

# 软土深基坑逆作开挖差异隆沉控制研究

郭晓航<sup>1</sup>, 谢小林<sup>2</sup>, 贾 坚<sup>2</sup>

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 阐述了软土深基坑逆作法中差异隆沉产生机理和影响因素。结合工程实践, 介绍了控制桩墙之间、立柱桩间差异隆沉的原理方法及设计应对措施。工程现场观测和实测数据表明, 通过采用加大桩长、预估分析、节点强化设计、动态化设计、信息化施工等措施, 可以有效地将差异隆沉控制在规范允许的范围内, 并减小差异隆沉对逆作法支撑体系的影响, 保证工程安全。

**关键词:** 软土深基坑; 逆作开挖; 差异隆沉控制

**中图分类号:** TU447      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0072-05

**作者简介:** 郭晓航(1986-), 男, 吉林省长春市人, 硕士, 目前从事软土深大基坑安全稳定及变形控制研究。E-mail: xiaohangxinxiang@163.com。

## Differential displacement control of deep foundation pits in soft clay by use of top-down excavation method

GUO Xiao-hang<sup>1</sup>, XIE Xiao-lin<sup>2</sup>, JIA Jian<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Ministry of Education, Department of Geotechnical Engineering,

School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Architectural Design & Research Institute of Tongji University,  
Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the project practices of Shanghai Tower, the differential settlement control of deep foundation pits using top-down excavation method is introduced. As the data illustrate, the measures like estimating analysis, dynamic design, information-guided excavation are of great values in the differential displacement control, consequently they help ensure the safety of the project.

**Key words:** deep foundation pit; top-down excavation method; differential displacement control

## 0 引言

随着我国城市建设向多层次立体化发展, 深基坑工程逆作法开挖已经成为一大技术热点。逆作法采用地下室顶板和楼板作支撑, 地下连续墙二墙合一, 具有以下特点: ①支撑刚度大, 有利于深基坑开挖的稳定; ②主体地下结构和基坑支护结构结合, 避免支撑的设置拆除, 节约资源; ③地下连续墙作为围护结构和地下室外墙(或外墙一部分)两墙合一, 可省却基坑临时围护结构和外墙支模的施工操作空间, 在满足规划条件下, 可使地下室空间外放2~3 m。既提高了土地的利用率, 相应地也增加了一定的经济效益<sup>[1]</sup>。

但逆作法存在的问题也显而易见。深大基坑土方卸载, 应力场、位移场的变化会产生较大的坑内土体回弹和隆沉量, 土体的差异回弹值、荷载与开挖顺序不同会造成立柱桩之间以及立柱桩与地下连续墙之间的差异隆沉, 继而造成结构内力发生变化, 使主要承受横向轴力的梁会同时承受剪力和弯矩, 并且会随着

差异隆沉值的增大而增大。如设计施工应对不当, 内变化带来的变形过大, 会引起楼板开裂, 带来安全隐患并影响正常使用, 软土地区深基坑该问题更加突出。因此, 必须采取一套行之有效的方法来控制逆作法中差异隆沉及其影响, 保证基坑工程顺利进行。

## 1 逆作开挖差异隆沉产生机理及控制应对方法

### 1.1 逆作开挖立柱桩隆沉及差异隆沉产生机理

逆作法施工期间, 基坑开挖卸荷, 土体应力释放会造成坑内土体回弹。坑内土体回弹导致桩土间存在相对运动, 土对桩产生摩阻力, 是立柱桩和地下连续墙产生竖向位移的根本原因。

土体回弹主要表现为: 基坑开挖坑底下回弹量最大, 沿深度回弹量逐渐减小, 到达一定深度后趋于

稳定, 坑底下 1 倍开挖深度为显著回弹影响区, 该区内土体回弹量随深度减小速率较大, 在坑底下 2 倍开挖深度以外回弹量很小, 可以确定为弱影响区, 1~2 倍开挖深度之间区域为过渡区域<sup>[2]</sup>。

