

中国隧道及地下工程修建技术

王梦恕, 谭忠盛

(北京交通大学, 北京 100044)

[摘要] 主要介绍了我国隧道与地下工程的设计理论及方法、钻爆法隧道施工技术、盾构隧道施工技术和TBM(tunnel boring machine)施工技术等。指出了我国隧道及地下工程今后研究的方向:大埋深特长隧道的修建技术,城市地下空间规划,隧道及地下工程的动态设计以及降低工程造价的方法等。

[关键词] 隧道;地下工程;设计理论;钻爆法;盾构与TBM法

[中图分类号] U455 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)12-0004-07

1 前言

随着城市规模不断扩大,人口增多,有大量的交通、房屋要建,我们每天都看到大片良田被钢筋混凝土所取代。这种摊煎饼扩大城市发展模式是与可持续发展目标相违背的发展模式。能否把地面沃土多留点给农业生产和居住环境,把地下岩土多开发点给道路交通、工厂和仓库,从而将城市向地下空间发展成为人类在地球上安全舒适生活的第二个空间,地下空间作为人类唾手可得的资源已摆在我们面前,这个问题是值得重视的。

今天,中国已是世界上隧道及地下工程规模大、数量最多、地质条件和结构形式最复杂、修建技术发展速度最快的国家。今后通过在工程建设实践的过程中不断创新,必将逐步形成具有我国特色的隧道与地下工程修建的方法和技术体系,使我国隧道与地下工程修建技术进入跨越性发展的轨道,成为引领世界隧道及地下工程修建技术的国家。

自1888年我国修建的第一条隧道——狮球岭隧道以来,经过120余年艰难曲折的发展历程,中国隧道修建技术从大瑶山双线铁路隧道采用新原理、新方法、新结构、新技术、新设备、新工艺全面建成开始,已步入了世界先进水平的行列,在勘测设计、施工、运营、科研等方面取得了许多重大的成就和创新。

秦岭隧道、乌鞘岭隧道、太行山隧道等一批越岭特长交通隧道已经建成;跨越水域的武汉长江隧道、上海崇明岛隧道、南京长江隧道、厦门翔安海底隧道、青岛海底隧道等内陆水域及海域隧道也已建成,琼州海峡隧道、港珠澳桥隧大通道、渤海湾桥隧工程正在规划;北京、南京、深圳、广州等30多个城市的地铁正处在建设与规划的热潮中;辽宁省直径8m的大伙房水库输水隧道长度达到85.32km,已建成投入使用,这条隧道已成为目前世界上已建成的最长隧道。规模宏大的葛洲坝、三峡、溪洛渡等水电站的建成,说明我国在修建大型复杂地下工程中的技术水平已位居国际前列。大量工程的修建已证明:我国已经成为世界上隧道数量最多、发展速度最快、地质条件与施工环境最复杂、隧道结构形式多样的国家。

2 隧道与地下工程设计理论与方法

2.1 设计理论

目前,地下工程结构设计理论的发展大概经历了三个阶段:第一阶段,古典设计理论阶段;第二阶段,荷载结构理论(散体压力理论)阶段;第三阶段,连续介质理论阶段(共同作用理论阶段)。

在地下工程结构计算理论研究的发展过程中,后期提出的计算方法一般并不否定前期的研究成果。鉴于岩土介质的复杂多变性,这些计算方法一

[收稿日期] 2010-10-21

[作者简介] 王梦恕(1938—),男,河南温县人,中国工程院院士,研究方向为隧道及地下工程设计、施工新技术;E-mail:wms3273@263.net

般都有各自的适用场合,但都带有一定的局限性。目前,我国在地下工程的结构计算中,采用较多的仍是以散体压力理论为基础的荷载-结构法,原因是:一方面该理论发展时间较长,应用中有较多经验;另一方面,该计算理论形式简单,比较容易为工程设计人员所掌握。

