

SHUIGONGSUIDONG GUANPIAN CHENQI SHEJI YUANLI

YU JISUAN FANGFA YANJIU

景来红 赵大洲 杨维九 王延红 编著

水工隧洞管片衬砌设计原理 与计算方法研究



黄河水利出版社

水工隧洞管片衬砌设计原理与 计算方法研究

景来红 赵大洲 杨维九 王延红 编著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书针对水工隧洞管片衬砌结构,较为系统地介绍了隧洞支护技术与原理,隧洞围岩力学性态,支护及衬砌结构设计模型与原理,荷载计算方法,预制管片衬砌构造设计,管片衬砌接缝力学特性,管片衬砌结构计算模型,隧洞开挖与管片衬砌过程的三维数值模拟。为便于理解,本书还概要介绍了岩体主要强度理论、常用数值分析方法的基本原理、长隧洞掘进技术及管片衬砌在水工隧洞工程中的应用情况。

本书可供从事水利水电、铁路、公路、城建等行业科研、设计、施工技术人员及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工隧洞管片衬砌设计原理与计算方法研究/景来红
等编著. —郑州:黄河水利出版社, 2011.5
ISBN 978-7-80734-922-8

I. ①水… II. ①景… III. ①管道工程-衬砌-设计
②管道工程-衬砌-计算方法 IV. ①TU81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 203565 号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail: hhsllwlp@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail: hhsllcbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:12.5

字数:290 千字

印数:1—1 000

版次:2011 年 5 月第 1 版

印次:2011 年 5 月第 1 次印刷

定价:38.00 元

前 言

修筑在具有某种应力履历和应力场的岩体中的隧洞,其周围岩体(围岩)具有一定的结构,岩体结构控制岩体变形、破坏及其力学性质。隧洞周围岩体的稳定受岩体结构、岩石力学性质、岩体赋存环境、隧洞开挖方式等多种因素的影响,围岩是造成荷载的主要来源,也是承受一定荷载的结构体,现代支护理论强调设计必须围绕围岩来做文章,并利用支护及衬砌的作用来提高围岩强度、防止围岩掉块和风化、减少围岩松弛以及提高结构安全度。

随着掘进机在开挖长大隧洞中的应用日益增多,管片衬砌法已成为隧洞支护、衬砌的一种重要形式。管片衬砌法是通过预制管片的洞内拼装以及管片背后豆砾石灌浆等方法形成衬砌结构,方便快捷,可较好地适应隧洞机械化施工的要求,显著改善隧洞内的施工环境。但在施工方法、结构形式等方面,管片衬砌与传统的现浇混凝土衬砌存在差异,并较之传统的现浇混凝土衬砌设计更为复杂,其中管片接缝的力学特性及管片衬砌结构的力学模型是管片衬砌研究中的重点问题之一。经过几十年的研究与实践,在(管片)衬砌设计与理论等方面取得了丰硕的研究成果,这些成果为本书的编写提供了丰富的材料。

本书较为系统地介绍了现代支护及衬砌技术,全面总结了隧洞衬砌设计中的荷载计算方法、管片衬砌构造设计特点及管片接缝力学特性,系统阐述了管片衬砌结构计算模型原理。全书共 10 章,在内容安排上包括:隧洞支护技术与原理,岩体强度理论及隧洞围岩力学性态,隧洞工程常用数值分析方法的基本原理,隧洞支护结构设计模型及原理,隧洞衬砌设计中的荷载计算方法,预制管片衬砌构造设计,管片衬砌接缝力学特性,管片衬砌结构计算模型,隧洞开挖与管片衬砌过程的三维数值模拟,深埋长隧洞掘进技术及工程实例。本书在叙述上力求由浅入深,内容上力图反映当前国内外在该领域研究的状况。本书作者长期从事南水北调西线工程深埋长隧洞的设计研究工作,书中汇总了作者在管片衬砌结构设计及研究方面的最新成果。

本书由景来红、赵大洲、杨维九、王延红编著。第一、二、四章由景来红执笔,第五、六章由杨维九执笔,第七、八、九章由赵大洲执笔,第三、十章由王延红执笔。全书由景来红统稿。

本书得到“十一五”国家科技支撑重大项目“南水北调工程若干重大技术问题研究及工程应用”之课题九——“西线超长隧洞 TBM 施工关键技术问题研究”(2006BAB04A06)课题的资助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,恳切希望读者对本书中的缺点和错误之处批评指正。

