

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.009

BFRP约束损伤混凝土棱柱体轴压力学性能研究*

马 高^{1,2}, 曾志虎¹

(1. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 桥梁结构安全控制湖南省工程实验室(长沙理工大学), 湖南长沙 410076)

摘要: 为研究玄武岩纤维增强复合材料(Basalt Fiber Reinforced Polymer, BFRP)约束有初始损伤的混凝土棱柱体的轴压力学性能, 对37个边长150 mm、高300 mm的混凝土棱柱体进行了轴压试验, 其中包括34个BFRP约束混凝土试件和3个素混凝土试件, 试验变量为BFRP层数(1、2、3、4和6层)和初始损伤程度(轻微、中等和严重损伤), 试验结果表明: BFRP约束棱柱体的抗压强度和轴向变形能力随FRP约束层数的增加而提高, 特别是对变形能力的提高更为明显; 初始损伤程度对BFRP约束试件的峰值点以及极限点的强度影响较明显, 但对极限应变影响较小; 当BFRP层数为2层及以下时, BFRP约束棱柱体的应力—应变曲线有明显软化段, 当BFRP层数为4层及以上时, 应力—应变曲线开始有明显强化段。基于试验结果, 提出了考虑初始损伤影响的BFRP约束混凝土棱柱体的强度模型和应变模型, 并分别给出了弱约束和强约束下的应力—应变关系模型, 模型预测结果与试验结果吻合良好。

关键词: BFRP; 初始损伤; 强度模型; 应变模型; 应力—应变

中图分类号: TU375.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0910-09

Axial Compression Behavior of Pre-damaged Concrete Prisms Confined with BFRP

MA Gao^{1,2}, ZENG Zhihu¹

(1. Hunan Provincial Key Lab on Damage Diagnosis for Engineering Structures, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Hunan Province Engineering Laboratory of Bridge Structure (Changsha University of Science & Technology), Changsha 410076, China)

Abstract: In order to study the axial compression behavior of pre-damaged concrete prisms confined by basalt fiber reinforced polymers (BFRPs), thirty-seven concrete prisms, with a side length of 150 mm and a height of 300 mm, were tested under axial compression, including thirty-four BFRP-confined specimens and three plain concrete specimens. The test variables were the number of BFRP layers (one, two, three, four, and six layers) and the initial damage (slight, moderate and severe damage). The test results show that the compression strength and axial deformation capacities of the BFRP-confined prisms increase with the increase of FRP layers, in which the improvement of the deformation capacity is more obvious. The initial damage levels have an obvious influence on the peak

* 收稿日期: 2018-11-06; 修回日期: 2019-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878268)、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项目(14KD02)、湖南省自然科学基金项目(2015JJ3032)资助

作者简介: 马 高(1985-), 男, 副教授, 博士。主要从事结构抗震、FRP加固等研究。Email: magao@hnu.edu.cn

and ultimate values of strength for BFRP-confined specimens but have little effect on the ultimate strain. When the BFRP layers are two or less, the stress-strain curves of BFRP-confined prisms have a softening section. When the BFRP layers are four or more, the stress-strain curves start to have an obvious strengthening section. Based on the test results, strength and strain models of the BFRP-confined concrete prisms considering the influences of initial damage were proposed, and the stress-strain relationship models under weak confinement and strong confinement were also presented. The model predicted results are in good agreement with the test results.

Keywords: BFRP; initial damage; strength model; strain model; stress-strain

引言

纤维增强复合材料(Fiber-Reinforced Polymer, FRP)以其优异的物理力学性能、化学特性,近年来逐渐成为土木工程中传统材料的重要补充,特别是在混凝土结构加固修复中的优势尤为明显^[1]。目前应用较广泛的主要有碳纤维增强复合材料(Carbon-FRP, CFRP)、玻璃纤维增强复合材料(Glass-FRP, GFRP)和芳纶纤维增强复合材料(Aramid-FRP, AFRP)。玄武岩纤维增强复合材料(Basalt FRP, BFRP)作为一种新型复合材料,是继碳纤维以来又一种高新技术复合纤维材料。玄武岩纤维是玄武岩在高温熔融后,通过拉拔制成的高性能无机纤维,BFRP是以玄武岩纤维为增强材料而生产的一种复合材料,其具有抗拉强度高,耐高温和耐腐蚀性能强等诸多优点,且其原材料来源广泛,生产工艺环保,符合绿色可持续发展的要求,是一种高性能环保的绿色材料^[2]。

我国的抗震设防目标是“小震不坏,中震可修,大震不倒”,实际震损结构除了严重破坏、残余位移过大且无法修复的建筑物需要拆除重建外,对于大量轻微和中等受损结构,由于经济和社会原因不可能全部推倒重建,可用FRP对其进行加固,而FRP约束损伤混凝土轴压力学性能是将FRP用于震损结构加固的基础。基于此,研究初始损伤对FRP约束混凝土轴压力学性能的影响具有重要的理论和工程意义。

目前国内外已开展了大量关于FRP约束混凝土的试验和理论研究^[1],而关于FRP约束损伤混凝土力学性能的研究较少。目前对于FRP约束损伤混凝土圆柱的试验研究已有一些报道^[3-5],研究表明,初始损伤对FRP约束混凝土圆柱轴压力学性能存在不利影响,特别是对约束混凝土的初始弹性模

