

盾构施工技术及其应用

王守强

(中国华水水电开发总公司 北京 100081)

摘要 综述盾构机械的结构、分类及工作原理,对盾构机的施工速度、施工技术、使用寿命,以及用盾构机挖成隧洞后的衬砌与灌浆问题作了较详细的分析。文末介绍了日本东京地下蓄水池工程和英国伦敦供水工程采用盾构机械施工的实例。

关键词 施工机械 盾构机 掘进机 施工技术 隧洞 衬砌 水工隧洞

当今世界上隧洞掘进主要有钻爆法和掘进机施工两种。钻爆法即通过钻孔爆破岩土来开挖隧洞,我国著名的鲁布革水电站就是一种全机械化钻爆法施工的典型,月平均进尺为 200~250 m。掘进机是以机械能破碎岩土,使隧洞全断面一次成型,掘进机开挖是目前世界上隧洞施工最有效的手段,它的广泛而又成熟的应用是隧洞施工史上的一次革命。它与钻爆法相比,具有快速、优质、经济、安全四大优点。

随着科学技术的不断进步,90 年代以来,掘进机工作效率不断提高,国外采用掘进机开挖隧洞月平均进尺已达到六七百米,有的甚至超过千米,一般为钻爆法的 3~5 倍。在甘肃引大人秦工程中,运用美国罗宾斯掘进机,月平均进尺达到 1000 m。用掘进机施工,避免了爆破作业,成洞周围岩石受震动破坏影响小,隧洞洞壁开挖光滑,衬砌工作量也随之大大减小,有些洞壁甚至可以不要衬砌。运用掘进机施工,可以选择较短的隧洞长度、较少的支洞数量和相应的临建工程以及费用,既缩短了工期,又提高了经济效益和社会效益。另外,采用掘进机施工还可避免钻爆法施工中的人员伤亡、有毒有害尘埃对人体

的危害以及工程安全事故。如日本津轻海峡的青函铁路隧道全长 53.85 km,1972 年起使用钻爆法施工 14 年才完工,事故死亡 100 多人。90 年代,规模相当(全长 50.5 km)的英法英吉利海峡铁路隧道使用盾构机施工,只用了三年半就全部贯通,没有一起死亡事故。

近 30 年来,在掘进机的施工中,又比较普遍而又成熟地应用盾构技术(全断面掘进),进行隧洞施工和地下埋管,这种机械与传统掘进机相比,工效较高,月进尺可达几百米至千米。适应于多种复杂地质条件,软土硬岩均可使用,即使一条隧洞既有软土、又有硬岩,也能选择合适的盾构机械一次贯通。特别是在地下水压很大的地层中传统掘进机难以开挖,而盾构机械也可畅通无阻。盾构机安全度高,可以一次成洞。洞体质量包括结构完整性、承载力、止漏防渗都远较传统掘进机好。另外因有坚固盾壳支撑,施工安全可靠。从这些方面来看,盾构技术的应用,又使掘进机施工技术进入一个新的阶段。

经济在发展,社会在进步,我国水利、水电、交通、铁道、城市地铁等建设,需要开挖大量的隧洞,或在地下埋管,因此,盾构技术在我国的应用有着广阔的前景。

作者简介:王守强,男,教授级高级工程师,中国华水水电开发总公司总经理。

1 盾构技术

盾构法施工起源于欧洲,后在日本、美洲也有了较大的发展,现在已广泛地应用于世界各地,据粗略统计,已生产了8000多台大小不等的各类盾构机,而且均已获得成功。

盾构技术是利用盾构机械所特有的盾壳作为支护,防止岩土地层的坍塌和地下水的人侵,以保障在岩土等各种地层中以多种切削方式进行开挖,同时安装管片并灌浆,从而形成质量完好的洞身。

由上可见,一个盾构系统大体上可由几个重要环节组成。首先是盾构机械,即开挖隧洞的主体设施,其次是洞身的管片的制作,再就是管片的运输与安装,最后灌浆封堵,同时还有装碴、出碴以及其它辅助设施。

