支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形特性分析

王建华[1]，徐中华[2]，王卫东[2]
（1．上海交通大学土木工程系，上海 200030；2．华东建筑设计研究院，上海 200002）

摘 要：收集了上海市区 31 个支护结构与主体地下结构相结合深基坑工程的实测变形资料，从统计角度探讨了支护结构与主体地下结构相结合深基坑围护结构的变形特性。结果表明，围护结构最大侧移介于 0.1%H 和 0.6%H 之间，平均值仅为 0.25%H，H 为开挖深度；且围护结构的最大侧移一般位于开挖面附近。进一步分析了墙底以上软土层厚度、围护结构插入比、支撑系统刚度、坑底抗隆起稳定系数及首道支撑的深度位置等因素对围护结构变形的影响。

关键词：深基坑；支护结构与主体地下结构相结合；变形特性；软土
中图分类号：TU476 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2007)12－1899－05

作者简介：王建华(1959－)，男，江西南昌人，博士生导师，教授，博导，主要从事岩土力学和岩土工程教学与研究工作。E-mail: wjh417@sjtu.edu.cn。

Analysis of deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure

WANG Jian-hua[1]，XU Zhong-hua[2]，WANG Wei-dong[2]
(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: A database of 31 case histories of wall deformation due to deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit was presented. Deformation behavior of the retaining structure was analyzed. It was shown that the maximum lateral displacement of the retaining wall ranged from 0.1%H to 0.6%H, and the mean value was only about 0.25%H, where H was the excavation depth. Generally speaking, the location of the maximum lateral displacement of the retaining wall occurred near the excavation surface. Furthermore, some factors affecting the deformation of the retaining structure were analyzed, including thickness of soft soil above the wall toe, embedded depth ratio of the retaining structure, system stiffness, factor of stability against basal heave and the location of the first level strut.

Key words: deep excavations; excavation supported by permanent structure; deformation behavior; soft clay

0 引 言

支护结构与主体地下结构相结合的设计和施工方法由于其在变形控制、可持续发展等方面具有诸多优点而成为建设高层建筑多层地下室和其它多层地下结构的有效方法[1]，该支护方式近年来在上海地区发展迅速并得到了越来越多的应用。目前主要应用于周边有密集建筑群及环境保护要求严格的基坑工程。在这种情况下，基坑的设计已完全转向变形控制设计。如在设计阶段就能较准确地预估基坑的变形及基坑开挖对周边环境的影响，则能有效地指导基坑工程的设计。因而在基坑的变形控制设计中，对深基坑的变形特性的认识非常重要。

许多学者基于多个基坑案例的实测资料，采用统计分析的方法，探讨基坑各变形特征量与基坑有关物理力学参数之间的关系，从而避开了讨论基坑工程复杂影响因素的难点。实测资料统计分析按基坑案例的来源范围可分为两种方法，一种是分析大范围内的基坑，如 Peck[2]、Clough[3]、Long[4]等的研究，给出基坑的一般变形规律；另一种是分析小范围（区域）内的基坑，如 Karlsrud[5]针对奥斯陆软土地区、Ou[6]针对台北软土地区、Wong[7]针对新加坡地区、Carder[8]和 Fernie[9]针对英国地区的基坑变形特性研究。

支护结构与主体地下结构相结合的支护方式在上海地区已经在一定规模上应用于工程实践，并积累了一定的工程经验，但关于其变形特性的认识目前尚缺乏较系统的研究。本文在收集上海地区 31 个已经成功

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50679041）
收稿日期：2007－01－05

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实践的支护结构与主体地下结构相结合基坑实测资料的基础上，对该类基坑的围护结构变形特性进行统计分析，并研究相关因素对基坑变形影响的规律，以期为该类基坑工程的设计和施工提供参考。

1 工程案例及整理

收集了上海地区已完成的 31 个支护结构与主体地下结构相结合深基坑案例，具体数据可参考文献[10]。数据包括基坑围护的基本信息和基坑的变形数据。基坑围护的基本信息列出了基坑开挖的深度 H、软土层顶面埋深 h_{st}、软土层厚度 h_s、围护结构型式及其厚度、深度 H_w 与抗弯刚度 EI、水平支撑的道数、首道支撑的深度位置 h_1、平均支撑间距 h 及坑底抗隆起稳定系数 F_s。其中软土层厚度是指上海地区软弱的第③层淤泥质粉质黏土层和第④层淤泥质黏土层的厚度之和。变形数据包括最大的墙体侧移 δ_{hm}、最大侧移的深度位置 $H_{\delta hm}$ 及墙顶侧移 δ_{top}。数据还包括了未开挖到底的中间工况。