量影响较大。而实际工程中,混凝土结构柱以方柱为主,但针对FRP约束有初始损伤混凝土方柱的研究则很有限^[6-7],G. Ma等^[6]研究了三种预损伤水平下混凝土方柱采用FRP加固后的轴压力学性能,三种损伤水平分别是:轴向加载至受压应力—应变曲线上升段的0.85、1.0和下降段0.9倍峰值强度再卸载,然后分别用CFRP和BFRP进行加固,试验表明预损伤对柱的极限强度仅有轻微影响,而对初始刚度影响较明显。K. D. Dalgic等^[7]考虑了三种初始损伤程度对CFRP加固混凝土方柱的影响,分别是预加载柱的轴向应变达到2 000 $\mu\epsilon$ 、3 000 $\mu\epsilon$ 和4 000 $\mu\epsilon$ 时卸载,结果表明在初始损伤较严重(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,初始损伤对加固柱的峰值强度有明显的不利影响,但对极限应变影响较小。由于方柱为非均匀约束,实际工程中方柱的FRP加固容易出现弱约束的情况,而G. Ma等^[6]和K. D. Dalgic等^[7]均未考虑弱约束情况下损伤混凝土方柱的加固效果。

综上所述,已有研究对FRP约束损伤混凝土方柱的研究非常少,而且结论并不一致,因此本文进行了三种不同损伤程度与五种BFRP层数约束的素混凝土棱柱体的轴压试验,研究了初始损伤程度和约束强弱对BFRP约束混凝土棱柱体轴压力学性能的影响规律,并基于试验建立了考虑初始损伤和约束强弱的BFRP约束混凝土棱柱体强度模型、应变模型以及应力—应变关系模型。

1 试验概况

1.1 试件设计

本试验共设计了37个尺寸为(150×150×300) mm,倒角半径为23 mm的棱柱体试件(包括34个BFRP约束试件和3个素混凝土试件),混凝土

强度设计等级为C25,粗骨料最大粒径为15 mm,水、水泥、细砂和粗骨料的质量配合比为0.49:1:1.39:2.47。正式试验时测得混凝土棱柱体轴心抗压强度 $f_{co}'=25.7$ MPa,对应的峰值应变 $\epsilon_{co}=1\ 820\ \mu\epsilon$ 。试验中使用的玄武岩纤维单向布由四川航天拓鑫玄武岩实业有限公司生产,BFRP实测力学性能见表1。

表1 BFRP力学性能

Table 1 Mechanical properties of BFRP

试件编号	厚度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限拉应变/%
B1	0.138	1 538	59.8	2.58
B2	0.138	1 553	59.5	2.63
B3	0.138	1 556	58.7	2.65
B4	0.138	1 541	61.7	2.50
B5	0.138	1 558	60.2	2.64
平均值	0.138	1 549	60.0	2.60

试验考虑了强弱约束的影响,而已有文献对强弱约束界限的定义并不一致,表2为部分文献给出的强弱约束界限值与本文试件约束系数的比较。

表2 约束系数计算结果

Table 2 Constraint coefficient after modification

层数	文献[8] (7.5%)	文献[9] (15%)	文献[10] (0.07)	文献[11] (7.5%)	文献[12] (0.2)
1	2.6%	3.2%	0.03	3.7%	0.06
2	5.3%	6.4%	0.06	7.4%	0.1
3	7.9%	9.6%	0.1	11.1%	0.2
4	10.5%	12.8%	0.1	14.9%	0.3
6	15.8%	19.2%	0.2	22.3%	0.4

由表2可知,1和2层试件均为弱约束情况,6层属于强约束情况,但对于3层和4层文献给出的结论不一致,4层有4篇文献认为是强约束。故本文设计的约束层数为:弱约束工况为1和2层,强约束工况为4和6层,同时为验证强弱约束界限,考虑了两个3层的试件,该试件无初始损伤。

1.2 加载和测量装置

加载设备采用1 000 T刚性压力机,试件轴向应变采用均匀布置在试件四周的4个位移传感器测量,标距为200 mm,BFRP环向应变通过电阻应变片测得,加载设备如图1所示,位移计和环向应变片布置如图2所示。

