

## 盾构始发后靠剪力墙对反力架力学特性影响研究\*

魏 驰<sup>1</sup> 张亚洲<sup>1</sup> 姚占虎<sup>1,2</sup> 樊振宇<sup>3</sup> 徐云龙<sup>1</sup> 王 晟<sup>4</sup>

(1. 中交隧道工程局有限公司, 211100, 北京; 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, 201899, 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] 由于盾构始发场地空间有限, 导致反力架尺寸受限, 难以单独提供足够的盾构始发反力。因此, 需设计并安装反力架后靠结构, 以实现两者协同受力。[方法] 以上海机场联络线工程为背景, 采用有限元分析方法, 系统地研究了反力架与剪力墙之间的连接方式, 并分析了剪力墙的纵向长度、厚度及高度等参数对反力架结构受力与变形的影响。通过模拟计算, 筛选出反力架与剪力墙之间最优的连接方式以及剪力墙的最优尺寸组合。[结果及结论] 反力架与剪力墙间采取贴合的连接方式, 避免反力架和永久结构贴合面传递弯矩, 对永久结构影响更小, 并可以有效释放反力架不利部位的弯矩, 使反力架受力更加合理。随着剪力墙纵向长度的加长, 可显著提高反力架和剪力墙结构受力变形能力; 剪力墙厚度的变化对反力架受力变形影响较小, 但在一定程度上可以增强剪力墙自身受力、减小变形; 剪力墙高度对反力架和剪力墙结构受力及变形的影响非常显著; 当剪力墙高度小于 13.5 m 时, 由于墙顶未锚入中板, 导致反力架和剪力墙自身的受力、变形均处于不利状态。

**关键词** 城市轨道交通; 盾构机始发; 反力架; 剪力墙; 有限元

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.017

### Influence of Back-Support Shear Wall for Shield Launching on the Mechanical Characteristics of the Reaction Frame

WEI Chi<sup>1</sup>, ZHANG Yazhou<sup>1</sup>, YAO Zhanhu<sup>1,2</sup>, FAN Zhenyu<sup>3</sup>, XU Yunlong<sup>1</sup>, Wang Sheng<sup>4</sup>

(1. CCCC Tunnel Engineering Company Limited, 211100, Beijing, China; 2. CCCC First Highway Engineering Group Co., Ltd., 100024, Beijing, China; 3. Shanghai Doondo Geotechnical Technology Co., Ltd., 201899, Shanghai, China; 4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., 200092, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] Due to the limited space available at the shield launching site, the restricted size of the reaction frame cannot provide sufficient shield launching reaction force

on its own. Therefore, it is necessary to design and install a back-support structure for the reaction frame to achieve synergistic stress between the two. [Method] Taking a project on Shanghai Airport Link Line as the background, the finite element analysis method is adopted to systematically study the connection method between the reaction frame and the shear wall, and the influence of the shear wall longitudinal length, thickness and height on the stress and deformation of the reaction frame structure is analyzed. Through simulation, the optimal connection method between the reaction frame and the shear wall, as well as the optimal size combination of the shear wall are screened out. [Result & Conclusion] The reaction frame and the shear wall are connected in a close-fitting manner to avoid the transmission of bending moment by the fitting surface of the reaction frame and the permanent structure, which has less influence on the permanent structure and can effectively release the bending moment at the unfavourable parts of the reaction frame, making the stress of the reaction frame more reasonable. As the longitudinal length of the shear wall increases, the stress and deformation capacity of the reaction frame and shear wall structure can be significantly improved; the change in the thickness of the shear wall has less influence on the stress and deformation of the reaction frame, but to some extent it can enhance the stress of the shear wall itself and reduce the deformation. The height of the shear wall has a very significant influence on the stress and deformation of the reaction frame and the shear wall structure. When the height of the shear wall is less than 13.5 m, because the top of the wall is not anchored into the center plate, resulting in the unfavorable state for the stress and deformation of the reaction frame and shear wall itself.