2 围护结构变形特性统计分析

2.1 围护结构的最大侧移

图 1 为围护结构的最大侧移与开挖深度之间的关系，图中的数据包括了基坑尚未开挖到底的中间工况。可以看出，除了一个基坑（森茂国际大厦）最大侧移大于 0.6%H 和一个基坑最大侧移小于 0.1%H（M8 线虹口体育场站逆作区）之外，其余基坑的最大侧移基本介于 0.1%H 和 0.6%H 之间。所有基坑的最大侧移平均值为 0.25%H。森茂国际大厦由于先期悬臂开挖深度大于 4 m 而产生了很大的位移，并导致开挖到底时的最大侧移达到 129 mm。M8 线虹口体育场站逆作区由于采用了大直径的咬合桩、坑底加固、时空效应挖土方法等措施从而将基坑的变形控制在很小的范围内（0.037%H）。图 1 表明，最大侧移随着开挖深度的增大而大致呈现出线性增长趋势。

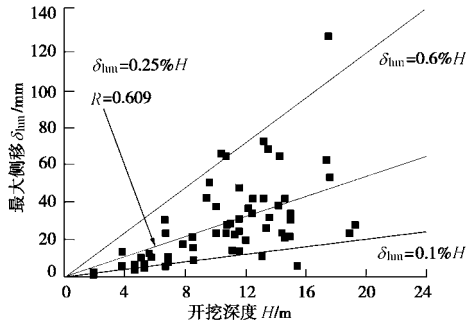


图 1 围护结构最大侧移与开挖深度之间的关系

Fig. 1 Relationship between the maximum lateral displacement of wall and the excavation depth

Clough[3]曾统计了各种围护墙体的最大侧移实测值，结果表明墙体最大侧移的平均值约为 0.2%H，并且绝大部分均小于 0.5%H。本文统计的支护结构与主体地下结构相结合基坑平均最大侧移略大于 Clough[3] 的统计值，是由于 Clough[3]统计的基坑工程主要是位于硬黏土、残积土和砂土等较好的土层，而本文的基坑则位于上海地区的软土层中的缘故。Ou[6]曾统计了台北地区十个基坑工程的变形，大部分基坑的最大侧移介于 0.2%H～0.5%H，平均最大侧移约为 0.4%H。本文统计的支护结构与主体地下结构相结合的基坑平均最大侧移较 Ou[6]的统计值小得多，这是由于 Ou[6] 所统计的基坑虽然也位于软土地区，但绝大部分采用常规顺作法施工，而本文统计的基坑采用支护结构与主体地下结构相结合，其水平支撑刚度较常规顺作法基坑要大得多，从而有效地控制了基坑的变形的缘故。

2.2 围护结构最大侧移的深度位置

图 2 为最大侧移所处的深度位置与开挖深度之间的关系。总体而言，最大侧移位于开挖面的附近。当开挖深度大于 16 m 以后，最大侧移的深度位置有位于开挖面以上的趋势，这可能是由于此时开挖面已经进入较硬的土层中的缘故。图中最大侧移位于墙顶的情况为中间工况，此时基坑为悬臂开挖，因而最大侧移位于墙顶。图 2 反映的实测最大侧移的深度位置的分布规律与 Ou[6]的统计规律相似，这表明支护结构与主体地下结构相结合的深基坑的围护结构最大侧移的深度位置的分布规律与常规顺作法基坑相似。

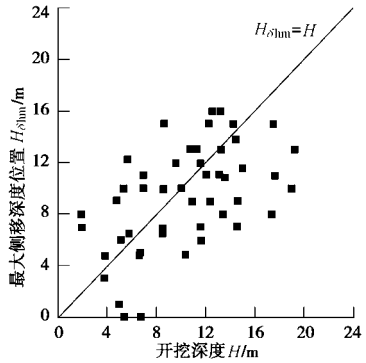


图 2 墙体最大侧移的深度位置与开挖深度之间的关系

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

2.3 围护结构侧移影响因素分析

围护结构的侧移大小受多种因素的影响，这里分析软土层厚度、围护结构插入比、支撑系统刚度、坑底抗隆起稳定系数及首道支撑的深度位置等几个因素对围护结构最大侧移的影响。

（1）墙底以上软土厚度对最大侧移的影响

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

上海地区的第③、④层土强度低、变形大、灵敏度高、侧压力系数大，且具有流变特性，因而对基坑的变形影响较大。Wong[7]曾将收集到的新加坡地区的基坑工程按照开挖面以上软土（标准贯入击数 N 小于 5）厚度小于 0.9H 和小于 0.6H 两类进行分类并分别分析了其变形特性。Long[4]亦曾将其收集到的基坑工程案例按照开挖面以上软土（十字板剪切强度 S_u 小于 25 kPa）厚度小于 0.6H 和大于 0.6H 两类进行分类并分别分析其变形特性。本文在讨论软土厚度对基坑变形的影响时，考虑围护墙底以上第③、④层软土的厚度。

