

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.01.019

# BFRP 约束损伤混凝土柱轴压力学性能试验研究

马高<sup>1,2</sup>, 齐亮<sup>1</sup>

(1.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2.长沙理工大学 桥梁结构安全控制湖南省工程实验室)

**摘要:** 为了研究玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)约束有初始损伤的混凝土圆柱体的轴压力学性能,对 26 个直径 150 mm、高 300 mm 的圆柱体试件进行了轴压试验,包括 24 个 BFRP 约束混凝土试件和 2 个素混凝土试件。研究的主要参数是 BFRP 约束层数(1、3、5 层)和试件初始损伤程度。其中 18 个混凝土试件在包裹 BFRP 之前分别轴压加载至 3 种不同的应力水平然后卸载,分别代表轻微、中等和严重损伤。试验结果表明:BFRP 约束完好及初始损伤混凝土试件相比于素混凝土试件,峰值强度和极限应变均有明显提高,初始损伤会影响 BFRP 约束试件的峰值强度,但对极限应变影响很小。在试验结果的基础上,提出了一个修正强度模型和应变模型来预测初始损伤对 BFRP 约束混凝土柱轴压力学性能的影响,预测值与试验结果吻合较好。

**关键词:** FRP 约束; 初始损伤; 峰值强度; 极限应变; 应力—应变曲线

## 1 前言

纤维增强复合材料(Fiber-Reinforced Polymer, FRP)以其优良的性能如轻质、高强、耐腐蚀和易于施工等特点,在过去 20 年里被广泛应用于土木工程结构加固领域。目前,应用较广泛的纤维增强复合材料主要有碳纤维(Carbon FRP, CFRP)、玻璃纤维(Glass

FRP, GFRP)和芳纶纤维(Aramid FRP, AFRP),但是这些纤维材料存在如下缺点:CFRP 成本较高,高性能 CFRP 依赖进口;AFRP 和 GFRP 力学性能相对较差,耐久性问题比较突出。而玄武岩纤维(BFRP)是玄武岩石料在高温(1 450~1 500 °C)熔融后,通过高速拉制而成的高性能无机纤维,具有较高的抗拉强度、低廉的价格以及良好的耐高温、耐久性能。基于此,该文选用 BFRP 作为加固材料。

- \*\*\*\*\*
- [7] Deng L, Cai C S. Bridge Model Updating Using Response Surface Method and Genetic Algorithm[J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 15(5): 553-564.
- [8] 王宁波, 任伟新, 万华平. 基于动应变的桥梁动态称重及其优化算法[J]. 振动与冲击, 2013(4).
- [9] 任伟新, 左小晗, 王宁波, 等. 非路面式桥梁动态称重研究综述[J]. 中国公路学报, 2014(7).
- [10] Zolghadri N, Halling M W, Johnson N, et al. Field Verification of Simplified Bridge Weigh-in-Motion Techniques[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(10): 04016063.
- [11] 赵华, 谭承君, 张龙威, 等. 基于小波变换的桥梁动态称重系统车轴高精度识别研究[J]. 湖南大学学报: 自然科

- 学版, 2016(7).
- [12] 邓露, 何维, 王芳. 不同截面类型简支梁桥动力冲击系数研究[J]. 振动与冲击, 2015(14).
- [13] Deng L, Wang F. Impact Factors of Simply Supported Prestressed Concrete Girder Bridges due to Vehicle Braking[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(11).
- [14] 庄一舟, 傅公康. 桥梁健康的智能测力支座. CN202492796U[P], 2012.
- [15] He W, Deng L, Shi H, et al. Novel Virtual Simply Supported Beam Method for Detecting the Speed and Axles of Moving Vehicles on Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 22(4).

收稿日期: 2018-05-03

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(编号: 51408211); 长沙理工大学桥梁结构安全控制湖南省工程实验室开放基金资助项目(编号: 14KD02); 湖南省自然科学基金资助项目(编号: 2015JJ3032); 国家留学基金委资助项目(编号: 201606135057)

**作者简介:** 马高, 男, 博士, 助理教授. E-mail: magao@hnu.edu.cn

目前已有不少针对 FRP 约束混凝土轴压力学性能的试验和理论研究成果,这些研究大部分都集中在 FRP 对完好混凝土试件强度和延性的提高上,仅有少数学者关注初始损伤对 FRP 约束混凝土力学性能的影响,而大量遭受地震损伤的结构由于经济和社会原因不可能全部重建,对其采用 FRP 进行加固后再使用是一种有效的解决方法,因此研究 FRP 约束损伤混凝土的力学性能具有重要意义。

