

DOI: 10.11779/CJGE2019S1063

# 软土地区基坑对周边环境影响空间效应分析

楼春晖<sup>1</sup>, 夏唐代<sup>1</sup>, 刘念武<sup>2</sup>

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 软土地区基坑开挖引起的变形具有明显的空间效应, 为了进一步研究开挖引起周边地面及建构筑物变形的特性, 结合对温州某大型深基坑工程的监测, 从垂直于基坑围护墙以及平行于围护墙两个方向, 对基坑外地面道路以及建筑物的沉降和裂缝情况进行了监测分析, 总结了开挖引起基坑外地表沉降的分布特性, 分析发现: 基坑边角对围护墙变形以及地表沉降具有明显限制作用; 在垂直于基坑方向上, 处在沉降主要影响区  $2H_e$  范围内, 建筑物均具有明显的差异沉降, 最大角变量达到 1/1300; 平行基坑方向距离边角 (0.4~1.2)  $H_e$  (最大开挖深度) 范围观测到纵向裂缝, 沉降变化率较大, 可能破坏道路或建构筑物; 此外, 桩基础的建筑物总沉降以及差异沉降均明显小于条形基础建筑。

**关键词:** 深基坑; 地表沉降; 建筑物沉降; 空间效应

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0249-04

作者简介: 楼春晖(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程方向的研究工作。E-mail: 158860104@qq.com。

## Spatial effects of deformation due to excavation in soft clay

LOU Chun-hui<sup>1</sup>, XIA Tang-dai<sup>1</sup>, LIU Nian-wu<sup>2</sup>

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The deformation due to excavation in soft clay areas has considerable spatial effects. To investigate the deformation characteristics, a large-scale deep excavation project in Wenzhou is monitored, the settlements and cracks of the ground and adjacent buildings are observed and analyzed through two directions: perpendicular to the retaining wall and paralleled to the wall, and the distribution characteristics of the ground settlement are summarized. The field measurements show that the corner has inhibition effect on the wall deflections and ground settlements. In the vertical direction, the buildings in the range of  $2 H_e$  outside the excavation have large differential settlement, and the maximum angular variable reaches 1/1300. The longitudinal cracks are observed from 0.4  $H_e$  to 1.2  $H_e$  (the maximum excavation depth) on the parallel direction, the large rate of settlement change may damage the road or the structures. In addition, the total and differential settlements of the buildings on pile foundation are significantly smaller than those on strip foundation.

**Key words:** deep excavation; surface settlement; building settlement; spatial effect

## 0 引言

随着地下空间开发规模的日益增大, 深大基坑的周边环境也越来越复杂, 开挖对周边道路以及邻近建构筑物影响的合理预判以及保护变得尤为重要。目前的基坑设计以及变形预测多将开挖简化为平面应变问题, 而实际施工中已有多位学者<sup>[1-3]</sup>发现基坑变形具有明显的空间效应。

在过往的研究中, Lee等<sup>[4]</sup>通过工程实测和数值模拟分析得出对基坑开挖空间效应的主要影响因素为基坑开挖的长深比、软弱土层深度、围护系统支撑系统刚度等; Roboski等<sup>[5]</sup>通过对实测数据的整理分析给出了基坑径向不同位置处土体位移分布的经验公式; 郑刚等<sup>[6]</sup>采用小应变本构模型HSS进行数值模拟, 对基

坑周围建筑物变形进行了研究, 分析了不同支护结构变形形式(悬臂式、踢脚式、内凸式和复合式)对邻近建筑物的影响。

大部分学者针对基坑的各个参数进行分析, 而基坑外的裂缝开展情况也能够在一定程度上反映变形的情况并体现影响的烈度, 本文结合工程监测从垂直及平行于基坑围护的两个维度出发, 并对基坑开挖产生的裂缝进行了长期的监测, 结合理论进行分析; 对于基坑外建筑物与基坑的距离以及基础形式对沉降的影响进行了总结。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608485); 浙江省“151”人才培养计划

