

# 环向预应力加固圆形混凝土筒仓的静力性能

周长东<sup>1</sup>, 侯平阳<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 100044 北京; 2. 恒大地产集团有限公司, 510620 广州)

**摘要:** 为了研究环向预应力碳纤维条带加固钢筋混凝土筒仓在贮料荷载下的受力性能, 本文主要考虑了有无预应力、预应力大小、材料厚度、宽度以及加固形式对加固效果的影响, 对5种针对不同影响因素的加固模型进行对比分析。结果表明: 采用环向预应力加固钢筋混凝土筒仓可有效限制仓壁径向位移和混凝土、钢筋应力, 并改善其整体应力水平; 预应力的施加可较大程度提高碳纤维条带中的应力, 使其高强特性发挥更加充分; 加固时, 碳纤维材料的厚度宜为0.35~0.5 mm, 预应力宜为其抗拉强度的10%~15%。

**关键词:** 钢筋混凝土筒仓; 环向预应力; 加固; CFRP; 数值分析

中图分类号: TU37; TU33+2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)06-0093-07

## Static behavior of circular reinforced concrete silo strengthened with lateral pre-stressed method

ZHOU Changdong<sup>1</sup>, HOU Pingyang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044 Beijing, China;

2. Evergrande Real Estate Group Ltd., 510620 Guangzhou, China)

**Abstract:** To study static behavior of circular reinforced concrete silo strengthened with pre-stressed carbon fiber reinforced polymer (CFRP) under stored material load, considering the influence of reinforcement parameters such as strengthening method, pre-stress level, width, thickness, and reinforcement form on reinforced effect, comparative analysis were performed between reinforcement models established according to 5 different influencing factors. The results show that lateral pre-stress could effectively restrict radial displacement, concrete and steel stress of silo wall and improve the stress level of silo wall. The lateral pre-stress can largely improve the damage stress of CFRP and bringing the high-strength characteristic of CFRP into full play. The thickness of CFRP should be from 0.35 mm to 0.50 mm and the pre-stress level should be from 10 to 15 percent of its ultimate tension strength.

**Keywords:** reinforced concrete silo; lateral pre-stress; strengthening; CFRP; numerical analysis

钢筋混凝土筒仓被广泛应用于农业、建材、化工、电力等领域<sup>[1-2]</sup>, 在使用过程中, 众多仓壁出现裂缝等问题, 并由此发生安全事故, 造成重大经济损失<sup>[3-4]</sup>。

相比加大截面法、外包钢加固法等传统加固方法, 纤维布轻质高强, 不增加构件自重和体积, 在加固工程中, 可充分发挥其高强度、高模量的特

点, 有效改善结构、构件的承载力和应力水平<sup>[5]</sup>。采用纤维布加固钢筋混凝土圆形筒仓, 可对仓壁产生约束力, 限制裂缝的产生、发展以及仓壁变形。但纤维布的抗拉强度因仓壁变形小等因素制约发挥不充分。且纤维布对圆形混凝土输水管道等类似构件的加固效果并不理想, 仅对于屈服荷载有较明显提高, 对开裂荷载提高不大, 仅在管壁混凝土开裂、受拉钢筋屈服后, 其高强特性才得到有效发挥<sup>[6-8]</sup>。

对纤维布施加预应力, 能够有效解决其应力滞后问题。本文将对采用环向预应力加固钢筋混凝土

收稿日期: 2013-08-18.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51178029).

作者简介: 周长东(1971—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 周长东, zhouchangdong@163.com.

筒仓的静力性能进行计算分析.有无预应力,预应力水平,纤维布厚度,加固区域宽度及加固形式对加固效果有较大影响,本文将分别进行对比分析.

## 1 工程概况及材料性能

### 1.1 工程概况

选取某粮库项目中有代表性的筒承式筒仓为原型进行建模计算.原型立筒群仓为  $3 \times 4 + 3 \times 5$  排列的筒承式钢筋混凝土结构<sup>[9]</sup>,最大装粮高度 27.0 m,筒仓单仓内径 12.0 m,建筑总高度 35.0 m,仓壁厚 0.22 m,环梁尺寸 0.4 m $\times$ 0.8 m.

### 1.2 材料性能

仓壁、环梁、漏斗及筒壁均采用 C30 混凝土,弹性模量 30 GPa,轴心抗压强度标准值 20.1 MPa,轴心抗拉强度标准值 2.01 MPa,泊松比 0.2,极限压应变为 0.003;采用 HPB300 级钢筋,弹性模量 210 GPa,屈服强度标准值 300 MPa,极限抗拉强度和极限应变分别为 420 MPa 和 0.010,泊松比 0.3;碳纤维布(CFRP)弹性模量为 241 GPa,极限抗拉强度和极限拉应变分别为 3710 MPa 和 0.017.

