

DOI: 10.11779/CJGE2014S2084

紧邻历史保护建筑深基坑设计实践及监测分析

梁志荣, 陈 颖, 黄开勇

(上海申元岩土工程有限公司, 上海 200040)

摘 要: 介绍了上海外滩源 33 号项目地下 3 层深基坑的工程概况, 该基坑具有规模较大、周边环境复杂、地质条件较差及工期紧等特点。针对本基坑的特点, 对历史保护建筑和古树采取了预保护措施, 采用逆作法、管幕法等方法辅以节点加固、设置临时支撑等措施, 取得了不错的工程效果。本工程监测数据的分析结果可为今后类似工程提供参考。

关键词: 历史保护建筑; 深基坑; 逆作法; 管幕法

中图分类号: TU473.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0483-06

作者简介: 梁志荣(1966-), 男, 教授级高级工程师、总工程师, 主要从事基坑工程方面的设计和研究工作。E-mail: llq009@vip.sina.com。

Design practice and monitoring analysis of deep excavations adjacent to protective historic buildings

LIANG Zhi-rong, CHEN Ying, HUANG Kai-yong

(Shanghai Shen Yuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: The project overview of underground 3-story deep excavation located at No.33 on the Bund source in Shanghai is introduced. According to its properties of large scale, complex surroundings, unfavorable geological conditions and urgent schedule, pre-protection measures are taken for the protective historic buildings and ancient trees. The top-down method and pipe roof method are applied when measures such as joint strengthening and temporary bracing are adopted. Excellent engineering effects are achieved. The analysis results of the monitoring data may provide reference for similar projects in future.

Key words: protective historic building; deep excavation; top-down method; pipe roof method

0 引 言

随着城市化进程的加快, 近年来涌现了不少邻近历史保护建筑的深基坑工程。有些此类基坑还具有开挖面积大、周边管线密集、地质条件差、工期紧等特点。对于此类基坑工程, 确保基坑本身的安全固然是基坑围护设计中应该考虑的, 对于基坑周边环境的保护也是重点考虑因素。国内许多工程师和研究人员对此类问题进行了不少设计和研究工作。刘征^[1]总结了历史保护建筑的结构特点和对变形的控制要求。钟铮等^[2]介绍了邻近保护建筑的上海外滩 191 号项目深基坑围护设计。黄茂松等^[3]提出了基于周边既有建筑物承载能力的基坑变形控制标准。丁勇春等^[4]通过数值方法研究了深基坑施工对历史建筑的变形影响。应宏伟等^[5]对深基坑隔断墙保护邻近建筑物的效果进行了数值分析。

本文以上海外滩源 33 号项目为例, 介绍紧邻历史保护建筑的深基坑围护设计中的技术难点及其解决方案, 并对历史保护建筑沉降监测结果进行分析。

1 工程概况

上海外滩源 33 号项目公共绿地及地下空间利用工程位于上海市黄浦区外滩源地区中山东一路 33 号, 项目总占地面积约 2.26 万 m²。该项目的主体结构主要为 3 层地下车库及其北侧局部区域上方重建的 3 层联合教堂, 地库其他区域上方为 1.5 m 厚填土绿化。主体结构采用框架结构, 局部采用无梁楼板体系, 基础形式采用桩筏基础, 工程桩采用钻孔灌注桩。为了保护一株古银杏树, 该地下三层车库分南、北两块。两块地库在地下二层有连接通道, 南块地库东侧有一地下通道穿越历史保护建筑基础通向历史保护建筑。

2 本项目基坑的主要特点

2.1 基坑规模较大, 形状极不规则

本项目基坑的总开挖面积约 4283 m², 基坑普遍

基金项目: 上海市科研计划项目 (14XD1420400)

收稿日期: 2014-07-28

开挖深度为 16.635~18.135 m，南北地下车库之间连接通道长度为 24 m，宽度为 10 m，底板及底板深度分别在自然地坪以下 11.935 m 和 4.8 m。南块地库东侧通道开挖深度为 6.3 m。

