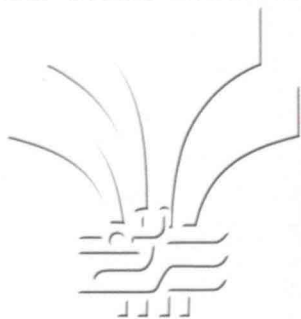


# 南水北调工程建设技术丛书

NANSHUI BEIDIAO GONGCHENG JIANSHE JISHU CONGSHU



## 预应力钢筒混凝土管 (PCCP) 工程

YUYINGLI GANGTONG HUNNINGTUGUAN  
(PCCP) GONGCHENG

国务院南水北调工程建设委员会办公室建设管理司 编

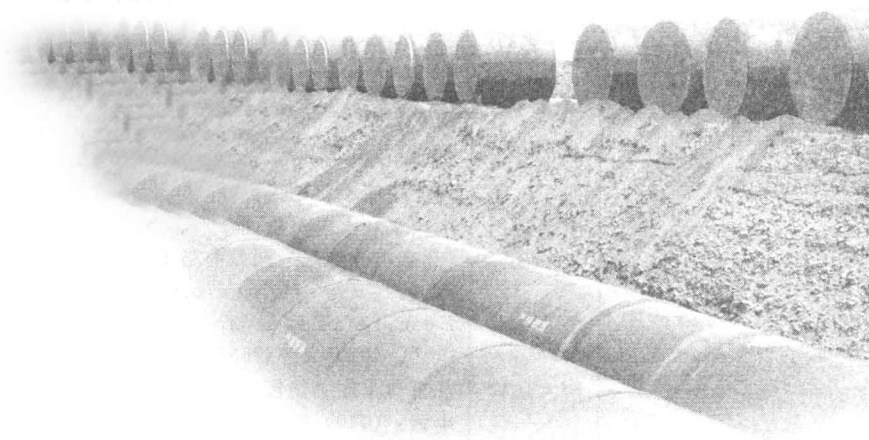


中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

南水北调工程建设技术丛书

# 预应力钢管混凝土管 (PCCP) 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——预应力钢筒混凝土管(PCCP)工程》分为科学研究、工程设计、施工技术和建设管理4个篇章,共计54篇论文。本书密切结合工程实际,总结了南水北调PCCP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PCCP工程的施工设计、生产制造、安装方法、施工检测及质量管理,具体反映了南水北调工程超大口径PCCP从设计生产、安装使用到运行实践中的详细内容。

本书可供从事水利水电工程技术的科研、设计、施工人员及相关大专院校师生参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

预应力钢筒混凝土管(PCCP)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, 2012. 6  
(南水北调工程建设技术丛书)  
ISBN 978-7-5084-9923-9

I. ①预… II. ①国… III. ①南水北调—水利工程—  
预应力混凝土管—钢筋混凝土管—研究 IV. ①TV546

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第138039号

封面: 预应力钢筒混凝土管/北京市南水北调工程建设管理中心提供

|      |                                                                                                                                                                                                                   |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 南水北调工程建设技术丛书<br><b>预应力钢筒混凝土管(PCCP)工程</b>                                                                                                                                                                          |
| 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<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 68367658 (发行部) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>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  | 北京市北中印刷厂                                                                                                                                                                                                          |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 22印张 522千字                                                                                                                                                                                       |
| 版 次  | 2012年6月第1版 2012年6月第1次印刷                                                                                                                                                                                           |
| 印 数  | 001—800册                                                                                                                                                                                                          |
| 定 价  | <b>68.00元</b>                                                                                                                                                                                                     |

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：王松春 苏克敬 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 井书光 马 黔

主 编：李鹏程

副 主 编：王松春 苏克敬

执行主编：井书光 马 黔 马 静

编辑人员：白咸勇 罗 刚 林永峰 张 晶 张俊胜

刘 芳 李素丽 王 斌 许 丹 赵莉花

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。

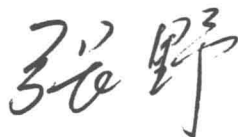
自工程开工以来，南水北调工程科技工作稳步推进。期间，南水北调工程各项目法人、设计、施工、建设管理等工程参建单位，以及相关科研院所、高等院校，先后开展了包括南水北调工程“十一五”国家科技支撑计划重大项目“南水北调工程若干关键技术研究与应用”在内的160多项科技项目的研究。其研究内容涉及水工结构、工程施工、水力学、管理、水工材料、水力机械、环境、水资源等诸多专业和领域。“十一五”期间，南水北调工程科技工作全面展开，取得了丰硕成果，为工程顺利建设奠定了技术基础。

