机质,局部夹黏质粉土,无摇震反应,土面光滑无光泽,干强度中~高等,韧性高等。
④	淤泥质黏土	-14.62	8.21	含云母,夹少量薄层粉砂及有机质,底部含贝壳屑,土质均匀,无摇震反应,有油脂光泽,干强度高,韧性高等。
⑤ <sub>1-1</sub>	黏土	-23.66	9.04	含钙质结核、腐植质,夹有机质,局部夹粉质黏土,有油脂光泽,无摇震反应,干强度高,韧性高等。
⑤ <sub>1-2</sub>	粉质黏土	-35.01	11.38	含腐植质及少量钙质结核,夹薄层粉砂,底部偶夹泥炭土,局部夹黏土,无摇震反应,土面光滑,无光泽,干强度中等,韧性高等。
⑥	粉质黏土	-37.18	2.13	含氧化铁质,少量腐植质及高岭土条纹,结构较好。无摇震反应,韧性中~高等,土面无光泽。
⑦	粉砂	-44.84	7.7	颗粒成分主要为石英、长石、云母,上部含氧化铁质及薄层黏性土,局部夹细砂及黏质粉土,摇震反应快,无光泽度,无韧性。
⑧ <sub>-1</sub>	黏土	-55.93	11.08	含腐植质与有机质条纹,夹贝壳屑及有机质条纹,局部夹粉质黏土,无摇震反应,土面光滑有油脂光泽,干强度高,韧性高等。
⑧ <sub>-2</sub>	粉质黏土	-68.35	12.42	含云母、腐植质,夹多量薄层粉砂,呈互层状,局部夹黏土,土面稍光滑无光泽,无摇震反应,可塑性稍有~中等,韧性中等。

本场地浅部地下水属潜水类型,主要补给来源为大气降水和地表径流。本场地第一承压水分布于第7层,第7层砂质粉土层顶埋深约43.8~46.8m。场地南侧(即亚洲文会大楼及其以南区域)有5层分布,需考虑微承压水的影响,采取相应的减压(在相应位置设置降压井)措施<sup>[16]</sup>,基坑剖面图如图1所示。

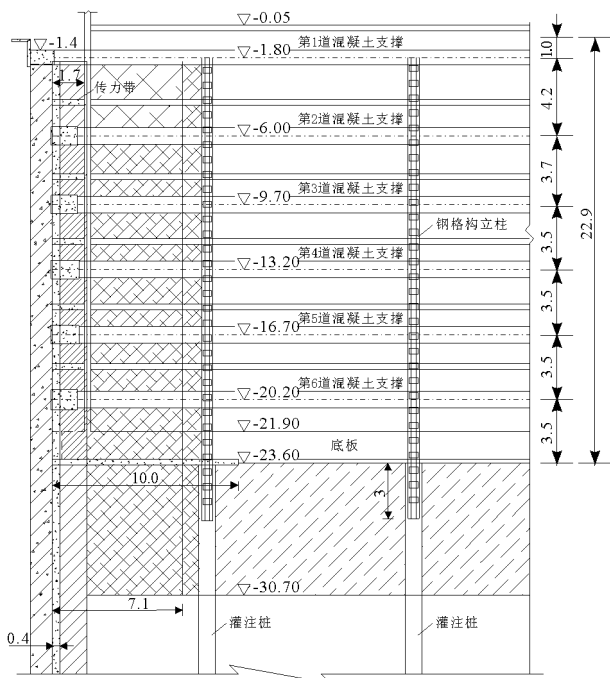


图1 基坑剖面图(单位:m)

1.2.2 水文地质概况 本次勘察揭露的地下水类型主要有浅部土层的潜水和深部第⑦层中的承压水,对本工程基础设计有直接影响的为浅部土层中的潜水及第⑦层中的承压水。

浅层地下水:场地浅部地下水属潜水类型,补给源以大气降水和地表径流为主。本基坑设计取地下高水位在地面以下0.5m处。

深层地下水:根据上海地区区域水文地质资料,承压水含水层水位呈年周期性变化,承压水位埋深的变化幅度一般在3~11m。勘察揭示,⑦层承压水水头低于潜水位,年呈周期性变化,埋深在3~11m之间。本基坑开挖深度为22.90~23.30m,第⑦层层面埋深约39.5m。根据《上海市基坑工程技术规范》(DG/TJ 08-61-2010),按公式(6.7.1)计算:按最不利的承压水位埋深3.0m考虑,第⑦层含水层土体抗承压水的稳定性安全系数 $K_s = 0.789 < 1.05$ ,即基坑底部土体抗承压水的稳定性安全系数

