

YUYINGLI GANGTONG HUNNINGTUGUAN(PCCP) GUANXIN HUNNINGTUNEIBI

LIEFENG KONGZHI JI ZHILIANG PINGJIA FANGFA YANJIU

张雷顺 著

# 预应力钢筒混凝土管 (PCCP)

## 管芯混凝土内壁裂缝控制及 质量评价方法研究



黄河水利出版社

# 预应力钢筒混凝土管(PCCP) 管芯混凝土内壁裂缝控制及 质量评价方法研究

张雷顺 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

## 内 容 提 要

本书介绍了国内外部分有关 PCCP 管芯混凝土内层裂缝的评价方法、混凝土的收缩类型及部分学者的认识和研究成果;分析了 PCCP 蒸汽养护制度,蒸汽养护过程中混凝土的胀缩,成品 PCCP 的干缩与应力,PCCP 插、承口裂缝与缝隙;通过理论和计算机仿真分析计算了降温过程中管芯内层混凝土的应力、缠丝过程中管芯内层混凝土应力及焊缝处的应力集中;介绍了作者进行的 PCCP 原型构件湿胀实验结果及裂缝宽度、深度与龄期关系的实验结果;给出了对 PCCP 管芯混凝土内层裂缝的评价和修补建议。

## 图书在版编目(CIP)数据

预应力钢筒混凝土管(PCCP)管芯混凝土内壁裂缝控制及质量评价方法研究/张雷顺著. —郑州:黄河水利出版社,2014.6

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0810 - 9

I. ①预… II. ①张… III. ①预应力混凝土管 - 钢筋混凝土管 - 裂缝 - 控制 - 质量 - 方法研究 IV. ①TU757.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 111830 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: hhslebs@126.com

承印单位:河南地质彩色印刷厂

开本:890 mm × 1 240 mm 1/32

印张:8.125

字数:176 千字

版次:2014 年 6 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2014 年 6 月第 1 次印刷

---

定价:25.00 元

## 编写委员会

|       |     |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| 主 任   | 王小平 |     |     |     |
| 副 主 任 | 杨继成 |     |     |     |
| 编 委   | 张雷顺 | 单松波 | 雷淮平 | 耿万东 |
|       | 胡国领 |     |     |     |

## 编写人员

|       |     |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| 主 编   | 张雷顺 |     |     |     |
| 副 主 编 | 单松波 | 雷淮平 | 耿万东 | 胡国领 |
| 编写人员  | 戚世森 | 蒋勇杰 | 杜 明 | 黑君森 |
|       | 陈瑞芳 | 司大勇 | 刘晓英 | 李光阳 |
|       | 李申亭 | 姚芳芳 | 孙大为 | 李平先 |
|       | 张攀辉 | 徐永福 | 张渊龙 | 李 鹤 |
|       | 郑 志 | 黄红粉 | 冯娜娜 |     |

# 前 言

本书作者在对河南省 6 家预应力钢筒混凝土管 (Prestressed Concrete Cylinder Pipe, 简称 PCCP) 生产企业进行实地调研, 收集、查阅大量有关文献的基础上, 分析了国内外有关标准对埋置式 PCCP 管芯内层混凝土表面裂缝的要求; 梳理了国内外部分学者对该问题的认识和研究成果; 对 PCCP 预养→升温→恒温→降温→缠丝前→缠丝中→成品后→裂缝自愈中每个环节都进行了较为深入的定性与理论分析; 对降温和缠丝过程进行了电算模拟; 对成品 PCCP 原型构件进行了湿胀试验; 在不同的龄期对 PCCP 管芯内层混凝土表面裂缝宽度和深度进行了检测; 分析了管芯内层混凝土表面裂缝产生和发展的机理。