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、施工技术与工艺、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、施工技术、建设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。

本书在编辑过程中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——  
预应力钢筒混凝土管(PCCP)工程

主 编：李鹏程

副 主 编：王松春 苏克敬

执行主编：井书光 马 黔 马 静

编辑人员：康德勇 白咸勇 罗 刚 林永峰 张 晶

张俊胜 刘 芳 桑国庆 丁 凯 马翔宇

邵 勇 项 娜 李素丽 王 斌 许 丹

赵莉花 李 森

# 预应力钢筒混凝土管 (PCCP)工程综述

京石段应急供水工程是南水北调中线一期工程率先实施的项目，除近期担负向北京应急供水的任务外，还担负中线一期工程全线贯通后的输水任务。工程起点位于河北省石家庄市古运河，终点位于北京市颐和园团城湖。2003年12月31日正式开工建设，2008年5月20日建成通过应急通水验收，并于当年9月18日开始实施向北京应急供水。京石段应急供水工程的率先建成通水，极大地缓解了首都北京高峰期的供水压力，保障了北京的供水安全。该段工程的率先建成，使南水北调中线一期工程提前发挥了经济效益和社会效益，也为南水北调中线其他工程建设积累了丰富的经验。其中，PCCP管道工程的建设，开创了我国同类工程建设的新局面，推动了相关产业的发展。

PCCP（预应力钢筒混凝土管）管道工程位于北京境内，是京石段应急供水工程的重要组成部分，是京石段工程建设中的关键性工程之一。该段工程全长55.474km，在国内首次创造性地采用双排直径为4m，单根长度5m、自重70多t的超大口径PCCP管道。按照京石段应急供水工程2008年通水目标要求，该段工程建设时间紧任务重、技术含量高、施工难度大、质量控制标准高。由于我国PCCP技术的起步较晚，研究也不深，工程用PCCP管设计和生产基本采用美国标准，这些标准是基于美国国内的原材料质量水平、试验方法、设计理念、生产水平等所制定的，与我国国情与现状条件不完全相符。南水北调工程在我国首次采用了直径4m的超大口径PCCP，在国内尚属首创，对管道结构安全、防腐蚀、水力特性等技术问题提出了新的更高要求，管道制造、运输、安装等建设环节的诸多技术问题都需要及时研究解决。有些技术问题在国内同行业中首次遇到，需要结合工程建设实际开展技术攻关。

为此，国务院南水北调办自工程建设之初，就及时组织项目法人和有关科研院所，如南水北调中线干线工程建设管理局、北京市水利规划设计研究院、南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院、清华大学、北京韩建河山管业有限公司等单位，在国内以往研究成果的基础上，结合南水北调工程建设实际需要，联合开展了相关难点问题关键技术攻关，特别是针对超大口径PCCP管道结构安全、安装工艺及质量控制标准进行系统研究。

“十一五”期间，“超大口径PCCP管道结构安全与质量控制研究”正式列入国家科技支撑计划“南水北调工程若干关键技术研究与应用”项目重要课题研究，取得丰硕成果。



解决了超大口径 PCCP 结构安全与质量控制的关键技术问题。首次提出了 PCCP 考虑预应力钢丝缠丝过程和刚度贡献的数值缠丝模型，提出了预应力钢丝失锚长度的概念和计算公式，建立了 PCCP 预应力损失模拟分析的断丝模型；提出了可模拟 PCCP 承载能力全过程的数值分析方法，能准确评价出裂缝扩展、断丝根数对 PCCP 承载能力的影响程度；研发了预应力钢筒混凝土管设计和仿真分析软件；在我国首次进行了 4m 超大口径 PCCP 制造工艺试验、管道结构原型试验、现场运输安装试验、管道防腐试验等；首次提出了 PCCP 管道糙率测算的新方法，克服了超大口径 PCCP 管道无法利用水力实验直接获取糙率系数的困难；首次提出了新建 PCCP 工程阴极保护的保护电位和电流密度的范围以及保护电位分布的数值计算方法。

