

受限空间内盾构始发反力架受力特性及设计优化^{*}

张习颖¹ 张亚洲¹ 姚占虎² 樊振宇³ 徐云龙¹ 王 晟⁴

(1. 中交隧道工程局有限公司, 211106, 南京; 2. 中交一公局集团有限公司, 100024, 北京; 3. 上海东杜岩土科技有限公司, 200092, 上海; 4. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 200092, 上海)

摘 要 [目的] 鉴于盾构隧道在空间受限环境下的始发作业中, 反力架的尺寸受到严格限制, 为确保能够承受大直径盾构机始发时产生的巨大反力, 并有效控制受力变形, 特提出研究设计一种具有足够强度和刚度, 同时结构紧凑、适应空间受限环境的反力架。[方法] 以上海机场联络线工程JCXSG-8标段为背景, 针对反力架尺寸受限的实际情况, 深入研究了不同后靠支撑方式下反力架的受力与变形特性。通过优化反力架的局部构造和传力撑的布置形式, 提出了改进方案, 并结合现场实际施工条件进行了验证, 以确保设计的合理性和有效性。[结果及结论] 在反力架后靠设置中, 采用剪力墙相较于斜撑更为优越, 能有效提升结构稳定性。此外, 在下斜梁增设中支座, 显著减小了下斜梁端支座的弯矩, 进而有效降低了底梁和竖框梁的扭矩, 提升了整体结构的承载能力。同时, 上斜梁上传力撑的数量及其布置方式对反力架的最大弯矩和变形具有显著影响。本工程实际施工中, 采用了1 m厚的反力架, 并在其后靠位置设置了900 mm厚的剪力墙, 同时在反力架下斜梁上增设了支座, 并适当减少了上斜梁上传力撑的数量。

关键词 城市轨道交通; 大直径盾构; 受限空间; 反力架; 支撑; 设计优化

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.016

Stress Characteristics and Design Optimization of Shield Initial Reaction Frame in Confined Space

ZHANG Xiying¹, ZHANG Yazhou¹, YAO Zhanhu², FAN Zhenyu³, XU Yunlong¹, WANG Sheng⁴

(1. CCCC Tunnel Engineering Company Limited, 211106, Nanjing, China; 2. CCCC First Highway Engineering Group Co., Ltd., 100024, Beijing, China; 3. Shanghai Doondo Geotechnical Technology Co., Ltd., 200092, Shanghai, China; 4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., 200092, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The size of the reaction frame is strictly constrained in shield tunnel initial operation under limit-

ed space environment. In view of this, to ensure the frame can withstand the huge reaction force generated during the start-up of the large-diameter shield machine and effectively control the stress deformation, it is proposed to study and design a reaction frame with sufficient strength and stiffness, compact structure, and adaptability to space-limited environments. [Method] Taking the JCXSG-8 section of Shanghai Airport Link project as the background, the stress and deformation characteristics of the reaction frame under different back-support modes are studied in depth in terms of the actual situation of limited reaction frame size. Through optimizing the local structure of the reaction frame and the layout of the force transmission support, an improvement scheme is proposed and verified in combination with the actual construction conditions on site to ensure the rationality and effectiveness of the design. [Result & Conclusion] In the setting of the reaction frame back-support, the use of shear walls is superior than the diagonal braces, and can effectively improve the structural stability. In addition, adding middle supports to the lower inclined beam significantly reduces the bending moment of the lower inclined beam end support, thereby effectively reducing the torque of the bottom beam and mullion beam, and improving the load-bearing capacity of the overall structure. At the same time, the number and arrangement of force transmitting struts on the upper inclined beam have a significant influence on the maximum bending moment and deformation of the reaction frame. In the actual construction of this project, a 1-m-thick reaction frame is used with a 900-mm-thick shear wall setting up in its back-support position. At the same time, a support is added on the lower inclined beam of the reaction frame, and the number of force transmitting struts on the upper inclined beam is appropriately reduced.

