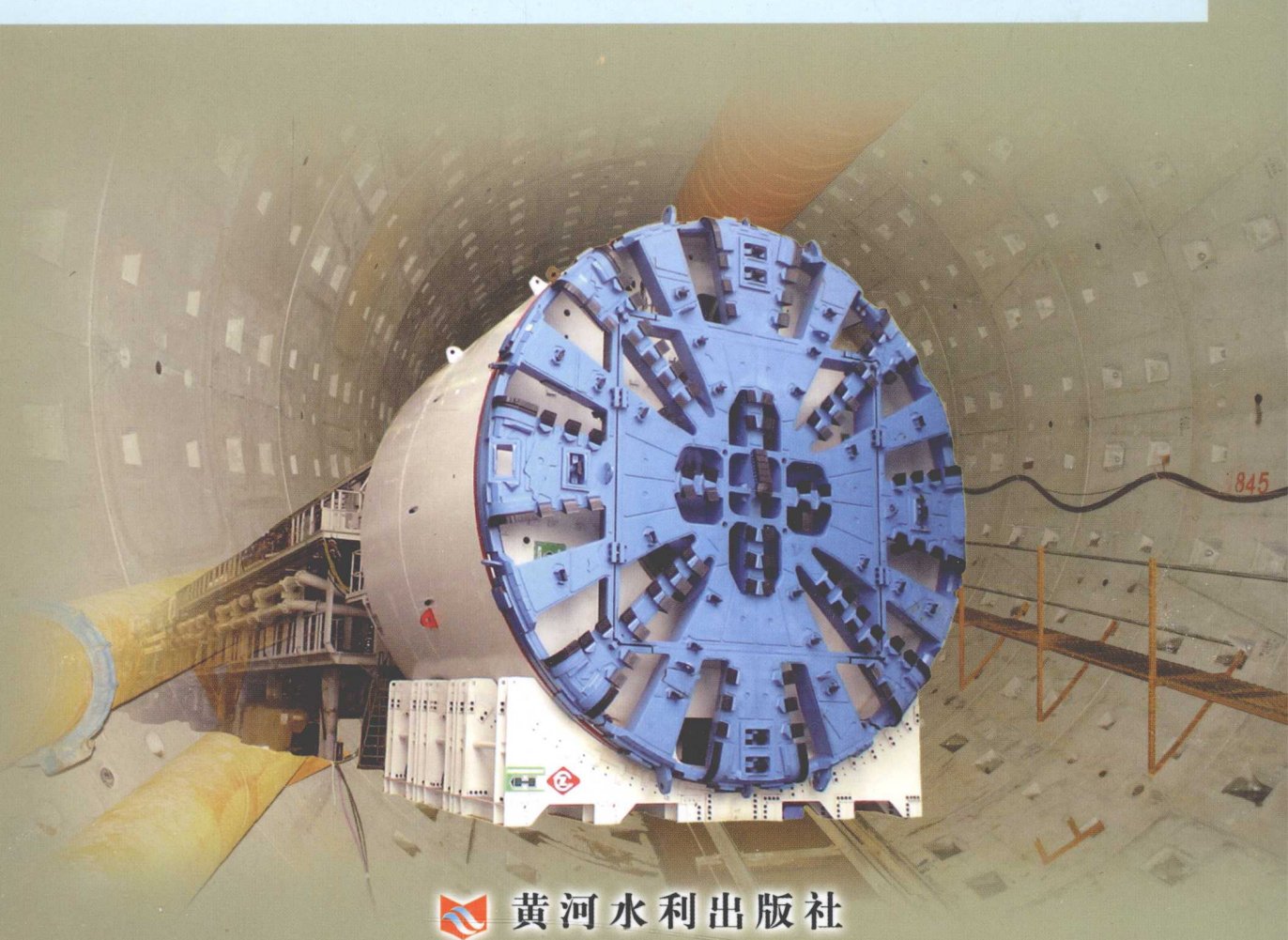


南水北调中线穿黄工程 泥水盾构施工技术

王江涛 陈建军 吴庆红 于澎湃 编著



黄河水利出版社

南水北调中线穿黄工程 泥水盾构施工技术

王江涛 陈建军 编著
吴庆红 于澎涛

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

穿黄隧洞工程是南水北调中线干线工程的关键单项工程,本书对穿黄隧洞盾构施工中的关键技术难题、解决方法和过程作了深入阐述,并以问答形式对整个穿黄工程作了详细介绍。

盾构隧洞掘进是一项复杂的系统工程,本书没有对盾构施工技术作全面介绍,而是依托穿黄工程,针对其工程的特点,总结出关键的施工技术,主要有始发竖井施工、盾构机的选型、泥水系统设计、盾构机的组装与调试、盾构始发技术、管片制作与拼装、壁后注浆、复合地层中的掘进、刀具的检测与更换、施工测量与监测、管片的错台及碎裂控制等。这些关键技术多数是目前国内外盾构施工前沿的核心技术。书中的试验方法、研究成果、施工参数可为类似工程借鉴使用。

