

DOI: 10.11779/CJGE2014S2074

复杂环境下某深厚软土基坑的实测性状研究

应宏伟^{1, 2}, 孙威^{1, 2}, 吕蒙军³, 陈东⁴

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;
3. 杭州运河集团投资发展有限公司, 浙江 杭州 310014; 4. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 详尽分析了杭州某上部带有较厚硬壳层的深厚软黏土地基中, 开挖深度为 17.4~19.8 m, 采用地下连续墙和多层钢筋混凝土支撑作为支护结构的超深基坑工程的实测性状。现场监测内容包括基坑侧壁土体水平位移、坑外地表沉降及内支撑轴力。研究表明, 本案例基坑的最大水平位移与基坑最大开挖深度之比 δ_{hm}/H_m 介于 0.24%~0.75%, 最大水平位移超过 100 mm, 其中蠕变变形占总侧向变形的比例高达 44%~56%, 基坑水平位移蠕变速率为 0.15~0.76 mm/d, 蠕变速率与基坑开挖深度和基底附近土层性质有密切关系; “T”型地下连续墙和隔断墙技术对减小侧壁土体变形有一定作用。基坑坑外横向地面沉降大致呈抛物线分布, 坑外纵向沉降大致呈马鞍形, 地表周围土体最大沉降与基坑最大开挖深度之比 δ_{vm}/H_m 介于 0.26%~0.7%, 最大沉降量与坑壁最大侧向位移量的关系大致为 $\delta_{vmax} = \delta_{hmax} \sim 2.57\delta_{hmax}$, 沉降蠕变速率为 0.1~0.6 mm/d。随着开挖及相邻支撑的浇筑及拆除, 多层支撑支护结构中各层支撑的轴力不断变化。

关键词: 深基坑; 水平位移; 沉降; 蠕变速率; 支撑轴力

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0424-07

作者简介: 应宏伟(1971-), 男, 副教授, 主要从事岩土工程的教学和科研工作。E-mail: ice898@zju.edu.cn。

Measured characteristics of a deep soft soil excavation in complex environment

YING Hong-wei^{1, 2}, SUN Wei^{1, 2}, LÜ Meng-jun³, CHEN Dong⁴

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. MOE, Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. The Hangzhou canal group investment and Development Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 4. Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: The monitoring data of a 17.4 m~19.8 m-deep multi-strutted soft clay excavation built on hard shell layer soft soil foundation in Hangzhou is analyzed. The deep excavation is supported by a concrete diaphragm wall and multi-storey reinforced concrete brace. The monitoring includes soil and wall deflections, surface and subsurface ground settlements, axial forces of concrete struts. This study shows that the maximum horizontal displacements are 0.24% H_m ~0.75% H_m , in which H_m is the total excavation depth. The maximum horizontal displacement is larger than 100 mm, in which the proportions of creep deformation reach up to 44%~56%. The horizontal creep rates are in 0.15~0.76 mm/d and closely related with the excavation depth and the properties of the soils near the base. The technology of T-diaphragm wall and partition wall can reduce the horizontal displacement of the excavation to some extent. The distribution of the lateral settlement is in a parabolic shape and the longitudinal settlement is in a saddle shape. The maximum settlements are 0.26% H_m ~0.7% H_m and the settlement rates are 0.1~0.6 mm/d. The relationship between the maximum settlements δ_{hmax} is between δ_{hmax} and $2.57\delta_{hmax}$, in which δ_{hmax} is the maximum horizontal displacement. The axial forces of the struts change dynamically during the excavation and construction or removal of the adjacent braces.

Key words: deep excavation; horizontal deflection; settlement; creep rate; strut force

0 引言

近年来基坑工程向着更复杂的方向发展, 深厚软黏土地区的基坑开挖往往会引起较大的墙体位移及周边建筑物的沉降, 通过现场监测, 来反馈各施工工况下支护墙体及周边环境的变形情况, 从而降低基坑施

工过程中的风险。

基于大量现场实测数据, 国内外学者对基坑的变

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278462); 浙江省建设厅科技推广应用研究项目

收稿日期: 2014-07-28

形性状进行了研究^[1-6], 应宏伟等^[7]及 Ou 等^[8]通过有限元的研究方法分析了基坑开挖过程中土体的固结作用。基坑工程问题与地基土的强度和变形特征、支护结构类型以及施工质量、基坑深度及平面规模、土方开挖及支撑施工方法等诸多因素相关。杭州主城区东部范围的深厚软黏土地基上覆厚度达十余米的粉土层, 属于典型的硬软互层地基, 本文即以杭州城区东部某设置多层内支撑、采用地下连续墙作为支护结构的深大基坑为对象, 详尽分析了施工过程中基坑的实测侧向位移及周围地表沉降等变形特性, 特别是对基坑的蠕变位移及蠕变速率进行了深入探讨, 并与国内外其他类似实例进行比较。