一个完善的盾构系统必须做好如下几项重要工作:首先是根据隧洞所处地质情况(包括地质构造、岩石指标、地下水位、渗透性等)、隧洞几何尺寸(包括隧洞断面形状、隧洞直径、隧洞长度、隧洞转弯曲率半径、隧洞纵向坡度等)及外部边界条件(包括隧洞埋深、地面建筑物情况与环境标准及要求等)选择适用的盾构机型;其次做出现场施工的总体布置,包括管片的制作与运输、出碴系统的布置、建立风、水、气系统及必要的辅助工厂,有些情况还要考虑超前加固地层。

1.1 盾构机械

盾构机为一卧式圆筒形钢结构,盾内设有操纵控制、固壁出碴、运输安装等各类系统设施。盾构机体可分为盾头、盾身、盾尾三部分,盾头为全断面刀盘,在各种形状的刀盘架上,根据地质情况设计安装合理的刀头,机械在盾头切削岩土,并取碴出碴,必要时在这里更换刀头、维护刀具;盾身为操纵控制盾构机运行的地方,这里设有控制室,并有机械手在这里安装管片;盾尾外部主要是对管片与开挖周边形成的空隙进行填充灌浆,其内部主要是将出碴系统和管片运输系统与后方有机地衔接。

盾构机的尺寸是这样确定的:依据隧洞洞径的要求,考虑管片厚度(即洞身的厚度)确定盾壳外径;根据切削、维修、出碴、安装管片、灌浆等要求,确定其长度。

目前,直径最大的盾构机的外径是14.14m,全重3200t,用于日本东京湾海底公路隧道施工。

盾构技术的关键在于根据地质条件与地下水状况合理选用相应的盾构机械,以达到开挖效率高、设备制造价格和工程投资较低、安装简便快捷、使用寿命长、操作与维护方便等要求。

目前国际上常用的盾构机械可分为泥水加压式和土压平衡式两大类,遇到较复杂的地质情况也可采用混合式盾构机械。下面对不同类型的盾构机作一简单介绍。

1.1.1 泥水加压式盾构机

泥水加压式盾构机又称有压泥浆式盾构机,主要针对无粘聚力的滞水砂层、软塑性、流动性等特别松软地层中进行隧洞开挖而研制的,目前被广泛应用于各种软弱地层的施工。

泥水加压式盾构机的基本工作原理是:盾构机将按一定要求配制的膨润土或粘土浆,通过泥浆泵、输浆管以一定的压力从盾头上部送往开挖工作面,有压泥浆可以发挥固壁作用,当地下水位较高时平衡水压力,使开挖面保持稳定;与此同时,刀盘从工作面切削下来的岩土碴也与泥浆混为一体,再由盾头下部的吸泥管吸出送往泥碴分离场(如遇不太大的石块,盾头下部设有颚式碎石机进行碎石至管道可以输送的程度);经过分离后的废碴运出工地,分离后的工作泥浆重复循环使用,必要时适当补充新的工作泥浆。

泥水加压式盾构机刀盘上的刀架与刀头,应根据岩土构成情况及其硬度,选择适当的材料和形状。对材料要求坚硬耐磨,便于装卸、更换。如有扩挖要求,还可在刀盘外缘,装配可调节的扩挖刀头。刀盘旋转动力一般为交流市电,有的用电动机带动液压泵驱动旋转。

随着刀盘不断切削岩土,在沿圆周布置的若干强力液压千斤顶推力下,盾头不断向前推进。这些液压千斤顶皆以电力带动油泵供油来工作。

当盾构机向前推进一个管片的长度(沿洞轴向)时,便可以用机械手将若干管片依从下而上的顺序拼装为管环,即洞身。一般洞身分7~11片(视洞径而定),其中顶部有一管片称关键片,它呈楔形,它的安装使管环呈一挤紧的整体。盾构机上的机械手,有的是机械挂构,用于插销固定管片;有的是用负压吸盘,将管片吸起。这些均由施工人员现场操作、拼装。

随着管环的形成,盾构机立即在盾尾部位进行填充灌浆,沿盾尾外周的灌浆管压出水泥砂浆,盾尾末端沿圆周内侧设有2~3道止浆圈,与已成型管片压紧防止漏浆,保持灌浆压力与质量。

