

文章编号: 1007-2993(2022)03-0230-08

某超大直径盾构工程勘察重难点分析及对策措施

孙常青^{1,2}

(1. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101;
2. 城市轨道交通深基坑岩土工程北京市重点实验室, 北京 100101)

【摘要】 超大直径盾构隧道技术正在向大深度、大断面、长距离的方向发展。由于隧道断面尺寸大、隧道埋深起伏大, 工程地质条件、水文地质条件复杂, 会面临复杂的岩土工程问题。以北京东六环改造隧道工程为依托, 总结了该大直径盾构工程具有勘察等级高、工程地质水文地质复杂、超深基坑支护及地下水控制难度大等特点, 针对勘察重难点采取了标准贯入原位测试, 颗粒分析、静止侧压力系数、基床系数等室内物理力学试验查明了场地土层的物理力学性质; 进行了水文地质专项勘察, 分层观测地下水位、黏性土层孔隙水压力测试、抽水试验及注水试验等提供水文地质参数, 为超大直径盾构机选型、刀盘、刀具配置, 超大盾构掘进过程中各种施工参数匹配、盾构井支护设计以及地下水控制方案设计提供依据, 供同类工程借鉴。

【关键词】 超大直径; 盾构; 隧道工程; 勘察重难点

【中图分类号】 P 642

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.03.011

Analysis and Countermeasures of Key and Difficult Points in the Investigation of a Super Large Diameter Shield Project

Sun Changqing^{1,2}

(1. Beijing Urban Construction Exploration&Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China; 2. Beijing Key Laboratory of Deep Foundation Pit of Geotechnical Engineering of Rail Transit, Beijing 100101, China)

【Abstract】 With the continuous development of urban municipal construction to ultra deep underground space, super large diameter tunnel construction technology is gradually adopted. At present, the technology of super large diameter shield tunnel is developing in the direction of large depth, large section and long distance. Due to the large cross-section size, large fluctuation of buried depth, complex engineering geological and hydrogeological conditions, complex geotechnical engineering problems will be encountered. Based on the reconstruction tunnel project of Beijing East Sixth Ring Road, the characteristics of the large-diameter shield project, such as high survey level, complex engineering geology and hydrogeology, and great difficulty in ultra deep foundation pit support and groundwater control were summarized. Standard penetration in situ test and indoor physical and mechanical tests such as particle analysis, static lateral pressure coefficient and subgrade bed coefficient have been carried out. A special hydrogeological survey such as layered observation of groundwater level, pore water pressure test of cohesive soil layer, pumping test and water injection test was carried out to provide hydrogeological parameters. All these provided a basis for the selection of super large diameter shield machine, cutter head and cutter configuration, the matching of various construction parameters in the process of super large shield tunneling, the support design of shield shaft and the design of groundwater control scheme. It also provides reference for similar projects.

【Key words】 super large diameter; shield machine; tunnel engineering; key and difficult points of investigation

0 引言

城市土地的高强度开发使得城市土地资源愈显珍贵, 城市市政建设不断向超深地下空间发展, 超大直径的隧道施工技术逐渐被采用。超大直径盾构隧道是指建成后的衬砌外径直径 ≥ 14 m 级的盾构法隧道^[1]。世界上第一条超大直径盾构法隧道东京湾海

底隧道 1997 年贯通, 推动了超大直径盾构法隧道的发展。截至 2019 年 10 月 31 日, 在世界范围内, 超大直径盾构法隧道工程数量(含已通车、已贯通和在建)为 52 个^[1], 其中国外 16 个, 中国大陆地区 34 个, 中国香港地区 2 个。超大直径盾构隧道技术正在向大深度、大断面、长距离的方向发展^[2], 目前大直径

作者简介: 孙常青, 女, 1974 年生, 汉族, 山西人, 硕士研究生, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 现从事岩土工程勘察、设计工作。E-mail: sunchangqing401@126.com