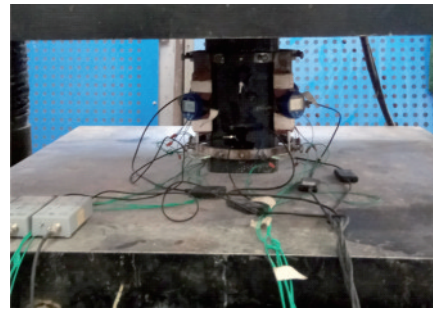


图1 加载设备

Fig.1 Loading device

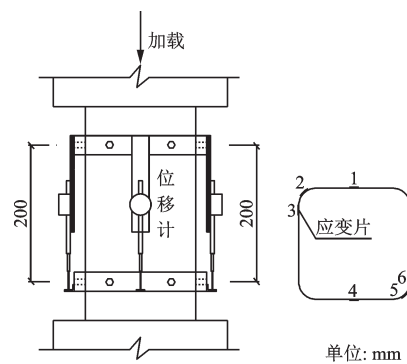


图2 位移计和应变片布置

Fig.2 Arrangement of displacement transducers and strain gauges

1.3 预损伤及包裹BFRP

实际震害发现震损钢筋混凝土结构的梁柱塑性铰区混凝土会出现不同程度的开裂甚至剥落,表明混凝土材料已进入了受压下降段。本文在对未约束棱柱体进行轴压材性试验时,发现棱柱体受压达到 $0.8f_{co}'$ 时,混凝土开裂才较明显,并伴随有部分表层混凝土剥落。故本文将预加载混凝土至下降段 $0.8f_{co}'$ 记为严重损伤(D3),对于峰值强度之前的预损伤,文献[6,11]表明其对FRP约束后的力学性能影响很小,而峰值强度是混凝土的一个重要力学参数,故将预加载至峰值点记为轻微损伤(D1);为研究不同损伤程度对BFRP约束混凝土力学性能的影响,将预加载至下降段 $0.9f_{co}'$ 记为中等损伤(D2),对于无初始损伤记为D0。另外,从材料层面研究混凝土有较大范围损伤(从轻微到严重)后再经FRP约束的力学性能,可以涵盖实际震损柱的大多数损伤情况,研究结果对实际震损柱的加固更有指导意义。

损伤后的试件如图3所示,实验中发现D1试件表面出现了细微裂缝,随着损伤增大试件表面裂缝逐渐发展,大多数D3试件形成多条较明显裂缝,部

分 D3 试件端部出现混凝土剥落。用裂缝卡测得 D1、D2 和 D3 试件的最大裂缝宽度分别为 0.20、0.50、0.95 mm。

试件达到预定损伤水平后,移除表层剥落的混凝土,再用早强水泥砂浆修补,养护两天后采用湿粘法包裹 BFRP,并在试件端部额外包裹两层宽度为 20 mm 的条带,防止加载时出现柱端破坏,加固后的试件如图 4 所示。

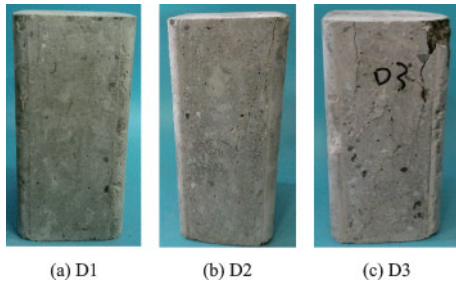


图3 预损伤试件损伤状态

Fig.3 Damage states of pre-damaged specimens

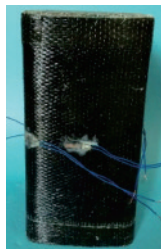


图4 BFRP包裹后

Fig.4 After BFRP wrapping

2 试验结果及分析

试验结果见表 3,其中每个工况两个试件,表中所列数据为两个试件的平均值。

2.1 BFRP 约束完好试件

BFRP 约束完好试件的破坏情况如图 5 所示,试件在加载后期可听到纤维断裂声音,随着荷载继续增大,纤维布在角部区域被拉断,并伴随有混凝土崩出,试件承载力急剧下降,为典型的脆性破坏模式。由图 5 可以发现内部混凝土的损伤程度随着 FRP 层数的增加而增大,这是因为包裹层数越多,FRP 提供的约束能力越强,所以破坏时试件释放的能量更多,导致混凝土破碎的更加严重。

素混凝土试件及 BFRP 约束完好试件的应力—应变曲线如图 6 所示。由图可知,随着 BFRP 层数

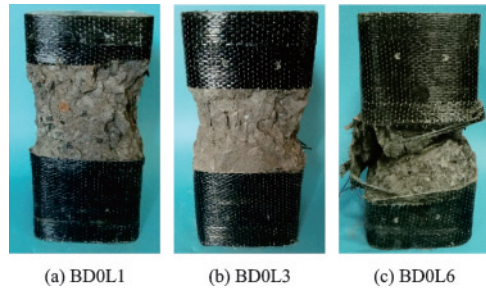


图5 BFRP约束完好试件破坏形态

Fig.5 Failure modes of the BFRP-confined intact specimens

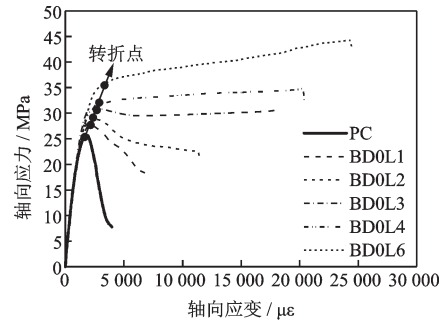


图6 BFRP约束完好试件应力—应变曲线

Fig.6 The stress-strain curves of the BFRP-confined intact specimens

的增多,试件的强度和变形能力逐渐提高,表明 FRP 提供的约束逐渐增强。相比于强度,约束试件变形能力提高的幅度更加明显,即 BD0L1、BD0L2、BD0L3、BD0L4 和 BD0L6 的 f_{cu}/f_{co}' 分别为 1.09、1.16、1.21 和 1.38,而 $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$ 达到了 4.42、6.51、9.98 和 13.37。伴随 FRP 层数的增加,转折点的应变和强度均有一定增大(图 6)。对于转折点后的应力—应变曲线走势,在不同的包裹层数下表现出不同的特征。对于 1、2 层约束,转折点过后应力—应变曲线存在下降段,属于弱约束;对于 3 层约束,转折点过后曲线有短暂的下降然后缓慢上升,极限点的强度和转折点的强度基本相等,可作为强弱约束的界限;4、6 层约束试件的曲线在转折点之后继续上升,属于强约束。对于强弱约束的界限,由表 2 可知,魏洋等^[12]给出的强弱约束界限和试验结果比较吻合。

