

砂卵石地层大直径盾构施工的关键技术

王春波¹ 孙建营¹ 武亦超¹ 方华昌²

(1. 中国人民武装警察部队警官学院基础部, 610213, 成都; 2. 中交一公局集团有限公司, 100024, 北京)

摘要 [目的] 总结分析砂卵石地层大直径盾构施工中盾构机选型、盾构始发与接收、盾构掘进姿态控制等施工关键技术, 并提出具体的施工控制参数与施工控制措施, 以减轻刀盘刀具磨损、降低地层损失、减小地层沉降变形。[方法] 针对砂卵石地层结构松散、颗粒无胶结或弱胶结、颗粒粒径大、透水性强的工程结构特性, 采用理论分析、现场监测等方法, 从盾构机选型、盾构始发接收、盾构掘进姿态控制、盾构刀盘刀具的检测维修等方面深入分析砂卵石地层大直径盾构施工关键技术。[结果及结论] 大直径盾构的刀盘开口率、刀盘刀具类型、渣土改良方案等应根据地层结构特性进行特殊设计, 且有利于盾构排渣和超前切割; 盾构井端头宜采取地层注浆加固、大管棚支护、施工降水等综合加固措施以保证大盾构始发或接收时地层的稳定; 大直径盾构的掘进施工应重点控制刀盘转速、出渣量、出渣温度等参数, 并应适当增大注浆量, 提高渣土改良效果, 避免过大超挖, 保证地层损失处于合理范围内。采用上述施工参数与施工措施后, 盾构掘进风险可控, 施工质量与施工效率明显提升, 同时大大降低了施工成本。

关键词 大直径盾构; 砂卵石地层; 刀盘刀具; 地层加固; 掘进姿态

中图分类号 TU455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.035

Key Technologies of Large-diameter Shield Tunneling in Sand and Gravel Strata

WANG Chunbo¹, SUN Jianying¹, WU Yichao¹, FANG Huachang²

(1. Department of Basic, Officers College of PAP, 610213, Chengdu, China; 2. China First Highway Engineering Co., Ltd., 100024, Beijing, China)

Abstract [Objective] Key construction technologies for large-diameter shield tunneling in sand and gravel strata are summarized and analyzed, including shield machine model selection, shield launching and receiving, and shield excavation posture control. Specific construction control parameters and measures are proposed to reduce cutterhead tool wear, decrease stratum losses, and minimize land subsidence and deformation.

[Method] Considering the engineering structural characteristics, such as the loose structure, non-cemented or weakly ce-

mented particles, large particle size, and strong permeability of sand and gravel strata, theoretical analysis and on-site monitoring methods are employed to deeply analyze the key construction technologies for large-diameter shield tunneling in sand and gravel strata, from aspects of shield machine model selection, shield originating and receiving, shield excavation posture control, as well as shield cutterhead tool detection-maintenance.

[Result & Conclusion] The cutterhead opening rate, cutterhead tool models, and spoil improvement scheme of large-diameter shield should be specially designed according to the stratigraphical structure characteristics, facilitating efficient shield spoil discharge and advance cutting. Comprehensive reinforcement measures, such as stratum grouting consolidation, large pipe shed support, and construction dewatering, should be adopted at shield tunnel shaft end to ensure strata stability during large-diameter shield launching or receiving. In large-diameter shield tunneling, the control of parameters such as cutterhead rotational speed, spoil discharge rate, and spoil discharge temperature should be emphasized, along with appropriate increases in grouting volume to improve spoil modification effects and avoid excessive over-excavation, keeping stratum losses within a reasonable range. By implementing the aforementioned construction parameters and measures, the risk of shield excavation can be controlled, while significantly enhancing construction quality and efficiency, and substantially reducing construction costs.

Key words large-diameter shield; sand and gravel strata; cutterhead tool; ground reinforcement; excavation posture

0 引言

随着我国基础设施建设的蓬勃发展, 盾构法隧道以其掘进速度快、施工安全性高、对周边环境扰动小等优点成为隧道工程乃至地下空间工程首选的施工方法之一。现代盾构隧道工程的发展逐渐呈现出直径大、埋深深、掘进距离长三大发展趋势。目前, 盾构按其直径 ϕ 分类还没有统一的标准, 通常认为 $6\text{ m} < \phi \leq 14\text{ m}$ 时为大直径盾构, $14\text{ m} <$