泥水加压式盾构机必须配备泥渣分离场,该场包括:①配制工作泥浆装置,按比例配制泥浆,并送入泥浆运行系统;②多级泥浆泵与泥浆管系统,将工作泥浆送至盾头工作面,同时将含渣泥浆返回分离场;③泥渣分离装置,包括多级振动、旋转等分离设施,使干渣分离出来。泥渣分离场以电力为动力。从分离场的布置看可分为两种情况,较常见的是将分离场布置在竖井附近的地面上,但遇到地面过于狭窄,难以布置或一台机隧洞开挖过长,也有将分离场布置在洞内台车上。

1.1.2 土压平衡式盾构机

土压平衡式盾构机与泥水加压式盾构机所不同的在于没有泥浆进入工作面,切削下来的岩土碴被一个螺旋输送机连续取出,送上皮带输送机,再装入斗车运出。这样,工作面的稳定是由自身和堆土压力平衡来保证的,因此螺旋输送器的取土速度必须调节适度,与切削的速度相适应。

由此可见,土压平衡式盾构机就无需泥渣分离设施,也无需泥浆泵、输泥管等设施。土压平衡式盾构机适用于地层稳定性较好,

地下水位不高的情况。

1.1.3 混合式盾构机

在同一条隧洞中,往往由于地质情况差异大,地层变化复杂,施工中遇到不同的问题,这就需要采取多种类型盾构机的相互转换,以适应地质条件对机械的要求。详细情况可见本文中所举工程实例。

除上述外,当隧洞尺寸较小时,洞身可以不分成为若干管片,可将整体管段由竖井处顶进。目前一般3m内径以下的深埋输排水系统的管路,均利用顶管机来实施。顶管机实质上是小直径的盾构机,它和盾构机一样通过各类刀盘旋转进行开挖工作,当挖进长度达到一节管长(一般3~4m)的时候,便可在竖井中收回液压千斤顶,同时向竖井中吊入一节管段,经对中后,启动千斤顶持续顶进。周而复始,洞身不断延长。目前一般一个竖井最长可顶管3000m,这当然决定于地质条件、管壁与地层摩擦力以及千斤顶数量与顶推力。

1.2 盾构机的重要技术经济要点

1.2.1 施工速度

隧洞工程施工比较复杂,工程量大,工作面少,工期较长,耗资多,而且对周围环境影响大,因此要求尽量加大施工速度。盾构施工速度的控制因素主要是开挖速度、安装管片时间以及检修维护时间。

开挖快慢又主要决定于地层条件、刀盘转动速度、刀头形状与材质。安装管片时间决定于吊装机械手的功能与人员的操作熟练程度。盾构机械由多个系统组成,每个系统均需经常性地检修维护,需占用一定的时间,这与机械质量与使用状况都有密切的关系。

据我们多次考察国际隧洞工程,一般月进尺在200~600m,大体上开挖时间占35%~50%,安装管片时间占20%~30%,检修维护时间占30%~40%。

1.2.2 盾构机械的使用寿命

盾构机的强大盾壳具有相当的强度与厚度,每台盾构机可以工作几十公里,甚至更长

的距离,可多次使用,每次使用后可以回收,只需做简单维修即可。刀盘刀架结构属坚固耐磨设计,不易损坏。机内机电设备、操作控制、出碴、运输等系统也都属常规运行,均可通过正常的检修、更新来延长使用时间。由此可见,控制整体机械的使用寿命在于刀头。

从多年实践看,目前的刀头一般只能开挖 $1\sim 1.5\text{ km}$,必须及时更换新刀头。德国海伦克内希特公司成功地应用在盾头设置支护板和压缩空气支护工作面技术,可以及时更换刀头,从而大大延长机械的整体寿命。但是使用压缩空气支护工作面,也有一定局限性,例如德国、日本规定人员不得在超过 $3\times 10^5\text{ Pa}$ 的空气压力下工作,因而在更高的地下水压力条件下,将会受到制约。从实践看,现在已有一台机连续开挖 15 km 的实绩。

