

# Monitoring Analysis of Retaining Structures of Excavation Pit of Qingchun Road River-Crossing Tunnel in Hangzhou

Zhengang Dong<sup>1</sup>, Zongliang Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hangzhou Qianjiang New City Construction and Management Commission, Hangzhou

<sup>2</sup>Hangzhou Qingchun Road River-Crossing Tunnel Co., Ltd., Hangzhou

Email: lizongliang@insigma.com.cn

Received: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2013; revised: Jul. 25<sup>th</sup>, 2013; accepted: Aug. 9<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Zhengang Dong, Zongliang Li. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** In situ monitoring demonstrates that the maximum horizontal displacements of the retaining structures are closely related to the excavation depth and time during excavation of the foundation pit. When multiple supports are applied, the axial forces of the supports fluctuate with increase of longitudinal length and depth of the excavation pit. Axial forces of the supports are significantly influenced by changes of external conditions such as temperature and rainfall. In addition, they are also greatly impacted by the set-up and removal of steel supports of the adjacent pit. The changes in ground water table resulting from dewatering and seepage are the main factors inducing settlement of ground surface. Displacements of the supports and the ground surface can be well controlled by in-time set-up of the supports, quick built-up of the basement and decreasing of stand-up duration. Field practice reveals that the implementation of two independent monitoring systems is essential during construction of large and deep excavation pits in complex ground conditions. Timely and effective monitoring gives a strong support to real-time acquirement of the conditions of the structures, in-time implementation of corresponding countermeasures and successful complement of the project.

**Keywords:** River-Crossing Tunnel; Retaining Structure; Monitoring; Analysis

## 庆春路过江隧道基坑围护结构监测分析

董振刚<sup>1</sup>, 李宗梁<sup>2</sup>

<sup>1</sup>杭州市钱江新城建设管理委员会, 杭州

<sup>2</sup>杭州庆春路过江隧道有限公司, 杭州

Email: lizongliang@insigma.com.cn

收稿日期: 2013年7月2日; 修回日期: 2013年7月25日; 录用日期: 2013年8月9日

**摘要:** 通过监测分析表明, 在深基坑开挖过程中, 围护体的最大水平位移与开挖深度和开挖时间密切相关, 在多道支撑工况下, 支撑轴力随开挖纵向长度增加、开挖深度增加呈波动变化, 环境温度明显变化和强降雨等因素对支撑轴力的影响明显, 邻近基坑的支撑架设与拆除对支撑轴力有较大影响, 基坑周边地下水位变化是影响地表沉降的主因, 及时架设支撑、尽快完成底板结构、减少基坑暴露时间在控制围护体位移的同时能有效控制地表沉降。工程实践表明, 复杂地质条件下大型深基坑建设, 建立两套相对独立的监测系统非常必要, 有效的数据信息为建设者实时掌握结构工况、及时采取相应措施、顺利完成工程建设提供了重要保障。

**关键词:** 过江隧道; 围护结构; 监测; 分析

### 1. 引言

在我国目前施工的大型深基坑工程中，围护结构多采用地下连续墙、排桩、咬合桩、SMW 工法等型式<sup>[1]</sup>，在地铁车站、隧道等超深基坑中选择 SMW 工法作为主要围护结构仍非常慎重。SMW 工法因具有对周围环境影响小、止水性能好、适用范围广、施工工期短、造价低等优点<sup>[2]</sup>，在基坑围护方案中具有一定优势。SMW 工法是在水泥土搅拌桩内插入 H 型钢或其他种类的劲性材料，从而增加水泥土桩抗弯、抗剪能力，并具有挡水、挡土功能，该工法具有工艺简单、施工期短、成本低廉等特点，在基坑围护方案比选中具有相对优势。但是 SMW 工法形成的水泥土墙体受抗弯性能以及插入比等因素影响，很难在超深基坑使用。

有关 SMW 工法的研究成果<sup>[3-5]</sup>大多涉及其方案设计、施工方法、施工技术的分析与研究，而详细的监测分析<sup>[3]</sup>却鲜见报导。由于 SMW 工法的自身特性，现场监测是保障基坑工程安全可靠的重要措施，也是信息化设计与施工的前提<sup>[6]</sup>。

