

DOI: 10.11779/CJGE2015S1016

北京地铁车站地连墙支护结构受力变形特性研究

孙长军^{1,2}, 张顶立¹, 刘井学³, 曹晓立³

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京 100068;

3. 北京迈达斯技术有限公司, 北京 100044)

摘要: 北京地铁 14 号线望京站采用地下连续墙+钢支撑以及地下连续墙+钢支撑+锚索混合支护体系。基于监测数据分析研究表明: 基坑开挖对周围土体的影响水平范围上与基坑深度相当。钢支撑区段与混合支撑区段的沉降槽形态有差异, 混合支撑区段地表沉降要大于钢支撑区段的地表沉降。在混合支撑区段, 当基坑开挖较浅时, 地下连续墙呈悬臂式位移分布, 随着基坑开挖深度的增加, 呈现抛物线型位移; 第一层部分钢支撑轴力接近工作轴力, 而下层锚索的拉力未能得到充分发挥。在钢支撑区段, 地下连续墙体变形呈现刚性移动特点, 钢支撑在预加轴力后经历了应力松弛然后轴力不断增长的过程, 具有明显的时空效应。盾构井段角撑轴力变化比较平缓, 波动幅度不大, 结构空间效应明显。两种支撑体系均能满足围护结构变形控制指标要求。

关键词: 深基坑; 地下连续墙; 变形特征; 受力特征

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0078-06

作者简介: 孙长军(1970-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 项目中心副总经理, 从事地铁工程技术及工程管理工作。

E-mail: suncj8898@263.net。

Mechanical and deformation characteristics of diaphragm wall system of Beijing metro station

SUN Chang-jun^{1,2}, ZHANG Ding-li¹, LIU Jing-xue³, CAO Xiao-li³

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiao Tong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing METRO Construction Administration Co.,

Ltd., Beijing 100068, China; 3. Beijing MIDAS Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Wangjing station of Beijing metro line No. 14 adopts the support system of underground diaphragm wall + steel support as well as diaphragm wall + steel support + anchor cable. The analysis of monitoring data shows that the influence range of excavation on the surrounding soil is close to the depth of foundation pit. The shapes of settling tank s of steel support section and mixed support section are different. The surface subsidence of mixed support section is larger than that of steel support section. In the mixed support section, when the excavation of foundation pit is shallow, the displacement of diaphragm wall is cantilever distributed. With the increase of excavation depth, the displacement is parabolic. The axial forces of first layer of steel strut are close to the work ones, and the tension of the lower anchor cable does not give full play. In the steel support section, the deformation of diaphragm wall presents rigid motion characteristics. The axial forces of steel support presenting stress relaxation and growing process have obvious effects of time and space. The axial forces of angle brace of steel support at shield well are quite gentle, the fluctuation is not large, and the spatial effects of structure are obvious. Two kinds of supporting system both can satisfy the requirements of deformation control indices of retaining structures.

Key words: deep foundation pit; diaphragm wall; deformation characteristic; mechanical characteristic

0 引言

近年来, 中国城市地铁建设发展迅猛, 地铁车站一般位于城市的繁华路段, 车站附近建筑物、地下设施密集、交通繁忙, 除少数暗挖车站以外, 大部分地铁车站采用明挖法施工。地铁深基坑开挖过程是基坑开挖面及挡墙面水平方向的卸荷过程。由于卸荷作用引起坑底隆起变形, 地下墙体在两边压力差作用下产

生水平侧移, 当墙体入土深度不足, 或挡墙刚度不足时, 会因开挖面内外四周土体产生过大的塑性区而引起基坑局部或整体失稳。所以深基坑不仅要保证基坑的稳定、减少支护结构的内力, 更要保护基坑周围的

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAJ01B03); 中央高校基本科研业务费专项资助项目 (2012JBZ013)