对此, 邓指军等<sup>[3]</sup>基于应力松弛法理论和回弹模量与卸荷比的关系, 对软土地区基坑开挖坑内土体回弹做了一系列试验, 结果表明: 坑底回弹影响最大深度为开挖深度 2.33 倍, 强回弹区的深度为开挖深度的 0.45 倍。

可以认为桩土相对位移为 0 处, 桩土间作用力为零。该点以上, 土体回弹值大于立柱桩抬升值, 土体对立柱桩有向上的摩阻力; 而该点以下, 立柱桩相对土体有向上运动趋势, 土对立柱桩就会产生向下摩阻力, 结合立柱桩上部外加载荷、桩身自重、以及桩端力, 使得立柱桩产生向上或向下的竖向位移。见图 1。

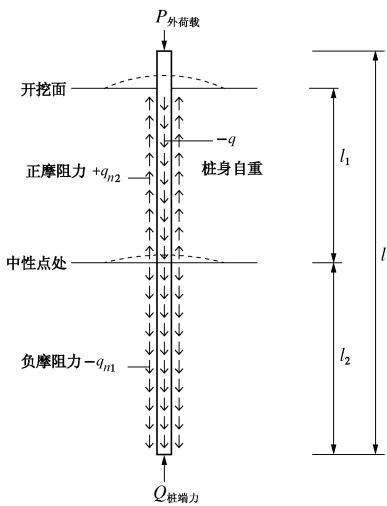


图 1 立柱桩受力示意图

Fig. 1 Forces on pile

整个过程中, 桩身所承受的荷载包括桩身自重、上部外荷载、正摩阻力、负摩阻力、桩端阻力, 产生竖向位移。立柱桩受力满足以下关系式:

$$P + ql + q_{n1} + l_1 = q_{n2} + l_2 + Q \quad (1)$$

由式(1), 桩身自重应力  $q$  为固定值, 桩端力  $Q$  可以由上部荷载、摩阻力、桩身自重得出, 而摩阻力由该深度处土体回弹值决定。因此, 立柱桩隆沉值和该处土体回弹值大小以及上部荷载大小直接相关。

可见, 逆作法施工中, 立柱桩所处位置土体回弹量不同, 立柱桩所受上部荷载不同是造成差异隆沉的主要原因。需要注意的是, 地墙和相邻立柱桩由于自重不同、土体回弹值差别明显, 差异隆沉值较大; 取土口立柱桩与周围立柱桩之间由于上部荷载不同、开挖先后顺序不同, 差异隆沉值较大, 需要特别引起注意, 采取控制措施。

## 1.2 逆作开挖中差异隆沉控制方法和设计对策

基于差异隆沉的产生机理及影响因素, 工程中采

用以下几种控制和应对措施。

(1) 桩端位于显著回弹区(强回弹区)之外, 处于过渡区域或弱影响区, 可增加土对立柱桩向下摩阻力, 进而减小单桩隆沉, 最终减小桩间差异隆沉。

(2) 逆作开挖中差异隆沉不可避免, 预先按照施工工况对立柱桩及地下连续墙进行隆沉估算, 采取相应回避, 可有效减小差异隆沉带来的不利影响。例如, 根据预测结果针对差异变形值较大处的梁柱节点, 在设计中采取加强配筋等措施提高其强度, 减小差异隆沉对结构内力的影响, 最终有效保证开挖和使用期间结构体系的安全。

(3) 坑底土体回弹对立柱桩的隆沉值影响很大, 减小坑底回弹, 可以降低立柱桩隆沉量<sup>[4]</sup>。根据“时空效应”理论, 在软土基坑开挖中, 实行分块开挖, 适当减小每步开挖土方的空间尺寸, 控制卸荷量, 并缩短每步开挖所暴露的基坑挡墙在未支撑前的暴露时间, 从而减小土体的流变变形, 可以有效控制坑底回弹<sup>[5]</sup>。同时, 减少每步开挖结束后的土体暴露时间, 限时形成楼板和支撑, 可以使立柱桩上部所受楼板、支撑荷载抵消部分下部土体对立柱桩向上的摩阻力, 从而控制立柱桩隆沉量, 减小差异隆沉。

