

# 基坑坑底施工阶段围护墙变形监测分析

刘国彬<sup>1</sup>, 刘登攀<sup>1</sup>, 刘丽雯<sup>2</sup>, 刁伟轶<sup>2</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092, 2. 上海港铁建设管理有限公司, 上海 200010)

**摘要:** 控制基坑变形已成为深基坑工程中的核心问题, 而坑底开挖施工阶段围护墙体的变形在基坑开挖施工中占有相当的比重。结合上海轨道交通某在建地铁车站基坑开挖时的变形监测数据及跟踪工况, 对不同坑底土体暴露时间所对应的围护墙体变形情况进行了对比分析。分析结果表明, 坑底土体暴露时间对土体暴露期间及整个坑底施工阶段的基坑变形有着显著影响, 随着坑底土体暴露时间的延长, 坑底施工阶段墙体变形量可达总变形的30%, 缩短土体暴露时间是控制坑底施工阶段围护墙变形的关键。同时, 素混凝土垫层对围护墙体变形具有一定的支撑效应, 在一定程度上能起到类似结构底板的作用。施工中应尽快完成混凝土垫层的浇筑工作, 尽早发挥垫层对围护墙体的支撑作用。另外, 垫层对墙体的支撑效果与其自身的平直度等因素有很大关系, 破坏垫层的整体性, 则会削弱其对围护墙体的支撑作用。提出对坑底施工阶段基坑变形的控制措施, 尽可能缩短坑底土体暴露时间及整个坑底阶段的施工时间, 提高垫层的整体性, 加快底板施工, 尽早形成底板混凝土对围护墙体的支撑作用, 从而控制开挖阶段的基坑变形, 对其他深基坑工程具有一定的参考价值。

**关键词:** 土力学; 坑底施工; 混凝土垫层; 暴露时间; 变形控制

**中图分类号:** TU 473.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 4386 - 09

## MONITORING AND ANALYSIS OF LATERAL DEFORMATION OF RETAINING WALL DURING BOTTOM EXCAVATION IN DEEP PIT

LIU Guobin<sup>1</sup>, LIU Dengpan<sup>1</sup>, LIU Liwen<sup>2</sup>, DIAO Weiyi<sup>2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. SHKM Construction Management Co., Ltd., Shanghai 200010, China)

**Abstract:** Controlling the lateral deformation of retaining wall is one of the hot issues in deep excavation, and the lateral deformation during bottom excavation occupies considerable proportion of that in the whole excavation works. Based on measured data and practical work of a metro station construction in Shanghai City, lateral displacement with different soil exposure times during excavation is analyzed. As a result, the exposure time of bottom soil has notable influence on the retaining wall's lateral deformation during the periods of both soil exposure and bottom excavation. As the increasing of soil exposure time, incremental lateral deformation of retaining wall on the stage of bottom excavation construction can reach 30 percent of the total displacement. Shortening soil exposure time is the key point of controlling lateral displacement on the stage of bottom excavation. In addition, concrete cushion plays critical bracing function on controlling lateral deformation of the retaining wall, which is similar to the reinforcement concrete bottom plate. Accelerating the construction of concrete cushion as soon as possible can make full use of bracing effect on controlling the lateral deformation of retaining wall. Bracing effect of concrete cushion depends on several factors, such as concrete cushion's strength, stiff and

**收稿日期:** 2007 - 01 - 29; **修回日期:** 2007 - 05 - 11

**基金项目:** 新世纪优秀人才支持计划资助(NCET - 05 - 0386)

**作者简介:** 刘国彬(1966 - ), 男, 博士, 1988 年毕业于同济大学地下建筑与工程系, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土力学方面的教学与研究工作。  
Email: tj\_liuguobin@126.com

flatness. The effect can be weakened with debasement of concrete cushion's entirety. Some proposals for lateral deformation controlling during bottom excavation of deep pit are offered. Shortening bottom excavation soil exposure time and bottom construction time are favorable of lateral deformation controlling. Increasing concrete cushion's entirety and promoting construction progress of the reinforcement concrete bottom plate can reduce retaining wall's lateral deformation on the excavation stage. The results can provide references to other similar deep excavation engineering.

**Key words:** soil mechanics; bottom excavation; concrete cushion; exposure time; deformation control

## 1 引言

目前在城市地铁建设中, 基坑周边环境的保护问题十分突出<sup>[1]</sup>。为保证坑周环境安全和地铁结构正常使用, 必须按控制变形的要求进行设计和施工, 把控制基坑变形作为地铁基坑工程的核心问题。而在开挖阶段, 基坑变形最大, 是深基坑变形控制的重点。另外, 在坑底施工阶段(基坑开挖到坑底标高~底板混凝土浇筑完成), 由于铺设垫层、绑扎底板钢筋和浇筑底板混凝土等的施工, 坑底土体不可避免的受到暴露及扰动<sup>[2]</sup>。此时坑底没有能约束围护墙体变形的支撑, 而坑底土体的应力水平又相对较高, 使得土体在较高应力水平下经历蠕变的高速发展阶段。上海地区土质软弱, 流变性显著, 这一阶段围护墙体在状态不变的情况下安全度下降, 因此该阶段是基坑变形控制的重点对象。