Key words urban rail transit; large diameter shield; limited space; reaction frame; support; design optimization

0 引言

近年来,大直径盾构隧道施工技术已在地下工

^{*} 中交一公局集团科研课题(KJYF-2021-A-09)

程领域得到广泛应用^[1-3],显著推动了该行业的发展。作为盾构法施工不可或缺的初始关键环节,盾构始发过程中,反力架扮演着确保施工安全的核心角色,其设计的合理性直接关系到始发的成功与安全性能^[4]。在实际工程实践中,由于盾构机需穿越复杂多变的地层,并可能伴随调向操作,这导致反力架所承受的力学环境变得尤为复杂^[5]。鉴于此,针对有限空间内大直径盾构始发时所使用的混凝土反力架,深入研究其受力变形特性并进行优化设计,以确保施工安全与效率,显得尤为重要且迫切。

在探讨盾构机始发阶段反力架的受力特性与设计优化领域,众多学者与工程技术人员已进行了深入研究。具体而言,文献[6]创新性地运用三种有限元软件联合仿真,针对大直径盾构反力架,在模拟极端不利但安全可控的工况下,以最小化反力架质量为优化目标,成功实现了总质量 12.9% 的减重,显著提升了结构设计效率。文献[7-8]则分别借助有限元分析工具,精准识别了始发施工阶段的关键受力部位及反力架的潜在薄弱点,为施工安全提供了重要参考。文献[9]聚焦于地铁暗挖隧道内盾构始发的特殊需求,通过软件分析特殊反力架在受力与变形方面的表现,进而提出增加加固构件以提升其稳定性的优化策略。而文献[10]则创造性地提出了一种新型盾构始发反力座,有效解决了穿黄隧洞盾构竖井内空间限制导致的反力架布置难题,不仅确保了工程的顺利实施,还显著节约了约 800 万元的工程投资,展现了技术创新带来的经济效益。

然而,当前在理论计算与数值模拟领域,针对大直径盾构在始发井空间有限、无法安装厚重反力架或利用井壁混凝土作为反力支撑的情况下的研究尚显不足。本文以上海机场联络线工程 JCXSG-8 标段张江站始发井为具体案例,针对空间受限条件下的盾构隧道始发反力架设计难题,系统分析了不同后靠支撑方式对反力架内力与变形的影响;同时,对反力架的上下斜梁部分进行了局部优化设计,验证了所提优化方案在保障盾构顺利始发方面的合理性与有效性,为类似工程条件下的反力架设计提供了宝贵经验和科学依据。

1 工程概况

1.1 工程概况及工作井结构形式

上海轨道交通市域线机场联络线工程张江

站一度假区站区间线路全长约为 5.69 km,采用盾构法施工,隧道衬砌环外径为 13.6 m,内径为 12.5 m。始发井设置在张江站东端头井,尺寸为 27.8 m(长)×44.5 m(宽),其中,工作井沿盾构掘进方向可提供给盾构机拼装、反力架安装及盾构始发的净空为 18.5 m。工作井结构现状如图 1 所示。



图 1 工作井结构现状图

Fig. 1 Current status of working shaft structure

1.2 盾构始发反力架尺寸确定

结合张江站主体结构特殊性、工作井沿掘进方向净宽及盾构机盾体长度等因素,经过测量复核,沿盾构掘进方向可供反力架布置的空间仅留 1 m。对当前国内直径 13 m 以上的盾构机始发反力架尺寸进行调研,结果如表 1 所示。

表 1 盾构直径为 13 m 以上的盾构机始发反力架尺寸调研表
Tab.1 Size survey table of shield machine initial reaction frames with a shield diameter over 13 m

项目名称	盾构外径/m	反力架结构形式	反力架纵向厚度/m
上海机场联络线 3 标工程	13.6	C35 现浇钢筋混凝土	3.0
北京东六环工程	15.4	钢结构	2.0
江阴靖江长江隧道	15.5	钢结构	2.0
珠海兴业快线(南段)工程	15.2	钢结构	1.6
南京和燕路过江通道	14.5	钢结构	1.5
上海机场联络线 7 标工程	13.6	钢结构	1.2