收稿日期: 2015-03-26

环境安全与使用功能,对变形控制要求十分严格,这给基坑变形预测与控制的理论与方法研究带来了重大挑战。

为此,许多学者针对深基坑支护结构的内力、变形以及地表沉降规律等问题进行深入研究,成果十分丰富。Peck^[1]对软土深基坑挖引起的地表沉降进行了详细研究,给出坑外土体沉降的估算图式。Clough^[2]将内支撑和锚拉系统的开挖所引致的围护结构变形型式归为3类并给出了预估墙体位移图表。Andrew^[3]对某地下停车场深基坑进行了有限元分析,并考虑了渗流的影响。徐中华等^[4-5]系统分析了上海地区93个基坑开挖引起的灌注桩变形性状。丁克胜等^[6]研究了天津地区盖挖逆做深基坑土压力与墙体侧向变形的关系;朱瑶宏等^[7]结合宁波轨道交通1号线基坑工程,统计分析基坑围护结构水平位移和墙后地表沉降的基坑变形特性。王卫^[8]研究了成都地铁深基坑变形性状及其主要影响因素和变形控制方法。张明聚等^[9]分析了海南美兰机场明挖隧道基坑锚索与钢支撑混合支撑体系施工过程中支护结构位移与内力的变化特征。刘勇等^[10]把FLAC3D三维数值模拟程序和北京某深基坑实际监测数据结合,通过修正模型,使预测结果更趋近于实际监测结果。安关峰等^[11]分析了广州地铁二号线琶洲塔站及站后折返线主体基坑多种支护优化方案。任建喜等^[12]以西安地铁2号线北大街车站深基坑工程为背景,运用FLAC模拟计算分析了围护桩的变形、钢支撑轴力变化和锚索受力变化的规律。杨有海等^[13]对杭州地铁秋涛路车站深基坑工程东区施工中围护桩水平位移、钢支撑轴力、地表沉降和地下水位等监测数据进行分析,得出了一些有价值的结论。

迄今为止,北京地区约95%的地铁基坑支护采用钻孔灌注桩内支撑体系或桩锚体系,采用地下连续墙支撑体系非常少见,部分研究成果也是以公建项目为主。随着北京市对地下水降水的严格控制,地下连续墙由于具有刚度大、强度高和防渗性能好等特点逐渐成为发展方向。本文基于北京地铁14号线望京站深基坑地下连续墙+钢支撑及地下连续墙+钢支撑+锚索混合支撑体系,对基坑施工阶段中土体以及支护系统的变形受力规律进行了系统的分析研究,可以为北京及周边地区基坑支护设计施工提供有益的参考和借鉴。

1 工程概况

北京地铁14号线望京站车站为地下三层三跨箱型框架结构,采用明挖顺做法施工。结构总长182.60 m,车站中心里程处地面标高为37.3 m,顶板覆土厚度约为3.377 m,车站标准段宽度23.3 m,盾构端头

井段宽度26.6 m;基坑平均开挖深度:标准段24.8 m,盾构井段26.1 m。

基坑深度自上而下的地层主要为:人工填土层;第四纪全新世冲洪积层;第四纪晚更新世冲洪积层。基底大部分位于粉质黏土层,连续墙底位于圆砾卵石层。基坑施工范围内受4层地下水影响,分别为上层滞水(一)、承压水(二)、承压水(三)、承压水(四)。

由于车站水文地质条件较差,周边环境复杂,对基坑整体安全性要求较高,因此车站南端1-6轴围护结构选用地下连续墙+内支撑的支护形式,连续墙墙厚800 mm,墙深33.0 m,砼标号C35(P8)。桩顶冠梁采用C30混凝土,断面规格为1200 mm×1000 mm。横撑采用Φ800, $t=16$, 20 钢管,自上而下分别设4道、5道,水平间距2.7~3.5 m。

车站中段及北端7~20轴段为将来做轨排井铺轨基地并为提高出土工效,采用连续墙+第一道钢支撑+四道锚索的支护形式,第一道钢支撑间距约6 m,第一道钢支撑与第一道锚索竖向间距5.0 m,第一、二道锚索、第二、三道锚索竖向间距均5.0 m,第三、四道锚索竖向间距4.0 m。

2 监测项目及监测结果分析

根据基坑工程周边环境、支护方案及相关规范确定周边地表道路及管线沉降、墙顶位移、墙体变形、支撑轴力、锚索拉力为监测项目。

2.1 基坑开挖地表沉降监测分析

基坑周围土的变形包括横向变形和竖向变形。这两种变形量是相关的。基坑周围地面的下沉估算是基坑工程安全判断的重点。Peck^[1]曾给出无因次曲线,可以得到下沉的数量级和沉降分布曲线。基坑钢锚混合支撑区段和钢支撑区段的地表监测断面数据表明基坑开挖对坑周围土体的影响范围为水平面上与开挖深度相当但沉降槽有差异。锚索支撑区段最大沉降达49.72 mm,超过了设计给定的累计沉降变形值30 mm的控制标准。钢支撑区段地表最大沉降27.85 mm,未超过设计给定的控制值。锚索支撑区段地表沉降要大于钢支撑区段的地表沉降,最大沉降为钢支撑段的1.78倍。