盾构隧道直径主要为 14.50~15.80 m,项目所在区域主要分布在我国东部沿海和中部城市^[1-2]。肖明清^[3]针对武汉长江隧道、南京长江隧道、上海长江隧道、狮子洋隧道 4 座代表性大直径盾构隧道的环境条件特点,总结了大直径盾构隧道的设计技术进步。杨方勤等^[4]介绍了上海长江隧道抗浮模型试验与结果,确定了超大直径隧道动态上浮力,以此为基础提出了隧道上浮稳定机理,建立了盾构隧道上浮计算的理论模型。余暄平等^[5]结合上海长江隧道工程超大直径、超长距离盾构掘进,分析了施工中的关键技术、技术难点与风险,提出了相应的对策。万凯军等^[6]总结了武汉长江隧道水上钻探与定位困难、砂土取芯率低、地下水流速流向测试困难等问题,并提出了采用组合桩锚定位、动态跟踪纠偏技术、江上同位素示踪法地下水流速、流向测试、江上勘探深度监控技术、砂土旋切式钻探工艺等方法。熊清林和莫衍超^[7]以春风隧道工程为实例,介绍了复杂条件下超大直径城市盾构隧道勘察中常见的技术难点,并提供了解决措施。由于我国幅员辽阔,东部沿海、中部城市与北方城市地质条件千差万别。盾构施工与工程地质条件、水文地质条件、地形地貌、地面建筑、地下管线、隧道结构、线路线型等因素息息相关,盾构机应该依据这些具体条件来“量身定做”。鉴于此,本文以北京东六环改造隧道工程为依托,分析超大直径盾构的特点、勘察重难点,并提出针对性勘察措施,对于盾构机选型、施工,盾构井支护设计、地下水控制等具有重要的意义。

1 工程概况

东六环改造盾构隧道工程第 2 标段位于北京市通州区,南起于北运河北侧约 200 m,北至潞苑北大街,设计里程范围 LYK8+800—LYK16+000,线路长 7.2 km,设计为高速公路,设计速度 80 km/h。里程 LYK8+800—LYK13+840 为超大直径盾构段,长度为 5040 m,隧道直径约 15.5 m,结构顶板埋深约 12.5~50.5 m,结构底板埋深为 28.0~66.0 m,设计荷载 250~300 kPa。在里程 LYK9+040—LYK9+065 设置中部竖井,LYK13+840—LYK13+867 设置北部竖井,中部竖井长 57.1 m,宽 27.8 m,深 42.5 m;北部竖井长 57.1 m,宽 27.0 m,深 26.0m,均采用明挖法施工,地连墙+内支撑支护。拟建隧道工程地理位置示意图见图 1。

2 东六环盾构隧道工程特点

(1) 工程勘察等级高

城市轨道交通盾构断面直径一般约 6.0 m,而东



图 1 北京东六环大直径隧道工程地理位置示意图

六环隧道直径 15.5 m,盾构机开挖断面 202 m²,是北京市首例超大直径盾构隧道,工程勘察等级甲级,工程经验较少。盾构机选型对于超大直径、长距离、高水压隧道工程设计和施工是关键。

(2) 工程地质、水文地质条件复杂

第 2 标段隧道长 5040 m,隧道起点段结构顶板埋深约 12.5 m,结构底板埋深约 28.0 m;中间段埋深最大,结构顶板埋深约 50.5 m,结构底板埋深约 66.0 m;隧道终点段结构顶板埋深约 18.30 m,结构底板埋深约 33.8 m。盾构穿越地层为黏性土、粉土、砂土层,砂层以密实富水砂层为主。由于埋深变化大,即使是相同岩性的粉土、粉质黏土、砂土,工程性质截然不同。盾构施工对地层差异敏感性高,施工造成土层应力重分布的影响范围较大。

另外,场地内分布多层地下水,其中承压水水头较高,水压力较大,盾尾密封仓可能被水压力击穿,勘察时需重点查明拟建场地的各土层的物理力学性质以及水文地质条件。

(3) 超深基坑支护以及地下水控制难度大

中部盾构井深 42.5 m,北部盾构井深 26 m,属于超深基坑,基坑安全等级为一级。基坑侧壁土层主要为人工填土、第四系大厚度砂土,夹黏性土、粉土层,基坑易坍塌,支护难度大;同时,场地内分布有上层滞水、潜水和多层承压水,承压水水头高,基坑开挖时可能发生基底隆起、突涌。勘察时需要查明拟建场地内各层含水层的分布,特别是承压水的水头高度对盾构井地下水控制方案的选择起决定作用。

另外,盾构井埋置深度大,拟建隧道场地历史水位高,抗浮问题较为突出。

(4) 周边环境复杂,风险等级高

隧道工程周边环境复杂,主要位于北京城市副

中心绿化景观提升公园,沿线下穿规划 M101、现状 6 号线、规划平谷线、城际铁路、京秦铁路、规划 M103、运潮减河,沿线还存在超高压燃气、航油、石油等重要管线(见图 2)。风险等级从一级到特级,盾