## 2 有限元模型

### 2.1 本构关系定义

本文中混凝土本构关系采用 GB50010—2010<sup>[11]</sup>推荐使用的单轴拉压本构模型;钢筋采用理想弹塑性模型;CFRP 为各向正交异性的线弹性材料,在拉应变达到极限拉应变时,纤维布破坏,建模分析时主要考虑其沿纤维方向的抗拉性能.

### 2.2 单元选取

本文模型中仓壁、筒壁、漏斗及环梁混凝土均采用 C3D8R 六面体减缩积分单元.CFRP 属于典型的正交各向异性材料,厚度相对于长宽方向非常小,只在环向上的弹性模量和抗拉强度较大,采用壳单元建模,选用 M3D4R 膜单元进行计算.钢筋以线单元建模,使用 T3D2 桁架单元进行计算.

碳纤维布模型及网格划分见图 1,分别有全包方式和条带方式;筒仓模型及网格划分见图 2,仓壁下部三分之一高度范围进行了网格细化.

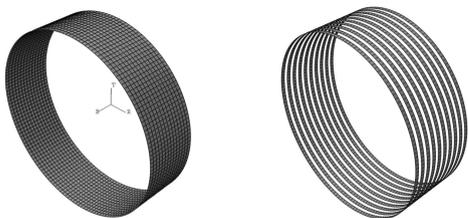


图 1 CFRP 网格划分



图 2 混凝土网格划分

### 2.3 边界条件及荷载计算

计算时 CFRP 与混凝土采用 Tie 接触方式,不考虑其粘结滑移,使 CFRP 贴附在仓壁上,两者共同受力和变形.筒仓底部采用限制平动自由度与转动自由度来模拟筒壁与基础间的相互作用.

本文主要进行筒仓在贮料压力下的受力分析,贮料压力的计算依据 GB50077—2003<sup>[12]</sup>进行,计算结果见表 1.

表 1 贮料压力计算结果

| 筒仓高度/m | 水平压力修正系数 | 水平压力/MPa  | 竖向线摩擦力/(N $\cdot$ mm <sup>-1</sup> ) | 竖向摩擦力/MPa | 竖向压力/MPa  |
|--------|----------|-----------|--------------------------------------|-----------|-----------|
| 0      | 1.00     | 0         | 0                                    | 0         |           |
| 1      | 1.11     | 0.004 037 | 0.733 5                              | 0.000 023 |           |
| 2      | 1.22     | 0.008 637 | 2.882 2                              | 0.000 081 |           |
| 3      | 1.33     | 0.013 754 | 6.371 6                              | 0.000 173 |           |
| 4      | 1.44     | 0.019 343 | 11.131 1                             | 0.000 299 |           |
| 5      | 1.55     | 0.025 358 | 17.093 7                             | 0.000 449 |           |
| 6      | 1.66     | 0.031 752 | 24.196 1                             | 0.000 644 |           |
| 7      | 1.77     | 0.038 514 | 32.378 2                             | 0.000 863 |           |
| 8      | 1.88     | 0.045 586 | 41.583 2                             | 0.001 104 |           |
| 9      | 2.00     | 0.053 211 | 51.757 1                             | 0.001 369 |           |
| 10     | 2.00     | 0.057 673 | 62.849 1                             | 0.001 668 |           |
| 11     | 2.00     | 0.061 905 | 74.810 6                             | 0.001 990 |           |
| 12     | 2.00     | 0.065 918 | 87.595 9                             | 0.002 323 |           |
| 13     | 2.00     | 0.069 713 | 101.161 5                            | 0.002 680 |           |
| 14     | 2.00     | 0.073 313 | 115.466 5                            | 0.003 059 |           |
| 15     | 2.00     | 0.076 717 | 130.471 7                            | 0.003 462 |           |
| 16     | 2.00     | 0.079 948 | 146.140 5                            | 0.003 876 |           |
| 17     | 2.00     | 0.083 007 | 162.437 7                            | 0.004 313 |           |
| 18     | 2.00     | 0.085 894 | 179.330 3                            | 0.004 761 |           |
| 19     | 2.00     | 0.088 642 | 196.786 9                            | 0.005 221 |           |
| 20     | 2.00     | 0.091 241 | 214.777 9                            | 0.005 704 |           |
| 21     | 2.00     | 0.093 702 | 233.275 0                            | 0.006 187 |           |
| 22     | 2.00     | 0.096 037 | 252.251 6                            | 0.006 693 |           |
| 23     | 2.00     | 0.098 245 | 271.682 5                            | 0.007 211 |           |
| 24     | 2.00     | 0.100 349 | 291.543 7                            | 0.007 740 |           |
| 25     | 2.00     | 0.102 327 | 311.812 5                            | 0.008 280 |           |
| 26     | 2.00     | 0.104 202 | 332.467 5                            | 0.008 821 |           |
| 27     | 2.00     | 0.105 984 | 353.488 4                            | 0.009 384 | 0.130 571 |

