

DOI: 10.7672/sjgs2025220017

地铁深基坑装配式拉压双向钢支撑 试验与应用分析*

王 琦¹, 刘成龙²

(1. 中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 250101; 2. 北京城乡建设集团有限责任公司, 北京 100067)

[摘要] 深基坑中的钢筋混凝土支撑浇筑工期长、破除困难、不可重复利用,而钢支撑容易脱落、结构整体性差。依托某地铁站基坑工程,从设计合理性和实用性角度,提出了具有轴向拉压双向受力性能、可重复利用的装配式钢支撑体系。支撑结构包括活络端、连接件和高强螺栓。分析了装配式钢支撑的受力特点、构件节点连接方式,深入阐述了现场安装技术。通过工程应用,第1道装配式钢支撑支护稳定,最大轴力为-1 451.4kN。深基坑第1层土方开挖过程中,邻近地表最大沉降约为5.5mm,整体稳定性良好,验证了该工法的有效性。

[关键词] 地铁;深基坑;装配式;钢支撑;试验

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0017-05

Experimental Study and Application Analysis of Prefabricated Tension-compression Dual Force Steel Supports in Subway Deep Foundation Excavtion

WANG Qi¹, LIU Chenglong²

(1. China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, China;

2. Beijing Urban & Rural Construction Group Co., Ltd., Beijing 100067, China)

Abstract: The pouring period of reinforced concrete supports in deep foundation excavation is long. Reinforced concrete support is difficult to break and cannot be reused. Steel supports are prone to detachment and have poor structural integrity. Based on the foundation excavation project of a subway station, a modular steel support system structure with axial tension compression bi-directional stress performance and reusability is proposed from the perspectives of design rationality and practical application. The supporting structure includes flexible ends, connectors, and high wall bolts. This paper analyzed the stress characteristics and component node connection methods of prefabricated steel supports, and elaborated on on-site installation and construction techniques. Through engineering application, the first prefabricated steel support is stable with a maximum axial force of -1 451.4kN. During the excavation of the first layer of soil in the deep foundation excavation, the maximum settlement of the adjacent surface is about 5.5mm, and the overall stability is good, which verifies the effectiveness of this construction method.

Keywords: subways; deep foundation excavation; prefabrication; steel support; tests

0 引言

在地铁深基坑支护工程实践中,首道内支撑多采用现浇钢筋混凝土结构,该技术体系施工周期

长,材料无法重复利用,且会产生过量的混凝土建筑垃圾,难以满足绿色施工的环保要求^[1-9]。装配式钢支撑体系通过模块化设计和双向受力特性,在保证基坑变形控制精度的同时,可缩短施工周期、降低碳排放,符合 GB/T 50378—2019《绿色建筑评价标准》的可持续发展要求^[10-11]。

目前对装配式钢支撑的研究,国内外学者取得

* 北京建工集团重点攻关项目(SGGA500920220001)

[作者简介] 王 琦,助理工程师,E-mail:1012511300@qq.com

[通信作者] 刘成龙,高级工程师,E-mail:liuchenglong541@163.com

[收稿日期] 2025-04-25

了许多研究成果。庄诗潮等^[12]采用理论推导、有限元模拟和现场监测相结合的方法,系统研究了预应力装配式的鱼腹式钢支撑系统的支点刚度与整体刚度,并进行了工程验证。郭雪源等^[13]依托北京地铁深基坑工程,从支撑设计和工程应用角度,提出了装配式钢管混凝土内支撑结构,提高了深基坑工程施工效率。许利东等^[14]考虑基坑周围环境的影响,提出了内支撑+桩锚的组合式支护结构,保障了基坑受力合理。黄远等^[15]基于对抗震性能和施工效率的分析,提出了全装配式混凝土框架-钢支撑结构,并开展数值仿真验证。何东亮等^[16]从实际施工可行性和可靠性角度出发,提出了新型装配式环筋扣合体系的叠合板铝模独立支撑体系,可有效发挥叠合板自身刚度,实用性强。