关于基坑开挖阶段变形的研究较为成熟<sup>[3~6]</sup>, 但传统的变形分析, 往往是以基坑开挖到坑底标高时的状态为依据, 并采用一个定值安全系数作为储备, 对于坑底施工阶段围护墙体的变形研究则相对较少。但从大量基坑工程实践中发现, 这一阶段基坑的变形在基坑开挖过程中不容忽视<sup>[2, 7~9]</sup>, 在一定情况下还可能会危及基坑的安全运行。秦爱芳等<sup>[2]</sup>研究了坑底被动区土体强度变化特征及坑底土体卸荷后滞留对其强度的影响, 并分析了坑底土体暴露及扰动等不利因素对围护墙体安全度的影响。卢礼顺等<sup>[7]</sup>结合工程实例, 从理论上及实测上分析了混凝土垫层控制基坑围护结构变形的支撑效应。徐浩峰等<sup>[8]</sup>用深层土体位移资料分析了土体流变效应, 对底板钢筋绑扎期间大直径钻孔灌注桩的水平位移进行了研究。李俊才等<sup>[9]</sup>分析了不同支护结构在深基坑开挖施工中的变形规律, 发现基坑开挖至设计深度时, 支护结构侧向位移量仅为基础底板浇筑完毕后支护结构最大位移量的 50%, 浇筑基础底板所需时间越长, 最终侧向位移越大。

这些研究使工程技术人员认识到坑底施工阶段

基坑变形控制的重要性, 促进了基坑工程的发展。但该阶段基坑变形是多方面因素共同影响的结果, 坑底土体暴露时间、垫层暴露时间及受到的施工扰动、垫层的厚度强度和平直度等施工质量都将影响围护墙体的变形。下面结合上海轨道交通某在建车站的现场监测数据, 分析坑底施工阶段围护墙体变形的规律, 以供其他工程加以借鉴。

## 2 工程实例分析

### 2.1 工程概况

上海轨道交通某在建车站为地下四层岛式站台车站, 主体结构外包尺寸: 297.4 m×21.2 m(长×宽), 站台宽 10 m。端头井基坑开挖深度 29.2 m, 宽度 29.4 m, 采用厚 1.2 m、深 51.0 m 的地下连续墙作为围护结构; 标准段基坑开挖深度为 27.9 m, 宽度 18.8 m。采用厚 1.2 m、深 48.0 m 地下连续墙作为围护结构。沿基坑深度方向设置 9 道支撑, 第 1, 3, 5, 7 道为钢筋混凝土支撑, 第 2, 4, 6, 8, 9 道为  $\phi 609$  mm 单拼或双拼钢管支撑。基坑保护等级为 I 级, 地下墙侧向最大水平位移值为 0.14% $H$ ( $H$  为基坑开挖深度)。

该车站土层分布及物理力学参数如表 1 所示。车站底板主要位于⑤<sub>3-1</sub>层。标准段地下连续墙墙趾位于⑦<sub>1</sub>粉质黏土层, 端头井地下墙墙趾位于⑦<sub>2</sub>层。

### 2.2 围护墙变形监测情况

工程将基坑分 4 个区域分别进行施工, 以减少各部分的暴露时间, 控制基坑本身及周边环境的变形。下面结合基坑 B 区的现场监测及跟踪工况, 分析坑底施工阶段的基坑变形情况。该区墙体测斜孔布置如图 1 所示。

根据车站主体结构的构造及受力需要, 在坑底设置了数道上、下翻梁, 以增强车站结构荷载的合理分配传递。上、下翻梁处坑底标高较其他部位低 1.0 m 左右, 梁身宽为 1.2 m, 翻梁的平面布置见图 1 中虚线所示。图 2 所示为该区标准段基坑设计断面。

表 1 土层分布及物理力学参数

Table 1 Soil layer distribution and physico-mechanical parameters

土层编号	土层名称	厚度/m	重度 ( $kN \cdot m^{-3}$ )	直剪固快(峰值)	
				c/kPa	$\phi(^{\circ})$
① <sub>1</sub>	填土	1.90			
② <sub>1</sub>	黏土	1.50	18.4	23	17.0
③	淤泥质粉质黏土	3.50	17.5	13	19.5
④ <sub>1</sub>	淤泥质黏土	10.00	16.7	14	12.0
④ <sub>2</sub>	砂质粉土	2.50	18.4	2	30.5
⑤ <sub>1-2</sub>	粉质黏土	7.10	18.0	16	19.5
⑤ <sub>3-1</sub>	粉质黏土	8.50	18.0	16	21.5
⑤ <sub>3-2</sub>	粉质黏土	14.60	18.2	16	24.0
⑦ <sub>1</sub>	砂质粉土	1.40	19.0	4	30.0
⑦ <sub>2</sub>	粉细砂	4.00	19.2	2	31.0

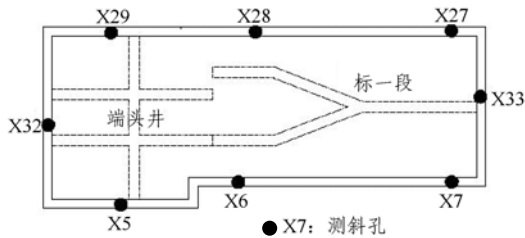


图 1 基坑 B 区围护墙体测斜孔及上、下翻梁布置

Fig.1 Arrangement of inclination and excavation measurement points and upper-lower beams in section B of deep pit

基坑自 2006 年 8 月 21 日晚开始开挖第 1 道钢筋混凝土支撑下的第 2 层土方, 至 10 月 28 日完成全部土方的开挖施工, 现场严格按照时空效应理论组织施工<sup>[9-13]</sup>, 采用分层、分段、对称, 平衡开挖方法, 随挖随撑, 按规定时限及时架设支撑, 减少基坑暴露时间, 将围护墙体的变形控制在允许的范围, 表 2 总结了底板完成前各工况下基坑墙体的变形情况。

