

南水北调工程建设技术丛书
NANSHUI BEIDIAO GONGCHENG JIANSHE JISHU CONGSHU



暗涵、倒虹吸工程

ANHAN/DAOHONGXI GONGCHENG

国务院南水北调工程建设委员会办公室建设管理司 编

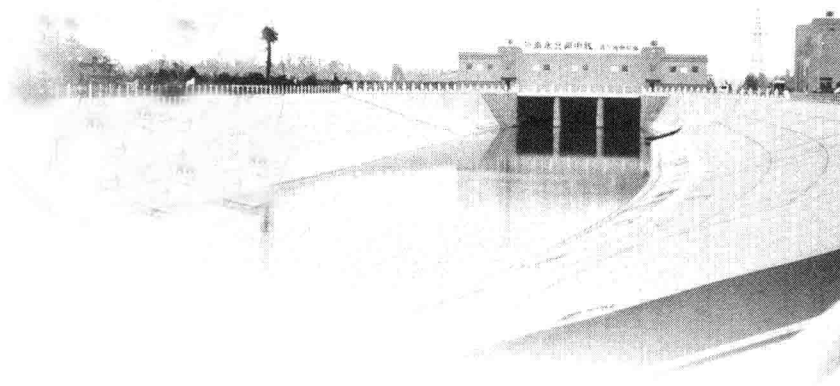


中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

南水北调工程建设技术丛书

暗涵、倒虹吸工程

国务院南水北调工程建设委员会办公室建设管理司 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

国务院南水北调工程建设委员会办公室建设管理司组织编撰的《南水北调工程建设技术丛书——暗涵、倒虹吸工程》分为试验研究、工程设计、施工技术、建设管理 4 个部分, 共计 54 篇文章。本书密切结合工程实际, 总结了南水北调暗涵、倒虹吸工程建设实践经验, 是南水北调工程科技创新成果总结的重要组成部分, 是我国水利事业发展宝贵经验的重要积累。内容主要包括南水北调暗涵、倒虹吸工程的主体和配套工程的规划设计、科学试验、水文地质与工程地质勘察、运行管理等方面。

本书可供从事水利水电工程技术的科研、管理机构, 设计、施工专业技术人员及相关高等院校师生参考使用。

图书在版编目 (C I P) 数据

暗涵、倒虹吸工程 / 国务院南水北调工程建设委员会办公室建设管理司编. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2014. 2

(南水北调工程建设技术丛书)

ISBN 978-7-5170-2014-1

I. ①暗… II. ①国… III. ①南水北调—涵洞工程②南水北调—倒虹吸管—水利工程 IV. ①TV672

中国版本图书馆CIP数据核字 (2014) 第096630号

书 名	南水北调工程建设技术丛书 暗涵、倒虹吸工程
作 者	国务院南水北调工程建设委员会办公室建设管理司 编
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	汇鑫腾达商贸公司
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 21.5 印张 510 千字
版 次	2014 年 2 月第 1 版 2014 年 2 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	65.00 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

《南水北调工程建设技术丛书》编委会

主 任：张 野

副 主 任：李鹏程

委 员：苏克敬 井书光 刘光明 张文波 宋 伟

张劲松 罗 辉 刘正才 聂世峰 曹为民

汤元昌 邓东升 马 黔 罗 刚

主 编：李鹏程

副 主 编：苏克敬 井书光

执行主编：马 黔 罗 刚 马 静

编辑人员：白咸勇 林永峰 张 晶 张俊胜 刘 芳

李素丽 王 斌 赵莉花 许 丹 李 森

序 言

南水北调工程是党中央、国务院决策兴建的旨在缓解我国北方水资源严重短缺、优化水资源配置、改善生态环境的重大战略性基础设施，是迄今为止世界上最大的调水工程。

南水北调工程是一项复杂的系统工程，是由多项目组成的庞大项目集群。工程涉及领域多，在设计、建设、运行等方面，面临诸多技术挑战，许多硬技术和软科学都是世界级的，是水利学科与多个边缘学科联合研究的前沿领域。面对诸多工程技术难题的严峻挑战，国务院南水北调工程建设委员会办公室高度重视科研和技术攻关工作，南水北调工程各项目法人以及参与研究、设计和建设的各有关单位积极参与，始终把科技工作放在突出位置，积极抓紧抓好。可以说，南水北调工程建设过程，就是伴随着一系列技术难题的不断攻克展开的。南水北调科技工作的开展，为推动工程又好又快建设提供了强有力的技术保障。