2.2 基坑周边环境极其复杂

本项目场地位于上海市著名景区外滩源，处于国家级文物保护单位外滩建筑群的控制地带和外滩历史文化风貌保护区。其周边环境如图 1 所示。

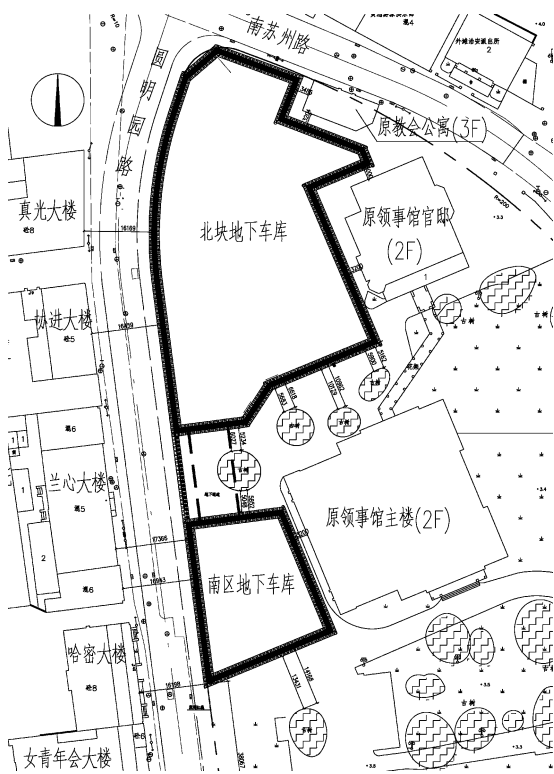


图 1 基坑周边环境图

Fig. 1 Surroundings of excavation

本项目地下车库东侧紧贴两栋原英国领事馆老建筑（领事馆主楼和官邸），两栋建筑先后于 1873 年和 1884 年建成，为外滩“万国建筑博览会”保存至今历

史最为悠久的建筑，两栋建筑均为砖木结构，地上二层，基础均为墙下条形基础，由黏土砖砌筑基础加石块基础组成，基础下设木桩。地库北侧紧贴一栋原教会公寓，建于 20 世纪二、三十年代，地上五层，基础为条形基础，基础下设木桩。两栋原领事馆建筑和原教会公寓距离本项目的地下车库外墙仅有 3.0 m 左右。

基地西侧为圆明园路，道路对面为洛克菲勒地块市级保护建筑。该侧保护建筑距离本工程地下车库外墙 16~17 m。圆明园路及场地北侧南苏州路下方分布有较多管线，包括上水管、雨水管、信息、电力、和煤气管线等，距离基坑较近。

此外，本工程场地内部分布着不少上百年的古树名木，有棵古银杏树甚至位于南北地库之间连通道的上方，这些古树具有一定历史价值，必须原位保护并确保全部存活。

2.3 地质条件比较复杂

拟建场地属于滨海平原地貌。本工程基坑开挖所涉及的土层主要是①、②₃、④、⑤_{1a}、⑤_{1b}、⑤_{1c}层。场地多处存在暗浜，最深处达 4 m。第②₃层黏质粉土层含粉性土颗粒较重，水平渗透系数较大。开挖面在第④层淤泥质黏土层底附近，该层土是上海地区最软弱的土层，其下方为第⑤_{1a}层黏土层，这两层土为基坑开挖的主要被动土压力区。本场地存在第⑤₂层微承压含水层和第⑦层、第⑨层承压含水层，且第⑤₂层和第⑦层局部连通，存在水力联系，这两层承压水层对本工程基坑开挖有影响。各土层物理力学性质见表 1。

2.4 工期紧、设计周期短

本项目属于“上海世博会重点工程”，要求在 2009 年 1 月开工，在 2010 年 4 月世博会开始前主体建筑竣工，从建筑方案到基坑围护施工图的设计周期仅 4 个月。