构掘进引起地层扰动,对周边建构(构)物影响较大,盾构下穿上述部位需要严格控制拱顶围岩沉降,以保证周边环境安全。

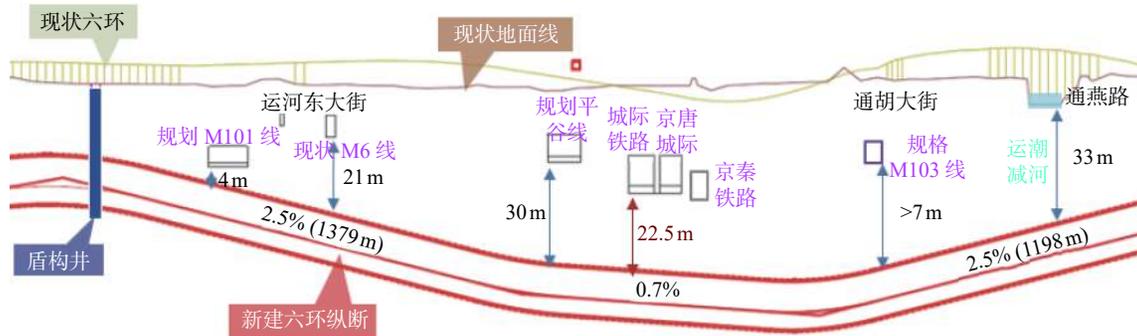


图 2 拟建隧道周边环境条件

3 工程重难点分析及勘察对策

3.1 超大直径盾构机选型及勘察对策

超大直径深埋盾构隧道需要克服很大的水压,平衡盾构开挖面顶底的水压差,最大泥水压力约 6 bar,要求刀盘旋转力矩足够大。根据泥水平衡盾构的特点^[8],泥水平衡盾构成为超大直径、长距离、高水压隧道盾构的最佳选择。另外,盾构穿越地层为黏性土、粉土、砂土层,砂层以高密度富水砂层为主,因此选择超大直径复合泥水平衡盾构机可以更好地控制地层沉降^[9]。

本文对盾构穿越部位进行了砂层、粉土、粉质黏土地层比例的统计,提供了砂土、粉土颗粒曲线,砂土特征粒径(D_{60} 、 D_{50} 、 D_{30} 、 D_{10})、不均匀系数(d_{60}/d_{10})、粉土和黏性土黏粒含量百分比、砂土物质组成,黏性土、粉土、砂土的标贯击数,为盾构合理选用刀盘结构形式、优化刀具配置以及盾构施工过程中各种施工参数设定,如切口水压设定与控制参数、泥水指标和同步注浆等提供依据。

表 1 是隧道穿越部位地层百分比统计结果;图 3 为典型砂土颗粒分试验曲线,表 2 为隧道穿越部位不同砂层特征粒径、不均匀系数、曲率系数;表 3 为对应砂土耐磨矿物成分平均值;表 4 为盾构穿越部位粉土和黏性土黏粒含量平均值;表 5 为隧道穿越部位粉土、砂层地层标贯统计值。

表 1 隧道穿越部位地层百分比统计 %

岩性名称	LYK8+800—LYK10+100	YK10+100—LYK11+050
砂土	66.0	40.3
粉质黏土	23.4	41.5
粉土	10.6	18.3

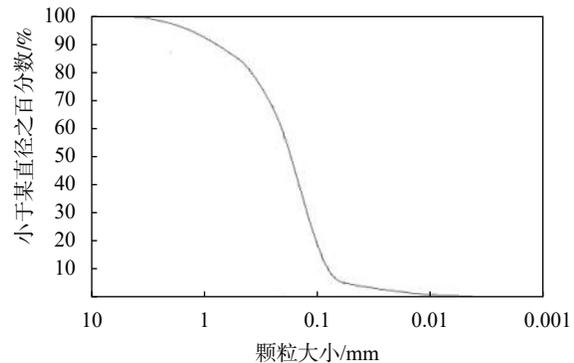


图 3 砂土典型颗粒分曲线

3.2 工程地质条件及勘察对策

拟建场地位于永定河冲洪积扇下部,属于古潮白河故道东侧台地。对于勘探深度范围内的土层,首先按照地层沉积年代、成因类型划分为人工堆积层、新近沉积层和一般第四纪冲洪积层三大类。为了进一步查明拟建隧道沿线的工程地质条件,本文按照地层沉积旋回划分出地层的主层,在此基础上依据地层岩性以及物理力学性质进一步划分 9 个主层及相应亚层,工程地质剖面见图 4,分层统计各土层物理力学性质。对于超大直径盾构围岩地层,本文对黏性土、粉土、砂土进行了一系列物理力学试验,提供参数类别见表 6,每一层参数取值见表 1—表 5、表 7,为盾构井设计、大直径隧道盾构设计、施工提供依据。