由表 1 可知,盾构直径在 13 m 以上的反力架结构形式多为钢结构,纵向厚度多在 1.5 m 以上,而本工程留给反力架布置的空间有限,给盾构始发增加了难度。

反力架为盾构机始发提供反推力。本工程盾构机开挖直径为 14.04 m,盾构机机身长度为 15.80 m,始发时最大推力为 80 000 kN;初步计算选用 1 m 厚的钢筋混凝土反力架,混凝土强度等级 C50,结构

外侧为门型架,内侧为类圆形结构,内侧类圆形结构半径同隧道衬砌环半径。反力架顶梁尺寸为2 500 mm(宽)×1 000 mm(高),底梁尺寸为1 800(宽)×1 000(高);竖梁尺寸为1 200(宽)×1 200(高);下斜梁尺寸为1 000(宽)×1 200(高);上斜梁尺寸为1 300(宽)×1 200(高)。反力架与负环相连接的部位采用 $\phi 400 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的传力支撑,共24个,钢管内浇筑C50混凝土,在反力架、管片及钢管对应位置埋设钢板。反力架结构示意图如图2所示,盾构始发井各结构位置平面图如图3所示。

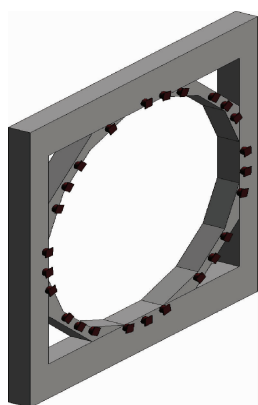


图2 反力架结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the reaction frame structure

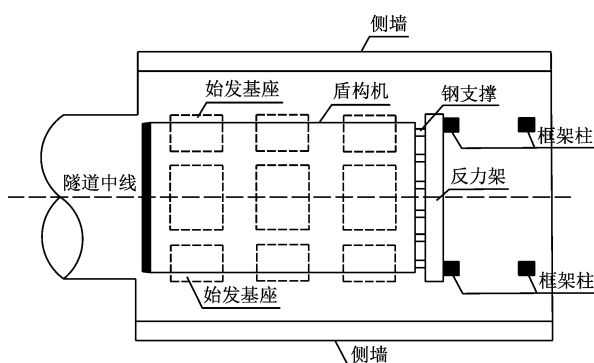


图3 盾构始发井各结构位置平面图

Fig.3 Location plan view of each structure in the shield initial shaft

2 计算模型与工况设置

本文采用结构分析软件,结合实际工况进行建模计算。模型中,主体结构的中板与底板沿反力架后靠方向延伸20 m,采用板单元进行模拟,且四周端部均施加固定约束。反力架后靠在中板、底板及支撑结构上,连接方式为贴合,确保反力架与后靠

之间仅传递轴力,同时释放弯矩。盾构机的反力则通过传力撑以集中荷载的形式有效传递给反力架。

为了选出施工便捷且节约成本的方案,本文共设置6种计算工况,其中工况一(S1)—工况四(S4)为反力架后靠支撑方式的对比,工况五(S5)和工况六(S6)为反力架局部优化,具体工况模型见图4。其中:

S1 是反力架后靠不设支撑;

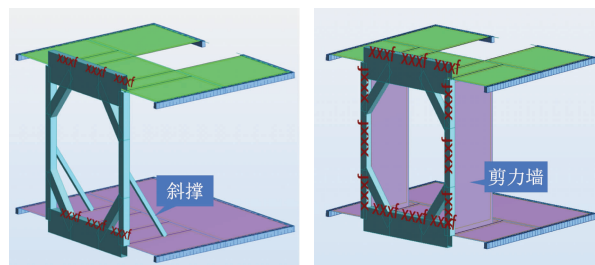
S2 是后靠设一道支撑,支撑一端在竖梁的中部,另一端在距反力架8 m处的底板上;

S3 是后靠设两道支撑,两道支撑一端分别在竖梁的1/3和2/3处,另一端在距反力架8 m处的底板上;

S4 是后靠设置跨度为8 m、厚度为0.9 m的剪力墙;

S5 是在工况四的基础上优化,在反力架左右两个下斜梁中部分别添加一个支座;