### 3 计算结果分析

针对有无预应力、预应力大小、材料厚度、加固宽度及加固形式共5种不同影响因素分别设置了相应工况进行计算分析,并对加固方案进行优化。

#### 3.1 不同方法加固计算结果分析

根据未加固时仓壁的径向位移和混凝土、钢筋的应力-应变曲线,在仓壁0.5~4 m范围内对筒仓进行加固。钢筋混凝土筒仓规范规定,空仓时施加预应力应使仓壁的受压值不高于混凝土抗压强度的75%<sup>[12]</sup>,当仓壁厚度为220 mm,施加最大预力度为30%,即CFRP中的预加应力为其极限抗拉强度的30%时,根据相应材料参数计算得到其厚度不应超过2.96 mm,取最大厚度为0.5 mm。

分别取工况1(未加固)、工况2(0.5 mm厚CFRP对0.5~4 m范围无预应力全包加固)、工况3(0.35 mm厚CFRP对0.5~4 m范围施加5%预应力全包加固,其中5%预应力为对CFRP施加的预应力为其自身极限抗拉强度值的5%)进行计算。

计算结果表明,仓壁高度大于6 m之后其径向位移值、环向应力值等均较小且均匀,材料均处于弹性受力阶段,因此,以下曲线均只取仓壁0.5~7 m高度范围进行详细分析。

图3为仓壁的径向位移随筒仓高度的变化曲线。无预应力加固后,加固区仓壁径向位移值整体减小,但变化趋势基本不变,仍有一个明显的峰值点,且峰值由3.55 mm减小到2.41 mm,减幅为32%。施加5%预应力加固后,加固区仓壁的径向位移值显著减小,且沿高度的变化趋势发生改变,峰值点下移,数值减小到1.0 mm,减幅为71.8%,在2~4 m范围内,径向位移值基本不变,约为0.41 mm;但相比无预应力加固,加固区上部2 m范围内,径向位移出现第二个峰值点,其值大于未加固及无预应力加固时的数值,称其为边缘效应。

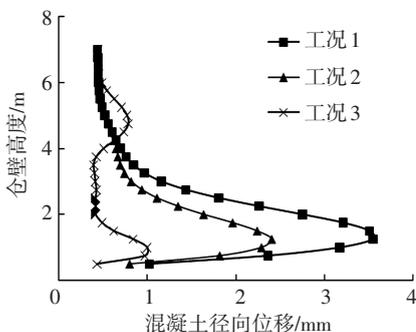


图3 仓壁混凝土径向位移曲线1

图4为仓壁混凝土的环向应力随筒仓高度的变化曲线。在加固区内,未加固时混凝土应力先减小后增大,无预应力加固后应力值整体有所增大,趋势基本不变,5%预应力加固之后混凝土应力在0.5~2 m范围继续增大,但在2~4 m范围则小于前两种工况。由未加固时混凝土环向应力随高度变化的曲线可知,在0.5~2 m高度范围内仓壁混凝土的受力状态处于其应力-应变曲线的下降段,混凝土已产生塑性变形,图3中该部位产生较大径向位移也可间接证明;无预应力加固后,由于CFRP的约束作用,混凝土的塑性变形减小,受力状态向应力-应变曲线的峰值点靠近,应力值有所回升。施加5%预应力后,CFRP的约束作用增强,0.5~2 m范围内混凝土塑性变形进一步减小,应力值回升;而在2~4 m范围内,荷载相对较小,混凝土受力状态处于应力-应变曲线的弹性受力阶段,应力值反而减小。由此可见,加固后混凝土的受力状态由处于其应力-应变曲线的下降段向峰值点回退,甚至恢复到弹性受力阶段,混凝土环向受力得到明显改善。

