文章编号:1674-2974(2020)01-0036-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2020.01.005

BFRP约束损伤混凝土轴压试验与应力-应变关系

马高[1,2,3†],陈晓煌[1]
(1.湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
2.工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学),湖南 长沙 410082;
3.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BFRP(玄武岩纤维增强复合材料)层数、初始损伤对FRP约束混凝土轴压力学性能的影响,对14个素混凝土圆柱体进行轴压预加载,考虑3种初始损伤等级,随后采用3种BFRP层数包裹加固并再次进行轴压试验.试验发现BFRP约束损伤混凝土的极限强度、极限应变分别为未约束混凝土的1.18~1.81倍和5.94~10.55倍;但与BFRP约束完好混凝土比较,其极限强度和初始弹性模量分别下降了7%~15%和38%~55%,极限应变则无明显差别.损伤混凝土经BFRP约束后其抗压强度和变形能力仍得到了改善,但损伤会降低BFRP约束混凝土的强度和初始弹性模量,且降低程度随损伤的增大而更明显.直接套用现有的FRP约束完好混凝土力学模型对损伤结构进行加固设计,会偏于不安全.基于试验结果和收集的文献数据,提出了可以考虑初始损伤影响的BFRP约束混凝土的强度模型、初始弹性模量模型和应力-应变关系模型,模型预测结果与试验结果吻合良好.

关键词:FRP约束;初始损伤;强度模型;极限应变模型;应力-应变关系模型
中图分类号:TU375.3 **文献标志码**:A

Axial Compression Test and Stress-strain Relationship of BFRP-confined Predamaged Concrete

MA Gao[1,2,3†],CHEN Xiaohuang[1]
(1.College of Civil Engineering,Hunan University,Changsha 410082,China;
2.Hunan Provincial Key Laboratory on Damage Diagnosis for Engineering Structures (Hunan University),Changsha 410082,China;
3.Hunan Province Engineering Laboratory of Bridge Structure(Changsha University of Science & Technology),Changsha 410076,China)

Abstract:To investigate the effects of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) layers and predamage levels on the axial compression behavior of BFRP-confined concrete,fourteen plain concrete cylinders were pre-loaded under axial compression loading. Three predamaged levels were considered. The predamaged cylinders were wrapped with three different BFRP layers and subjected to axial compression loading again. It is found that the ultimate strength and ultimate strain of the BFRP-confined predamaged concrete were 1.18~1.81 times and 5.94~10.55 times of those of the

* 收稿日期:2019-01-05
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878268,51408211),National Natural Science Foundation of China(51878268,51408211);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项目(14KD02),Open Fund of Hunan Province Engineering Laboratory of Bridge Structure (Changsha University of Science & Technology)(14KD02);湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ3032),Natural Science Foundation of Hunan Province (2015JJ3032);长沙市工业科技特派员项目 (CSKJ2019-17),Industrial Sci-tech Special Commissioner Foundation of Changsha (CSKJ2019-17)
作者简介:马高(1985—),男,湖南邵阳人,湖南大学副教授
† 通讯联系人,E-mail:magao@hnu.edu.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

unconfined concrete, respectively. However, compared with the BFRP-confined undamaged concrete, the ultimate strength and initial elastic modulus of the BFRP-confined predamaged concrete were reduced by 7%~15% and 38%~55%, respectively, while the ultimate strain had little difference. The test results showed that the compression strength and deformation capacities of the damaged concrete exhibited good repair effect after BFRP confinement. However, the strength and initial elastic modulus of the BFRP-confined concrete tended to decrease with an increase of predamage level. Therefore, it will be unsafe to apply the existing mechanical model of FRP-confined undamaged concrete to the retrofit design of damaged structures. Based on the experimental results and collected literature data, a strength model, initial elastic modulus model and stress-strain relationship model of BFRP-confined concrete were proposed with considering the effect of predamage levels. The proposed models showed a good agreement with the experimental results.

Key words: FRP-confinement; predamage; strength model; ultimate strain model; stress-strain model

近年来，纤维增强复合材料（Fiber-Reinforced Polymer, FRP）因其高强、轻质、耐腐蚀、便于施工等优点，已成为工程加固领域的研究热点. 玄武岩纤维（Basalt Fiber），由取自大自然的玄武岩石在熔融状态下拉丝而成，是一种无污染绿色材料，力学性能优异，其制成的 BFRP 与碳纤维增强复合材料（Carbon-FRP, CFRP）相比价格更低廉. FRP 通过约束混凝土的横向膨胀，使混凝土处于三轴受压状态，可有效提高承载力和抗震性能. 目前，FRP 约束完好混凝土的力学性能已获得大量的研究[1-3]，但已有研究主要针对 FRP 加固完好构件和结构，考虑结构初始损伤的 FRP 加固试验和理论研究还很有限. Demers 等[4]、Ilki 等[5]、Liu 等[6]展开 FRP 加固损伤混凝土的轴压试验，发现损伤水平对 FRP 约束混凝土的轴压力学性能基本没有影响；Wang 等[7]发现 CFRP 约束损伤钢筋混凝土柱比完好柱在强度、极限应变上略有降低；Ma 等[8]探索了 3 种损伤水平的混凝土方形柱用 CFRP 和 BFRP 加固后的力学性能，3 种预损伤水平分别是：轴压应力-应变曲线上升段的 0.85、1.0 和下降段 0.9 倍峰值强度处，发现预设损伤只对初始刚度影响比较明显；Dalgic 等[9]发现即使预损伤较严重时，损伤柱经 CFRP 加固后的强度和变形性能仍得到有效改善，但预损伤会降低加固后的初始刚度和峰值强度.