S6 是在工况五的基础上优化上斜梁,将反力架上斜梁传力撑(集中荷载)数量减少1个。



a) S2—一道斜撑

b) S4—剪力墙

图4 不同工况模型图

Fig.4 Model diagrams of different working conditions

3 反力架受力变形特性研究

3.1 后靠支撑方式对反力架受力变形的影响

模型建立完成后,分别对S1—S4进行计算,得出不同后靠支撑方式下反力架的内力及产生的变形。不同后靠支撑方式下反力架的内力及变形对比图如图5所示。

由图5可知:反力架后靠有、无支撑对反力架的影响很大;设置一道斜撑时,最大弯矩及最大变形比无支撑时分别减小了42.56%、65.42%,因此设置后靠支撑是保证反力架安全性的重要因素;设置两道斜撑时反力架受的最大内力相比一道斜撑时略有减小,而产生的最大变形量略有增加,总体上无明显变化,变形最大位置均在竖梁中部。

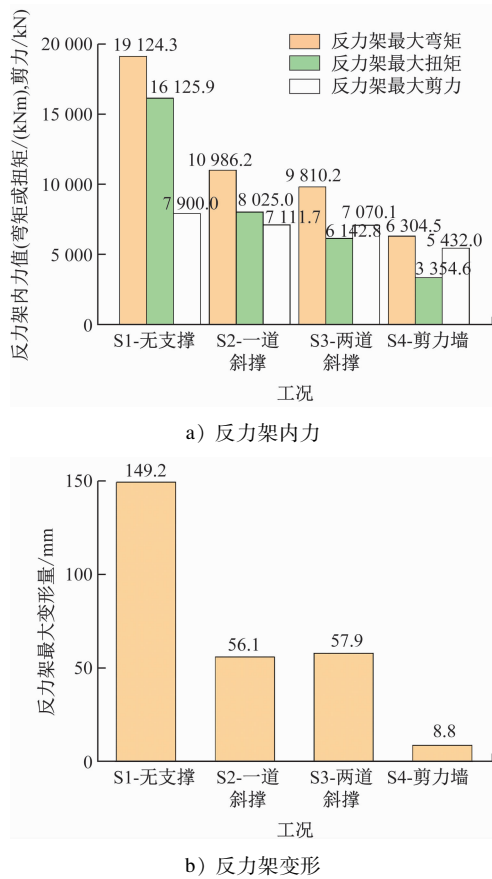


图5 不同后靠支撑方式下反力架的内力及变形对比图

Fig. 5 Comparison chart of internal force and deformation of the reaction frame under different back-support modes

图6为S4-设置剪力墙的反力架弯矩和扭矩分布图。图7为不同后靠支撑工况下反力架及支撑的变形分布图。在后靠支撑方式替换为剪力墙后,反力架的内力值和变形量有了很大的改善,相比设置两道斜撑的工况,剪力墙的设置使反力架的最大弯矩、扭矩、剪力分别减小了35.74%、45.39%、23.17%;反力架的最大变形量由57.9 mm减小至8.8 mm,减小了84.8%。

结合图6和图7可知:反力架最大变形位置由竖梁中部变至上、下斜梁中部,这是由于斜撑刚度不足,两道斜撑顶部发生了较大的水平位移,从而导致竖梁发生了较大的水平变形,顶梁和底梁产生了极大扭矩。而设置剪力墙后,增加了整体刚度,使得竖梁水平变形被约束,顶梁、底梁扭矩得到了很好的控制。

3.2 反力架局部支点对反力架受力变形的影响

由上一节分析得出,设置剪力墙虽能大大减小反力架的变形量,但反力架上、下斜梁弯矩和变形

仍然较大,导致顶梁、底梁和两侧竖梁产生较大的扭矩,需对反力架进行优化。结合实际施工可行性,在下斜梁中部加一个后靠支座,使斜梁跨度减小,增强结构承受荷载的能力。计算得到下斜梁加支座前、后反力架内力及变形对比见图8,下斜梁加支座后反力架弯矩、扭矩分布见图9。