3.3 水文地质条件及勘察对策

为查明拟建场地的地下水分布情况,计算超大直径、超大埋深、超高水压盾构管片所承受的水压力,分析超深盾构井基坑开挖所产生的突涌风险,并采取合适的地下水控制措施,本工程进行了地下水位分层观测、盾构区间黏性土中孔隙水压力测试、抽水试验及注水试验。

表 2 不同砂层粒径、不均匀系数、曲率系数平均值

土层编号	地层岩性	有效粒径 d_{10}/mm	限制粒径 d_{30}/mm	平均粒径 d_{50}/mm	限制粒径 d_{60}/mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
② ₅	粉细砂	0.071	0.111	0.157	0.189	2.67	0.93
③	粉细砂	0.070	0.110	0.150	0.170	2.32	0.92
③ ₄	中粗砂	0.298	2.68	10.799	13.001	43.63	1.95
④	粉细砂	0.070	0.110	0.160	0.190	2.73	0.90
④ ₄	中粗砂	0.084	0.254	0.329	0.360	4.29	2.13
⑤ ₂	粉细砂	0.080	0.123	0.171	0.206	2.58	0.92
⑥ ₅	细砂	0.028	0.057	0.093	0.119	7.07	1.02
⑦	粉细砂	0.080	0.160	0.210	0.240	3.05	1.35
⑧	细砂	0.101	0.183	0.249	0.297	4.41	1.14

表 3 不同砂层耐磨矿物成分 X 射线衍射物相分析

%

地层编号	地层岩性	云母	角闪石	绿泥石	石英	长石	方解石	白云石
② ₅	粉细砂	1.0	1.1	0.0	43.0	54.7	0.2	0.0
③	粉细砂	2.7	0.0	0.0	39.5	57.8	0.0	0.0
③ ₄	中粗砂	1.0	1.1	0.2	44.6	52.3	0.2	0.7
④	粉细砂	1.4	0.8	0.0	41.4	56.2	0.2	0.0
④ ₄	中粗砂	1.0	0.0	1.4	51.2	38.2	2.7	5.5
⑤ ₅	粉细砂	1.5	1.3	1.0	44.3	52.0	0.2	0.0
⑥ ₅	细砂	1.0	1.2	0.0	35.6	59.4	0.0	0.0
⑦	粉细砂	0.6	1.6	0.0	39.6	57.7	0.5	0.0
⑧	细砂	0.0	1.7	0.0	37.0	61.3	0.0	0.0

表 4 盾构穿越部位粉土和黏性土黏粒含量平均值

%

土层编号	地层岩性	粒径范围/mm				
		0.25 ~ 0.075	0.075 ~ 0.05	0.05 ~ 0.025	0.025 ~ 0.005	<0.005
②	粉土	21.6	18.4	19.8	30.9	9.3
② ₂	粉质黏土	5.3	10.9	20.5	35.0	28.3
③ ₂	粉质黏土	4.3	15.3	15.1	23.8	41.5
③ ₃	粉土	26.5	18.0	17.1	30.8	7.7
④ ₂	粉质黏土	5.0	13.0	20.0	32.3	29.8
④ ₃	粉土	18.8	18.7	19.6	32.1	18.8
⑤	粉质黏土	4.9	11.2	20.0	31.7	32.2
⑤ ₃	粉土	16.1	19.6	20.8	32.0	9.8
⑥	粉土	22.3	17.8	18.6	31.7	9.6
⑥ ₂	粉质黏土	6.5	11.7	19.7	31.0	31.0
⑦ ₂	粉质黏土	5.3	11.8	21.6	29.5	31.7
⑦ ₃	粉土	21.7	17.5	19.5	31.8	9.5
⑧ ₂	粉质黏土	4.9	9.1	19.9	28.9	37.2
⑧ ₃	粉土	22.1	18.0	18.6	31.1	10.3

(1) 地下水位分层观测
拟建场地在 85 m 深度范围内分层观测地下水

位, 并设置长期观测孔, 地下水分层观测结果见表 8、
地下水分布见图 4。

表5 隧道穿越部位地层标贯击数统计值

土层编号	地层岩性	标贯击数 最大值/击	标贯击数 最小值/击	标贯击数 平均值/击
②	粉土	18	6	13
② ₂	粉质黏土	11	4	7
② ₃	粉细砂	26	12	19
③	粉细砂	43	18	29
③ ₂	粉质黏土	11	8	9
③ ₃	粉土	22	11	17
③ ₄	中粗砂	44	36	40
④	粉细砂	60	29	43
④ ₂	粉质黏土	14	9	11
④ ₃	粉土	33	17	23
④ ₄	中粗砂	62	32	45
⑤	粉质黏土	25	12	18
⑤ ₂	粉细砂	79	31	53
⑤ ₃	粉土	32	18	25
⑥	粉土	43	21	30
⑥ ₂	粉质黏土	31	11	21
⑥ ₃	细砂	85	34	61
⑦	粉细砂	90	40	72
⑦ ₂	粉质黏土	34	17	25
⑦ ₃	粉土	45	23	33
⑧	细砂	100	43	80
⑧ ₂	粉质黏土	38	19	28
⑧ ₃	粉土	47	31	36

