

DOI:10.11918/201906011

BCCP 内水压承载能力原型试验

孙岳阳^{1,2}, 胡少伟¹, 乔艳敏¹, 陆俊¹, 胡登兴³

(1. 南京水利科学研究院 材料结构研究所, 南京 210024; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210024;
3. 宁夏青龙管业股份有限公司, 银川 750004)

摘 要: 为了研究钢筋缠绕钢管混凝土压力管(BCCP)在内水压作用下的承载破坏特征, 设计了三个不同管径的 BCCP 内水压现场原型试验. 在管径 1 800 mm BCCP 的钢管、钢筋和混凝土保护层上布置环向应变片, 逐级施加内水压至 2.5 MPa, 得到了各部位在内水压作用下的受力变化规律. 主要结论如下: BCCP 从生产时施加预应力到承受内水压至最终破坏的受力过程可分为 5 个阶段. 1) 管芯受预应力钢筋环向作用力阶段. 缠筋后, 钢管与混凝土形成的管芯受到一个初始预压应力; 2) 保护层开裂前整管承受内水压弹性阶段. 对应于试验中内水压小于 1.5 MPa 的阶段, 管芯依然受压, 而预应力钢筋和外混凝土保护层受拉; 3) 保护层开裂, 管芯承受内水压弹性阶段. 试验中当内水压达到 1.6 MPa 后, 保护层开始达到抗拉强度开裂, 混凝土管芯也从初始的受压慢慢转变为受拉, 依然处于弹性状态; 4) 管芯开裂, 钢管和钢筋受拉弹性阶段. 当内水压达到 2.2 MPa 后, 管芯径向开裂, 但是钢管和钢筋的应力随内水压依然稳步增长; 5) 管道破坏阶段. 钢管和预应力钢筋达到最终屈服强度, 整管丧失承载能力. 研究成果可为 BCCP 在输调水工程中的推广使用以及相关标准的制定提供依据.

关键词: 钢筋缠绕钢管混凝土压力管(BCCP); 内水压; 试验; 应变; 承载能力

中图分类号: TV332 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)05-0171-08

Prototype test on the bearing capacity of BCCP under internal water pressure

SUN Yueyang^{1,2}, HU Shaowei¹, QIAO Yanmin¹, LU Jun¹, HU Dengxing³

(1. Materials & Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;
3. Ningxia Qinglong Pipes Industry Co. Ltd., Yinchuan 750004, China)

Abstract: In order to study the full-range failure process of bar-wrapped cylinder concrete pressure pipe (BCCP) under internal water pressure, tests on three prototype BCCPs with different diameters were designed. Annular strain gauges were arranged on the cylinder, steel bar, and concrete protective cover of the BCCP with a diameter of 1 800 mm, and the force response of each part under the action of internal water pressure was obtained by increasing the applied internal water pressure to 2.5 MPa step by step. It was found that the load-bearing process of BCCP from prestressing to ultimate failure could be divided into 5 stages. First, the concrete core was subjected to the force of the prestressed steel bar without protective cover. After being wrapped, the core formed by cylinder and concrete was subjected to an initial pre-compression stress. Second, the whole pipe was in the elastic stage before the protective cover cracked. It corresponded to the stage when the internal water pressure in the test was less than 1.5 MPa, and the core was still under pressure, while the prestressed steel bar and the outer concrete protective cover were under tension. Third, the concrete core was in the elastic stage after the protective cover cracked. When the internal water pressure arrived at 1.6 MPa, the cover reached the tensile strength and began to crack, and the concrete core also transformed from the initial compression to tension slowly and remained in elastic state. Fourth, the cylinder and the steel bar were in the elastic stage of tension after the concrete core cracked. As the water pressure arrived at 2.2 MPa, the concrete core cracked radially, but the stress of cylinder and bars still increased steadily with the internal water pressure. Fifth, the pipe was completely destroyed. The cylinder and the steel bars reached the ultimate yield strength, and the whole pipe lost its bearing capacity. The research results could provide basis for the popularization and application of BCCP in water transfer engineering and the formulation of relevant standards.

