

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.02.017

PCCP 管道结构承受内水压的全过程分析

胡少伟^{1,2}, 刘晓鑫^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要 通过分析与推导,研究预应力钢筒混凝土管(PCCP)承受内水压荷载下的全过程。将 PCCP 承受内水压荷载从弹性到屈服分为 3 个阶段:①弹性阶段;②混凝土开裂阶段;③钢丝屈服阶段。在混凝土开裂阶段建立正交异性模型,计算混凝土的应力,递推钢丝的应力,从而以判断钢丝的屈服来判断 PCCP 的屈服,最后得出 PCCP 混凝土的开裂内水压荷载以及钢丝屈服时的内水压值,并与试验进行了比较。

关键词 预应力钢筒混凝土管(PCCP) 内水压 正交异性模型 钢丝屈服

中图分类号 :TV134 ;TU528.73 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2011)02-0071-03

Whole process analysis of prestressed concrete cylinder pipes under internal load//HU Shao-wei^{1,2}, LIU Xiao-xin^{1,2}
(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210024, China)

Abstract :Based on the analysis and theoretical derivation, the whole process of prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) under internal load was investigated. The process of PCCP under internal load from the elasticity to the wire yield was divided into three stages : (1) elastic stage ; (2) concrete cracking stage ; (3) wire yield stage. An orthotropic model was established for the concrete cracking stage, and the stress of the concrete was calculated and that of the wires was inversed so as to judge yield of PCCP based on yield of wires. The internal loads both at the concrete cracking stage and the wire yield stage were obtained and compared with the experimental ones.

Key words :prestressed concrete cylinder pipe ; internal load ; orthotropic model ; wire yield

预应力钢筒混凝土压力管(PCCP)是由预应力钢丝、钢筒、混凝土等材料复合组成的管道^[1]。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、基本不漏水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,如南水北调中线京石段引水工程^[2-3]。

以承受内水压荷载的 PCCP 为研究对象,通过理论推导与分析,进行了 PCCP 承受内水压由弹性到开裂再到钢丝屈服的全过程分析。通过与试验进行对比,能够估算内水压试验的混凝土开裂以及钢丝屈服时的荷载,从而为 PCCP 结构的设计提供依据。

1 理论推导

1.1 弹性阶段的理论分析

将 PCCP 简化为图 1 所示的 2 层相互嵌套的圆

筒,分别为混凝土层和钢丝折算层。

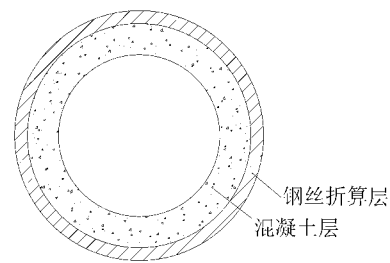


图 1 PCCP 分层示意图

由于钢筒的厚度仅为 2 mm,所以在承载计算中可以忽略钢筒的作用。对于承受内水压的 PCCP 的计算问题,在内压作用下可以简化成多层轴对称计算问题,轴对称问题的内压荷载分配公式可按平面应变问题处理,采用折算的弹性模量数 E' 和泊松比 μ' 如下:

$$E' = \frac{E}{1 - \mu^2} \quad \mu' = \frac{\mu}{1 - \mu^2} \tag{1}$$

基金项目 国家自然科学基金(50879048)
作者简介 胡少伟(1969—),男,河南杞县人,博士,教授级高级工程师,从事水工结构与材料性能分析研究。E-mail :hushaowei@nhri.cn

假定 2 个互相嵌套的厚壁圆筒之间无径向间隙,是一个“完全接触”问题,两者之间没有相对位移和滑动,在接触面上的边界条件为正应力 $\sigma_{r1} = \sigma_{r2}$,径向位移 $u_1 = u_2$ 。

