

引用格式 贺正伟,陈昱翰,古金本,等. 玻璃纤维增强复合材料管约束生物炭混凝土柱轴压性能研究[J]. 工业建筑,2024,54(6):149-159.
HE Z W, CHEN Y H, GU J B, et al. Research on Mechanical Properties of GFRP Tube Confined Biochar Concrete Under Axial Compression[J]. Industrial Construction,2024,54(6):149-159(in Chinese). DOI:10.3724/j.gjzG24032002

玻璃纤维增强复合材料管约束生物炭 混凝土柱轴压性能研究*

贺正伟¹ 陈昱翰³ 古金本^{2,3} 陶毅^{3,4} 窦雅芬³

(1. 中交二公局第四工程有限公司, 河南洛阳 471013; 2. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市工程结构安全重点实验室, 上海 200032; 3. 西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055; 4. 绿色建筑全国重点实验室, 西安 710055)

摘要 生物炭可作为一种轻骨料,部分掺入混凝土中可有效提供内固化及填充效应,成为一种潜在的碳捕捉和封存技术,但由于生物炭高孔隙率的微观结构,导致生物炭混凝土存在强度低、耐腐蚀性差及稳定性差等问题。本研究提出采用玻璃纤维增强复合材料(GFRP)管约束生物炭混凝土,开展GFRP管约束生物炭混凝土的轴压性能试验研究,设计参数主要包括:GFRP管的厚度(层数)、生物炭掺量及生物炭吸水率,着重分析各试件的轴向应力-应变曲线、环向应变-轴向应变曲线、屈服应力、极限应变及环向断裂应变等指标。研究结果表明:在相同生物炭掺量及吸水率的前提下,GFRP管约束生物炭混凝土试件的极限抗压强度相对于未约束试件可提升490.4%~563.3%,约束试件的极限应变也大幅提升,且约束试件屈服应力、应变远远大于未约束试件的屈服应力、应变,说明GFRP管的约束有效提高了生物炭混凝土的强度及变形能力;随着生物炭掺量的增加,约束试件的屈服应力降低,但轴向极限应变增大;而生物炭吸水率的增加则导致约束试件的屈服荷载提高,但极限应变减小;GFRP管的层数增加,使得GFRP管约束生物炭混凝土的二次刚度提升,其环向应变-轴向应变曲线弹性段和二次刚度段无明显过渡点,说明GFRP管与生物炭混凝土协同工作性能良好。

关键词 生物炭混凝土;纤维增强复合材料;轴压性能;极限应变;屈服应力

Research on Mechanical Properties of GFRP Tube Confined Biochar Concrete Under Axial Compression

HE Zhengwei¹ CHEN Yuhang³ GU Jinben^{2,3} TAO Yi^{3,4} DOU Yafen³

(1. CCCC-SHB Fourth Engineering Co., Ltd., Luoyang 471013, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, SRIBS, Shanghai 200032, China; 3. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 4. State Key Laboratory of Green Building, Xi'an 710055, China)

Abstract: Biochar can be served as a lightweight aggregate material and its partial incorporation into concrete can realize internal curing and filling effects, thereby enhancing the mechanical properties of cementitious materials. It represents a potential carbon capture and sequestration technique. However, due to the high porosity of biochar's microstructure, biochar concrete faces challenges such as low strength, poor corrosion resistance, and instability. This study proposed the use of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) tubes to confine biochar concrete, and the axial compression tests on GFRP tube-confined biochar concrete were performed, with design parameters including GFRP tube thickness (number of layers), biochar content, and biochar water absorption rate. Emphasis was placed on analyzing the axial stress-strain curves, circumferential strain-axial strain curves, yielding stress, ultimate strain, and circumferential fracture strain of each specimen. The results indicated that, under the premise of same biochar content and water absorption rate, the ultimate compressive strength of GFRP-confined biochar concrete specimens increased by 490.4% to 563.3% compared to that of unconfined specimens. The ultimate strain of confined specimens also significantly increased, and the yielding stress and strain of the confined specimens were much greater than those of unconfined specimens, indicating that GFRP confinement significantly improves the bearing capacity and deformation performance of biochar concrete. With increasing biochar content, the peak stress of confined specimens decreased while the axial ultimate strain increased. On the other hand, an increase in biochar water absorption rate led to an increase in the yielding load of confined specimens but a decrease in the ultimate strain. Additionally, an increase in the number of layers of GFRP tubes enhanced the secondary stiffness of confined specimens. The circumferential strain-axial strain curve exhibited no obvious transition point between the elastic segment and the linear segment, indicating that there was a good synergy between FRP tubes and biochar concrete.

Keywords: biochar concrete; fiber reinforced polymer; axial compressive performance; ultimate strain; yielding stress

* 上海市工程结构安全重点实验室开放课题(2023-KF09);陕西省教育厅协同创新中心项目(21JY025)。

第一作者:贺正伟,高级工程师,主要从事交建工程领域的研究,285760944@qq.com。

通信作者:陶毅,教授,主要从事新材料及新型结构体系、高性能建筑材料(如FRP、UHPC)应用等方面的研究,y.tao@xauat.edu.cn。

收稿日期:2023-03-20

0 引言

水泥是全球建筑业中广泛使用的主要材料,同时也是 CO₂ 排放的重要行业之一,约占全球 CO₂ 排放的 7%^[1-3]。在水泥生产过程中,碳酸盐矿物的热分解导致的 CO₂ 排放占比超过 60%,成为总排放量中的主要因素。因此,采用碳排放量较低的替代原料或辅助胶凝材料来生产水泥,是减少建筑业碳排放的重要途径^[4]。生物炭是一种富含碳的轻质多孔材料,较多地应用于土壤领域以提高土壤的保水能力及降低土壤的密度^[5-7]。

研究表明,生物炭可作为辅助胶凝材料掺入混凝土中,形成生物炭混凝土,而生物炭可提供内固化效应,继而提高生物炭混凝土的材料性能,同时达到轻质混凝土密度的要求。这使得生物炭具备潜在的碳捕捉和封存技术的可能性^[8-10]。此外,生物炭混凝土具有负碳排放的特点,同时也具备经济、环保和绿色的优势。然而,由于其密度较小、孔隙率较高,存在着强度低、稳定性差等问题,因此需要采用合理的技术手段来保证其达到一定的强度和耐久性。

玻璃纤维增强复合材料(GFRP)以轻质高强、高抗拉强度、线弹性行为、不受恶劣环境条件的影响、良好的耐腐蚀性能、对现有构件形状和尺寸影响最小、非磁性和非导电以及设计灵活性等优异特性被广泛研究^[11-13]。GFRP 约束生物炭混凝土可以提升混凝土的强度,并有效防止其受到侵蚀。

Mirmiran 等^[14-15]最先提出 FRP 管约束混凝土柱组合构件形式,并进行了单轴压缩与压弯试验研究,发现这种新型结构具有更高的强度及耐久性。Saafi 等^[16]对 FRP 约束混凝土柱进行了轴向受压试验研究。研究表明,FRP 约束混凝土柱不仅具有优异的抗压性能和延性表现,而且在浇筑和加载过程中,FRP 起到了模板、防护套筒、约束和加固的作用。此外,随着轴向荷载的增加,FRP 约束效果也会提高。Samaan 等^[17]也进行了 FRP 约束混凝土短柱轴压试验研究,发现 FRP 纤维铺层数越多,试件极限荷载及极限应变越大;混凝土抗压强度越高,FRP 约束效果越差。