图1为钢支撑区段地表沉降时程曲线,在基坑开挖初期,受钢支撑预加轴力的影响,地表出现小幅隆起,最大3.24 mm。根据观测,在开挖第二道钢支撑以下土方时,地表缓慢下沉,表现为沉降,最大值为33.69,沉降过程中,沉降速率相对也较小。

图2为钢锚混合支撑区段平行于基坑距离5 m的一条电力沟的地表监测点沉降时程曲线,可以看出,

管线经历了隆起—缓慢沉降—再次隆起—快速沉降—缓慢沉降的过程。分析认为, 基坑开挖之初, 第一道钢支撑预加轴力挤压土体造成了桩顶向基坑外位移和土体隆起。随着基坑开挖深度加大, 后续锚索施工及拉拔并没有完全抵抗侧压力引起的桩体变形, 造成引起周边土体沉降, 表现为地表的下沉。其最终沉降最大值达39.33 mm, 超过30 mm的控制目标。最大沉降速率达到1.56 mm/d, 没有超过控制值。从以上分析可知, 地表的隆沉与围护结构及支撑型式、支撑的架设以及土方开挖息息相关。

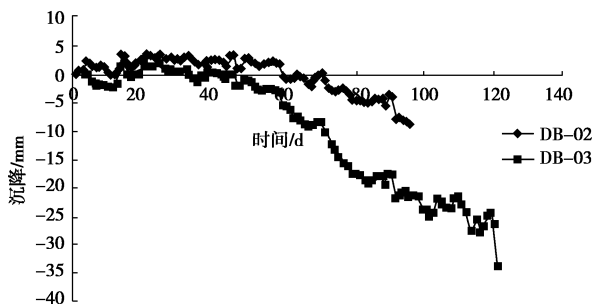


图 1 钢支撑区段地表沉降时程曲线

Fig. 1 Change of settlement of surrounding pipelines at steel support section with time

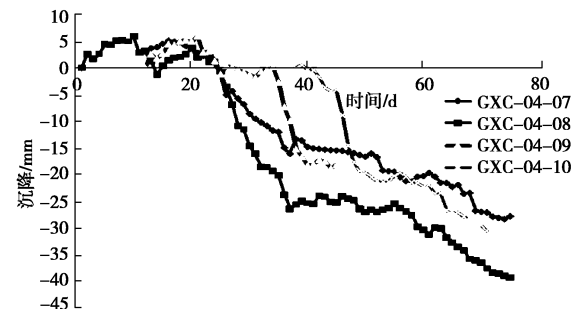


图 2 钢锚混合支撑区段周边管线沉降时程曲线

Fig. 2 Change of settlement of surrounding pipelines at steel anchor support section with time

2.2 地下连续墙+钢支撑+锚索段监测分析

(1) 地下连续墙侧移监测分析

从图 3 ZQS-05 墙顶水平位移时程曲线可以看出, 墙顶在基坑刚开挖时受土体侧压力影响, 向基坑内位移 1.92 mm, 架设支撑并预加轴力以后, 向基坑外位移, 最大达 4.81 mm, 随着土方继续向下开挖, 后续锚索的拉拔并没有控制住墙顶向基坑内的偏移。在基坑开挖到底后, 墙顶位移基本稳定在向基坑内 3 mm 左右, 表现为小幅波动。

从图 4 墙体水平位移图可以看出, 在不同开挖阶段, 墙体变形逐渐发展, 当基坑开挖较浅, 墙体表现为墙顶位移最大, 向基坑方向水平位移, 呈悬臂式位移分布, 随着基坑开挖深度的增加, 表现为墙体腹部向

基坑内突出, 呈现抛物线型位移, 但整体变形幅度很小。

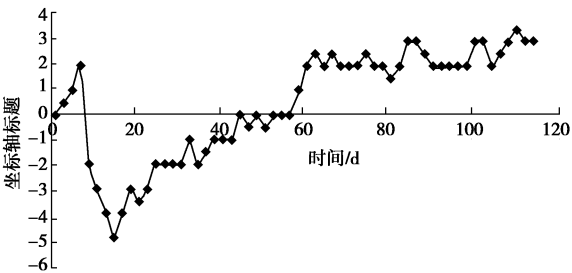


图 3 地下连续墙 ZQS-05 墙顶水平位移时程曲线 (正值朝基坑内, 负值朝基坑外)