本书可作为广大工程技术人员、专家学者的参考资料,对穿黄工程感兴趣的读者也可通过本书对工程的前期规划、建设管理、施工技术等有较全面的了解。

图书在版编目(CIP)数据

南水北调中线穿黄工程泥水盾构施工技术/王江涛等
编著. —郑州:黄河水利出版社,2010.6

ISBN 978 - 7 - 80734 - 796 - 5

I. ①南… II. ①王… III. ①南水北调 - 水利工程 -
引水隧洞 - 盾构(隧洞) - 施工技术 IV. ①TV682

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 019202 号

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:hhslcbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:31.75

字数:734 千字

印数:1—1 500

版次:2010 年 6 月第 1 版

印次:2010 年 6 月第 1 次印刷

定价:128.00 元

序

南水北调工程是缓解我国北方水资源严重短缺局面的重大战略性基础设施。建设南水北调工程,是党中央、国务院根据我国经济社会发展需要作出的重大决策。工程的实施,对于贯彻落实科学发展观,优化我国水资源配置,建设资源节约型、环境友好型社会,进一步推动小康社会建设,实现经济社会的可持续发展,具有极为重要的作用。

南水北调中线工程,从大坝加高水库扩容后的丹江口水库陶岔渠首闸引水,沿线经开挖或回填后成型的渠道,经唐白河流域西部过长江流域与淮河流域的分水岭方城垭口,沿黄淮海平原西部边缘,在郑州以西李村附近穿过黄河,沿京广铁路西侧北上,可基本自流到北京、天津。输水干线工程全长 1 430 多 km,跨越长江、淮河、黄河、海河四大流域,实现跨流域长距离调水。这是人类运用现代科学技术,改造自然,改变人类生存环境,保护生态平衡和促进经济发展的伟大壮举。

南水北调工程点多、线长,涉及面广,工程技术复杂,建设管理极具挑战性。作为南水北调中线关键控制性工程,穿黄工程战略地位重要,且地质条件复杂,工程建设及管理的难度很大,是南水北调工程诸多具有高技术含量的单项工程的典型代表。

在穿黄工程建设中,穿黄隧洞的盾构掘进最令人关注。在黄河河床大埋深下开掘大直径隧洞,地层条件复杂多变,地下水位高,掘进线路长,且存在孤石、枯树等,施工技术难度很大。采用当今世界上先进的泥水加压平衡盾构机隧洞掘进设备进行穿黄隧洞的施工,就需要参建各方掌握最先进的科学技术,进行科学管理,并且在施工中还要勤于钻研,勇于创新,才能解决不断出现的各种困难和问题,保证工程的顺利进行。

自 2005 年 9 月 27 日穿黄主体工程开工以来,参建各方有效地应对了在工程施工过程中出现的种种挑战,以科学求实的态度和严肃认真的作风,团结协作,攻坚克难,解决了一个又一个技术难题。经过五年的拼搏奋斗,目前穿黄工程建设取得了可喜进展,上游隧洞已由北向南掘进并一次衬砌 3 450 m,顺利通过黄河深槽达南岸竖井,下游隧洞也已掘进 2 900 多 m。这里我用两句话概括截至目前仍在紧张建设的穿黄工程:总体进展顺利,施工质量优良。

本书四位作者,在繁忙工作之余,不断收集、整理成果资料,总结施工过程中的点滴体会,并对一些关键技术问题进行了初步分析和研究,辛勤耕耘,习作成书,体现了一代青年人的精神和追求。

在穿黄隧洞盾构掘进即将全线贯通之际,《南水北调中线穿黄工程泥水盾构施工技术》面世了。此书全面回顾了穿黄隧洞盾构施工的全过程,对穿黄隧洞盾构施工的经验教训进行了认真的总结和分析,对盾构施工重点技术问题进行了深入研究。此书还对整

个穿黄工程概括为 100 个问题,方便读者对穿黄工程有一个全面的了解。

我希望通过此书,可以使读者感受到盾构施工的巨大魅力和潜力,体验到穿黄工程的技术难度,看到南水北调工程建设者攻艰克难、无私奉献的风采,也希望通过此书使更多的年青科技工作者淡泊名利,致力于民族振兴、科技进步。

诚然,本书作者都还年轻,书中错误在所难免,希望得到更多专家的批评和指导。穿黄隧洞盾构掘进贯通后,还有更艰巨的后续施工任务,在此希望作者及全体建设者继续努力,全面实现工程建设目标,为营造和谐建设环境、创建一流精品工程作出新的更大的贡献。

