

城市富水砂卵石地层大断面泥水盾构工艺参数变化对施工成本的影响

王 颖

(中铁隧道集团北京地下直径线项目部,北京 100045)

[摘要] 以北京铁路地下直径线盾构隧道施工为例,介绍了不同工程地质及施工边界条件变化时的工艺参数选择原则,并通过对工艺参数调整时的施工效率、机具材料消耗统计,分析了成本的差异及变化。

[关键词] 盾构施工;工艺参数;经济分析

[中图分类号] U455 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)12-0108-05

1 前言

北京站至北京西站地下直径线工程盾构法隧道穿越北京城市中心区,工程环境条件十分复杂、沿线建(构)筑物众多,沉降控制标准要求极为严格。隧道穿越地层东西两端差异大,文章仅就已经掘进完成的1700 m隧道,对盾构施工过程中的人、材、机消耗的影响进行分析。

2 工程概况

盾构隧道总长5175 m,采用一台气垫式泥水平衡盾构施工,盾构直径12.04 m。已经掘进完成的1700 m隧道穿越的地层主要为卵石层、圆砾层,局部为粉质粘土层、粉土层和粉质粘土层等土层,一般粒径为20~60 mm,大于20 mm的颗粒含量约占总重的65%。实际揭露,盾构隧道穿越地层中存在 $\phi 650$ mm的大直径卵石,并且存在强度约30 MPa的砂卵石胶结层。水文地质主要为孔隙潜水和孔隙承压水,地层渗透系数每天为50~150 m。

工程沿线两侧地面建(构)筑物密集,煤气、热力、电力、污水等大型地下管线繁多。下穿西便门桥、天宁寺桥、护城河和4号线宣武门站等建(构)筑物,近邻箭楼、正阳门等重要文物。与地铁2号线平行近4 km,其中最近投影距离1.7 m,深度差15 m左右。

3 泥水盾构掘进施工主要影响因素

根据工程情况,工程边界条件变化对施工的影响主要为:

1)在卵石、圆砾地层,由于空隙率较大,对泥浆的粘度和比重等指标要求较高,需要经常补充新鲜浆液,造成同步注浆和二次注浆量较大,同时刀盘刀具、泥水循环系统的泵、阀、管路、各类精密传感器等损坏严重。沙砾+粘土地层由于细颗粒含量增加,泥浆比重上升较快,掘进困难的同时泥水分分离困难,造成用电量增加等一系列问题,特别是城市施工要求泥水无废浆排放,因而大大增加了工程施工难度。

2)埋深变化时,泥水压力的设置及掘进参数控制原则也有不同。浅埋地层下,泥水仓压力设定应适当低于理论计算值,盾构刀盘转速、掘进速度不宜过快,以减少刀盘对地层的扰动,并要求经常加入新拌制的高质量泥浆,以形成良好的泥膜,保证掌子面稳定,减少地面沉降。中埋-深埋条件下,泥浆向地层散失量增大,要经常补充高粘度新鲜浆液,以保证掌子面形成良好泥膜。