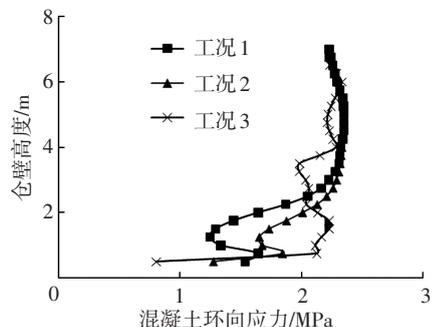


图4 仓壁混凝土环向应力曲线1

图5为仓壁内环向钢筋的应力随筒仓高度的变化曲线。无预应力加固后,加固区内环向钢筋应力值较未加固时整体减小,但趋势不变,存在明显峰值点,且峰值应力由123.7 MPa降至83.6 MPa,降幅为32.4%。施加5%预应力后,加固区内钢筋应力值显著减小,且变化趋势改变,峰值点下移,且峰值减为34.7 MPa,降幅为71.9%;在2~4 m范围内,环向钢筋应力值约为15 MPa,基本不变;应力值在加固区上边沿4 m高度处再次增大,在5 m处达到第二峰值27.6 MPa。

图6为CFRP环向应力随筒仓高度的变化曲线。无预应力加固时,CFRP环向应力波动范围较大,介于26~92 MPa,且峰值应力与仓壁峰值位移位置对应。施加5%预应力后,CFRP环向应力波动较小,介于223~242 MPa,峰值应力与径向峰值位移位置仍对应。对比两种工况,CFRP应力均值由53.6 MPa迅速增加到226.9 MPa,后者是

前者的 4.23 倍.并且前者数值波动较大,后者则更为均匀.

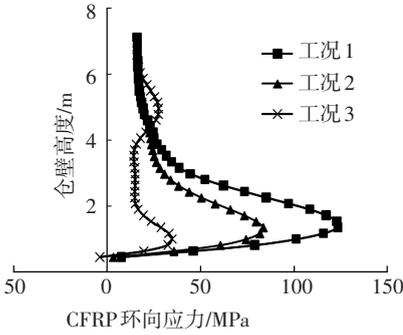


图 5 环向钢筋应力曲线 1

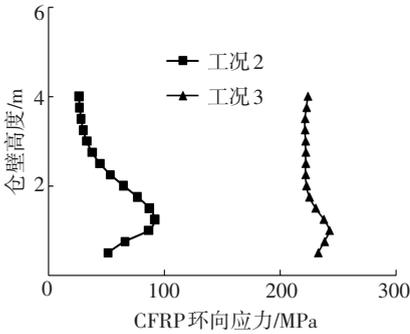


图 6 CFRP 环向应力曲线 1

综上所述,CFRP 加固材料在无预应力加固时只能使原有结构的变形和应力、应变在一定程度上减小,不能使各参数的变化趋势发生改变,存在明显应力滞后现象;而施加预应力后,不仅能使对应各变量的数值显著减小,且能使结构的位移、应力的变化趋势发生改变,具有明显主动约束作用,同时各变量沿高度的变化趋于平缓,筒仓各部分的受力变得更加均衡,受力状态逐渐趋近最佳.

### 3.2 不同厚度和预应力条件下计算结果分析

鉴于预应力加固效果更显著,本节将对不同厚度的 CFRP 施加不同预应力度加固仓壁,并对结果对比分析,得到最优的 CFRP 厚度和预应力度.加固工况见表 2,加固后各材料的相关位移、应力和应变曲线分别见图 7~10.

表 2 不同厚度和预应力条件下的计算工况

| 工况 | 具体信息                                      |
|----|---|
| 1  | 0.5 mm 厚 CFRP 对 0.5~4 m 范围施加 10% 预应力全包加固  |
| 2  | 0.5 mm 厚 CFRP 对 0.5~4 m 范围施加 15% 预应力全包加固  |
| 3  | 0.35 mm 厚 CFRP 对 0.5~4 m 范围施加 15% 预应力全包加固 |
| 4  | 0.2 mm 厚 CFRP 对 0.5~4 m 范围施加 15% 预应力全包加固  |
| 5  | 0.2 mm 厚 CFRP 对 0.5~4 m 范围施加 20% 预应力全包加固  |

由图 7 可以看出,混凝土径向位移曲线的变

化趋势基本一致.工况 3 的曲线与工况 1 的几乎重合,说明两者在限制仓壁径向位移方面效果一致;工况 4、5 加固时的混凝土径向位移均要大于工况 1 时的数值,且加固区峰值位移均大于加固区上部区域的峰值位移.由此可知,适当减小 CFRP 的厚度同时增大预应力也可以达到对径向位移较好的限制效果,但厚度过小,即使继续加大预应力度,加固效果也会有所减弱,尤其是在加固区的相邻区域.