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

工程场地位于杭州市城区东部, 上部结构由酒店区、住宅区两个独立的高层结构单元组成, 酒店区地上 19 层, 裙房 4 层, 住宅地上 29 层, 裙房 2 层。地下设 3 层地下室, 基坑开挖深度为 17.4~19.8 m, 基坑平面尺寸大, 而且平面形状不规则, 周长约 560 m。

基坑位于闹市区, 周围环境复杂。南侧距离地铁一号线车站主体最近约 21 m, 距离地铁出入口及风亭最近仅约 6 m; 西侧和西北侧临近住宅小区, 邻近既有建筑由多幢 4~7 层砖混浅基础建筑物组成, 最近距离基坑约 14.4 m; 东侧和东北侧为城市道路, 交通繁忙并分布有大量地下市政管线。基坑周围环境及平面图见图 1。

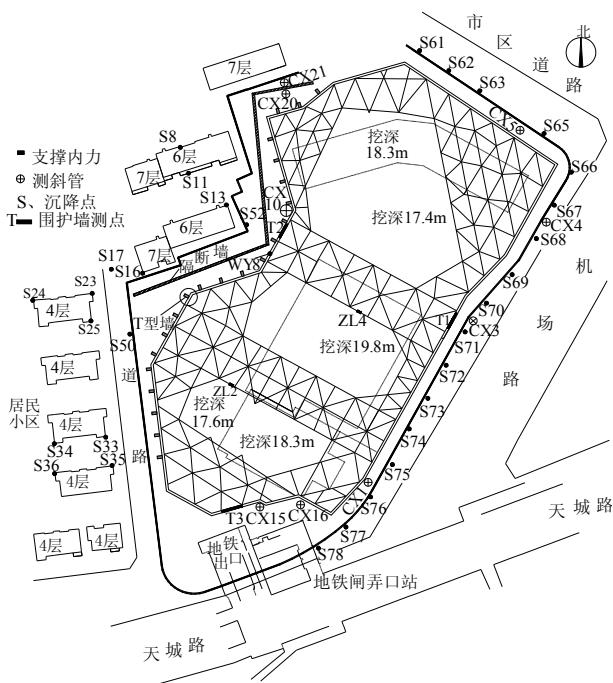


图 1 基坑平面布置图及主要监测点布置

Fig. 1 Layout of excavation and monitoring points

1.2 工程地质条件

工程场地地形较为平坦, 地貌单元属于钱塘江下游冲海积平原。开挖深度影响范围内上部 12 m 左右以粉土为主, 下部为厚度达 18 m 的淤泥质粉质黏土层。地下水埋深在 1.00~1.50 m 之间, 孔隙承压水主要分布于深部的圆砾层中, 层顶埋深 48 m, 承压水头高度为地面以下 9.5 m 左右。表 1 为地层的主要物理力学性质指标。

表 1 地基土层物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层	平均层厚/m	含水率 w/%	重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^3$	孔隙比 e	直剪固快	
					c /kPa	$\varphi/^\circ$
①填土	1.60	20.5	18.00	0.800	6.0	12.0
②-1 黏质粉土	2.65	29.9	19.28	0.823	20.9	18.0
②-2 砂质粉土	2.30	27.3	19.57	0.748	16.3	25.3
②-3 黏质粉土	1.95	25.3	19.33	0.755	14.5	25.5
②-4 砂质粉土	4.55	26.2	19.59	0.729	12.1	29.1
③淤泥质粉质黏土	18.00	40.4	17.97	1.133	20.0	7.6
④-1 粉质黏土	2.95	30.8	19.37	0.843	22.2	10.8
④-2 粉质黏土	5.45	29.9	19.39	0.824	27.3	11.0
⑤-1 粉质黏土	4.95	33.9	18.65	0.976	25.5	11.5
⑤-2 粉质黏土	4.30	23.5	20.44	0.644	27.4	10.3
⑥粉质黏土	1.15	25.2	20.08	0.702	35.1	14.6

2 基坑支护方案及施工工况

2.1 基坑支护方案

采用厚度为 0.9 m 的地下连续墙作为地下室外墙并兼做基坑支护墙, 采用“正作法”施工。竖直面内共设三层钢筋混凝土临时水平支撑, 各支撑面自上而下深度分别为 1.2, 7.2, 12.7 m, 在水平面内, 中部设置 2 组东西向对撑, 在四周设多道大角撑和边桁架。采用三轴水泥搅拌法设置了水泥土被动加固区和局部主动加固区。基坑典型剖面见图 2。此外为减小基坑施工对邻近建(构)筑物的影响, 西北侧临近既有建筑物的范围及南侧均采用“T”型地下连续墙结构, 并且在既有建筑物和支护墙之间设置了一排三轴水泥搅拌桩内插钻孔灌注桩的隔断桩墙。

