

复杂环境下地铁深基坑变形行为的实测研究

汪中卫¹, 刘国彬², 王旭东¹, 宰金珉¹

(1. 南京工业大学土木工程学院, 江苏 南京 210009; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 本文通过对上海软土地区开挖深度为 15.5 m 的多支撑基坑的现场实测, 发现与世界范围其它工程实例相比, 本基坑的墙体侧移和地表沉降是非常小, 空间效应不明显, 其原因是基于时空效应的分层分小块의 快挖快撑、坑内注浆加固以及积极的支撑预加轴力等措施的应用。同时通过土体体积的变化量和平方根时间方法分析在中板养护期间的土体随时间变形, 指出在开挖期间基坑变形不仅仅与土蠕变相关, 土体的固结也对变形产生了相当的影响。

关键词: 基坑; 软土; 墙体变形; 地表沉降; 蠕变; 固结

中图分类号: TV223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)10-1263-04

作者简介: 汪中卫(1972-), 男, 安徽桐城人, 博士, 主要从事基坑工程与桩基工程的研究工作。

Study on the deformation of a deep metro excavation under complex environment

WANG Zhong-wei¹, LIU Guo-bin², WANG Xu-dong¹, ZAI Jin-min¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A 15.5-m-deep multi-strutted metro excavation in Shanghai soft clays was monitored. It was found that relatively small wall deflections and ground settlements were measured as compared with similar case histories worldwide, and no significant space effect existed. The reason was probably because of the use of short excavation section, application of compaction grouting for improving ground conditions and the use of active pre-stress steel struts based on the theory of time-space effect. Based on soil volume change and square root time method, time-dependant soil deformation was studied during curing period of middle-slab concrete. It was pointed out that the settlement was attributed to the primary consolidation as well as creep effects.

Key words: excavation; soft clays; wall deflection; ground settlement; creep; consolidation

0 前言

目前我国地铁车站基坑的设计主要是基于半经验的方法, 为了验证设计假定的合理性和减小基坑开挖期间所引起的工程风险, 确保基坑的安全开挖, 现场监测手段是保护周围环境和确保基坑自身安全的必备手段。本文通过对上海某地铁深基坑工程的变形实测数据分析, 以了解软土地区深基坑开挖变形规律和影响因素, 为以后类似工程提供经验与借鉴。

1 地质条件

本文中地铁基坑来自于上海地铁 3 号线二期工程, 图 1^[1]显示了场地土层的分布情况和一些土体性质指标的变化情况。

根据工程地质勘察报告可知, 现场常年地下水位大约为地表以下 1 m, 主要由饱和海相软土沉积而成。由于受水位变化的作用以及地表各种活动的影响, 浅层土为含水量相对较低和剪切强度较高的超固结粘

土。浅层以下为渗透性 ($10^{-8} \sim 10^{-9}$ m/s) 较低的淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土, 其含水量接近于液限, 土体具有相对高的孔隙比和高压缩性。

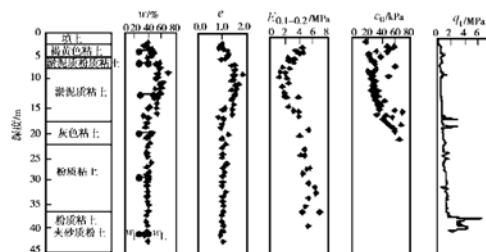


图 1 土层剖面及土体部分岩土参数

Fig. 1 Soil profile and geotechnical parameters

2 基坑施工与监测^[1]

