

## PCCP管内环向预应力碳纤维板加固数值分析

吕康伟, 鲁文妍, 刘海祥, 柯敏勇, 许珉凡

### Numerical analysis of reinforcement with circumferential prestressed carbon fiber board in PCCP pipe

L Kangwei, LU Wenyan, LIU Haixiang, KE Minyong, XU Minfan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20210112001>

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 桩承式加筋路堤有限元几何建模方法及边坡效应研究

Geometrical modelling with finite element method and slope effect of geosynthetic reinforced and pile-supported embankments

水利水运工程学报. 2020(1): 84 <https://doi.org/10.12170/20181206001>

##### 配筋率对混凝土 I - II 复合型断裂过程声发射特征的影响

Effect of reinforcement ratio on acoustic emission characteristics during I - II mixed-mode fracture process of concrete

水利水运工程学报. 2020(6): 55 <https://doi.org/10.12170/20191225002>

##### 锚索应力增量法评价边坡稳定性

Evaluation of stability of toppling slope by increment method of anchoring cable stress

水利水运工程学报. 2019(2): 8 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.002>

##### 考虑径流补给的滑坡渗流三维有限元模拟

3D FEM numerical simulation of infiltration of landslide considering runoff

水利水运工程学报. 2017(4): 105 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.015>

##### 基于边界面的多隔舱筒形基础动力分析

Dynamic analysis of multi-compartment bucket foundation based on boundary model

水利水运工程学报. 2020(3): 114 <https://doi.org/10.12170/20190523001>

##### 坝踵混凝土体型对混凝土面板应力变形的影响

Influence of concrete heel shape on stress and deformation of concrete slab of a dam

水利水运工程学报. 2019(1): 11 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.002>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20210112001

吕康伟, 鲁文妍, 刘海祥, 等. PCCP 管内环向预应力碳纤维板加固数值分析 [J]. 水利水运工程学报, 2021(6): 133-141. (LÜ Kangwei, LU Wenyan, LIU Haixiang, et al. Numerical analysis of reinforcement with circumferential prestressed carbon fiber board in PCCP pipe[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(6): 133-141. (in Chinese))

# PCCP 管内环向预应力碳纤维板加固数值分析

吕康伟<sup>1,2</sup>, 鲁文妍<sup>2</sup>, 刘海祥<sup>2</sup>, 柯敏勇<sup>2</sup>, 许珉凡<sup>2</sup>

(1. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 211100; 2. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 为充分发挥碳纤维板(CFRP)的抗拉性能,提升断丝预应力钢管混凝土管(PCCP)的承载能力,提出了管内环向预应力碳纤维板加固方法。研究分析 CFRP 和混凝土的环向应力,得出拉梅公式的力学模型计算结果与有限元计算结果基本相符,两者结果最大仅相差 9.3%。PCCP 钢丝断丝率相同情况下,对不同断丝分布进行了计算研究,断丝率相同情况下断丝在同一位置时最不利。断丝发生时,在断丝处从管内到管外的混凝土损伤由小变大。重点对断丝率为 10% 时预应力 CFRP 加固前后性能进行了比较。结果表明:正常工作水压下,断丝处 PCCP 混凝土、钢管的应力应变显著减小,说明 CFRP 起到了很好的加固效果;断丝率越高,在混凝土内壁没有损坏前,CFRP 的作用越大。管内环向预应力碳纤维板加固方法还具有施工周期短、环境影响小、非开挖、易操作的特点,对实际 PCCP 应急修复具有很好的参考价值。

**关键词:** 预应力钢管混凝土管; 预应力碳纤维板; 有限元加固模型; 断丝; 加固效果

中图分类号: TV672<sup>+</sup>.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2021)06-0133-09

预应力钢管混凝土管(PCCP)是一种由混凝土管芯、钢管、高强度预应力钢丝和砂浆保护层组成的复合型管材<sup>[1]</sup>,被广泛应用于我国水利、化工、市政等多个领域。但 PCCP 在使用过程中会出现各种缺陷,这些缺陷大多是由于设计、施工和运行环境等引起的。为了提高 PCCP 运行中的安全性,延长 PCCP 管的使用寿命,许多学者对 PCCP 管道维修加固进行了大量研究。目前 PCCP 管维修加固可以采用置换、外部后张预应力、内衬钢管、粘贴复合纤维材料等方法。Houssam 等<sup>[2]</sup>得出碳纤维(CFRP)加固效果在提高管道内压承载力、强度、耐腐蚀性等方面优于 GFRP、FRP;陈亚鹏<sup>[3]</sup>通过试验数据和理论验证了 CFRP 加固 PCCP 的有限元模型的正确性;窦铁生等<sup>[4-5]</sup>对 CFRP 修复 PCCP 进行内外压试验和数值分析,认为粘贴在管芯混凝土内壁上的 CFRP 与 PCCP 结构联合承载,在管芯混凝土出现微裂缝后参与应力重分布,限制了管芯混凝土裂缝的开展,调整了管体结构的受力状态。孙志恒等<sup>[6]</sup>提出了一种内壁复式碳纤维加固,即在碳纤维与 PCCP 内壁混凝土表面之间增设一层高压压缩弹性垫层,并进行了试验和理论计算,结果表明此种加固技术实现了碳纤维与 PCCP 共同承受内水压力的效果。Zhai 等<sup>[7-8]</sup>提出了一种采用碳纤维增强聚合物(CFRP)外粘接修复 PCCP 的新方法,结果表明,碳纤维布的断裂率越高,其作用越大;修复效果随着修复层数的增加而增强。Hu 等<sup>[9-10]</sup>对 CFRP 衬砌预应力混凝土圆筒管进行了内压试验与数值研究,采用具有双线性牵引分离响应的粘结单元层模拟复杂的 CFRP-混凝土粘结界面。此外,还介绍了失效风险分析方法,用来确定对断丝 PCCP 需使用的 CFRP 层数。文献[11]提出了一种管内轮胎式气压加载环向预应力加固装置,为本文研究提供了良好的基础。现阶段已有研究大多考虑碳纤维材料被动受力加固,即 CFRP 在水压之后开始起作用,本文研究的预应力钢管混凝土管内环向预应力 CFRP 加固方法,其原理是通过在管内张

