

自动轴力补偿钢支撑围护墙变形受力分析研究

唐剑华*

上海申元岩土工程有限公司，上海 200011

摘要：在变形要求较高条件下进行基坑围护施工，传统的钢支撑施工技术和监测手段已经难以达到严格的变形控制要求，基坑围护施工将会遭遇一系列技术性问题和潜在的施工安全风险。自动轴力补偿钢支撑可对轴力实时补偿与监控，解决了传统钢支撑无法实施监测轴力、及时补偿轴力损失等问题，可有效控制围护结构自身及保护对象的变形。本通过搜集并分析墙围护墙变形、钢支撑轴力以及地面沉降等现场测量数据，探讨了在自动调节轴力的钢结构支撑系统影响下，围护结构的力学特性和变形特性，旨在为自动轴力钢支撑系统的设计、施工以及相关理论的研究工作提供详尽的参考资料和依据。

关键词：基坑围护；自动轴力补偿；钢支撑

Automatic Axial Force Compensation Steel Support Retaining Wall Deformation Force Analysis Research

Tang Jianhua*

Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co.,Ltd.Shanghai 200011

Abstract : Under conditions with high deformation requirements, traditional steel support construction techniques and monitoring methods have already struggled to meet strict deformation control standards. Deep excavation support construction may encounter a series of technical issues and potential construction safety risks. The automatic axial force compensation steel support can achieve real-time compensation and monitoring of axial force, solving the problems of traditional steel supports that cannot monitor axial force and timely compensate for axial force loss. This can effectively control the deformation of the protective structure itself and the protected objects. By collecting and analyzing on-site measurement data such as deformation of the retaining wall, axial force of steel supports, and ground settlement, this study explores the mechanical characteristics and deformation characteristics of the protective structure under the influence of an automatically regulated axial force steel structure support system. The aim is to provide detailed reference materials and basis for the design, construction, and related theoretical research of the automatic axial force steel support system.

Key words : excavation ; automatic axial force compensation; steel support

一、引言

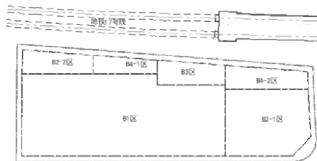
随着我国社会经济的高速发展，越来越多的深基坑邻近已有建筑物、地下市政管线，以及轨交隧道等设施，基坑工程环境保护要求越来越高，若不严格控制基坑围护结构的变形，将会影响邻近基坑的建筑物及构筑物的正常使用^[1-3]。相比于常规钢支撑，自动轴力补偿钢支撑可对轴力实时补偿与监控，解决了常规钢支撑因应力松弛等原因无法及时补充轴力损失等问题，能有效控制基坑变形^[4-5]，该种支撑体系目前已快速发展起来，并且正在进行不断更新换代以迎合施工及设计的要求，可作为基坑开挖过程中的邻近轨交变形控制内支撑系统。

本文通过搜集并分析墙围护墙变形、钢支撑轴力以及地面沉降等现场测量数据，探讨了在自动调节轴力的钢结构支撑系统影响下，围护结构的力学特性和变形特点，旨在为自动轴力钢支撑系统的设计、施工以及相关理论的研究工作，提供详尽的参考资料和依据。

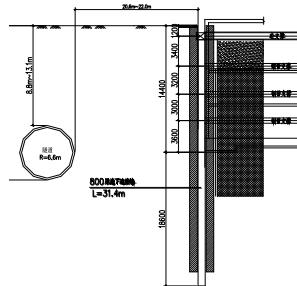
二、工程概况

本工程位于上海市青浦区，图1为基坑分区平面布置图，基坑面积约23487m²，北侧基坑开挖边线距离轨交17号线20.6~22m，基坑共分为6个分区，分别为B1区、B2-1区、B2-2区、B4-1区、B3区、B4-2区，施工临近地铁侧小分区（B2-2区、B4-1区、B3区、B4-2区）之前，B1区、B2-1区地下室结构已施工完成，本文仅包含B2-2区、B4-1区、B3区、B4-2区现场实测数据，四个分区面积分别为1315m²、903m²、1310m²、1504m²。其中B2-2区、B4-1区、B3区开挖深度为14.4m，采用第一道砼支撑、第二~四道自动轴力钢管支撑；B4-2区开挖深度为17.8m，采用第一道砼支撑、第二~五道自动轴力补偿钢支撑。第二、三道钢支撑初始轴力为2000kN，第四道钢支撑初始轴力为2200kN，第五道支撑轴力为2400kN。