**Key words** urban rail transit; shield launching; reaction frame; shear wall; finite element

盾构机在始发阶段, 反力架扮演着至关重要的角色, 它不仅为盾构机提供强大的前进反力, 还确

\* 中交一公局集团科研课题(KJYF-2021-A-09)

保拼装管片初始段的良好圆度以及管片间的紧密纵向连接,这对于工程质量至关重要<sup>[1-2]</sup>。鉴于盾构机所需的支撑反力可达 104 kN 量级,且随着盾构机直径的增加而增加<sup>[3]</sup>,反力架必须具备足够的承载力和刚度。然而,在实际施工中,由于工作井净空尺寸的限制,安装传统钢反力架可能面临困难,或已安装的钢反力架刚度不足。因此,结合现场具体工况对反力架进行创新性改进显得尤为重要<sup>[4]</sup>。

在净空受限的条件下,采用混凝土反力架成为一种有效的解决方案。同时,在其后浇筑混凝土剪力墙可以进一步增强其性能。通过调整剪力墙的纵向长度、厚度及高度,可以显著提升反力架的承载能力和刚度,确保满足盾构机始发时的严格要求。

尽管已有研究对反力架的优化设计进行了深入探讨,但文献[5]通过精细计算验证了新型反力座各关键部位的配筋合理性,证明了其结构的稳定性和可靠性;文献[6]在最不利工况下进行了极限荷载模拟,优化了结构设计;文献[7]利用 Ansys 空间有限元程序,结合后浇反力墙和钢管传力支撑,成功实现了盾构机的顺利始发;文献[8]则通过受力计算和数值模拟,深入分析了反力架各部件的受力状态及位移情况,明确了始发阶段的重点关注区域。

综上,目前尚缺乏对剪力墙不同结构尺寸如何影响混凝土反力架力学特性的系统性研究。因此,本文致力于深入探讨剪力墙与反力架之间不同节点连接方式,以及剪力墙的纵向长度、厚度、高度等因素对反力架受力变形规律的具体影响。本研究旨在选择出最优的剪力墙结构尺寸组合,既能有效保护永久结构免受损伤,又能为盾构机的安全始发提供坚实保障,同时为未来类似工程提供宝贵的参考经验和指导。

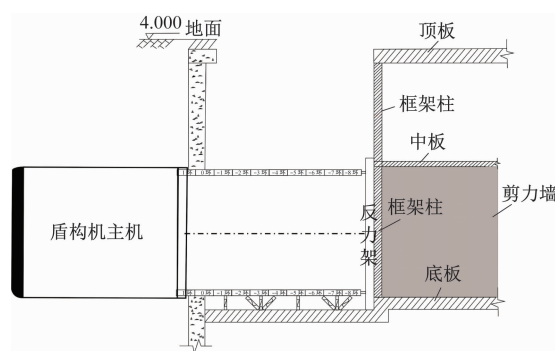
## 1 工程概况

上海轨道交通机场联络线盾构机始发井尺寸经过测量复核,沿盾构掘进方向可供反力架布置的空间仅有 1 m,而本工程盾构机开挖直径为 14.04 m,始发时最大推力为 80 000 kN,对始发时反力架的结构强度和刚度提出了较高的要求。

结合本工程始发井特点,最终选择设置纵向厚度为 1 m 的钢筋混凝土反力架。由于本工程始发井与车站主体结构相连,因此,可利用永久结构的中板、底板和框架柱分别作为反力架的上横梁、底

梁和侧梁的支撑受力点;通过计算,对反力架与永久结构的各节点连接采用贴合连接的方式。

为提高反力架结构刚度,满足始发要求,同时避免盾构机始发时反力过大对永久结构造成不可逆损伤,在框架柱后通过植筋的方式设置混凝土剪力墙,使剪力墙与框架柱形成整体,共同作为反力架的后靠支撑。由于框架柱和剪力墙之间采取植筋连接,为了简化受力过程,下文进行模型计算时可将框架柱和剪力墙看成一个整体,对剪力墙结构进行内力分析。盾构机始发纵断面布置图如图 1 所示。



