

文章编号:1008-1542(2012)02-0175-04

# 玄武岩纤维约束预压混凝土的应力-应变模型

李素娟, 马卫华

(唐山学院土木工程系, 河北唐山 063000)

**摘要:**针对实际工程中对结构构件进行现场加固时不能卸载这一现象,开展了玄武岩纤维片材(BFRP)约束预压混凝土方柱的轴压性能试验,并重点分析了试验所得应力-应变曲线,通过研究发现其形式接近抛物线,结合前人研究确定了抛物线加直线的应力-应变模型。通过对试验数据的处理,进一步得出抛物线顶点对应的峰值应力及峰值应变的计算模型,再加上一定的理论推导,最终得出完整的应力-应变模型。此模型的优点在于考虑了试件加固之前所受荷载的影响,同已有众多模型相比,与工程实践更为接近。

**关键词:**BFRP; 峰值应力; 峰值应变; 应力-应变模型; 预压

中图分类号:TU528.572 文献标志码:A

## Stress-strain model for BFRP-confined preloaded concrete

LI Su-juan, MA Wei-hua

(Department of Civil Engineering, Tangshan College, Tangshan Hebei 063000, China)

**Abstract:** For the reinforcement of structural member on site, the member can not be unloaded. So this paper studies BFRP constraint preloaded square concrete column under uniaxial load. The stress-strain curve of the specimen is deeply researched into. It is found that the curve is close to the parabola. Based on previous researches, the model of parabola plus linear is determined. Through the processing of test data, the model of peak stress and strain of the parabola vertex is obtained. Moreover, with the theoretical derivation, the complete stress-strain model is obtained. The preload taken into account, the model is closer to actual engineering compared with other models.

**Key words:** BFRP; peak stress; peak strain; stress-strain model; preload

用 FRP 片材裹覆的方式对结构构件进行加固已成为工程界比较多见的一种做法,对 FRP 约束混凝土的研究也较为多见。然而已有的研究主要针对碳纤维复合材料(CFRP)进行。随着复合材料技术的发展,被誉为“火山岩变丝”的玄武岩纤维,由于其具有强度高、性能稳定、成本低廉等优点<sup>[1]</sup> 逐渐进入人们的视野,并逐渐运用于土木工程中的加固改造领域<sup>[2]</sup>。关于玄武岩纤维增强复合材料加固混凝土结构的研究也随之升温。针对实际工程结构构件的加固不能卸载这一状况,笔者研究了玄武岩纤维片材(BFRP)约束预压混凝土的轴压性能。

### 1 试验研究

制作强度等级为 C20, C25, 尺寸为 150 mm × 150 mm × 300 mm 的混凝土棱柱体试件来做混凝土柱,利用一定的设备对其进行预压,预压后锚固,即做成预压试件,而后对预压试件用 BFRP 裹覆,再用静态液压加

收稿日期:2011-09-26;责任编辑:冯 民

基金项目:唐山市科技局项目(08450204B)

作者简介:李素娟(1979-),女,河北保定人,讲师,硕士,主要从事结构工程方面的研究。

载设备系统对试件进行轴压性能试验。此处预压试件的预载程度用参数轴压比来控制,轴压比定义为预加荷载与素混凝土试件的破坏荷载的比值。根据试验数据,最终做出试件在二次加载过程中的应力-应变曲线,如图1、图2所示,其中1N2和2N2为素混凝土试件曲线,其余为不同轴压比下的BFRP约束预压混凝土试件的应力-应变曲线。

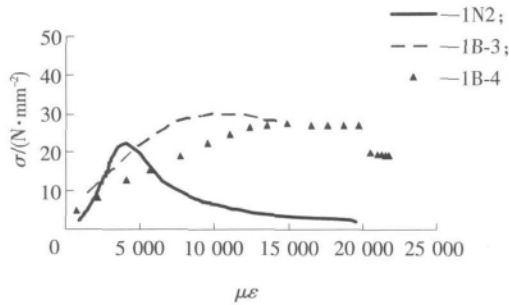


图1 C20试件的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curve of C20 specimen

