文章编号:1672-3031(2021)03-0301-07

# 高压缩弹性垫层对复式碳纤维加固PCCP的应变影响分析

韦昊南,孙志恒
(中国水利水电科学研究院,北京 100038)

**摘要:** 在PCCP内部粘贴复式碳纤维是一种新型的PCCP补强加固技术。为了研究不同管径及高压缩弹性垫层厚度对复式碳纤维加固PCCP的效果,本文通过建立6种管径和4种厚度垫层的复式碳纤维加固PCCP有限元模型,得到在不同内水压力和预应力钢丝断丝等工况下,垫层对复式碳纤维加固PCCP的应变影响。计算结果表明,采用5 mm厚度垫层的复式碳纤维加固PCCP,碳纤维环向应变增加了8~16倍;在0.6 MPa正常内水压力作用下,混凝土内壁环向应变的改善比例在11.5%~38.7%之间。管径越小,复式碳纤维加固效果越显著。对2.6 m管径PCCP进行复式碳纤维加固计算表明,随着垫层厚度的增加,碳纤维环向应变大幅提高,混凝土环向应变也得到显著改善。本文的研究成果为复式碳纤维加固PCCP的设计提供了参考依据。

**关键词:** 预应力钢筒混凝土管(PCCP);高压缩弹性垫层;复式碳纤维加固
**中图分类号:** TV672.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200120

## 1 研究背景

预应力钢筒混凝土管(Prestressed Concrete Cylinder Pipe,简称PCCP)是在带有钢筒的混凝土管芯外侧缠绕环向预应力钢丝,并在管体外侧辊射水泥砂浆保护层而制成的一种复合型管材,其中预应力钢丝对于PCCP的承载力有重要影响[1-3]。目前我国引调水工程中使用PCCP管的工程越来越多,但由于设计、施工质量缺陷、土壤腐蚀环境、运行管理不当等原因,多个工程已出现爆管情况,且大部分爆管是由于高强预应力钢丝出现断丝所致[4-6]。PCCP缺陷补强加固主要采用开挖更换、钢绞线修复、颈缩钢筒、钢管穿插、外贴碳纤维及内贴碳纤维等方法。这些方法各具特色,互有优劣[7-8]。内贴碳纤维加固PCCP管技术是通过树脂类胶结材料将碳纤维增强聚合物(Carbon Fiber Reinforced Polymer,简称CFRP)粘贴于PCCP管内侧混凝土表面,通过两者的共同作用达到加固补强、改善结构受力性能的一种加固技术。与其他加固技术相比,这种技术无需大型施工机具,施工简便、高效、质量易保证[9-11]。碳纤维材料一般具有良好的耐腐蚀性和耐久性,片材较轻且薄,基本不增加原结构自重及不减少PCCP管的过水断面[12]。美国水务协会最新颁布了关于CFRP加固PCCP的规范ANSI/AWWA C305[13],其目标是在预期使用寿命50年内,加固后的整体结构满足强度、耐久性、可靠性和承插接口部位止水性的要求,该规范采用的极限状态设计法确定了不同极限荷载组合下结构的破坏模式,根据承担荷载的结构实际情况,对应不同的环向和纵向极限状态设计,该规范同时建立了对加固结构材料性能、粘贴性能、施工工艺和质量控制等相关要求[14-15]。

但是,传统的CFRP加固混凝土结构存在着一些缺陷,混凝土的开裂应变(0.02%)与碳纤维的极限拉应变(1.7%)相差甚远,伴随着混凝土的脆性开裂,CFRP仍处于较低的应力水平还未发挥其高强特性,二者之间环氧树脂胶的剪切变形不断增大,而呈现软化情况[16]。在碳纤维加固PCCP方面存在类似的问题,由于碳纤维布在粘贴时可能出现鼓包的施工质量问题[17],且碳纤维加固结构的高强性