本基坑工程开挖深度约 15.5 m, 由于本基坑处于

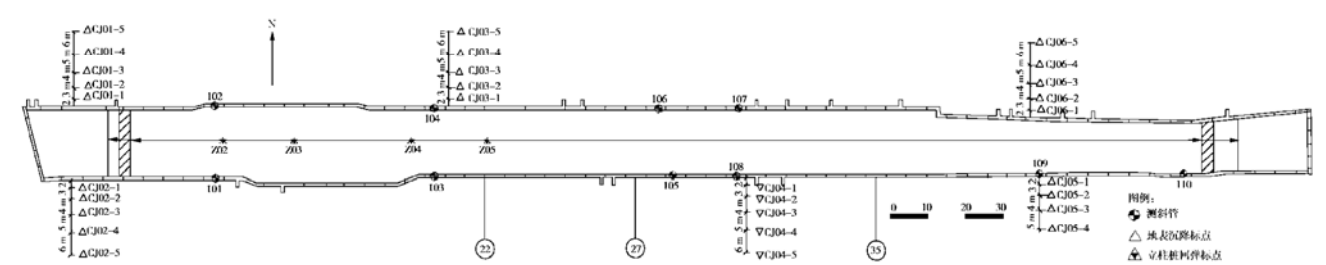


图 2 基坑平面及相应的监测点布置

Fig. 2 Excavation plan and its monitoring stations

上海闹市区，因此其周边环境相当复杂。为了尽量减小开挖对周围环境的影响，基坑采用了 600 mm 厚的地下连续墙进行围护。在 27 号轴线和 35 号轴线之间的地下墙深度为 28 m，其余部分北侧为 28 m，南侧为 34 m。基坑共布置五道支撑，分别位于地表以下 1.5、4.7、6.9、9.7、12.5 m。第一道为钢筋混凝土支撑，水平间距大约在 6 m；其余为 $\phi 609 \times 16$ 钢管支撑，水平间距为 3 m。地表以下 8.6~10.6 m 和 16.6~19.6 m 位置采用注浆进行加固，图 2^[1]给出基坑支撑系统布置及相应的监测布置图。

基坑每层开挖顺序从两端向中部进行，根据分层分小块的时空效应施工方法，沿着长度方向每小块开挖宽度一般不超过 6 m，并保证支撑及时施工和预加轴力，以尽可能控制地下连续墙的侧向变形，每道钢管支撑的预加轴力量约为设计值的 50%~70%。在进行第 5 道支撑施工前，除 27 轴和 35 轴之间区域外，600 mm 厚的中板（位于地表以下 8.3 m）被提前到开挖阶段施工，在中板达到足够强度后才进行最后一层开挖。表 1^[1]总结了开挖过程中的主要施工工况。

表 1 基坑开挖的主要阶段

Table 1 Main stages of excavation

阶段	施工内容
1(a)	施工地下连续墙
1(b)	压密注浆
1(c)	开挖到第一道支撑位置
1(d)	浇注第一道混凝土支撑
2(a)	开挖到第二道支撑位置
2(b)	安装第二道支撑
3(a)	开挖到第三道支撑位置
3(b)	安装第三道支撑
4(a)	开挖到第四道支撑位置
4(b)	安装第四道支撑
4(c)	施工中板
4(d)	中板养护
5(a)	开挖到第五道支撑位置
5(b)	移去第四道支撑
5(c)	安装第五道支撑
6	开挖到最后标高

3 直观的监测结果

图 3 给出在两个典型位置测斜管 I08^[1]（无中板施

工）和 I09（有中板施工）在开挖期间的归一化侧向变形（ δ_v/H ）沿深度变化的情况，图 3 中也给出了测斜管相应位置的地表沉降断面（CJ04 和 CJ05）^[1]的归一化地表沉降（ δ_s/H ）与离开墙体水平距离 D/H 的关系（ D 为离开基坑水平距离， H 为最终开挖深度）。

从图 3 中可以看出本基坑变形符合典型的软土地区有支撑深基坑的变形特点，墙后地表有明显的勺状沉降槽，基坑变形随着开挖的进行而逐渐增加，相应的地表沉降槽亦逐渐加深，且在开挖结束时，最大墙体变形发生在开挖面以下 3~5 m 处。同时由于采用时空效应和预加轴力施工方法，地下墙自墙顶以下 8 m 范围内的侧向变形得到有效控制。但通过比较两个位置墙体变形，Liu et al(2005)^[1]认为中板的施工似乎没有起到有效抑制墙体侧向变形的预期作用。值得注意的是在中板施工与养护期间，CJ05 断面地表沉降的相对发生量（相对于总沉降）明显要高于同一位置的墙体侧向变形的相对发生量（相对于总侧向变形）；同时从图 3 可以看出最大地表沉降值不超过最大墙体侧向变形的 50%，明显小于一般经验值，这表明基于时空效应的快速施工能够有效减小基坑周边的地表沉降。