### 2. 工程概况

庆春路过江隧道北接杭州市庆春东路，南连萧山区市心北路，采用双向四车道，计算行车速度 60 km/h，匝道设计车速 40 km/h；道路等级为城市主干道，拟车道宽度分别为 3.75 和 3.50 m，通行净高 4.5 m。隧道总长 3765 m，其中江中盾构段长 1766 m，江南、江北岸上段均采用明挖施工。该场地内土层工程地质分层详见表 1，其土层分布情况如图 1 所示。

Table 1. Soil layers at site  
表 1. 场地工程地质分层表

土层编号	①	②-1	②-2	③-1	③-2	③-3	③-3 夹	④	⑤-1	⑤-2 夹
土层类别	素填土	砂质粉土	粉土夹淤泥质土	粉砂夹粉土	砂质粉土	粉砂夹粉土	粉土夹淤泥质土	淤泥质粉质粘土	粉质粘土	粉、细砂
土层编号	⑥-1	⑥-2	⑦-1	⑦-2	⑦-2 夹	⑧-1	⑧-2	⑧ 夹	⑨-1	⑨-2
土层类别	粘土	粉质粘土	含粉砂粉质粘土	粉、细砂	粉质粘土夹粉砂	圆砾	卵石	粉质粘土夹细砂	含砾砂岩	含砾砂岩

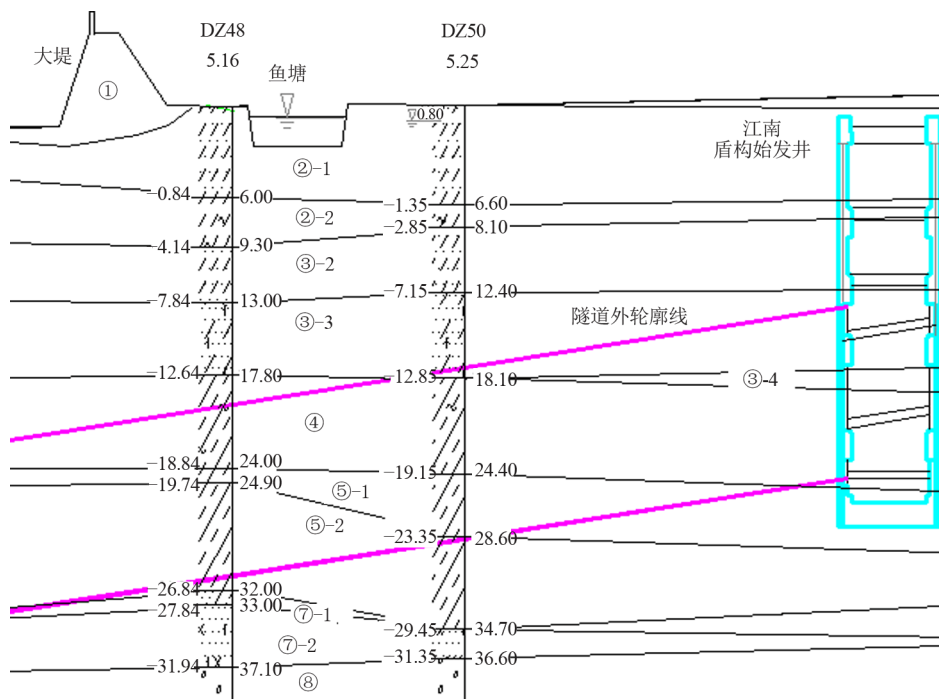


Figure 1. Typical geology profile  
图 1. 典型地质剖面图

沿线水文地质条件,工程范围场地地下水因含水介质、水动力特征及其赋存条件的不同,其补、迳、排作用和水化学特征均各有不同。松散岩类孔隙潜水含水层主要赋存于场区浅部人工填土及其下部粉、砂性土层内,含水层底板大致以④层淤泥质粉质粘土层为界,其富水性和透水性具有各向异性,分布广泛且连续。特别是表部填土层,透水性良好,下部粉性土层透水性弱,江南岸区段含水层厚度为18.1~21.0 m。江南段抽水试验:当降深2.17 m时,单井涌水量为1.57 m<sup>3</sup>/d。孔隙潜水与钱塘江水体水力联系密切,动态变幅一般在1~3 m左右。勘察期间实测潜水位埋深0.70~3.10 m,相对于标高为2.86~6.07 m,平均水位标高为3.75 m。