收稿日期:2020-07-07;网络首发时间:2021-04-21
网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.2021.0420.1006.002.html
基金项目:国家"十三五"重点研发计划(2016YFC0401609)
作者简介:韦昊南(1996-),硕士生,主要从事水工结构修补加固技术研究。E-mail:wei_hn@outlook.com
通讯作者:孙志恒(1962-),教授级高级工程师,主要从事水工混凝土建筑物的检测、评估与修补加固技术研究。E-mail:sunzhh@iwhr.com

能在非断丝区域发挥有限[18]，或在管壁已存在裂缝的位置脱粘而无法持续发挥作用，难以有效抑制PCCP结构的变形和裂缝的发展[19]，导致传统直接使用碳纤维布加固PCCP效果不明显。复式碳纤维加固PCCP是指在碳纤维与混凝土内壁之间增设一层高压缩弹性垫层(以下简称“垫层”)，该垫层具有在弹性范围内压缩量大、抗拉强度较高、抗渗、耐老化、耐低温、与混凝土和碳纤维粘接强度大于垫层本体强度等特点，在相同的内水压力下，复式碳纤维加固方法中碳纤维的径向位移囊括了垫层的压缩量，导致碳纤维环向变形增大，进而提高了碳纤维的环向应力，使碳纤维承担更多的内水压力。该加固方法可以较充分发挥碳纤维布高强的特性，更好的起到碳纤维布与PCCP联合受力的效果[20-22]。现有研究已经针对0.75 m管径钢筒进行了室内模型试验，并通过建立基于弹性力学厚壁圆筒理论的计算模型和有限元模型，将试验结果与计算结果进行对比，试验结果与计算结果基本一致[21]。

目前国内外主要PCCP工程管道管径主要在1.6 m ~ 4 m，工作压力在0.4 MPa ~ 0.8 MPa，我国标准GB/T 19685《预应力钢筒混凝土管》[2]提出使用的管道制造公称内径为400 mm ~ 4000 mm，基于上述情况，为探究垫层对复式碳纤维加固PCCP的效果及应变规律，本文分别建立了PCCP内径为4.0 m、3.2 m、2.6 m、2.0 m和1.52 m，工作压力均为0.6 MPa的有限元模型，研究在不同内水压力作用和预应力钢丝断丝等工况下，分别采用复式碳纤维加固PCCP结构和传统碳纤维加固PCCP结构情况下碳纤维和混凝土内壁的应变情况。另外选取4种厚度的垫层，通过有限元计算2.6 m管径复式碳纤维加固PCCP，分析不同厚度的垫层对于整体结构的影响。

## 2　计算模型及相关参数

**2.1　PCCP管道及加固结构参数**　表1为计算所采用的6种管道的相关参数，均为埋置式PCCP，即钢筒将管芯混凝土分为内层和外层，预应力钢丝缠绕在管芯混凝土外侧，相关参数来自于实际工程或满足相关规范对于管芯混凝土厚度和配筋率等要求。

表1　PCCP相关参数

| 序号 | 内径/mm | 管芯砼厚度/mm | 钢筒外径/mm | 钢筒厚度/mm | 砂浆厚度/mm | 钢丝直径/mm | 缠丝间距/mm | 缠丝层数 | 缠绕应力/MPa | 砂浆标准抗压强度/MPa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1# | 4000 | 320 | 4185 | 2 | 26 | 7 | 22.03 | 2 | 1177.5 | 60 |
| 2# | | | | 2 | 26 | 7 | 16.84 | 2 | 1177.5 | 45 |
| 3# | 3200 | 220 | 3343 | 1.5 | 20 | 6 | 13.47 | 1 | 1177.5 | 45 |
| 4# | 2600 | 155 | 2713 | | | 6 | 12.96 | | 1177.5 | 45 |
| 5# | 2000 | 140 | 2103 | | | 6 | 19.24 | | 1177.5 | 45 |
| 6# | 1520 | 114 | 1600 | | | 5 | 29.59 | | 1062.4 | 45 |