表 1 土层物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层编号	土层	层厚/m	层底深度/m	重度/(kN·m ⁻³)	含水率/%	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	地基承载力/kPa	渗透系数/(cm·s ⁻¹) (建议值)
①	填土	3.1	3.1	18.0	—	—	—	—	—	—
② ₃	黏质粉土	5.9	9.0	18.3	32.5	7.53	6	31.0	120	7.0×10 ⁻⁵
④	淤泥质黏土	8.9	17.9	16.9	49.9	2.16	13	11.0	60	6.0×10 ⁻⁷
⑤ _{1a}	黏土	5.1	23.0	17.7	38.1	3.22	17	14.5	75	5.0×10 ⁻⁷
⑤ _{1b}	粉质黏土	9.0	32.0	18.0	34.6	4.25	19	16.0	90	6.0×10 ⁻⁶
⑤ _{1c}	粉质黏土夹黏质粉土	10.0	42.0	17.9	34.4	5.44	15	24.0	105	3.0×10 ⁻⁵
⑤ ₄	粉质黏土	1.5	43.5	19.6	23.3	6.67	46	18.0	130	—
⑦	砂质粉土	4.2	47.7	18.9	28.2	8.09	5	34.5	—	—

3 围护设计方案

3.1 南、北两块地下车库围护设计

3.1.1 总体方案

综合考虑本基坑的规模、周边环境保护要求及工期等因素,本基坑的围护设计采用支护结构与主体结构全面结合、基坑开挖全逆作施工的整体方案,分南、北两个区域分别实施。逆作各工况示意如图 2 所示。