2.2 施工工况

基坑采用分层、分块开挖, 竖向逐层设置支撑, 逐层开挖, 开挖土方至最终基底标高, 随后从下往上依次施工地下各层结构并拆除各层临时支撑。基坑主要施工工况如表 2 所示。

表 2 主要的施工工况

Table 2 Key construction stages

施工工况	历时/d	完成日期	施工内容	说明
工况 1	32	2011 年 11 月 30 日	挖至-2.2 m, 施工第一道支撑	基坑平面分块施工示意图
工况 2	49	2012 年 4 月 9 日	挖至-8.5 m, 施工第二层支撑	如下, 平面分块施工顺序
工况 3	52	2012 年 6 月 5 日	挖至-13.9 m, 施工第三道支撑	依次为 1-2-3-4-5-6-7-8。
工况 4	75	2012 年 8 月 30 日	除 5 区和 8 区外, 其余范围挖至基底	
工况 5	36	2012 年 10 月 4 日	土方全部开挖完成	
工况 6	115	2012 年 10 月 31 日	底板施工, 拆除第三道支撑	
工况 7	66	2012 年 12 月 24 日	施工地下二层楼板, 拆第二道支撑	
工况 8	163	2013 年 05 月 06 日	施工地下一层楼板, 拆第一道支撑	

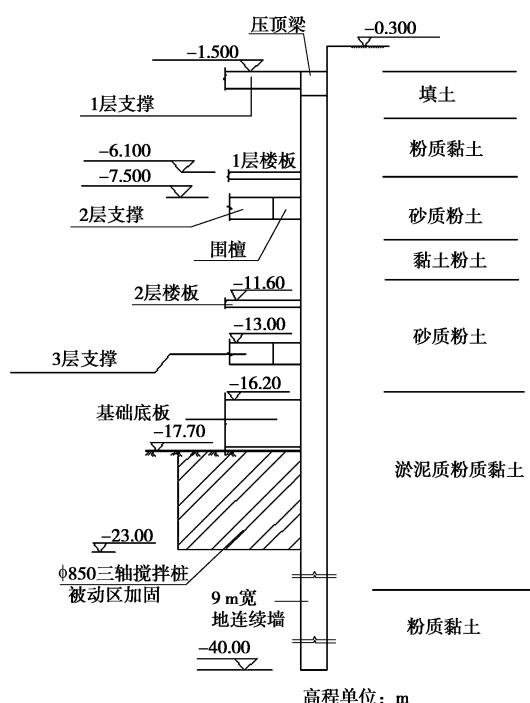


图 2 基坑的典型剖面图

Fig. 2 Typical cross section of excavation

3 监测项目及测点布置

基坑周边设置了多个监测项目, 用来监测基坑施工过程中支护结构、周边邻近建筑物的变形性状, 图 1 为主要监测点的平面布置图。其中, 共设置了测斜管 24 根, 来监测地基土体与围护墙在各深度的水平位移, 并设置了 80 个地面和建筑物沉降观测点, 在受力较大的支撑梁上设置 27 个支撑内力测点。

由于现场施工条件的制约, 监测工作从工况 1 结束后开始。

4 实测结果分析

场地承压含水层埋深达 48 m, 基底以下不透水层厚度较大(约 30 m), 经验算, 基坑不会发生突涌现

象, 另外, 基坑外侧并未进行降水, 仅在坑内浅层设疏干降水井, 由于围护挡墙底部进入不透水层隔绝了内外地下水的水力联系, 故地下水对基坑变形的影响可忽略不计。

4.1 坑壁土体水平位移

图 3, 4 分别为测斜管 CX1 和 CX4 所测得的各工况下土体水平位移随深度的变化曲线。从图中可以看出, 坑壁水平位移随着开挖深度的增加而逐渐增大, 位移随深度分布曲线呈“鼓胀”形, 最大水平位移近 100 mm, 说明类似地基中的深大基坑变形控制不理想; 最大位移发生的位置随着开挖深度的增大逐渐下移至当前工况的开挖面附近。