2.2 设计方法

隧道及地下工程结构的设计方法主要有工程类比法、荷载-结构法、地层结构法、信息反馈法、综合设计法和针对地震荷载的动力设计法6种类型。

国际隧道协会于1978年曾成立结构设计模型研究组(working group on structural design models),收集和汇总了各国会员目前采用的地下结构设计方法。经过总结,国际隧道协会认为,目前采用的地下结构设计方法可以归纳为以下4种设计模型。

1) 工程类比法:以参照过去隧道工程实践经验进行工程类比设计的方法。

2) 收敛-约束法:也称特征曲线法。以现场量测和室内试验为主的实用设计方法。

3) 荷载-结构法:以作用、反作用模型,采用结构力学理论进行设计的方法,例如,弹性地基圆环计算、弹性地基框架计算、温克尔假定的链杆法等计算方法。

4) 连续介质模型:包括解析法和数值法。数值计算法目前主要是有限单元法。

每种设计模型或方法各有其适用的场合,也各有自身的局限性。由于地下结构的设计受各种复杂因素的影响,围岩变形破坏机制与相应理论还不成熟,因此,工程类比法和链杆法是目前主要的设计方法。

2.3 盾构管片设计计算方法

作为盾构隧道支护的管片衬砌,不管是在单层衬砌形式下作为唯一的永久结构承载或双层衬砌形式下与二衬复合承载,都是隧道的主要承载结构,直接关系到结构的使用功能、安全性和耐久性。现阶段国内已经有了大量工程实践经验,在此基础上,有必要对其受力形态和相关的计算方法进行评述和思考。

首先,盾构隧道和常见的地下工程一样,也涉及结构本体和地层之间相互作用关系的拟合问题,常用的有两种模型:地层-结构模型和荷载-结构模型。

另外,在盾构隧道中管片作为一个多接头的预制拼装混凝土构件(极少数为钢构件或铸铁构件),

拼装是其施工工艺和结构受力的一个最主要特征。其结构形式不同于我们常见的矿山法隧道或明挖法隧道,结构既不是均质的,也不是连续体,这就造成计算模型和方法的复杂化。具体说来,管片衬砌环的不同分块、接头的不同构造、环与环间接头的不同分布都对结构的受力和变形产生不同的影响,因此实际分析中对管片接头的不同拟合方式就形成了多种不同的计算方法。其中以荷载-结构模型为基础的修正惯用设计法和梁-弹簧模型法应用最为广泛。

2.4 洞门及洞口段设计

在洞门及洞口段设计上,由洞门、明洞和洞口中内浅埋段组成。19世纪50年代初以端墙式和翼墙式两种挡土结构为主,明洞则以拱形为主。洞门形式有端墙式、柱式、翼墙式、耳墙式、台阶式等。洞门的设计主要考虑功能的需要,从力学和安全的角度出发,按标准图模式,为适应地形变化作一些小修改,而在结构形式上创新少。几十年来,洞门的结构形式未发生多大变化,仍以端墙式和翼墙式为主,因此,需要修建一段路堑进洞,必要时还要加筑洞口挡墙、翼墙等挡土结构,以保持边、仰坡的稳定。这种做法不可避免地对洞口山体稳定性和植被产生破坏,设计要考虑生态和环保的有关要求。

随着人们环保意识的提高和隧道施工技术的进步,已出现一大批不开挖边、仰坡的洞口结构形式。采用隧道早进晚出,设计了许多凸出式、无洞门的结构形式,极大地减少了施工对山体地扰动破坏,对保持洞口山体稳定和保护环境有重要意义。

洞门的设计,已不仅仅停留在结构的功能上,而是应将环境、美学、力学融为一体,使洞门的设计与周围环境融为一体,形成一道美丽的风景,洞门设计力求达到建筑学、园林学、环境美学和力学的完美统一。