3.1.2 围护施工前对历史建筑及古树的保护措施

(1)对历史保护建筑的基础进行托换。基础托换采用在老基础位置设置托换型钢抬梁,并浇筑混凝土条形基础,条基下设置钢管桩,待老建筑基础托换施

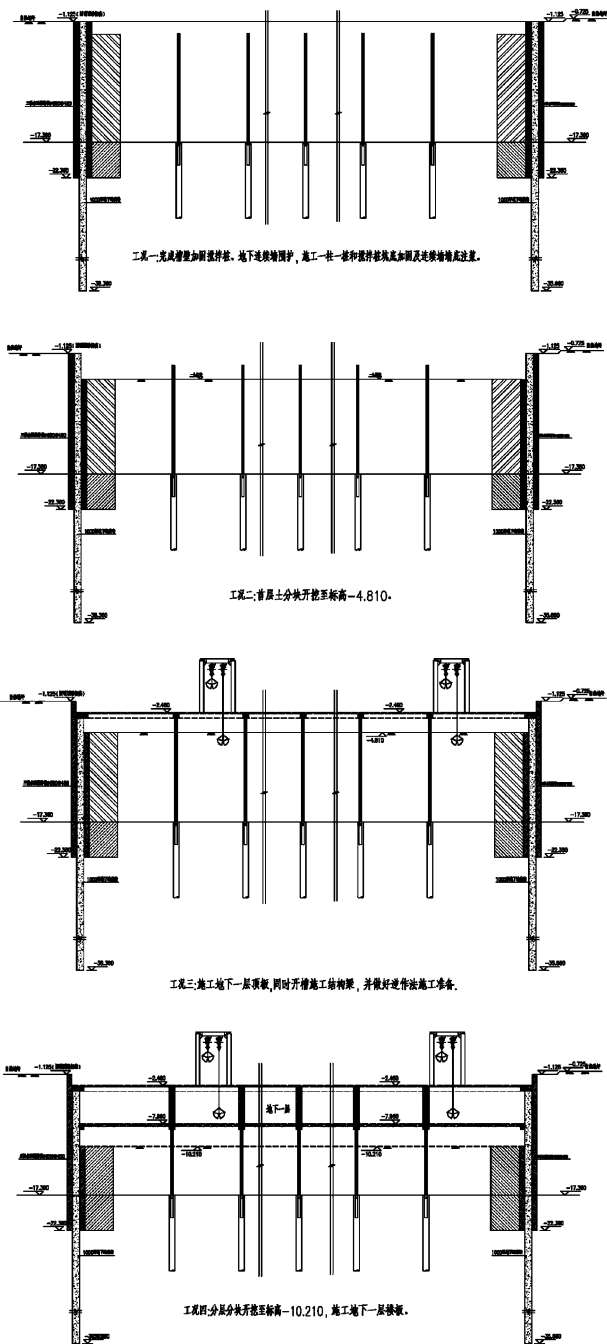
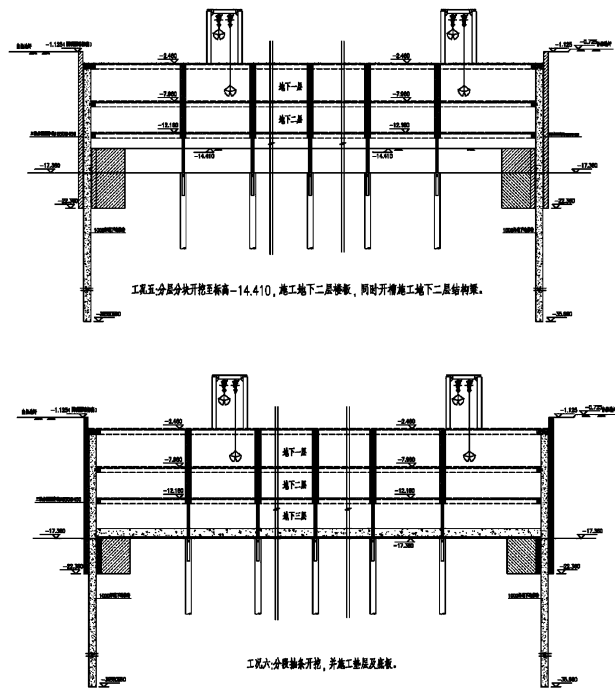


图 2 逆作法工况图

Fig. 2 Steps of top-down method



工完成后进行围护部分的施工。建筑基础托换的关键点包括:

- a) 采用先托换后进行围护施工的原则。
- b) 根据基坑开挖时托换桩身受弯和水平变形的情况,以及室内施工的要求,桩基采用结构刚度较大、静压施工方便、并具有较强的抗水平变形能力的小直径钢管桩。
- c) 为减小基坑开挖的扰动对桩端变形的影响,托换桩端除了进入可靠持力层的要求外,还要求桩底略深于围护地下连续墙墙底。
- d) 结合托换条形基础的设计,围护地下连续墙墙顶及压顶梁标高高于托换条基,减小地连墙导墙施工及压顶梁施工开挖过深对保护建筑基础的影响。
- e) 历史保护建筑托换后沉降计算考虑地下车库基坑开挖的协同变形影响。

(2)为防止地连墙成槽施工对老建筑沉降产生较大影响,在地连墙内外两侧设置三轴水泥土搅拌桩槽壁加固,邻近历史保护建筑部位,为减小地连墙压顶施工开挖对历史保护建筑的影响,局部设置三轴水泥土搅拌桩。