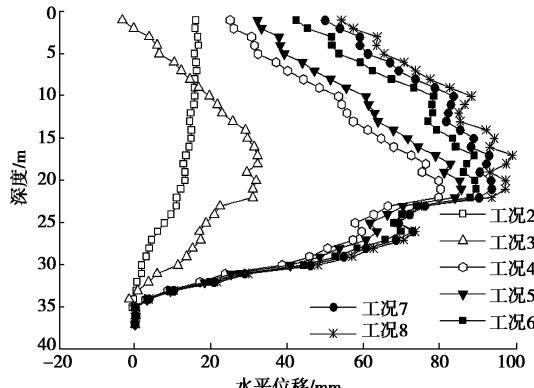


图 3 测斜管 CX1 各工况水平位移观测结果

Fig. 3 Horizontal deformations of inclinometer CX1

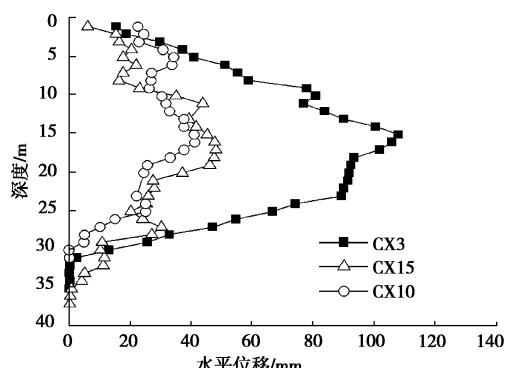


图 4 测斜管 CX4 各工况水平位移观测结果

Fig. 4 Horizontal deformations of inclinometer CX4

图 5 为基坑周围其他典型位置的测点 CX3, CX10, CX15 的坑壁土体最终水平位移曲线, 从图中可以看出, CX10 及 CX15 的位移显著小于 CX3, 最大水平位移分别为 CX3 的 37.9% 以及 44.5%。CX15 测点位于东南角附近, 紧邻地铁出入口(埋深约 9 m), 即该构筑物附近的基坑支护墙外侧为有限宽度土体。虽然 CX10 位于西侧中部附近, 但从图中仍可看出其位移明显较小, 这是由于该处采用了刚度更大的“T”型地下连续墙作为支护墙, 并且在建筑物和支护墙之间设置了隔离桩墙, 在一定程度上减小了墙体及周围土体的位移, 使得 CX10 的位移明显减小, 说明“T”型墙与隔断墙的技术措施有一定的效果; 空间效应使得 CX3 的水平位移明显大于 CX15 及 CX10。

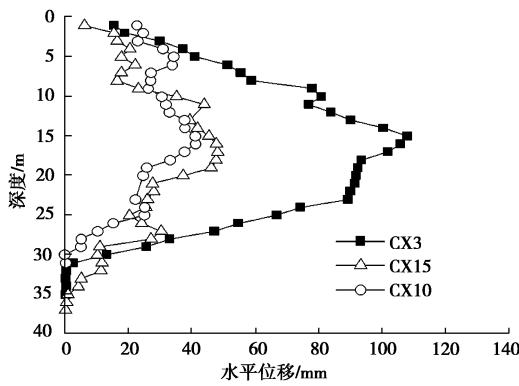


图 5 基坑坑壁不同位置处的实测最终水平位移

Fig. 5 Horizontal deformations at different positions at last stage

图 6 为 CX4 测斜管在不同工况的开挖间歇期坑壁水平位移沿深度的分布曲线, 可见在开挖深度不变的情况下, 在支撑及底板施工期间, 坑壁土体水平位移明显增大。开挖间歇期支护结构及地基继续发生变形的现象, 一般是由土体的固结和蠕变行为所引起。本工程支护墙底部进入基岩将坑内外水力联系隔断, 施工期间坑外未降水、地下水位保持不变, 基坑内外并未因为水头差而发生渗流, 根据应宏伟等^[7]及 Ou 等^[8]的研究可知, 软黏土基坑开挖间歇期由于开挖卸荷产生的超静孔压消散会使坑壁土体水平位移和地表沉降发生轻微回缩, 由于基坑施工期间埋设在地基中的孔隙水压力计测得的孔压值没有明显变化, 本文在讨论基坑变形的时间效应时忽略土体固结的影响, 将开挖间歇期的坑壁土体水平位移和地表沉降的增量定义为蠕变。

图 7 为坑壁最大水平位移与时间的关系图。在基础底板浇筑、第三层支撑拆除前的各施工工况, 各测点最大水平位移增加幅度较大, 这是由于场地地基土上硬下软, 最终基底面位于深厚软黏土层内, 土体压