3 钻爆法隧道施工技术

3.1 工法选择原则

工程地质和水文地质条件对隧道施工的成败起着重要甚至是决定性的作用。隧道施工需要附加地开挖竖井、斜井、横洞等辅助工程来增加工作面,加快隧道施工速度。同时施工中要加强管理、合理组织、避免相互干扰。洞内设备、管线路布置应周密考虑,妥善安排。

选择施工方法时,要考虑的因素有如下几方

面;工程的重要性,一般由工程的规模、使用上的特殊要求,以及工期的缓急体现出来;隧道所处的工程地质和水文地质条件;施工技术条件和机械装备状况;施工中动力和原材料供应情况;工程投资与运营后的社会效益和经济效益;施工安全状况;有关污染、地面沉降等环境方面的要求和限制。

3.2 技术要点

进行综合性的超前预报,并将其纳入正常的施工工序;初期支护要强,承受全部荷载,二次衬砌作为安全储备;尽可能多采用网构钢拱架,少用型钢拱架;软弱地层取消系统锚杆,只在拱架接头处设锁脚锚管;软弱及有水地层采用潮喷混凝土,不提倡采用湿喷混凝土;无钉铺设防水板,采用复合式衬砌形式;无纺布后部设置系统排水盲管,取消中部排水沟;软弱围岩宜采用正台阶法施工,台阶长度为1~1.5洞径;大断面硬岩隧道宜采用小导坑超前爆破开挖法施工;隧道不宜采用预裂爆破,而应采用光面爆破;长大双洞隧道宜采用巷道式射流通风技术。

3.3 钻爆法隧道施工作业线

3.3.1 钻爆开挖作业线

进行隧道开挖前,必须先探明隧道工程地质和水文地质情况,然后结合设计开挖断面尺寸、埋深等情况综合确定开挖步骤和循环尺寸,开挖轮廓要考虑预留变形量、施工误差等因素。

按照开挖断面分布情形,开挖方法可分为全断面开挖法、台阶开挖法、分部开挖法。

隧道施工应满足安全环保、工艺先进、质量优良、进度均衡、节能降耗的要求,本着“安全、有序、优质、高效”的指导思想,按照“保护围岩、内实外美、重视环境、动态施工”的原则组织施工。其施工方法的选择应遵循以下原则:

- 1) 确保施工安全,改善施工环境。
- 2) 应根据设计文件、施工调研情况、地质围岩级别,结合隧道长度、断面大小、纵坡情况、衬砌方法、工期要求、装备水平、队伍素质等综合因素决定。
- 3) 对于地质变换频繁的隧道,应考虑其适应性,便于工序调整转换。
- 4) 应尽量采用新技术、新工艺、新设备、新材料。
- 5) 掌握应用好光爆、初支、量测施工三要素。
- 6) 突出快速施工,考虑时空效应,做到“5个及时”,即及时支护、及时封闭、及时量测、及时反馈、

及时修正。

如何正确选择施工方法,应根据实际情况综合考虑,但必须符合快速、安全、质量及环境的要求,达到规避风险,加快施工进度与节约投资的目的。

全断面开挖法是按设计断面将隧道一次开挖成型,再施作支护和衬砌的隧道开挖方法,一般适用于地质条件好的I、II级围岩,也可用在单线铁路隧道III级围岩地段。浅埋段、偏压段和洞口段不宜采用。

台阶法施工是将隧道结构断面分成两个或几个部分,即分成上下两个断面或几个断面,分部进行开挖的隧道开挖方法。该法适用于铁路双线隧道III、IV级围岩,单线隧道V级围岩亦可采用,但支护条件应予以加强。该法具体可分为正台阶法、环形开挖预留核心土开挖法等。

在隧道洞口地段,施工时要结合洞外场地和相邻工程的情况全面考虑,妥善安排,及早施工,制订完善的进洞方案,洞门端墙处的土石方,应视地层稳定程度、施工季节和隧道施工方法等选择合理的施工方法,为隧道洞身施工创造条件。洞口工程施工前,应进行工艺设计,对施工的各工序进行必要的力学分析,以确定隧道洞口边仰坡土石方开挖及防护、防排水工程、洞门及洞口段衬砌、背后回填的施工方法和施工顺序。

