

城市轨道交通车站基坑伺服钢支撑轴力补偿与开挖变形控制效果^{*}

陈金铭¹ 狄宏规^{2**} 周顺华² 李旭³ 郭慧吉² 文璐²

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315012, 宁波; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

3. 中铁一局集团城市轨道交通工程有限公司, 214100, 无锡//第一作者, 高级工程师)

摘要 基于宁波轨道交通海晏北路站深基坑的开挖变形与支撑轴力实测数据, 对比分析液压伺服钢支撑与普通钢支撑的变形控制效果。结果表明: 与普通钢支撑段相比, 相邻液压伺服钢支撑段围护结构变形量减小 16%~20%, 地表沉降量减小 13%~25%; 普通钢支撑存在明显的轴力损失现象。液压伺服钢支撑采取“低补偿高调整”的工作方式, 能有效弥补钢支撑轴力损失的缺陷, 减小围护结构变形, 提高基坑开挖时的稳定性与安全性。

关键词 城市轨道交通; 车站; 基坑; 液压伺服系统; 测斜变形; 轴力损失

中图分类号 TU433:U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.10.004

Axial Force Compensation for Urban Rail Transit Station Servo Steel Support and Control Effect of Foundation Pit Excavation Deformation

CHEN Jinming, DI Honggui, ZHOU Shunhua, LI Xu, GUO Huiji, WEN Lu

Abstract Based on the measured data of support axial force and support structure deformation caused by the foundation pit excavation at rail transit Haiyanbeilu Station in Ningbo City, the deformation control effects of hydraulic servo steel support and ordinary steel support are comparatively analyzed. Research results show that the deformation of the surrounding structure and the ground surface settlement in servo steel support section are reduced by 16%~20%, and 13%~25% respectively compared to the ordinary steel support section, in which the loss of axial force is obvious. While the hydraulic servo steel support can effectively make up for axial force loss of the ordinary steel support, reduce the deformation of the support structure and improve the security of foundation pit ex-

cavation by adopting the “low compensation and high adjusting”, working mode.

Key words urban rail transit; station; foundation pit; hydraulic servo steel support system; incline deformation; loss of axial force

First-author's address Ningbo Rail Transportation Group Co., Ltd., 315012, Ningbo, China

随着城市轨道交通建设的快速发展, 地铁车站建设面临的问题也愈加复杂, 其中最突出的一类问题便是: 新建线路穿越既有线路车站以及已有车站改扩建^[1]时, 既要保证新建工程的顺利施工, 又要保证既有车站或线路的正常运营。因此, 如何控制和减小基坑开挖变形及周边沉降, 已成为亟待解决的工程难题。

近年来, 众多学者对基坑开挖变形问题进行了深入研究。文献[2]通过对基坑围护结构变形的研究, 给出了围护结构变形、坑底隆起与支撑刚度之间的关系。文献[3]研究表明, 提高钢支撑的刚度和预轴向力可以在一定程度上减小基坑开挖变形。文献[4]以扬州瘦西湖明挖段基坑工程实测数据为基础, 研究了膨胀土中狭长型深基坑围护结构受力变形规律, 提出第1道支撑采用钢筋混凝土支撑, 能有效控制上部围护结构变形。文献[5]研究表明, 分区开挖能有效控制基坑围护结构的变形。文献[6]结合上海某深基坑实测数据, 采用数值模拟研究基坑开挖过程中围护结构变形、地表沉降及坑底隆起的变化规律。为了弥补传统基坑支撑方式的不足^[7], 近年来相关科研人员借鉴其他工程领域对自动控制系统技术的应用, 将液压自动伺服控制原

^{*} 同济大学中央高校基本科研业务费专项资金(22120180568)

^{**} 通信作者

理应用于基坑钢支撑的轴力控制中。但由于造价较高,工程案例较少,目前关于液压伺服钢支撑基坑变形规律的研究鲜见报道。

本文以宁波轨道交通 5 号线海晏北路站基坑工程为背景,基于实测数据分析基坑开挖过程中围护结构、地表沉降以及钢支撑轴力的变化规律,对比液压伺服钢支撑与普通钢支撑的支撑效果。其结论可为类似工程提供参考与借鉴。