自工程开工以来，南水北调工程科技工作稳步推进。期间，南水北调工程各项目法人、设计、施工、建设管理等工程参建单位，以及相关科研院所、高等院校，先后开展了包括南水北调工程“十一五”国家科技支撑计划重大项目“南水北调工程若干关键技术研究与应用”在内的160多项科技项目的研究。其研究内容涉及水工结构、工程施工、水力学、管理、水工材料、水力机械、环境、水资源等诸多专业和领域。“十一五”期间，南水北调工程科技工作全面展开，取得了丰硕成果，为工程顺利建设奠定了技术基础。

在科技部等国家有关部门的大力支持下，在广大科研工作者的共同努力下，成功组织实施了“十一五”国家科技支撑计划重大项目“南水北调工程若干关键技术研究与应用”。该项目针对“大型渠道设计与施工新技术研究”“丹江口大坝加高工程关键技术研究”“大型贯流泵关键技术与泵站联合调度优化”“超大口径PCCP管道结构安全与质量控制研究”“膨胀土地段渠道破坏机理及处理技术研究”“大流量预应力渡槽设计和施工技术研究”等16个南水北调工程重大关键技术展开研究。经过几年来的共同努力，各课题承担单位均按照课题研究计划及任务书要求积极推动相关工作开展，实现了既定的研究目标。重点解决了工程建设急需解决的重大关键枢纽和典型工程建筑物的

结构、材料、施工技术 with 工艺、设备等难题，优化了设计，保证了工程建设质量、安全、进度，提高了工程建设的技术和管理水平；减少了工程投资，充分发挥了工程的综合效益，推动了相关科学的新进展，取得了一批科研成果，保证了工程建设高质量、高效率有序推进。

为加强南水北调工程技术交流，提高工程建设技术水平，为水利科技工作者进行广泛学术交流提供平台，为南水北调后续工程建设提供宝贵科技资料，建设管理司组织各有关方面分门别类开展了南水北调工程建设技术成果论文征集、评审工作，编辑出版《南水北调工程建设技术丛书》很有意义。该丛书从工程建设实际出发，充分结合南水北调工程作为项目集群特点，通过分类和集中，从工程科学研究、工程设计、工程施工、工程管理等多个方面和角度，对 PCCP 管道工程、泵站工程、渡槽工程、渠道工程、暗涵工程、枢纽工程、平原水库工程等，取得的一系列技术成果进行了经验总结和提炼，非常及时和必要。该丛书将为科研院校及设计、施工、管理等单位广大技术人员提供有益借鉴和参考。

本书内容难免有错误或不当之处，敬请读者指正。



国务院南水北调工程建设委员会
办公室党组成员、副主任
二〇一二年五月十五日

南水北调工程建设技术丛书——暗涵、倒虹吸工程

主 编：李鹏程

副 主 编：井书光

执行主编：罗 刚 张 晶 马 静

编辑人员：庞 敏 李永顺 马 黔 白咸勇 林永峰

张俊胜 刘 芳 温世亿 桑国庆 邵 勇

李素丽 王 斌 赵莉花 许 丹 李 森

暗涵、倒虹吸和隧洞工程综述

南水北调东线、中线一期工程纵跨长江、淮河、黄河、海河四大流域，东线一期工程调水干线全长 1467km，中线一期工程干线全长 1432km。工程沿途经过众多河渠、山峰、公路、铁路、城市及地质条件复杂地段，形成的建筑物种类多，结构型式复杂。其中，暗涵、倒虹吸和隧洞等地下工程是南水北调工程使用较多的建筑物型式。