缩性大, 抗剪强度低, 在高剪应力水平下变形速率大。基础底板浇筑完成后最大水平位移逐渐稳定。

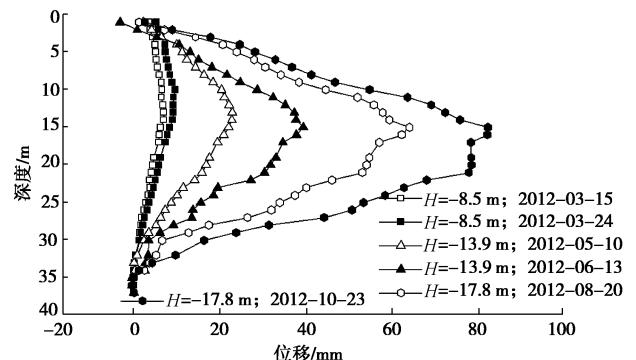


图 6 CX4 测斜管蠕变曲线

Fig. 6 Variation of soil displacement with time of inclinometer

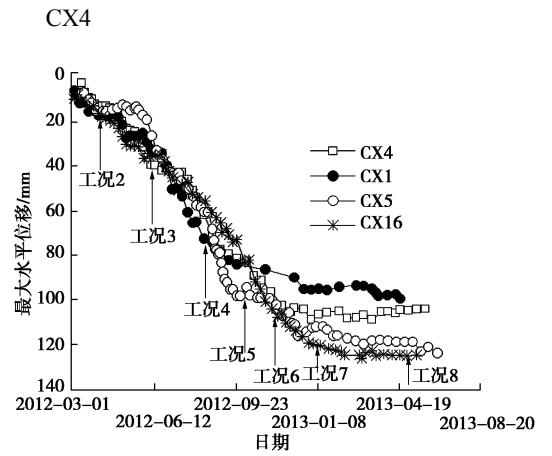


图 7 坑壁最大水平位移随时间的变化

Fig. 7 Variation of maximum soil horizontal deformations with time

图 8 为各开挖工况下最大侧向蠕变速率与基坑开挖深度的关系, 其中最大蠕变速率 ($\Delta\delta / \Delta t$) 定义为基坑开挖间歇期, 坑壁土体最大位移增量与所用时间之比^[3]。从图 8 中可以看出, 随着开挖深度的增加, 除了 CX1 外, 最大侧向蠕变速率均出现先增大后基本保持不变的趋势, 与 Ou 等^[3]得到的规律基本相同。当基坑开挖到 14 m (工况 3) 时, 蠕变速率达到最大, 随后保持不变。基坑最大侧向蠕变速率介于 0.15~0.76 mm/d 之间, 比 Ou 等^[3]总结的支护墙体最大位移速率介于 0.1~0.6 mm/d 的数值略大, 可能是由于本工程基底附近的淤泥质粉质黏土层的土质条件更差的原因。以旧金山的基坑为例, Mana 等^[2]分析了支护墙的蠕变速率, 得出的最大蠕变速率介于 0.3~30 mm/d, 数值及范围均大于本文所得结论, 这可能是由于其分析的基坑地基土质条件有差异, 且其围护墙多为板桩墙。

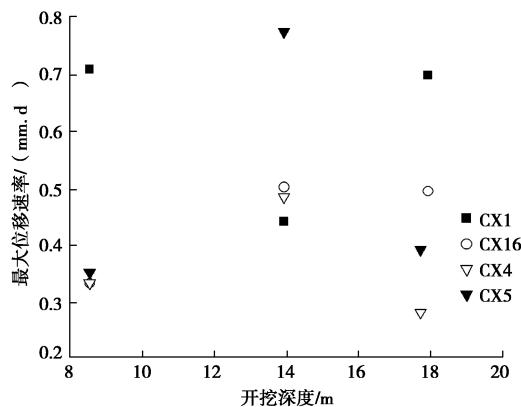


图 8 土体最大侧向蠕变速率随开挖深度的分布图

Fig. 8 Variation of maximum lateral deflection creep rate of soils with excavation depth

表 3 坑壁土体侧向蠕变位移与总位移的关系

Table 3 Relationship between horizontal creep displacement and total displacement of wall

深度	$\sum \Delta \delta_h$ /mm	总的侧向 位移/mm	蠕变位移占总 位移的比例/%
			本文
10 m	21.4	48.08	44.51
20 m	40.62	72.36	56.14
Ou 等 ^[3]	10 m	18.88	30
Ou 等 ^[3]	20 m	29.29	36

表 3 给出了测斜管 CX4 在 10 m 和 20 m 的两个深度的坑壁侧向蠕变位移与总位移的关系。由表中数据可知, 本工程总的蠕变位移以及蠕变比例均大于 Ou 等^[3]得出的结论。蠕变主要与 3 个因素有关, ①周围土体的应力水平, ②地基土质的情况, ③支撑设置或者底板施工引起基坑的暴露时间。本案例地基在第二道支撑标高以下分布有厚度达 18 m 的软黏土层, 施工第三道支撑和基础底板历时分别达 34 d 和 64 d, 基底的土质差, 应力水平高, 基底暴露时间长, 是导致蠕变速率相差不大的情况下, 蠕变位移和蠕变比例远大于 Ou 结论的原因。

