

NANSHUIBEIDIAO ZHONGXIAN CHUANHUANG GONGCHENG
DAXING SHENMAI HUANMAO YUYINGLI SUIDONG SHIGONG

JISHU YANJIU

南水北调中线穿黄工程 大型深埋环锚预应力隧洞施工 技术研究

张登柱 李发孝 杨杰 成燕 王荣华 任杰 程琳 王吉成 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

南水北调中线穿黄工程 大型深埋环锚预应力隧洞施工 技术研究

张登柱 李发孝 杨杰 成燕 王荣华 任杰 程琳 王吉成 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

穿黄隧洞工程是南水北调中线工程的关键控制性工程,隧洞内衬采用后张法有粘结环向预应力锚索现浇钢筋混凝土结构。本书针对南水北调中线穿黄隧洞的具体工程特点和施工难点,对超长深埋式压力隧洞预应力内衬施工技术进行了系统研究和总结提炼,主要研究内容和成果包括:隧洞内衬混凝土配合比试验研究、隧洞衬砌钢模台车设计及使用研究、内衬混凝土浇筑施工工艺研究、回填灌浆施工技术研究、预应力锚索张拉技术研究、超长深埋式隧洞施工组织研究等。

本书较全面地融汇了穿黄隧洞预应力衬砌施工中的各项先进技术和工程经验,可以为以后类似工程施工提供借鉴和参考,也可作为水利水电、土木建筑、交通桥隧等工程技术人员和相关学科专业研究生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

南水北调中线穿黄工程大型深埋环锚预应力隧洞施工技术研究 / 张登柱等编著. — 北京:中国水利水电出版社, 2015.1

ISBN 978-7-5170-2943-4

I. ①南… II. ①张… III. ①南水北调—水利工程—深埋隧道—压力隧洞—预应力施工—研究 IV. ①TV682

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第022110号

书 名	南水北调中线穿黄工程大型深埋环锚预应力隧洞施工技术研究
作 者	张登柱 李发孝 杨杰 成燕 王荣华 任杰 程琳 王吉成 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 11.75印张 285千字 4插图
版 次	2015年1月第1版 2015年1月第1次印刷
印 数	0001—3500册
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