综上可知，对于损伤混凝土经 FRP 加固后的轴压力学行为还缺少统一的认识和理论解释，而实际需加固的结构可能在自身荷载、地震、环境腐蚀或爆炸、撞击等偶然荷载的作用下已遭受一定的损伤或破坏. 特别是震后大量损伤混凝土结构需修复与相关研究较少之间的矛盾亟需解决. 因此研究 BFRP 约束损伤混凝土的轴压力学性能具有重要的理论意义和工程应用价值.

1　试验概况

1.1　方案设计

本文设计 17 个尺寸为 150 mm×300 mm 的素混凝土圆柱体试件，分为 3 个未约束和 14 个 BFRP 约束试件. BFRP 包裹层数为 2 层、4 层、6 层，分别命名为 L2、L4、L6；考虑不同的 BFRP 层数，可建立较宽约束力范围下的应力-应变关系模型. 《建筑抗震试验规程》[10] 对混凝土构件/结构的破坏荷载定义为荷载下降至最大荷载的 85%时的相应荷载，而对混凝土材料层面的损伤未做说明. 鉴于实际混凝土结构经历地震损伤后，柱端混凝土会开裂甚至剥落，表明混凝土受压已进入下降段. 同时本文在对 3 个未约束圆柱体进行轴压时发现即使受压达到下降段 $0.85f'_{co}$，试件表面的裂缝仍不明显，在达到 $0.80f'_{co}$ 时，裂缝才较明显. 因此试验考虑 4 种损伤等级，分别为完好、预加载至应力-应变曲线 f'_{co} 及下降段 $0.9f'_{co}$、$0.8f'_{co}$ 处再卸载至应力为 0（如图 1），分别定义为完好、中等、较严重和严重损伤，命名为 D0、D1、D2、D3，该损伤等级仅限于描述混凝土的破坏程度，不同于建筑结构的地震破坏等级划分. 另外将混凝土预损伤至下降段，能从材料层面研究较大损伤范围（轻微到严重）下混凝土经 FRP 加固后的力学性能，可涵盖实际待加固损伤柱中混凝土的大部分损伤情况，研究结论更具工程指导价值. 因课题组内已对

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

D1 工况进行试验,本次试验不再重复,但理论分析时将利用该数据[11]. 每种工况设置两个相同试件,详见表 2,字母 B 代表 BFRP 约束.

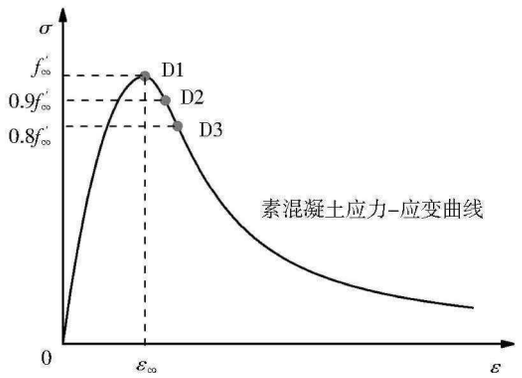


图 1 损伤等级示意图

Fig.1 Schematic diagram of predamage levels

为对损伤程度进行合理的定义并定量描述混凝土的初始损伤水平,本文参考《混凝土结构设计规范》[12]引入损伤演化参数 $d_{c,c}$,可由下列公式确定,各试件的 $d_{c,c}$ 计算见表 2,混凝土初始损伤越严重,$d_{c,c}$ 值越大.

$$d_{c,c}=\begin{cases}1-\dfrac{\rho_c n}{n-1+x^n}, & x\leqslant 1;\\ 1-\dfrac{\rho_c}{\alpha_c(x-1)^2+x}, & x>1.\end{cases} \tag{1}$$

$$\rho_c=\frac{f_{c,r}}{E_{co}\varepsilon_{c,r}}. \tag{2}$$

$$n=\frac{E_{co}\varepsilon_{c,r}}{E_c\varepsilon_{c,r}-f_{c,r}}. \tag{3}$$

$$x=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}}. \tag{4}$$

式中:$f_{c,r}$ 为抗压强度代表值,对应每个预损伤试件的峰值强度 $f_{co}^{'}$;$\varepsilon_{c,r}$ 是与 $f_{c,r}$ 对应的应变,即对应每个预损伤试件的峰值应变 ε_{co};E_{co} 是素混凝土的弹性模量;ε 为预损伤卸载时的应变值;α_c 是下降段参数值,可由线性插值法求得.

1.2 材料力学性能

混凝土粗骨料最大直径 15 mm,水、水泥、砂和粗骨料配合比为 0.51∶1∶1.39∶2.47. 混凝土立方体 28 d 抗压强度为 41.3 MPa,正式试验时测得标准圆柱体抗压强度 $f_{co}^{'}$ = 33.0 MPa,对应峰值应变 ε_{co} = 1 804με,初始弹性模量 E_{co} = 33 300 MPa.

玄武岩单向纤维布由四川航天拓鑫玄武岩实业有限公司生产,浸渍胶采用湖南固特邦的 JN-C3P 环氧树脂胶,实测 BFRP 片材性能见表 1.