### 3. 围护结构型式

根据基坑开挖深度、地质情况、场地条件、环境条件以及施工条件,按照安全可靠、技术可行、施工方便、经济合理的原则,根据不同工况的设计要求,分段采用合理的支护体系。

江北段明挖段对于基坑深度小于4.0 m的地段,设计采用1:1放坡开挖的型式(LK0+415—LK0+505);LK0+505—LK1+200段基坑顶先用1:0.75坡度放坡2 m后再采用SMW围护结构型式,江北段周围环境复杂,桩的嵌固深度适当加大;LK1+200—LK1+319段为荒地,地质情况也较好,基坑采用放坡开挖坡面喷锚支护。

江南明挖段工作井南端头因挖深达到26.32 m,采用地下连续墙围护结构+地连墙基坑外侧土方卸载15.5 m+三道Φ609钢支撑+止水帷幕;盾构始发段(LK3+132.723~+440=RK3+130.254~+434.084)开挖深度21.71~17 M,采用三级放坡大开挖+喷射砼/钢筋网片+SMW工法桩H型钢插二跳一+两道Φ609钢支撑;开挖深度在17~12米段,采用三级放坡大开挖+喷射砼/钢筋网片+H型钢(700×300×13×24);后续段采用全面放坡打开挖的+喷射砼/钢筋网片。江南大开挖的同时设置可靠连续的基坑降水,包括承压水降水井和疏干降水井。

### 4. 工程监测

考虑到本工程的基坑开挖规模巨大,采用结合降

水放坡的复合式基坑围护体系,基坑围护结构在作业期间的稳定性和安全性至关重要,因此采取两套独立监测系统,施工监测系统外由建设单位单独委托进行第三方监测,抽取施工监测系统的典型断面进行同步监测,同时在重要部位设置独立监测断面,第三方监测系统取得的监测数据与施工监测数据同步上报、对比分析并相互印证。

#### 4.1. 主要监测内容、范围和频率

监测范围包括工程主体和周边工程环境(建构筑物、管线、道路地表等)。基坑开挖时周边环境监测范围为:基坑结构外侧2倍开挖深度;盾构施工时周边环境监测范围为:区间结构外侧算起2倍埋深(埋深等于区间结构顶离地表距离);隧道左、右线的监测范围为施工面前后各50米。监测内容如表2所示,监测频率如表3所示。

特殊情况下的监测频率,当出现下列情况之一时,应加强监测,提高监测频率:监测数据达到报警值;监测数据变化量较大或者速率加快;存在勘察中未发现的不良地质条件;超深、超长开挖或未及时加撑等未按设计施工;基坑及周边大量积水、长时间连续降雨、市政管道出现泄漏;基坑附近地面荷载突然增大或超过设计限值;支护结构出现开裂;周边地面出现突然较大沉降或严重开裂;邻近的建(构)筑物出现突然较大沉降、不均匀沉降或严重开裂;基坑底部、坡体或支护结构出现管涌、渗漏或流砂等现象;基坑工程发生事故后重新组织施工;出现其他影响基坑及周边环境安全的异常情况。

Table 2. Monitoring items  
表 2. 监测项目表

序号	监测项目	类别
1	建(构)筑物沉降、倾斜	
2	基坑外管线、建筑物沉降	
3	基坑外道路及地表沉降	基坑开挖、隧道施工 周边环境
4	防汛大堤沉降、倾斜、位移等监测	
5	坑外水位观测	
6	SMW工法桩冠梁顶及坡顶水平位移及沉降	
7	围护结构桩(墙)体变形	基坑开挖围护结构体系
8	支撑轴力	