针对青岛地铁车站上软下硬复合地层深基坑工程(普遍开挖深度 $\geq 20\text{m}$)的特殊工况,在装配式钢支撑基础上,对传统支护方案进行系统性优化,采用了钢-混凝土复合支撑支护体系;将第 1 道支撑端头部位的 3~4 根混凝土支撑替换为装配式拉压双向受力钢支撑。

1 工程概况

青岛地铁 7 号线前东城站深基坑开挖长度 217m,开挖宽度 20.1~24.2m,开挖深度 19.5~20.5m。车站主体采用明挖法施工,基坑支护结构整体采用钻孔灌注桩+1 道混凝土支撑+2 道钢支撑+铰削深搅水泥土搅拌墙(CSM)止水帷幕支护方案。

车站第 1 道支撑设计采用钢筋混凝土支撑,车站基坑开挖方案为拉马道后退式放坡开挖,根据开挖方案,21~23 号支撑暂缓施工(见图 1)。该区域冠梁下预留宽 3m 的反压土,坑内临时便道坡度不满足坑内土方运输,后经工程验算和施工效率分析,将 21~23 号混凝土支撑变更为装配式钢支撑,钢支撑的钢管参数为直径 800mm、壁厚 20mm。

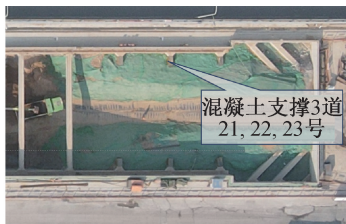


图 1 21~23 号混凝土支撑位置

Fig.1 Positions of concrete supports 21~23

2 工程地质条件

车站开挖区域由上至下依次为素填土、杂填土、粉质黏土、中砂~细砂、粗砂~砾砂、全风化泥质砂岩、强风化泥质砂岩、中风化泥质砂岩,如图 2 所

示。车站主体范围普遍存在富水砂层,主要以粗砂~砾砂为主,具有富水、饱水的特性,通常水源补给充足。富水砂层渗透性高、自稳性差、流动性强,开挖过程中极易发生坍塌、管涌。

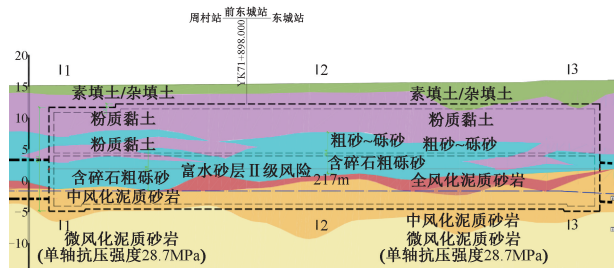


图 2 地质剖面

Fig.2 Geological profile

3 轴向拉压支撑结构设计

本文提出新型装配式轴向拉压双向受力支撑结构,结构节点为承载活络端节点,如图 3 所示。轴向拉压双向受力支撑结构包括活络端、连接件和高强螺栓,在活络端靠近端板的一侧焊接法兰盘,法兰盘和端板上预留螺栓孔,螺栓孔的数量、直径和位置相同。连接件由 L 形方板、圆钢管和方板组成,方板与围护结构预留螺栓或钢筋固定连接。使用高强螺栓,将 L 形方板、带活络端的端板以及法兰盘通过三者对齐的螺栓孔进行固定连接。活络端仍用钢楔块承受压应力,高强螺栓承受可能出现的拉应力。