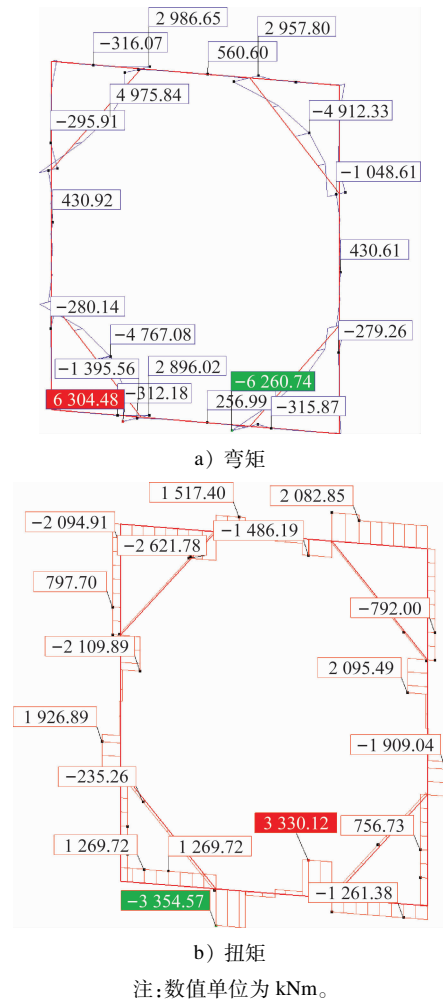
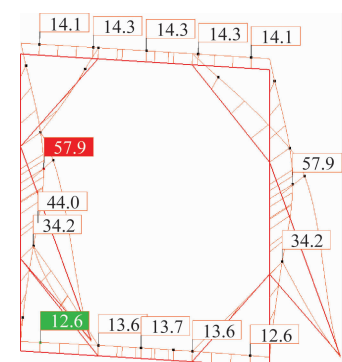


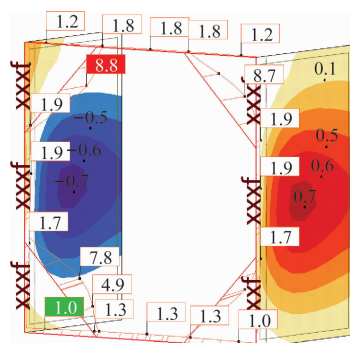
图6 S4-设置剪力墙的反力架弯矩和扭矩分布图

Fig. 6 Bending moment and torque distribution diagram of the reaction frame for S4 setting shear wall

由图8可以看出:下斜梁加支座后,反力架整体所受的最大弯矩、剪力、扭矩及变形分别减小了9.68%、3.94%、35.23%、2.27%,这说明下斜梁加支座对反力架整体安全性有一定的作用。其中,反力架所受扭矩减小最为显著,由3 354.57 kNm减小至2 172.91 kNm。结合图6b)和图9可以看出:下斜梁加支座前后扭矩变化主要体现在反力架底梁上,其主要是因为支座的存在使下斜梁所受弯曲变形及端部弯矩减小,从而减小了下斜梁端部的约束作用。



a) S3-两道斜撑变形



b) S4-剪力墙变形

注:数值单位为 mm。

图 7 不同后靠支撑工况下反力架及支撑的变形分布图

Fig. 7 Deformation distribution diagram of the reaction frame and its support under different back-support working conditions

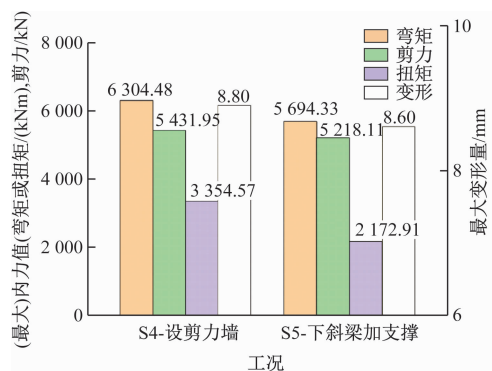
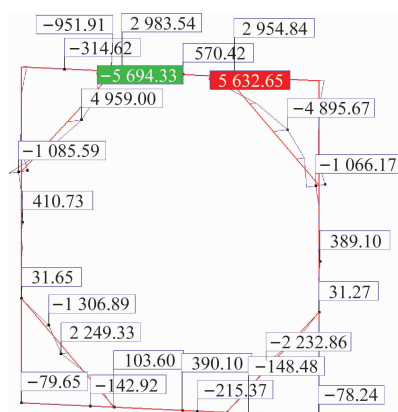


