

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.05.003

超大口径 PCCP 管内水压承载能力试验

胡少伟¹ 沈捷¹ 刘晓鑫¹ 王东黎²

(1.南京水利科学研究院,江苏 南京 210024;2.北京水利规划设计研究院,北京 100044)

摘要 采用原型现场试验的方法,分析 PCCP 的管内水压试验方法、破坏特征和承载机理。详细叙述了试验前试件成型与测量方案,阐述了内水压承载试验的具体过程及试验破坏特征。基于试验结果分析了 PCCP 的承载机理:PCCP 较普通混凝土管承载力的提高是由于预应力钢丝的作用,极限内水压时,表现为钢丝的屈服和混凝土的最终拉裂破坏,发挥了组合结构中各材料的性能。试验研究为超大口径 PCCP 管道的生产、施工积累了经验,为制订超大口径 PCCP 管道标准及其质量验收标准提供依据。

关键词 预应力钢筒混凝土管(PCCP);内水压;承载能力;破坏特征

中图分类号 :TV332.3 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)05-0009-04

Study on bearing capacity test of internal water pressure of super-caliber PCCP//HU Shao-wei¹, SHEN Jie¹, LIU Xiao-xin¹, WANG Dong-li²(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Beijing Institute of Water, Beijing 100044, China)

Abstract : A field prototype test was used to analyze the method of testing the internal water pressure of pre-stressed concrete cylinder pipe(PCCP), its failure characteristics , and its bearing mechanism. The scheme for pre-test molding and measurement of test pieces is described. The concrete testing process and failure characteristics are explained. Finally , the bearing mechanism is analyzed based on the test results. The bearing capacity of PCCP is higher than that of a common concrete pipe due to the use of pre-stressed steel wires. At the maximum internal water pressure , the steel wire yields and the concrete is fractured. PCCP gives play to the properties of all materials in the combined structure. This test study collects experience for the production and construction of super-caliber PCCP and provides a basis for formulating super-caliber PCCP quality standards.

Key words : pre-stressed concrete cylinder pipe(PCCP); internal water pressure ; bearing capacity ; failure characteristics

预应力钢筒混凝土管(PCCP)是由预应力钢丝、钢筒、混凝土构成的复合管材,是在带钢筒的混凝土管芯上环向缠绕预应力钢丝,再在管外部施喷水泥砂浆保护层制成^[1-2]。各节 PCCP 之间由带承插口钢环的柔性接头衔接,从而使其能够应用于管道长距离输水工程中。由于采用了柔性接头设计,使 PCCP 管道的接头具备可靠的密封性能,另外,由于 PCCP 管壁内嵌置了由薄钢板制成的钢筒,增强了管道的环向强度,使得 PCCP 管壁可以建立起比普通预应力高得多的环向预压应力。因此,PCCP 具备了高密封性、高强度、高抗渗性的技术特征。此外,PCCP 以其适用范围广、经济、寿命长、抗震性能好、安装方便、运行费用低等优点,成为大口径、长距离高压输水工程的首选管材,被成功应用于山西万家寨引黄工程、南水北调中线工程等国家重点基础建

设中^[3]。随着国民经济的发展和城市供水设施的改建,PCCP 必将更广泛地应用于城市给水工程中^[4-6]。

南水北调中线工程京石段应急供水工程采用了 56.4 km 长的 PCCP,管内径达 4 m,为国内工程中具体应用的最大口径的 PCCP。由于目前国内对于超大口径 PCCP 的设计还不够成熟,此种 PCCP 的研制以及成品管的质量控制还没有成熟的经验,因而管子的应力应变也计算不准,已有的计算方法大都较为粗略和保守。因此,为了弄清大口径 PCCP 在不同内水压下准确的应力情况,在“十一五”国家支撑计划和国家自然科学基金项目的资助下,结合修建的实际工程,对这一超大口径原型管进行了内水压承载能力试验研究,以期掌握 PCCP 在实际内水压作用下的开裂过程和破坏特征,并结合测试结果分析其承载机理,从而为超大口径 PCCP 管道的生产、