(3)在古树名木的影响区域打设两排Ⅲ号拉森钢板桩隔离水泥浆液,防止古树受化学污染,保证最终古树全部存活。

3.1.3 地下连续墙

地下连续墙既作为地下车库外墙,又兼做基坑的围护结构(“两墙合一”);根据挖深的不同采用三种不

同深度的槽段,力求经济合理;为提高施工速度,减少槽段开挖对周边环境造成不良影响,槽段尺寸普遍控制在 5.0 m 左右;采用锁口管柔性接头。

3.1.4 支撑与立柱

本工程采用逆作法施工,利用刚度较大的地库梁板作为水平支撑,以节约造价,控制周边环境变形;局部落深区域,利用大底板设置一道钢支撑,控制变形;根据结构水平受力形态及逆作出土的需要,选择出土口的位置,在地下各层楼板缺失处及出土口区域,设置临时钢筋混凝土支撑,洞口周边圈梁加固;逆作施工阶段顶板承受车辆荷载及施工堆载,须加强局部楼板。竖向承重体系采用一柱一桩,为减少立柱沉降对结构的不利影响,桩底采取桩端后注浆措施等以提高立柱桩的承载力并控制立柱(桩)的总体沉降以减少立柱之间的差异沉降。

3.2 南、北地库之间地下通道围护设计

本工程南、北地下车库之间地下通道水平开挖采用管幕法施工。管幕法目前主要应用于隧道工程,大量工程实践表明,管幕法可以有效控制地面沉降及对周围环境的影响。本工程是上海地区第一个采用管幕法施工的基坑围护项目,在国内其它地区也鲜有类似的先例。管幕法围护剖面如图 3 所示。

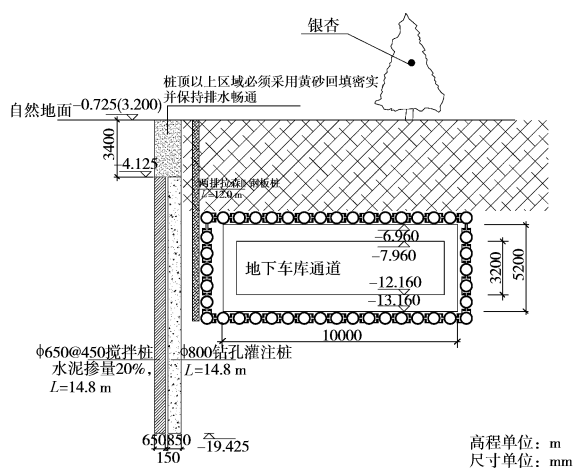


图 3 管幕法围护剖面图

Fig. 3 Profile of pipe roof method

3.2.1 技术难点

(1)管幕施工与地下车库基坑围护施工须穿插进行。由于本工程工期特别紧,管幕穿管施工在地下一、二层楼板施工完成、地下室底板尚未施工前进行,此时基坑处于最不利的工况。

(2)管幕施工需在南、北地库侧墙开 11 m×7 m 左右的洞口,涉及切断三幅地墙,其中一幅整幅切断,地墙将处于上口竖向悬空、侧向悬臂,下口侧向悬臂的情况。

(3)南区地库为管幕施工入洞口,施工期间地库三层楼板均需开洞。

(4)上排管幕穿管施工完成之后,北区地下一层管幕开洞区域立即结构封板,作为设备用房投入使用。此时地库底板尚未完成,结构封洞侧墙尚未上来,地墙开洞已无竖向支撑作用。

(5)管幕水平施工、地下通道开挖,对周边历史保护建筑的影响。

3.2.2 解决方案

(1)设置二次支撑以解决开洞后因地墙失去楼板支撑侧向失稳的问题:即在楼板开洞、管幕穿管后,立即设置斜向临时钢支撑,确保地墙开洞后的侧向稳定。

(2)在北区开洞口设置钢立柱,并加强设置承重梁体系,代替开洞地墙托换地下一层楼板及设备的重量。

(3)上口悬空地墙采用加强圈梁内钢筋,加强与结构梁侧向连接的措施,确保竖向稳定。

(4)合理制定施工工序,由于管幕施工前底板不能完成,因而在该区域内保持留土,管幕穿管完成后开挖,底板施工完成后逐渐顺作施工管幕周边加强结构柱、梁体系,代换围护临时支撑系统。管幕挖土施工在两侧地库结构完成后实施。