本文提出了采用 GFRP 管约束生物炭混凝土的方法,不仅能够有效改善生物炭骨料混凝土的脆性和强度低的缺陷,还可以提高其延性和耐久性能。同时进行了 GFRP 管约束生物炭混凝土的轴压性能试验研究,分析了 GFRP 管的厚度、生物炭掺量和生物炭吸水率对 FRP 管约束生物炭混凝土的轴向应

力-应变曲线、环向应变-轴向应变曲线、屈服应力和极限应变等的影响规律。同时,基于现有的 FRP 约束混凝土本构模型,评价了 GFRP 管约束生物炭混凝土的极限应变等。

1 试验概况

1.1 试验设计及制作

本研究旨在探究 GFRP 管约束生物炭混凝土在轴压力学性能方面的表现,通过将生物炭作为混凝土中的骨料,以降低混凝土的密度。试验中所使用的混凝土配方包括水泥、石英粉、硅灰、石英砂、减水剂、激发剂和消泡剂。减水剂的使用旨在避免生物炭在搅拌过程中析出水分,从而影响混凝土的强度。试验涵盖了 4 种不同配合比的生物炭混凝土,它们各自具有不同的吸水率,如 87%吸水率的生物炭代表其具有最大的吸水能力为 87%。此外,不同配合比的生物炭混凝土具有不同的密度范围,随着生物炭掺量和吸水率的增加,混凝土密度降低(2 138~1 892 kg/m³)。除了密度外,混凝土的强度与炭掺量之间存在显著关联,炭掺量越高,混凝土强度越低。为保障生物炭混凝土具有 C30 混凝土以上的强度,建议生物炭掺量低于 55%。其他相关信息参见表 1。

表 1 生物炭混凝土配合比

Table 1 Mix proportions of biochar concrete						
水胶比	生物炭 掺量 C/%	吸水率 W/%	超细 粉料/kg	生物炭/ kg	水/ kg	密度/ (kg·m ⁻³)
0.62	20	87	33.50	1.50	3.08	2 138
0.62	40	87	28.87	3.47	2.66	2 081
0.62	50	61	23.95	4.31	2.52	1 892
0.62	50	87	23.95	4.31	2.60	1 903

本研究设计并试验了 18 个 GFRP 管约束生物炭混凝土柱试件及 12 个无约束生物炭混凝土柱试件。其中,FRP 纤维铺层 16 层的试件为试验设计中的“中位数”,因此每组设置 2 个额外的重复试件以保证结果的准确性。GFRP 管约束生物炭混凝土柱试件如图 1 所示。试件的高度均为 300 mm,FRP 管内径均为 150 mm,无约束生物炭混凝土柱试件直径 150 mm。主要变化参数为 FRP 纤维铺层数(厚度)、生物炭掺量以及生物炭吸水率,具体参数见表 2。

根据 JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》^[18]的方法来测定本文所用生物炭的吸水率。通过将生物炭在水中分别浸泡不同时长,

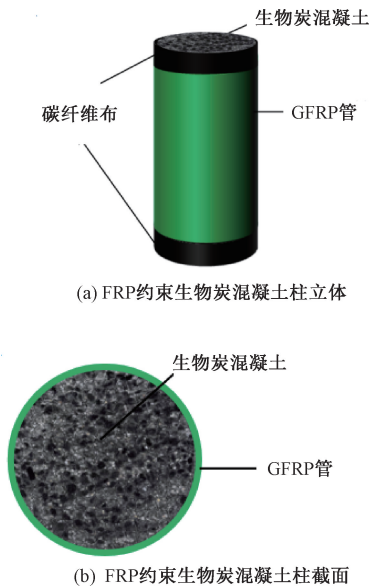


图 1 FRP 约束生物炭混凝土柱示意

Fig. 1 Schematic diagrams of FRP confined biochar concrete columns

表 2 试件设计参数

Table 2 Design details of specimens

试件编号	生物炭 掺量 C/ %	生物炭 吸水率 W/%	纤维铺 层数/层	试件 高度 H/mm	长细比
F16-C20-W87-1~3	20	87	16	300	2
F16-C40-W87-1~3	40	87	16	300	2
F16-C50-W61-1~3	50	61	16	300	2
F16-C50-W87-1~3	50	87	16	300	2
F12-C50-W61	50	61	12	300	2
F14-C50-W61	50	61	14	300	2
F18-C50-W61	50	61	18	300	2
F12-C20-W87	20	87	12	300	2
F14-C20-W87	20	87	14	300	2
F18-C20-W87	20	87	18	300	2
C20-W87-1~3	20	87	—	300	2
C40-W87-1~3	40	87	—	300	2
C50-W61-1~3	50	61	—	300	2
C50-W87-1~3	50	87	—	300	2

以得到不同吸水率的生物炭。吸水过程可以分为两个阶段:极速吸水阶段、缓慢吸水阶段^[19]。两个阶段完成后达到饱和,饱和吸水率为 87%。为避免 GFRP 管约束的试件在加载过程中出现柱子端部提前破坏,在试件上下两端分别用两层 30 mm 宽的碳纤维布进行加固。此外试验过程中由于针对生物炭的吸水率存在较大的不确定性,因此将同批次除饱和吸水率外的生物炭吸水率取平均值。另外,为了减少试验误差对结果的影响,16 层 GFRP 纤维铺层的试件均制作 3 个,以验证试验结果。

1.2 材料性能

本次试验选用 4 种内径为 150 mm、高度为

300 mm 的 GFRP 管,根据纤维铺层数将 FRP 管划分为 12 层(厚度 4.2 mm)、14 层(厚度 4.9 mm)、16 层(厚度 5.6 mm)以及 18 层(厚度 6.3 mm),具体性能参数见表 3。本次试验所配置的 4 种生物炭混凝土的立方体抗压强度如表 4 所示,可以看出,随着生物炭体积掺量的提升,生物炭混凝土的立方体抗压强度显著下降。

表 3 FRP 材料性能

Table 3 Material properties of FRP

t_f / mm	E_h / GPa	$\sigma_{h, rup}$ / MPa	v_h	E_a / GPa	$\sigma_{a, rup}$ / MPa	v_a
4.2	45.6	745.2	0.29	9.5	107.3	0.24
4.9	45.9	760.2	0.29	10.8	173.2	0.25
5.6	45.1	772.0	0.30	11.3	196.3	0.25
6.3	45.5	786.3	0.30	12.2	210.5	0.27

t_f 为 FRP 管的实测厚度; E_h 为 FRP 管的名义环向弹性模量; $\sigma_{h, rup}$ 为 FRP 管环向抗拉强度; v_h 为 FRP 管环向泊松比; E_a 为 FRP 管轴向弹性模量; $\sigma_{a, rup}$ 为 FRP 管轴向抗压强度; v_a 为 FRP 管轴向泊松比。