1 个单独的厚壁圆筒,内外壁分别受均匀内水压力 q_a 和 q_b ,内壁和外壁半径分别为 a 和 b ,其径向位移 u 为^[3]

$$u = \frac{1 - \mu'}{E'} \frac{(q_a a^2 - q_b b^2) r}{b^2 - a^2} + \frac{1 + \mu'}{E'} \frac{(q_a - q_b) a^2 b^2}{(b^2 - a^2) r} \tag{2}$$

在这个厚壁圆筒外再嵌套 1 个内径为 b 、外径为 c 的厚壁圆筒。在 $r = b$ 处,内筒承受的接触应力 q_b' 与外筒承受的接触应力 q_b'' 相等,即 $q_b' = q_b''$,内筒的径向位移 u' 应等于外筒 $r = b$ 处的径向位移 u'' ,即 $u' = u''$,代入式(2)中,得到 q_b 的表达式^[4]：

$$q_b = \frac{2 a^2 (c^2 - b^2) E_2' q_a}{A (b^2 - a^2) + B (c^2 - b^2)} \tag{3}$$

其中

$$A = E_1' [(1 - \mu_2') b^2 + (1 + \mu_2') c^2]$$

$$B = E_2' [(1 + \mu_2') a^2 + (1 - \mu_1') b^2]$$

式中： c 为圆筒半径,如图 2 所示； E_1' 和 E_2' 分别为内、外筒的折算弹性模量； μ_1' 和 μ_2' 分别为内、外筒的折算泊松比,由式(1)计算得到。

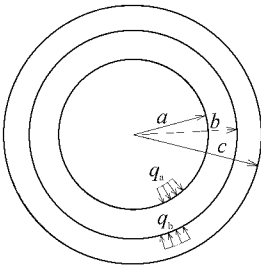


图 2 圆筒计算简图

当得到第 2 层上的 q_b 后,钢丝折算层上的应力可以由拉梅公式^[3]进行计算：

$$\sigma_{\theta} = \frac{\frac{c^2}{r^2} + 1}{\frac{c^2}{b^2} - 1} q_b \tag{4}$$

$$\sigma_r = - \frac{\frac{c^2}{r^2} - 1}{\frac{c^2}{b^2} - 1} q_b \tag{5}$$

式中： σ_{θ} 、 σ_r 分别为钢丝(或混凝土)的环向应力和径向应力。

1.2 混凝土的开裂判断准则 Kupfer 判据

对于 PCCP 问题,可以简化为平面应变问题,即双轴应力问题。所以引进 Kupfer 判据^[4]来判断混凝土是否开裂。

Kupfer 根据双轴最大应力包络图给出了混凝土二维强度判据的函数表达式：

$$\sigma_{ti} = \begin{cases} f_t' & \text{拉-拉区} \\ \left(1 + 0.8 \frac{\sigma_2}{f_c'}\right) f_t' & \text{拉-压区} \\ - \frac{1 + 3.65 \alpha}{(1 + \alpha)^2} f_c' & \text{压-压区} \end{cases} \tag{6}$$

$$\sigma_{c1} = \alpha \sigma_{c2} \tag{7}$$

式中： σ_{ti} 为抗拉峰值应力； σ_{c1} 、 σ_{c2} 为抗压峰值应力； α 为应力比系数； f_t' 为单轴抗拉强度； f_c' 为单轴抗压强度。

承受内水压的 PCCP 混凝土属于拉-压区,由式(4)计算得到混凝土的环向应力 σ_{θ} 后,可用式(6)来判断混凝土的状态。

1.3 混凝土开裂后的分析计算

1.3.1 混凝土开裂后的计算模型

大量试验资料表明,在管道混凝土出现若干径向裂缝后,混凝土基本丧失环向上的强度,但仍然可以继续传递径向应力^[4],内水压荷载主要由钢丝承担。混凝土的这种状态可以用正交异性体来模拟。所谓正交异性体,是指如果取裂缝方向作为一个局部坐标轴方向,那么沿坐标轴的 2 个正交方向上混凝土具有不同的物理力学性质^[4-5]。

