

DOI: 10.11779/CJGE2014S2071

# 兰州市湿陷性黄土地区地铁车站深基坑变形规律 监测与数值模拟研究

吴意谦<sup>1, 2</sup>, 朱彦鹏<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;  
3. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 以兰州市地铁 1 号线一期工程世纪大道车站深基坑工程为依托, 给出了该车站深基坑支护结构的变形监测方案, 制定了监测项目、监测仪器和监测频率, 完成了现场的监测工作, 根据监测结果分析了围护结构及周围土体随着基坑开挖深度和时间变化的位移规律。结果表明, 围护结构设计及监测方案是合理可行的, 钻孔灌注桩+钢管内支撑的支护形式能够有效地控制基坑变形, 保证地铁车站的安全施工。同时也对地铁车站深基坑开挖进行全过程数值模拟计算, 将获得的结果与监测数据进行了对比分析。分析表明数值计算结果与现场监测结果较为一致, 研究为兰州地区地铁车站深基坑工程的合理设计与安全施工提供了科学依据。

**关键词:** 地铁车站; 深基坑; 变形; 监测; 数值模拟

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0404-08

**作者简介:** 吴意谦(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程支护结构方面的研究工作。E-mail: 371901233@qq.com。

## Monitoring and numerical simulation of deformation law of deep foundation pit of subway station in Lanzhou collapsible loess

WU Yi-qian<sup>1, 2</sup>, ZHU Yan-peng<sup>1, 2, 3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730050, China; 3. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou 730050, China.)

**Abstract:** Taking the deep foundation pit of Shijidadao Station of the first-stage project of Lanzhou subway line No. 1 as background, the deformation monitoring plan of its supporting structures is introduced. The monitoring items, instruments and frequencies are formulated. The in-situ monitoring is completed. According to the monitoring results, the characteristics of deformation of piles and the surrounding soils of supporting structures with time are analyzed. The results show that the design of supporting structures and the monitoring plan are reasonable. The supporting structures of bored piles and interior support can control the deformation efficiently and ensure a safe construction of the subway station. At the same time, the method of FLAC<sup>3D</sup> is used to study the whole excavation process of the foundation pit. The calculated results are consistent with the monitoring data. This study may provide reference for the reasonable design and safety construction of deep foundation pits of subway in Lanzhou.

**Key words:** subway station; deep foundation pit; deformation; monitoring; numerical simulation

## 0 引 言

随着经济的飞速发展, 城市人口急剧增长, 开发地下空间诸如地铁的建设是缓解交通、空间危机的有效手段。然而地铁车站一般位于人口集中、建筑物密集、地下管线众多的繁华地段, 车站深基坑的开挖极易导致周围土体位移, 产生较大的地面沉降, 会给深基坑支护的设计与施工及周围环境带来巨大的风险, 国内外相关工程事故屡见报道。目前全国建设地

铁城市 20 余个, 其中兰州市的湿陷性黄土地质条件与国内外一些已建成投入使用地铁车站的城市在地质条件方面存在较大差异。

当今基坑工程的设计原则正从强度破坏极限状态向着变形极限状态控制发展。既要保持支护体系和基

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAK12B07); 国家自然科学基金项目(50978129)

收稿日期: 2014-07-28

坑自身的稳定,又要保证周边环境的安全。许多学者对于地铁车站深基坑的变形规律做出了诸多研究成果<sup>[1-16]</sup>,对基坑开挖支护时的支护结构变形、坑周土体变形及其内支撑的轴力得出了诸多科学可信的变形规律,能够有效的保证安全合理施工。但在湿陷性黄土地区地铁车站深基坑的设计与施工中,可参考的经验很少。

深基坑支护结构的变形及对周边环境的影响一般很难通过解析的方法求解。而数值分析及信息化监测的方法为解决这类问题提供了有力的工具。本文以兰州市地铁1号线1期工程世纪大道车站深基坑为背景,进行支护结构变形及周围环境的现场监测工作,同时利用有限差分软件FLAC<sup>3D</sup>对其基坑分步开挖、架设内撑等施工全过程进行模拟计算,同监测数据对比分析了车站深基坑支护体系及周围地层的变形规律,以期对兰州地区今后的地铁车站建设提供技术依据。

