

DOI: 10.11779/CJGE2019S1022

南京软土地区基坑墙体变形性状研究

万 星¹, 戈 铭², 贺智江¹, 邓 松¹, 丁建文^{*1}

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096 2. 江北新区枢纽经济发展管理办公室, 江苏 南京 211899)

摘要: 依托南京江北地区某线形隧道基坑, 搜集了35个南京地区支挡结构加内支撑的明挖基坑案例, 对南京软土地区基坑开挖的墙体变形性状进行了比较系统的探讨。研究表明: 墙体的最大侧移量随基坑开挖深度的增大而明显增大, 变化范围为 $0.05\%H_e \sim 0.69\%H_e$, 平均值约为 $0.24\%H_e$; 最大侧移深度均位于 $H_e-8 \sim H_e+2$ 之间, 其中多数位于基坑开挖底面以上; 南京地区侧墙变形具有显著的时空效应, 施工过程应注意尽可能缩短坑底暴露时间; SMW工法支护对于墙体侧移的控制能力相比地连墙及钻孔桩支护较弱。另外, 围护结构的插入比和基坑的长宽比亦会对墙体变形产生影响。

关键词: 基坑工程; 南京地区; 墙体变形性状; 现场实测

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0085-04

作者简介: 万 星(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事基坑工程、桩基工程等方面的研究。E-mail:220162530@seu.edu.cn。

Characteristics of deformation of retaining wall due to deep excavation in Nanjing

WAN Xing¹, GE Ming², HE Zhi-jiang¹, DENG Song¹, DING Jian-wen¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Office of Economic Development Management, District Jiangbei New Area, Nanjing 211899, China)

Abstract: Based on a linear foundation pit in Jiangbei, Region of Nanjing, a database of 35 case histories was collected. The characteristics of lateral displacement in Nanjing due to deep excavation are studied systematically. The research shows that the maximum lateral displacement increases with the excavation depth, which ranges from $0.05\%H_e$ to $0.69\%H_e$, with an average value of $0.24\%H_e$. The maximum lateral wall displacements along depth occur within the range from H_e-8 to H_e+2 and most are above the excavation surface. The effects of time-space characteristics are found remarkable in lateral displacement of excavation in Nanjing. Hence, the time of exposure of the pit bottom should be as short as possible in construction. The SMW engineering method is relatively weaker in restraining lateral displacement than diaphragm wall and bored pile wall. In addition, the insertion ratio and length-width ratio can both affect the lateral displacement.

Key words: foundation pit engineering; Nanjing; characteristic of lateral wall; field measurement

0 引言

随着城市地下空间的开发, 基坑工程呈现密集成化, 且开挖面积及深度均不断增大, 有学者指出中国基坑工程的设计与施工已经迎来了变形控制的重要阶段^[1], 基坑的受力变形是综合作用的结果, 现有理论难以系统地考虑支护形式、支护结构刚度、复杂周边环境等因素, 而有限元方法尽管可以考虑复杂的边界条件, 但因参数难以选取等问题存在很大局限性。现场监测数据是基坑实际变形情况的真实反映, 通过系统地分析某一地区的基坑实测数据, 进行统计归纳, 得出地区性、经验性的结论, 是一种非常有效的研究途径, 可以为后续该地区基坑的设计施工提供指导。国内学者^[2~4]分别对上海、北京、无锡等地区的基坑变形情况进行了研究, 得出了许多有益的结论。

南京地区近年来在建大量地铁公路隧道, 该地区广泛分布的漫滩相软土使得基坑开挖的难度及风险较大, 因此对基坑的变形控制尤其是基坑侧移的控制尤为重要, 而有关于南京地区基坑开挖墙体变形规律系统的研究则相对较少。本文以南京江北地区某线形隧道基坑为依托, 并搜集了南京地区35个支挡结构加内支撑的明挖基坑案例实测数据, 对南京地区的基坑墙体变形性状进行了分析研究, 并对影响墙体变形的因素进行了探讨, 以期为该地区今后的基坑工程设计与施工提供参考。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378118); 国家科技支撑项目(2015BAB07B06); 水利部公益性行业专项经费项目(201401006-2)