Ilki 对 FRP 约束的圆截面初始损伤混凝土柱进行了轴向压缩试验,结果表明:在轴向应变为  $4\ 000 \sim 8\ 000\ \mu\epsilon$  的预损伤水平下,FRP 约束完好与初始损伤混凝土柱的力学性能相似;Wei 研究了有局部破坏的素混凝土和钢筋混凝土方形截面柱在外表面包裹 CFRP 时的轴向受压性能,结果发现:CFRP 约束初始破坏柱的强度和极限变形能力都得到了显著的提高;Ma 研究了 FRP 约束损伤混凝土棱柱体的轴压力学性能,考虑了 3 种不同初始损伤程度,初始损伤水平分别是:单轴压缩至应力—应变曲线上上升段的  $0.85f'_{co}$ 、 $f'_{co}$  和应力—应变曲线下下降段的  $0.9f'_{co}$  处后卸载( $f'_{co}$  为素混凝土轴向受压峰值强度),然后这些损伤混凝土柱分别用 CFRP 和 BFRP 加固。试验结果表明:预损伤对柱的初始弹性模量有明显影响,对极限强度影响较小;Dalgic 研究了 CFRP 约束损伤混凝土矩形柱的轴压力学性能,考虑了 3 种初始损伤程度,分别是轴压至柱的轴向应变达到  $2\ 000$ 、 $3\ 000$  和  $4\ 000\ \mu\epsilon$  时卸载,结果表明:在初始损伤较严重( $\epsilon = 4\ 000\ \mu\epsilon$ )时用 CFRP 加固仍能有效改善混凝土柱的强度和变形性能,初始损伤程度会影响加固后柱的峰值强度,但对极限应变影响较小。

综上所述:已有研究成果对损伤混凝土柱经 FRP 加固后的轴压力学行为还缺少统一的认识,对 FRP 加固混凝土柱的轴压力学性能受初始损伤程度的影响规律还缺乏足够的试验数据支持。因此,该文研究不同层数 BFRP 对 3 种不同初始应力损伤水平混凝土圆柱体试件的轴压力学性能的影响,并在试验结果的基础上提出一个考虑初始损伤修正的 FRP 约束混凝土试件的强度模型和应变模型。

## 2 试验概况

### 2.1 试件准备

试验一共设计制作了 26 个  $150\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$  的圆柱体试件(包括 24 个 BFRP 约束试件和 2 个素混凝土试件),试验中 24 个 BFRP 约束试件以初始损伤程度和 BFRP 层数为变化参数分成两类:按初始损伤等级分为无初始损伤,加载至素混凝土轴压应力—应变曲线上峰值点  $f'_{co}$  后卸载为第 1 种损伤等级,加载至素混凝土轴压应力—应变曲线下下降段的  $0.9f'_{co}$  和  $0.8f'_{co}$  后卸载为第 2 和第 3 种损伤等级,记为 D0、D1、D2 和 D3;按 BFRP 的层数分为 1、3 和 5 层,记为 L1、L3 和 L5。即 BD1L1 表示 1 层 BFRP 约束的第 1 种初始损伤等级的试件。素混凝土试件记为 PC。同一参数的试件制作 2 个,各试件参数如表 1 所示。

表 1 试件参数

试件编号	试件个数	纤维层数	损伤等级	MCR/%
PC	2	—	—	—
BD0L1	2	1	D0	8.0
BD0L3	2	3	D0	23.9
BD0L5	2	5	D0	39.8
BD1L1	2	1	D1	8.0
BD1L3	2	3	D1	23.9
BD1L5	2	5	D1	39.8
BD2L1	2	1	D2	8.0
BD2L3	2	3	D2	23.9
BD2L5	2	5	D2	39.8
BD3L1	2	1	D3	8.0
BD3L3	2	3	D3	23.9
BD3L5	2	5	D3	39.8

注:MCR 为修正约束比。

试件浇筑采用的混凝土由普通硅酸盐水泥、砂、粗骨料(最大粒径  $15\ \text{mm}$ )和水用机械搅拌而成,混合料的配合比按 C35 设计(表 2),所有试件的混凝土均一次浇筑完成。采用标准养护,正式试验时测得素混凝土圆柱体平均抗压强度  $f'_{co} = 37.7\ \text{MPa}$ ,与其对应的应变  $\epsilon_{co} = 1\ 676\ \mu\epsilon$ 。