Keywords: bar-wrapped cylinder concrete pressure pipe (BCCP); internal water pressure; test; strain; bearing capacity

收稿日期: 2019-06-03
基金项目: 国家自然科学基金(51739008, 51527811)
作者简介: 孙岳阳(1992—), 男, 博士研究生;
胡少伟(1969—), 男, 教授, 博士生导师
通信作者: 胡少伟, hushaowei@nhri.cn

我国在 20 世纪 80 年代从国外引进预应力钢管混凝土管(Prestressed Concrete Cylinder Pipe, PCCP), 经过三十多年的发展, 该管型已广泛应用于我国各大市政、电力、水利等工程项目中. 但是, 近年

来 PCCP 发生破坏的事故也屡见不鲜,主要原因集中在反映在以下三点:1) 高强钢丝的脆化断裂,PCCP 主要使用光圆的 1 570 MPa 高强钢丝,是钢盘条经反复拉拔而成,钢的柔韧性大幅下降,而脆性增加,氢脆指标难以合格,使用几年后易出现脆化断裂,严重影响管道的安全运行和使用寿命^[1];2) 保护层的空鼓裂缝,PCCP 保护层采用辊射的砂浆保护层,厚度较薄,一般 25 mm 左右,吸水率较难合格,与较细光面高强钢丝的粘结力较差,易产生空鼓裂缝,从而腐蚀介质进入加速钢丝的腐蚀;3) 砂浆保护层的承载能力被高估,参考 JGJ/T 98—2010《砌筑砂浆配合比设计规程》^[2],水泥砂浆和预拌砌筑砂浆的强度等级最高为 M30,而国内外的 PCCP 相关规范规程中均要求保护层砂浆的抗压强度标准值不低于 45 MPa,远大于 M30 和 M15,强度难以满足,设计时计算校核虽然通过,但是往往忽略了实际砂浆强度不足带来的 PCCP 保护层先天隐蔽性缺陷^[3]. 这些问题严重影响了 PCCP 的正常运行,必须研发性能更加优越的新产品来满足输调水工程建设要求.

钢筋缠绕钢筒混凝土压力管 (Bar-wrapped Cylinder Concrete Pressure Pipe, BCCP) 就是针对解决上述 PCCP 的三个问题而研发的新产品,是由带钢筒的高强混凝土管芯在缠绕预应力钢筋后,再浇筑细石混凝土保护层制成的新型复合管材,结构如图 1 所示. 同样,BCCP 根据钢筒位置分为内衬式和埋置式^[4]. 内衬式 (BCCP-L),在钢筒内部浇筑混凝土形成管芯,钢筒外缠绕预应力钢筋,再浇筑细石混凝土保护层;埋置式 (BCCP-E),将钢筒埋置于混凝土内跟混凝土一起形成管芯,然后在管芯外缠绕预应力钢筋,再浇筑细石混凝土保护层. 与 PCCP 相比,BCCP 有以下两个特点:1) 使用较粗的冷轧带肋预应力钢筋,钢筋应力等级低,屈服强度为 650 MPa 或 970 MPa,克服了 PCCP 中 1 570 MPa 高强钢丝的应力脆化问题^[5];2) 在带肋钢筋上浇筑 C50 细石混凝土保护层,相比 PCCP 中使用的砂浆保护层,具有更密实、高强、抗拉、防腐的优越性能.

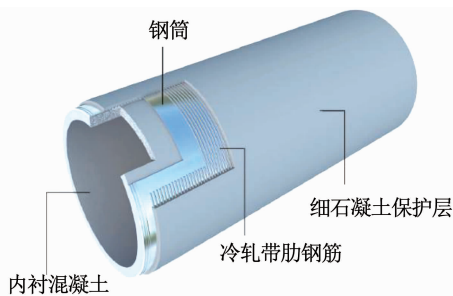


图 1 BCCP 结构示意

Fig. 1 Structure diagram of BCCP

在上个世纪, Rose^[6]、Zarghamee^[7-8] 和 Tremblay^[9] 等国外学者对 PCCP 进行试验研究,揭示了 PCCP 的内水压承载机理. PCCP 引进我国后,胡少伟^[10-12]、窦铁生^[13-15] 等学者通过原型试验与数值仿真对 PCCP 在不同荷载作用下的承载能力和破坏机理进行了研究,取得了很大的进展. 但是 BCCP 在预应力钢筋和保护层上与 PCCP 有明显的不同,如果直接使用相关规范中的计算公式,则计算结果与实际试验结果偏差较大. 为此本文对 BCCP 原型管进行了内水压承载能力研究,以期揭示 BCCP 在内水压作用下的承载破坏规律,为 BCCP 进一步在输调水工程中的推广使用提供依据.

