

黄浦区洛克外滩源深基坑监测研究

饶平平¹, 陈尚荣², 崔纪飞¹, 赵 坤¹

(1 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2 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,系统分析了基坑开挖过程中维护结构变形、地表沉降以及周围建筑物的变形规律,监测结果显示:维护墙体变形整体呈“纺锤”状,并具有明显的时空效应,随着开挖深度的不断加深,地下连续墙水平位移的最大值也不断向下移动;地表沉降曲线表现出明显的“沉降盆”,在距离基坑边缘一定距离处达到最大值,并随着距基坑距离的不断增大,地表沉降逐渐减小,且深层土体的开挖对地表沉降的影响尤为明显;加强邻近历史建筑物侧的基坑维护和防水措施以及对历史建筑物地基的加固处理有效地控制了历史建筑物沉降.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; 历史建筑; 变形; 沉降

中图分类号: TU 473 **文献标志码:** A

Deep Foundation Pit Monitoring of the Rock Bund in Huangpu District

RAO Ping-ping¹, CHEN Shang-rong², CUI Ji-fei¹, ZHAO Kun¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Geological & Mineral Engineering Investigation Co. Ltd., Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on a large amount of experimental data, the rules was analyzed about the structure deformation, ground settlement and surrounding building deformation during excavation process. The monitoring results show that the deformation of the maintenance wall presents “spindles” shape, and has a space-time effect. With the increase of excavation depth, the maximum lateral displacement of diaphragm wall is constantly moving downward; surface subsidence curves show a “settling basin”, which means the subsidence reaches a maximum at a certain distance away from foundation pit edges, and the surface settlement gradually decreases as the distance increases, and the impact on surface subsidence in excavating deep soil is obvious; the settlement of the historical buildings can be controlled by reinforcing the lateral foundation enclosure and waterproof measures before excavating, as well as by the reinforcement of the historical building foundation. The conclusions provide some practical value and valuable reference for designing and excavating the soft soil foundation under crowded buildings.

Key words: deep foundation; historical building; deformation; settlement

收稿日期: 2013-11-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51208301); 上海高校青年教师培养资助计划(slg12019)

第一作者: 饶平平(1984-), 男, 讲师. 研究方向: 岩土工程. E-mail: raopingping@usst.edu.cn

随着城市的不断发展,对地下空间的利用开发大大增加,出现了大量在密集建筑群中施工的基坑工程^[1].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,这势必对邻近建筑物的安全产生影响^[2-3].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、城市排水管道、电缆煤气管道的安全^[4].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^[5].

上海一直是我国东西方文化的聚集地,城市内部修建的许多历史建筑是中西方文化交流与融汇的结晶.作为国家历史文化名城,保护和利用好优秀历史建筑,是上海建设现代化国际大都市不可或缺的重要内容^[2].然而,这些建筑大部分已超过使用年限,且地基和基础相对薄弱,因此这些建筑对地基的沉降变形非常敏感,一旦损坏将造成无法弥补的损失.工程施工时,很多情况下会遇到此类问题.如何较好地控制基坑开挖过程中邻近保护建筑物的地基沉降,是基坑开挖过程中又一问题.然而对于这个问题的研究目前还不成熟,地下工程施工信息反馈也需进一步研究^[6],同时也缺乏更多的工程实例以供借鉴.

上海黄浦区洛克外滩源 174 街坊项目以东紧邻历史建筑,北面苏州河,东面黄浦江,地质条件非常差,且周边建筑复杂,有 7 栋保护建筑和 4 栋保留(局部保留)建筑,保留、保护建筑物距离基坑较近.同时,保留、保护建筑物基本为 20 世纪 20 年代建造,超过正常使用年限,结构整体性差,承受再次变形能力较差.多栋保留、保护建筑物目前倾斜较大,基本在 7‰~11‰.另外,周边各建筑的基础大部分分布在软土地基上,对环境变化非常敏感.本文结合大量监测数据,总结了基坑开挖过程中维护墙体和周围基坑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

黄浦区 174 街坊(外滩源)项目位于上海市黄浦区圆明园路以西、虎丘路以东、南苏州路以南、北京东路以北地块,基坑周围平面图如图 1 所示.本工程占地面积约 16 800 m²,位于上海市外滩历史文化风貌保护区的核心地块,拟建建筑主要为商业、办公、酒店及地下车库,主要由 5~17 层建筑、3 层地下室组成,基坑最大开挖深度达到 21.05 m.