定义围护墙底以上软土厚度为 h_{sw}，则 h_{sw} 可通过软土层顶面埋深 h_{st}、墙体的深度 H_w 及软土层厚度 h_s 算出。图 3 为基坑墙底以上软土厚度与最大侧移的关系，其中横轴为墙底以上软土厚度与墙体深度的比值（h_{sw}/H_w），纵轴为无量化的最大侧移。从图中可以看出，无量纲化的最大侧移随着墙底以上软土厚度与墙体深度的比值的增大而大致呈现出线性的增长关系，这表明，墙底以上的软土厚度越大，围护结构的侧移也越大。需指出的是图 3 中的数据未包括中间工况。

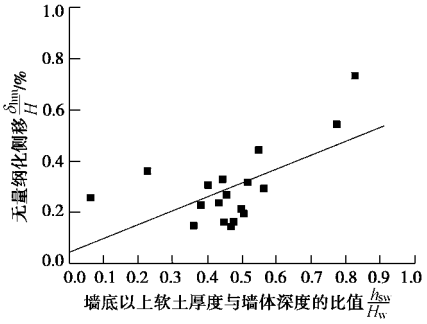


图 3 墙底以上软土厚度对最大侧移的影响

Fig. 3 Effect of thickness of soft soil above wall toe on normalized maximum lateral displacement of wall

图 4 为墙底以上软土厚度对最大侧移深度位置的影响情况，其中横坐标仍为墙底以上软土厚度与墙体深度的比值（h_{sw}/H_w），而纵坐标为最大侧移的深度位置与基坑开挖深度的比值（$H_{\delta hm}/H$）。可以看出，随着 h_{sw}/H_w 的增大，$H_{\delta hm}/H$ 也随之增大。这表明，最大侧移的位置随着墙后软土厚度的增大而下移。

（2）插入比（(H_w-H）/H）对最大侧移的影响

图 5 为无量纲化最大侧移与围护结构插入比的关系，图中的数据不包括中间工况。可以看出，支护结构与主体地下结构相结合的基坑的围护结构变形与插入比的关系不大。Hashash[11]通过有限元分析表明，只有当基坑的开挖深度达到极限开挖深度（由于土体变形过大导致数值计算不收敛时对应的开挖深度）时，围护结构的插入深度才会对墙体的侧移产生较小的影响，否则围护结构的插入深度对围护结构的侧移的影响就可以忽略。本文所统计的基坑的实际开挖深度均远小于极限开挖深度，实测的围护结构最大变形与插入比无关，这与 Hashash[11]的理论分析结论一致。

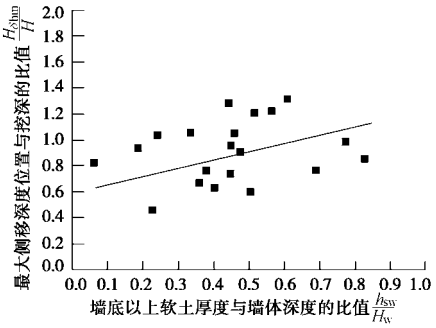


图 4 墙底以上软土厚度对最大侧移的深度位置的影响

Fig. 4 Effect of thickness of soft soil above wall toe on location of the maximum lateral displacement of wall

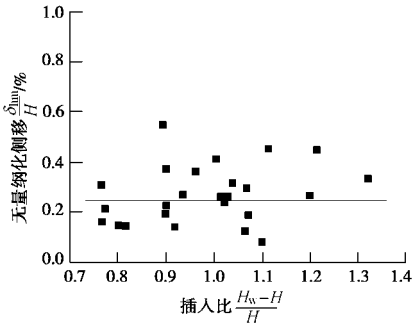


图 5 围护结构插入比对最大侧移的影响

Fig. 5 Effect of embedded depth ratio on normalized maximum lateral displacement of retaining wall

