

# 超大型深基坑半逆作法设计与实践

刘 征<sup>1</sup>, 罗志琪<sup>2</sup>

(1. 上海现代建筑设计集团申元岩土工程有限公司, 上海 200011; 2. 上海浦东建筑设计研究院有限公司, 上海 201204)

**摘要:** 通过某典型超大面积深基坑半逆作法施工的具体情况, 介绍了此类项目采用框架逆作施工法的关键因素和设计要点以及相关的变形控制措施。同时, 通过后期监测成果分析了基坑最大变形位置和变形分布规律。本项目相关控制点和设计方案实施效果对类似项目有较大的借鉴意义。

**关键词:** 超大型深基坑; 半逆作法; 关键因素; 设计与施工

中图分类号: TU463 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0507-05

作者简介: 刘 征(1979-), 男, 硕士, 主要从事深基坑工程的设计与研究工作。E-mail: lzsagacity@yahoo.com.cn。

## Design and construction of ultra-large deep excavations

LIU Zheng<sup>1</sup>, LUO Zhi-qi<sup>2</sup>

(1. Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd. of Shanghai Xiandai Architectural Design Group, Shanghai 200011, China; 2. Shanghai

Pudong Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201204, China; )

**Abstract:** According to the details of a typical ultra-large deep excavation project, the key points in the design and construction of the semi-top-down construction method and some deformation-control measures in construction are introduced. In addition, the positions of the maximum deformation and the deformation rules are discussed according to the monitoring data. The related key points and the results of the design can be referred for similar projects.

**Key words:** ultra-large deep excavation; semi-top-down construction method; key point; design and construction

## 0 引言

随着城市地下空间的大规模开发和高层建筑的加速建设, 深基坑工程设计方法和施工工艺的创新已成为当前基坑工程发展的一个迫切需求。对大面积深基坑, 传统的分块顺作法施工目前已经很难满足业主的工期要求, 同时分块顺作法施工期间所设置的大量临时性支撑和围护结构也是对社会资源的较大浪费, 不符合国家当前倡导的节能减排的生产发展模式的要求, 因此, 改进传统的设计方法和施工工艺, 在实践中探索和应用新的深基坑开挖与支护新技术也是顺应时代的发展要求的需要。

为控制基坑变形, 加强对基坑周边建筑物和管线等环境的保护, 深基坑开挖往往选择采用刚度较大的梁板结构整体作为支撑构件的逆作法施工<sup>[1]</sup>, 施工效果良好。但传统逆作法施工挖土极为不便, 为克服其施工中的缺点, 近年来上海深基坑工程实践中出现了以结构梁作为水平支撑体系、结构竖向构件作为竖向支撑体系, 结构梁板采用分次浇筑的“半逆作法”施工工艺, 但在大面积深基坑中应用较少。根据目前上海地区大面积深坑的归纳统计, 本文案例属上海地区类似规模深基坑中首例采用半逆作法施工的项目, 且

施工效果良好, 对同类工程设计有较大的借鉴和参考意义。

## 1 工程和地质概况

本项目由 5 幢塔楼 (TD4-1 地上 190 m, TD4-2 和 TD4-2 地上 130 m, TD4-4 和 TD4-7 地上 80 m) 和 1~3 层裙房组成, 下设 3 层地下室。地下室基坑平面上呈规则长方形, 东西长约 251 m, 南北宽约 189 m。基坑总面积约 47475 m<sup>2</sup>, 塔楼区基坑开挖深度为 14.7 m, 裙房区基坑开挖深度为 13.7 m。

### 1.1 周边环境

本基坑工程位于上海浦东花木地块, 地下室距离红线约 5.5~5.7 m, 红线外为道路及超高层大酒店, 基坑周围道路下均布设有密排管线, 具体平面位置如图 1 所示。

### 1.2 地质概况

本工程场地为典型的上海软土地层, 场地土主要由软弱的黏土(夹薄层粉土)、中密—密实的粉土和砂土组成, 相关物理力学指标参数见表 1。其中  $\varphi$  及  $c$