## 1 工程概况

### 1.1 车站概况

兰州市地铁线路1号线1期工程全长26.53 km,布设于主城区内,均为地下线,共20个车站。世纪大道车站位于安宁区世纪大道银安路下,周边有少量民房。车站设计里程为AK3+935.300—AK4+249.700,有效站台中心里程为AK4+022.000,全长314.4 m,车站宽21~82 m,标准段宽21.6 m。轨面设计高程为1519.390~1519.790 m。车站的主体结构为地下二层,标准段的底板埋深约17 m。车站设有4个出入口,车站的西北侧和东南侧分别设置4个风亭(图1,2)。



图1 车站深基坑现场照片

Fig. 1 Photo of foundation pit of subway station

### 1.2 工程地质概况

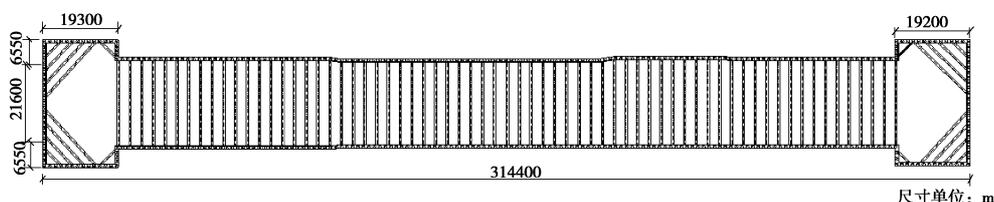


图2 车站深基坑支护平面图

Fig. 2 Plan of support for foundation pit of subway

车站场地地貌单元属黄河Ⅱ级阶地,位于七里河断陷盆地内,地层分布稳定,沉积韵律清晰,未发现有断裂构造发育,高于黄河河水水位9.0~12.6 m。车站无河流穿过,场地南边距离黄河北岸约1268.30 m。拟建车站地质勘察钻探深度内地层自上而下划分为5层,各土层力学指标参考表1中对应建议值。其中黄土具Ⅰ级非自重湿陷性。

表1 拟建车站场地主要地层的力学指标

Table 1 Physical and mechanical indices of soils

岩土名称	层厚/m	质量密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比
杂填土	4.0	1.70	5	0	12	0.34
黄土状土	2.0	1.77	10	17	27	0.32
卵石	2.0	2.30	35	0	40	0.28
卵石	6.0	2.35	40	0	40	0.26
卵石	>200	2.50	45	20	43	0.25

### 1.3 水文地质概况

地下水位埋深6.69~8.32 m,高出基坑底约10 m,地下水位高程为1525.43~1526.04 m。主要赋存于2-10和3-11卵石层中(图3),属河谷孔隙性潜水,含水层厚度200~300 m。需降水至基坑底面以下1 m,降水深度约11.6 m,采用管井法坑外降水。

### 1.4 支护结构设计方案

车站基坑开挖深度约17.34~18.50 m,不适合使用复合土钉墙支护形式,钻孔咬合桩及地下连续墙的造价又较高。拟采取 $\phi 800@1400$ 钻孔灌注桩+三道 $\phi 600$ 钢管内支撑,支撑位置分别在地下2, 8, 14 m处,水平间距3 m。施加预应力值100, 250, 150 kN。桩间采用100 mm厚网喷混凝土。

## 2 监测方案

### 2.1 监测项目

为确保基坑施工的安全顺利进行和基坑周边环境的安全,本车站深基坑开挖过程中将对以下4项进行现场监测:①桩顶侧向位移;②桩身侧向变形;③钢管内支撑的轴力;④基坑边一定范围内土体的竖向沉降。

### 2.2 监测仪器

主要监测仪器有经纬仪、水准仪、测斜管、测斜仪、应变计等(表2)。

表2 监测项目及测点布置

Table 2 Layout of measuring points and monitoring items

序号	监测项目	监测位置	监测精度	测点布置	仪器名称	监测频率	控制值	报警值
1	桩顶水平位移	桩顶部	1.0 mm	桩顶部	经纬仪	开挖 0~5 m 1 次/3 d, 5~10 m 1 次/2 d, 10 m 以上 1 次/1 天	取 30 mm 与 0.1%H 小值	25 mm
2	桩体变形	桩内	1.0 mm	测点距 0.5 m	测斜管 测斜仪	开挖期 24 h 监测, 开挖完毕后 1 次/ 1 d, 浇注完底板后 3 d 量测一次	取 30 mm 与 0.1%H 小值	25 mm
3	支撑轴力	支撑端部或中部	≤1/100 ( $F_s$ )	轴力较大处	轴力计 应变仪	开挖初期 1 次/1 d, 开挖完成 1 次/3 d	设计轴力	设计值的 80%
4	地表沉降	基坑周围地面	1.0 mm	孔间距 5 m	水准仪	1 次/3 d	20 mm	16 mm