**Table 3. Reading frequency during construction**  
**表 3. 施工期间的监测频率**

监测项目	监测频率
施工开始挖土前	2 次
墙顶水平位移、沉降监测	基坑开挖时 1~2 次/天, 主体施工时 1 次/天
周边建筑物、管线、 防汛堤变形	基坑开挖时 1~2 次/天, 主体施工时 1 次/天
支撑轴力	基坑开挖后 1~2 次/天
围护墙(桩)钢筋应力	基坑开挖时 1 次/天, 主体施工时 1 次/2 天
水位监测	基坑开挖时 1~2 次/天, 主体施工时 1 次/2 天
格构柱竖向沉降	基坑开挖时 1 次/天, 主体施工时 1 次/2 天
围护墙水平位移监测(测斜)	基坑开挖时 1 次/天, 主体施工时 1 次/2 天

## 4.2. 监测巡视

1) 对开挖面地质情况巡视以下内容:

a) 土层性质及稳定性。包括:土质性质及其变化情况(土质密实度、湿度、颜色等性质,分布情况,与地质核查结果和设计条件的差异情况);土体塌落(塌落位置、塌落体大小、发展趋势、塌落原因等)。

b) 降水效果。包括:抽降水控制效果、降水井抽水出砂量、变化情形及持续时间、附近地面沉降情况等。

2) 对支护结构体系巡视以下内容:

a) 支护体系施作及时性情况。

b) 渗漏水情况。包括渗漏水量、是否伴有砂土颗粒、发生位置、发展趋势等。

c) 支护体系开裂、变形变化情况。包括桩顶与冠梁脱开现象,冠梁开裂范围、宽度与深度,桩间网喷护壁开裂情形;支撑扭曲及偏斜程度、发生位置、发展趋势;混凝土腰梁开裂、腰梁与土体脱开情况、及发生位置。

3) 对基坑周边巡视以下内容:

a) 坑边超载。包括坑边荷载重量、类型、与坑缘距离、面积、位置等。

b) 地表积水。包括积水面积、深度、水量、位置、地面硬化完好程度、坡顶排水系统是否合理及通畅等。

## 4.3. 正文建立第三方监测系统的意义

第三方监测系统促进工程建设安全技术管理工

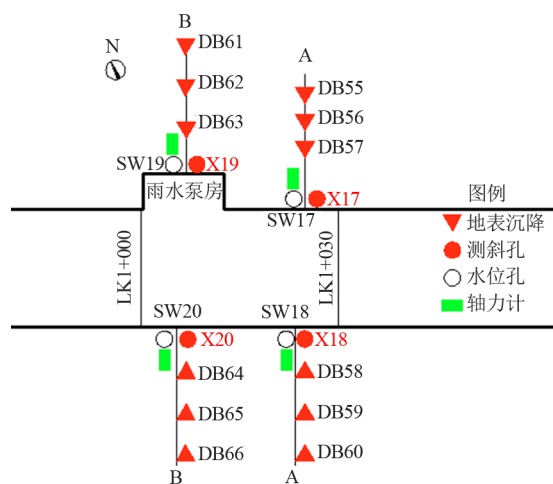
作的系统化、规范化和信息化,最大限度地规避风险,避免人员伤亡和环境损害,降低工程经济和工期损失,为工程建设提供安全保障服务。第三方监测系统在施工过程中对周边环境、工程本体实施独立、公正的监测抽检工作,基本掌握周边环境、围护结构体系和围岩的动态,验证施工方的监测数据,为建设单位、监理、设计、施工单位提供参考依据。第三方监测系统为工程建设风险管理提供支持,通过监测抽检、安全巡视和监测管理服务,较全面地掌握各工点的施工安全控制程度,为信息管理平台提供基础数据,对施工过程实施全面监控和有效控制管理。作为独立的监测方,其监测数据和相关资料可成为处理风险事物和工程安全事故的重要参考依据。积累资料和经验,为今后的同类工程设计提供类比依据。

## 5. 监测分析

为有效控制基坑开挖对周围环境的影响,同时现为信息化设计与施工提供依据<sup>[6]</sup>,基坑施工过程中,就围护结构的水平位移、钢支撑轴力、地表沉降、地下水等进行监测,得到了一些有益的参量变化规律。因本工程基坑过于长大(约 900 m),选取有代表性的节段,其监测点平面布置如图 2 所示。

