

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.010

BFRP 管约束再生混凝土圆柱轴压试验

王海涛¹, 陈磊¹, 许国文^{2,3}, 熊浩^{2,3}, 茆亚辉¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122;
3. 上海碳纤维复合材料土木工程应用工程技术研究中心, 上海 200122)

摘要: 为研究玄武岩纤维复合材料(BFRP)对再生混凝土力学性能的提升作用,对 BFRP 管约束再生混凝土圆柱进行了轴压试验,分析了 BFRP 层数对圆柱轴压性能的影响。试验结果表明:BFRP 管约束再生混凝土圆柱的失效模式表现为 BFRP 断裂引起的圆柱受压破坏,BFRP 管约束可以显著提高再生混凝土圆柱的承载力和变形能力,轴压应力-应变曲线表现出明显的强化段。随着 BFRP 层数的增加,约束再生混凝土的轴压强度比未约束再生混凝土提高了 78%~281%,极限轴压应变提高了 6.16~18.10 倍,均显著高于对应的未约束普通混凝土的轴压强度和极限轴压应变。结合试验数据,评估了典型纤维复合材料(FRP)约束混凝土圆柱轴压强度和极限轴压应变模型在 BFRP 约束再生混凝土中的适用性,发现所评估的典型模型不能精确地预测试件的轴压强度和极限轴压应变。

关键词: BFRP 管;再生混凝土;圆柱;约束混凝土;轴压性能

中图分类号: TU399 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)06-0077-07

Axial compressive experiments of recycled concrete cylinders confined by BFRP tube

WANG Haitao¹, CHEN Lei¹, XU Guowen^{2,3}, XIONG Hao^{2,3}, MAO Yahui¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200122, China;
3. Research Center of Shanghai Carbon Fiber Composite Application Technology in
Civil Engineering, Shanghai 200122, China)

Abstract: In order to investigate the improvement effect of the basalt fiber reinforced polymer (BFRP) on the mechanical behavior of recycled concrete, the BFRP tube confined recycled concrete cylinders were tested under axial compression and the effect of the number of BFRP layers on the compressive behavior of cylinders was analyzed. Test results show that the failure mode of BFRP tube confined recycled concrete cylinders is characterized by the rupture of the BFRP followed by the compressive failure of cylinders. The confinement of BFRP tube can significantly increase the ultimate capacity and deformation ability of recycled concrete cylinders, and the axial compressive stress-strain curves exhibit an obvious hardening stage. With an increase in the BFRP layer, the axial compressive strength of confined recycled concrete increases by 78%-281%, and the ultimate axial compressive strain increases by 6.16-18.10 times, compared those of the unconfined recycled concrete. Both the axial compressive strength and ultimate axial compressive strain of the BFRP tube confined recycled concrete are much greater than those of the corresponded unconfined normal concrete. Finally, the applicability of the typical axial compressive strength and ultimate axial compressive strain models of fiber reinforced polymer (FRP) confined concrete cylinders in the BFRP confined recycled concrete was evaluated based on test data, and it is observed that the evaluated typical models cannot provide an accurate prediction in the axial compressive strength and ultimate axial compressive strain of specimens.

Key words: BFRP tube; recycled concrete; cylinders; confined concrete; compressive behavior

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378233);中建股份科技研发计划项目(CSCEC-2022-Z-8);上海市科技计划项目(20DZ2253000)

作者简介: 王海涛(1987—),男,副教授,博士,主要从事结构高效加固技术及新材料与新型结构研究。E-mail: cewht@hhu.edu.cn

通信作者: 熊浩(1986—),男,高级工程师,硕士,主要从事新材料在土木工程中的应用研究。E-mail: xionghao@cscec.com

引用本文: 王海涛,陈磊,许国文,等. BFRP 管约束再生混凝土圆柱轴压试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):77-83.

WANG Haitao, CHEN Lei, XU Guowen, et al. Axial compressive experiments of recycled concrete cylinders confined by BFRP tube[J].
Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6): 77-83.