表 1 BFRP 力学性能

Tab.1 Mechanical properties of BFRP

厚度 t_{frp}/mm	抗拉强度 f_{frp}/MPa	弹性模量 E_{frp}/GPa	极限应变 ε_{uf}/%
0.138	1 549	60.3	2.6

1.3 试验过程及测量装置

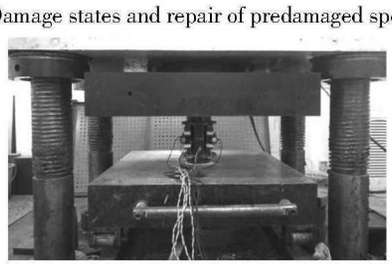
加载采用 10 000 kN 电液伺服刚性试验机,预加载和正式加载(首先采用力控制,速率为 1.6 kN/s,达到 90 kN 后,采用位移控制,速率为 0.4 mm/min). 试件的损伤状况如图 2(a)(b)所示,D2 试件表面有较为明显的细裂纹,最大宽度为 0.55 mm;D3 试件表面裂缝增多,裂缝长度和宽度明显增大,裂缝最大宽度达到了 0.95 mm,出现表层混凝土剥落和局部破碎现象. 预加载试件卸载后,进行表面清理,并用早强砂浆修补缺损部位,修复后如图 2(c)所示;采用湿黏法缠绕 BFRP 布,试件两端另包 3 层 30 mm 宽 BFRP 布,防止加载时端部破坏,如图 2(d)所示. 轴向应变通过布置在试件中部的 4 个位移计测量;FRP 环向应变通过沿环向均匀贴在试件中部的 4 个应变片测量;加载装置与测量方案如图 3 所示.



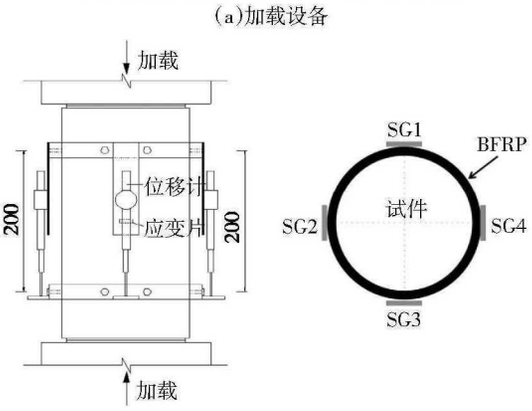
(a)D2 (b)D3 (c)砂浆修复 (d)包裹 BFRP

图 2 损伤试件的状态及修复加固

Fig.2 Damage states and repair of predamaged specimens



(a)加载设备



(b)测量装置 (c)应变片布置

图 3 加载设备及测量装置(单位:mm)

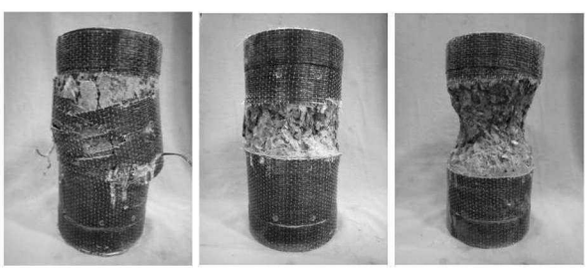
Fig.3 Loading equipment and measurement devices (unit:mm)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 试验结果

2.1 试件破坏现象

BFRP 约束损伤和完好试件的破坏形态类似,均是由 BFRP 突然断裂所致,为脆性破坏模式,如图 4(a) 所示. BFRP 约束损伤与完好混凝土内核压碎剥落的程度无明显差别,图 4(b)(c)为 2 层、6 层 BFRP 约束时移除压碎混凝土后的内核, 可见随着 BFRP 层数增多,混凝土破坏越严重.



(a)BFRP 断裂　　(b)2 层约束　　(c)6 层约束

图 4　BFRP 约束混凝土破坏模式

Fig.4　Failure modes of BFRP-confined concrete

2.2 FRP 约束损伤混凝土力学性能分析

部分轴向应力-应变曲线见图 5,预设损伤并不改变应力-应变曲线的形状, 表明 FRP 约束损伤和完好混凝土的受力机理类似, 同工况下两个试件平均后的力学性能见表 2.

2.2.1　轴压力学性能分析

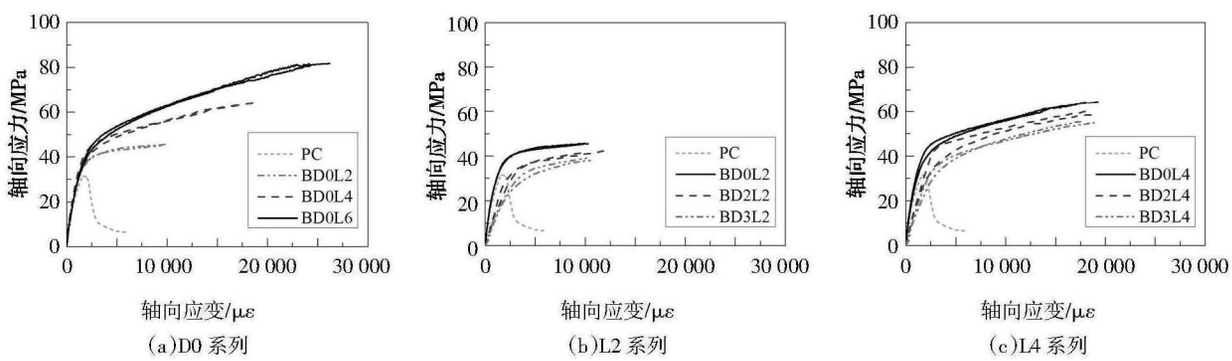
表 2 和图 5 表明 BFRP 约束完好与损伤混凝土的强度和变形能力均得到显著提高, 且随 BFRP 层数增加, 其改善效果更明显. 即使在 D3 损伤时,2 层、4 层 BFRP 约束试件的强度提高系数 f'_{cc}/f'_{co} 为 1.18、1.81, 极限应变提高系数 $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$ 为 6.47、10.23, BFRP 对损伤混凝土仍具有良好的修复效果. 采用 2 层 BFRP 约束时,约束系数 f_l/f'_{co} 为 0.10,各损伤等级下应力-应变曲线均为强化型, 并未发现软化段. 因此,在实际损伤工程加固中,为保证混凝土恢复甚至超过原有水平,需使约束系数大于 0.10. 对于具体工程的加固, 需依据其所要达到的性能目标经计算确定 FRP 加固用量.