表 2 混凝土配合比

峰值强度 $f'_{co}/\text{MPa}$	极限应变 $\epsilon_{co}/\mu\epsilon$	组成/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )			
		水泥	水	粗骨料	砂
37.7	1 676	562.5	225	1 117	550

试验中使用的玄武岩纤维单向布编织密度 4.5,单位面积质量为  $329\ \text{g}/\text{m}^2$ ,环氧树脂型号为 JN-C3P, A、B 两种组分按  $100:40$  的质量比配制使用。参考 ASTM D3039 并结合试验条件,将玄武岩纤维单向布手工制作成长  $250\ \text{mm}$ 、宽  $25\ \text{mm}$  的 BFRP 片材,并在片材两端分别用  $50\ \text{mm} \times 25\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$  的铝片进

行端部加固,对 BFRP 片材进行单向拉伸试验得到的力学性能如表 3 所示。计算 BFRP 抗拉强度和弹性模量时使用的是玄武岩纤维布的实际厚度( $t_{frp} = 0.126$  mm),由称重法获得。约束混凝土试件采用的 BFRP 层数分别为 1、3、5 层,根据 Mirmiran 定义的修正约束比(Modified Confinement Ratio, MCR)计算,1、3、5 层可分别对应弱约束、中等约束和强约束 3 种约束情况。

表 3 BFRP 力学性能

厚度 $t_{frp}/\text{mm}$	抗拉强度 $f_{frp}/\text{MPa}$	弹性模量 $E_{frp}/\text{GPa}$	极限应变 $\epsilon_{u,frp}/\%$
0.126	1 787	70.4	2.54

包裹 BFRP 之前先进行试件表面的清洁、打磨等基底处理工作。为了保证最后粘贴工作的精度,在粘贴之前将玄武岩纤维按预定的长度(BFRP 包裹的层数加上 1/4 圆周长搭接长度)裁剪好,并充分浸润粘贴胶后沿试件环向进行包裹,在这个过程中使用滚筒挤出多余的胶以及可能存在的气泡。

## 2.2 加载和测量装置

为了测量试件的环向应变,在圆柱体试件的中部沿环向均匀粘贴 4 个应变片,布置位置如图 1 所示,应变片敏感栅尺寸为  $15\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。在试件两端固定圆形钢箍,上下钢箍标距为 200 mm,沿钢箍四周均匀布置 4 个位移传感器以测量试件的轴向应变。采用 10 000 kN 电液伺服压力机进行加载,加载过程采用位移控制。轴向压力、位移计以及应变片的数据由电脑实时采集。加载装置示意图与位移传感器布置如图 2 所示。

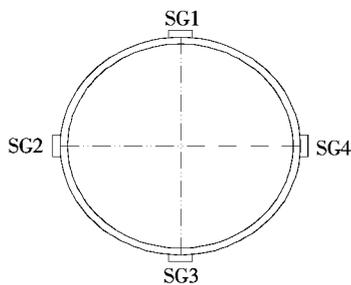
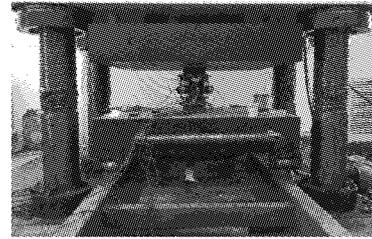