随着我国基础设施建设的推进,因大量老旧建筑物、混凝土路面的拆除改造而产生的建筑垃圾越来越多,近年来建筑垃圾总量已占到城市垃圾总量的约40%^[1],其中废弃混凝土又占大多数。解决好废弃混凝土的回收利用问题,既有利于降低环境污染,又能降低天然砂石等资源的消耗,并能助力建筑业的可持续发展,具有重要的经济和环保效益。利用废弃混凝土全部或部分替代天然骨料制备成再生混凝土是解决废弃混凝土回收利用的主要途径。然而,与普通混凝土相比,再生混凝土的抗压强度、抗拉强度、抗折强度、弹性模量等力学性能有不同程度的降低^[2-5],从而制约着再生混凝土在工程中的推广应用。

为了提高再生混凝土材料的物理及力学性能,研究者提出了多种提升方法,比如对骨料进行预处理,添加外加剂以及纤维材料等^[6-9]。除了对再生混凝土自身性能进行改善外,也可通过不同材料与再生混凝土的组合提高其强度和变形能力,其中最常用的措施就是对再生混凝土进行侧向约束^[10-12]。相比于钢材,纤维复合材料(FRP)具有轻质、高强及耐久性好等优点,近年来FRP在土木工程中的应用得到了广泛关注^[13-16]。研究^[17-18]表明,采用FRP对普通混凝土进行约束可以显著提高混凝土的强度和延性。鉴于此,国内外学者近年来也开始开展FRP约束再生混凝土的研究,以期改善其力学性能;肖建庄等^[19]研究了玻璃纤维复合材料(GFRP)约束再生混凝土圆柱的轴压性能,发现其强度得到明显提高,变形能力得到改善;马辉等^[20]的研究表明,GFRP管可以有效提高再生混凝土圆柱的轴压承载力,承载力随长细比和再生骨料取代率的增大而降低;Chen等^[21-22]关注了FRP约束再生混凝土的尺寸效应,发现碳纤维复合材料(CFRP)约束再生混凝土圆柱基本不存在尺寸效应,而GFRP约束再生混凝土方柱则存在尺寸效应;Gao等^[23]对再生砖混凝土的研究发现,CFRP管约束混凝土的抗压强度比GFRP管约束的高,但是延性呈现出相反趋势。以上研究说明,采用FRP约束再生混凝土可以显著提高再生混凝土的力学性能。

土木工程中应用的FRP主要有CFRP、GFRP和玄武岩纤维复合材料(BFRP)。相比于CFRP和GFRP,组成BFRP的玄武岩纤维是一种无污染、可重复利用的绿色纤维^[24],将BFRP与再生混凝土结合可以更好地实现资源的可再生与环境保护。然而,目前有限的针对FRP约束再生混凝土的研究仍集中在CFRP和GFRP,对BFRP约束再生混凝土的研究还很少。为了研究BFRP约束对再生混凝土轴压力学性能的提升效果,本文对BFRP管约束再生混凝土圆柱在单调轴压下的力学性能进行测试,分析不同BFRP层数约束对再生混凝土圆柱轴压性能的影响,以期BFRP在再生混凝土力学性能提升方面的应用提供参考。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验所用水泥为42.5R普通硅酸盐水泥;细骨料为中粗河砂,连续级配,细度模数为2.5;天然粗骨料为粒径5~20 mm的连续级配普通碎石;再生粗骨料为粒径5~20 mm的连续级配再生混凝土骨料,实测吸水率为4%;采用普通自来水进行搅拌。普通混凝土和再生混凝土的水灰比均为0.5,砂率均为0.38,混凝土采用相同质量配合比,即水泥、砂、粗骨料(石子或再生骨料)和水的用量分别为410、716.3、1 168.7和205 kg/m³,对于再生混凝土,添加46.7 kg/m³的附加水。用于制作BFRP管的单向玄武岩纤维布的密度为380 g/m²,名义厚度为0.140 mm,宽度为300 mm,厂家提供的玄武岩纤维布抗拉强度为2 400 MPa,弹性模量为90 GPa,极限延伸率为2.5%。用于制作BFRP管的浸渍胶为两组份环氧树脂,将A和B两组分按2:1(质量比)的比例拌和均匀,厂家提供的环氧树脂抗拉强度、弹性模量和极限延伸率分别为60.1 MPa、2.9 GPa和3.4%。

1.2 试件设计

试验共设计15个圆柱试件,其中BFRP管约束再生混凝土试件9个,未约束普通混凝土对比试件和未约束再生混凝土对比试件各3个。试件的高度为300 mm,直径为150 mm,试件示意图见图1。再生混凝土试件的再生骨料取代率均为100%,主要研究参数为试件设计详情见表1。