收稿日期: 2021-01-12

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405003);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y417008)

作者简介: 吕康伟(1994—),男,四川达州人,硕士研究生,主要从事工程结构安全评估理论和修复加固新材料、新技术等研究。E-mail: 1182769144@qq.com 通信作者: 鲁文妍(E-mail: wylu@nhri.cn)

拉、粘贴碳纤维板,使预应力碳纤维板与 PCCP 联合受力,主动补偿由于断丝导致的预应力损失,形成新的受力平衡,充分发挥混凝土的抗压性能和 CFRP 的高强抗拉性能,从而提高高损 PCCP 管道的整体刚度及承载能力。本文通过有限元模拟方法分析了 PCCP 管内预应力碳纤维板加固的效果。

## 1 PCCP 加固有限元模型

PCCP 包括内衬式和埋置式两种,其中 DN1400 以上通常为埋置式。本文采用埋置式 PCCP 建立有限元模型。

### 1.1 模型参数

PCCP 管道内径 2 800 mm,管长 5 000 mm,混凝土芯厚 252 mm,钢管内径 2 922 mm,钢管厚度 2 mm,钢丝直径 7 mm,钢丝间距 16.4 mm; C50 混凝土弹性模量 34.5 GPa,砂浆弹性模量 23.4 GPa,钢管弹性模量 206 GPa,钢丝弹性模量 205 GPa,钢丝抗拉强度 1 570 MPa,钢管抗拉强度 227 MPa,管道内部工作压力 0.8 MPa; CFRP 厚 1.2 mm,抗拉强度 2 810 MPa,弹性模量 180 GPa。

### 1.2 模型材料本构及单元类型

混凝土采用八节点六面体线性缩减积分的 Solid 单元(C3D8R)模拟,本构模型采用混凝土塑性损伤(CDP)模型<sup>[12-13]</sup>,基于拉压各向同性塑性的连续线性假设,将弹性损伤与拉压塑性相结合以描述混凝土的非线性行为,使用损伤参数实现加载中材料刚度的折减,反映混凝土材料塑性变形和弹性损伤,混凝土结构规范中应力应变表达式为:

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_c \varepsilon \quad (1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_c \varepsilon \quad (2)$$

式中: $\sigma$ 为应力; $\varepsilon$ 为应变; $E_c$ 为混凝土材料的弹性模量; $d_t$ 为混凝土单轴受拉损伤演化参数; $d_c$ 为混凝土单轴受压损伤演化参数。

钢管属于薄壁结构,采用四节点 Shell 单元(S4R)模拟,钢丝采用杆 Truss 单元(T3D2)来模拟,应力应变关系均采用理想弹塑性模型<sup>[14]</sup>。砂浆保护层采用塑性损伤模型,四节点 Shell 单元(S4R)模拟。CFRP 板厚 1.2 mm,属于薄壁结构,采用四节点 Shell 单元(S4R)模拟。模型中 CFRP 受力形式主要为受拉,且 PCCP 加固后碳纤维板受力远达不到其抗拉强度,故有限元分析时取碳纤维板的应力-应变关系为线弹性断裂模型。

### 1.3 预应力模拟及验证

预应力可采用等效荷载、初始应变法和降温法来模拟。钢丝预应力采用降温法,通过钢丝的降温收缩来施加 PCCP 的预压应力。钢丝降温公式为:

$$\Delta t = \frac{F}{\alpha EA} \quad (3)$$

式中: $\Delta t$ 为施加的降温值; $F$ 为钢丝轴力; $\alpha$ 为钢丝线膨胀系数,取  $1.2 \times 10^{-5}$ ;钢丝弹性模量  $E$  为  $2.05 \times 10^5$  MPa; $A$  为预应力钢丝的截面面积。根据钢丝需要设定的预应力,求出温降  $\Delta t$ 。钢丝抗拉强度为 1 570 MPa。

碳纤维板预应力模拟采用等效荷载法。在 CFRP 施加预应力后把预应力 CFRP 用结构胶粘贴在 PCCP 内壁,此时管内壁受到向内的预压应力,故采用等效荷载法进行模拟。CFRP 抗拉强度 2 810 MPa, C50 混凝土的抗拉强度标准值为 2.64 MPa, CFRP 的断裂伸长率为 1.72%,为保证 CFRP 与混凝土的粘接效果,结合试验取伸长率为 0.421%,则 CFRP 预应力值为 758 MPa。加载过程如图 1 所示。

运用材料力学中的薄壁圆筒环向应力公式计算得出所施加的等效荷载:

$$\sigma = \frac{pd}{2\delta} \quad (4)$$

式中: $\sigma$ 为薄壁圆筒环向应力; $p$ 为圆筒内压; $d$ 为圆筒内径; $\delta$ 为圆筒厚度。由式(4)得出等效荷载压力  $p$  的大