1.2.3 几项重要施工技术

a. 纵坡倾斜掘进。综观国内外盾构施工实例,在隧洞纵向布置上,都全面考虑到与地下工程、管道及其它设施之间的高程关系,同时也研究地质条件的合理选择,因而几乎所有的隧洞都有一定纵坡。较缓的纵坡对于盾构机械施工是没有什么特殊要求的,较大的坡度则必须对碴浆的运送、管片的运输以及盾构机开挖定向做出论证。目前,国外一些公司、工厂都在开展纵坡施工研究,在实际工程中,纵坡一般控制在 1% 左右,在德国科隆地铁隧洞工程中,可以达到 4% 。

b. 弯道掘进。盾构机在施工时可以转弯,转弯半径视机械尺寸、隧洞尺寸而定。在德国科隆地铁隧洞工程中,最小转弯半径为 250 m 。转弯时,用分布于盾壳四周的 14 个液压千斤顶进行调整。当调整幅度不够时,还可以用超挖设施辅助进行。

c. 盾构机械调头。盾构机械虽然大而笨重,但也可以设法在一定空间中调头、转向。在德国科隆地铁隧洞工程中,借助于 10 个气垫支承整个盾头 250 t 的重量,升高 1 mm ,这样,一天就可拖行 150 m ,或者完成调头工作。

1.2.4 盾构机的价格

目前盾构机械在国际市场上处于激烈竞争的状况,尽管盾构机型不一,直径不一,但总的看来,价格仍有一定规律,一般每米直径约 100 万美元。德国海伦克内希特公司制造的 10 m 直径的泥水加压盾构机为 $1000\sim 1200$ 万美元,为伦敦地铁 107 工程提供的直径 5.13 m 的泥水加压式盾构机每台 500 多万美元;为台湾生产的直径 5.5 m 的 4 台盾构机总计 2200 万美元。德国埃森地铁工程直径为 8.38 m 的泥水加压式盾构机每台 1600 万马克(约合 1000 万美元)。

1.3 盾构机的制造、运输与安装

目前,国外盾构机的制造厂从 1964 年以来已生产出各种类型的盾构机 8000 多台,主要的生产制造厂有十余家,集中在欧洲与日本,如德国海伦克内希特公司、日本三菱重工、川崎重工、英国豪顿公司、奥地利阿尔平公司。另外美国罗宾斯公司,加拿大罗威特公司也都生产盾构机械。

盾构机均应按用户需要单独设计,有些项目往往还需经过试验研究,因此制造时间较长。一般直径在 $8\sim 10\text{ m}$ 的盾构机,需要半年多的制造时间。

盾构机尺寸大、重量重,考虑运输的要求,都是由若干部分拼装而成,因此在制造厂里组装试运行后,再分解运输。散件运输到工地后,即可进行组装,一般组装时间需三个月左右。

盾构机组装前,在开挖隧洞的起点,一般先开挖一竖井,井的直径以吊装盾构机及隧洞开挖需要为原则,井深应满足盾构机能在隧洞设计高程上就位运行。井壁必须稳定可靠,必要时予以冷冻或灌浆加固处理。隧洞首部的岩土地层也必须稳定处理,防止坍塌。盾构机体放在钢轨上移动前进,便可进入正常运行。

1.4 隧洞衬砌与灌浆

衬砌通常采用若干钢筋混凝土管片来进行,一般为 $7\sim 11$ 片,当隧洞直径很大时,还

可以增加管片数量,其中一片为关键片,其它各片可以是同一种规格,也可分为两种规格。管片厚度及钢筋布置由洞身所受内外压力情况计算确定,管片长度与宽度,则主要考虑每个管片的重量和安装效率来确定,一般每片重量达4~7t。管片与管片间在纵向和环向均有螺栓或键销连接,当洞外荷载远大于内荷载时,也有在安装、灌浆后把螺栓再拆下来的情况。管片与管片之间接缝均采用企槽设计,接缝的密封采用在槽中加弹力橡胶圈和灌浆的办法来解决。

上述的设计方案保证了较高的技术标准,加上用精度较高的钢模板,以及制作过程中严密的程序,加上绑扎牢固的钢筋网位置准确,严格控制的混凝土材料,以及定时的蒸汽养护,使管片表面光洁,能够准确定位,管片间具有良好的紧密性,并能够抵抗开挖时千斤顶施以的推进力,从而使洞身完整、美观、有效。