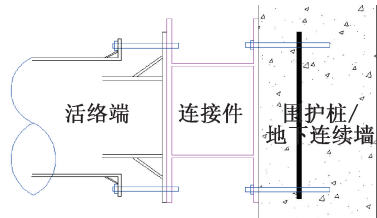


图 3 轴向拉压双向受力钢支撑结构

Fig.3 Tension-compression dual force steel support

该结构通过高强螺栓群与端板焊接组合构造,实现拉压双向传力;采用可调式楔形锁紧装置,确保在围护结构外移工况下仍能保持有效预应力(损失率 $\leq 5\%$)。该节点体系可使支护结构整体稳定性提高 35%,最大程度避免了传统钢支撑因预应力完全消失而失稳的风险。相较于钢筋混凝土支撑,该装配式系统兼具材料可回收(重复使用率 $\geq 90\%$)和快速安装(单节点耗时 $\leq 45\text{min}$)的优势,形成了更合理的空间框架支护体系,为复杂环境下的深基坑工程提供了可靠的技术解决方案,保障了施工安全。

4 施工控制要点

4.1 装配式钢支撑连接件

装配式钢支撑连接件用于活络端、标准段和固定端的可靠连接,焊接管端头与法兰盘焊接,法兰端面轴线垂直偏差控制在 1.5mm 内,轴线偏心 $\leq 20\text{mm}$,法兰盘加工符合国家标准要求。钢支撑构件加工完毕后,根据基坑断面宽度配备不同长度的标准段。根据设计资料提供可能出现的受拉工况,采购一定数量的高强螺栓标准件。活络端结构如图 4 所示,连接件结构如图 5 所示。

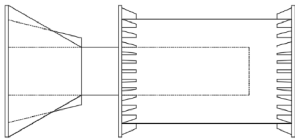


图 4 活络端结构
Fig. 4 Turnbuckle assembly

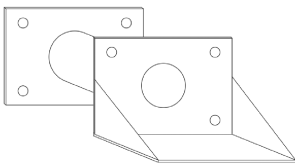


图 5 连接件结构
Fig. 5 Connection assembly

4.2 钢支撑组装

按设计需要的钢管长度准备支撑钢管,如钢管需要接长时,在钢管接头处焊接连接法兰盘,对接有法兰盘的钢管使用螺栓拧紧,接长至设计长度,钢支撑分节运至现场后,钢管支撑先在地面上按实测基坑宽度进行配管预拼装。支撑的一端接活动端头(其伸缩量 $\leq 20\text{cm}$),另一端接固定端头。为了保证钢管只受垂直轴力,固定活动端头的面须垂直相应预埋件中点的连线。测量固定、活动端头的距离,截取相应中间节钢管的长度。吊起中间节放在中间,上紧中间节与固定端头的螺丝,为确保平直,法兰螺栓应采用对角和等分顺序拧紧。拼装好后放在坚实的地坪上用线绳两端拉直或用水准仪检查支撑管的平直度,用钢尺检查钢支撑的长度,并检查支撑连接是否紧密、支撑管有无破损或变形、支撑 2 个端头是否平整、接头箱的焊缝是否饱满。检查合格后,用红油漆在支撑上编号,标明支撑的长度和安装的具体位置。钢管支撑拼装后两端支点中心线偏心应 $\leq 20\text{mm}$,安装后总偏心量应 $\leq 50\text{mm}$,高强螺栓连接紧固如图 6 所示。

4.3 钢支撑架设

可调节活络端的一端采用现浇形式固定与冠



图 6 高强螺栓连接紧固
Fig. 6 Fasten with high-strength bolts

梁连接,两端使用现浇混凝土进行锚固作为现浇段支撑,两端浇筑混凝土长度均为 1m,截面尺寸为 1m \times 1m,混凝土强度等级与原混凝土支撑相同。活络端端部锚筋应采用防松动螺母固定。活络端和固定端放置在连接件上,用螺栓将钢支撑固定端与连接件固定。