4.2 地表沉降

图 9 为各施工工况下基坑西北侧中部的实测坑外横向地表沉降随与坑壁距离的变化曲线, 选取的 5 个沉降测点依次为图 1 中的 WY8, S52, S13, S11, S8。由图 9 可知, 开挖引起的地面沉降大致呈抛物线分布, 最大沉降位置距离基坑坑壁 16 m 左右, 底板浇筑前的最大沉降量为 95 mm, 基坑最大开挖深度 H_m 为 17.4~19.8 m, 影响范围可达坑壁以外 60 m, 约为 $3.33H_m$, 最大沉降发生处距离坑壁约 $0.89H_m$, 最大沉降量约 $0.5\%H_m$ 。Wang^[6]指出上海软土地区深基坑沉降影响范围为距离基坑 $1.5H_m$ ~ $3.5H_m$, 地表的最大沉降位于 $0.1\%H_m$ ~ $0.8\%H_m$ 之间, 最大地表沉降的发生

位置在 $1.0H_m$ 范围内。本文分析结论与 Wang 等^[6]结论基本吻合。

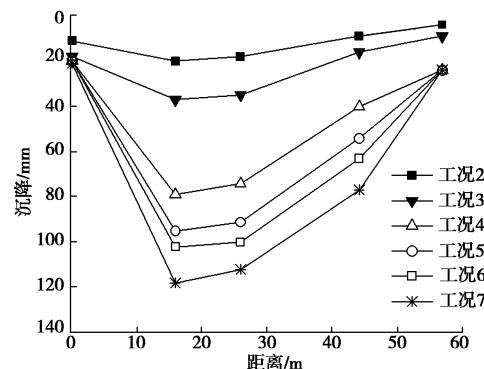


图 9 基坑横向地表沉降随与基坑间距的变化曲线

Fig. 9 Distribution of surface settlements with distance from excavation

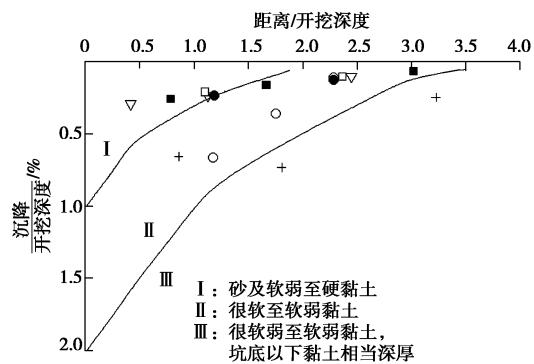


图 10 坑外地表沉降分布

Fig. 10 Distribution of ground settlement normalized by excavation depth

Peck^[1]基于实测数据提出在不同性质的土层中预测地表沉陷量与坑壁距离的关系曲线如图 10 所示, 并根据主要土层的性质划分为 3 个区域。从图 10 可以看出本案例的实测数据主要位于区域 I 及区域 II, 与 Peck 预测曲线不符合, 这是由于坑外地基沉降与地基土层分布及土层性质、支护结构类型和参数、开挖施工方法等众多因素相关。

图 11 给出了实测地表沉降随基坑施工时间的变化曲线, 可以看出, 随着基坑的开挖, 沉降逐渐增大。基坑中间点 S62, S63, S64 沉降较大, 而角点 S61, S65 沉降速率明显相对较小, 这是角点效应所致, 从图中可以看出, 在基坑开挖阶段, 周边沉降速率较大, 土方开挖结束(工况 5)后 S61, S62, S65 的沉降增加缓慢, 但是 S63, S64 测点仍有较为明显的沉降增幅, 这是软土蠕变效应的一种体现。取基坑东南侧坑外纵向线上的沉降观测点为对象分析基坑的蠕变, 其中 S74, S75, S76 在 CX1 所在区块(区块 1), S71, S72, S73 在 CX2 所在区块(区块 2), 其余点落在 CX3 和 CX4 所在的区块(区块 3)内, 按照对应区块的施