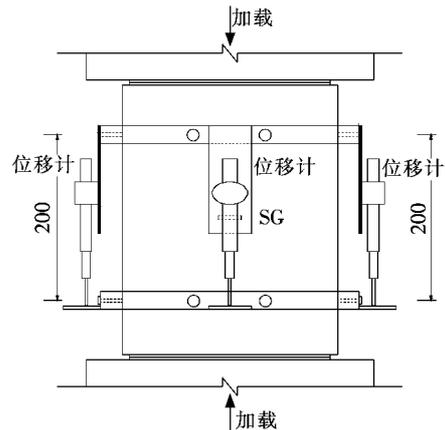
图 1 应变片布置图

## 2.3 预制损伤与包裹 BFRP

为了达到不同的初始损伤水平(图 3),先将试件加载至不同的应力状态(D1、D2、D3)后卸载,卸载结束后小心地将试件从压力机上转移,以防止对试件造成二次损伤。

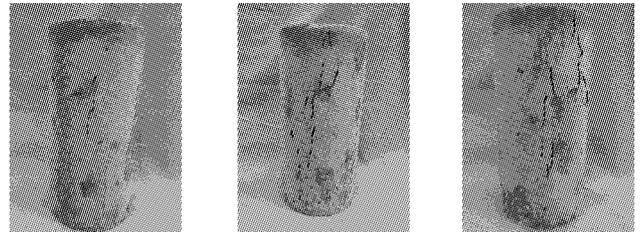


(a) 加载装置:10 000 kN 压力机



(b) 位移计布置

图 2 加载装置及位移计布置图(单位:mm)



(a) D1

(b) D2

(c) D3

图 3 不同初始损伤程度试件状态

从图 3 可以看出:随着损伤程度加深至 D2 和 D3,试件表面的裂缝数目逐渐增多,裂缝长度增大,并出现表层混凝土剥落和局部破碎的情况。

对 18 个试件分别预加载至 D1、D2、D3 之后,再以 2 个试件一组分别包裹 1、3、5 层 BFRP。为了揭示初始损伤对 BFRP 约束混凝土轴压力学性能的影响,6 个无初始损伤的试件也以 2 个为一组分别包裹 1、3、5 层 BFRP,详见表 1。在包裹 BFRP 之前,先清理初始损伤试件表面剥离的混凝土,并用早强高性能砂浆进行修补,以保证试件表面的平整。BFRP 布包裹完成后,在试件的两个端面分别再用 30 mm 宽 BFRP 条带包裹 3 层用作端部加固,以防止试件端部过早发生局部破坏。BFRP 约束后的试件在室内放置 7 d 后进行轴压试验。

### 3 试验结果

试验中 26 个圆柱体试件的轴压力学性能参数如表 4 所示。表格中  $f'_{co}$  与  $f'_{cc}$  分别为素混凝土和 FRP 约束混凝土的峰值强度,  $\epsilon_{co}$  与  $\epsilon_{cc}$  分别为对应  $f'_{co}$  与  $f'_{cc}$  的轴向应变,  $f_l$  为 FRP 对试件提供的环向约束应力。

表 4 FRP 约束试件轴压力学性能参数

试件类型	$f'_{cc}/\text{MPa}$	$\epsilon_{cc}/\mu\epsilon$	$f_l/\text{MPa}$	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$
BD0L1	49.9	4 710	3.0	1.3	2.8
BD1L1	47.6	4 879	3.0	1.3	2.9
BD2L1	45.0	4 884	3.0	1.2	2.9
BD3L1	41.5	4 800	3.0	1.1	2.9
BD0L3	61.8	9 369	9.0	1.6	5.6
BD1L3	59.1	9 300	9.0	1.6	5.6
BD2L3	55.6	9 269	9.0	1.5	5.5
BD3L3	51.9	8 642	9.0	1.4	5.2
BD0L5	80.5	10 960	15.0	2.1	6.5
BD1L5	77.0	11 566	15.0	2.0	6.9
BD2L5	72.5	11 056	15.0	1.9	6.6
BD3L5	67.7	11 314	15.0	1.8	6.8