图 8 下斜梁加支座前、后反力架内力及变形对比图

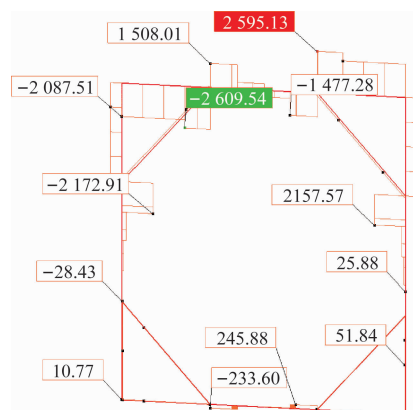
Fig. 8 Comparison chart of internal force and deformation of the reaction frame before and after adding support to the lower inclined beam

为了更好地体现下斜梁加支座对下斜梁内力及变形的影响,整理得出加支座前、后下斜梁内力及变形对比图如图 10,下斜梁弯矩分布图如图 11。

由图 10 和图 11 可以看出:下斜梁加支座对下斜梁的最大内力及最大变形减小的贡献度很大,最大弯矩、剪力、扭矩、变形分别减小了 64.32%、



a) 弯矩图



b) 扭矩

注:数值单位为 kNm。

图9 下斜梁加支座后反力架弯矩、扭矩分布图

Fig. 9 Bending moment and torque distribution diagram of the reaction frame after adding support to the lower inclined beam

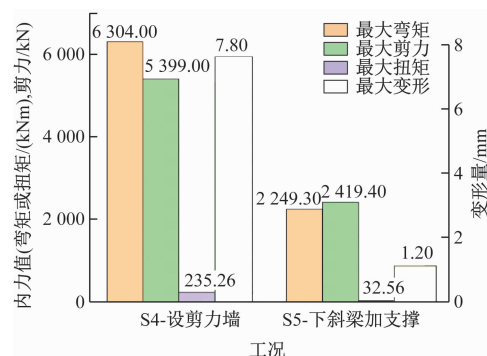


图 10 下斜梁加支座后下斜梁内力及变形对比图

Fig. 10 Comparison chart of internal force and deformation of the lower inclined beam after adding support

55.59%、86.16%、84.62%，这是由于加支座后，使下斜梁的跨度变小，确保了1 m厚的斜梁能够满足配筋要求。下斜梁所受最大弯矩位置由端支座转移到中支座，随着端支座弯矩的减少，底梁和竖框梁的扭矩也随之降低。

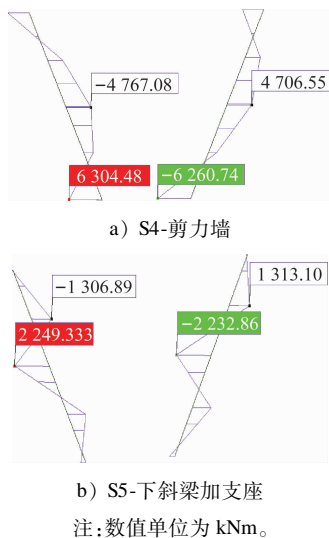


图 11 下斜梁弯矩分布图

Fig. 11 Bending moment distribution diagram of the lower inclined beam/(kN·m)

3.3 传力撑设置对反力架受力变形的影响

由图 9 可知:上斜梁弯矩及与其相连的顶梁和竖梁扭矩值仍然较大,为进一步优化反力架受力条件,对传力撑的布置进行优化调整。将工况 S5 的斜梁的 3 个传力撑优化为工况 S6 的 2 个传力撑,上斜梁处作用的集中力由 3 个变为 2 个,其他部位传力撑布置不变。反力架上传力撑的总数由 24 个减少为 22 个;假定总推力不变且反力仍然均匀分布,则每个传力撑集中力增加。计算得到在 S5 和 S6 工况下反力架内力及变形数据对比图见图 12。S6 工况下反力架弯矩分布图见图 13。

