

DOI: 10.11779/CJGE201810024

上海陆家嘴地区超深大基坑邻近地层变形的实测分析

刘 波^{1, 2}

(1. 上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200093; 2. 上海环境岩土工程技术研究中心, 上海 200093)

摘要: 结合上海国际金融中心超大体量卸载、超深开挖深度、超长降水周期的基坑工程实践, 通过对邻近地层变形的信息化监测, 研究上海陆家嘴地区超深大基坑在顺逆作同步交叉实施条件下邻近地层的时空位移特征, 初步探讨其变形机理和影响因素。研究表明: 重车动载对坑外地表沉降影响较大, 地墙隆起对 $0.1H$ 范围内的地表土体拖带上抬; 地表沉降主要受软弱土开挖和承压井降水影响凹槽分布, 纵向地表沉降空间效应明显, 受顺逆作同步交叉实施影响差异沉降突出; 坑外地层侧移角部效应明显, 形成水平方向的土拱作用, 并与系统刚度和土体硬度呈正比; 坑内地层强隆起范围远超开挖面下 1 倍挖深, 立柱隆起在第三和第五层土方开挖时发展速率明显较快; 坑外设计挖深上部地层以斜向下位移为主, 下部地层以斜向上位移为主; 基坑土方开挖阶段, 坑内地层卸荷隆起为主流动补偿为辅, 坑外设计挖深以上地层土体流动补偿和承压井降水固结沉降均显著, 而设计挖深以下地层以卸荷隆起为主兼有少量流动补偿。

关键词: 超深大基坑; 地层变形; 信息化监测; 时空位移特征

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)10-1950-09

作者简介: 刘 波 (1985-), 男, 山东济南人, 硕士, 工程师, 主要从事软土地区超深大基坑的信息化监测研究工作。E-mail: liubo@sgidi.com。

Measurement and analysis of deformation of adjacent strata super deep and large foundation pits in Lujiazui District of Shanghai

LIU Bo^{1, 2}

(1. Shanghai Geotechnical Investigations & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Geo-Environment, Shanghai 200093, China)

Abstract: Considering the building foundation pits of Shanghai International Financial Center with oversize unloading, ultra-deep excavation depth and super-long dewatering cycle of confined water and based on the informative monitoring of deformation of the adjacent strata for the super deep and large foundation pits, the time-space deformation features are studied for the super deep and large foundation pits by synchronous cross-excavation of the bottom-up and the top-down construction methods in Lujiazui District of Shanghai, and the mechanism and influencing factors are preliminarily discussed. It is shown that the surface ground settlement is obviously affected by the vehicle dynamical loads and the surface strata under the zone of $0.1H$ is uplifted by the rebound deformation of retaining walls. The distribution of the surface settlements seems to be grooved due to the excavation of soft soils and the dewatering of confined water. The spatial effects of the longitudinal settlements are uncommon and the differential deformation is prominently under the construction plan. The corner effect of the horizontal displacement in deep strata is strong, while the horizontal soil arch is formed and is proportional with the system stiffness and soil hardness. The influence zone of the powerful upheaval in the bottom can exceed a distance of about $1.0H$ from the excavation surface, where H is the final excavation depth, and the development rate of the column uplift is significantly faster at the third and fifth layers of soils at the excavation stage. The upper strata of the design excavation depth outside the wall are mainly oblique downward displacements, and the lower strata are mainly oblique upward ones. During the earth excavation, the upheaval in the bottom is mainly composed of unloading uplift and is ancillary by flow compensation of strata, and the upper strata of the design excavation depth outside the wall are significantly influenced by flow compensation of strata and consolidation settlement of the dewatering of confined water, while the lower strata are mainly caused by the upload rebound and a small amount of flow compensation.

Key words: super deep and large foundation pit; stratum deformation; informative monitoring; time-space deformation feature

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目 (13231201006); 上海市科学技术委员会工程技术研究中心建设专项 (15DZ2251300)
收稿日期: 2017-07-21

0 引言

21世纪以来,在用地愈发紧张的城市中心进行地下空间的开发和利用已成为一种必然,而地下空间的建设都不可避免的遇到深基坑工程^[1-2],特别是进行城市地铁、超高层建筑、大型交通枢纽、大型商业综合体等建设带来基坑工程的规模越来越大、深度越来越深、周边环境条件日趋敏感、施工周期越来越长、设计和施工繁复多样,深基坑工程在规模、深度和难度上都在经历跨越式发展,如虹桥综合交通枢纽基坑^[3]开挖面积达 $52 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、轨交四号线董家渡修复工程^[4]基坑挖深达40.9 m、上海中心大厦基坑工程^[5]周边环境极其复杂敏感。同时超深大基坑引起的环境效应问题日益突出:大体量的土方开挖卸载和超长时间的承压水降水必将引起周围土体位移场、应力场的较大变化,加之所处地层基本为饱和流塑或软塑黏性土,压缩性大、强度低、灵敏度高等不良地质土层,更易造成周边建筑的沉降倾斜和周边道路管线的不均匀沉降甚至开裂破坏,造成不良的社会影响^[6]。因此,掌握软土地区超深大基坑周边不同地层变形的时空分布规律和位移场,以采取相应的设计对策和施工措施来保护周边环境安全稳定成为一个迫切而重要的课题。许多学者结合相关深大基坑工程实践已对深基坑周围地层位移和坑内回弹等问题开展相关的实测研究^[6-9],但这些研究中基坑宽度通常不大、挖深未超25 m、未考虑坑外承压水位大幅下降对周边地层的影响等。本文以上海国际金融中心项目超深大基坑(宽度超150 m、普遍挖深超26.5 m、坑外承压水位降深近18 m、基坑开挖超37个月)为背景,通过对基坑周边地表沉降、坑底土体回弹、基坑邻近地层的隆沉和侧移等海量现场实测数据的分析,研究其在顺逆作同步交叉实施条件下不同地层的时空变形规律,并与国内外类似结果进行比较,初步探讨超深大基坑邻近地层的变形机理和影响因素。

1 工程简介

1.1 工程概况

上海国际金融中心项目位于上海市浦东新区竹园商贸地块,占地约 $5.5 \times 10^4 \text{ m}^2$,地上为3栋独立的22~32层超高层办公,地下设5层连通的地下室。基坑总面积约48860 m²,总延长950 m,实际开挖深度约26.5~27.9 m,采用“前阶段整体逆作,后阶段塔楼先顺作、纯地下室后逆作”的围护方案。施工流程如下:完成工程桩、地墙及一柱一桩施工后,依次浇筑形成地下室顶板和地下一层结构(含顺作区第一、二