### 2.3 坑底施工阶段墙体变形监测分析

对坑底施工阶段围护墙体的变形情况进行汇总整理, 结果见表 3 和图 3。

#### (1) 墙体变形的空间效应

通常情况下, 基坑变形都会出现明显的空间效应, 基坑土体的空间作用主要取决于基坑的形状、深度及大小等。汪中卫等<sup>[14]</sup>通过对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)的研究, 发现小尺寸基坑中部的变形并没有明显偏大, 表明分层分小块的快挖快撑的时空效应施工方法能够有效地控制空间变形性状抑制空间效应的发生。

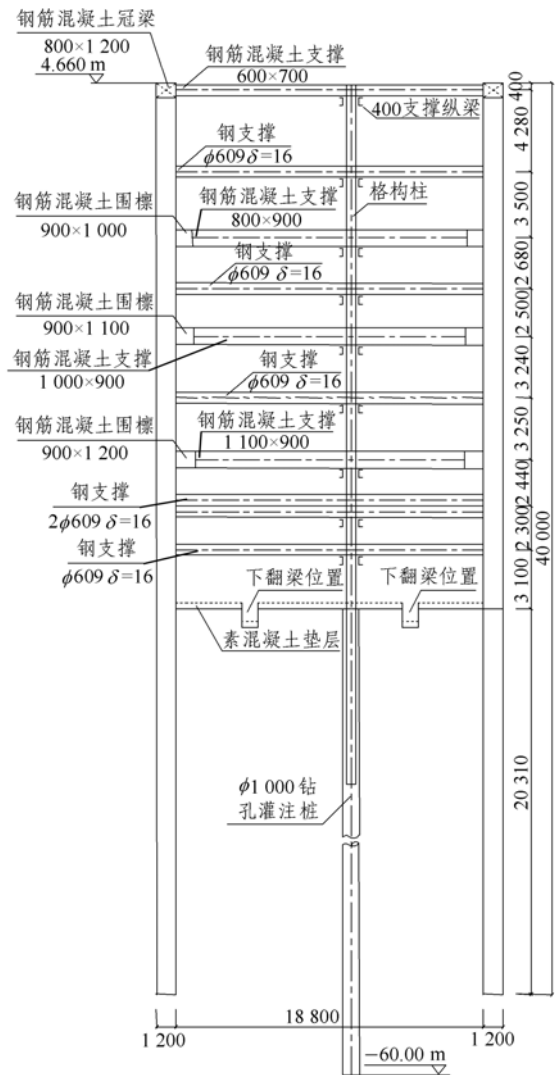


图 2 标准段基坑设计断面(单位: mm)

Fig.2 Design section of normal excavation of deep pit(unit: mm)

表 2 各工况下墙体变形情况汇总

Table 2 Statistics of lateral deformation of retaining wall for various cases

工况	mm							
	X5	X6	X7	X27	X28	X29	X32	X33
1	-0.6	-0.5	-0.7	-0.5	-0.1	-0.37	-0.78	-0.88
2	-0.9	-1.0	-3.2	-2.6	-0.9	-1.20	-0.80	-1.30
3	-6.4	-7.2	-6.7	-6.8	-7.3	-7.30	-4.00	-6.50
4	-8.0	-12.6	-10.6	-12.3	-12.5	-8.62	-6.90	-13.10
5	-14.0	-14.1	-14.2	-15.9	-15.2	-12.70	-8.10	-15.90
6	-18.1	-15.3	-22.9	-18.2	-21.2	-16.60	-11.80	-20.00
7	-21.4	-22.2	-23.7	-17.9	-21.5	-23.80	-20.00	-23.00
8	-25.4	-24.2	-31.4	-25.2	-25.4	-26.70	-24.70	-31.20
9	-32.5	-30.7	-36.9	-32.5	-28.8	-35.70	-27.30	-34.00
10	-38.8	-32.9	-36.6	-37.1	-32.8	-38.40	-28.80	-37.10

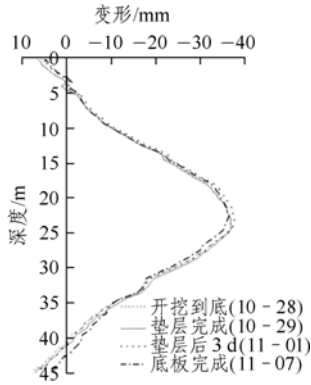
注: 工况 1~9 分别对应于第 1~9 道支撑完成; 工况 10 对应于底板浇筑完成。

表 3 坑底施工阶段墙体变形汇总

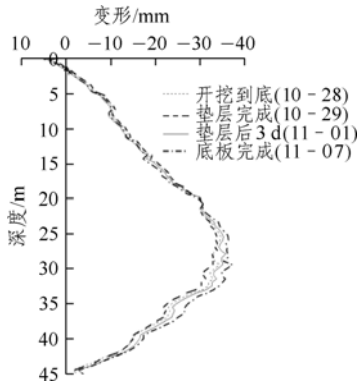
Table 3 Statistics of lateral deformation of retaining wall during bottom excavation