由图 12 和图 13 可知:上斜梁传力撑优化后,最大弯矩及变形部位仍然位于上斜梁,但反力架最大弯矩、扭矩、剪力及变形量分别减小为 22.32%、22.62%、23.76%、18.60%,作用较为明显。上斜梁传力撑优化后,下斜梁弯矩稍有增大,由 S5 的 2 249.33 kNm 增大至 2 395.90 kNm,这是由于上斜梁传力撑的减少导致单个传力撑的集中力增大所致,但其增加量在下斜梁的允许范围之内。

4 反力架设计方案与现场实施效果

结合上述计算结果,考虑对反力架、框架柱和剪力墙后靠体系的受力变形影响,避免盾构始发时反力过大对永久结构造成不可逆损伤;同时,综合安全性和经济性因素并满足始发要求,在现场实际施工时采用 1 m 厚的反力架,后靠设置 900 mm 厚

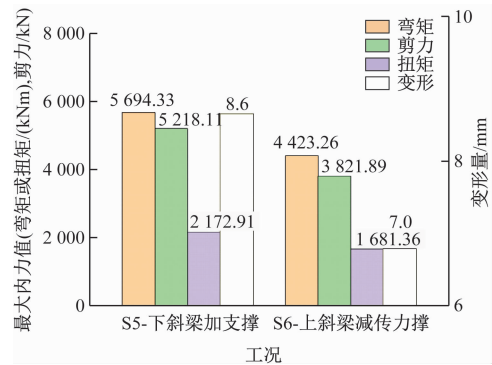


图 12 上斜梁减传力撑后反力架内力及变形对比图

Fig. 12 Comparison chart of internal force and deformation of the reaction frame after reducing the upper inclined beam force transmitting struts

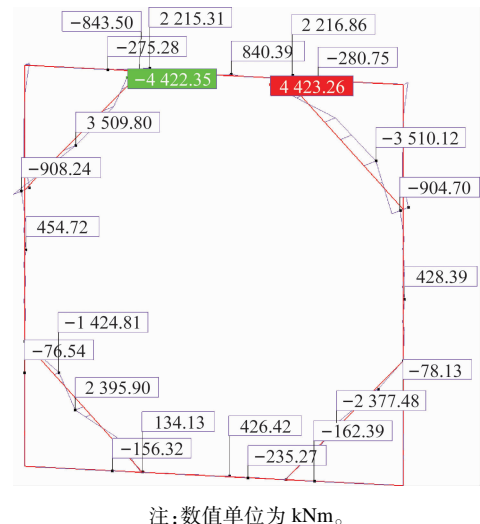


图 13 S6 工况下反力架弯矩分布图

Fig. 13 Bending moment distribution diagram of the reaction frame under S6 working condition

的混凝土剪力墙;剪力墙与两侧的主体框架柱共同形成 8 m 长墙体,使剪力墙与框架柱形成整体,共同作为反力架竖梁的后靠支撑,同时在下斜梁添加支座。

实施阶段对反力架体系重点受力部位进行了变形监测。监测结果显示,其上、下斜梁的最大累计变形均小于 7 mm,而其他部位的变形则微乎其微。同时,混凝土的外观质量保持良好,各构件的实际受力情况与有限元模拟结果高度吻合,且实际变形量小于数值模拟的预测值,这充分表明反力架体系的实施效果十分优异。最终,盾构机得以安全、顺利地始发,进一步验证了反力架体系设计的合理性与实施的有效性。

5 结语

通过对上海轨道交通机场联络线张江站一度假区站区间盾构始发反力架与后靠体系进行详尽的数值模拟分析,深入探究了不同支撑方式及上、下斜梁局部优化对结构受力与变形特性的影响。采用控制变量法,得出了以下结论:

1) 与不设支撑相比,设置一道斜撑时反力架的内力及变形明显减小,但设置两道斜撑和设置一道斜撑相比,其对反力架的影响不明显。

2) 与设置两道斜撑相比,设置剪力墙时:反力架的最大内力分别减小;反力架的最大变形量由 57.9 mm 减小至 8.8 mm,说明剪力墙的设置大大提高了体系的刚度。