南水北调东线、中线一期工程特点不同。东线一期工程利用京杭大运河及与其平行的河道逐级提水北送，并联通起调蓄作用的洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖，出东平湖后分两路输水，一路向北穿过黄河至鲁北，另一路向东经济南至烟台、威海，工程多平交。与东线一期工程不同，中线一期工程从加坝扩容后的丹江口水库陶岔渠首闸引水北送，沿线新开挖渠道，经唐白河流域西部过方城垭口，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，自流到北京、天津。中线一期工程全线立交，沿途修建倒虹吸、渡槽、隧洞、暗涵、左排、桥梁等各类建筑物多达 2556 座。

倒虹吸、暗涵和隧洞等地下工程，作为南水北调工程重要的建筑物结构型式，有其自身的优势。一是采用这种地下工程结构型式，立交穿越河渠和地质条件复杂地段，可有效避免输水过程中，调来的客水与当地水体之间的交换，确保输水水质；二是此类地下工程，在我国水利工程建设中普遍使用，建筑物结构稳定性好，设计和施工技术成熟，工程施工进度、质量和安全有保障；三是地下工程受外部环境影响小，运行维护效率高、成本低、风险小，利于管理；四是经过人口密集区的天津干渠和北京段工程，全线采用暗涵等地下工程方式输水，还可有效减少京津等经济发达地区永久占地，节约土地资源。基于此，在反复比选后，南水北调东线、中线一期工程共规划和建设了大型倒虹吸 167 座，暗涵 31 座，隧洞 11 座。

这些地下工程构造、原理并不复杂，设计和施工技术也相对成熟，但由于南水北调工程线路长，水头控制要求高，且工程穿越众多不同河流、地段，地质条件复杂、多样，地下水位变化大，建筑物具体结构型式、施工方法、工期和质量安全控制要求各不相同，需要有针对性地开展相关技术攻关，研究优化设计方案和施工方法。有的地下工程如中线穿黄隧洞工程，建筑物结构十分复杂，技术要求高，设计和施工难度大，部分关键技术远远超出目前国内同类工程技术水平，需要开展专门的科研攻关和技术研究。

中线穿黄河隧洞工程作为南水北调中线干线的关键性控制工程，穿越地质条件十分复杂的黄河典型游荡型河段，工程需要克服河床游动、砂土地震液化、隧洞渗漏、围土稳定、双层衬砌单独受力结构稳定、压力输水安全等一系列技术难题。工程采用泥水平衡盾构技术进行挖掘施工，在国内穿越大江大河水利工程中也属首例。穿黄工程最小埋深 23m，一次性盾构掘进达 3.45km，隧洞开挖直径达到 8.7m，这种大断面大埋深长距离盾构施工，技术要求高，风险大。“十一五”期间，国务院南水北调工程建设委员会办公室

组织有关单位联合开展科技攻关，成功组织实施了“复杂地质条件下穿黄隧洞工程关键技术研究”，克服诸多技术难题，取得了一批技术成果，进一步优化了设计、施工、进度和质量控制方案：通过穿黄隧洞衬砌 1:1 仿真模型试验，优化了锚索间距；提出盾构始发反力座方案，解决了超长无法布置常规反力架问题；研制了薄壁式矩环锚测力计，满足了隧洞长期安全监测需要；编制了《南水北调中线一期穿黄工程输水隧洞施工技术规范》等等。这些成果保障了穿黄工程的顺利建成。

另外，针对长距离输水暗涵穿越公路、铁路，倒虹吸深基坑强透水地基段方案设计及施工期降水、汛期导流，建筑物稳定和选型优化，软弱地基处理，水头损失控制，浅埋暗挖法施工工艺、工法，大体积混凝土浇筑质量控制等诸多技术难题，科研院校、设计、建设管理和施工等单位广大科技工作者，在科研、设计、施工和管理等不同环节，积极探索，大胆创新，提出许多好的措施和办法，成功解决了工程建设实际问题，积累了丰富的经验，保障了南水北调东线、中线一期工程的顺利建设。