工时间计算出相应的最大沉降蠕变速率, 如图 12 所示。

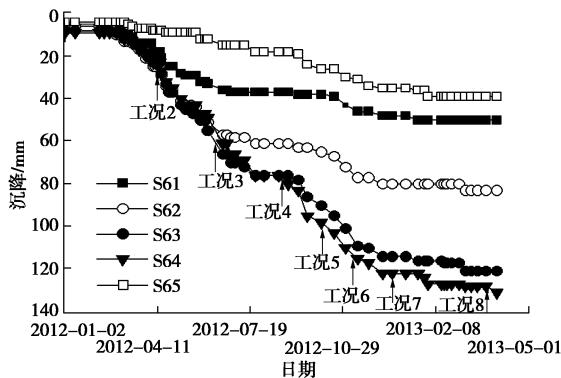


图 11 地表沉降随时间的变化

Fig. 11 Variation of surface settlements with time

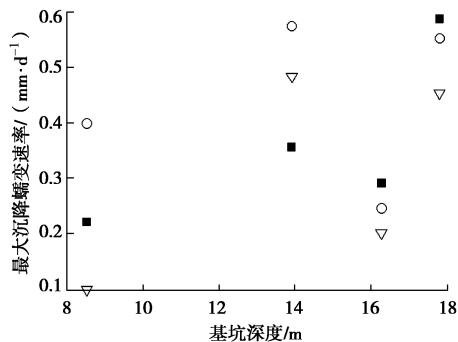


图 12 基坑最大沉降蠕变速率与基坑开挖深度的关系

Fig. 12 Variation of creep rate of maximum settlement with excavation depth

除了区块 1 沉降蠕变速率随基坑开挖深度增大而逐渐增大外, 区块 2、3 均是沉降蠕变速率先随基坑开挖深度增大而逐渐增大, 之后基本保持不变, 这与前文基坑侧向蠕变速率变化趋势一致。由上图可知, 基坑的沉降蠕变速率介于 $0.1\sim0.6 \text{ mm/d}$, 大于 Ou 等^[3]得出的 $0.1\sim0.4 \text{ mm/d}$, 略小于前文已得的基坑水平位移蠕变速率 $0.15\sim0.76 \text{ mm/d}$ 。

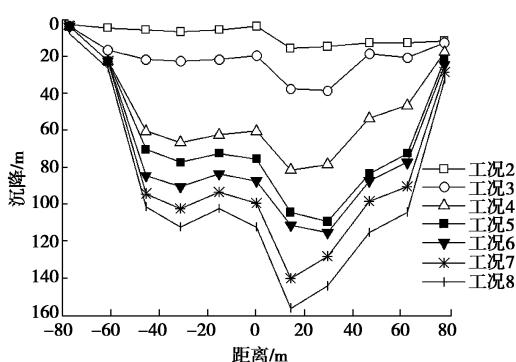


图 13 基坑东南侧纵向地表沉降变化曲线

Fig. 13 Longitudinal distributions of surface settlements in southeast of excavation

图 13 为基坑东南侧纵向地表沉降变化曲线(左到右依次为 S76, S75, S74, S73, S72, S71, S70, S69, S68, S67, S66), 基坑最大沉降量约 $0.26\%H_m\sim0.7\%H_m$, 实测纵向沉降均呈现马鞍形, 沉降最大值位于基坑中部附近, 角部沉降明显较小, 坑外纵向最大沉降差均超过 100 mm , 空间效应明显, 在基坑施工及设计过程中, 基坑的纵向不均匀沉降应引起重视。

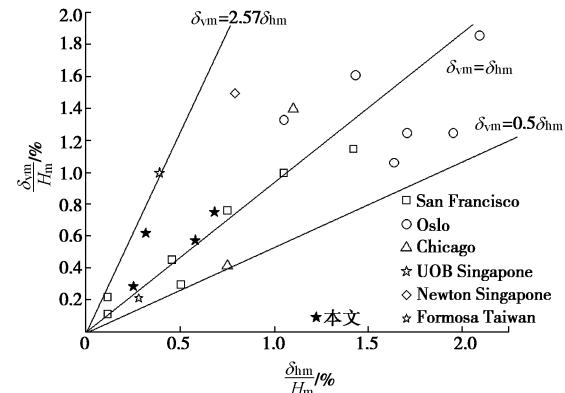


图 14 基坑周边土体最大沉降与最大水平位移的关系

Fig. 14 Relationship between maximum ground settlement and maximum wall deflection

图 14 为 Mana 等^[2]提出的围护墙体地表最大沉降与最大水平位移的关系曲线, 本文案例的数据大致位于 $\delta_{\text{vmax}} = \delta_{\text{hm}}$ 与 $\delta_{\text{vmax}} = 2.57\delta_{\text{hm}}$ 之间。从图 14 中可以看出基坑的最大水平位移与基坑最大开挖深度之比 δ_{hm}/H_m 介于 $0.24\%\sim0.75\%$, 小于 Mana^[2]所提出的 $0.5\%\sim3.0\%$, 大于 Ou 等^[11]提出的基坑最大侧向位移位于 $0.2\%H_m\sim0.5\%H_m$ 的结论, 原因可能是参与其统计分析的案例地基以粉砂土和粉质黏土为主, 地基土性质好于本案例。本工程中最大沉降与基坑最大开挖深度之比 δ_{hm}/H_m 介于 $0.26\%\sim0.7\%$, 包含应宏伟等^[9]分析的某一基坑实例的 0.37% , 但小于 Moorman^[10]对软黏土中某基坑的分析结果 $1.07\%H_m$, 且位于 Wang 等^[6]指出的地表最大沉降范围 $0.1\%H_m\sim0.8\%H_m$ 之内。

4.3 内支撑轴力

图 15 为不同的施工工况下, 基坑实测内支撑轴力的变化曲线, 支撑轴力采用钢筋应力计测量, 由图知, 基坑施工过程中各层支撑的轴力均有一定波动, 说明多层支撑结构中各支撑轴力的大小随基坑的开挖和拆撑工况的变化而动态调整, 上下两层支撑的轴力明显小于第二层支撑, 多层支撑桩墙支护结构受力复杂, 地基土层的分布、支撑竖向间距及标高以及最后一道支撑与基底的竖向距离等因素均会对各层支撑的受力产生影响, 因此在进行支撑的设计时, 应对支撑设计方案进行优化, 应在保证支撑稳定的前提下, 又不造