作 者

2010 年 7 月于郑州

目 录

前 言

第 1 章 隧洞支护技术与原理	(1)
1.1 支护理论发展概述	(1)
1.2 现代支护及衬砌技术	(2)
1.3 水工隧洞支护及衬砌形式	(13)
参考文献	(16)
第 2 章 岩体强度理论及隧洞围岩力学性态	(17)
2.1 岩体的力学特征及破坏机制	(17)
2.2 岩体强度理论	(18)
2.3 隧洞围岩力学性态	(26)
参考文献	(38)
第 3 章 隧洞工程常用数值分析方法的基本原理	(39)
3.1 连续及非连续介质数值分析方法的基本思想	(39)
3.2 有限元方法的基本原理	(42)
3.3 有限差分方法的基本原理	(52)
3.4 国外大型通用数值分析软件介绍	(57)
参考文献	(60)
第 4 章 隧洞支护结构设计模型及原理	(62)
4.1 隧洞支护结构设计模型	(62)
4.2 设计模型原理	(63)
参考文献	(70)
第 5 章 隧洞衬砌设计中的荷载计算方法	(71)
5.1 荷载形式及分类	(71)
5.2 围岩压力	(71)
5.3 水压力	(91)
5.4 弹性抗力	(98)
5.5 施工荷载	(99)
参考文献	(101)
第 6 章 预制管片衬砌构造设计	(102)
6.1 预制管片衬砌形式	(102)
6.2 管片衬砌构造设计	(107)
参考文献	(120)
第 7 章 管片衬砌接缝力学特性	(121)
7.1 管片接缝各组成材料的力学特性	(121)

7.2 影响管片接缝力学特性的因素·····	(125)
7.3 管片接缝力学模型研究现状·····	(128)
参考文献·····	(131)
第 8 章 管片衬砌结构计算模型·····	(133)
8.1 弹性铰法·····	(133)
8.2 惯用与修正惯用法·····	(134)
8.3 梁—弹簧模型·····	(137)
8.4 壳—弹簧模型·····	(141)
8.5 平板壳—接缝元—地基系统模型·····	(144)
参考文献·····	(165)
第 9 章 隧洞开挖与管片衬砌过程的三维数值模拟·····	(166)
9.1 数值分析模型·····	(166)
9.2 隧洞开挖与管片衬砌过程三维数值模拟·····	(169)
第 10 章 深埋长隧洞掘进技术及工程实例·····	(172)
10.1 深埋长隧洞掘进技术·····	(172)
10.2 深埋长隧洞工程主要地质问题及防治·····	(177)
10.3 水工长隧洞工程实例·····	(180)
参考文献·····	(192)

第1章 隧洞支护技术与原理

地下工程最早期的支护主要采用圆木或砌石构筑,后来出现了现浇混凝土、钢筋混凝土衬砌及锚喷支护,随着施工技术及工艺的提高,又出现了管片衬砌以及挤压混凝土衬砌等。早期地下工程的建设完全依据经验,19世纪初才逐渐形成结构计算理论,并开始用于指导地下结构的设计与施工。在地下结构计算理论形成的初期,人们是仿照地面结构的计算方法进行地下结构的计算,因而常常不能正确地阐述地下工程中出现的各种力学现象和过程。经过较长时间的实践,地下结构受力变形的特点才开始被认识,并逐渐形成以考虑围岩对结构受力变形影响为特点的地下结构计算理论。理论与实践的结合是近代支护技术与理论飞跃发展的基石。本章叙述了现代支护及衬砌技术的原理,并简要介绍了水工隧洞各种支护及衬砌形式的特点。

1.1 支护理论发展概述

地下工程支护结构理论的发展至今已有百余年的历史,它与岩土力学的发展有着密切关系。土力学的发展促使了松散地层围岩稳定和围岩压力理论的发展,而岩石力学的发展促使围岩压力和地下工程支护结构理论进一步飞跃。

一般将20世纪50年代以前形成的支护理论称为传统支护理论,如古典压力理论、散体理论等。传统支护理论认为支护的作用是承受上覆岩层重量或围岩塌落拱内的松动岩体重量,主要沿用适应于地面工程的理论和方法来解决地下工程所遇到的问题。随着岩石力学逐渐成为一门独立的学科,围岩弹性、弹塑性及黏弹性解答逐渐出现,同时锚杆与喷射混凝土新型支护的出现和与此相应的一整套新奥地利隧道设计施工方法(简称新奥法)的兴起,终于形成了以岩石力学原理为基础的、考虑支护与围岩共同作用的地下工程现代支护理论。

现代支护理论与传统支护理论之间的区别主要表现在以下几方面:

(1)在对围岩压力的成因方面:传统支护理论认为围岩压力由洞室塌落的围岩“松散压力”造成,而现代支护理论则认为围岩具有自承能力,围岩作用于支护上的压力不是松散压力,而是阻止围岩变形的形变压力。

(2)在围岩和支护间的相互关系方面:传统支护理论把围岩和支护分开考虑,围岩当做荷载,支护作为承载结构,属于“荷载—结构”体系,现代支护理论则将围岩和支护作为一个统一体,二者组成“围岩—支护”体系,共同参与工作。

(3)在支护功能和作用原理方面:传统支护理论认为支护的最主要功能是承受荷载,现代支护理论则强调支护的作用是为了及时稳定和加固围岩。

(4)在设计计算方法方面:传统支护理论通过确定作用在支护上的荷载,来研究支护结构的承载能力,而现代支护理论从分析形成围岩压力的岩体初始地应力入手,研究围岩和支护结构共同承载能力。

(5)在隧洞施工方面:现代支护理论强调隧洞施工中尽量减少对周围岩体的扰动,通过简单、快捷的锚喷等支护形式,在围岩松动之前及时加固围岩,并通过动态监测指导隧洞支护,从而克服了传统支护理论所采用的被动支护的施工设计理念。