本书提出的蒸汽养护制度中应注意的问题, 降温后及时养护的意见, 焊缝处应力集中及出现螺旋状裂缝的解释, 缠丝过程中焊缝位置附近的应力特性、PCCP 原型管芯内层混凝土湿胀性能, 管芯内层混凝土表面裂缝宽度、深度与龄期的关系, 对管芯内层混凝土表面裂缝的评价方法等, 有益于减少裂缝数目和减小裂缝宽度, 对改进 PCCP 生产工艺、提高产品质量, 增加经济效益, 制定更为合理的质量评定方法有一定的参考价值。

# 目 录

## 前 言

|                                             |      |
|---------------------------------------------|------|
| 第 1 章 概 述 .....                             | (1)  |
| 第 2 章 对 PCCP 生产企业的调研 .....                  | (4)  |
| 第 3 章 PCCP 在国内外的的发展及应用概况 .....              | (6)  |
| 第 4 章 PCCP 技术标准及关于裂缝与修补的规定 ...              | (11) |
| 4.1 PCCP 技术标准 .....                         | (11) |
| 4.2 标准中关于裂缝及修补的规定 .....                     | (13) |
| 第 5 章 PCCP 结构特点与制作工艺 .....                  | (24) |
| 5.1 PCCP 结构特点 .....                         | (24) |
| 5.2 PCCP 制作工艺 .....                         | (27) |
| 第 6 章 部分学者对 PCCP 管芯混凝土裂缝的认识 ...             | (39) |
| 6.1 PCCP 裂缝 .....                           | (39) |
| 6.2 部分学者对 PCCP 管芯混凝土裂缝生成的认识<br>.....        | (39) |
| 6.3 部分学者对 PCCP 管芯内层混凝土表面裂缝<br>自愈性能的认识 ..... | (54) |
| 第 7 章 PCCP 的蒸汽养护制度 .....                    | (65) |
| 7.1 预养期 .....                               | (66) |
| 7.2 升温期 .....                               | (67) |
| 7.3 恒温期 .....                               | (71) |
| 7.4 蒸汽养护制度对混凝土中水泥石的孔结构                      |      |

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 影响 .....                            | (72)  |
| 7.5 降温期 .....                       | (76)  |
| 7.6 山西引黄工程 PCCP 蒸汽养护记录统计 .....      | (77)  |
| 7.7 河南段南水北调配套工程 PCCP 蒸汽养护记录统计 ..... | (78)  |
| 第 8 章 混凝土的收缩类型 .....                | (79)  |
| 8.1 混凝土的收缩类型 .....                  | (79)  |
| 8.2 分析裂缝时不同时期应考虑混凝土收缩类型 .....       | (86)  |
| 8.3 几个重要的试验资料 .....                 | (87)  |
| 第 9 章 混凝土的早期收缩 .....                | (99)  |
| 9.1 不掺减水剂和掺合料的普通混凝土的早期收缩 .....      | (100) |
| 9.2 掺有减水剂的混凝土的早期收缩 .....            | (106) |
| 9.3 掺有减水剂、不同水灰比的混凝土的早期收缩 .....      | (112) |
| 9.4 掺有减水剂和粉煤灰的混凝土的早期收缩 .....        | (115) |
| 9.5 掺有减水剂和矿粉的混凝土的早期收缩 .....         | (117) |
| 9.6 对混凝土早期收缩的认识 .....               | (118) |
| 第 10 章 蒸汽养护过程中混凝土的缩胀 .....          | (119) |
| 第 11 章 混凝土的应力松弛 .....               | (124) |
| 第 12 章 螺旋焊缝处的应力集中 .....             | (126) |
| 第 13 章 降温过程中管芯混凝土温度应力的理论分析 .....    | (129) |