参照目前大多数PCCP管的设计参数，选择这6种管道的工作内水压力为0.6 MPa，设计内水压力为0.9 MPa；管芯混凝土标准抗压强度为55 MPa；薄钢筒拉伸屈服强度为227 MPa，最小抗拉强度为310 MPa；其中4.0 m、3.2 m、2.6 m、2.0 m管径PCCP预应力钢丝最小抗拉强度为1570 MPa，1.52 m管径PCCP预应力钢丝最小抗拉强度为1654.8 MPa。使用的碳纤维片材为高强Ⅰ型碳纤维，其力学性能指标如表2所示。

表2　CFRP力学指标

| 厚度/mm | 克重/($g/m^2$) | 抗拉强度/MPa | 弹性模量/GPa | 泊松比 |
|---|---|---|---|---|
| 0.167 | 300 | >3400 | 230 | 0.3 |

通过对垫层性能室内试验测试结果表明，垫层拉伸强度值大于1.7 MPa，拉伸断裂伸长率大于100%，密度为0.55 $g/cm^3$。图1为垫层受压应力 ~ 应变曲线，这是本文计算模型中垫层受压性能取值的依据。

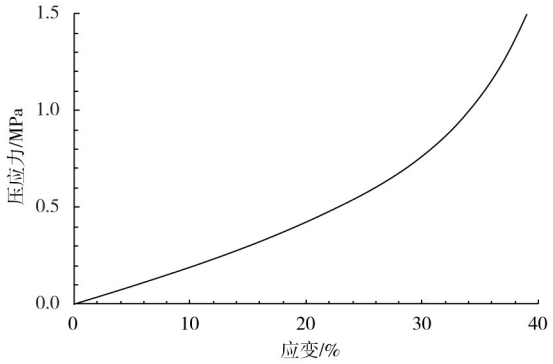



图1　垫层受压应力～应变曲线

**2.2　有限元模型**　复式碳纤维加固PCCP各层结构有限元模型如图2所示。复式碳纤维加固对6种型号PCCP先采用5 mm厚的垫层布置于3层CFRP和混凝土内壁之间，传统碳纤维加固对6种型号PCCP采用3层CFRP与混凝土管壁直接粘接。CFRP与钢筒采用壳单元模拟，混凝土与砂浆采用实体单元模拟，预应力钢丝采用杆单元模拟。垫层在模型中使用有限元软件专门提供的垫层单元模拟，这是一个三维八节点的线性界面单元，常被用于模拟垫圈的接头，垫片的主变形被限制在厚度方向，划分网格只需要一层。在有限元计算中，垫片处于受压的状态，并在两个组件之间传递接触力。模型假设CFRP、混凝土管芯、钢筒、砂浆与预应力钢丝之间没有相对滑移和脱空，采用共用节点的方式模拟各层结构之间的相互协调工作。采用约束方程方式实现预应力钢丝与管体结构与砂浆层之间的相互作用。根据实际缠丝间距，逐圈建立单独作用于管体的预应力钢丝，这区别于实际PCCP结构的螺旋型预应力钢丝。为了探究复式碳纤维加固PCCP在不同内水压力及预应力损失情况下的表现，所建立的模型将管道视为无限长，在管道端部施加对称约束，即约束节点对称面外的位移和面内的旋转自由度。断丝方式采用沿管道纵向按缠丝圈数的固定比例均匀断丝，各圈预应力钢丝完全退出工作。