(4) 加强对柱网及地下连续墙的竖向位移观测, 做到动态化设计、信息化施工。及时将差异变形情况汇总反馈, 并根据现场情况调整挖土顺序、局部加快或放慢挖土、调整场地内车辆行进路线, 对于实际工程中差异隆沉的控制也尤为重要。

## 2 上海中心裙房基坑差异沉降控制实践

以下是结合“上海中心大厦工程”裙房基坑工程实践, 阐述了软土地区深大基坑逆作法开挖条件下, 设计施工中差异隆沉的控制及应对措施。

### 2.1 工程概况及差异沉降控制要求

“上海中心大厦”位于上海浦东新区陆家嘴金融中心区, 场地北侧与金茂大厦相邻, 东侧与环球金融中心相邻。工程施工条件复杂, 变形控制要求严格, 工程质量要求标准高。“上海中心大厦”裙房基坑地下 5 层, 开挖深度约 26.7 m, 裙房基坑呈四边形, 边长约 200 m×150 m, 裙房基坑面积约 23660 m<sup>2</sup>。图 2 为裙房基坑总平面图。图 3 为上海中心大厦鸟瞰图。

该工程中, 塔楼基坑顺作开挖完成后, 塔楼上部结构与裙房地下结构同时施工, 场地和工期紧张, 周边环境保护和基坑变形控制要求高, 因此裙房基坑逆作法开挖特别适用于本工程。软土地区深基坑逆作开挖须严格控制楼板立柱的差异隆沉量。根据上海市工程建设规范《基坑工程技术规范》, 立柱桩之间以及立柱桩与地下连续墙之间的差异沉降不宜大于 20 mm,

且不宜大于1/400柱距<sup>[6]</sup>。

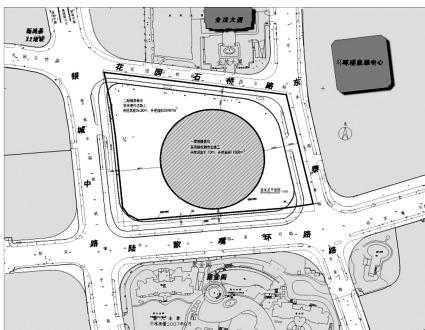


图2 褶房基坑总平面图

Fig. 2 General layout of foundation pit of podiums



图3 上海中心大厦鸟瞰图

Fig. 3 Birds eye view of site

## 2.2 考虑差异隆沉的设计方案

### (1) 立柱桩桩长选择及差异隆沉预测分析

经方案总体设计研究比选后，“上海中心大厦”裙房基坑采用全逆作的施工工法。根据变形控制要求及主体结构的需求，采用地下墙二墙合一，墙厚1.2 m，深48 m；结合柱网设计，一柱一桩。

根据之前坑底回弹理论分析，为减小单桩隆沉，进而控制差异隆沉，有效桩长须大于1倍开挖深度，使桩端位于强回弹区外。本基坑开挖深度约26 m，分析过程中取有效桩长26, 31, 36 m，对出土口边立柱桩差异隆沉按各工况进行了有限元计算，形成了一套完整计算分析结果。表1为土体计算参数，图4为计算模型，图5为不同桩长的计算结果。

表1 土体计算参数

Table1 Parameters of soil strata

土层名称	厚度/m	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/kPa
①杂填土	0.5	18.4	—	—	—
②粉质黏土	2	18.4	20	18	3.97
③淤泥质粉质黏土	4.7	17.7	10	22.5	3.84
④淤泥质黏土	8.1	16.7	14	11.5	2.27
⑤ <sub>1a</sub> 黏土	3.8	17.6	16	14	3.56
⑤ <sub>1b</sub> 粉质黏土	3.3	18.4	15	22	5.29
⑥粉质黏土	5	19.8	45	17	6.96
⑦ <sub>1</sub> 砂质粉土	7.2	18.7	3	32.5	11.45
⑦ <sub>2</sub> 粉砂	28.3	19.2	0	33.5	14.85
⑨ <sub>1</sub> 粉砂	17	19.1	5	32	11.13

