

# PCCP 内壁碳纤维补强加固 1:1 模型试验研究

孙志恒<sup>1</sup> 杨进新<sup>2</sup> 李萌<sup>1</sup> 韦昊南<sup>1</sup>

1. 中国水利水电科学研究院 2. 北京市水利规划设计研究院

内容摘要：针对 PCCP 的预应力钢丝断裂数目的增多，给 PCCP 运行带来的安全隐患问题，本文提出了 PCCP 复式碳纤维加固技术，在原型 PCCP 内壁进行了现场实施，证实了 PCCP 复式碳纤维加固技术的可行性。试验采用电阻应变片和光纤两种测量手段，监测了 1:1 模型在内水压力作用下断丝对 PCCP 内壁混凝土及碳纤维的影响，试验结果证明 4m 直径的 PCCP 采用内壁复式碳纤维加固方案，较传统碳纤维加固方案可以提高碳纤维的拉应力水平 4~5 倍。

关键词：PCCP、1:1 模型、复式碳纤维加固、传统碳纤维加固

## 1 前言

预应力钢筒混凝土管（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。目前我国引调水工程中使用 PCCP 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。目前修复破损 PCCP 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。其中内贴碳纤维加固 PCCP 技术是通过树脂类胶结材料将碳纤维材料粘贴于 PCCP 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。但是，传统粘贴碳纤维加固 PCCP 技术存在一些固有缺陷，混凝土的开裂应变与碳纤维的极限拉应变相差甚远，直接粘贴碳纤维难以抑制 PCCP 结构的变形、裂缝的发展和外侧预应力钢丝的断裂，使碳纤维材料的高强度优势不能得到有效发挥。复式碳纤维加固技术是指在碳纤维与混凝土内壁之间增设一层高压压缩弹性垫层，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弹性垫层的压缩量，导致碳纤维环向位移增大，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。有必要将 PCCP 传统碳纤维加固方法与复式碳纤维加固方法进行对比，来验证复式碳

纤维加固方法的可行性与优越性，并为以后的 PCCP 内部补强加固处理积累宝贵的经验。

## 2 试验方案设计

### 2.1 现场试验布置

模型现场试验采用两节直径为 4m 的 PCCP、一节连接管、两个堵头和两个镇墩。图 1 为 PCCP 修复技术 1:1 模型内加固试验布置。其中 1 号 PCCP 采用复式碳纤维加固方法，即在碳纤维与 PCCP 内壁混凝土表面之间粘贴一层高压压缩弹性垫层（5mm 厚），碳纤维选用一层环向+一层纵向+一层环向，碳纤维表面涂刷 SK 单组分聚脲（1~1.5mm 厚）防护，简称“复式碳纤维加固管”；2 号 PCCP 采用传统碳纤维加固方法，即在 PCCP 内壁混凝土表面直接粘贴碳纤维，碳纤维选用一层环向+一层纵向+一层环向，碳纤维表面涂刷 SK 单组分聚脲防护，简称“传统碳纤维加固管”；中间的钢管作为连接管，堵头留有进出人孔，镇墩要求能够承受试验中内水压力的推力。在 PCCP 承插接口 30~40cm 范围内涂刷 4mm 厚的 SK 单组分聚脲封边来增加表面柔性止水。