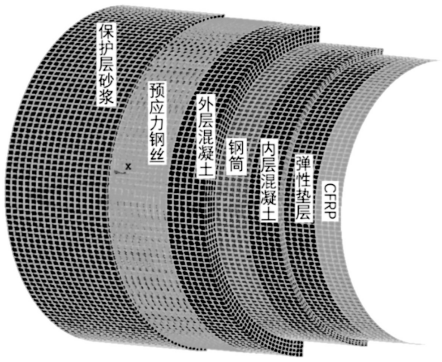



图2　复式碳纤维加固PCCP有限元模型

## 3　碳纤维加固PCCP结构应变分析

**3.1　CFRP应变**　在内水压力作用下，复式碳纤维加固PCCP中的CFRP变形以环向变形为主。管道中部管腰处在不同内水压力作用下CFRP环向应变曲线如图3所示。从图3可以看出，在未断丝阶段，伴随着内水压力的增加，复式碳纤维加固PCCP中的CFRP环向应变迅速增大，在达到正常内水压力0.6 MPa后，应变增长速度略有下降。在正常内水压力0.6 MPa作用下，复式碳纤维加固PCCP中的CFRP环向应变值在690～1250 με之间，传统碳纤维加固PCCP中的CFRP环向应变值在65～105 με，两种加固结构中CFRP应变相差8～16倍。这一结果证明，垫层为表层的CFRP提供了更多的径向变形空间，从而使CFRP承担了更多的内水压力。在0.9 MPa设计内水压力作用下不同

断丝比例环向应变曲线如图4所示。从图4可以看出，在达到设计内水压力0.9 MPa后的断丝阶段，CFRP环向应变值增长速度明显放缓，传统碳纤维加固PCCP中的CFRP环向应变则一直保持缓慢的增长速度。断丝后，在设计内水压力0.9 MPa作用下，CFRP环向应变最大值在1100～1800 με之间，传统碳纤维加固PCCP中的CFRP环向应变值在265～450 με。管径越小，复式碳纤维加固PCCP中的CFRP环向应变越大，表明CFRP承受的内水压力越大，而传统碳纤维加固PCCP中的CFRP则没有明显规律。结合弹性力学厚壁圆筒理论，管道所受环向应力从内壁到外壁逐渐降低，复式碳纤维加固结构较传统碳纤维加固中碳纤维承担了更多的内水压力，使CFRP与PCCP更好地发挥联合受力的效果。