测斜孔号	坑底土体暴露时间/h	围护墙体变形/mm				占累计量百分比/%	
		土体暴露期间	垫层暴露期间	坑底施工阶段	累计量	土体暴露期间	坑底施工阶段
X5	36	-4.20	-1.87	-6.01	-40.00	10.6	15.0
X6	72	-6.17	-2.16	-7.25	-37.90	16.1	18.9
X7	12	-1.75	-1.39	-1.23	-37.74	4.6	3.3
X27	12	-1.43	-3.37	-4.32	-37.12	3.9	11.6
X28	72	-6.27	-4.60	-10.23	-32.79	20.0	31.2
X29	12	-1.62	-3.68	-4.35	-41.40	3.9	10.5
X32	12	-0.61	-2.87	-2.53	-29.92	2.0	8.5
X33	12	-1.10	-3.97	-3.43	-37.07	3.0	9.3

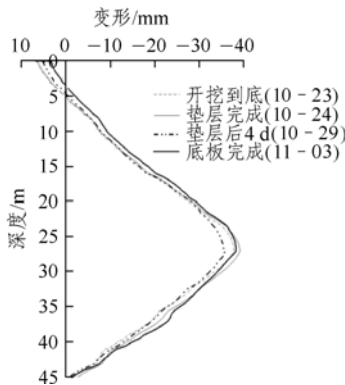
注：“-”表示墙体向坑内位移。



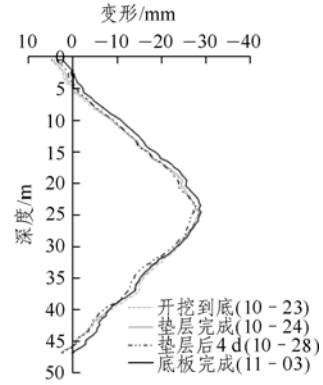
(a) 测斜孔 X7



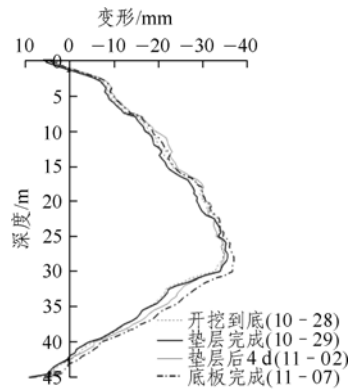
(b) 测斜孔 X27



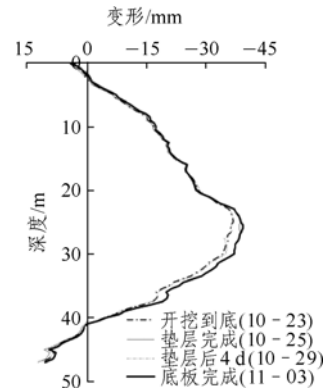
(c) 测斜孔 X29



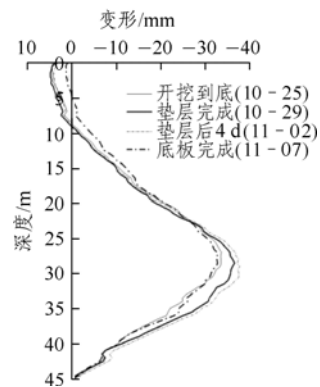
(d) 测斜孔 X32



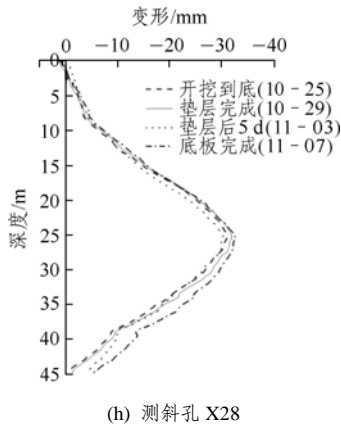
(e) 测斜孔 X33



(f) 测斜孔 X5



(g) 测斜孔 X6



(h) 测斜孔 X28  
 图3 坑底施工阶段不同测斜孔墙体变形(2006年)  
 Fig.3 Lateral deformation of retaining wall at different inclinometer tubes(in 2006)

该基坑平面尺寸为 58.4 m×21.2 m(长×宽)，三维空间效应显著，限制基坑隆起和围护结构位移的作用较强。位于基坑中部的测斜孔 X6 及 X28 距离基坑角落的距离为 1.3 倍基坑开挖宽度，土体开挖所引起墙体变形的空间效应较小。比较表 2 中各工况下各测斜孔的变形情况，除了个别测斜孔(X6, X28)处变形较大外，其余的基本持平。同样从表 3 中各测点累计变形量统计情况也可以看出，此两测点处的围护墙变形并没有比其他测点处的大，反而还要小。因此，可以认为其开挖空间条件与其他各测点基本相同，围护墙变形的空间效应非常小，在本文分析中可以忽略空间的影响，主要考虑时间效应这个因素对该阶段墙体变形的影响情况。

(2) 坑底土体暴露期间墙体变形

首先考查坑底土体暴露时间对该期间(土方开挖到底~素混凝土垫层完成)内围护墙体变形的影响规律。从表 3 和图 3 可以看出，测斜孔 X7, X27, X29, X32 和 X33 处土方开挖到坑底设计标高后，在 12 h 内完成了素混凝土垫层的浇筑，坑底土体的暴露时间较短，土体暴露期间墙体变形量在 2.0 mm 以内，其占开挖期间墙体总变形量的百分比小于 5%。测斜孔 X5 处坑底土体暴露时间为 36 h，墙体变形则有较大增长，变形量 4.2 mm，变形速率 2.8 mm/d，接近设定的控制报警值，所占总变形的比例也超过了 10%。测斜孔 X6 和 X28 处坑底土体暴露时间过长，达到 72 h，坑底及坑周土体发生较大的蠕变变形，而此期间内围护墙体一直处于无支撑暴露状态，也没有能限制其变形发展的约束作用。墙体的变形量明显较大，连续 3 d 的变形速率在 2.0 mm/d 以上，期间累计变形量为 6.2 mm 左右，其所