张吉奎
2009.12

前 言

穿黄工程,是举世瞩目的南水北调中线干线工程的关键单项工程,采用隧洞型式从黄河河床下穿过,实现了中国两大河流长江和黄河之水的立体交叉。穿黄工程具有战略地位重要、工程任务明确、建设工期紧张、管理工作繁重、地质条件复杂、技术要求严格等诸多特点,因而受到国内外的高度关注。特别是采用了泥水加压平衡盾构机进行掘进施工,是我国水利界第一次采用大直径泥水平衡盾构机进行输水隧洞的施工,这对于盾构技术在水利工程中的推广应用具有十分重要的意义。

2005年9月27日穿黄工程主体工程开工建设,两条隧洞分别于2007年7月8日和2008年3月15日实现盾构机始发,2009年11月22日上游线隧洞完成3450m的穿越黄河河床段的掘进施工,胜利到达南岸竖井,从而实现了穿越黄河的伟大壮举。

穿黄工程在施工过程中先后遇到的重大技术挑战有:①超深超厚地下连续墙施工技术;②深始发竖井施工技术;③盾构机始发技术;④大直径隧洞管片拼装技术;⑤长距离盾构掘进技术;⑥长距离掘进刀盘具维护技术;⑦盾构机到达技术;⑧长距离隧洞测量技术等。

作为亲身参加穿黄盾构施工的技术人员,我们一边和其他参建者共同攻坚克难、解决技术难题,一边在工作之余,注意收集成果资料,对穿黄工程解决盾构施工的关键技术成果进行汇编整理,在盾构施工穿越黄河取得阶段性胜利之时,定稿出版。本书以穿黄工程盾构施工为主线,基本上以施工先后为顺序,从北岸始发竖井施工开始,直至南岸竖井,阐述了盾构施工的每一个环节的重点施工技术,最后又通过问答形式对穿黄工程作了整体介绍,使得本书既侧重盾构关键技术,又能兼顾一般读者。本书文笔虽显粗糙,但确属辛苦之作。与一般的科技著作不同,本书不是全面介绍盾构技术的专门性著作,而是以穿黄工程的实际施工为载体,重点阐述了在穿黄隧洞盾构掘进施工中是如何解决技术难题的。书中数据翔实可靠,技术方法针对性强,且在工程实施中得到了实践证明。穿黄工程所遇到的大部分关键技术难题也是其他类似盾构施工所要面对的问题,即便考虑到穿黄工程的特殊性,作者亦希望穿黄工程运用的方法技术能为其他工程提供有益借鉴。本书是全体穿黄建设者集体智慧的结晶,通览全书,不但可以从中了解盾构施工的关键技术,也能感受到穿黄施工的艰辛所在。

本书在编著过程中,得到了国务院南水北调办公室张基尧主任、李津成副主任、宁远副主任、张野副主任、沈凤生总工程师及国务院南水北调建委会专家委汪易森秘书长的亲切关怀和重要指导,得到了南水北调中线干线工程建设管理局石春先局长、郑征宇副局长、曹为民副局长、韩连峰副书记、李长春副局长和中线建管局河南直管建管部高必华部

长的重点关注和高度支持,作者在此深表谢意!

本书的始发竖井施工一章,上海的王洪新博士给予了很多具体的帮助。在本书收集资料和编写过程中,长江勘测规划设计研究有限责任公司符志远设计总工程师给予了很多协助,中铁十六局集团有限公司穿黄工程项目部的曹振锋、于兴国、何培志、张广鹏、唐毅、王连明、乔龙、程传过、朱代杰、武彬华、李明景、郑中刚等参与了部分章节的编写,在此一并表示感谢!

编 者

2009 年 12 月 10 日

目 录

序

张基尧

前 言

第 1 章 概 述	(1)
1.1 概 况	(1)
1.2 国内外盾构施工技术现状	(4)
1.3 穿黄工程概况	(8)
1.4 隧洞地质条件	(14)
1.5 盾构施工技术挑战	(22)
第 2 章 始发竖井施工	(25)
2.1 始发竖井结构特点	(25)
2.2 灰浆墙施工	(32)
2.3 地下连续墙侧壁稳定分析	(36)
2.4 地下连续墙施工	(42)
2.5 竖井基坑稳定分析	(63)
2.6 逆作法竖井施工	(83)
第 3 章 泥水加压平衡盾构机的选用	(91)
3.1 盾构机类型的确定	(91)
3.2 盾构机的设计要点	(97)
3.3 泥水加压平衡盾构机工作原理	(105)
3.4 盾构机技术参数	(111)
3.5 盾构机主机部件性能描述	(117)
3.6 盾构机后配套系统功能描述	(126)
3.7 盾构机的管理和保养维修	(146)
第 4 章 泥水加压平衡盾构机的泥水系统设计	(152)
4.1 泥水平衡的机理	(152)
4.2 泥水系统及设备	(166)
4.3 泥水系统的综合管理	(188)
第 5 章 盾构机的组装与调试	(191)
5.1 盾构机的运输	(191)