不满足要求,基坑开挖过程中应采取降压措施。

## 2 支护方案和基础加固措施

### 2.1 支护方案

本工程利用原已施工完成的1200mm厚地下连续墙,西藏中路侧地下连续墙深43.3m,其余侧地墙深度41.2m;同时地下连续墙接缝处2003年已在基坑外侧压密注浆,注浆深度至开挖面以下约7.0m。基坑东区及西区之间(靠地铁侧14m)新施工1000mm厚地下连续墙作为分区中隔墙,墙深50.0m。为切断承压含水层,原已施工完成的1200mm厚地下连续墙内侧新施工两排三轴 $3\Phi 850@600$ 超深水泥土搅拌桩,深度约52m(进入第⑧层土层内约5.5m);水泥土搅拌桩与地墙之间采用高压旋喷桩填充。

东区及西区基坑内均设置6道水平向钢混凝土支撑,支撑呈对撑及边桁架形式,东区第1道支撑局部兼作施工栈桥。各道支撑中心标高依次为-1.80、-6.00、-9.70、-13.20、-16.70和-20.20m。支撑立柱采用钻孔灌注桩结合钢格构柱 $4\angle 180 \times 18$ 、断面为500mm×500mm。

### 2.2 基础加固措施

为了保护、保留建筑物,将于基坑开挖之前进行基础加固,以减小基坑围护施工对其造成的不利影响。采取的方案如下:

(1)西区基坑土体加固为三轴 $\Phi 850$ 水泥土搅拌桩满堂加固形式。地面标高以下至-9.70m(第3道支撑中心)标高加固体水泥掺量10%;标高-9.70m(第3道支撑中心)至-30.70m(坑底开挖面下7.0m)标高加固体水泥掺量20%。

(2)东区基坑土体加固为三轴 $\Phi 850$ 水泥土搅拌桩裙边加固结合高压旋喷桩抽条加固形式。裙边加固宽度为7.0m,加固体水泥掺量与加固深度范围同西区基坑;坑底7m范围内采用旋喷桩抽条加固,抽条加固体宽度为4.2m。

(3)西区基坑开挖至坑底后沿地墙设置配筋垫层,垫层厚300mm;东区基坑设置10.0m宽的配筋垫层,垫层厚300mm。

此外,为消除基坑开挖过程中围护墙侧向变形对周边保护、保留建筑物的不利影响,需在基坑开挖前在围护墙外侧预埋注浆管,在基坑开挖过程中进行跟踪注浆,对建筑物区域土体损失进行补偿,确保周边建筑物安全。