试件最终破坏时的 BFRP 环向应变如图 7 所示,图中部分位置数值缺失是由于 BFRP 断裂或者应变片自身破坏。由图可知,截面各处的 BFRP 环向应变分布存在明显的差异,截面中间的应变明显大于角部的应变,但试验中最先出现断裂的却是角部区域,文献[11, 13]也发现了类似现象。原因为截面中间和转角处 FRP 处于不同的受力状态,截面

中间FRP近似处于轴向受拉状态,虽应变较大,但未达到轴向极限应变,故未发生断裂,而角部区域FRP处于环向受拉状态,虽应变较小,但由于应力集中而首先发生断裂,所以BFRP的有效断裂应变

取角部区域断裂应变的平均值,由表3可知,其值为材性试验测得的极限应变的0.51倍,即有效断裂应变系数为0.51。

表3 试件参数及试验结果
Table 3 Specimen parameters and test results

试件编号	B/mm	h/mm	R _c /mm	f _{cc} '/MPa	ε _{cc} /με	f _{cu} /MPa	ε _{cu} /με	ε _{lc} /με	f _{cc} '/f _{co} '	ε _{cc} /ε _{co}	f _{cu} /f _{co} '	ε _{cu} /ε _{co}
BD0L1	150	300	23	27.9	2 065	18.4	8 045	14 083	1.09	1.13	0.72	4.42
BD1L1	150	300	23	26.8	2 170	18.1	8 684	13 163	1.04	1.19	0.71	4.77
BD2L1	150	300	23	24.6	2 255	16.8	8 489	12 307	0.96	1.24	0.65	4.66
BD3L1	150	300	23	23.2	2 390	15.9	8 306	12 601	0.90	1.31	0.62	4.56
BD0L2	150	300	23	29.8	2 178	23.7	11 848	13 420	1.16	1.20	0.92	6.51
BD1L2	150	300	23	28.6	2 265	22.8	12 566	13 261	1.11	1.24	0.89	6.90
BD2L2	150	300	23	26.9	2 406	21.0	12 705	14 985	1.05	1.32	0.82	6.98
BD3L2	150	300	23	24.0	2 503	20.2	11 718	12 765	0.94	1.38	0.79	6.44
BD0L3	150	300	23	31.0	2 374	30.6	18 156	13 883	1.21	1.30	1.19	9.98
BD0L4	150	300	23	31.6	2 549	34.8	20 271	13 615	1.23	1.40	1.36	11.14
BD1L4	150	300	23	30.0	2 683	33.5	19 943	13 039	1.17	1.47	1.31	10.96
BD2L4	150	300	23	28.5	2 824	32.2	20 199	11 933	1.11	1.55	1.25	11.10
BD3L4	150	300	23	26.4	2 925	30.1	20 541	13 406	1.03	1.61	1.17	11.29
BD0L6	150	300	23	35.5	2 956	44.3	24 325	14 092	1.38	1.62	1.73	13.37
BD1L6	150	300	23	33.7	3 096	42.7	23 869	12 955	1.31	1.70	1.66	13.11
BD2L6	150	300	23	31.8	3 206	40.1	24 534	12 675	1.24	1.76	1.56	13.48
BD3L6	150	300	23	29.3	3 405	38.9	24 021	12 793	1.14	1.87	1.46	13.20

注: B代表BFRP; D代表损伤, D1、D2、D3分别为轻微损伤、中等损伤、严重损伤; L1、L2、L3、L4、L6分别为包裹1、2、3、4、6层数; b为截面边长; h为柱高; R_c为截面倒角半径; f_{cc}'和ε_{cc}分别为BFRP约束柱峰值点(应力—应变曲线转折点,如图6所示)的强度和应变; f_{cu}和ε_{cu}为约束柱极限点的强度和应变; ε_{lc}为实测BFRP的断裂应变

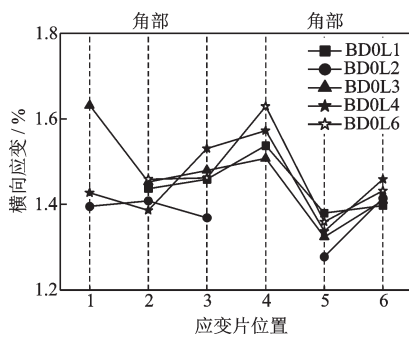


图7 BFRP约束完好试件环向应变分布

Fig.7 Hoop strain distribution of the BFRP-confined intact specimens

敬登虎等^[8]针对强弱约束情况,分别给出了FRP约束混凝土棱柱体极限点的强度和应变计算公式,并认为转折点和素混凝土峰值点相差不大,故直接取素混凝土的峰值强度和应变。L. Lam