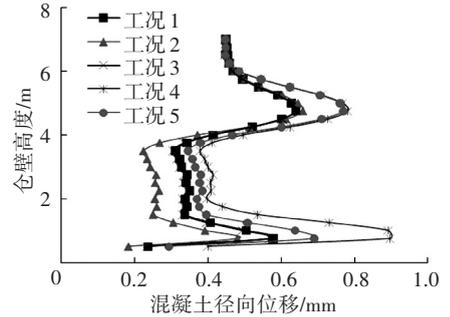


图 7 仓壁混凝土径向位移曲线 2

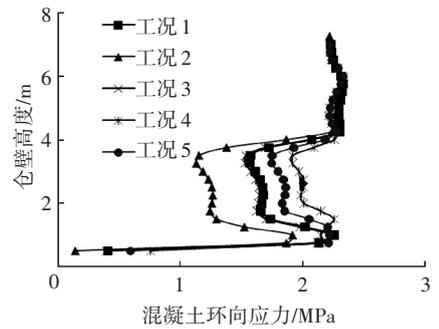


图 8 仓壁混凝土环向应力曲线 2

由图 8 可以看出,加固区内大部分混凝土受力处于弹性阶段,只有工况 4 在 0.5~1.5 m 范围出现明显塑性发展现象.工况 3 对混凝土受力状况的改善与工况 1 基本一致,而对于工况 4、5,CFRP 分担的荷载稍小,混凝土中应力略大,且在加固区上方 4~6 m 范围内出现明显的塑性发展现象.

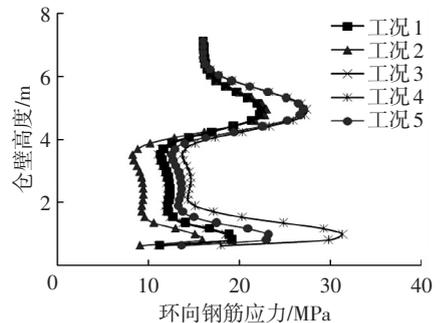


图 9 环向钢筋应力曲线 2

由图 9 可以看出,出现了工况 1、2 曲线几乎重合的现象,说明两者对改善钢筋受力的效果基

本相同.工况4的钢筋应力要大于工况1的,尤其在两个峰值点处应力明显较大;采用工况5,加固区应力继续减小但仍大于工况1的数值,并且在加固区上方峰值点处应力基本不再降低,说明使用0.2 mm厚度CFRP进行加固时,即使进一步增大预应力度,对钢筋的受力也较难实现进一步的改善.

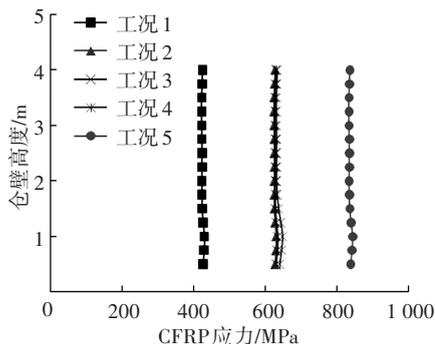


图10 CFRP环向应力曲线2

由图10可以看出,CFRP中的应力变化趋势基本一致;相同预应力度时,各厚度的CFRP环向应力均非常接近,而不同预应力度时,CFRP环向应力随着预应力的提高而显著提高.按照5%作为预应力梯度,则每提高一个等级CFRP应力相应提高约200 MPa,可见,在一定范围内CFRP的高强特性在越高的预应力度条件下发挥的越充分.

综上分析可知,CFRP厚度由0.5 mm减小到0.35 mm,同时预应力度由10%提高到15%,均可取得较好的整体加固效果;而厚度继续减小,加固效果变差,即使将预应力度再提高,对于加固效果的改善也非常有限,尤其是加固区的上部区域.

因此,考虑节省材料、降低预应力施加难度及实现较好的经济效益,实际加固时建议采用0.5 mm厚度CFRP施加10%预应力进行加固,或者采用0.35 mm厚度施加15%预应力.考虑到继续减小厚度加固效果变差,及高预应力施加困难等因素,建议不宜使用更小厚度的CFRP进行加固.