道支撑),其后塔楼顺作区往下开挖(纯地下室区域土方不动),待其地下一层结构完成后进行纯地下室区域的土方开挖及地下结构的逆作施工。金融剧院各道支撑随纯地下室逆作水平结构一起施工,至底板施工完成后再向上顺作施工各层地下结构。基坑平面布置图见图1,基坑开挖实景照片见图2。

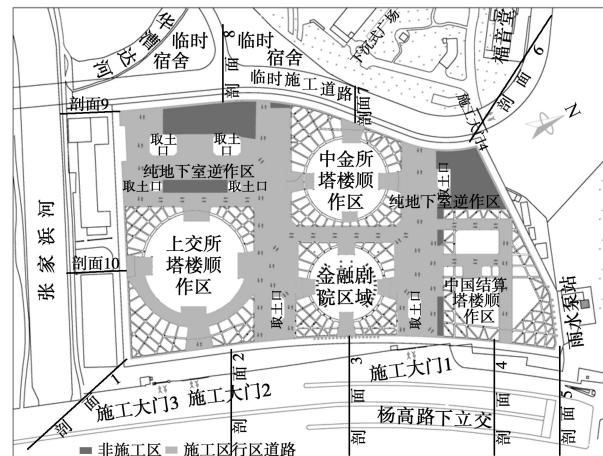


图1 基坑平面图及监测剖面布置

Fig. 1 Layout of excavation and monitoring section of deformation



图2 基坑工程照片

Fig. 2 In-situ photo of foundation pits

基坑周边环境较为复杂,东面为杨高南路及其下立交,下立交道路宽约35 m、深约0~7 m,采用钻孔灌注桩结合锚杆作抗拔桩,基坑外墙距下立交边线约35 m,且道路下埋有13条市政管线,距基坑外墙最近约6 m;南面为张家浜河,距基坑外墙最近约40 m;西面华漕达河与基坑外墙最近约25 m,西北角的福音堂(2~3F)距基坑外墙约72 m;东北角为下立交雨水泵房,其中管理用房采用天然基础,距基坑外墙最近约8 m,进水闸门井及泵房采用沉井结构(埋深3~13 m),距基坑外墙最近约21 m,受施工影响较大。

1.2 围护结构

基坑周边地墙按两墙合一设计(厚1.2 m/深46 m),共207幅;基坑内部设置1.0 m厚临时隔断地墙(深45 m),共100幅;地墙外侧设等厚度水泥土搅拌墙隔水帷幕(TRD/厚0.7 m),深度不小于53 m(进

入⑦₂粉砂层不小于 11.6 m)。上交所、中金所塔楼及金融剧院区域设置 5 道钢筋混凝土环撑体系, 中国结算塔楼区域设置 5 道钢筋混凝土对撑体系, 纯地下室逆作区以结构梁板作为水平支撑, 围护结构剖面见图 3。

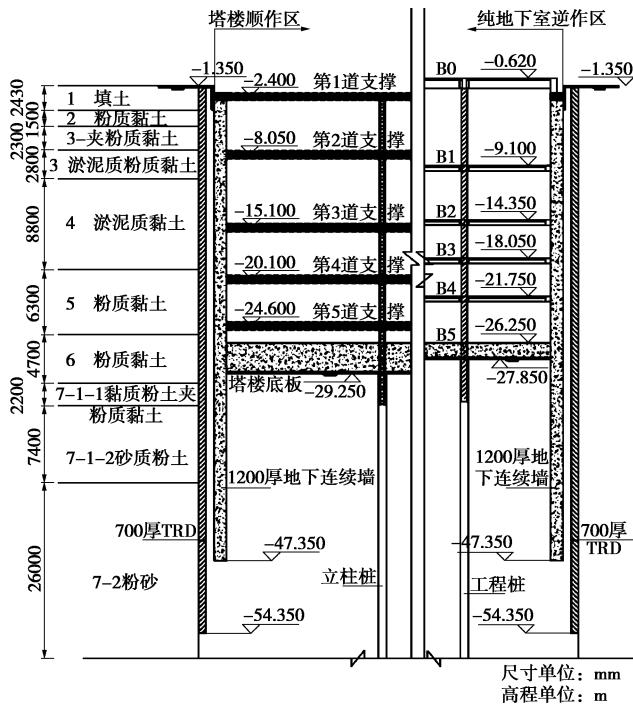


图 3 围护结构剖面

Fig. 3 Section of bracing and retaining structures

1.3 工程地质水文条件

本场地属上海地区正常地层分布区，主要由饱和黏性土、粉性土和砂土组成，成层分布。基坑中浅层分布有较厚的③淤泥质粉质黏土、④淤泥质黏土和⑤粉质黏土，呈现高压缩性、高含水率、土质软弱、具有明显的流变和触变特性，物理力学性质相对较差，尤其在外部荷载作用下土体强度极易降低；基坑深部为层厚较大、物理力学性质较好的砂层，但基坑局部位于⑦₁₋₁层黏质粉土夹粉质黏性土的顶面附近，透水性相对较好，基坑开挖时在动水压力作用下易产生流砂、管涌、塌方等现象；地下水据埋藏条件分为浅层潜水及承压水，坑外潜水水位变化不大，埋深约为1.2~1.9 m，砂层分布有第⑦层和第⑨层承压含水层因缺失第⑧层黏性土而互相连通，形成总厚度超100 m的复合承压含水层，含水率丰富且渗透较好，勘察期间测的第⑦层承压水头埋深约为7.1~10.4 m。

2 现场监测及施工工况

2.1 现场监测

对基坑坑外地表沉降、地层的隆沉和侧移及坑底地层的回弹进行科学的信息化监测，采用水准仪监测地表沉降，编号为剖面1~10，具体位置如图1所示，其中剖面7，8，10分别在距离基坑地墙3，6，10，

20 m 处布设 4 组深层土体侧移和分层沉降监测断面, 具体见图 4, 其中利用全站仪监测土体管顶水平位移, 测斜仪监测土体深层侧移, 分层沉降仪和水准仪监测深层土体隆沉和坑底土体回弹变形。