表 4 生物炭混凝土抗压强度

Table 4 Compressive strength of biochar concrete

养护 时间/d	不同生物炭掺量、吸水率下的抗压强度/MPa			
	20%、87%	40%、87%	50%、61%	50%、87%
3	53.49	25.27	31.87	25.34
7	64.18	45.96	31.43	29.46
14	94.08	45.07	39.50	30.21
28	91.48	50.09	47.10	45.00

1.3 试验加载及测量装置

本试验试件布置 12 组(24 个)应变片,每组应变片分别包括 1 个纵向和 1 个环向应变片,距试件底部 1/3、1/2、2/3 的截面高度处沿环向均匀布置,同时每个试件设置 2 个位移计,具体布置如图 2 所示。

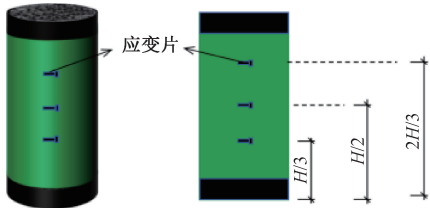


图 2 应变片粘贴位置示意

Fig. 2 Arrangements of strain gauges

本次试验仪器及量测装置示意图 3。正式加载前进行预加载以减小或消除偏心误差,尽可能地使试件处于轴心受压状态。试验采用位移控制加载,加载速率为 0.2 mm/min,承载力下降至 50% 极限荷载以下时,试验结束。

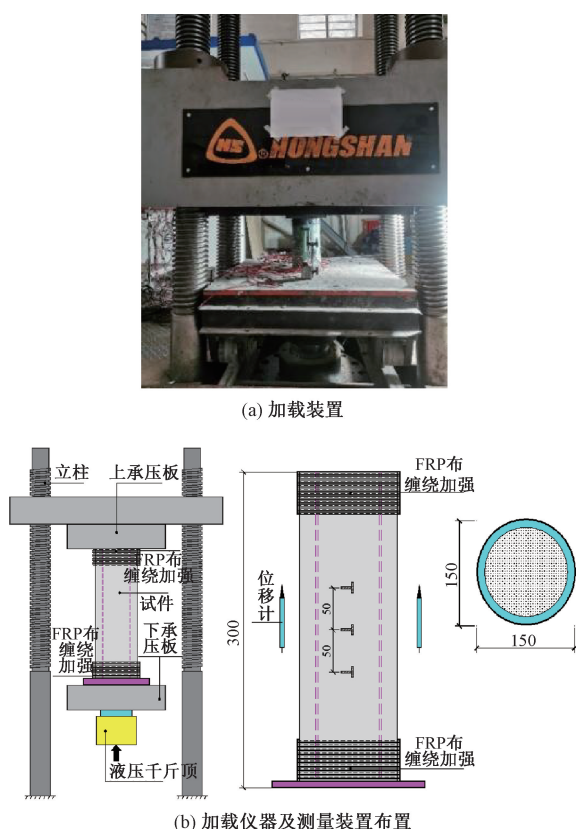


图3 轴压试验加载及测量装置 mm

Fig. 3 Loading set-up and measuring device for axial compression tests

2 试验现象及破坏模式

各试件的破坏形态如图4所示,表现为鼓曲破坏,并且破坏过程相似。在加载初期,由于荷载和变形较小,试件表现出无明显的特征。随着荷载增加至约65%极限荷载(即屈服荷载)时,FRP管约束作用提升;当荷载达到约80%极限荷载时,FRP管中部出现泛白现象,GFRP管出现拉伸破坏;当荷载逐渐增至85%极限荷载(试件出现明显破坏)时,伴随着断裂声的出现,GFRP管的纤维开始断裂,接着裂纹从断裂处向两侧扩展。当纤维被完全拉断时,核心混凝土断裂,荷载达到极限荷载,之后迅速下降。

3 试验结果及分析

3.1 极限荷载

试件极限荷载如表5、表6所示。可知:当生物炭吸水率与GFRP管纤维铺层数一定时,试件的极限荷载会随着生物炭掺量的增加而减少;当生物炭掺量与GFRP管纤维铺层数不变时,试件的极限荷载会随着生物炭吸水率的增加而减小;此外,当核心

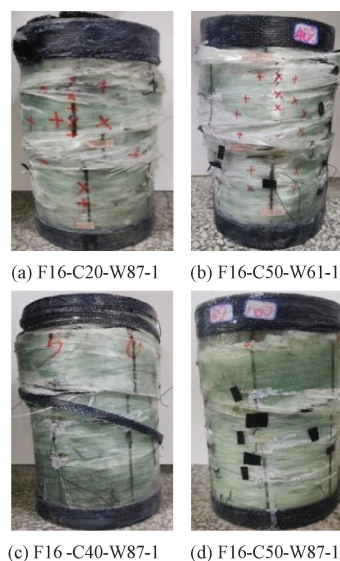


图4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure modes of specimens

混凝土采用相同配合比时,随着GFRP管厚度增大,约束试件的极限荷载提高,因此,增加GFRP管厚度可有效提升生物炭混凝土的抗压性能。同时,在相同生物炭掺量及吸水率的前提下,GFRP管约束生物炭混凝土试件的极限荷载相对于未约束试件可提升490.4%~563.3%,根据图5(c)、表5及表6可知,约束试件的极限应力、极限应变、屈服应力及屈服应变较未约束试件得到了大幅提升,生物炭混凝土的承载力及变形性能得到了明显的改善。

3.2 试验结果分析

3.2.1 轴向应力-应变曲线分析

每组试件首个编号试件的轴向应力-应变曲线如图5所示。可以发现:FRP约束生物炭混凝土的应力-应变曲线可分为弹性和强化两个阶段;对于弹性阶段,因FRP的约束效应未被激发,所以FRP约束生物炭混凝土的应力-应变关系曲线与未约束的生物炭混凝土类似;随着核心混凝土的不断开展,GFRP的约束效应不断被激发,FRP约束生物炭混凝土的环向应变快速上升,而强化阶段的试件刚度则取决于FRP的约束刚度。

综上,可以用Mohr-Coulomb破坏条件来解释试件在极限状态下的破坏状态,包括两方面内容:1)当试件屈服时,内部混凝土开裂,此时试件二次刚度靠GFRP侧向约束力提供;2)约束条件一定时,核心混凝土强度越强,试件应力-应变曲线在弹性阶段斜率越大,即初始刚度越大^[20]。

