

富水硬岩地层泥水平衡盾构掘进参数的优化分析*

卢泽霖¹ 王旭春¹ 曹云飞¹ 江玉生²

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 266033, 青岛;

2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 100083, 北京//第一作者, 博士研究生)

摘要 泥水平衡盾构穿越富水硬岩地层时,合理的掘进参数是盾构安全高效掘进的基础。依托青岛地铁8号线某区间泥水平衡盾构段项目,分析了盾构穿越富水硬岩地层的总推力及贯入度等参数。对刀具与岩体作用荷载值和刀具荷载设计值进行了计算,提出了盾构掘进参数的优化方案,并分析了优化后的掘进效率。结果表明:总推力可以控制刀盘贯入度,宜优先通过控制总推力增加盾构掘进速度;刀具与岩体作用荷载为4 277.87 kN,远小于9 528.22 kN的设计荷载值,故可适当增加刀具与岩体作用荷载至设计荷载值的75%;盾构总推力提升至18 000 kN后,刀盘贯入度增加,每环开挖耗时较优化前减少了38.7%,施工效率增加了一倍。

关键词 泥水平衡盾构;硬岩地层;掘进参数

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.030

Optimization Analysis of Slurry Balance Shield Tunneling Parameters in Water-rich Hard Rock Stratum

LU Zelin, WANG Xuchun, CAO Yunfei, JIANG Yusheng

Abstract When slurry balance shield is excavating through water-rich hard rock stratum, reasonable tunneling parameters provide the basis to ensure the safe and efficient excavation of shield tunnel. Relying on a slurry balance shield construction project in an interval of Qingdao Metro Line 8, the parameters of shield tunnel excavating through water-rich hard rock stratum including total thrust and penetration depth are analyzed. Calculation is carried out on cutter tool and rock action load, and cutter tool load design value. Optimization scheme of shield tunneling parameters is proposed, and the optimized excavation efficiency is analyzed. Results show that: the total thrust can control the penetration of cutter tool, priority should be given to the total thrust control to increase shield tunneling speed. The cutter tool and rock action load is 4 277.87 kN, much smaller than the design load value of 9 528.22 kN, so the cut-

ter and rock action load can be adequately increased to 75% of the design load value. After the shield thrust is increased to 18 000 kN, the cutter tool penetration is increased. The excavation time of each ring is 38.7% less than that before optimization, and the construction efficiency is doubled than before.

Key words slurry balance shield; hard rock stratum; tunneling parameters

First-author's address School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, 266033, Qingdao, China

盾构法因其掘进速度快、施工安全性好、自动化程度高等特点,已经广泛运用于跨越江河湖海的隧道施工中,如南京扬子江隧道、武汉三阳路长江隧道等。

国内外学者对盾构掘进参数做过大量的研究^[1-2],如文献[3]研究了砂卵石地层泥水平衡盾构的掘进参数,通过线性拟合研究了总推力与掘进速度的相关性,发现加大盾构总推力能适当提高掘进速度;文献[4]研究了黏土地层半舱气压法下盾构掘进参数的变化特征,给出了掘进速度与其他掘进参数的关系式;文献[5]对富水圆砾地层段和圆砾泥岩复合地层土压平衡盾构的掘进参数进行对比分析,得到了富水圆砾地层盾构掘进参数的合理选择范围。由此可见,在已有的文献中,对于掘进参数的研究多是结合地层情况展开的,但针对富水硬岩地层泥水平衡盾构施工的工程研究相对较少。掘进参数是影响盾构施工安全和效率的关键,也关系项目的成本和工期。

本文依托青岛地铁8号线某区间泥水平衡盾构施工项目,研究了富水硬岩地层中盾构总推力、贯入度等掘进参数,得到了影响泥水平衡盾构掘进效率的关键因素。通过对盾构总推力和刀具荷载设计值进行计算,提出富水硬岩地层泥水平衡盾构掘

* 国家重点研发计划项目(2018YFC1505302)