等^[10]仅给出了FRP约束棱柱体强约束情况下极限强度的计算方法,即在FRP约束圆柱体强度模型的基础上考虑一个形状系数。王代玉^[11]在试验基础上给出了FRP约束钢筋混凝土方柱峰值点和极限点的强度和应变计算公式,考虑了强弱约束情况,并分别给出了应力—应变曲线计算模型。

本文借鉴王代玉^[11]模型,基于试验结果及收集的其它文献数据^[14-16],回归分析得到的峰值点和极限点的强度和应变模型分别为:

$$f'_{cc} = f'_{co}(1 + 0.55\lambda_f) \quad (1)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}(1 + 0.94\lambda_f) \quad (2)$$

$$\frac{f_{cu}}{f'_{co}} = 0.45 + 6.82 \left(\frac{f_1}{f'_{co}} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{co}} = 2 + 36.27 \left(\frac{f_1}{f'_{co}} \right)^{0.8} \quad (4)$$

式中, λ_i 为 FRP 含纤特征值; f_i 为侧向约束应力。

λ_i 和 f_i 可分别表示为:

$$\lambda_i = \frac{k_a \rho_f f_i}{f'_{co}} \quad (5)$$

$$f_i = k_a \frac{2E_f n t_f \epsilon_{fe}}{D} = 0.5k_a \rho_f E_f \epsilon_{fe} \quad (6)$$

式中, E_f 为 FRP 的弹性模量; f_i 为 FRP 的抗拉强度; ϵ_{fe} 为有效断裂应变, 取 $\epsilon_{fe} = 0.51\epsilon_{fu}$, ϵ_{fu} 为 FRP 材性试验测得的极限拉应变; D 为截面的等效圆直径, 取 $D = \sqrt{2}b$; ρ_f 为体积含纤率; k_a 为截面形状系数, 即有效约束面积和截面总面积之比:

$$k_a = 1 - \frac{2(b - 2R_c)^2}{3[b^2 - (4 - \pi)R_c^2]} \quad (7)$$

由图 6 可知, 强弱不同约束下的应力—应变曲线存在很大差别, 因此本文对于不同约束情况分别采用不同的应力—应变关系模型。

对于应力—应变曲线单调上升的强约束情况, 采用抛物线加直线段模型:

$$\begin{cases} \frac{\sigma}{f'_{cc}} = 2 \frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}} \right)^2 & \epsilon \leq \epsilon_{cc} \\ \sigma = f'_{cc} + \frac{f'_{cu} - f'_{cc}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{cc}} (\epsilon - \epsilon_{cc}) & \epsilon_{cc} < \epsilon \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (8)$$

对于峰值点后存在软化段的弱约束情况, 采用三线形式, 其中峰值点之前和强约束相同, 均为抛物线, 峰值点之后采用一段直线下降段加水平直线段, 具体表达式为:

$$\begin{cases} \frac{\sigma}{f'_{cc}} = 2 \frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}} \right)^2 & \epsilon \leq \epsilon_{cc} \\ \sigma = f'_{cc} + \frac{f'_{cu} - f'_{cc}}{\epsilon_{ct} - \epsilon_{cc}} (\epsilon - \epsilon_{cc}) & \epsilon_{cc} < \epsilon \leq \epsilon_{ct} \\ \sigma = f_{cu} & \epsilon_{ct} < \epsilon \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (9)$$

式中, ϵ_{ct} 为第二段和第三段转折点的应变, 由试验结果回归分析得到其表达式为:

$$\frac{\epsilon_{ct}}{\epsilon_{cc}} = 4.2 - 1.76 \frac{f'_{cu}}{f'_{cc}} \quad (10)$$

综上所述, 由式(1)~(10)可以完全确定 BFRP 约束完好混凝土棱柱体的应力—应变全曲线。

2.2 BFRP 约束预损伤棱柱体力学模型

BFRP 约束损伤试件的破坏过程及形态和无损伤试件基本相同, 不再赘述。BFRP 约束初始损伤试件的应力—应变曲线如图 8 所示。由图 8 及表 3 可知: 初始损伤对应力—应变曲线的影响不可忽

略, 特别是当损伤程度较大时, 峰值点和极限点的强度降低明显, 同时损伤对于峰值点对应的应变也有一定影响, 但是对于极限应变的影响很小; 初始损伤对 BFRP 约束试件的初始弹性模量影响较大, 且层数的增加并不能减小该影响。

由图 6、8 可知, BFRP 约束初始损伤、约束完好试件的应力—应变曲线形状相似, 故 BFRP 约束损伤混凝土棱柱体的强度和应变模型可通过引入损伤影响系数 α_d 和 β_d 对式(1)~(4)进行修正获得, 以考虑初始损伤程度对强度和应变的不利影响^[17], 修正后的形式如下:

$$f'_{cc,d} = \alpha_{d1} f'_{co} (1 + 0.55\lambda_i) \quad (11)$$

$$\epsilon_{cc,d} = \beta_{d1} \epsilon_{co} (1 + 0.94\lambda_i) \quad (12)$$

$$\frac{f'_{cu,d}}{f'_{co}} = \alpha_{d2} \left[0.45 + 6.82 \left(\frac{f_i}{f'_{co}} \right) \right] \quad (13)$$

$$\frac{\epsilon_{cu,d}}{\epsilon_{co}} = \beta_{d2} \left[2 + 36.27 \left(\frac{f_i}{f'_{co}} \right)^{0.8} \right] \quad (14)$$