图5(a)表示GFRP管纤维铺层数及核心生物

表 5 约束试件试验结果

Table 5 Test results of confined specimens

试件编号	极限荷载变异系数	f_{cc}/MPa	$\bar{f}_{cc}/\text{MPa}$	极限荷载/kN	极限荷载均值/kN	$\varepsilon_{a, \text{rup}}/10^{-6}$	$\varepsilon_{h, \text{rup}}/10^{-6}$
F16-C20-W87-1	0.084	218.90	200.6	3 866.32	3 542.98	12 500	11 310
F16-C20-W87-2		197.25		3 483.93		15 620	10 660
F16-C20-W87-3		185.63		3 278.69		11 260	7 653
F16-C40-W87-1	0.053	165.14	174.7	2 916.79	3 086.35	14 569	13 807
F16-C40-W87-2		175.38		3 097.65		29 658	14 457
F16-C40-W87-3		183.70		3 244.60		26 953	9 970
F16-C50-W61-1	0.130	116.02	135.2	2 049.20	2 387.97	26 950	12 756
F16-C50-W61-2		150.42		2 656.79		24 560	10 909
F16-C50-W61-3		139.16		2 457.91		25 693	12 264
F16-C50-W87-1	0.028 8	132.26	128.0	2 336.04	2 261.38	25 620	12 552
F16-C50-W87-2		125.64		2 219.11		29 654	16 528
F16-C50-W87-3		126.20		2 229.00		20 302	13 562
F12-C20-W87	—	179.32	—	3 167.24	—	14 540	11 229
F14-C20-W87	—	181.59	—	3 207.33	—	14 420	10 692
F18-C20-W87	—	230.37	—	4 068.91	—	19 790	9 874
F12-C50-W61	—	125.62	—	2 218.76	—	18 540	11 190
F14-C50-W61	—	127.90	—	2 259.03	—	19 170	9 411
F18-C50-W61	—	174.32	—	3 078.93	—	22 560	6 577

f_{cc} 为核心混凝土受到 GFRP 约束时的抗压强度; $\bar{f}_{cc}$ 为核心混凝土受到 GFRP 约束时的平均抗压强度; $\varepsilon_{a, \text{rup}}$ 为约束试件轴向断裂应变; $\varepsilon_{h, \text{rup}}$ 为约束试件环向断裂应变。

表 6 无约束试件试验结果

Table 6 Test results of unconfined specimens

试件编号	极限荷载变异系数	f_{co}/MPa	$\bar{f}_{co}/\text{MPa}$	极限荷载/kN	极限荷载均值/kN	$\varepsilon_{co}/10^{-6}$	$\bar{\varepsilon}_{co}/10^{-6}$
C20-W87-1	0.068	35.94	37.87	634.79	668.94	1 120	1 129
C20-W87-2		40.78		720.28		1 032	
C20-W87-3		36.90		651.75		1 236	
C40-W87-1	0.097	32.89	29.59	580.92	522.57	1 023	1 137
C40-W87-2		28.22		498.44		1 263	
C40-W87-3		27.65		488.37		1 152	
C50-W61-1	0.084	28.22	26.28	498.44	464.23	962	1 140
C50-W61-2		26.75		472.47		1 256	
C50-W61-3		23.88		421.78		1 203	
C50-W87-1	0.055	20.84	21.19	368.09	374.39	1 045	
C50-W87-2		22.49		397.23		1 120	1 040
C50-W87-3		20.26		357.84		956	

f_{co} 为试件无约束时核心混凝土的抗压强度; $\bar{f}_{co}$ 为试件无约束时核心混凝土的抗压强度平均值; ε_{co} 为无约束试件环向断裂应变; $\bar{\varepsilon}_{co}$ 为无约束试件平均环向断裂应变。

炭掺量一定时,吸水率不同的试件应力-应变对比。可以看出:吸水率对约束试件的环向应变及极限抗压强度影响较小,但吸水率较低的试件保持着较高的初始刚度,因此高吸水率的试件有着更好的轴向变形能力。由图 5(b)可以看出:生物炭吸水率及 GFRP 纤维铺层数不变,随着生物炭掺量的增加,试件的屈服应力(应力-应变曲线弹性段到硬化段的转折点所对应的应力)和极限抗压强度显著降低,试件初始刚度降低且降低程度相对较小。这说明生物炭掺量对承载力有较大影响。生物炭掺量越高,试

件抗压性能越弱。随着生物炭掺量的增加,GFRP 管约束生物炭混凝土的二次刚度变化较小。图 5(c)表示核心混凝土配合比相同时 GFRP 层数不同的约束试件的应力-应变曲线对比。可以看出:GFRP 对核心混凝土轴压性能提升明显;随着 FRP 约束刚度的增加,试件的屈服应力增大,极限应力也同样增大,说明增加 GFRP 约束刚度可以提升构件的抗压强度;GFRP 管的层数增加,使得约束试件的二次刚度提升;其环向应变-轴向应变曲线的弹性段与强化段无明显过渡点,说明 GFRP 管与生物炭混凝土协

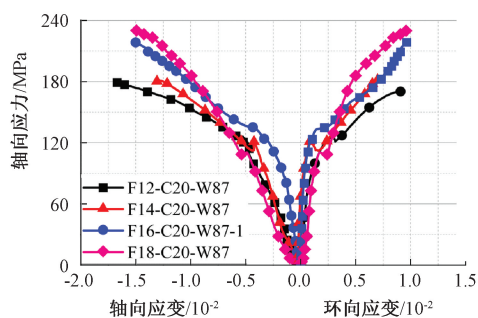
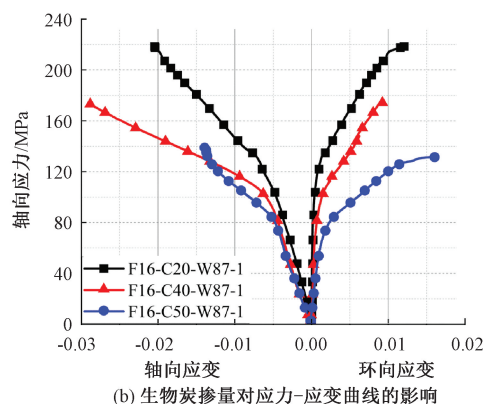
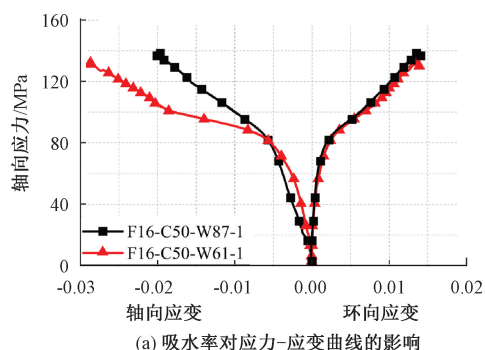


图5 轴向应力-应变曲线

Fig. 5 Relations between axial stress and strain

同工作性能良好。

综上所述:1)吸水率对试件极限荷载影响不大,对试件变形能力影响明显,吸水率越高,试件变形性能越好。2)生物炭掺量对试件最大荷载影响较大,这是因为生物炭掺量能显著影响核心混凝土

的抗压强度,因此生物炭掺量越低,抗压性能越强。

3)GFRP管越厚,试件抗压性能越强。

3.2.2 环向应变-轴向应变曲线分析

由图6可见:不同生物炭掺量的约束试件中,生物炭掺量高的约束试件环向应变提升速度明显低于生物炭掺量低的约束试件,但轴向应变极值高于生物炭掺量低的约束试件。这是由于随生物炭掺量的增加,混凝土内部微裂缝发展得更加不均匀;吸水率大小对轴向应变-环向应变影响较小。