3.3.2 装运作业线

装运作业线机械设备选型配套原则如下。

1) 设备的外形尺寸:机械设备的外形尺寸要保证其在单线隧道的作业空间内运转自如,交叉作业的机械设备应能满足相互之间安全距离的要求。

2) 机械动力性能、生产能力:每种机械设备的生产能力应与其他机械相匹配,并满足施工总工期的要求;机械动力性能要满足隧道的坡度、每循环工作量及施工环境的要求。

3) 机械适应能力强:所选的机械设备尽量适应不同的施工方案及多种环境的作业要求。

4) 机械选配的经济性:在保证工期要求的同时,应尽量降低总的设备投入成本,并选择节能型的设备。

5) 机械设备的防爆性能:隧道施工中有可能遇到煤层及瓦斯,则机械设备应考虑采用防爆型电力设备,内燃机械不能进入工作面施工。

6) 机械的通用性、维修性好:同类机械设备应尽量采用同一厂家、同一型号的设备,以加强设备的通用、互换。国产设备质量能基本达到要求时,尽量选用

国产设备,保证设备配件充足、维修方便快捷。

7) 选用低污染、低噪声设备:通风是长大隧道施工中的难题,洞内设备应选用低污染甚至无污染设备,以减少施工中的空气污染源,提供一个良好的施工环境。

隧道施工中的装碴作业应根据隧道的断面大小、施工方法、机械设备及施工进度等要求综合考虑,装碴机械的选型应能满足在开挖面内高效装碴作业,装碴能力应与开挖能力及运输能力相匹配,并保证装运能力大于最大开挖能力。

隧道洞内运输方式分为有轨和无轨两种,应根据隧道长度、开挖方法、机具设备、运量大小等选用相应的运输方式。

运输设备的配套应首先考虑隧道施工环境的要求,根据技术条件与经济条件选择设备型号,在这一前提下应尽可能地选择运输量大的运输设备;在数量确定上应保证装碴设备随时保持装碴作业,不能出现装碴设备等车现象。

3.3.3 初期支护与二次衬砌作业线

为了有效地约束和控制围岩的变形,增强围岩的稳定性,防止塌方,保证施工和运营作业的安全,必须及时、可靠地进行临时支护和永久支护。临时支护的种类很多,按材料的不同和支护原理的不同,有木支撑、钢支撑、钢木混合支撑、钢筋混凝土支撑,锚杆支护、喷射混凝土支护、锚喷联合支护等。永久支护一般是采用混凝土衬砌。

各种临时支护的合理选用与围岩的稳固程度有关。一般来说,Ⅰ级围岩不需临时支护,Ⅱ级围岩采用锚杆支护,Ⅲ、Ⅳ级围岩采用喷射混凝土支护、锚杆喷混凝土联合支护、锚杆钢筋网喷混凝土联合支护,Ⅴ、Ⅵ级围岩采用喷射混凝土钢支撑联合支护或其他支撑支护。对于Ⅱ级及其以上围岩,可以先挖后支,支护距开挖面距离一般不宜大于5 m;Ⅲ、Ⅳ级围岩随挖随支,支护需紧跟工作面;Ⅴ~Ⅵ级围岩先支后挖。如条件合适,应尽量将临时支护与永久支护结合采用。

初期支护一般指喷射混凝土支护,必要时可采用钢纤维喷射混凝土,配合使用钢筋网、钢架或采用辅助施工措施的支护。

在隧道初期支护完成后,为防止围岩不致因暴露时间过长而风化、松动和坍落,降低围岩稳定性,需要开展二次衬砌。衬砌的结构类型和尺寸,应根据使用要求、工程地质条件、围岩类别、埋置位置及