对于 PCCP,由于混凝土层只有 30 ~ 40 cm 厚,所以混凝土开裂但未裂穿是一种很不稳定的状态,会迅速出现径向的通缝,其数目增加,钢丝应力增大,国内外实验资料均表明,混凝土出现通缝后并不是结构的破坏状态。裂穿后,混凝土仍然可以起到传递内水压的作用,直到钢丝屈服才导致结构破坏^[3-4,6]。

1.3.2 混凝土开裂后公式的推导

本文从正交异性体的基本微分方程入手,推导出混凝土开裂后的显式计算公式。把具有径向裂缝的混凝土圆环作为正交异性体处理,同时假设：①钢与混凝土之间有完全的黏结,二者变形相容；②忽略泊松比的影响,即 $\mu_{\theta} = 0$ 。

混凝土处于完全裂穿后,问题可以简化为开裂混凝土层和钢丝层,如图 3 所示。把开裂的混凝土处理为正交异性体,所谓正交异性体是认为在垂直于引起开裂的拉应力方向形成了无数条小裂纹,这些裂纹是平行的,或是相交于极坐标原点的射线^[3]。在此认为垂直裂纹方向已丧失承载能力,其环向弹性模量 $E_{\theta} = 0$,而开裂混凝土仍然可以传递径向应力,并假设径向弹性模量 E_r 仍保持混凝土弹性模量的原有量值 E_c 。

开裂混凝土的极坐标平衡方程为

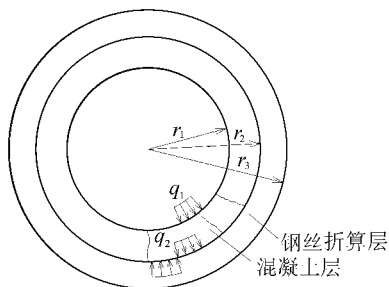


图3 混凝土开裂后计算简图

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (8)$$

几何关系和物理方程(假设 $\mu_\theta = 0$) 分别为

$$\epsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad \epsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (9)$$

$$\sigma_r = E_r \epsilon_r \quad \sigma_\theta = E_\theta \epsilon_\theta \quad (10)$$

式中: ϵ_θ 为环向应变; ϵ_r 为径向应变。

把式(9)(10)代入式(8)并引入正交异性条件 $E_\theta = 0, E_r = E_c$, 得到

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} = 0 \quad (11)$$

式(11)的通解是

$$u = A \ln r + B \quad (12)$$

把式(12)代入式(9)(10)后有

$$\epsilon_r(r) = \frac{A}{r} \quad (13)$$

$$\sigma_r(r) = E_c \frac{A}{r} \quad (14)$$

引进边界条件, 当 $r = r_1$ 时, $\sigma_r = q_1$; 当 $r = r_2$ 时, $\sigma_r = q_2$ 。由此可以得到

$$A = \frac{q_1 r_1}{E_c} = \frac{q_2 r_2}{E_c} \quad (15)$$

所以可以得到混凝土开裂后作用在钢丝层上的压力为

$$q_2 = q_1 \frac{r_1}{r_2} \quad (16)$$

求得 q_2 后, 钢丝上的环向应力 $\sigma_{\theta s}$ 可由式(17)求出:

$$\sigma_{\theta s} = \frac{q_2 r_2}{t_2} \quad (17)$$

式中: t_2 为环向钢丝的折算厚度, $t_2 = F_a (N/100)$; F_a 为每根环向钢丝的截面积; N 为每延米钢丝的数目。

开裂混凝土的径向应力可由式(18)求得

$$\sigma_{rc} = \frac{q_1 r_1}{r} \quad (18)$$

根据上述推导可以由钢丝的环向应力来判断钢丝是否达到屈服, 并判断 PCCP 是否进入屈服阶段。

2 算例与试验结果对比

2.1 内水压试验

内水压承载试验在北京河山管业有限公司生产

现场完成。结构试验荷载只考虑内水压力, 采用套筒式的加压装置, 套筒由若干个钢架组成, 因而具有足够的刚度, 套筒下侧与底座固定, 加压内套筒外直径为 3800 mm, PCCP 与内套筒间为 100 mm 的加压空腔, 两端均用橡胶密封圈密封, 形成一个密封的加压空腔, 在管道的两侧用钢构件法兰盘将内套筒固定, 用加压泵将水注入加压空腔模拟内水压力, 试验中采用油压系统加压, 以 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa, 1.0 MPa, 1.2 MPa, 1.4 MPa, 1.6 MPa 分级加载^[7]。

2.2 计算结果与对比

PCCP 的几何尺寸如下: 管道内径为 4000 mm, 钢筒外径为 4183 mm, 管芯厚度为 300 mm, 钢丝直径为 7 mm, 缠丝面积为 2691 mm², 缠丝间距为 14.30 mm。材料参数如下: ①弹性模量: 混凝土为 28958 MPa, 预应力钢丝为 193050 MPa; ②泊松比: 混凝土为 0.167, 预应力钢丝为 0.3; ③单轴受拉强度: 混凝土为 4.018 MPa, 预应力钢丝 2050.6 MPa; ④单轴受压强度: 混凝土为 48.0 MPa, 预应力钢丝为 410 MPa。

根据前面的理论推导, 为提高计算效率编制相应的程序, 将 PCCP 的几何尺寸和材料参数代入程序中, 经计算得到 PCCP 的开裂荷载为 1.16 MPa, 钢丝的屈服荷载为 2.66 MPa。可以看出, 计算的开裂荷载比试验值小 1.4 MPa^[7-10], 这是因为在计算中没有考虑钢丝的预应力以及钢筒的作用。而钢丝的屈服荷载与文献[7]中计算得到的 2.68 MPa 相差较小, 表明本文的计算结果有一定的精度。

混凝土和钢丝的应力如图 4 所示 (p 为荷载)。

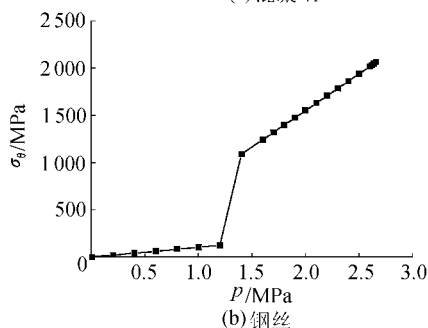
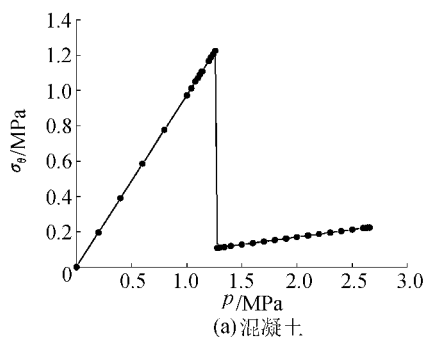


图4 环向应力计算结果

(下转第 88 页)

大之外,后期的投入很少,当测点多于 500 个时则比传统电测技术更经济。

c. 该测量方法可能存在的问题及解决方案。由于所处环境为水体,因此需要考虑水体可能对光纤产生的不利影响。①光纤的腐蚀问题,水体对光纤外包的塑料或者金属铠均有腐蚀作用,特别是酸性较高的水体。因此,在布置之前需要对光纤进行防腐处理,在外包材料中添加抗腐蚀材料,增加其抗腐蚀性。②冲刷侵蚀性问题,库水中挟带的泥沙会对光纤产生冲刷,逐渐侵蚀光纤外包材料,从而导致光纤断裂。为了防止冲刷,可以将光纤适当埋入坝体内一定深度,或者在光纤外面布置抗冲刷垫层。③库水中的鱼类以及较大固体物对光纤的牵绊影响。在布设光纤的时候一定要注意光纤的牢固固定,以免锚固失效导致光纤被拉断。