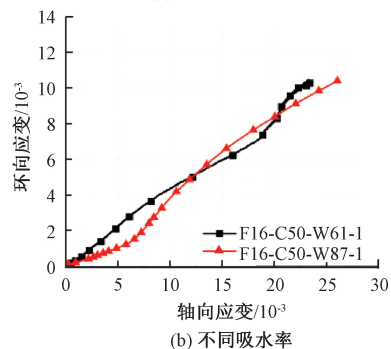
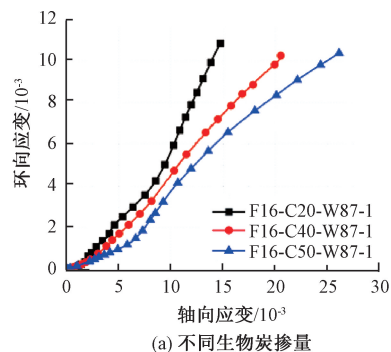


图6 环向应变-轴向应变曲线

Fig. 6 Relations between circumferential strain and axial strain

3.2.3 试件环向应变分布

选取各试件在加载过程中不同轴向应变下GFRP管的环向应变,将其绘制成如图7所示的雷达图。由于生物炭混凝土的各向不均匀性以及裂缝开展的随机性,GFRP管约束生物炭混凝土环向应变分布会不均匀。

选取轴向应变达到10%、20%、40%、60%、80%、100%轴向极限应变时的环向应变作为选定点进行对比分析。可以看出:GFRP管环向应变分布呈现明显的不均匀性,导致FRP发挥的有效应变远小于FRP的极限拉伸应变;增加GFRP管的铺层数,可有效降低混凝土的不均匀开裂的影响;随着生物炭掺量的提高,GFRP环向不均匀约束效果先降低再提高,生物炭掺量为40%的试件其FRP环向约束不均匀程度明显强于生物炭掺量为20%、50%的

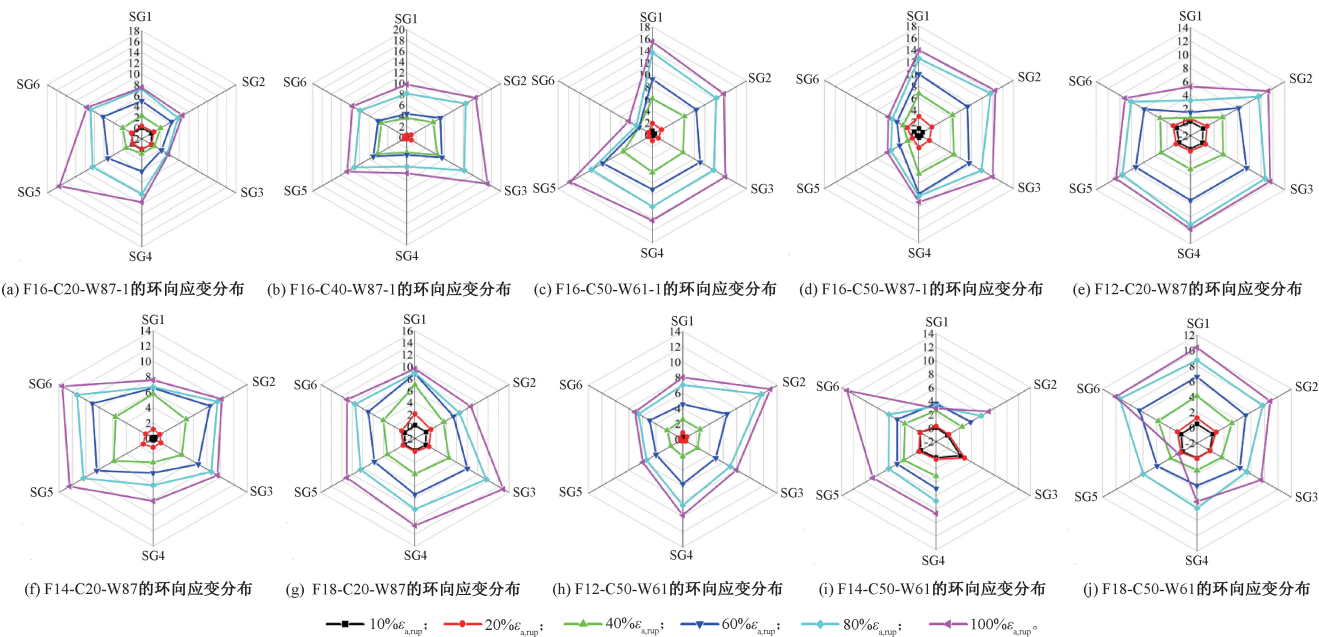


图 7 试件环向应变分布 10^{-3}

Fig. 7 Circumferential strain distribution of specimens

试件;对比不同吸水率,吸水率为 61% 的试件其 FRP 环向约束不均匀程度明显强于吸水率为 87% 的试件;吸水率低的生物炭混凝土各向不均匀性及裂缝开展的随机性强于吸水率高的生物炭混凝土。

当生物炭掺量分别为 20%、40%、50% 时,试件环向断裂应变平均值随着生物炭掺量的增大而增大,表明生物炭掺量对环向断裂应变有一定的影响,且生物炭掺量越高,混凝土脆性越大,改变了微裂缝扩展为局部裂缝的形态。此外,从图 7 中可知,随 GFRP 纤维铺层数增加,试件的环向断裂应变变化并不是很明显,因此可以得出,试件的环向变形取决于核心混凝土。当生物炭掺量一定时,随着吸水率的降低,环向断裂应变也随之降低,表明吸水率对约束试件的环向断裂应变有影响,吸水率高的混凝土脆性高于吸水率低的混凝土,因此其环向断裂应变更大。

3.3 试件轴向延性分析

采用位移延性系数作为衡量约束柱轴向变形能力的指标,即延性系数越大,说明结构或者构件的延性越好,变形能力越强^[21]。利用式(1)计算的结果见表 7 所示。

$$\mu = D_u / D_y \quad (1)$$

式中: D_u 为结构(试件)的最大位移; D_y 为试件的屈服位移。

本文试件屈服点根据 Feng 等^[22]所推荐的方法

表 7 FRP 约束生物炭混凝土柱延性系数

Table 7 Ductility coefficient of FRP confined biochar concrete column

试件编号	$D_u /$ mm	$D_y /$ mm	μ	$\bar{D}_y /$ mm	$\bar{\mu}$
F16-C20-W87-1	17.76	6.89	2.58		
F16-C20-W87-2	19.10	5.59	3.42	6.24	2.96
F16-C20-W87-3	18.62	6.25	2.98		
F16-C40-W87-1	19.56	6.31	3.10		
F16-C40-W87-2	17.01	8.78	1.94	6.89	2.69
F16-C40-W87-3	19.08	5.58	3.42		
F16-C50-W61-1	22.50	6.51	3.46		
F16-C50-W61-2	20.92	5.58	3.75	5.69	3.72
F16-C50-W61-3	20.13	4.98	4.04		
F16-C50-W87-1	21.12	7.06	2.99		
F16-C50-W87-2	24.58	7.13	3.45	6.92	3.03
F16-C50-W87-3	17.10	6.56	2.61		
F12-C20-W87	14.54	6.24	2.33	—	—
F14-C20-W87	14.42	6.24	2.31	—	—
F18-C20-W87	19.01	6.24	3.05	—	—
F12-C50-W61	18.54	5.69	3.26	—	—
F14-C50-W61	19.16	5.69	3.37	—	—
F18-C50-W61	22.38	5.69	3.93	—	—