收稿日期: 2019-04-28

*通讯作者(E-mail:jwding@seu.edu.cn)

1 工程概况

南京扬子江隧道江北连接线位于江北新区中心区。本场地主要为长江漫滩沉积地貌单元，地势较平坦，地层岩性以全新统灰色、灰褐色粉质黏土及淤泥质土为主，典型围护结构型式如图1所示，本项目主要采用SMW工法支护加水平内支撑的组合形式，支护形式随纵向开挖深度做出调整。

搜集了南京地区35个支挡结构加内支撑的明挖基坑案例，其中13个案例采用地下连续墙作为支挡结构，17个采用钻孔灌注桩，5个采用SMW工法。本文结合该工程及统计案例对南京地区墙体的变形性状展开分析。

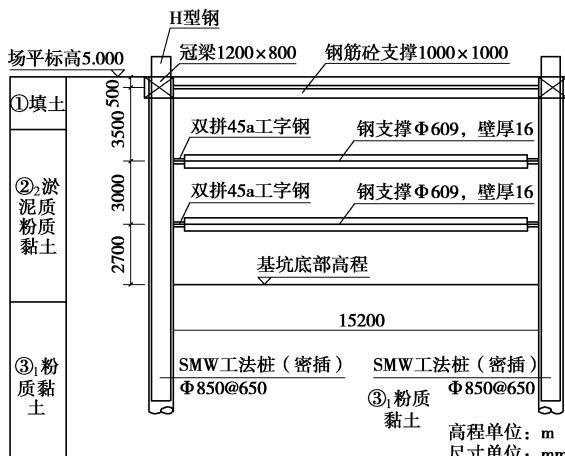


图1 典型围护结构示意图

Fig. 1 Typical schematic of supporting structures of excavation

2 侧墙变形性状分析

2.1 墙体最大侧移

从图2可以看出，南京地区基坑的最大侧移量随开挖深度增大而增大，变化范围为 $0.05\%H_e \sim 0.69\%H_e$ ，平均值约为 $0.24\%H_e$ 。本工程的最大侧移量约为 $0.35\%H_e$ ，大于统计平均值，主要是由于选用了刚度较低的SMW工法支护型式。由于土层差异，围护结构的侧向变形具有显著的区域性差异，上海地区流塑态软土对墙体变形的抑制作用弱，采用地下连续墙支护时，最大侧移量仍高达 $0.42\%H_e$ ^[2]；相比之下，北京^[3]、无锡地区^[4]的地层条件则较好，侧移相对较小。

如图3所示，除了某3个地连墙支护的最大侧移发生在墙顶外，南京地区基坑的最大侧移位置均位于 $H_e - 8 \sim H_e + 2$ ，其中多数位于基坑开挖面以上。而本工程各测点的最大侧移深度均介于 $H_e + 2 \sim H_e + 7$ ，最大侧移位置均位于开挖面以下。Ou等^[5]对台湾地区基坑进行了研究，发现基坑的最大侧移点基本位于开挖面处，

徐中华等^[2]则发现上海地区基坑最大侧移深度基本介于 $H_e - 5 \sim H_e + 5$ 。尽管统计结果存在差异，但可以看出最大侧移点基本位于开挖面附近，土层条件、支护结构受力以及施工方法上的差异都会影响基坑的最大侧移位置。

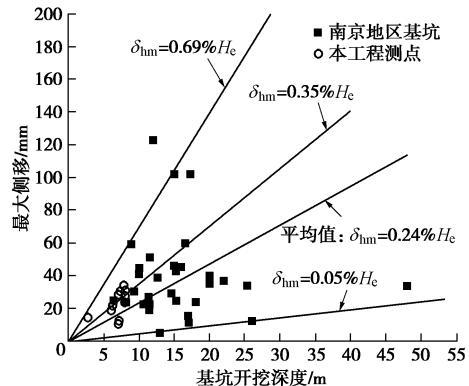


图2 墙体最大侧移与开挖深度关系

Fig. 2 Relationship between maximum lateral displacement of wall and excavation depth