试件的准备过程包括BFRP管制作,混凝土浇筑和养护、端部加固等主要步骤。采用泡沫圆柱作为模具制作BFRP管,在缠绕

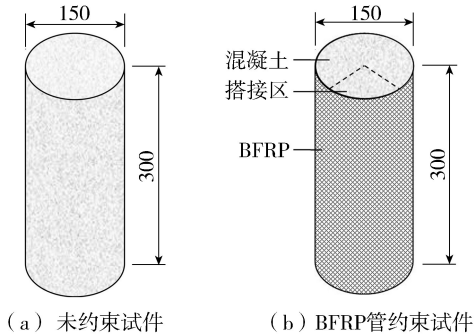


图1 试件示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of specimens (unit: mm)

表 1 试件设计参数及主要试验结果

Table 1 Design parameters and main test results of specimens

试件编号	取代率/%	BFRP 层数	f'_{co}/MPa	f'_{cc}/MPa	ε_{co}	ε_{cu}	失效模式
NAC-1	0	0	24.5		0.0029		C
NAC-2	0	0	32.7		0.0031		C
NAC-3	0	0	28.9		0.0036		C
RAC-B0-1	100	0	19.3		0.0021		C
RAC-B0-2	100	0	17.5		0.0017		C
RAC-B0-3	100	0	19.1		0.0019		C
RAC-B1-1	100	1		33.3		0.0128	R+C
RAC-B1-2	100	1		33.1		0.0107	R+C
RAC-B1-3	100	1		33.0		0.0130	R+C
RAC-B3-1	100	3		59.3		0.0217	R+C
RAC-B3-2	100	3		53.9		0.0189	R+C
RAC-B3-3	100	3		36.4		0.0142	R+C
RAC-B5-1	100	5		73.8		0.0344	R+C
RAC-B5-2	100	5		67.5		0.0316	R+C
RAC-B5-3	100	5		71.4		0.0314	R+C

注:试件编号中,NAC 和 RAC 分别代表普通混凝土和再生混凝土,B 代表 BFRP 管,B 后面的数字表示所用的 BFRP 布层数,编号中最后面的数字用来区分相同设计参数的重复试件; f'_{co} 为未约束混凝土轴压强度, f'_{cc} 为约束混凝土轴压强度, ε_{co} 为未约束混凝土轴压强度对应的轴压应变, ε_{cu} 为约束混凝土的极限轴压应变;失效模式 C 代表受压失效,R 代表 BFRP 断裂。

BFRP 布时设置了长度为 150 mm 的搭接区,以防止试件在搭接部位失效,如图 1(b)所示。此外,为了防止试件在加载过程中出现两端先于中部破坏的情况,在试件两端各缠绕两层 BFRP 布条带进行加固,每个条带的宽度为 30 mm。需要说明的是,本研究将 BFRP 布预先制作成 BFRP 管,其更适合应用在新建结构中,BFRP 管一方面提供约束作用,另一方面可以充当混凝土模板;而如果将 BFRP 布直接缠绕在圆柱表面进行约束,则更适合应用在既有圆柱的加固中。

1.3 加载及测量方案

试验采用量程为 2 000 kN 的液压伺服试验机进行轴心加载,加载装置如图 2 所示。采用位移控制模式,加载速率为 0.5 mm/min。在每个试件上均布置了应变片和位移计,其中应变片布置方案如图 3 所示。对于未约束试件,在中部对称粘贴 2 个 80 mm 的环向应变片(SG1 和 SG2)和 2 个 100 mm 的纵向应变片(SG3 和 SG4),4 个应变片相隔 90°交错布置。对于 BFRP 管约束试件,在 BFRP 管中部布置 6 个 20 mm 的环向应变片(SG1 ~ SG6)和 2 个 20 mm 的纵向应变片(SG7 和 SG8),其中 2 个纵向应变片相隔 180°,5 个环向应变片均匀分布在搭接区正对的 180°区域内,1 个环向应变片位于搭接区。对于所有试件,在中部两侧对称布置 2 个位移计以测量试件中部 120 mm 高度范围内的变形。荷载数据由试验机自动采集,应变及位移数据使用静态数据采集仪采集。