$\bar{D}_y$ 为试件平均屈服位移; $\bar{\mu}$ 为重复组试件延性系数均值。

确定,屈服位移则为屈服点所对应的轴向位移。从表 7 及图 8 中的延性系数可以看出:随着 GFRP 约束层数增加,混凝土柱的位移延性系数增大,因此,GFRP 的约束有效提升了生物炭混凝土柱的延性性能;随 GFRP 层数的增加,约束试件的轴压承载力随之增大,内部混凝土的破坏开裂程度越严重,意味着试件的轴向位移也越大,即 GFRP 纤维

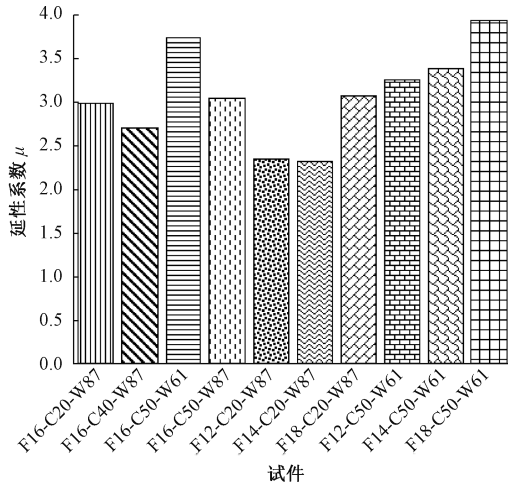


图8 试件延性系数

Fig. 8 Ductility coefficient of specimens

铺层数越多的延性越好;当GFRP铺层数与吸水率一定时,随着生物炭掺量的增大,延性系数先减小后增大,掺量最大时的延性系数最大;相比变化GFRP管层数,改变生物炭掺量对延性系数的影响幅度较低。

4 FRP约束混凝土抗压强度及应变模型分析

4.1 模型回顾

现阶段国内外学者已经提出了许多模型来研究FRP约束混凝土柱的轴压性能。试件形式均为简单封闭式^[23-24],模型包含详细的迭代过程^[25-26]。Richart等^[27]首次对有钢约束和无钢约束的混凝土的应力-应变曲线进行了研究,目前大多数用于预测FRP受压混凝土柱抗压强度的模型都是基于其提出的约束混凝土强度计算模型。通过改变FRP对核心混凝土约束系数 k_1 的值以确保所计算抗压强度的准确性。

Samaan等^[28]提出了应力、应变计算强度模型:

$$f_{cc} = f_{co} + 6.0 f_l^{0.7} \quad (2a)$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{f_{cc} - 0.872 f_{co} - 0.371 f_l - 6.258}{245.61 f_{co}^{0.2} + 1.3456 (E_{frp} t_{frp} / D)} \quad (2b)$$

式中: f_l 为FRP对核心混凝土所施加的侧向约束应力; E_{frp} 为GFRP管的环向弹性模量; D 为FRP管的内径。

Toutanji^[29]所提出的FRP约束混凝土应力、应变模型如式(3)、(4)所示,该模型不存在下降段:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.5 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.85} \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + (310.57 \varepsilon_l + 1.90) \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \quad (4)$$

式中: ε_l 为约束试件的侧向应变。

Xiao等^[30]对36个直径为152 mm、高为305 mm的圆柱体混凝土试件以有无约束及碳纤维布约束厚度为参数进行了抗压试验研究,并将试验数据回归分析得到碳纤维布约束混凝土圆柱的应力、应变表达式:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1.1 + \left(4.1 - 0.75 \frac{f_{co}^2}{E_l} \right) \frac{f_l}{f_{co}} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\varepsilon_{frp} - 0.0005}{7 \left(\frac{f_{cc}}{E_l} \right)^{0.8}} \quad (6)$$

式中: ε_{frp} 为FRP的极限拉应变; E_l 为侧向约束刚度。

Jiang等^[26]对Lam & Teng模型^[23]进行优化,不仅考虑了FRP约束应变而且考虑到约束刚度的影响,提出更加精准的轴向受压强度及极限应变的表达式:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.5 \left(\frac{f_{lu,a}}{f_{co}} - 0.01 \right) \left(\frac{\varepsilon_{h,rupt}}{\varepsilon_{co}} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + 6.5 \left(\frac{K_1}{f_{co}/\varepsilon_{co}} \right)^{0.8} \left(\frac{\varepsilon_{h,rupt}}{\varepsilon_{co}} \right)^{1.45} \quad (8)$$

式中: $f_{lu,a}$ 为有效侧向约束应力; $\varepsilon_{h,rupt}$ 为试件的环向断裂应变。

基于能量平衡法,Mander等^[31]利用迭代分析的方法建立了约束混凝土应力-应变模型,其应力、应变计算式如下:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_{lu,a}}{f_{co}}} - 2 \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} - 1.254 \quad (9)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 0.8 \right) \quad (10)$$

吴刚等^[32]通过收集大量试验数据及分析,提出了FRP约束混凝土无下降段型的三折线模型。其模型如下:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2.5 \frac{f_l}{f_{co}} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{co} = \varepsilon_{jip} / [0.56 (f_l / f_{co})^{-0.66} | \varepsilon_{co} = \varepsilon_{jip} / [0.31 (f_l / f_{co})^{-0.44}] \quad (12)$$

式中: ε_{jip} 为试件极限应变。

Fardis等^[33]基于Richart等^[27]的约束混凝土强度模型,通过试验与数值回归,推出应力、应变表达式为:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.7 \left(\frac{f_l t}{R f_{co}} \right)^{0.86} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 0.001 E_{ft} / (D f_{co}) \quad (14)$$

Moran 等^[34]通过总结大量试验数据,对已有模型进行优化,得到屈服应力、应变公式如下:

$$f_{cc}/f_{co} = 1 + 4.14 f_l/f_{co} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co} = 1 + 1/[0.00927 \times (E_l/f_{cc})^{1/3}] \cdot f_l/f_{co} \quad (16)$$

Marques 等^[35]根据轴向应力作用下 FRP 约束混凝土和无侧向约束混凝土的本构关系,通过分析迭代,提出一种能够准确预测 FRP 约束矩形、圆柱型混凝土短柱的应力、应变模型。其轴向受压强度

和轴向极限应变模型如下:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 6.7 \frac{f_{lu,a}^{0.83}}{f_{co}} \quad (17)$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 1340 \frac{f_{lu,a}^{0.8}}{f_{co}^2} \quad (18)$$

4.2 FRP 约束混凝土抗压强度模型分析

由表 8 及图 9 可以看出:Samaan 等^[28]和 Jiang 等^[26]模型对 FRP 约束生物炭混凝土的抗压强度计算相对于其他模型更为准确,但是使用模型得到的试件计算值误差仍能达到 20% 以上。因此可以得出,本文回顾的设计模型并不能较好地预测 GFRP 约束生物炭混凝土的抗压强度。