表 2　BFRP 约束试件轴压力学性能参数

Tab.2　Mechanical properties parameters of the BFRP-confined specimens under axial compression loading

试件	BFRP 层数	f_l/MPa	f_l/f'_{co}	损伤等级	$d_{c,c}$	α_d	f'_{cc}/MPa	$\varepsilon_{cc}/\mu\varepsilon$	f'_{cc}/f'_{co}	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{sf}/\mu\varepsilon$	$\varepsilon_{sf}/\varepsilon_{tf}$	E_c/MPa	E_c/E_{co}
BD0L2	2	3.3	0.10	D0	0	1	45.6	10 169	1.38	5.64	14 473	0.56	33 331	1.00
BD0L4	4	6.6	0.20	D0	0	1	64.4	18 608	1.95	10.31	14 407	0.56	33 378	1.00
BD0L6	6	9.9	0.30	D0	0	1	81.2	25 193	2.46	13.97	15 090	0.58	33 362	1.00
BD2L2	2	3.3	0.10	D2	0.53	0.92	42.2	11 401	1.28	6.32	14 978	0.58	19 101	0.57
BD2L4	4	6.6	0.20	D2	0.51	0.93	59.9	19 031	1.81	10.55	15 361	0.60	20 661	0.62
BD3L2	2	3.3	0.10	D3	0.65	0.85	38.9	10 710	1.18	5.94	15 398	0.60	15 012	0.45
BD3L4	4	6.6	0.20	D3	0.64	0.86	55.5	18 506	1.68	10.26	15 517	0.60	15 351	0.46

注:E_c 为 FRP 约束混凝土应力-应变曲线的初始弹性模量;α_d 为强度折减系数,计算过程见公式(15)和(19).



(a)D0 系列　　(b)L2 系列　　(c)L4 系列

图 5　应力-应变曲线

Fig.5　Stress-strain curves

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

值得注意的是,2 层 BFRP 约束时,D0、D2、D3 试件的强度提高系数和极限应变提高系数分别为 1.38、1.28、1.18 和 5.64、6.32、5.94;4 层约束时则分别为 1.95、1.81、1.68 和 10.31、10.55、10.26. 可见损伤等级的加重使 FRP 约束混凝土的极限强度明显降低,但对极限应变几乎没有影响. 此外,由图 5(b)(c)和表 2,发现 BFRP 约束损伤混凝土的初始弹性模量为素混凝土初始弹性模量的 0.45~0.62 倍,明显低于素混凝土试件,表明增加 FRP 层数并不能修复轴向刚度. 原因是在预损伤时混凝土产生了宏观裂缝,再加载时其弹性模量会明显退化.

因此, 损伤等级对 BFRP 约束混凝土的力学性能有明显的影响,若直接将现有的 FRP 约束完好混凝土力学模型用于损伤结构的加固设计, 会偏于不安全. 建立可考虑初始损伤不利影响的 FRP 约束混凝土本构模型具有重要的价值.

2.2.2 BFRP 有效断裂应变

由表 2 可知,各试件的 FRP 环向断裂应变相差不大,表明 FRP 层数和损伤等级对 FRP 断裂应变影响很小. 另外试件破坏时 BFRP 的平均断裂应变 ε_{ef} 远小于拉伸试验测得的极限拉应变 ε_{uf},$\varepsilon_{ef}/\varepsilon_{uf}$ 仅为 0.58,故本文有效断裂应变系数取 0.58.

3 完好应力–应变关系模型

因初始损伤对极限强度、初始弹性模量和应力–应变模型中的 f_0 均有不利影响, 并随着损伤等级的加重而越明显. 本文先提出相应的完好模型,并在此基础上引入折减系数以考虑损伤的不利影响.

3.1 强度模型

对 FRP 约束混凝土,其强度模型一般表达式为:

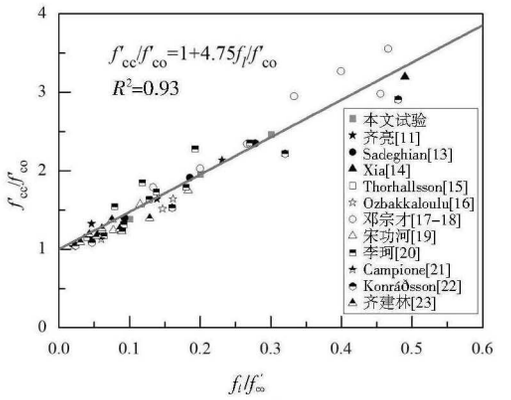
$$\frac{f_{cc}^{'}}{f_{co}^{'}} = 1 + k_1\left(\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right)^m . \tag{5}$$

式中:k_1 为约束有效性系数;m 为常数. 为提出较为通用的强度模型, 本文收集大量 BFRP 约束素混凝土圆柱体的试验数据,经拟合得到 m=0.96,考虑 m=1.0 时模型为线性函数,为方便使用,因而取 m=1.0. 拟合结果如图 6(a)所示,得到本文建议的 BFRP 约束混凝土的强度模型如式(6),由图 6(b)可知模型精度良好.