1 工程概况

1.1 工程简介

海晏北路站为宁波轨道交通 1 号线(以下简为“1 号线”)和宁波轨道交通 5 号线(以下简为“5 号线”)的换乘站。其中,1 号线海晏北路站沿宁穿路呈东西向敷设,为地下两层岛式车站;5 号线海晏北路站沿海晏路呈南北向敷设,为地下三层岛式车站,两站呈“十字形”交叉接驳,如图 1 所示。目前,1 号线海晏北路站已开通运营。5 号线海晏北路站为地下三层双柱三跨现浇钢筋混凝土框架结构,长 189 m,标准段基坑宽度为 22.1 m,基坑深度约 24.71~24.76 m;南、北端头井基坑宽度为 26.20 m、基坑深度为 26.46~26.51 m。为简便起见,本文只研究北基坑的开挖过程,其主要工况如表 1 所示。

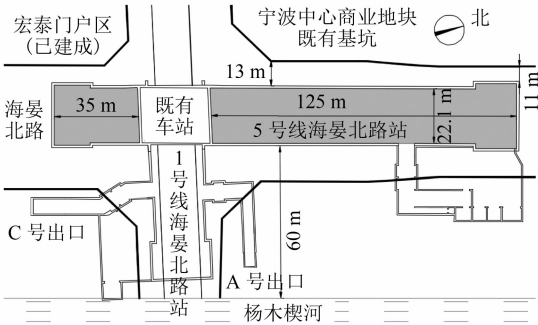


图 1 海晏北路站基坑平面布置示意图

表 1 海晏北路站北基坑各工况及时间统计表(2017 年)		
工况	事件	日期
1	第 1 层土体开挖,施做第 1 道混凝土支撑	05-22—05-26
2	第 2 层土体开挖,施做第 2 道钢支撑	06-02—06-18
3	第 3 层土体开挖,施做第 3 道钢支撑	06-23—07-05
4	第 4 层土体开挖,施做第 4 道钢支撑	07-04—07-16
5	第 5 层土体开挖,施做第 5 道混凝土支撑	07-20—08-15
6	第 6 层土体开挖,施做第 6 道钢支撑	07-25—10-02
7	第 7 层土体开挖,施做第 7 道钢支撑	08-07—10-15
8	第 8 层土体开挖,施做底板	09-01—10-30

该工程周边环境复杂,基坑东侧的木碇河离基

坑边缘约为 60 m,1 号线海晏北路站配套工程及 A、C 出入口、风井均离基坑较近。基坑西北侧为在建的宁波中心,车站地连墙距宁波中心地连墙净距为 11~13 m,宁波中心基坑开挖深度约 19 m。基坑西南侧为刚建成的宏泰门户区 PC 楼。复杂的工程环境导致对该基坑施工变形的控制要求较为严格。

1.2 工程地质条件

根据地质勘察报告^[8],拟建场地土层从上至下依次为:①₁ 层杂填土、①₂ 层黏土、①₃ 层淤泥质黏土、②₂₋₁ 层淤泥、③₁ 层粉砂层、③₂ 层粉质黏土夹粉砂、④₁₋₂ 层粉质黏土、④₂ 层黏土、⑤₂ 层粉质黏土、⑤₃ 层砂质粉土、⑥₂ 层粉质黏土、⑥₃ 层黏土、⑧₂ 层粉质黏土、⑧_{2-T} 粉细砂、⑧₃ 粉细砂、⑨₁ 层粉质黏土、⑨₄ 粉细砂。该区段软土具有天然含水量大于或等于液限,天然孔隙比大于或等于 1.0,压缩性高,强度低,灵敏度高,透水性低等特点。