现代支护理论的形成与发展,首先是由于锚喷支护等现代支护结构的大量使用,使人们积累了丰富的经验。新奥法是典型的代表,而现场监控量测的应用,进一步丰富了新奥法内容,同时促进了新奥法的应用。至20世纪80年代,又将现场监控量测与理论分析结合起来,发展成为一种适应地下工程特点和当前技术水平的新的设计方法——现场监控设计方法(也称信息化设计方法)。其次是由于岩石力学理论的发展,20世纪60年代中期和70年代末期,以有限元法和边界元法为基础的数值解法开始运用到地下工程中来。70年代后期,在解析方面,国内外学者对轴对称问题有了较完善的解答,提出了锚喷支护的一些计算与设计方法,在国外称为收敛—约束法,或特征曲线法。随着有限元法、边界元法及有限差分法等数值解法的迅速发展,在模拟分析围岩弹塑性、黏弹塑性及岩体节理面等岩石力学问题方面取得了长足的进步。由于数值计算通常是以已知的地应力及施工条件为前提来分析支护与围岩的共同作用,因此能较为准确地反映地下工程的力学现象。当然,这些数值计算方法还存在参数难以准确获得、对岩土材料的本构模型及围岩的破坏失稳准则认识不足等问题^[1]。

1.2 现代支护及衬砌技术

随着岩体力学理论、隧洞工程施工方法的不断发展及对围岩稳定机理认识的逐步深入,支护及衬砌方法正向着简单实用和安全可靠的方向发展。目前,与开挖方式相适应的快速支护及衬砌技术主要有新奥法、挪威法、管片衬砌法以及挤压混凝土衬砌法等。

1.2.1 新奥法

新奥法(New Austrian Tunnelling Method, NATM)是20世纪60年代奥地利专家L.V. Rabcewicz在总结前人在隧道工程中积累的经验后提出来的一套隧道设计、施工的新技术。1980年,奥地利土木工程学会地下空间利用分会把新奥法定义为:“在岩质、土砂质介质中开挖隧道,以使围岩形成一个中空筒状支撑环结构为目的的隧道设计施工方法。”新奥法的这个定义扼要地揭示了新奥法最核心的问题——利用围岩支护隧道,使围岩本身形成支撑环。

新奥法的具体做法是,随隧道掘进,及时喷射一层混凝土,封闭围岩暴露面,形成初期柔性支护,随后按设计要求系统布置锚杆加固深部围岩。锚杆、喷层和围岩共同组成承载环,支撑围岩压力,形成了新奥法初期支护结构,通常把这部分支护结构称为“外拱”。在施工过程中,通过监测了解外拱围岩的变形情况,待支护抗力与围岩压力相适应时进行外拱封底,使变形收敛,隧道围岩趋于稳定,随后进行二次衬砌——复喷混凝土或现浇混凝土,习惯上把第二次衬砌称为“内拱”。实际上,内拱为储备强度。新奥法必须严格控制二次衬砌时间,以便支护性能呈现先柔后刚的特性。新奥法建议的支护形式见图1-1。

就目前的认识水平,喷混凝土是唯一能够与围岩壁面大面积牢固黏附的支护手段,也是适用于各种围岩的一种有效支护手段,其作用主要有:

(1)支撑围岩作用。喷层能与围岩密贴和黏结,并给围岩表面以抗力和剪力,从而使围岩处于三向受力状态,防止围岩强度恶化,阻止不稳定岩块的塌滑。喷混凝土的轴力是由拱脚下的反力和界面的抗剪阻力所支持的。如图 1-2 所示,喷混凝土与岩壁的黏着力所产生的抗剪阻力以切向应力传递到围岩内部,这有助于形成拱状的压应力带。

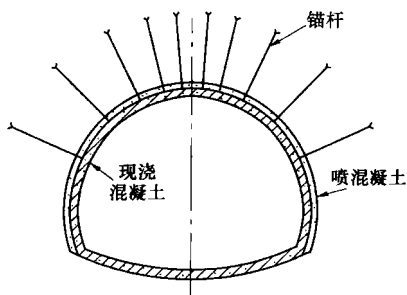


图 1-1 新奥法建议支护形式

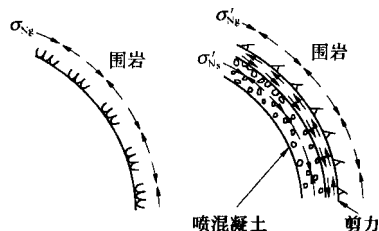


图 1-2 喷混凝土的黏附力学效应示意图

(2)调控围岩应力的重分配作用。喷层是柔性的,而且这种柔性可通过分次喷层的方法进一步发挥,从而可以调整围岩的应力重分配,使围岩在不出现有害变形的前提下,能进入一定程度的塑性。喷层的柔性也可减小喷层中的弯曲应力。

(3)填平补强围岩作用。喷射混凝土可使混凝土射入围岩张开的裂隙,填充表面凹穴,使裂隙分割的岩块层面黏结在一起,保持岩块间的咬合镶嵌作用,提高岩块的黏结力、摩阻力,有利于防止围岩松动,避免或缓和围岩应力集中。

(4)防护作用。喷层直接粘贴岩面,形成防风化和止水的防护层,阻止节理裂隙中充填物的流失,防止围岩力学指标因受外界影响而发生恶化。

(5)分配外力作用。通过喷层把外力传给锚杆、钢筋网架等,使支护结构均匀受力。

锚杆的作用是:

(1)加固围岩。围岩多数处于受剪破坏状态,锚杆的抗剪能力提高了围岩锚固区的 C 、 φ 值,尤其是在节理发育的岩体中,加固作用更为明显。

(2)加固不稳定块体。用局部锚杆可以加固不稳定块体,如利用锚杆的悬吊作用,阻止拱顶不稳定块体的塌落,利用锚杆的抗剪作用阻止边墙不稳定块体的滑落等。

(3)形成沿开挖面的受力环区,将开挖面处的高应力延伸到岩体深处。

(4)改善岩石-混凝土结构体系的承重效果,起到锁定岩石共同受力的作用。

(5)限制围岩位移,部分减少开挖过程中引起的松动。

(6)在层状岩体中,各层岩板间传递剪力的能力很小,其结构类似于“叠合梁”的力学行为,而通过锚杆可使各层岩板紧密联系在一起,岩板间传递剪力的能力大为增强,从而使层状岩体结构具有“组合梁”的特性。

由以上分析可知,新奥法是应用岩体力学原理,以维护和利用围岩的自稳能力为基点,以锚喷作为主要支护手段,及时进行支护,以便控制围岩的变形与松弛,使围岩成为支护体系的组成部分,形成了以锚杆、喷射混凝土和洞室围岩三位一体的承载结构,共同支撑岩体压力。

根据新奥法的支护理念,在隧洞施工、设计中应重点把握以下几点:

(1)开挖作业宜采用光面爆破和预裂爆破,并尽量采用大断面或较大断面开挖,以减少对围岩的扰动。

(2)隧洞开挖后,尽量利用围岩的自承能力,充分发挥围岩自身的支护作用。

(3)根据围岩特征采用不同的支护类型和参数,及时施作密贴于围岩的柔性喷射混凝土和锚杆初期支护,以控制围岩的变形和松弛。

(4)在软弱破碎围岩地段,使断面及早闭合,以有效地发挥支护体系的作用,保证隧洞稳定。

(5)二次衬砌原则上是在围岩与初期支护变形基本稳定的条件下修筑的,二次衬砌、初期支护与围岩形成一个整体,因而提高了支护体系的安全度。

(6)尽量使隧洞断面周边轮廓圆顺,避免棱角突变处应力集中。

(7)通过施工中对围岩和支护的动态观察、量测,合理安排施工程序,进行设计变更及日常的施工管理。

这种将围岩作为衬砌结构联合工作的承载体的施工设计方法是隧洞设计理论的一大进步,采用该理论可有效提高施工进度、节省工程投资,其成效得到了工程技术界的肯定。

1.2.2 挪威法

挪威法(Norwegian Method of Tunnelling, NMT)是将 Q 值岩体分类系统与锚固支护加喷钢纤维混凝土相结合的设计、施工方法,即根据 Q 值岩体分类系统,确定出加固锚杆的长度、直径、间距以及钢纤维喷混凝土的厚度。自 20 世纪 90 年代始,该方法在西、北欧隧道工程中较多采用,是对新奥法的完善、补充和发展。

NMT 的支护设计通常按经验方法确定,具有更强的可操作性。同时, NMT 建立了“功能围岩结构”的概念,更强调高强锚喷支护的时效性,要求更加快速地形成荷载环,以最经济的支护达到稳定、安全的目的。NMT 的支护设计通常以定量的 Q 系统法为基础, Barton 等根据已有的大量隧道施工经验,按 Q 值给出了各种不同跨度和安全等级的支护图(见图 1-3),而 Q 值的计算主要是依靠地质勘探部门所提供的 6 个地质评价参数,即 RQD (岩石质量指数)、 J_n (岩石节理组数)、 J_r (岩石节理粗糙度)、 J_a (岩石节理蚀变程度系数)、 J_w (岩石节理含水量)、 SRF (岩石应力折减系数)。在施工过程中,随着掌子面的推进,6 个地质评价参数将不断地修正,同时 Q 值也相应改变。在实际应用中可采用离散单元法对所设计的某些特殊情况的岩石支护设计作检验,以帮助评价其安全等级。对应于 Q 值,可把岩体分为 A~G 共 7 类。从图 1-3 可以看出, NMT 中有许多情况是不需要支护的。以 Q 系统法为重要组成部分的 NMT,其支护形式由锚杆、素喷混凝土、钢纤维喷混凝土和现浇混凝土的一种或几种组合,大致有 9 种类型。

从应用的范围来看, NMT 最适用于有节理的、硬或较硬岩层中的隧道。在硬岩中修建隧道,无论采用钻爆法或掘进机开挖,节理和超挖都占主导地位。在此条件下,采用网喷混凝土和格栅钢架不但费时、不经济,还可能不安全,而采用锚杆调围岩强度的动力最强。由于节理充填物引起围岩不均匀,可能引起围岩失稳,因此要求用喷混凝土或喷钢纤维混凝土对系统锚杆补强。因此,在支护手段上, NMT 一般采用高