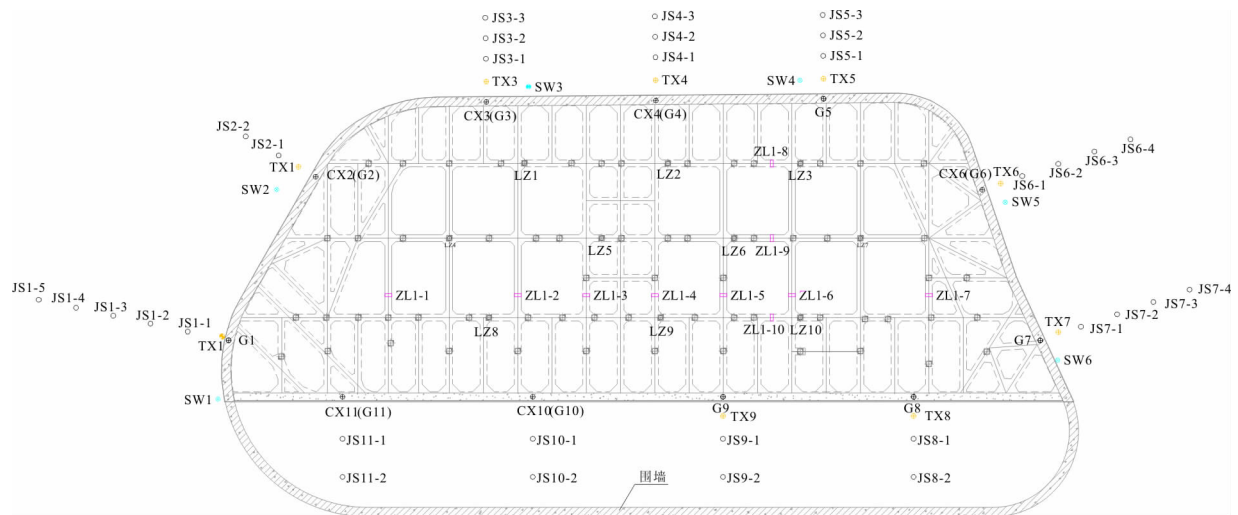


图2 A 基坑平面图及测点布置

### 3 监测方案

本工程基坑主要有 A、B 两个,本文主要针对 A 基坑的监测状况进行剖析,A 基坑的监测方案和测点布置如图 2 所示,本工程 A 基坑主要监测内容如下:

(1) 围护墙体侧向位移(测斜)监测:在基坑围护之地下连续墙内布设 17 个围护墙体测斜监测孔,编号 CX2、CX3、CX4、CX6、CX10 ~ CX22。

(2) 周边地表沉降监测:在基坑围护体外侧土体内布设 15 组基坑外地表沉降监测点,对应不同区域每个剖面有 2 ~ 5 个监测点,监测点与围护外边线之间及监测点相互之间间距均为 5m,编号 JS $m$ - $n$ ( $m$  表示剖面编号、 $n$  表示监测点顺序号)。

(3) 围护墙顶变形监测点:在地下连续墙围护压顶圈梁上布设 22 个围护体顶部变形监测点,编号 G1 - G22,监测点对应围护墙体测斜监测孔。

A 基坑的基坑开挖及地下室结构工程施工工况如表 2 所示。

表 2 A 基坑施工工况

序号	施工工况	时间节点/或时间段
1	第 2 皮土土方开挖	2013-10-09
2	第 3 皮土土方开挖	2013-10-20
3	第 4 皮土土方开挖	2013-10-29
4	第 5 皮土土方开挖	2013-11-11
5	第 6 皮土土方开挖	2013-11-24
6	第 7 皮土土方开挖	2013-12-07
7	垫层完成	2013-12-24
8	底板完成	2014-01-11
9	地下室结构施工 (至地下二层顶板)	2014-09-20
10	地下室结构完成	2015-07-12

### 4 实测结果分析

#### 4.1 围护墙体测斜

本文围护墙体测斜主要选取 CX3、CX4、CX6、CX10 4 个具有代表性的测点进行实测分析,由具体监测数据并结合实际施工情况分析,围护墙体水平位移随时间的变化曲线如图 3 所示。

从图 3 可以得出:本工程基坑在开挖过程中,围护墙体的整体变形形状呈中间大、两头小,与常见采用多道支撑围护结构的变形规律相似<sup>[9-10]</sup>;随着基坑开挖深度的不断增加,围护墙体变形不断增大,且支护结构水平位移的变化具有明显的时空效应,即开挖持续时间越长,基坑暴露时间越长,变形增长越快,围护墙体测斜孔呈现向基坑内侧位移,其中围护墙体测斜监测孔 CX3、CX4、CX10 的累计位移量超出报警值范围而报警,围护墙体测斜最大最终观测位移量为 CX4、+72.12 mm;从围护墙体测斜孔的变化曲线看,监测孔呈现持续、缓慢的变化态势,未见突变情况发生;从围护墙体测斜孔的位移量看,A 基坑施工过程中的变形量较大,出现报警情况的监测孔均位于此区域内。