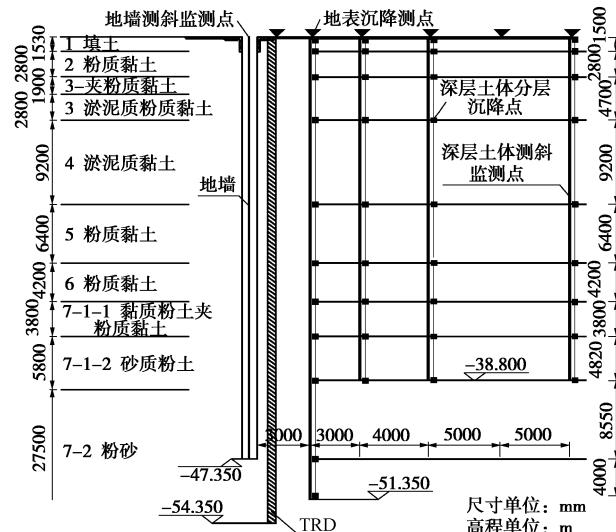


图 4 坑外土体深层变形监测点布置图

Fig. 4 Layout of monitoring points for deformation

2.2 施工工况

基坑监测数据采集工作从 2014 年 2 月 24 日基坑整体逆作第 1 层土方开挖至 2017 年 2 月 26 日金融剧院地下结构基本完成结束, 历时近 37 个月, 概分为 12 个工况 (工况 1~2 为整体逆作阶段/工况 3~7 为塔楼顺作阶段/工况 8~11 为纯地下室逆作阶段/工况 12 为金融剧院地下结构顺作阶段), 详见表 1。

表1 施工工况

Table 1 Construction cases

工况	塔楼区	纯地下室挖深	临时支	梁板结	工期	承压水头	
	开挖深度/m	/m	撑施工	构施工	/月	埋深/m	坑内
1	1.4	6.0	1道	B0	1.2	5.1	5.1
2	7.1	9.6	2道	B1	1.5	7.1	6.1
3	14.2	9.6	3道	—	1.1	8.1	7.9
4	19.1	9.6	4道	—	1.0	13.1	9.1
5	23.9	9.6	5道	—	1.2	20.8	13.1
6	27.9	9.6	底板	—	4.0	28.9	17.6
7	—	9.6	5~3道	—	4.3	16.7	11.6
8	—	15.0	2道	B2	2.4	17.5	11.7
9	—	18.7	1道	B3	1.7	19.2	11.9
10	—	22.4	—	B4	3.3	23.1	12.3
11	—	26.5	—	底板	3.2	29.5	15.0
12	金融剧院区域	地下结构顺作施工			9.3	—	9.4

3 实测数据分析

3.1 地表沉降

图 5 给出采用开挖深度无量纲化处理后坑外横向地表沉降分布。

王卫东等^[10]在总结 35 个上海软土地区深基坑数

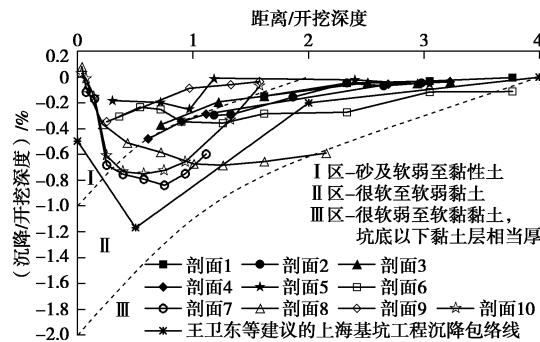


图 5 采用开挖深度进行无量纲化的墙后地表沉降分布

Fig. 5 Distribution of ground settlement normalized by depth

据后指出: 地表最大沉降介于 $0.1\%H\sim 0.8\%H$, 均值为 $0.38\%H$, 影响范围不超过 $4H$, 且距离围护墙 $0\sim 1H$ 范围内为沉降最大区域, 而在 $1H\sim 4H$ 范围为沉降过渡区域。本工程实测数据分为两类: 第一类为东侧和南侧剖面(剖面 1~5, 9, 10), 能够较好的验证上述结论, 最大沉降位于 P10 剖面坑外约 $0.57H$ 处, 最大值约 $0.77\%H$, 影响范围基本在 $4H$ 以内; 第二类剖面均与王卫东等^[10]的结论有所偏差, 沉降最大值及影响范围均有所扩大, 最大沉降位于 P7 剖面中坑外约 $0.75H$ 处, 最大值约 $0.85\%H$, 影响范围上来说, 剖面 8 沉降在坑外 $2.3H$ 处沉降仍有 $0.6\%H$ (最大值的 86%), 剖面 6 沉降在坑外 $4.0H$ 处仍有 $0.12\%H$, 且在靠近基坑地墙附近的测点呈现一定的隆起现象。原因可能如下: ①基坑西侧为新建临时道路, 新加道路附加荷载造成地面沉降过大; ②基坑西侧重车频繁碾压造成道路下土体结构性有所降低; ③基坑东侧为杨高南路原有市政道路和下立交地下结构, 南侧为张家浜河道护岸, 均对土体变形有一定的有利作用。

Peck^[11]通过收集诸多地区的基坑实测数据提出图 5 的坑外地表沉降曲线, 根据土层和支撑条件将墙后地表沉降分为 3 个区域, 王卫东等^[10]在统计分析 35 个上海深基坑数据后给出图 5 的最大地表沉降预测包络线。对比分析看出: 基坑角部的沉降最大值基本落在 Peck 的 I 区内, 基坑中部的沉降最大值基本落在 II 区内, 基坑西面临时道路侧的剖面 6、8 的远端测点位于 II 区和 III 区的交界处, 且落在王卫东等^[10]建议的沉降包络线外, 另外王卫东等^[10]建议的沉降包络线还未考虑超深大基坑地墙隆起对临近土体的上抬影响。因此, 除去频繁的施工车辆动载对施工便道造成的沉降较大外, 本基坑在超长时间承压井降水、超深开挖深度、超长施工周期的叠加下, 坑外沉降基本落在王卫东等^[10]建议的沉降包络线内, 说明本基坑所采用的围护结构设计、信息化施工和降水使地表变形得到有效控制。