强锚喷作为永久支护,并且 NMT 强调使用钢纤维喷混凝土代替钢筋网喷混凝土,用钢筋喷混凝土拱肋代替钢拱架。这种锚杆加喷混凝土(或喷钢纤维混凝土)支护系统,既可用做隧道临时支护,又可用做隧道永久支护。该系统对开挖轮廓形状适应性强,即使轮廓不平顺,喷层也能贴合岩面,远比钢拱架或网构好。喷层承载环可视需要形成。围岩条件变化时,只需调整锚杆长度和间距以及喷层厚度,便可适应,很少作混凝土二次衬砌。

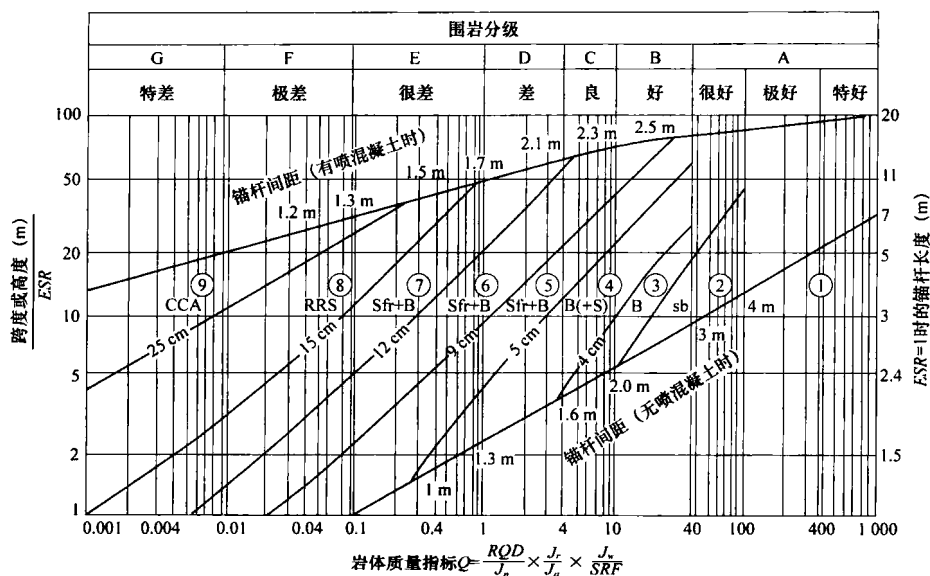


图 1-3 Q 系统围岩支护设计简图

① 不设支护；② sb—局部视需要施加的随机性锚杆；③ B—系统锚杆；④ B(+S)—系统锚杆(+喷混凝土，喷层厚 4~10 cm)；⑤、⑥、⑦ Sfr+B—系统锚杆+钢纤维喷混凝土，其中：⑤ 喷层厚 5~9 cm，⑥ 喷层厚 9~12 cm，⑦ 喷层厚 12~15 cm；⑧ Sfr+RRS+B—钢纤维喷混凝土+加劲肋+系统锚杆，喷层厚 ≥ 15 cm；⑨ CCA—模筑钢筋混凝土拱衬砌

为了减少二次衬砌,必须保证单层喷护衬砌的平整度,解决单层衬砌平整度的一项措施就是目前存在争议的“模喷”技术。一方面,在施工时往一个封闭的小空间内喷射混凝土,由于骨料颗粒的跳动和反弹对混凝土的结构产生一定的影响(“模喷”混凝土由于模板的作用,造成回弹物裹入,从而会在喷射混凝土中形成空隙);另一方面,在采用“模喷”工艺的情况下,喷混凝土作业中的回弹问题能得以彻底解决,同时又能使喷混凝土层获得足够厚度和一个较为平滑的表面。因此,为使“模喷”技术得以推广应用,仍需进行系统的试验研究和理论分析,解决存在的问题。图 1-4 为德国研制的两种类型的适用于“模喷”技术的随动模板^[2]。

NMT 非常重视地质及工程地质调查,应用地表地质测绘、地质钻孔、岩芯分析与实验室实验、跨孔层析 X 摄影、地质雷达等技术,尽可能得到更多的岩层信息,对岩体质量和支护作出尽可能确切的预测。在施工中,以隧道的地质素描日志和各种形式的超前地质预报对施工作出信息反馈,进行动态控制。所以,挪威法也是一种动态反馈设计方法。一般情况下,监控量测仅在关键或特殊的时刻(如 $Q < 0.01$ 或高跨比特别小)施作,但随着 NMT 在软弱围岩(如伦敦黏土)方面的尝试,现代的 NMT 也逐渐重视监控量测手段。