* 作者简介：唐剑华（1988-），男，江西上饶人，硕士，工程师，主要研究方向为岩土工程、地下工程，E-mail: 826863579@qq.com



>图1 基坑分区平面布置图

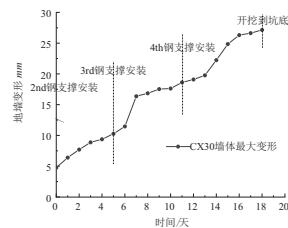


>图2 基坑围护剖面图

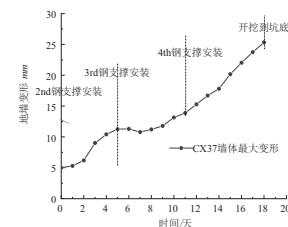
三、现场监测数据分析

在本工程中，通过选取具有代表性的监测点位，对围护墙在各个施工工况的侧向位移变化趋势进行了深入分析。其中测点CX30、CX34、CX35测点分别位于B2-2区、B3区、CX34、CX45北侧中部。

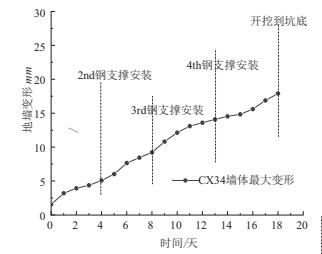
图3展示了在采用自动轴力补偿钢支撑条件下，四个分区的围护墙在基坑开挖全过程中最大变形的发展区域，可以看出随着基坑开挖的进行，墙体的最大变形也在持续增加。从墙体的最大侧向变形数据可以观察到，尽管自动轴力钢支撑在支撑点附近的墙体上产生了明显的回弹效果，但对于整个围护墙的最大变形而言，并不会出现明显的回弹现象。这一现象的主要原因在于，自动轴力补偿钢支撑主要影响其直接作用的墙体区域，使得这部分墙体的变形与支撑的变形保持一致，从而效果较为明显。然而，围护墙的最大变形通常发生在开挖面之下，这部分变形并不直接受到自动轴力钢支撑的影响，因此没有表现出显著的回弹特征，因此随着基坑开挖，墙体最大变形位置随之下移。



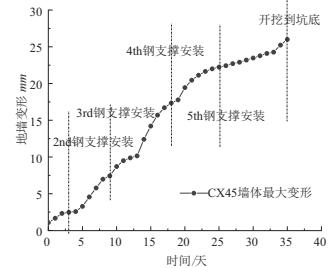
(a) B2-2区 CX30测点墙体最大变形



(b) B3区 CX37测点墙体最大变形



(c) B4-1区 CX34测点墙体最大变形



(d) B4-2区测点墙体最大变形

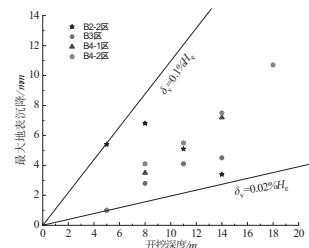
>图3 各分区墙体最大变形

图4展示了围护墙最大变形 δ_h 与基坑开挖深度 H_e 之间的关系。在本工程中，围护墙的最大变形 δ_h 的变化范围在 $(0.1\% H_e, 0.20\% H_e)$ 之间，其平均值约为 $0.15\% H_e$ 。这一结果相较于 Wang^[6] 等人对上海地区众多采用地下连续墙的基坑工程进行的统计，本工程最大变形 δ_h 的变化范围 $(0.1\% H_e, 1.0\% H_e)$ 要小。这种差异可能归因于以下两点原因：