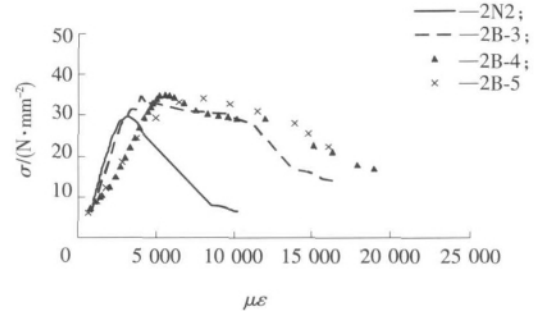


图2 C25试件的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of C25 specimen

从曲线中明显可以看出试件加固后的效果,峰值应力有了明显提高。但是由于预加应力的存在,使得前期曲线走向变得平缓,即应变较未预压试件增长迅速,同时轴压比越大,即预加荷载越大,曲线越往右移,可见试件在二次受力时,荷载的存在对加固后的效果还是有着明显影响的。

## 2 既有应力-应变曲线研究

前人研究中,对于FRP约束矩形混凝土的应力-应变模型多采用了前半段为抛物线、后半段为直线的曲线形式<sup>[3-6]</sup>。东南大学吴刚等人的研究,把FRP约束混凝土矩形柱的应力-应变曲线分为有软化段和无软化段2种<sup>[4]</sup>。其中前者的明显特征是曲线有极值,而后进入下降段。对于本课题中的方形棱柱体试件,用1层BFRP布加固,由实测应力-应变曲线可看出属于前者。对于此类曲线的研究,转折点应力及应变(或峰值应力及应变)的确定对于模型的研究是不可或缺的。

## 3 参数计算

### 3.1 峰值应力

参考已有FRP约束混凝土强度模型<sup>[7]</sup>,考虑试件预加荷载的影响,对于应力-应变曲线的峰值应力采用如下的方程来计算:

$$\frac{f_{c\alpha}}{f_{c0}} = k_0 + k_1 k_s \frac{f_l}{f_{c0}} + k_2 B。$$

式中: $k_0, k_1, k_2$ 均为系数; $B$ 为试件的预加轴压比;其他参数同文献<sup>[7]</sup>。

在上述方程中,利用本课题试验数据得出峰值应力计算表达式:

$$\frac{f_{c\alpha}}{f_{c0}} = 0.8875 + 8.9390 k_s \frac{f_l}{f_{c0}} - 0.09629 B。$$

通过回归分析可知,所得方程的相关系数为0.95。方程中涵盖了试件的预加轴压比,即反映了试件在役加固对其后期承载力的影响。

### 3.2 峰值应变

峰值应变采用如下的方程来计算:

$$\frac{\epsilon_{c\alpha}}{\epsilon_{c0}} = k_0 + k_1 \frac{E_r}{E_c} + k_2 B。$$

式中: $k_0, k_1, k_2$ 为系数; $E_r$ 为等效圆柱约束刚度, $E_r = \frac{\sqrt{2} t_{frp} E_{frp}}{b}$ ,其中 $E_{frp}$ 和 $t_{frp}$ 分别为CFRP的弹性模量和厚度, $b$ 为混凝土试件的宽度; $E_c$ 为混凝土的弹性模量;其他参数同文献<sup>[7]</sup>。

同理可得峰值应变计算表达式为

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{c0}} = -2.0424 + 685.4099 \frac{E_r}{E_c} + 1.9327B。$$

该方程的相关系数为 0.8。

### 4 应力-应变模型

#### 4.1 试验结果

用  $\sigma$  表示二次加载过程中试件横截面的平均应力,  $f_{cc}$  表示二次加载过程中试件的峰值应力,  $\epsilon$  表示二次加载过程中试件的竖向应变,  $\epsilon_{cc}$  表示二次加载过程中试件的峰值应变。对试验数据加以处理, 再用  $\sigma/f_{cc}$  表示纵轴,  $\epsilon/\epsilon_{cc}$  表示横轴, 得到二次加载时新的应力-应变曲线, 曲线形式类似抛物线。利用软件给曲线添加抛物线形式的趋势线并且得到趋势线方程。其中部分试件的曲线如图 3 所示(1B-3, 1B-4 为 C20 轴压比为 0.3 和 0.4 的试件; 2B-4, 2B-5 为 C25 轴压比为 0.4 和 0.5 的试件)。