小为 0.65 MPa。分别运用弹性力学知识和数值模拟计算出 CFRP、混凝土的环向应力, 将两者结果进行比较验证预应力 CFRP 加固的有限元模型。CFRP 加固的有限元验证模型如图 2 所示。

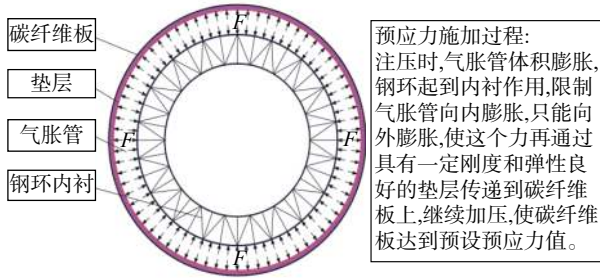


图 1 预应力加载示意

Fig. 1 Schematic diagram of prestress loading

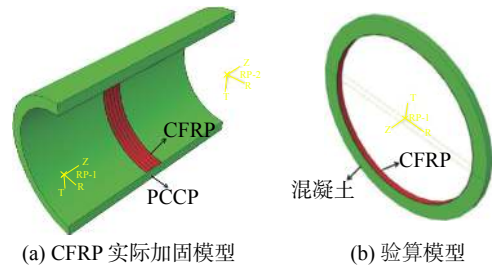


图 2 CFRP 加固模型

Fig. 2 CFRP reinforced model

根据预应力碳纤维板加固结构的特点, 提出如下基本假设: (1)加固 PCCP 的复合结构每层均是弹性介质; (2)各层结构的材料均具有各向同性; (3)各层之间为完全接触, 即不互相脱离也不互相滑动; (4)在接触面上, 两侧结构的正应力相等, 剪切应力也相等, 法向位移和切向位移均相等, 根据弹性力学原理<sup>[6, 14-15]</sup>, 可得平面轴对称问题的均匀受压圆筒的拉梅公式, 其径向位移解如下:

$$u_r = \frac{1}{E} \left[ (1 + \nu) \frac{r_n^2 r_w^2 (p_n - p_w)}{r_w^2 - r_n^2} \frac{1}{r} + (1 - \nu) \frac{p_n r_n^2 - p_w r_w^2}{r_w^2 - r_n^2} r \right] \quad (5)$$

式中:  $u_r$ 为径向位移;  $E$ 为弹性模量;  $\nu$ 为泊松比;  $r_n$ 为圆筒内径;  $r_w$ 为圆筒外径;  $p_n$ 为圆筒内压;  $p_w$ 为圆筒外压。

对于平面应变问题, 式(5)中的弹性模量和泊松比需进行如下转换:

$$E_s = \frac{E}{1 - \nu^2}, \quad \nu_s = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (6)$$

对于 CFRP、混凝土这两层均匀受压圆筒( $i = 1, 2$ 分别为 CFRP、混凝土层), 根据拉梅公式解得:

$$u_{ri} = \frac{1}{E_{si}} \left[ (1 + \nu_{si}) \frac{r_{ni}^2 r_{wi}^2 (p_{ni} - p_{wi})}{r_{wi}^2 - r_{ni}^2} \frac{1}{r} + (1 - \nu_{si}) \frac{p_{ni} r_{ni}^2 - p_{wi} r_{wi}^2}{r_{wi}^2 - r_{ni}^2} r \right], \quad (i = 1, 2) \quad (7)$$

式中:  $u_{ri}$ 为第  $i$  层的径向位移值;  $E_{si}$ 、 $\nu_{si}$ 为各层换算的弹性模量和泊松比;  $r_{ni}$ 、 $r_{wi}$ 为第  $i$  层的内外半径;  $p_{ni}$ 、 $p_{wi}$ 为各层间的内外围压。内层 CFRP 受到沿径向的朝内的预拉应力, 即  $p_{n1} = -0.65$  MPa(负号表示方向朝管内); 外层管芯混凝土外表面  $p_{w2} = 0$ , 且  $p_{w1}$ 、 $p_{n2}$ 两者大小相等, 故可由式(8)中各层间径向位移协调求出:

$$u_{ri}|_{r=r_i} = u_{r(i+1)}|_{r=r(i+1)}, \quad (i = 1, 2) \quad (8)$$

复合结构各层的环向应力公式为:

$$\sigma_{\theta i} = \frac{r_{ni}^2 p_{ni}}{r_{wi}^2 - r_{ni}^2} \left( 1 + \frac{r_{wi}^2}{r^2} \right) - \frac{r_{wi}^2 p_{wi}}{r_{wi}^2 - r_{ni}^2} \left( 1 + \frac{r_{ni}^2}{r^2} \right), \quad (i = 1, 2) \quad (9)$$

计算得出  $p_{n2} = -0.6212$  MPa(负号表示方向朝管内), 将各层的环向应力计算结果与有限元模拟结果进行比较, 如表 1 所示。

由表 1 可见, 理论值和模拟值差别较小, 故此方法可以用来模拟 CFRP 的预应力, 在此基础上进行后续的内水压计算。

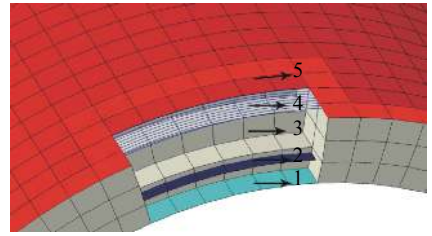
表 1 理论值和数值计算结果对比

Tab. 1 Comparison of theoretical values and numerical results				
构件	理论值/MPa	模拟值/MPa	差值/MPa	变幅/%
CFRP环向应力	-32.898	-35.98	3.082	9.3
混凝土外层环向应力	-3.166	-3.386	0.220	6.9
混凝土内层环向应力	-3.788	-3.937	0.149	3.9