图 2 加载装置

Fig. 2 Load device

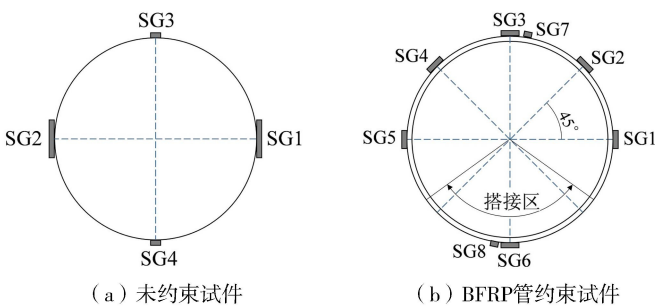


图 3 应变片布置

Fig. 3 Arrangements of strain gauges

2 试验结果与分析

2.1 试验现象及失效模式

加载初期,所有试件均表现为线弹性,即轴向荷载随位移的增加基本直线上升,试件表面并未发生明显

变化。随着荷载的持续增加,约束试件与未约束试件的受力过程开始出现显著差异,对于未约束试件,当轴向荷载增加至大约峰值荷载时,柱身出现裂缝,继续加载导致裂缝不断开展并逐渐有混凝土开始剥落;而对于 BFRP 管约束试件,当轴向荷载大约增至未约束混凝土试件的峰值荷载后,随着荷载继续增加,其荷载-位移曲线仍呈现上升趋势,直至加载后期试件才会发出细微的纤维丝断裂声,最后由于再生混凝土的侧向膨胀导致搭接区外的 BFRP 管突然发生环向断裂,荷载急剧下降,试件失效。典型试件的失效模式如图 4 所示。与既有研究中钢管约束混凝土柱相比,虽然 FRP 管与钢管的约束机理相似,但是普通钢材是弹塑性材料,随着核心混凝土的侧向膨胀,钢管会发生屈服以及鼓曲^[12,25-26],使得侧向约束效果受到影响;而 FRP 是线弹性材料,FRP 管的约束应力随着核心混凝土的侧向膨胀逐渐增大,直至 FRP 在环向被拉断。

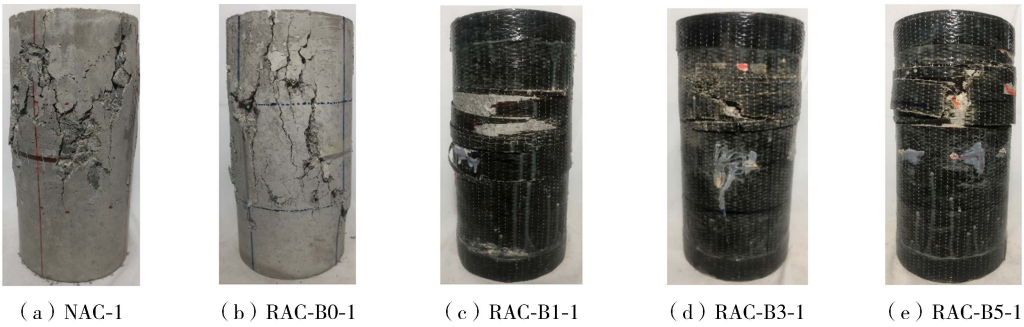


图 4 典型试件的失效模式

Fig.4 Failure modes of typical specimens

2.2 轴压应力-应变曲线

图 5 为未约束以及 BFRP 管约束再生混凝土圆柱的轴压应力-应变曲线,其中横坐标为负的部分表示轴压应力 σ_c 和环向应变 ε_l 的关系,横坐标为正的部分表示 σ_c 和轴压应变 ε_c 的关系。图 5 中的 σ_c 为轴压荷载与圆柱横截面积的比值, ε_c 基于位移计得到, ε_l 基于应变片得到。可以看出,不同层数 BFRP 管约束的再生混凝土试件的轴压应力-应变曲线形状相似,大致可分为两段。第一段与未约束再生混凝土试件的应力-应变曲线几乎重合,此阶段由于混凝土侧向膨胀很小,BFRP 管的约束作用并未有效发挥;在大约达到未约束试件的峰值应力后,应力-应变曲线进入第二阶段,由于 BFRP 管的约束作用,轴压应力随应变的增加而持续上升,出现硬化段,但斜率较第一段有所下降。然而,未约束试件应力-应变曲线在达到峰值应力后出现软化现象。此外,BFRP 层数对再生混凝土的极限轴压应力(轴压强度)和变形能力有显著影响,随着 BFRP 层数的增加,约束再生混凝土的轴压强度和极限轴压应变显著增大,但是 BFRP 层数对极限环向应变影响不大。