注:表中标贯击数未经过修正。

表6 盾构施工岩土参数表

类别	参数	类别	参数
物理 性质	1. 比重、含水量、密度、 孔隙比	力学 性质	1. 无侧限抗压强度
	2. 颗粒级配颗粒分析、 提供粒径级配、特征粒 径(D_{60} 、 D_{50} 、 D_{30} 、 D_{10})、 不均匀系数 d_{60}/d_{10} 、曲 率系数及土名、黏粒含 量百分比 ρ_c 、砂的物质 组成及石英含量		2. 黏聚力、内摩擦角
	3. 液限、塑限		3. 压缩模量、压缩 系数
	4. 静止侧压力系数		
	5. 标准贯入锤击数		
	6. 基床系数		
	7. 热物理		

根据地下水的含水介质及赋存条件,潜水(二)、层间潜水(三)赋存在一个大的含水层中,只有中间局部粉质黏土部位以两层地下水的方式存在。

潜水(二)、层间潜水(三)、承压水(四)、承压水(五)、承压水(六)长期观测孔水位曲线见图5。

(2) 孔隙水压力观测

为了观测盾构区间埋置深度范围内黏性土中的孔隙水压力,本工程埋设4个孔隙水压力计,场地内地下水长期观测孔的水位及孔隙水压力计监测结果见表9,观测时间为2020年3月;根据监测结果绘制出孔隙水压力随深度变化曲线见图6。

(3) 水文地质试验

渗透系数 k 是工程设计、施工地下水控制的重要水文地质参数,本工程在中部竖井布置了3组单

表7 盾构穿越部位黏性土、粉土层特殊指标参数

土层编号	地层岩性	无侧限 抗压强度/kPa	静止侧 压力系数	基床系数		三轴试验		比热容 C /($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数 λ /($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导温系数 α /($\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$)
				K_x /($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	K_v /($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	c_{cu}/kPa	$\varphi_{cu}/(^{\circ})$			
③ ₂	粉质黏土	42.6	0.50	19.9	20.9	30.7	14.3	1.50	1.50	0.00179
③ ₃	粉土	51.5	0.43	23.0	24.1	18.0	26.7	1.60	1.70	0.00200
④ ₂	粉质黏土	83.8	0.49	25.6	25.2	34.7	16.3	1.60	1.36	0.00159
⑤	粉质黏土	75.8	0.44	30.5	28.9	31.3	19.9	1.59	1.53	0.00177
⑤ ₃	粉土	90.2	0.43	33.4	32.7	21.4	27.6	1.50	1.30	0.00155
⑥	粉质黏土	113.4	0.41	32.8	29.7	24.3	30.1	1.30	1.81	0.00247
⑦ ₂	粉质黏土	100.1	0.42	35.1	34.6	36.1	18.3	1.54	1.64	0.00199
⑦ ₃	粉土	92.4	0.39	40.5	38.7	26.3	32.2	1.43	1.58	0.00200
⑧ ₂	粉质黏土	119.2	0.42	38.7	35.6	35.2	19.4	1.44	1.70	0.00218
⑧ ₃	粉土	125.1	0.38	43.3	41.4	24.4	33.5	1.41	1.73	0.00221

表8 地下水特征表

地下水类型	水位或水头埋深/m	水位或水头标高/m	含水层
潜水(二)、层间潜水(三)	9.82 ~ 14.35	7.15 ~ 10.56	粉细砂③层、中粗砂③ ₄ 层、圆砾③ ₇ 层、粉细砂④层、中粗砂④ ₄ 层
承压水(四)	10.63 ~ 13.56	8.02 ~ 9.47	粉细砂⑤ ₂ 层、粉土⑤ ₃ 层、圆砾⑤ ₂ 层
承压水(五)	13.49 ~ 15.34	6.24 ~ 6.61	粉土⑥层、细砂⑥ ₃ 层
承压水(六)	19.98 ~ 20.35	0.12 ~ 1.23	粉细砂⑦层、细砂⑧层、细砂⑨ ₃ 层