表 1 场地土主要物理力学参数  
Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

| 土层<br>编号                      | 土层         | 埋深<br>/m | $E_{0.1-0.2}$<br>/MPa | 重度<br>/(kN·m <sup>-3</sup> ) | $\varphi$<br>(°) | $c$<br>/kPa | 渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> ) |                       |
|-------------------------------|------------|----------|-----------------------|------------------------------|------------------|-------------|----------------------------|-----------------------|
|                               |            |          |                       |                              |                  |             | $K_v$                      | $K_h$                 |
| ①                             | 填土         | 1.5      |                       |                              |                  |             |                            |                       |
| ②                             | 褐黄~灰黄色粉质黏土 | 3        | 4.86                  | 18.5                         | 22.5             | 16          | $2.46 \times 10^{-6}$      | $3.66 \times 10^{-6}$ |
| ③                             | 灰色淤泥质粉质黏土  | 3.5      | 3.41                  | 17.6                         | 21               | 12          | $4.14 \times 10^{-6}$      | $8.61 \times 10^{-6}$ |
| ③ <sub>夹</sub>                | 灰色黏质粉土     | 5.5      | 9.31                  | 18.7                         | 29.5             | 8           | $1.33 \times 10^{-4}$      | $3.53 \times 10^{-4}$ |
| ③                             | 灰色淤泥质粉质黏土  | 8        | 3.41                  | 17.6                         | 21               | 12          | $4.14 \times 10^{-6}$      | $8.61 \times 10^{-6}$ |
| ④                             | 灰色淤泥质黏土    | 17.5     | 2.13                  | 16.9                         | 14               | 14          | $1.71 \times 10^{-7}$      | $3.22 \times 10^{-7}$ |
| ⑤ <sub>1-1</sub>              | 灰色黏土       | 21       | 3.60                  | 17.9                         | 14.5             | 17          | $1.49 \times 10^{-6}$      | $2.94 \times 10^{-6}$ |
| ⑤ <sub>1-2</sub>              | 灰色粉质黏土     | 24       | 4.25                  | 18.2                         | 19               | 15          | $2.99 \times 10^{-6}$      | $10.5 \times 10^{-6}$ |
| ⑥ <sub>1</sub>                | 暗绿色粉质黏土    | 26       | 7.31                  | 19.7                         | 19               | 48          | $1.65 \times 10^{-6}$      | $3.00 \times 10^{-6}$ |
| ⑥ <sub>2</sub>                | 暗绿—草黄色黏质粉土 | 28       | 8.35                  | 19.6                         | 19.5             | 45          | $4.40 \times 10^{-6}$      | $9.59 \times 10^{-6}$ |
| ⑦ <sub>1-1</sub>              | 草黄色黏质粉土    | 29.5     | 9.86                  | 19.3                         | 29.5             | 9           | $2.90 \times 10^{-5}$      | $5.26 \times 10^{-5}$ |
| ⑦ <sub>1-1</sub> <sub>夹</sub> | 草黄色粉质黏土    | 30.5     | 7.02                  | 18.8                         | 23.5             | 20          | $2.15 \times 10^{-5}$      | $7.56 \times 10^{-5}$ |
| ⑦ <sub>1-1</sub>              | 草黄色黏质粉土    | 32       | 12.47                 | 18.8                         | 29.5             | 9           | $4.74 \times 10^{-4}$      | $13.2 \times 10^{-4}$ |
| ⑦ <sub>1-2</sub>              | 草黄色砂质粉土    | 39       | 13.51                 | 18.9                         | 33               | 4           | $2.15 \times 10^{-5}$      | $7.56 \times 10^{-5}$ |
| ⑦ <sub>2</sub>                | 草黄—灰黄色粉砂   | 未穿       | 15.73                 |                              |                  |             |                            |                       |

为勘察报告提供的固结快剪峰值指标。



图 1 基坑周边环境图

Fig. 1 Surrounding environment of excavation

场地浅层地下水属潜水类型, 受大气降水和地表径流补给, 水位埋深一般为 0.24~1.30 m。场地在深度约 27 m 下的第⑦层粉土和砂土层为第一承压含水层, 承压水头埋深呈周期性变化, 一般为 3~11 m, 现场实测承压水水头埋深为 8 m, 经计算电梯井深坑区域不满足承压水稳定性要求。