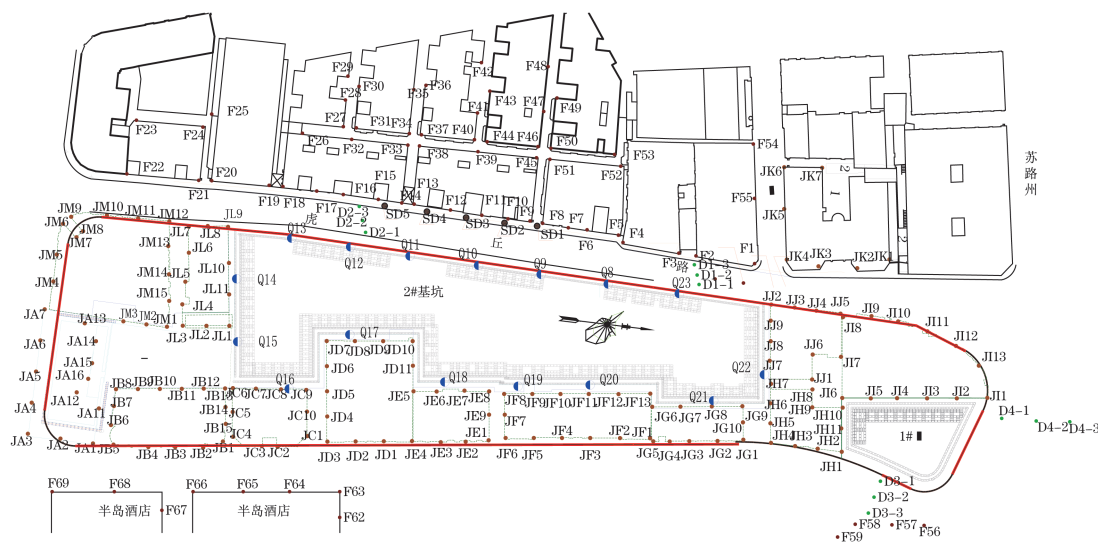


图 1 基坑平面图及测点布置

Fig.1 Plan diagram of foundation pit and monitoring points arrangement

本工程拟开挖的 4 个基坑地室外墙均非常接近保护、保留建筑基础,距周边建筑的最小距离仅为 1.5 m.1#基坑西侧和南侧为保护建筑;2#基坑除西侧为虎丘路外,其余三侧均为保护、保留建筑;3#基

坑东、西两侧均为保护、保留建筑物,南北两侧与 2#、4#基坑相连;4#基坑北侧和西侧为保护、保留建筑,东侧和南侧为需要保留的建筑物外墙.同时,周边地下管线分布有 10 多条.

1.2 水文地质概况

根据工程地质勘察报告,拟建场地 100.33 m 深度范围内的地基土按其沉积年代、成因类型及其物理力学性质的差异,可划分为 7 个主要层次,自上而下依次为:a.杂填土;b.粉质黏土和黏质粉土;c.淤泥质黏土;d.粉质黏土;e.砂质粉土;f.黏土;g.中粗砂和粉细砂.表 1 给出了基坑影响范围内各土层物理力学性质指标.

表 1 基坑影响范围内各土层物理力学性质参数
Tab.1 Physico-mechanical parameters of soil layers

土层	土层厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
杂填土	1.3	18.9	5.0×10 ⁻⁶	17	25.0
黏质粉土	7.3	18.4	3.0×10 ⁻⁶	5	30.5
淤泥质黏土	7.5	17.0	3.0×10 ⁻⁶	14	12.5
粉质黏土	10.8	18.2	1.0×10 ⁻⁵	17	19.5
砂质粉土	16.4	18.3	6.0×10 ⁻⁵	17	22.0

本场地浅部地下水属潜水类型,主要补给来源为大气降水、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 43.8~46.8 m.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.