占墙体总变形量的比例最大也达到了 20%。

(3) 素混凝土垫层暴露期间墙体变形

再来考查素混凝土垫层对围护墙体的支撑约束效应。从表 3 中的数据可以看到，在混凝土垫层施工前后，墙体变形有一定的减缓。在垫层暴露期间(垫层完成~底板完成)，围护墙体的变形量基本在 3 mm 左右，变形最大的测斜孔 X28 点处也只有 4.6 mm。对于有 9 d 垫层暴露时间来说，这个变形量是比较小的，说明垫层对围护结构变形有一定的约束作用。

对比图 3 中垫层完成与垫层完成后 3~5 d 两工况条件下墙体变形曲线可以看到，随着垫层混凝土强度的逐渐发挥，围护墙体出现了向坑外的反弹变形。垫层浇筑完成后，墙体相对变形与暴露时间的关系见图 4。

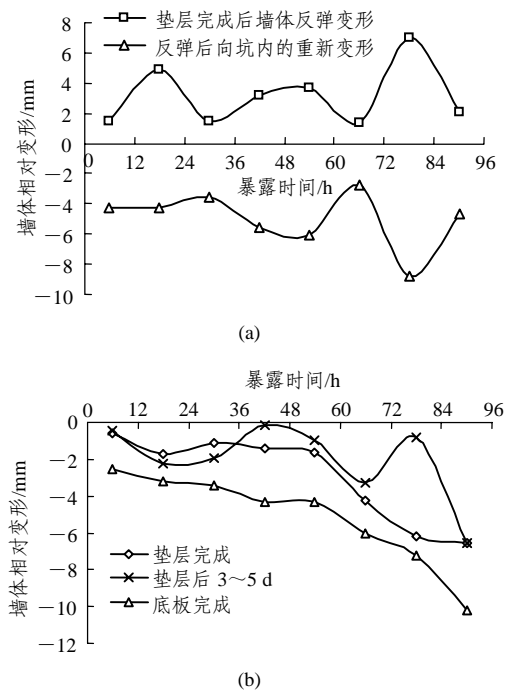


图4 墙体相对变形与暴露时间的关系  
 Fig.4 Relationship between relative deformation of wall and soil exposure time

从图 4 可看出，在完成垫层浇筑后 3~5 d 时，墙体变形的反弹量平均为 3.1 mm，最大反弹量为测斜孔 X6 处的 7.0 mm。这是由于墙后主动区土压力随着墙体的位移向主动土压力发展，土压力减小，与此同时，被动区土压力由于围护墙体向坑内位移而有所增加，围护结构两侧土压力发生变化，从而约束了墙体向坑内变形的发展，使墙体向坑内的位移较垫层浇筑前有所降低。上述分析表明，素混凝土垫层强度的发挥，产生相当于一道支撑的作用，

对控制围护墙体的变形具有一定的支撑约束效应。

同时从图 3 也可看到, 在墙体变形向坑外的反弹变化量达到最大值之后, 围护墙体又重新出现了向坑内变形的发展趋势。比较图 3 中垫层 3~5 d 之后与底板完成两工况条件下墙体的变形曲线, 并结合图 4, 可以看出随着素混凝土垫层暴露时间延长, 围护墙体变形的发展情况。在垫层完成 3~5 d 后到底板混凝土浇筑完成的期间里, 墙体向坑内变形为 3~8 mm, 平均变形为 5 mm, 这样不但抵消了垫层支撑效应所产生的变形反弹量, 而且还较垫层浇筑完成时的墙体变形又有所增加, 如表 3 所示。实测数据分析表明, 虽然混凝土垫层对围护墙体有一定的支撑效应<sup>[7]</sup>, 但支撑作用有限。坑底下翻梁处垫层施工情况见图 5。



图 5 下翻梁处垫层施工情况

Fig.5 Situation of concrete cushion construction for lower-beam

结合该区坑底上、下翻梁的设置情况, 不难分析垫层完成数天后墙体再次出现向坑内变形的原因。首先, 由于车站结构较复杂, 在坑底存在着上、下翻梁, 使得混凝土垫层的平直度无法保证, 垫层不再是一个完整的矩形平面混凝土板, 而成为数个相互隔离、形状不规则的板块, 从而影响了垫层的受力性能, 削弱了混凝土垫层对围护墙体变形的支撑效应。其次, 浇筑垫层在施工中主要是作为底板施工的工作面及起到封闭坑底土体的作用, 厚度一般在 200 mm 左右, 强度也不足以较长时间抵抗坑底处于高应力水平下的土体变形。再次, 随着墙体向坑内位移的减小, 以及出现向坑外的反弹变形, 坑底附近处的主动区土压力会随时间而增大, 最终会增长为静止土压力, 甚至超过静止土压力向被动土压力方向发展, 与此同时, 被动区土压力则会随搁置时间的延长而减小<sup>[1, 15~17]</sup>。基于以上几点原因, 使得混凝土垫层的支撑效果受到影响, 支撑效