注: 负号表示受压。

## 1.4 PCCP 层间关系

预应力碳纤维板加固 PCCP 的层间分布如图 3 所示,由内到外即 1~5 分别是预应力 CFRP、钢筒(在 1、2 层之间是内壁混凝土)、混凝土、预应力钢丝、砂浆保护层。假定钢筒与混凝土层之间,钢丝与砂浆保护层之间均为完全接触,即不考虑各个层间的相对滑移或者脱空等现象。通过有限元软件中“嵌入”命令,钢筒和钢丝被分别“嵌入”混凝土中和砂浆保护层中,把钢筒、钢丝的单元节点与相应的混凝土、砂浆实体单元节点的自由度约束在一起,从而模拟混凝土与钢筒、钢丝与砂浆保护层之间的相互作用。CFRP 通过结构胶与混凝土粘接,结构胶的厚度很小忽略不计。通过文献和试验<sup>[16-17]</sup>发现,发生破坏时的位置多出现在粘接处的混凝土面,故模拟时采用“tie”命令连接 CFRP 和管芯混凝土。



1. 预应力 CFRP 板 2. 钢筒 3. 混凝土 4. 预应力钢丝 5. 砂浆保护层

图 3 PCCP 层间分布

Fig. 3 Interlayer distribution of PCCP

## 2 PCCP 模型有限元计算

通过有限元计算,研究了断丝分布类型、断丝率对 PCCP 受力的影响、预应力 CFRP 加固 PCCP 效果及不同断丝率对预应力 CFRP 的加固效果的影响。内水压从 0.4 MPa 开始计算,每级递增 0.2 MPa,直至 1.2 MPa 结束。

### 2.1 PCCP 断丝分布影响分析

实际工程中 PCCP 断丝的情况非常复杂,断丝的位置和分布情况各异。本文在总断丝率相同(取 10%)情况下,取其中 3 种类型的断丝分布进行分析,具体如图 4 所示。

数值结果表明,由于断丝的原因,之前钢丝所承受的应力转由邻近的钢筒和混凝土管芯承担,所以在各种模拟情况下,钢筒和混凝土管芯的最大应变和应力都位于钢丝断裂的位置。图 5 给出了不同断丝类型钢筒最大环向应力随内水压力的变化曲线。为方便比较,以断丝后钢筒的应力状态为起点作图。从图 5 中可以看出,随着内水压的增加,钢筒的环向应力增加;同一内水压下,断丝分布越分散,钢筒应力越小。随着断丝分布点位增加,钢筒环向应力趋于平缓。可见在总断丝率不变的情况下,同一位置的断丝情况会使 PCCP 处于最脆弱的状态。

### 2.2 PCCP 断丝率影响分析

通过有限元法分别计算断丝 5%、10%、15% 和 20% 时 PCCP 随内水压变化的受力状态<sup>[18]</sup>,结果如图 6 所示。由图 6(a)不同断丝率混凝土环向应变曲线可知,断丝率 $\leq 10\%$ 时,随着内水压增加,断丝处最外层混凝土环向应变增加缓慢;断丝率增加至 20% 时,混凝土环向应变变化速度随内水压明显加快,0.6 MPa 内水压下断丝 10% PCCP 混凝土外层已出现损伤,裂缝出现,故应变较大。由此可见,断丝率对

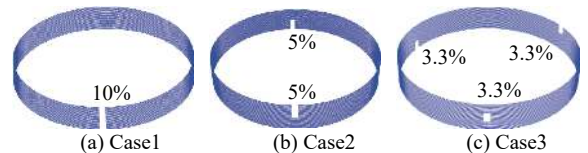


图 4 断丝分布的 3 种类型

Fig. 4 Three types of broken wire distribution

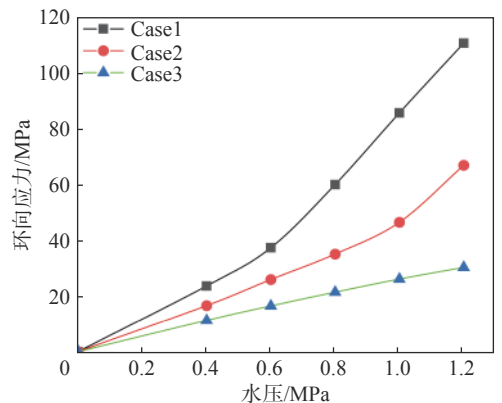


图 5 钢筒最大环向应力随内水压力的变化曲线

Fig. 5 Maximum circumferential stress in steel cylinder during the phase of internal load increase

PCCP 内水压承载力影响显著。图 6(b)为不同断丝率情况下, 钢管环向应力随内水压变化曲线。在未达到钢管的屈服强度之前, 钢管环向应力增加趋势与混凝土相似。断丝率 20% 情况下, 当内水压增至约 0.95 MPa 时钢管达到其屈服强度。断丝率越低钢管应力变化越慢, 相较于较高断丝率能承担更大的内水压。