Fig. 3 Time history curves of horizontal displacement ZQS-05

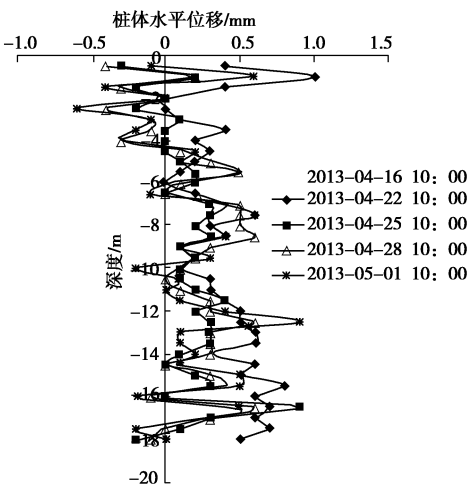


图 4 ZQT-05 测斜孔位移 - 深度关系曲线

Fig. 4 Relationship between horizontal displacement and depth for ZQT-05

(2) 钢支撑轴力与锚索拉力监测分析

支撑的目的就是为了减小连续墙内外水平向压力差, 使得墙体变形不致于形成过大侧移并保证基坑的稳定性。因此, 及时施加支撑是绝对必要的, 它可以大大缓解连续墙与土体的受力情况。支撑轴力分为临界轴力及工作轴力。 P_{cr} 临界轴力是指基坑变形引起支撑轴向受压直至屈服时的压力, 其计算可采用二端铰支压杆稳定公式 $P_{cr}=\pi^2 EI/B^2$ (E 为支撑刚度系数)。对本工程, 圆钢管支撑 $I=8d^3\pi$ 。 $t=0.016$, $d=0.8$ m, $B=23.3$ m, 得 $P_{cr}=7581$ kN。取工作安全系数 $n=2.0\sim 2.5$, 则工作轴力 $[P]=3032\sim 3790.5$ kN, 取3000 kN。

表 1 为钢支撑及锚索拉力与设计值对比分析表, 在混合支撑体系下, 第一道钢支撑轴力约占设计轴力值的 149%~1734%, 其中 ZL-05-01 钢支撑所承受的轴力远超设计轴力, 达到原设计轴力的 17.34 倍, 虽然没有超过支撑的工作轴力 3000 kN, 但已比较接近了。为了消除隐患, 在该道支撑附近适当部位及时增加了支撑。在后续类似工程设计中需对混合体系考虑

变形协调及支撑不同带来的影响, 慎重设计。

表 1 钢支撑及锚索拉力与设计值对比分析表

Table 1 Comparison between measured and design values of steel support and anchor cable tension

支撑	设计轴力/kN	预加轴力/kN	实测轴力范围/kN		实测值与设计值百分比/%
			最小值	最大值	
第一道支撑	165	100	247	2868	149~1734
第一道锚索	543	350	164	391	30.20~72.00
第二道锚索	780	468	195	794	25.0~101.80
第三道锚索	956	580	536	575	56.07~60.15
第四道锚索	934	580	未测	未测	

图 5 为 05 断面钢支撑轴力、锚索拉力时程曲线, 在混合支撑条件下, 第一层钢支撑的轴力随开挖不断增长, 在基坑开挖到第一排锚索时, 轴力从 401 kN 增长到 710 kN, 在下层锚索拉拔以后, 钢支撑轴力略有降低, 到 663 kN。随着土方继续开挖, 支撑轴力逐渐增大, 在第三道锚索施工时, 钢支撑轴力增长到 2072 kN。在基坑开挖到底后, 钢支撑轴力达到 2868 kN。

图 5 中锚索拉力时程曲线表明, 在基坑开挖过程中随着基坑开挖深度增加, 锚索拉力增减幅度不大。结合表二可知, 基坑开挖到过程中, 锚杆拉力约占设计拉力值的 25.0%~101.80%, 尤其第一道和第三道锚索拉力仅为设计值的 30.20%~72.00%, 说明锚索的拉力未能得到充分发挥。