由于基坑开挖过程中土层逐渐被挖除,在坑外主动土压力的作用下,地下连续墙向基坑内侧偏移。针对该情况给出以下处理措施:

(1) 加强围护墙体测斜的监测工作,同时密切关注监测孔的日位移量,用单日变量与累计变量的双控指标确定是否应对此监测项目进行综合监测报警。

(2) 在关注围护墙体测斜变化的同时,也应对基坑外地下水位的变化进行密切关注,避免由于基

坑外水土流失而导致的围护墙体测斜产生的超量位移,以保证基坑外土体的整体稳定。

(3)严格控制土方的分层分块开挖速度,以使

得支撑的施工速度能与基坑开挖速度紧密配合,及时形成支撑避免基坑无支撑暴露时间。

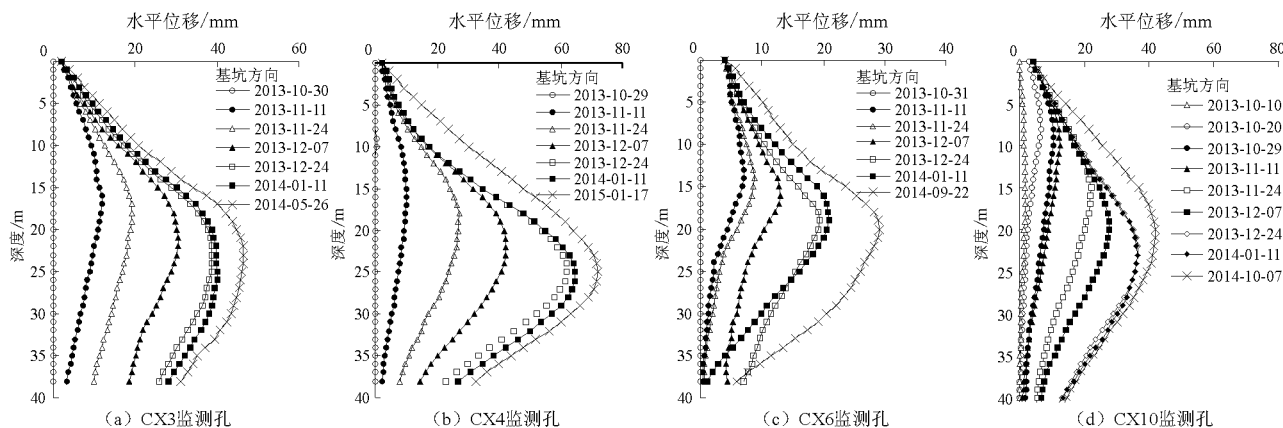


图 3 测点测斜曲线

### 4.2 周边地表沉降

墙后地表沉降是反映基坑变形程度的一项重要内容,根据墙后地表沉降的大小,可以推测出周围建筑物和管线的变形情况,从而对基坑变形的环境影响进行评估<sup>[11]</sup>。本工程中对 A 基坑周边地表沉降的具体监测数据并结合实际施工情况分析,监测点如图 2 中 JS1-n ~ JS11-n 所示,黄浦 109 街坊改造项目 A 基坑开挖及地下室结构工程施工阶段,相关周边地表沉降监测点变化情况可归纳为:

(1)黄浦 109 街坊改造项目 A 基坑基础工程施工完成后,相关周边地表沉降监测点累计垂直变化除西侧的 9#、10#及 11#剖面监测点呈现抬升外,其他监测点均呈现下沉,1#~7#剖面的监测点曾有累计下沉量超出报警值范围而报警的情况发生;最大最终观测下沉量为 JS4-2 监测点 -44.60 mm,如图 4 所示。

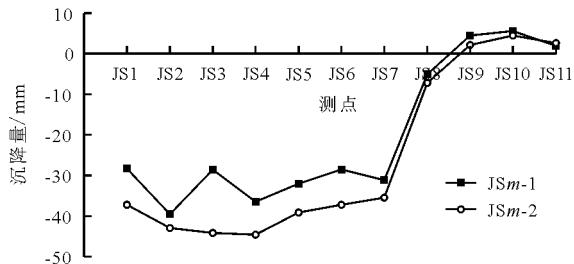


图 4 周边地表最终沉降曲线

(2)虽然有部分地表沉降监测点有累计下沉量超出报警值范围而报警的情况发生,但从地表沉降监测点的沉降变化曲线看,监测点沉降呈现持续、缓慢的变化态势,未见突变情况发生,沉降变化曲线较