本书结合南水北调东线、中线一期工程暗涵、倒虹吸和隧洞等地下工程建设实践，对该类工程在科学研究、工程设计、施工技术和建设管理等方面取得的主要经验和成绩进行了梳理总结，精选了部分典型成果进行了整理汇编。有些经验和成果可以为国内同类工程建设提供借鉴，为广大科研院校和设计等单位提供参考。由于水平有限，本书难免有不足之处，敬请批评指正。

目 录

序言

暗涵、倒虹吸和隧洞工程综述

试 验 研 究

1	穿黄盾构隧洞新型复合衬砌结构特性研究	钮新强等
10	多孔并联分段低压输水系统的水力特性和控制	练继建等
18	穿黄隧洞衬砌 1 : 1 仿真模型试验研究	钮新强等
30	穿黄隧洞地质条件及其对盾构掘进的影响	张延仓等
36	并联输水箱涵检修操作过程中的水力仿真及瞬变控制	穆祥鹏等
43	分段低压输水管系的水力振荡的动荷载分析	秦亮等
48	穿黄隧洞工程布置与结构型式研究	符志远等
58	复杂输水系统水力过渡的数值解法比较及适用性分析	穆祥鹏等
67	保水堰交替水流数值模拟研究	李琳等
72	基于外部分类法的倒虹吸 CAD 系统研制	杨保军等
77	基于水力控制的分段低压输水系统优化研究	穆祥鹏等
85	长距离输水箱涵穿越公路施工技术研究	贾志营等
93	复合模型在串流河道水工模型试验研究中的应用	董振锋等
100	南水北调中线工程倒虹吸斜管段抗滑稳定计算分析	刘国龙等
104	深基坑强透水地基管井降水方案分析研究	王伟等
110	南水北调中线工程倒虹吸闸室稳定计算分析	刘国龙等
116	南水北调总干渠下穿五棵松地铁车站工程深孔注浆试验及成果分析	刘春阳

工 程 设 计

120	穿黄隧洞大型超深竖井结构加固与防水设计	谢向荣等
134	穿黄工程盾构隧洞拼装式管片设计	张传健等
141	穿黄隧洞北岸竖井新型反力座结构设计	符志远等

150	南水北调工程南沙河强透水地基渠段设计方案探讨	杨锋等
154	南水北调中线沧河倒虹吸长度与行洪口门优化设计	冯光伟
159	东线穿黄河工程滩地埋管设计分析与施工研究	傅题善等
166	结合河流特性分析南水北调倒虹吸行洪口门	冯光伟等
173	南水北调中线工程山门河隧洞支护及进洞设计	宋文瑞等
177	南水北调中线工程午峪河河道倒虹吸设计	刘香君等
180	南水北调中线工程新密铁路渠道倒虹吸总体布置分析	苏卫涛等
183	南水北调石良河渠道倒虹吸轴线与行洪口门优化设计	杨长庚等
187	浅谈南水北调中线工程左岸排水倒虹吸建筑物渗控设计	龔宛等
190	古运河暗渠穿石太高速浅埋暗挖洞型结构设计	梁信宝等
195	梨形导流堤在南水北调中线倒虹吸工程中的应用	王海峰等
199	关于南水北调中线一期工程供电设施的永临结合方案探讨	张向东
203	南水北调七里庄沟渠道倒虹吸建筑物选型和优化	魏艳秀等
206	孟良河倒虹吸预应力混凝土箱型涵结构设计	赵文利
210	南水北调中线工程南沙河倒虹吸优化设计	刘树玉等
214	关于长距离倒虹吸设计及后期运用检修探讨	宁金钢等

施 工 技 术

219	复杂地质条件下穿黄隧洞工程关键技术综述	钮新强等
228	超前注浆加固技术在南水北调西四环暗涵工程中的应用	房彦梅等
233	穿黄隧洞工程泥水盾构掘进施工技术	仲生星等
243	大坍落度混凝土在南水北调西四环暗涵工程中的应用	房彦梅等
247	南水北调中线穿黄工程超深竖井施工技术	李荣智等
255	南水北调西四环暗涵工程下穿五棵松地铁车站扩大段、 注浆横通道施工技术	赵旭
260	浅埋暗挖法施工双线超净距水工隧道下穿城市立交桥的综合技术研究	王振飞
264	南水北调永定河倒虹吸管涵裂缝控制及处理方法	刘继利等
270	南干渠工程隧洞二次衬砌混凝土浇筑质量的控制研究	张大成等
276	南水北调中线一期工程淇河渠道倒虹基础地下溶蚀坑处理措施研究	朱智伟
279	强夯法在南水北调中的设计与应用	张明恩等
283	铁路交叉暗涵顶进施工及安全控制措施	宋明耀等
291	混凝土建筑物预防渗漏分析	李培旺等