1 试验准备

BCCP 试验试件的制作是在宁夏青龙管业股份有限公司生产现场完成,严格按规范制作,具体制作过程如下:承插口接头制作,钢筒制作,管芯混凝土浇筑,预应力钢筋缠绕,混凝土保护层浇筑. 试验管选择了三种管径:1 400 mm、1 600 mm 和 1 800 mm,均为埋置式 (BCCP-E),三种管径的 BCCP 试验管设计工压都为 1.0 MPa. 本文选取管径 1 800 mm 的 BCCP 为主要研究对象,因为仅有该管在生产过程中预先在钢筒上布置了应变片,且该管所加载的内水压为最高,而管径 1 400 mm 和 1 600 mm 的试验管仅加载至管身保护层开裂后即停止加压.

1.1 几何尺寸及材料参数

管芯和保护层均采用 C50 混凝土浇筑,其弹性模量和抗拉强度取值根据式 (1) 进行计算^[17-18],钢筒和钢筋的弹性模量则采用常规取值^[19],各管径几何尺寸及材料力学参数见表 1、2.

$$f_t = 0.52 \sqrt{f_{cu,k}}, E_c = 8\,373 (f_{cu,k})^{0.3}. \quad (1)$$

式中: $f_{cu,k}$ 为混凝土抗压强度标准值, f_t 为混凝土抗拉强度设计值, E_c 为混凝土弹性模量设计值.

1.2 测点布置

试验过程中内水压是均匀施加于管道内壁的,且管道截面沿管长方向一致. 所以在内水压作用下,BCCP 受力可以简化为平面应变问题来分析^[20],即各层结构只在截面的径向和环向方向发生变形. 为了获得更多有效的数据,在 BCCP 制作过程中预先在钢筒外壁布置电阻应变片. 在靠近承、插口端 10 cm 处各布置两个环向应变片,分别为 C-1、C-2、C-3 和 C-4,然后在靠近管端 1.5 m 和 3.0 m 处设置 3 个断面,每个断面上布置一个环向应变片,分别为 C-5、C-6 和 C-7,具体的测点布置编号如图 2 所示.

表1 BCCP 几何尺寸

Tab. 1 Geometrical dimension of BCCP

管道内径	管芯混凝土厚度	钢筒厚度	钢筒外径	保护层厚度	钢筋直径	缠筋间距
D_i/mm	h_c/mm	t_y/mm	D_y/mm	h_p/mm	d_s/mm	d/mm
1 400	110	2	1 504	60	8	18
1 600	130	2	1 704	60	10	23
1 800	150	2	1 904	60	10	21

表2 BCCP 材料力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of materials in BCCP

混凝土弹性模量 设计值 $E_c/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	混凝土抗拉强度 设计值 f_t/MPa	钢筋抗拉强度 标准值 f_{su}/MPa	张拉控制应力	钢筋弹性模量 $E_s/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	钢筒拉伸屈服强度 f_{ys}/MPa	钢筒弹性模量 $E_y/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$
27 075	3.68	650	$72\%f_{su}$	205 000	235	210 000

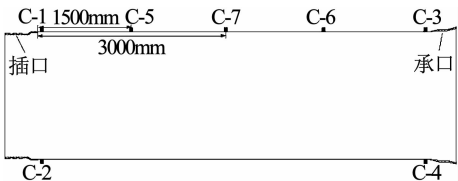


图2 钢筒应变片布置

Fig. 2 Layout of strain gauges on cylinder

为了准确掌握预应力钢筋在承载过程中的应变情况,试验管保护层浇筑完成后,在靠近管端 1.5 m 和管中 3.0 m 处设置 3 个断面,找专业人员凿开需要测试位置的混凝土保护层,每个断面上布置一个环向应变片,由插口往承口方向编号分别为 S-1、S-2 和 S-3,具体的测点布置编号如图 3 所示。

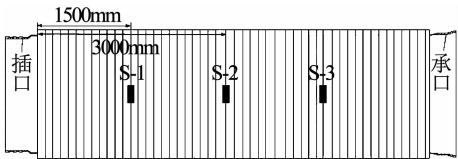


图3 钢筋应变片布置

Fig. 3 Layout of strain gauges on steel

另外,在承插口两端,以及靠近管端 1.5 m 和管中 3.0 m 处共设置 5 个断面,在每个断面对称位置选取两个测点布置保护层环向应变片,以测得 BCCP 承受内水压过程中细石混凝土保护层的受力变化规律,应变片编号分别为 P-1、P-2、……、P-10,如图 4 所示。