进参数的优化方案,并对参数优化前后的掘进效率进行对比分析。

1 青岛地铁 8 号线某区间泥水平衡盾构施工项目工程概况

青岛地铁 8 号线某区间泥水平衡盾构施工段为双线单洞隧道,全长为 7 784.37 m。其左线隧道长为 3 897.08 m,右线隧道长为 3 887.29 m;隧道线间距为 16~125 m,最小曲线半径为 800 m,线路最大纵坡为 28‰,隧道埋深为 26.49~51.20 m。区间隧道主要穿越地层为粉质黏土、中粗砂、泥质粉砂岩、中风化泥质粉砂岩、强风化火山角砾岩、中风化火山角砾岩、块状碎裂中风化火山角砾岩、砂土状碎裂凝灰岩及微风化凝灰岩。隧道在第 990 环处由强风化火山角砾岩地层进入微风化凝灰岩硬岩地层。该处隧道地质纵断面图如图 1 所示。该富水硬岩区段位于海平面 40 m 以下,地下水丰富,以松散岩体孔隙水和基岩裂隙水为主,局部地区与胶州湾海水相通。第 990 环—第 1 300 环隧道断面岩石基本质量等级为Ⅲ级,考虑地下水和局部节理裂隙发育,围岩等级按Ⅳ级考虑。

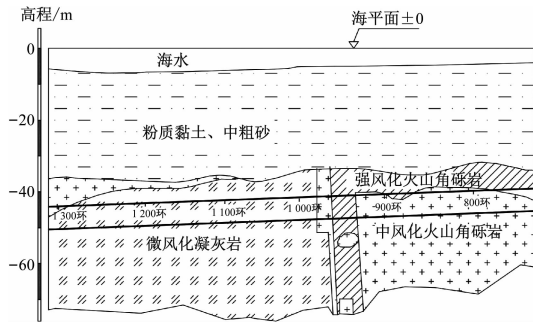


图 1 青岛地铁 8 号线某区间泥水平衡盾构施工段地质纵断面图

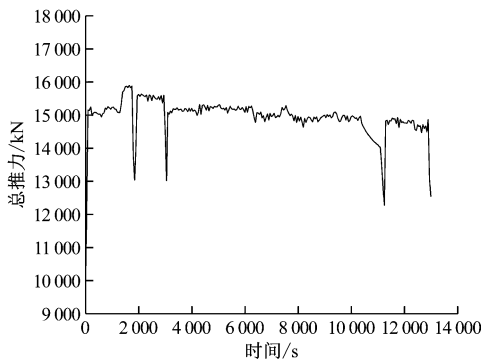
Fig. 1 Geological longitudinal section of the slurry balance shield construction section in an interval of Qingdao Metro Line 8

该区间盾构机选用海瑞克 S-888 型泥水盾构机。盾构机刀盘采用辐条+面板复合式刀盘,开口率为 36%,采用尺寸为 45.72 cm (18 in) 的滚刀。刀盘配备有 4 把双刃滚刀、39 把单刃滚刀、60 把刮刀、12 把边刮刀、12 把撕裂刀和 6 把先行撕裂刀。盾构机开挖直径为 7.02 m,管片衬砌外径为 6.70 m、内径为 6.35 m,衬砌厚度为 0.35 m,环宽为 1.50 m。

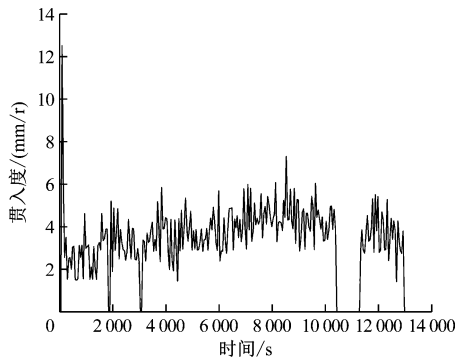
2 青岛地铁 8 号线富水硬岩地层盾构掘进参数分析

2.1 盾构掘进参数分析

通过青岛地铁 8 号线盾构施工监测系统,选取第 1 022 环的盾构总推力、刀盘贯入度进行分析,如图 2 所示。在第 990 环处盾构机由强风化和中风化火山角砾岩地层进入微风化凝灰岩硬岩地层,掘进速度明显变慢,掘进效率较低,说明当前掘进参数已经不再适用于该富水硬岩地层的掘进。



a) 盾构总推力



b) 刀盘贯入度

图 2 青岛地铁 8 号线第 1 022 环掘进参数

Fig. 2 Tunneling parameters of the No. 1 022 Ring of Qingdao Metro Line 8

盾构的总推力和刀盘转速属于主动参数,可人为设置。预设盾构机推力为 15 000 kN,刀盘转速为 2.0 r/min,盾构总推力变化曲线如图 2 a)。由图 2 a) 和图 2 b) 可知,在 1 500~1 800 s 处,盾构总推力提升至 16 000 kN,相应地刀盘贯入度亦提升至 3.5~4.6 mm/r。在第 1 900 s 和第 3 100 s 处,盾构机总推力降低至 13 000 kN,刀盘转速不变,此时贯入度降为 0。可见,在岩质均一的硬岩地层中控制盾构总推力可以调整刀盘贯入度,进而控制盾构的掘进速度。

