

DOI: 10.11779/CJGE2019S1040

断丝 PCCP 管道外贴 CFRP 修复足尺模型试验研究

翟科杰¹, 方宏远^{2,4,5}, 付 兵³, 王复明^{1,2,4,5}, 胡本月^{2,4,5}, 雷新海⁶

(1. 中山大学土木工程学院, 广东 广州 510275; 2. 郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 3. 广东工业大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 4. 重大基础设施检测修复技术国家地方联合工程实验室, 河南 郑州 450001; 5. 水利与交通基础设施安全防护河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001; 6. 郑州水务建筑工程股份有限公司, 河南 郑州 450002)

摘要: 断丝是目前预应力钢筒混凝土管 (Prestressed Concrete Cylinder Pipe, PCCP) 最为常见的一种病害, 如不及时加固, 极易造成爆管等事故。针对长距离 PCCP 输水管道难以停水维修问题, 提出了一种外贴碳纤维增强复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) 的维修方法。为了探究外贴 CFRP 修复断丝 PCCP 效果, 采用一根内径 2.8 m 的 PCCP 管道进行了内水压足尺试验。试验对修复前后 PCCP 结构应变响应进行了对比分析, 结果表明: 由于 CFRP “箍束”作用, 修复后断丝区中间截面材料应变减小, 利于 PCCP 承压。

关键词: 碳纤维增强复合材料 (CFRP); 预应力钢筒混凝土管 (PCCP); 外贴修复; 足尺试验

中图分类号: TV332; TU528.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)S1-0157-04

作者简介: 翟科杰 (1991—), 男, 博士研究生, 主要从事混凝土结构修复加固研究。E-mail: zhaikj@mail2.sysu.edu.cn。

CFRP wrapping to retrofit a deteriorated prestressed cylinder concrete pipe: full-scale experiments

ZHAI Ke-jie¹, FANG Hong-yuan^{2,4,5}, FU Bing³, WANG Fu-ming^{1,2,4,5}, HU Ben-yue^{2,4,5}, LEI Xin-hai⁶

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. College of Water Conservancy & Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 4. National Local Joint Engineering Laboratory of Major Infrastructure Testing and Rehabilitation Technology, Zhengzhou 450001, China; 5. Collaborative Innovation Center of Water Conservancy and Transportation Infrastructure Safety, Henan Province, Zhengzhou 450001, China; 6. Zhengzhou Water Construction Project Limited by Share Ltd, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The prestressed concrete cylinder pipes (PCCPs) are often deteriorated due to rupture of prestressed steel wires. Such deteriorated PCCPs need to be retrofitted timely and effectively, otherwise they could suffer from explosion. An innovative retrofitting technique is therefore proposed, which is carbon fiber reinforced polymer (CFRP) wrapping outside the deteriorated PCCPs, and the retrofitting technique is especially suitable for the cases that shutting off water is impossible. In order to evaluate the effectiveness of the newly-proposed retrofitting technique for PCCPs, a full-scale PCCP of 2.8 m in inner diameter is tested under internal water pressure. The strains of PCCP structures are compared before and after the repair. It is found that the strains near the ruptured steel wires significantly decrease due to the presence of CFRP, which improves the operation of the PCCPs.

Key words: carbon fiber-reinforced polymer; prestressed steel cylinder concrete pipe; retrofitting; full-scale experiment

0 引言

预应力钢筒混凝土管 (PCCP) 是由混凝土管芯、预应力钢丝、钢筒、砂浆等材料组成的复合结构, 结构型式分为埋置式 (PCCPE) 和内衬式 (PCCPL) 两类^[1-2]。PCCP 在工程运用中主要受到内水压作用, 因此 Ross^[3]、McCall^[4]、Zarghami^[5]和 Tremblay^[6]等学者曾对 PCCP 进行过内水压试验研究, 分析了 PCCP 在内压下各材料受力特征。

PCCP 管道在我国应用和研究起步较晚, 胡少伟等对南水北调超大口径 PCCP 管道混凝土管芯预存裂缝问题进行了研究, 探讨了预存裂缝对承载力的影响^[7];

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0802400); 河南省重大科技专项项目 (171100310100); 河南省教育厅高校科技创新人才计划项目 (19HASTIT043); 郑州大学优秀青年人才科研基金项目 (1621323001)

收稿日期: 2019-04-30

*通讯作者 (E-mail: 18337192244@163.com)

表 1 PCCP 几何尺寸

Table 1 Geometric dimensions of PCCPs

PCCP 内径 D_i/mm	管芯厚度 h_c/mm	钢丝直径 d/mm	钢管直径 D_o/mm	钢管厚度 t_o/mm	钢丝间距/mm
2800	200	7	2923	1.5	14.1