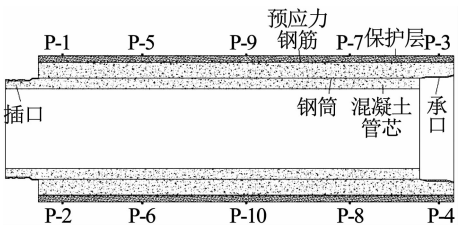


图4 混凝土保护层应变片布置

Fig. 4 Layout of strain gauges on concrete cover

1.3 试验装置及加载制度

试验是在宁夏青龙管业 BCCP 生产现场完成,内水压采用立式的套筒装置施加,如图 5 所示,在套筒与 BCCP 内表面之间有一个加压空腔,用加压泵将水注入加压空腔内,管两端的径向约束方式与实际埋置管一致,试验管上端为插口,采用双橡胶圈与试验装置处的承口顶座连接,试验管下端为承口,也与带有两橡胶圈的插口底座连接,为了保证密封性,防止漏水,装置四周采用固定杆连接顶座和底座。

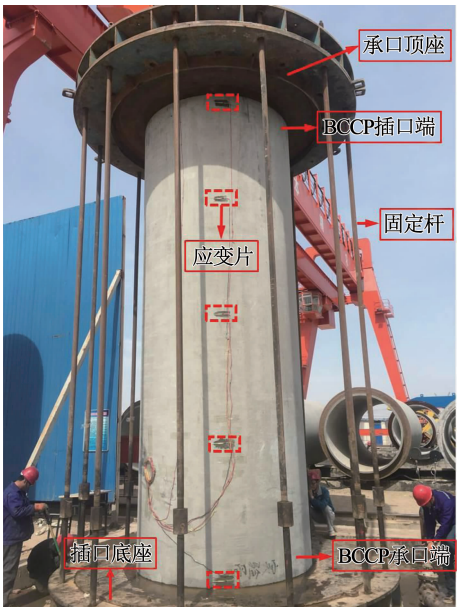


图5 立式内水压试验装置

Fig. 5 Vertical internal hydraulic pressure test equipment

试验采用油压系统加压,分级加载,以 0.1 MPa 为一级,每级荷载稳压 5 min^[18],采用 DH3816 静态应变测试采集系统采集各应变片的数据,并安排专业人员仔细观察保护层混凝土裂缝的出现与发展。

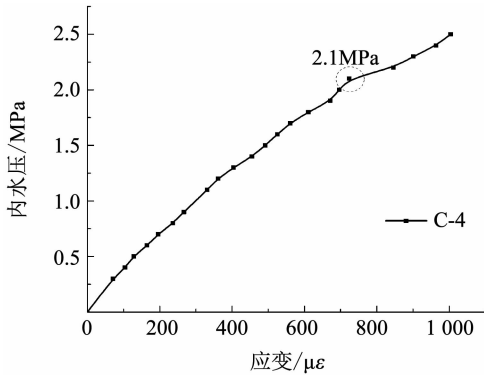


图8 内水压-钢筒应变关系曲线

Fig. 8 Internal water pressure-strain curves of cylinder

试验过程中,测得的钢筒应变并不是钢筒的真实应变,因为钢筒作为管芯的一部分,初始即受到缠绕预应力钢筋所产生的预压应力. 真实的应变是初始受压应变和试验测得应变结果的叠加. 缠筋后各部分预压应力可参考文献[17-18]进行计算,如式(2)所示.

$$\begin{aligned} f_{ic} &= -\frac{A_s f_{se}}{A_c + n_s A_s + n_y A_y}, \\ f_{iy} &= n_y f_{ic}, \\ f_{is} &= f_{se} + n_s f_{ic}. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: f_{ic} 为管芯混凝土初始预应力,压缩为负,拉伸为正,下同, f_{iy} 为钢筒初始预应力, f_{is} 为预应力钢筋初始应力, A_s 为预应力钢筋总面积, A_c 为管芯混凝土面积,不包括钢筒面积, A_y 为钢筒面积, f_{se} 为预应力钢筋有效张拉应力, n_s 为预应力钢筋与管芯混凝土的弹性模量比, n_y 为钢筒与管芯混凝土弹性模量比.

缠绕预应力钢筋后,不可避免会发生预应力损失,预应力损失计算参考文献[21]中的相关规定,考虑钢筋应力松弛引起的环向预应力损失、混凝土收缩徐变引起的预应力损失和混凝土弹性压缩引起的环向预应力损失. 经过计算,本试验管总预应力损失为 128 MPa,则预应力钢筋有效张拉应力为 340 MPa. 根据式(2)进一步计算,相应的管芯混凝土的初始预应力 f_{ic} 为 -7.4 MPa,钢筒初始预应力 f_{iy} 为 -57.4 MPa,钢筋初始应力 f_{is} 为 284.0 MPa. 依据表 2 中的相关材料参数,钢筒初始压应变为 273 $\mu\epsilon$. 试验测得的钢筒在内水压 2.5 MPa 下的受拉应变为 1 004 $\mu\epsilon$,减去初始受压应变后为 731 $\mu\epsilon$,远小于钢筒拉伸屈服强度所对应的屈服应变 1 119 $\mu\epsilon$,说明内水压 2.5 MPa 下钢筒并未发生屈服,从应变曲线中钢筒应变随内水压增长依然呈线性关系上也可以得到验证.