应降低, 从而造成围护墙体重新向坑内变形, 使围护墙体的安全度下降。

#### (4) 坑底施工阶段墙体变形

由表 3 并结合图 6 进行分析可知, 坑底土体暴露时间的长短对整个坑底施工阶段墙体的变形有明显的影响。

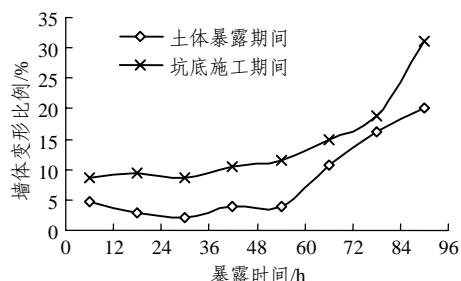


图 6 墙体变形比例与暴露时间的关系

Fig.6 Wall deformation percentage with soil exposure time

当坑底土体的暴露时间在 12 h 以内时, 土体暴露期间墙体变形量较小, 在整个坑底施工阶段内的变形量也不超过 5.00 mm, 所占总变形的比例在 10% 左右。在土体暴露时间为 36 h 时, 墙体变形量则有较大增长, 坑底施工阶段的变形量为 6.00 mm, 达到总变形量的 15%。当暴露时间超过 36 h 时, 由于土体的应力松弛, 引起墙后主动区土压力随时间不断增加, 而被动区土压力则不断减小, 基坑的安全性逐渐下降, 围护墙体产生较大的变形, 使坑底施工阶段内墙体变形量达到了 10.23 mm, 占总变形量的 30%, 此时基坑存在着较大的安全风险。

### 3 墙体变形时间效应的机制分析

通过以上对施工监测资料的分析, 可以发现坑底施工各时期内及整个阶段围护墙体变形与暴露时间有着密切的联系, 从机制上来看, 围护墙体的这种变形特性不仅与软土地区土的流变(表现为蠕变)相关, 而且土体的固结(基坑开挖卸载产生的负超静孔隙水压力随时间的消散)也对变形产生了相当的明显影响, 是由孔隙水压力随时间的变化和土体的蠕变行为共同引起的<sup>[14, 18]</sup>。

上海地区地下 30 m 深度以内的地层多属流塑及软塑黏土, 大多数深基坑处于此深度内<sup>[1, 10]</sup>。这种地层的土体具有高含水量、高灵敏度、高压缩性、低密度、低强度、低渗透性等特点, 流变性尤其显著。根据对上海地区土体进行一系列的卸载流变试

验,可以知道软土的流变特性与土的应力水平有密切联系<sup>[10]</sup>。在压应力 $\sigma_1 \leq 0.025$  MPa时,这类土体就已发生蠕变;当 $\sigma_1 \geq 0.150$  MPa(14~15 m的深基坑挡墙被动区土体的压应力)时,不排水蠕变急剧增大,最后会发生破坏。另外,在土的应力水平高的情况下,土体会在一定的承载时间内,以不易觉察的蠕变速度发生破坏。汪中卫等<sup>[3]</sup>提出黏土流变的半经验公式,流变速率与应力水平和时间之间的关系可表示为

$$\varepsilon = Ae^{\alpha D} t^m \quad (1)$$

式中: $D$ 为应力水平大小; $A$ , $\alpha$ , $m$ 均为与土性参数有关的试验修正系数,与土质条件成反比,即土质条件越差,其取值越大。

对于本工程而言,在土方开挖至设计坑底标高时,开挖深度达到27.9~29.2 m,深开挖引起了非常明显的卸载作用,土体在竖向高应力水平下,典型地表现为卸载流变,而且流变性表现明显。随着坑底土体暴露时间的延长,土体的流变速率亦有着明显的加大,从而坑底及坑周土体产生较大的流变变形,进一步使围护墙体向坑内的水平位移增大,坑底施工阶段内墙体变形量占总变形的比例也有较大增加,最大达到了30%的比例。

孔隙水压力随时间的变化也对墙体变形产生一定的影响。基坑开挖卸载会引起坑底和周围土体中的初始应力场改变,使得坑底和周围土体中产生负的超静孔隙水压力,负孔隙水压力的存在有利于基坑工程的稳定<sup>[17]</sup>。根据朗肯土压力理论,并考虑超静孔隙水压力的影响,围护墙体两侧的侧压力分别为

$$P_a = K_a \gamma_1' z - 2c_1' \sqrt{K_a} + (1 - K_a) u_1(z, t) + \gamma_w \quad (0 \leq z \leq h_1) \quad (2)$$

$$P_p = K_p \gamma_2' (z - \Delta h) + 2c_2' \sqrt{K_p} + (1 - K_p) u_2(z, t) + \gamma_w (z - \Delta h) \quad (\Delta h \leq z \leq h_1) \quad (3)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} K_a &= \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi_1'}{2} \right) \\ K_p &= \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi_2'}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $c_1'$ , $\phi_1'$ , $\gamma_1'$ , $h_1'$ , $u_1$ 分别为主动区土的有效应力强度指标(黏聚力和内摩擦角)、浮重度、土层厚度、超静孔隙水压力; $c_2'$ , $\phi_2'$ , $\gamma_2'$ , $h_2'$ , $u_2$ 分别为被动区土的有效应力强度指标(黏聚力和内摩擦角)、

浮重度、土层厚度、超静孔隙水压力。

随着基坑开挖后暴露时间的增加,负孔隙水压力逐渐消散,引起主动区和被动区的有效应力发生变化,进而使主动区与被动区作用在围护墙体上的侧压力发生变化,如图7所示<sup>[17]</sup>。