### 5.1. 江北基坑围护体水平位移监测结果分析

选取 CX18 和 CX19 两个测斜孔采集的数据进行分析,自基坑未架设支撑前至基坑内结构施工完成后,基坑围护体水平位移监测结果如图 3 所示。



**Figure 2. Layout of monitoring site of foundation pit**  
**图 2. 基坑监测点平面布置示意图**

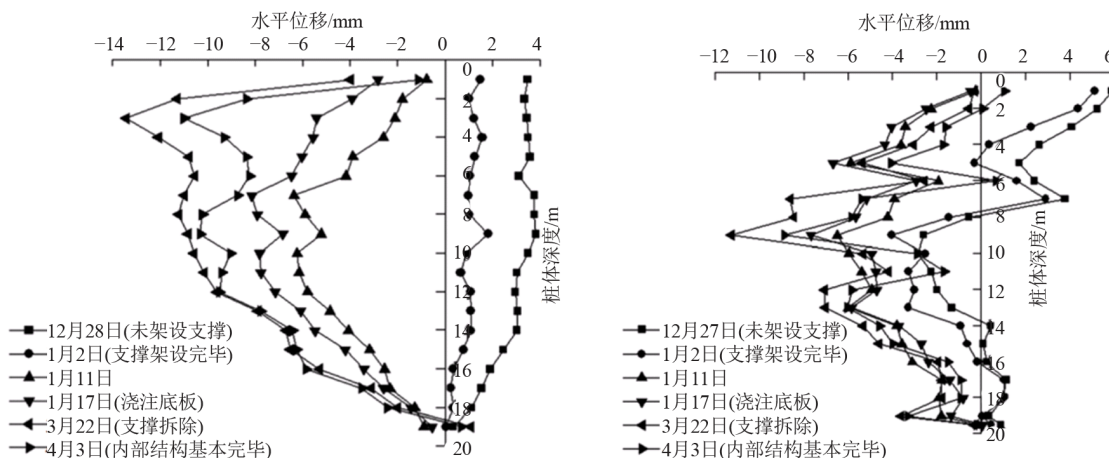


Figure 3. Relationship curves of horizontal displacement vs. depth (2009)  
图 3. 两个典型测斜孔水平位移 - 深度关系曲线(2009 年)

从图 3 中可以看出，在基坑开挖过程中，围护体的最大水平位移与开挖深度及时间密切相关。钢支撑架设前最大水平位移基本发生在围护体顶部。但随着基坑开挖深度的增加，围护体水平位移逐渐增大，最大水平位移发生位置也逐渐下移，且总体表现为中间大、两端小的趋势。支撑架设后，围护体水平位移明显减小，说明支撑的架设能很好地控制围护体的变形。图中所示在施加支撑后围护体水平位移变为负值情况，经分析认为该测点位于节段的端部，与其邻近基坑的支撑架设与拆除对其造成影响所致，且降雨造成的土体应力变化与粉砂土渗流也有一定影响。

从图中可以看到在基础底板浇注完成后，基础底板以下桩体水平位移明显减小，基础底板的存在能很好限制底部桩体的变形。支撑拆除后，基坑围护桩体水平位移明显增大。因此，在拆除支撑时应采取必要的保护措施，防止出现意外。主体结构完成后，桩体的水平位移总量及增量均有显著减小，经分析认为结构完成后土体回填限制了桩体位移的发展。支撑的架设及内部结构施工对围护体的水平位移控制作用明显。

### 5.2. 江北基坑钢支撑轴力监测结果分析

现场钢支撑架设如图 4 所示，选取 A-A 和 B-B 两个典型断面，其钢支撑轴力随时间变化如图 5 所示。

从图 5 中可以看到主要是第二道钢支撑受力，钢支撑的架设对其相邻支撑会产生明显的影响，并且随开挖长度和深度的增加、施工及气温的影响，第二道支撑的轴力逐渐增大，呈现波动变化。图中钢支撑轴