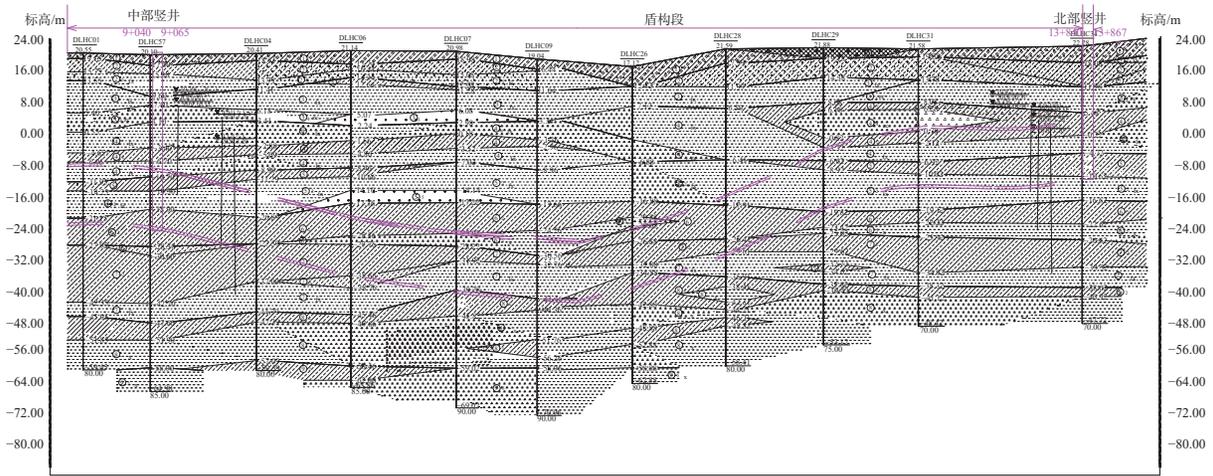


图4 拟建场地工程地质剖面图

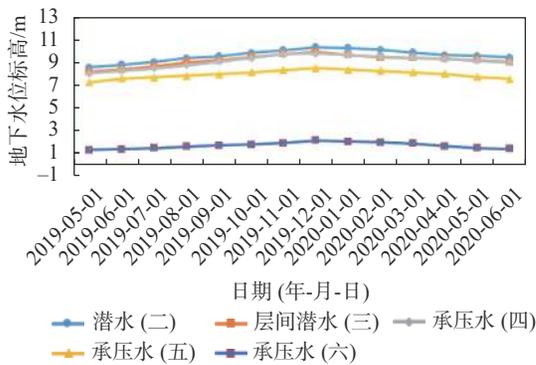


图5 不同含水层长期观测孔水位曲线

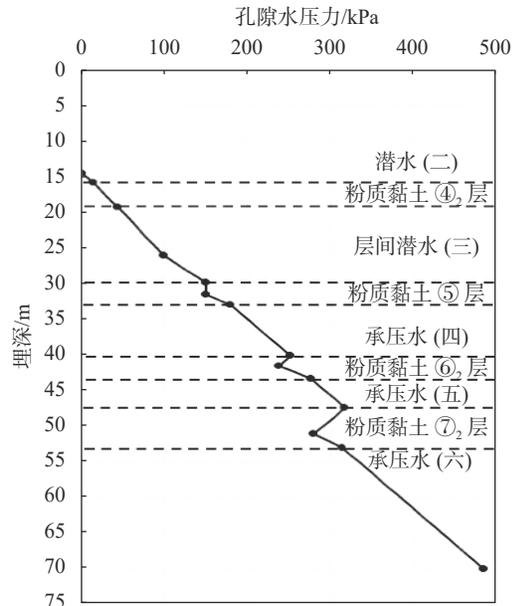


图6 孔隙水压力随深度变化曲线

表9 盾构区间地下水水位长期观测孔与孔隙水压力计监测情况

监测方式	试验井编号	地下水类型	观测深度/m	水位或水头埋深/m	水位或水头标高/m
地下水水位长期观测孔	G1	承压水(六)	53~70	21.67	1.23
	G2	承压水(五)	43~47	15.68	7.24
	G3	承压水(四)	33~40	14.90	8.02
	G4	层间潜水(三)	19~30	14.77	8.15
	G5	潜水(二)	8~16	14.37	8.56
孔隙水压力计	K1	层间潜水(三)	26	16.17	6.80
	K2	粉质黏土⑤层	31.5	16.48	6.44
	K3	粉质黏土⑥层	41.5	17.80	5.12
	K4	粉质黏土⑦层	51	23.04	-0.19