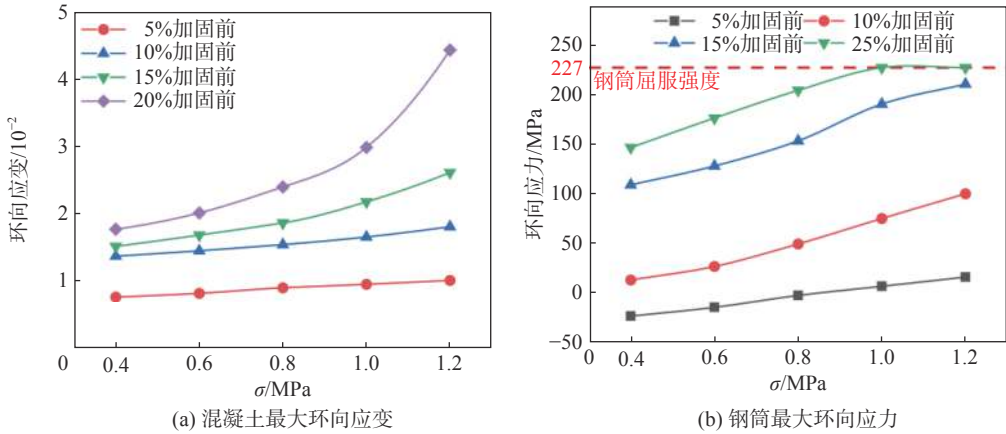


图 6 最大混凝土环向应变和钢管环向应力变化曲线

Fig. 6 Variation curve of maximum circumferential strain of concrete and stress of steel cylinder

选取内水压 0.6 MPa 下不同断丝率的 PCCP 的受力状态进行变化趋势分析。由图 7 可知, 随着断丝率增大, 混凝土环向应变不断增大; 断丝率由 0 增至 20%, 钢管的环向应力由 -33.8 MPa 变为 176.2 MPa。混凝土应变在断丝 0~10% 时, 应变变化的斜率基本相近, 这是由于内水压 0.6 MPa 为该 PCCP 正常工作状态下的内压, 钢丝对混凝土的预压和钢丝承担了主要的内水压力。当断丝率达到 10% 后, 混凝土应变的变化速率发生剧烈变化, 此时钢管的环向应力由受压变为受拉, 且变化速度发生突变, 说明此时钢管也开始分担较多内压。

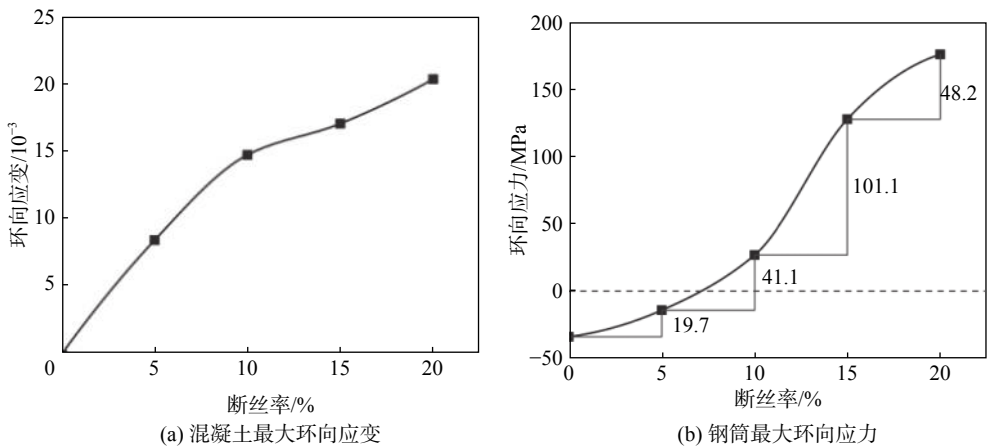
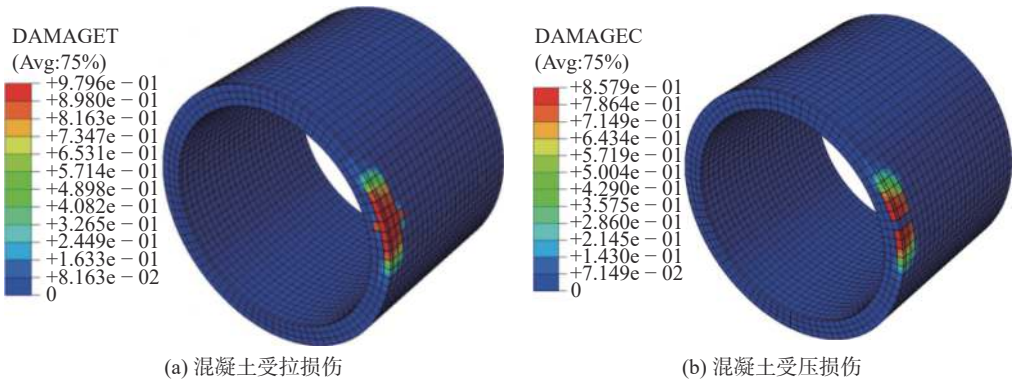


图 7 混凝土环向应变和钢管环向应力在 0.6 MPa 内水压下的变化曲线

Fig. 7 Variation of circumferential strain and stress curves of concrete and steel cylinder under 0.6 MPa internal pressure

无内压断丝率为 10% PCCP 混凝土受拉受压损伤如图 8 所示。由图 8 可知, 断丝率 10% 混凝土的最大拉伸损伤系数达到了 0.97, 此时断丝位置处混凝土外层已经出现了裂缝, 这是由于预应力钢丝断丝时, 应力发生突变, 导致断丝区域的混凝土产生损伤。同时可见, 混凝土最里层的损伤较小, 其应变远小于最外层, 而钢管位于混凝土网格划分的最里层, 故断丝处最外层混凝土的应变与钢管的应变相差较大。计算发现通过加固后的断丝管道, 在水压 0.8 MPa 以内时损伤基本无变化, 这说明预应力碳纤维板加固后的管道可以在一定程度上阻止损伤的继续扩大。