5.2	刀盘和盾体的焊接	(194)
5.3	盾构机的组装	(199)
5.4	盾构机的调试	(219)
第6章	泥水加压平衡盾构机的始发技术	(222)
6.1	概 述	(222)
6.2	穿黄隧洞盾构始发背景	(222)
6.3	盾构机出洞地基加固处理	(225)
6.4	盾构始发侧冷冻封水技术	(234)
6.5	始发托架安装与固定及其计算	(238)
6.6	洞口密封装置安装	(243)
6.7	洞门混凝土凿除	(245)
6.8	盾构机始发	(246)
6.9	施工风险分析及应急预案	(249)
第7章	钢筋混凝土管片制作与拼装	(255)
7.1	管片概况	(255)
7.2	管片预制厂设计与布置	(255)
7.3	管模设备	(259)
7.4	管片的制作与生产	(262)
7.5	管片质量保证措施	(280)
7.6	管片拼装工艺	(288)
第8章	壁后注浆	(296)
8.1	概 述	(296)
8.2	壁后注浆地质条件	(298)
8.3	壁后注浆试验研究及浆液类型的选择	(299)
8.4	同步注浆压力和注浆量	(314)
8.5	壁后注浆设备	(315)
8.6	壁后注浆施工	(319)
8.7	壁后注浆效果	(323)
第9章	长距离大直径复合地层中的盾构掘进	(333)
9.1	复合地层中的泥水盾构掘进	(333)
9.2	盾构机操作及参数控制	(345)
9.3	特殊地层处理措施	(348)
第10章	南岸竖井的到达与二次始发	(352)
10.1	南岸竖井工程概况	(352)

10.2	盾构机到达南岸竖井工艺流程	(354)
10.3	盾构机到达南岸竖井施工准备措施	(355)
10.4	盾构机二次始发工作流程及保证措施	(364)
10.5	盾构机到达和二次始发应急预案	(369)
第 11 章	盾构机的刀具检测与更换	(371)
11.1	概 述	(371)
11.2	带压进仓施工技术	(372)
11.3	刀具检查与更换	(378)
11.4	常压开仓换刀法	(381)
第 12 章	施工测量与监测	(399)
12.1	施工现场勘察及测量控制网交接	(399)
12.2	地面施工控制网建立	(399)
12.3	竖井联系测量	(400)
12.4	洞内导线测量	(404)
12.5	盾构施工中盾构姿态定位测量	(405)
12.6	隧洞贯通测量	(407)
12.7	盾构施工时隧洞沉降监测	(408)
第 13 章	管片改造及错台破损控制技术	(412)
13.1	概 述	(412)
13.2	工程背景	(412)
13.3	管片结构型式	(413)
13.4	管片拼装问题	(414)
13.5	管片结构问题分析	(418)
13.6	管片改造及错台破损控制措施研究	(420)
13.7	最终实施方案	(431)
13.8	总 结	(433)
第 14 章	工程施工供电系统	(435)
14.1	基本概况	(435)
14.2	供电负荷等级和电能要求	(435)
14.3	负荷计算	(436)
14.4	10 kV 高压供电系统	(445)
14.5	应急供电系统	(449)
14.6	接地装置	(449)
14.7	安全用电	(451)
14.8	通信系统	(453)
第 15 章	南水北调中线干线穿黄工程百问百答	(455)
15.1	基本情况	(455)
15.2	前期规划	(459)

15.3	工程技术	(462)
15.4	建设管理	(482)
15.5	技术挑战	(485)
参考文献		(494)

第1章 概述

1.1 概 况

南水北调中线穿黄工程是整个中线工程的重点项目,穿越黄河的位置、建筑物型式、施工方法是多年来研究的主要内容,在开工建设前的十多年来,主要研究单位长江水利委员会长江勘测规划设计研究院(以下简称长委设计院,现更名为长江勘测规划设计研究有限责任公司)和黄河水利委员会黄河勘测规划设计研究院(以下简称黄委设计院,现更名为黄河勘测规划设计有限公司)做了大量的勘测、设计和科研工作,穿黄工程的方案确定主要考虑以下因素:对黄河河势防洪的影响,地质条件,黄河冲刷深度影响,结构安全性,施工可行性,运行管理,投资,战备防恐等。

1.1.1 线路比选

穿黄线路比选集中到郑州荥阳市王村镇孤柏嘴附近约 2.6 km 的河段范围内进行,与下游的郑州铁路桥相距约 30 km,距上游小浪底水库约 80 km。

2002 年 3 月,水利部办公厅下发了《南水北调中线穿黄工程工作安排的通知》(办函[2002]82 号),对中线工程总干渠水头分配优化以及线路与过河方案比选工作做了具体的安排,并委托水利部水利水电规划设计总院(以下简称水规总院)主持比选工作。根据多年来的研究成果,2002 年 4 月 16 日,黄河水利委员会(简称黄委会)以黄总办[2002]1 号文向水利部呈报了《南水北调中线穿黄工程有关问题的意见》,提出李村线(又称上线)穿黄工程长度采用 3.5 km、孤柏嘴线(又称下线或满沟线)穿黄工程长度在 4 km 以上方能使其对河势的影响得到明显改观。同时,长委设计院和长江科学院亦根据多年来对穿黄工程的研究,向水规总院和水利部调水局报送了《南水北调中线穿黄工程过河线路比选报告》、《南水北调中线穿黄工程与河势防洪研究报告》和《南水北调中线水头优化报告》,认为孤柏嘴线过河主体工程长度取 3.5 km 与上游李村线取 3.5 km,就工程与河势、防洪相互影响而言并无明显不同,而孤柏嘴线的建设条件优于李村线。