2 支护方案和基础加固措施

2.1 支护方案

本工程采用地下连续墙(两墙合一)+三轴水泥土搅拌桩(夹芯饼兼止水帷幕)+四道(局部五道)水平支撑形式.地下连续墙混凝土等级为 C30,有效深度为 38.0,35.0,33.5,38.5,41.5,43.5 m;厚度为 800 mm.夹芯饼靠近地墙内侧采用 3φ50@900 三轴水泥土搅拌桩,搅拌桩施工至围檩底面,有效桩长分别为 20.30 m(北侧一般区域),22.30 m(南侧一般区域)和 24.30 m(南侧局部超挖区域).靠近地墙外侧采用 φ650@450 高压旋喷桩替代,长度同相应的三轴水泥土搅拌桩.坑内加固采用 3φ650@1350(搭接 200 mm)三轴水泥土搅拌桩,有效桩长 15.45~20.55 m 不等,水泥掺量分别为 13%(坑底以上)和 20%(坑底以下).基坑靠近虎丘路一侧的地墙插入比为 1.0,地墙墙顶高度为地面下 1.4 m,墙顶浇筑一道混凝土顶压圈梁兼作第一道支撑围檩,截面为 1 200 mm×800 mm(1#,2#,3#基坑).

本工程降水分别采用深井降水(1#,2#,3#基

坑)和轻型井点降水(4#基坑).

2.2 基础加固措施

本工程各保护、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:a.增加原基础刚度,通过补设基础梁来提高基础刚度,增加基础整体性,减小不均匀沉降的影响;b.对原有基础进行基础托换,将基坑施工产生的附加荷载引入到深层土体中.综合考虑建筑物结构现状及施工条件,拟采取锚杆静压钢管桩.同时对丰美洋行保留的两片外墙采用了整体加固方案.

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.

3 监测方案

本工程监测方案和测点布置如图 1 所示,本工程 2#基坑主要监测内容如下:

- a. 维护结构侧向位移监测:在 2 号基坑周围布置 16 个点,监测基坑维护结构的侧向变形,测点编号 Q8~Q23.
- b. 地表沉降监测:在 2#基坑周围布置 16 个点,分为 4 组,监测基坑周围地表的变形,测点编号 D1-1 到 D4-4.
- c. 周围建筑沉降监测:针对 2#基坑周围的历史建筑,共布置 147 个监测点,监测基坑周围历史建筑的侧向变形;针对 2#基坑周围的一般建筑,共布置了 61 个测点,监测基坑周围一般民用建筑的沉降.

4 实测结果分析

4.1 围护结构侧向位移

取具有代表性的测斜孔 Q14,Q21,Q22,Q23(测斜值报警值为 40 mm,测点布置如图 1 所示)进行分析,其水平位移 u 随时间的变化曲线如图 2 所示(见下页), H 表示开挖深度.

图 2 为标准段各测点在不同工况下的测斜变形曲线.根据测斜曲线结合基坑变形特性可以得出(以 Q21 为例分析):a.墙体变形整体呈“纺锤状”,即“两头小,中间大”,符合常见采用多道支撑围护结构的

变形规律^[7-8]. b. 随着开挖不断加深, 地下墙变形也不断增大, 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. c. 随着开挖深度的不断加深, 地下连续墙水平位移的最大值也不断向下移动, 墙体水平位移的最大值随着开挖深度的不同而表现出不同的特性. 在第二至第四工况条件下墙体水平位移的最大值位于开挖面以下, 在第四工况向第五工况

过程中墙体水平位移最大值出现在开挖面附近, 在工况五条件下墙体水平位移的最大值位于开挖面以上. 徐中华等^[9]对采用灌注围护桩的深基坑进行统计, 最大侧向位移的深度位置基本为 $(H_e \pm 5)$ m (H_e 为开挖深度). 选取本工程的一些典型测点, 可以发现本工程围护结构最大侧移的深度位置与开挖深度的关系基本符合上述统计规律. d. 在底板浇筑完成到顶板浇筑的时间段内, 墙体的水平位移很小.