图 6 给出了基坑南侧剖面 10 (位于上交所塔楼顺作区基坑中间位置, 且无施工车辆行驶) 在各施工工况下坑外横向地表沉降随与地墙距离的变化曲线。由

图 6 可知, 在基坑整体逆作阶段地表沉降相对较小, 基本在 10 mm 以内; 在塔楼顺作阶段受土方开挖卸载和承压井降水双重影响地表沉降加速, 第 3~5 层土方开挖期间地表沉降增量基本保持在 35 mm 左右, 且最大值所在位置随开挖深度增加逐渐远离地墙最终稳定在距离地墙 16 m 左右, 而在第六层土方开挖和塔楼底板施工和养护期间, 沉降增量最大值增大到近 60 mm, 可能与施工周期相对较长、承压水降深最深有关; 在塔楼顺作阶段的地下结构施工期间, 承压井持续降水 (坑外承压水头维持在埋深 11.6 m 左右), 沉降增量最大值约为 20 mm, 沉降速率约为 4.7 mm/月; 在纯地下室逆作区施工阶段, 坑外承压水头维持在埋深 11.7~15.0 m 左右, 沉降增量最大值约为 30 mm, 沉降速率约为 2.8 mm/月; 在金融剧院顺作区地下结构施工阶段, 坑外承压水头维持在埋深 9.4 m 左右, 沉降增量最大值约为 10 mm, 沉降速率约为 1.1 mm/月。可以看出, 坑外地表沉降主要受基坑软弱土开挖和承压井降水双重影响呈梯形凹槽分布, 地表沉降速率随承压水位降深的增大而增大, 而在承压水位相对稳定后地表沉降速率随时间延长而减小。

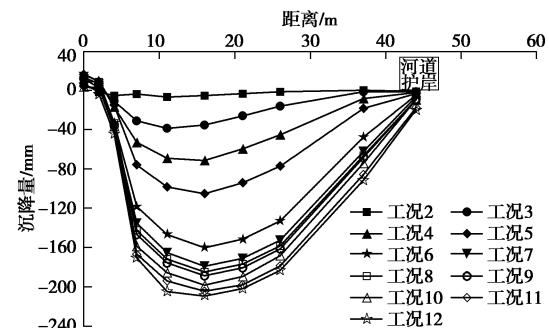


图 6 剖面 10 坑外横向地表沉降随与地墙距离的变化曲线

Fig. 6 Distribution of ground settlement for section No. 10 normalized by excavation depth at different stages

图 7 给出了各施工工况下基坑东侧(杨高南路侧)距离地墙约 16 m 的坑外纵向沉降分布。由图 7 可知, 纵向地表沉降具有明显的空间效应, 沉降最大值基本位于基坑分区的中部附近, 且角部沉降明显小于中部。受施工方案制约, 塔楼顺作区完成后 (工况 7) 实测纵向沉降大致呈 W 型, 地表差异沉降突出, 金融剧院地下结构完成后大致演变成马鞍形, 地表差异沉降有一定消减。另外, 金融剧院顺作区在工况 12 地下结构施工期间, 虽无土方开挖, 但坑外地表土体还有较大沉降 (20~25 mm), 原因可能是金融剧院区域持续承压水减压降水、材料临时堆放、施工车辆碾压及杨高南路新排雨水等地下管线施工等。因此, 在顺逆作同步交叉实施下的超深大基坑, 应特别重视控制建筑物和地下管线的纵向不均匀沉降, 同时尽量缩减承压水减压降水周期, 合理调整场地布置和重车行走线路,

密切关注邻近工程施工进展, 确保周边环境安全。

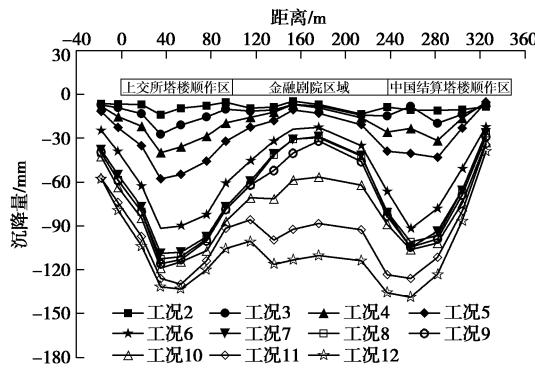


图 7 基坑东侧纵向地表沉降在各工况下变化曲线

Fig. 7 Longitudinal distribution of surface settlement in east of excavation at different stages

3.2 坑外土体深层侧移

图 8 给出地墙及距地墙约 3 m 处土体的深层侧移最大值的空间效应变化规律。由图 8 可知: 各塔楼分区坑外土体深层侧移呈现明显的角部效应, 角部的土体深层侧移明显小于中部土体侧移; 各塔楼分区角部和纯地下室区域的土体深层侧移明显小于相应地墙侧移; 各塔楼分区中间区域的土体深层侧移与地墙侧移的差异性不大, 甚至大于地墙侧移。原因可能是坑外土体受基坑平面形状和支撑刚度影响形成水平方向的土拱效应, 系统刚度越大, 土拱效应越明显。

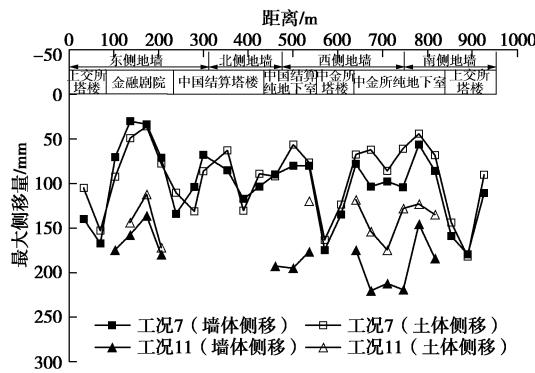


图 8 地墙及坑外土体深层侧移的空间效应变化曲线

Fig. 8 Longitudinal distribution of space effect for horizontal displacement in retaining walls and deep strata

图 9 给出了纯地下室逆作区剖面 8 处坑外土体和相应地墙侧移在各施工工况下沿深度的变化曲线。可以看出: 在基坑整体顺作和塔楼顺作阶段(工况 2~7)坑外土体和墙体的侧移基本吻合; 在纯地下室逆作阶段坑外土体侧移比墙体侧移要小, 且两者的差异随开挖深度的增加而逐渐增大, 尤其是纯地下室逆作区第 5~6 层土方开挖期间差异明显增大; 从竖向来讲, 纯地下室底板浇筑养护完成后, 23 m 埋深以下深部土体(第 6~7 层土)的差异明显大于中上部土体。说明坑外土体水平方向土拱作用主要发生在基坑深层土体开挖期间, 随开挖深度的增加越加明显, 对深层土体