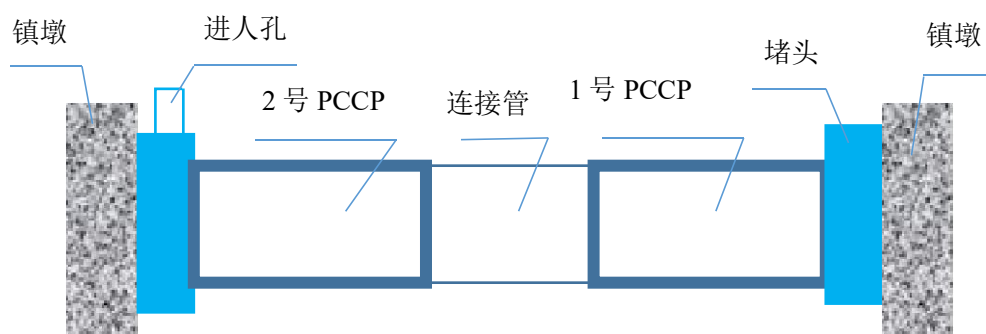


图 1 PCCP 修复技术 1:1 模型内加固试验布置

### 2.2 试验参数

PCCP 试验管道设计工作压力为 0.6MPa、9m 覆土。管芯厚度 320mm，两个试验管均有内、外两层钢绞线，其中 1 号复式碳纤维加固管外层钢丝 226 根、内层钢丝 227 根，2 号传统碳纤维加固管外层钢丝 291 根、内层钢丝 297 根。PCCP 材料力学性能参数见表 1，试验使用碳纤维布力学参数见表 2。

表 1 PCCP 材料力学性能参数

管芯混凝土弹性模量设计值/MPa	钢筒弹性模量设计值/MPa	钢丝弹性模量设计值 /MPa	砂浆弹性模量设计值 /MPa
27860.6	206850	193035	24864
钢丝缠绕应力/MPa	钢筒拉伸屈服强度 /MPa	钢筒抗拉强度/MPa	保护层砂浆抗压强度 /MPa
1177.5	227.53	310	37.92

表 2 碳纤维布力学参数指标

厚度/mm	克重/g/m <sup>2</sup>	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	断裂伸长率/%
0.167	300	>3400	230	0.3	1.7

选择的高压缩弹性垫层具有在弹性范围内压缩量大、本体强度较高、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，压缩 40%以内时的泊松比近似为零，垫层拉伸强度值大于 2.0MPa，拉伸断裂伸长率大于 90%。

### 3 PCCP 内部碳纤维补强加固及测量

#### 3.1 碳纤维补强加固

PCCP 复式碳纤维加固施工工艺为：PCCP 内壁混凝土表面打磨、清洗、晾干。在混凝土表面布置电阻应变片和分布式光纤测点，分别粘贴应变片和分布式光纤，并进行保护。混凝土表面粘贴高压缩弹性垫片，垫片表面辊压平整，并刮涂腻子找平，图 2 为高压缩弹性垫层表面刮涂腻子找平现场。在高压缩弹性垫片表面粘贴两层环向和一层纵向碳纤维布，图 3 为垫层表面粘贴环向碳纤维施工现场，在碳纤维表面布置应变片和光纤测点，粘贴电阻应变片和分布式光纤，并进行保护；在碳纤维表面涂刷 1~1.5mm 厚的 SK 手刮聚脲（抗冲磨型）进行防护。PCCP 传统碳纤维加固施工工艺同上，不同之处是在混凝土表面直接粘贴两层环向和一层纵向碳纤维布。



图 2 高压缩弹性垫层表面刮涂腻子找平



图 3 垫层表面粘贴环向碳纤维施工现场

### 3.2 变测量方法及测点布置

在 1:1 模型试验中，PCCP 混凝土及碳纤维应变测量分别采用电阻应变片测量方法和分布式光纤应变测量方法。

试验对每节管道前后间隔 1.25m 的 3 个断面进行监测，即电阻应变片和环向光纤粘贴在这三个断面的位置。

1 号管内混凝土表面应变片测点布置 14 个测点，碳纤维表面应变片测点布置 10 个测点。2 号管内混凝土表面应变片测点布置 4 个测点，碳纤维表面应变片测点布置 12 个测点。管内混凝土表面光纤采用一条龙的方式粘贴，每节管道混凝土内壁分别贴有 3 个光纤环，共计 6 个光纤环。在每节管道内壁粘贴的碳纤维表面贴了 3 个环向光纤，共计 6 个光纤环。在接近管底的位置粘贴纵向光纤。

## 4 现场试验步骤

在未断丝情况下，施加内水压力，内水压力每次以 0.1MPa 递增方式加载，直到内水压力达到 0.9MPa，每次稳压 10 分钟；在稳压 0.9MPa 的情况下，外层预应力钢丝分四次均匀切断。外层预应力钢丝全部切断后，为试验安全起见，将内水压力卸载至零，开始切断内层预应力钢丝。复式碳纤维加固管内层预应力钢丝每次断丝 28 根，内水压力分别为 0.3MPa、0.5 MPa、0.7MPa 和 0.9MPa，直至全部断丝后卸载，抽空管内