3)随着环境沉降控制标准的不断提高,重要风险部位除要采用超前注浆或其他地面措施外,必须对盾构掘进参数进行严格控制,确保掌子面泥膜的

[收稿日期] 2010-10-27;修回日期 2010-11-29

[作者简介] 王 颖(1976—),女,河南洛阳市人,工程师,主要从事施工经济性分析工作;E-mail: wangyin09@163.com

形成速度及质量、同步注浆压力和注浆量,及时进行二次注浆和二次加强注浆,也要加强监控量测,根据监测信息的变化不断优化各项掘进指标。

4 工程分段及工艺参数统计

4.1 工程段落划分

根据工程地质、隧道埋深、环境控制标准等工程边界条件,北京直径线部分盾构隧道组段情况如表1所示。

表1 工程段落划分
Table 1 Division of engineering segments

里程	段落长度/m	断面地质描述	细颗粒含量 (粒径 < 0.25 mm)	地层分类	备注
DK6 + 795 ~ DK6 + 612.477 DK6 + 524.187 ~ DK6 + 378.3 卵石层	328.41	绝大部分是卵石,有少量砂子,未发现粘土,一般粒径为 10 ~ 60 mm,最大粒径为 220 mm	粒径 > 2 mm 占 80 % ~ 95 % ; 0.25 mm < 粒径 ≤ 2 mm 占 5 % ~ 10 % ; 粒径 ≤ 0.25 mm 占 10 %	卵石土	属超浅埋 (< 1.5 D) - 浅埋段 (1.5 ~ 2 D), 下穿护城河、天宁寺 1# 匝道桥, 近距离侧穿天宁寺 2# 匝道桥, 沉降控制指标要求 < 10 mm
DK6 + 612.477 ~ DK6 + 544.044 DK6 + 378.3 ~ DK5 + 352.5	1 094.2	卵石含量减少,中细砂含量较高,有较多粘土块,一般粒径为 10 ~ 40 mm,最大粒径为 180 mm	粒径 > 2 mm 占 60 % ; 0.25 mm < 粒径 ≤ 2 mm 占 30 % ; 粒径 ≤ 0.25 mm 占 10 %	圆砾土	属中埋 - 深埋段 (> 2D), 下穿西便门桥、西便门桥东西高路基挡墙, 近距离侧穿西便门东里建筑群; 下穿长椿街过街通道, 侧穿 2 号线长椿街西喇叭口, 沉降值要求 < 5 mm
DK6 + 544.044 ~ DK6 + 524.187 DK5 + 352.5 ~ DK5 + 027	345.36	粘土和粉细砂含量较高,有大量粘土块,卵石一般粒径为 10 ~ 40 mm,最大粒径为 160 mm	粒径 > 2 mm 占 40 % ; 0.25 mm < 粒径 ≤ 2 mm 占 35 % ; 粒径 ≤ 0.25 mm 占 25 %	砾砂	属中埋 - 深埋段 (> 2 D), 近距离侧穿 2 号线

注: D 为隧道直径

4.2 工艺参数统计

盾构法施工中,盾构掘进过程的工艺参数主要包括盾构掘进参数、泥水性能指标、同步注浆及二次注浆相关参数,其差异主要出现在不同隧道埋深、工程地质及水文地质、不同施工边界条件下,不同的工艺参数所造成的地面沉降也有所区别^[1]。

4.2.1 各段掘进参数统计

盾构掘进参数包括泥水压力、流量和泥浆比重、粘度,刀盘转速、掘进扭矩、推力以及掘进速度等(见表2)。

表2 不同工况的掘进参数控制指标

Table 2 Controlling indexes of excavation parameters under different working conditions

组段 名称	刀盘转速 /(r·min ⁻¹)	刀盘扭矩 /(kN·m)	油缸推力 /kN	掘进速度 /(mm·min ⁻¹)
卵石层	0.9 ~ 1.0	≤ 7 000	≤ 6 500	6 ~ 21
圆砾层	0.95 ~ 1.05	≤ 7 000	≤ 7 000	6 ~ 18
砾砂层 + 粘土	0.95 ~ 1.15	≤ 8 000	≤ 8 500	3 ~ 15

4.2.2 其他工艺参数统计

其他工艺参数主要包括泥浆的性能指标、同步注浆以及二次注浆参数。

泥浆性能指标主要指泥浆的比重与粘度。对浅覆土地段,为加快泥膜成形及掌子面稳定,选用粘度较高和比重适中的泥浆^[2];对细颗粒含量较少的卵石层,为控制泥浆逸失,满足掌子面泥膜的形成及排渣需要,选择粘度和比重均较高的泥浆,随着地层中细颗粒含量的增加,尤其是对于粘土较多的地段,为尽量减少泥水分离负荷,选用粘度适中和比重较低的泥浆;对于沉降控制要求严格的重大风险点施工区段,掘进过程中选用高粘度泥浆,并提高泥浆的置换频率,以确保掘进过程中掌子面的泥膜质量和地面的沉降控制。

同步注浆的工艺参数主要包括注浆压力设定、注浆量控制(按注入率表示)以及注浆的浆液配比等。根据施工资料统计,注入率与地层中细颗粒含量、盾构的掘进速率正相关,而掘进速率主要根据

断面的地质条件和沉降的控制需要而定,因此在同等地质条件下,注浆量也与所处位置的沉降控制标准正相关。沉降控制指标要求越高,注浆持续时间越长,注入率越大。在特级环境风险控制点区段适当提高注浆压力,加大同步砂浆水灰比以减少隧道后期沉降尤为重要。