①本工程中采用了自动轴力补偿钢支撑技术，这种技术能够有效地控制围护墙的位移，使得位移保持在较小的范围内。

②通常情况下，超深或超大面积的基坑开挖可能会引起较大的侧向位移。然而，本工程的样本数量相对较少，这可能导致变形数据的离散性较小，从而使得最大变形的平均值相对较低。

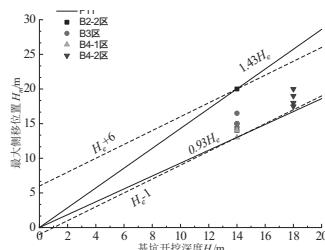
因此，可以认为本工程采用的自动轴力补偿钢支撑技术对于控制围护墙的变形具有显著的效果，同时也提示在进行类似工程时，应考虑到样本数量对于统计结果的影响，以获得更为准确和有代表性的数据。



>图4 围护结构最大侧移与开挖深度关系

图5展示了基坑开挖深度 H_e 与其最大侧移位置 H_m 之间的相互关系。数据显示，基坑的最大侧移位置 H_m 在 $(0.93 H_e, 1.43 H_e)$ 的区间内变动，其平均侧移位置约为 $1.18 H_e$ 。与此同时，Wang^[6] 等人通过对上海地区众多基坑基坑的统计分析，得出了 H_m 的变动区间为 $(0.5 H_e, 1.4 H_e)$ ，平均值为 $0.95 H_e$ ；这说明与普通钢支撑或者砼支撑相比，采用自动轴力补偿钢支撑的

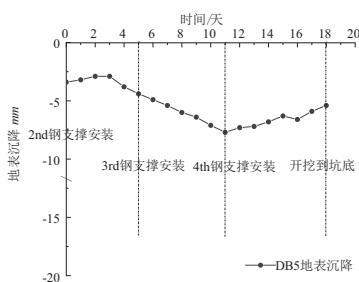
围护墙最大侧移位置下移，自动轴力补偿钢支撑能有效控制支撑范围内的围护墙侧移，从而导致最大侧移位置向支撑以下位置偏移。Tan^[7]等通过分析基坑最大侧移位置 H_m 与其开挖深度 H_e 之间的距离差异来探究 H_m 的分布特性。在本工程中，应用这一方法得到的数据表明， H_m 的主要分布在 $(H_e - 1, H_e + 6)$ 的范围内。这一结果与采用顺作法施工的上海地铁基坑中观察到的 H_m 变化范围 $(H_e - 7, H_e + 7)$ 相吻合。



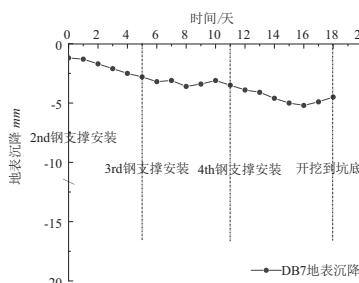
>图5 围护结构的最大侧移位置与开挖深度的关系

图6统计了各分区地表沉降发展情况，由于自动轴力补偿钢支撑具有顶回效果，墙体变形可被顶为负值，必然对墙后土体具有挤压效应，个别测点的地表沉降在钢支撑安装后存在略微隆起或保持稳定的现象，但整体的地表沉降发展趋势仍是不断增大。在自动轴力补偿钢支撑作用下，墙体最大变形位置随着开挖深度不断下移