3.3 不同加固宽度条件下计算结果分析

使用预应力加固后加固区上沿的相关位移、应力会出现一个小的突变峰值,且在上部约2 m范围内各变量数值大于未加固时的数值;0.5 mm厚度10%预应力和0.35 mm厚度15%预应力加固时均取得较好的效果,但加固区上沿峰值大于加固区内峰值.因此,本节将分析加固宽度对加固效果的影响.具体工况见表3,加固后各材料的相关位移、应力和应变曲线见图11~14.

表3 不同加固宽度条件下的计算工况

| 工况 | 具体信息                                |
|----|-------------------------------------|
| 1  | 0.5 mm厚CFRP对0.5~5 m范围施加10%预应力全包围加固  |
| 2  | 0.5 mm厚CFRP对0.5~4 m范围施加10%预应力全包围加固  |
| 3  | 0.35 mm厚CFRP对0.5~5 m范围施加15%预应力全包围加固 |
| 4  | 0.35 mm厚CFRP对0.5~4 m范围施加15%预应力全包围加固 |

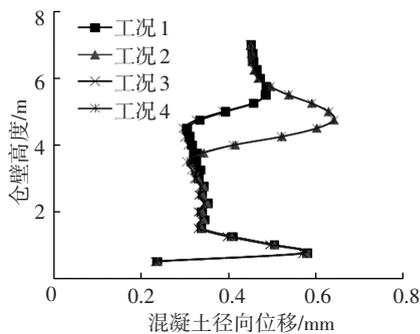


图11 仓壁混凝土径向位移曲线3

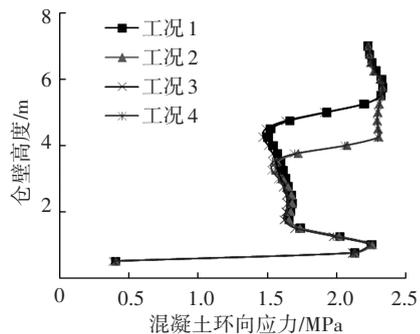


图12 仓壁混凝土环向应力曲线3

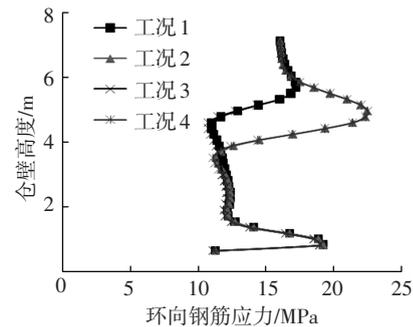


图13 环向钢筋应力曲线3

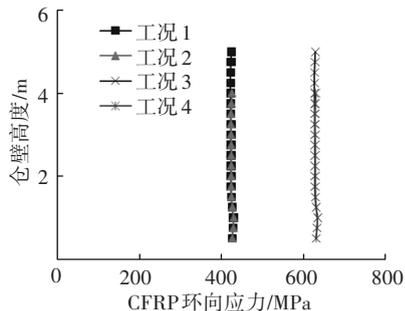


图14 CFRP环向应力曲线3

由图11~13可以看出,加宽前后工况1、3的曲线均基本重合.

加宽后混凝土径向位移明显减小,上部峰值

点消失,曲线上最大值为加固区峰值,说明增大宽度后,很好的限制了加固区上部的径向位移,消除了边缘效应.加固区上方 4~6 m 范围出现混凝土进入塑性阶段的现象消失,混凝土基本处于弹性受力阶段;该范围内钢筋应力峰值显著减小,钢筋应力值低于未加固时的数值,其最大值小于加固区峰值.同样说明增大宽度后很好消除了边缘效应,使钢筋受力更加均匀.

由图 14 可以看出,加宽前后 CFRP 中的应力无明显变化,变化趋势及数值均保持一致.

综上所述可知,加固宽度增大后,可消除加固区上方的边缘效应,使混凝土径向位移、环向钢筋应力从加固区的较小值逐渐过渡到未加固区,数值突变现象消失,无明显峰值点,加固区内的数值均小于未加固时的相应数值.

在实际工程中可根据筒仓贮料荷载的大小适当增大加固宽度,消除边缘效应,使加固后起控制作用的位移和应力处于加固区域内.

### 3.4 采用 CFRP 条带加固的计算结果分析

考虑到全包方式将耗费较多材料及加固时存在的困难,根据较为成熟的纤维材料自锁式锚具施加预应力的方法<sup>[13]</sup>,使用 CFRP 条带进行间隔加固.取 5 条宽 0.5 m,厚 0.5 mm 的条带间隔 0.5 m 对 0.5~5 m 高度范围进行加固.具体工况见表 4.