表 8 GFRP 约束生物炭混凝土轴向抗压强度模型计算值

Table 8 The calculated value of axial compressive strength model of GFRP confined biochar concrete

生物炭 掺量/%	吸水率/ %	FRP 铺 层数/层	Samaan 等 ^[28] /MPa	Toutanji 等 ^[29] /MPa	Fardis 等 ^[33] /MPa	Xiao 等 ^[30] /MPa	吴刚等 ^[32] / MPa	Jiang 等 ^[26] /MPa	Mander 等 ^[31] /MPa	Moran 等 ^[34] /MPa	Marques 等 ^[35] /MPa	试验值/ MPa
20	87	16	157.87	106.97	57.07	123.67	81.87	187.12	101.43	110.73	110.29	200.60
40	87	16	173.59	112.26	52.68	154.64	86.34	199.02	94.39	123.57	119.04	174.70
50	61	16	154.68	103.52	47.86	163.56	79.78	164.09	85.45	114.88	111.46	135.20
50	87	16	141.19	108.28	45.62	187.32	85.19	193.66	77.05	127.17	120.03	128.00
20	87	12	128.17	98.36	50.97	126.28	75.50	187.12	95.72	100.18	101.47	179.32
20	87	14	137.59	103.69	54.16	124.67	79.42	115.20	99.31	106.68	106.93	181.59
20	87	18	171.67	122.37	63.91	188.70	93.62	163.20	110.45	130.19	126.01	230.37
50	87	12	164.28	82.41	38.48	162.30	63.03	164.09	75.27	87.14	88.65	125.62
50	87	14	138.18	95.00	43.37	196.80	72.91	192.50	81.71	103.49	102.27	127.90
50	87	18	174.01	97.19	48.18	134.20	74.66	123.50	82.72	106.39	104.63	174.32

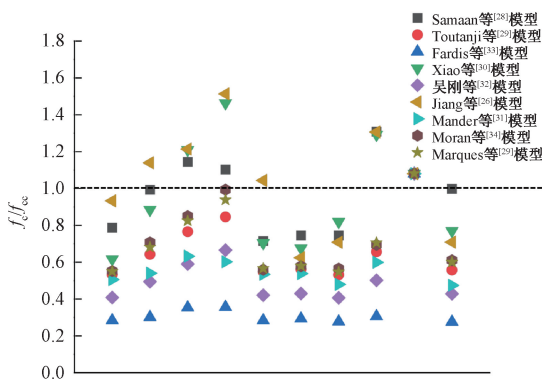


图 9 混凝土约束强度计算值 f_{cc} 与试验值 f_{cc} 之比

Fig. 9 The ratio of calculated confined strength value f_{cc} to experimental value f_{cc} of concrete

通过对以上模型计算值与本试验值对比分析可得,Samaan 等模型^[28]是设计模型中误差最小的一个,所以本文以 Samaan 等模型^[28]为强度模型原型,拟合出更加适合本文 GFRP 管约束生物炭混凝土的轴向受压强度模型计算式:

$$f_{cc} = f_{co} + 7f_l^{0.9} \quad (19)$$

将试验数据代入本文所回归的强度表达式中,发现模型预测值与试验数据吻合较好,说明本文提

出的模型比较适合 GFRP 约束生物炭混凝土柱。模型离散值的具体对比如图 10 所示。

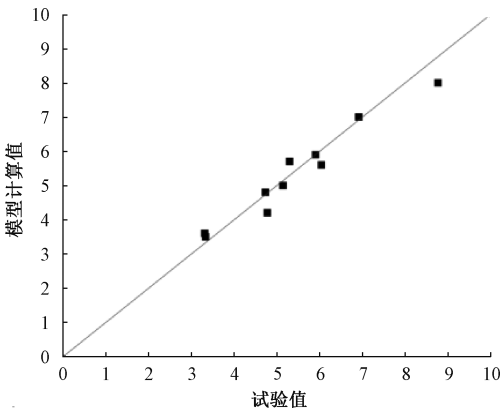


图 10 建议轴向受压强度模型计算值与试验值对比

Fig. 10 The ratio of calculated axial compressive strength value to experimental value of suggested models

4.3 FRP 约束混凝土屈服应变模型分析

由表 9 及图 11 可以看出:Samaan 等^[28]和 Jiang 等模型^[26]对 FRP 约束生物炭混凝土的极限应变计算相对于其他模型更为准确。尤其是 Jiang 等模型^[26]计算值与试验值误差在 20% 以内,因此,对于 GFRP 约束生物炭混凝土柱的极限应变可以采用 Jiang 等

表9 GFRP 约束生物炭混凝土极限应变模型计算值

Table 9 Calculated value of ultimate strain model of GFRP confined biochar concrete

生物炭 掺量/%	吸水率/ %	FRP 铺 层数/层	Samaan 等 ^[28] /10 ⁻⁶	Toutanji 等 ^[29] /10 ⁻⁶	Fardis 等 ^[33] /10 ⁻⁶	Xiao 等 ^[30] / 10 ⁻⁶	吴刚等 ^[32] / 10 ⁻⁶	Jiang 等 ^[26] / 10 ⁻⁶	Mander 等 ^[31] /10 ⁻⁶	Moran 等 ^[34] /10 ⁻⁶	Marques 等 ^[35] /10 ⁻⁶	试验值/ 10 ⁻⁶
20	87	16	18 600	33 190	62 400	16 640	41 400	11 590	22 490	50 380	10 270	9 874.3
40	87	16	18 600	37 730	68 700	20 470	51 700	12 820	25 520	78 880	19 610	12 745
50	61	16	11 500	32 040	56 900	20 810	53 000	10 460	21 720	76 960	23 500	11 976.4
50	87	16	14 400	38 760	71 500	27 320	63 100	13 640	26 200	111 680	40 940	14 214
20	87	12	9 700	17 640	62 400	24 200	38 700	11 590	12 590	37 190	9 180	11 229
20	87	14	9 700	18 040	62 400	24 110	40 400	11 470	12 660	41 020	9 850	10 692
20	87	18	15 800	29 210	62 400	18 210	46 000	11 360	19 680	61 300	12 200	9 874
50	87	12	17 300	43 430	56 900	16 440	45 000	10 460	30 550	58 510	17 660	11 190
50	87	14	22 800	57 720	56 900	13 590	49 900	10 460	39 830	79 930	21 160	9 411
50	87	18	10 500	29 550	56 900	22 070	50 700	10 240	19 900	68 040	21 760	6 576.5

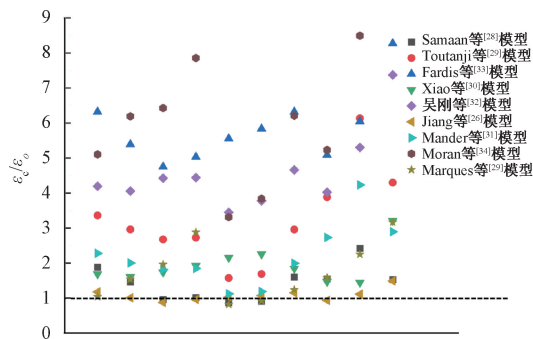


图 11 约束柱极限应变计算值 ε_c 与试验值 ε_e 之比

Fig. 11 The ratio of the calculated ultimate strain ε_c to the experimental value ε_e of confined column