5 结 论

a. 基于分布式光纤温度传感技术的库水温度测量方法具有可靠性好、精度高、连续线性测量等优点,能快速、实时、自动地完成库水温度的测量,是一

种比传统库水测温仪器先进的测量方法。

b. 通过多次测量结果分析,发现测量数据具有很好的重复性与稳定性,证明该技术用于库水温度测量是可行的。

c. 通过对库水温度的实际测量,发现库水温度曲线可以分为 3 个阶段,即快速下降段、缓慢下降段与温度稳定段,且库水温度在距水面约 60 m 以下保持基本不变。

参考文献：

[1] 袁琼.高拱坝近坝库水温度分布研究[D].武汉:武汉大学,2004.
[2] 肖衡林,鲍华,何俊.分布式光纤温度传感技术在水电工程中的应用[J].长江科学院院报,2009,26(S1):104-107.
[3] 丁涛.光纤传感技术监测百色碾压混凝土坝温度场[D].宜昌:三峡大学,2005.
[4] 邹建.分布式光纤温度测量系统关键技术研究[D].重庆:重庆大学,2005.
[5] 肖衡林.渗漏监测的分布式光纤传感技术的研究与应用[D].武汉:武汉大学,2006.

(收稿日期 2010-06-17 编辑 方宇彤)

(上接第 73 页)

由图 4 中可以看出在混凝土层开裂后,混凝土层的径向应力有明显的减小,而钢丝上的环向应力有明显的增大,这与试验中测得的钢丝的应变变化规律(图 5^[7])相符。

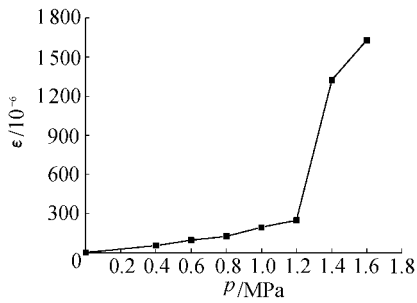


图 5 试验测得的钢丝应变

3 结 语

本文的理论推导及计算模型简单直观,并通过正交异性模型考虑混凝土的开裂。当混凝土开裂后,不考虑混凝土在环向的承载能力,通过递推公式推导出钢丝上的应力,从而依据钢丝的屈服来判断 PCCP 的承载形态。将计算结果与试验结果进行比较,可以看出计算结果满足一定的精度要求,能为 PCCP 的大型数值计算和内水压试验提供一定的参考。本文方法没有考虑钢丝预应力作用以及钢管的

作用,在推导计算上还有待进一步的提高和完善。

参考文献：

[1] ANSL/AWWA C304—99 Standard for design of prestressed concrete cylinder pipe[S].
[2] 潘一毅.预应力钢管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 的发展和应用[J].山西水利科技,2005(1):86-87.
[4] 杨桂通.弹塑性力学[M].北京:人民教育出版社,2000.
[5] 董哲仁.钢衬钢筋混凝土压力管道设计与非线性分析[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
[6] 胡少伟.南水北调超大钢管混凝土管道结构安全评估[J].水利水运工程学报,2010(1):74-82.
[7] 张玲,沈捷,胡少伟.预应力钢丝松弛对超大口径 PCCP 承载能力的影响[J].水利水电科技进展,2010,30(5):69-72.
[8] 沈捷.超大口径 PCCP 结构安全性能试验与数值分析研究[D].南京:南京水利科学研究院,2010.
[9] 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.
[10] 胡少伟,沈捷,王东黎,等.超大口径预埋裂缝钢管混凝土管结构分析与试验研究[J].水利学报,2010,41(7):876-882.

(收稿日期 2010-08-30 编辑 高建群)