## 2 基坑设计

### 2.1 设计方案选型

该基坑环境保护要求高, 且规模巨大, 属超大规模的深基坑。本项目设计方案选型的关键因素有三点: ①基坑采用整体开挖还是分块开挖; ②土方采用明挖

还是暗挖; ③业主相关要求。

业主要求地下室整体工期尽量短, 且主楼结构能尽快向上施工, 同时造价尽量节省。本项目基坑若采用整体开挖相对分块开挖而言可大量缩短工期, 而采用整体开挖还是分块开挖的关键在于支撑的刚度。鉴于逆作法施工采用刚度较大的结构梁板兼做基坑水平支撑体系, 因此基坑设计首先考虑采用逆作法进行整体开挖施工。

但传统逆作法由于结构梁板形成的封闭体系, 土方开挖多为暗挖施工, 施工速度较慢且不方便。为解决此问题, 本基坑设计采用了半逆作法施工工艺, 即以结构梁为水平支撑体系, 结构板采用二次浇筑形式。这样, 基坑土方开挖即可采用明挖方式, 挖土速度快, 且解决了出土运输、机电设备吊装等一系列施工难题。

最终, 本项目基坑采用以钻孔灌注桩作为临时围护结构、主体结构梁为水平支撑体系、结构柱的劲性构件为竖向支承系统, 结构板和外墙后浇的半逆作法设计方案。同时, 由于基坑面积非常大, 为有效控制变形, 开挖前对被动区土体采用两轴搅拌桩裙边加固处理。

### 2.2 水平支撑体系及相关技术要点

项目地下室结构体形方正、轴网规则, 利用结构梁作为支撑构件, 水平力传递较为直接和可靠, 其四周围护结构顶部或腰间设置刚度较大的环梁, 与各层结构梁连接, 形成较为完整的水平传力体系, 本项目地下室的 3 层楼板, 形成基坑围护结构的 3 道有效支

撑; 同时, 基坑周边3倍开挖深度范围内无地铁、原水管渠、历史保护建筑等重点保护对象, 以上特点均使得进行超大面积基坑整体开挖成为可能。

另外, 由于塔楼区域为钢框架-钢筋混凝土核心筒结构体系, 考虑到核心筒水平传力较复杂, 且核心筒逆作时竖向支承体系难设置, 因此塔楼区采用了顺做法施工, 其外围设置刚度较大的圆环形钢筋砼临时支撑构件与地下室主体结构框架体系连为一体, 这样既解决支撑体系的难题, 又便于主楼的独立施工, 满足业主对主楼快速向上施工的要求。

水平支撑结构体系如图2所示。

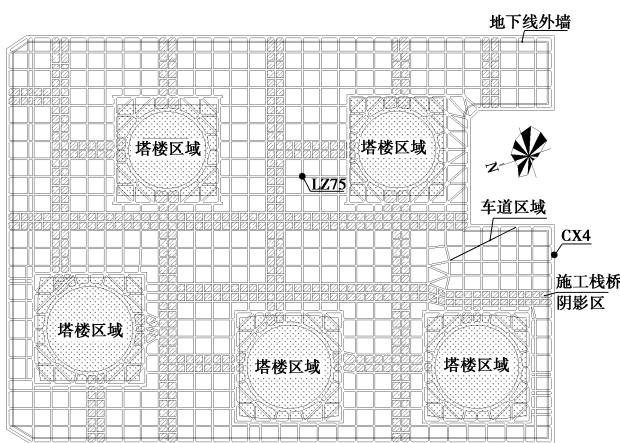


图2 水平支撑体系(首层)

Fig. 2 Horizontal bracing system (ground floor)

为确保水平力的有效传递, 本基坑水平支撑结构体系设计时对地下室各层楼板处的薄弱位置进行了相应加强处理。

(1) 错层位置: 地下室顶板边跨与中间区域楼板存在错层(高差为450 mm), 影响水平力传递, 同时也使错层梁处产生应力集中现象, 因此对错层梁采取了梁侧加腋处理, 并通过计算加强其抗扭剪配筋。