建 设 管 理

296	南水北调西四环暗涵工程施工过程中的建设管理	仇文顺等
301	暗涵（倒虹吸）施工中橡胶止水带施工安装质量控制措施浅析	郑涛等
305	南水北调总干渠河渠交叉河道倒虹吸汛期施工措施	宋明耀等
311	天津干线箱涵工程现场质量控制与管理	王秀贞等
314	天津干线箱涵穿越京九铁路施工组织	周峰
320	附录 南水北调东线、中线暗涵、倒虹吸和隧道工程统计表	

试验研究

穿黄盾构隧洞新型复合衬砌结构特性研究

钮新强, 符志远, 张传健

(长江水利委员会 长江勘测规划设计研究院, 武汉 430010)

摘要: 为防止穿黄盾构隧洞在运行期间内高压水从外衬管片接缝和内衬变形缝外渗, 从而诱发洞外围土渗透破坏, 确保隧洞能安全稳定运行。采用三维有限元分析和 1:1 仿真物理模型试验的方法, 对穿黄隧洞复合衬砌结构的特性进行了试验研究, 探讨了结构型式、破坏机理和风险预防措施以及有关工程应用的具体问题; 研究了盾构隧洞复合衬砌 3 种结构形式的 7 个具体方案。提出了预应力盾构隧洞结构型式, 研发了拼装式管片环与预应力结构相结合的新型复合衬砌型式。这种创新结构设计型式在盾构隧洞工程中尚属首例, 可为同类工程参考。

关键词: 穿黄盾构隧洞; 预应力复合衬砌; 结构特性; 破坏机理; 风险防范

1 工作概况

穿黄工程是南水北调中线总干渠规模最大的交叉建筑物, 深受专家们关注。在穿越黄河的建筑物型式审定前, 对跨河渡槽方案和盾构隧洞方案均做了大量的研究工作, 在审定为盾构隧洞方案后, 近期又做了进一步的研究; 在列为国家“十一五”科技支撑计划《复杂地质条件下穿黄隧洞关键技术》课题(以下简称《穿黄课题》)后, 又结合工程建设条件, 补充了研究工作, 并开展了穿黄隧洞衬砌 1:1 仿真模型试验研究。

1.1 近期研究工作

对 2002 年后的研究工作作了进一步补充和深化, 主要包括以下内容:

(1) 《南水北调中线穿黄渡槽和隧洞结构静动力分析研究与抗震安全评估》——中国水利水电科学研究院(2002 年 4 月)。

(2) 《南水北调中线穿黄工程隧洞结构内外衬间设软夹层方案抗震分析报告》——长江水利委员会长江科学院(2003 年 4 月)。

(3) 《穿黄隧洞盾构施工技术专题研究报告》——长江水利委员会长江勘测规划设计

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目“复杂地质条件下穿黄隧洞工程关键技术研究”(2006BAB04A11)。

第一作者简介: 钮新强(1962—), 男, 浙江湖州人, 教授级高级工程师, 全国勘察设计大师, 主要从事水利水电工程设计与科研工作。



研究院(2002年6月)。

(4)《穿黄隧洞纵向变形三维非线性有限元计算分析》——长江水利委员会长江科学院(2004年6月)。

(5)穿黄隧洞结构分析研究报告——长江水利委员会长江勘测规划设计研究院(2004年6月)。

(6)穿黄隧洞管片接缝止水试验——长江水利委员会长江勘测规划设计研究院(2007年9月)。

1.2 《穿黄课题》研究工作

由南水北调工程技术委员会办公室组织的南水北调工程若干关键技术研究与应用项目,是“十一五”国家科技支撑计划重大项目之一,该项目包含了“穿黄课题”,而隧洞复合衬砌结构特性研究则是“穿黄课题”的一个子题。重点是依托穿黄隧洞工程,对穿黄隧洞复合衬砌结构特性展开研究,探讨其结构型式、破坏机理和风险预防,以及有关工程应用的具体问题。以下是与本子题有关的重要研究成果。