计算结果显示，桩有效长度为26, 31, 36 m时，最大差异隆沉值分别为24.102, 19.061, 15.03 mm。可见，桩的有效长度达到36 m时，差异隆沉已经得到了有效控制，处在规范允许范围内。考虑到工程需要，并避免不必要的浪费，最终设计选取立柱桩有效桩长为36 m的φ550钢管立柱，内灌高强混凝土，插入钻孔灌注桩（直径1 m）。

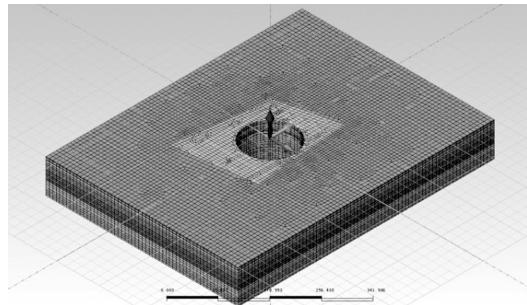


图4 三维模拟模型

Fig. 4 3D simulation model

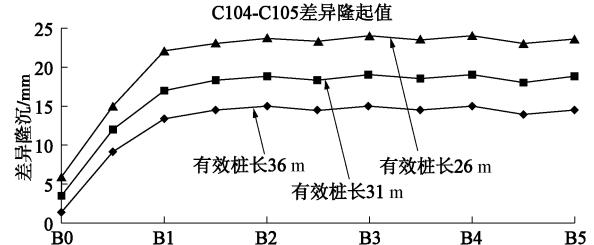


图5 差异隆沉计算结果

Fig. 5 Calculated values of differential uplift

### (2) 考虑差异隆沉的梁柱节点设计

根据基坑立柱桩差异隆沉的分析预测，最大差异值为15.03 mm，考虑到地层分布的不均匀、立柱桩间刚度的差异以及楼板分块施工导致的桩顶荷载分布不规律，并结合规范要求，楼板设计时将基坑开挖阶段的相邻立柱差异隆沉控制值定为20 mm。

设计分析了立柱差异隆沉20 mm的楼板附加内力。取梁截面1200 mm×850 mm。图6为建模和计算结果。

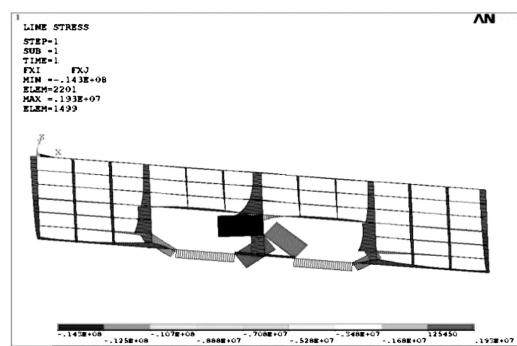


图6 支撑梁轴力

Fig. 6 Axial load of beams

由计算分析结果, 在相邻立柱桩差异隆沉 20 mm 的情况下, 结构将产生较大的附加内力。为保证结构安全, 在计算预测基础上, 设计加强了地下室主体结构梁板节点的构造和配筋。图 7 为施工现场节点照片。



图 7 施工现场节点照片

Fig. 7 Photo of reinforcement detail from site

### (3) 基于“时空效应”理论的开挖及信息化施工

本工程中, 基坑采取分块开挖以控制卸荷量, 减小坑内土体回弹; 限时形成支撑体系, 减小立柱桩隆沉值, 进而减小差异隆沉值。此外, 开挖过程中, 对整个开挖过程实行信息化管理, 做到动态化设计指导施工。根据前一个日基坑变形监测情况, 调整基坑后续挖土流程, 控制基坑变形, 保证工程安全, 保护周围环境。根据相关规范并结合工程实际情况, 确定报警值为: 立柱桩隆沉: 20 mm, 2 mm/d; 相邻立柱桩测点差异隆沉: 15 mm, 2 mm/d; 地墙与相邻立柱桩之差异沉降: 15 mm, 2 mm/d。监测频率为 1 次/d。