二次注浆包括二次回填注浆和二次加强注浆。二次回填注浆主要针对同步注浆收缩后的空隙进行回填。如地表或地下建(构)筑物变形且不稳定,则须进行二次加强注浆。二次注浆的主要控制参数包括与同步注浆的时间或距离间隔、注浆压力控制和注浆量控制。根据施工资料及沉降分析,对浅覆土、沉降控制要求较高的特级和一级风险点,二次注浆与同步注浆间隔在 18 m 以内最有效;对埋深较大、自稳性较好的卵石层以及一般风险控制段落,二次注浆与同步注浆间隔控制在 36 m 以内效果较好。二次注浆压力主要依据浆液压入口的水土压力而定,二次注浆回填量因地层的差异、同步注浆渗透也会不同。施工统计表明,砂卵石地层二次注浆量一般为同步注浆量的 15%~20%。在细颗粒含量较多以及浅覆土地层时,由于地层的渗透系数较小,二次注浆量也相应减少。二次加强注浆则视地层变形情况随机确定。泥浆参数与同步注浆情况如表 3 所示。

表 3 泥浆参数和同步注浆参数

Table 3 Parameters of slurry and synchronous grouting

组段名称	泥浆参数		同步注浆参数		
	粘度/ (Pa·s)	比重/ (t·m ⁻³)	补浆量/ (m ³ ·环 ⁻¹)	注浆压力 (高于开挖 仓泥水压 力)/bar	注入 率/%
卵石层	30~40	1.15	20	0.5	210
圆砾层	30~40	1.10~1.15	20	0.3~0.5	200
砾砂层	25~30	1.1	12~15	0.4	180

注:当盾构通过重要环境风险点及地面沉降控制指标要求较高(<5 mm)时,掘进过程选用高质量泥浆,泥浆粘度控制在 60~80 Pa·s,平均每环补浆量可达 30~40 m³;1 bar=100 kPa

5 各段工艺参数调整对施工成本影响

泥水盾构施工成本主要包括盾构机摊销、盾构机进出场及安拆费用、盾构掘进、盾构管片制作及拼装、端头加固、设备改造费用、措施费用、临建费用、安全及文明施工费等。根据现有施工资料分析,直径线成本组成比例如表 4 所示。

表 4 泥水盾构成本构成比率

Table 4 Cost constitution ratio of slurry shield

项目	比例/%
盾构机摊销	19.51
盾构机进出场及安拆费	0.46
盾构掘进	24.04
盾构管片	31.12
盾构下部结构	5.73
端头加固	0.91
设备改造费	6.88
风险评估措施	8.88
临建、现场办公费	0.96
安全及文明施工费	1.52

工艺参数变化引起的盾构掘进费用变化,主要表现在以下两方面:一是各组段施工中由于掘进速度差异、设备故障占施工时间比例差异导致施工降效,从而增加了人工、机械台班数量的消耗;二是由于设备负荷和掘进速度引起的盾尾密封油脂量、同步注浆量、主轴承密封及润滑油脂消耗数量变化。由于地质条件变化引起的刀具刀盘、尾刷、泥水管路及设备磨损、泥浆逸失及配比调整增加材料消耗、水电消耗,以及各类机具、配件、材料消耗数量的变化。直径线盾构组段施工效率及主要机具、材料消耗统计如下。

5.1 盾构不同组段施工效率对比

盾构不同组段施工效率的对比情况见表 5。

表5 盾构不同组段施工效率对比表

Table 5 Contrast of construction efficiency in different shield segments

组段名称	长度 /m	施工时间统计						施工效率	
		总用时/d	各部分占总用时/%				工序 间歇	平均掘 进速度 /(mm· min ⁻¹)	平均进度 /(m·d ⁻¹)
			掘进	管片 拼装	设备故障停机				
				盾构	泥水				
DK6 + 795 ~ DK6 + 612.477, DK6 + 524.187 ~ DK6 + 378.3 卵石层	328.41	185	10.43	11.62	14.97	8.81	54.16	12	2
DK6 + 612.477 ~ DK6 + 544.044DK6 + 378.3 ~ DK5 + 352.5 圆砾层	1 094.2	246	21.43	17.53	13.46	7.78	39.81	14	4
DK6 + 544.044 ~ DK6 + 524.187 DK5 + 352.5 ~ DK5 + 027 砾砂层	345.36	101	19.31	13.20	11.81	20.01	35.37	12	3