经过广大科研工作者和全体工程建设者的共同努力，PCCP 管道工程及时攻克了一系列技术难题，如期完建，为京石段顺利实现通水目标创造了条件。在科学研究和工程建设实践中，参与 PCCP 管道工程建设的科研、设计、建设管理、施工、监理、质量监督、安全监测等单位的广大技术人员付出了艰苦的努力，贡献了自己的聪明才智，在科学研究、工程设计、施工、建设管理、质量控制等方面，探索和积累了大量丰富的经验，为我国 PCCP 管道工程设计和建设提供了有益借鉴和参考，极大地推动了我国 PCCP 管道工程相关产业的发展。

本书重点从科学研究、工程设计、施工技术、建设管理等四个方面，汇总相关技术成果，供参考。

# 目 录

## 序言

## 预应力钢筒混凝土管(PCCP)工程综述

## 科 学 研 究

|    |                                         |      |
|----|-----------------------------------------|------|
| 1  | 超大口径 PCCP 管道结构安全与质量控制研究 .....           | 王东黎等 |
| 12 | PCCP 外壁防腐涂层涂装工艺技术研究 .....               | 张大成等 |
| 18 | 南水北调大口径 PCCP 管道漏水风险分析 .....             | 姚宣德等 |
| 25 | 南水北调中线 PCCP 管道的摩阻损失计算分析 .....           | 刘进等  |
| 32 | PCCP 输水阻力测试及防腐减阻关键技术研究 .....            | 李东丽等 |
| 40 | 南水北调中线工程 PCCP 管及暗涵输水系统空气阀型式研究 .....     | 戚兰英等 |
| 48 | 南水北调工程北京段 PCCP 管道施工对马刨泉影响的地质分析与研究 ..... | 武登云等 |
| 55 | PCCP 管芯混凝土碱含量控制和骨料碱活性抑制措施研究 .....       | 丁凯   |
| 60 | 南水北调中线工程 PCCP 阴极保护测试探头研究 .....          | 王东黎等 |
| 66 | 直径 4000mm PCCP 接头密封试验研究 .....           | 宁靖华等 |
| 71 | 长距离、大口径 PCCP 管道水压试验方法改进研究 .....         | 杨进新等 |
| 77 | PCCP 型式试验方法在南水北调工程中的应用 .....            | 李珍等  |

## 工 程 设 计

|     |                                |      |
|-----|--------------------------------|------|
| 82  | 南水北调工程 PCCP 设计关键技术研究 .....     | 王东黎等 |
| 93  | 预应力钢筒混凝土管阴极保护 .....            | 胡士信等 |
| 101 | 南水北调中线 PCCP 管道工程阴极保护方案研究 ..... | 郭永峰等 |
| 110 | 南水北调工程 PCCP 竖向土压力计算分析 .....    | 刘进等  |
| 119 | 南水北调工程北京段 PCCP 管线止推体系分析 .....  | 王东黎  |
| 129 | 南水北调中线 PCCP 管道工程安全监测方案研究 ..... | 杨进新等 |
| 140 | 西甘池隧洞洞穿 PCCP 管设计思路探讨 .....     | 冯雁等  |

|     |                                   |      |
|-----|-----------------------------------|------|
| 148 | 南水北调中线北京段超大口径 PCCP 管道吊装方案分析 ..... | 刘烨华等 |
| 153 | PCCP 保护层设计探讨 .....                | 李向东  |
| 158 | PCCP 管道外防腐设计及龟裂问题分析处理 .....       | 李万智等 |
| 164 | 防腐技术在南水北调 PCCP 工程中的应用 .....       | 李向东  |
| 170 | 特大型 PCCP 管道安装方式比选研究 .....         | 龚成波  |