国务院南水北调办公室主任鄂竞平同志到穿黄隧洞视察



国务院南水北调办公室副主任张野同志到穿黄隧洞视察



水电七局穿黄项目部经理李发孝同志接受中央电视台记者采访



北岸竖井



内衬钢模台车施工



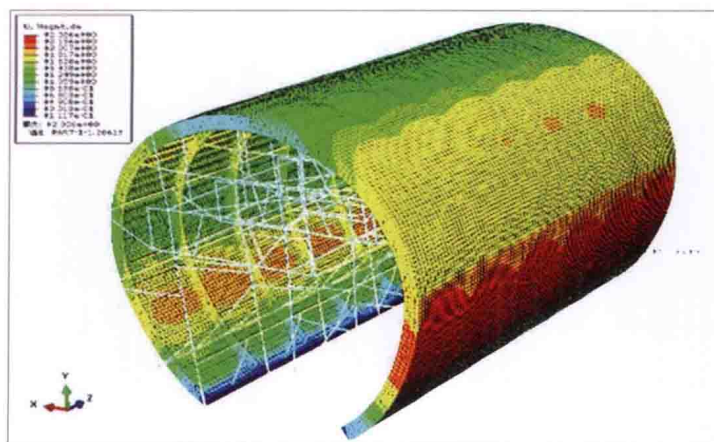
浇筑完成的预应力内衬



航拍图 1

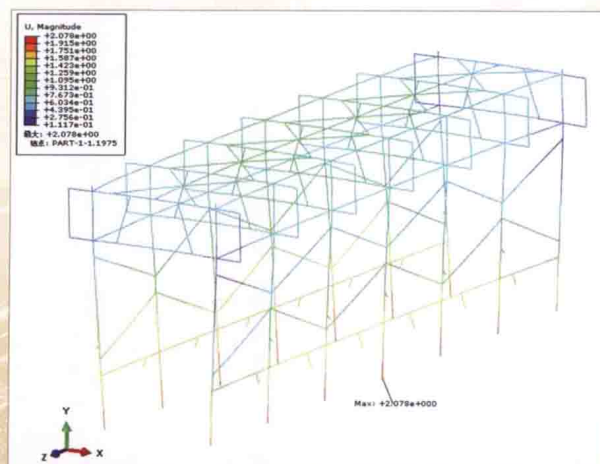
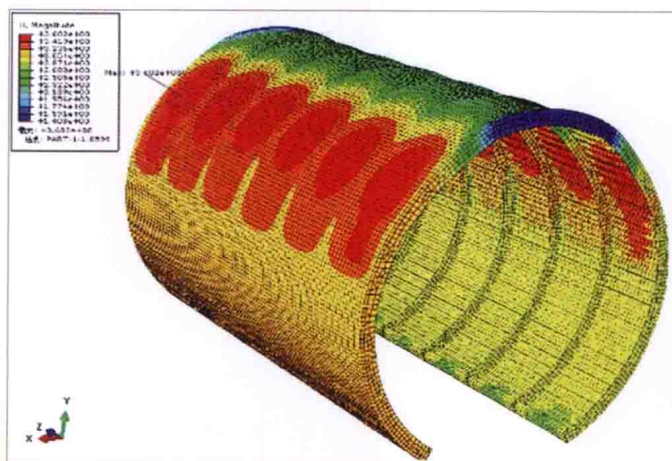


航拍图 2



彩图 1 浇筑侧墙时台车模板位移云图

彩图 2 浇筑顶拱时台车模板位移云图



彩图 3 浇筑侧墙时台车门架竖向位移云图

彩图 4 浇筑侧墙时台车门架应力云图

彩图 5 浇筑顶拱时台车门架
竖向位移云图

彩图 6 浇筑顶拱时台车门架
应力云图

序

我国水资源总量丰富，多年平均年径流量居世界第五位，但人均占有量仅为世界人均值的 $1/4$ ，而且水资源的地区分布也极不均匀。为解决我国北方缺水问题，在 20 世纪 50 年代开始实施的南水北调工程，对于缓解我国北方水资源严重短缺的局面具有重大战略性意义。

南水北调中线工程的实施，可缓解京、津、华北地区水资源危机，为京、津及河南、河北沿线城市的生活、工业增加供水 64 亿 m^3 ，增供农业用水 30 亿 m^3 ，可大大改善供水区生态环境和投资环境，对推动我国中部地区的经济发展，优化我国水资源配置，实现社会经济的可持续发展具有十分重要的作用。

南水北调中线穿黄工程是中线总干渠与黄河的交叉建筑物，是中线总干渠上规模最大、难度最高、技术最复杂的关键性、标志性、控制性工程。中线工程穿黄隧洞位于孤柏嘴山湾河段，为穿黄工程的咽喉，地处黄河典型游荡性河段，位于Ⅶ度地震区，地质条件复杂，设计采用深埋隧洞穿越黄河河床覆盖层，并推荐采用了盾构隧洞施工方案。

中线穿黄隧洞由两条平行隧洞组成，平面上为双洞布置，中心线相距 28m 。连接两岸明渠的穿黄隧洞分为两段，由邙山隧洞和过河隧洞组成，全长 4250m 。鉴于穿黄隧洞为穿越黄河河床覆盖层的大型压力输水隧洞，除需承受外部水压力及土荷载作用外，还需承受大于 0.5MPa 的内水压力，而由盾构施工过程形成的管片衬砌为拼装式结构，目前尚无大型压力水工隧洞应用实例，所以需要在拼装式结构内再修建一层衬砌，用以承受巨大的内水压力，并满足过流对平整度的要求，因而采用了双层复合衬砌的结构型式。穿黄隧洞所采用的衬砌结构形式目前国内还使用比较少，缺乏成熟的施工技术方案，因其结构新颖、工艺复杂，并首次在工程上应用，因而备受工程界和广大专家们关注。

《南水北调中线穿黄工程大型深埋环锚预应力隧洞施工技术研究》一书针对南水北调中线穿黄工程的大型压力输水隧洞环锚预应力内衬施工的特点和难点，系统研究和总结了穿黄隧洞工程中深埋式超长隧洞施工技术优化设计和施工组织、盾构施工技术、钢模台车的设计改造和使用技术、内衬底板和

边顶拱混凝土浇筑施工技术、超薄环锚预应力混凝土施工、回填灌浆及预应力锚索张拉等施工技术，提出了隧洞预应力衬砌施工的一些新技术、新工艺和新方法，不仅在南水北调中线工程穿黄隧洞内衬施工中得以成功应用，工程实施效果优良，而且可为其他水利水电工程中类似深埋式超长隧洞衬砌施工提供很好的技术参考和借鉴。

Handwritten signature in black ink, reading '吴中如' (Wu Zhuru).