|        |                                             |       |
|--------|---------------------------------------------|-------|
| 13.1   | 基本假设 .....                                  | (129) |
| 13.2   | 计算公式 .....                                  | (129) |
| 13.3   | 温度应力计算 .....                                | (130) |
| 第 14 章 | 降温过程中管芯混凝土温差应力数值分析 .....                    | (140) |
| 14.1   | 养护罩摘离、拆模前混凝土中心温度与模板<br>温差引起的混凝土应力 .....     | (140) |
| 14.2   | 外模打开、内模保留,内模板温度与外层混<br>凝土表面温差引起的混凝土应力 ..... | (146) |
| 第 15 章 | 缠丝前内层混凝土的干缩及应力 .....                        | (151) |
| 15.1   | 蒸汽养护后混凝土干缩的数学模型 .....                       | (151) |
| 15.2   | 缠丝前钢筒与内层混凝土之间的黏结 ...                        | (153) |
| 15.3   | 缠丝前内层混凝土的干缩应力 .....                         | (156) |
| 第 16 章 | 缠丝后 PCCP 环向预应力理论分析 .....                    | (161) |
| 第 17 章 | PCCP 径向位移与环向预应力数值计算 ...                     | (169) |
| 第 18 章 | PCCP 缠丝过程中缠丝位置附近的应力 ...                     | (173) |
| 18.1   | 算例 1 .....                                  | (174) |
| 18.2   | 算例 2 .....                                  | (177) |
| 18.3   | 算例 3 .....                                  | (180) |
| 第 19 章 | 成品管内层混凝土的干缩及应力 .....                        | (189) |
| 第 20 章 | 裂缝自愈研究现状 .....                              | (195) |
| 20.1   | 部分学者对湿胀自愈的认识 .....                          | (196) |
| 20.2   | 部分学者对化学自愈的认识 .....                          | (198) |
| 第 21 章 | PCCP 原型湿胀性能试验 .....                         | (205) |
| 21.1   | 试验方法 .....                                  | (205) |
| 21.2   | 试验结果 .....                                  | (208) |

|        |                                  |       |
|--------|----------------------------------|-------|
| 21.3   | 试验结果分析 .....                     | (222) |
| 第 22 章 | 约束对混凝土湿胀的影响 .....                | (225) |
| 第 23 章 | 龄期、裂缝表面宽度与裂缝深度的关系检测 .....        | (230) |
| 第 24 章 | 插、承口端裂缝与缝隙 .....                 | (233) |
| 24.1   | 插口端裂缝 .....                      | (233) |
| 24.2   | 承口端裂缝 .....                      | (235) |
| 24.3   | 插口端内层混凝土与插口钢环之间的环形<br>纵向缝隙 ..... | (236) |
| 24.4   | 改进措施 .....                       | (241) |
| 第 25 章 | 结论与建议 .....                      | (243) |
| 25.1   | 结论 .....                         | (243) |
| 25.2   | 建议 .....                         | (247) |

# 第 1 章 概 述

在河南省南水北调配套工程中,共需敷设各类输水管道 942.74 km,其中管径大于等于 1.4 m、压力高于 0.8 MPa 的管子,一般选用预应力钢筒混凝土管(PCCP)。据初步统计,在河南省南水北调配套工程中,PCCP 总长度达 669 km,占输水管道总长的 71%。

2012 年下半年,南水北调中线河南段管道配套招标项目基本完成,山东龙泉管道工程股份有限公司、宁夏青龙管业股份有限公司、浙江巨龙管业股份有限公司、北京韩建河山管业股份有限公司、洛阳富兴管业有限公司、天津常天管道有限公司、山东山水水泥集团有限公司和南阳市御龙管道有限公司等 8 家单位中标,并生产、提供所需的 PCCP。

河南省南水北调配套工程开工以来,发现 PCCP 在生产、运输、停放和安装期间管芯内层混凝土表面出现裂缝的现象较为普遍。

尽管国标《预应力钢筒混凝土管》(GB/T 19685—2005)在“成品质量”一节、河南省南水北调中线工程建设管理局颁布的“河南省南水北调受水区供水配套工程 PCCP 采购指南”中“成品管检验”一章、河南省南水北调中线工程建设领导小组办公室颁布的“河南省南水北调配套工程 PCCP 管道工程质量评定办法”中“PCCP 制造”一节等都对埋置式 PCCP 管芯内层混凝土表面不同部位裂缝宽度及长度提出了要求,但生产、监理和验收单位对 PCCP 为什么会出现裂缝、裂缝宽度如

