

文章编号:1006-2106(2007)03-0070-04

北京铁路地下直径线盾构选型^{*}

张双亚 陈 馈^{**}

(中铁隧道集团有限公司, 河南 洛阳 471009)

摘要:研究目的:通过对盾构选型的研究,为类型工程的盾构选型提供参考,掌握盾构选型的关键技术。

研究方法:分析了北京铁路地下直径线的工程地质及水文地质;针对不同类型盾构的结构特点,进行了可行性分析和论证;通过对盾构类型与地层渗透性的关系、与粘土含量的关系、与颗粒级配的关系的分析,从开挖面稳定机理、地表沉降、装机功率、刀具磨损、施工成本、施工进度等方面对盾构选型进行了详细阐述和方案比较。

研究结果:通过对不同类型盾构的分析,完成了适应于北京铁路地下直径线工程的盾构选型,并对盾构施工的关键技术进行了探讨。

研究结论:通过对工程地质及水文地质的分析,得知北京铁路地下直径线工程最适合使用泥水盾构施工。

关键词:盾构;选型;渗透系数;开挖面稳定;地表沉降

中图分类号:U455 **文献标识码:**A

Shield Machine Type Selection for Beijing Rail Underground Transit Line

ZHANG Shuang-ya, CHEN Kui

(China Railway Tunnel Group Co. Ltd., Luoyang, Henan 471009, China)

Abstract: Research purposes: Through the research of choose TBM, this paper supplied choose reference to this kind of project and handle key skill of choose TBM.

Research methods: This paper analysed the engineering geology and hydrography in BEIJING ZJX. Aiming to different TBM's characteristic, this paper put up feasibility analyse and argumentation. And through analysis to the relation of TBM type and stratum osmosis, clay content, grain graduation, this paper put up detailed expatiate and project compare form excavated surface mechanism, earth surface sedimentation, assembly power, cut tool abrasion, construction expense and construction progress.

Research results: Through the analysis to different type of TBM, this paper finished choosing of TBM which can fit for BEIJING metro ZJX project, and discussed the key skill of TBM construction.

Research conclusions: Through the analysis to project geology and hydrography, slurry TBM is the most fit method to BEIJING metro ZJX project.

Key words: TBM; choose type; infiltrate coefficient; stabilization of excavated surface; earth surface sedimentation

1 工程概况

北京铁路枢纽北京站至北京西站地下直径线工程,自北京站起,沿崇文门西大街、宣武门大街、莲花池

东路至北京西站;线路全长 9.156 km,其中地下隧道长 7.23 km,地下隧道中盾构施工长度为 5.7 km。北京铁路地下直径线工程是国内第一条采用盾构法施工的铁路地下隧道,也是目前城市最大直径的双线铁路

* 收稿日期:2006-12-03

** 作者简介:张双亚,1955年出生,男,高级工程师;陈馈,1963年出生,男,高级工程师,国家一级建造师。

隧道工程。

盾构区间采用钢筋混凝土管片衬砌,外径 $\phi 11.6\text{ m}$,内径 $\phi 10.5\text{ m}$,环宽 1.8 m ,管片分块采用 $8+1$ 形式。盾构法隧道分为2个标段,共采用2台 $\phi 11.97\text{ m}$ 大直径盾构施工,其中1标段盾构在前门站始发,向西掘进 3.2 km 到达宣武门站;2标段盾构在天宁寺桥北侧设置盾构始发井,向东掘进 2.5 km 到达宣武门站。

2 工程地质与水文地质

盾构穿越的地层 95.21% 为砂卵石地层,盾构区间各地层所占比例见图1。

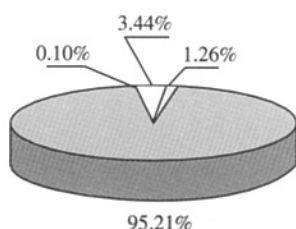


图1 盾构区间各地层所占比例

盾构区间地层随机取样筛分试验粒径比例见图2。地层细颗粒含量极少, 0.074 mm 以下的约占 2.4% , 10 mm 以上的含量大于 60% ,最大砂卵石粒径达到 280 mm 左右,且不能排除有大直径孤石的可能。

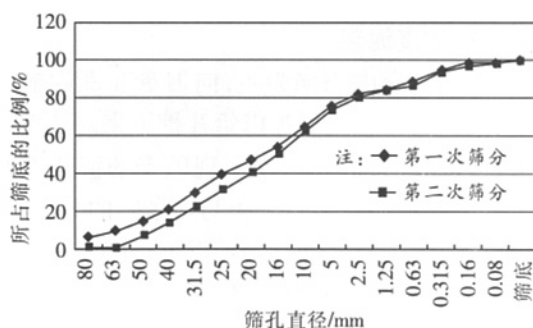


图2 地层随机取样筛分试验粒径比例图

盾构区间覆土厚度为 $11\sim 29\text{ m}$ 。含水层主要为砂卵石层、圆砾层及砂层,最大渗透系数为 $1.74\times 10^{-3}\text{ m/s}$,最大水土压力为 0.3 MPa 。

3 盾构类型的选择

3.1 泥水盾构方案

3.1.1 盾构类型与地层渗透性的关系

根据德法等国的盾构施工经验,当地层的渗透系数小于 10^{-7} m/s 时,可选用土压平衡盾构;当渗透系数在 $10^{-7}\sim 10^{-4}\text{ m/s}$ 之间时,既可选用泥水盾构,也可在碴土改良的情况下选用土压平衡盾构;当地层的

渗透系数大于 10^{-4} m/s 时,宜采用泥水盾构。北京铁路地下直径线盾构穿越地层的渗透系数为 $1.74\times 10^{-3}\text{ m/s}$,大于 10^{-4} m/s ,采用泥水盾构施工是可行的。

3.1.2 盾构类型与颗粒级配的关系

一般来说,细颗粒含量多,碴土易形成不透水的流塑体,容易充满土仓的每个部位,在土仓中可以建立压力来平衡开挖面的土体。粗颗粒含量多的碴土塑流性差,实现土压平衡困难。盾构类型与颗粒级配的关系见图3,图中区域3为粘土、淤泥质土区,为土压平衡盾构适用的颗粒级配范围;区域1为砾石粗砂区,为泥水盾构适用的颗粒级配范围;区域2为细砂区域,2类盾构都能适用。北京地下直径线的地层主要为砂卵石地层,砂卵石含量占 95.21% 。根据直径线地层随机取样筛分试验所作的级配曲线(图3中左边2条曲线)可以看出,北京直径线的地质颗粒级配不适宜采用土压平衡盾构,较适于采用泥水盾构。但样件1与样件2的曲线局部超出了泥水盾构的适用范围,因此,北京地下直径线使用泥水盾构也存在一定的风险。

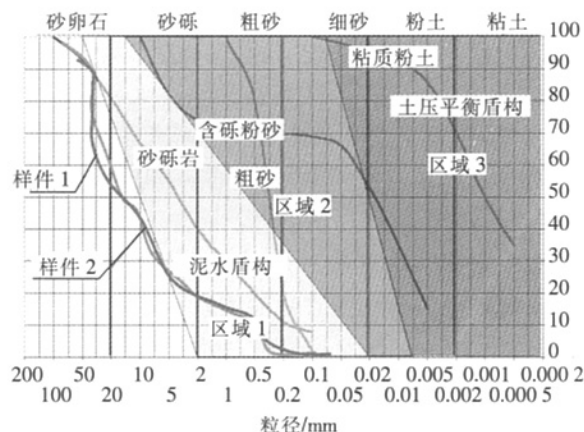


图3 盾构类型与颗粒级配的关系

3.1.3 开挖面稳定与泥膜的形成

泥水盾构利用泥浆作为支护材料,开挖面的稳定是通过泥浆渗透形成不透水的泥膜,通过泥水压力来平衡作用于开挖面的土压力和水压力,开挖面的稳定与泥膜能否形成至关重要。在砂卵石地层中使用泥水盾构的风险就是泥膜形成困难。在砂卵石地层中,地层孔隙较大,当有效孔隙 $L > 3D_{\max}$ (泥水最大粒径)时,全部泥水可经过地层的孔隙流走,无法形成泥膜,由于易出现逸泥现象,泥水压力管理较困难,易造成掌子面坍塌或地面沉降的危险。在砂卵石地层泥膜形成的方法除在泥水中加入膨润土外,还应加入增粘剂或加入聚丙烯酰胺或其它聚合物等泥浆改良剂。当加入泥浆改良剂后,泥水在向地层孔隙中渗透的同时,自身

形成体积增大的团粒与地层土颗粒吸附结合,对渗透形成阻力,该阻力随渗透距离的增大而增大,当渗透距离达到某一定值时,渗透阻力与泥水压力平衡,渗流停止,形成渗透泥膜。对于渗透泥膜而言,应控制泥水的参数及掘进参数,使其成膜时间短于刀盘对应的掘削时间。

3.1.4 刀具的布置与砂卵石的破碎

在砂卵石地层,砂卵石属松散体,地层对砂卵石缺少约束力,且由于砂卵石的抗压强度较高,滚刀只能部分破碎砂卵石,不能对砂卵石进行有效破碎。在刀盘上应配置撕裂刀、切刀、周边刮刀等刀具,撕裂刀为先行刀,超前切刀布置,先行切削地层,先对砂卵石进行冲击和撕裂,对砂卵石进行部分破碎并解除地层对砂卵石的约束力,然后由超前量较小的切刀切削剩余部分。经撕裂刀松动和部分破碎的砂卵石,通过刀盘的刀口进行泥水仓,在泥水仓内通过破碎机进行二次破碎。在泥水仓内布置的破碎机能破碎砂卵石的粒径一般不大于 500 mm。因此在设计刀盘时,泥水盾构宜采用面板式刀盘,通过刀盘的开口来限制进入泥水仓的砂卵石的粒径。

3.1.5 大直径孤石的处理 直径线地层预计最大砂卵石粒径为 280 mm 左右,且不能排除有大粒径孤石的可能。对粒径大于 500 mm 的孤石需人工处理,处理程序如下:停机→刀盘前地层加固→带压进入开挖仓→破碎漂石→掘进。

3.2 土压平衡盾构方案

3.2.1 盾构类型与粘土含量的关系

根据日本的盾构施工经验,当地层中粘土含量不足 10% 时,不推荐使用泥水盾构。粘土含量不足时,使用泥水盾构在开挖面上很难形成泥膜,开挖面易坍塌。直径线地层细颗粒含量极少,0.074 mm 以下粘土含量仅占 2.4%,泥膜形成较困难,因此使用泥水盾构具有一定的风险,可考虑采用土压平衡盾构施工。

3.2.2 开挖面稳定与土压平衡

土压平衡盾构是依靠推进油缸的推力给土仓内的开挖土碴加压,使土压作用于开挖面使其稳定,主要适用于粘稠土壤的施工,掘进时,由刀盘切削下来的土体进入土仓后由螺旋输送机输出,在螺旋机内形成不透水的土塞,保持土仓压力稳定。土压平衡盾构施工中,土仓内的碴土起着平衡开挖面水土压力,支撑开挖面的作用,应具有良好的塑性变形、内摩擦角小及渗透率小等特点。在饱水的砂卵石地层,需使用添加剂进行碴土改良。其原理为将开挖土砂与添加剂在开挖面混合,形成具有不透水和塑流性的碴土,通过推进油缸给土仓加压,使土压作用于开挖面,以平衡开挖面的水土

压力。

3.2.3 添加剂的选择

添加剂的选择和使用与地层的含水量、地层的细颗粒含量等有关。对于一般的砂层或砂砾层(渗透性在 10^{-7} m/s ~ 10^{-4} m/s)而言,掘进时注入泡沫或膨润土泥浆。在细颗粒含量很少的地层中(渗透系数在 10^{-4} m/s ~ 10^{-2} m/s),可注入添加有聚合物的泡沫或泥浆,或注入单纯的聚合物,或同时通过几种添加剂的联合合理使用,也可以建立起有效的土压平衡和土压控制。直径线地层的最大渗透系数 1.74×10^{-3} m/s,为达到建立土压平衡及有效实现开挖碴土的流塑性,宜采用多种添加剂联合使用方案,建议注入的添加剂为泡沫(FIR = 80%)、稠泥浆(8% ~ 10%)、聚合物(1%)。具体如下:

3.2.3.1 掺聚合物的泡沫

主要以向刀盘上添加为主,向土仓和螺旋输送机上添加为辅。由于地层具有细颗粒少、高透水性的特点,因此泡沫剂中宜掺入专门为这种地层研制的用于增强泡沫韧性和寿命的聚合物 TFA 6 AM(CONDAT)或 FIX SLF P2(麦斯特)。向刀盘上添加的目的是利用掺聚合物泡沫良好的渗透性、控水性和润滑冷却性,使用时将发泡率设置成较大值。向土仓内加的目的是利用其维持土仓内上部没有碴土填充部位的开挖面的稳定性,同时也可加速碴土搅拌和在土仓内的流动。

3.2.3.2 高浓度泥浆

主要以向土仓内添加为主,向刀盘和螺旋输送机上添加为辅。向土仓内添加以给开挖下来的碴土提供足够的用于改良的细颗粒,以实现碴土的流塑性和低渗透性,同时可极大降低仓内土与刀盘间的摩擦,以减少刀盘扭矩。向刀盘前注入是辅以增加开挖面的细颗粒,形成一定的泥膜以降低渗透性并加强泡沫的使用效果。

3.2.3.3 聚合物溶液

从土仓隔板上往螺旋输送机两侧注入,用于再次改善进入螺旋输送机的碴土的塑性和止水性,确保在螺旋输送机内形成土塞效应。添加剂可使用 CONDAT 的 TFA34 或麦斯特的 FIX SLF P3。

4 方案比选

盾构选型应从安全性、可靠性、经济性等方面综合考虑,所选择的机型要能尽量减少辅助施工工法并能确保开挖面稳定,确保施工安全可靠,确保地面建筑物的安全,确保以最低的成本实现施工进度目标。从技术上来说,直径线工程不论是选用土压平衡盾构还是选用泥水盾构都是可行的,但哪类盾构更适用,应从以

下方面予以分析:

4.1 地表沉降

大直径土压平衡盾构施工的困难在于难以有效地控制螺旋输送机内的土压力,难以达到理想的碴土混合效果。由于直径太大,泡沫堆积在土仓的上部,较重的土体集中在土仓的下部。大直径盾构比小直径盾构刀盘的转速慢,更加剧了这种趋势,要想碴土达到同样的搅拌效果,土仓中的碴土混合耗时长,这导致掘进过程中,螺旋输送机内的土体的粘性变化剧烈,从一开始的密质,到掘进一段时间后会变成浆液。此外,在泡沫积累的过程中还可能造成气体泄露。大直径土压平衡盾构的土仓压力的控制精度不会低于 ± 0.5 bar,也就是说地表沉降会较高,不利于地面建筑物的安全。相反,泥水盾构的压力控制精度不受盾构直径大小的限制,不论直径多大,泥水压力的控制精度都是 ± 0.1 bar,地表沉降会低于 5 mm。

4.2 装机功率

土压平衡盾构的功率大部分用于土仓内土体混合,泥水盾构的装机功率要比土压平衡盾构的功率小很多。比如,西班牙项目 $\phi 15.16$ m 的土压平衡盾构刀盘的装机功率为 14 000 kW,而格林哈特项目 $\phi 14.87$ m 泥水盾构刀盘的装机功率仅为 3 600 kW。

4.3 刀盘及刀具的磨损

土压平衡盾构高装机功率的后果就是造成刀盘及刀具磨损严重,大部份功率都消耗在土仓内土体的混合和地层与刀盘及刀具之间的摩擦上。施工经验数据表明,同直径盾构的两种机型的磨损率和其装机功率成正比,因此土压平衡盾构的刀盘及刀具的磨损比泥水盾构严重,根据北京地铁土压平衡盾构的施工经验,在砂卵石地层掘进时,由于砂卵石地层石英含量高,约每掘进 300 ~ 500 m 需换刀一次,带压换刀不仅安全性差,而且严重影响了施工进度。泥水盾构的刀具在泥水环境中工作,由于泥水的冷却与润滑作用,刀具磨损较小,有利于长距离掘进,可减少或避免中途换刀,不仅降低了盾构法施工风险,更节省成本,且提高了施工进度。

4.4 施工成本

大直径土压平衡盾构的综合施工成本比泥水盾构高。(1) 高装机功率会带来盾构价格的增加,从使用成本来说,高装机功率造成能源消耗增加,在电及冷却水的消耗方面,土压平衡盾构比泥水盾构要高,这种成本的增加相当于地面泥水处理设备的成本。(2) 大直径土压平衡盾构采用螺旋输送机将碴土转运至皮带输送机上,然后通过碴车运至竖井,由地面上的门吊将碴车吊至地面进行卸碴,土压盾构的碴土运输成本要略

高于泥水盾构。(3) 土压平衡盾构的维护费用大约是泥水盾构的 2 倍,特别是刀具的更换费用很高。(4) 土压平衡盾构在砂卵石地层施工时,碴土的改良成本相当昂贵。

4.5 施工进度

由于砂卵石地层的孔隙率高达 38%,为了能形成具有塑流性的碴土,需要添加大量的膨润土、泡沫、聚合物进行碴土改良,需要的添加剂量多,不仅在地面要设置添加剂存储场地;而且,由于碴土改良的需要,增加了洞内的运输量,由于运输量的增加,严重制约了施工进度。泥水盾构采用管道以流体形式将开挖土碴运输至地面,施工工序连续性强,有利于提高施工进度。

5 结论

北京铁路地下直径线的盾构选型,先后进行了多次专家论证,在专家首次论证时选用了土压平衡盾构方案,以后经多次反复论证后,决定采用泥水盾构方案,所选泥水盾构的主要技术参数见表 1。

表 1 直径线泥水盾构主要技术参数

参数名称	技术参数
盾构主机长度	约 11 m
盾构总长度	约 55 m
盾构直径	11.97 m
刀盘开口率	30%
先行刀数量	30 把
切刀数量	284 把
周边刮刀数量	16 把
仿形刀数量	1 把
刀盘转速	0 ~ 2.3 rpm
刀盘额定扭矩	15 700 kNm
刀盘驱动功率	1 620 kW
最大推力	140 700 kN

从技术上来说,土压平衡盾构和泥水盾构都是可行的,但泥水盾构更适应北京铁路地下直径线的工程地质和水文地质,可以确保盾构施工的安全可靠。北京铁路地下直径线选用泥水盾构施工,不仅是“安全第一”的需要,也是满足施工进度目标的需要。

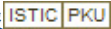
参考文献:

[1] 竺维彬,鞠世健. 复合地层中盾构施工技术[M]. 北京:中国科学技术出版社,2006.

[2] 张凤祥,傅德明,等. 盾构隧道施工手册[M]. 北京:人民交通出版社,2005.

[3] 唐健,陈馈. 成都地铁试验段盾构选型探讨[J]. 建筑机械化,2006(6),43 - 46.

(编辑 慕成娟)

作者: 张双亚, 陈馈, ZHANG Shuang-ya, CHEN Kui
作者单位: 中铁隧道集团有限公司, 河南, 洛阳, 471009
刊名: 铁道工程学报 
英文刊名: JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY
年, 卷(期): 2007, 24(3)
被引用次数: 3次

参考文献(3条)

1. 竺维彬;鞠世健 复合地层中盾构施工技术 2006
2. 张凤祥;傅德明 盾构隧道施工手册 2005
3. 唐健;陈馈 成都地铁试验段盾构选型探讨[期刊论文]-建筑机械化 2006(06)

本文读者也读过(10条)

1. 李凤远, LI Feng-yuan 盾构选型和关键参数选择探讨[期刊论文]-建筑机械化2008, 29(8)
2. 唐健, 陈馈, TANG Jian, CHEN Kui 成都地铁试验段盾构选型探讨[期刊论文]-建筑机械化2006, 27(6)
3. 唐忠, 叶康慨, Tang Zhong, Ye Kangkai 北京铁路直径线盾构选型[期刊论文]-城市轨道交通研究2006, 9(6)
4. 李伟, 黄琦恒, LI Wei, HUANG Qi-heng 深圳地铁隧道区间盾构施工与配套机械配置分析[期刊论文]-探矿工程-岩土钻掘工程2010, 37(5)
5. 王明胜, 倪冰玉 成都地铁一号线盾构选型[期刊论文]-岩土工程界2009, 12(3)
6. 戴燕超, 张国京, DAI Yan-chao, ZHANG Guo-jing 加泥式土压平衡盾构机及其配套技术研究[期刊论文]-市政技术2005, 23(4)
7. 屈天祥, Qu Tianxiang 穿黄隧洞工程的盾构选型[期刊论文]-都市快轨交通2007, 20(1)
8. 蔡仲银, 董崇民, 汪雪英, 李惠安, 杨维九 南水北调中线工程潮河段隧洞盾构选型设计研究[期刊论文]-隧道建设2010, 30(1)
9. 何其平 盾构选型[期刊论文]-建筑机械2003(1)
10. 张双亚, ZHANG Shuang-ya 北京铁路地下直径线盾构选型[期刊论文]-隧道建设2007, 27(2)

引证文献(3条)

1. 沈林冲, 张金荣, 秦建设, 黄先锋, 郭爱国, 王勇 杭州地铁1号线盾构选型探讨[期刊论文]-铁道建筑 2011(7)
2. 王振飞, 张成平, 王剑晨 富水砂卵石地层泥水盾构施工地层变形规律[期刊论文]-铁道工程学报 2013(9)
3. 刘东 繁华城区富水砂卵石地层大直径泥水盾构隧道施工关键技术[期刊论文]-隧道建设 2011(1)

引用本文格式: 张双亚, 陈馈, ZHANG Shuang-ya, CHEN Kui 北京铁路地下直径线盾构选型[期刊论文]-铁道工程学报 2007(3)