(2) 局部开洞位置: 局部楼板存在多跨的大面积开洞(包括车道位置), 水平传力构件不连续, 影响了基坑水平支撑刚度的水平力传递。设计中对相应位置框架梁采取了拉通连接处理, 在基坑施工完毕、地下室主体结构完成后对该处梁进行凿除。

(3) 后浇带和加强带位置: 由于地下室结构设置的后浇带(或加强带)一般在主体结构完成后再浇筑, 基坑施工期间该位置水平力无法传递, 设计时在各层结构梁和底板内相应位置加设了H型钢支撑。

### 2.3 竖向支承体系及相关技术难点

地下室结构梁柱逆作时, 采用结构框架柱的劲性构件(格构柱)形成竖向支承体系, 在基坑开挖及地下室结构逆作施工阶段主要承受其上结构梁的重量, 施工栈桥区域还需另承受施工荷载和栈桥区楼板重

量。本项目框架结构柱网间距一般为8.4 m×8.4 m, 立柱一般设置于框架柱位置; 对设置施工栈桥区域, 考虑到荷重较大, 该区域立柱加密, 即在框架梁及中央次梁跨中均加设一根临时性立柱, 以减少立柱间差异沉降。

立柱采用4根L160×16角钢与缀板焊接而成的格构式刚柱, 立柱桩均利用结构工程桩, 待逆作施工结束后将格构柱外围浇筑混凝土形成永久性框架柱, 局部加设的临时性立柱进行割除。

对梁柱节点处理, 由于兼做水平支撑体系的结构梁较宽, 梁主筋可从钢格构立柱外侧穿越贯通。对栈桥区域, 考虑到梁柱节点处剪力较大, 钢格构立柱在节点区域焊接钢牛腿及加强筋以有效传递结构梁承担的竖向荷载。施工栈桥区梁柱节点处理如图3所示。

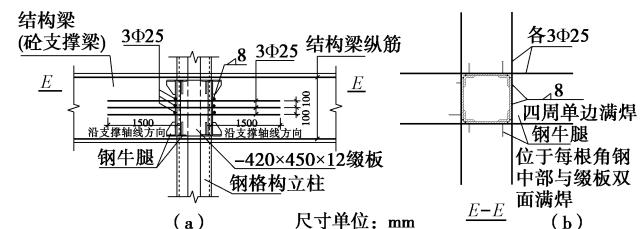


图3 施工栈桥区立柱与结构梁连接节点详图

Fig. 3 Joint detail of steel column and beam of construction platform

### 2.4 半逆作法施工的关键节点处理

本基坑采用半逆作法施工时, 结构地下室外墙及各层楼板均为后做, 结构柱的钢筋及外包混凝土施工均在基坑逆作结束后进行, 先期施工的结构梁外穿地下室室外墙处节点防水处理、结构梁的叠合层浇筑时钢筋处理、结构柱与结构梁节点处钢筋预留等均为整个施工过程中的关键问题。对此, 设计采用了如下处理方法:

(1) 本基坑围护桩采用临时围护桩, 围护桩内边退让地下室室外墙距离为1.6 m, 结构梁与围护桩时连接完毕穿越后做的地下室室外墙, 此处在结构梁外侧设置一圈遇水膨胀止水条来处理二次浇筑接缝处的防水问题, 同时预留地下室室外墙插筋, 具本施工节点如图4所示。

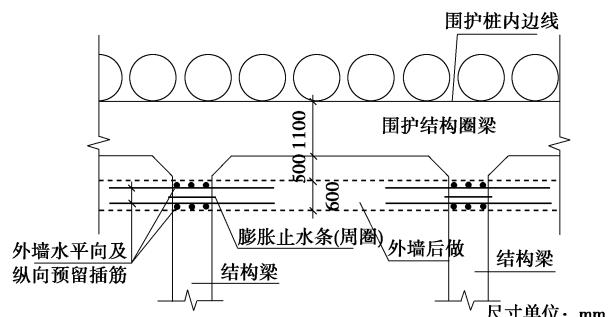


图4 结构梁穿地下室外墙的处理详图

Fig. 4 Detail for through-wall beam in basement

(2) 本项目半逆作施工中, 结构楼板作为叠合板二次浇筑<sup>[3]</sup>, 结构梁按叠合梁设计及构造要求, 叠合层与结构梁先浇部分的施工详图如图5所示。