何控制、裂缝能否自愈等问题不是很清楚,对标准或评定办法提出的要求的合理性存在疑虑。

在美国 ANSI/AWWA C 304 设计标准中,规定了三种极限状态设计准则:正常使用极限状态设计准则、弹性极限状态设计准则和强度极限状态设计准则。在工作极限状态设计时,混凝土管芯和保护层的拉应变控制是比较严格的,管芯混凝土内、外表面的拉应变仅为  $1.5 \mu\epsilon$ ;而保护层砂浆由于未受预应力作用,允许的拉应变为  $6.4 \mu\epsilon$ ,但仍不会出现可视裂缝;实际上,PCCP 在生产过程中基本都会出现裂缝,因此在 ANSI/AWWA C 301 制造与验收标准中,又对裂缝宽度提出了要求。这实际上是一个不衔接、有间断区的设计与制造配套标准。要使二者连结起来,弥补上间断区,必须增加管芯混凝土裂缝及管子带裂缝工作等方面的分析内容与研究。

深入开展 PCCP 管芯内层混凝土裂缝的研究,搞清楚裂缝产生的机理、裂缝的性质;提供如何减少裂缝数目及减小裂缝宽度的意见;对哪些裂缝需要修补,哪些裂缝不需要修补,需要修补的裂缝如何修补等提出建议,对贯彻有关标准及评定办法、保证南水北调配套工程质量具有十分重要的意义。

2013 年 8 月,课题组开展了“预应力钢筒混凝土管(PCCP)管芯混凝土内壁裂缝控制及质量评价方法研究”。在研究中得到河南省南水北调中线工程建设管理局、河南省水利水电工程建设质量监测监督站、郑州城市职业学院和浙江巨龙管业股份有限公司等单位的大力支持和协助。

在对 PCCP 生产企业的调查研究和查阅大量资料的基础上,通过对 PCCP 管芯内层混凝土裂缝的理论分析、原型湿胀试验、原型裂缝宽度与深度及龄期检测、降温期间温度场计算机

模拟、缠丝期间管芯内层混凝土应力及对螺旋焊缝处钢筒内搭接台阶应力集中等的有限元计算等,取得了一些研究成果,可供 PCCP 设计、制造、验收以及制定或修改有关标准参考。

| 序号 | 项目名称                 | 承担单位        | 备注     |
|----|----------------------|-------------|--------|
| 1  | 预应力混凝土管桩 (PC) 的制造与施工 | 中国水利水电科学研究院 | 1998 年 |
| 2  | 预应力混凝土管桩 (PC) 的制造与施工 | 中国水利水电科学研究院 | 1998 年 |
| 3  | 预应力混凝土管桩 (PC) 的制造与施工 | 中国水利水电科学研究院 | 1998 年 |
| 4  | 预应力混凝土管桩 (PC) 的制造与施工 | 中国水利水电科学研究院 | 1998 年 |
| 5  | 预应力混凝土管桩 (PC) 的制造与施工 | 中国水利水电科学研究院 | 1998 年 |
| 6  | 预应力混凝土管桩 (PC) 的制造与施工 | 中国水利水电科学研究院 | 1998 年 |

## 第2章 对 PCCP 生产企业的调研

2013 年 5 月 21 ~ 29 日,历时 9 d,课题组先后对河南省境内 6 家 PCCP 生产企业进行了调研。对各企业调研的时间见表 2-1。

表 2-1 对 6 家 PCCP 生产企业调研的时间

| 序号 | 调研时间       | 企业名称           | 所在地 |
|----|------------|----------------|-----|
| 1  | 2012.05.21 | 宁夏青龙管业股份有限公司   | 汤阴县 |
| 2  | 2013.05.22 | 天津常天管道有限公司     | 卫辉县 |
| 3  | 2013.05.22 | 浙江巨龙管业股份有限公司   | 原阳县 |
| 4  | 2013.05.28 | 北京韩建河山管业股份有限公司 | 叶县  |
| 5  | 2013.05.29 | 南阳市御龙管道有限公司    | 南阳市 |
| 6  | 2013.05.29 | 宁夏青龙管业股份有限公司   | 镇平县 |