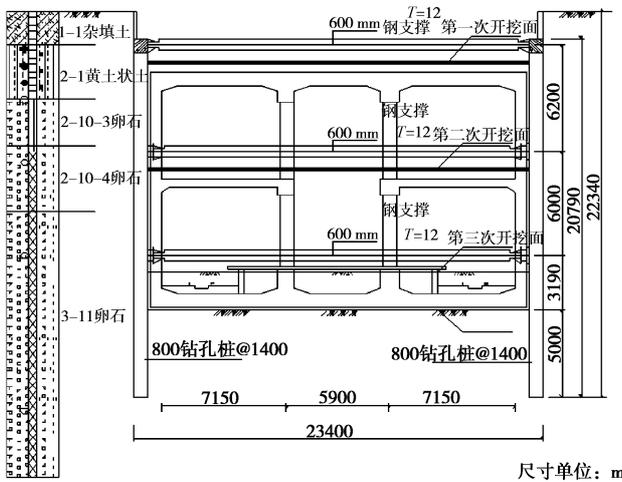


图3 车站主体支护结构剖面图

Fig. 3 Section of supporting structures of subway station

2.3 监测点布置

桩顶位移、桩体侧向变形监测选取 4 个有代表性的位置如图 4 所示, 支撑轴力在车站标准段及端部斜撑各选择一处, 坑周地表沉降监测选择基坑东南边有少量民房的一侧, 各监测点具体位置如图 4 所示。

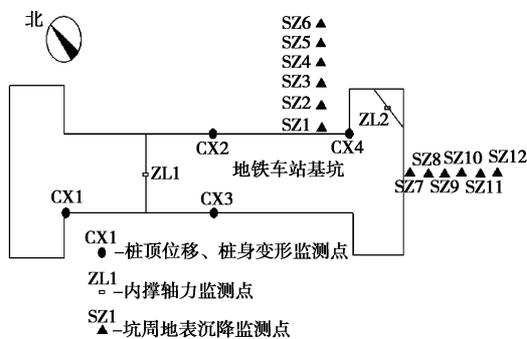


图4 基坑监测平面布置及坑周环境示意图

Fig. 4 Layout of foundation pit and monitoring sites

3 监测数据分析

3.1 桩顶位移分析

图 5 是 CX1, CX2, CX3, CX4 等 4 处桩顶部位移动监测结果, 选取每月 1 号的监测值作统计分析。起初桩顶位移为 0, 第一阶段桩顶位移向坑内数值不断增大, 这是由于随着基坑大规模开挖, 土体应力释放, 桩体逐渐成为悬臂状态, 变形曲线较陡; 第二阶段基坑开挖基本完成后, 位移曲线趋于平滑稳定。各处变形值相差不大, 变形值满足要求。

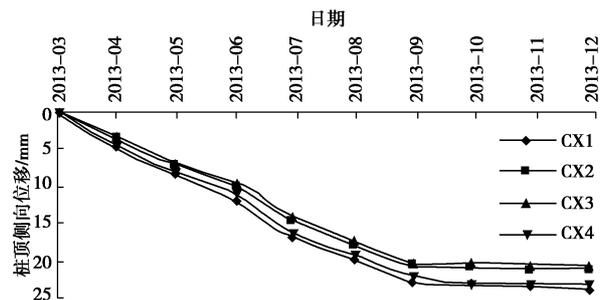


图5 桩顶侧向位移监测结果

Fig. 5 Curve of lateral displacement at pile top

3.2 桩身在不同施工期的位移分析

基坑开挖关键工况见表 3。桩作为主要支护结构, 其变形大小也是基坑安全的重要指标。选取 5 个具有代表性的时间点, CX2 测点的桩身变形监测数据见图 6。结果表明: ①基坑开挖暴露时间越长, 桩体位移量越大, 而桩底位移一直很小; ②在开挖初期, 围护桩变形为前倾型曲线, 桩顶水平位移最大; ③随着基坑的进一步开挖和钢支撑的施作, 围护桩变形曲线逐渐向“弓”字型变化, 最大水平位移发生部位随之下移。当基坑开挖最终完成时 (至 17 m), 桩体最大变形为 23.4 mm, 该点约在距离基坑顶部 2/3 深度的-11.0 m 处。如何利用监测数据反算围护结构的设计参数, 对现有围护结构设计进行优化是下一步需要研究的课题。