3) 通过在下斜梁增加支座的方式,使下斜梁端支座弯矩大大减小,有效降低了底梁和竖框梁的扭矩。

4) 上斜梁传力撑数量减少后,最大弯矩及变形部位仍位于上斜梁,但均有较大减小;下斜梁弯矩稍有增大,但其增量在下斜梁的允许范围内。

5) 本工程施工时采用 1 m 厚反力架,后靠设置 900 mm 厚剪力墙,同时在反力架下斜梁添加支座,减少上斜梁传力撑数量。反力架实施效果良好,且盾构始发安全顺利。

参考文献

- [1] 钱七虎,李朝甫,傅德明. 全断面掘进机在中国地下工程中的应用现状及前景展望[J]. 建筑机械, 2002(5): 28.
QIAN Qihu, LI Chaofu, FU Deming. Spreading the use of TBM, promoting development of underground space in China[J]. Construction Machinery, 2002(5): 28.
- [2] 张亚洲,温竹茵,由广明,等. 上软下硬复合地层盾构隧道设计施工难点及对策研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(4): 669.
ZHANG Yazhou, WEN Zhuyin, YOU Guangming, et al. Difficulties and countermeasures in design and construction of shield tunnels in upper-soft and lower-hard stratum[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4): 669.
- [3] 章龙管,李志刚,谭江. 白城隧道工程大断面马蹄形盾构始发与接收技术[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(7): 1041.
ZHANG Longguan, LI Zhigang, TAN Jiang. Launching and re-

ceiving technology of large cross-section horseshoe-shaped shield used in Baicheng tunnel[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(7): 1041.

- [4] 张楠. 浅埋复合地层小净距大盾构隧道始发掘进技术研究[J]. 公路, 2022, 67(1): 383.
ZHANG Nan. Study on starting excavation technology of small clear distance and large shield tunnel in shallow composite stratum[J]. Highway, 2022, 67(1): 383.
- [5] 赵宝虎,王燕群,岳澄,等. 盾构始发过程反力架应力监测与安全评价[J]. 工程力学, 2009, 26(9): 105.
ZHAO Baohu, WANG Yanqun, YUE Cheng, et al. Stress monitoring and safety evaluation of the counterforce frame during shield originating[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(9): 105.
- [6] 周航,李景浩. 大直径盾构反力架受力分析与结构优化[J]. 建筑机械, 2021(9): 61.
ZHOU Hang, LI Jinghao. Stress analysis and structural optimization of reaction frame for large diameter shield[J]. Construction Machinery, 2021(9): 61.
- [7] 高洪吉. 9.15 m 直径盾构始发阶段推力计算及反力架受力分析[J]. 市政技术, 2019, 37(4): 121.
GAO Hongji. Thrust calculation and reaction frame stress analysis of 9.15 m Dia. shield machine in starting stage[J]. Municipal Engineering Technology, 2019, 37(4): 121.
- [8] 曹建军,王新强,陆志明. 大直径盾构始发反力架受力分析与斜杆优化[J]. 四川建筑, 2021, 41(1): 247.
CAO Junjun, WANG Xinqiang, LU Zhiming. Force analysis and diagonal optimization of initial reaction frame of large diameter shield[J]. Sichuan Architecture, 2021, 41(1): 247.
- [9] 张子辛. 盾构特殊反力架受力特性研究[J]. 铁道建筑技术, 2016(2): 100.
ZHANG Zixin. Force properties of special counter force frame in shield originating[J]. Railway Construction Technology, 2016(2): 100.
- [10] 符志远,张传健. 穿黄隧洞北岸竖井新型反力座结构设计[J]. 人民长江, 2011, 42(8): 41.
FU Zhiyuan, ZHANG Chuanjian. Design of new type of reaction abutment of working shaft in northern bank of tunnel crossing Yellow River[J]. Yangtze River, 2011, 42(8): 41.

· 收稿日期:2022-07-13 修回日期:2022-11-17 出版日期:2024-10-10
Received:2022-07-13 Revised:2022-11-17 Published:2024-10-10
· 第一作者:张习颖,工程师,295862318@qq.com
通信作者:张亚洲,高级工程师,yazhouzhang321@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license