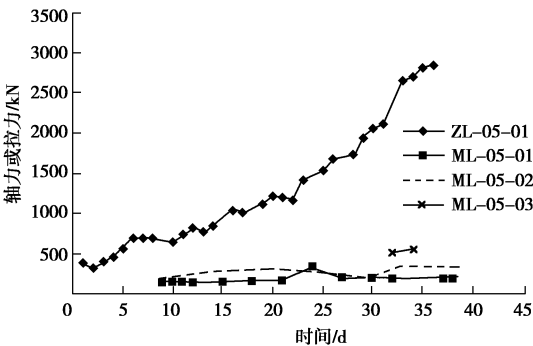


图 5 05 断面钢支撑轴力、锚索拉力时程曲线

Fig. 5 Curves of axial forces and anchor cable tensions of section 05

2.3 地下连续墙+钢支撑区段监测分析

(1) 地下连续墙侧移监测分析

从图6可以看出, 地下连续墙+钢支撑区段的墙顶水平位移受支撑架设及预加轴力的影响较大, 经历了开挖向基坑内移动、架设支撑预加轴力向坑外移动, 再向坑内移动, 架设支撑预加轴力向坑外移动, 再向坑内移动, 再往下开挖, 又逐渐向坑外偏移, 在钢支撑拆除后, 又逐渐回缩的过程。向基坑内位移最大为3 mm, 向基坑外最大位移为2.89 mm。

从图7地下连续墙ZQT-07测斜孔位移 - 深度关系曲线可以看出, 墙体变形整体出现刚性移动的特点, 墙的上部逐渐向基坑外部移动, 墙底有一个抵抗被动

土压力的趋势, 逐步向基坑内侧移动, 但整体偏移量很小, 在1~2 mm范围内。

与地下连续墙+钢支撑+锚索段相比, 墙体变形的刚性特征要明显很多, 分析认为, 这与钢支撑的刚度远远大于锚索的特性是分不开的。

(2) 钢支撑轴力监测分析

图8为09断面钢支撑轴力监测曲线, 可以观察到, 在同一监测断面, 钢支撑在预加轴力以后, 都有一个应力松弛的现象, 均略有衰减, 然后随着基坑土方开挖支撑轴力不断增长。在下一层钢支撑预加轴力后。上一层或几层钢支撑轴力均显现短暂的略有下降的过程。钢支撑轴力整体上随开挖呈现平稳增长的态势。在下层钢支撑拆除后, 第一层钢支撑轴力从864.44 kN迅速增长到1509.96 kN, 有一个显著增长的过程, 这是因为基坑周边侧压力迅速传导到上部支撑的结果, 说明钢支撑轴力的变化与基坑开挖状态及支撑架设密切相关, 具有明显的时空效应。

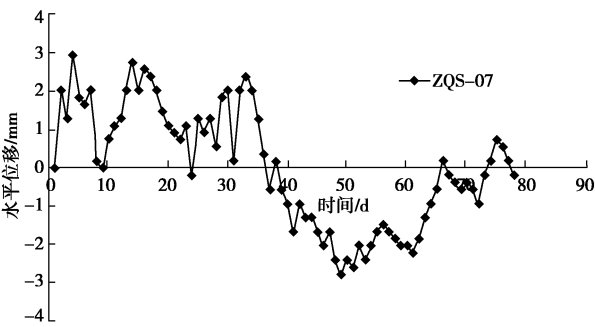


图 6 地下连续墙 ZQS-07 桩顶水平位移时程曲线

Fig. 6 Time-history curves for horizontal displacement for ZQS-07

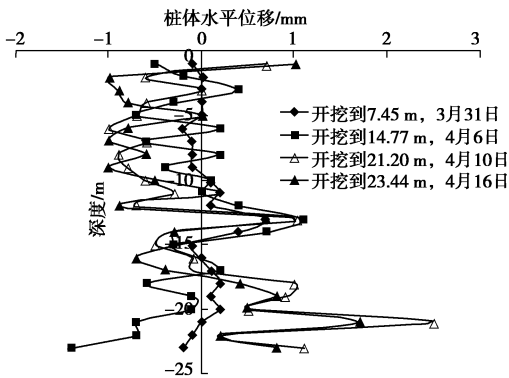


图 7 地下连续墙 ZQT-07 测斜孔位移 - 深度关系曲线

Fig. 7 Relationship between horizontal displacement and depth for ZQT-07

从表2分析认为, 第一道钢支撑实测轴力最小值为设计轴力的148%, 实测轴力最大值为设计轴力的983.6%, 远超设计轴力, 第二道钢支撑最大值也超过设计轴力。第三道钢支撑轴力最大值为设计轴力的116%。第四道钢支撑实测轴力仅为设计轴力的32.8%~65.4%。未达到设计轴力。所以, 第一层钢支