式中, $f'_{cc,d}$ 和 $\epsilon_{cc,d}$, $f'_{cu,d}$ 和 $\epsilon_{cu,d}$ 分别为 BFRP 约束损伤试件峰值点、极限点的强度和应变。

α_d 和 β_d 是刻画混凝土初始损伤程度的指标, 本文采用《混凝土结构设计规范》^[18] 给出的方法计算混凝土单轴受压下的初始损伤:

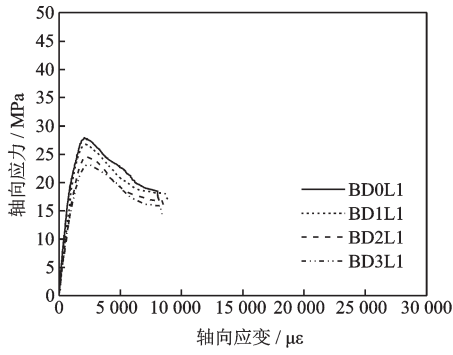
$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x - 1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (15)$$

其中,

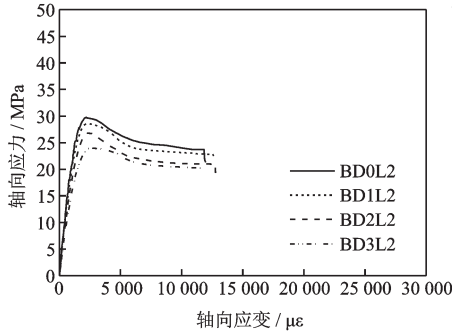
$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \epsilon_{c,r}}, n = \frac{E_c \epsilon_{c,r}}{E_c \epsilon_{c,r} - f_{c,r}}, x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{c,r}} \quad (16)$$

式中, d_c 为混凝土单轴受压损伤演化参数; α_c 为混凝土单轴受压应力—应变曲线下下降段参数; $f_{c,r}$ 为抗压强度代表值, 对于本次试验取 f'_{co} ; $\epsilon_{c,r}$ 为与 $f_{c,r}$ 对应的应变, 即 ϵ_{co} ; E_c 为素混凝土的弹性模量; ϵ 为预制初始损伤时达到的应变值。

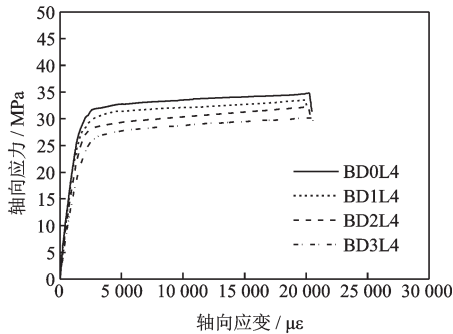
由图 8 和表 3 可知: 随着损伤程度的增加, 峰值强度和极限强度均逐渐减小, 而峰值点对应的应变却随着损伤程度的增大而增大, 即 α_d 和 β_d 与 d_c 存在一定的相关性; 极限点的应变随损伤程度的变化很小, 即 β_{d2} 可取为 1。 α_d 和 β_d 与 d_c 关系的拟合结果如图 9 所示, α_d 和 β_d 的表达式分别为:



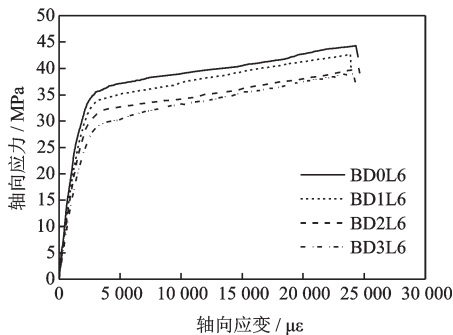
(a) 1层BFRP约束



(b) 2层BFRP约束



(c) 4层BFRP约束

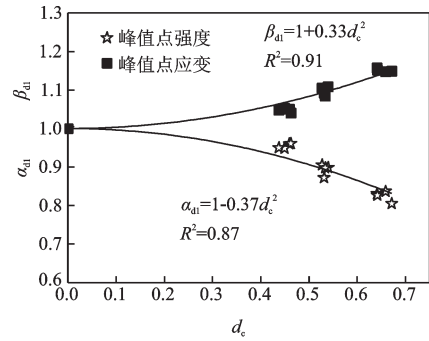


(d) 6层BFRP约束

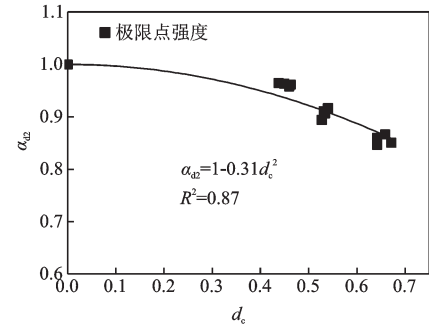
图8 初始损伤程度对BFRP约束损伤试件应力—应变曲线的影响

Fig.8 Effect of pre-damage levels on the stress—strain curves of the BFRP-confined pre-damaged specimens

$$\begin{cases} \alpha_{d1} = 1 - 0.37d_c^2 \\ \beta_{d1} = 1 + 0.33d_c^2 \end{cases} \quad (17)$$