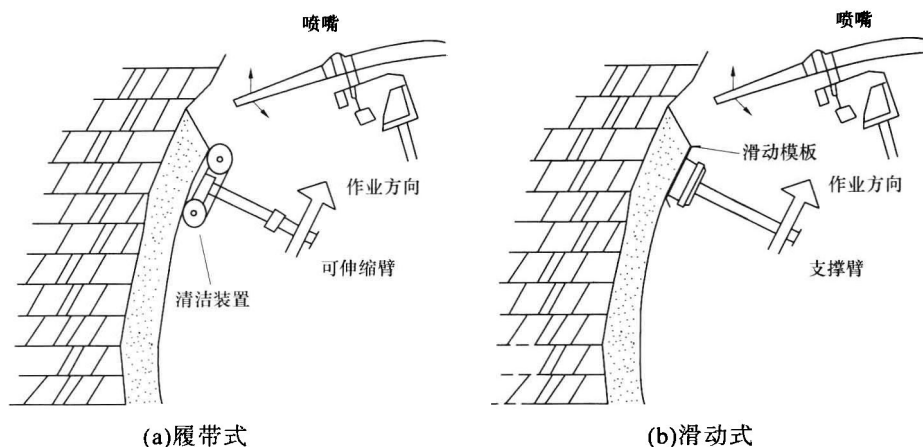


图 1-4 “模喷”随动模板

1.2.3 管片衬砌法

管片衬砌法是通过预制管片的洞内拼装以及管片背后豆砾石灌浆等方法形成衬砌结构，结构形式见图 1-5，图 1-6 为全断面掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)掘进、衬砌工艺示意图。该法方便快捷，适应隧洞机械化施工的要求，可显著改善隧洞内的施工环境。随着掘进机在开挖长大隧洞中应用的日益增多，管片衬砌法在隧洞支护、衬砌中得到更多应用^[3]。

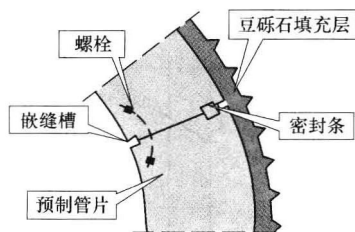


图 1-5 管片衬砌结构示意图

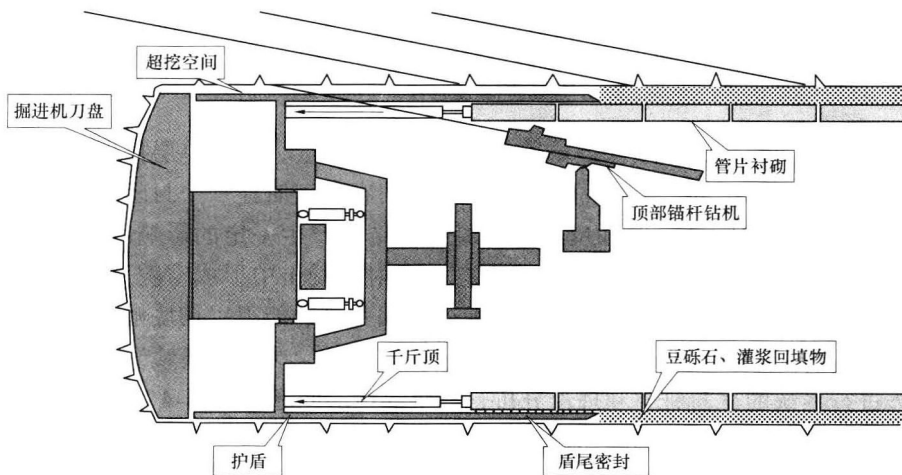


图 1-6 护盾式 TBM 掘进、衬砌工艺示意图

管片类型主要有球墨铸铁管片、钢管片、复合管片和钢筋混凝土管片等，每环由数块管片组合而成。其中钢筋混凝土管片强度高，加工制作比较容易，采用钢模制作时可保证管片精度，耐腐蚀，造价也低，目前应用最广泛，图 1-7 为拼装后的钢筋混凝土管片衬砌。表 1-1 给出了部分国内外已建管片衬砌隧洞指标。由表 1-1 可见，目前混凝土

土管片多采用强度等级为 C50 及以上混凝土制作,这是因为高强混凝土强度高、抗渗性能好,可有效降低衬砌厚度、减轻管片重量,同时其具有早强性,可有效减少钢模的数量。表 1-2 给出了国内已建输水隧洞管片衬砌配筋量,除引大入秦调水工程 30A 隧洞重型管片衬砌外,各隧洞管片衬砌均采用对称配筋。由表 1-2 可知,各隧洞管片衬砌最小配筋率均大于 0.2%, I ~ III 类围岩中的衬砌含筋量一般在 $50 \sim 140 \text{ kg/m}^3$ 。



图 1-7 拼装后的钢筋混凝土管片衬砌

在工程实践中,钢筋混凝土管片的一些缺点也逐渐暴露出来,如钢筋混凝土管片的厚度一般较大、运输安装过程中边缘容易破损、推进过程中管片易顶裂等,为此可采取提高钢模制作精度和管片混凝土强度、提高拼装质量、在混凝土中加入钢纤维提高管片的抗裂能力^[4]、降低千斤顶对管片的偏心作用等措施。

通常管片衬砌采用螺栓连接以提高结构抗变形能力,近来国内外技术人员开发出预应力管片衬砌新技术,可有效提高管片衬砌的真圆性、止水性、耐久性及抗内水压力能力^[5]。管片衬砌通常在采用护盾式掘进机、盾构机等开挖的隧洞中应用,管片衬砌中必须保证回填灌浆质量,使衬砌与围岩形成整体工作,否则可能因围岩无法得到支撑而变形增大,并进而引起管片的开裂和错台(见图 1-8)。



图 1-8 管片衬砌的开裂、错台现象

1.2.4 挤压混凝土衬砌法

挤压混凝土衬砌法,即 ECL(Extruded Concrete Lining)工法,采取在 TBM 护盾尾部立内模,压入素混凝土、钢纤维混凝土或钢筋混凝土的方式形成挤压混凝土衬砌,使衬砌与围岩密贴,加快了施工进度,减少了衬砌间的接缝。图 1-9 为挤压混凝土衬砌法的原理示意图^[6]。