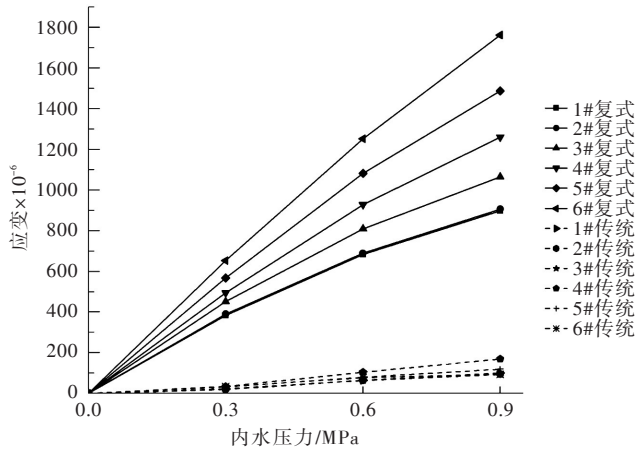



图3　不同内水压力下两种加固结构中CFRP环向应变曲线

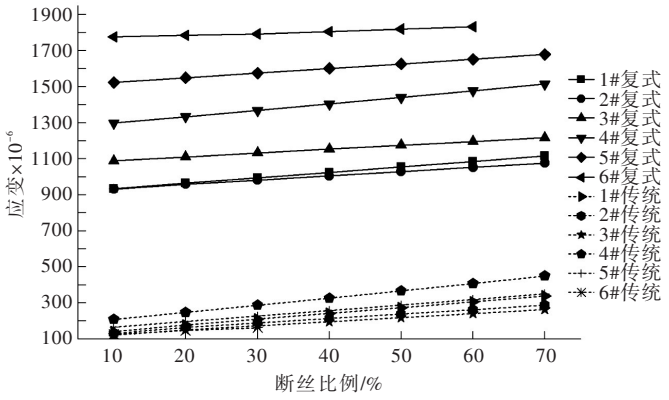



图4　0.9MPa设计内水压力下两种加固结构中不同断丝比例CFRP环向应变曲线

**3.2　管芯混凝土内壁应变**　在内水压力作用下，复式碳纤维加固PCCP中的管芯混凝土变形以环向变形为主，管腰处环向应变小于管顶和管底处的环向应变值，PCCP环向应变自混凝土内壁至外壁逐渐增大。表3给出了管道中部管腰处混凝土内壁环向应变变化结果。从表3可以看出，6种管型PCCP由于不同的预应力钢丝缠丝间距、缠丝应力产生的初始受压预应力，管芯混凝土结构几何尺寸的不同，和混凝土材料弹性模量的不同，造成了管芯混凝土结构初始环向应变的不同。伴随着内水压力的增大及管壁外侧预应力的损失，不同加固方式PCCP的管芯混凝土从相同的初始环向应变开始逐渐增大。复式碳纤维加固结构中碳纤维拥有更大的变形空间，能承担更多的内水压力，对比传统碳纤维加固结构，复式结构混凝土环向应变得到了改善。

表4为复式碳纤维加固PCCP与传统碳纤维加固PCCP对混凝土内壁环向应变的改善比例。由表3和4结果可以看出，复式碳纤维加固较传统碳纤维加固对PCCP混凝土结构环向应变有明显改善，在0.6 MPa内水压力作用下，复式碳纤维加固结构对混凝土内壁环向应变的差值在6～30 με之间，改善比例在11.5%～38.7%之间；在0.9 MPa内水压力作用下，复式碳纤维加固对混凝土内壁环向应变的差

表3　复式与传统碳纤维加固PCCP混凝土内壁环向应变结果　（单位：με）

| 内水压力/MPa | | 0 | 0.6 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 断丝比例 | | 0% | 0% | 0% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% |
| 1# | 复式 | −311 | −255 | −226 | −181 | −143 | −112 | −80 | −48 | −16 | 17 |
| | 传统 | −311 | −247 | −213 | −171 | −134 | −102 | −71 | −39 | −6 | 27 |
| 2# | 复式 | −241 | −184 | −152 | −117 | −85 | −61 | −36 | −11 | 15 | 40 |
| | 传统 | −241 | −176 | −144 | −110 | −77 | −52 | −27 | −2 | 23 | 49 |
| 3# | 复式 | −219 | −164 | −126 | −107 | −84 | −56 | −34 | −11 | 11 | 34 |
| | 传统 | −219 | −155 | −119 | −95 | −66 | −42 | −20 | 3 | 25 | 48 |
| 4# | 复式 | −393 | −316 | −265 | −220 | −181 | −142 | −102 | −62 | −21 | 20 |
| | 传统 | −393 | −310 | −234 | −195 | −156 | −116 | −76 | −36 | 6 | 47 |
| 5# | 复式 | −299 | −241 | −201 | −162 | −132 | −101 | −71 | −41 | −10 | 22 |
| | 传统 | −299 | −220 | −180 | −134 | −102 | −72 | −41 | −11 | 20 | 51 |
| 6# | 复式 | −143 | −95 | −63 | −57 | −47 | −40 | −24 | 2 | 26 | |
| | 传统 | −143 | −65 | −24 | 2 | 23 | 37 | | | | |

表4　复式与传统碳纤维加固对PCCP混凝土内壁环向应变改善比例

| 内水压力/MPa | 断丝比例/% | 1#PCCP/% | 2#PCCP/% | 3#PCCP/% | 4#PCCP/% | 5#PCCP/% | 6#PCCP/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.6 | 0 | 12.5 | 12.8 | 14.6 | 11.5 | 26.3 | 38.7 |
| 0.9 | 0 | 13.9 | 7.5 | 6.4 | 19.5 | 17.8 | 33.2 |
| 0.9 | 10 | 7.0 | 5.9 | 9.3 | 12.7 | 16.8 | 40.7 |
| 0.9 | 20 | 5.3 | 5.2 | 12.0 | 10.8 | 15.0 | 42.2 |
| 0.9 | 30 | 4.6 | 4.8 | 7.9 | 9.3 | 12.8 | 42.6 |