水。传统碳纤维加固管内层预应力钢丝每次断丝 28 根，内水压力分别为 0.3MPa、0.5 MPa、0.7MPa 和 0.9MPa。直至剩余 87 根钢丝后卸载，抽空管内水。

## 5 试验数据分析

### 5.1 内水压力作用下外层预应力钢丝断丝工况

#### (1) PCCP 内壁混凝土表面测点环向应变

在 PCCP 内水压力从 0 增加至 0.9MPa 及在保持内水压力为 0.9MPa，外层预应力钢丝断丝的工况下，复式碳纤维加固管和传统碳纤维加固管混凝土表面测点的环向拉应变均随着内水压力的增加而增大，但当内水压力保持在 0.9MPa 后开始断丝，随着外层预应力钢丝断丝数量的增加，混凝土表面测点应变的增量变化很小，说明外层预应力钢丝对内加固后的 PCCP 承受 0.9MPa 内水压力情况下的影响不大；两个管混凝土表面测点的应变值小，但差值不明显。当内水压力达到 0.9MPa 时，两个管内壁混凝土应变片测点拉应变增量最大值为  $220\mu\epsilon$ ，外层预应力钢丝全部断丝后，两个管内壁混凝土应变片测点拉应变增量最大值为  $240\mu\epsilon$ 。光缆测量结果与应变片测量结果基本相当。

#### (2) PCCP 内壁碳纤维表面测点环向应变

PCCP 内水压力从 0 增加至 0.9MPa，并且保持内水压力 0.9MPa 不变，外层预应力钢丝分 4 次均匀断丝的工况下，PCCP 内壁碳纤维表面电阻应变片测点环向应变增量变化见图 4。从图 4 可以看出，随着内水压力的增加，复式碳纤维加固管内壁碳纤维表面应变值较传统加固碳纤维表面应变值显著增加，管腰部和管顶应变增加值约为 80%，管底部测点应变增加值约为 40%。当内水压力保持在 0.9MPa 后开始断丝，随着外层预应力钢丝断丝的增加，各测点应变增加值基本不变。传统碳纤维加固管内壁碳纤维表面的测点应变增量与混凝土表面的测点应变增量基本相同。

图 5 为光纤测量碳纤维应变数据。从图 5 可以看出，每个管道碳纤维表面有对应三个光纤环应变，对比复式碳纤维加固管和传统碳纤维加固管内壁碳纤维表面的相对应变可以发现，复式碳纤维加固管碳纤维相对应变明显增大，加压至 0.9MPa 时，相对应变值在  $1300\mu\epsilon$  左右；传统碳纤维加固管碳纤维相对应变较小，加压至 0.9MPa 时，相对应变值在  $300\mu\epsilon$  左右，二者相差  $1000\mu\epsilon$ 。