该衬砌方法的正式研究应用是在 20 世纪 60 年代,1965 年苏联首次应用该技术建造了涅格宁河总水管,继后又用于莫斯科等城市的地铁隧道。虽然以苏联为首的东欧各国先行一步,但他们主要是将这一施工方法用于地质条件良好的地基中,且隧道衬砌采用素混凝土,这大大限制了该方法的推广。20 世纪 80 年代初,西德和日本将钢纤维混凝土、钢筋混凝土引入 ECL 法中,尽管工法的基本构成仍与素混凝土相同,但扩大了其适用范围,推进了 ECL 法在隧道施工中的应用。此外,为了使这一技术能够应用于地基软弱、工作面自承能力差的城市隧道开挖中,日本技术人员把密闭盾构技术与 ECL 技术有机结合,即采用密闭型盾构机在前端挖掘,采用 ECL 技术在后端衬砌。由于两道工序同时进行,通常是掘进多少,衬砌也向前推进多少,因而在日本也将 ECL 技术称为并进技术。目前,从地质条件良好的山岭隧道到软弱地基的城市隧道都可采用 ECL 法进行衬砌施工。截止到 20 世纪 90 年代,ECL 施工方法已在多个国家隧洞工程中应用,详见表 1-3^[6]。

表 1-1 部分采用预制钢筋混凝土管片衬砌设计的隧洞

工程名称	类别	地质	隧洞衬砌			管片						止水方式
			长度 (km)	外径(mm)	内径(mm)	每环 分块	拼装 方式	形状	混凝土 强度等级	宽度 (mm)	厚度 (mm)	
引大入秦 30A 隧洞 (中国甘肃)	水工	结晶灰岩、含漂石砾岩、含砾砂岩、泥岩、砂岩等	11.65	5 400	4 800	4	错缝	六边形	C25	1 600	300	饱浸沥青的泡沫止水条
引黄入晋南干线 4-6 号洞 (中国山西)	水工	灰岩	45.9	4 740 4 640	4 300 4 200	4	错缝	六边形	C55	1 400	220	遇水膨胀橡胶与弹性橡胶止水条
引黄入晋南干线 7 号洞 (中国山西)	水工	灰岩	42.5	4 700	4 200	4	错缝	六边形	C55	1 400	250	遇水膨胀橡胶与弹性橡胶止水条
引黄入晋南干线 连接段 7 号洞 (中国山西)	水工	灰岩、泥灰岩	13.5	4 640	4 140	4	错缝	六边形	C45	1 400	250	遇水膨胀橡胶与弹性橡胶止水条
引黄入晋总干线 6-8 号洞 (中国山西)	水工	灰岩、煤系地层	12.2	5 960	5 460	4	错缝	六边形	C30	1 600	250	土洞段设两道止水条及 BW 遇水膨胀止水条及双组分聚硫胶嵌缝填筑;岩石段只对嵌缝采用 Sika 砂浆填筑
掌鸠河供水工程 上公山隧洞 (中国云南)	水工	灰岩、玄武岩、白云岩、泥岩、页岩	13.762	3 500	3 000	5	错缝	四边形	C45	1 000	250	无孔弹性橡胶止水条
南水北调中线 穿黄隧洞 (中国河南)	水工	中砂层、粉质壤土	2×3.45	8 700	7 000	等分 7 块	错缝	四边形	C50	1 600	外衬 400	无孔弹性橡胶止水条
八十一大坂隧洞 (中国新疆)	水工	凝灰质砂岩与角砾岩、砂岩与泥岩互层	25.7	6 560	6 000	4	错缝	六边形	C40	1 600	280	

续表 1-1

	类别	地质	隧洞衬砌			管片						止水方式
			长度 (km)	外径 (mm)	内径 (mm)	每环 分块	拼装 方式	形状	混凝土强 度等级	宽度 (mm)	厚度 (mm)	
广州地铁隧道 2号线 (中国广东)	地铁	黏性土、强风化砂岩、 泥岩	18.5	6 000	5 400	6	错缝	四边形	C50	1 200	300	
广州地铁隧道 3号线 (中国广东)	地铁	黏性土、强风化砂岩、 泥岩	23.2	6 000	5 400	6	错缝	四边形	C50	1 500	300	三元乙丙水膨胀橡胶 止水条
上海大连路越江 地铁隧道 (中国上海)	地铁	黏性土	1.274	11 000	10 040	8	错缝	四边形	C50	1 500	480	
北京铁路直径线 (中国北京)	地铁	以卵石土、圆砾土、 中砂、粗砂为主	7.23	11 600	10 500	9	错缝	四边形	C50	1 800	550	复合式弹性遇水膨胀 橡胶止水
南京地铁 1 号线 (中国江苏)	地铁		10.9	6 200	5 500	6	错缝	四边形	C50	1 200	350	橡胶止水
武汉长江隧道 (中国湖北)	公路	粉细砂、中粗砂、卵 石为主	2×2.55	11 000	10 000	等分 9 块	错缝	四边形	C50	2 000	500	
上海崇明越江 隧道 (中国上海)	公路	砂质粉土、粉质黏土、 淤泥质黏土	7.47	15 000	13 700	10	错缝	四边形	C60	2 000	650	
EL Salam Tunnel (埃及)	水工	灰性粉砂黏土、砂土	4×0.77	6 340	5 100	8	错缝	四边形	C45/C20	1 200	外衬 300	EPDM 密封条(可承受 70 m 水头)
Lesotho Highlands Water Project (南非)	水工	玄武岩、含凝灰岩、 砂岩、粉砂岩	32.0 37.0	4 700 5 000	4 200 4 500	4 5	错缝	六边形 四边形	C40	1 400	250	四边形的管片衬砌段采 用 EPDM 密封条, 六边 形的管片衬砌段不设止水