管片安装后,及时地沿隧洞周围进行认真的灌浆,是防止地层下沉的重要措施,同时可以均匀地向周围岩土缝隙灌浆,因此也是保证洞身完整、进行有效承载的基础条件。盾构机械装有非常可靠的操作系统,对灌浆压力与灌浆量都能进行控制和监测,故能实现灌浆的预期效果。

1.5 盾构施工的作业人员及其组合

应用盾构技术进行隧洞施工,已经实现机械化或自动化,每班洞内挖掘操作与衬砌管片需4~6人,管片及其它材料运输需4~5人,泥浆制备与残碴处理系统需要4~5人,

检测洞身位置确定开挖方向需2人,再加上技术人员与管理人员,每班需约20人。

2 工程实例

2.1 东京神田川环七线地下调蓄池工程

日本东京神田川环七线地下调蓄池工程位于日本东京市中野区环状七号线下,是为解决每小时50mm降雨量、河水暴涨引发东京市部分地区水害而修建的地下隧道式排洪调蓄池工程。调蓄池为圆形断面,衬砌后外径13.7m,内径12.5m,总长4.5km,纵坡1/1500。工程分两期实施,现施工第一期,段长2km,第二期将延长约2.5km,见图1。

调蓄池的地质条件是:主要地层由表土层、冲积砂层、洪积粘土、砂质土、砂砾石互层等组成,见图2。砂层较松软,标准贯入击数 $N < 10$,砂的矿物成份主要为石英、长石,分选磨圆度较好,中细粒为主,含量约占68.5%。砂砾的分选磨圆度较差,较密实, $N = 30 \sim 50$,砾径多为5~50mm,最大150mm,成分主要为片岩、石英岩、花岗岩等,含量7.7%~10%。粘土稍硬、致密, $N > 15$ 。砂砾层渗透系数为 $4.24 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。施工段孔隙水压力为 $2.7 \sim 4.1 \text{ kg/cm}^2$ (265~402 kPa)。勘探钻孔间距一般为150m,局部加密,部分地段因地面建筑物拥挤,钻孔布置只好见缝插针。

调蓄池埋深在地面下34~43m,见图3。调蓄池采用泥水加压式盾构机进行施工,盾构机外径13.94m,盾头长11.82m。泥水压力 6.0 kg/cm^2 (588 kPa)。