表 2 PCCP 材料性能参数

Table 2 The material parameter of PCCP

混凝土弹性模量 设计值 E_c/MPa	混凝土 强度 等级	砂浆弹性模量 设计值 E_m/MPa	砂浆 强度 等级	钢管弹性 模量设计 值 E_y/MPa	钢管弹性 模量设计 值 E_s/MPa	钢丝强度 设计值 f_{py}/MPa	钢管强度设 计值 f/MPa	工作内压 /MPa
34500	C50	24165	C45	206000	205000	1110	215	0.8

窦铁生等采用了 BOTDA 和 FBG 光纤传感技术, 在加压过程中连续测试 PCCP 管道各层结构响应^[8]。

然而, 由于各种因素影响, PCCP 管道预应力钢丝容易出现断裂现象, 如不进行修复, 在运行过程中可能发生爆管事故。PCCP 断丝修复方法主要包括后张预应力法、外包混凝土法、内部衬钢法等^[9]。随着纤维布在工程加固领域的广泛应用, 有学者提出使用纤维布对 PCCP 进行内衬加固。Lee 和 Karbhari^[10]通过 PCCP 截面试验, 研究了内衬 FRP 在外压和内压作用下的受力性能; Lee 和 Lee^[11]基于有限元方法, 分析了 CFRP 内衬层数、内衬角度、管道断丝数目等因素对 PCCP 的影响; 窦铁生等^[9]采用 2.6 m 内径 PCCP 进行了 CFRP 内衬修复足尺试验研究, 结果表明, 修复效果明显。

上述成果可对断丝 PCCP 管道进行有效修复, 但其在施工过程中需要中断输水进入管道施工, 对于一些不能停水或小口径的 PCCP 不能适用。因此, 本文提出在断丝 PCCP 外侧粘贴 CFRP, 拟对断丝管道进行不停输修复。并对一根内径为 2.8 m 的埋置式 PCCP 进行了足尺试验研究。对该 PCCP 进行 10% 断丝, 加压到工作内压, 用以模拟实际工作状态中的 PCCP。之后进行泄压, 外贴两层 CFRP 修复, 再加压至工作状态, 对修复前后 PCCP 受力状态进行对比分析。为实际修复施工提供依据。

1 几何尺寸及材料参数

本次试验选用内径为 2.8 m 的埋置式预应力钢管混凝土管 (PCCPE), 该管按照《预应力钢管混凝土管》(GB/T 19685—2005)^[12]和《Design of Prestressed Concrete Cylinder Pipe》(ANSI/AWWA C304—2014)^[1]制作而成。其几何尺寸及材料性能参数见表 1 和表 2。几何尺寸及材料性能参数均为 PCCP 制造厂家给出。断丝修复所用 CFRP 厚为 0.167 mm, 宽为 500 mm, 弹性模量为 240 GPa, 抗拉强度为 3400 MPa。

2 试验方案

2.1 测点布置

本次试验选用栅长分别为 100 mm 和 50 mm 的应

变片分别测量砂浆 (CFRP) 和钢管外侧混凝土管芯在加压过程中的应变响应。在 PCCP 管体上布置 5 个横截面 (如图 1)。在每个截面处进行开凿, 暴露出混凝土管芯用以粘贴应变片。

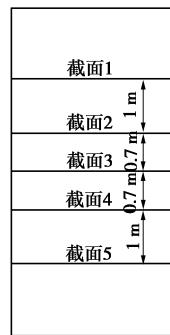


图 1 横断面布置

Fig. 1 Layout of cross section

2.2 加载方案

试验加载前先将 PCCP 管体内通水浸泡 24 h。之后用砂轮机在 PCCP 管中部进行 10% 断丝, 模拟 PCCP 的断丝受损情况, 接着逐级加压至工作内压 0.8 MPa, 每级 0.1 MPa, 待应变示数稳定后, 再进行下一级加压。试验过程中测量砂浆和钢管外侧混凝土管芯在每级内水压作用下的应变响应。修复后加载方案与修复前一致, 内水压逐级加至工作内压 0.8 MPa, 并测量各材料应变数据。

2.3 CFRP 修复方案

第一次加载结束后, 将内水压泄去, 对断丝开槽处进行修补, 之后沿 PCCP 截面 3 粘贴两层宽 500 mm 的 CFRP 进行修复 (如图 2)。并在与砂浆应变片对应位置的 CFRP 上粘贴 CFRP 应变片。

3 试验结果与分析

3.1 试验现象

加压初期, PCCP 未出现任何宏观现象, 但应变仪显示各材料应变均随内水压逐级增大而呈线性增大, 断丝处钢丝有回缩但不够明显。当内水压达到约 0.7 MPa, 有个别位置出现细微裂纹, 裂纹方向与竖向约成 45° 夹角, 稳定内水压 5 min 后直至各材料应变不再增大。继续升压至工作内压 0.8 MPa, 此过程中