的效果明显优于中上部土体。原因可能是深层土体硬度较大, 自身抗剪能力较强, 土拱效应较明显。

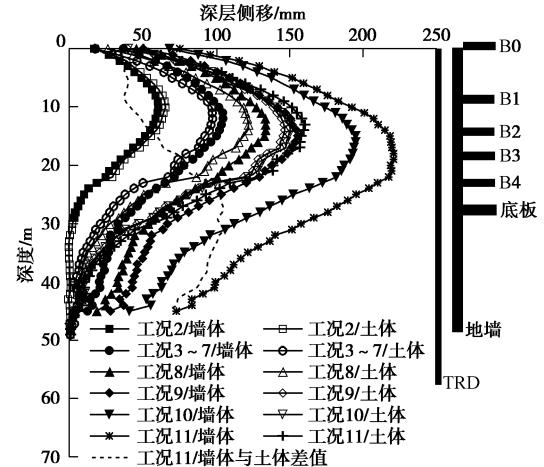


图 9 纯地下室区域坑外土体和地墙在各个工况下的侧移对比

Fig. 9 Horizontal displacements in retaining walls and deep strata of pure basement area at different stages

图 10 为塔楼顺作区地下结构完成时剖面 7, 10 距地墙不同水平距离的土体侧移随深度变化。总体而言, 塔楼区基坑开挖对周边环境的影响程度随距离开挖区域距离的增大而减少, 在竖直面上土体从两头小中间大的鼓胀型变化为两头小中间大的双折线形, 与应宏伟等^[12]的有限元分析结果和应宏伟等^[13]的杭州某深大基坑的实测数据结论较为吻合。另外, 距离地墙 20 m 处的土体侧移最大值仍超 50 mm (约为总量的 30%), 在竖直面上距离地墙 6 m 的土体侧移基本在基坑开挖面有明显收敛, 而距离地墙 10 m 的土体在第 5 道临时支撑处就有明显收敛, 证明软土地区超深大基坑顺作开挖的深层土体的影响范围远大于 20 m, 且随距离地墙越远其在竖直面上的收敛深度不断缩减。

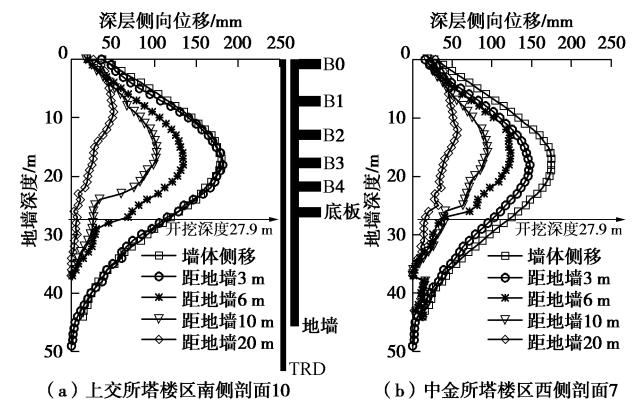


图 10 塔楼区域距地墙不同距离土体的实测深层侧移

Fig. 10 Horizontal displacements in deep strata of main building area at different distances from excavation

图 11 为纯地下室逆作区底板完成时剖面 8 距地墙不同水平距离的土体侧移随深度变化。由图 11 可知,

纯地下室逆作区基坑开挖对周边环境的影响程度随离开挖区域距离的增大而减少, 在竖直面上土体基本保持鼓胀型的开挖特征, 但侧移最大值位置不断远离最终开挖面, 可能与纯地下室逆作区基坑开挖历时较长(37个月), 而塔楼顺作区基坑历时较短(15个月), 软土随时间蠕变作用较大引起。另外, 距地墙20 m处的土体侧移最大值仍接近110 mm(约为总量的67%), 在竖直面上离地墙6 m的土体侧移无明显收敛, 而在离地墙10 m的土体在基坑开挖面才有明显收敛。结合图10可知, 在顺逆作同步交叉实施下纯地下室逆作区基坑对邻近地层的影响比塔楼顺作区基坑更深、更远、更大。因此, 减少超深大逆作法基坑施工时间, 加快施工进度, 对控制其对周边环境的影响是巨大的。

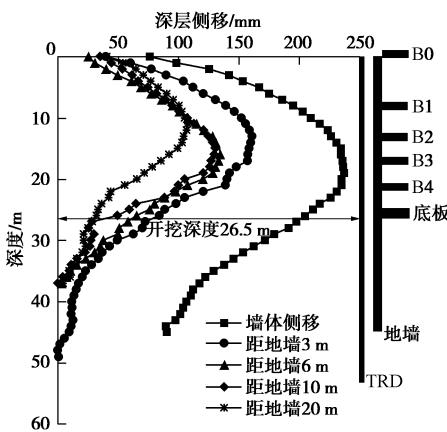


图 11 纯地下室区域距地墙不同距离土体的实测深层侧移
Fig. 11 Horizontal displacements in deep strata of pure basement area at different distances from excavation

3.3 坑外土体分层沉降

图12给出了塔楼顺作区(工况7完成)距地墙不同距离深层土体的实测分层沉降。

由图12可以看出: 埋深0~9 m的土体沉降非常大, 最大值接近40 cm(剖面10埋深1.5 m), 可能受新建办公楼基础附加荷载影响, 而剖面7最大沉降则发生在距地墙20 m地表处, 可能受重车频繁碾压影响; 埋深9~18.2 m的土体沉降有一定减少, 但最大仍有12~15 cm, 且基本发生在距离地墙10 m处; 埋深18.2~24.6 m的土体沉降明显较小; 埋深28.8 m及其下土体表现出隆起, 且在埋深28.8~46 m范围内隆起量随深度有一定的增加(约40 mm), 而在46 m以下土体隆起增量不大, 甚至有一定减小。因此, 本基坑顺作施工时坑外土体竖向位移空间分布规律为: 基坑浅部土体(埋深10 m以上)受地面附加荷载和重车行驶等施工因素影响较大; 基坑设计挖深以上主要表现为土体沉降, 随土体埋深增加沉降减小, 设计挖

深以下主要表现为土体隆起, 并随土体埋深增加隆起量逐渐增大, 但存在隆起收敛深度。

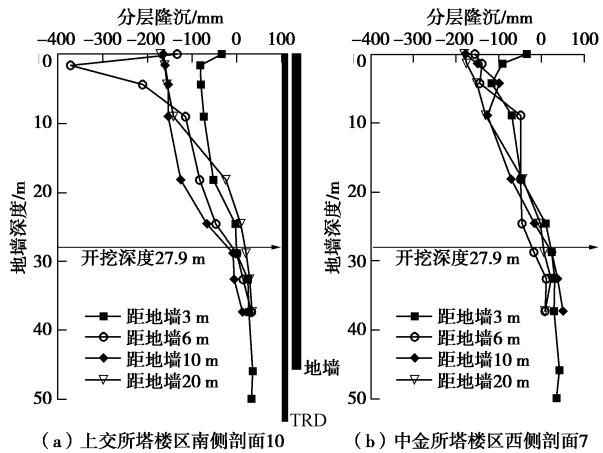


图 12 塔楼区距地墙不同距离土体的实测分层沉降

Fig. 12 Vertical displacements in different strata of main building area at different distances from excavation