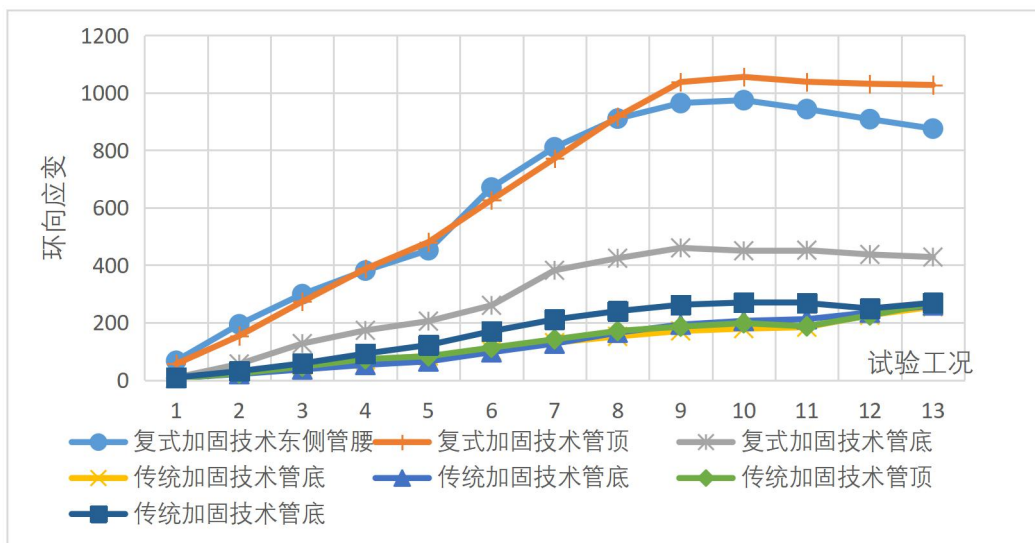


图 4 PCCP 内壁碳纤维表面应变片测点环向应变增量变化

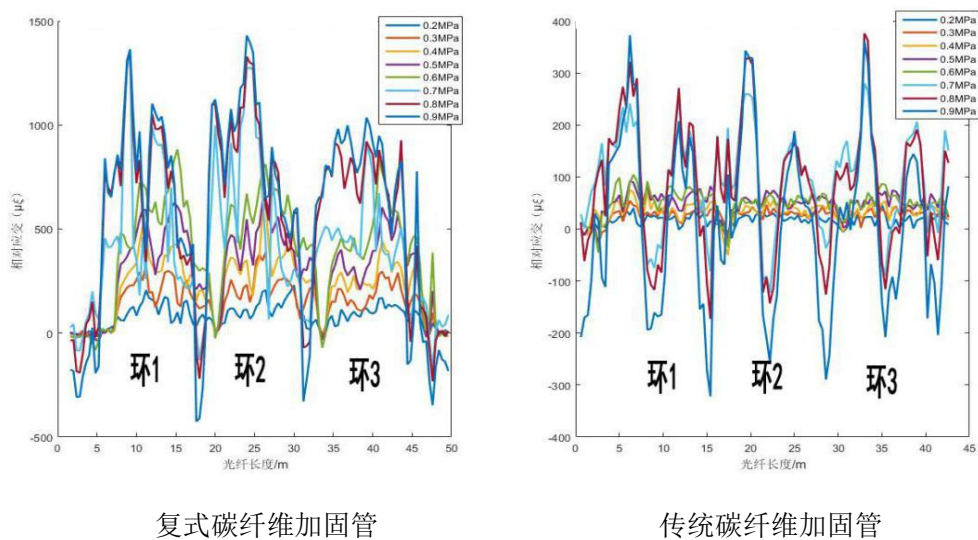


图 5 光纤测量碳纤维应变数据

电阻应变片和分布式光纤测量结果均表明复式碳纤维承担的内水压力较传统碳纤维显著增大。

## 5.2 内水压力下内层预应力钢丝断丝后工况

### (1) 内层预应力钢丝数量与 PCCP 内壁混凝土环向应变增量

从电阻应变片和分布式光纤测量结果表明，试验管的内层预应力钢丝均匀切断后，随着内水压力的增加，混凝土表面各测点的环向应变增量不断增大，当内水压力为 0.9MPa 时，复式碳纤维加固管管道内壁混凝土应变为 250~300 $\mu\epsilon$ ，传统碳纤维加固管管道内壁混凝土应变为 300~350 $\mu\epsilon$ 。复式碳纤维加固管混凝土应变较传统碳纤维加固管混凝土应变小 50 $\mu\epsilon$ 左右。当第一次加压至 0.9MPa 后卸压至零，再进行第二次切割。各应变片测点应变值变化规律基本一致。

## (2) 内层预应力钢丝数量与 PCCP 内壁碳纤维环向测点应变增量

从电阻应变片结果表明，传统碳纤维加固管内层预应力钢丝第一次均匀切断 37 根，随着内水压力的增加，碳纤维表面应变片各测点的环向应变增量不断增大，当内水压力为 0.9MPa 时，碳纤维表面的应变片测点应变为 189~283 $\mu\epsilon$ ；相应的复式碳纤维加固管第一次均匀切断 28 根，随着内水压力的增加，各测点的应变增量迅速增大，当内水压力为 0.9MPa 时，碳纤维表面的应变片测点应变为 717~1091 $\mu\epsilon$ ，复式碳纤维加固管较传统碳纤维加固管中的碳纤维应变大 4~5 倍。当第一次加压至 0.9MPa 后卸压至零，再进行第二次切割，应变片各测点应变值变化规律基本一致。