施工积累经验,掌握第一手资料,为制订超大口径 PCCP 管道标准以及质量验收标准提供依据。

1 试验准备

1.1 试件成型

钢筒作为管体防渗的主要部分,将加工好的承口、插口钢圈装在螺旋制筒机上,将 2mmQ235B 碳素结构钢卷成钢筒,边卷边焊,一次焊接成型,经打压试验不渗漏,管芯混凝土作为承受管材内水压和外荷载的主要部分,采用北京河山管业有限公司配制的 C60 商用混凝土,PCCP 内径为 4m;钢筒吊入模具,镶嵌在混凝土中,经强力震捣,形成 PCCP 的管芯,管芯混凝土厚度为 300 mm;管芯在养护室蒸养到混凝土设计强度的 70% 时,取出进行缠丝;将管芯吊至缠丝机工作台,钢丝以 75% 的屈服强度的拉应力进行缠丝,缠丝直径为 7 mm,缠丝间距为 14.3 mm,单位管长预应力钢丝面积为 2 691 mm²,缠丝完毕后,采用高速辊射机辊射水泥砂浆保护层,保护层厚度为 25 mm。

1.2 测点布置

在安装好的 PCCP 中选取 1 段 5 m 作为试验管,取距管子两端各 1 m 和管腰中间、距管端 2.5 m 处共设置 3 个断面,由于管子的对称性,在每个断面每间隔 90° 的位置布置 4 个环向和 4 个纵向应变片,选取靠近一端的断面作为主测面,另一端的断面作为校核断面。测点布置及 PCCP 横断面如图 1 所示。

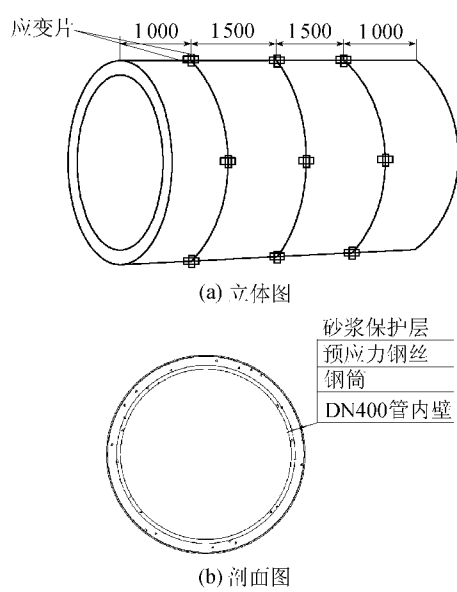


图 1 PCCP 应变片布置及横断面示意图(单位:mm)

1.3 应变片的粘贴及防潮防水

根据构成该混凝土管结构的原材料性质,为了较准确地反映测点的平均应变,试验中选择的应变片尺寸为 3 mm × 60 mm(宽 × 长)。在选定的测点上,

首先磨光测试表面并用无水乙醇清洗干净,然后在清洗干净的表面涂一薄层调配好的环氧树脂,使其均匀变形,待环氧树脂干燥后打磨平,清洗后用 502 胶水贴应变片,贴片时应防止留有气泡。为了防止应变片潮湿,在粘贴好的应变片上涂 704 胶作保护,操作中还需充分注意将应变片和引出线焊接处进行防水密封。应变片的引出线采用 100 芯铝箔屏蔽的同轴电缆线与应变采集仪相连接,应变采集系统为江苏东华测试技术有限公司生产的静态应变测试系统 DH3186 采集仪。

1.4 试验装置

PCCP 的内水压装置为内置的具有足够刚度的钢筒,在钢筒外侧套上 PCCP,PCCP 与内置钢筒之间有 10 cm 的间隙,在间隙中通入水,再用打压机进行打压,PCCP 的上下顶均用密封圈密封住,每次加载到设置压力时即用 DH3186 采集仪采集应变。

1.5 试验过程

将 PCCP 吊装至试验台架上,用密封圈及钢板密封上下管口,然后通水浸泡管子 24 h,使管芯混凝土表面湿润,并保证 PCCP 不漏水。试验规则参照规范[7]。测试开始时,首先读出各应变片的初始读数,通过仪器采集初始读数,全部工作和应变补偿片都在正常范围之内则说明应变片的粘贴、防潮防水、引出线等试验工艺都是成功的。加压测试时,以 0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa、1.0 MPa、1.2 MPa、1.4 MPa、1.6 MPa 的设置压力进行加压,每次测试压力达到设置压力后稳压 5 min,采集应变数值。仔细观察混凝土与砂浆保护层裂缝的出现与发展情况,用数显仪器测量裂缝的宽度。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