值在7～39 με之间，改善比例在6.4%～33.2%之间。管径越小，复式碳纤维加固对PCCP混凝土结构环向应变的改善越明显。

## 4　垫层厚度对复式碳纤维加固PCCP的影响分析

**4.1　CFRP应变**　采用复式碳纤维加固管径为2.6 m的PCCP，四种垫层厚度对CFRP环向应变的影响见表5。从表5可以看出，未断丝时，在0.9 MPa设计内水压力作用下，传统碳纤维加固PCCP中的CFRP环向应变为157 με，4种厚度垫层复式碳纤维加固PCCP中的CFRP环向应变为1260～2629 με，相差1103～2472 με。随着断丝数量的增加到70%，传统碳纤维加固PCCP中的CFRP环向应变为437 με，4种厚度垫层复式碳纤维加固PCCP中的CFRP环向应变为1515～2852 με，相差1078～2415 με，断

表5　垫层厚度对PCCP碳纤维环向应变的影响　（单位：με）

| 断丝比例 | 内水压力/MPa | 弹性垫层厚度/mm | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 5 | 7.5 | 10 | 12.5 |
| 0% | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0% | 0.6 | 77 | 929 | 1281 | 1596 | 1882 |
| 0% | 0.9 | 157 | 1260 | 1752 | 2212 | 2629 |
| 10% | 0.9 | 197 | 1299 | 1790 | 2248 | 2664 |
| 20% | 0.9 | 235 | 1334 | 1824 | 2280 | 2695 |
| 30% | 0.9 | 275 | 1369 | 1858 | 2312 | 2726 |
| 40% | 0.9 | 315 | 1405 | 1893 | 2344 | 2757 |
| 50% | 0.9 | 355 | 1441 | 1928 | 2377 | 2788 |
| 60% | 0.9 | 396 | 1478 | 1963 | 2410 | 2820 |
| 70% | 0.9 | 437 | 1515 | 1999 | 2444 | 2852 |

丝与未断丝时的差值基本相当。复式碳纤维加固PCCP中的垫层越厚，碳纤维的径向变形空间越多，CFRP环向应变越大。

**4.2 管芯混凝土内壁应变** 复式加固结构中垫层厚度对PCCP混凝土内壁环向应变改善比例见表6。在未断丝、0.9 MPa设计内水压力作用下，复式碳纤维加固PCCP与传统碳纤维加固PCCP中的混凝土内壁环向应变改善比例在19.5%～41.7%，垫层越厚，改善效果越明显。

表6 复式加固结构中垫层厚度对PCCP混凝土内壁环向应变改善比例

| 断丝比例 | 内水压力/MPa | 垫层厚度/mm | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 5 | 7.5 | 10 | 12.5 |
| 0% | 0.6 | 11.5% | 17.9% | 26.0% | 33.2% |
| 0% | 0.9 | 19.5% | 25.3% | 35.0% | 41.7% |
| 10% | 0.9 | 12.7% | 16.9% | 22.2% | 26.9% |
| 20% | 0.9 | 10.8% | 13.6% | 18.4% | 22.4% |
| 30% | 0.9 | 9.3% | 11.6% | 15.8% | 19.2% |
| 40% | 0.9 | 8.2% | 10.1% | 13.8% | 16.8% |
| 50% | 0.9 | 7.4% | 8.9% | 12.3% | 14.9% |
| 60% | 0.9 | 6.7% | 8.0% | 11.1% | 13.4% |
| 70% | 0.9 | 6.2% | 7.2% | 10.0% | 12.2% |