施 工 技 术

|     |                                       |      |
|-----|---------------------------------------|------|
| 173 | PCCP 高强混凝土的配制及碱含量控制技术研究 .....         | 纪国晋等 |
| 179 | 南水北调特大型 PCCP 安装的质量控制探讨 .....          | 王万鹏等 |
| 184 | PCCP 阴极保护技术在天津南水北调工程中的应用 .....        | 罗莎等  |
| 189 | 大口径 PCCP 管生产工艺流程与厂区布置 .....           | 程翠林等 |
| 197 | 南水北调中线北京段 PCCP 管制造质量控制研究 .....        | 王万鹏等 |
| 203 | 浅谈预应力钢筒混凝土管 (PCCP) 的冬季生产 .....        | 张静等  |
| 210 | 直径 4m PCCP 管道的修补方法 .....              | 张静等  |
| 216 | 直径 4m PCCP 管芯生产过程中气孔产生原因分析及解决办法 ..... | 李珍等  |
| 220 | 南水北调北京段工程隧洞大口径 PCCP 安装技术 .....        | 薛文政等 |
| 228 | PCCP 管道的安装技术 .....                    | 袁建旺等 |
| 233 | 大口径 PCCP 对接安装方法研究 .....               | 南彦波  |
| 237 | 液压张力装置在 4m 直径 PCCP 管道安装中的应用 .....     | 马建伟等 |
| 241 | PCCP 管洞穿混凝土施工方法 .....                 | 吕艺生  |
| 246 | 牺牲阳极法施工及检测技术在 PCCP 管道工程的应用 .....      | 郭永峰等 |
| 251 | 南水北调隧洞衬砌采用 PCCP 管做模板的施工技术 .....       | 程翠林等 |
| 259 | PCCP 管芯外壁纵裂的有效控制及管道应用分析 .....         | 朱茂宏等 |
| 267 | 隧洞 PCCP 管做内模的衬砌施工工艺 .....             | 罗跃文等 |
| 275 | 浅谈阴极保护技术在 PCCP 施工中的应用 .....           | 任怀毅等 |
| 282 | 南水北调中线京石段应急供水工程 (北京段) PCCP 管体防腐 ..... | 郑连涛等 |
| 285 | PCCP 管道工程冬季施工技术 .....                 | 张辉   |
| 291 | 大型 PCCP 管道静水压试验施工技术 .....             | 张辉等  |
| 298 | 洞穿管后自密实混凝土质量控制 .....                  | 冉光俊等 |
| 302 | 南水北调工程 PCCP 管道穿燕化铁路的安装 .....          | 白露露  |
| 306 | 坐标转换在 PCCP 管道工程中的应用 .....             | 刘杰   |
| 311 | 南水北调中线工程 PCCP 管道施工控制网的建立 .....        | 陈海兵等 |

## 建 设 管 理

|     |                                 |      |
|-----|---------------------------------|------|
| 315 | 南水北调中线北京段 PCCP 管道工程进度管理实践 ..... | 郭晓娜等 |
| 319 | PCCP 工程的质量监督管理模式探讨与实践 .....     | 付新生等 |
| 323 | PCCP 管道工程进度控制 .....             | 魏臣学等 |
| 330 | 南水北调 PCCP 工程质量监督常见问题及处理措施 ..... | 何占峰等 |
| 334 | 浅谈预应力钢筒混凝土管原材料质量控制 .....        | 蔡建平  |

## 超大口径 PCCP 管道结构安全与质量控制研究

王东黎<sup>1</sup>, 郑征宇<sup>2</sup>, 胡少伟<sup>3</sup>, 李庆斌<sup>4</sup>, 窦铁生<sup>5</sup>, 刘江宁<sup>6</sup>

(1. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048;

2. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038;

3. 南京水利科学研究院, 南京 210024; 4. 清华大学, 北京 100084;

5. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 6. 北京河山管业有限公司, 北京 102423)

**摘要:** 简要介绍了国家“十一五”科技支撑计划项目“南水北调中线工程关键技术研究与应用”课题之一“超大口径 PCCP 管道结构安全与研究”课题研究成果, 包括 PCCP 结构安全性关键技术、超大口径 PCCP 制造关键技术及质量控制标准、安装关键技术及质量控制标准、PCCP 阴极保护成套技术、PCCP 管道水力特性参数等。研究工作紧密结合 PCCP 工程实际情况, 课题取得的成果可应用于 PCCP 工程建设、管理, 对我国 PCCP 相关规范的制定具有指导意义, 对 PCCP 在我国的应用起到推导作用。