3.3 内撑轴力全过程分析

选取 ZL1 测点, 轴力监测数据曲线见图 7。设置

每道支撑时对其相邻支撑都会产生一定的影响, 第二道支撑架设后, 第一道支撑轴力有所降低; 架设第三道支撑后第二道的轴力却突然的增加, 这是由于第三道支撑预应力的施加使得墙体发生最大位移的位置上移, 导致第二道支撑轴力的增加。所以在设置或拆除支撑过程中, 应时刻关注其邻近支撑的轴力变化, 防止由于其轴力突增或突降而带来危险。当开挖完成后, 轴力变化趋于稳定, 第一道支撑轴力约为 100 kN, 第二道支撑轴力约为 900 kN, 第三道支撑轴力约为 450 kN, 说明第二道支撑附近的围护结构变形较大。钢支撑的最大实测轴力为设计轴力的 60%~70%。

表 3 关键施工阶段

时间	车站深基坑施工阶段
2013 年 3 月	基坑开挖约 5 m (在开挖至 3 m 时在 2 m 深处施作第一道钢内撑)
2013 年 5 月	基坑开挖约 10 m (在开挖至 9 m 时在 8 m 深处施作第二道钢内撑)
2013 年 7 月	基坑开挖约 15 m, 在 14 m 深处施作第三道钢内撑
2013 年 9 月	基坑开挖完成, 施作底板
2013 年 11 月	支护结构施工完成

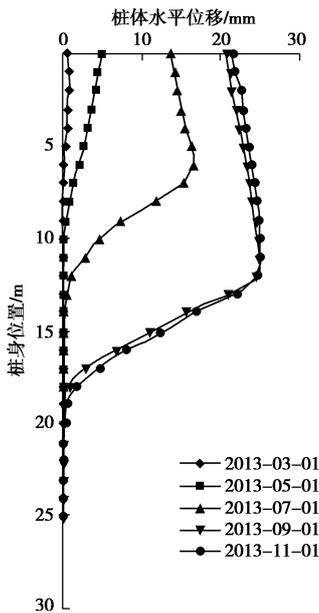


图 6 桩身侧向位移监测结果

Fig. 6 Curves of lateral displacement of piles

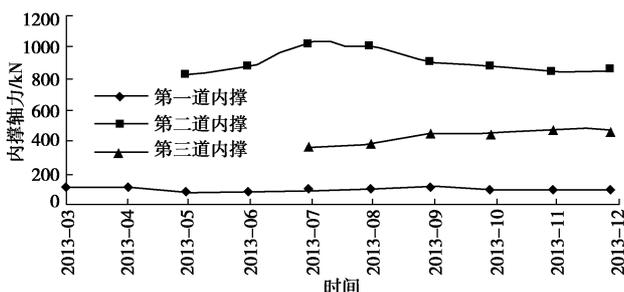


图 7 钢管内支撑轴力曲线

Fig. 7 Curves of axial force of first, second and third supports

### 3.4 坑周地表沉降分析

选取 SZ1, SZ2, SZ3, SZ4, SZ5, SZ6 等 6 个测点, 其沉降监测曲线见图 8。SZ1, SZ2, SZ3 等 3 个测点即墙后土体的沉降值均不大, 这是由于桩体与土体之间的摩擦力限制了土体的沉降。起初沉降最大值发生于坑边, 随着开挖的加深, 最终最大沉降点距坑边有一定距离 (SZ4 测点, 据坑边 15 m), 最大沉降值约为 16 mm。监测点的沉降曲线形态类似, 随开挖深度加深而逐步增大, 开挖最终完成后趋于稳定。总体的沉降量不大, 能够满足基坑设计中关于地面最大沉降的控制要求。