2.2 盾构掘进效率分析

通过对第 1 021 环—第 1 040 环的掘进速度、每环开挖耗时以及管片拼装耗时进行统计,得到当前掘进条件下每环衬砌开挖效率统计表,如表 1 所示。

表 1 当前掘进参数条件下每环衬砌开挖效率统计表
Tab.1 Excavation efficiency statistics of each ring lining under the current tunnelling parameter conditions

管片环号	掘进速度/(mm/min)	开挖耗时/h	拼装耗时/h
1 021	6.15	4.07	0.48
1 022	8.10	3.09	0.59
1 023	9.07	2.76	0.51
1 024	7.35	3.40	0.57
1 025	7.15	3.50	0.53
1 026	8.64	2.89	0.58
1 027	7.46	3.35	0.46
1 028	6.23	4.01	0.58
1 029	5.67	4.41	0.52
1 030	7.24	3.45	0.53
1 031	7.03	3.56	0.48
1 032	9.00	2.78	0.51
1 033	8.26	3.03	0.57
1 034	9.24	2.71	0.52
1 035	9.12	2.74	0.49
1 036	8.01	3.12	0.53
1 037	7.57	3.30	0.51
1 038	8.26	3.02	0.55
1 039	9.23	2.71	0.51
1 040	10.11	2.47	0.52

由表 1 可以看到,在当前的掘进参数条件下,盾构掘进速度为 5.67~10.11 mm/min,每环衬砌开挖耗时为 2.47~4.41 h,开挖掘进耗时较长。管片拼装耗时为 0.42~0.59 h,拼装总体耗时较为稳定,均在 0.5 h 左右。盾构机在第 1 029 环施工时,耗时最长,为 4.93 h。按此施工效率,盾构在穿越富水硬岩地层时最多每日掘进 4~5 环。由于当前盾构掘进效率无法达到项目工期要求,因此必须提高盾构掘进速度。

盾构掘进速度主要是由刀盘转速和贯入度决定。当刀盘转速提高时,刀盘最外侧滚刀线速度会显著增加,进而导致周边滚刀磨损严重。因该隧道位于海底,开舱换刀需要带压作业。海底带压换刀不仅需要大量的时间,而且存在一定的安全风险。因此,当前条件下可以通过提高刀具贯入度来增加

盾构机的掘进速度。由地质断面图可知,当前地层岩性较为均一,拟采用增加盾构总推力的方式增加刀盘贯入度,进而提高盾构机的掘进效率。

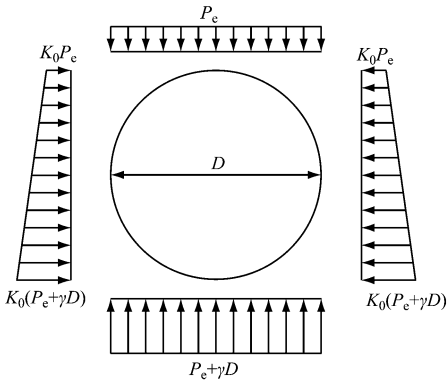
3 盾构掘进参数优化方案

3.1 刀具与岩体作用荷载计算

为了防止盲目增加总推力导致刀具过载,造成盾构刀具的非正常磨损,需要对当前掘进条件下盾构机的刀具与岩体作用荷载进行计算。盾构机掘进时,盾体的总推力 F 主要是由刀具与岩体的作用荷载 F_1 、盾体与地层之间的摩擦阻力 F_2 、盾构机与管片之间的摩擦力 F_3 、后配套台车的牵引力 F_4 以及刀盘对开挖面的支撑荷载 F_5 等组成^[6]。盾构机推力计算式为:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \tag{1}$$

盾构机与地层之间的摩擦力由两部分组成,一部分是盾构机自重产生的摩擦阻力,另一部分是围岩压力作用在盾壳上产生的摩擦阻力。隧道围岩压力分布如图 3 所示。



注: D 为开挖直径; P_e 为隧道上部地层竖向土压力; K_0 为水平侧压力系数; γ 为洞身土体的重度。

图 3 隧道围岩压力分布图
Fig.3 Distribution of surrounding rock pressure in tunnel

故盾构与地层之间摩擦力可以通过式(2)进行计算:

$$F_2 = 0.25\pi DL\mu_1(2P_e + 2K_0P_e + K_0\gamma D) + \mu_1mg \tag{2}$$

式中:

- L ——盾体长度;
- μ_1 ——盾壳与地层之间的摩擦因数;
- g ——重力加速度;
- m ——盾体总质量。

盾构机与管片之间的摩擦力主要由管片在脱出盾尾之前与盾体内壁的摩擦力、管片与盾尾刷之

$$K_s = F_{\max}/F_d \tag{7}$$

式中：
 K_s ——刀具承载力安全系数；
 F_d ——刀具承载力设计值。

由刀具的布置可知刀具额定荷载和各刀具安装角度,将参数代入式(6)中可以计算得到刀具极限荷载 F_{\max} 为 11 910.28 kN。 K_s 通常取 1.25,代入式(7)中可得 F_d 为 9 528.22 kN。

由上述计算可知,刀具荷载设计值为 9 528.22 kN,而在当前总推力条件下掘进时刀具与岩体作用荷载仅为 4 277.87 kN,刀具切削岩体的作用力不足刀具荷载设计值的 50%。这说明盾构在硬岩地层掘进过程中,当前的总推力并没有较好地发挥刀具的切削作用,故可以将刀具与岩体作用荷载增加至刀具设计荷载的 75%,即刀具与岩体作用荷载增大至 7 146.15 kN。将优化后的刀具与岩体作用荷载代入式(1)中计算,得到参数优化后的盾构总推力为 17 868.28 kN。故盾构在该富水硬岩地层段掘进时,建议加大盾构机总推力至 18 000 kN,以此来提高盾构机的掘进效率。

4 参数优化后掘进效率分析

4.1 优化后盾构掘进参数分析

通过对刀盘设计荷载值进行计算,得到增加盾构总推力至 18 000 kN、保持原刀盘转速不变的优化方案。将优化后的掘进参数用于第 1 071 环—第 1 090 环的掘进,通过青岛地铁盾构施工监测系统采集数据,并选取第 1 089 环的盾构总推力、刀盘贯入度进行分析,如图 5 所示。

由图 5 a) 可以看到,掘进参数优化后单环管片

开挖用时由 13 050 s 减少至 8 000 s,单环管片掘进用时较优化前减少了 38.7%;由图 5 b) 可看出,掘进参数优化后刀具贯入度有明显提升,由原来的 4 mm/r 提升至 6 mm/r。

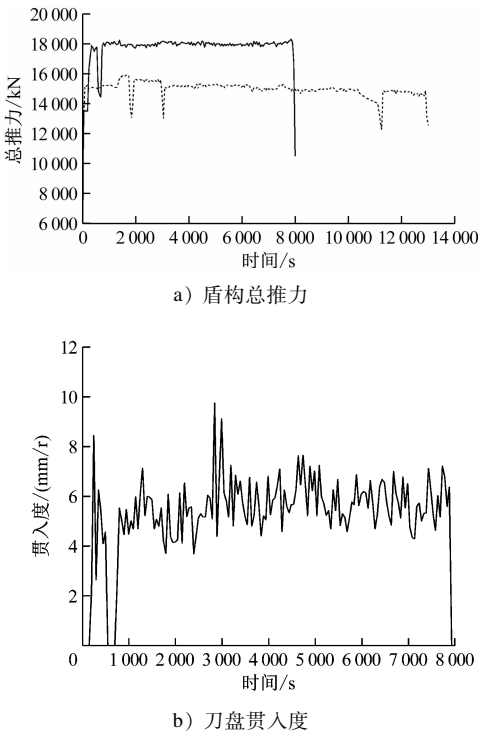


图 5 第 1 089 环掘进参数
Fig. 5 Tunneling parameters of the 1 089 Ring

4.2 优化后盾构掘进效率分析

通过对掘进参数优化后的第 1 071 环—第 1 090 环掘进速度、每环开挖耗时及管片拼装耗时进行统计,得到掘进参数优化后每环衬砌开挖效率统计表,如表 3 所示。

表 3 掘进参数优化后开挖效率统计表

Tab. 3 Excavation efficiency statistics after tunneling parameter optimization							
管片环号	掘进速度/(mm/min)	开挖耗时/h	拼装耗时/h	管片环号	掘进速度/(mm/min)	开挖耗时/h	拼装耗时/h
1 071	12.34	2.03	0.51	1 081	15.24	1.64	0.52
1 072	12.51	2.00	0.54	1 082	13.18	1.90	0.50
1 073	15.12	1.65	0.79	1 083	14.51	1.72	0.49
1 074	11.87	2.10	0.58	1 084	13.61	1.84	0.53
1 075	12.04	2.08	0.46	1 085	12.19	2.05	0.54
1 076	12.57	1.99	0.42	1 086	13.07	1.91	0.50
1 077	13.24	1.89	0.57	1 087	14.28	1.75	0.43
1 078	14.05	1.78	0.51	1 088	15.23	1.64	0.47
1 079	13.51	1.85	0.46	1 089	12.57	1.99	0.44
1 080	14.34	1.74	0.57	1 090	11.62	2.15	0.49