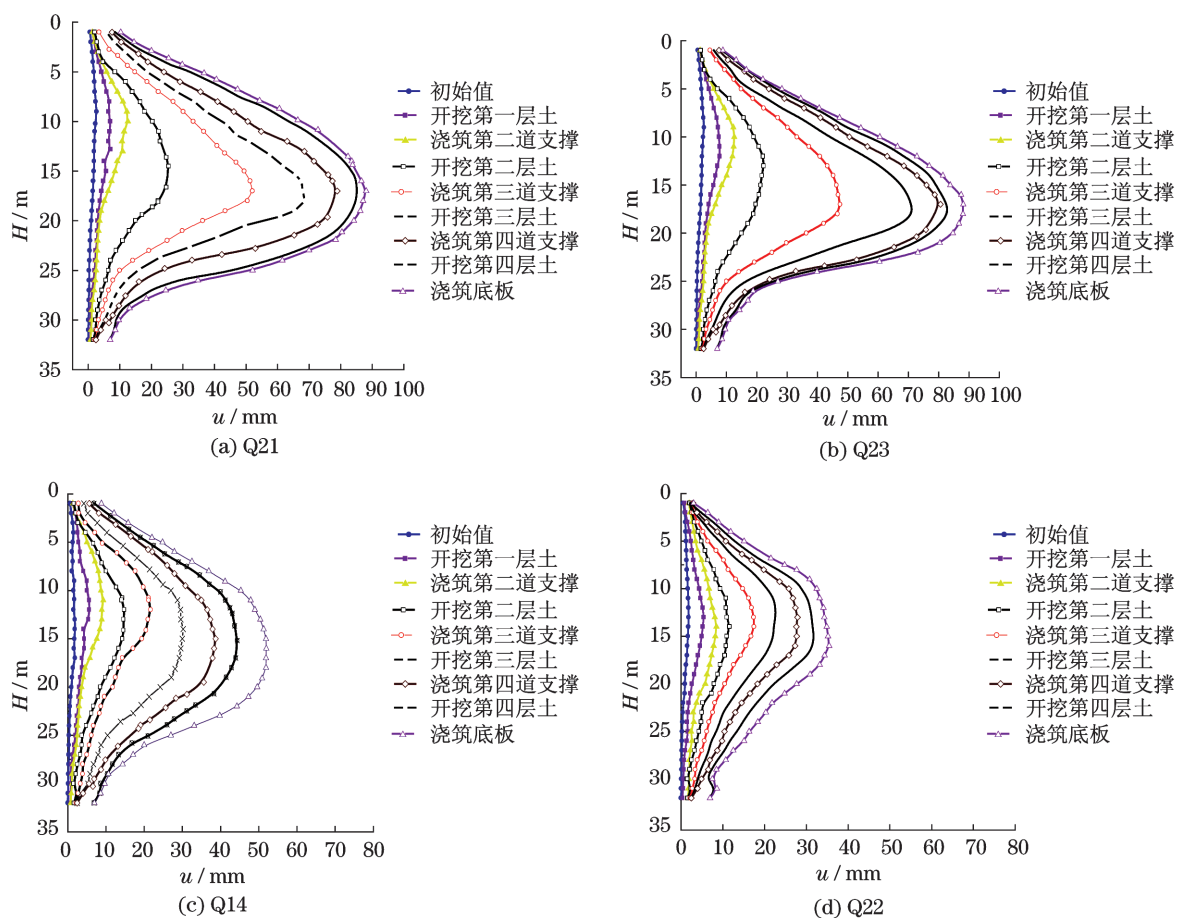


图2 测点测斜曲线

Fig.2 Curve of lateral displacement

图3所示为Q21的时程曲线, 可以看出在2013年2月9日浇筑底板之后该点的最大变形也只有4 mm左右, 说明基坑在底板浇筑完成后变形基本上处于相对稳定状态, 此后即可降低监测频率.

4.2 实测墙后地表沉降

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^[10]. 选取具有代表性的测点SD1, SD3, D1, D2, D3, D4 (测点布置如图1所示) 进行分析, 其地表沉降变化曲线如图4所示 (图中 x 表示水平距

离, S 表示地表沉降值).

对图4分析可得地表沉降的以下规律: a. 地表沉降曲线表现出明显的“沉降盆”, 由于支护结构的摩擦作用, 沉降在距离基坑边缘一定距离到达某一最大值, 之后随着距基坑距离的不断增大, 地表沉降逐渐减小. b. 地表沉降与基坑开挖之间存在对应关系, 基坑开挖时地表沉降明显, 特别是深层土体的开挖对地表沉降的影响尤为明显. 图4测点SD1在开挖至底层土之前的地表沉降最大值为54.7 mm, 但是在开挖底层土至底板浇筑完成后沉降最大值达到85.8 mm, 底层土体的开挖引起的地表沉降占了总

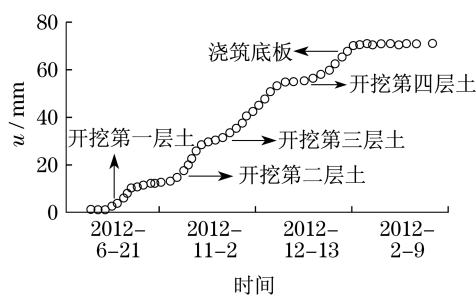


图3 Q21点处测斜时程曲线

Fig.3 Inclinator curve at Q21 along the time

沉降量的将近一半.在测点SD3中,最大值也从开挖底层土之前的57.9 mm达到底板浇筑后的93.6 mm.c.地表沉降的影响范围,在对该基坑地表沉降点进行分析,地表沉降影响范围基本上分布

在5~40 m之间,与基坑开挖深度的比值在2.73~4.10之间.根据刘建航等^[1]提出的地表沉降估算公式,地表沉降范围取支护结构背后滑动棱体的宽度即 $L \tan(\pi/4 - \varphi/2)$ (L 为基坑支护结构长度, φ 为土的内摩擦角),该工程中取 $\varphi = 18^\circ$, $L = 43.50$ m. d.地表沉降最大值发生的位置,距离基坑边缘附近的土体由于受到地下连续墙的摩擦阻力作用,使得地表沉降受到约束,沉降较小.在距离基坑开挖深度影响之外,地表沉降迅速减小,所以在距离基坑一定距离处,地表沉降达到最大值,与王卫东在文献^[11]中对上海轨道交通多条线近百个车站中182个实测断面的数据资料分析后,得出的最大地面沉降发生位置距基坑围护结构的水平距离 $x_{\max}$ 与 H_0 (基坑开挖深度)之间的关系基本上一致,如图5所示(见下页).

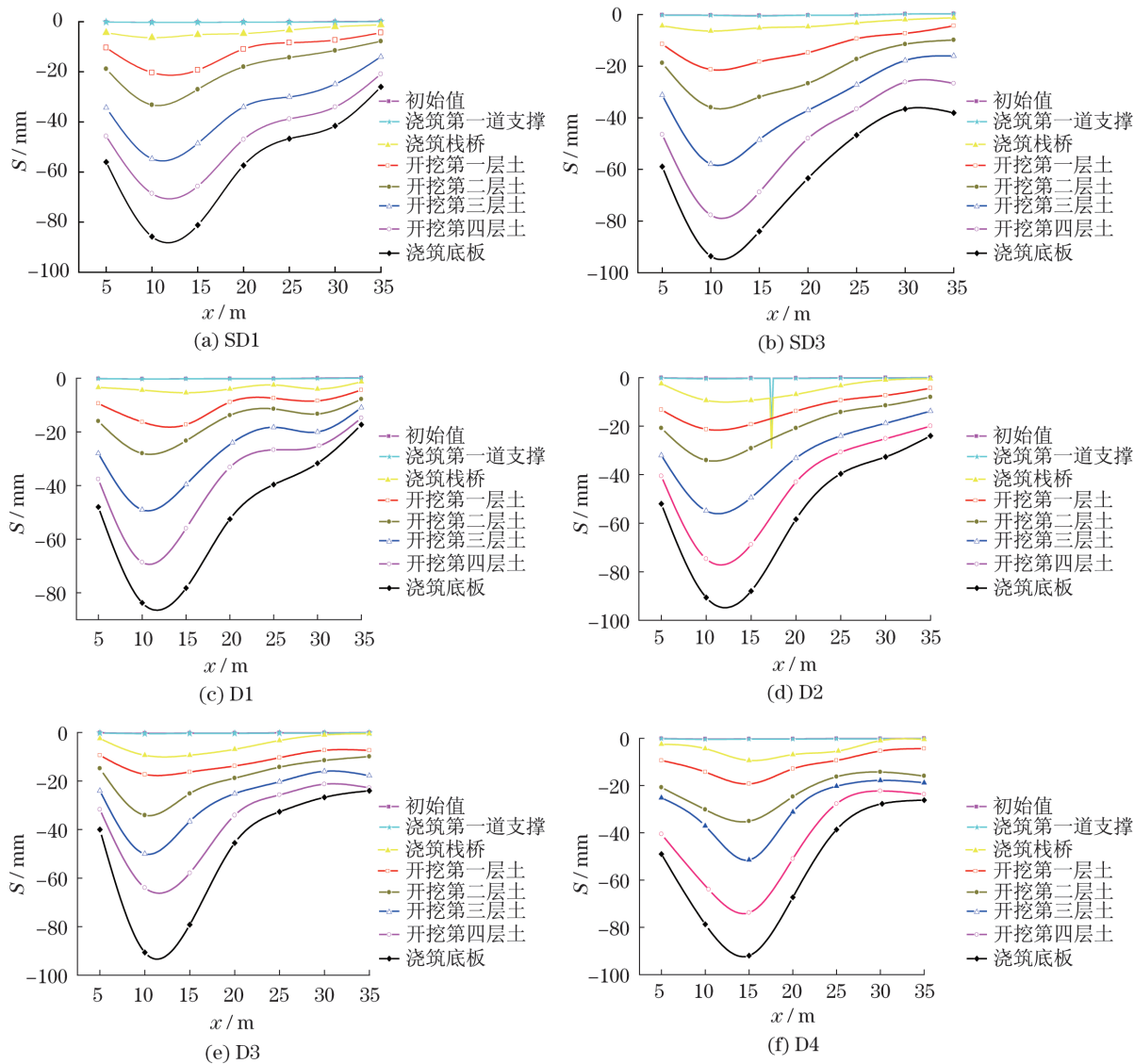


图4 地表沉降曲线

Fig.4 Ground settlement curve

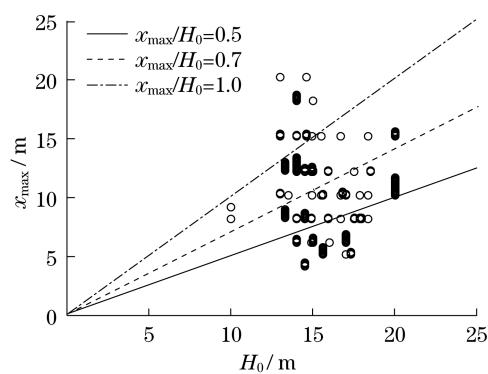


图5 最大地面沉降点位置与开挖深度关系

Fig.5 Relation between maximal settlement point and excavation depth

同时,该工程中,最大地表沉降 $S_{\max}$ 与墙体水平位移的最大值 $\delta_{\max}$ 的比值分布在 0.703~1.236 之间,与 Kung^[12] 等关于深基坑工程开挖的地表变形规律基本一致。