2.2.3 钢筋应变变化规律

图 9 给出了内水压作用下预应力钢筋的应变变化曲线. 从曲线中可以看出,3 个测点的应变数据基本相当. 在内水压达到 1.5 MPa 之前,随着内水压的增大,应变基本稳步增大;当内水压在 1.5 MPa 与 2.1 MPa 之间,钢筋应变随内水压的增加依然呈线性增加,内水压每增加 0.1 MPa,应变增加的幅度较内水压在 0 ~ 1.5 MPa 时要大. 内水压继续增加到 2.1 MPa 后,3 个测试点的应变随着内水压增大依然呈现稳步增加的趋势,每增加 0.1 MPa,应变增加的幅度较 0 ~ 1.5 MPa 和 1.5 MPa ~ 2.1 MPa 要大. 从曲线可以明显看出,应变随内水压增大的发展呈现一个三阶段的变化趋势,1.5 MPa 为第一阶段与第二阶段的拐点,2.1 MPa 为第二阶段与第三阶段的拐点. 结合前面混凝土保护层以及钢筒的内水压应变关系曲线,保护层的开裂内压是 1.6 MPa,混凝土管芯的开裂内压为 2.2 MPa,分别对应钢筋应变曲线中两个拐点处的下一级内水压.

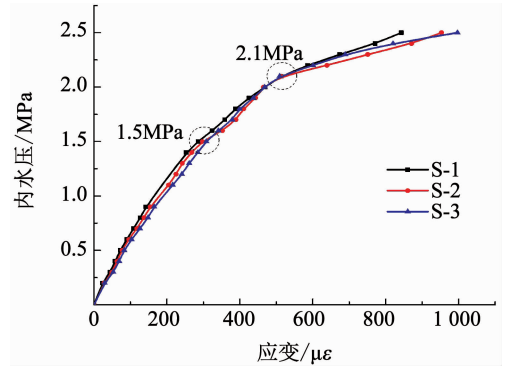


图9 内水压-钢筋应变关系曲线

Fig. 9 Internal water pressure-strain curves of steel

同样,试验过程中所测得的钢筋应变数据并不是钢筋真实的应变,因为钢筋有一个初始拉应力. 根据前文计算的钢筋初始张拉应力为 284.0 MPa,则对应的初始拉应变为 1 385 $\mu\epsilon$,试验中内水压 2.5 MPa 下,测得的钢筋最大拉应变为 997 $\mu\epsilon$,叠加后总的拉应变为 2 382 $\mu\epsilon$,远小于钢筋屈服强度 650 MPa 对应的屈服应变 3 137 $\mu\epsilon$,钢筋没有发生屈服破坏,整管还可以承受更大的内水压.

GB/T 19685 - 2017^[18] 中规定成品管 PCCP 需在控制开裂标准组合条件下进行抗裂内压检验,检验内压大小按式(3)计算,要求在该检验内压下,管体不得出现爆裂、局部凸起或出现其他渗漏现象,管体预应力区水泥砂浆保护层不应出现任何裂缝或其他剥落现象.

$$P_t = \frac{A_s f_{se} + \alpha f_{tk} A_n}{b r_0}. \quad (3)$$

式中: P_i 为抗裂内压检验荷载, A_s 为每米管子长度环向预应力钢丝面积, f_{se} 为环向钢筋最终有效预加应力, A_n 为每米管子长度管壁截面管芯混凝土、钢筒、钢筋及砂浆保护层折算面积; α 为控制砂浆开裂系数,对 PCCP-E 为 1.06,对 PCCP-L 为 0.65, f_{tk} 为管芯混凝土抗拉强度标准值, b 为管子轴向计算长度,数值为 1 000 mm, r_0 为管壁截面计算半径。

BCCP 与 PCCP 结构型式类似,选取文献[5]中

内径 4 000 mm 的超大口径 PCCP 与本文研究的 BCCP 进行对比分析,该 PCCP 管芯厚度 300 mm,采用直径为 6 mm 的 1 570 MPa 高强预应力钢丝,缠丝间距 14.30 mm,将其内水压承载结果与本文研究的 3 种不同管径 BCCP 的结果进行对比,经计算及汇总,两种管型的抗裂内压检验荷载计算结果、现场试验保护层开裂内水压、管芯开裂内水压和极限内水压试验结果如表 3 所示。