检查合格的支撑用 90t 履带式起重机整体吊到位,支撑吊装采用两点起吊,在支撑吊装过程中必须保持钢支撑平稳,不得碰撞钢支撑,以确保支撑无变形。钢支撑吊装到位后,先不松开吊钩,将支撑两端放在钢托架上,用人工辅助将支撑调整到设计位置后再将支撑临时固定,对因钻孔桩施工误差造成的钢腰梁不能与墙面紧密接触处,必须在墙面与支撑端头间加设钢板垫块,以确保支撑轴向受力。基坑内安装支撑时,其两端支撑中心线的偏心度必须控制在 2cm 内。活络端与围护结构连接如图 7 所示。

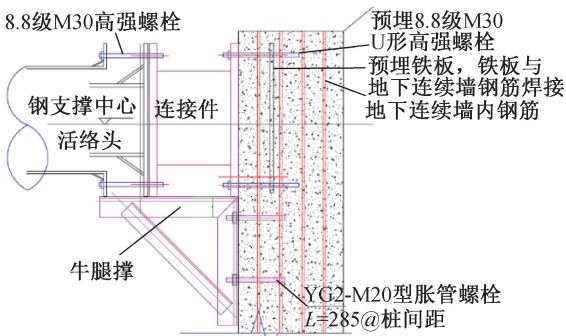


图 7 活络端与围护结构连接
Fig. 7 Connection between turnbuckle assembly and retaining structure

4.4 预加支撑轴力

支撑安装采取可靠措施,确保支撑轴心受压,偏心距控制在 30mm 以内,支撑架设完毕后及时检查各节点连接状况,经确认后方可施加预加力,预应力施加采用门式起重机配合下放 2 台 100t 的液压千斤顶,根据设计轴力的大小分级施加,通过油泵压力表读取压强值,当读数达到需要架设的预加力 50%时停顿 30min,再继续加压 30%,停顿 30min

继续加压,相对应的压强值相符时再稳定千斤顶压力。在活络端打设钢楔限位,待预加力稳定后用高强螺栓将活络端的法兰盘、端板和连接件 L 形方板三孔一线连接固定。

5 监测数据分析

前东城站第 1 道支撑采用装配式钢支撑和钢筋混凝土支撑的联合支护方式,如图 8 所示。



图 8 装配式钢支撑和钢筋混凝土支撑联合支护

Fig. 8 Combination support of prefabricated steel support and reinforced concrete support

5.1 钢支撑受力

装配式钢支撑系统在施工过程中的轴力演化特征如图 9 所示。由图 9 可知,随着表层土体开挖,装配式支撑依次安装后,钢支撑体系呈现典型的受压状态,其中 21~23 号钢支撑的初始平均轴力分别为-1 645. 7,-1 590. 1,-1 579. 3kN,轴力波动幅度控制在 $\pm 5\%$ 范围内。待第 1 道混凝土和钢支撑体系形成后,钢支撑轴力趋于稳定并呈现小幅衰减,最终稳定值分别为-1 451. 4,-1 429. 6,-1 423. 8kN,衰减率约为 10. 6%。

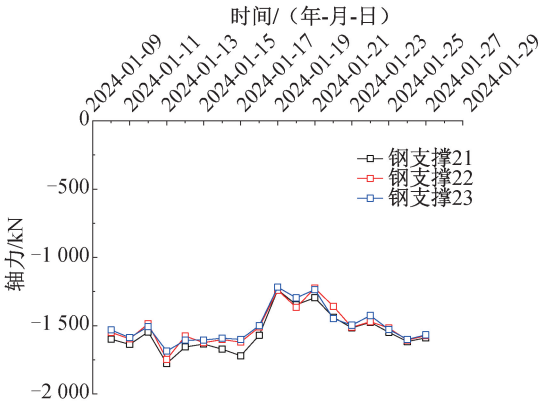


图 9 钢支撑轴力变化

Fig. 9 Fluctuation of axial force in steel supports

基于力流传递原理,邻近扩大端的 22,23 号钢支撑由于部分荷载被斜支撑分流,其轴力均小于 21 号钢支撑。监测数据验证了装配式钢支撑空间协同工作机制的有效性,各支撑轴力差异控制合理。