平稳。

(3)2013-12-03 开始,陆续有地表沉降监测点开始出现累计下沉量超出报警值范围而报警,根据工况看,此时间点位于第 6 皮土方开挖阶段。

(4)从下沉量较大的地表沉降监测点位置分布看,均处于芝罘路、六合路及凤阳路侧,位于西侧整体基坑内的 8#~11#剖面监测点沉降变化量较小。

(5)从图 5 不同开挖阶段周边地表沉降量可以得出:除第 2 及第 3 皮土方开挖阶段监测点垂直变化未见明显规律,有呈抬升、有呈下降外,其他施工工况阶段监测点垂直变化均呈现下沉;周边地表监测点的分阶段沉降速率最大值均出现在第 6、第 7 皮土方开挖及垫层施工阶段。

(6)从位于同一剖面的监测点沉降量看,距离基坑围护外边线 10 m 位置处的监测点下沉量最大,距离基坑围护外边线 5 m 位置处的监测点下沉量略大于或基本相当于 15 m 位置处的监测点。

### 4.3 围护墙顶变形

对围护墙顶变形的研究主要从垂直位移和水平位移两方面进行研究,由具体监测数据并结合实际施工情况分析,监测点如图 2 中 G1~G11 所示,变化情况可归纳为:

(1)垂直位移。如图 6(a)所示为围护墙顶垂直位移变形曲线图,从变化曲线图可以看出:黄浦 109 街坊改造项目基础工程施工完成后,围护墙顶监测点累计垂直变化均呈现抬升,最大最终观测抬升量为 G11、+13.14 mm;从围护墙顶监测点的沉降变化曲线看,监测点沉降呈现持续、缓慢的变化态势,未见突变情况发生,沉降变化曲线较平稳。

(2)水平位移。图6(b)所示为围护墙顶水平位移变形曲线图,从变化曲线图可以看出:黄浦区109街坊改造项目基础工程施工完成后,围护墙顶监测点的累计平面位移除监测点G2呈现静止外其他监测点均呈现向基坑内侧位移,且各监测点水平位移变化范围在0(G2)~+9 mm(G9)之间。

(3)从图7围护墙顶监测点的分阶段沉降量及分阶段沉降速率看:第2及第3皮土方开挖阶段,围护墙顶监测点的垂直变化除G10略显下沉外其他

监测点均呈现抬升;第4及第5皮土方开挖阶段及地下室结构施工阶段,围护墙顶监测点的垂直变化均呈现抬升;底板施工阶段,围护墙顶监测点的垂直变化均呈现下沉;第6、第7皮土方开挖及垫层施工阶段,围护墙顶监测点的垂直变化未见明显规律,有呈抬升、有呈下沉;围护墙顶监测点的分阶段沉降速率最大值监测点G1~G7(外围地下连续墙处)出现在第2及第3皮土方开挖阶段,监测点G8~G11(分隔墙处)出现在第4及第5皮土方开挖阶段。