以 B1 开挖为例, 在实际开挖期间, 附近考虑到土口处立柱桩差异隆沉较大, 施工先开挖中心十字对称区域, 限时形成支撑体系, 可以减小该区域的立柱桩竖向位移; 后开挖差异隆沉较大的区域, 图 9 中 B1-3(B) 和 B1-3(C) 区域, 减少了该处土体开挖后到下一步开挖前的暴露时间, 有效控制了该处立柱桩隆沉值, 减小了桩间差异隆沉值。

图 8 为 B1 的分区开挖方案。开挖顺序为 B1-1 → B1-2 → B1-3。图 9 为对立网立柱桩隆沉等值线图。考

虑到实际工程中, 塔楼基坑工程已完成, 与裙房通过后浇带连接只传递水平力的具体情况, 不考虑塔楼竖向位移; 相邻等值线高差为 2 mm。

### 2.3 基坑立柱桩差异隆沉控制结果

通过采取加大桩长等一系列措施, 本工程立柱桩差异隆沉值得到有效控制。并且通过优化梁柱节点设计, 减小了差异隆沉对结构支撑体系的不利影响, 满足规范要求。至基坑工程施工结束, 未出现梁板明显开裂现象, 成功保证了工程安全, 使上部结构各项施工得以顺利进行。