**关键词:** 南水北调; 预应力钢筒混凝土管 (PCCP); 结构计算; 软件; 阴极保护; 混凝土; 砂浆糙率

### 1 前言

预应力钢筒混凝土管 (PCCP) 以其特有的新型组合结构优点, 正越来越多地应用到我国长距离输水工程中。南水北调北京段工程在我国首次采用了超大口径 PCCP。由于我国 PCCP 的起步较晚, 研究也不甚深刻, 大多数工程 PCCP 管设计和生产完全采用美国标准, 这些标准是基于美国国内的原材料质量水平、试验方法、设计理念、生产水平等所制定的, 与我国国情不符; 南水北调中线所用的 PCCP 管道直径已达 4m, 对管道结构安全、防腐蚀、水力特性等技术问题提出了更高的要求, 也增加了管道制造、运输、安装、吊装的难度。因此, 本文紧密结合南水北调工程, 针对南水北调京石段工程中出现的具体问题进行分析研究, 具有一定的理论意义和重要的工程实际意义。

**基金项目:** “十一五”国家科技支撑计划项目“南水北调超大口径 PCCP 管道结构安全与研究”(2006BAB04A04)。

**第一作者简介:** 王东黎 (1965—), 女, 四川人, 教授级高级工程师, 注册一级结构工程师, 主要从事水利水电工程设计。



国家“十一五”科技支撑计划项目“南水北调中线工程关键技术研究与应用”中的课题“超大口径 PCCP 管道结构安全与研究”重点研究 PCCP 管道混凝土、砂浆, 结构计算方法与程序开发、管道水力特性、管道防护、防腐蚀及安全性, 本文将简要介绍课题组已经取得的主要研究成果。

## 2 PCCP 结构安全性关键技术

### 2.1 基于缠丝模型的 PCCP 数值计算方法

有限元方法于 20 世纪才开始被用于 PCCP 进行数值计算模拟, 研究成果很少, 人们一直试图建立能够合理分析 PCCP 管道结构响应的有限元分析模型。现有的数值计算方法在施加钢丝的预应力方面总是存在着一定的不足, 本文提出从施工仿真的角度建立预应力钢丝的缠丝模型, 以建立合理的 PCCP 的预应力场。该模型基于环形预应力的作用机理提出钢丝受拉均匀假定, 通过引入多点运动耦合约束实现了混凝土管芯的旋转, 考虑了钢丝与混凝土管芯之间的相互作用, 并结合混凝土、钢丝与钢筒等材料的本构关系实现了预应力钢丝的缠丝模拟, 建立了 PCCP 管道的缠丝模型。该模型能够考虑预应力钢丝刚度的贡献及其与混凝土的管芯的相互作用。由于需要对预应力钢丝进行离散, 模型中包含有较多数量的自由度, 计算中需要不断搜索和更新钢丝自由度与混凝土自由度之间的接触关系, 加之需要考虑几何非线性的大变形问题, 使得整个模型的非线性程度和计算规模均相当大。因此有必要对实际的缠丝过程进行简化, 并采用显式的动力计算方法。应用该模型分析 PCCP 结构缠丝后的应力应变场, 并与现有模型和理论公式作了比较, 验证了缠丝模型的合理性。

从施工仿真的角度建立 PCCP 预应力钢丝缠丝模型, 用以模拟施加 PCCP 的预应力场, 解决了现有预应力施加方法的不足与局限性。该模型属于首次提出和建立, 在 PCCP 的数值计算方法方面具有较大的创新性。