2.3 膨胀性能

为了说明 BFRP 管约束再生混凝土圆柱的膨胀性能,图 6 为 BFRP 管约束试件的典型环向应变-轴压应变曲线。开始阶段,环向应变随着轴压应变的增大而变化很小,说明在此阶段 BFRP 管发挥的约束作用非常小。随着轴压应变的增大,环向应变随轴压应变基本上线性增加,说明 BFRP 管发挥的约束作用越来越大。此外,在相同的轴压应变下,环向应变的绝对值随着 BFRP 层数的增加而逐渐减小,说明再生混凝土的侧向膨胀随着 BFRP 层数的增加而逐渐变小,因此 BFRP 管的侧向约束效果随着 BFRP 层数的增加而逐渐提高。

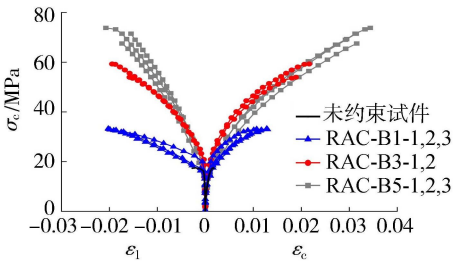


图 5 BFRP 层数对试件应力-应变曲线的影响

Fig.5 Effects of number of BFRP layers on stress-strain curves of specimens

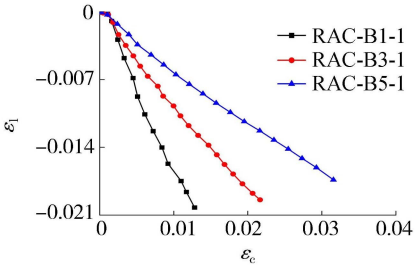


图 6 典型试件的环向应变-轴压应变曲线

Fig.6 Hoop strain-axial compressive strain curves of typical specimens

2.4 轴压强度

由图 7 可知,随着 BFRP 层数的增大,约束再生混凝土试件的轴压强度几乎呈线性增长。1 层、3 层和 5 层 BFRP 约束试件的轴压强度分别比未约束试件轴压强度提高了 78%、205% 和 281%。结合表 1 数据发现,在本文 100% 骨料取代率下,再生混凝土的轴压强度相比普通混凝土显著降低,下降幅度达到 35.2%,然而即使仅使用 1 层 BFRP 约束,约束再生混凝土的轴压强度(平均值为 33.1 MPa)即可超过对应的普通混凝土轴压强度(平均值为 28.7 MPa),充分说明 BFRP 管约束对再生混凝土圆柱抗压能力的提升作用非常显著。

2.5 极限轴压应变

由图 8 可知,随着 BFRP 层数的增大,极限轴压应变逐渐增大。1 层、3 层和 5 层 BFRP 约束试件的极限轴压应变分别比未约束试件提高了 6.16 倍、10.91 倍和 18.10 倍,充分说明 BFRP 管约束可以大幅提高再生混凝土的变形能力。

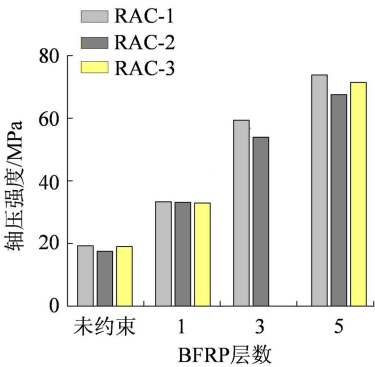


图 7 BFRP 层数对轴压强度的影响

Fig.7 Effect of number of BFRP layers on the axial compressive strength

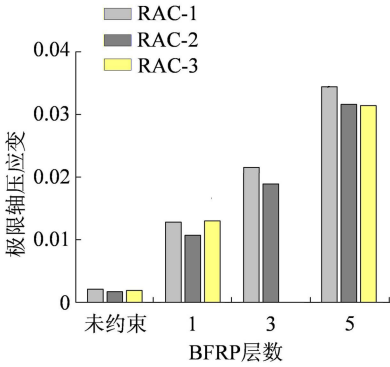


图 8 BFRP 层数对极限轴压应变的影响

Fig.8 Effect of number of BFRP layers on the ultimate axial compressive strain

3 FRP 约束混凝土圆柱轴压强度和极限轴压应变模型评估

国内外学者提出了大量 FRP 约束混凝土轴压强度和极限轴压应变的理论模型,本文选取其中 3 个典型模型,评估其对 BFRP 管约束再生混凝土圆柱的适用性,3 个模型的表达式见表 2。通过模型计算值与试验值比值的平均值(A)、标准差(S)以及计算值与试验值的平均绝对误差(E)评价各模型的预测精度。