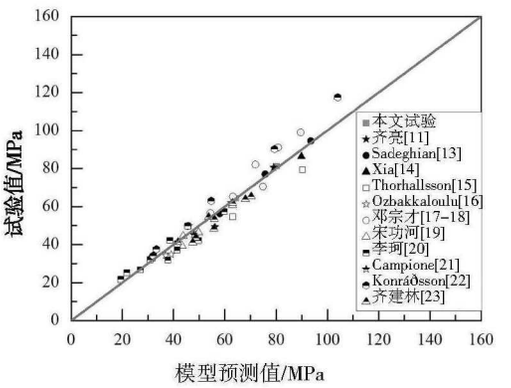
$$\frac{f_{cc}^{'}}{f_{co}^{'}} = 1 + 4.75\frac{f_l}{f_{co}^{'}}. \tag{6}$$

3.2 极限应变模型

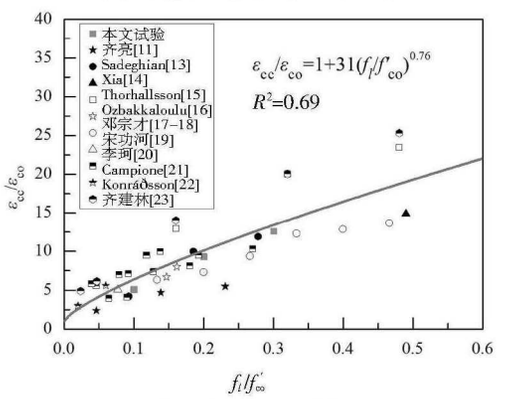
滕锦光等[1]发现 FRP 约束混凝土的极限应变不



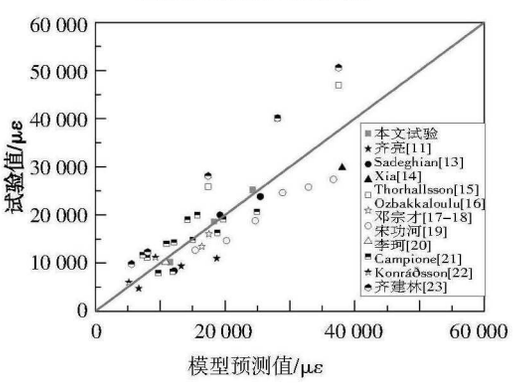
(a)强度模型拟合结果



(b)强度模型预测值与试验值比较



(c)极限应变模型拟合结果



(d)极限应变模型预测值与试验值比较

图 6 强度模型与极限应变模型拟合结果

Fig.6 Fitting results of the strength model and ultimate strain model

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

仅依赖于侧向约束力,还与 FRP 种类即 FRP 断裂应变有关. CFRP 的断裂应变在 1.5%左右,而 BFRP 能达到 2.5%以上，因此需提出适合于 BFRP 约束混凝土的极限应变模型,一般形式为:

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + k_2\left(\frac{f_l}{f'_{co}}\right)^p. \tag{7}$$

式中:k_2 为应变增强系数;p 为常数. 结合搜集的数据,参考滕锦光等[1]拟合极限应变模型时的方法,未约束混凝土峰值应变 ε_{co} 统一取 0.002. 图 6(c)表明极限应变与约束比大致呈幂函数关系，且相对于强度模型,应变模型的离散性较大. 该现象与 CFRP 及 GFRP 约束混凝土的极限应变模型类似[1].本文建议的 BFRP 约束混凝土的极限应变模型为:

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 31\left(\frac{f_l}{f'_{co}}\right)^{0.76}. \tag{8}$$

由图 6(d)可知,BFRP 约束混凝土极限应变的预测值与试验值有一定误差，但大部分数据的相对误差均在 30%以内.

3.3 应力-应变关系模型

3.3.1 选用应力-应变关系表达式

部分试验结果与已有模型的比较如图 7（a)所示,Mander 模型[24]在中后期高估了 FRP 的约束作用,偏于不安全,但在 FRP 层数较少时,FRP 对后期承载力提升不明显,Mander 模型依旧有一定的优势,但层数较多时误差较大;较为通用的 Lam and Teng 模型[25]在中后期偏差也较为明显;Samaan 模型[26]则较为接近且形状一致. 因此，本文基于 Samaan 模型进行改进,提出适合 BFRP 约束混凝土的应力-应变关系模型.

原 Samaan 模型参数定义如图 7(b)所示,表达式如下,其模型没有分段,使用较方便.

$$\sigma = \frac{(E_{co} - E_2)\varepsilon}{\left[1+\left(\frac{(E_{co} - E_2)\varepsilon}{f_0}\right)^n\right]^{1/n}} + E_2\varepsilon, \tag{9}$$

$$E_2 = 245.61 f'^{0.2}_{co} + 1.345\,6\frac{E_{frp}t_{frp}}{D}, \tag{10}$$

$$f_0 = 0.872 f'_{co} + 0.371 f_l + 6.258. \tag{11}$$

式中:n 为曲线形状控制系数,一般取 1.5[26].

由图 7(a)可知,原 Samaan 模型中的 f_0 较试验值偏低,导致应力-应变曲线在后期的应力预测值偏低. 本文提出新的 f_0 计算公式,然后采用更为简洁的表达式计算 E_2.

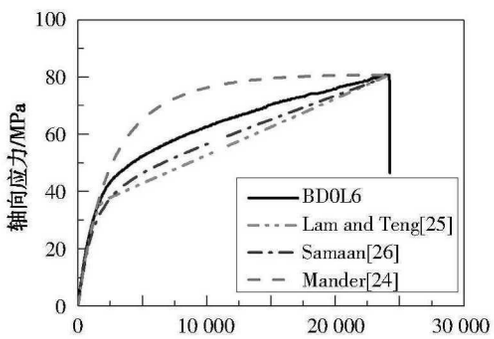
3.3.2 本文 f_0 计算表达式

f_0 为曲线上升段起点切线在应力轴上的截距. 试验结果表明 f_0 与抗压强度 f'_{co} 有直接关系，同时侧向约束力 f_l 对 f_0 也有一定的贡献，因此 f_0 采用式(12)形式.