5.2 基坑外围地表变形

深基坑工程地表累计沉降控制标准为 $\pm 30\text{mm}$ 。

为验证装配式支撑系统的可靠性,在临近道路侧距基坑边界 1m 处布设了地表沉降监测点,横向位置与 21~23 号钢支撑位置对齐。

装配式钢支撑施工过程及土体开挖过程中地表测点的沉降变化规律如图 10 所示。在装配式支撑安装后,地表沉降逐渐增加,表层土开挖及钢支撑支护完成后,测点最大沉降量为 4. 4mm。进入第 1 层土体开挖阶段后,受卸荷效应影响,沉降量发展至 5. 5mm 后趋于稳定,以上施工过程最大沉降量仅为控制标准的 18. 3%,远低于规范限值。

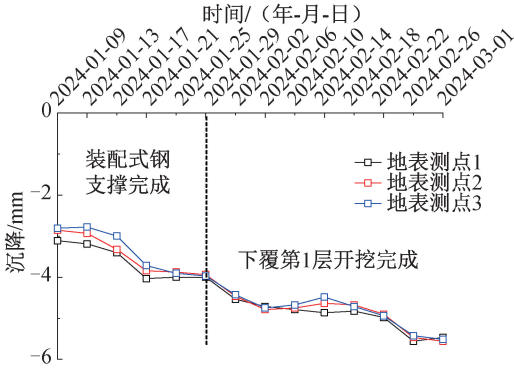


图 10 基坑外围邻近测点沉降值变化

Fig. 10 Change of settlement values of monitoring points adjacent to the foundation excavation

6 结语

1) 提出了可承受轴向拉压荷载的装配式活络端及连接部件的钢支撑体系,既能实现基坑横撑与围护桩整体连接,又提高了活络端端头的拉压受力性能。

2) 通过轴向拉压受力支撑结构,在内支撑受压的基础上可承受一定的扭转及拉力作用,提高了支护结构的整体性,保证了工程安全,施工工艺简单,有效地缩短了施工工期。

3) 通过工程应用,验证了轴向拉压受力支撑施工过程及土体开挖过程中结构受力及地表变形特点,结果表明:深基坑第 1 道装配式钢支撑支护稳定,最大轴力值为-1 451. 4kN,呈受压状态。深基坑第 1 层土体开挖过程中,邻近地表最大沉降值约为 5. 5mm,整体稳定性良好。

参考文献:

[1] 钱七虎. 我国地下空间利用还有多大空间[J]. 科学中国人, 2023(8): 33-35.
QIAN Q H. How much space is there for the utilization of underground space in China [J]. Scientific Chinese, 2023(8): 33-35.
[2] 雷升祥,申艳军,肖清华,等. 城市地下空间开发利用现状及未来发展理念[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 965-979.

LEI S X, SHEN Y J, XIAO Q H, et al. Present situations of development and utilization for underground space in cities and new viewpoints for future development [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2019, 15(4): 965-979.

[3] 吕志成,杨京生.新时期我国综合管廊高质量发展的思考 [J]. 给水排水, 2024, 60(4): 173-180.

LÜ Z C, YANG J S. Reflections on the high quality development of urban utility tunnel in China in the new era [J]. Water & wastewater engineering, 2024, 60(4): 173-180.

[4] 贾飞.邻近地铁深基坑钢管斜撑支护与土方开挖技术 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(22): 87-91.

JIA F. Steel pipe diagonal bracing support and earthwork excavation technology for deep foundation excavation near subway [J]. Construction technology, 2023, 52(22): 87-91.

[5] 王祖贤,施成华,龚琛杰,等.邻近车站(工作井)基坑开挖对下卧盾构隧道影响的解析计算方法 [J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2176-2190.

WANG Z X, SHI C H, GONG C J, et al. Analytical method to estimate the influence of foundation pit excavation adjacent to the station(working shaft) on the underlying shield tunnel [J]. Rock and soil mechanics, 2022, 43(8): 2176-2190.