表 2 典型的 FRP 约束混凝土圆柱轴压强度和极限轴压应变模型

Table 2 Typical models for axial compressive strength and ultimate axial compressive strain of FRP confined concrete cylinders

理论模型	轴压强度公式	极限轴压应变公式
Samaan 模型 ^[28]	$f'_{cc}/f'_{co}=1+6.0f_1^{0.7}/f'_{co}$	$\varepsilon_{cu}=(f'_{cc}-f'_{co})/E_2$ $E_2=245.61f_{co}^{0.2}+1.3456E_ft_f/D$
Lam 和 Teng 模型 ^[29]	$f'_{cc}/f'_{co}=1+3.3f_1/f'_{co}$	$\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}=1.75+12(f_1/f'_{co})(\varepsilon_1/\varepsilon_{co})^{0.45}$
Xiao 模型 ^[30]	$f'_{cc}/f'_{co}=1+3.24(f_1/f'_{co})^{0.8}$	$\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}=1+17.4(f_1/f'_{co})^{1.06}$

注: f_1 为侧向约束应力, E_2 为应力-应变曲线第二阶段的斜率, E_f 、 t_f 分别为 FRP 的弹性模量和厚度, D 为圆柱直径。

由表 3 可知, Lam 和 Teng 模型^[28] 的轴压强度计算值与试验值的比值仅有 0.9, 说明该模型低估了本文 BFRP 管约束再生混凝土的轴压强度, 而 Xiao 模型^[29] 对轴压强度的预测又偏高, 而且这 2 个模型的平均误差都大于 10%。相比较而言, Samaan 模型^[27] 的预测结果较好, 计算值与试验值的比值为 0.97, 平均误差仅为 5.84%。

表 3 典型 FRP 约束混凝土圆柱模型的预测结果评估

Table 3 Evaluation of predicted results from typical models of FRP confined concrete cylinders

理论模型	轴压强度的评价指标			极限轴压应变的评价指标		
	A	S	E/%	A	S	E/%
Samaan 模型 ^[27]	0.97	0.069	5.84	1.42	0.253	42.43
Lam 和 Teng 模型 ^[28]	0.90	0.068	10.05	1.40	0.240	40.10
Xiao 模型 ^[29]	1.10	0.069	10.57	0.93	0.246	20.07

由表 3 可知,Samaan 模型^[27]与 Lam 和 Teng 模型^[28]极大地高估了本文 BFRP 管约束再生混凝土圆柱的极限轴压应变,且平均误差均在 40% 以上,而 Xiao 模型^[29]的计算值与试验值的比值为 0.93,平均误差约 20%。相对而言,Xiao 模型^[29]对本文 BFRP 管约束再生混凝土圆柱极限轴压应变的预测结果较好。综合轴压强度和极限轴压应变的对比结果可知,3 个典型模型对 BFRP 管约束再生混凝土圆柱的预测精度还不足,仍需进一步改进并提出更高精度的 BFRP 管约束再生混凝土圆柱理论模型。

4 结 论

a. BFRP 管约束再生混凝土圆柱的破坏模式表现为 BFRP 环向断裂导致的圆柱承载力急剧下降。在本文研究条件下,BFRP 管约束再生混凝土的应力-应变曲线表现出两阶段特征,具有明显的硬化现象,而未约束再生混凝土的应力-应变曲线在达到峰值应力后出现软化现象。

b. BFRP 管约束可以显著提高再生混凝土的力学性能,本文约束再生混凝土的轴压强度比未约束混凝土提高了 78%~281%,极限轴压应变比未约束混凝土提高了 6.16~18.10 倍,明显高于相同配合比下的普通混凝土的轴压强度和极限轴压应变。而且随着 BFRP 层数的增加,约束再生混凝土的侧向膨胀变小,轴压强度和极限轴压应变显著增大,但是极限环向应变基本不变。

c. 对 3 个典型 FRP 约束普通混凝土圆柱轴压强度和极限轴压应变模型在 BFRP 管约束再生混凝土中的适用性进行了评估。发现采用的 FRP 约束普通混凝土圆柱模型在预测 BFRP 约束再生混凝土时很难兼顾轴压强度和极限轴压应变的预测精度。因此,还需进一步提出适合 BFRP 管约束再生混凝土圆柱的轴压强度和极限轴压应变理论模型。