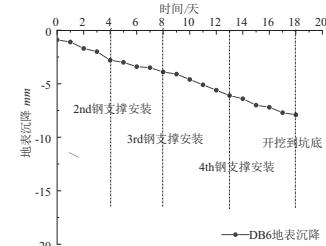
图6展示了各分区地表沉降随时间的发展情况，得益于自动轴力补偿钢支撑的回顶作用，墙体的变形在一定程度上被反向调整至负值，这不可避免地对墙后的土体产生了挤压作用。个别测点在安装钢支撑之后，地表沉降表现出轻微的隆起的状态。然而，从整体趋势来看，地表沉降量仍然呈现出持续增长的态势。在自动轴力补偿钢支撑的影响下，围护墙的最大变形位置随着基坑开挖的深入而逐渐向下转移，由此导致被钢支撑所顶回的墙后土体趋向于向最大变形区域靠拢。这意味着尽管自动轴力补偿钢支撑在控制支撑点附近的墙体变形控制方面效果显著，墙后地表沉降的总体趋势仍然是逐渐增加的，这与黄彪等^[8]观察到的现象基本一致。



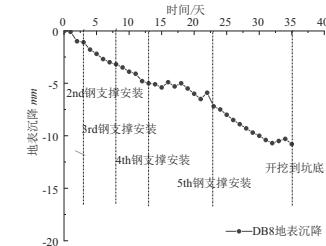
(a) B2-2区 DB5测点地表沉降



(b) B3区 DB7测点地表沉降



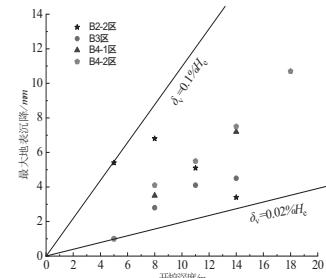
(c) B4-1区 DB6测点地表沉降



(d) B4-2区测点地表沉降

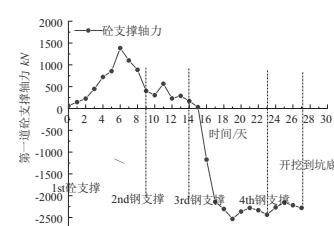
>图6 各分区地表沉降发展过程

图7为墙后最大地表沉降与基坑开挖深度之间的关系。从图7中可以看出，B2-2区最大地表沉降随开挖深度先增大后减小，而其他分区最大地表沉降随着开挖深度的增大而呈现出增大的趋势，其变化范围为 $(0.02H_e\%, 0.1H_e\%)$ 之间，平均值为 $0.06H_e\%$ ；这远小于徐中华等^[9-10]统计的上海地区软黏土地层中大量基坑的最大地表沉降（基本介于 $0.1H_e\% \sim 0.8H_e\%$ ，平均值约为 $0.45H_e\%$ ），笔者认为原因如下：①本工程采用自动轴力补偿钢支撑，自动轴力补偿钢支撑具有顶回作用，导致墙后地表沉降远小于采用一般支撑的基坑墙后地表沉降，②本工程样本数量相对不足，离散性更小。

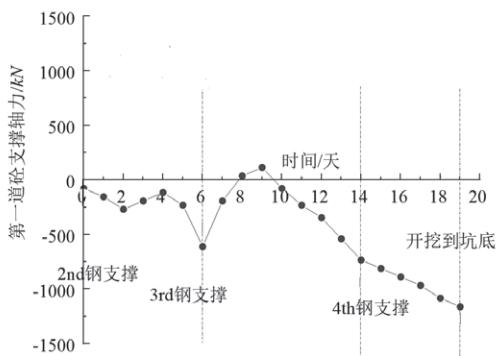


>图7 最大地表沉降与开挖深度之间的关系

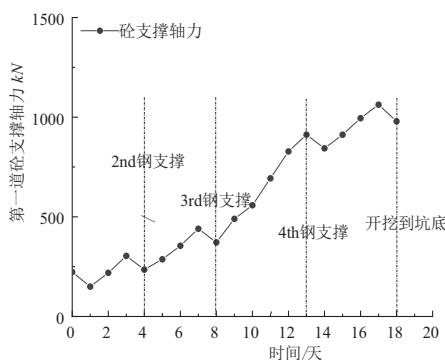
图8为各分区对应砼支撑轴力监测点随时间的发展过程，图8(a)、(c)、(d)为砼支撑达到强度后开始开挖第二层土后开始进行轴力监测，图8(b)由于现场遗失第二层土开挖至第二道钢支撑安装时间段的数据，因此图8(b)仅描述第二道钢支撑安装后第一道砼支撑轴力发展过程，规定砼支撑轴以受压为正，受拉为负。