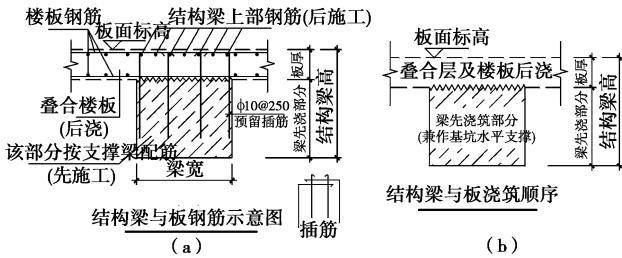


图 5 楼板及结构梁叠合层的二次浇筑详图

Fig. 5 Detail of secondary cast of slab and overlapping layers of beam

(3) 对框架柱处设置的基坑支承立柱, 基坑逆作施工结束后需绑扎柱外围钢筋, 并浇筑混凝土以形成结构框架柱。因此基坑施工期间, 梁柱节点处需预留柱纵筋插筋, 预留插筋长度按结构抗震构造要求, 具体如图6所示。

## 2.5 变形控制措施

由于基坑整体开挖时体形较大 (251 m×189 m), 结构梁传力路径较长, 刚度相对削弱, 且由于尺寸效应, 基坑变形相对小体形基坑会加大, 因此基坑变形控制成为本次设计施工中的又一难点。为此, 设计对相关环节进行了相应控制和加强。

(1) 挖土工况的控制: 整个基坑开挖采用盆式开挖, 周边留设20 m宽的土坡平台后挖, 中部土方开挖时按分层分块开挖及隔块跳挖原则控制挖土流程, 充

分利用时空效应原理，减少基坑变形。

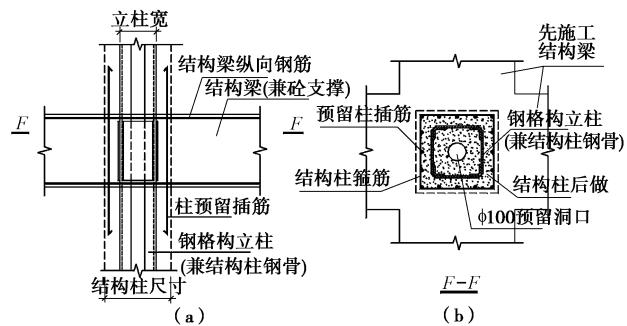


图 6 结构梁与后作框架柱的节点详图

Fig. 6 Joint detail of beam and secondary cast column

(2) 坑内被动区加固<sup>[2]</sup>: 为控制坑内土体深层变位, 除坑内局部深坑区加固外, 同时在坑内沿围护桩采用两轴搅拌桩进行裙边加固(见图7), 加固宽度根据基坑深度采用5.2或6.2 m, 加固深度为地下一层结构梁底至坑底下4 m左右, 具体可见图8。