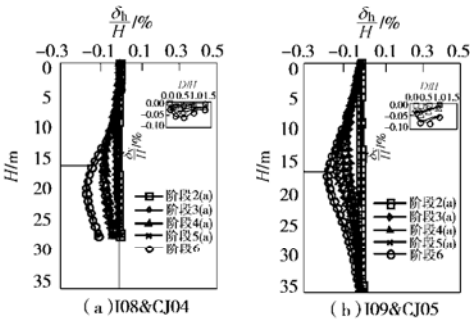


图 3 开挖期间的墙体变形和沉降分布

Fig. 3 Wall deflections and settlement distribution during excavation

对于墙体变形，Liu et al(2005)^[1]比较了本文基坑以及亚洲其它地区软粘土基坑^[2]的最大归一化变形与 Mana and Clough (1981)^[3]的经验图表上下限的关系，如图 4^[1]所示，根据 Bjerrum and Eide (1956)^[4] 的计算方法，被引用的基坑抗隆起安全系数均在 3.0 以上，

在不影响分析的条件下, 这些数据在图 4 在抗隆起安全系数为 2.4 位置被绘出。从图 4 可以看出尽管本工程的抗隆起安全系数只有 2.2 左右, 但其实测值却主要位于 Mana 的控制线的下限以下, 归一化变形明显要比图 4 中的其它基坑工程要小^[1]。Liu et al(2005)^[1]认为采用基于时空效应工法的高刚度的地下墙、间距很密的支撑系统、分层分小块의快挖快撑、坑内注浆加固以及积极的支撑预加轴力等专门控制变形的施工工艺是导致变形过小的主要原因。从实践效果来看, 在经历上海地铁 1、2 号线建设以后, 由于时空效应施工方法逐渐推广应用, 上海地铁深基坑的变形明显受到有效控制, 其最大侧向变形位于 Mana 控制线下限以下也在情理之中。而文中被用于对比的亚洲其它地区基坑, 从文献记载来看并没有与上海地铁类似的专门的控制变形措施, 因此本工程的地表沉降实测结果看起来亦是合理的。

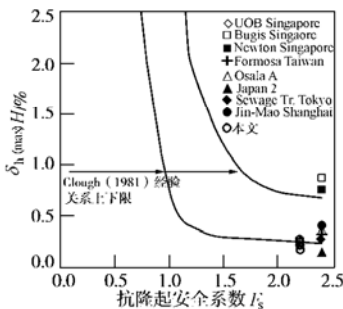


图 4 抗隆起安全系数与最大侧向变形关系

Fig. 4 Relationship between factor of safety against base heave and the maximum wall deflection

4 时间对变形影响分析

在饱和软土地区基坑工程, 时间对基坑变形有着非常重要的影响, 为了综合分析时间因素对变形的影响, 测斜管 I08 (无中板施工) 和 I09 (有中板施工) 的最大侧向变形随时间开挖的关系被绘制在图 5, 同时同一位置的地表沉降标点 CJ04-3 和 CJ05-3 也在图中被绘出, 图中 δ 和 $\delta_{\max}$ 分别代表开挖期间和开挖结束后的最大墙体侧向变形 (对 I08 和 I09) 或地表沉降 (对 CJ04-3 和 CJ05-3)。