图13给出塔楼顺作区剖面10距地墙20 m处深层土体的实测隆沉历时曲线。可知: 在整体逆作阶段, 受坑内土方开挖卸载影响, 距基坑20 m处深层土体主要表现为土体隆起(20 mm以内); 在塔楼第三至五层土方开挖期间, 伴随承压井降水试验和正式降水, 埋深9 m以上土体表现为沉降, 埋深9 m以下表现为隆起; 在塔楼第六层土方开挖及底板施工期间, 随挖深增加和坑外承压水的进一步下降, 埋深18.2 m以上土体沉降速率明显加大, 而埋深18.2 m以下表现为隆起(50 mm以内); 在塔楼地下结构顺作期间, 坑外承压水位虽有一定的回升, 但受坑外土体流变影响, 坑外不同埋深的土体均表现为沉降。综上可知, 超深大基坑顺作施工时坑外土体竖向位移受到坑内土体卸荷、坑外土体变形及承压井减压降水叠加影响, 不同深度土层表现出一定的差异甚至相反趋势, 相同深度的测点在不同工况下表现出一定不同, 时间效应明显。

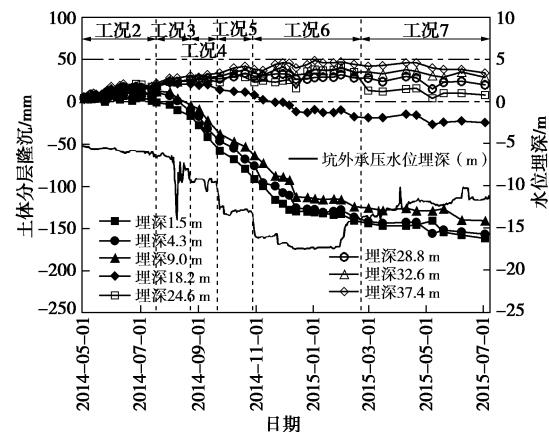


图 13 塔楼区距地墙20 m的土体的实测分层隆沉历时曲线
Fig. 13 Variation of vertical displacements in different strata of main building area at 20 meters from excavation

图14给出了塔楼顺作区剖面10距地墙不同距离深层土体隆沉在地下结构完成时的变化曲线。可知：埋深9 m以上土体沉降很大，距坑边10~20 m内沉降均超150 mm，呈现明显的半梯形沉降槽；埋深18.2~24.6 m的土体沉降有一定减少（70~120 mm），发展为三角形沉降槽，沉降最大点距坑边10 m；埋深28.8~32.6 m的土体隆沉很小，沉降最大点距坑边10 m，发展为三角形隆沉槽（两端隆起，中间沉降）；埋深37.4 m以下的土体以隆起为主，发展为三角形隆起槽（两端隆起大，中间隆起小）。总体来讲，本基坑距地墙20 m内坑外深层土体横向的空间规律为：基坑设计挖深以上土层由浅部粉质黏土或淤泥质黏土明显的半梯形沉降槽向中部稍硬的粉质黏土的三角形沉降槽演变，设计开挖深度以下土层由中下部砂质粉土的三角形隆沉槽向深部粉砂层的三角形隆起槽过渡；浅部土层（9.0 m以上）在距地墙20 m竖向变形基本未收敛，而中部及深部土层（18.2 m以下）有明显收敛。

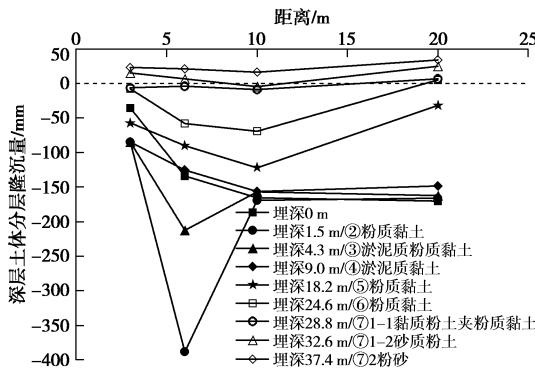


图14 剖面10坑外深层土体分层隆沉随与地墙距离的变化

Fig. 14 Distribution of vertical displacements in different strata for section No. 10 normalized by excavation depth

3.4 坑内土体分层回弹

图15为塔楼顺作区基坑挖至坑底时，埋设于坑底的5组分层回弹实测得到的土体回弹变形曲线。可以看出：超深大基坑塔楼顺作时坑内土体回弹变形较大，在埋深33.5 m处回弹最大值接近140 mm；开挖面下10 m内土体随深度增加稍有衰减，但开挖面下10~30 m的土体回弹量仍有80~120 mm，未见明显收敛。因此，本基坑坑内土体强回弹区远超开挖面下1倍挖深，远大于邓指军等^[14]通过室内 K_0 试验建议工程应用强回弹区为0.25~0.5倍的基坑挖深的规律。

图16为塔楼顺作区坑内典型立柱隆起变形的历时曲线。可以看出：在整体顺作阶段，立柱随土方开挖卸荷快速隆起，之后受重车行驶碾压有一定沉降；在塔楼第3~4层土方开挖阶段，立柱隆起明显，但受承压井群井抽水试验影响有一定沉降；在塔楼第五层土方开挖阶段，虽受承压水减压降水和4道水平支撑约束，立柱隆起却有加速趋势，此时立柱最大隆起已

近60 mm；在塔楼第6层土方开挖及底板施工阶段，立柱隆沉受土方开挖卸荷、承压井减压降水、底板施工加载等影响，呈明显锯齿型变化，增量不大，并在土方开挖完成后测得最大隆起近70 mm。因此，本基坑立柱隆起主要受土方开挖卸载、承压水埋深升降、底板及地下结构施工加载等影响，不同施工阶段变化规律明显不同，并在第三层和第五层土方开挖阶段发展速率明显较快，建议加快卸荷施工，尽早完成垫层和水平支撑，减小立柱隆起和控制其进一步发展。