表 3 抗裂内压计算和试验结果
Tab.3 Calculation results of internal crack resistance and test results

管型	管道内径 D_i /mm	抗裂内压检验荷载计算 结果/MPa	保护层开裂内水压试验 结果/MPa	管芯开裂内水压试验 结果/MPa	极限内水压试验 结果/MPa
BCCP	1 400	1.42	1.5		
	1 600	1.47	1.6		
	1 800	1.49	1.6	2.2	>2.5
PCCP	4 000	1.13	1.2	1.4	

3 种管径的 BCCP 试验管设计工压都为 1.0 MPa,而抗内压检验荷载计算结果分别为 1.42 MPa、1.47 MPa 和 1.49 MPa,均比设计工压要大,现场保护层开裂的内水压试验结果也比设计工压大 0.5 MPa~0.6 MPa,说明设计工压下 BCCP 各层结构均处于弹性阶段,具有一定的安全储备。

两种管型的抗裂内压检验荷载计算结果都比保护层开裂内水压试验结果要小,说明两种管型的抗内水压能力检验都是合格的,其中管径 1 800 mm 的 BCCP 管芯开裂内水压试验值比保护层开裂时的内水压值高 0.6 MPa,而管径 4 000 mm 的 PCCP 中两者的差值仅为 0.2 MPa。分析原因,首先 BCCP 中细石混凝土保护层的厚度为 60 mm,而 PCCP 中砂浆保护层的厚度仅为 27 mm,BCCP 中保护层对整管刚度的贡献更大;另外管径 1 800 mm 的 BCCP 中每米管子长度环向预应力钢丝面积为 3 768 mm²,而管径 4 000 mm 的 PCCP 中每米管子长度环向预应力钢丝面积为 1 978 mm²,BCCP 的配筋率要高,即预应力钢筋对整管刚度的贡献比 PCCP 要大。综上所述,BCCP 中管芯开裂时的内水压与保护层开裂时的内水压的差值要比 PCCP 的大一些,BCCP 的安全储备更为丰富。

2.3 破坏全过程分析

以内径 1 800 mm 的埋置式 BCCP 为例,从生产时施加预应力到承受内水压至最终破坏的过程可分

为以下 5 个阶段,如图 10 所示:1)管芯受预应力钢筋环向作用力阶段,如图 10(a)所示.带钢筒的混凝土管芯成型后受到缠绕预应力钢筋所产生的初始预压应力,可以抵消部分内水压,经计算混凝土的初始预压应力为 7.4 MPa,钢筒的初始预压应力为 57.4 MPa,钢筋的初始拉应力为 284.0 MPa,充分发挥了混凝土受压,钢丝受拉的特性,提高了整管的承载能力;2)保护层开裂前整管承受内水压弹性阶段,如图 10(b)所示.当内水压小于 1.6 MPa 的时候,整管都处于弹性状态,管芯依然受压,而预应力钢筋和外混凝土保护层受拉;3)保护层开裂,混凝土管芯承受内水压弹性阶段,如图 10(c)所示.当内水压加载到 1.6 MPa 后,保护层达到了其极限抗拉强度,首先开裂,此时的内水压为 BCCP 的初裂荷载,混凝土管芯也逐渐从初始的受压转变为受拉,但依然处于弹性状态;4)管芯开裂后钢筒和钢筋受拉弹性阶段,如图 10(d)所示.随着内水压的进一步增大,达到 2.2 MPa 后,管芯混凝土开始开裂并很快径向裂穿,钢筒和钢筋的应力迅速增大;5)管道破坏阶段,如图 10(e)所示.钢筒和钢筋相继达到屈服强度 235 MPa 和 650 MPa 后,整管将丧失承载力发生破坏.从试验过程以及试验结果来看,本次试验的 BCCP 经历了上述 2)~4)3 个阶段,由于试验设备和安全因素考虑,没有加载到管道最终破坏阶段。