从图可以看出, 最大变形在每一工况下搁置期间的变化量随时间有明显的增加, 但变形速率逐渐减小。在基坑开挖到最后标高(Stage 6)时所有最大侧向变形在经历一定时间后才达到稳定。从图 5 (b) 可以看出, 在中板养护期间[Stage 4(d)], 标点 CJ05-3 的归一化地表沉降速率明显要大于归一化的侧向变形速率, 而在其它阶段, 归一化的地表沉降速率基本上不超过相应的侧向变形速率。因而除蠕变外, 在中板养护期间, 土体固结亦可能导致地表发生相当量的沉降, 从而导

致在中板养护期间同一位置地表沉降的相对发生量明显高于侧向变形的相对发生量。

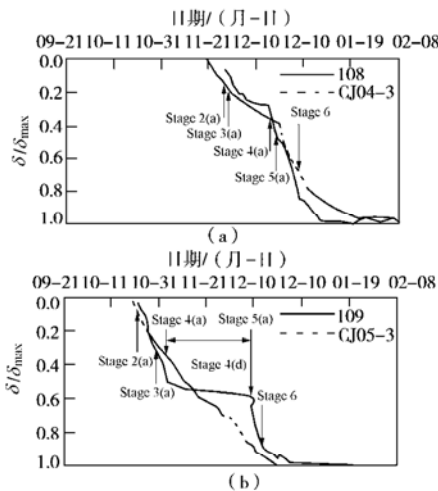


图 5 归一化最大墙体变形 (地表沉降) 与开挖阶段的关系

Fig. 5 Relationship between the normalized maximum wall deflection (ground settlement) and excavation stages

通常情况下, 并不能直接分析土体的时间变形是由蠕变引起还是由孔压随时间的消散 (固结) 所致, 其原因是由于在现场很难准确地分离由蠕变和固结两者引起的孔压变化量。可以认为在中板养护期间, 土体的蠕变行为导致了墙体变形的持续增大, 但显然从图 5 中还不能确切断定出在中板养护期间地表沉降主要是由蠕变还是固结引起的。

为了进一步分析在中板养护期间[Stage 4(d)]地表沉降随时间发生的原因, 图 6 给出了测点 I09 与 CJ05 在中板养护期间产生的变形, 由于在 CJ05 沉降断面上测点数量的限制, 因此在不影响分析结论的条件下假定在距离基坑 2H (H 为最终开挖深度) 的位置沉降发生量为 0。图 6 显示在中板搁置期间侧向变形所产生的体积变化量明显小于地表沉降所引起的体积变化量。可以认为所发生的地表沉降的一部分 (等于侧向变形所产生的体积变化量) 由蠕变所产生的土体剪切应变所引起, 余下部分可认为由于孔压消散所引起的土体体积应变所引起。换言之, 在中板搁置期间, 所产生地表沉降的相当一部分是土体主固结所引起。

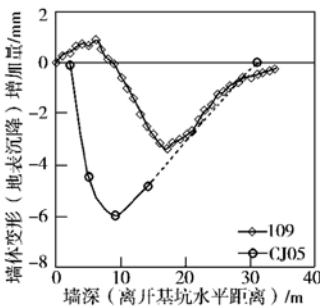


图 6 中板养护期间发生的沉降与侧向变形

Fig. 6 Settlement and deflection during stage 4(d)

Liu et al(2005)^[1]通过平方根时间方法从理论上进一步分析了在此期间的沉降随时间变化关系,如图7^[1]所示,并从图7估计出CJ01-3、CJ02-3、CJ03-3和CJ06-5对应的 t_{90} 值分别为36, 56, 56和16 d。据此Liu et al(2005)^[1]认为在中板搁置期间土体已基本完成固结过程,地表沉降是由孔压随时间的变化和土体的蠕变行为共同引起的。因此Liu et al(2005)^[1]的上述结论与从图6所得到的结论是一致的。

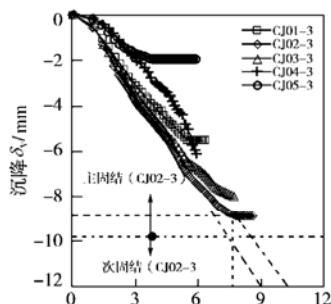


图7 中板养护期间平方根时间与沉降的关系

Fig. 7 Relationship between square root of time and settlement during stage 4(d)