#### 3.1 无初始损伤试件

素混凝土试件(PC)及 FRP 约束完好试件的应力—应变曲线如图 4 所示。

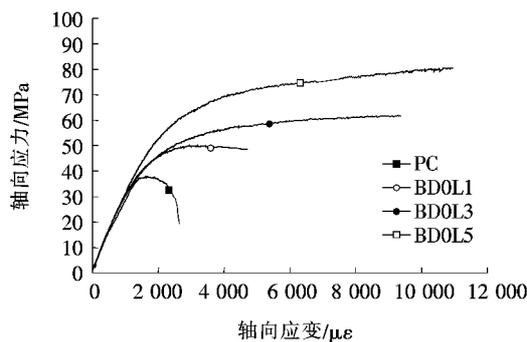


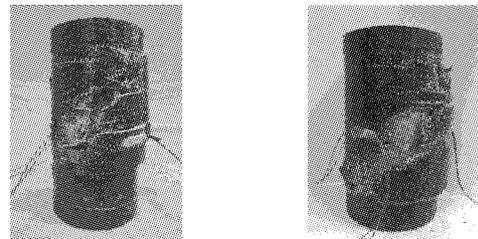
图 4 无初始损伤试件应力—应变曲线

从图 4 可以看出:① 素混凝土的峰值强度为 37.7 MPa, 相对应的轴向应变为 1 676  $\mu\epsilon$ ; ② 随着 FRP 约束层数的增加, 试件的约束效果随之提高; ③ 图中 FRP 约束试件的曲线可以分成 3 个阶段: 第一个线性阶段, FRP 约束试件的应力—应变关系与素混凝土试件类似, 应力随着应变的增加而增大, 此时素混凝土的横向膨胀很小, FRP 还不能发挥其约束作用; 当

应力接近素混凝土峰值强度时, 试件的裂缝开始迅速发展, 横向膨胀增大, 此时应力—应变曲线进入非线性的过渡阶段, 同时 FRP 开始工作, FRP 层数越多, 完全发挥作用需要的时间越长, 过渡阶段的曲线越长; 当 FRP 完全工作时, 试件的强度和延性又开始线性增加, 到达第三个阶段。这个阶段 FRP 的环向拉应力随着轴向应力的增加而增大, 当 FRP 的拉应力超过其极限抗拉强度时发生断裂, 整个试件随之突然失效。如图 5(a) 所示, 试件的破坏形态是 FRP 在试件中部发生断裂, 内部混凝土被压碎。

#### 3.2 FRP 约束初始损伤试件

FRP 约束初始损伤试件的破坏形态如图 5(b) 所示, 其破坏形态与 FRP 约束完好混凝土试件类似。



(a) 约束完好试件

(b) 约束初始损伤试件

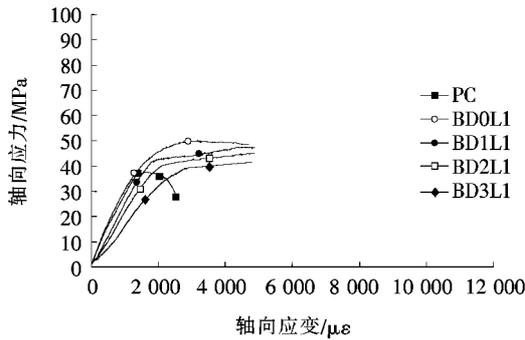
图 5 破坏形态

图 6 为 FRP 约束初始损伤试件的应力—应变曲线。由图 6 可以发现: 不同初始损伤试件的峰值强度和极限应变都高于素混凝土试件, 相比于 FRP 约束完好混凝土试件, 随着损伤程度的增加, 峰值强度逐渐降低, BD1L5、BD2L5、BD3L5 的约束效果分别为 2.0、1.9 和 1.8, 是 FRP 约束完好试件峰值强度的 0.96、0.90 和 0.84 倍, 因此试件的初始损伤程度会影响其峰值强度。但是极限应变却没有显示出与峰值强度相同的规律, 从表 4 和图 6 可知: 随着初始损伤程度的加深, 同一约束强度试件的极限应变差异很小。

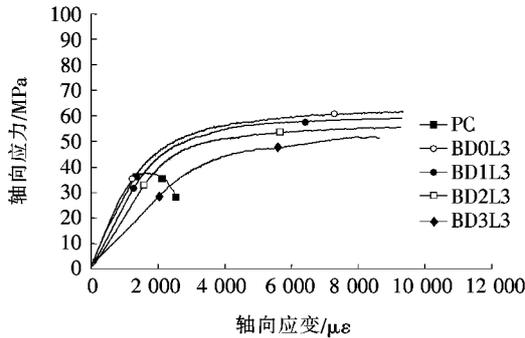
Demers and Neale 提到了在有初始损伤的情况下, 圆柱体试件的初始弹性模量会有明显的降低。在此次试验中同样发现了该规律。从图 6 可以看出 FRP 约束初始损伤试件的初始弹性模量相比于素混凝土试件有明显减小, 且随着损伤程度的增加有降低的趋势, 因此, 在实际工程中采用 FRP 对受地震损伤钢筋混凝土柱进行加固时, 其侧向刚度不能得到修复。