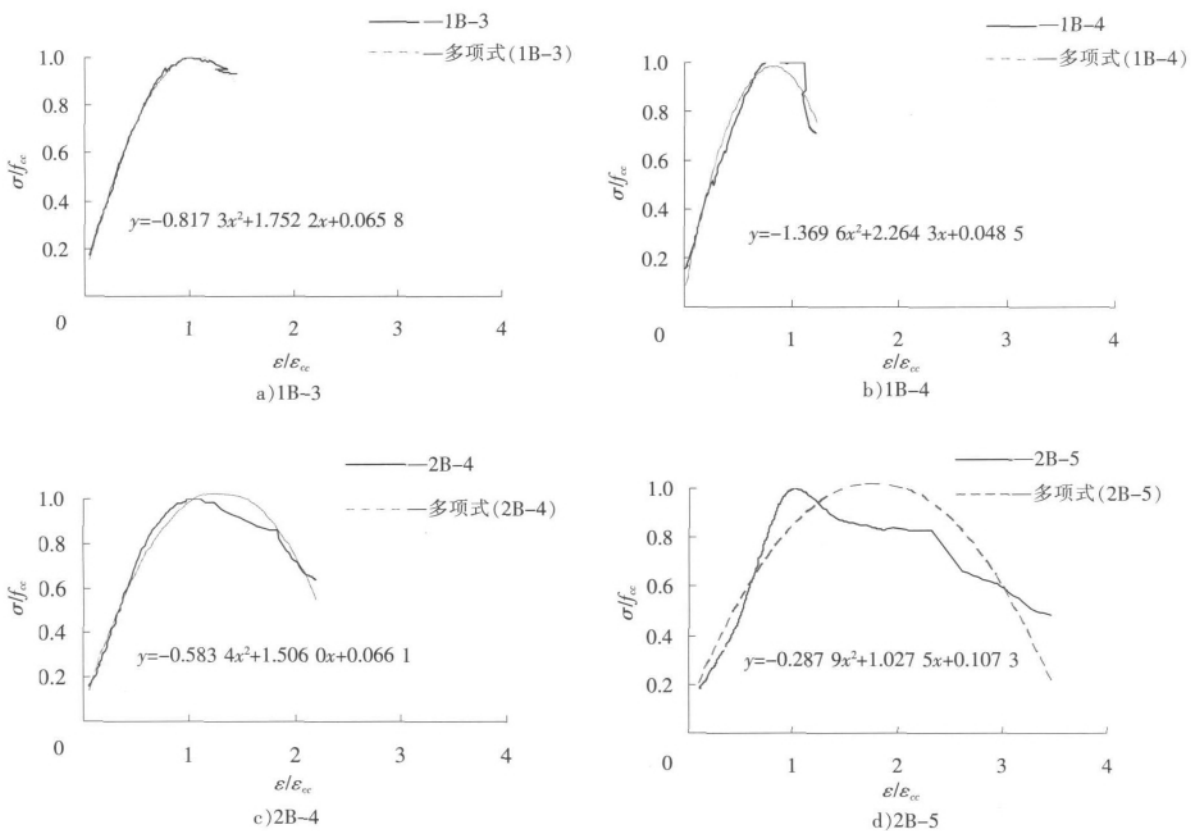


图 3 试件应力-应变曲线及趋势线

Fig. 3 Stress-strain curve and trend line

#### 4.2 应力-应变通用模型的提出

根据前述试验结果, 通用模型的峰值点以前可采用抛物线, 对于本文的弱约束情况, 进入下降段以后方程采用何种形式不重要, 因此参考 CFRP 约束混凝土的研究结果仍采用直线形式。

笔者拟用图 4 所示曲线来作为 BFRP 约束预压混凝土的应力-应变模型, 其中上升段曲线方程采用  $y = ax^2 + bx + c$ , 对于该模型存在如下边界条件:

$$\begin{cases} x = \frac{\epsilon_{p0}}{\epsilon_{cc}} \\ y = \frac{\sigma_{p0}}{f_{cc}} \end{cases}, \quad \begin{cases} x = 1 \\ y = 1 \end{cases}, \quad \begin{cases} x = 1 \\ \frac{dy}{dx} = 0 \end{cases}。$$

代入边界条件解得

$$a = \frac{\frac{\sigma_{p0}}{f_{cc}} - 1}{\left(\frac{\varepsilon_{p0}}{\varepsilon_{cc}} - 1\right)^2}, \quad b = -2 \times \frac{\frac{\sigma_{p0}}{f_{cc}} - 1}{\left(\frac{\varepsilon_{p0}}{\varepsilon_{cc}} - 1\right)}, \quad c = \frac{\frac{\sigma_{p0}}{f_{cc}} - 1}{\left(\frac{\varepsilon_{p0}}{\varepsilon_{cc}} - 1\right)} + 1.$$

经分析可知:  $-1 \leq a \leq 0$ , 抛物线开口朝下, 与模型曲线一致。  
由此可得应力-应变模型:

$$y = \frac{\frac{\sigma_{p0}}{f_{cc}} - 1}{\left(\frac{\varepsilon_{p0}}{\varepsilon_{cc}} - 1\right)^2} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} - 1\right)^2 + 1.$$

