

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.05.018

预应力钢丝松弛对超大口径 PCCP 承载能力的影响

张 玲¹ 沈 捷^{2,3} 胡少伟²

(1. 安阳工学院土木建筑工程学院 河南 安阳 455000 ; 2. 南京水利科学研究院 江苏 南京 210024 ;
3. 江苏吕四海洋经济开发区 江苏 启东 226200)

摘要 :以南水北调中线工程为背景 ,利用光纤光栅计测取预应力钢丝实际松弛量。基于试验结果 ,采用非线性有限元法建立了 PCCP 承载数值计算分析模型 ,进行了钢丝预应力松弛对 PCCP 承载能力的影响研究。计算结果表明 :在正常使用极限状态和弹性极限状态下 ,PCCP 内压值随预应力松弛量的增加而减小 ,在承载能力极限状态时 PCCP 内压值保持不变。基于现场测试结果和计算结果 ,评价了预应力松弛对 PCCP 承载能力的影响 ,为 PCCP 的生产和运行积累了工程经验 ,为制定超大口径 PCCP 标准以及质量验收提供依据。

关键词 :预应力钢筒混凝土管道(PCCP) ;预应力钢丝松弛 ;管道承载能力 ;极限状态

中图分类号 :TV148 文献标识码 :B 文章编号 :1006-7647(2010)05-0069-04

Influences of relaxation of prestressed steel wires on bearing capacity of prestressed concrete cylinder pipes with large calibers//ZHANG Ling¹ , SHEN Jie^{2,3} , HU Shao-wei² (1. Civil and Architectural Engineering Department of Anyang Institute of Technology , Anyang 455000 , China ; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210024 , China ; 3. Jiangsu Lisi Marine Economy Development Zone , Qidong 226200 , China)

Abstract : With regard to the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion , the relaxation of prestressed steel wires was measured by use of fiber bragg grating gauges . A mathematical model for the bearing capacity of prestressed concrete cylinder pipes (PCCPs) was established on the basis of the test results by means of nonlinear finite element methods . The influences of relaxation of prestressed steel wires on the bearing capacity of PCCPs were analyzed . The calculated results show that the bearing capacity of PCCPs decreases with the increase of relaxation of steel wires under the working and elastic limit states , and it keeps unchanged under the limit state of strength . The influences of relaxation of prestressed steel wires on the bearing capacity of PCCPs were evaluated based on the test and calculated results so as to gather experience for manufacture and construction of PCCPs with large calibers and to provide a basis for preparation of the relevant criteria .

Key words : prestressed concrete cylinder pipe ; relaxation of prestressed steel wire ; bearing capacity ; ultimate state

预应力钢筒混凝土管道(PCCP)是由预应力钢丝、钢筒、混凝土等材料复合组成的管道^[1] ,各节管道由承插口相衔接而连成管线。PCCP 作为一种新型组合结构形式 ,以其承载能力高、经济性、适用范围广、寿命长、安装方便、抗震性能好、运行费用低等一系列技术经济先进性而被一批国内外长距离输水工程所采用 ,如已建成的国内山西万家寨引黄工程、南水北调中线京石段引水工程和国外正在修建的利比亚“人工大运河”工程^[2-3]。

在 PCCP 组合结构中 ,高强钢丝以预先设计的拉应力螺旋式缠绕在管芯上 ,使管芯产生均匀的预压应力以抵抗内水压 ,从而提高 PCCP 的抗裂能

力^[4]。预应力钢丝的松弛指预应力钢丝受到一定的张拉力后 ,在长度和温度保持不变的条件下预应力钢丝的拉应力随时间增长而降低的现象。从受力机理可以看出 ,预应力钢丝无疑是 PCCP 管体强度的保证 ,是整个管道的主要受力体 ,管道能满足 50—100 年设计年限的关键取决于预应力钢丝的寿命。然而由于生产制造过程过长、PCCP 堆放时间过久以及长期运行等原因 ,预应力钢丝存在不同程度的松弛现象 ,从而可能影响整个管道的抗裂能力。