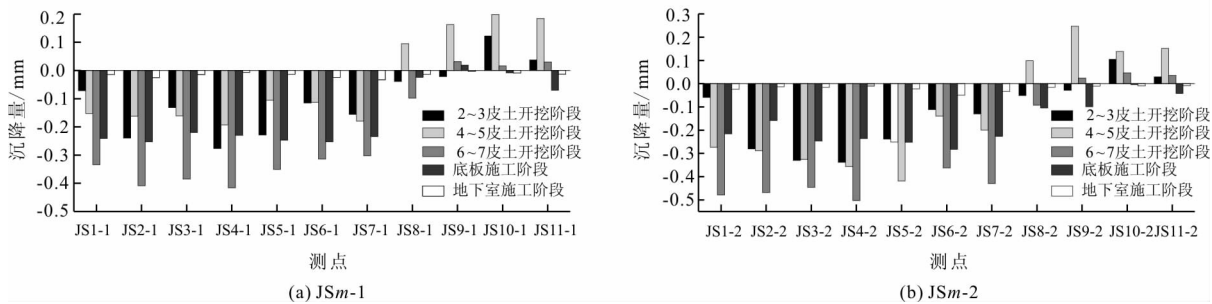


图5 不同开挖阶段周边地表沉降对比图

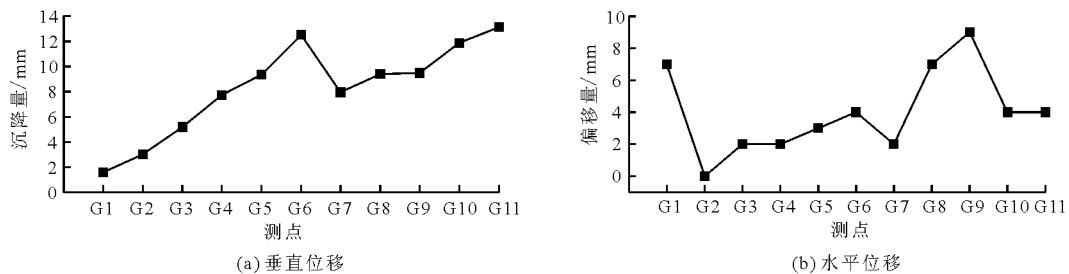


图6 围护墙顶变形曲线图

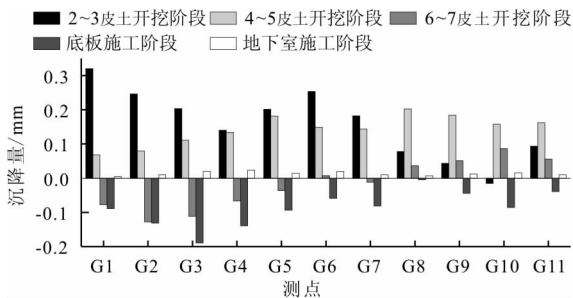


图7 不同施工阶段围护墙顶沉降曲线图

### 5 结论

本文依据实测深基坑监测数据,对软土深基坑围护墙体测斜、周边表沉降、围护墙顶变形进行了较为全面的总结与分析,得出以下结论:

(1)本工程基坑在开挖过程中围护墙体的整体变形形状呈中间大、两头小,随着基坑开挖深度的不断增加,围护墙体变形不断增大,且变形呈现持续、

缓慢的变化态势,未见突变情况发生,A基坑施工过程中,围护墙体测斜孔的位移变形量较大,出现报警情况的监测孔均位于A基坑内。

(2)该基坑工程相关周边地表沉降监测点累计垂直变化基本呈现下沉,虽然有部分地表沉降监测点有累计下沉量超出报警值范围而报警的情况发生,但从地表沉降监测点的沉降变化曲线看,沉降呈现持续、缓慢的变化态势,未见突变情况发生,沉降变化曲线较平稳。

(3)围护墙顶变形的研究结论:垂直方向沉降呈现持续、缓慢的变化态势,未见突变情况发生,沉降变化曲线较平稳;水平方向围护墙顶监测点的累计平面位移基本呈现向基坑内侧位移,且各监测点水平位移变化范围在0~+9 mm之间。