注:标高单位为 m。

图 1 盾构机始发纵断面布置图

Fig. 1 Longitudinal section layout of the shield machine launching

本工程反力架垂直于地面,采用 C50 混凝土;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管片半径。反力架沿隧道轴线方向厚度为 1 m,上横梁尺寸为 2 500 mm × 1 000 mm,下横梁尺寸为 1 800 mm × 1 000 mm,侧梁尺寸为 1 200 mm × 1 200 mm,下斜梁尺寸为 1 000 mm × 1 200 mm,上斜梁尺寸为 1 300 mm × 1 200 mm。

## 2 反力架与剪力墙间的连接方式对结构受力变形的影响

### 2.1 反力架与剪力墙间连接方式分析

在反力架施工前,根据既有结构特征,对反力架与剪力墙间的不同连接方式进行分析,主要有两种:①固结方式。通过在框架柱内预留钢筋接驳器或对框架柱进行植筋的方式与反力架进行连接,框架柱与反力架共同受力且叠合面能够传递弯矩、扭矩。②贴合方式。反力架和永久结构之间少量植筋,框架柱与反力架能够共同承受水平荷载,但叠合面不能传递弯矩和扭矩。

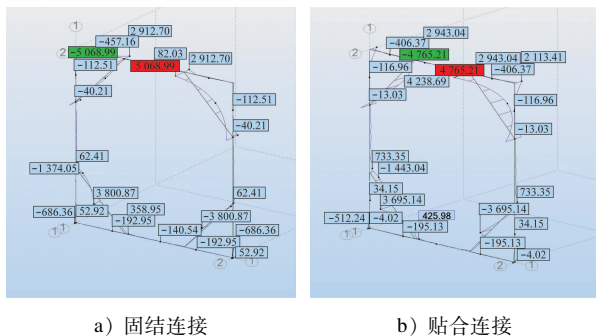
## 2.2 计算模型及计算工况

采用 Autodesk Robot 软件建立空间计算模型,模型体系为梁-板体系,其中反力架的所有杆件均采用梁单元,永久结构中板、底板和剪力墙均采用板单元。

## 2.3 计算结果分析

针对两种不同的工况进行了详尽的有限元分析。结果显示,在这两种工况下,整个反力架体系承受的最大力点均集中在上横梁与上斜梁的连接节点处。因此,本文特别关注斜梁上的弯矩变化,并以此作为控制受力分析的主要指标。

接下来,本文计算了不同连接方式下反力架的最大弯矩及其变形情况,具体结果如图 2 所示。由图 2 可知:反力架的最大弯矩分别达到了 5 068.99 kNm 和 4 765.21 kNm。值得注意的是,当采用贴合方式连接时,上斜梁的弯矩得到了显著降低,尽管此时剪力和扭矩的值相较于固结方式略有上升。同时,本文也观察到,在贴合方式下,反力架的最大变形量相较于固结方式有了一定程度的增加。



注:单位为 kNm。

图 2 不同连接方式下反力架的弯矩分布规律

Fig. 2 Bending moment distribution law of the reaction frame with different connection methods

同理,对剪力墙的内力进行深入分析时,本文同样以其最大弯矩作为控制指标。分析结果显示,当采用贴合方式连接时,剪力墙的最大弯矩值、扭矩值以及受力变形均呈现出显著的下降趋势。这一现象表明,贴合连接方式能有效限制轴向上的力的传递,避免框架柱和剪力墙发生不必要的转动,从而显著减小了剪力墙的内力和变形。因此,从实际工程应用的角度考虑,反力架与主体结构之间采用贴合连接方式更为合理,它能在一定程度上降低反力架受力时对永久结构的不利影响。

综上所述,通过对比分析不同连接方式下的各

项数据,发现贴合方式在减少反力架斜梁最大变形(尽管略有增大)的同时,更显著地降低了反力架整体结构以及剪力墙的受力和变形。此外,鉴于本工程主体结构未设置接驳器,若在小尺寸框架柱上大量植筋,不仅会对主体结构造成较大损伤,而且后续反力架的拆除作业也将进一步影响主体结构的永久受力性能。因此,经过综合比选,决定采用贴合方式连接反力架与剪力墙,以确保工程的安全性和经济性。