$\phi \leq 17$ m 时为超大直径盾构,而 $\phi > 17$ m 则为超特大直径盾构^[1]。自 1994 年日本东京湾隧道首次采用 $\phi 14.14$ m 盾构的施工开始,截至 2020 年 5 月,全球共有 56 处超大直径盾构隧道,其中我国香港的屯门—赤鱗角隧道盾构直径为 17.63 m,为全球最大直径盾构隧道^[2]。盾构直径的增大不仅会增加盾构施工成本,还会大大增加盾构进出洞、盾构掘进姿态、盾构注浆、盾构出渣等一系列施工过程风险。文献[3]总结分析了大直径盾构在高水压、强透水、软硬不均且伴有断层破碎带的复合地层中施工风险;文献[4]重点对超大直径土压平衡盾构开挖面稳定性控制、盾构姿态与轴线控制、长距离小曲线连续出土等掘进参数进行了研究;文献[5]总结了超大直径泥水盾构隧道穿越淤泥质粉质黏土、硬塑膨胀性黏土、粉细砂与砾砂(岩)复合等复杂地层时的施工难点与关键技术;文献[6]结合工程案例对盾构设备、隧道内部结构施工、盾构始发与到达施工工艺、近距离穿越建构筑物等相关施工技术经验进行了总结。上述文献基本没有涉及砂卵石地层,或者只是论述了大直径盾构施工的某一方面,而没有从盾构机选型、盾构掘进施工、盾构始发与到达等全过程施工关键技术进行研究分析。

砂卵石地层结构松散、颗粒无胶结或弱胶结、颗粒粒径大、透水性强,砂卵石地层中大直径盾构的施工往往会表现盾构掌子面稳定性差、刀盘刀具磨损严重、地层损失率高、沉降变形大、盾构管片上浮等一系列工程问题。本文以成都地铁 17 号线一期工程的大直径盾构隧道为背景,结合砂卵石地层工程地质、水文地质特性,总结分析砂卵石地层中大直径盾构机选型、盾构始发与到达、盾构掘进姿态控制、渣土改良效果、地层损失率、地层沉降控制等施工关键技术,为后续类似工程的施工提供借鉴和指导。

1 工程概况

成都地铁 17 号线一期工程为成都第一条在砂卵石地层中掘进的大直径盾构隧道工程。其中九江北站至一期设计终点区间道全长约 4.3 km,线路最小平曲线半径为 600 m,最大纵坡坡度为 -25% ,隧道埋深为 8.7 ~ 24.1 m,采用直径为 8.6 m 土压平衡盾构机掘进施工,成形隧道外径为 8.3 m,内径为 7.5 m。隧道先后下穿绕城高速、过街天桥、江安河大桥等多处建构筑物。盾构区间隧道上覆土层

从上到下依次为人工填土及杂填土、粉质黏土、稍密砂卵石、中密砂卵石、密实砂卵石。卵石粒径一般为 20 ~ 200 mm,个别漂石最大粒径可达 380 mm。典型地勘钻孔岩心取样如图 1 所示。



图1 局部地勘钻孔岩心取样

Fig. 1 Core sampling from local geological exploration drilling

2 砂卵石地层大直径盾构施工关键技术

2.1 盾构机选型

对于大直径盾构的掘进施工,地质是基础,盾构机选型是关键,掘进施工是难点。区间砂卵石分选性差、渗透系数大、富水性强,且颗粒粒径较大,砂卵石成分以石英岩、花岗岩、石灰岩为主。大直径盾构在掘进过程中很可能会出现以下问题:①刀盘刀具磨损严重,掘进缓慢;②掌子面稳定性差,保压换刀困难;③土压控制较难,与螺旋输送机排土匹配性差,地层沉降难以控制。

针对上述可能出现的工程问题,盾构机在选型上重点考虑了刀盘开口率、刀盘刀具耐磨性、渣土改良等特殊设计需求。刀盘采用 6 辐条 + 6 面板复合刀盘,刀盘上安装有单双刃滚刀、刮刀、先行刀、超前刀等多种刀具,且配置 3 处液压型磨损检测刀和 2 处磨损检测条,能及时发现刀具及刀盘磨损情况。盾体外周设置了 11 个超前注浆孔,在必要时可对开挖面前方土体进行超前注浆。盾构设有人舱及气动保压系统。气动保压系统在断电时仍能正常工作,以确保带压换刀时人舱内人员的安全;刀盘面板均匀设置 10 个刀盘喷口,9 路泡沫,4 路膨润土(其中 3 路与泡沫共用互换),每个喷口均为单管单泵设计,提高了渣土改良效果,排渣顺畅,盾构刀盘刀具如图 2 所示。