(a) 峰值点



(b) 极限点

图9 d_c 与 α_d 和 β_d 拟合结果

Fig.9 Fitting results of d_c vs α_d and β_d

$$\begin{cases} \alpha_{d2} = 1 - 0.31d_c^2 \\ \beta_{d2} = 1 \end{cases} \quad (18)$$

综上,由式(11)~(18)可以确定BFRP约束损伤混凝土棱柱体的峰值点和极限点,BFRP约束损伤混凝土的应力—应变关系模型则可采用BFRP约束完好混凝土的形式,即式(8)、(9),只需代入考虑损伤的峰值点和极限点结果即可。

表4给出了BFRP约束损伤混凝土峰值点和极限点的强度和应变的试验值和预测值的比较结果,其中峰值点强度和应变的最大误差分别为8.2%和12.8%,极限点强度和应变的最大误差分别为12.4%和14.0%,由表4可知强度模型相对应应变模型较为准确,这是由应变本身的离散性较大造成的。

3 试验曲线和计算曲线的比较

图10给出了部分试件模型预测结果和试验结果的比较,由图可知,计算结果和试验结果总体上吻合良好。对于弱约束,峰值点之后存在的软化段文中采用斜直线代替,导致下降段的预测存在一定的误差,但整体应力—应变曲线的走势与试验数据吻合较好。

表 4 $f_{cc,d}'$ 和 $\varepsilon_{cc,d}$, $f_{cu,d}$ 和 $\varepsilon_{cu,d}$ 计算结果与试验结果的比较

Table 4 Comparison of $f_{cc,d}'$, $\varepsilon_{cc,d}$, $f_{cu,d}$ and $\varepsilon_{cu,d}$ obtained by calculation and tests

试件 编号	$f_{cc,d}'$ /MPa		相对误 差/%	$\varepsilon_{cc,d}/\mu\varepsilon$		相对误 差/%	$f_{cu,d}$ /MPa		相对误 差/%	$\varepsilon_{cu,d}/\mu\varepsilon$		相对误 差/%
	试验值	计算值		试验值	计算值		试验值	计算值		试验值	计算值	
BD1L1	26.8	25.6	4.5	2 170	2 200	1.4	18.1	16.7	7.7	8 684	8 263	4.8
BD2L1	24.3	24.8	2.1	2 255	2 254	0.1	16.8	16.3	3.0	8 489	8 263	2.7
BD3L1	23.2	23.3	0.4	2 390	2 351	1.6	15.9	15.5	2.5	8 306	8 263	0.5
BD1L2	28.6	27.4	4.2	2 265	2 459	8.6	22.8	22.6	0.9	12 566	11 689	7.0
BD2L2	27.0	26.6	1.5	2 406	2 519	4.7	21.0	22.0	4.8	12 705	11 689	8.0
BD3L2	24.0	25.0	4.2	2 503	2 628	5.0	20.2	21.0	4.0	11 718	11 689	0.2
BD1L4	30.0	31.1	3.7	2 683	2 974	10.8	33.5	34.5	3.0	19 943	17 655	11.5
BD2L4	28.4	30.1	6.0	2 824	3 047	7.9	32.2	33.6	4.3	20 199	17 655	12.6
BD3L4	26.4	28.3	7.2	2 925	3 179	8.7	30.1	31.9	6.0	20 541	17 655	14.0
BD1L6	33.7	34.8	3.3	3 096	3 491	12.8	42.7	46.3	8.4	23 869	23 024	3.5
BD2L6	31.8	33.7	6.0	3 206	3 576	11.5	40.1	45.1	12.4	24 534	23 024	6.2
BD3L6	29.3	31.7	8.2	3 405	3 730	9.5	38.9	42.9	10.3	24 021	23 024	4.2

注: 相对误差 = |计算值 - 试验值| / 试验值 × 100%

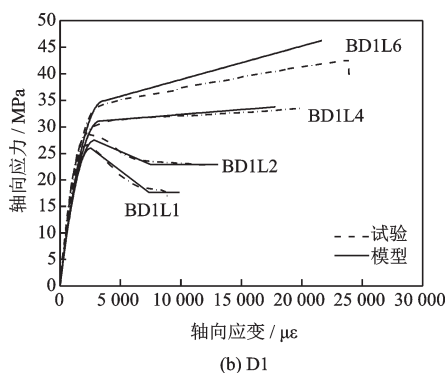
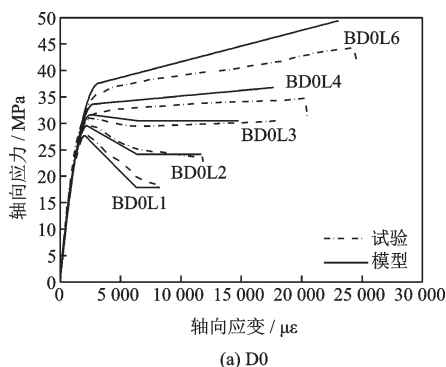