1.3 海晏北路站基坑支护方案

海晏北路站主体基坑采用明挖顺筑法施工,围护结构采用 1 000 mm 和 1 200 mm 厚地连墙+内支撑体系,地连墙深度约为 57.8 m。图 2 为标准段基坑横剖面图。图 2 中,基坑标准段沿深度方向设置 7 道支撑,其中第 1 道为钢筋混凝土支撑,截面尺寸为 800 mm(宽度)×1 000 mm(高度);第 5 道为钢筋混凝土支撑,截面尺寸为 1 000 mm(宽度)×1 000 mm(高度),其余为 φ 609 mm、壁厚 16 mm 的钢支撑。基坑标准段南侧靠近既有车站处设有液压伺服钢支撑段。液压伺服钢支撑段内的 3、4、6、7 道支撑采用液压伺服钢支撑,如图 2 所示。基坑标准段钢支撑平面布置的平均间距为 3 m,混凝土支撑平均间距为 8.5 m。

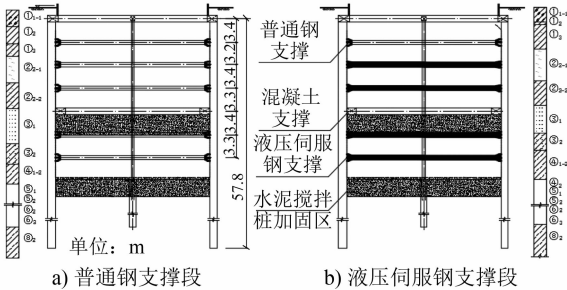


图 2 车站标准段基坑横剖面图

1.4 海晏北路站基坑变形监测方案

图 3 为海晏北路站基坑监测项目布置图。其中测斜监测点共布置 15 个(CX01—CX15),沉降监测点布置 37 个(D1-1—D14-4),支撑轴力监测点位置

选在靠近测斜孔的位置,共设 7 组(T1—T7)。

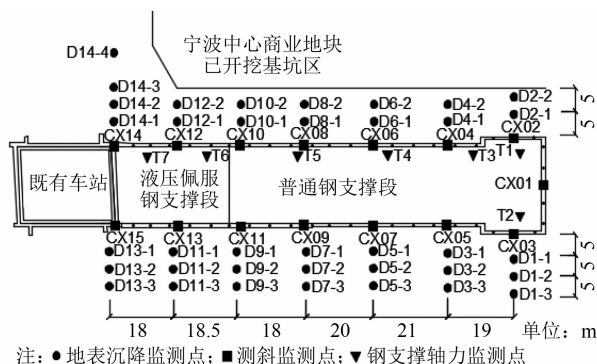


图 3 基坑监测点布置示意图

2 海晏北路站基坑实测数据对比分析

2.1 围护结构水平变形

选取远离既有车站的液压伺服钢支撑段 CX12 测点及普通钢支撑段的 CX10 测点进行对比分析。图 4 给出了基坑不同深度处围护结构累计水平变形量随深度的变化曲线。由图 4 可以看出,随着基坑开挖深度的增加,围护结构变形量不断增大,且最大变形量一般发生在开挖深度位置附近。在第 4 道钢支撑架设完成至第 5 道混凝土支撑施作,基坑累积水平变形量变化较大,其值约占最终变形量的 40%。原因主要为混凝土支撑施作后要达到设计强度需要一定的时间,使得基坑存在一定时间的无支撑暴露期,这期间导致围护结构发生较大变形。此外,CX12 测点位置处第 7 道钢支撑架设完成后的最大累积水平变形量为 71 mm,小于 CX10 测点的变形量 91 mm,可见液压伺服钢支撑较普通钢支撑效果好。