[6] 王利军,邱俊筠,何忠明,等.超大深基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(6): 77-85.

WANG L J, QIU J J, HE Z M, et al. Influence of excavation of super deep foundation pit on deformation of adjacent metro tunnel [J]. Journal of Chang' an University (natural science edition), 2020, 40(6): 77-85.

[7] 赵勇,高文旗,王敏,等.复杂地层中超大地铁车站深基坑施工关键技术 [J]. 公路, 2017, 62(6): 327-332.

ZHAO Y, GAO W Q, WANG M, et al. Key technology of deep foundation pit construction of super-large subway station in complex stratum [J]. Highway, 2017, 62(6): 327-332.

[8] 刘腾,李兆平,赵天标,等.地下交通枢纽多级基坑组合支护结构体系设计及变形特性研究 [J]. 铁道标准设计, 2024, 68(8): 122-129.

LIU T, LI Z P, ZHAO T B, et al. Study on the design and deformation characteristics of multi-stage foundation pit in underground transportation hub with combined support structure system [J]. Railway standard design, 2024, 68(8): 122-129.

[9] 方能榕,蓝燕金,李继光,等.紧邻既有地铁车站基坑开挖变形影响分析 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(12): 55-62.

FANG N R, LAN Y J, LI J G, et al. Influence analysis of excavation deformation of foundation excavation adjacent to existing subway station [J]. Construction technology, 2023, 52(12): 55-62.

[10] 张宇奇,邱运军,郭建涛,等.狭小场地条件下地下连续墙桩式配筋设计与应用研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S1): 389-395.

ZHANG Y Q, QIU Y J, GUO J T, et al. Study on design and application of pile reinforcement of underground continuous wall under narrow site conditions [J]. Tunnel construction, 2022, 42(S1): 389-395.

[11] 刘方.装配式支护结构研究现状 [J]. 土工基础, 2023, 37(6): 940-944.

LIU F. State of the practice of prefabricated supporting structures [J]. Soil engineering and foundation, 2023, 37(6): 940-944.

[12] 庄诗潮,张建霖,张灿辉,等.装配式预应力鱼腹式钢支撑系统的刚度研究 [J]. 土木工程学报, 2021, 54(4): 18-25.

ZHUANG S C, ZHANG J L, ZHANG C H, et al. On stiffness of prefabricated prestressed fish-belly steel support system [J]. China civil engineering journal, 2021, 54(4): 18-25.

[13] 郭雪源,张明聚,武立伟,等.装配式钢管混凝土内支撑在盾构竖井深基坑工程中的应用 [J]. 兰州理工大学学报, 2020, 46(6): 131-136.

GUO X Y, ZHANG M J, WU L W, et al. Engineering application of prefabricated concrete-filled tube bracing in deep excavation for shield shaft [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020, 46(6): 131-136.

[14] 许利东,曹慧,彭小毅,等.装配式钢支撑在软土地区深基坑应用技术研究 [J]. 施工技术, 2020, 49(S1): 58-60.

XU L D, CAO H, PENG X Y, et al. Research on application technology of fabricated steel support in deep foundation excavation in soft soil area [J]. Construction technology, 2020, 49(S1): 58-60.

[15] 黄远,汤拓.全装配式混凝土框架-钢支撑结构抗震性能 [J]. 中国科技论文, 2022, 17(8): 857-864.

HUANG Y, TANG T. Seismic performance of all-precast concrete frame with steel braces structure [J]. China sciencepaper, 2022, 17(8): 857-864.

[16] 何东亮,龚成利,乔海洋,等.新型装配式环筋扣合体系叠合板铝模独立支撑体系施工技术 [J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 1147-1151.

HE D L, GONG C L, QIAO H Y, et al. Construction technology of aluminum formwork independent support system for new assembled ring reinforcement fastening system laminated plate [J]. Building structure, 2021, 51(S1): 1147-1151.