调研后了解到的基本情况如下:

(1)全部生产埋置式 PCCP。

(2)6 家企业的 PCCP 生产工艺基本相同。

(3)在钢筒焊接工艺上,全部采用单面搭接焊,搭接长度 25 mm。1 家采用纵向焊,其他 5 家采用螺旋焊。焊缝最大凸出高度控制在 1.6 mm。

(4)全部采用普通硅酸盐水泥。2 家采用的水泥强度等级为 52.5,4 家采用的水泥强度等级为 42.5。

(5)全部不参加矿物掺合料(粉煤灰、硅粉等)。

(6)全部掺加减水剂,4 家参加的是聚羧酸高效减水剂,

掺量  $3.28 \sim 5.10 \text{ kg/m}^3$ , 2 号为萘系高效减水剂, 掺量  $4.13 \sim 4.65 \text{ kg/m}^3$ 。

(7) 水泥用量  $360 \sim 510 \text{ kg/m}^3$ , 水灰比  $0.27 \sim 0.40$ , 石子级配 5 ~ 20。

(8) 全部采用一次蒸汽养护方案, 静养 1 ~ 2 h, 升温 1 ~ 2 h, 恒温 6 ~ 8 h, 恒温温度  $45 \sim 52 \text{ }^\circ\text{C}$ , 降温 1 ~ 2 h。

(9) 成品 PCCP 管芯内层混凝土表面普遍存在螺旋状裂缝, 裂缝条数、长度和宽度不等, 管芯中部内层混凝土裂缝宽度最小, 承口端内层混凝土裂缝宽度较大, 插口端内层混凝土裂缝宽度最大。纵向焊接管芯内层混凝土裂缝较少。

(10) 从外观上看, 管芯混凝土中粗骨料分布很不均匀, 采用立式振动成型浇筑工艺时, 位于底部承口端附近的混凝土中含骨率较大, 位于插口端的混凝土中含骨率较小。

(11) 管芯混凝土设计强度等级 C50 ~ C55。

(12) 养护结束后 3 d 左右开始缠丝。

(13) 缠丝后喷涂水泥砂浆保护层, 之后 4 d 左右刷防腐剂。

### 第 3 章 PCCP 在国内外的的发展及应用概况

PCCP 是由预应力钢丝、钢筒和混凝土构成的复合管材。

PCCP 生产技术源于法国邦纳公司。1893 年法国巴黎总工程师(Bonna)设计和制造了钢筒混凝土管,第一次应用于巴黎科隆贝(Colombes)引水工程。第一条钢筒混凝土管,直径 1.6 m,工作压力 0.6 MPa,耐久性很好,直到 1978 年仍在使用,其缺点是管壁厚、重量大。正因为如此,有时 PCCP 也称邦纳管。

预应力混凝土技术出现于 19 世纪后期,1928 年发展成熟,第二次世界大战结束后开始盛行。预应力的施加,使混凝土结构的厚度明显减小,重量明显减轻。在这样的背景下,人们开始研究在混凝土管道上施加预应力的方法,以减小管的壁厚,减轻管的重量。美国 PB 公司的前身刘易斯敦(Lewistown)管道公司,从 20 世纪 20 年代开始研究制造预应力混凝土管的工艺方法,在此后近 20 年的时间里,试验过在多种混凝土管上施加预应力的方法,终于在 1940 年成功地生产出了第一根不带钢筒的预应力混凝土管,1942 年,成功地生产出了第一根带钢筒的预应力混凝土管(PCCP)。因此,严格意义上讲 PCCP 诞生于 1942 年。