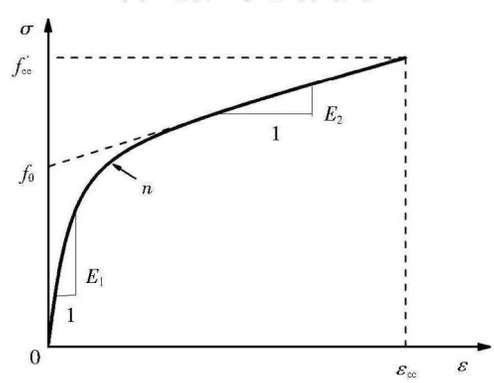
$$\frac{f_0}{f'_{co}} = 1 + k_3\left(\frac{f_l}{f'_{co}}\right)^q. \tag{12}$$

式中:k_3、q 为拟合系数. 拟合结果如图 7(c)所示,得到本文建议的 f_0 表达式为:

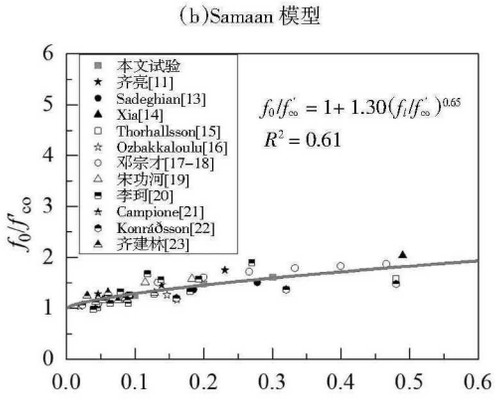
$$\frac{f_0}{f'_{co}} = 1 + 1.30\left(\frac{f_l}{f'_{co}}\right)^{0.65}. \tag{13}$$



(a)已有模型与试验曲线比较



(b)Samaan 模型



(c)模型拟合 f_0

图 7　应力-应变模型

Fig.7　Stress-strain model

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

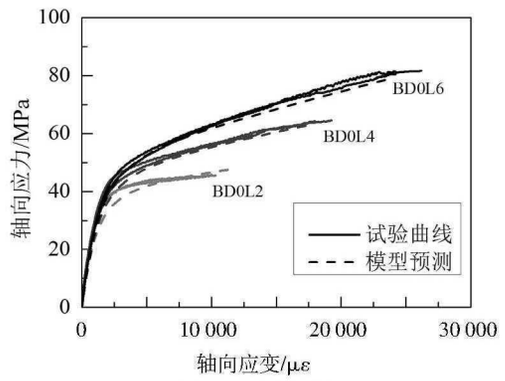
3.3.3 确定 E_2

E_2 为后期近似直线段的斜率,与 FRP 层数及其力学性能有关,但根据 E_2 的定义,可由下式计算.

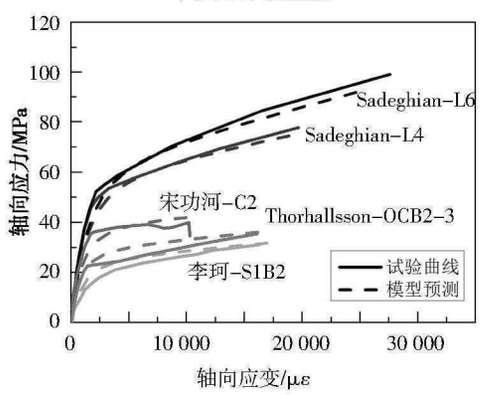
$$E_2=\frac{f_{cc}^{'}-f_0}{\varepsilon_{cc}}. \tag{14}$$

3.3.4 本文模型预测曲线与试验曲线对比

图 8 所示为本文模型预测曲线与试验曲线对比,可见本文提出的 BFRP 约束完好混凝土应力-应变关系模型具有良好的精度.



(a)本文试验数据



(b)参考文献试验数据

图 8 完好模型预测曲线与试验曲线比较

Fig.8 Comparison between the intact model and the test results

4 损伤应力-应变关系模型

4.1 损伤应力-应变关系模型的形式

在 BFRP 约束完好混凝土力学模型的基础上引入折减系数 α_d、γ_d 和 ζ_d,修正后的力学模型如下:

$$\frac{f_{cc,d}^{'}}{f_{co}^{'}}=\alpha_d\left(1+4.75\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right), \tag{15}$$

$$\frac{f_{0,d}}{f_{co}^{'}}=\gamma_d\left[1+1.30\left(\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right)^{0.65}\right], \tag{16}$$

$$E_{co,d}=\zeta_d E_{co}. \tag{17}$$

式中:$\alpha_d=\frac{f_{cc,d}^{'}}{f_{cc}^{'}}$,$\gamma_d=\frac{f_{0,d}}{f_0}$,$\zeta_d=\frac{E_{co,d}}{E_{co}}$.

初始损伤并不改变 BFRP 约束混凝土的应力-应变曲线的形状,应力-应变关系表达式为:

$$\sigma=\frac{(E_{co,d}-E_{2,d})\varepsilon}{\left[1+\left(\frac{(E_{co,d}-E_{2,d})\varepsilon}{f_{0,d}}\right)^{n}\right]^{1/n}}+E_{2,d}\varepsilon. \tag{18}$$

式中:$E_{2,d}=\frac{f_{cc,d}^{'}-f_{0,d}}{\varepsilon_{cc,d}}$.