## 5 结论

本文通过建立不同管径和垫层厚度的复式碳纤维加固PCCP有限元模型，模拟不同内水压力作用及不同预应力损失程度的情况，得到CFRP与混凝土内壁的应变结果，计算结果表明：(1)在0.6 MPa内水压力作用下，复式碳纤维加固PCCP中垫层厚度为5 mm时，较传统碳纤维加固PCCP中的CFRP环向应变值增加8～16倍，混凝土内壁环向应变改善比例在11.5%～38.7%之间；在0.9 MPa内水压力作用下，复式碳纤维加固PCCP混凝土内壁环向应变改善比例在6.4%～33.2%之间。(2)4.0 m和2.6 m管径复式碳纤维加固结构中，在0.6 MPa内水压力作用下CFRP环向应变值分别为690 με和930 με；在0.9 MPa内水压力作用下CFRP环向应变值分别为900 με和1260 με。管径越小，复式碳纤维加固PCCP中的CFRP环向应变越大，CFRP承受的内水压力越大，加固效果越好。(3)采用复式碳纤维加固2.6 m管径的PCCP，在0.9 MPa内水压力作用下，若垫层厚度从5 mm增至10 mm，CFRP环向应变值从1260 με增至2212 με，混凝土内壁环向应变改善比例从19.5%增至35.0%。CFRP环向应变随着垫层厚度的增加而增大，CFRP承受的内水压力也增加，混凝土内壁环向应变改善效果越明显。

**参 考 文 献：**


[1] 中华人民共和国水利部. 预应力钢筒混凝土管道技术规范：SL 702-2015[S]. 北京：中国水利水电出版社，2015.

[2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 预应力钢筒混凝土管：GB/T 19685-2017[S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[3] American Water Works Association. AWWA Standard for design of prestressed concrete cylinder pipe：AWWA

C304-14[S]. Denver: American Water Works Association, 2007.
[4] ROMER A E, BELL G E C, ELLISON R D. Failure of prestressed concrete cylinder pipe[C]//Mohammad N, Lynn O. Pipelines 2007: Advances and Experiences with Trenchless Pipeline Projects. Massachusetts: ASCE, 2007: 1-17.
[5] GE S Q, SINHA S. Failure analysis, condition assessment technologies, and performance prediction of prestressed-concrete cylinder pipe: state-of-the-art literature review[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, 28(3): 618-628.
[6] 窦铁生, 燕家琪. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的破坏模式及原因分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(1): 29-33.
[7] NDAH T T, CROWLEY J S. Got a lot of wire breaks, now what? An overview of the Santa Clara valley water district's emergency repair of a 96-inch PCCP and changes in program and policies[C]//Livingston B L, Cate C. Pipelines 2016: Out of Sight, Out of Mind, Not Out of Risk. Missouri: ASCE, 2016: 1613-1627.
[8] 张海鹏, 赵丽君, 窦铁生, 等. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)几种常用加固方法的对比研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(1): 36-39.
[9] LOERA R. Advancements in FRP repair of PCCP[C]//Tom J R, George F R. Pipelines 2010: Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability: Renew, Rehab, and Reinvest. Colorado: ASCE, 2010: 1088-1097.
[10] ZARGHAMEE M S, ENGINDENIZ M. CFRP renewal of PCCP: An overview[C]//Rahman S, McPherson D. Pipelines 2014: From Underground to the Forefront of Innovation and Sustainability. Oregon: ASCE, 2014: 920-931.
[11] MONCRIEF W J, KENDALL D R, MULLIGAN S B, et al. Rehabilitation of 78-inch PCCP with carbon fiber reinforced composite material[C]//Joseph P C. Pipelines 2001: Advances in Pipelines Engineering and Construction. California: ASCE, 2001: 1-8.
[12] 任慧韬. 纤维增强复合材料加固混凝土结构基本力学性能和长期受力性能研究[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2003.
[13] American Water Works Association. AWWA Standard for CFRP renewal and strengthening of prestressed concrete cylinder pipe(PCCP): AWWA C305-18[S]. Denver: American Water Works Association, 2018.
[14] ZARGHAMEE M S. AWWA C305—a new standard for CFRP renewal and strengthening of PCCP[C]//Jeffrey W. H, Mark S M. Pipelines 2019: Condition Assessment, Construction, and Rehabilitation. Tennessee: ASCE, 2019.
[15] ZARGHAMEE M S. Theoretical and experimental basis of AWWA standard C305 on CFRP renewal of PCCP[C]// Pridmore A, Geisbush J. Pipelines 2017: Condition Assessment, Surveying, and Geomatics. Arizona: ASCE, 2017.
[16] 尚守平, 彭晖, 童桦, 等. 预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件的抗弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 24-30.
[17] GIPSOV M, ARNOLD S F, OJDROVIC R. Shooting at a moving target: forensic analysis of CFRP strengthened PCCP confirms the evolution of joint detailing and design[C]//Pridmore A, Geisbush J. Pipelines 2017: Condition Assessment, Surveying, and Geomatics. Arizona: ASCE, 2017: 363-372.
[18] 窦铁生, 程冰清, 胡赫, 等. CFRP修复PCCP断丝管的试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(1): 68-74.
[19] 窦铁生, 程冰清, 胡赫, 等. CFRP修复PCCP的内水压试验[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(12): 35-40.
[20] 董晓农. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)内壁复式碳纤维加固技术的研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
[21] 董晓农, 李萌, 孙志恒, 等. 预应力钢筒混凝土管内壁复式碳纤维加固试验与计算分析[J]. 水利学报, 2019, 50(6): 780-786.
[22] 孙志恒, 董晓农, 郝巨涛, 等. PCCP内壁复式碳纤维加固技术及应力计算分析[J]. 水利水电技术, 2018, (7): 88-93.