#### 3.3 强度和应变模型

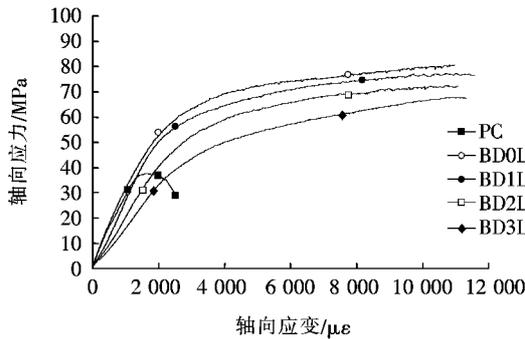
约束系数对于研究 FRP 约束混凝土的力学性能是一个重要的参数, 已有的 FRP 约束完好混凝土的强度模型和应变模型大多采用下述形式:



(a) 1 层 BFRP 约束



(b) 3 层 BFRP 约束



(c) 5 层 BFRP 约束

图 6 不同层数 BFRP 约束有初始损伤试件应力—应变曲线

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (1a)$$

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1 + k_2 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (1b)$$

式中： $k_1$ 为约束有效性系数； $k_2$ 为应变增强系数； $f'_{cc}$ 、 $\epsilon_{cc}$ 和  $f'_{co}$ 、 $\epsilon_{co}$ 分别为 FRP 约束混凝土和无约束混凝土的峰值强度和与其对应的轴向应变； $f_l$ 为 FRP 对混凝土试件的环向约束应力，由下式确定：

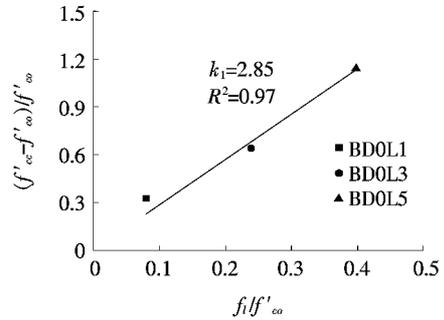
$$f_l = \frac{2f_{frp}t}{d} \quad (2)$$

式中： $f_{frp}$ 为 FRP 材料的抗拉强度； $t$ 为 FRP 材料的厚度； $d$ 为圆柱体试件直径。

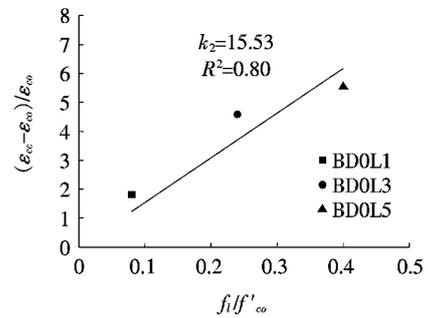
BFRP 对试件的环向约束应力如表 4 所示。

BFRP 约束完好混凝土试件的强度模型和应变模

型拟合如图 7 所示，约束有效性系数  $k_1$ 和应变增强系数  $k_2$ 分别为 2.85 和 15.53。



(a) 峰值强度模型



(b) 极限应变模型

图 7 拟合结果

表 5、6 分别比较了上述模型预测值与试验所得强度值和极限应变值的误差。为了分析上述拟合模型的准确度，该文采用 Yan and Chou 提出的模型精度分类标准来评估。对于强度模型，可将准确度分为 3 类：当模型预测值与试验结果之间的误差不大于 15% 时，认为拟合精度良好；误差大于 15% 但不超过 30% 时，拟合结果相对准确；当误差值大于 30% 时，则认为拟合模型不准确。

表 5 强度模型与试验结果的对比

试件编号	试验结果/MPa	模型预测/MPa	误差/%
BD0L1	49.9	46.2	7.4
BD0L3	61.8	63.3	2.5
BD0L5	80.5	80.4	0.2

注：误差=[(预测值-试验值)/试验值]×100%。下同。

表 6 应变模型与试验结果的对比

试件编号	试验结果/ $\mu\epsilon$	模型预测/ $\mu\epsilon$	误差/%
BD0L1	4 710	3 748	20.4
BD0L3	9 369	7 897	15.7
BD0L5	10 960	12 035	9.8

根据表 5、6 的分析结果,可以发现该文拟合的 BFRP 约束完好试件的强度模型具有良好的准确度,最大误差为 7.4%。而对于应变模型,其误差要大于强度模型,最大误差为 20.4%。