图 10 计算结果和试验结果的比较

Fig.10 Comparison between the calculation results and the test results

4 结 论

(1) BFRP 约束能使完好试件与初始损伤试件的强度和变形能力得到提高, 且随 BFRP 层数的增加, 试件强度和变形能力的提高幅度增大。

(2) BFRP 约束棱柱体试件根据 BFRP 层数的

不同, 其应力应变曲线存在两种完全不同的形式, 层数较少时为弱约束情况, 应力—应变曲线在峰值点之后存在软化段, 对于强约束, 其应力—应变曲线为单调上升的曲线。

(3) 初始损伤对 BFRP 约束混凝土棱柱体的强度有不利影响; 初始损伤对峰值点的应变有一定影响, 但对极限点的应变影响很小。强度和应变的损伤影响系数 α_d 、 β_d 与混凝土单轴受压损伤参数 d_c 有一定的相关性, 随着初始损伤程度的增大, 约束试件强度的提高幅度越小, 但是峰值强度和极限强度仍然高于素混凝土试件。

(4) BFRP 约束损伤混凝土与其约束完好混凝土的应力—应变曲线形状相似, 但初始损伤会使试件的初始弹性模量降低, 且 BFRP 层数的增加对初始弹性模量的改善作用很小。

(5) 本文提出的考虑初始损伤修正的强度模型和应变模型以及应力—应变曲线模型和试验结果吻合较好, 但是由于本试验考虑的 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] 滕锦光, 陈建飞, S·T·史密斯, 等. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
Teng J G, Chen J F, Smith S T, et al. FRP strengthened RC structures[M]. Beijing: China Architecture &

- Building Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 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):84-88.
- Ouyang L J, Ding B, Lu Zh D. Application of basalt fiber in building structure reinforcement[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2010(3):84-88. (in Chinese)
- [3] Liu H K, Liao W C, Liang T, et al. Compression strength of pre-damaged concrete cylinders reinforced by non-adhesive filament wound composites[J]. Composites Part A, 2004, 35(2):281-292.
- [4] 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.
- [5] 钟 健. CFRP约束受损混凝土圆柱的轴压力学性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
- Zhong J. Study on mechanical properties of damaged concrete cylinder confined by CFRP under axial compression [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [6] Ma G, Li H, Duan Z. Repair effects and acoustic emission technique-based fracture evaluation for predamaged concrete columns confined with fiber-reinforced polymers [J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(6):626-639.
- [7] Dalgic K D, Ispir M, Ilki A. Cyclic and monotonic compression behavior of CFRP-jacketed damaged non-circular concrete prisms [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(1):04015040.1-04015040.14.
- [8] 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, 2005, 38(12):32-37.
- Jing D H, Cao Sh Y. A model for calculating the axial stress-strain curve of square-section concrete column confined by FRP[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(12):32-37. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] Lam L, Teng J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete[J]. Construction & Building Materials, 2009, 17(6/7):471-489.
- [11] 王代玉. FRP加固非延性钢筋混凝土框架结构抗震性能试验与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- Wang D Y. Experimental and analytical investigation of seismic performance of nonductile RC frames retrofitted with FRP [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 魏 洋, 吴 刚, 吴智深, 等. FRP约束混凝土矩形柱有软化段时的应力-应变关系研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3):21-28.
- Wei Y, Wu G, Wu Zh Sh, et al. Study on the stress-strain relationship for insufficient FRP-confined rectangular concrete columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(3):21-28. (in Chinese)
- [13] 肖建庄, 龙海燕, 石雪飞, 等. GFRP对不同断面形状混凝土柱约束性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2003(4):21-26.
- Xiao J Zh, Long H Y, Shi X F, et al. Experimental study on confinement behavior of concrete columns with various section shapes by GFRP [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2003(4):21-26. (in Chinese)
- [14] 邓宗才, 付建斐. 玄武岩纤维布约束混凝土柱体的轴压性能试验研究[J]. 混凝土, 2013(7):37-40.
- Deng Z C, Fu J F. Experimental study on mechanical property of concrete columns confined by basalt fiber reinforced polymer under axial compression [J]. Concrete, 2013(7):37-40. (in Chinese)
- [15] 童谷生, 刘永胜. 玄武岩纤维布约束混凝土方柱的试验研究[J]. 混凝土, 2009(5):26-28.
- Tong G Sh, Liu Y Sh. Experimental study on the square section concrete column restricted by basalt fiber sheets [J]. Concrete, 2009(5):26-28. (in Chinese)
- [16] 李 涛, 黄镜淳, 周 安, 等. 玄武岩纤维复材布加固素混凝土方柱轴压性能研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(2):182-187.
- Li T, Huang J T, Zhou A, et al. Research on compressive behavior of BFRP reinforced concrete square columns [J]. Industrial Construction, 2018, 48(2):182-187. (in Chinese)
- [17] Ma G, Li H, Yan L, et al. Testing and analysis of basalt FRP-confined damaged concrete cylinders under axial compression loading [J]. Construction & Building Materials, 2018, 169:762-774.
- [18] 混凝土结构设计规范: GB50011—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Code for design of concrete structure: GB50011—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)