2014 年 10 月 10 日

前言

20 世纪 40 年代开始,随着预应力混凝土技术的飞速发展和施工技术的不断提高,德国、意大利、日本、法国、奥地利、瑞士等国家纷纷开始使用预应力混凝土衬砌这种新型结构代替传统的钢板衬砌结构,大大降低了工程造价和施工难度。90 年代,我国清江隔河岩水电站和南盘江天生桥一级水电站的引水发电隧洞尝试采用了环锚预应力混凝土衬砌结构。

近年来,随着水利工程建设的不断发展,我国已成为世界上大型盾构隧洞工程数量最多、建设规模最大、施工技术难度最复杂、发展速度最快的国家。国内外调查研究表明,隧洞二次衬砌多修筑于水工隧洞,以承担较高内水压力作用。早期建设的绝大多数盾构隧洞均未做二次衬砌。日本较早应用双层衬砌的结构型式,如东京湾横断公路隧洞、城市市政输水管道等,迄今已有 20 年左右的历史。而在国内,鉴于部分已建单层装配式管片衬砌盾构隧洞所暴露出来的问题,也逐步开始尝试使用外衬管片加混凝土内衬的复合衬砌型式。但截至目前,该复合衬砌结构形式在国内隧洞建设中还较少采用,缺乏成熟的施工技术和工程经验。

南水北调中线穿黄工程的主要任务是安全有效地将调水从黄河南岸输送到黄河北岸,是南水北调中线工程中施工难度最高、规模最大的重要建筑物,也是整个中线工程的控制性工程和咽喉工程,同时也是地质条件最复杂、技术难度最大的单项工程,其规模及难度在国内外均无先例。南水北调中线穿黄盾构隧洞属于长距离深埋压力输水隧洞,所采用的盾构装配式管片外衬与环锚预应力钢筋混凝土内衬相结合的新型双层复合衬砌结构形式,在国内尚属首次应用,缺乏成熟的施工技术参考,亟须开展相关的科学研究。

本书结合南水北调中线穿黄隧洞工程的具体特点和施工难点,对超长深埋式压力输水隧洞预应力混凝土内衬施工关键技术进行了系统研究和总结。全书共分 10 章,包括概述、穿黄隧洞盾构施工技术、深埋式超长穿黄隧洞混凝土快速施工组织设计、穿黄隧洞混凝土施工配合比设计试验、衬砌钢模台车设计及施工技术、超薄预应力内衬混凝土施工技术、混凝土质量控制及缺陷检查、回填灌浆施工技术、预应力锚索张拉施工技术和穿黄隧洞内衬接缝压水试验等内容。

本书在中国水利水电第七工程局有限公司和西安理工大学水利水电学院合作研究基础上编著完成，其中第1章由张登柱、李发孝、杨杰编写，第2章由任杰、程琳、马婧编写，第3章由李发孝、成燕、王荣华编写，第4章由李发孝、王荣华、王吉成、吕建辉、武小龙编写，第5章由李发孝、王吉成、马婧、武小龙编写，第6章由杨杰、张登柱、李发孝、成燕编写，第7章和第8章由成燕、王荣华、杨杰编写，第9章由李发孝、杨杰、王荣华编写，第10章由成燕、王吉成、任杰、程琳编写，全书由西安理工大学杨杰统稿。

中国工程院院士吴中如教授为本书撰写提出了中肯建议并欣然作序；水电七局吴旭、赵海洋、倪坤林、邓鹏等领导对书稿内容提出了良好建议；在书稿编写、图文编辑过程中，水电七局李莺、胡诗魁、王波、翟俊勇、王立军、文小林等人及西安理工大学杨军超、成婷婷、郭强、李念、王璐、王椒、于崇祯、马春辉等研究生做了大量细致认真的工作。谨以致谢！