(1)穿黄隧洞衬砌1:1仿真试验地下模型试验研究报告——长江水利委员会长江勘测规划设计研究院(2010年8月)。报告中地下模型仿照实际工程大小设置,洞顶以上埋深30余m,其中分设双层衬砌有垫层试验段和无垫层有插筋试验段。试验在洞外水土条件仿真、洞内通过高位水箱充水,形成定水头加压的条件下进行。所取得的大量试验结果表明,双衬有垫层方案和无垫层有插筋方案,技术上均属可行。2010年9月,南水北调中线干线工程建设管理局(以下简称中线建管局)组织专家审查了试验研究报告,确认完成了各项试验内容,达到了预期目标,并认为试验目的明确,设计合理,过程控制严谨,分析计算方法科学且针对性强,所获数据资料翔实,成果可靠,说服力强,可作为设计和施工方案优化的基础。

(2)穿黄工程穿黄隧洞衬砌设计变更报告——长江水利委员会长江勘测规划设计研究院(2010年10月)。进入内衬施工阶段,在实施隧洞双层衬砌有垫层方案时,垫层铺设若未能达到设计要求,将影响工程质量和工程进度,建设单位要求设计单位对双层衬砌取消垫层方案进行研究。基于穿黄隧洞衬砌1:1仿真试验成果,研究表明:双层衬砌有垫层方案是一个着眼于工程安全、技术可靠的方案;同时也表明无垫层方案,通过在内、外衬间加设插筋,同时配置相应的防排水措施,技术上也是可行的。

(3)穿黄隧洞预应力衬砌结构联合受力三维非线性有限元分析——长江水利委员会长江科学院(2010年11月)。采用考虑接触问题的三维非线性有限元法,对联合承载方案的衬砌结构,据实模拟外围水土压力、内水压力、预应力荷载,并对内水外渗全水头作用在内外衬界面的极端情况进行模拟计算,展示了隧洞衬砌结构受力状态,验证了设计变更报告提出的穿黄隧洞双层复合衬砌无垫层方案的技术可行性。

(4)南水北调中线一期穿黄工程穿黄隧洞衬砌结构选型与设计计算研究——同济大学隧道及地下工程研究所上海同济科技开发有限公司(2010年12月)。

2 复合衬砌结构特性研究要点

2.1 复合衬砌结构的提出

穿黄隧洞地处黄河典型游荡性河段,位于地震区,地质条件复杂,经论证认为,不宜



采用深埋隧洞穿越黄河,并推荐采用盾构隧洞方案。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、土荷载外,还需承受大于 0.5MPa 的内水压力,由盾构施工过程形成的衬砌为拼装式结构,目前尚无大型压力水工隧洞应用实例;为此需要在拼装式结构内再修建一层衬砌,用以承受内水压力,并满足过流对平整度的要求,因而提出双层复合衬砌结构型式。

2.2 复合衬砌结构研究要点

对于穿黄隧洞双层复合衬砌结构,从应用角度,研究要点可归纳如下。

(1) 外衬作为拼装式结构,通常采用普通钢筋混凝土结构,在此前提下,内衬结构宜取何种合适的结构型式。

(2) 内衬与外衬的接触关系及其工作原理。

(3) 复合衬砌的破坏机理。

(4) 风险预防。

(5) 结构型式优化。

3 复合衬砌结构型式

对于穿黄隧洞复合衬砌的内衬结构,研究过 3 种结构型式。

3.1 第 1 种结构型式

此种结构型式外衬与内衬均为普通钢筋混凝土结构,其中分为两个方案。

(1) 方案 1。外衬管片厚度为 40cm,内衬厚度为 45cm,内衬施工前外衬单独承载,在地层和外衬变形基本稳定后进行内层衬砌施工,运行期内、外衬联合受力范围由内、外衬叠合面拉应力和剪应力条件决定。