模型^[26]进行预测。

5 结束语

通过对 18 个 GFRP 约束生物炭混凝土短柱试件及 12 个无约束生物炭混凝土短柱进行轴压试验,对 GFRP 约束生物炭混凝土的轴压性能进行了研究,研究表明:

1)生物炭混凝土的强度受生物炭掺量的影响比较大,受生物炭吸水率的影响较小。增加生物炭混凝土中生物炭掺量及吸水率,都会降低生物炭混凝土的抗压强度。

2)GFRP 对生物炭混凝土约束作用较好。同一生物炭混凝土配合比下,所有约束试件相比于无约束试件具有更高的承载力(承载力的提升效果可达 4 倍以上)、更好的变形能力。此外,所有 GFRP 约束试件均为鼓曲破坏,当荷载加到强化阶段时约束作用提升,试件承载力继续上升,直至破坏。

3)试件在弹性阶段的刚度主要由核心混凝土强度决定,在强化段则主要受 GFRP 层数决定。

4)当核心混凝土不变,随着 GFRP 纤维铺层数

增加(12 层提升至 18 层),试件的延性系数随之递增。即提升 GFRP 纤维铺层数,能够有效提升 GFRP 约束生物炭混凝土短柱的延性。

5) Samaan 等模型能够拟合出较为准确预测 GFRP 约束生物炭混凝土约束强度的模型;Jiang 等模型的极限应变模型能够较为准确地预测到 FRP 约束生物炭混凝土的极限应变。

参 考 文 献

- [1] 吴维,卢玉南,覃英宏,等. 生物炭混凝土生命周期 CO₂ 排放评价[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(3): 20-29.
- [2] ANDRES R J, MARLAND G, FUNG I, et al. A 1°×1° distribution of carbon dioxide emissions from fossil fuel consumption and cement manufacture, 1950—1990 [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(3):419-429.
- [3] 齐冬有,张标,罗宁. 水泥工业碳减排的技术路径[EB/OL]. (2021-06-08) [2023-03-29]. <https://www.ccement.com/news/content/13050268544005001.html>.
- [4] 马忠诚,汪澜. 水泥工业 CO₂ 减排及利用技术进展[J]. 材料导报, 2011,25(19):150-154.
- [5] SCRIVENER K L, JOHN V M, GARTNER E M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 114:2-26.
- [6] HIGUCHI T, MORIOKA M, YOSHIOKA I, et al. Development of a new ecological concrete with CO₂ emissions below zero[J]. Construction and Building Materials, 2014, 67: 338-343.
- [7] 李金文,顾凯,唐朝生,等. 生物炭对土体物理化学性质影响的研究进展[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(1): 192-206.
- [8] AKHTAR A, SARMAH A K. Novel biochar-concrete composites: manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties[J]. Science of the Total Environment, 2018, 616-617: 408-416.
- [9] GUPTA S, KUA H W. Factors determining the potential of biochar as a carbon capturing and sequestering construction material:

- critical review [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(9), 04017086.
- [10] 窦雅芬. FRP 约束生物炭骨料混凝土轴压力学性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [11] KÖROĞLU M A, CEYLAN M, ARSLAN M H, et al. Estimation of flexural capacity of quadrilateral FRP-confined RC columns using combined artificial neural network [J]. *Engineering Structures*, 2012, 42: 23–32.
- [12] WU Y F, JIANG J F. Effective strain of FRP for confined circular concrete columns [J]. *Composite Structures*, 2013, 95(1): 479–491.
- [13] MONTI G, NISTICO N. Square and rectangular concrete columns confined by CFRP: Experimental and numerical investigation [J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2008, 44: 289–308.
- [14] MIRMIRAN A, SHAHAWY M. A new concrete-filled hollow FRP composite column [J]. *Composites Part B Engineering*, 1996, 27(3/4): 263–268.
- [15] MIRMIRAN A, SHAHAWY M. Closure to "behavior of concrete columns confined by fiber composites" by amir mirmiran and mohsen shahawy [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124(9): 1095–1095.
- [16] SAAFI M, TOUTANJI H A, LI Z. Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes [J]. *ACI Structural Journal*, 1999, 96(4): 500–509.
- [17] SAMAAN M, MIRMIRAN A, SHAHAWY M. Model of concrete confined by fiber composites [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124(9): 1025–1031.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准: JGJ 52—2006 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [19] 叶扬天. 生物质烘焙特型及动力学研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- [20] 敬登虎, 曹双寅. FRP 约束混凝土极限状态下破坏机理分析 [J]. *特种结构*, 2007(2): 93–95.
- [21] 毛志杰, 黄靓, 吴越, 等. 纤维增强复合材料约束尾矿粉地聚物再生混凝土轴压性能研究 [J]. *工业建筑*, 2023, 53(6): 209–217.
- [22] FENG P, CHENG S, BAI Y, et al. Mechanical behavior of concrete-filled square steel tube with FRP-confined concrete core subjected to axial compression [J]. *Composite Structures*, 2015, 123: 312–24.
- [23] LAM L, TENG J. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17: 471–489.
- [24] NISTICO N, PALLINI F, ROUSAKIS T, et al. Peak strength and ultimate strain prediction for FRP confined square and circular concrete sections [J]. *Composites Part B*, 2014, 67(12): 543–554.
- [25] MIRMIRAN A, SINGHVI A, MONTI G. FRP-confined concrete model [J]. *Journal of Composites for Construction*, 1999, 3(1): 62–65.
- [26] JIANG T, TENG J G. Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(11): 2968–2986.
- [27] RICHART F E, BRANDTZG A, BROWN R L. Failure of plain and spirally reinforced concrete in compression [J/OL]. *Engineering, Materials Science*, 1929. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:136940705>.
- [28] SAMAAN, MIRMIRAN A, SHAHAWY M. Model of concrete confined by fiber composites [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124(9): 1025–1031.
- [29] TOUTANJI H A. Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber-composite sheets [J]. *ACI Materials Journal*, 1999, 96(3): 397–404.
- [30] XIAO Y, WU H. Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2000(2): 12: 139–146.
- [31] MANDER J A B, PRIESTLEY M J N. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1988, 114(8): 1804–1826.
- [32] 吴刚, 吕志涛. FRP 约束混凝土圆柱无软化段时的应力-应变关系研究 [J]. *建筑结构学报*, 2003(5): 1–9.
- [33] FARDIS M N, KHALILI H H. FRP-encased concrete as a structural material [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1982, 34(121): 191–202.
- [34] MORAN D A, PANTELIDES C P. Damage-based stress-strain model for fiber-reinforced polymer-confined concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2005, 6(4): 233–240.
- [35] MARQUES S P C, MARQUES D C S C, LINS DA SILVA J, et al. Model for analysis of short columns of concrete confined by fiber-reinforced polymer [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(4): 332–340.