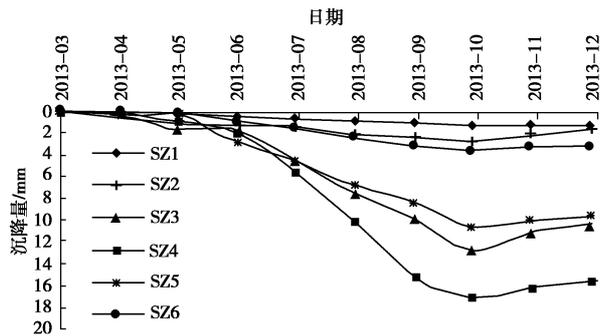


图 8 坑周地表沉降曲线

Fig. 8 Settlement curves of surrounding of soils foundation pit

## 4 施工过程数值模拟

### 4.1 计算模型

采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 模拟分析施工的全过程。因基坑开挖前已完成降水, 地下水水位维持在基坑底板以下 1.0 m, 故在模拟中不再考虑地下水的影响, 建立三维数值计算模型如图 9。基坑标准段的宽度约为 22 m, 开挖深度约 17 m。依据圣维南原理, 计算边界一般选开挖尺寸的 3~5 倍比较合理, 取 82 m × 20 m × 40 m 建立模型, 共产生 372840 个单元, 334660 个节点。同时考虑到基坑周围随机发生的车辆行驶动载及其施工堆载等因素, 基坑周围均布置超载 15 kPa。采用空模型 Null 实现土体的开挖, 用 Mohr-Coulomb 本构模型模拟土体。四周侧边界法向方向固定, 切线方向自由, 底边界固定。

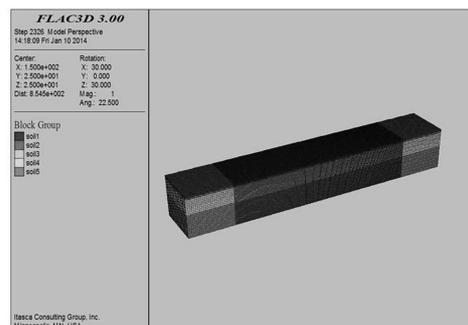


图 9 数值模拟计算模型

Fig. 9 Numerical simulation model

### 4.2 初始应力

首先建立初始应力场，假设任一水平面和竖直面剪应力均为零，所以土体的初始应力即可定义为距土层表面深度的函数。若其竖向应力值随纵坐标线性变化，那么水平应力分量即可定义为该点的竖向应力与侧压力系数的乘积（图 10）。

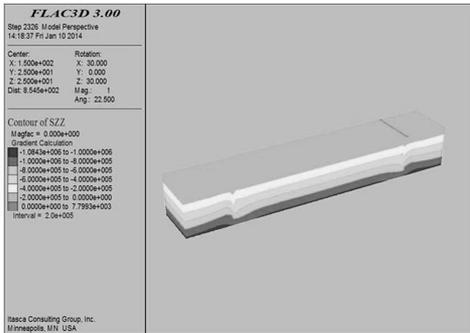


图 10 初始应力图

Fig. 10 Initial stress

### 4.3 支护结构的模拟

在兼顾模拟精确度的前提下，尽量使模拟分析过程简化。利用等效刚度原则，围护结构采用各向同性弹性模型的实体单元模拟为地下连续墙结构，墙体厚度为 650 mm。钢支撑采用 FLAC<sup>3D</sup> 自带的 Beam 单元，在端头处施加一对等大反向的力模拟预应力，以便准确的模拟钢管内支撑的实际受力状态（图 11）。

### 4.4 主要施工步骤

主要施工步骤见表 4。

表 4 主要施工工况

Table 4 Main construction steps

序号	工况
1	构筑钻孔灌注桩+喷砼支护体系
2	开挖至 3 m，在 2 m 处架设第 1 道钢支撑，预应力 100 kN
3	开挖至 9 m，在 8 m 处架设第 2 道钢支撑，预应力 250 kN
4	开挖至 15 m，在 14 m 处架设第 3 道钢支撑，预应力 200 kN
5	开挖至基坑底部，深度 17 m