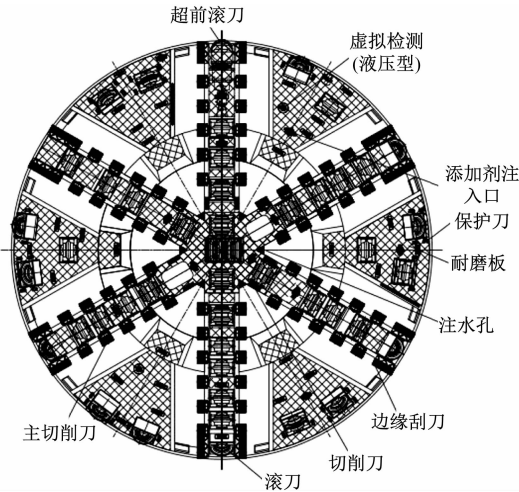


图2 直径为8.6 m的盾构刀盘刀具布置示意图
Fig.2 Diagram of cutterhead tool layout of 8.6 m-diameter shield

2.2 盾构始发/接收

大直径盾构盾构井的平面尺寸更大、基坑开挖深度更深,所需施工场地的面积也更大。大直径盾构在砂卵石地层中始发时,盾构姿态控制难度高,压力建仓困难。尤其是当盾构覆土厚度小于1倍洞径时,极易发生击穿冒顶或地面坍塌等事故。盾构的接收是盾构施工阶段的最后一个风险环节,盾构与洞门环梁预留150 mm间隙。当盾构掘进到达区后,关键要精准测量,保证将盾构机轴线与线路中线的偏差控制在允许范围内。

在中密或密实砂卵石层中,盾构始发井/接收井端头部位通常采用降水、地面深孔注浆、洞内大管棚(管棚内注浆)三项处理措施,如表1所示。该区间盾构始发段的实测地面沉降等值线图如图3所示。

2.3 盾构掘进姿态控制

该区间盾构隧道主要位于中密砂卵石及密实砂卵石地层中。若盾构机在砂卵石地层中长距离掘进施工,则不仅盾构刀盘将会严重磨损,需要常压更换刀盘,而且地层沉降变形也难以控制。尤其在盾构下穿河流、居民房及高架桥梁等重要建(构)筑物时,盾构掘进控制技术难度大、施工风险高。对此,施工中采用如下技术参数:

1) 严控盾构掘进参数。保持盾构平稳推进,尽量勤于纠偏并减少纠偏,最大限度地减少对正面土体的扰动,减少超挖量。盾构姿态预警值宜取±50 mm,掘进速度宜控制为60~70 mm/min,刀盘转速宜控制为1.4~1.6 r/min。

表1 砂卵石地层大直径盾构始发接收地层的处理措施
Tab. 1 Treatment measures for large-diameter shield launching and receiving ground layers in sand and gravel strata

处理措施	处理范围	施工要求
降水	距盾构隧道结构线外侧3 m 范围内	水位降至盾构隧道结构底面以下不少于1 m
地面袖阀管深孔注浆	距中心线左右横向各8.3 m;纵向长15 m;竖向至盾构隧道中心线以上8.3 m 处	采用φ80 mm 袖阀管注浆;水泥浆水灰比为0.8~1.0,注浆压力为0.2~0.4 MPa,注浆孔间距为1.0 m×1.0 m,并根据实际情况适当调整
洞内大管棚(管棚内注浆)	管棚覆盖范围对应的圆棚(管棚心角为120°,管棚口位于开挖轮廓线以外200 mm	采用φ108 mm、壁厚6 mm 无缝钢管,环向间距为300 mm;注浆孔孔径为10 mm,孔间距为200 mm

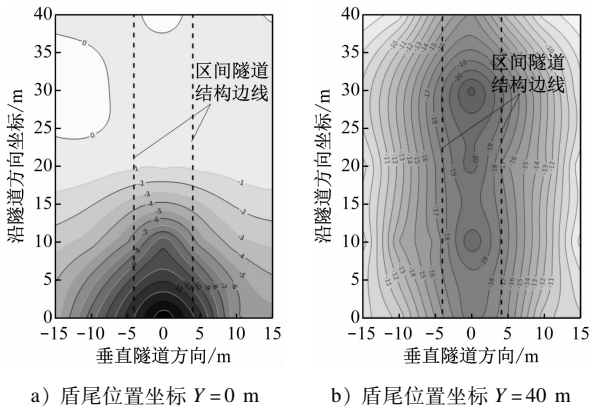


图3 盾构始发段的实测地面沉降等值线图/mm

Fig.3 Contour map of field-measured land subsidence at shield tunneling launching section/mm