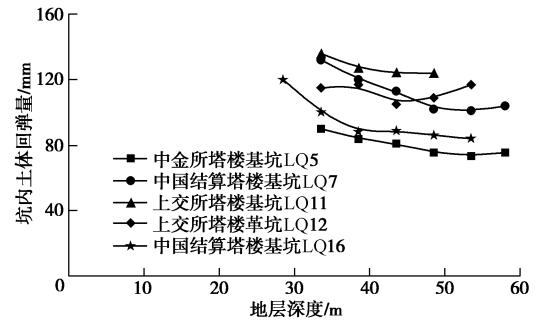


图15 塔楼顺作区坑内土体回弹实测变形

Fig. 15 Monitoring upheaving data of bottom ground

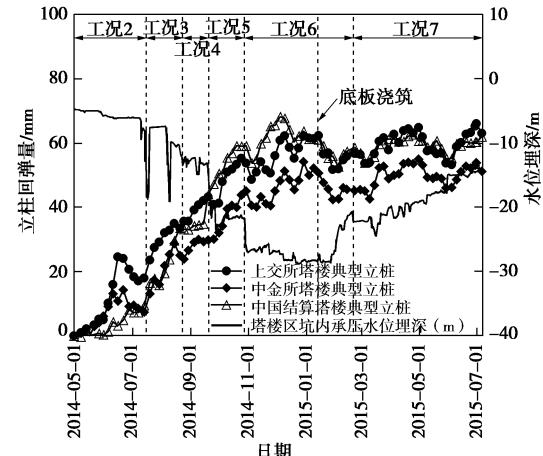


图16 塔楼顺作区坑内立柱隆起实测历时变化

Fig. 16 Variation of monitoring upheaving data of piles

3.5 坑外土体位移场和变形机理探讨

图17, 18分别为选择塔楼顺作区剖面10和纯地下室逆作区剖面8距坑边等距的坑外深层侧移和分层隆沉监测数据，将不同深度土体的水平和垂直位移加以量化，分别得到塔楼区地下结构完成和纯地下室区域底板浇筑养护完成时邻近地层的位移矢量场，矢量夹角为与水平向角度，向下为负，向上为正。

由图17, 18可得本基坑工程坑外邻近地层变形规律如下：①坑外地层以设计挖深为界，位移趋势截然不同，且上部地层的位移量明显大于下部，上部地层以斜向下位移为主，随深度增加沉降趋势逐渐减弱而向坑内水平流动逐渐增强；下部地层以斜向上位移为主，随深度增加位移量逐渐衰减，土体向坑内水平流动减弱且隆起趋于收敛；②设计挖深以上的浅部地

层(埋深10 m以上),受施工荷载影响较大,距坑边5~20 m内的土体沉降明显大于侧移,中部地层侧移逐渐大于沉降,位移量随距坑边距离的增加明显衰减,竖向上随地层埋深增加先增后减,在0.6~0.7H(H为设计挖深)测得最大值;③设计挖深以下地层,随距基坑距离的增加侧移明显衰减,而隆起未明显减小,变形以隆起为主;④距塔楼顺作区坑边20 m处的地层侧移明显收敛而隆起未明显收敛,距纯地下室逆作区坑边20 m处的地层侧移和隆沉均未明显收敛,其对邻近地层的影响远大于20 m;⑤在同步顺逆作交叉实施下,纯地下室逆作区的挖深虽比塔楼顺作区略小,但对邻近地层的影响远大于塔楼顺作区,特别是设计挖深以上的中部地层侧移差别较大,原因可能是纯地下室逆作区施工工期较长土体流变作用较大。

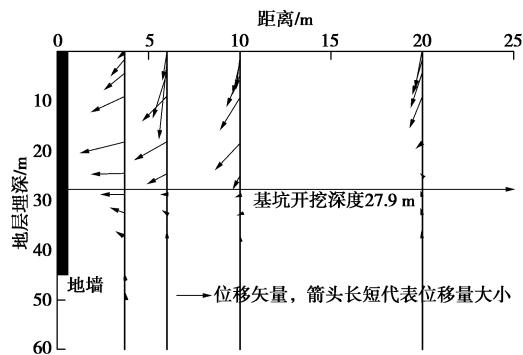


图17 塔楼顺作区剖面10坑外不同深度土体位移矢量图

Fig. 17 Displacement vectors of different strata for section No. 10

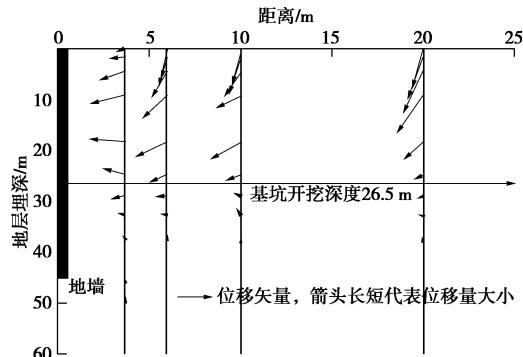


图18 纯地下室逆作区剖面8坑外不同深度土体位移矢量图

Fig. 18 Displacement vectors of different strata for section No. 8

根据陆家嘴地区的工程及水文地质条件,坑外土体以黏性土层为主,含水率、触变性和灵敏度高、时空效应显著,而且地层缺失第⑧层黏性土使第⑦层和第⑨层连通形成总厚超100 m的复合承压含水层,止水帷幕通常无法隔断此层。因此,在不同施工阶段、不同地层、距基坑不同距离的时间与空间场内,陆家嘴地区超深大基坑邻近地层变形机理探讨如下:

(1) 土方开挖阶段坑内坑外地层变形趋势不同:坑内地层卸荷隆起显著流动补偿较弱,距地墙较近区域以隆起为主辅以少量水平位移,而距地墙较远区域

几乎全为隆起;坑外设计挖深以上地层,土体流动补偿和承压井降水固结沉降均显著,距地墙较近区域以补偿为主,沉降和向坑内流动变形明显,而距地墙较远区域以降水固结和施工荷载影响为主,沉降显著;坑外设计开挖深度以下地层以卸荷隆起为主兼有少量的流动补偿,距地墙20 m范围内回弹显著且未见明显收敛,土方开挖卸载的影响范围可能远大于承压井降水。