当  $\sigma_{p0} = 0, \varepsilon_{p0} = 0$ , 即无预加应力时, 上式变为  $y = -\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} - 1\right)^2 + 1$ ,

与普通素混凝土试件的应力-应变曲线形式一致。

下降段曲线方程仍沿用文献[7]的做法, 如此即可得到 BFRP 约束预压混凝土方柱完整的应力-应变模型:

$$\text{当 } \varepsilon_{p0} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cc} \text{ 时, } y = \frac{\frac{\sigma_{p0}}{f_{cc}} - 1}{\left(\frac{\varepsilon_{p0}}{\varepsilon_{cc}} - 1\right)^2} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} - 1\right)^2 + 1; \quad \text{当 } \varepsilon_{cc} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \text{ 时, } y = 1 + \frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{cc}} \left(\frac{\sigma_u}{f_{cc}} - 1\right).$$

## 5 结 论

通过试验研究和理论分析, 得出以下结论:

- 1) 预加荷载对方柱约束后的受力性能的影响不容忽视;
- 2) BFRP 约束预压混凝土方柱在轴向荷载作用下, 其应力-应变曲线形式类似抛物线;
- 3) 得出了峰值应力及峰值应变的计算表达式;
- 4) 得出了 BFRP 约束预压混凝土方柱的应力-应变模型。

受条件所限, 本文的研究还处于初级阶段, 试验中还有诸多内容需要完善, 如对于更大加固量的考虑, 偏心受压等。因此模型的优劣仍需大量试验数据的验证, 付诸于工程实践之前还需要很多的研究工作。

## 参考文献:

- [1] 杨勇新, 岳清瑞. 玄武岩纤维及其应用中的几个问题[J]. 工业建筑(Industrial Construction), 2007, 37(6): 1-4.
- [2] 胡显奇, 董国义, 鄢 宏. 玄武岩纤维在建筑和基础设施中的应用[J]. 工业建筑(Industrial Construction), 2004, 34(S1): 21-26.
- [3] LAM L, TENG Jin-guang. Compressive strength of FRP confined in rectangular columns[A]. Proceeding of the International Conference on FRP Composite in Civil Engineering[C]. Hong Kong: [s. n.], 2001, 335-344.
- [4] 吴 刚, 吕志涛. 纤维增强复合材料约束混凝土矩形柱应力-应变关系的研究[J]. 建筑结构学报(Journal of Building Structure), 2004, 25(3): 99-106.
- [5] 顾 辉, 姜 涛. 碳纤维符合材料(CFRP)约束矩形截面混凝土柱应力-应变关系研究[J]. 四川建筑科学研究(Sichuan Building Science), 2006, 32(5): 45-49.
- [6] 敬登虎, 曹双寅. 方形截面混凝土柱 FRP 约束下的轴向应力-应变曲线计算模型[J]. 土木工程学报(China Civil Engineering Journal), 2005, 38(12): 32-37.
- [7] 腾锦光, 陈建飞, 史密斯 S T, 等. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

## (上接第 141 页)

- [Gly] with benzylalcohol at  $T = (298.15 \text{ to } 313.15) \text{ K}$ [J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2010, 42(5): 640-645.
- [18] ATTRI P, REDDY P M, VENKATESU P. Density and ultrasonic sound speed measurements for N,N-dimethylformamide with ionic liquids[J]. Indian Journal of Chemistry, 2010, 49A(5-6): 736-742.
  - [19] WU T Y, SU S G, LIN Y C, et al. Electrochemical and physicochemical properties of cyclic amine-based Brønsted acidic ionic liquids[J]. Electrochimica Acta, 2010, 56(2): 853-862.
  - [20] MOKHTARANI B, SHARIFI A, MORTAHEB H R, et al. Density and viscosity of pyridinium-based ionic liquids and their binary mixtures with water at several temperatures[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2009, 41(3): 323-329.

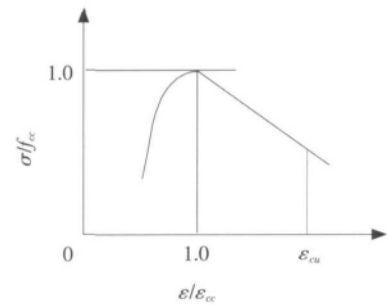


图 4 应力-应变模型曲线

Fig. 4 Curve of stress-strain model