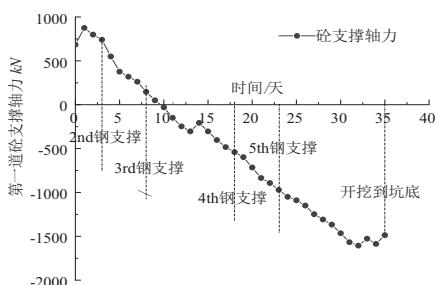
(a) B2-2区典型测点砼支撑轴力发展过程图



(b) B3区典型测点砼支撑轴力发展过程图



(c) B4-1区典型测点砼支撑轴力发展过程图



(d) B4-2区典型测点砼支撑轴力发展过程图

>图8 各分区砼支撑轴力发展过程

由图8(a)、(c)、(d)可知,随着第二道自动轴力钢支撑安装后,第一道砼支撑轴力迅速减小,随后随着基坑开挖以及第三、四道自动轴力补偿钢支撑的安装,第一道砼支撑轴力由压力变为拉力,其中B2-2区砼支撑拉力最大达到2535kN;对于B4-1区,砼支撑轴力从表层土开挖到开挖至坑底,砼支撑轴力(压力)一直在增大,与目前一般规律相违背,B4-1区砼支撑轴力现场监测亦可能有误。对于B4-2区,随着第三道钢支撑安装后,首道砼支撑轴力开始由压力变为拉力,且最大值达到1500kN。

四、结论

本章结合具体工程案例,进一步分析了围护墙变形、支撑轴力、地表沉降等实测数据,深入研究自动轴力补偿钢支撑作用下围护结构受力变形特征,为进一步丰富设计施工及相关理论研究提供丰富的参考依据,所得相关结论如下:

(1) 自动轴力补偿钢支撑在直接控制安装位置附近的墙体变形方面效果显著,钢支撑安装后,相应位置的墙体变形通常会得到有效的约束或被反向调整。然而,鉴于围护墙的最大变形往往出现在开挖面之下,自动轴力补偿钢支撑并不能完全阻止最大变形的扩展。

(2) 与一般钢支撑或砼支撑相比,由于自动轴力钢支撑的作用,围护墙的最大侧移位置显著下移,最大侧移亦有显著减小。

参考文献

- [1] 范凡,陈锦剑,章红兵,等.基坑开挖引起紧邻建筑物沉降的简化计算方法[J].岩土工程学报,2015,37(S2):61-64.
- [2] 崔纪飞,马际首,李镜培,等.软土基坑施工优化离心模型试验[J].结构工程师,2020,36(01):120-129.DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2020.01.017.
- [3] 孙九春,盛健超,王哲,等.主动控制轴力作用下基坑围护结构强度研究[J].地基处理,2023,5(02):133-143.
- [4] 石磊,张宏宇,章敏.基于等效温法的基坑钢支撑预应力损失研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(01):229-237.
- [5] Wang J H, Xu Z H, Wang W D. Wall and ground movements due to deep excavations in shanghai soft soils [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(7): 985-994.
- [6] Tan Y, Wang D L. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay.II: Top-down construction of the peripheral rectangular pit [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(11): 1894-1910.
- [7] 黄彪.伺服钢支撑支护结构的控制算法及受力变形特性研究[D].上海交通大学,2020.
- [8] 王卫东,徐中华,王建华.上海地区深基坑周边地 表变形性状实测统计分析[J].岩土工程学报,2011,33(11).
- [9] 徐中华.上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D].上海:上海交通大学,2007.
- [10] 张佳莉.苏州地区软土深基坑围护结构变形特性及稳定性研究[D].苏州大学,2020.DOI:10.27351/d.cnki.gszhu.2020.000115.