收稿日期: 2019-04-28

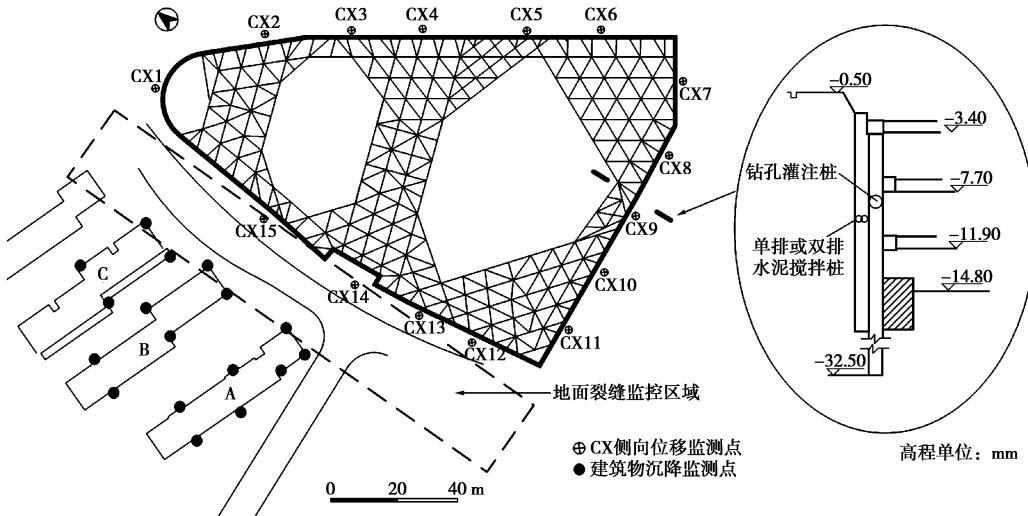


图1 基坑及周边环境平面图

Fig. 1 Layout of excavation and surrounding environment

## 1 工程概况

本基坑所属工程为44层总高180 m的超高层建筑，设有3层地下室。北邻市府大道，东南面为划龙河，西南面连接站东路。基坑平面图及周边环境如图1所示，基坑总面积较大，西面总长约180 m，距离基坑较近处有4栋多层住宅，最近处距离基坑边仅12 m左右。基坑典型剖面也在图1中展示，可见基坑开挖深度为13.4~14.3 m，围护结构采用直径1 m的钻孔灌注桩，间距1.2 m，插入深度32 m；外侧采用直径0.6 m的水泥搅拌桩止水帷幕进行支护，间距0.4 m，总长15.8 m，东侧局部采用双排水泥搅拌桩；基坑内部采用三道钢筋混凝土支撑。

## 2 监测方案及施工工序

监测点布置如图1所示，除常规基坑及建筑变形监测外，为研究开挖对地表沉降影响的空间效应，本次对基坑外地面道路如图1标注区域进行地面裂缝监测，一旦发现裂缝，即标注并观测记录裂缝开展情况。其余一系列监测内容还包括内支撑轴力、水位监测，桩顶部水平位移、围护体顶部沉降及立柱隆沉。

为便于讨论，将本工程施工工序总结为6个阶段如表1所示。

表1 典型施工工序划分

Table 1 Typical construction sequence

工况1	钻孔灌注桩及水泥搅拌桩施工
工况2	开挖至-3.40 m，开始施工冠梁及第一道支撑
工况3	开挖至-7.70 m，施工第二道支撑
工况4	开挖至-11.90 m，施工第三道支撑
工况5	开挖至-14.8 m，浇筑承台及底板施工
工况6	地下室外墙施工，依次拆除支撑，回填

## 3 围护结构侧向变形分析

随基坑开挖深度增加，围护桩向基坑内部变形增

大，图2展示了CX11及CX10处的侧向变形随6阶段工况的变形发展情况。由图可见，两处围护墙变形的形态相近，均呈内凹性开展，最大侧向变形的位置基本处于开挖面附近；对两个位置的变形比较可知，CX11处的变形明显小于CX10处的变形，基坑南侧周边环境简单，对变形影响较小，分析可得在相同情况下，由于CX11距离基坑边角16.5 m，约1.1倍 $H_e$ （最大开挖深度），坑角对围护结构的变形仍然有一定的限制作用。