4.2 损伤演化参数与折减系数的关系

由试验结果分别求出强度、初始弹性模量和 f_0 的损伤折减系数. 强度折减系数 α_d 和损伤演化参数 $d_{c,c}$ 的值见表 2,可见随着损伤等级加重,损伤演化参数 $d_{c,c}$ 也在不断增大,折减系数 α_d、γ_d 和 ζ_d 逐渐减小. 为获得损伤演化参数与折减系数之间的关系, 结合文献[11],拟合结果如图 9,得到以下关系.

$$\alpha_d=1-0.34d_{c,c}^2, \tag{19}$$

$$\gamma_d=1-0.32d_{c,c}^2, \tag{20}$$

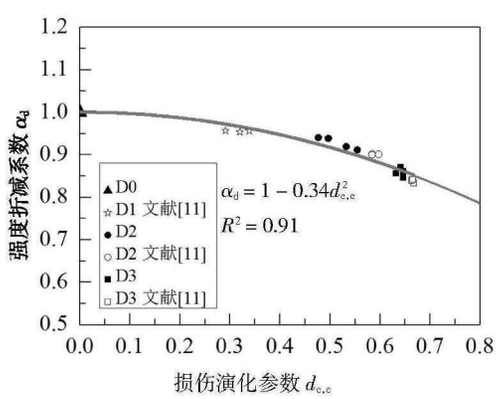
$$\zeta_d=1-0.74d_{c,c}^2-0.31d_{c,c}. \tag{21}$$

将式(19)~(21)分别代入式(15)~(17),最终得到 BFRP 约束损伤混凝土的力学模型为:

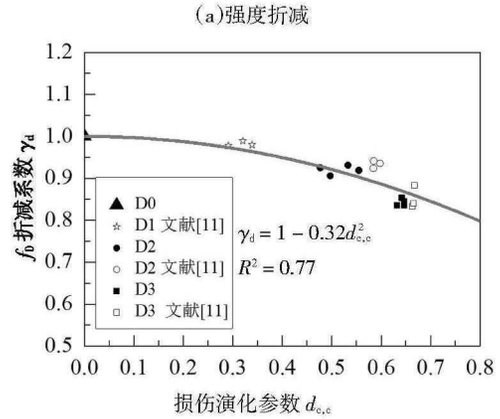
$$\frac{f_{cc,d}^{'}}{f_{co}^{'}}=(1-0.34d_{c,c}^2)\left(1+4.75\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right), \tag{22}$$

$$\frac{f_{0,d}}{f_{co}^{'}}=(1-0.32d_{c,c}^2)\left[1+1.30\left(\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right)^{0.65}\right], \tag{23}$$

$$E_{co,d}=(1-0.74d_{c,c}^2-0.31d_{c,c})E_{co}. \tag{24}$$

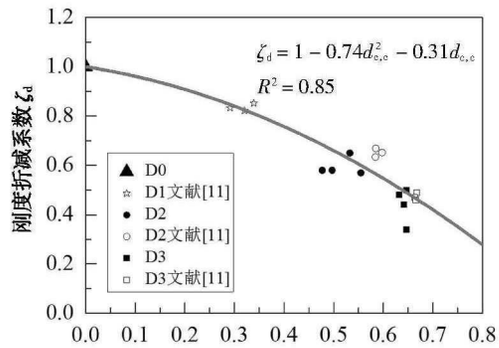


(a)强度折减



(b)f_0 折减

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



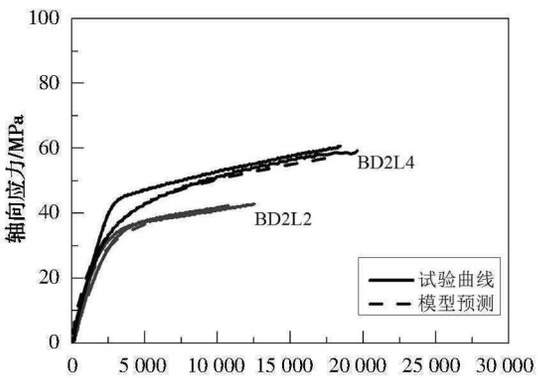
(c)刚度折减

图 9　损伤演化参数与折减系数拟合

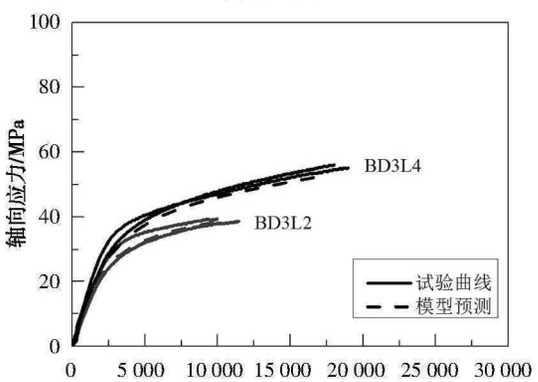
Fig.9　Fitting results of reduction coefficients vs damage evolution parameters

4.3　损伤模型验证

图 10 所示为本文损伤模型预测曲线与试验曲线对比，可见本文提出的 BFRP 约束损伤混凝土应力-应变关系模型具有良好的精度.



(a)D2 系列



(b)D3 系列

图 10　损伤模型预测曲线与试验曲线比较

Fig.10　Comparison between the damage model and the test results

5　结　论

1)BFRP 约束损伤混凝土仍能提高其强度与变形能力，在 D3 损伤时,2 层、4 层 BFRP 约束试件的强度提高系数 f_{cc}'/f_{co}' 为 1.18、1.68,极限应变提高系数 $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$ 为 5.94、10.26.