Figure 4. Site photo of steel supports  
图 4. 现场钢支撑架设图

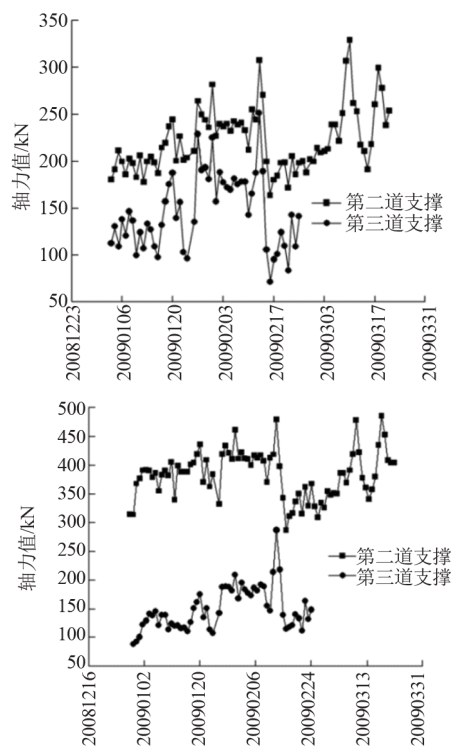


Figure 5. Variation curves of axial force vs. time  
图 5. 两个典型断面支撑轴力随时间变化曲线

力发生明显变化处,经分析认为该期间持续降雨,围护结构外侧水土压力增加,又恰逢该期间气温明显下降,部分支撑因温度明显变化导致轴力变化幅度较大。在底板结构完成且第三道支撑拆除后,第二道支撑的轴力明显增加;在邻近基坑支撑拆除过程中第二道支撑的轴力也呈现明显波动变化。因此在架设或拆除支撑过程中,应加强对轴力变化监测,防止轴力突变对基坑稳定性造成影响。本监测段中钢支撑轴力只达到设计值的45.7%,68.6%左右,曾有工程实测值是设计值的2.25~3.3倍<sup>[7]</sup>,说明钢支撑轴力还有足够的安全储备。

### 5.3. 江北基坑地表沉降监测结果分析

选取 A-A 和 B-B 两个断面共 6 个测点,其地表沉降监测结果如图 6 所示。从图 6 中随着基坑逐步开挖,地表沉降逐渐增大沉降值一般为 20~60 mm。在底板浇筑以后,各监测点的沉降值趋于稳定。

基坑周边地表沉降与地下水水位变化也有着密

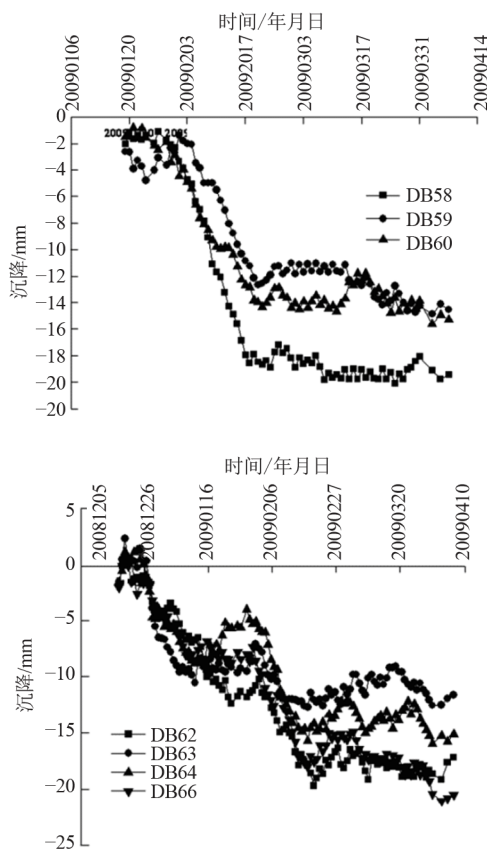


Figure 6. Variation curves of settlement vs. time  
图 6. 典型断面地表沉降随时间变化曲线

切关系。地面沉降随着基坑内外地下水位的下降而增加,地面沉降也会在地下水位稳定时趋于稳定。本工程明挖段开挖土层以粉砂性土为主,渗透系数较大,水将会对基坑产生很大的影响。基坑开挖时容易发生粉土流失而对基坑开挖产生很大影响,因此,在基坑开挖过程中采取有效措施控制基坑周围水位变化,对控制土体变形和围护结构的稳定具有重要意义。尤其在降雨过程中,应增加监测密度,及时掌握基坑变形情况,并做好防范与应急措施<sup>[8]</sup>。