（3）支撑系统刚度对最大侧移的影响

图 6 为无量纲化最大侧移与 Clough[3]定义的支撑系统刚度（$EI/\gamma_w h^4$）之间的关系，图中的数据不包括中间工况。所收集的支护结构与主体地下结构相结合的基坑的支撑系统刚度介于 700～4000 之间。总体上可以看出，随着支撑系统刚度的增大，围护结构的侧移有减小的趋势。从图中还可以看出，无量纲化最大侧移以 Clough[3]给出的 F_s＝1.4 曲线为上限，以其给出的 F_s=3.0 的曲线为下限，并大致以其给出的 F_s＝2.0 曲线为平均值。

（4）坑底抗隆起稳定系数 F_s 对最大侧移的影响

Mana[12]的研究表明坑底抗隆起稳定系数 F_s 是影响墙体变形的一个重要参数，并根据奥斯陆、旧金山、芝加哥及波士顿等地的基坑工程案例统计出了墙体变形和 F_s 的关系，给出了墙体变形的上下限，从而给出了可通过 F_s 来预测墙体变形的方法。Mana 采用了 Terzaghi[13]给出的 F_s 计算方法。由于上海地区的基坑

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

工程均按上海市基坑工程设计规程[14]推荐的方法计算 F_s，因此本文讨论 F_s 对墙体侧移的影响时，F_s 均按上海市基坑工程设计规程推荐的方法计算。

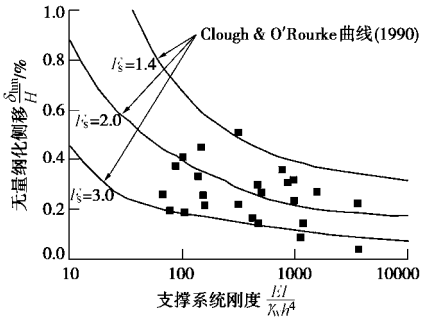


图 6 Clough[3]支撑系统刚度与最大侧移的关系

Fig. 6 Relationship between normalized maximum lateral displacement of wall and Clough[3] system stiffness

图 7 给出了上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑的墙体侧移与 F_s 的关系。从图中可以看出，所有数据点基本均落在 Mana[12]建议的上下限范围内。总体而言，围护结构的最大侧移与 F_s 的关系不大。这表明，采用 Mana 建议的根据 F_s 来预测墙体变形的方法来预测上海地区支护结构与主体地下结构相结合的基坑的墙体变形时将难以给出较好的结果。这是由于支护结构与主体地下结构相结合的基坑的变形本身就较小，此外上海市基坑工程设计规程[14]规定支护结构与主体地下结构相结合的基坑为一级基坑，要求 F_s 大于 2.5，从 Mana 建议的上下限来看，F_s 越大，墙体侧移的变化越不敏感，因此也越难给出较好的预测结果。

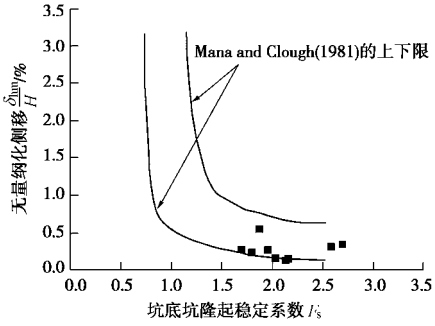


图 7 坑底抗隆起稳定系数 F_s 与最大侧移的关系

Fig. 7 Relationship between normalized maximum lateral displacement of wall and F_s

(5) 首道支撑位置对变形的影响

首道支撑的深度位置实际上决定了基坑悬臂开挖的深度，悬臂开挖深度会显著地影响基坑初期的变形尤其是墙顶的变形。图 8 为首道支撑的深度位置对墙顶侧移的影响。虽然数据点较少，但总体上可以看出，墙顶的侧向位移随着首道支撑深度位置的下移而呈现出增大的趋势，数据点可以采用指数增长函数来拟合。当 h_1 较小时，墙顶侧移随首道支撑深度位置的下移而增长很慢，这是由于土体本身存在一个边坡自稳的临界高度；当 h_1 约大于 3 m 后，墙顶侧移随着首道支撑深度位置的增大而迅速增长。图 8 的结果表明，为了控制围护墙顶的变形，应尽量将首道支撑设置在边坡自稳的临界高度范围内。

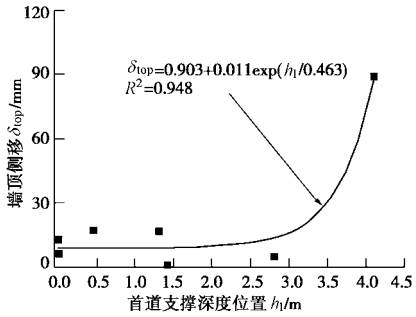


图 8 墙顶侧向位移与首道支撑的深度位置的关系

Fig. 8 Relationship between lateral displacement of top of wall and location of first level strut