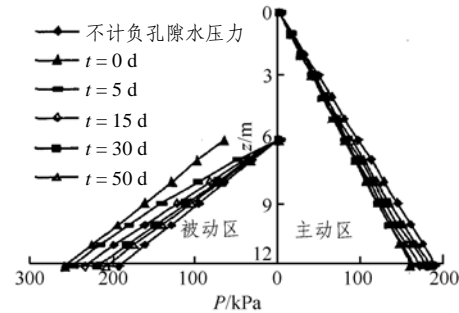


图7 围护结构侧压力随时间变化关系图<sup>[17]</sup>

Fig.7 Variations of lateral pressure acting on retaining structure with time<sup>[17]</sup>

伴随负超静孔隙水压力的消散,主动区作用在围护墙体上的侧压力逐渐增大,而被动区作用在围护墙体上的侧压力却逐渐减小,这对基坑的稳定来说是非常不利的。

### 4 坑底施工阶段基坑变形控制

控制基坑变形是保证基坑本身及周边环境安全的关键因素,坑底施工阶段墙体变形更是基坑变形控制的重中之重<sup>[2, 8, 9, 17]</sup>。此阶段内,由于施工工序的需要,围护墙体的无支撑暴露时间较长,对坑底土体有不可避免的施工扰动,土体强度降低,围护墙体及周围环境的变形速率会有较大的增加。

从以上分析中可知,坑底土体暴露时间的长短不仅对此期间内墙体变形有明显的影 响,而且坑底施工阶段的变形随暴露时间的不同也有着显著的差异,坑底土体的暴露时间是控制整个坑底施工阶段围护墙体变形的关键。在土方开挖至坑底设计标高后,应尽可能早地浇筑混凝土垫层,封闭坑底暴露的土体,约束被动区土体产生较大的蠕变变形,从而控制围护墙体的变形。围护墙体的变形滞后于土体变形时间为2~3 d<sup>[8]</sup>,而素混凝土垫层的强度发挥也需要1~2 d,因而应尽量在土体蠕变所产生的较大变形传递到围护墙体之前完成素混凝土垫层的浇筑,并使其发挥一定的支撑约束作用。在施工中应做到,严格依据时空效应进行开挖施工,开挖到坑底设计标高后,每6~10 m宽度就要及时分条浇

筑素混凝土垫层, 尽量将坑底土体暴露时间控制在 24 h 以内, 以减少对坑底土体的扰动及其他影响。

素混凝土垫层能够在一定程度上起到支撑的作用, 能约束围护墙体变形的发展, 有利于控制墙体的变形。垫层的效果与垫层的厚度、强度及施工的平直度(即是否有转折等)有非常大的关系, 如果垫层是加强垫层, 厚度要不小于 300 mm, 混凝土等级强度在 C20 以上, 平直度较好, 那么垫层和结构底板的作用类似, 能够较好起到支撑的作用, 控制墙体变形。但由于车站结构比较复杂, 在坑底处设置有数道上、下翻梁, 使混凝土垫层的平直度受到很大影响, 削弱了垫层对墙体变形的支撑作用。另外, 由于上、下翻梁钢筋绑扎复杂, 使得底板钢筋施工工作量大, 耗时较长, 从而延长了垫层的暴露时间。随着施工时间的加大以及绑扎钢筋、浇筑底板混凝土等施工扰动的影响, 坑周及坑底土体内土压力状态的调整, 围护墙体的安全性逐步降低, 在垫层浇筑完成 3~5 d 后, 围护墙体又重新出现向坑内发展的变形。为了不使墙体再次向坑内产生较大变形, 应减少素混凝土垫层的暴露时间, 预先做好底板及上、下翻梁钢筋施工的准备工作, 加快钢筋施工进度, 尽量争取在垫层浇筑后的 5 d 时间内完成混凝土底板的浇筑施工, 形成强有效的支撑约束体系, 从根本上控制坑底施工阶段基坑的变形。

## 5 结 论

(1) 随着土体暴露时间的延长, 坑底施工阶段墙体变形量可达到总变形的 30%, 在基坑变形控制中占有相当大的比例, 应给予足够的重视。

(2) 坑底土体暴露时间对该期间及整个坑底施工阶段内的墙体变形有显著影响, 缩短土体暴露时间是控制坑底施工阶段围护墙变形的关键所在。施工中应将土体暴露时间控制在 24 h 以内, 以减少对坑底土体的扰动及其他影响。

(3) 素混凝土垫层对围护墙体的变形具有一定的支撑效应, 在一定程度上起到类似结构底板的作用。采用掺加早强剂成分的混凝土浇筑垫层, 尽早发挥混凝土垫层的支撑作用, 约束墙体变形向坑内的进一步发展。

(4) 混凝土垫层对墙体的支撑效果与垫层的厚度、强度及施工的平直度有很大关系, 复杂的结构

会削弱垫层的支撑作用, 应合理优化结构设计, 提高垫层的整体性。

(5) 减少素混凝土垫层的暴露时间, 预先做好底板施工的准备, 加快绑扎钢筋、浇筑混凝土的施工进度, 争取在垫层浇筑后的 5 d 内完成底板的浇筑, 尽早形成底板混凝土对围护墙体的支撑作用, 从根本上控制坑底施工阶段基坑的变形。