2003 年 1 月 28 日,根据南水北调建设形势的需要,长委设计院和黄委设计院组成了穿黄工程联合项目组,并于 2003 年 4 月共同完成了《南水北调中线穿黄工程方案综合比选报告》(简称《综合比选报告》),在《综合比选报告》中,穿黄工程按最终规模考虑,即设计流量为 $440 \text{ m}^3/\text{s}$,加大流量为 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。《综合比选报告》认为,李村线和孤柏嘴线均能满足总干渠安全输水要求,与穿黄河段治导规划一致,配套一定的控导工程,对穿黄河段河势、防洪均无实质性的相互影响,均是可行的穿黄线路。对于穿黄隧洞方案宜采用下线,穿黄渡槽方案宜采用上线。

2003 年 5 月 24 ~ 26 日,水规总院对《综合比选报告》进行了审查,同年 6 月 10 日下

发的审查意见认为:隧洞方案比选了上线和下线两条洞线方案,两洞线布置基本不受黄河河势和洪水影响,均能满足总干渠安全输水要求。上线采用斜井直接与隧洞相接,避免了穿越邙山临河高边坡及河岸防护复杂技术问题,北岸河滩宽阔,适合施工场地布置,但进口退水建筑物只能采用隧洞型式退水。下线进口连接段过邙山采用隧洞方案,避免了渠道高边坡,隧洞进口地形平坦,利于退水建筑物和施工场地布置。考虑到黄河河势的不确定性以及河道部门对河势控导工程的规划意见,经综合比选,上线可作为本阶段选定+洞线。

因此,穿黄工程线路选定在上线上。

1.1.2 建筑物型式确定

穿黄工程采用隧洞方式还是渡槽方式穿越黄河,是各界长期关注的焦点,前期工作历时之长、涉及面之广,在中国重大基建项目的决策过程中,对一个单体建筑物型式的论证,实属不多见。两种方案均能满足总干渠输水规模和运用要求,在技术上总体可行,投资上又相差不大,因此难以取舍。

2003年6月10日,水规总院对《综合比选报告》的审查意见认为,隧洞方案不影响桃花峪水库规划,主洞位于河床下 Q_2 粉质壤土和 Q_{3+4} 砂层中,基本不存在由于高含沙水流冲刷可能引起的砂层位移影响隧洞安全问题,工程布置和结构设计基本合理,洞身的双层衬砌分别承受内、外水压力,分缝、防水结构措施可以保证隧洞安全运用,盾构技术成熟,能够满足施工质量和工期要求,具备维护、检修条件,对河道生态与环境影响较小。

渡槽方案需与规划的桃花峪水库特征水位进行协调,工程布置和结构设计基本合理,建筑物结构简单,受力条件明确,混凝土灌注桩加固基础属常规基础处理措施,有成功经验,工程正常维护、检修较为方便。由于渡槽槽身较重,按设计要求需2 800 t级50 m跨度的造槽机,这在国内尚无先例,从研制到投入生产需要一个过程,给施工增加了难度,渡槽重心偏高,对抗震不利。

两方案经技术经济因素的综合比较,隧洞方案运行风险相对较小,更为合理,同意隧洞方案作为穿黄工程下阶段的推荐方案。

2004年3月22~23日,水规总院对《南水北调中线一期穿黄工程可行性研究阶段方案比选报告》进行了审查,维持前次审查结论,同意隧洞方案作为穿黄工程可行性研究阶段的推荐方案。

2004年5月11~14日,水规总院对《南水北调中线一期穿黄工程可行性研究报告》进行了审查,继续维持以前审查结论,同意隧洞方案作为本阶段穿黄工程推荐方案。

2004年6月3~10日,中国国际工程咨询公司对《南水北调中线一期穿黄工程可行性研究报告》进行了评估,认为隧洞方案相比渡槽方案具有以下优势:

- (1)隧洞对桃花峪水库规划留有余地,对黄河行洪和河势影响小。
- (2)隧洞结构抗震性能明显优于渡槽结构。
- (3)隧洞受大气、环境、冻害影响小,耐久性优于渡槽。
- (4)隧洞方案的地面影响小于渡槽方案。
- (5)隧洞方案对防御战争或恐怖袭击有利。