注:工序间歇主要包括停机换刀、管路延伸、设备定期保养以及相关辅助设备故障维修所占用的时间

5.2 各段落主要机具、材料消耗量对比

各段落机具材料消耗数量对比情况见表6。

表6 各段落机具材料消耗数量对比表

Table 6 Quantity consuming contrast of equipment material in each segment

名称	单价/元	每米消耗数量					
		卵石层		圆砾层		砂砾层	
		数量	金额/元	数量	金额/元	数量	金额/元
同步注浆/m ³	464.6	17.14	7 963.244	16.16	7 507.936	14.61	6 787.806
二次注浆/m ³	738.16	3.428	2 530.412	2.908 8	2 147.16	2.264 55	1 671.6
盾尾密封油脂/kg	24	206	4 944	86	2 064	154.09	3 698.16
主轴承润滑油脂/kg	35.79	22.36	800.264 4	3.71	132.780 9	—	0
主轴承密封油脂/kg	51.57	48.42	2 497.019	44.49	2 294.349	44.75	2 307.758
补充新浆(泥浆)/m ³	322.92	20	6 458.4	18	5 812.56	13.5	4 359.42
泥水管路/元	—	—	192.18	—	159.93	—	82.56
掘进刀具消耗/元	—	—	10 697.22	—	8 947	—	9 725
盾构机配件	—	—	207.14	—	550.51	—	384.35
泥水设备配件	—	—	175.47	—	666.6	—	811.85
电/(kW·h)	0.9	10 029	9 026.1	4 327	3 894.3	6 137	5 523.3
合计	—	—	45 491.45	—	34 177.13	—	35 351.8

注:表中不包含盾构掘进的全部内容,如螺栓、通风照明、出碴、带压换刀、带压动火、泥水系统折旧等

6 结语

1)盾构施工的生产效率与隧道埋深、地质条件及环境控制存在明显的相关性,尤其是与隧道穿越的地质条件关联性最为显著。其中在细颗粒含量

较少、颗粒粒径在60~90 mm的圆砾地层中掘进时效率最高。而对于卵石层,由于刀具损坏严重,因换刀频繁而造成工序间歇时间所占比例较大,因而生产效率较圆砾层降低约50%,单位数量所包含的人工费、机械台班费因之增加近1.5倍。对于细颗

粒含量较多的砂砾层,由于泥水分离负荷的加重,造成泥水故障停机所占时间比例增加,因而降低施工效率,相应的单位工程量所包含人工费、机械台班费较圆砾层增加约 1.25 倍。

2) 工序间歇时间所占施工时间比例均在 40 % 左右,这主要是由于砂卵石地层中掘进刀具磨损较为明显,施工过程中间隔 100 ~ 150 m 需进行一次带压进仓刀具更换,而现行的泥水盾构定额中均未将带压进仓更换刀具纳入工序管理,编制专门的定额子项,从而造成定额指导与实际施工存在较大偏差。

3) 掘进刀具消耗数量主要与地层的土粒成分和颗粒级配相关,在富水砂卵石地层中刀具损坏大、磨损快、更换频繁,对成本影响极大。

4) 环境控制标准和盾构穿越地层条件的差异

对单位盾构掘进材料消耗影响明显。泥浆补浆量、壁后注浆量、盾尾密封油脂消耗与地层渗透系数相关性大,因此卵石层、圆砾层的单位消耗明显多于砂砾层,卵石层主要材料单位消耗大约为砂砾层的 1.3 倍,圆砾层为砂砾层的 1.01 倍左右。环境控制标准高时,由于注浆压力大和泥浆性能指标高,因此该部分材料消耗数量差别较大。

参考文献

- [1] 袁大军,尹 凡,王华伟,等. 超大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009, 28(10):2074-2080.
- [2] 顾国明,唐建飞,陈卫平. 越江隧道盾构泥水处理系统的运用[J]. 建筑机械化,2007(9):46-50.

The economic impact analysis of process parameters change of large section slurry shield in urban water-rich sandy gravel stratum

Wang Ying

(Beijing Underground Diameter Project Department, China Railway Tunnel Group, Beijing 100045, China)

[Abstract] Taking the underground diameter shield construction of Beijing railway for example, the choosing principles of process parameters in different engineering geo-conditions and changing boundary conditions were introduced. The cost difference and change were analyzed according to the analysis of construction efficiency and machine material consuming when the process parameters were adjusted.

[Key words] shield construction; process parameter; cost analysis