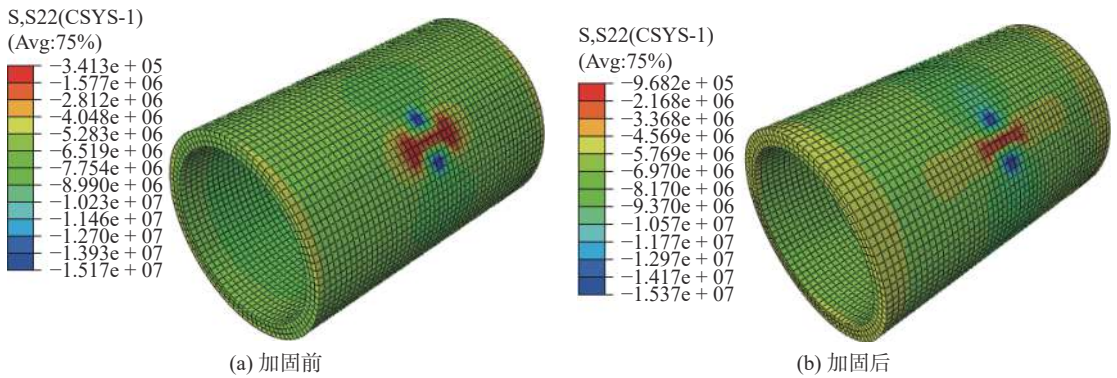
(a) 混凝土受拉损伤 (b) 混凝土受压损伤

图 8 断丝率为 10% 时的混凝土损伤

Fig. 8 Damage diagram of concrete with 10% broken wires

### 2.3 PCCP 管内预应力碳纤维板加固分析

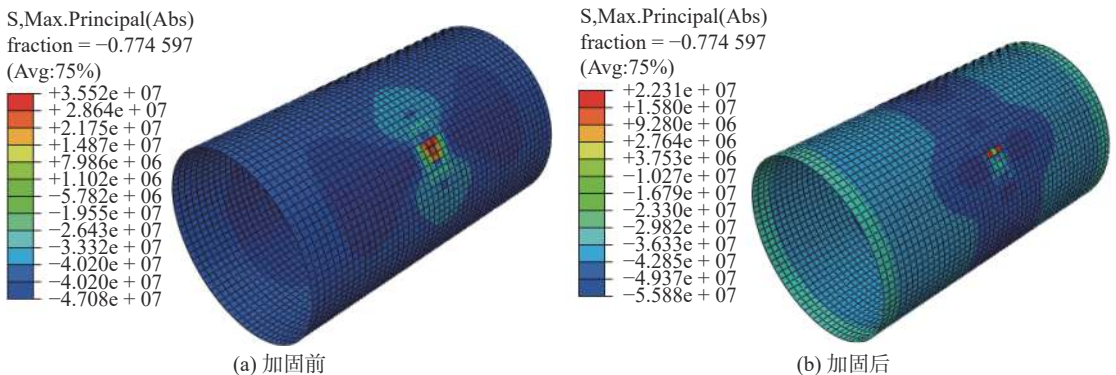
由上述分析可知,断丝率 $\geq 10\%$ 时 PCCP 受力开始发生明显改变。故选取 10% 断丝率对 PCCP 加固前后各部件的受力情况进行对比分析,计算结果如图 9 和 10。由图 9 可见,采用预应力 CFRP 加固断丝区域后,混凝土环向压应力由 0.341 MPa 增大为 0.958 MPa,增大了约 2 倍,即预应力 CFRP 对混凝土所产生的预压应力抵消了这部分的水压力,进而起到加固效果。由图 10 可见,在 0.6 MPa 内水压下,采用预应力 CFRP 加固断丝区域后,钢筒最大主应力由 35.52 MPa 减小为 22.31 MPa,减小了约 37.2%,加固后最危险区域的面积变化与混凝土的变化一致,均明显减小。



(a) 加固前 (b) 加固后

图 9 0.6 MPa 内压下混凝土环向应力(单位: Pa)

Fig. 9 Circumferential stress of concrete under internal pressure of 0.6 MPa (unit: Pa)



(a) 加固前 (b) 加固后

图 10 0.6 MPa 内压下钢筒最大主应力(单位: Pa)

Fig. 10 Maximum principal stress of steel cylinder under internal pressure of 0.6 MPa (unit: Pa)



图 11 为加固前后混凝土环向应力随内水压的变化曲线对比。为便于分析,同时在表 2 列出 CFRP 在不同水压下的环向应力。由图 11 可以看出,在内水压达到 0.8 MPa 之前,加固前后混凝土的应力变化曲线走向基本一致;超过 0.8 MPa 后,两者都发生了改变,断丝未加固的 PCCP 应力突然增大,而进行加固后的 PCCP 变化则比较缓慢。由表 2 可以看出,在水压 0.8 MPa 时,CFRP 显著增大,说明此时 CFRP 开始分担了较大内水压力,使得混凝土的应力增加缓慢。如上所述,PCCP 管内环向预应力碳纤维板加固技术能提高管道的安全性能。