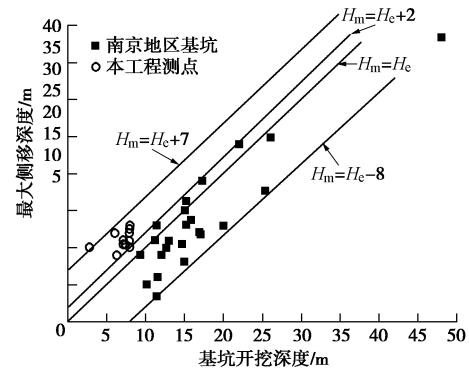


图3 基坑最大侧移深度与开挖深度关系

Fig. 3 Relationship between location of maximum lateral displacement of wall and excavation depth

2.2 侧墙变形规律

根据表1及图4可以看出在开挖3m深时，墙体侧移较小，最大值为6~7mm，且位移曲线呈“悬臂型”。当开挖至底时（7.4m深），侧墙的最大位移值约为15mm，同时侧移曲线变为“鼓胀型”，最大侧移深度为12m左右，位于开挖面以下。在浇筑垫层及绑扎底层钢筋的阶段，侧墙发生了较大的变形，最大侧移量增加了约10mm，且最大侧移深度略有下移。拆除混凝土支撑后，墙体的侧移值高达30mm，远大于基坑开挖完成时的侧移量，这主要有两方面原因：①南京地区软土具有流变性，蠕变作用较强，时间效应显著^[6]；②SMW工法支护型式侧墙刚度有限，在拆除支撑时整体刚度减小，侧移增大。以上表明拆除砼支撑时是侧移最大的阶段，危险程度较高，应给予重视。另外，在拆撑的两个阶段，基坑最大侧移位置发生了上移，这与基坑整体的受力状态改变有关。

由图 5 可以看到, 在浇筑垫层、绑扎钢筋及浇筑底板的约一个月时间中, 选取的某两仓侧移量高达 $10\sim15$ mm, 占最终变形量的 $1/3$ 左右, 这表明由于时空效应的作用, 南京软土地区基坑围护结构的最终侧移量与坑底暴露时间密切相关。当需严格控制基坑侧移时, 可通过优化施工工艺等方法加快底板施工速度, 减小坑底暴露时间, 抑制围护结构的侧移。

表 1 主要施工工况

Table 1 Key construction stages

日期	工况
2016-11-10	开挖 3 m 深
2016-11-12	开挖完成 (7.4 m 深), 架设钢支撑
2016-11-15	垫层完成
2016-11-20	铺筑底层钢筋
2016-11-30	底板完成
2016-12-14	拆除钢支撑
2017-01-10	拆除混凝土支撑