### 2.2 预应力钢筒混凝土管辅助设计系统 (PCCP - CDP) V1.0

预应力钢筒混凝土管辅助设计系统 (PCCP - CDP) V1.0 计算机软件基于 ANSI/AWWA C301、ANSI/AWWA C304、M9 等相关规范的计算设计原理, 引用相关的中国材料及荷载规范, 设计出界面友好、操作简单、系统稳定、结果正确、便于维护的 PCCP 设计系统软件。PCCP - CDP 软件结构如图 1 所示。软件可进行预应力钢筒混凝土压力管的设计计算和检验计算, 同时可对管子的各种材料用量进行工程量统计, 对工程造价进行初步的预算, 可进行覆土荷载和汽车荷载的计算, 其中覆土荷载可选择沟槽管、凸埋管、凹埋管、减压沟槽管、顶管和洞穿管等埋置形式, 汽车荷载可按照美国规范《ANSI/AWWA M9》和中国规范《CECS 140: 2002》两种方法计算。计算结果采用 Word 格式输出计算书。管子的设计参数可选择采用国际单位制 SI 或美国单位制 US。管子类型包括嵌置式 (ECP) 和内衬式 (LCP)。

### 2.3 预应力钢筒混凝土管仿真系统 (PCCP - FEM) V1.0

预应力钢筒混凝土管 (PCCP) 仿真分析系统, 简称 PCCP - FEM, 主要用于 PCCP 在各计算工况下的结构受载响应分析, 是首次开发的一款专门针对 PCCP 的受载响应进行分析的有限元软件。软件能够提供平面分析与三维分析两种模型, 全面集成 PCCP 的各种

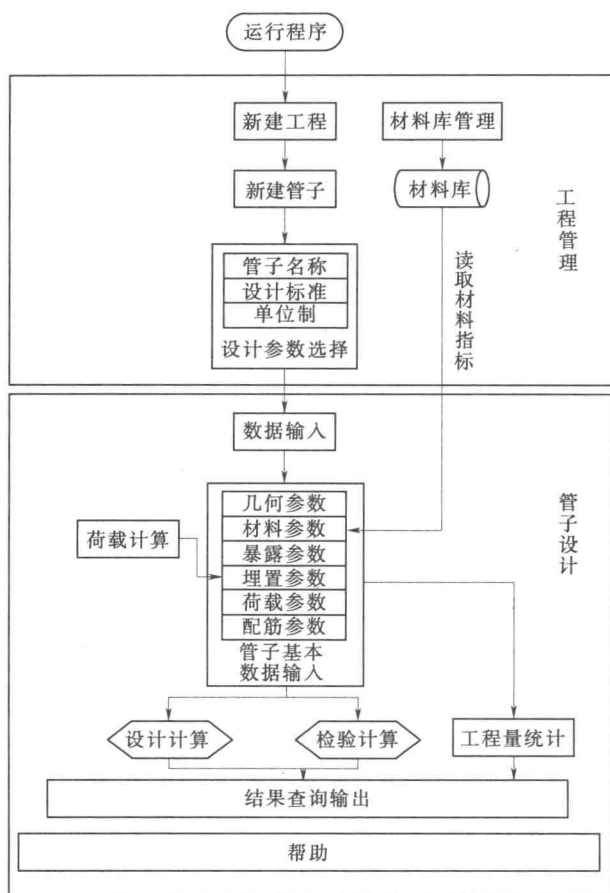


图 1 PCCP-CDP 软件结构图

计算工况，能给出 PCCP 在各种外荷载作用下的各受力阶段的响应及其发展规律，揭示 PCCP 的应力和变形的分布过程，较准确评价 PCCP 的结构安全性能，并提供强大的前后处理功能，使用户能够方便地对 PCCP 在各计算工况下的受载响应进行分析，为 PCCP 管道的结构设计和分析提供专业软件平台。

图 2 中给出了 PCCP-FEM 的主要流程。其中前处理模块提供图形化界面，使用户能够方便地建立 PCCP 的分析模型，并形成作业文件（.ipt 文件）；然后调用求解器对分析模型进行求解，求解器具有实时监控错误的功能，如果发生异常错误，求解器会自动停止运行并产生相应提示，用户需要根据提示信息返回前处理模块进行错误修正，正确求解后形成结果文件（.opt 文件）；调用后处理模块对结果进行图形化显示。