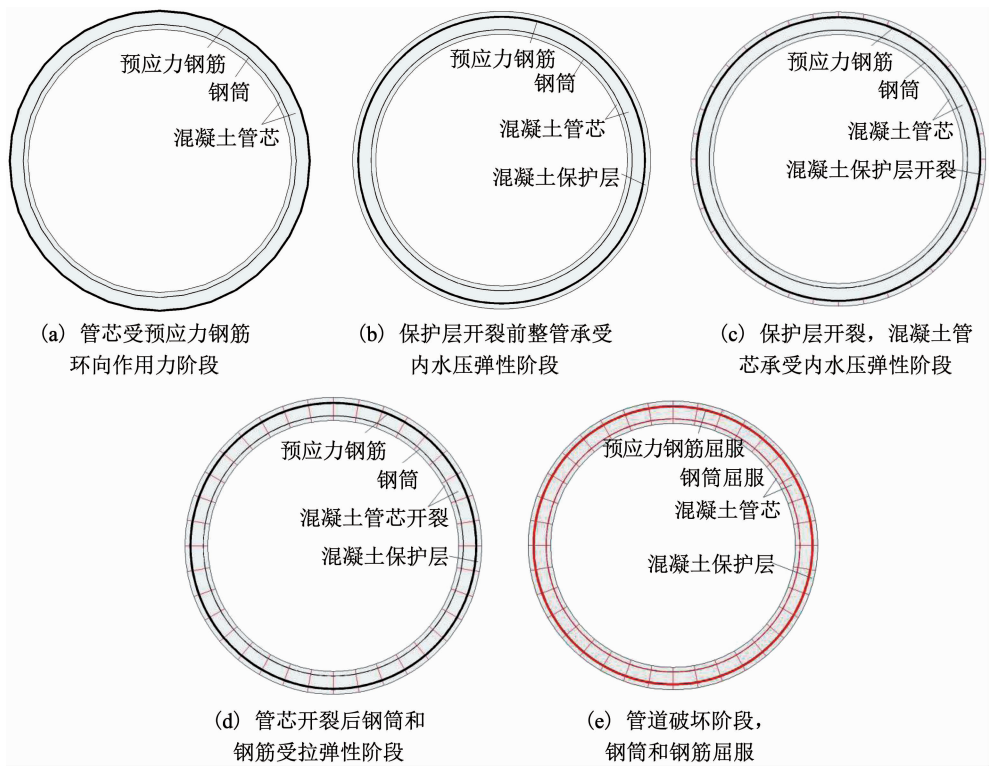


图 10 BCCP 内水压作用下破坏全过程

Fig. 10 Failure process of BCCP under internal water pressure

3 结 论

本文通过 3 根不同管径的埋置式 BCCP 内水压原型试验,得到了各自的初裂内压,并且在内径 1 800 mm 的 BCCP 制作过程中预先埋置应变片,得到了钢筒、预应力钢筋和混凝土保护层应变随内水压的变化曲线,最后总结出了 BCCP 承受内水压的破坏规律.

初始状态下,张拉预应力钢筋使混凝土管芯受压,而保护层不受任何作用;当内水压在 0 ~ 1.5 MPa 时,整管处于弹性状态,各部分变形协调一致;内水压达到 1.6 MPa 后,保护层开始开裂,而混凝土管芯和预应力钢筋依然处于弹性状态;内水压继续增大至 2.2 MPa 后,混凝土管芯由内向外径向开裂,钢筋和钢筒应力迅速增大,最终加载至 2.5 MPa,钢筒和钢筋还没有达到屈服强度.

管径 1 400 mm、1 600 mm 和 1 800 mm 的 BCCP 试验开裂内压分别为 1.5 MPa、1.6 MPa 和 1.6 MPa,根据规范计算的抗裂内压检验荷载分别为 1.42 MPa、1.47 MPa 和 1.49 MPa,设计的工作内压都为 1.0 MPa,设计是安全的,具有一定的安全储备,充分发挥了组合结构中混凝土抗压、钢筋抗拉和钢筒抗渗的优越性能. BCCP 可作为 PCCP 的升级替代产品在国内外的输调水工程中推广使用.

参考文献

[1] 胡少伟, 薛翔, 孙岳阳, 等. 地基沉降对 BCCP 接口力学性能影响的试验研究[J]. 人民长江, 2018(11): 91
HU Shaowei, XUE Xiang, SUN Yueyang, et al. Experimental study on mechanical properties of BCCP joint under foundation settlement[J]. Yangtze River, 2018(11): 91. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.11.018

[2] 砌筑砂浆配合比设计规程: JGJ/T 98—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
Specification for mix proportion design of masonry mortar: JGJ/T 98—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010

[3] 陈博智, 冯新, 范哲, 等. PCCP 砂浆保护层强度取值及开裂控制条件的研究和探讨[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(11): 37
CHEN Bozhi, FENG Xin, FAN Zhe, et al. Research and discussion on strength value and cracking control condition of PCCP mortar protective layer[J]. China Concrete and Cement Products, 2017(11): 37. DOI: CNKI:SUN:HNTW.0.2017-11-008