施工条件等,通过工程类比和结构计算分析确定。必要时,还应通过试验论证确定。

深埋隧道二次衬砌施作,一般情况下应在围岩和初期支护变形基本稳定后进行。二次衬砌施工的顺序是仰拱超前、边墙基础超前,最后是边墙、拱整体浇筑。

3.3.4 钻爆法隧道施工辅助作业线

隧道施工通风是为了送进新鲜空气,排出有害气体,降低粉尘浓度,改善工作环境,保证工人健康和施工安全,提高劳动生产率。目前,隧道施工采用的通风方法有扩散通风、引射器通风、机械通风、利用辅助坑道通风等几种方式。

隧道通风方式应根据隧道长度、施工方法和设备确定。一般都是在施工方案确定了以后,才能确定独头掘进的长度和通风长度,然后才能计算工作面风量。

选择施工通风设备的程序是:确定通风方式→计算风量→选择风管→计算通风阻力→选择通风机。

选择风管直径的主要依据是送风量与通风距离。另外,还要考虑隧道断面大小,以免风管无法布置或易被机械或车辆撞坏、刮破。选择风管,除了考虑技术上可行之外,还要考虑在经济上合理。应根据工程实际情况进行全面分析,但一般通风量在满足洞内各项作业需要的最大风量基础上,通风机还应有50%的备用能量。

从目前的现状看,由于国内目前还没有一套系统的符合国情的隧道施工通风的设计理论和计算方法,也没有针对不同施工条件的通风系统设计规范和技术标准,多数施工单位和设计部门在考虑施工设计时,还没有把施工通风作为一个需要认真考虑的重要技术环节来对待,因此,在实际施工中还存在许多问题,针对以上问题应在加强管理、优化匹配、防漏降阻的基础上进行综合治理。

3.4 长大隧道快速施工

长大隧道施工主要包括4条主要作业线(钻爆作业线、装运作业线、初期支护作业线、二次衬砌作业线),以及两条辅助作业线(通风作业线、防排水作业线),在隧道开挖的工艺流程中,测量放线、爆破通风、找顶等工序较为简单,耗用时间较短,比较容易管理,且循环进尺的多少受这些工序的影响较少。而钻孔、装药、装运碴等在每开挖循环中所占的时间比例很大,是开挖工作中的关键工序,是最重要因素。而对于长大隧道,由于其具有工程量大、作业空间小、地质条件复杂等特点,装运作业

线、通风作业线成为比一般隧道施工更难解决好的难题,也是直接影响长大隧道快速施工的主要因素。

在隧道施工中,如何迅速将开挖的石碴运到洞外,是制约隧道施工进度的决定性因素之一,尤其是独头掘进的长大隧道,出碴往往是影响隧道掘进速度的关键因素。

为了加快隧道施工速度,实现多工作面平行交叉施工,改善通风条件、施工排水、不良地质地段等。隧道施工时,通常需要设置辅助坑道来满足这些需求。一般辅助坑道包括平行导坑、横洞、斜井(坡度 $22^{\circ}\sim 24^{\circ}$)、斜坡道(坡度 $6^{\circ}\sim 8^{\circ}$)、竖井等。

辅助坑道的断面尺寸应根据用途、运输要求、地质条件、支护类型、设备外形尺寸及技术条件、人行安全及管路布置等因素确定。

辅助坑道设置原则:反对长隧短打;提倡设置平行导坑。

平行导坑相对于设置斜、竖井,贯通式平导对地层的破坏程度要小得多,洞内的施工环境也远优于斜、竖井。同时,设置平导可以增开开挖工作面,在超前正洞一定距离后,以横通道的方式拐入正洞开创新的工作面,实现多工作面平行作业,空车从正洞进,经横通道进入平导,运碴车走平导,这样正洞和平导之间形成一进一出的单向行车,加快了行车速度,提高了运碴能力,大大缩短了正洞的掘进时间,加快了正洞的快速掘进速度。有平导可使正洞掘进速度提高2倍;斜井仅能提高正洞的开挖速度,不宜进行衬砌作业;竖井更少,一般不予提倡,尤其当竖井深度大于40m以后,速度更慢。斜坡道或横洞不同于斜井,等同于无轨运输,在有条件的地方可采用,但一般不提倡。设置平导还可以实现长大隧道的施工通风。