撑对于基坑稳定至关重要,设计要综合考虑结构施工期间拆撑造成的土体侧压力的传递,适当加密第一层钢支撑,第四道钢支撑可适当减少。

表 2 钢支撑轴力与设计对比分析表

Table 2 Comparison between measured and design values of axial forces of steel support

支撑	设计轴 力/kN	预加轴 力/kN	实测轴力范围		实测轴力与设 计值百分比%
			/kN		
			最小值	最大值	
第一道钢支撑	177	100	262	1741	148.0~983.6
第二道钢支撑	957	400	719	1884	75.0~196.8
第三道钢支撑	1590	650	762	1842	47.9~116.0
第四道钢支撑	1610	650	529	1053	32.8~65.4

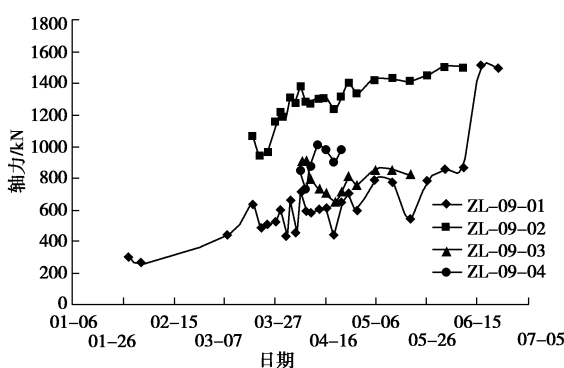


图 8 09 断面钢支撑轴力监测曲线

Fig. 8 Curves of measured axial force of steel support of section 09

2.4 盾构井区段监测分析

从表 3 盾构井段角撑轴力与设计对比分析表看出,第一道和第二道角撑有部分超过钢支撑设计轴力,其中一根轴力达 1027 kN,为设计轴力 275 kN 的 373.5%。第三道和第四道钢支撑轴力仅为设计轴力的 8.6%~52.8%,与标准区段钢支撑轴力相比,较为接近,并没有达到设计值。盾构井段地下连续墙变形及支撑受力均小于设计值,监测表明角撑轴力变化比较平缓,波动幅度不大,综合分析认为在盾构井区段,结构空间效应明显。

表 3 盾构井段各层角撑轴力与设计对比分析表

Table 3 Comparison between measured and design values of axial forces of steel support of each corner brace layer

支撑	设计轴 力/kN	预加轴 力/kN	实测轴力范围		实测轴力与设 计值百分比/%
			/kN		
			最小值	最大值	
第一道钢支撑	275	100	241	1027	87.6~373.5
第二道钢支撑	1423	450	187	1946	13.1~136.7
第三道钢支撑	2048	600	176	1082	8.6~52.8
第四道钢支撑	2727	800	640	703	23.5~25.8

3 结 论

(1)监测分析表明,基坑在开挖过程中结构稳定,周边环境沉降可控,两种支撑体系均能满足围护结构变形控制指标要求。

(2)基坑周围地表的隆沉与围护结构及支撑型式、支撑的架设以及土方开挖息息相关。基坑开挖对坑周围土体的影响范围为水平面上与开挖深度相当。钢支撑区段与混合支撑区段的沉降槽形态有差异。锚索支撑区段地表沉降要大于钢支撑区段的地表沉降,其地表经历了隆起—缓慢沉降—快速沉降—缓慢沉降的过程。

(3)在地下连续墙+钢支撑+锚索的混合支撑区段,地下连续墙桩顶水平位移经历了向基坑内—向基坑外—向基坑内—基本稳定的过程。当基坑开挖较浅时地下连续墙呈悬臂式位移分布,随着基坑开挖深度的增加呈现抛物线型位移。

(4)在地下连续墙+钢支撑+锚索的混合支撑区段,第一层钢支撑所承受的轴力远超设计轴力,部分支撑已接近工作轴力,需引起高度重视,在类似工程设计中对于混合体系应考虑变形协调及支撑特性不同带来的影响。随着基坑深度增加,锚索拉力增减幅度不大,尤其第一道和第三道锚索拉力仅为设计值的 30.7%~72.09%,锚索的拉力未能得到充分发挥。