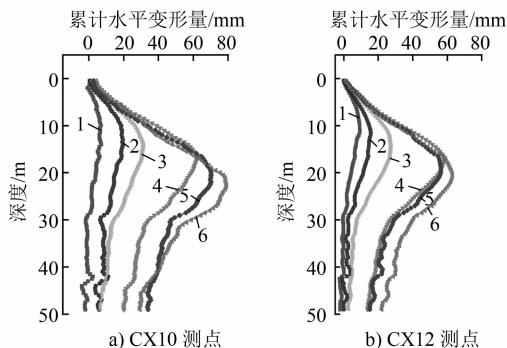


图 4 基坑围护结构水平变形量随深度变化曲线

为进一步研究液压伺服钢支撑段围护结构变形的控制效果,分别选取基坑西侧和东侧围护结构

最大累积水平变形进行分析。如图 5 所示,靠近宁波中心基坑西侧的围护结构累计水平变形量总体小于基坑东侧围护结构的累计水平变形量。其原因在于基坑西侧较近距离内存在既有基坑,导致基坑西侧围护结构变形较小。为减少既有基坑与基坑时空效应的影响,选取 CX10、CX11、CX12、CX13 测点数据进行对比分析。通过分析可以看出,液压伺服钢支撑最大累积水平变形量较普通钢支撑小 16%~20%,再次证实了液压伺服钢支撑较普通钢支撑效果好。

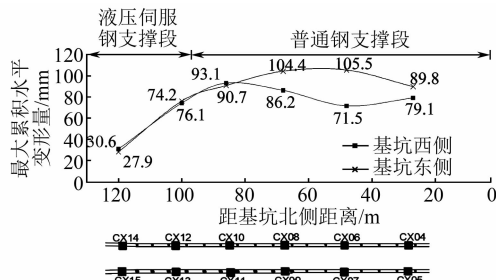


图 5 围护结构最大累积水平变形沿基坑边缘分布图

2.2 地表沉降

选取沿海晏北路站基坑边缘 10 m 处的地表沉降量进行分析,如图 6 所示。基坑西侧的最终沉降量总体小于基坑东侧的沉降量,其原因在于西侧既有基坑开挖时要进行工程降水,使得周边土体进行了一定的固结沉降,故当开挖 5 号线车站基坑时其西侧沉降较小。为避免既有基坑与基坑时空效应的影响,选取 D9-2、D10-2、D11-2、D12-2 测点的沉降数据进行分析。由图 6 可知,液压伺服钢支撑附近地表沉降较普通钢支撑的沉降小 13%~25%,液压伺服钢支撑能更有效地控制地表沉降。

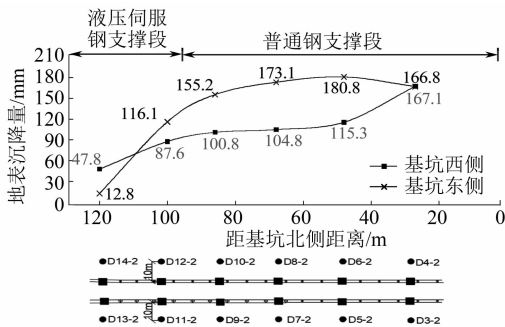


图 6 基坑边缘 10 m 处地表最终沉降量

2.3 支撑轴力

选取 T6 普通钢支撑监测断面中第 3 道钢支撑 Zg3-6(T6 轴力监测组的第 3 道钢支撑)以及与之邻近的 SF3-1 液压伺服钢支撑(距离 Zg3-6 最近的第

3 道液压伺服钢支撑)进行轴力对比分析。图 7 为钢支撑轴力变化趋势图。由图 7 可以看出,钢支撑轴力变化经历了 3 个阶段,即增大(I)、减小(II)及突增(III)3 个阶段。

I 阶段钢支撑轴力增大发生在第 5 道混凝土支撑施加前,其原因为随着开挖深度的不断增加,导致基坑内、外侧的土压力差不断增大,使得围护结构有向坑内变形的趋势,进而使得轴力增大。当下道支撑施加时,轴力增加的趋势趋于缓慢,其原因为邻近支撑的施作能有效分担来自墙后的土压力。II 阶段钢支撑轴力减小发生在第 5 道混凝土支撑施加后,造成该现象的原因有以下 3 点:①因为混凝土支撑具有较大的刚度与稳定性,承担了大部分的土压力;②随着开挖面距测点支撑位置的距离不断增大,致使测点支撑的轴力趋于稳定;③钢支撑具有应力损失的缺点,使得钢支撑轴力呈现缓慢下降的趋势。支撑轴力突然增大的 III 阶段发生在第 6、7 道钢支撑拆除后,其原因为由于 6、7 道钢支撑的拆除,会导致其余钢支撑分担更多来自墙后的土压力,致使产生轴力增大的现象,因此在拆撑后应加强监测,并及时施作内部结构。