#### 2.4 管芯裂缝、预应力钢丝断丝和预应力松弛对 PCCP 承载力影响评价

课题对 PCCP 产生裂缝的形式进行了分析整理，对裂缝产生的机理进行了详细分析，并对南水北调工程中线段实际产生的裂缝进行了分析，提出了减少或减轻裂缝的措施。

（1）课题选取工程中出现典型管芯纵向裂缝的 PCCP 进行承载力外压试验，再通过数值模拟裂缝对 PCCP 承载力的影响。试验表明：PCCP 现场试验值超过设计值，而数值计

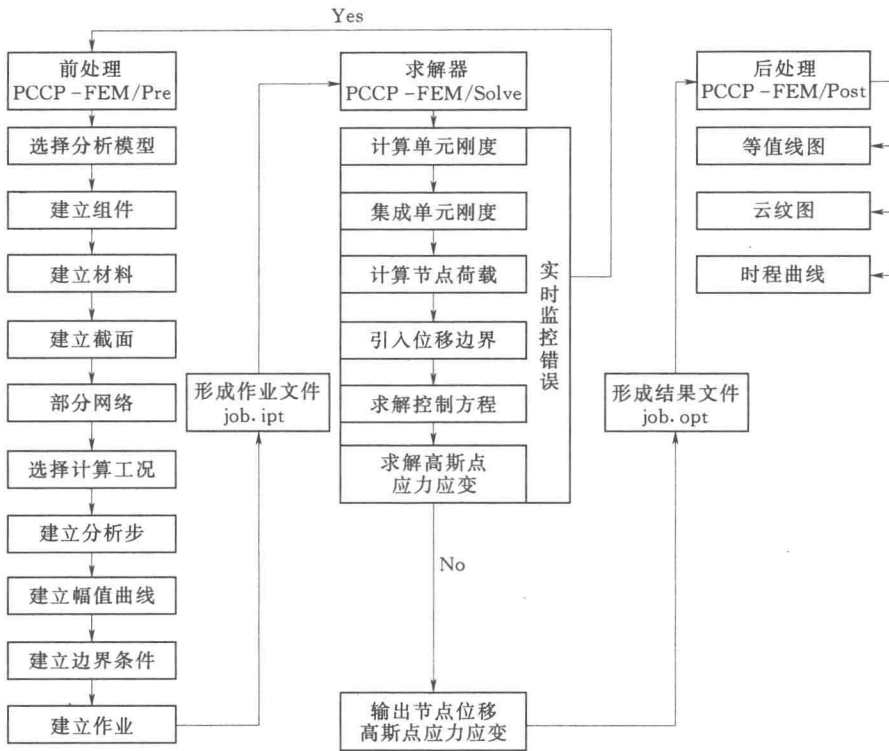


图 2 PCCP-FEM 计算主流程图

算结果与试验值相近。对于预先出现裂缝的管子，从计算结果可以看到：裂缝对抗裂外压影响不大，对抗裂内压有一定影响，下降了 17%，从应力云图与微裂缝损伤图上可以看出：裂缝预先出现的管子，在裂缝区域，对混凝土、砂浆保护层均出现应力集中现象，故会在裂缝区域首先出现破坏。

(2) 课题模拟了工程中可能出现的断丝现象，对 PCCP 在承载过程中进行断丝试验，观察断丝过程中 PCCP 的破坏情况。由于砂浆保护层对钢丝的附着力较大，PCCP 破坏特种仍为管顶和管底瞬间出现贯通裂缝，管腰砂浆保护层出现裂缝。通过对 PCCP 断丝的数值模拟得出：随着断丝数的增多，各极限状态所允许施加的内水压逐渐减小；断丝区混凝土最容易出现裂缝，随着内水压的增大，断丝区的钢筒也更容易屈服，离断丝区越近，钢丝应力越大，屈服地也越早；在断丝数不超过 25 根的情况时，PCCP 管的整体工作性能仍然良好，在内压、外部土荷载、水体和管自重作用下仍处于安全状态，发生爆管的可能性不高；当断丝数超过 25 根时，仅有外部土荷载、管和流体自重作用，而无内水压作用时，混凝土就已经开裂，当有内水压作用时，水容易沿着裂缝流至钢筒或钢丝层，从而引起他们的腐蚀，影响 PCCP 的耐久性。在这种情况下，虽然在达到弹性极限状态（钢筒屈服）之前 PCCP 仍能承担一定的内水压，但随着时间的推移，钢筒或钢丝的锈蚀以及混凝土的劣化会增加爆管的风险。