为了考虑预应力钢丝的松弛因素 ,笔者测取实际缠丝 PCCP 放置 270 d 后钢丝的真实应力 ,在缠丝完成后即在钢丝上粘贴光纤光栅应变计 ,然后喷涂

基金项目 :国家自然科学基金(50879048)

作者简介 :张玲(1968—) ,女 ,河南开封人 ,副教授 ,博士研究生 ,从事混凝土结构理论及工程加固技术研究。E-mail :jgxzh1@163.com

砂浆保护层,放置一段时间后通过测取光纤光栅上的读数变化得知钢丝应变的变化,从而反映到钢丝应力的变化。基于测得的钢丝应力松弛数据进行有限元数值计算,分别计算了预应力钢丝松弛100 MPa、200 MPa、300 MPa 后的内水压承载情况,从而为长期放置 PCCP 的应用以及为 PCCP 结构安全提供合理的评价。

1 现场试验

1.1 试件成型

本次 PCCP 成型在北京河山引水管业有限公司现场成型,管子内径为 4 m,在成型过程中严格按规范制作,制作过程如下:承插口接头制作、钢筒制作、管芯混凝土浇筑、预应力钢丝缠丝、水泥砂浆保护层喷涂,钢丝预应力以钢丝 75% 的屈服强度(1 177 MPa)施加。整个 PCCP 结构的几何尺寸如下:管道内径为 4 000 mm,砂浆厚度为 25 mm,钢筒厚度为 2 mm,管芯厚度为 300 mm,钢丝直径为 7 mm,缠丝间距为 14.3 mm。

1.2 现场试验

1.2.1 光纤计布置

预应力钢丝较细,为了准确获取钢丝上的应力松弛量,采用光纤光栅应变计测取钢丝应力。在缠好预应力钢丝的半成品管上安装传感器,安装用的钢丝用酒精清洁干净,将光纤光栅直接粘贴于钢丝上,两端尾纤加套管保护。每节管沿周向共布设 4 个监测断面,各断面间隔 90°分布。每个监测断面布置 2 支光纤光栅应变计和 1 支光纤光栅式温度传感器,温度计用于环境温度测量。各纵断面传感器用单芯铠装光缆连接,从管端头引出 4 个纵断面监测仪同时构成 2 个应变观测横剖面。粘好传感光栅的 PCCP 外层喷涂水泥砂浆,待砂浆喷好尚未固化时将每组传感光栅两端尾纤拉出水泥砂浆外,以便监测光栅读数。光纤计算布置见图 1。

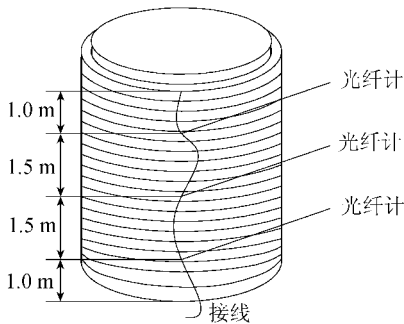


图 1 光纤计布置示意图

1.2.2 试验结果

图 2 及图 3 分别列出了 2 根不同管号的 PCCP 成型放置 270 d 的应变松弛情况,为方便数据分析说

明,对图中所示的 PCCP 预应力损失监测光栅按一定规则进行编号:caicj(表示环向测点,插口端起沿轴向第 i 个、顶部起逆时针第 j 个光栅)。由于试验采用的是裸光栅直接粘于钢丝上,粘好后在钢丝外侧进行混凝土保护层喷涂,受试验条件所限,无法屏蔽混凝土对光栅的应力作用,光栅在监测钢丝变形的同时也会受到混凝土对其产生的应力作用,加之在搬运过程中混凝土保护层也无法屏蔽所有外力的影响,因此影响光栅波长变化的因素较多,这些因素包括钢丝的变形、混凝土的变形以及搬运等各种外力对光栅波长产生的影响,这样也导致每根 PCCP 上 8 个测点的数据不完整(部分光纤计可能在搬运过程中损坏),因此仅列出保存完好的光纤光栅的应变变化情况(图 2、图 3)。从图 2、图 3 可以看出,PCCP 松弛数据的波动性大,松弛量基本在 200 ~ 1 000 个微应变之内,但数据具有一定的规律性,每根 PCCP 钢丝的松弛量都基本一致。由于钢丝都处于弹性范围,因此可以算出松弛应力范围大致在 40 ~ 200 MPa 之内。试验所得数据可为下面的数值计算提供依据^[5-6]。