表 4 采用 CFRP 条带加固的计算工况

| 工况 | 具体信息  |
|----|---|
| 1  | 0.5 mm 厚 CFRP 对 0.5~5 m 范围施加 10% 预应力全包加固                                |
| 2  | 0.5 mm 厚、0.5 m 宽 CFRP 条带对 0.5~5 m 范围内间隔 0.5 m 加固,预应力 10%                |
| 3  | 0.5 mm 厚、0.5 m 宽 CFRP 条带对 0.5~5 m 范围内间隔 0.5 m 加固,最下部第一条带预应力为 15%,其余 10% |
| 4  | 0.5 mm 厚、0.5 m 宽 CFRP 条带对 0.5~5 m 范围内间隔 0.5 m 加固,最下部第一条带预应力为 20%,其余 10% |

由图 15 可以看出,工况 2 的混凝土径向位移大于工况 1,尤其在 0.5~2 m 范围内增大明显,在 1 m 高度处出现较明显峰值,达到 1 mm;在 2~5 m 范围内,条带加固的位移值出现连续的较小波动,且波谷和波峰的位置与条带和间隔的位置相对应;鉴于工况 2 条件下加固区会出现较大峰值点,设置了工况 3、4,由曲线看出,下部条带的预应力增大后,混凝土在相应区域的径向位移明显减小,尤其施加 20% 预应力后,混凝土径向位移最大值低于工况 1 的数值,加固效果良好.

由图 16 可以看出,后 3 种工况的混凝土应力非常接近,且均大于工况 1 的数值.条带加固后,混凝土应力在加固区内出现与条带相对应的轻微波动;且除下部 1~2 m 范围内存在较小的差异外,3 种条带加固工况下混凝土的应力曲线基本重合,这是因为加固后混凝土受力基本处于应力-应变曲线峰值点附近.分析可知,条带加固时混凝土中的应力将大于全包形式,由于此时混凝土受力大部分处于应力-应变曲线的上升段,因此使混凝土自身性能得到了更好地发挥.

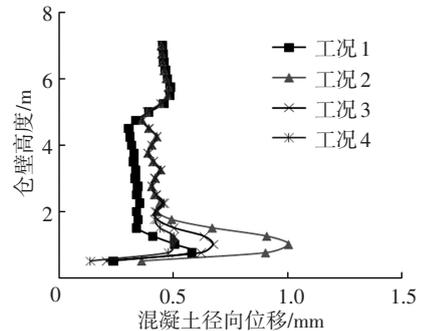


图 15 仓壁混凝土径向位移曲线 4

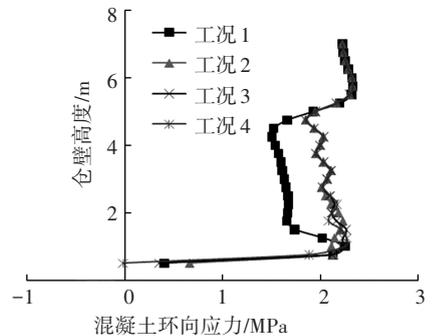


图 16 仓壁混凝土环向应力曲线 4

由图 17 可以看出,工况 2 的加固区钢筋应力要大于工况 1,且钢筋应力在 0.5~2 m 范围内增加明显,有明显的峰值点;增大最下部条带预力度后,该峰值明显减小,尤其施加 20% 预力度后,钢筋应力峰值已低于全包加固时对应的峰值;在 2~5 m 区域内,条带加固时的钢筋应力值略大于全包加固的情况,并出现轻微波动,波谷和波峰的位置分别与条带和间隔的中间位置相对应;因钢筋处于弹性受力的最初阶段,钢筋应力适当增大有利于钢筋性能的发挥;在加固区应力值低于未加固区最大应力值时,采用条带法加固更为合理.

由图 18 可以看出,工况 2 的 CFRP 应力值略大于工况 1,最下部条带增大较为明显,这是由于对应位置仓壁径向位移较大造成 CFRP 应变增大也即应力增大.增大最下部条带预力度后,CFRP 的应力显著增加,仍基本按照 5% 预力度梯度应力相应增减 200 MPa.