(3) 课题针对可能出现的预应力钢丝松弛现象，对放置时间达到 360d 的 PCCP 管进





行内水压承载试验, 得出了内水压情况下 PCCP 的破坏特征: PCCP 从管端开裂, 并沿管轴向向下扩展, 在管端截面, 裂缝由内向外扩展, PCCP 的极限承载力高于 PCCP 的强度极限内压, 也远远高于其工作内压。通过测量预应力钢丝松弛的应变值, 采用数值模拟的方法, 计算了预应力钢丝松弛了 109MPa、209MPa、309MPa 时的承载情况, 得出: 在现场试验所观测的范围内 (松弛应变 $<1600\mu\epsilon$ ), 预应力松弛量与 PCCP 的工作极限状态和弹性极限状态的降低基本呈线性关系; 在预应力损失为 309MPa 时, PCCP 工作极限状态的内水压为 0.91MPa, 大于工作内压 0.6MPa, 所以仍能保证 PCCP 在正常工作时的安全性; 由于强度极限状态由钢丝的屈服这一条件决定, 在内压作用下, 钢丝的预应力松弛对 PCCP 的强度极限影响甚微。

## 2.5 高柔韧性、高抗裂性与高耐久性的承插口接头砂浆

通过试验研究矿物掺合料、减水剂、纤维、膨胀剂、高吸水性树脂 (SAP) 等改性组分对灌缝砂浆的影响规律, 对比不同组分对灌缝砂浆的工作性、抗裂性和耐久性的影响。结合试验结果为工程提供高工作性、抗裂性好及耐久性优良的灌缝砂浆配合比。所开发的高性能接头砂浆的具体技术指标如下。

(1) 耐久性。90d 龄期 RCM 法氯离子扩散系数小于  $5 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ , 抗冻性大于 200 次冻融循环。

(2) 阻锈性。按照硬化砂浆阳极极化法试验, 保证钢筋基本处于钝化状态。

(3) 抗裂性。按照 ASTM C1581 圆环法测试的受约束条件下的砂浆圆环开裂时间比目前的接头砂浆配方延长 50% 以上且大于 7d。

(4) 施工适应性。具有自密实能力, 有关流动性、填充性、抗分离性的指标满足《自密实混凝土设计与施工指南》(CCES 02—2004) 的要求, 泌水率小于 5% (单位面积表面泌水量与单位体积用水量的质量比)。

## 2.6 室内原材料及混凝土、砂浆试验

针对南水北调 PCCP 工程采用的施工配合比, 对混凝土和砂浆的力学性能、变形性能和耐久性能展开研究, 分析对比目前采用的设计参数与研究得出的成果的相关性, 为南水北调超大口径 PCCP 的设计和结构安全计算的校核提供真实可靠的技术参数, 同时也为我国的 PCCP 相关标准和设计标准的制定与修订提供技术依据。以室内试验为主, 通过对比我国规范体系配制的混凝土与美国标准配制的混凝土各项性能的相关性, 提出一整套符合我国规范体系及原材料现状的, 采用 ANSI/AWWA C304 标准设计的 PCCP 结构设计参数, 结论如下。

(1) 我国规范与美国规范对混凝土和砂浆的设计指标和要求的性能是相同的, 不同的是每个设计指标和性能所采取的测试方法、原材料的品质检验和检测标准不同。

(2) 对不同标准进行的抗压强度试验结果表明, 圆柱体试件与立方体试件的换算系数为 0.85。从管道结果安全角度考虑, 采用现在的换算系数 0.80 进行工程的质量控制是偏于安全的。

(3) 早期影响管芯混凝土裂缝的主要因素是温度应力, 后期还受自生体积变形收缩应力的影响, 干缩应力后期不容忽视, 但可以通过养护措施进行控制。

(4) 影响砂浆裂缝的注意因素是干缩, 辊射工艺后应加强湿养工艺控制。