参考文献:

[1] 曹元辉,王胜杰,王勇,等.我国建筑垃圾综合利用现状及未来发展趋势[J].中国建材,2021(9):118-121. (CAO Yuanhui, WANG Shengjie, WANG Yong, et al. Development status and future trend in comprehensive utilization of construction waste in China[J]. China Building Materials, 2021(9):118-121. (in Chinese))

[2] 肖建庄,李佳彬,孙振平,等.再生混凝土的抗压强度研究[J].同济大学(自然科学版),2004,32(12):1558-1561. (XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, SUN Zhenping, et al. Study on compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(12):1558-1561. (in Chinese))

[3] 周静海,何海进,孟宪宏,等.再生混凝土基本力学性能试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(3):464-468. (ZHOU Jinghai, HE Haijin, MENG Xianhong, et al. Basic mechanical properties of recycled concrete experimental study[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2010, 26(3):464-468. (in Chinese))

[4] 陈宗平,占东辉,徐金俊.再生粗骨料含量对再生混凝土力学性能的影响分析[J].工业建筑,2015,45(1):130-135. (CHEN Zongping, ZHAN Donghui, XU Jinjun. Research on mechanical properties of recycled concrete using different recycled coarse aggregate replacement[J]. Industrial Construction, 2015, 45(1):130-135. (in Chinese))

[5] 李孝忠,王庆贺,王玉银,等.再生混凝土抗折强度的影响因素及其计算方法[J].建筑结构学报,2019,40(1):155-164. (LI Xiaozhong, WANG Qinghe, WANG Yuyin, et al. Influence factors and prediction methods for flexural strength of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1):155-164. (in Chinese))

[6] 刘震宇,秦鸿根,刘冠国,等.再生混凝土力学性能提升技术与应用[J].水利水电科技进展,2017,37(1):90-94. (LIU Zhenyu, QIN Honggen, LIU Guanguo, et al. Technique for improvement of mechanical properties of recycled concrete and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1):90-94. (in Chinese))

[7] LIU T J, WANG Z Z, ZOU D J, et al. Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 122:72-82.

[8] 肖建庄,李标,张凯建,等.纳米二氧化硅改性再生混凝土的单轴受压动态力学性能[J].同济大学学报(自然科学版),2021,49(1):30-39. (XIAO Jianzhuang, LI Biao, ZHANG Kaijian, et al. Dynamic mechanical properties of nano-silica modified recycled aggregate concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(1):30-39. (in Chinese))

[9] 高丹盈,景嘉骅,周潇.混杂纤维增强再生砖骨料混凝土增强机制与抗压性能计算方法[J].复合材料学报,2018,35(12):3441-3449. (GAO Danying, JING Jiahua, ZHOU Xiao. Reinforcing mechanism and calculation method of compressive behavior of hybrid fiber reinforced recycled aggregates concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12):3441-3449. (in Chinese))

[10] 王兴国,姜茂林,张向冈,等.钢管再生混凝土柱力学性能研究进展[J].铁道科学与工程学报,2021,18(5):1256-1266. (WANG Xingguo, JIANG Maolin, ZHANG Xianggang, et al. Research progress on mechanical property for recycled aggregate