能听到预应力钢丝与砂浆之间由于发生黏结滑移而产生的轻微“咔嚓”声, 裂纹数目增多且呈现“鱼骨”状(如图 3), “鱼骨”宽约 500 mm, 且有环向细微裂缝出现。钢丝回缩值变大, 由于断丝区两端存在未断预应力钢丝的约束作用, 使得钢丝回缩呈现出两端小中间大的“枣核”状(如图 4)。稳定内水压在 0.8 MPa 直到各材料应变稳定, 加压停止, 最后测得断丝两端钢丝最小回缩值约 10.2 mm, 中间最大回缩值约 38.2 mm。



图 2 外部粘贴 CFRP 修复 PCCP
Fig. 2 Repair of PCCPs using CFRP

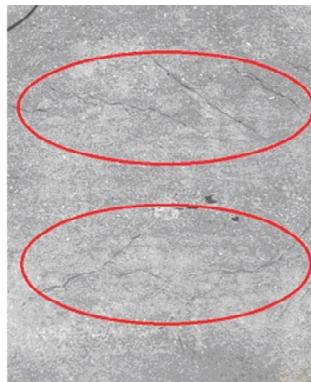


图 3 “鱼骨”状裂纹
Fig. 3 Cracks

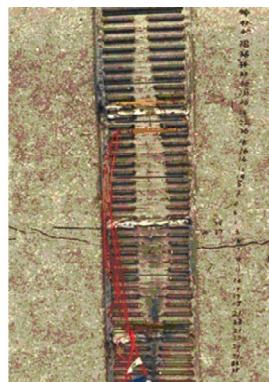


图 4 预应力钢丝回缩
Fig. 4 Retraction of rebars

修复后, 加压初期 PCCP 管体均未出现明显宏观破坏现象, 随内水压增大, 各材料应变线性增长。在断丝位置处, CFRP 受到集中应力, 因此 CFRP 在断

丝位置处应变最大, 至断丝位置沿 PCCP 环向向两侧逐渐减小。

3.2 修复前后相对应位置处砂浆与 CFRP 应变对比

图 5 为修复前后两次加压中截面 3 处砂浆与对应位置处 CFRP 的应变对比情况。由图 5 可见, 在加压初期, 修复前后砂浆与 CFRP 应变几乎一致, 当内水压达到约 0.4 MPa, 修复后 CFRP 应变比修复前砂浆应变小, 说明此时由于 CFRP 的“箍束”作用, 使得最外层材料在内水压作用下发生较小应变, CFRP 发挥作用, 有利于 PCCP 的受力。

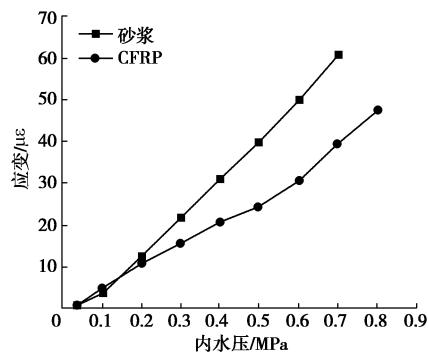


图 5 修复前后截面 3 相对应位置处砂浆与 CFRP 应变对比
Fig. 5 Strain contrast of CFRP and mortar on section 3 before and after repaired

图 6 为截面 4 处砂浆应变对比情况。由图 6 可见, 修复前后对截面 4 处砂浆应变几乎无影响, 说明 CFRP 的约束加固区域有限, 对截面 4 处砂浆应变不构成影响。

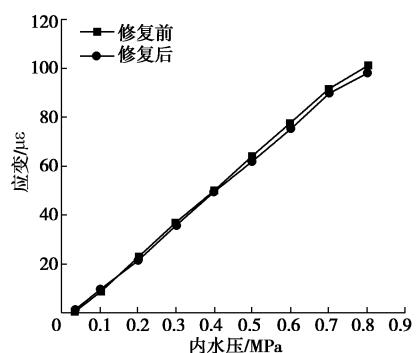


图 6 修复前后截面 4 砂浆应变对比
Fig. 6 Strain contrast of mortar on section 4 before and after repaired

3.3 修复前后混凝土管芯应变对比

图 7 为修复前后截面 3 处混凝土管芯应变对比情况。由图 7 可见, 截面 3 处混凝土管芯在加载初期修复前后变化较小, 当内水压达到 0.5 MPa 后, 修复后混凝土应变才明显小于修复前, 由于 CFRP 的修复, 混凝土应变减小, 更利于 PCCP 的承压。