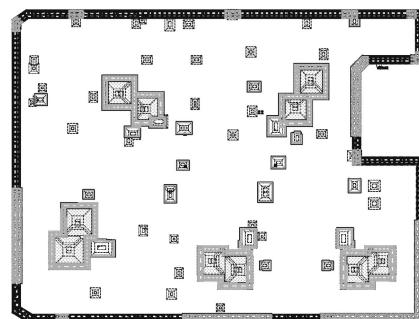


图 7 坑内加固平面图

Fig. 7 Plan of soil consolidation

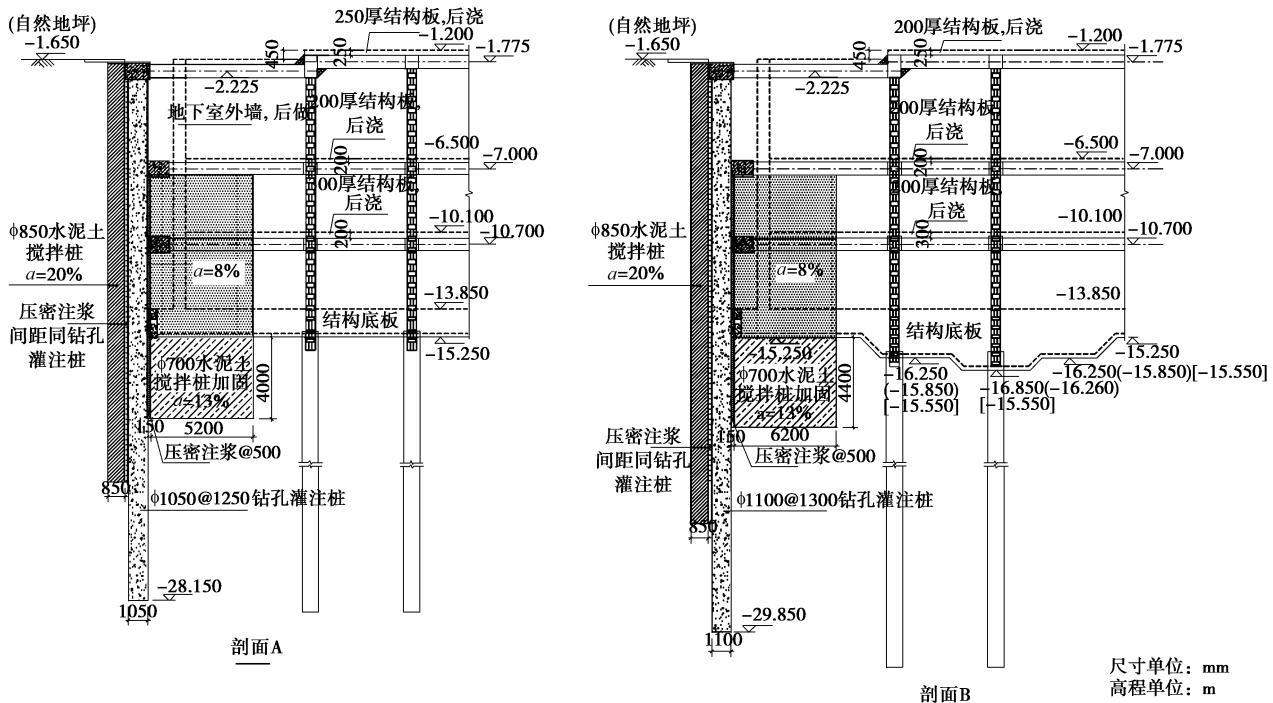


图 8 支护体系剖面图

Fig. 8 Section of bracing and support system



### 3 工程监测结果

经精心设计及良好的施工, 该基坑工程已成功完成。根据监测结果, 在底板施工完成时, 最后一块浇筑底板区域靠近48层建筑物的围护桩测斜点(CX14)最大变形为38.9 mm, 结构出正负零后围护桩侧向最大变形为48.4 mm, 该处围护墙各阶段侧向变形情况见图9。其它绝大部分的测斜点最终累计最大变形在30~38 mm之间。