### 5.4. 江南基坑监测结果分析

在江南基坑现已施工段的开挖范围共设置了 5 个监控断面,60 个地表沉降监测点,60 个土体水平位移观测点,20 个墙顶沉降监测点,20 个墙顶水平位移监测点,20 个测斜孔,20 个水位观测孔,16 组轴力计等。根据监测数据分析,施工期间地表沉降最大值为 56 mm,未出现报警值;土体水平位移最大值为 42.8 mm,日均变量均在 3 mm 以下;基坑钢支撑轴力变化与施工工况相符,均未超过支撑轴力设计值<sup>[9]</sup>。本段超深基坑自开挖至主体结构完成,历时 112 d,施工过程中降水效果良好,基坑变形稳定,工程监测为基坑安全提供了可靠的信息,确保了深基坑建设安全。

## 6. 结论

工程实践表明,本工程超深基坑选择降水放坡结合 SMW 工法的围护结构是成功的,期间工程监测发挥了重要作用,两套平行监测系统客观反馈了围护结构、周边土体、地下水位、支撑内力等数据信息,为建设者能实时掌握结构工况、及时采取相应措施提供了重要保障。同时通过监测分析对粉砂质地层条件下深基坑施工提出以下建议:

1) 通过对围护体水平位移的监测分析,认为在深基坑开挖过程中,围护体的最大水平位移与开挖深度可开挖时间密切相关,随开挖深度增加,围护体水平位移渐大,最大水平位移发生位置随开挖深度增加而渐下移,支撑的架设及主体结构完成能非常有效地限制围护体水平位移。

2) 通过对钢支撑轴力的监测分析,认为在多道支撑的工况下,第二道支撑轴力明显大于第三道支撑轴

力,且随开挖纵向长度增加、开挖深度增加呈波动变化。环境温度明显变化和强降雨等因素对支撑轴力的影响明显。邻近基坑的支撑架设与拆除对支撑轴力有较大影响。

3) 通过对基坑周边地表沉降的监测分析,认为基坑周边地下水位变化是影响地表沉降的主因,及时架设支撑、尽快完成底板结构、减少基坑暴露时间在控制围护体位移的同时能有效控制地表沉降。

4) 复杂地质条件下大型深基坑建设,建立两套相对独立的监测系统非常必要,可以充分提高所采集数据的使用效率,增加对数据的置信程度,同时两套系统对不同时段的数据采集可以形成有效的补充,尤其对可能出现的重大隐患预警信息更为有效可靠,为工程平稳安全建设提供重要保障。

## 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.
- [2] 张忠苗. 桩基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [3] 周希圣, 陈裕康, 张伟. SMW 围护深基坑逆筑法设计研究与工程实践[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 511-515.
- [4] 张冠军, 徐永福, 傅德明. SMW 工法型钢起拔试验研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 444-448.
- [5] 顾士坦, 施建勇. 深基坑. SMW 工法模拟试验研究及工作机理分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1121-1126.
- [6] 王浩, 覃卫民, 汤华. 关于深基坑施工期监测现状的一些探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增): 1789-1793.
- [7] 安关峰, 高峻岳. 广州地铁公园前地下空间深基坑综合支护监测分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 872-979.
- [8] 张忠苗, 赵玉勃, 吴世明, 王博. 过江隧道深基坑中 SMW 工法加钢支撑围护结构现场监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1270-1278.
- [9] 吴世明, 李宗梁, 焦齐柱. 庆春路过江隧道超深基坑降水放坡结合 SMW 工法的应用[A]. 地下工程建设与环境和谐发展—第四届中国国际隧道工程研讨会文集[C]. 上海: 同济大学出版社, 2009, 10: 827-837.