在内水压加压过程中,管子受力均匀,在加压到 1.2 MPa 之前没有观察到裂缝出现,当加载到 1.2 MPa 时砂浆保护层出现第 1 条微小裂缝,裂缝长度为 300 mm,宽度为 0.03 mm,随着内水压的继续增大,裂缝沿纵向向下延伸,当加载到 1.4 MPa 时砂浆保护层出现 4 条微小裂缝,长度 300 ~ 500 mm 不等,宽度 0.03 ~ 0.05 mm 不等;随着内水压的继续增大,承插口的裂缝同时沿着管子纵向和混凝土厚度方向扩展,加载到 1.6 MPa 时管端截面沿着环向大致均匀分布着 15 条裂缝,原有的裂缝扩展,裂缝长度为 700 mm,宽度为 0.1 mm。加载出现裂缝如图 2 所示。

从 PCCP 的裂缝开裂过程来看,首先是砂浆保护层在 1.2 MPa 时沿着圆周环向均匀出现裂缝,随着内水压的增大,砂浆保护层裂缝沿着纵向延伸,当

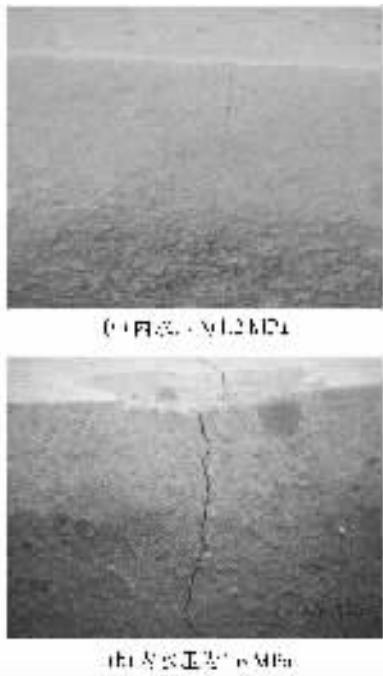


图2 加载出现裂缝情况

内水压达到 1.6 MPa 时,承插口管端混凝土出现沿径向的裂缝,继而裂缝扩展。从开裂过程来看,砂浆保护层先于管芯混凝土开裂,这是因为 PCCP 在制造时,预应力钢丝使得管芯混凝土内产生预压应力,而缠丝之后才喷涂砂浆保护层,使得砂浆保护层不产生预压应力,所以当内水压增大时,砂浆保护层直接承受拉应力,而管芯混凝土先由预压应力抵消一部分拉应力,直到预压应力全部抵消后才会承受拉应力。

2.2 材料的力学指标

制管厂家依据设计院设计参数对原材料指标进行了检测,结果表明各项指标均达到了设计标准。设计指标如下:混凝土抗压强度为 66 MPa,抗拉强度为 2.85 MPa,弹性模量为 36 GPa。该试验采集到的应变为砂浆保护层的应变,假设在砂浆保护层开裂之前处于弹性阶段,混凝土与砂浆的变形相协调。根据 CECS—140 中的公式计算弹性变形量如下:

$$E_m = 8427f_{mck}^{0.3} = 26.2 \text{ GPa}$$

式中: E_m 为砂浆弹性模量; f_{mck} 为砂浆的标准抗弯强度。

2.3 试验结果

按上述试验过程,采集砂浆保护层的应变结果,绘制出如图 3 所示的应变~内水压曲线。

从图 3 可以看出,在内水压加压过程中,随着内水压的加大,应变也随之增大。其中测点 co11 的应变较小,其余 3 个测点的应变接近,但大体规律一致。根据厂家提供的砂浆抗拉强度和由公式计算所得出的砂浆弹性模量,认为砂浆在初始受力阶段为

弹性应变,砂浆开裂时的应变为 100×10^{-6} ,也即内水压达到 1 MPa 作用时砂浆保护层将开裂,但管芯混凝土的开裂速度比砂浆保护层的开裂速度慢。该结果与笔者在试验中出现的现象一致。