4 盾构隧道施工技术

4.1 盾构法隧道施工的基本原则

1)盾构机选型是决定盾构法施工是否能成功的关键因素之一,盾构机选型主要考虑地质条件、地形水压状况、周边环境条件及场地条件等。而盾构对地层的适应性,基本取决于刀盘设计是否合理。

2)盾构机设计原则根据围岩条件、隧道断面大小形状、施工方法进行。

3)盾构法施工始终贯彻确保开挖面稳定的原则,针对不同地层合理设定压力优化掘进参数,特殊地质条件采用相应的辅助措施。

4)盾构始发与到达基本目标是防止破除洞门过程中的地层失稳及防止地下水喷涌,因此考虑地层、地下水、盾构类型、覆土厚度、作业环境、洞门密封等条件来选择始发与到达方法。

5)盾构法施工贯彻的基本方针“盾构掘进过程中做到三有序、三平衡、三平稳原则”。

6)根据地质条件、隧道断面大小、线路条件施工技术水平选择合适的分块、管片宽度、接头形式。

7)为确保盾构法隧道的耐久性 & 降低施工、运营阶段安全风险,一般应在管片衬砌基础上增加二次衬砌。根据盾构法,隧道设计寿命周期一般要求100年。

4.2 盾构选型与设计要点

1)影响盾构选型的主要地质因素。当地层的透水系数小于 10 m/s 时,可以选用土压平衡盾构;当地层的渗水系数在 $10\sim 4\text{ m/s}$ 之间时,既可以选用土压平衡盾构,也可以选用泥水式盾构;当地层的透水系数大于 4 m/s 时,宜选用泥水盾构。

2)工程环境因素对盾构选型的影响。盾构直径对盾构选型的影响。对于直径大于10m的盾构机,从驱动系统能力及节能方面多考虑采用泥水盾构。同时对直径小于3m的微型盾构,主要从碴土运输方面考虑多采用泥水管道运输方式,也多采用泥水盾构。

地下水位直接对盾构选型产生影响。对于无水地层或能同降水将地下水位降到隧道以下,可以考虑采用敞开式盾构;土压平衡盾构一般在地下水位 $30\sim 50\text{ m}$ 时采用,而泥水盾构比较适用于在河底、海底等高水压条件下隧道的施工,具有高的安全性和良好的施工环境。高水压条件下施工,应认真考虑各部位的强度与各系统的密封性能。

盾构法施工需要场地较大,同时泥水盾构需要较大泥水分离场地。

在隧道线路周边有重要建(构)筑物、地下管线等,为了减小施工对周边环境的影响,一般选择闭胸式盾构,盾构机设计时应考虑充分的辅助设备。

4.3 盾构掘进

盾构始发前,采用合适的始发方法;制定洞门围护结构拆除方案,采取合适的洞门密封措施,保证始发安全。始发方法:考虑地层、地下水、盾构类型、覆土厚度、作业环境、洞门密封等条件来决定。

根据隧道地质条件、埋深、周边环境等条件,确定盾构掘进参数,确保开挖面稳定。根据盾构掘进测量随时调整盾构姿态,使盾构沿着设计线路掘进。

管片拼装。在掘进完成后及时进行,根据盾尾间隙与油缸行程差等,选择合适封顶块拼装位置,按照正确的拼装方式、合理的拼装顺序进行管片拼装,确保管片拼装质量,避免管片破损。

根据地层条件、地层含水情况、盾构类型、隧道埋深及周边环境条件,选择合适的注浆材料和注浆方法。最好在盾构掘进的同时进行,应有效填充盾尾间隙,以防止地层松弛和地表沉降。