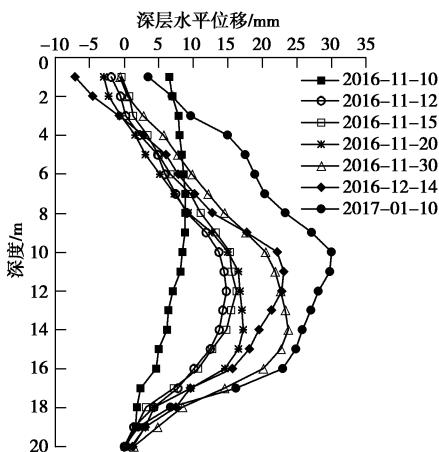


图 4 典型断面测点水平位移随时间变化曲线

Fig. 4 Change of lateral displacement with time

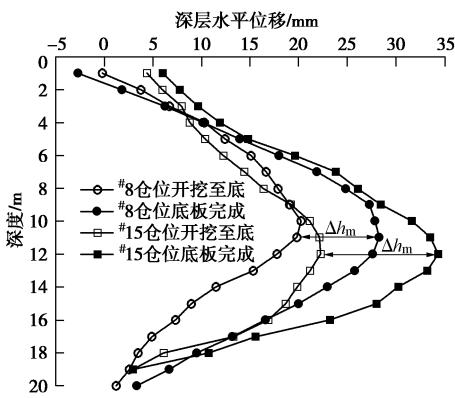


图 5 底板施工阶段围护结构变形情况

Fig. 5 Deformation of walls during construction of floor

3 侧墙变形影响因素探讨

3.1 不同围护结构的影响

不同围护结构由于其刚度、尺寸及施工工艺等方

面的差异, 对墙后土体变形的抑制能力各不相同。根据相关统计案例, 3 种支护型式在南京地区适用的基坑深度范围各不相同, 其中 SMW 工法约为 $5\sim15$ m, 钻孔灌注桩约为 $10\sim20$ m, 而地下连续墙适用范围最广, 在深度为 $5\sim30$ m 范围内均有选用。SMW 工法由于其挡土止水一体化、对环境影响小、钢板桩可回收利用等优点, 近些年来应用广泛, 但相较于传统地连墙及钻孔桩等结构其变形控制能力偏弱, 相适应的基坑开挖深度也较浅。图 6 反映了上述 3 种不同围护结构最大侧移的情况, 可以看出, 地下连续墙与钻孔灌注桩在控制基坑侧移方面作用相当, 而 SMW 工法则远不及前两者, 最大侧移量高达 $0.53\%H_e$, 为前者的两倍之多。另外, 由上文可知本工程中 SMW 工法结构的侧移量为 $0.35\%H_e$, 小于南京地区 SMW 工法的平均值, 这可能是由于该快速化改造工程是在原有路基上进行基坑开挖, 先期对原有路基土体进行了搅拌桩加固, 使得土体强度有所增大, 从而基坑开挖时产生的侧向位移则相对较小。

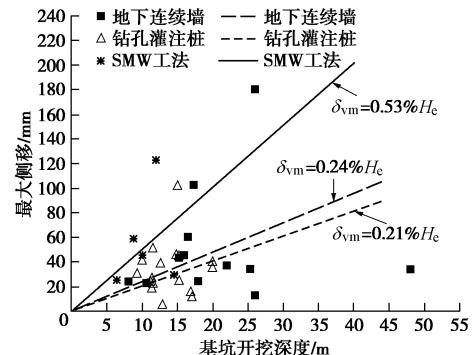


图 6 不同支护结构基坑最大侧移与开挖深度关系

Fig. 6 Relationship between maximum lateral displacement and excavation depth of different retaining system types

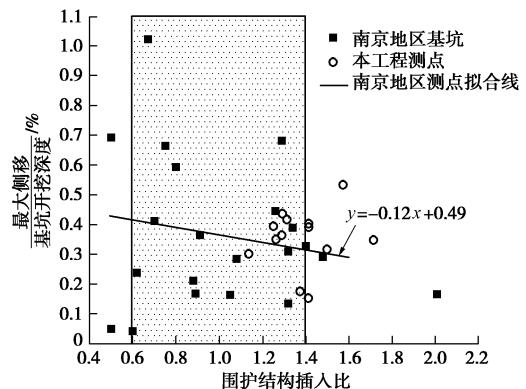


图 7 无量纲化最大侧移与围护结构插入比关系

Fig. 7 Relationship between normalized lateral displacement and embedded depth ratio

3.2 插入比的影响

从图 7 可以看出, 南京地区基坑的围护结构插入

比基本位于 0.6~1.4 之间, 平均值为 1.02, 稍大于上海地区的平均插入比 0.88^[2]。文献[7]认为增大插入比可以提高基坑的抗隆起稳定性, 在一定条件下可以减小基坑的侧移量。从图中可以看出基坑的无量纲化最大侧移随着插入比的增大呈减小的趋势, 这与李淑等^[3]得出的结论一致。本工程的围护结构插入比相对较大, 这主要是由于 SMW 工法支护刚度较低, 通过增大钢板桩入土深度可以提高基坑的整体稳定性。而本工程的最大侧移量与插入比未见明显相关性。