(5)在地下连续墙+钢支撑区段,地下连续墙墙顶水平位移受支撑架设及预加轴力的影响反复波动,经历了向基坑内—向坑外—向坑内—向坑外—再向坑内—逐渐回缩的过程。地下连续墙体变形整体出现刚性移动的特点,墙的上部逐渐向基坑外部移动,墙底逐步向基坑内侧移动。

(6)在地下连续墙+钢支撑区段,同一监测断面的钢支撑在预加轴力后经历了应力松弛—轴力不断增长的过程。下一层钢支撑预加轴力后,上一层或几层钢支撑轴力均显现短暂的略有下降的过程。在下部钢支撑拆除后,第一层钢支撑轴力有一个显著增长的过程,说明轴力的变化与基坑开挖状态及支撑架设密切相关,具有明显的时空效应。

(7)盾构井段角撑轴力变化比较平缓,波动幅度不大,结构空间效应明显。

参考文献:

[1] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico, 1969: 201 - 290.

- [2] CLOUGH G W, ANDO'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]//Proceedings, ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No. 25, ASCE. New York, 1990: 439 - 470.
- [3] ANDREW J W, YOUSSEF M A. Analysis of deep excavation in boston[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **119**(1): 69 - 89.
- [4] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(8): 81 - 86. (XU Zhong-hua, WANG Jian-hua, WANG Wei-dong. Deformation behavior of diaphragm walls in deep excavations in Shanghai[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, **41**(8): 81 - 86. (in Chinese))
- [5] 徐中华, 王建华, 王卫东. 软土地区采用灌注桩围护的深基坑变形性状研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(5): 1362 - 1366. (XU Zhong-hua, WANG Jian-hua, WANG Wei-dong. Deformation behavior of deep excavations retained by bored pile wall in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(5): 1362 - 1366. (in Chinese))
- [6] 丁克胜, 张宜佳. 天津地区超深基坑地下连续墙侧向变形与土压力关系研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(10): 9 - 11. (DING Ke-sheng, ZHANG Yi-jia. Relationship between lateral deformation of diaphragm walls of deep foundation pits and earth pressure in Tianjin[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(10): 9 - 11. (in Chinese))
- [7] 朱瑶宏, 叶俊能, 刘晓虎, 等. 宁波轨道交通地下连续墙深基坑工程变形特性及控制研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, **39**(4): 66 - 73. (ZHU Yao-hong, YE Jun-neng, LIU Xiao-hu, et al. Deformation characteristics and control of foundation pits supporting with diaphragm wall in the Ningbo urban rail transit[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, **39**(4): 66 - 73. (in Chinese))
- [8] 王 卫. 成都地铁深基坑工程变形控制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011. (WANG Wei. Study on deformation control of chengdu subway deep foundation pit[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [9] 张明聚, 谢小春, 吴 立. 锚索与钢支撑混合支撑体系内力监测分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(7): 483 - 488. (ZHANG Ming-ju, XIE Xiao-chun, WU Li. Monitoring analysis of internal force for mixed-support structure of anchor rope and steel support[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(7): 483 - 488. (in Chinese))
- [10] 刘 勇, 冯 志, 黄国超, 等. 北京地铁工程深基坑围护结构变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, **5**(2): 329 - 335. (LIU Yong, FENG Zhi, HUANG Guo-chao, et al. The study in predicting the deformation of supporting structure for deep foundation pit of Beijing railway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, **5**(2): 329 - 335. (in Chinese))
- [11] 安关峰, 宋二祥. 广州地铁琶州塔站及站后折返线工程基坑监测分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(3): 333 - 337. (AN Guan-feng, SONG Er-xiang. The analysis of excavation monitoring for the Pazhouta subway station in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(3): 333 - 337. (in Chinese))
- [12] 任建喜, 张引合, 张 琨, 等. 西安地铁车站深基坑变形规律 FLAC 模拟研究[J]. 铁道工程学报, 2011, **3**: 90 - 93. (REN Jian-xi, ZHANG Yin-he, ZHANG Kun, et al. Research on the deformation law of deep foundation pit of metro station in Xi'an by FLAC simulation[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, **3**: 90 - 93. (in Chinese))
- [13] 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))

(本文责编 黄贤沙)