1942 年到 1965 年,PB 公司生产了约 6 100 km 的 PCCP 管材,现在 PB 公司已累计生产 PCCP 管材 7 900 km 以上。

1953 年 Ameron 公司引进 PCCP 的生产工艺,目前也已累计生产 PCCP 管材数百千米,其中包括直径 6.4 m 的当时世界上最大管径的 PCCP。

值得注意的是,在近 60 年的发展中,PCCP 基本结构形式始终保持不变,但其生产工艺日臻成熟,质量控制体系越来越完善,生产设备亦越来越先进。

现在美国、加拿大、英国、法国、德国、意大利、巴西、土耳其、沙特、利比亚、韩国、印尼、泰国等国家都有 PCCP 生产企业。

20 世纪 80 年代末,我国山东电力管道公司首先从美国 Ameron 公司引进 PCCP 生产设备、技术和设计软件,通过消化吸收完成了国内 PCCP 生产技术和市场开发,起初大量用于对可靠性要求较高的火力发电厂供水和循环水工程,效果良好,由此逐渐树立了 PCCP 在国内管道市场的良好品牌和信誉。之后,江苏无锡华毅管道有限公司、深圳太阳管道公司等相继从美国引进了 PCCP 生产线,这三条生产线的关键设备全部从美国进口。到 2000 年底,他们已为国内外供水工程提供了直径 0.6 ~ 3.0 m 的 PCCP 管道达 600 多 km,应用于 80 多个工程项目。近年来在国内相继建成呼和浩特万联、江苏中毅、山东济南、淄博、新疆国统、四川金炜等多个 PCCP 生产厂,生产能力达到了一定的水平和规模,产品规格涵盖了直径 400 ~ 4 000 mm 和内压 0.4 ~ 2.0 MPa 中以 0.2 MPa 为级差的各个压力等级。

目前,PCCP 已广泛使用于我国的水利、电力和市政给排水等各个领域。

在我国,大口径或超大口径 PCCP 应用较晚,2003 年 10

月,在正式向太原市供水的山西省万家寨引黄工程中采用了内径为3 m的PCCP,2004年5月华腾远通综合管业有限公司首次为南水北调引水工程成功试制出直径4 m的PCCP。

预应力钢筒混凝土管具有如下特点:PCCP采用经过水压试验的钢筒和钢制承插口橡胶密封圈接头,保证了管体和接头处的抗渗性,解决了一般混凝土管存在的渗水问题,故可承受很高的内水压力;PCCP在设计上充分考虑了混凝土的抗压强度,利用管身缠绕的高强钢丝对管体施加预应力,使管芯被压缩,当管体承受内压和外荷载时,PCCP受到的拉力被预压应力所抵消,使得PCCP能承受很高的内压和外荷载;另外,PCCP及其接头的内表面光滑,不形成瘤节,表面不结垢,流水阻力小,通水能力强;有良好的耐腐蚀性,耐久性强,设计使用寿命为50年以上,美国水工协会(AWWA)耐腐蚀委员会的研究认为,PCCP可以使用100年;安装便捷快速,加快了施工进度,且减少了工程投资;对地基适应性好,PCCP采用的半刚性接头使得此种管材既具有一定程度的刚性,又具有较好的柔性,允许有一定的转角,而不影响管道使用,所以适应地基变化的能力较其他管材要好;抵抗轴向推力能力强;具有较好的抗震性能等。

尽管PCCP具有上述很多优点,但由于各种原因,使用中也曾发生过一些事故。美国调查了1943~1990年所发生的事故,工程事故发生频率的最高时期是20世纪70年代,见图3-1。美国供水协会研究基金报告资料显示,美国在1942~2006年期间共发生399次PCCP爆管事故。其他国家,如墨西哥、南非、沙特阿拉伯、利比亚、加拿大等,也曾多次出现PCCP爆管事故。利比亚大人工河工程的第一期工程自