### 3.4 考虑初始损伤修正的分析模型

对于 BFRP 约束损伤混凝土试件,可引入参数  $\alpha_D$  和  $\beta_D$  分别来考虑初始损伤对 FRP 约束完好混凝土试件峰值强度和极限应变的影响,修正之后的模型表达式如下:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \alpha_D (1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}}) \quad (3a)$$

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = \beta_D (1 + k_2 \frac{f_l}{f'_{co}}) \quad (3b)$$

对于不同损伤程度的混凝土试件,GB 50011—2010《混凝土结构设计规范》提出混凝土单轴受压损伤演化参数可由下式确定:

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n-1+x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (4a)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \epsilon_{c,r}} \quad (4b)$$

$$n = \frac{E_c \epsilon_{c,r}}{E_c \epsilon_{c,r} - f_{c,r}} \quad (4c)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{c,r}} \quad (4d)$$

式中: $d_c$ 为混凝土单轴受压损伤演化参数; $\alpha_c$ 为混凝土单轴受压应力—应变曲线下降段参数值,对于 C35 混凝土取 1.65; $f_{c,r}$ 为抗压强度代表值,对于此次试验取  $f'_{co}$ ;  $\epsilon_{c,r}$ 为与  $f_{c,r}$ 对应的应变,即此文中的  $\epsilon_{co}$ ;  $E_c$ 为素

混凝土的弹性模量,可从图 4 计算得为 33.5 GPa; $\epsilon$ 为初始损伤程度对应的应变值,从图 4 中可得出 D1、D2、D3 对应的  $\epsilon$  分别为 1 676、2 300 和 2 548  $\mu\epsilon$ ,经计算其对应的  $d_c$  分别为 0.33、0.69 和 0.77。

由表 4 可知:随着初始损伤程度的增加,BFRP 约束试件的峰值强度逐渐降低,因此可以推测  $\alpha_D$  与  $d_c$  存在一定相关性,而初始损伤程度的不同对 BFRP 约束试件的极限应变影响很小,因此  $\beta_D$  的值取为 1。不同损伤程度的 BFRP 约束试件的强度影响系数  $\alpha_D$  与  $d_c$  的线性拟合结果如图 8 所示,因此,有初始损伤试件的峰值强度和极限应变影响系数  $\alpha_D$  和  $\beta_D$  的表达形式如下:

$$\alpha_D = 1 - 0.179d_c \quad (5a)$$

$$\beta_D = 1 \quad (5b)$$

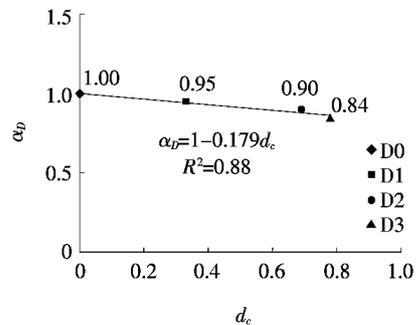


图 8  $\alpha_D$  与  $d_c$  线性拟合结果

表 7 分别给出了考虑初始损伤影响的强度模型和应变模型的预测结果。由表 7 可知:该文提出的强度模型具有良好的精度,最大误差为 9.6%;对于 5 层 BFRP 约束损伤试件,应变模型预测结果与试验值吻合良好,最大误差为 8.8%;而对于 1、3 层 BFRP 约束损伤试件,应变模型的误差增大,最大误差为 23.3%。

表 7 修正的强度、应变模型与试验结果的对比

试件编号	强度模型			应变模型		
	试验结果/MPa	模型预测/MPa	误差/%	试验结果/ $\mu\epsilon$	模型预测/ $\mu\epsilon$	误差/%
BD1L1	47.6	43.5	8.6	4 879	3 747	23.2
BD2L1	45.0	40.7	9.6	4 884	3 747	23.3
BD3L1	41.5	39.8	4.1	4 800	3 747	21.9
BD1L3	59.1	59.5	0.7	9 300	7 890	15.2
BD2L3	55.6	55.7	0.2	9 269	7 890	14.9
BD3L3	51.9	54.5	5.0	8 642	7 890	8.7
BD1L5	77.0	75.6	1.8	11 566	12 032	4.0
BD2L5	72.5	70.8	2.3	11 056	12 032	8.8
BD3L5	67.7	69.2	2.2	11 314	12 032	6.3