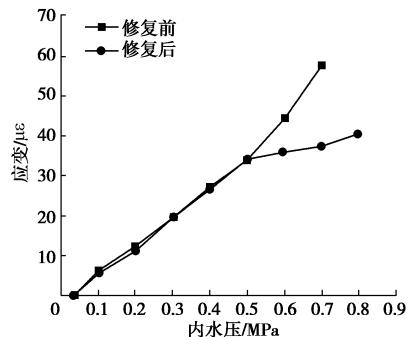


图7 修复前后截面3混凝土管芯应变对比

Fig. 7 Strain contrast of core concrete on section 3 before and after repaired

图8为修复前后截面4处混凝土管芯应变对比情况。由图可见, CFRP 修复前后对截面4处管芯混凝土应变几乎无影响,与砂浆相似,说明 CFRP 的约束加固区域有限,对截面4处管芯混凝土应变不构成影响。

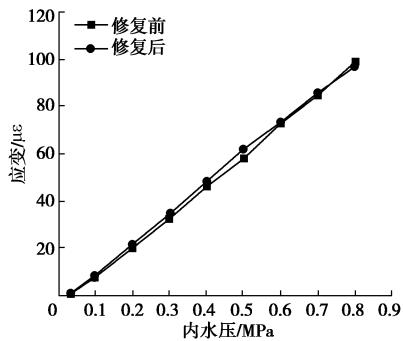


图8 修复前后截面4混凝土管芯应变对比

Fig. 8 Strain contrast of core concrete on section 4 before and after repaired

4 结 论

本文首次进行了外贴 CFRP 修复 PCCP 原型试验,为 PCCP 断丝修复提供新思路,可参考用于指导实际工程应用。通过对一根内径为 2.8 m 原型 PCCP 内水压试验,研究了工作内压下断丝率 10% 时 PCCP 修复前后砂浆与相对应位置处 CFRP 应变变化情况,以及修复前后管芯混凝土应变变化规律,具体可得结论如下:

(1) 断丝率 10% 情况下,当达到工作内压时,修复后截面 3 位置最外层材料应变比修复前应变至少减小 17 $\mu\epsilon$, 管芯混凝土应变至少减小 20 $\mu\epsilon$, CFRP 发挥“箍束”作用,利于 PCCP 承压。

(2) 外贴 CFRP 修复断丝 PCCP, 对 PCCP 断丝截面区域影响较大,对远离断丝区域无影响。

(3) CFRP 最大应变发生在断丝位置处,至断丝位置沿 PCCP 环向两侧逐渐减小。

参 考 文 献:

[1] ANSI/AWWA C304—2014 Design of prestressed concrete

cylinder pipe[S]. American National Standards Institute, American Water Works Association, 2014.

- [2] SL702—2015 预应力钢筒混凝土管道技术规范[S]. 2015. (SL702 — 2015 Technical specifications of prestressed concrete cylinder[S]. 2015. (in Chinese))
- [3] ROSS C W. Tests of prestressed concrete pipe containing a steel cylinder[J]. Journal Proceedings, 1945, 42(9): 37 - 48.
- [4] MCCALL J T, VALENZIANO F P. Combined load tests on 108 inch prestressed concrete embedded cylinder pipe[C]// Proceedings of Symposia on Prestressed Concrete. Sidney, Australia, 1961.
- [5] ZARGHAMEE M S. Hydrostatic pressure testing of prestressed concrete cylinder pipe with broken wires[C]// Pipeline Engineering and Construction international conference, 2003.
- [6] TREMBLAY A W. Combined-load testing of prestressed concrete cylinder pipe[C]// Proceedings International Conference on Pipeline Design and Installation. ASCE, 2015.
- [7] 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]. 水力学报, 2010, 41(7): 876 - 882. (HU Shao-wei, SHEN Jie, WANG Dong-li, et al. Experiment and numerical analysis on super caliber prestressed concrete cylinder pipes with cracks[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(7): 876 - 882. (in Chinese))
- [8] 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]. 水力学报, 2017, 48(12): 1438 - 1446. (DOU Tie-sheng, CHENG Qing-bing, 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 - 1446. (in Chinese))
- [9] 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. (DOU Tie-sheng, CHENG Qing-bing, HU He, et al. Test of CFRP repair PCCP under internal water pressure[J]. China Concrete and Cement Products, 2017(12): 35 - 40. (in Chinese))
- [10] LEE D C, KARBHARI V M. Rehabilitation of large diameter prestressed cylinder concrete pipe (PCCP) with FRP composites-experimental investigation[J]. Advances in Structural Engineering, 2005, 8(1): 31 - 44.
- [11] LEE Y, LEE E T. Analysis of prestressed concrete cylinder pipes with fiber reinforced polymer[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2015, 19(3): 682 - 688.
- [12] GB/T19685 — 2005 预应力钢筒混凝土管 [S]. 2005. (GB/T19685—2005 Prestressed concrete cylinder pipe[S]. 2005. (in Chinese))

(责编: 明经平)