图 9 为墙体最大侧移与首道支撑深度位置的关系，横坐标为首道支撑的深度位置与开挖深度的比值，而纵坐标为无量纲化的墙体最大侧移。从图中可以看出，墙体的最大侧移与首道支撑的深度位置的关系不大，说明首道支撑的深度位置主要是影响墙顶的侧移。Hashash[11]的研究表明，在开挖深度超过一定深度后，悬臂开挖对墙体的最大变形的影响就会消失，这里的实测统计结果亦支持了这个规律。

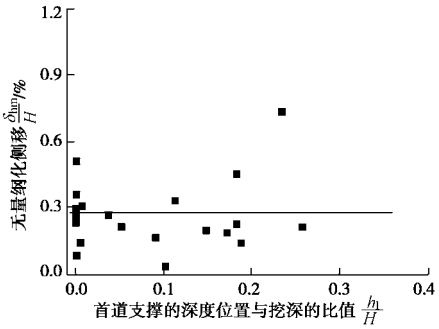


图 9 墙体最大位移与首道支撑的深度位置的关系

Fig. 9 Relationship between the maximum lateral displacement of wall and the location of first level strut

3 结 论

收集了上海地区 31 个支护结构与主体地下结构相结合的基坑工程的实测变形资料，从统计角度探讨

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

了支护结构与主体地下结构相结合的深基坑围护结构的变形特性，得到结论如下：

（1）支护结构与主体地下结构相结合基坑围护结构最大侧移介于 0.1%H 和 0.6%H 之间，平均值为 0.25%H。围护结构的最大侧移一般位于开挖面附近。

（2）围护结构的最大侧移随着墙底以上软土厚度的增大而增大；且最大侧移的深度位置随着墙后软土厚度的增大而呈现出下移的趋势。

（3）插入比对围护结构的最大侧移几乎没有影响。围护结构的最大侧移与坑底抗隆起稳定系数的关系不大，这表明，根据 F_s 来预测墙体变形的方法来预测上海地区支护结构与主体地下结构相结合的基坑的墙体变形时将难以给出较好的结果。

（4）所收集的支护结构与主体地下结构相结合的基坑的支撑系统刚度介于 700～4000 之间。随着支撑系统刚度的增大，围护结构的侧移有减小的趋势。可以根据支撑系统刚度利用 Clough[3]的图表来预测支护结构与主体地下结构相结合深基坑的变形。

（5）墙顶的侧向位移随着首道支撑深度位置的下移而呈现出增大的趋势，而首道支撑的深度位置对围护结构的最大侧移则几乎没有影响。

参考文献：

[1] 王卫东, 王建华. 深基坑工程中主体工程地下结构与支护结构相结合的研究与实践[J]. 工业建筑, 2004(增刊): 69－79. (WANG Wei-dong, WANG Jian-hua. Study and practice of deep excavation supported with substructure[J]. Industrial Construction, 2004(S): 69－79. (in Chinese))

[2] 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.

[3] 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, New York: 1990: 439－470.

[4] LONG M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, **127**(3): 203－224.

[5] KARLSRUD K. Performance monitoring in deep supported excavations in soft clay[C]// Proceedings, 4th International Geotechnical Seminar, Field Instrumentation and In-Situ Measurement, Nanyang Technological Institute, Singapore, 1986: 187－202.

[6] 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.

[7] WONG I H, POH T Y, CHUAH H L. Performance of excavations for depressed expressway in Singapore[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, **123** (7): 617－625.

[8] CARDER D R. Ground movements caused by different embedded retaining wall construction techniques[R]. Transport Research Laboratory Report 172, Berkshire, U K, 1995.

[9] FERNIE R, SUCKLING T. Simplified approach for estimating lateral movement of embedded walls in U K ground[C]// Proceedings, International Symposium on Geo Aspects of Underground Construction in Soft Ground, City University, London, 1996: 131－136.

[10] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007. (XU Zhong-hua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese))

[11] HASHASH Y M A. Analysis of deep excavation in clay[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1992.

[12] MANA A I, Clough G W. Prediction of movements for braced cuts in clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1981, **107**(6): 759－777.

[13] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1967.

[14] DBJ—60—97 基坑工程设计规程[S]. 1997. (DBJ—60—97 Code for design of excavation engineering[S]. 1997. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net