4.3 邻近建筑物的沉降

图6为位于基坑东边一居民楼随时间的变化曲线。该基坑于4月11日开始从北端井开始开挖,基坑从4月份开始坑内降水。但是,在基坑降水至基坑开挖期间建筑物并没有发生明显的沉降,说明地下连续墙的插入深度达到设计的要求,基本上阻止了基坑外部的的水涌向基坑内部的通道。从该曲线中可以发现基坑开挖期间建筑物的沉降值速率较大,累计值均超过报警值 ± 20 mm;在2月9日底板浇筑完毕以后建筑物沉降的速率变小,有明显缓和的趋势,说明底板浇筑对控制地表沉降有着重要作用。

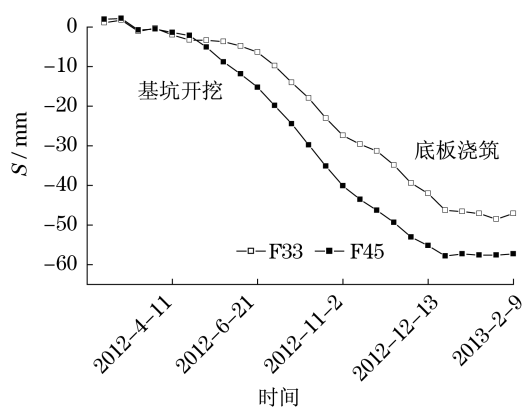


图6 小区建筑沉降曲线

Fig.6 Settlement curve of residential building

测点 F33 和 F45 位于建筑物的同一侧,从图7中看两个测点具有相同的变化规律,而且在基坑施工的各个阶段其沉降值基本相同。由于 F45 在基坑

中部的位置,支护结构对中间部位的约束较小,且邻近的建筑对中间部位的影响较大,所以 F45 处沉降值大于 F33。从施工现场也发现该建筑物因为基坑开挖而出现了大量裂缝和倾斜。并且,该小区煤气管线也曾发生过漏气现象,小区人行道上铺设的瓷砖也出现了多处隆起的现象。在监测站报警的情况下,施工方加快施工进度,对小区内的房屋进行大规模修补,排除了小区居民的安全隐患。由此也可以看出在基坑开挖过程中应尽量缩减土体暴露时间。

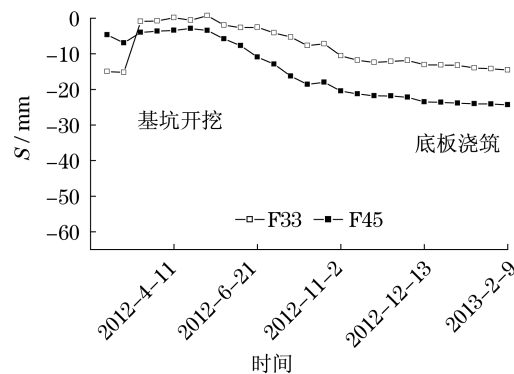


图7 历史建筑沉降曲线

Fig.7 Settlement curve of historical building

对比图6和图7,可以发现历史建筑沉降明显小于小区建筑沉降,最大沉降值仅为 24.31 mm(历史建筑沉降最大值,略微超过报警值 ± 20 mm),历史建筑未出现明显裂缝和倾斜。这说明开挖基坑前对历史建筑的加固措施以及在靠历史建筑一侧地下连续墙外增加 $\varphi 800$ 的排桩发挥了良好的作用。

值得注意的是,安培洋行共布设沉降测点 15 个,在施工中进行跟踪监测,随时了解沉降情况,得到安培洋行沉降曲线图如图8所示。

如图8,安培洋行在地基加固期间,出现了微小的不均匀沉降;加固完成后,由于3#基坑施工的影响,出现了较大的沉降,最大的沉降达到了 40 mm。3#基坑施工结束后,沉降趋于稳定。

综合分析数据,可以看出安培洋行沉降基本保持正常。经过严密的施工措施和及时的监测相互配合,安培洋行的变形基本趋于稳定。基于部分测点在部分施工工序中仍有较为明显的变形现象,建议在以后的此类工程施工中一方面要做好施工变形事前预测工作,充分做好应对措施;另一方面还要严格控制好关键性的工序,根据监测数据及时调整好相关施工参数,做好施工反馈机制,尽量避免或减轻施工对周边环境设施破坏性的影响程度,确保工程施工安全。