另一方面,由图 7 可知,普通钢支撑的实测轴力普遍小于安装时的设计轴力,由此可见普通钢支撑的轴力损失严重。而液压伺服钢支撑的轴力普遍在标定轴力控制值以上,由此可见液压伺服钢支撑以“轴力不变”为工作理念,采去“低补偿高调整”的工作方式取得良好的支撑效果。“低补偿”指当钢支撑实测轴力低于标定值时,以标定轴力为基准,进行液压补偿,使得轴力不低于标定轴力,有效减小了由于轴力损失引起的围护结构变形。“高调整”指当钢支撑实测轴力高于标定轴力时,以液压千斤顶伸缩量为参考,主动优化更新标定轴力,使

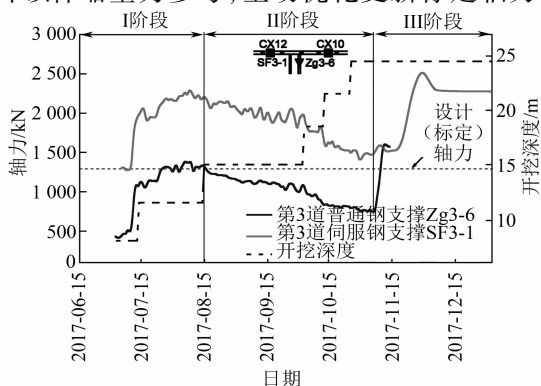


图 7 钢支撑轴力时程曲线

其在一定程度上避免了由于初始标定轴力不当而引起的基坑开挖变形。

3 结论

1) 与普通钢支撑段相比,液压伺服钢支撑段基坑围护结构水平变形量减小 16%~20%、地表沉降减小 13%~25%。伺服钢支撑能有效减小基坑变形及开挖施工对邻近周边环境的影响。

2) 基坑开挖过程中,钢支撑的轴力受邻近支撑施作的影响较大,混凝土支撑的施加能有效地减小钢支撑轴力的变化。支撑的拆除会引起邻近支撑轴力激增,应加强监测确保基坑安全。

3) 与普通钢支撑不同,液压伺服钢支撑采取“低补偿高调整”的工作方式,能及时补偿开挖过程中支撑轴力的损失,使轴力保持在理想控制值以上,进而减小基坑开挖变形,提高基坑开挖的安全性。因此,在基坑周边施工环境复杂且对变形控制要求较高的情况下,建议使用液压伺服钢支撑系统。

参考文献

- [1] 郑刚,朱合华,刘新荣,等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报,2016(6): 1.
- [2] CLOUGH G W O, ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls [C]//ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No. 25. New York: American Society of Civil Engineers, 1990: 439-470.
- [3] 姚燕明,周顺华,孙巍,等. 支撑刚度及预加轴力对基坑变形和内力的影响[J]. 地下空间与工程学报,2003(4): 401.
- [4] 陈健. 膨胀土中狭长型深基坑围护结构受力变形分析[J]. 地下空间与工程学报,2015(2): 440.
- [5] DING Z, JIN J, HAN T C. Analysis of zoning excavation monitoring data of narrow and deep foundation pit in soft soil area [J]. Journal of Geophysics & Engineering, 2018, 15(4): 1231.
- [6] XU G L, ZHANG J W, LIU H, et al. Shanghai center project excavation induced ground surface movements and deformations [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2018, 12(1): 26.
- [7] 贾坚,谢小林,翟杰群,等. 软土基坑变形控制的微扰动技术[J]. 上海交通大学学报,2016(10): 1651.
- [8] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 宁波市轨道交通 1 号线一期工程——海晏北路站配套工程岩土工程勘察报告[R]. 上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2012.

(收稿日期:2019-04-14)