## 3 剪力墙尺寸对结构受力变形的影响

### 3.1 剪力墙纵向长度对结构受力变形的影响

为了研究剪力墙纵向长度对结构受力变形的影响,分别设置剪力墙纵向长度为 2 m、3 m、4 m、6 m 和 8 m 等 5 种工况,并控制每种工况的剪力墙厚度为 0.6 m,高度为 13.5 m,通过计算模型进行反力架和剪力墙内力分析。

图 3 为不同剪力墙纵向长度下反力架最大弯矩变化。图 4 为不同剪力墙纵向长度下反力架最大变形变化。通过图 3 和图 4 可知:随着剪力墙纵向长度的加长,反力架最大弯矩和最大结构变形均逐渐变小,且当剪力墙纵向长度大于 3 m 时,反力架弯矩几乎保持不变,最大结构变形的变化亦呈现减缓趋势。因此认为:当剪力墙的纵向长度超过 3 m 时,它已足以满足反力架所需的刚度要求。进一步增加剪力墙的纵向长度,对于反力架刚度的提升效果将变得相对有限。

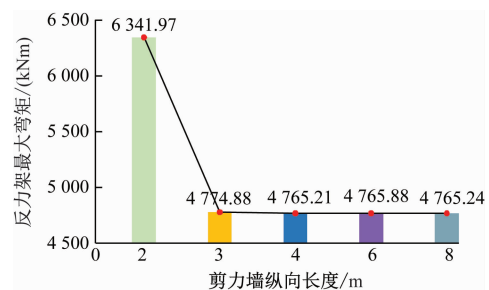


图 3 不同剪力墙纵向长度下反力架最大弯矩变化

Fig. 3 Variation in maximum bending moment of the reaction frame with different shear wall longitudinal lengths

不同剪力墙纵向长度下剪力墙最大弯矩和最大结构变形变化规律如图 5 和图 6 所示。由图 5 和图 6 可知:随着剪力墙纵向长度的增加,其自身的最大弯矩和最大结构变形均呈现出逐渐减小的趋势。这一现象明确表明,延长剪力墙的纵向长度能够有

效提升其结构刚度。为了最大程度地减少反力架在传递力量过程中对永久结构可能造成的损伤,建议在条件允许的情况下,尽可能设置更长的剪力墙纵向长度。

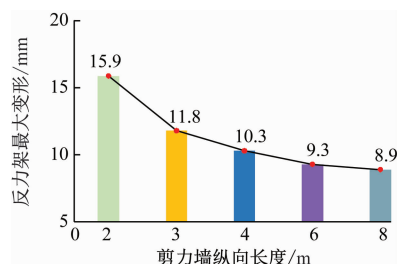


图 4 不同剪力墙纵向长度下反力架最大变形变化

Fig. 4 Variation in maximum deformation of the reaction frame with different shear wall longitudinal lengths

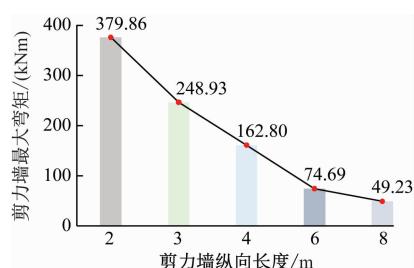


图 5 不同剪力墙纵向长度下剪力墙最大弯矩变化

Fig. 5 Variation in maximum bending moment of the shear wall with different shear wall longitudinal lengths

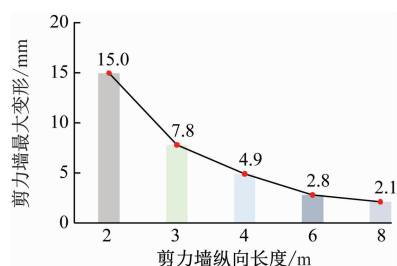


图 6 不同剪力墙纵向长度下剪力墙最大变形变化

Fig. 6 Variation in maximum deformation of the shear wall with different shear wall longitudinal lengths