评估意见认为,《南水北调中线一期穿黄工程可行性研究阶段方案比选报告》中推荐选择双线隧洞穿黄方案是合适的。

自此之后,穿黄工程的过河建筑物型式确定采用双线隧洞方案。

1.1.3 施工方法的选择

1.1.3.1 隧洞常用的施工方法

穿黄隧洞的施工方法的确定与建筑物型式及线路的比选密切相关,是同时进行的。选择合理的施工方法是保证施工安全、经济合理、达到预期进度的关键。根据穿黄隧洞工程特性和穿越地层的地质条件,经类比国内外工程实践,主要施工方法有埋管法、矿山洞挖法、顶管法、沉管法和盾构法等几种。

1) 埋管法

隧洞洞身段透水地层总厚度为 60 m 左右。顶部 20 m 为饱和粉细砂、中砂层,为中等—强透水层,具有流动性,这种土层的开挖稳定边坡缓于 1:5,且这种土粒结构地层的开挖边坡受施工机械振动、降雨等影响,将使基坑边坡产生近乎无休止的滑移,土体稳定边坡 $3^{\circ} \sim 4^{\circ}$,使得基坑十分庞大,带来边坡稳定等众多难以克服的问题。

2) 矿山洞挖法

隧洞穿越地层主要为粉细砂、细砂、中砂,其渗透系数及含水量均较大,土体流动性大,洞壁没有自稳时间。如果采用矿山洞挖法开挖,必须先沿隧洞轴线洞体周围一定范围内对土体进行加固处理,采取超前支护和喷锚支护等施工措施。由于隧洞埋置最深达 31 m,对隧洞周围大范围土体加固工程量大,技术难度高。

3) 顶管法

顶管法施工的基本步骤为:先做好顶管竖井,作为顶管的起点与终点,竖井侧壁设有圆孔,以作为被顶入地层的预制管节的出口或入口,顶管出口孔壁的对面侧壁是承压壁,其上安装液压千斤顶和承压垫板,千斤顶将带有切口和支护开挖装置的工具管顶出竖井,以工具管为先导,逐节地将预制管沿设计轴线顶入土层中,一次顶进长度约 200 m。长距离顶管可在设计轴线上设置数个竖井作为顶进接力的中继井,并在管道外周压注减摩剂。我国用此法施工的管道最大内径为 2.8 m,国外已施工的管道最大管径为 4.0 m,施工总长度一般为 1 km 左右。顶管法主要适用于小直径、短距离的隧洞工程。

4) 沉管法

沉管法是在江河水下开挖沟槽,设置临时支撑,将 60 ~ 140 m 长的预制管沿设计轴线沉放至设计高程,各段预制管在水下连接。沉管法主要适用于管道埋深浅、水下淤积少的隧洞工程。黄河中水下开槽困难大,枯水期水深较小,沉管无法水运就位,因此沉管法施工可行性小。

5) 盾构法

盾构法是在地下暗挖隧洞的一种先进的施工方法,盾构是开挖土砂围岩的主要施工机械。盾构在土体中推进,可以防止土砂的崩塌,在盾壳内部进行开挖、衬砌循环作业,施工进度快,不影响河道行洪。

盾构机外壳是一个能支撑土体压力且又能在地层中推进的圆形钢筒结构,盾构前面

设置支撑和开挖土体的装置,盾构尾部是具有一定空间的壳体,周边装有掘进所需的千斤顶,盾构每推进一环距离,在盾尾支护下拼装一环管片衬砌。盾构推进过程中不断从开挖面排出适量的土方,并及时向盾尾后的管片衬砌环与地层之间的空隙中压注足够的浆体,即所谓壁后同步注浆,以防止隧洞及地面下沉,同时使管片衬砌结构的受力状态得到改善。

1.1.3.2 施工方法比选

采用明挖埋管法施工,在主河床段,水中开挖深度达 25 m 以上,无论基坑采用何种支护形式,其支护及防渗工程量都比较大。从施工技术难度及经济合理性上都难以实施。

采用矿山洞挖法施工,隧洞围土加固工程量大,工序烦琐,相互干扰大,施工安全及进度没有保障,工程难以实施。

采用顶管法施工,穿黄隧洞洞径大、距离长,管壁承受的压力相当大,亦难以实施,同时需在沿线设置多个中继井,工程量较大。采用顶管法施工,当时的技术尚难应对穿黄工程的如此规模。

采用沉管法施工,由于黄河含沙量大,泥沙成坡缓于 1:5,不仅开挖深度深,工程量大,而且由于黄河淤积速度快,难以挖至设计高程,水下接缝及基础处理难度较大,穿黄隧洞利用此法施工很难达到设计要求。

从国内外工程实践来看,埋深较大,地质条件复杂,穿越松散、含水地层的隧洞工程,一般采用盾构法施工,与其他施工方法相比,盾构法具有施工进度快、安全可靠、经济合理、自动化程度高、信息化施工等优点。我国上海、南京、广州、北京等城市已成功利用盾构法完成了多条城市地铁、过江(河)隧洞的施工,积累了丰富的施工经验,培养了一批专业化盾构施工队伍。经过技术论证和经济比较综合分析,推荐穿黄隧洞采用盾构法施工。