5 围护结构的空问变形性状

通常情况下,基坑变形都会出现明显的空间效应,图8(摘自文献[5])给出了本工程归一化墙体变形与距离比(距基坑角部的距离与基坑边长比值)的关系。

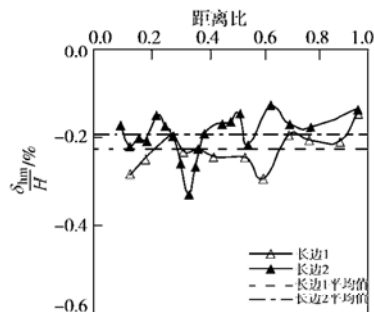


图8 距离比与最大墙体变形的关系

Fig. 8 Relationship between distance ratio and maximum wall deflection

很明显,墙体变形与距离比并没有明确的规律关系,其变形值沿着某一平均值上下不规则波动,基坑中部的变形并没有明显偏大。这表明分层分小块^[5]的快挖快撑的时空效应施工方法能够有效控制空间变形性状,抑制空间效应的发生。

同时从图9中5根立柱桩的回弹情况来看,其回弹并没有随着离开端部距离的增加而增加,并没有出现一致性的规律性变化。从理论上讲,立柱桩的回弹在很大程度上反映出了基坑土的隆起规律,因此可以断定基坑土回弹在此开挖模式下可以避免明显的空间效应现象的发生,能够保证坑底土回弹量在一定范围内变化。

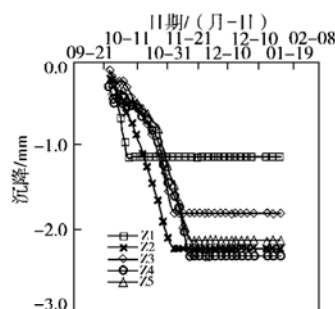


图9 时间与立柱桩变形关系

Fig. 9 Relationship between time and vertical column pile

6 结 论

通过对上海某地铁车站基坑的实测变形数据分析,可以得出如下结论:

(1) 尽管上海地区地质条件比较差,但本基坑工程墙体变形明显偏小,表明时空效应工法对控制上海地铁基坑变形的效果非常有效。同时对本工程而言,最大地表沉降值不超过最大墙体侧向变形的50%,明显小于一般工程经验值,表明快速施工能够有效减小基坑周边的地表沉降。

(2) 通过土体体积的变化量分析中板养护期间的土体随时间变形,指出在开挖期间基坑变形不仅仅与土体蠕变相关,土体的固结也对变形产生了相当明显的影响,这一结论与Liu et al(2005)^[1]平方根时间方法所得出的结论一致。

(3) 本工程所采用的时空效应施工方法能够明显削弱基坑变形的空间效应。

参考文献:

- [1] LIU G B, NG C W W, WANG Z W. Observed performance of a deep multistrutted excavation in Shanghai soft clays[J]. J Geotech and Geoenviron Engrg, ASCE, 2005, **131**(8): 1004 - 1013.
- [2] LONG M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. J Geotech and Geoenviron Engrg, ASCE, 2001, **127**(3): 203 - 224.
- [3] MANA A I, Clough G W. Prediction of movements for braced cuts in clay[J]. J Geotech Engrg, ASCE, 1981, **107**(6): 759 - 777.
- [4] BJERRUM L, EIDE O. Stability of strutted excavations in clay[J]. Géotechnique, 1956, **6**(1): 32 - 47.
- [5] WANG Z W, NG C W W, LIU G B. Characteristics of wall deflections and ground surface settlements in Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, **42**(5): 1243 - 1254.
- [6] 汪中卫. 考虑时间与小应变的地铁深基坑变形及土压力的研究[D]. 同济大学, 2004. (WANG Z W. Research on deformation and earth pressure of deep metro excavation in soft clay based on time and small strain[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.)