(2) 方案 2。以外衬为主受力结构,其中外衬管片厚度为 60cm,内衬厚度为 20cm,由于内衬厚度很薄,主要起修正盾构施工“蛇行”和运行减糙,以及提高外衬管片耐久性、防水性等作用。内衬施工前由外衬单独承载,内衬形成后,与外衬联合受力,其联合受力范围由叠合面拉应力和剪应力条件决定。

3.2 第 2 种结构型式

此种结构型式的外衬为钢筋混凝土管片,内衬为预应力混凝土结构。根据内衬与外衬分界面的接触关系,分别对以下 3 个方案进行研究,方案编号顺接为方案 3~方案 5。

(1) 方案 3。内衬与外衬由防、排水垫层分隔,按此建立计算模型。外衬自重和隧洞外部水土荷载由外衬单独承载;内衬形成后,内衬自重、预应力和运行期内水压力主要由内衬承担。拟定的管片厚度为 40cm,内衬厚度为 45cm,软垫层厚 10mm,内衬预应力采用 HM 锚具,由后张集束钢绞线(简称锚索)提供,单束锚索由 12 根 $\varphi_15.2$ (1860 级)的钢绞线集束而成,锚索间距原定为 40cm,基于穿黄隧洞衬砌 1:1 仿真模型试验研究成果,经设计优化,调整为 45cm。

(2) 方案 4。外衬和内衬结构布置与方案 3 相同,不同的是内、外衬界面不再设置垫层,而于外衬手孔设置插筋与内衬相连;内衬混凝土直接浇筑在外衬表面,对于因现浇混凝土收缩,在分界面可能形成的缝隙,待预应力张拉后采用灌浆处理。该方案内衬施工前,外衬单独承载,其后内、外衬共同工作。

(3) 方案 5。外衬和内衬结构布置与方案 3 相同,不同的是,内、外衬界面不再设置垫层,而于外衬手孔设置插筋与内衬相连;内衬混凝土直接浇筑在外衬表面,对于因现浇混凝土收缩,在分界面可能形成的缝隙,不作接缝灌浆处理,留作排水通道,并设置排水带收集渗水,再排入车道平台下方的排水管。该方案内衬施工前,外衬单独承载,其后内、外衬共同工作。

(4) 双层复合衬砌结构布置。方案 3、方案 4、方案 5 外衬与内衬结构相同,其布置说明如下:

1) 外衬管片环。内径为 7.9m,外径为 8.70m,衬厚 40cm,由 7 块预制钢筋混凝土管片拼装组成,管片环单环宽 1.6m,混凝土强度等级为 C50,抗渗等级为 W12。

2) 内衬。内径为 7.0m,外径为 7.90m,衬厚 45cm,为后张法环锚预应力钢筋混凝土结构,标准分段长 9.6m,混凝土强度等级为 C40,抗渗等级为 W12,要求内壁糙率系数 $n \leq 0.0135$ 。预应力通过张拉锚索提供,单束锚索由 12 根 $\phi 15.2$ 的钢绞线集束而成,锚索间距为 45cm,为锚索张拉提供空间的预留槽分高、低、左、右 4 列布置。

3.3 第 3 种结构型式

此种结构型式外衬为钢筋混凝土管片环,内衬为钢板结构。在子题 1 中曾研究过如下两类方案。

第 1 类为钢板钢筋混凝土方案,钢板在内圈,钢板与外衬之间充填混凝土,并在混凝土内布置适量的钢筋。

第 2 类为明钢管方案,钢管与外衬分离,钢管支承在支墩或连续管座上,并将其结构自重和其上荷载传递到外衬管片环上。根据此类方案的布置特点,称为外衬内置明钢管方案或简称为明钢管方案。图 1 为外衬内置明钢管方案断面图。