2) 加强出渣管理。渣土改良宜采用2% 泡沫原液,8~12 倍发泡率;螺旋机出渣量的单环偏差不大于5 m³,三环偏差不大于10 m³;出渣温度不宜超过40 ℃。

3) 提升注浆加固效果。同步注浆的每环注浆量不应小于13 m³;注浆压力应为注浆点静水压力与土压力之和,实现尽量填补而不发生破裂;同步注浆的速度应与盾构掘进速度相匹配;洞内注浆优先选用水泥浆,多采用φ42 mm(壁厚为3.5 mm)钢花管;注浆应及时,以免地层损失过大,浆液无法填充空隙,难以达到预期效果。

4) 盾构刀盘及刀具检修采用新工艺。砂卵石地层对盾构机刀盘及刀具的磨损较大,因此长距离掘进施工时,需要经常更换刀具或者对刀盘进行修理。目前应用较多的为开仓换刀法,传统开仓换刀施工风险高,工效低,成本高。该区间施工中创新

性地采用了玻璃纤维筋中空孔桩检修施工工艺,先施作大直径玻璃纤维筋桩,并在其初凝后、终凝前利用钻机形成偏心中孔桩。该施工工艺可以保证在不开仓的情况下对盾构机刀盘进行检修或者清理,还可以降低施工成本、缩短施工工期,大大降低了进仓作业人员施工风险。玻璃纤维筋中孔桩如图 4 所示。

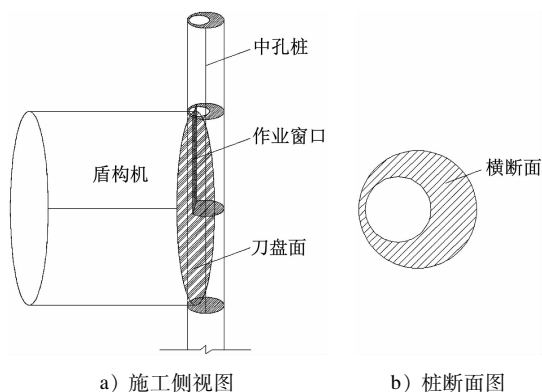


图 4 玻璃纤维筋中孔桩示意图

Fig. 4 Diagram of mid hole pile with glass fiber reinforcement

3 结语

现代盾构隧道工程主要有盾构直径大、埋深深、掘进距离长等三大发展趋势,且不同的地层掘进施工工艺、施工技术相差较大。砂卵石地层具有结构松散、颗粒无胶结或弱胶结、颗粒粒径大、透水性强等特性。大直径盾构在砂卵石地层中掘进,主要遇到掌子面稳定性差、刀盘刀具磨损严重、地层沉降控制较难等工程问题。本文主要以成都地铁 17 号一期工程九江北站至设计终点区间隧道为工程背景,针对砂卵石地层独特的工程特性,从盾构机选型、盾构始发接收、盾构掘进姿态控制及盾构刀盘刀具的检测维修等方面总结分析砂卵石地层大直径盾构施工关键技术,以期后续类似工程的施工提供借鉴和指导。

参考文献

- [1] 吴世明. 大直径盾构隧道技术工程示范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
WU Shiming. Demonstration of large diameter shield tunnel technology and engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [2] 孙恒, 冯亚丽. 全球超大直径隧道掘进机数据统计[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(6): 921.
SUN Heng, FENG Yali. Statistics on global super-large diameter tunnel boring machines [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(6): 921.
- [3] 王焰. 城际铁路大直径泥水盾构施工风险及对策: 以佛莞城际铁路狮子洋隧道工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 983.
WANG Yan. Construction risks and countermeasures for large-diameter slurry shield used in Shiziyang tunnel on Foshan-Dongguan Intercity Railway [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(6): 983.
- [4] 戴仕敏. 超大直径土压平衡盾构隧道施工关键技术[J]. 施工技术, 2011, 40(18): 1.
DAI Shimin. Key construction technologies of super large-diameter earth-pressure-balance shields [J]. Construction Technology, 2011, 40(18): 1.
- [5] 陈健, 黄永亮. 超大直径泥水盾构施工难点与关键技术总结[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊 2): 637.
CHEN Jian, HUANG Yongliang. Summary of key technologies and construction difficulties in large diameter slurry shield tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S2): 637.
- [6] 王吉云. 近十年来中国超大直径盾构施工经验[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 330.
WANG Jiyun. Super-large diameter shield tunneling technologies in China in recent decade [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(3): 330.

· 收稿日期:2021-08-23 修回日期:2021-09-14 出版日期:2024-01-10
Received:2021-08-23 Revised:2021-09-14 Published:2024-01-10
· 通信作者:王春波,高级工程师,BoChunWang@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

欢迎订阅《城市轨道交通研究》
服务热线 021—56830728 转 821