表 5 内层预应力钢丝数量与碳纤维表面光纤环向应变增量

内层钢绞线断丝次数	传统碳纤维加固管测点应变 ( $\mu\epsilon$ )			复式碳纤维加固管测点应变 ( $\mu\epsilon$ )		
	内水压力 (MPa)	内层钢绞线数量	光纤应变增量	内水压 (MPa)	内层钢绞线数量	光纤应变增量
1	0.9	260	150~250	0.9	199	820~920
2	0.9	223	150~250	0.9	171	820~920
3	0.6	143	100~120	0.6	143	500 左右
4	0.6	115	100~120	0.6	115	500~600
5	0.6	115	150~190	0.6	87	800~1000
6	0.5	87	50~100	0.5	58	600~900

表 5 为内层预应力钢丝数量与碳纤维表面光纤环向应变增量变化情况。从表 5 可以看出，传统碳纤维加固管第一次均匀切断 37 根，当内水压力为 0.9MPa 时，管中碳纤维表面光纤测得的应变为 150~250 $\mu\epsilon$ ；相应的复式碳纤维加固管第一次均匀切断 28

根，当内水压力为 0.9MPa 时，管中碳纤维表面光纤测得的应变为 820~920 $\mu\epsilon$ 。复式碳纤维加固管中的碳纤维表面的环向应变较传统碳纤维加固管中的碳纤维应变大 4~5 倍。光纤与应变片测量结果基本一致。

### 5.3 卸载后管内部检查

试验完成后排空管内水，进入 PCCP 内部进行检查。从现场检查情况来看，复式碳纤维加固管和传统碳纤维加固管管道内部均未发现碳纤维剥落及脱空现象。复式碳纤维加固管内部管体内径同试验前没有变化。

## 6 结语

(1) 试验过程采用电阻应变片测量和分布式光纤测量两种方式同时监测混凝土及碳纤维表面应变，两种测量方式获得的测点应变结果基本一致，起到了相互印证了效果，试验数据可靠。

(2) 试验结果证明，采用碳纤维内加固后的两节 PCCP 在 0.9MPa 内水压力作用下，外层钢绞线全部断丝，对内壁采用碳纤维加固的两节 PCCP 的结构影响不大。

(3) 在内水压力作用下，PCCP 采用内壁复式碳纤维加固方案，较传统碳纤维加固方案可以提高碳纤维的拉应力水平 4~5 倍，提升了碳纤维加固 PCCP 的效果，起到了使碳纤维与 PCCP 联合共同承受内水压力的效果及预防 PCCP 爆管的作用。

(4) 采用复式碳纤维加固的 1 号管和采用传统碳纤维加固的 2 号管在多次加、卸的情况下，PCCP 管道内部均未发现碳纤维剥落情况，管体内部尺寸与试验前没有明显变化，说明在 PCCP 内部粘贴碳纤维补强加固工艺是可行的，结构是可靠的。

## 参考文献

[1] 张海丰 董顺 周维 等. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)结构修复更新技术介绍[J]. 给水排水, 2017, (8): 104-108.

[2] Engindeniz M, Nardini P D, Ojdrovic R P, et al. CFRP Repair and Strengthening of PCCP for Thrust Restraint[C]//Pipelines 2012: Innovations in Design, Construction,

Operations, and Maintenance, Doing More with Less. Florida: ASCE, 2012: 1368-1376.

[3] 孙志恒 董晓农 郝巨涛 马宇 PCCP 内壁复式碳纤维加固技术及计算分析 水利水电技术 2018.7 P88~93

[4] 董晓农 李萌 孙志恒 马宇 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 水利学报 2019 年 6 月 780~786

[5] 张海丰 董顺 周维 等. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)结构修复更新技术介绍[J]. 给水排水, 2017, (8): 104~108.

[6] 沈之基 郑小明 美国 PCCP 管的失效及对中国给水管道应用的警示 水利规划与设计 2015 年第 3 期

作者简介：孙志恒 教授级高工 从事水工混凝土建筑物检测、评估与修补加固技术 邮箱：[82158652@qq.com](mailto:82158652@qq.com)