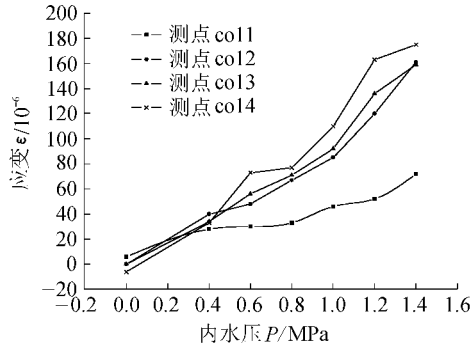


图3 应变~内水压曲线

3 PCCP 内水压承载机理

为了准确分析内水压试验过程中 PCCP 的承载过程,图 4 以 1/4 管剖面为例给出了不同受力阶段 PCCP 的承载过程。图 4(a)为管芯混凝土成型后的初始状态,此时管道结构各部力为零,也即此时为管芯混凝土初始应力状态;图 4(b)为施加环向预应力钢丝后的应力状态,在环向预应力钢丝作用下,混凝土产生预压应力,因此,当内水压增加时可以抵消内水压;图 4(c)为加入内水压的受力状态,此时内水压开始作用于管芯混凝土,但还小于预应力钢丝产

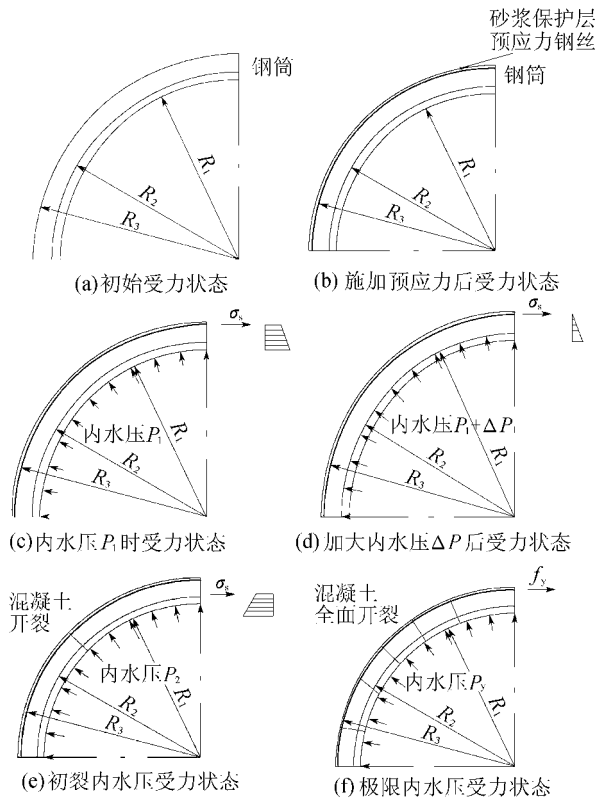


图4 PCCP 承载过程示意图

生的环向压力 ;图 4(d)为内水压加大后的受力状态 ,随着内水压的增大 ,由于预应力钢丝约束作用而产生管芯混凝土压应力逐渐减少 ,直至等于零(有可能残留部分压应力 ,但其数值已经很小) ,可以认为此时管道混凝土处于零应力状态 ;图 4(e)为混凝土初裂受力状态 ,随着内水压的继续增大 ,管芯混凝土外侧和砂浆保护层出现第 1 条初裂裂缝 ,此时的内水压为管道初裂内水压力^[8] ;图 4(f)为混凝土终裂受力状态 ,随着内水压继续增大 ,砂浆保护层和管芯混凝土裂缝条数逐渐增多 ,在管道裂缝断面混凝土和钢丝达到屈服强度 ,混凝土拉裂破坏 ,管道承载力丧失 ,此时的内水压力为管道的极限承载力^[9-10] .分析结果表明 ,笔者试验采用的 4 m 直径 PCCP 的初裂内水压为 1.2 MPa ,但由于试验设备和条件的限制(内置钢筒的刚度和试验的安全性) ,管道没有达到极限内水压 ,但显然极限内水压大于 1.6 MPa.