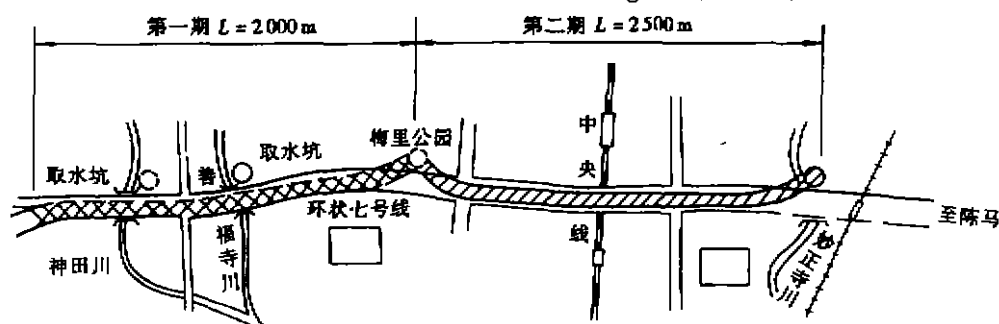


图1 神田川地下调节池平面图

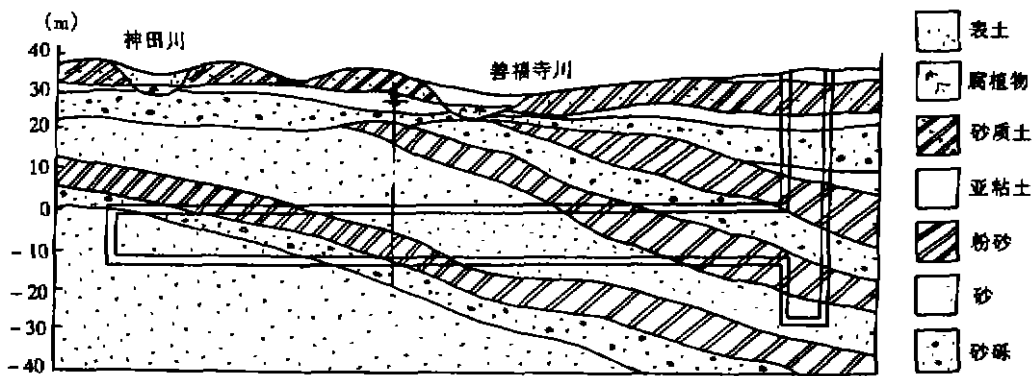


图2 神田川地下调节池地质纵剖面

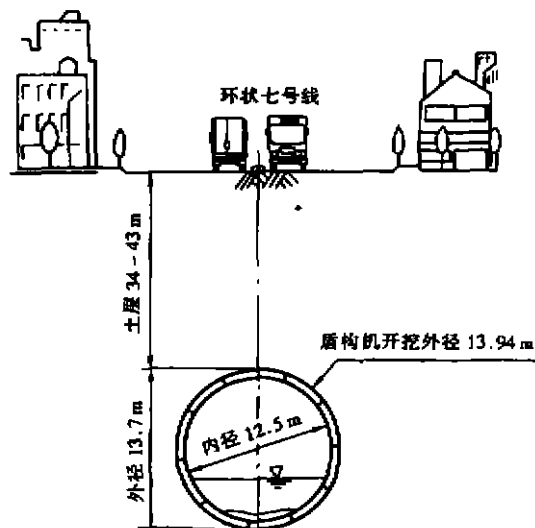


图3 神田川地下调节池横剖面

隧道进口竖井位于梅里公园处,竖井内径 25 m,外径 28.2 m,竖井深约 60 m,基础深约 100 m,井壁由混凝土连续墙构成,见图 4。竖井的建设工程期约 15 个月。

为确保盾构机顺利开挖进洞,在盾构机前后方向的竖井壁处,进行了围土的改良和加固,以提供较好的进洞条件和足够的推力

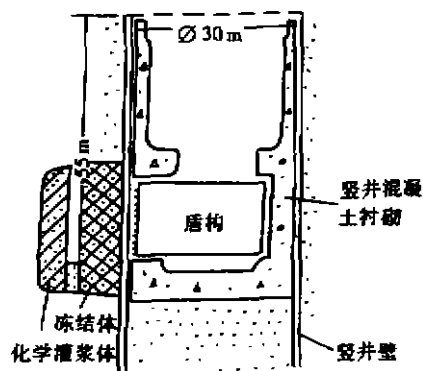


图4 神田川地下调节池进口竖井剖面

支撑体,改良加固的方法主要有水泥灌浆、化学灌浆和土壤冷冻,厚度一般为 8~28 m,即盾构机能够进行正常掘进的长度。

泥浆制备和泥砂处理场设置在竖井边的地面上,配置的优质泥浆经泵加压送至盾构机掘进工作面,泥砂则随废浆排至泥砂处理场,通过三次沉沙分离,丢弃残土,泥水经配置后再次循环使用,见图 5。

泥浆的材料以粘土为主,配以分散剂和增粘剂,比重 1.05~1.1,粘度 25 s。

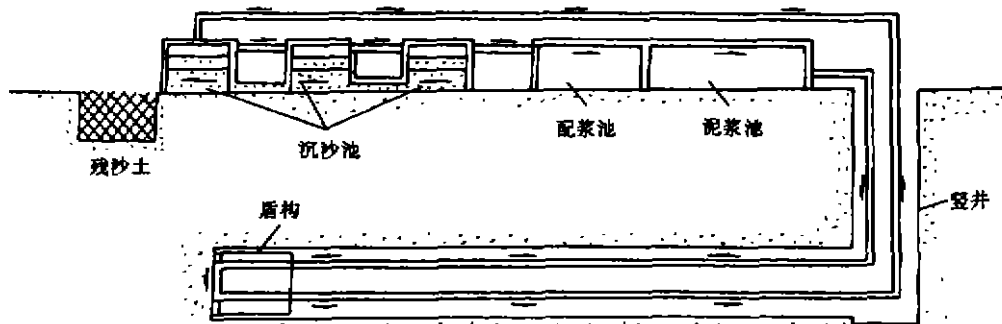


图5 泥浆、泥水、泥砂处理图

管片组装:由于隧道断面大,设计选用11片管片拼装组合。管片由专门的预制厂精心制作,单片宽1.2m,长4m,厚0.6m,每块重约7.5t。

安装顺序:先安装底部A片,再对称安装4~8的A片,后安装9~10两个B片,最后安装关键片K片。各管片间有两道止水片,管片间用螺栓连接,以形成整体,并抵御地下水的渗透,见图6。拼装一圈需2h左右。