## 参考文献(References):

- [1] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(LIU Jianhang, HOU Xueyuan. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))
- [2] 秦爱芳, 刘绍峰, 胡中雄. 基坑软土强度变化特征及坑底施工安全控制[J]. 地下空间, 2003, 23(1): 40 - 44.(QIN Aifang, LIU Shaofeng, HU Zhongxiong. Analysis of strength change of soil body of soft clay pit and safety control for the pit bottom construction[J]. Underground Space, 2003, 23(1): 40 - 44.(in Chinese))
- [3] 汪中卫, 刘国彬. 支撑暴露时间对深基坑变形的影响分析[J]. 交通与运输, 2003, (增 1): 59 - 63.(WANG Zhongwei, LIU Guobin. Analysis of deformation of subway station under condition of supporting-exposure time[J]. Traffic and Transportation, 2003, (Supp.1): 59 - 63.(in Chinese))
- [4] 李耀良, 徐安军, 王建华. 上海 M8 线西藏南路站 6 区基坑的监测与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 603 - 606.(LI Yaoliang, XU Anjun, WANG Jianhua. Monitoring and analysis of excavation of South Tibet Road Station of Shanghai line M8[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 603 - 606.(in Chinese))
- [5] 熊巨华, 楼晓明. 复杂条件下基坑围护结构的位移监测与分析[J]. 地下空间, 2004, 24(3): 354 - 358.(XIONG Juhua, LOU Xiaoming. Monitoring and analysis of displacement of a foundation pit in soft soil[J]. Underground Space, 2004, 24(3): 354 - 358.(in Chinese))
- [6] 秦爱芳. 基坑开挖实例分析与研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 1997.(QIN Aifang. Study on excavation of foundation pit[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 1997.(in Chinese))
- [7] 卢礼顺, 刘建航, 刘国彬. 基坑底混凝土垫层的支撑效应分析[J]. 地下空间, 2004, 24(6): 224 - 228.(LU Lishun, LIU Jianhang, LIU Guobin. Analysis of supporting effect of concrete sub-base of foundation pit[J]. Underground Space, 2004, 24(6): 224 - 228.(in Chinese))
- [8] 徐浩峰, 应宏伟, 朱向荣. 某深基坑监测与流变效应分析[J]. 工业



- 建筑, 2003, 33(7): 11 - 14, 56.(XU Haofeng, YING Hongwei, ZHU Xiangrong. Monitoring and analysis of creep effect of a deep excavation[J]. Industrial Construction, 2003, 33(7): 11 - 14, 56.(in Chinese))
- [9] 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 Juncai, ZHANG Zhuoyuan, LUO Guoyu. 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))
- [10] 杨国伟, 王如路, 刘建航. 时空效应规律在深基坑施工中的应用[J]. 地下工程与隧道, 2000, (4): 41 - 45, 50.(YANG Guowei, WANG Rulu, LIU Jianhang. Application of time-space effect rule in deep excavation[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2000, (4): 41 - 45, 50.(in Chinese))
- [11] 吴兴龙, 朱碧堂. 深基坑开挖坑周土体变形时空效应初探[J]. 土工基础, 1999, 13(3): 5 - 8.(WU Xinglong, ZHU Bitang. Primary investigation on time-effect of soil deformation around deep foundation pit during excavation[J]. Soil Engineering and Foundation, 1999, 13(3): 5 - 8.(in Chinese))
- [12] 蒋洪胜, 刘国彬, 刘建航. 软土地铁车站基坑开挖过程中的时空效应分析[J]. 建筑施工, 1999, 21(2): 30 - 33.(JIANG Hongsheng, LIU Guobin, LIU Jianhang. Time-space effect analysis of soft clay excavation in a metro station[J]. Building Construction, 1999, 21(2): 30 - 33.(in Chinese))
- [13] 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 Hongwei, XIE Kanghe, PAN Qiuyuan, et al. FE analysis of time-effects of deep excavations in soft clay[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2000, 17(3): 349 - 354.(in Chinese))
- [14] 汪中卫, 刘国彬, 王旭东, 等. 复杂环境下地铁深基坑变形行为的实测研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1 263 - 1 266.(WANG Zhongwei, LIU Guobin, WANG Xudong, et al. Study on the deformation of a deep metro excavation under complex environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1 263 - 1 266.(in Chinese))
- [15] 黄院雄, 刘国彬, 侯学渊. 软土有支护深基坑主动土压力研究[J]. 地下工程与隧道, 2000, (3): 7 - 11.(HUANG Yuanxiong, LIU Guobin, HOU Xueyuan. Study on the active earth pressure of deep braced excavation in soft clay[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2000, (3): 7 - 11.(in Chinese))
- [16] 刘国彬, 刘金元, 徐全庆. 基坑开挖引起的土体力学特性变化的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 112 - 116.(LIU Guobin, LIU Jinyuan, XU Quanqing. Testing study on variation of mechanical characteristics of soil due to excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 112 - 116.(in Chinese))
- [17] 李玉崎, 谢康和. 开挖卸载负孔隙水压力的消散对围护结构的影响[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2004, 3(6): 599 - 603.(LI Yuqi, XIE Kanghe. Influence of dissipation of negative pore water pressure on retaining structure during excavation[J]. Journal of Southern Yangtze University(Natural Science), 2004, 3(6): 599 - 603.(in Chinese))
- [18] LIU G B, NG C W W, WANG Z W. Observed performance of a deep multistrutted excavation in Shanghai soft clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(8): 1 004 - 1 013.