(下转第312页)

## Study on the chronicles of Master Li Yizhi and its author Hu Buchuan

TAN Xuming, WANG Xiaolu

(*China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*)

**Abstract**: Pivoting around *The Chronicles of Master Li Yizhi*, this paper takes stock of the life of Master Li Yizhi and his chronological author Mr. Hu Buchuan during China's traditional water engineering transition. In the 1930s and 1940s, the first generation of Chinese water engineers brought to fruition a number of modern irrigation projects in Shaanxi Province despite extreme difficulties. They blaized a trail of modern engineering in China by assimilating and applying western water science and technology. *The Chronicles of Master Li Yizhi* is a classic of modern chronicles, which has filled in many gaps in modern water engineering history and bears important historical value. The study also notes in the conclusions that Mr. Hu Buchuan, who is the writer of *The Chronicles of Master Li Yizhi*, prioneered with indigenous design and construction of large sluices and initiated irrigation district water management under the water right mechanism. Mr. Hu Buchuan is an unacknowledged modern water scientist, who deserves an in-depth study from many perspectives.

**Keywords**: modern times; history of water conservancy; Li Yizhi; Hu Buchuan

(责任编辑：王学凤)

---

(上接第307页)

## Strain effect analysis of high compression elastic cushion on PCCP strengthened with composite CFRP

WEI Haonan, SUN Zhiheng

(*China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*)

**Abstract**: The application of composite CFRP liner inside a PCCP is an innovative reinforcement technology. To evaluate the effect of both different pipe diameters and the thickness of high compression elastic cushion on PCCP strengthened with composite CFRP, this paper established the corresponding finite element models by six pipes with different diameters and four cushions with different thicknesses, which analyzed the influence of cushion on the strain of PCCP strengthened with composite CFRP considering the various stages of the internal pressure and the number of broken wires. The results indicate that, when the thickness of the elastic cushion is 5 mm in PCCP strengthened with composite CFRP, the circumferential strain of CFRP is increased by 8 ~ 16 times and under internal working pressure of 0.6 MPa, the inner concrete core is reduced by 11.5% ~ 38.7%. More pronounced reinforcement effect is shown in composite CFRP-lined PCCP with the smaller diameter. The results of composite CFRP-lined PCCP with 2.6 m inner diameter demonstrate that the circumferential strain of CFRP is improved remarkably and the deformation of the inner concrete core is obviously reduced when using the thicker cushion. The research results presented in this paper can provide technical references for the reinforcement design of composite CFRP-lined PCCP.

**Keywords**: Prestressed Concrete Cylinder Pipe (PCCP); high compression elastic cushion; composite CFRP

(责任编辑：祁 伟)