壁后注浆施工是为了在防止地层松动和下沉的同时防止管片漏水,并达到管片环的早期稳定和防止隧道的蛇行等目的,所以,迅速实施,同时需进行充分的填充。

4.4 特殊地段施工

1) 平行隧道施工。应考虑地层条件、盾构形式、盾构隧道断面大小、距离等,研究其相互影响,采取安全的施工方法。在施工时,要实施信息化施工,如使用各种监测仪器等,监测掌握地层及隧道的变形规律,并将信息及时反馈到施工中。并且根据需要使用适当的辅助施工方法以防止地层松动和隧道变形等。

2) 穿越河流施工。在不影响河流或周围结构物的前提下,制定出相应的对策,确保施工安全可靠。在穿越河流的施工时,应注意以下几点:地质、地下水调查;开挖面的稳定;减小对堤防、周围结构物的影响。

3) 浅覆土施工。一般盾构隧道需要最小覆土为 $1.0 \sim 1.5 D$ (D 为盾构直径),浅覆土施工时应该注意以下几点:开挖面压力的管理;壁后注浆。

特殊条件浅覆土施工:对于穿越河流等水底浅覆土施工时,除要对开挖面的压力、泥浆或添加材料的泄漏或喷涌进行研究外,需要注意隧道的上浮及管片的变形;在靠近居民区的浅覆土施工时,需要充分注意盾构推进的振动、噪声,有时根据情况停止夜间施工。另外,有时根据周边建筑物地基及条件或围岩条件,有必要时适当采取辅助施工法。

4) 大覆土段施工。应考虑地基条件、盾构形式、施工条件等进行仔细研究,并采取如下相应措施:在进行大覆土施工时,对刀盘轴承密封、盾尾密封、排土装置、推进装置等进行研究;使用能耐高水压的密封材料进行轴密封,增加密封层数等;使用能耐高水压的盾尾密封,必要时考虑配置紧急止水装置等;排土装置需要研究泥水盾构的送排泥泵上的高水压轴密封带等。

5) 小曲线半径施工。考虑围岩条件,制定相应的对策,注意防止推进反力引起的隧道变形、移动等。综合判断围岩条件、隧道线路、盾构、管片、超挖量、辅助施工法、壁后注浆等,采用切实可行的对策,以便施工顺利进行。一般施工时往往比理论上可能推进的曲率半径要大,所以计划时要留有充分的富裕量。

5 开敞式岩石掘进机与复合衬砌施工

5.1 掘进机与钻爆法施工相比的优缺点

掘进机施工的优点:快速、优质、安全、环保。

掘进机施工的局限性:掘进机的经济性问题;设计制造周期长;掘进机针对性强;开挖断面只限于圆形;要求施工人员的技术水平和管理水平高;运输困难,对施工场地有特殊要求。

掘进机的使用范围:采用掘进机施工时,应明确地质条件及必要的预处理措施。围岩的单轴抗压强度为 $50 \sim 200 \text{ MPa}$;从机械条件看适用范围,合理选型及完善的后配套系统;对作业场地和运输能力有特殊要求;企业自身的实际能力,如制造维修能力、经济能力,施工队伍的技术、管理水平以及传统的施工习惯等。

5.2 掘进机分类和复合衬砌方式

根据掘进机的结构形式进行分类:开敞式掘进机;单护盾式掘进机;双护盾式掘进机。

1) 开敞式掘进机的优点。由于山岭隧道较长,地质变化较大,采用开敞式掘进机施工,衬砌结构可根据地层变化调整;单护盾、双护盾掘进机由于采用管片衬砌,衬砌结构不能调整;采用管片衬砌结构较弱,不能满足百年寿命。