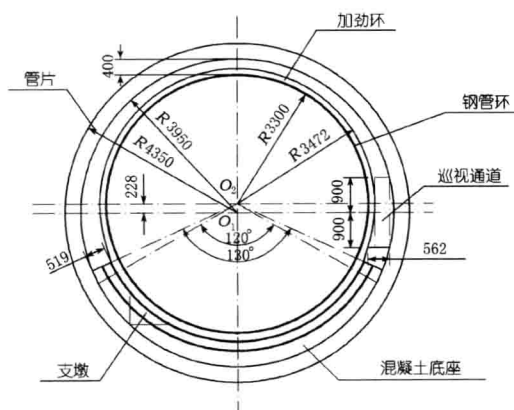


图 1 外衬内置明钢管方案断面 (单位: mm)

在内衬为钢板结构的两类方案中,第 2 类明钢管方案工程量较小,并能适应黄河冲淤变化引起的纵向变形,选为代表与预应力复合衬砌结构比较。因长隧洞焊接施工条件恶劣,钢管就位与混凝土施工困难,巡视通道宽仅 56.2cm,防腐工作量大,运行管理条件差,且不能按预定工期完工,投资较大等原因而放弃。



4 复合衬砌结构分析

4.1 分析原则

(1) 隧洞结构安全等级按 1 级建筑物考虑。

(2) 限制外衬结构变形和接缝张开量,以满足正常使用与防水要求,其控制指标为:衬砌圆环直径变形不大于 $6\%_0 D$ (D 为隧洞直径),管片接缝张开不大于 6mm。

(3) 对于普通钢筋混凝土结构,应满足承载要求和限裂要求;对于预应力钢筋混凝土结构,要求在基本荷载组合下,满足全截面受压要求;在特殊荷载组合下,允许出现拉应力,但应满足抗裂要求。

4.2 分期荷载组合

根据穿黄隧洞的施工过程及运行条件,采用分期应力计算,除对隧洞结构按各施工及运行阶段作有限元模拟外,还视不同方案将荷载分为两期(内衬为钢筋混凝土结构)或三期(内衬为预应力钢筋混凝土结构)加载,详见表 1。

表 1 隧洞分期荷载组合

工作阶段	自重	螺栓预紧力	土压力	预应力	外水压	内水压	界面水压	温度及混凝土收缩	荷载组合	
									工况	组合类别
第 1 期	√	√	√		√				施工	特殊
第 2 期	√	√	√	√	√				施工	特殊
第 3 期 1	√	√	√	√	√	√			运行	基本
第 3 期 2	√	√	√	√	√	√		√	运行	特殊
第 3 期 3	√	√	√	√	√	√	√		运行	特殊

注 1. 方案 1 和方案 2 工况只有第 1 期、第 3 期 1 和第 3 期 2,属于分两期加载。

2. 界面水压指外衬与内衬界面中作用有全水头内水压力。

4.3 分析方法

结构计算分别采用三维非线性有限元和空间杆系有限元法进行,要点如下:

(1) 对于外衬拼装式管片接头采用接头分析模型,接头衬垫采用弹簧模拟,只承压,不抗拉,螺栓预紧力以温度荷载模拟。

(2) 对于联合受力方案,先按联合受力计算,再按内、外衬分界面拉应力和剪应力条件复核,修正联合受力范围。

(3) 为充分反映地层与结构之间的相互作用,地层约束以弹性链杆模拟,按只承压,不抗拉的原则,根据计算情况确定约束范围。

4.4 结构分析

考虑到工程习惯,以下主要按平面杆系有限元法计算成果进行结构分析。

(1) 方案 1、方案 2、方案 3。在各种工况下,3 个方案的外衬均可满足承载和抗裂要求,且钢筋配置合理。对于内衬,方案 1 和方案 2 配筋受第 3 期 2 工况控制,为满足限裂要求,方案 1 内衬钢筋含量高达 $207\text{kg}/\text{m}^3$,方案 2 更高达 $272\text{kg}/\text{m}^3$ 。相应钢筋配置密度很大,浇筑施工困难,将影响混凝土的质量,对结构长期正常使用不利。方案 3 通过对内