3.3 长宽比的影响

基坑工程是三维结构, 基坑的形状会对受力情况、施工工艺流程等方面产生影响, 从而带来基坑变形情况的差异。从图 8 可以看到, 无量纲化最大侧移量随着基坑长宽比的增大而增大。这与基坑开挖的空间效应有关, 一方面狭长型基坑的坑角效应较弱, 对基坑侧移的抑制作用较差; 另一方面狭长型基坑的施工周期较长, 时间效应明显。在基坑开挖的过程中, 应注意时空效应规律的应用, 做到分段分层开挖和隔舱开挖, 减少无支撑暴露时间及坑底暴露时间。

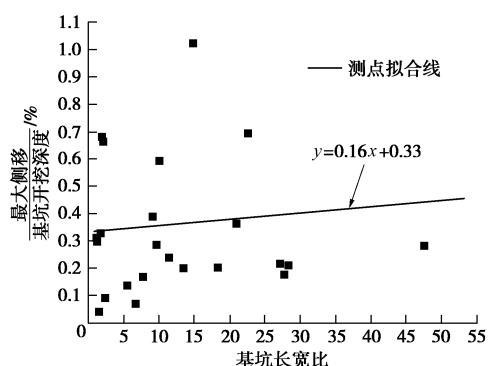


图 8 无量纲化最大侧移与基坑长宽比关系

Fig. 8 Relationship between normalized lateral displacement and length-width ratio

4 结 论

(1) 南京地区基坑的最大侧移量随开挖深度的增大而增大, 变化范围为 $0.05\%H_e \sim 0.69\%H_e$, 平均值约为 $0.24\%H_e$ 。最大侧移深度均位于 $H_e - 8 \sim H_e + 2$ 。本工程墙体最大侧移为 $0.35\%H_e$, 高于南京地区平均值, 主要由于采取了刚度较低的 SMW 工法支护。最大侧移深度均位于 $H_e + 2 \sim H_e + 7$ 。

(2) 南京地区基坑侧墙变形具有显著的时空效应, 本工程底板施工期间基坑侧移量高达最终侧移量的 1/3 左右, 施工过程应注意缩短坑底暴露时间, 抢浇垫层和底板。

(3) 地下连续墙与钻孔灌注桩在控制基坑侧移方面效果相当, 而 SMW 工法则明显较差, 平均最大侧移量为前两者的两倍之多。墙体最大侧移量随插入比的增大而减小, 随长宽比的增大而增大。

参 考 文 献:

- [1] 郑刚, 朱合华, 刘新荣, 等. 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, LIU Xin-rong, et al. 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] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 81~86. (XU Zhong-hua, WANG Jian-hua, WANG Wei-dong. Deformation behavior of diaphragm walls in deep excavations in Shanghai[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(8): 81~86. (in Chinese))
- [3] 李淑, 张顶立, 房倩, 等. 北京地区深基坑墙体变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2344~2353. (LI Shu, ZHANG Ding-li, FANG Qian, et al. Research on characteristics of retaining wall deformation due to deep excavation in Beijing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2344~2353. (in Chinese))
- [4] 乔亚飞, 丁文其, 王军, 等. 无锡地区地铁车站深基坑变形特性[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 761~766. (QIAO Ya-fei, DING Wen-qi, WANG Jun, et al. Deformation characteristics of deep excavations for metro stations in Wuxi[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S0): 761~766. (in Chinese))
- [5] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(5): 758~767.
- [6] 李俊才, 张倬元, 罗国煜. 深基坑支护结构的时空效应研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 812~816. (LI Jun-cai, ZHANG Zhuo-yuan, LUO Guo-yu. Study on effects of time-space of retaining structures of the deep-foundation pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 812~816. (in Chinese))
- [7] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Handbook for foundation pit engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))

(责编: 胡海霞)