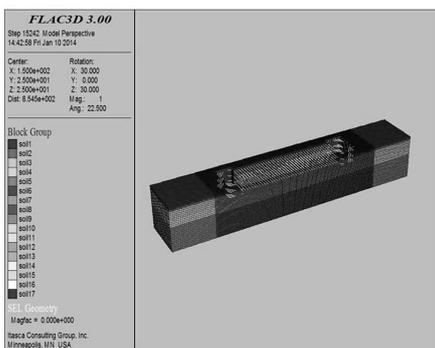


图 11 开挖完成后基坑及内撑图

Fig. 11 Support of foundation pit after excavation

## 5 模拟结果及与监测数据对比分析

### 5.1 坑周地层应力及位移模拟分析

坑内土体开挖后，打破了自身原有的初始应力平衡场，内力进行重分布，坑周地层向下沉降。随着基坑开挖深度的持续增加，沉降越来越大，其值随着与基坑距离的加大而逐渐降低，直到较远处为零，而坑底则有明显的隆起（图 12）。前三次开挖其沉降值的变化较快，最后一次开挖中土体应力基本已达到平衡，位移变化很小，开挖全部完成后沉降达到最大值。随着开挖深度的增加，坑内土体的去除使得坑壁的法向约束消除，坑周土体向坑内的水平位移也逐步增大。在施工中，应运用先支挡再开挖的施工方法，在每一次开挖前先进行坑壁的喷射混凝土，其黏结效应可对坑壁土体起到良好地支护作用。

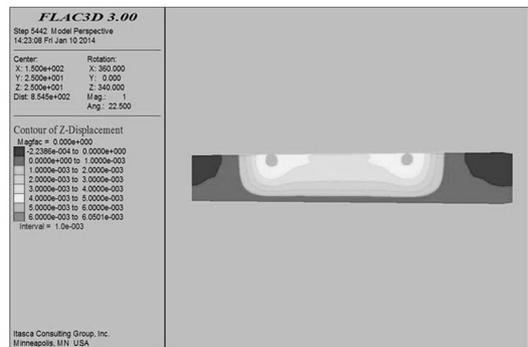


图 12 开挖完成后整体竖向位移云图

Fig. 12 Nephogram of vertical displacement after excavation

### 5.2 桩体水平位移模拟分析

图 13 为模拟计算各工况后围护体系的水平位移曲线。首道内撑架设后，支护结构最大水平位移约 0.6 mm，发生于桩顶；第二道内撑架设后，最大位移增大至 2.9 mm，发生部位位于桩体埋深约 5 m 处，桩顶

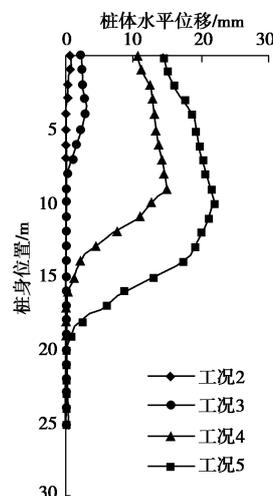


图 13 支护结构水平位移图

Fig. 13 Horizontal displacement of supporting structures

变形约为 1.9 mm; 第三层内撑架设完成后, 最大位移继续增大至 14.8 mm, 位于桩体埋深约 10 m 处, 桩顶变形约为 10.4 mm; 开挖完成后支护结构最大水平位移增大至 21.9 mm, 发生于桩体埋深约 11 m 处, 桩顶变形约为 14.4 mm。

以计算开挖完成工况 5 后的数据与 2013 年 9 月实际开挖完成后的监测数据作比较, 整个桩身变形大小较为接近, 变形趋势相同 (图 14)。说明模型的建立、参数的选取以及计算是合理的, 计算结果能够体现深基坑变形的一般规律, 其计算结果对于基坑工程围护结构设计、施工均具有一定的指导意义。

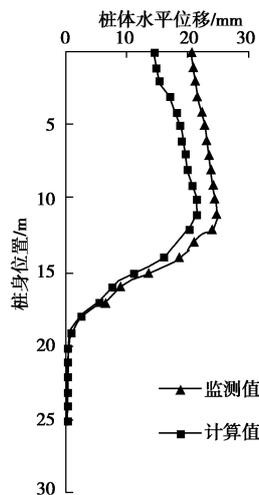


图 14 支护结构水平位移对比图

Fig. 14 Comparison of horizontal displacements of supporting structures

### 5.3 坑周地表沉降模拟分析

在模拟计算中, 运用 FLAC<sup>3D</sup> 中的 Hist 监控记录命令得出坑边各点的竖向位移历时曲线, 用所得数据绘出各工况后坑边土体竖向沉降曲线如图 15 所示。