续表 1-1

工程名称	类别	地质	隧洞衬砌			管片					止水方式	
			长度 (km)	外径 (mm)	内径 (mm)	每环 分块	拼装 方式	形状	混凝土强 度等级	宽度 (mm)		厚度 (mm)
Evinos-Mornos Conveyor Tunnel (希腊)	水工	复理石、灰岩、泥及 泥砂质片岩	29.4	3 900	3 500	4	错缝	六边形		1 250	200	
Stormwater Management and Road Tunnel (马来西亚)	水工 公路	石灰岩、砂土、黏土、 粉土	5.205	12 830	11 830	10	错缝	四边形	C50	1 700	500	
Trans-Tokyo Bay Highway Tunnel (日本)	公路	非常软的冲积土层	9.1	13 900	11 900	等分 11 块	错缝	四边形		1 500	外衬 650	管片周边粘贴遇水膨 胀橡胶止水条, 内、外 层衬砌间铺设防水层
the Fourth Elbe Tunnel (德国)	公路	含砂、砾石、冰川 泥灰岩等杂质的黏性 土或非黏性土层	3.1	13 750	12 350	9 块	错缝	四边形		2 000	700	管片周边粘贴两道 EPDM 弹性橡胶止水 条(可承受 1 MPa 水 压)
Groene Hart Tunnel (荷兰)	铁路	泥煤层、沉积沙层、 黏土层	7.16	14 500	13 300	10	错缝	四边形		2 000	600	
Guadarrama Tunnel (西班牙)	铁路	花岗岩、片麻岩	2×28.4	9 140	8 500	7	错缝	四边形	C40	1 600	320	
Storebaelt Tunnel (丹麦)	铁路	冰碛漂砾黏土、泥 灰岩、石灰岩	2×7.4	8 500	7 700	7	错缝	四边形	C70	1 650	400	氯丁橡胶弹性密 封条

表 1-2 国内已建输水隧洞管片衬砌主要指标

名称		输水方式	内径 (m)	混凝土强度等级	管片形式	厚度 (m)	宽度 (m)	配筋率 ρ (%)	含筋量 (kg/m^3)	厚度/外径 (%)
引大入秦调水工程 30A 隧洞	轻型管片	无压	4.8	C25	六边形管片, 每环 4 块	0.30	1.6	0.192	67.5	5.56
	重型管片							0.247	77.2	
万家寨引黄工程 总干线 6~8 号隧洞	A 型管片	无压	5.46	C30	六边形管片, 每环 4 块	0.25	1.6		51.25	4.29
	B 型管片								71.18	
	C 型管片								120.66	
万家寨引黄工程 南干线 4~6 号隧洞	A 型管片	无压	4.2	C55	六边形管片, 每环 4 块	0.22	1.4		79	4.74
	B 型管片								140	
	C 型管片								180	4.64
	D 型管片								210	
万家寨引黄工程南干线 7 号隧洞 (A 型管片)		无压	4.2	C55	六边形管片, 每环 4 块	0.25	1.4	0.219	79.6	5.32
万家寨引黄工程 连接段 7 号隧洞	A 型管片	无压	4.14	C45	六边形管片, 每环 4 块	0.25	1.2		90.86	5.39
	B 型管片								158.11	
	C 型管片								306.49	
掌鸠河供水工程 上公山隧洞	轻型管片	有压	3.0	C45	四边形的管片, 每环 5 块	0.25	1.0	0.402	76.4	7.14
	重型管片							0.524	104.7	

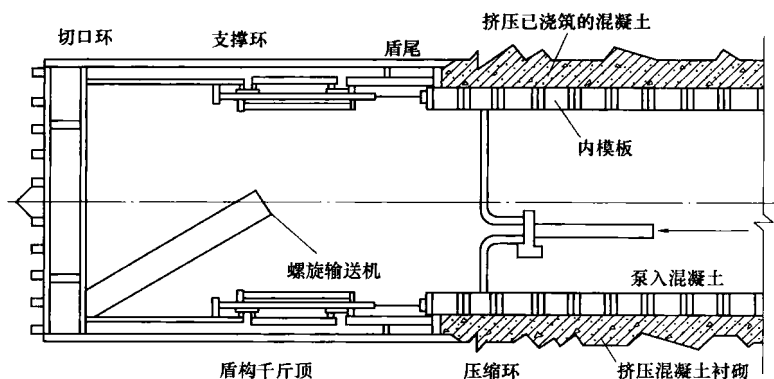


图 1-9 ECL 工法原理图