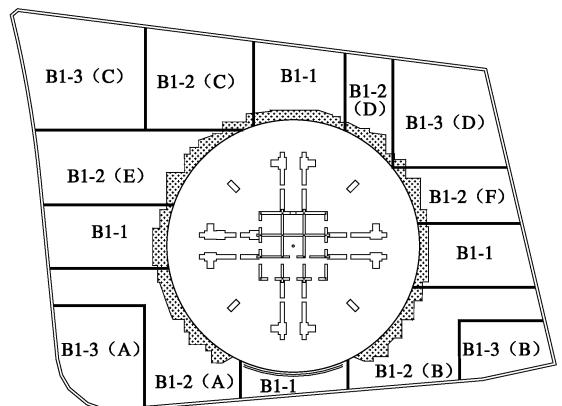


图 8 基坑分区开挖方案

Fig. 8 Scheme of zoning excavation in foundation pit

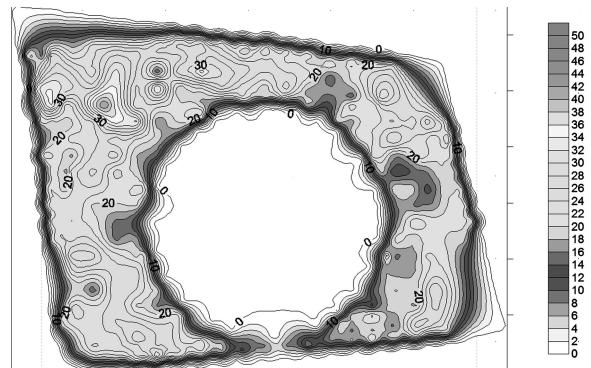


图 9 立柱桩隆沉等值线图

Fig. 9 Contour map of uplift of soldier piles

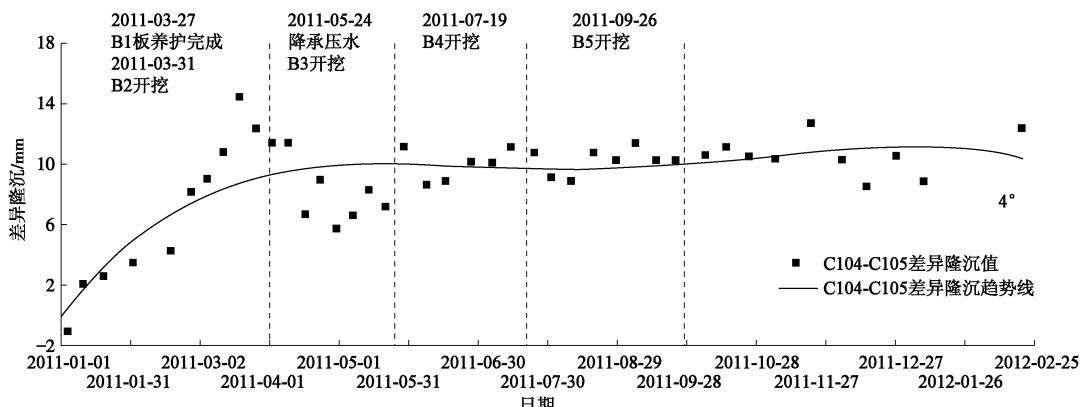


图 10 立柱桩差异隆沉实测数据

Fig. 10 Monitoring data of differential settlement between props



表 2 为基坑开挖至坑底后的 B1 层的楼板内力实测结果。图 10 为立柱桩差异隆沉实测数据。

表 2 楼板内力的实测值与计算值比较

Table 2 Comparison between predicted and in-situ measured internal forces

	板应力/MPa	梁轴力/kN
B1 层结构计算内力	14.3	14300
B1 层结构实测内力	14.03	14000



图 11 基坑逆作开挖现场照片

Fig. 11 In-situ photo of top-down excavation method

### 3 结 论

为满足工程建设工期要求, 通过多方案比选, 确定了塔楼圆形基坑顺作+裙房逆作的基坑实施方案。通过上海中心裙房逆作开挖的计算分析结果和现场监测反馈, 可得出以下几点结论:

(1) 尽管裙房基坑逆作开挖后, 立柱桩有一定隆起, 但差异隆沉及逆作梁板结构内力均处于安全可控的状态。可见, 通过加大桩长, 使桩端位于强回弹区外的过渡区域或弱影响区, 从而减小立柱桩的隆起, 对于立柱桩隆沉和桩间差异隆沉控制的效果比较理想。

(2) 在设计中, 对于预计差异隆沉造成的结构内力进行计算分析, 采取强化节点等设计对策, 有效减小了差异隆沉对结构的影响, 未出现开裂等不良现象。

(3) 根据“时空效应”理论制定“分块开挖”、“对称开挖”施工方案, 强调开挖的先后顺序和开挖区域的整体布局, 对于减小土体回弹, 进而控制差异隆沉, 有较强理论基础, 应用于本工程实践中, 取得较好效果。

(4) 实施动态化设计指导施工、信息化施工, 根

据现场监测数据及时情况调整挖土工况, 例如减慢差异值较大处的挖土速率, 或将该区域相对延后开挖, 并且采取设计对策, 有效控制了逆作开挖的差异隆沉。

本文结合“上海中心大厦”裙房基坑逆作开挖的工程实例, 探讨分析了软土地区深大基坑逆作开挖中, 控制立柱桩间及桩墙之间差异隆沉问题的方法和原理。通过大量的和合理的分析预测, 采取相应的设计对策, 并提出动态化设计、信息化施工的方法和技术, 从而确保了上海中心裙房逆作法深大基坑的安全顺利实施。

### 参考文献:

- [1] 贾 坚. 逆作开挖深基坑控制卸载变形的方法与实践[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 304 - 308. (JIA Jian. Deflection controlling measures and practices of deep foundation pits by use of top-down excavation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 304 - 308. (in Chinese))
- [2] 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: 185. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 185. (in Chinese))
- [3] 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, 11(3): 52 - 55. (DENG Zhi-jun, JIA Jian. On unloading resilience depth in deep station foundation pit[J]. Urban Mass Transit, 2008, 11(3): 52 - 55. (in Chinese))
- [4] 王允恭. 逆作法设计施工与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 35. (WANG Yun-gong. Design and construction of top-down excavation and project practice[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 35. (in Chinese))
- [5] 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: 35 - 36. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997: 35 - 36. (in Chinese))
- [6] DG/TJ08—61—2010 上海市工程建设规范 - 基坑工程技术规范 [S]. (DG/TJ08 — 61 — 2010 Technical code for excavation engineering[S]. 2010. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)