本书参阅了大量国内外文献，不能一一罗列，谨对所有作者致以诚挚谢意！

由于作者水平所限，错误与不当之处难免，恳请读者批评指正。

作者

2014年10月

目 录

序

前言

第1章 概述	1
1.1 调水工程概述	1
1.2 南水北调工程概述	4
1.3 中线穿黄工程概述	10
1.4 主要研究内容	13
第2章 穿黄隧洞盾构施工技术	15
2.1 盾构发展历史	15
2.2 常用盾构机	18
2.3 盾构施工技术	21
2.4 盾构施工技术难点	22
第3章 深埋式超长穿黄隧洞混凝土快速施工组织设计	25
3.1 深埋式超长穿黄隧洞施工方案研究	25
3.2 隧洞结构型式研究	27
3.3 施工方法选择	30
3.4 隧洞施工布置	31
3.5 混凝土快速施工组织设计	35
第4章 穿黄隧洞混凝土施工配合比设计试验	44
4.1 混凝土主要技术指标及要求	44
4.2 混凝土材料及混凝土配合比试验要求	44
4.3 混凝土配合比设计	47
第5章 衬砌钢模台车设计及施工技术	61
5.1 衬砌钢模台车结构介绍	61
5.2 衬砌钢模台车 3D 效果图及方案图	62
5.3 主要技术参数	64
5.4 钢模台车施工工艺及安装	64
5.5 台车受力分析	67
5.6 钢模台车施工技术	74

第 6 章 超薄预应力内衬混凝土施工技术	79
6.1 预应力内衬混凝土技术应用现状	79
6.2 隧洞预应力内衬设计	81
6.3 预应力内衬施工方案及技术难点	84
6.4 1:1 地面仿真模拟浇筑试验	85
6.5 隧洞预应力内衬底板施工技术	91
6.6 隧洞预应力内衬边顶拱施工技术	99
6.7 排水弹性垫层施工技术	108
6.8 总结	110
第 7 章 混凝土质量控制及缺陷检查	111
7.1 混凝土质量控制	111
7.2 混凝土缺陷检查及修复	116
第 8 章 回填灌浆施工技术	121
8.1 设计概况	121
8.2 施工布置	121
8.3 回填灌浆施工	122
8.4 资源配置	125
第 9 章 预应力锚索张拉施工技术	126
9.1 设计概况	126
9.2 环锚预应力张拉施工技术	127
9.3 环锚预应力张拉施工方法	131
9.4 环锚预应力张拉试验	136
9.5 不良锚索退锚	142
9.6 波纹管堵塞处理	143
9.7 环锚预应力张拉总结	144
第 10 章 穿黄隧洞内衬接缝压水试验	147
10.1 内衬接缝压水试验（地面试验）	147
10.2 穿黄隧洞内衬接缝压水试验	157
10.3 穿黄隧洞内衬接缝压水生产性试验	171
参考文献	179

第 1 章 概 述

1.1 调水工程概述

水是一切生命之源，也是人类社会与经济发展的基础。在人类赖以生存的地球上，虽然七成以上的表面积被水覆盖，总水量约为 14 亿 km^3 ，但是其中 97.47% 是咸水，只有 2.53% 是淡水。而且，将近 70% 的淡水冻结在南北极冰盖和高山冰川中，其余的大部分是土壤中的水分或是深层地下水，人类难以开采和利用。江河、湖泊、水库中的水及浅层地下水等水源虽易于为人类直接开采使用，但其数量不足地球总水量的 1%。

地球淡水资源不仅短缺，而且地区分布极不均衡。从全球径流的分布看，亚马逊河携带着全球 16% 的径流，而世界上占陆地面积 40% 的干旱与半干旱地区的径流仅占全球径流的 2%。按世界各国的淡水资源分布来说，地球上 65% 的淡水集中在 10 个国家，而占人口 40% 的 80 个国家却严重缺水，其中有 26 个国家将近 3 亿人口极度缺水。预计到 2025 年，全球将会有 30 亿人面临缺水，40 个国家和地区严重缺水。