成资源的浪费。

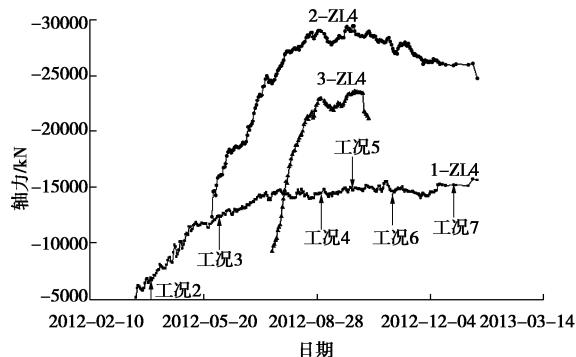


图 15 ZL4 测点支撑轴力随时间变化曲线

Fig. 15 Variation of struts forces with time

5 结 论

基于深厚软黏土中某深大基坑的实测数据分析，可以得到以下 3 点结论。

(1) 深厚软黏土地基中的大型基坑开挖过程中不应忽视引起的周围地层变形影响。基坑侧向变形沿深度呈“鼓胀”形，基坑最大水平位移约 $0.24\%H_m \sim 0.75\%H_m$ (H_m 为基坑最大开挖深度)。基坑的侧向蠕变位移量占总位移量的比例高达 $44\% \sim 56\%$ ，侧向变形蠕变速率出现先增大后基本保持不变的趋势，最大侧向蠕变速率介于 $0.15 \sim 0.76 \text{ mm/d}$ 之间，蠕变速率与基坑开挖深度和基底附近土层性质有密切关系。“T”型墙、隔断墙的设置、邻近既有地铁出站口等因素对减小位移有明显的积极作用。

(2) 基坑周边实测横向地表沉降程抛物线型分布，沉降影响范围为 $3.33H_m$ ，最大沉降发生处距离坑壁约 $0.89H_m$ ，最大沉降量约 $0.5\%H_m$ 。受空间效应影响，基坑纵向地表沉降最大值位于基坑中部附近，分布呈马鞍型。基坑最大沉降量约 $0.26\%H_m \sim 0.7\%H_m$ ，最大沉降与最大水平位移关系位于 $\delta_{vmax} = \delta_{hmax}$ 与 $\delta_{vmax} = 2.57\delta_{hmax}$ 之间。随着基坑的开挖，最大沉降蠕变速率先增大后保持不变，且介于 $0.1 \sim 0.6 \text{ mm/d}$ 。

(3) 随着土方的开挖、相邻支撑的浇筑以及拆除，多层支撑支护结构中各层支撑的轴力不断的动态调整，中间支撑轴力明显大于上下两层支撑。

参 考 文 献：

- [1] PECK R B. Deep excavation & tunneling in soft ground[C]// Proc 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexiocity, 1969: 225 - 281.
- [2] MANA A I, CLOUGH G W. Prediction of movements for braced cuts in clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1981, **107**(6): 759 - 777.
- [3] OU C Y, LIAO J T, LIN H D. Performance of diaphragm wall constructed using the top-down method[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1998, **124**(9): 798 - 808.
- [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] LIU G B, NG C W W, WANG Z W. Observed performance of a deep multi-strutted excavation in Shanghai soft clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2005, **131**(8): 1004 - 1013.
- [6] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2010, **136**(7): 985 - 995.
- [7] 应宏伟, 谢康和, 潘秋元, 等. 软黏土深基坑开挖时间效应的有限元分析[J]. 计算力学学报, 2000, **17**(3): 349 - 354. (YING Hong-wei, XIE Kang-he, PAN Qiu-yuan, et al. FEM analysis on time-effects of deep excavations in soft clay[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2000, **17**(3): 349 - 354. (in Chinese))
- [8] OU C Y, LAI C H. Finite-element analysis of deep excavation in layered sandy and clayey soil deposits[J]. Can. Geotech. J, 1994, **31**(2): 204 - 214.
- [9] 应宏伟, 杨永文, 胡安峰, 等. 软土某深基坑开挖的实测性状和环境效应分析[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(增刊): 90 - 93. (YING Hong-wei, YANG Yong-wen, HU An-feng, et al. Analysis on observed performance and environmental effect of a deep excavation in soft clay[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(增刊): 90 - 93. (in Chinese)).
- [10] MOORMAN C. Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database[J]. Soils and Foundation, 2004, **44**(1): 87 - 98.
- [11] 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.

(本文责编 胡海霞)