### 参考文献:

[1] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑业

- 出版社,1997.
- [2] 王磊,吴善能. 上海地区深基坑施工对周围历史建筑物的影响[J]. 低温建筑技术,2011,33(4):107-108.
- [3] 周奎,刘奕斌,余金鑫. 隧道开挖对近接既有人防工程影响的监测方法[J]. 上海理工大学学报,2013,35(1):91-96.
- [4] 张陈蓉,俞剑,黄茂松. 基坑开挖对邻近地下管线影响的变形控制标准[J]. 岩土力学,2012,33(7):2027-2034.
- [5] 姜峥. 基坑开挖引起邻近管线变形的理论解析[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(2):362-368.
- [6] 郑刚,杜一鸣,刁钰,等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(4):599-612.
- [7] 杨德春,刘建国. 地铁隧道附近软土深基坑设计与施工关键技术分析[J]. 建筑结构,2012,42(7):109-114+67.
- [8] 温忠义,张丽娟,陈松,等. 基坑支护结构变形对邻近地铁隧道的影响研究[J]. 路基工程,2014(5):144-148.
- [9] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [10] 屠传豹,陈勇,刘国彬,等. 地铁深基坑测斜监控指标的探讨及实践[J]. 岩土工程学报,2012,34(S1):28-32.
- [11] 叶任寒,单华峰,王显椿,等. 软土地区深基坑开挖变形监测[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(S1):306-311.
- [12] 李巍,段富凯,琚海明. 深部位移监测技术在城市深基坑监测中的应用[J]. 山西建筑,2009,35(3):120-122.
- [13] 吴建华. 深基坑开挖施工中的动态监测方法[J]. 四川建筑,2006,26(4):124-125.
- [14] Ou C Y, Liao J T, Lin H D. Performance of diaphragm wall constructed using top-down method[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering,1998,124(9):798-808.
- [15] Tan Y, Li M. Measured performance of a 26 m deep top-down excavation in downtown Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal,2011,48(5):704-719.
- [16] 李青. 软土深基坑变形性状的现场试验研究[D]. 上海:同济大学,2008.

(上接第218页)

#### 参考文献:

- [1] 王学武,党发宁,蒋力,等. 深厚复杂覆盖层上高土石围堰三维渗透稳定性分析[J]. 水利学报,2010,41(9):1074-1078+1086.
- [2] 王正成,毛海涛,姜海波,等. 深厚覆盖层弱透水层对防渗墙防渗效果的影响[J]. 人民黄河,2017,39(2):112-115+119.
- [3] 张拥军,牛运华,杨波. 汉江兴隆水利枢纽一期土石围堰二维渗流分析[J]. 人民长江,2011,42(16):11-14.
- [4] 唐瑜莲,朱岳明,丁兵勇. 深覆盖层地基碎石土心墙堆石坝的渗流特性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2008,30(6):11-15.
- [5] 戴会超,王玲玲. 三峡深水高土石围堰工程的渗流研究[J]. 水科学进展,2005,16(6):849-852.
- [6] 李静琪. 某工程坝基防渗系统敏感性分析[J]. 红水河,2009,28(4):96-99.
- [7] 莫轻兵,王建新,王思敬. 金沙江某拟建水电站上游围堰防渗帷幕敏感性分析[J]. 工程勘测,2011,39(10):33-36+83.
- [8] 曾海燕,张建海,王震洲,等. 某堆石坝帷幕缺陷处理后渗流稳定敏感性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(6):118-122.
- [9] 张飞,卢晓春,田斌,等. 基于深厚覆盖层变化的土石围堰堰基渗透特性[J]. 人民黄河,2014,36(8):127-129.
- [10] 卢晓春,田斌,孙开畅. 深厚覆盖层上土石围堰渗流及边坡稳定性研究[J]. 人民长江,2014,45(9):55-61.
- [11] 侯俊平,郭炜. 有限元计算方法在大坝渗流分析中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2005,38(5):65-68.
- [12] 陈士俊,张俊霞,李莉,等. 工程渗流有限元计算方法研究[J]. 人民黄河,2000,22(9):34-36.
- [13] 陆美霞,任德记,王刚. 基于 seep/w 的吊江岩水电站闸坝渗流稳定分析[J]. 水利科技与经济,2010,16(2):224-226.
- [14] 彭云枫,郝丹. 土工膜防渗工程的渗流计算探讨[J]. 安徽农业科学,2013,41(7):3241-3243.
- [15] 张宜虎,杨裕云,王亮清,等. 确定坝基工程地基渗透系数的敏感分析方法[J]. 地球科学-中国地质大学学报,2004,29(3):375-378.
- [16] 王瑞骏,李阳,丁占峰. 堆石料流变模型参数敏感性分析的正交试验法[J]. 水利学报,2016,47(2):245-252.