(5)为减小管幕法水平开挖对场地外保护建筑的影响,围护设计在邻近圆明园路一侧设置一排钻孔灌注桩隔离桩。

3.3 南块地库东侧地下通道围护设计

南块地库东侧地下通道通向原领事馆主楼,其大部分结构位于领事馆主楼的下方,需要穿越该历史保护建筑的基础。该通道的围护设计结合历史保护建筑基础托换设计,先托换后开挖。围护采用静压钢管桩+内支撑的方案,并采取以下措施确保基坑开挖的安全:

(1)为加强钢管桩的刚度,采用 $\Phi 377$ 钢管内灌 C30 混凝土。

(2)由于土层渗透性强,围护采用钢管桩间钢板锁扣连接外加 $\Phi 800@500$ 高压旋喷桩的双重止水措施。

(3)穿越墙体的部位,旋喷桩和钢管桩无法施工,止水无法封闭。该处采取旋喷桩沿墙外侧绕行施工,增加渗透路径的措施。开挖过程中分层开挖,边挖边设置止水钢板内浇混凝土墙的措施,避免大范围漏水。

(4)为减小围护的变形,采用三道 H400×400 钢支撑,围护桩上口锚入托换基础底板。

4 监测结果分析

4.1 监测布置

本基坑周边历史保护建筑的沉降监测自 2009 年 1 月 28 日南块地库东侧搅拌桩开始施工起至 2010 年 1 月 7 日北块底板浇筑完成止。

离本基坑最近的原领事馆主楼、官邸及原教会公寓的沉降监测点布置如图 4 所示，三栋建筑的监测点编号分别为 F1~F8、F9~F16 和 F17~F22。其中，F5~F6、F13~F16 和 F19~F22 位于各建筑物正对基坑位置，F14 和 F20 紧邻基坑阳角。各建筑的累计沉降量如图 5 所示。