- concrete-filled steel tubular columns[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2021,18(5):1256-1266. (in Chinese))
- [11] HARRIES K A,KHAREL G. Experimental investigation of the behavior of variably confined concrete[J]. Cement and Concrete Research,2003,33(6):873-880.
- [12] 张向冈,周高强,范玉辉,等. 圆钢管玄武岩纤维再生混凝土短柱轴压力学性能[J]. 复合材料学报,2023,40(1):1-14. (ZHANG Xianggang,ZHOU Gaoqiang,FAN Yuhui,et al. Axial compressive property of circular steel tubular stub column filled with basalt-fiber reinforced recycled-concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2023,40(1):1-14. (in Chinese))
- [13] 李悦媛,许巍,张俊,等. 纤维网格布表层强化混凝土早期开裂特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):114-122. (LI Yueyuan,XU Wei,ZHANG Jun,et al. Early cracking characteristics of concrete strengthened with fiber mesh[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):114-122. (in Chinese))
- [14] 胡成,翁兴中,朱懋江,等. 纤维网格布表层强化混凝土抗冻性能[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):84-92. (HU Cheng,WENG Xingzhong,ZHU Maojiang,et al. Frost resistance performance of surface reinforced concrete with fiber mesh [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):84-92. (in Chinese))
- [15] 王海涛,吴刚,张磊. FRP板修复开裂钢板的应力强度因子影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):440-445. (WANG Haitao,WU Gang,ZHANG Lei. Influencing factor analysis of stress intensity factor for FRP-strengthened cracked steel plates[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(5):440-445. (in Chinese))
- [16] 王海涛,朱长玉,熊浩,等. 锚固方法和预应力水平对 CFRP板加固钢筋混凝土梁抗弯性能的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):104-110. (WANG Haitao,ZHU Changyu,XIONG Hao,et al. Effects of anchorage method and prestressing level on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):104-110. (in Chinese))
- [17] 吴刚,吕志涛. 纤维增强复合材料(FRP)约束混凝土矩形柱应力-应变关系的研究[J]. 建筑结构学报,2004,25(3):99-106. (WU Gang,LYU Zhitao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete rectangular columns[J]. Journal of Building Structures,2004,25(3):99-106. (in Chinese))
- [18] 欧阳利军,许峰,高皖扬,等. 玄武岩纤维布约束高温损伤混凝土方柱轴压力学性能试验[J]. 复合材料学报,2019,36(2):469-481. (OUYANG Lijun,XU Feng,GAO Wanyang,et al. Axial compressive behavior of post-heated square concrete columns wrapped by BFRP sheets: an experimental investigation[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2019,36(2):469-481. (in Chinese))
- [19] 肖建庄,杨洁. 玻璃纤维增强塑料约束再生混凝土轴压试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2009,37(12):1586-1591. (XIAO Jianzhuang,YANG Jie. On recycled concrete confined by GFRP tube under axial compression[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2009,37(12):1586-1591. (in Chinese))
- [20] 马辉,崔航,李哲,等. 玻璃纤维管约束再生混凝土柱轴压性能研究[J]. 应用力学学报,2019,36(1):209-218. (MA Hui,CUI Hang,LI Zhe,et al. Axial compression performance and bearing capacity of restrained recycled concrete columns with glass fiber tube[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2019,36(1):209-218. (in Chinese))
- [21] CHEN G M,ZHANG J J,WU Y F,et al. Stress-Strain behavior of FRP-confined recycled aggregate concrete in square columns of different sizes[J]. Journal of Composites for Construction,2021,25(5):04021040.
- [22] CHEN G M,ZHANG J J,JIANG T,et al. Compressive behavior of CFRP-confined recycled aggregate concrete in different-sized circular sections[J]. Journal of Composites for Construction,2018,22(4):04018021.
- [23] GAO C,HUANG L,YAN L B,et al. Behavior of glass and carbon FRP tube encased recycled aggregate concrete with recycled clay brick aggregate[J]. Composite Structures,2016,155:245-254.
- [24] 吴智深. 玄武岩纤维及其复合材料作为建材的创新应用[J]. 江苏建材,2018(4):15-22. (WU Zhishen. Innovative application of basalt fiber and its composites as building materials[J]. Jiangsu Building Materials,2018(4):15-22. (in Chinese))
- [25] 郭云龙,耿悦,洪宗海. 圆钢管约束混凝土轴压构件长期持荷后受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(增刊2):256-263. (GUO Yunlong,GENG Yue,HONG Zonghai. Mechanical behavior of steel tube confined reinforced concrete stub columns after long-term service loading[J]. Journal of Building Structures,2021,42(Sup2):256-263. (in Chinese))
- [26] 陈宗平,张士前,王妮,等. 钢管再生混凝土轴压短柱受力性能的试验与理论分析[J]. 工程力学,2013,30(4):107-114. (CHEN Zongping,ZHANG Shiqian,WANG Ni,et al. Experimental study and theoretical analysis on axial compress capacity of recycled aggregate concrete-filled circle steel tube short column [J]. Engineering Mechanics,2013,30(4):107-114. (in Chinese))
- [27] SAMAAN M,MIRMIRAN A,SHAHAWY M. Model of concrete confined by fiber composites [J]. Journal of Structural Engineering,1998,124(9):1025-1031.
- [28] LAM L,TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. Construction and Building Materials,2003,17(6/7):471-489.
- [29] XIAO Q G,TENG J G,YU T. Behavior and modeling of confined high-strength concrete [J]. Journal of Composites for Construction,2010,14(3):249-259.