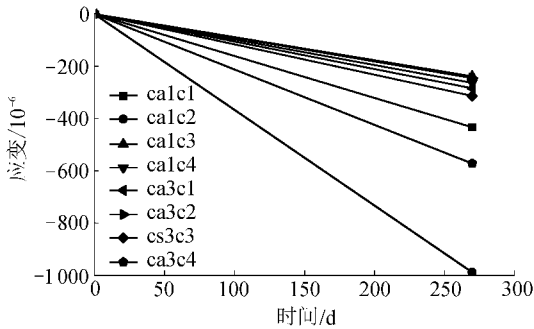


图 2 管 1 测试结果

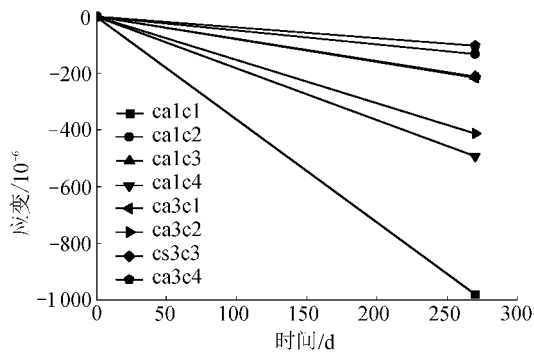


图 3 管 2 测试结果

2 PCCP 承载能力计算

2.1 控制标准

为了明确表示断丝后 PCCP 的受力状态,笔者结合美国 ANSI/AWWA C304—99 设计规范中的设计标准,将 PCCP 受力状态按 3 个极限状态进行控制分析^[1] ①正常使用极限状态。管道处于正常工作状

态 控制工作荷载和内压作用下管芯混凝土出现微裂缝。笔者以管芯混凝土局部出现受拉损伤作为工作极限状态。②弹性极限状态。控制 PCCP 在瞬时条件下开裂 即保持 PCCP 具备足够的弹性以防止发生破坏。笔者以钢管开始屈服作为弹性极限状态。③承载能力极限状态 控制 PCCP 在外荷载和内压作用下管子破坏 保证 PCCP 能抵御钢丝屈服。笔者以预应力钢丝开始屈服作为强度极限状态。

2.2 预应力钢丝模拟

PCCP 承载能力的提高主要依赖于钢丝预应力的施加,为了使分析模型能够更直观并更好地对断丝进行数值模拟,对钢丝用杆单元来模拟。由于 PCCP 钢丝细、间距小,采用等效面积法将 5 根钢丝合成 1 根钢丝模拟。钢丝预应力的施加采用等效降温法^[7-8]来施加 PCCP 预应力,利用钢丝的热胀冷缩特性对其进行降温,使之达到所需要的应力。试验中所用的预应力钢丝初始应力为 75%的钢丝屈服强度。

2.3 材料参数

对混凝土采用塑性损伤模型模拟。其破坏机制是拉裂和压碎,只要围压高到足够防止裂纹扩散,混凝土的脆性便会消失,混凝土的宏观响应也就类似于硬化的延性材料,其损坏是在破坏面或屈服面上屈服和流动^[9-10]。对钢材采用双线性模型模拟,具体的材料参数如下:混凝土弹性模量为 36 GPa,砂浆弹性模量为 23.4 GPa,钢材弹性模量为 206 GPa,混凝土泊松比为 0.2,抗压强度为 38.5 MPa,抗拉强度为 2.84 MPa,砂浆抗压强度为 31.5 MPa,抗拉强度为 2.64 MPa,钢丝极限强度为 310 MPa。