2)损伤等级的加重使 BFRP 约束混凝土的极限强度明显降低,但对轴向变形能力几乎没有影响,另外增加 BFRP 层数并不能修复损伤混凝土的弹性模量，损伤等级对 BFRP 约束混凝土的力学性能有明显的不利影响.

3)基于本文试验并结合大量文献数据,建立了 BFRP 约束完好及损伤混凝土的强度模型、极限应变模型、f_0 表达式及应力-应变关系模型，模型预测值与试验值吻合良好,具有较好的精度.

参考文献

[1]　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,2005:145—185.
TENG J G,CHEN J F,LIN L,*et al*. FRP strengthened RC structures [M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2005:145—185. (In Chinese)

[2]　单波,蔡静,肖岩,等. 大尺寸 CFRP 约束混凝土方柱的轴心抗压试验研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版),2016,43(3):75—82.
SHAN B,CAI J,XIAO Y,*et al*. Experimental research on large-scale square columns confined with wrapped CFRP under axial compressive load [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2016,43(3):75—82. (In Chinese)

[3]　周芬,冷举良,杜运兴. 基于纤维模型的 FRP 约束混凝土圆柱本构模型研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(5):46—52.
ZHOU F,LENG J L,DU Y X. Research on the constitutive models of FRP confined concrete cylinder based on fiber models [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2015,42(5):46—52. (In Chinese)

[4]　DEMERS M,NEALE K W. Confinement of reinforced concrete columns with fibre-reinforced composite sheets—an experimental study [J]. Canadian Journal of Civil Engineering,1999,26(2):226—241.

[5]　ILKI A,PEKER O,KARAMUK E,*et al*. FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2008,20(2):169—188.

[6]　LIU H K,LIAO W C,TSENG L,*et al*. Compression strength of pre-damaged concrete cylinders reinforced by non-adhesive filament

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

wound composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004, 35(2): 281—292.

[7] WANG Z, WANG D, SMITH S T, *et al*. CFRP-confined square RC columns. I: experimental investigation [J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 16(2): 150—160.

[8] MA G, LI H, WANG J. Experimental study of the seismic behavior of an earthquake -damaged reinforced concrete frame structure retrofitted with basalt fiber-reinforced polymer [J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(6): 04013002.

[9] 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, 2015, 20 (1): 04015040.

[10] JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 14—15.
JGJ/T 101—2015 Specification for seismic test of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 14—15. (In Chinese)

[11] 齐亮. FRP 约束损伤混凝土轴压力学性能及损伤评价研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2017: 18—49.
QI L. Investigation of compressive behavior and damage assessment of predamaged concrete confined with fiber-reinforced polymers [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2017: 18—49. (In Chinese)

[12] GB 50011—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社, 2010:210—212.
GB 50011—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 210—212. (In Chinese)

[13] SADEGHIAN P, FILLMORE B. Strain distribution of basalt FRP-wrapped concrete cylinders [J]. Case Studies in Construction Materials, 2018, e00171.

[14] XIA Y, XIAN G, WANG Z, *et al*. Static and cyclic compressive properties of self-compacting concrete-filled flax fiber-reinforced polymer tubes [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20 (6): 04016046.

[15] THORHALLSSON E, KUBENS S, RHEOCENTER I C I, *et al*. Concrete cylinders confined with basalt fibre reinforced polymer [J]. Nordic Concrete Research, 2011, 43(1): 457—461.

[16] OZBAKKALOULU T, XIE T. Geopolymer concrete -filled FRP tubes: behavior of circular and square columns under axial compression [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 96: 215—230.

[17] 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)

[18] 邓宗才, 阚德新, 翟胭脂. HFRP 布约束混凝土圆柱体轴压力学性能试验[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(2): 197—205.
DENG Z C, KAN D X, ZHAI Y Z. Experimental study on mechanical property of concrete circular columns confined by HFRP under axial compression [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(2): 197—205. (In Chinese)

[19] 宋功河, 张海昆. BFRP 约束素混凝土圆柱强度及尺寸效应的试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(4): 3—5.
SONG G H, ZHANG H K. Experimental research on strength and size effection of circular concrete columns reinforced by BFRP [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(4): 3—5. (In Chinese)

[20] 李珂. 玄武岩纤维布对轴压混凝土短柱的加固性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学土木工程与建筑学院, 2015: 14—35.
LI K. Strengthening performance research on the BFRP reinforced concrete columns with axial compression [D]. Mianyang: School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, 2015: 14—35. (In Chinese)

[21] CAMPIONE G, LA MENDOLA L, MONACO A, *et al*. Behavior in compression of concrete cylinders externally wrapped with basalt fibers [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 69: 576—586.

[22] KONRÁÖSSON A. Experimental research on BFRP confined concrete columns [D]. eykjavík, Iceland: School of Science and Engineering, eykjavík University, 2011: 24—51.

[23] 齐建林. 玄武岩纤维布约束混凝土圆柱轴心抗压性能试验研究[D].广州: 广东工业大学土木与交通工程学院, 2011: 24—49.
QI J L. Experimental study on the axially compressed circular concrete column confined by basalt fiber reinforced plastic sheet [D]. Guangzhou: School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, 2011: 24—49. (In Chinese)

[24] MANDER J B, PRIESTLY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804—1826.

[25] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. Construction and Building Materials, 2003, 17: 471—489.

[26] SAMAAN M, MIRMIRAN A, SHAHAWY M. Model of concrete confined by fiber composites [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(9): 1025—1031.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net