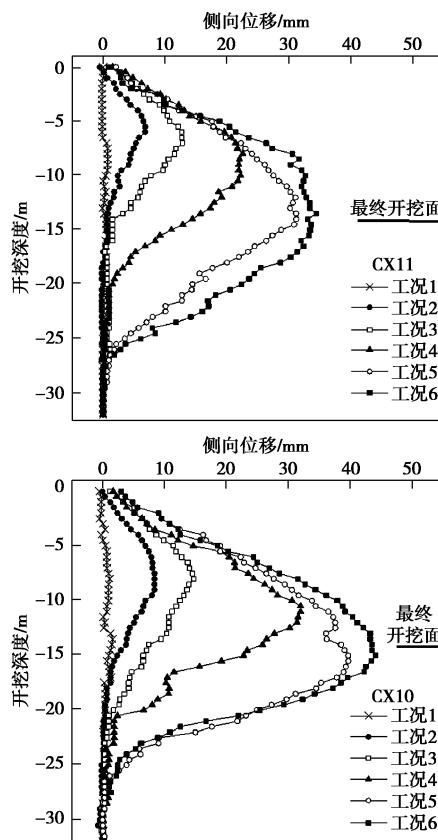


图2 围护桩侧向位移

Fig. 2 Deflections of lateral wall

图 3 展示了墙后最大侧向位移与开挖深度之间的关系。可以看出, 本基坑围护侧向位移远小于 Peck<sup>[7]</sup>提出的  $1\%H$  的控制线范围, 比较符合 Clough 等<sup>[8]</sup>提出的 ( $0.22\% \sim 0.5\%$ )  $H$  的范围。此外, 本基坑变形明显大于上海某使用地下连续墙围护的长条形地铁基坑<sup>[9]</sup>数据, 可见钻孔灌注桩加止水帷幕在限制位移方面弱于地下连续墙。

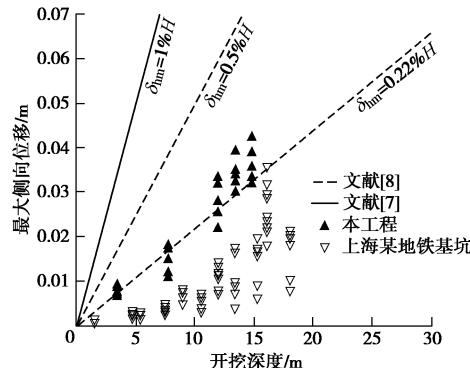


图 3 最大侧向变形与开挖深度的关系

Fig. 3 Relationship between maximum wall deflection and excavation depth

## 4 地表沉降分析

### 4.1 垂直基坑方向沉降分布

图 4 显示了基坑西侧中部的坑外地表沉降随开挖发展的情况, 可见其发展趋势比较符合 Clough 等<sup>[8]</sup>提出的经验分布, 主要影响区域在 2 倍开挖深度范围内; 与 Hsieh 等<sup>[10]</sup>的经验曲线相比, 距离 0.5 倍开挖深度内, 沉降值也较大, 可能的影响因素是基坑外重型车辆导致的附加荷载。

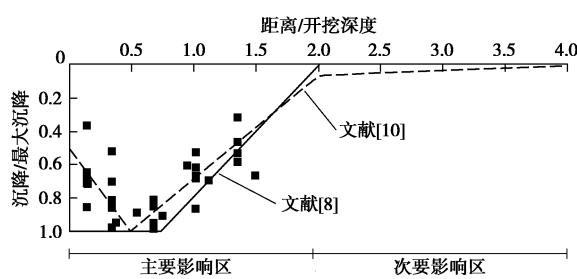


图 4 基坑外沉降分布

Fig. 4 Settlement distribution vertical to excavation

### 4.2 平行基坑方向沉降分布

基坑边角对围护结构的变形限制也会相应减小基坑外的地表沉降, 但是也会使得平行基坑方向上产生一定的差异沉降, 差异沉降过大会对道路、地下管线或邻近的建筑物造成破坏。本研究在基坑开挖阶段对西侧外部道路的裂缝情况进行了监测, 在开挖达到第三阶段时, 在道路上观测到与基坑呈  $70^\circ \sim 110^\circ$  的纵向裂缝, 裂缝开展的位置如图 5 所示。

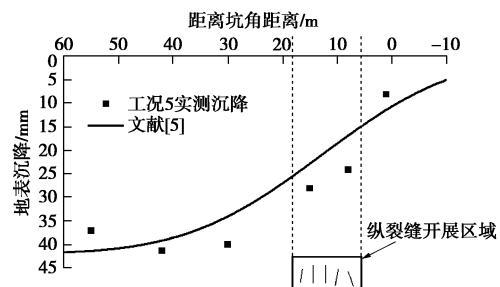


图 5 西侧平行基坑方向沉降分布

Fig. 5 Settlement distribution parallel to west side

图 5 中显示的曲线根据 Roboski 等<sup>[5]</sup>提出的平行基坑方向变形分布方程绘制; 基坑在坑角至  $1.5H_e$  段的沉降略大于预测曲线, 由图可见, 坑角对地表沉降也有明显抑制作用, 大约在距离坑角  $3H_e$  时, 沉降才达到最大值, 也就是说坑角效应的影响范围在本工程中大约为  $3H_e$ 。此外, 在裂缝开展较为明显的区域即是在坑角附近沉降变化率较大的位置, 处在  $0.4H_e \sim 1.2H_e$  的范围, 也就是说若在基坑开挖此范围区域存在需要严格控制变形的道路或建构筑物, 需要严密监控或者提前加大范围进行加固, 减小沉降变化率。