为保证反力架和永久结构安全性,综合考虑以上分析结果和现场实际工程特点,对剪力墙进行配筋验算,最终选择将剪力墙纵向长度设置为 8 m。

### 3.2 剪力墙厚度对结构受力变形的影响

为了研究剪力墙厚度对结构受力变形的影响,分别设置剪力墙厚度为 0.4 m、0.6 m、0.8 m、1.0 m 等 4 种工况,并控制每种工况的剪力墙纵向长度为 8.0 m,高度为 13.5 m,通过计算模型进行反力架和剪力墙内力分析。

图 7 为不同剪力墙厚度下反力架最大弯矩变化。图 8 为不同剪力墙厚度下反力架最大变形变化。

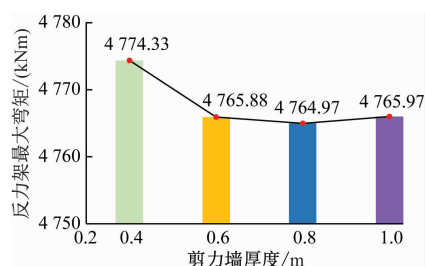


图 7 不同剪力墙厚度下反力架最大弯矩变化

Fig. 7 Variation in maximum bending moment of the reaction frame with different shear wall thicknesses

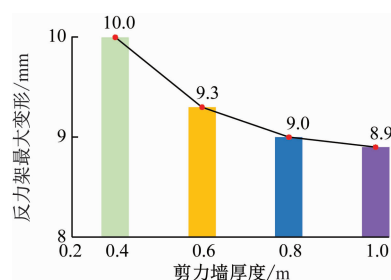


图 8 不同剪力墙厚度下反力架最大变形变化

Fig. 8 Variation in maximum deformation of the reaction frame with different shear wall thicknesses

由图 7 和图 8 可知:随着剪力墙厚度的增大,反力架最大弯矩和结构最大变形均呈现小幅下降,因此,剪力墙厚度的变化对反力架受力变形影响较小,且当剪力墙厚度达到 0.8 m 以上时,即可满足反力架刚度需求。

不同剪力墙厚度下剪力墙最大弯矩和最大结构变形变化规律如图 9 和图 10 所示。由图 9 和图 10 可知:剪力墙厚度的变化对自身结构受力和变形影响较大,随着剪力墙厚度的增大,剪力墙弯矩呈现逐渐增大的趋势;同时,随着剪力墙厚度的增大,其结构变形逐渐减小,这表明剪力墙厚度增大可以较大程度提高其结构刚度,避免发生较大结构变形。

因此,综上分析结果和现场实际工程特点,最终选择将剪力墙厚度设置为 0.8 m。

### 3.3 剪力墙高度对结构受力变形的影响

为了研究剪力墙高度对结构受力变形的影响,分别设置剪力墙高度为 5.4 m、8.1 m、10.8 m、13.5 m(剪力墙上、下端部通过植筋锚入主体结构中板、底板)4 种工况,并控制剪力墙纵向长度为 8.0 m,厚度为 0.8 m,通过计算模型对反力架和剪力墙进

行内力分析。图 11 为不同剪力墙高度下反力架最大弯矩变化。图 12 为不同剪力墙高度下反力架最大变形变化。

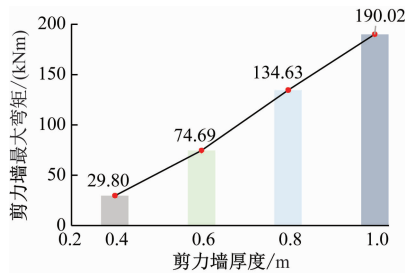


图 9 不同剪力墙厚度下剪力墙最大弯矩变化

Fig. 9 Variation in maximum bending moment of the shear wall with different shear wall thicknesses