### 2.4 不同断丝率下预应力 CFRP 加固效果比较

图 12(a)为不同断丝率下钢筒环向应力随内水压变化曲线,在正常工作内压(0.8 MPa)下,断丝率为 5%、10%、15% 经过预应力 CFRP 加固后的钢筒环向应力分别减小为 23.62、41.84 和 61.26 MPa。在水压超过 0.8 MPa 后,随内水压增加,不同断丝率经过 CFRP 加固后钢筒的环向应力变化曲线未出现突变,均呈线性匀速增加,与加固前相比,当断丝率 $\geq 10\%$ ,随内水压增加,加固前钢筒的环向应力显著增加,与加固后的曲线变化有明显的区别。可见,在 CFRP 与混凝土之间的粘接没有失去作用前,断丝率越大,预应力 CFRP 加固 PCCP 的效果越显著。

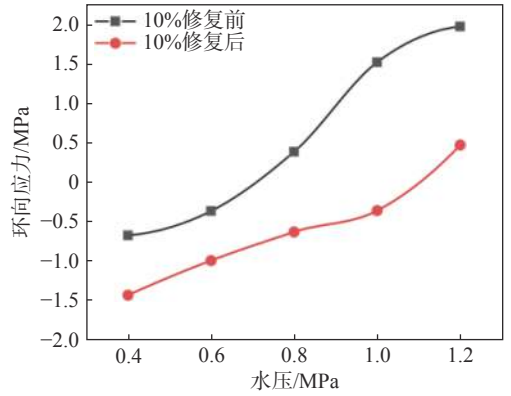


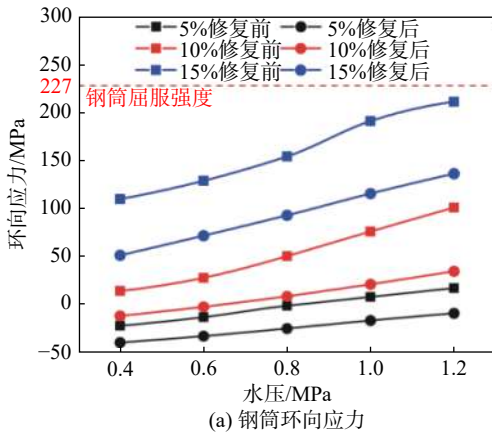
图 11 加固前后混凝土环向应力

Fig. 11 Circumferential stress of concrete before and after reinforcement

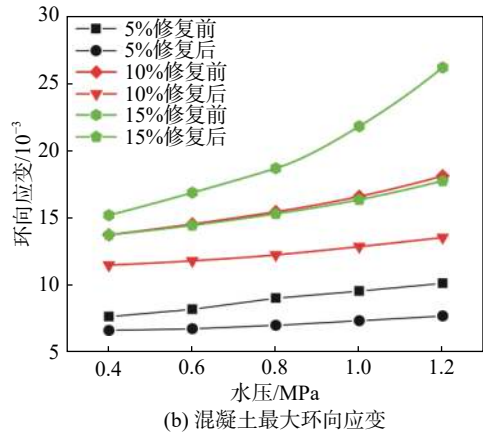
表 2 断丝率 10% 时加固 CFRP 的环向应力

Tab. 2 Circumferential stress value of CFRP after reinforcement with 10% broken wire

内水压/MPa	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
应力值/MPa	3.64	9.20	19.27	31.07	43.86	53.23



(a) 钢筒环向应力



(b) 混凝土最大环向应变

图 12 不同断丝率下钢筒环向应力、混凝土应变随内水压变化曲线

Fig. 12 Curve of circumferential stress and concrete strain of steel cylinder with internal water pressure at different wire break rates

图 12(b)为不同断丝率下混凝土环向应变随内水压变化曲线。混凝土的最大应变位置在 PCCP 断丝处混凝土外表面上,加固后不同断丝率混凝土环向应变增长缓慢,且断丝率越低,曲线越平缓。在内水压 0.8 MPa 下,断丝率 5%、10%、15% 的 PCCP 经过预应力 CFRP 加固后的混凝土应变分别减小  $0.20 \times 10^{-2}$ 、 $0.32 \times 10^{-2}$ 、 $0.34 \times 10^{-2}$ 。可见,在正常工作内压下,不同断丝率预应力 CFRP 加固对混凝土应变的加强强度相近;但随着水压超过正常工作内压时,断丝率 $\geq 10\%$ 后,加固前后混凝土应变的曲线增长趋势发生显著改变,断丝率越高,两者曲线越相互远离。

### 3 结 语

本文对内壁环向预应力 CFRP 加固 PCCP 的方法进行了理论验算,为 PCCP 断丝修复提供新思路,计算结果可供实际工程参考。通过对 PCCP 管道断丝修复进行数值模拟,得出预应力 CFRP 加固后 PCCP 各个部件的内力,对加固前后的结果进行对比分析,得出结论如下:

(1)断丝率相同情况下,断丝发生位置越集中,PCCP 受力越不利。

(2)断丝率超过 10% 后,PCCP 的应力显著变化,断丝 10%~15% 的钢筒应力变化约是断丝率 5%~10% 的 2.5 倍。预应力 CFRP 伸长率为 0.421% 时,在正常内水压(0.8 MPa)作用下,经过预应力 CFRP 修复断丝率 15% 的 PCCP 能够继续使用。

(3)断丝率 10% 的 PCCP 经管内预应力 CFRP 修复后,在正常工作内水压(0.8 MPa)下,CFRP 能发挥很好的加固效果,混凝土最大环向应变出现在管道断丝处混凝土外表面;嵌入在靠管芯混凝土内壁的钢筒其主应力由 35.52 MPa 变为 22.31 MPa,提升约 37.2%,两者随内水压均线性变化。