(2) 在顺作法基坑底板及地下结构施工阶段,坑内土体卸荷隆起受承压水超深降水影响明显减弱,距地墙较近区域受结构自身刚度和荷载增量作用,变形基本稳定,而距地墙较远区域受局部深坑土方开挖、承压水水头升降、结构施工加载三重影响呈锯齿型隆沉变化;坑外设计挖深以上地层,土体流动补偿和卸荷隆起较弱,距地墙较近区域以降水固结为主,沉降发展缓慢、侧移少量发展,而距地墙较远区域由于地层移动使土体扰动产生逐渐收敛的固结沉降;坑外挖深以下地层受未完全停止的承压水减压降水影响产生少量沉降。

4 结 论

(1) 地表沉降主要受软弱土开挖和承压井降水影响凹槽分布,重车频繁行驶对其影响范围超4H,而地墙隆起对0.1H范围内的地表拖带上抬;纵向地表沉降空间效应明显,最大值基本位于基坑分区的中部,且受顺逆作同步交叉实施影响差异沉降突出。

(2) 超深大基坑的空间作用导致坑外地层侧移角部效应明显,受基坑平面形状和支撑刚度影响形成土拱效应;土拱效应主要体现在深层土体开挖期间,且土体硬度越大越明显;基坑施工对邻近地层的影响随距坑边距离的增大而减少,范围远大于20 m。

(3) 坑外土体竖向位移受到坑内土体卸荷、坑外土体侧移及承压井减压降水影响,时间效应明显,设计挖深以上表现为土体沉降,设计挖深以下主要表现为土体隆起;地层沉降槽在设计挖深以上由半梯形向三角形演变,而设计挖深以下由隆沉槽向深部隆起槽过渡;浅部地层在距地墙20 m处竖向变形基本未收敛,而中部及深部地层收敛明显。

(4) 超深大基坑坑内土体强隆起范围远超开挖面下1倍挖深;立柱隆起主要受土方开挖卸载、承压水水头升降、底板及地下结构施工加载等影响,并在第3层和第5层土方开挖阶段发展速率明显较快,建议加快卸荷施工尽早完成垫层和水平支撑的施工。

(5) 坑外地层以设计挖深为界,上部地层以斜向下位移为主,下部地层以斜向上位移为主,且上部地层的位移量明显大于下部;设计挖深以上浅部地层

沉降明显大于侧移, 而中部土层侧移逐渐大于沉降; 设计挖深以下地层以隆起为主; 逆作区对邻近地层的影响大于顺作区, 原因可能是工期较长土体流变较大。

(6) 超深大基坑土方开挖阶段, 坑内地层卸荷隆起为主流动补偿为辅; 坑外设计挖深以上地层, 土体流动补偿和承压井降水固结沉降均显著, 横向随距地墙远近由补偿流动为主发展为土体固结和附加荷载影响为主; 坑外设计挖深以下地层卸荷隆起为主兼有少量流动补偿, 距地墙 20 m 处回弹显著且未见明显收敛, 土方开挖卸载的影响可能远大于承压井降水。

参考文献:

- [1] 郑刚, 朱合华, 杨光华. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 1–24. (ZHENG Gang, ZHU He-hua, YANG Guang-hua. Control of safety of deep excavations and underground engineering and its impact on surrounding environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(6): 1–24. (in Chinese))
- [2] 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. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese))
- [3] 吴念祖. 上海虹桥综合交通枢纽超深大基坑工程建设与实践[J]. 建筑施工, 2010, 32(7): 609–610. (WU Nian-zu. Construction and practice of super deep and large foundation pit of Shanghai Hongqiao integrated transportation hub[J]. Building Construction, 2010, 32(7): 609–610. (in Chinese))
- [4] 瞿成松. 上海地铁四号线董家渡修复段基坑降水实录[J]. 岩土工程学报, 2010(增刊 2): 339–342. (QU Chen-song. Dewatering of the Dongjiadu tunnel restoration on Shanghai metro line 4[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(S2): 339–342. (in Chinese))
- [5] 贾坚, 谢小林, 等. “上海中心”圆形基坑明挖顺作的安全稳定和控制[J]. 岩土工程学报, 2010(增刊 1): 370–376. (JIA Jian, XIE Xiao-lin, et al. Safe and stability control of circular foundation pit of Shanghai Tower[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(S1): 370–376. (in Chinese))
- [6] 贾坚, 谢小林. 上海软土地区深大基坑的卸荷变形及控制[J]. 岩土工程学报, 2008(增刊 1): 376–380. (JIA Jian, XIE Xiao-lin. Deformation and control measures of deep and large foundation pits in Shanghai soft clay area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008(S1): 376–380. (in Chinese))
- [7] 吕少伟. 上海地铁车站施工周围土体位移场预测及控制技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2001. (LÜ Shao-wei. Prediction and controlling of displacement surrounding Shanghai metro station[D]. Shanghai: Tongji University, 2001. (in Chinese))
- [8] 李亚. 基坑周围土体位移场的分析与动态控制[D]. 上海: 同济大学, 1999. (LI Ya. Analysis of displacement field around the foundation pit and dynamic control[D]. Shanghai: Tongji University, 1999. (in Chinese))
- [9] 杨骏, 李夫杰, 杨育僧. 软土地区地铁车站深基坑施工坑外土体位移规律研究[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(5): 542–547. (YANG Jun, LI Fu-jie, YANG Yu-seng. Research on the soil displacement outside the construction pit of deep foundation pit in subway station in soft soil area[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(5): 542–547. (in Chinese))
- [10] 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(11): 1659–1666. (WANG Wei-dong, XU Zhong-hua, WANG Jian-hua. Statistical analysis of characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011(11): 1659–1666. (in Chinese))
- [11] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [C]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art-Volume. Mexico City, 1969: 225–290.
- [12] 应宏伟, 王奎华, 谢康和, 等. 杭州解百商业城半逆作法深基坑支护设计与监测[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 79–83. (YING Hong-wei, WANG Kui-hua, XIE Kang-he, et al. Design and monitoring of deep excavation with semi-top-down method in Hangzhou Jiebai commercial building[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 79–83. (in Chinese))
- [13] 应宏伟, 杨永文. 杭州深厚软黏土中某深大基坑的性状研究[J]. 岩土工程学报, 2011(12): 1838–1846. (YING Hong-wei, YANG Yong-wen. Characteristics of a large and deep soft clay excavation in Hangzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011(12): 1838–1846. (in Chinese))
- [14] 邓指军, 贾坚. 地铁车站深基坑卸荷回弹影响深度的试验[J]. 城市轨道交通研究, 2008(3): 52–55. (DENG Zhi-jun, JIA Jian. On unloading resilience depth in deep station foundation pit[J]. Urban Mass Transit, 2008(3): 52–55. (in Chinese))