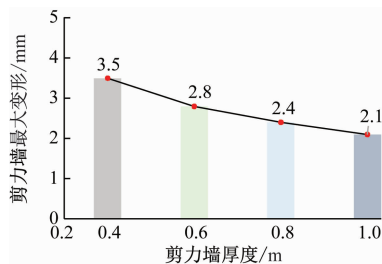


图 10 不同剪力墙厚度下剪力墙最大变形趋势

Fig. 10 Maximum deformation trend of the shear wall with different shear wall thicknesses

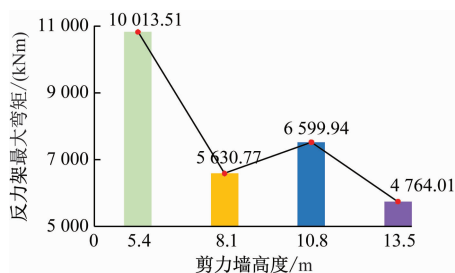


图 11 不同剪力墙高度下反力架最大弯矩变化

Fig. 11 Variation in maximum bending moment of the reaction frame with different shear wall heights

由图 11 和图 12 可知,当剪力墙高度未达到 13.5 m,即剪力墙上部未锚入主体结构中板时,反力架弯矩及反力架最大变形均产生了较大的提高,但无明显规律。

由图 11 可以看出:随着剪力墙高度的升高,反力架最大变形呈现逐渐减小的趋势,且当剪力墙高度小于 13.5 m 时,反力架最大变形过大,不能满足盾构机始发要求,这是因为剪力墙高度不足,在盾构机始发时反力架侧梁上半段无后靠支撑,从而引起反力架侧梁变形过大。

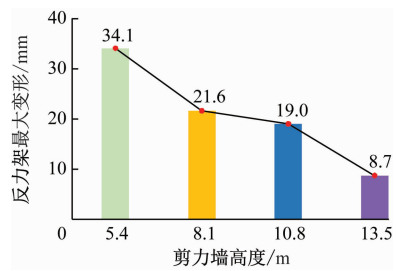


图 12 不同剪力墙高度下反力架最大变形变化

Fig. 12 Variation in maximum deformation of the reaction frame with different shear wall heights

图 13 为不同剪力墙高度下剪力墙最大弯矩变化。图 14 为不同剪力墙高度下剪力墙最大变形变化。由图 13 和图 14 可知:当剪力墙高度小于 13.5 m,即剪力墙上、下端部未锚入主体结构中板、底板时,剪力墙自身弯矩以及最大变形均有大幅提高,且其受力变形与剪力墙的高度变化无明显规律。

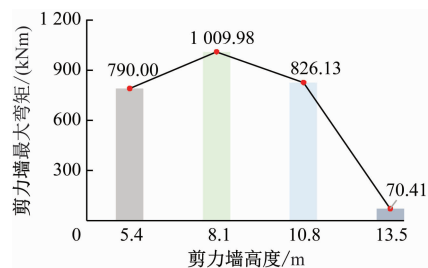


图 13 不同剪力墙高度下剪力墙最大弯矩变化

Fig. 13 Variation in maximum bending moment of the shear wall with different shear wall heights

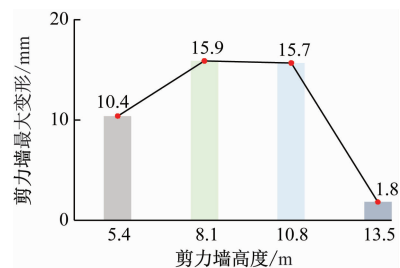


图 14 不同剪力墙高度下剪力墙最大变形变化

Fig. 14 Variation in maximum deformation of the shear wall with different shear wall heights

以上分析结果说明剪力墙高度的变化对反力架和剪力墙结构受力及变形产生的影响非常显著:当剪力墙高度小于 13.5 m 时,反力架和剪力墙自身的受力和变形承受能力皆较弱;当剪力墙高度达到 13.5 m 时,即上、下端部通过植筋锚入主体结构中板、底板,此举大大增强了反力架及剪力墙自身的结构刚度,使反力架和剪力墙的结构受力变形均较