(4)正常工作内压下,断丝率由 5% 增至 15% 时,加固后的钢筒环向应力曲线随内水压基本保持线性增加,随内水压增大,加固前后的曲线变化有明显差异,这表明断丝率越高,预应力 CFRP 分担的内压越显著。

### 参 考 文 献:

- [1] American Water Works Association. Standard for design of prestressed-concrete cylinder pipe: ANSI/AWWA C304[S]. 2007.
- [2] TOUTANJI H, DEMPSEY S. Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composites materials[J]. *Thin-Walled Structures*, 2001, 39(2): 153-165.
- [3] 陈亚鹏. 碳纤维复合材料加固水电站压力钢管模型试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. (CHEN Yapeng. The study of experiment of hydroelectric-station steel-penstocks reinforce by CFRP[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese))
- [4] 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 Tiesheng, CHENG Bingqing, HU He, et al. Internal water pressure testing of PCCP repaired by CFRP[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2017(12): 35-40. (in Chinese))
- [5] 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. (DOU Tiesheng, CHENG Bingqing, HU He, et al. The experimental study on CFRP renewal of PCCP with broken wires[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2019, 17(1): 68-74. (in Chinese))
- [6] 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, 49(7): 88-93. (SUN Zhiheng, DONG Xiaonong, HAO Jutao, et al. Strengthening technology for inner wall of PCCP with composite CFRP and its stress calculation analysis[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(7): 88-93. (in Chinese))
- [7] ZHAI K J, FANG H Y, FU B, et al. Mechanical response of externally bonded CFRP on repair of PCCPs with broken wires under internal water pressure[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 239: 117878.
- [8] ZHAI K J, FANG H Y, GUO C C, et al. Strengthening of PCCP with broken wires using prestressed CFRP[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 267: 120903.
- [9] HU H, DOU T S, NIU F J, et al. Experimental and numerical study on CFRP-lined prestressed concrete cylinder pipe under internal pressure[J]. *Engineering Structures*, 2019, 190: 480-492.
- [10] 胡少伟. 南水北调超大型钢管混凝土管道结构安全评估[J]. *水利水电工程学报*, 2009(4): 74-82. (HU Shaowei. Study on structural safety evaluating technique for pre-stressed concrete cylinder pipe (PCCP) in the South-to-North Water Diversion Project[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2009(4): 74-82. (in Chinese))
- [11] 刘海祥, 鲁文妍, 陈亮, 等. 一种管内轮胎式气压加载环向预应力加固装置: 中国, CN201820256055.2[P]. 2018-11-06. (LIU Haixiang, LU Wenyan, CHEN Liang, et al. Intraductal tire formula atmospheric pressure loading hoop prestressing force

reinforcing apparatus: CN, CN201820256055.2[P]. 2018-11-06. (in Chinese))

- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011. (in Chinese))
- [13] 李清富, 匡一航, 郭威. CDP模型参数计算及取值方法验证[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(2): 43-48. (LI Qingfu, KUANG Yihang, GUO Wei. CDP model parameters calculation and value method verification[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(2): 43-48. (in Chinese))
- [14] 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: 49-55. (SHEN Jie. Experimental study on structure safety performance and theoretical analysis for large caliber PCCP[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010: 49-55. (in Chinese))
- [15] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2016. (XU Zhilun. Elasticity[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese))
- [16] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2005: 9-12. (LU Xinzhen. Studies on FRP-concrete interface[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005: 9-12. (in Chinese))
- [17] 洪雷, 王涛. 盐雾干湿循环对预应力CFRP加固梁抗弯性能影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 144-149. (HONG Lei, WANG Tao. Flexural behavior of beams strengthened with prestressed CFRP under salt spray dry-wet cycles[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(3): 144-149. (in Chinese))
- [18] 胡少伟, 卢勇, 孙岳阳, 等. 实际埋置条件下断丝对PCCP内水压承载能力影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(10): 27-30. (HU Shaowei, LU Yong, SUN Yueyang, et al. Study on the influence of broken wire on the water pressure bearing capacity of PCCP under actual embedding conditions[J]. China Concrete and Cement Products, 2019(10): 27-30. (in Chinese))

## Numerical analysis of reinforcement with circumferential prestressed carbon fiber board in PCCP pipe

LÜ Kangwei<sup>1,2</sup>, LU Wenyan<sup>2</sup>, LIU Haixiang<sup>2</sup>, KE Minyong<sup>2</sup>, XU Minfan<sup>2</sup>

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211000, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** In order to give full play to the tensile properties of carbon fiber boards (CFRP), and improve the load-bearing capacity of prestressed concrete cylinder pipe (PCCP), a method of reinforcement with circumferential prestressed carbon fiber board in PCCP was proposed. By comparing the mechanical model calculation results of Lamé's formula with the finite element calculation results, it is concluded that the two results are basically in agreement. The maximum difference is only 9.3%. The cases of the same total wire broken rate with different broken distribution were calculated and studied, and it is found that the worst case is that the broken wires are at the same position. When wires break, the concrete damage index near broken wires increases from inside to outside. The reinforcement effect of PCCP with 10% of wire breakage rate was studied. When the wire breakage rate was 10%, the stress and strain of concrete and steel cylinder at the broken wires were significantly reduced under normal working water pressure, which indicates that CFRP has a very good reinforcement effect. The higher the wire breakage rate, the better the effect of CFRP before the concrete inner wall is damaged. This method also has the characteristics of short construction period, non-excavation, and easy operation, and has a good reference for actual PCCP emergency repair.

**Key words:** prestressed concrete cylinder pipe (PCCP); prestressed CFRP; finite element reinforcement model; broken wires; reinforcement effect