## 5 建筑物沉降分析

基坑西侧的三栋建筑物沉降观测点分布如图 1 所示, 其中 A, C 栋为柱基础建筑, B 栋为条形基础建筑, 建筑最终沉降量如图 6 所示, 可见柱基础建筑的沉降明显小于条形基础建筑的沉降; 此外, 建筑物由差异沉降产生的角变量  $\beta$  可由下式求得:

$$\beta_{ij} = (S_i - S_j) / d_{ij} \quad (1)$$

式中  $S_i$  为建筑某点沉降;  $d_{ij}$  为两沉降点间距。由图 6 可判断最大角变量的区段, 经计算 3 栋建筑的最大角变量分别是  $1/2100$ ,  $1/1300$ ,  $1/3800$ 。可见 B 栋建筑的差异沉降最大, 经观测建筑墙体并未出现明显的裂缝, 可判断  $1/1300$  的角变量还在建筑的安全使用范围。

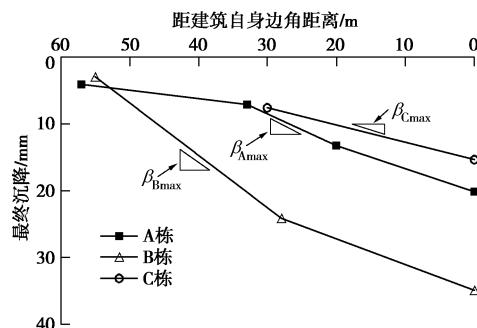


图 6 建筑物最终沉降值

Fig. 6 Final settlements of buildings

但在开挖过程中, B 栋建筑的最大沉降值接近 35 mm, 且 3 栋建筑附近均产生了明显的裂缝, 此区域

的裂缝主要为横向裂缝，且裂缝宽度较大，分析原因主要是由于建筑底部与地表的沉降值相差较大，导致错层开裂。

## 6 结 论

本文以温州市深基坑工程作为背景，对工程及监测手段进行了介绍，对基坑围护结构侧向位移、坑外地表沉降、邻近建筑沉降及裂缝监控的数据总结分析，得出以下结论：

(1) 随开挖深度增加，围护结构呈内凹性增大变形，最大位移位于开挖面附近，位移值较地下连续墙围护的基坑偏大，总体处在(0.15%~0.4%) $H$ 范围。

(2) 在距离坑角1.1倍 $H_e$ 位置，坑角仍对围护结构变形有明显的抑制作用。

(3) 平行基坑方向，空间效应对地表沉降的影响范围在本工程中大约 $3H_e$ ，在 $0.4H_e\sim 1.2H_e$ 范围，由空间效应引起的沉降变化率较大，需重点监测加固。

(4) 在距离基坑 $2H_e$ 范围内的建筑具有明显的沉降及差异沉降，引起的最大角变量达到 $1/1300$ ，但仍在建筑可承受范围。

(5) 邻近基坑的桩基础建筑的沉降及差异沉降均明显小于条形基础建筑物。

## 参 考 文 献：

- [1] 俞建霖, 龚晓南. 深基坑工程的空间性状分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 21~25. (YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Spatial behavior analysis of deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 21~25. (in Chinese))
- [2] 赖冠宙, 房营光, 史宏彦. 深基坑排桩支护结构空间共同变形分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1749~1752. (LAI Guan-zhou, FANG Ying-guang, SHI Hong-yan. Spatial mutual deformation analysis method for row of piles of deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1749~1752. (in Chinese))

- [3] FINNO R J, BLACKBURN J T, ROBOSKI J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 30~36.
- [4] LEE F H, YONG K Y, QUAN K C N, et al. Effect of corners in strutted excavations: field monitoring and case histories[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(4): 338~349.
- [5] ROBOSKI J F, FINNO R J. Distributions of ground movements parallel to deep excavations in clay[J]. Canadian Geotechnical Engineering, 2006, 43: 43~58.
- [6] 郑刚, 李志伟. 不同围护结构变形形式的基坑开挖对邻近建筑物的影响对比分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 969~977. (ZHENG Gang, LI Zhi-wei. Comparative analysis of responses of buildings adjacent to excavations with different deformation modes of retaining walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 969~977. (in Chinese))
- [7] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]// Proceeding of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering State-of-the-art Volume, Mexico City, 1969: 225~290.
- [8] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]// Proceedings, ASCE Conference On Design And Performance Of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No.25, ASCE. New York, 1990: 439~470.
- [9] TAN Y, WEI B. Observed behaviors of a long and deep excavation construction by cut-and-cover technique in Shanghai soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2012, 138(1): 69~88.
- [10] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Can Geotech, 1998, 35(6): 1004~1017.

(本文责编 胡海霞)