1.2 国内外盾构施工技术现状

1.2.1 盾构施工技术的起源与发展

盾构施工技术自 1825 年由布鲁诺尔首创于英国伦敦泰晤士河的水底隧道工程以来,已有 180 余年的历史。在这 180 余年的风风雨雨中,经过几代人的努力,盾构法已从一种只能在极少数欧美发达国家中应用的特殊技术,发展成为在发达国家中极为普通,在发展中国家中亦逐渐得到应用的隧道施工技术。

盾构法的思路是来自英国工程师布鲁诺尔的一个有趣发现,布鲁诺尔发现船的木板中,有一种蛀虫钻出孔道,并用它自己分泌的液体覆涂在孔壁上。1818 年,布鲁诺尔在蛀虫钻孔的启示下,最早提出了用盾构法建设隧道的设想,并且在英国取得了该施工法的专利。

1825 年,布鲁诺尔用他自己的想法制成盾构,并第一次在泰晤士河施工了水底隧道。这条道路隧道的断面(11.4 m×6.8 m)相当大,施工中遇到了塌方和水淹(由于初始未能掌握控制泥水涌入隧道的方法,隧道施工中多次被淹),加上隧道的损坏,当时处于难以进展的状态,后来在东伦敦地下铁道公司的合作下,经过对盾构施工的改进,用气压辅助

施工,花了18年的时间才于1843年完成了全长458 m的第一条盾构法隧道。

在盾构穿越饱和含水地层时,施加压缩空气以防止涌水的气压法最先是1830年由口切兰斯爵士(Lord Cochrane)发明的。

1865年,巴尔劳首次采用圆形盾构,并用铸铁管片作为地下隧道衬砌。1869年,他用圆形盾构在泰晤士河底下建成了外径为2.21 m的隧道。

1874年,在英国伦敦地下铁道南线的黏土和含水砂砾地层中建造内径为3.12 m的隧道时,格雷塞德(Henry Greathead)(1844~1896年)综合了以往所有盾构施工和气压法的技术特点,较完整地提出了气压盾构法的施工工艺,并且首创了在盾尾后面的衬砌外围环形空隙中压浆的施工方法,对盾构法的发展起了重大的推动作用。

1880~1890年,在美国和加拿大间的圣克莱河下用盾构法建成一条直径6.4 m、长1 800余m的水底铁路隧道。

20世纪初,盾构施工法已在美国、英国、德国、苏联、法国等开始推广。20世纪30~40年代,这些国家已成功地使用盾构建成内径3.0~9.5 m的多条地下铁道及过河公路隧道。仅在美国纽约就采用气压法建成了19条重要的水底隧道,盾构施工的范围广泛,有公路隧道、地下铁道、上下水道以及其他市政公用设施管道等。苏联于20世纪40年代初开始使用直径为6.0~9.5 m的盾构并先后在莫斯科、列宁格勒等市修建了地下铁道的区间隧道及车站。

20世纪60年代初,穿越不稳定和含水地层的隧道工程辅助技术有降水法、气压法、地层加固法和冻结法。气压法最经济有效,由于安全和健康等原因,希望有一种能不干扰地面和使工人不在气压下施工的隧道掘进机,欧洲国家提出局部气压方法,但这种方法对工作面不能提供不变的和有规则的支护。英国隧道专家建议在隔仓板前用喷水“水力盾构”,但水不能支护开挖面,无法阻止开挖面不停地流动。这种情况与充满水的挖槽相类似,从而提出在开挖面用类同槽壁法的支护,这样就诞生了泥水加压盾构掘进机。

1964年,英国Mott、Hay和Anderson的John Bartlett申请了泥水加压平衡盾构掘进机原理专利(英国专利号1083322)。1971年开挖了直径4.1 m、长140 m的试验段。英国体系泥水加压平衡盾构掘进机与同类德国体系相对照,其研制的特征是有长槽的鼓轮状的切削头、提取来自压力室的泥浆,有粗和细两套分离装置,以及以控制弃土出口压力(阀或泵)的方法保持开挖面的压力。当时,英国由于缺乏能适合促进这种技术的隧道工程,这种技术的发展受到了限制。

1967年,英国成功开发了首台泥水加压平衡盾构。1974年,日本成功开发了首台土压平衡盾构。1987~1991年,英国、法国采用11台盾构掘进50 km长的英吉利海峡隧道(见图1-2-1),创造了单台盾构连续掘进21 km的记录。1989~1996年,日本采用8台世界最大直径14.14 m的泥水加压盾构,掘进东京湾海峡隧道,两条隧道各长9.4 km。