由表3可以看出,掘进参数优化后盾构掘进速度由原来的5.67~10.11 mm/min提升至11.62~15.24 mm/min。同时,掘进参数优化后每环管片开挖耗时为1.64~2.15 h,每环开挖耗时均明显减少。管片拼装耗时为0.42~0.79 h,与参数优化前基本保持不变。每环管片施工总耗时最长为第1070环,耗时为2.77 h。按此施工效率,掘进参数优化后最多每日掘进8~9环,施工效率相比于参数优化前提高了一倍。因此,对掘进参数进行优化后盾构施工的每环管片开挖耗时减少、日掘进环数显著增加,说明盾构在穿越富水硬岩地层时,合理控制盾构推力可以有效增加刀盘与岩体的作用荷载,从而提高刀盘贯入度,提升盾构掘进速度。

5 结语

依托青岛地铁8号线某区间泥水平衡盾构隧道施工项目,对盾构穿越富水硬岩地层的掘进参数进行了分析。通过对刀具与岩体作用荷载值和刀具荷载设计值进行计算,提出盾构掘进参数的优化方案,并分析了优化后的掘进效率。得到如下结论:

1) 盾构在富水硬岩地层中掘进时,可以通过控制盾构总推力和刀盘转速增加掘进速度。刀盘转速增加会加剧刀具磨损,因海底隧道带压换刀耗时且安全风险大,故优先采用增加总推力以增加盾构掘进速度。

2) 盾构刀具与岩层作用荷载为4 277.87 kN,远小于刀具设计荷载值9 528.22 kN。建议增大推力至刀具设计荷载值的75%,即优化盾构总推力为18 000.00 kN。

3) 采用将盾构总推力提升至18 000.00 kN而刀盘转速保持不变的掘进参数优化方案,盾构每环开挖耗时较参数优化前减少了38.7%,施工效率提高了一倍。

参考文献

- [1] 秦佳佳. 合肥地区复合地层盾构掘进参数控制研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020(3): 435.
QIN Jiajia. Study on parameters control of shield tunneling in composite strata in Hefei area [J]. Tunnel Construction, 2020(3): 435.
- [2] 陈桥,孙振川,张兵,等. 超大直径盾构在海域软土地层掘进推进系统参数控制方法研究——以汕头海湾隧道工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2020(1): 126.
CHEN Qiao, SUN Zhenchuan, ZHANG Bing, et al. Parameters control method for thrust system of super-large diameter shield boring in soft soil layer of sea area: a case study of Shantou Bay tunnel project [J]. Tunnel Construction, 2020(1): 126.
- [3] 徐冲. 砂卵石地层泥水平衡盾构隧道掘进参数控制[J]. 铁道建筑, 2019(2): 94.
XU Chong. Control of tunnel driving parameters of slurry balance shield in sandy gravel stratum [J]. Railway Engineering, 2019(2): 94.
- [4] 田勇坚,杜守继,孙伟良,等. 基于半舱气压法的大直径泥水盾构掘进参数与地表沉降研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019(10): 2530.
TIAN Yongjian, DU Shouji, SUN Weiliang, et al. Study on tunneling parameters and surface subsidence of large-diameter slurry shield based on half-chamber air pressure method [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019(10): 2530.
- [5] 杨旸,谭忠盛,彭斌,等. 富水圆砾地层土压平衡盾构掘进参数优化研究[J]. 土木工程学报, 2017(增刊1): 94.
YANG Yang, TAN Zhongsheng, PENG Bin, et al. Study on optimization boring parameters of earth pressure balance shield in water-soaked round gravel strata [J]. China Civil Engineering Journal, 2017(S1): 94.
- [6] 王凯,孙振川,牛紫龙,等. 超大直径泥水盾构软土地层推力、转矩分析与计算[J]. 隧道建设(中英文), 2019(12): 2074.
WANG Kai, SUN Zhenchuan, NIU Zilong, et al. Analysis and calculation on thrust force and torque of extra-large diameter slurry shield in soft soil [J]. Tunnel Construction, 2019(12): 2074.

(收稿日期:2020-09-03)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn