文章编号:1009-6582(2019)02-0001-09 DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2019.02.001

大直径铁路盾构隧道设计及选型技术研究

田四明[1] 赵 勇[1] 王丽庆[2] 李鹏飞[3]
(1 中国铁路经济规划研究院,北京 100038;2 中国铁路设计集团有限公司,天津 300142;3 北京工业大学,北京 100022)

摘 要 文章依托太原市铁路枢纽西南环线东晋隧道盾构设计与施工实例,从工程地质、水文地质、周边环境及风险控制等方面,对盾构隧道的设计与选型进行了适应性分析与探讨。结果表明,盾构选型是盾构隧道施工的关键,应掌握详尽的地质勘察资料,有针对性地选择盾构机类型和确定盾构机相关技术参数;盾构施工中加强碴土改良及注浆系统的配置,能较好地控制地层沉降;采用大直径土压平衡盾构机在周边环境复杂的地层中施工是可行的,能够最大程度减小对城市居民生活的影响。

关键词 隧道工程 盾构选型 复杂地质层 地层适应性
中图分类号:U45 **文献标识码:A**

1 引 言

盾构掘进机是专用于隧道施工的特殊机械,集光、机、电、液、传感、信息等技术于一体,具有开挖切削土体、输送碴土、管片拼装、测量导向纠偏等功能。近年来,盾构法因具有快速、优质、安全、高效、环保、环境影响小、自动化及信息化程度高等优势而得到广泛的应用[1,2]。

针对特定的地质条件,盾构设备的良好运转是隧道顺利贯通的关键。国内许多学者对于盾构选型的问题开展了相应研究。刘金祥等[3]对西安地铁砂性土层标贯基数大于45时盾构选型应注意的问题进行了研究,并提出相应的建议;杨晓华[4]结合兰州地区的工程及水文地质情况,对砂卵石地层中双洞地铁隧道的盾构选型进行了研究;郭彩霞等[5]针对北京地区无水大粒径卵砾漂石地层,对盾构刀盘刀具、螺旋输送系统等关键设备进行了适应性研究和优化改造;曹 智等[6]对成都富水砂卵石地层的盾构设计选型进行了优化研究,并与国外盾构设计做了对比。可以看出,已有的研究主要侧重于分析盾构对地层的适应性,且关于各地区典型地层的盾构选型已取得一定成果,但结合复杂地层的大直径盾构选型的研究目前还比较缺乏。

本文依托太原市铁路枢纽西南环线东晋隧道盾构的设计与施工,从工程地质、水文地质、周边环境及风险控制等方面,对盾构的设计与选型进行适应性分析与探讨,为类似地层的大直径盾构隧道施工提供借鉴。

2 工程概况

东晋隧道为市域铁路隧道,线路呈南北向穿越太原市晋中盆地北部、山前洪积平原,盾构段全长4 850 m,为单洞双线隧道。平面布设一条半径为1 200 m平曲线,纵断面采用10‰和3‰单面下坡。盾构穿越段地形平坦开阔,略有起伏,地面高程为811.72~823.59 m;内轨顶面到地面之间埋深约为17.9~26.3 m;拱顶覆土厚度约为9.8~17.4 m。

隧道周边环境复杂,沿线建构筑物密集(多层、高层建筑物与隧道净距为11~26 m),地下管线多达百条(煤气、饮用水管、污水管、热力管等压力管线多为承插接口,对沉降要求高),下穿4条河流(汛期

修改稿返回日期:2019-01-15
作者简介:田四明(1972-),男,教授级高级工程师,主要从事铁路隧道的技术咨询和设计审查等方面工作,E-mail: tsmd@163.com.

水量大，为市区东西向主要排洪河道），并下穿18条城市主干道，重大风险源达64处。

穿越地层主要为第四系全新统人工堆积层（素填土、杂填土）、洪积层（新黄土、粉质粘土、粉土、粉砂、细砂、中砂、粗砂、砾砂、圆砾、卵石、含圆砾粉质粘土）。其地层成分构成如图1所示，其中新黄土6.8%、粉土约占39.1%、粉质粘土约占16.7%、粉砂约占1.6%、细砂约占2.9%、中砂约占13.5%、粗砂2.7%、砾砂2.1%、卵石土1.5%、圆砾土约占8.0%、含圆砾粉质粘土约占5.1%。物理参数详见表1。

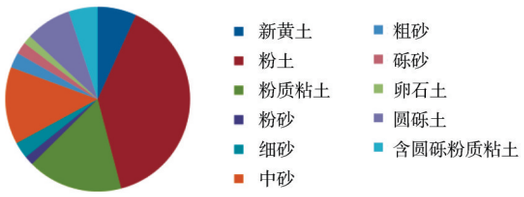

图1 地层成分饼状图

Fig 1 Pie chart of strata composition

钻孔显示，盾构隧道穿越地层可以划分为3段典型地层：

表1 物理参数

Table 1 Physical parameters

地层岩性	固结快剪峰值		灵敏度 St	无侧限抗压强度 q_u/kPa	三轴CU试验				静止侧压力系数 K_o	基床系数	
	c /kPa	φ/(°)			C_{cu}/kPa	φ_{cu} /(°)	C'/kPa	φ'/(°)		K_h MPa/m	K_v MPa/m
新黄土	10.6	25.5	1.75	88	36	23.9	40.5	25.1	0.5	15	13
粉质粘土	26.2	7.5	1.37	60	37	22.3	44	22.7	0.45	15	12
粉质粘土	14	38.3	1.8	301	34.7	11	36	11.3	0.23	22	24
含圆砾粉质粘土	—	—	—	60	—	—	—	—	0.4	40	50
粉土	23.2	21.1	1.67	50	32	24.3	44	25.2	0.4	12	10
圆砾	—	—	—	40	—	—	—	—	0.33	30	30
卵石	—	—	—	—	—	—	—	—	—	55	65

（1）Ⅰ段典型地层为DK1+250～DK2+500段，长1 250 m，主要为新黄土、粉土、粉质粘土、砂层及少量圆砾地层的混合层，其地质断面如图2所示。土层软塑—硬塑，砂层稍密—中密。

（2）Ⅱ段典型地层为DK2+500～DK4+300段，长1 800 m，主要为圆砾或卵石层地层，局部有粉土和粉质粘土混合；卵石为中密—密实，其地质断面如图3所示。卵石含量高达50%~85%，粒径以20～80 mm为主，部分粒径大于100 mm，最大粒径为180 mm，卵石级配差，细颗粒含量少；局部含有粒径超过500 mm的高强度漂石，通过全护筒液压钻孔（图4）揭示最大粒径为630 mm；卵石和漂石单轴抗压强度高，部分达55～165 MPa。

（3）Ⅲ段典型地层为DK4+300～DK6+100段，长1 800 m，主要以粉土、粉质粘土为主的地层，以粘性细颗粒为主，其地质断面如图5所示。

地震动峰值加速度为0.2 g（Ⅷ度）。地下水类型为第四系孔隙潜水，潜水水位埋藏较深，勘测期间地下水埋深为6.6～30.8 m（高程为808.47～786.29 m），

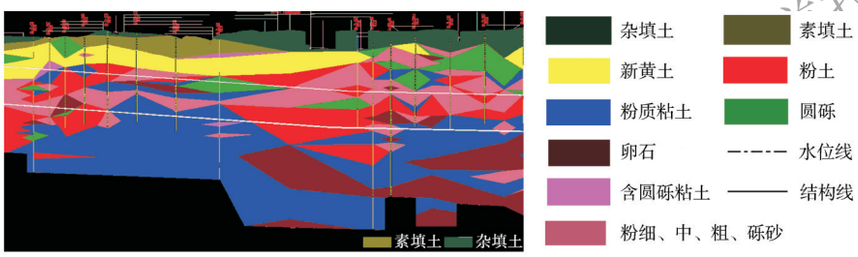

图2 Ⅰ段典型地层地质断面

Fig.2 Geological profile of typical stratum of section Ⅰ

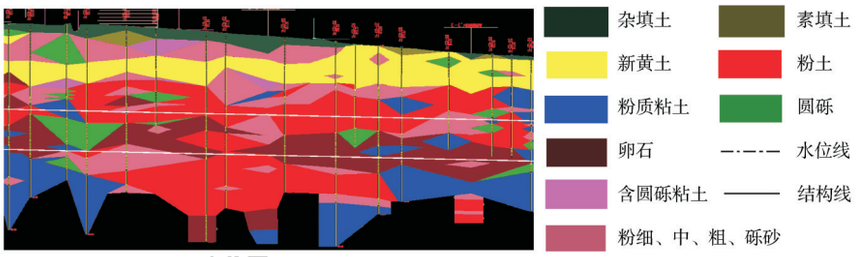

图3 Ⅱ段典型地层地质断面

Fig.3 Geological profile of typical stratum of section Ⅱ

(a) (b)

图4 全护筒液压钻孔取芯

Fig.4 Hydraulic coring by full protection cylinder

盾构隧道均位于地下水位以下，最大水头为20 m。

3 盾构隧道设计

按照铁路隧道净空断面要求，拟定盾构隧道管片内径为10.6 m，管片厚度为55 cm，管片外径为11.7 m。盾构段两端布设盾构工作竖井，在DK1+250处设置始发井，并利用明挖段创造盾构机整体始发条件；DK6+100处设置接收井。由一台盾构机单方向从小里程向大里程掘进，其标准横断面如图6所示。图中，管片为通用楔形环，每环管片采用8+1的分块方式，即由6块标准块A、2块邻接块B和K形楔形构成，分块形式为$6A(43.2°)+2B(43.2°)+K(14.4°)$，管片拼装方式为环间错缝拼装，楔形块先搭接2/3环宽径向推上，再行纵向插入。管片的计算参数见表2，单块管片最大重量约为10 t。

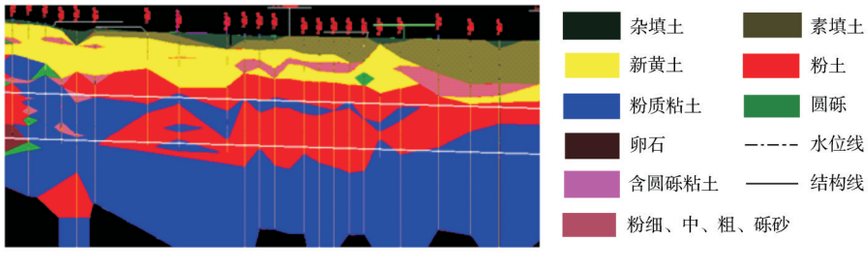

图5 Ⅲ段典型地层地质断面

Fig.5 Geological profile of typical stratum of section Ⅲ

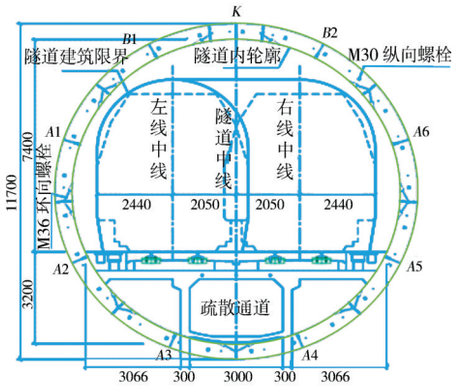

图6 盾构隧道标准横断面示意(单位：mm)

Fig.6 Typical cross section of the shield tunnel(Unit: mm)

管片环和纵缝面上通过设置斜螺栓连接，环缝共设置38个M30螺栓，每块管片纵缝则共设置3个

表2 管片计算参数

Table 2 Calculation parameters of shield segments

材料	外径/mm	内径/mm	厚度/mm	宽度/mm
C50钢筋混凝土抗渗等级S12	11 700	10 600	550	2 000

M36螺栓；纵缝面上设凹凸榫槽，环缝面上不设凹凸榫槽，在环缝单面设置传力衬垫。

管片防水利用1道三元乙丙高弹性橡胶密封防水条和1道遇水膨胀防水条。为了不影响盾构机作业效率，在盾构机主机后方配置预制口子构件同步施工系统，同步施工区域长度不小于30 m。

按隧道埋深划分浅埋段（埋深<1D）、标准段（埋深1D～1.5D）和深埋段（埋深>1.5D）进行配筋计算。盾构需穿越30多处风险源，除了采用盾构掘进姿态控制、同步注浆、二次注浆等洞内措施外，地表还采用隔离和跟踪注浆等措施。

4 盾构选型

近年来我国过江、过海的大直径盾构隧道逐渐增多，极大地促进了盾构法隧道的设计和施工技术进步，但各类盾构设备均有一定的地层适应条件，因此，在盾构机及设备参数选择时应抓住核心和重点，其性能参数不仅要满足工程需要，还要有一定的储备系数。盾构施工的成败主要取决于地质条件和盾构设备2个因素，地质条件是基础，盾构设备是关键；两者既相辅相成又互相制约[7,9]。

4.1 总体要求

盾构选型是项综合技术，涵盖地质条件、工程设计、盾构设计、机械配套等技术因素。根据类似工程经验，本项目主要在泥水平衡盾构和土压平衡盾构中选择其一，需对其工作原理、技术条件、经济指标、工作环境及工程实际效果等方面综合比较进行确定。

泥水平衡盾构是通过施加略高于开挖面水、土压力的泥浆压力来维持开挖面的稳定，一般适用于在河底、海底等高水压条件下隧道的施工，具有很高的安全性和良好的施工环境[10]。土压平衡盾构依靠推进油缸的推力给土舱内的开挖土碴加压，通过添加水、泥水或其它添加材料使土压作用于开挖面使其稳定，切削土体进入土舱后由螺旋输送机输出，在螺旋机内形成不透水的土塞，保持土舱压力稳定，适用于含水量和颗粒组成适中的情况[11]。

选型前必须了解国内外盾构机发展状况及趋势，各种盾构机的适应条件，现有盾构能否利用，工期要求，场地条件，建构筑物与地下管线等环境条件，经济，碴土处理及施工经验等因素。一般盾构选型应注重以下方面[3]：

（1）以开挖面稳定为核心（主要与地层条件有关），刀盘设计和刀具配置应保证隧道土体开挖顺利；

（2）充分考虑颗粒级配、渗透系数及碴土的塑性流动，以优质的碴土改良效果来确保盾构施工作业的效率；

（3）应考虑地下水的含量及水压，其涉及到盾构的主驱动密封、铰接密封、盾尾密封的选用，以确保开挖空间的安全和稳定支护；

（4）保证地面沉降量在要求范围内；

（5）满足施工场地及环保要求。

4.2 影响因素

（1）地层颗粒级配、渗透性

由图7可知，泥水平衡盾构适用的颗粒级配主要为粗砂、砾石，土压平衡盾构适用的颗粒级配主要为淤泥质、粉质粘土；中间区域则为过渡区域，主要为细砂，在该区域级配范围内，两种盾构都能适用。此外，图7中还表明细粒土（粒径≤0.075 mm）的含量小于40%时，适宜采用泥水平衡盾构，反之则适宜采用土压平衡盾构。砂、卵石地层是一种典型的力学不稳定和强磨蚀性地层，具有卵石含量高、粒径大、强度高、流塑性差、摩擦系数大、石英含量高等特点[12]，土压平衡盾构在该类地层中掘进时，存在大粒径卵石流动性差、排出困难，刀盘、刀具磨损严重，刀盘扭矩、土舱压力控制困难，掘削面稳定困难及盾构掘进效率低等问题。

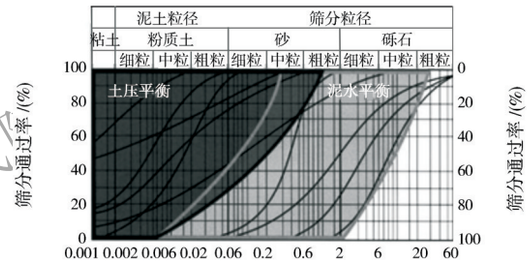

图7 盾构类型与颗粒级配的关系（粒径单位：mm）

Fig.7 Relationship between shield type and grain grading (Unit of grain size: mm)

由图8可知，新黄土、粘土、粉土、粉质粘土等地层为弱透水层，地层渗透系数小于10^{-7} m/s时，宜选用土压平衡盾构方式；中、粗砂、砾砂、圆砾土、卵石土地层为强透水层，地层渗透大于10^{-4} m/s时，宜选用泥水平衡盾构方式。当地层渗透系数介于10^{-7}～10^{-4} m/s之间时，土压平衡盾构和泥水盾构均可。

根据盾构施工经验和本工程的地质条件，盾构段首尾两端Ⅰ段和Ⅲ段采用土压与泥水平衡盾构均适宜（图9）。地层中粉土、粉质粘土体积占比达到

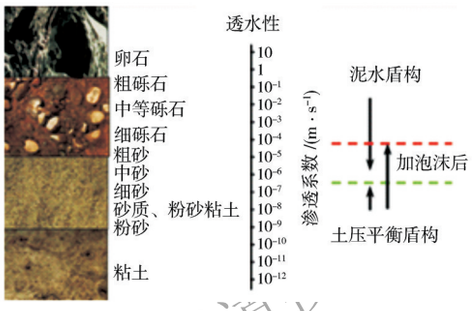

图8 盾构类型与渗透系数的关系

Fig.8 Relationship between shield type and permeability coefficient

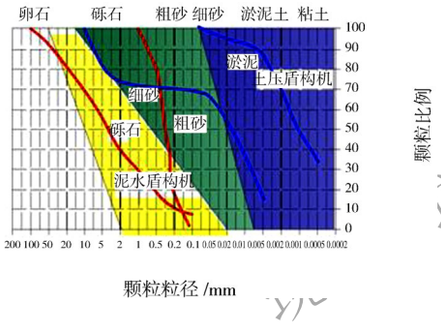

图9 东晋隧道地层情况及盾构适应性

Fig.9 Strata conditions and shield adaptability of the Dongjin tunnel

了54.9%，<75 μm的细颗粒含量占地层的62.2%左右，因此土压平衡盾构机更具适应性。而泥水平衡盾构机的泥水分离难度大，会产生较多无法分离的弃浆，对周边环境造成较多污染，且泥水分离的效率也将成为制约施工进度的因素之一。Ⅱ段2+500～4+300部分以砂、卵石为主，中密—密实，局部段落卵石和漂石含量高，漂石最大粒径达630 mm；卵石单轴抗压强度高，一般在50.5～136 MPa，平均为98.6 MPa。砂卵石地层的内摩擦角大，碴土的和易性和流动性差。泥水平衡盾构遇到大粒径卵石时，需在泥水舱内配置二次破碎装置，排碴效率低，并且卵石层中含有细粒粉土，泥水分离难度大。而土压盾构可对卵石采取“以疏导、通过和排出为主”的处理方式，通过配备合理刀具、增大螺旋输送机直径和与之相匹配开口尺寸的刀盘等措施，提高出碴效率。

此两段地层条件差异大，透镜体夹层、互层多，复杂多变，无论泥水盾构还是土压盾构，单一的盾构机均不能与地层条件匹配，故结合盾构机工作原理，需考虑辅助措施。

（2）隧道埋深及地下水压力

泥水平衡盾构机本身具有密封性能好的特点，掘进地层的水压大于0.3 MPa时，泥水盾构适宜性更好。而土压平衡盾构的螺旋输送机难以形成有效的土塞效应，在螺旋输送机排土闸门处易发生碴土喷涌现象，引起土舱中土压力下降，导致开挖面坍塌。土压盾构的排土装置(螺旋排土器)必须保持开挖面上的水、土压力的平衡，但是在高水压土体中，仅用螺旋排土器难以保持开挖面的稳定性，还需要保持压力的过滤器、连接压送泵等[13]。

本工程盾构隧道拱顶覆土厚度约为9.8～17.4 m，地下水正常水位线距内轨顶面线高度最大约为16 m，抗浮水位线距内轨顶面线高度最大约为22 m。考虑勘察时间跨度大、地区降水季节性变化大，雨季雨量大等因素，因此隧道结构需承受的最大水压力在0.1～0.2 MPa。根据既有工程经验及实际情况，埋深和水压不是盾构选型的控制性因素，土压盾构和泥水平衡盾构均适用于东晋隧道所处的埋深和地下水条件。

（3）既有管线及建构筑物

因工程地质条件的多样性、复杂性以及施工中的各种不确定因素，盾构施工引起的地层损失是不可避免的，可能会造成地表沉降过大[14]。泥水盾构利用泥浆渗透形成不透水的泥膜作为支护材料，维持开挖面的稳定，通过泥水压力来平衡作用于掌子面的土、水压力，压力波动敏感度高，控制精度高，对开挖面周边土体的干扰减少，因此地面沉降量的控制精度得以提高，对沿线既有构筑物影响较小。土压盾构通过碴土改良可增强不透水性，有利于稳定开挖面；在螺旋输送机上配备防喷涌装置可平衡地层的水、土压力；压力波动敏感度低，控制精度低，对开挖面周边土体的干扰较大，使地面沉降量的控制精度降低。通过合理控制掘进参数，建立良好的压力平衡，采取必要的加固保护和动态监测等综合措施，两种类型盾构均能有效地控制地表沉降，满足各种建(构)筑物的沉降要求。

以往工程案例的监测数据表明：泥水平衡盾构地表沉降控制效果较土压平衡盾构稍好，一般可减小地表沉降3～10 mm，在通过重要建构筑物时安全性较高。泥水盾构在开挖面平衡压力稳定性及地面沉降控制等方面具有一定的优势。

东晋隧道盾构区段地表建筑物主要集中在1+400～2+550隧道两侧，为6～8层砖混结构、筏板基础，距离为12～19 m；高层房屋、框架结构、桩基或扩大基础，距离为15～30 m。此段穿越粉土、粉质粘土、砂层及少量圆砾地层的混合层，采用泥水盾构

和土压盾构施工都可以较好地控制地面沉降。

(4) 施工效率(工期)

泥水平衡盾构需有一套庞大而复杂的泥水处理系统,要对泥水进行分离、调制浆、余浆处理等。在砂卵石地层中,泥水平衡盾构一般可以连续输送的卵石直径应小于排泥管直径的1/3,通常排泥管直径为100~200 mm[10]。因此,被排出的卵石直径最多达50~70 mm,在含有大粒径砂卵石地层中掘进,需要对卵石进行两次破碎,出土效率很低。土压平衡盾构不需泥水处理系统,通过采用添加泡沫、膨润土泥浆和水等综合措施,进行良好的碴土改良,可使改良后的碴土呈塑性状态、流动性好,易于顺利快速地进入土舱,使螺旋输送机出碴连续且在连续皮带机上铺展良好,连续出碴效率极高,同时地面碴土直接外运,提高盾构掘进速度[15]。

通过对国内外类似地层大直径盾构工程进行调查、分析,砂卵石地层属于强磨蚀性地层,但通过采取针对性的设计或辅助措施,可提高耐磨性、出碴效率和实现砂卵石地层长距离的掘进。另外,泥水盾构穿越粉质粉土、砂土层,盾构施工速度平均约为140 m/月;土压盾构较泥水盾构施工速度快,施工月进度可超过200 m/月。综上所述,东晋隧道采用土压盾构掘进较泥水盾构施工速度快、效率高。

(5) 施工场地

盾构始发场地包含:工作井、运输设备、管片堆放场地、管片防水处理场、拌浆站、料具间、机修间、两回路的变配电间、电机车电瓶充电间等设施以及进出通道[16]。泥水平衡盾构的始发井工区,考虑到泥水处理要求,需要占用13 000 ㎡的场地面积。土压平衡盾构较泥水平衡盾构可节约近1/3的土地。现场调查地形、地貌,盾构始发场地位于一片空地内,基本满足盾构的始发条件。

(6) 经济指标

泥水盾构工艺复杂且辅助设备多,尤其是需要配置专门的泥水处理设备,占地面积大,施工投入大;由于土压盾构不需要购置泥水处理系统,碴土运输采用皮带运输,占地面积小、设备综合造价低,通过添加剂可扩大适用范围。根据对国内外几家盾构设备制造商的调研,直径12 m左右的泥水盾构整套设备比土压盾构高出0.5亿元[10]。另外,在施工过程的设备维护中,土压盾构无其它比较重要的影响盾构推进的复杂设备,维护相对泥水盾构简单、方便;土压盾构掘进时消耗的电、油脂、油料相对低;经调研统计,泥水盾构每米掘进成本比土压平衡盾构高约10%~38%[17]。综上所述,土压平衡盾构机的经济指标要优于泥水平衡盾构机。

(7) 环境保护

盾构掘进对周边环境影响涉及诸多方面[18],除了施工引起的沉降外,应重点关注对噪音、振动、废水和固体废弃物等控制。在机械选型上尽量使用低噪音、低污染的环保机具,经常对盾构机及配套设备进行检查和维修。泥水平衡盾构配有泥水处理系统,进行泥水分离;废水需通过沉淀池和离心机系统将微米级的超细颗粒分离出来,获得的清水继续进行调浆。土压平衡盾构需加注泡沫或膨润土来改良土体的流塑性,输出的碴土在碴土池中静置后泡沫可随即挥发,碴土逐渐恢复至硬塑状态,接近于原状土,碴土可直接外运至弃碴场。碴土改良不对地下水造成污染。结合本工程实际,采用土压平衡盾构并使用皮带运输系统,出碴连续,能较好地保持环境的清洁。

4.3 综合对比分析

土压平衡盾构和泥水平衡盾构在地质条件、隧道直径、地下水压力、对地表影响程度、碴土处理、施工场地等方面都有所差异,将两种盾构的各项特点进行综合对比分析,结果见表3。

从以上分析可得出:泥水平衡盾构机能抵抗较高的水压,洞内运输设备简单,但因泥水处理设备复杂且庞大,需要较大的始发井场地,机械造价高于土压平衡盾构,更适用于高水压、长距离、厚覆土、大断面的隧道工程;土压平衡盾构抵抗高水压能力不如泥水平衡盾构,螺旋输送机配合连续皮带机运输,出碴效率高,施工速度快,无泥水处理设备,始发井占地面积较小,机械造价较泥水平衡盾构低,更适用于水压不高、覆土较浅的隧道工程。为此,本工程采用土压平衡盾构机能确保施工工期和隧道施工安全。

5 盾构机主要技术参数

为了减小盾构推进过程中盾壳与四周土体之间的摩擦阻力,盾构呈锥体设计。结合管片的尺寸(管片外径为11 700 mm),盾构各部直径分别为:刀盘12 140 mm,前盾12 010 mm,中盾11 995 mm,尾盾11 980 mm。

设备招标前采用全护筒液压钻孔全方位揭示卵石层地层,为解决砂卵石地层中掘进的刀盘、刀具磨损、泥饼阻塞及地表沉降等问题提供条件。在满足刀盘结构强度、刀具布置以及地层支护条件的情况下,应尽量增大刀盘开口率,使碴土易于流动,防止结泥饼,提高开挖效率。土压平衡盾构刀盘为辐板式结构,开口率在30%~40%之间,中心开口率保

表3 盾构类型特点对比

Table 3 Comparison of the characteristics of various types of shields

项目名称	土压平衡盾构	泥水平衡盾构
适应土层	在砂性土等透水地层中要有土体改良的特殊措施	砂、粉砂、粘土和风化岩等各类土质地层
抵抗水土压力	靠泥土的不透水性或改良土在螺旋机内形成土塞效应，抵抗水土压力	靠泥水在开挖面形成的泥膜抵抗水土压力，更能适应高水压地层
地层沉降控制	压力波动敏感度低、控制精度低，对开挖面土体的干扰大，对构筑物有一定影响	压力波动敏感度高、控制精度高，对开挖面周边土体的干扰减少，对沿线构筑物影响小
盾构推力	土层对盾壳的阻力大，盾构推进力比泥水盾构大，需预留足够的安全储备	因泥浆的作用，土层对盾壳的阻力小，盾构推进力比土压盾构小
刀盘及刀具寿命 刀盘扭矩	碴土改良、合理刀盘开孔率和螺旋输送机的内径以及刀盘、螺旋筒、螺旋带耐磨措施，可实现砂卵石地层中长距离掘进	切削面及土舱中充满泥水，对刀具、刀盘起到一定的润滑作用，刀盘驱动扭矩小；但大颗粒卵石，需配置二次破碎装置，排碴效率低
推进效率	通过碴土改良措施，利用螺旋输送机和长距离皮带运输，提高出碴效率、掘进速度	掘削下来的碴土转换成泥水通过管道输送，效率高；大颗粒卵石需二次破碎，排碴效率低
环保	利用螺旋输送机和长距离皮带运输，无需出碴车，无碴土散落	采用封闭管道输送废土，没有出碴矿车，无碴土散落
施工场地	碴土呈泥状，无需进行任何处理即可运送，占地面积较小	在施工地面需配置必要的泥水处理设备，占地面积较大
经济性	整套设备购置费用低，掘进成本低	整套设备购置费用高，掘进成本高

证≥30%，确保砂土流动顺畅，不易堵塞。

针对地层变化频繁、大颗粒卵石，设计选用中心轴式大直径的螺旋输送机，满足颗粒直径600 mm卵石的排送通过，减少磨损和提高卵石通过率；配置双闸门防止喷涌，同时预留土体改良添加剂注入接口和保压泵接口。

为减少开舱换刀次数，降低刀具成本，结合工程地层特点，针对各种刀具的磨损情况，对刀具合金形式和合金材质进行分析，对刀具的种类配备进行了全面优化，刀具选型应尽可能简单、数量少。

在盾构机设计、建造中根据大颗粒的卵石地层合理确定刀盘开孔率、开孔位置及配备合适类型的刀具，加大螺旋输送机的内径，刀盘、刀具、螺旋输送机考虑其耐磨性，采用以“疏导、通过和排出”为主的砂卵石处理模式，实现土压平衡盾构长距离掘进。

6 盾构掘进施工应用要点

盾构施工控制应进行全方位、全过程的监控，确保地层损失率≤0.5%；土压盾构地层沉降控制关键在于土舱压力控制、盾构掘进参数的合理选择、及时足量的同步注浆和出碴量控制。段落Ⅰ、段落Ⅲ盾构穿越地层主要为粉土、粉质粘土、砂层，少量为砂卵石互层，土压盾构机易建立掌子面水、土压力平衡；穿越施工中要做好盾构掘进综合控制，确保盾构“连续、平稳、快速”推进。

段落Ⅱ主要为圆砾或卵石层地层，局部有粉土和粉质粘土混合地层，砂卵石地层具有以下特点：(1)卵石含量高，内摩擦角较大；(2)级配差，碴土的和易性及流动性差；(3)渗透系数大。碴土改良是穿越该地层时控制沉降的核心，只有土舱中碴土达到理想状态，具有一定的不透水性和流塑性，才能抵抗掌子面地下水、土压力和达到匀速出土的要求，防止出现砂层喷涌现象和粘性土结饼问题，进而避免土舱压力波动，引起地面沉降。

穿越卵石地层时，在更换刀具之前要选择合适的地点并预先对地层进行加固处理，优先采用带压换刀模式，通过调整“到达预定换刀地点前”、“到达预定换刀地点时”、“换刀结束后恢复掘进”3个过程的施工控制参数以及注浆浆液的配合比，实现整个带压换刀作业的顺利进行。

在盾构穿越桥基、框架桥等建(构)筑物50 m前，盾构机应进行全面维修保养，尤其是注浆系统，要保证注浆管路的畅通，保证二次注浆设备能够即时启用且备足二次注浆材料；泡沫、膨润土系统保证完好且无堵塞现象，保证刀盘膨润土注入管路的畅通；检查保养油脂系统，备足优质盾尾油脂，铰接的

盾尾油脂注入必须完好且足量注入盾尾油脂；保证聚合物注入系统的完好，达到可即时启用。

管片拼装后及时复紧上一环的管片螺栓；对脱出盾尾后第4环的管片还要再次复紧；控制盾构姿态，尽可能减少纠偏，纠偏时每环不超过5 mm；合理选择拼装点位，保证盾尾间隙的合理与均匀[19]。

7 结论及建议

目前，盾构隧道段施工已顺利完成，地表最大沉降≯10 mm，管片错台≯5 mm，实现工程施工质量检验合格率100%。结合现有的工程实践经验，本文给出以下结论及建议。

（1）盾构选型是盾构隧道施工成败的关键，在盾构选型时，应掌握详尽的地质勘察资料，有针对性地选择盾构机类型和确定盾构机相关技术参数，慎重决策。

（2）根据实际施工结果来看，盾构施工中加强碴土改良及注浆系统的配置，能较好的控制地层沉降。

（3）在复杂的周边环境和适宜的地质条件下，采用大直径土压平衡盾构进行施工是可行的，能够最大程度减小对城市居民生活的影响，而且施工进度快，平均月进度达到260 m，最高可达420 m/月。

参考文献
References

[1] 雍朗明. 富水砂层土压平衡盾构掘进沉降分析与控制[D]. 成都：西南交通大学，硕士论文，2015.
YONG Langming. Analysis and Control of Earthwork Balance Shield Tunneling in Water-rich Sand Layer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, Master Thesis, 2015.

[2] 井东旭. 盾构机分体始发施工技术[J]. 建筑工程技术与设计, 2016, (12): 252-253.
JING Dongxu. Construction Technology of Separate Lauching of Shield Machine[J]. Architecture Engineering Technology and Design, 2016, (12): 252-253.

[3] 刘金祥，蔡 辉. 砂性土层施工盾构选型应注意的问题：以西安地铁3号线TJSG－4标为例[J]. 隧道建设，2015，35（增2）: 171-175.
LIU Jinxiang, CAI Hui. Some Issues on Shield Type Selection in Sandy Stratum: Case Study on TJSG-4 Bid Section on No.3 Line of Xi′an Metro[J]. Tunnel Construction, 2015, 35 (S2): 171-175.

[4] 杨晓华. 砂卵石地层中复合式土压平衡盾构掘进参数及地层变形规律研究[J]. 隧道建设, 2014, (8): 721-730.
YANG Xiaohua. Study on Boring Parameters of Composite EPB Shield in Sandy Cobble Strata and Study on Ground Deformation Rule[J]. Tunnel Construction, 2014, (8): 721-730.

[5] 郭彩霞, 王梦恕, 孔 恒, 等. 无水大粒径卵砾漂石地层盾构选型研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51 (4): 13-17.
GUO Caixia, WANG Mengshu, KONG Heng, et al. Selection of a Shield for Tunnelling in Waterless Strata with Large-Particle Cobbles and Boulders[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51 (4): 13-17.

[6] 曹 智, 李剑祥. 成都地铁盾构选型设计及实用性比较[J]. 隧道建设, 2014, 34 (10): 1005-1010.
CAO Zhi, LI Jianxiang. Case Study on Type Selection of Shields for Chengdu Metro [J]. Tunnel Construction, 2014, 34 (10): 1005-1010.

[7] 侯凯文, 王 崇, 江 杰, 等. 南宁地铁2号线盾构选型设计与适应性分析[J]. 隧道建设, 2017, 37 (8): 1037-1045.
HOU Kaiwen, WANG Chong, JIANG Jie, et al. Type Selection Design and Adaptability Analysis of Shield Used in Line No.2 of Nanning Metro[J]. Tunnel Construction, 2017, 37 (8): 1037-1045.

[8] 江 华. 北京典型砂卵石地层土压平衡盾构适应性研究[D]. 北京：中国矿业大学，2012.
JIANG Hua. Study of Adaptability of EPB Shield Boring in Sandy Soil in Beijing [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2012.

[9] 陈东海. 砂卵石地层区间隧道盾构施工数值模拟及盾构选型研究[D]. 长沙：中南大学，2013.
CHEN Donghai. Numerical Simulation of Shield Tunnel Construction and the Selection of Shield in Sand-pebble Stratum[D]. Changsha: Central South University, 2013.

[10] 苗 壮, 唐 伟. 城市铁路隧道盾构选型研究[J]. 中国高新技术企业, 2015, 36 (6): 34-35.
MIAO Zhuang, TANG Wei. Research on Shield Selection of Urban Railway Tunnels[J]. China High-tech Enterprises, 2015, 36 (6): 34-36.

[11] 彭 敏. 土压平衡式盾构机的施工技术与设备故障处理[J]. 山西建筑, 2011, 37 (26): 231-233.
PENG Min. Construction Technology of Earth Pressure Balance Shield and Equipment Failure Treatment[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37 (26): 231-233.
[12] 郑珠光. 盾构施工砂卵石地层特性及改良试验研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2016.
ZHENG Zhuguang. Experimental Study on the Properties and Improved Test of Sandy Cobble Stratum in Shield Construction[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016.
[13] 琚时轩. 土压平衡盾构和泥水平衡盾构的特点及适应性分析[J]. 工程机械, 2007, 38 (12): 20-22.
JU Shixuan. Features and Adaptability Analysis of Soil Pressure Balancing Shield and Grout Balancing Shield[J]. Construction Machinery and Equipment, 2007, 38 (12): 20-22.
[14] 敖日汗. 地铁隧道盾构施工中的几个问题[D]. 天津:天津大学, 2010.
AO Rihan. Several Problems in Shield Construction of Metro Tunnel[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
[15] 魏康林. 土压平衡盾构施工中泡沫和膨润土改良土体的微观机理分析[J]. 现代隧道技术, 2007, 44 (1): 73-77.
WEI Kanglin. Micro-mechanism Analysis for the Soil Improvement by Foam and Bentonite in EPB Shield Tunnelling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44 (1): 73-77.
[16] 任晓龙, 魏百术, 张 伟, 耿向菲, 毕晓刚. 区间盾构隧道施工始发场地规划探讨[J]. 云南水力发电, 2017, 33 (6): 58-63.
REN Xiaolong, WEI Baishu, ZHANG Wei, GENG Xiangfei, BI Xiaogang. Discussion on the Launching Site Planning of Running Shield Tunnel Construction[J]. Yunnan Water Power, 2017, 33 (6): 58-63.
[17] 杨书江. 成都地铁泥水平衡及土压平衡盾构法施工对比[J]. 建筑机械化, 2011, 32 (6): 24-27.
YANG Shujiang. Chengdu Metro: Comparing SPB Shield with EPB Shield[J]. Construction Mechanization, 2011, 32 (6): 24-27.
[18] 谢新生, 张志勇. 盾构施工对周围环境的影响及防治措施分析[J]. 岩土工程界, 2004, (8): 27-30.
XIE Xinsheng, ZHANG Zhiyong. Analysis of the Influence of Shield Tunneling on Surrounding Environment and Prevention Measures[J]. Geotechnical Engineering World, 2004, (8): 27-30.
[19] 张 鹏. 盾构掘进纠偏及管片选型技术浅析[J]. 建筑机械化, 2012, 33 (S2): 219-221.
ZHANG Peng. The Analysis of Shield Driving Rectification and Segments Selection[J]. Construction Mechanization, 2012, 33 (S2): 219-221.

Study on Design and Selection Techniques for Large-Diameter Shield Railway Tunnel

TIAN Siming[1] *ZHAO Yong*[1] *WANG Liqing*[2] *LI Pengfei*[3]
(1 China Railway Economic and Planning Research Institute, Beijing 100038; 2 China Railway Design Co., Ltd., Tianjin 300142; 3 Beijing University of Technology, Beijing 100022)

Abstract Based on the shield design and construction of the Dongjin tunnel on the southwest ring road of Taiyuan railway terminal, an analysis and discussion on adaptability were conducted in terms of engineering geology, hydrogeology, ambient environment and risk management regarding shield tunnel design and shield selection, with the results showing that shield selection is critical for shield tunnel construction, it′s necessary to master detailed geological survey documents, properly choose shield machine and determine the related technical parameters; soil conditioning and grouting system configuration should be improved during shield construction to well control ground settlement; it is feasible for large-diameter earth-pressure balance shield to be adopted in the strata with complex ambient environment and the influence on urban residents is reducing to the largest extent.

Keywords Tunnel engineering; Shield type selection; Complex geological formation; Strata adaptability