井抽水试验、1组变水头注水试验,水文地质试验设计参数见表10。每组抽水试验布设1个抽水井,3个观测井,抽水试验水泵型号采用250QJ140-46,水位监测采用标准测绳,流量监测采用超声波管井流量计TDS-100F1(DN100),标定误差<3%。

抽水试验中每个抽水井均完成2个降深,达到稳定降深后记录持续时间和涌水量,然后进行水位恢复试验。考虑到抽水试验过程受电压、水泵等因素影响流量的不稳定性,本文利用水位自然恢复数据,

采用非稳定流Jacob直线图解法计算渗透系数,计算结果见表11。

根据注水试验单对数曲线求出时对应的特征时间 T_L 、形状系数、渗透系数,计算结果见表12。

计算得出不同含水层渗透系数取值范围见表13。

(4)抗浮水位

本工程在水文地质调查、水文地质试验、地下水动态监测和大量工程地质、水文地质资料的基础上,分析拟建场地含水层分布特征,借助于GMS软件建立研究区的水文地质概念模型和地下水流数值模拟模型(非均质各向同性的非稳定流模型)。选择1959年作为降水典型年,采用频率分析法确定拟建场地百年一遇降水量1500mm,同时考虑该区域远期地下水停采,地下水位降落漏斗恢复以及西部地区长期生态补水的影响,拟建场地地下水位将抬升至15.5~

表 10 水文地质试验设计参数

试验组号	钻孔性质	钻孔编号	孔深/m	孔径/mm	管径/mm	过滤器长度/m	试验时段(埋深)
第一组抽水试验	抽水井	S1	30	600	300	23	目标含水层为潜水(二)和层间潜水(三), 过滤器埋深位置约为7~29 m
	观测孔	G1-1	30	130	50	23	
		G1-2	30	130	50	23	
		G1-3	30	130	50	23	
第二组抽水试验	抽水井	S2	40	600	300	9	目标含水层为承压水(四),过滤器位置约为 31~40 m
	观测孔	G2-1	40	130	50	9	
		G2-2	40	130	50	9	
		G2-3	40	130	50	9	
第一组注水试验	注水井	Z2	52	130	50	2	目标含水层承压水(五),含水层粉土⑥层, 过滤器埋深位置约为50~52 m
第三组抽水试验	抽水井	S4	80	600	300	20	目标含水层为承压水(六),过滤器埋深位置 约为60~80 m
	观测孔	G4-1	80	600	300	20	
		G4-2	80	600	300	20	

表 11 抽水试验渗透系数计算结果

地下水类型	试验编号	试验井编号	$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	H/m	i	$k/(m \cdot d^{-1})$
潜水(二)、层间潜水(三)	S1-1	抽水孔S1	25.86	18.6	0.0561	46.58
		观测孔G1-1	25.86	18.6	0.0485	53.88
		观测孔G1-2	25.86	18.6	0.0464	56.32
		观测孔G1-3	25.86	18.6	0.0422	61.92
	S1-2	抽水孔S1	49.83	18.6	0.1107	45.48
		观测孔G1-1	49.83	18.6	0.0897	56.14
		观测孔G1-2	49.83	18.6	0.0886	56.83
		观测孔G1-3	49.83	18.6	0.0736	68.42
承压水(四)	S2-1	抽水孔S2	22.36	6.5	0.1371	47.92
		观测孔G2-1	22.36	6.5	0.1316	49.92
		观测孔G2-2	22.36	6.5	0.1326	49.55
		观测孔G2-3	22.36	6.5	0.1233	53.28
	S2-2	抽水孔S2	46.01	6.5	0.2779	48.65
		观测孔G2-1	46.01	6.5	0.2712	49.85
		观测孔G2-2	46.01	6.5	0.2526	53.52
		观测孔G2-3	46.01	6.5	0.2548	53.06
承压水(六)	S3-1	抽水孔S4	60.37	20	0.7948	7.23
		观测孔G4-1	60.37	20	0.7453	7.71
		观测孔G4-2	60.37	20	0.7388	7.78
	S3-2	抽水孔S4	34.23	20	0.3683	8.88
		观测孔G4-1	34.23	20	0.3327	9.82
		观测孔G4-2	34.23	20	0.4308	7.59
	S3-3	抽水孔S4	39.53	20	0.4582	8.24
		观测孔G4-1	39.53	20	0.3716	10.16
		观测孔G4-2	39.53	20	0.4154	9.09

表 12 注水试验计算渗透系数计算结果

试验井编号	滤水管长度 L/m	井套管半径 r/m	形状系数 A/m	特征时间 T_i/min	渗透系数 $k/(m \cdot d^{-1})$	地层
Z2	2	0.025	2.476	2.27	0.503	粉土⑥层