[4] 胡少伟. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)结构承载安全评价理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 31
HU Shaowei. Theory and practice of load-bearing safety evaluation of prestressed steel tubular concrete (PCCP) structures[M]. Beijing: China Water Power Press, 2011: 31

[5] 胡少伟. PCCP 在我国的实践与面临问题的思考[J]. 中国水利, 2017(18): 25
HU Shaowei. Considerations on practice and problems of PCCP in China[J]. China Water Resources, 2017(18): 25. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2017.18.010

[6] ROSS C W. Tests of prestressed concrete pipe containing a steel cylinder[J]. Journal Proceedings, 1945, 42(9): 37

[7] ZARGHAMEE M S, OJDROVC R P, DANA W R. Coating

- delamination by radial tension in prestressed concrete pipe. I: Experiments[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(9): 2701
- [8] ZARGHAMEE M S. Hydrostatic pressure testing of prestressed concrete cylinder pipe with broken wires [C]//Proceedings of Pipeline Engineering and Construction International Conference. Reston: ASCE, 2003: 294. DOI: 10.1061/40690(2003)19
- [9] TREMBLAY A W. Combined-load testing of prestressed concrete cylinder pipe [C]//Proceedings International Conference on Pipeline Design and Installation. Reston: ASCE, 2015: 310
- [10] 胡少伟, 刘晓鑫. PCCP 管道结构承受内水压的全过程分析[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2): 71
HU Shaowei, LIU Xiaoxin. Whole process analysis of prestressed concrete cylinder pipes under internal load [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(2): 71. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2011.02.017
- [11] 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
HU Shaowei, SHEN Jie, LIU Xiaoxin, et al. Study on bearing capacity test of internal water pressure of super-caliber PCCP[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(5): 9. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2009.05.003
- [12] 胡少伟, 沈捷, 王东黎, 等. 超大口径预存裂缝的预应力钢筒混凝土管结构分析与试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(7): 876
HU Shaowei, SHEN Jie, WANG Dongli, et al. Experiment and numerical analysis on super caliber prestressed concrete cylinder pipes with cracks[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(7): 876. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.07.013
- [13] 窦铁生, 程冰清, 胡赫, 等. 预应力钢筒混凝土管结构变形规律的原型试验研究 I: 内压[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1438
DOU Tiesheng, CHENG Bingqing, HU He, et al. The prototype test study of prestressed concrete cylinder pipe structure deformation law I: The internal pressure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1438. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170464
- [14] 窦铁生, 程冰清, 胡赫, 等. 预应力钢筒混凝土管结构变形规律的原型试验研究 II: 外压[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 207
DOU Tiesheng, CHENG Bingqing, HU He, et al. The prototype test study of prestressed concrete cylinder pipe structure deformation law II: The external pressure [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2): 207. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170465
- [15] 窦铁生, 胡赫, 杨进新, 等. PCCP 断丝数量对内压承载力的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(7): 35
DOU Tiesheng, HU He, YANG Jinxin, et al. The influence of the number of broken wires on the bearing capacity of BCCP under internal pressure[J]. China Concrete and Cement Products, 2015(7): 35. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4637.2015.07.008
- [16] 预应力钢筒混凝土管道技术规范: SL702-2015[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015
Technical specifications of prestressed concrete cylinder pipe: SL702-2015[S]. Beijing: China Water Power Press, 2015
- [17] Design of prestressed concrete cylinder pipe: ANSI/AWWA C304-2014[S]. New York: American National Standards Institute, 2014
- [18] 预应力钢筒混凝土管: GB/T19685-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
Prestressed concrete cylinder pipe: GB/T19685-2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017
- [19] 戎芹, 曾宇声, 侯晓萌, 等. 圆钢管 RPC 轴压短柱有限元分析与承载力计算[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(12): 61
RONG Qin, ZENG Yusheng, HOU Xiaomeng, et al. Finite element analysis and bearing capacity calculation for RPC-filled circular steel tube columns [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(12): 61. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201807186
- [20] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 70
XU Zhilun. Concise tutorial on elastic mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2013: 70
- [21] 给水排水工程埋地预应力混凝土管和预应力钢筒混凝土管道结构设计规程: CECS 140:2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011
Specifications for structural design of buried prestressed concrete pipeline and prestressed concrete cylinder pipeline of water supply and sewerage engineering: CECS 140:2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2011

(编辑 苗秀芝)