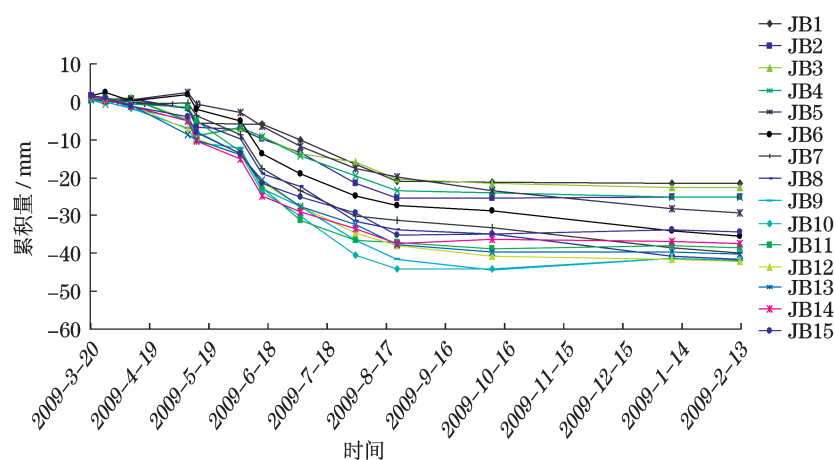


图8 安培洋行沉降曲线图

Fig.8 Settlement curve of Abe Matheson

5 结束语

从实测的深基坑监测数据出发,结合上海已经完成的软土基坑的变形规律,对软土深基坑支护结构、地表沉降、建筑物沉降作了较为全面的总结与分析,得出以下结论:

a. 维护墙体变形整体呈“纺锤”状,即“两头小,中间大”,支护结构水平位移的变化具有明显的时空效应,应合理安排施工顺序以控制变形.同时,随着开挖深度的不断加深,地下连续墙水平位移的最大值也不断向下移动.

b. 地表沉降曲线表现出明显的“沉降盆”,在距离基坑边缘到达某一最大值,并随着基坑距离的不断增大,地表沉降逐渐减小.地表沉降与基坑开挖之间存在对应关系,基坑开挖时地表沉降明显,特别是深层土体的开挖对地表沉降的影响尤为明显.

c. 在基坑开挖之前,加强邻近历史建筑物侧基坑的围护和防水措施,以及对历史建筑物地基的加固处理,有效地控制了历史建筑物的沉降,保证了工程的顺利开展.

d. 对于在城市密集建筑群中开挖的基坑,变形控制条件成为基坑安全的重要控制条件.防止周围建筑过大变形的措施主要有:(a)合理的施工工序和挖土过程;(b)控制地下水位,排除水患;(c)对邻近建筑地基进行加固;(d)增加围护结构插入深度.

参考文献:

[1] 刘建航,侯学渊.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.

- [2] 王磊,吴善能.上海地区深基坑施工对周围历史建筑的影响[J].低温建筑技术,2011(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] 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.
- [5] 王曙光.复杂周边环境基坑工程变形控制技术[J].岩土工程学报,2013,35(增刊):474-477.
- [6] 马晓旦,袁金荣.地下工程信息平台的研究[J].上海理工大学学报,2004,26(3):275-279.
- [7] Ou C Y, Liao J T, Lin H D. Performance of diaphragm wall constructed using top-down method[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9):798-808.
- [8] Tan Y, Li M W. Measured performance of a 26 m deep top-down excavation in downtown Shanghai [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(5):704-719.
- [9] 徐中华,王建华,王卫东.软土地区采用灌注桩围护的深基坑变形性状研究[J].岩土力学,2009,30(5):1362-1366.
- [10] 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.
- [11] 王卫东,徐中华,王建华.上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J].岩土工程学报,2011,33(11):1659-1666.
- [12] Kung G T C, Juang C H, Hsiao E C L, et al. Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(6):731-747.

(编辑:丁红艺)