表 13 不同含水层渗透系数取值

地下水类型	含水层	$k/(m \cdot d^{-1})$	k 平均值 $/(m \cdot d^{-1})$
潜水(二)和层间潜水(三)	粉细砂③层、中粗砂④层、圆砾⑤层、粉细砂⑥层	45.48 ~ 68.42	57.05
承压水(四)	粉细砂⑤层、圆砾⑥层	47.92 ~ 53.52	50.72
承压水(五)	粉土⑥层	0.503	0.503
承压水(六)	粉细砂⑦层、细砂⑧层	7.23 ~ 10.16	8.5

16.0 m。通过数值模拟模型对拟建场地百年一遇情况下的最高水位进行预测,模型预测期为 10 年,其中第 6 年降水量利用百年一遇降水量。

经分析,拟建场地百年一遇地下水位大幅抬升,潜水水位上升至 19.5 m(见图 7)。因此,拟建场地抗浮设防水位确定为 19.5 m。

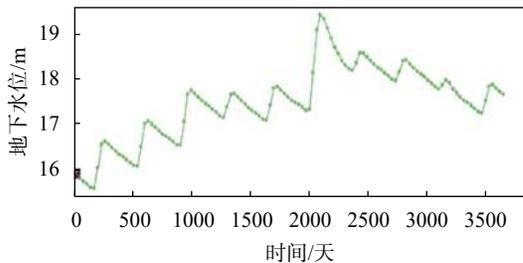


图 7 拟建场地地下水位动态变化预测曲线

3.4 周边环境调查及专项安全评估

针对复杂的周边环境条件,本工程对现状 6 号线、城际铁路、京秦铁路、运潮减河以及超高压燃气、航油、石油等重要管线进行建(构)筑物专项调查。同时,对盾构下穿上述建(构)筑物进行了施工安全专项风险评估,结果表明建(构)筑物、河底的沉降量均在允许的范围,满足规范要求。

4 结论

(1)盾构机选型、刀盘、刀具及盾构施工过程中各种施工参数匹配是超大直径隧道施工的关键,本文查明了盾构隧道刀盘不同岩土地层切削比例,砂土的密实度、石英含量与颗粒级配,黏性土、粉土的黏粒含量等关键参数。

(2)超大直径盾构隧道断面尺寸大,隧道两端埋深浅、中间段埋深大,隧道围岩涉及地层种类多,工程性质变化大,通过详细勘察,查明了场地土层的物理力学性质,提供了隧道围岩设计、施工所需的岩土参数。

(3)超大直径、超大埋深、超高水压致使盾构管片承受很大的泥水压力;超深盾构井基坑开挖涉及多

层地下水,面临基坑突涌风险,需要进行专项水文地质勘察,分层设置地下水位长期观测孔,量测盾构区间孔隙水压力,进行抽水试验、注水试验测定不同土层渗透系数,为制定合适的地下水控制方案提供依据。

(4)针对复杂的周边环境条件,需要建(构)筑物专项调查,并进行施工安全专项风险评估,以保证盾构施工过程中周边环境安全。

(5)通过分析超大直径隧道盾构的工程特点,明确了超大直径盾构工程勘察重难点及对策措施,为超大直径盾构隧道设计、施工提供依据。

参 考 文 献

- [1] 王 平. 中国超大直径盾构法隧道市场发展形势分析[J]. 建筑科技, 2020, 4(1): 42-46.
- [2] 傅德明,周文波. 超大直径盾构隧道工程技术的发展[C]//第五届中国国际隧道工程研讨会论文集. 上海市土木工程学会, 2011.
- [3] 肖明清. 国内大直径盾构隧道的设计技术进展[J]. 铁道标准设计, 2008, (8): 84-87.
- [4] 杨方勤,段创峰,吴华荣,等. 上海长江隧道抗浮模型试验与理论研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, (3): 454-459.
- [5] 余暄平,沈永东,凌宇峰,等. 上海长江隧道工程盾构施工技术[J]. 上海建设科技, 2007, (8): 47-50.
- [6] 万凯军,李大毛,赵建海. 武汉长江隧道岩土工程勘察难点及措施[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(5): 663-665.
- [7] 熊清林,莫衍超. 复杂条件下超大直径城市盾构隧道勘察关键技术探讨—以春风隧道为例[J]. 工程建设与设计, 2019, (16): 90-91.
- [8] 索晓明,张继清,杨毅秋. 北京地下直径线大直径盾构隧道技术研究[J]. 中国工程科学, 2010, 12(12): 11-17.
- [9] 刘洪洲. 超大直径盾构机的选型问题[J]. 公路隧道, 2006, (1): 9-13.