日本工程师相信液体支护隧道开挖面的原理,他们称其为“泥水加压平衡盾构”。

1970年,日本铁建公司在京叶线森崎运河下羽田隧道工程中采用了直径7.29 m的泥水加压盾构施工,土质为冲积粉砂土层和洪积砂层,标贯击数 N 值为2~50,施工长度为 865×2 条=1 712(延米)。直径7.29 m的泥水加压盾构掘进机,在隧道施工中获得了极大的成功,它是当时最大直径的泥水加压平衡盾构。日本及联邦德国等针对在城市建

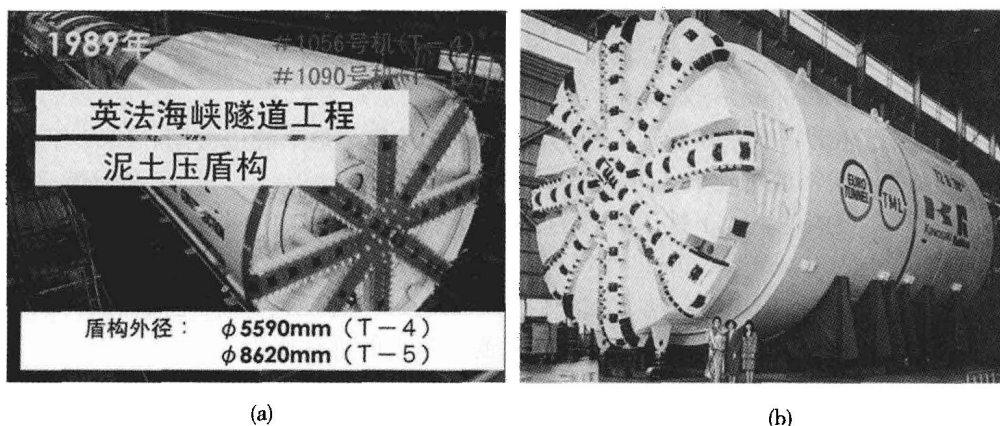


图 1-2-1 英吉利海峡隧道用盾构机

设区的松软含水地层中由于盾构施工所引起的地表沉陷、预制高精度钢筋混凝土衬砌和接缝防水等技术问题,研制了各种新型的衬砌和防水技术及局部气压式、泥水加压式和土压平衡式等新型盾构及相应的工艺与配套设备(见图 1-2-2)。

1994 年,日本研制出世界第一台三圆泥水盾构(见图 1-2-3),并成功地用于大阪地铁 7 号线“商街公园”车站工程施工。商街公园地铁车站(Bsaka Business Park)是大阪地铁 7 号线工程中施工难度最大的一个车站,深约 32 m,长 155 m,位于 IMP 摩天大楼及盾构施工大断面下水道隧道的正下方,处在深度大、水压高、易塌方地层中。管片采用球墨铸铁管片,共计 105 环(105 m),日掘进 2~3 环,于 1994 年 1~4 月完成了约 107 m,在完成一次衬砌后,立柱的托换亦于同年 10~11 月顺利完工。

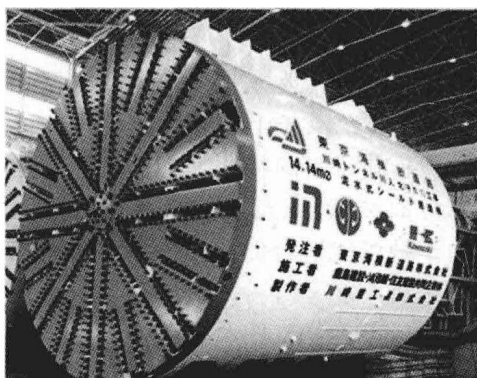


图 1-2-2 日本东京湾泥水盾构

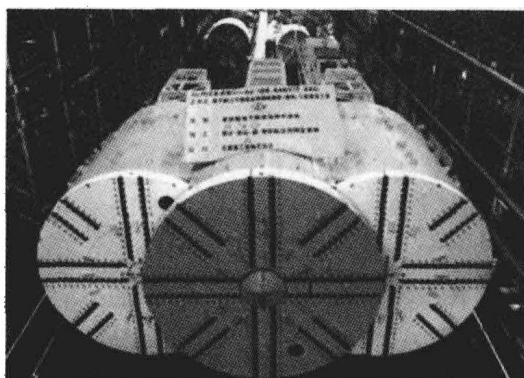


图 1-2-3 1994 年世界第一台三圆泥水盾构

纵观日本近 30 年的泥水盾构发展,自日本泥水盾构问世以来,泥水盾构就一直持续发展。20 世纪 70 年代,在不到 10 年的时间里,日本就用大直径的泥水盾构施工了 20 km 隧道。就当时技术发展水平来说,认为日本对于一切的细颗粒土地层有了较丰富的经验,日本泥水盾构常利用开挖出来的泥土作为开挖泥浆,并只要加上膨润土或其他材料就可调制出用于泥水盾构的泥浆性能,而当时英国的经验仅局限于膨润土这一种泥浆材料。