4 结 语

笔者对南水北调京石段输水工程超大口径 PCCP 进行承载能力现场原型试验 ,提出了内水压承载能力试验的测试方法 ,总结得出了 PCCP 内水压破坏特征 :PCCP 在内水压作用下 ,首先是砂浆保护层上出现裂缝 ,随着内水压增大 ,管端管芯混凝土出现裂缝 ,裂缝首先在砂浆保护层上沿着纵向扩展 ,继而管端混凝土沿着厚度方向扩展 ;从试验结果看 ,PCCP 的开裂内水压(1.2 MPa)高于设计工作内水压(0.6 MPa) ,设计偏于安全 ,具有一定的安全储备 .此外 ,笔者基于试验现象与结果 ,分析了 PCCP 内水压承载机理 :PCCP 较普通混凝土管承载力的提高是

由于预应力钢丝的作用 ,其发挥了混凝土抗压不抗拉的特性 ,其极限内水压是钢丝的屈服和混凝土的最终拉裂破坏 ,此种管道形式发挥了组合结构中各材料的性能(钢丝受拉 ,混凝土受压 ,钢筒防渗) ,节省了成本 ,以利于在国家基础建设中广泛应用 .

致谢 北京水利规划设计研究院、清华大学、中国水利水电科学研究院、北京河山引水管业有限公司等单位共同参与了部分试验工作 ,在此表示感谢 !

参考文献 :

- [1] 周冠洋 ,孙海良 .PCCP 管在我国的研制和应用[J] .制冷空调与电力机械 ,2001 22(1) :25-28.
- [2] 潘一毅 .预应力钢筒混凝土管回顾与展望[J] .混凝土与水泥制品 ,2004(6) :30-31.
- [3] 温开亮 .PCCP 的发展和运用[J] .山西水利科技 ,2005 (1) :86-87.
- [4] 孙绍平 ,王贵明 .预应力钢筒混凝土管的特性[J] .市政技术 ,2006(24) :121-125.
- [5] 张树凯 .预应力钢筒混凝土管发展与前景展望[J] .混凝土与水泥制品 ,2007(2) :25-29.
- [6] 余洪方 ,沈丽华 .国内预应力钢筒混凝土管技术现状调查与分析[J] .混凝土与水泥制品 ,2005(1) :26-29.
- [7] GB/T 19685—2005 预应力钢筒混凝土管[PCCP] S.
- [8] 胡少伟 ,沈捷 ,游日 .预应力钢筒混凝土管裂缝分析与防治措施研究[J] .灌溉排水学报 ,2008(6) :127-128.
- [9] 秦杰 .钢衬钢筋混凝土压力管道施工期、运行期性能及其改性研究[D] .大连 :大连理工大学 ,2002.
- [10] 李晓克 .预应力混凝土压力管道受力性能与计算方法的研究[D] .大连 :大连理工大学 ,2003.

(收稿日期 :2009-04-03 编辑 :高建群)

· 简讯 ·

水工模型试验和原型观测技术国际研讨会将在南京召开

随着量测与控制技术的快速发展 ,物理模型试验和原型观测技术取得了长足进步 ,同时也促进了水科学研究水平的不断提高 .为了适应当前试验手段和测试技术发展的需要 ,由南京水利科学研究院将主办的水工模型试验和原型观测技术国际研讨会(International Symposium on Hydraulic Physical Modeling and Field Investigation)将于 2010 年 9 月 13 ~ 15 日在南京召开 .本次国际研讨会还将邀请国内外有关单位参加同期举行的技术展览 ,为物理模型试验与原型观测技术新进展、新思路提供重要技术交流与展示平台 .

会议议题如下 :①物理模型试验新技术 :包括水工、河工、港工模型试验 ,地表水与地下水模拟 ,泥沙输运及河床演变 ,河口海岸演变和波浪运动 ,污染物、盐、热等的传输与传导 ,溃坝模拟技术 ,相似理论和缩尺效应等 7 个方面的内容 ;②原型观测新技术 :包括内陆水域、河口和海洋原型观测 ,水环境、生态系统和修复工程原型观测 ,洪水、飓风、冰雪和灾害等极端条件下的原型观测 ,水利工程长期监测和控制技术 ,模型试验和原型观测的对比等 5 个方面的内容 ;③测量仪器与设备 :包括室内试验和野外测量设备 ,水力学测量传感器技术和设备 ,水环境和生态测量新技术 ,数据采集和传输技术等 4 个方面的内容 ;④复合模型(物模 + 数模)技术 :包括物理模型与数学模型耦合技术 ,多进程、数据驱动的模拟技术 ,与模型试验相关的其他方法等 3 个方面的内容 .会议网址 :www.ishpf2010.cn.

(本刊编辑部供稿)