## 4 结 论

通过对 24 个 BFRP 约束完好与初始损伤混凝土圆柱体和 2 个素混凝土圆柱体试件的轴压试验,研究了 BFRP 层数与初始损伤程度对 FRP 约束混凝土圆柱体轴压力学性能的影响规律,得出如下结论:

(1) 通过 BFRP 约束,完好混凝土试件与初始损伤混凝土试件的强度和延性都能得到显著提高,随着 BFRP 层数的增加,试件强度和延性的提高越大。

(2) 初始损伤对 BFRP 约束混凝土试件的峰值强度有影响,强度影响系数  $\alpha_D$  与混凝土单轴受压损伤演化参数  $d_c$  具有较好的线性关系,随着初始损伤程度的增大,试件强度的提高越小,但是峰值强度仍然高于素混凝土试件;初始损伤对 BFRP 约束混凝土试件的极限应变影响很小。

(3) BFRP 约束完好与初始损伤混凝土试件的应力—应变曲线形状相似,都是由两个线性阶段中间由一个非线性的过渡阶段连接而成,初始损伤会使试件的初始弹性模量降低。

(4) 该文提出的考虑初始损伤修正系数的强度模型和应变模型可以较好地预测试验结果,但是由于此次试验考虑的 BFRP 层数和初始损伤工况有限,该模型还需要更多试验结果做进一步验证。

### 参 考 文 献:

- [1] 冯鹏. 复合材料在土木工程中的发展与应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(9).
- [2] 滕锦光, 陈建飞, 林力, 等. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] 欧阳利军, 丁斌, 陆洲导. 玄武岩纤维及其在建筑结构加固中的应用研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(3).
- [4] 董志强, 张光超, 吴刚, 等. 加速老化环境下纤维增强复合材料筋耐腐蚀性能试验研究[J]. 工业建筑, 2013(6).
- [5] Samaan M, Mirmiran A. Model of Concrete Confined by Fiber Composites[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(9): 1 025—1 031.
- [6] Lam L, Teng J G. Strength Models for Fiber—Reinforced Plastic—Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(5): 612—623.
- [7] Ilki, A., Kumbasar, N. Compressive Behaviour of Carbon Fibre Composite Jacketed Concrete with Circular and Prismatic Cross — Sections[J]. Earthquake Engineer, 2003, 7(3): 381—406.
- [8] Pantelides C P, Yan Z. Confinement Model of Concrete with Externally Bonded FRP Jackets or Posttensioned FRP Shells[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(9): 1 288—1 296.
- [9] Wei Y Y, Wu Y F. Unified Stress—Strain Model of Concrete for FRP—Confined Columns[J]. Construction & Building Materials, 2012, 26(1): 381—392.
- [10] Ilki A, Kumbasar N. Behavior of Damaged and Undamaged Concrete Strengthened by Carbon Fiber Composite Sheets[J]. Structural Engineering & Mechanics, 2002, 13(1): 75—90.
- [11] Wei H, Wu Z, Guo X, et al. Experimental Study on Partially Deteriorated Strength Concrete Columns Confined with CFRP[J]. Engineering Structures, 2009, 31(10): 2 495—2 505.
- [12] Ma G, Li H, Duan Z. Repair Effects and Acoustic Emission Technique—Based Fracture Evaluation for Pre-damaged Concrete Columns Confined with Fiber—Reinforced Polymers[J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(6): 626—639.
- [13] Dalgic K D, Ispir M, Ilki A. Cyclic and Monotonic Compression Behavior of CFRP—Jacketed Damaged Noncircular Concrete Prisms[J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(1).
- [14] ASTM D3039. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials[S]. West Conshohocken, Pa, USA, 2008.
- [15] Mirmiran A, Shahawy M, Samaan M, et al. Effect of Column Parameters on FRP—Confined Concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 1998, 2(4): 175—185.
- [16] Demers M, Neale K W. Confinement of Reinforced Concrete Columns with Fibre—Reinforced Compo[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, 26(2): 226—241.
- [17] Lam L, Teng J G. Design—Oriented Stress—Strain Model for FRP—Confined Concrete[J]. Construction & Building Materials, 2003, 17(6—7): 471—489.
- [18] Yan L, Chouw N. Behavior and Analytical Modeling of Natural Flax Fibre—Reinforced Polymer Tube Confined Plain Concrete and Coir Fibre—Reinforced Concrete[J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(17): 2 133—2 148.
- [19] GB 50011—2010 混凝土结构设计规范[S].