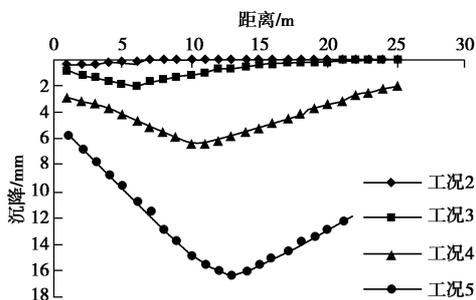


图 15 坑周土体竖向沉降图

Fig. 15 Soil settlement around foundation pit

起始悬臂开挖时, 沉降曲线呈“三角形”, 沉降最大值发生于坑边; 随着支撑的架设, 沉降曲线逐渐变为“抛物线”型, 最大沉降点距坑边有一定距离。随着基坑开挖深度的加大, 沉降变形亦逐步增大, 随着距离坑边越来越远而减小, 最终趋于稳定, 其形状

类似于勺形。且影响范围也越来越远, 距离坑边达开挖深度 2 倍的地表也能受到施工带来的影响, 其范围大于 35 m (两倍开挖深度)。据坑边 15 m 处各工况后沉降值与 SZ4 点处监测值相差不大。在深基坑施工过程中, 一定要密切注意基坑周边可能要发生最大沉降的区域, 必要时可进行监测预警, 防止工程事故的发生。

### 5.4 钢管内支撑轴力模拟分析

通过模拟计算, 监控得出 ZL1 处支撑轴力在各工况后的数据见图 16。工况 2 架设第一道支撑后, 其轴力基本稳定在 100 kN, 其余两道支撑轴力与监测数据相比也相差不大, 计算结果合理。

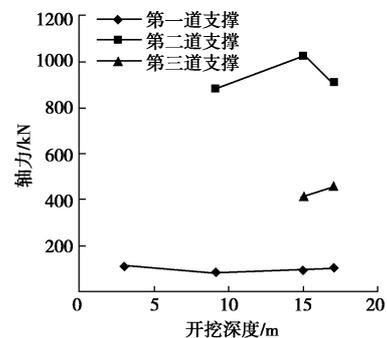


图 16 钢管内支撑轴力图

Fig. 16 Axial force of tubular steel support

## 6 结 论

(1) 现场监测及数值模拟计算结果表明, 该深基坑钻孔灌注桩+钢支撑围护结构的设计选型是合理可行的, 监测变形值满足要求。

(2) 采用有限差分数值分析方法对基坑开挖的施工过程进行了模拟研究, 将计算结果与监测结果进行了对比, 结果表明围护桩变形及基坑周围地表变形的基本趋势大体一致。有限元计算模型、参数选取及等效替代是合理的, 数值计算方法可为基坑工程的设计及施工提供科学指导和理论依据。

(3) 实际工程受周边环境、可变荷载、施工机械和时空效应等的影响, 现有数值模拟手段无法考虑周全, 使得计算值略小于监测值。如何改进计算精度、提高真实性是今后需要进一步解决的问题。

(4) 支护结构的水平位移量与施工开挖的深度紧密关联, 当深基坑悬臂开挖至某一深度时, 支护结构的水平位移曲线呈前倾型, 桩体上部的水平位移值最大; 随着钢管内支撑的架设、预应力的施加以及基坑的进一步开挖, 支护结构的水平位移曲线逐渐向“弓”字型转变, 发生最大位移的部位也随之下移, 大约在基坑开挖深度的 2/3 处。坑边最大沉降点距离坑边有