合理。

因此,在现场施工时,选择设置剪力墙高度为13.5 m,其上、下端部通过植筋分别锚入主体永久结构中板和底板。

通过上述有限元结果分析可知,现场采用了纵向长度为8 m、厚度为0.8 m、高度为13.5 m的剪力墙作为混凝土反力架后靠,在盾构机始发阶段,保证了本工程的顺利始发。

#### 4 结语

通过对上海轨道交通机场联络线张江站一度假区站盾构始发反力架与后靠体系进行有限元分析,得到了反力架与剪力墙间不同连接方式对结构受力变形的影响,并通过控制变量法得到了剪力墙的纵向长度、厚度和高度分别对反力架结构受力变形的影响,具体结论如下:

1) 反力架与主体结构之间采用贴合连接方式更符合实际,避免了在永久结构上大量植筋对其造成的损坏;同时反力架与主体结构之间采取贴合连接方式,既释放了反力架上所受弯矩,又在一定程度上减小了反力架受力时对永久结构的影响。

2) 随着剪力墙纵向长度的加长,反力架和剪力墙结构受力和变形的承受能力均得到了较大幅度的提高,综合考虑工程安全性和经济性原则,将剪力墙纵向长度设置为8 m。

3) 剪力墙厚度的变化对反力架受力变形影响较小,且当剪力墙厚度达到0.8 m以上时,即可满足反力架刚度需求;同时剪力墙厚度的提高对其受力具有不利影响,但对其变形承受能力具有提升的效果,经综合所有因素进行考虑,将剪力墙厚度设置为0.8 m。

4) 剪力墙高度的变化对反力架和剪力墙结构受力及变形产生的影响非常显著,当剪力墙高度小于13.5 m时,反力架和剪力墙自身的受力和变形承受能力皆较弱,当剪力墙高度达到13.5 m时,满足反力架及剪力墙自身的结构刚度需求,综合考虑将剪力墙高度设置为13.5 m。

5) 由于绝大多数工况下,反力架的最大变形都发生在斜梁基座或跨中位置,因此施工时,应加强该部位配筋,并在盾构机已掘进一定安全距离之后,将首负环管片与反力架上斜梁处传力用的钢支撑拆除,避免上斜梁处结构变形过大,有效降低了施工风险。

#### 参考文献

- [1] 竺维彬,鞠世健.复合地层中的盾构施工技术[M].北京:中国科学技术出版社,2006:20-74.  
ZHU Weibin, JU Shijian. Shield construction technology in composite strata[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2006: 20-74.
- [2] 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.
- [3] 王凯,张良辉,孙振川,等.基于PSO算法的反力架设计与优化[J].隧道建设(中英文),2019,39(2):302.  
WANG Kai, ZHANG Lianghui, SUN Zhenchuan, et al. Design and optimization of counterforce frame based on particle swarm optimization algorithm[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2): 302.
- [4] 杜万强.大断面燕尾段隧道盾构长距离空推始发技术[J].铁道建筑技术,2013(5):25.  
DU Wanqiang. Tunnel shield traversing & launching technology for long distance in large section dove-tail tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2013(5): 25.
- [5] 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.
- [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] 唐卫平,赵林,郑勇.大直径泥水平衡盾构机12‰下坡隧道双机同井洞内始发控制技术[J].铁道标准设计,2013,57(9):75.  
TANG Weiping, ZHAO Lin, ZHENG Yong. Launching technology of two large-diameter slurry shield machines in the same working shaft on a 12‰ downhill tunnel[J]. Railway Standard Design, 2013, 57(9): 75.
- [8] 王义强.地铁盾构施工中始发反力架设计及受力分析[J].价值工程,2020,39(8):140.  
WANG Yiqiang. Design and force analysis of starting counterforce frame in metro shield construction[J]. Value Engineering, 2020, 39(8): 140.

· 收稿日期:2022-08-09 修回日期:2022-09-02 出版日期:2024-10-10  
Received:2022-08-09 Revised:2022-09-02 Published:2024-10-10  
· 第一作者:魏驰,工程师,515065631@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