2.4 计算结果

2.4.1 混凝土损伤

图 4 仅给出了钢丝应力松弛 200 MPa 时混凝土

达到工作、弹性、强度各极限状态的应力云图。从图 4 可以看出,对于实际埋置的 PCCP,在内水压作用下,混凝土发生损伤开裂首先出现于管底内侧,随着内水压增大,损伤不断扩大,当达到弹性极限状态时混凝土已发生全面损伤开裂,与承载能力极限状态时的损伤开裂相似。

2.4.2 钢丝应力

图 5 给出了预应力钢丝松弛 200 MPa 下达到正常使用极限状态时钢丝的受力情况。从图 5 可以看出,在正常使用极限状态下,钢丝应力为 612 MPa,远小于钢丝的屈服强度,因此,在正常工作压力下钢丝的应力还有安全储备,随着内水压加大,钢丝应力不断增大,并最终达到钢丝屈服,此时整个 PCCP 完全破坏。

2.4.3 内水压承载结果

笔者计算了实际埋置 PCCP 在不同预应力松弛量下达到各极限状态的内水压值。图 6 为内水压值与不同预应力钢丝松弛量的关系曲线。从计算结果可以看出,随着预应力松弛量的增大,PCCP 在正常使用极限状态和弹性极限状态下的内水压值不断降低,而在承载能力强度极限状态的内水压保持不变,这是因为预应力松弛不会影响钢丝的最终屈服强度,在预应力松弛一定量的情况下,计算出的内水压仍大于其工作压力,因此仍可使用。

3 结 语

PCCP 充分发挥了材料特性,利用钢丝预应力来提高其抗裂能力,而对于长期放置 PCCP 可能造成不同程度的预应力松弛现象,影响其运行。笔者对实际成型的 PCCP 测取放置 270 d 后的钢丝应变情

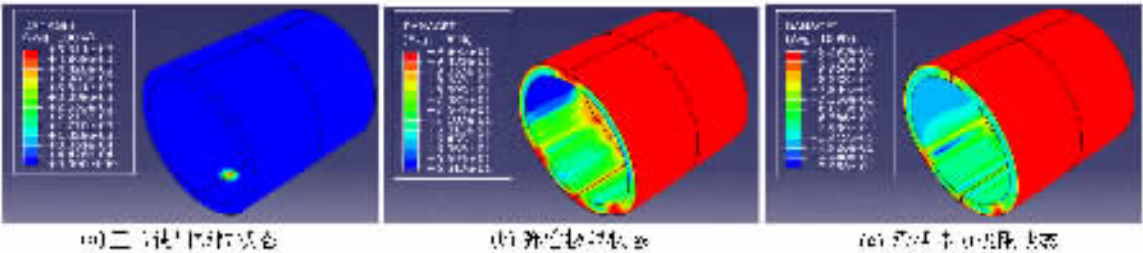


图 4 预应力松弛 200 MPa 时各极限状态混凝土损伤云图

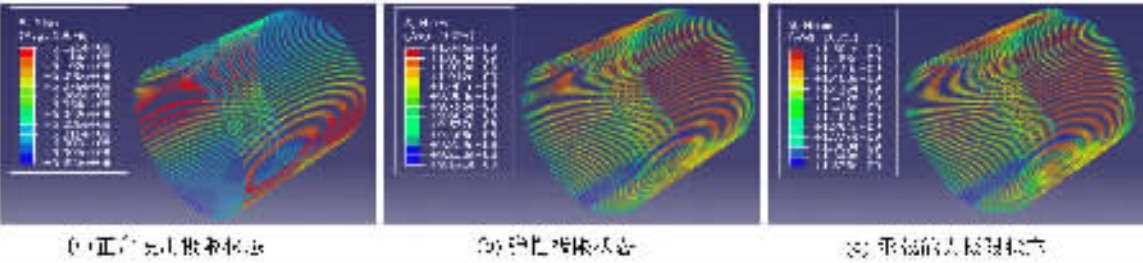


图 5 预应力松弛 200 MPa 时各极限状态钢丝受力云图(单位:Pa)