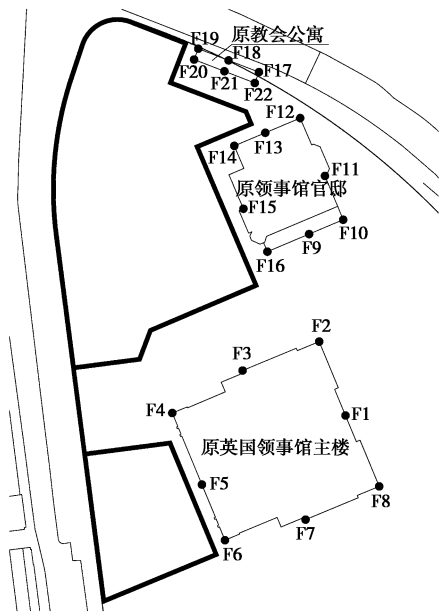


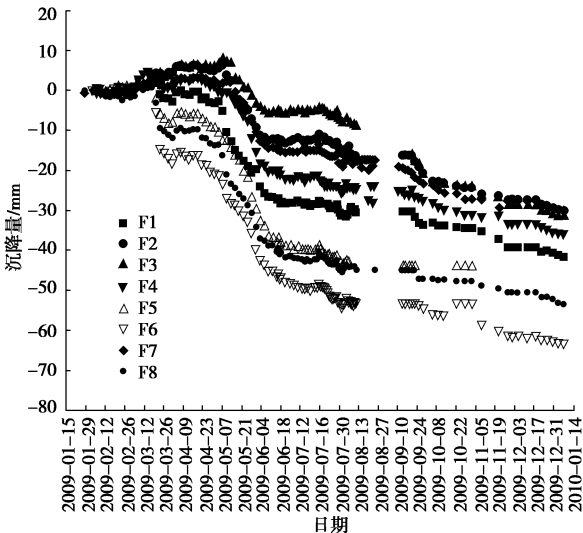
图 4 沉降监测点平面布置图

Fig. 4 Distribution of settlement monitoring points

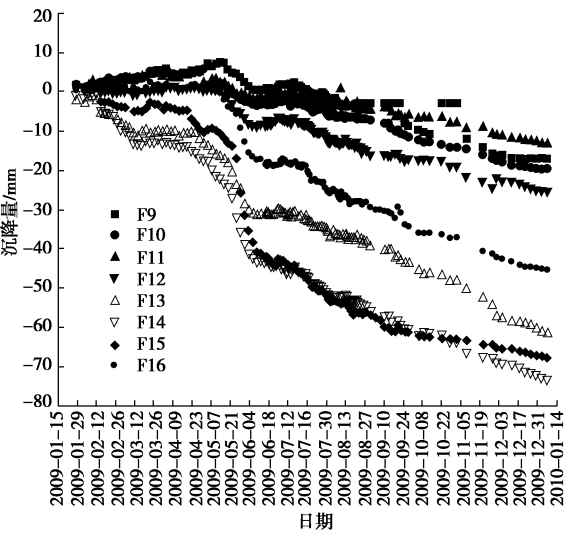
4.2 监测分析

从图 5 (a) ~ (c) 可看出：南块地库三轴水泥土搅拌桩施工阶段三栋建筑沉降都很明显，其中原领事馆主楼距离施工区域最近（仅 3.2 m），沉降最为明显，其西南角监测点 F6 出现报警。经各方商议协调，采取了如下措施：

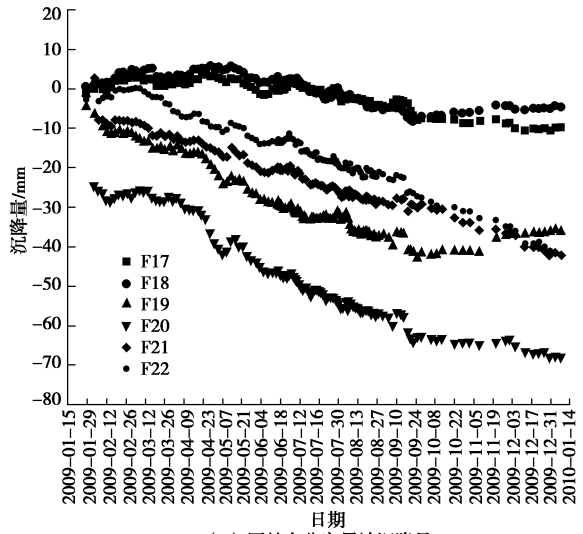
- (1) 由于原领事馆主楼西侧中部楼层及屋面需拆除复原历史原貌，因此提前拆除该部位的结构进行卸载所。
- (2) 原领事馆主楼静压锚杆桩完成后再施工南块地墙。
- (3) 采用分段施工的方法，将施工对建筑结构沉降变形的影响降至最低。北块地库距离建筑较近区域改三轴水泥土搅拌桩为双轴，控制变形。



(a) 原领事馆主楼累计沉降量



(b) 原领事馆官邸累计沉降量



(c) 原教会公寓累计沉降量

图 5 各建筑的累计沉降变化过程

Fig. 5 Variation of cumulative settlements of buildings with time

(4) 加强监测频率，跟踪变形趋势。

至 2009 年 6 月中旬时, 南北地库所有围护桩、墙施工结束, 历史保护建筑基础托换完成, 原领事馆主楼、官邸和原教会公寓的最大累计沉降量分别为 46.5 mm (F6 点)、43.8 mm (F14 点) 和 46.7 mm (F20 点)。