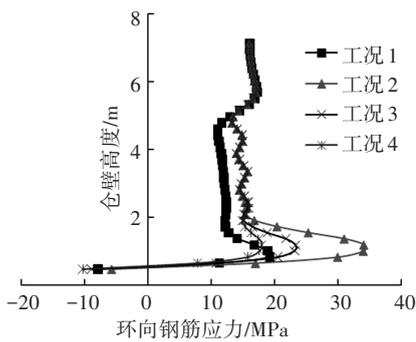


图 17 环向钢筋应力曲线 4

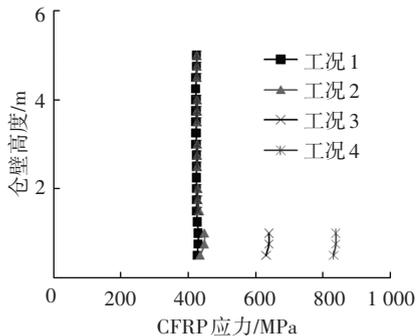


图 18 CFRP 环向应力曲线 4

综合分析看出,采用 CFRP 条带加固后,混凝土的径向位移及钢筋的应力均有所增加,特别是 0.5~2 m 荷载较大的位置,数值增大明显;因为 CFRP 材料的减少导致分担的荷载减少而使混凝土的环向应力增大,并产生较小的塑性应变;而增大下部第一条 CFRP 中的预应力后,CFRP 应力显著增加,对应区域钢筋的应力和混凝土的应力及塑性应变明显减小。

采用条带加固时,相应区域的位移、应力等会出现微小的波动,但对加固效果无明显影响,且条带加固便于施工,可灵活调节条带的宽度与间隔,使加固区域的位移、应力水平趋于均匀一致,从而达到更优的加固效果。

## 4 结 论

1)采用无预应力 CFRP 加固钢筋混凝土筒仓仓壁后,仓壁的位移、应力等都有明显降低,但是 CFRP 的受力存在明显的被动滞后现象;施加预应力后,CFRP 能够提供主动约束,使仓壁的位移、应力等均显著降低,明显提高其承载能力,并且 CFRP 中的应力变得稳定均匀,材料的高强特性得到更加充分的发挥。

2)采用 0.5 mm 厚度 CFRP 施加 10% 预应力或者采用 0.35 mm 厚度施加 15% 预应力对仓壁加固时均可获得较好的加固效果.实际使用时可结合经济性选择合适的方案。

3)加固宽度不足将会导致加固区边缘出现位移、应力明显增大现象,加宽后该边缘效应消失;实际加固时可适当增大加固宽度,使其覆盖未加固时位移、应力明显较大的区域来消除边缘效应。

4)将加固形式由全包 CFRP 改为条带后,位移、应力等曲线在加固区内出现轻微波动,但是整体加固效果良好,并且可以灵活调节 CFRP 的厚度、预应力度以及条带的宽度与间隔来进行针对性的加强,可达到节省材料、降低施工难度等效果。

## 参考文献

- [1] 蒋蕊秋. 世界筒仓设计规范动向与技术发展[J]. 特种结构, 1991, 8(4): 48-52.
- [2] 崔元瑞. 我国贮料构筑物建设的发展与回顾[J]. 特种结构, 2000, 17(1): 8, 68.
- [3] 俞晓红. 两个筒仓倒塌案例及其原因分析[J]. 水运科学研究, 2006, 3: 47-50.
- [4] 王田凤, 丁智潮, 王立, 等. 某钢筋混凝土筒仓整体坍塌事故原因分析[J]. 工业建筑, 2008, 38(4): 116-118.
- [5] 周长东, 黄承逵. 混凝土结构补强加固方案优选[J]. 混凝土与水泥制品, 2003, 2: 45-47.
- [6] 卢亦焱, 易越磊, 史健勇. 粘贴碳纤维布加固混凝土管道试验研究[J]. 实验力学, 2004, 19(3): 310-318.
- [7] 王利阳. 纤维材料加固钢筋混凝土压力管道的试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [8] 王苏岩, 刘飞, 何化南, 等. 纤维布加固震损钢筋混凝土管道试验[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2010, 26(2): 216-224.
- [9] 程瑜. 钢筋混凝土立筒仓结构抗震分析[D]. 郑州: 河南工业大学, 2010.
- [10] 侯平阳. 环向预应力加固圆形钢筋混凝土筒仓的静力性能分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [11] GB50010—2010 中华人民共和国国家标准. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 207-220.
- [12] GB50077—2003 中华人民共和国国家标准. 钢筋混凝土筒仓设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003: 23-29.
- [13] 周长东, 李季, 吕西林. 纤维复合材料自锁式锚固体体系力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 829-835.

(编辑 赵丽莹)