开敞式掘进机长径比小于1,易于调整掘进机姿态。双护盾掘进机长径比大于1,因此灵敏性较差。

开敞式掘进机可以进行及时支护,即适应于硬岩,也适应于软岩,可随地层变化及时调整支护方式,如磨沟岭隧道在软弱地层施工平均月进度达230 m。双护盾掘进机对于软弱围岩和收敛较大的地层适应性较差,护盾易于卡死、塌方。

双护盾掘进机造价较开敞式掘进机高 $20\% \sim 30\%$ 。

2) 衬砌方式。开敞式TBM的衬砌,可根据地质情况和施工条件进行改动,TBM上主要进行初期支护(喷锚支护),然后再进行二次衬砌。

5.3 敞开式掘进机适应性分析

5.3.1 地质因素分析

塑性地压大的软弱围岩;类沙性土构成的软弱围岩和具有中等以下膨胀性的围岩;断层破碎带,岩溶发育带,严重涌水地段,单轴抗压强度超过250 MPa的极硬岩且节理不发育、高硬度或高拉伸强度及高磨蚀性的岩石。

岩石的单轴抗压强度是影响掘进效率的关键因素之一,一般最适合掘进抗压强度为30~150 MPa的硬岩。根据统计,大多数已建工程的岩石平均单轴抗压强度为75~175 MPa。

敞开式通常用于围岩稳定隧道(洞)的开挖。若岩体质量指数为50%~100%、节理裂隙间距大于60 cm,则首选敞开式。

TBM在隧道工程施工中,施工速度快、对围岩扰动小、安全及在大于一定掘进长度后施工经济等特点,越来越受到隧道(洞)建设单位的重视。与钻爆法相比,因其对地质地层状况较敏感,因此,其在隧道建设中的应用仍受到较大限制。

5.3.2 掘进机配置选择

掘进机对地质条件的相关性很强,针对不同的地质条件,设计出不同的掘进机,如果实际工程地质条件和设计掘进机时地质条件相差较大,则掘进机的使用效率将大大降低。

主要设备配套:刀盘,针对工程不同地质具有良好的破岩开挖能力;刀盘驱动,驱动转速根据地质

情况随时可调;盘形滚刀,寿命长,以减少换刀时间;掘进机,具有足够的推力、扭矩、功率储备,满足掘进速度需要;激光自动导向系统,及时显示掘进机掘进的方位、姿态;掘进方向控制性能,满足掘进方向控制水平误差和竖向误差的要求;出碴运输等系统,做到出碴连续输送,完善的材料供应系统及起吊设备。

敞开式掘进机具有快速完成初期支护能力:配置钢拱架安装机构、锚杆安装设备、挂网机构、高效的喷射混凝土系统,支护能力与掘进速度匹配,刀盘护盾处应急喷射混凝土,管棚、小导管钻孔及注浆施工功能,有超前地质勘探钻机,必要时对地质进行预报等设备。双护盾掘进机具有快速安装管片、豆砾石充填功能。

6 结语

埋深大、隧道长、修建难度加大是目前及今后较长时期隧道及地下工程建设普遍面临的问题,有众多的新难题需要攻克。目前,在城市地下空间利用与交通隧道修建范畴,要对以下问题进行研究与探索:城市地下空间利用的规划问题;城市地下空间规划的评价方法与评价标准问题;地质调查经费投入比例与地质调查技术研究问题;建设方案评价及动态设计理念问题;降低工程造价的途径问题。

The construct technology of tunnel and underground engineering in China

Wang Mengshu, Tan Zhongsheng

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] This paper mainly introduced the design theory and method of Chinese tunnel and underground engineering, construction technique of drill blast method, the shield tunnel construction technique and TBM (tunnel boring machine) construction technique and so on, and pointed out the research direction of Chinese tunnel and underground engineering from now on, including: the long tunnel's construction technology of great burying depth, the urban underground space plan, dynamic design of the tunnel and underground engineering as well as methods to reduce the building cost of projects and so on.

[Key words] tunnel; underground engineering; design theory; drill - blast technique; shield tunnelling and TBM