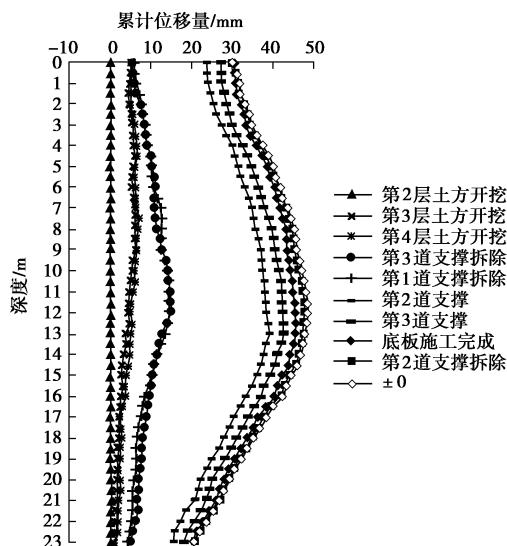


图9 围护墙各阶段侧向变形曲线

Fig. 9 Lateral deformation curves of retaining wall at each stage

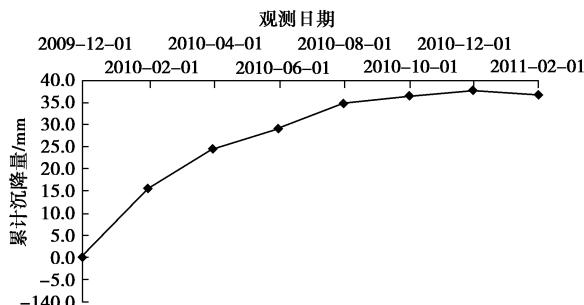


图10 立柱垂直位移变化图

Fig. 10 Vertical displacement curve of soldier pile

对于立柱的垂直位移, 监测发现在第2层土方、第3层开挖后, 立柱明显上抬, 第3层支撑形成后, 立柱隆起速率开始减小, 隆沉曲线逐渐趋于平缓。立柱隆起最大发生点位于基坑中部(测点LZ75处), 累计隆起量为37.7 mm。其垂直位移变化规律如图9所示。其它绝大部分的测斜点最终累计隆起量在20~30 mm之间。

围护测斜点CX14及立柱监测点LZ75位置参见图2。

监测结果同时表明, 立柱隆起量较大的区域差异沉降也较大, 塔楼区周围圆环支撑处立柱相邻测点沉降最大, 达16.02 mm, 满足基坑规范相关要求<sup>[4-5]</sup>。且由于该区域立柱和支撑均为临时性支撑体系, 对后期主体结构基本无影响。

周边道路市政管线在塔楼区域圆环支撑距围护结构边线最近区域(即花木路靠TD4-1塔楼区域)管线沉降及水平变形均为最大, 最大沉降量为18.3 mm, 最大水平位移值为14.5 mm, 整个施工过程中周边道路管线均未发生损坏情况。

### 4 结 论

本基坑支护体系的成功实施, 是软土地区超4万m<sup>2</sup>深基坑整体半逆作法施工的一次大胆尝试, 也创造了较好的经济效益和时间效益。本工程有如下4点关键因素可供类似项目借鉴与参考。

(1) 对大规模深基坑, 在结构框架平面合理的情况下, 采用框架逆作的半逆作法施工工艺是可行且安全可靠的。

(2) 围护设计在水平支撑和竖向支承体系设计中, 应针对主体结构框架体系薄弱处及传力不连续部位予以加强和贯通。

(3) 半逆作法围护施工时, 应兼顾后期主体施工的需要, 注意关键节点处钢筋预留和防水处理。

(4) 围护结构设计中, 应根据基坑周边被保护对象对围护墙进行局部加强, 对坑内进行适当加固, 并合理有效控制挖土流程, 以最大程度控制基坑变形。

### 参考文献:

- [1] 王卫东, 王建华. 深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 87-110. (WANG Wei-dong, WANG Jian-hua. Design, analysis and case histories of deep excavations supported by permanent structures[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007: 87 - 110. (in Chinese))
- [2] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 898 - 923. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering handbook[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009: 898 - 923. (in Chinese))
- [3] 薛伟辰, 杨云俊. 混凝土叠合梁受力性能与设计方法研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2008(1): 44 - 48. (XUE Wei-chen, YANG Yun-jun. Advances mechanical behaviors and design methods of concrete piled and composited beams[J]. China Concrete and Cement Products, 2008(1): 44 - 48. (in Chinese))
- [4] DG/TJ08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 2010. (DG/TJ08—61—2010 Technical code for excavation engineering[S]. 2010. (in Chinese))
- [5] JGJ 120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 1999. (JGJ 120—99 Code for design of excavation engineering[S]. 1999. (in Chinese))