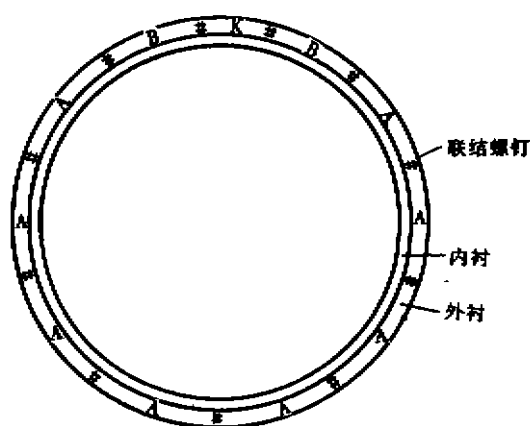


图6 隧道衬砌拼装图

东京市神田川环七线调节池自1992年9月动工,至1994年5月,历时1年零9个月,平均月进尺为100m,累计总进尺已超过1700m。施工进度比较顺利,曾发生过排砂管被砾石堵塞的事故,排除这次事故约用去12h。

2.2 环伦敦供水工程

泰晤士水公司是英国最大的水公司,负责伦敦600万人员的供水。伦敦原有的供水系统是由水厂通过泵站经过地面输水管路送到伦敦各处的。长期以来金属管路锈蚀、损坏并且规模也与供水需求不适应。由泰晤士水公司投资2.5亿英镑建设环伦敦供水工程,计划10年完工,现提前2年已于1995年完工。

环伦敦供水工程主要目的是建设大型地下输水隧道来代替地面输水管路,使经过水厂处理过的水通过地下输水管道自流送到设在环绕伦敦供水隧道线路上的10座泵站,然后由泵站将水送到与之相连的遍及伦敦的城

市配水系统。环伦敦供水工程包括水处理厂、泵站、输水隧洞、控制系统等。

输水隧道全长80km。为避开伦敦地下众多的地铁隧道,输水隧道深埋于地表45m以下,最深处达75m。隧道通过的地层主要是超固结的黄色伦敦粘土层,该层渗透系数 $K < 10^{-4}$ cm/s,部分地段为砂、砾石层。

隧道内径2.3~3.0m,施工竖井直径7.0~11.0m,部分竖井施工完后,改建为泵站。两个施工竖井之间最长的距离为6km。

工程分为二期,第一期工程使用开敞式挖掘,在遇到流沙时,几乎被埋住。第二期工程采用盾构式掘进机,盾构掘进机外部可承受 4×10^5 Pa的外水压力。

施工进度原设计每周200m,第一期工程每周115m,第二期工程每周达到350m,平均每周超过200m。

隧道衬砌为混凝土预制管片,第一期工程预制管片每环由11片组成,人工安装。第二期工程预制管片,每环由8片组成,机械安装。隧道衬砌承受 1.5×10^5 Pa的内水压力,设计按承受 3×10^5 Pa考虑,在隧道通过砂层时需要二次衬砌,并设密封止水。在通过粘土层时,管片不设止水,亦无任何处理。

(收稿日期:1997-04-11 编辑:马敏峰)

简讯

巴基斯坦水电开发部门最近制定了一项20年电力发展规划,拟在2018年之前将电力生产在现有水平上增加3倍,这项规划的制定是对各个工业部门未来电力需求进行详细调查研究的结果。目前巴基斯坦电力需求量约9500MW,而到2000~2001年将增至13310MW。巴基斯坦已建并投入运营的水/火电生产能力合计约11000MW,该发展规划提出应在此基础上增加至44000MW。根据此方案,水电生产应增加2倍,即从现在的4825MW增至14100MW。规划提出的增长数量包括由有争议的Kalabago水电工程提供的2700MW电力。(熊莉芸供稿)