一定距离, 离坑边越远, 沉降逐渐减小, 沉降影响范围大于 30 m。

### 参考文献:

- [1] 任建喜, 张 琨, 陈新焱, 等. 奥林匹克公园地铁车站深基坑围护结构变形规律监测研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊): 456 - 460. (REN Jian-xi, ZHANG Kun, CHEN xin-yan, et al. Deformation laws of supporting structure for deep foundation pit of Olympic Park subway station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S0): 456 - 460. (in Chinese))
- [2] 李 淑, 张顶立, 房 倩, 等. 北京地铁车站深基坑地表变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(1): 189 - 198. (LI Shu, ZHANG Ding-li, FANG Qian, et al. Research on Characteristics of Ground surface deformation during deep excavation in Beijing Subway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(1): 189 - 198. (in Chinese))
- [3] 刘 杰, 姚海林, 任建喜. 地铁车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 2): 456 - 461. (LIU Jie, YAO Hai-lin, REN Jian-xi. Monitoring and numerical simulation of deformation of retaining structure in subway station foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S2): 456 - 461. (in Chinese))
- [4] 李 磊, 段宝福. 地铁车站深基坑工程的监控量测与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 1): 2684 - 2691. (LI Lei, DUAN Bao-fu. Monitoring measurement and numerical simulation for deep foundation pit of subway station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S1): 2684 - 2691. (in Chinese))
- [5] 胡安峰, 张光建, 王金昌, 等. 地铁换乘车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊): 77 - 81. (HU An-feng, ZHANG Guang-jian, WANG Jin-chang, et al. Monitoring and numerical simulation of deformation of retaining structure excavation of a metro transfer station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S0): 77 - 81. (in Chinese))
- [6] 张忠苗, 房 凯, 刘兴旺, 等. 粉砂土地铁深基坑支撑轴力监测分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 426 - 429. (ZHANG Zhong-miao, FANG Kai, LIU Xing-wang, et al. Monitoring analysis of axial forces of strut for deep foundation pits of subway station in silty sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 426 - 429. (in Chinese))
- [7] 王随新, 杨有海, 周沈华. 杭州地铁秋涛路车站深基坑地表沉降监测分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊): 430 - 435. (WANG Sui-xin, YANG You-hai, ZHOU Shen-hua. Monitoring analysis of ground settlement of deep foundation pit at Qiutao Road Station of Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S0): 430 - 435. (in Chinese))
- [8] 杨有海, 王建军, 武进广, 等. 杭州地铁秋涛路车站深基坑信息化施工监测分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(10): 1550 - 1554. (YANG You-hai, WANG Jian-jun, WU Jin-guang, et al. Informationized construction monitoring analysis of deep foundation pit for Qiutao Road station of Hangzhou Metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(10): 1550 - 1554. (in Chinese))
- [9] 贺 炜, 潘星羽, 张 军, 等. 河心洲地铁车站深基坑开挖监测及环境影响分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 478 - 483. (HE Wei, PAN Xing-yu, ZHANG Jun, et al. Monitoring and environmental impact analysis of deep excavation of subway stations in river islands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 478 - 483. (in Chinese))
- [10] 叶帅华, 朱彦鹏, 周 勇. 兰州市某复杂深基坑工程设计与监测分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 431 - 437. (YE Shuai-hua, ZHU Yan-peng, ZHOU Yong. Design and monitoring analysis of a complicated deep foundation pit in Lanzhou [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 431 - 437. (in Chinese))
- [11] 任永忠, 朱彦鹏, 周 勇. 兰州市某深基坑支护设计及监测研究分析[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊): 710 - 715. (REN Yong-zhong, ZHU Yan-peng, ZHOU Yong. Design and monitoring of bracings for a deep foundation pit in Lanzhou [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S0): 710 - 715. (in Chinese))
- [12] 房师军, 付拥军, 姚爱军. 某地铁工程深基坑排桩围护结构变形规律分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 216 - 219. (FANG Shi-jun, FU Yong-jun, YAO Ai-jun. Deformation of row pile retaining structures for deep foundation pit of subway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 216 - 219. (in Chinese))
- [13] 叶 强, 吴庆令. 某深基坑工程的监测分析与变形特性[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 541 - 544. (YE Qiang, WU Qing-ling. Monitoring analysis and deformation characteristics of a deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 541 - 544. (in Chinese))

- Chinese))
- [14] 李四维, 高华东, 杨铁灯. 深基坑开挖现场监测与数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 284 - 291. (LI Si-wei, GAO Hua-dong, YANG Tie-deng. Monitoring and numerical analysis of a deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 284 - 291. (in Chinese))
- [15] 徐 伟, 夏乔网, 徐鹏飞, 等. 软土地基临江特大型相邻深基坑同期施工监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 1): 2676 - 2683. (XU Wei, XIA Qiao-wang, XU Peng-fei, et al. Monitoring and analysis of synchronized excavation of extra large-scale adjacent riverside deep foundation pits in soft soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S1): 2676 - 2683. (in Chinese))
- [16] 逢铁铮, 方勇生, 覃为民. 厦门梧村隧道明挖深基坑施工监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 1): 2751 - 2757. (PANG Tie-zheng, FANG Yong-sheng, QIN Wei-min. Analysis of excavation monitoring for deep foundation pit in Xiamen Wucun Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S1): 2751 - 2757. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)