此后, 基坑进入逆作施工阶段直至 2010 年 1 月中旬底板浇筑完成, 该阶段基坑沉降速率比较均匀, 沉降量趋于稳定。各建筑物的最大累计沉降量分别为 63.4 mm (F6 点)、73.5 mm (F14 点) 和 68.2 mm (F20 点), 即各监测点在逆作施工阶段的沉降量分别为 16.9 mm、29.7 mm 和 21.5 mm。可见本工程的沉降变形主要发生在搅拌桩、地连墙施工阶段及基础托换阶段, 逆作施工阶段的沉降变形量相对较小。而在逆作施工阶段, 北块基坑旁的建筑沉降变形大于南块, 这与北块基坑面积较大、施工周期较长有关。总体上说, 各建筑物正对基坑的位置沉降量较大, 其中又以紧邻基坑阳角处沉降量最大。靠近管幕施工区域的监测点 F4 的最终沉降量为 36 mm, 远小于上述正对基坑位置的监测点沉降量, 而与其他各监测点沉降量相差不大。

5 结 论

本文以位于密集历史保护建筑群中的上海外滩源 33 号项目深基坑为例, 介绍了基坑围护设计中的技术难点及解决方案。根据本项目基坑的规模、周边环境、地质条件以及工期要求等, 围护设计采取了一系列有针对性的措施:

(1) 围护施工前对历史保护建筑及古树采取了一些预保护处理, 包括进行建筑基础托换、采用搅拌桩槽壁加固以及设置拉森钢板桩防止化学污染等, 最终建筑基本完好, 古树全部存活。

(2) 两块地库采用“两墙合一”、逆作施工, 地库间的连通道采用管幕法, 通过合理组织施工顺序, 两者穿插施工, 极大地加快了工期, 最终工程如期完成。

(3) 南块地库东侧穿越历史保护建筑基础的连通道采用静压钢管桩内灌混凝土等措施增加围护刚度, 结合多重止水措施, 以减小对历史保护建筑的影响。

本工程对历史保护建筑进行了沉降监测, 其监测结果表明:

(1) 在本工程中, 沉降变形主要发生在围护桩、墙施工期间以及历史保护建筑基础托换阶段, 今后类似工程应对该阶段的施工采取适当应对措施。

(2) 地库逆作施工阶段及连通道管幕施工、开挖阶段, 建筑沉降相对较小, 说明本设计采取的相关措

施如节点加固、设置临时支撑等是行之有效的。

(3) 建筑正对基坑的区域, 尤其是紧邻基坑阳角位置, 沉降变形明显较大。

(4) 邻近北块基坑的建筑沉降量大于南块, 这与北块基坑面积较大、施工周期较长有关, 符合“时空效应”理论。

参考文献:

- [1] 刘 征. 临近历史保护建筑的深基坑设计与施工[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(S2): 1653 - 1659. (LIU Zheng. Design and construction of deep excavations adjacent to conserved historical buildings[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(S2): 1653 - 1659. (in Chinese))
- [2] 钟 铮, 许 亮, 王祺国, 等. 紧邻保护建筑的深基坑逆作法设计与实践[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 249 - 255. (ZHONG Zheng, XU Liang, WANG Guo-qi, et al. Design and practice of top-down method in deep foundation pits very close to protected buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 249 - 255. (in Chinese))
- [3] 黄茂松, 朱晓宇, 张陈蓉. 基于周边既有建筑物承载能力的基坑变形控制标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2305 - 2311. (HUANG Mao-song, ZHU Xiao-yu, ZHANG Chen-rong. Deformation controlling criterion for excavation based on bearing capacity of adjacent buildings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2305 - 2311. (in Chinese))
- [4] 丁勇春, 程泽坤, 王建华, 等. 深基坑施工对历史建筑的变形影响及控制研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 644 - 648. (DING Yong-chun, CHENG Ze-kun, WANG Jian-hua, et al. Influence of deep excavation on deformation and control of adjacent historical building[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S0): 644 - 648. (in Chinese))
- [5] 应宏伟, 李 涛, 杨永文, 等. 深基坑隔断墙保护邻近建筑物的效果与工程应用分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1123 - 1129. (YING Hong-wei, LI Tao, YANG Yong-wen, et al. Effect and application of partition walls in protecting adjacent buildings from deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(7): 1123 - 1129. (in Chinese))

(本文责编 明经平)