就单一国家来讲，其水资源的分布也是极不均衡。我国水资源总量丰富，多年平均水资源总量为 28.12 亿 m^3 ，多年平均年径流量居世界第五位，但人均占有量仅为 2163 m^3 ，为世界人均占有量的 1/4，是全球 13 个贫水国之一。由于受大陆季风性气候的影响，我国水资源在季节上的分布极不均匀，连年干旱或连年洪涝也时有发生；在地域分布上，由于中国的地势为西高东低，水汽输送主要路径则由东向西，主要靠位于大陆东南部的太平洋输送水汽，长江、珠江、松花江水资源较丰富，多年平均年径流量达 13000 亿 m^3 以上，而黄河、淮河、海河、辽河的水资源则十分紧缺。地势与水汽输送路径共同作用，使中国水资源的分布为南多北少，而人们赖以生存的耕地分布却是南少北多。南方雨水多，北方雨水少，造成北方地区水资源十分短缺。水、土资源配合欠佳的状况，加剧了中国北方地区缺水的程度。

20 世纪以来，随着全球人口的急剧增长，工业、农业和城市化的不断发展，以及经济全球化进程的加快，人类对淡水的需求量与日俱增。虽然地球上仍然有大量水资源可以利用，但是淡水资源分布不均衡的状况，严重制约了区域经济的发展，特别缺水的某些地区甚至已陷入生存的困境。在这种形势下，修建调水工程，调出多水地区的水资源补充干旱和半干旱地区，就自然成为重新分配水资源、缓解缺水地区供需水矛盾、保证经济社会可持续发展的主要途径。

1.1.1 调水工程的分类

广义地讲，调水工程就是指为了补偿缺水（或引出多余的水）而更有效、更完全地利

用水资源，从任何一个水源（河流、水库、湖泊、海湾、河口）取水，并沿着河槽、渠道、隧洞或管道送给用户所修建的水利工程。而在两个或多个流域之间的水体转移被称之为“跨流域调水”，为此所兴建的一系列工程即为“跨流域调水工程”。

世界各国评价调水工程规模的标准不尽相同，由杨立信等编译的《国外调水工程》对此有比较系统的阐述。从调水工程技术的复杂性、工程造价以及对自然环境的影响程度来看，调水量和调水距离是径流调配工程最重要、最有意义的两个特征值。因此，评价调水工程的规模一般采用综合指标，就是年调水量 W 与调水距离 L 的乘积 WL 。调水工程的规模分类见表 1.1。

表 1.1 调水工程的规模分类

调水规模	调水量 W /(亿 m^3/a)	调水线路长度 L /km	调水规模的综合指标 WL /[(亿 m^3/a) $\cdot$ km]
小型（小规模）	<10	<100	<1000
中型（中等规模）	$10\sim25$	$100\sim400$	$1000\sim10000$
大型（大规模）	$25\sim50$	$400\sim1000$	$10000\sim50000$
特大型（特大规模）	$50\sim100$	$1000\sim2500$	$50000\sim250000$
巨型（巨型规模）	>100	>2500	>250000

1.1.2 大型长距离调水工程的特点

大型长距离调水工程，其特点是规模大、距离长，正是由于工程规模和调水距离超出一般的引水工程，使得大型长距离调水工程具有普通引水工程所不具备的特点。

(1) 工程类型多。对大型长距离调水工程，由于工程所经地域的地质条件复杂、地形千变万化，使得一项上规模的调水工程几乎囊括了所有已知的水利工程建筑类型，包括山区水库、平原水库、输水明渠、水电站、隧洞、渡槽、倒虹吸、拦河引水闸、泵站、输变电工程、防洪堤及桥涵闸等渠系建筑物，可以说是现代水利工程建筑的博物馆。

(2) 建设管理难度大。大型长距离调水工程一般跨流域、跨区域，是一个复杂的系统工程，除了主体工程建设面临很多技术难题以外，还涉及征地移民、生态与环境保护、众多地区部门职责和利益关系的调整，建设难度很大。

(3) 效益综合化。大型长距离调水工程的另一主要特点是其效益的综合化。通过水资源在更大区域的科学配置，综合发挥经济效益、社会效益和生态效益。

1.1.3 国内外调水工程

跨流域调水，是实现水资源在一个国家或一个特定区域内优化配置的重要手段，世界各国尤其是一些发达国家普遍采用了这一手段。根据资料，世界上 40 个国家建成了 350 余项不同规模的调水工程（不包括干渠长度在 20km 以下、年调水量在 1000 万 m^3 以下的