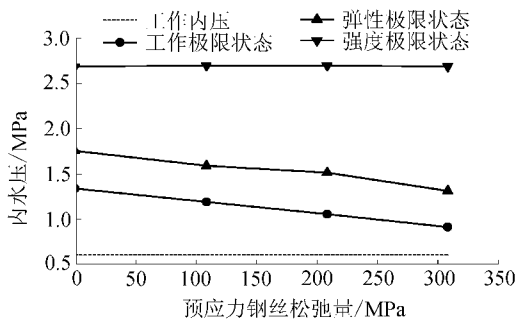


图6 内水压~预应力钢丝松弛量关系曲线

况,得出钢丝预应力松弛范围。基于试验结果,结合美国 ANSI/AWWA C304—99 设计规范,计算出不同钢丝预应力在不同松弛量下的内水压值,从而确定结构的受力状态。计算结果可为工程设计与维护提供指导,为规范标准制定提供参考意义。

参考文献:

[1] ANSI/AWWA C304—99 Standard for design of prestressed concrete cylinder pipe[S].

[2] 温开亮. PCCP 的发展和运用[J]. 山西水利科技, 2005 (1): 86-87.
[3] 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.
[4] 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.
[5] 胡少伟, 沈捷, 刘晓鑫, 等. 超大口径 PCCP 管内水压承载能力试验[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(5): 9-14.
[6] 胡少伟, 沈捷, 刘晓鑫, 等. 超大口径 PCCP 管外载试验研究[J]. 水利水电技术, 2009(12): 31-33.
[7] 熊欢, 丁凯, 李鹏辉, 等. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的计算方法[J]. 水利水电技术, 2009(11): 28-32.
[8] 张彩秀. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2005.
[9] 艾亿谋, 杜成斌, 洪永文, 等. 混凝土坝抗震加固中钢筋混凝土的动力本构模型[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 289-295.
[10] 胡少伟. 南水北调超大钢筒混凝土管道结构安全评估[J]. 水利水运工程学报, 2010(1): 74-82.

(收稿日期: 2010-04-15 编辑: 高建群)

(上接第 68 页)

措施对于该车站结构温度裂缝的限制效果不明显,降低混凝土水化热和提高混凝土早期强度是防止温度裂缝最有效的办法。本文主要从理论和数值上分析混凝土早期热-力学性能对大体积混凝土结构的影响,对于材料参数的确定主要采用以往工程的经验。因此,对于混凝土早期热-力学模型中材料参数的精确确定需要进行进一步的试验研究。

参考文献:

[1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
[2] 张子明, 郭兴文, 杜荣强. 水化热引起的大体积混凝土墙应力与开裂分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(5): 12-16.
[3] 冯树荣, 胡志奇, 何建平, 等. 基于施工条件的龙滩碾压混凝土重力坝温度应力仿真分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 57-61.
[4] 宋智通, 张子明, 陈金杭. 基于细观尺度的混凝土绝热温升预测[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 819-823.
[5] 郑丹, 李文伟. 预测全级配大坝混凝土弹性模量的三相模型[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(4): 14-17.
[6] 张子明, 宋智通, 黄海燕. 混凝土绝热温升和热传导方程的新理论[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(3): 1-6.
[7] de LARRARD F, ACKER P, ROY R L. Shrinkage creep and thermal properties[C]//SHAH S P, AHMAD S H. High

Performance Concrete: Properties and Applications. New York: McGraw Hill Inc, 1994: 65-114.

[8] COPELAND L E, KANTRO D L, VERBECK G. Chemistry of hydration of portland cement[C]//United States Department of Commerce. Proceedings of Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement. Washington D. C.: Portland Cement Association, 1960: 429-465.
[9] BAZANT Z P. Constructive equation for concrete creep and shrinkage based on thermodynamics of multi-phase system[J]. Materials and Structures, 1970, 3(1): 3-36.
[10] 闫东明, 林皋. 三向应力状态下混凝土强度和变形特性研究[J]. 中国工程科学, 2007, 9(6): 64-70.
[11] TANK R E, CARINO N J. Rate constant function for strength development of concrete[J]. ACI Material Journal, 1991, 88(1): 74-83.
[12] BAZANT Z P. Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus method[J]. ACI Material Journal, 1972, 69(2): 212-217.

(收稿日期: 2009-11-25 编辑: 高建群)

