

圆钢管玄武岩纤维再生混凝土短柱轴压力学性能

张向冈 周高强 范玉辉 高翔 冷发光 汪昉

Axial compressive property of circular steel tubular stub column filled with basalt fiber reinforced recycled concrete

ZHANG Xianggang, ZHOU Gaoqiang, FAN Yuhui, GAO Xiang, LENG Faguang, WANG Fang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220317.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玄武岩纤维增强聚合物筋增强珊瑚礁砂混凝土柱轴压试验

Axial compression test of basalt fiber reinforced polymer reinforced coral reef and sand aggregate concrete column

复合材料学报. 2020, 37(10): 2428–2438 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200219.003>

CFRP约束钢管-活性粉末混凝土短柱轴压性能

Axial compression behaviour of CFRP confined reactive power concrete filled steel tube stub columns

复合材料学报. 2021, 38(2): 439–448 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200608.003>

碳纤维增强环氧树脂复合材料-铝合金短柱力学性能

Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy composite-aluminium alloy stub column

复合材料学报. 2021, 38(4): 1115–1127 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200806.001>

玄武岩纤维布增强树脂基复合材料约束高温损伤混凝土轴压力学性能

Axial compressive behavior of basalt fiber reinforced polymer-confined damaged concrete after exposed to elevated temperatures

复合材料学报. 2018, 35(8): 2002–2013 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170926.002>

圆钢管自应力钢渣增强混凝土柱的受力机制及承载力计算

Mechanical behavior and bearing capacity calculation of self-stressing steel slag aggregate reinforced concrete filled circular steel tube columns

复合材料学报. 2020, 37(5): 1211–1220 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190916.001>

玄武岩-碳纤维/矿渣混凝土力学性能正交试验

Orthogonal experiment on mechanical properties of basalt fiber-carbon fiber/slag concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1743–1753 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190930.001>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220317.004

圆钢管玄武岩纤维再生混凝土短柱
轴压力学性能



分享本文

张向冈^{1,2,3}, 周高强², 范玉辉^{*2}, 高翔², 冷发光^{1,3}, 汪昉²

(1. 建筑安全与建筑环境国家重点实验室, 北京 100013; 2. 河南理工大学 土木工程学院, 焦作 454003;
3. 国家建筑工程技术研究中心, 北京 100013)

摘要: 为研究圆钢管玄武岩纤维再生混凝土 (BFRR) 短柱的轴压力学性能, 以再生粗骨料取代率和玄武岩纤维掺量为变化参数, 设计并完成了 15 根圆钢管 BFRR 短柱试件的轴压试验。观察了试件的受力全过程及破坏形态, 获取了试件的荷载-位移曲线及荷载-应变曲线, 分析了变化参数对圆钢管 BFRR 短柱轴压性能的影响, 建立了可行的组合截面应力-应变全过程曲线方程。研究表明: 试件均发生鼓曲破坏, 但核心混凝土在钢管约束下处于碎而不散状态; 随着再生粗骨料取代率的增大, 试件的耗能性能、延性系数逐渐增大, 耗能因子、延性系数提升幅度最高可达 1.84% 和 10.36%, 承载力逐渐降低, 降低幅度最大达 5.03%; 随着玄武岩纤维掺量的增大, 试件的耗能性能、延性系数逐渐增大, 增加幅度最高可达 2.97% 和 4.93%, 承载力提高幅度不大; 不同的玄武岩纤维掺量下, 试件实测的荷载-位移曲线饱满, 且具有较长的变形流幅, 延性较好。
关键词: 圆钢管玄武岩纤维再生混凝土; 短柱; 轴向受压; 力学性能; 组合截面应力-应变全过程曲线

中图分类号: TU398.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2023)01-0369-14

Axial compressive property of circular steel tubular stub column filled with basalt fiber reinforced recycled concrete

ZHANG Xianggang^{1,2,3}, ZHOU Gaoqiang², FAN Yuhui^{*2}, GAO Xiang², LENG Faguang^{1,3}, WANG Fang²

(1. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China;
2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;
3. National Engineering Research Center of Building Technology, Beijing 100013, China)

Abstract: To study the axial compressive performance of basalt fiber reinforced recycled concrete (BFRR)-filled circular steel tubular stub columns, the replacement ratio of recycled coarse aggregate and the content of basalt fiber were designed as the variable parameters and the axial compression performance tests on 15 BFRR-filled circular steel tubular stub column specimens were carried out. The failure mode and whole loading process of the specimen were characterized. The load-displacement and load-strain curves of the specimen were obtained. The influence of design parameter on the BFRR-filled circular steel tubular stub column specimens was analyzed. A feasible full-curve equation of composite-section stress versus strain was established. It is observed that the specimen undergoes buckling damage, but the internal BFRR is crushed but “broken and not scattered”. On increasing the replacement ratio of recycled coarse aggregate, the energy dissipation capacity and ductility coefficient of the specimen are gradually increased, the maximum increasing extent for energy dissipation capacity and ductility

收稿日期: 2021-12-06; 修回日期: 2022-02-17; 录用日期: 2022-03-08; 网络首发时间: 2022-03-18 16:42:45
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220317.004>
基金项目: 建筑安全与环境国家重点实验室暨国家建筑工程技术研究中心开放课题基金 (BSBE2019-06); 河南省高校基本科研业务费专项 (NSFRF200320); 河南理工大学青年骨干教师资助计划项目 (2019XQG-15); 国家自然科学基金 (U1904188)
Opening Funds of State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment & National Engineering Research Center of Building Technology (BSBE2019-06); Fundamental Research Funds for the Universities of Henan Province (NSFRF200320); Young Backbone Teachers Funding Scheme of Henan Polytechnic University (2019XQG-15); National Natural Science Foundation of China (U1904188)
通信作者: 范玉辉, 博士, 讲师, 研究方向为混凝土结构及其耐久性研究和建筑废弃物资源化利用等领域 E-mail: fyhzzdx2003@hpu.edu.cn
引用格式: 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): 369-382.
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): 369-382(in Chinese).

coefficient are 1.84% and 10.36%, respectively, whereas the bearing capacity is gradually decreased, and the maximum increasing extent of bearing capacity is 5.03%. On increasing the basalt fiber content, the energy dissipation capacity and ductility coefficient of the specimen are gradually increased, the maximum increasing extent for energy dissipation capacity and ductility coefficient are 2.97% and 4.93%, respectively, whereas little increase appears about the bearing capacity. The measured load-displacement curve of the specimen with different basalt fiber content is full, and it has a long deformation flow, which presents satisfactory ductility.

Keywords: circular steel tubular stub column filled with basalt fiber reinforced recycled concrete; stub column; axial compression; mechanical property; composite-section stress-strain curve

再生混凝土 (Recycled aggregate concrete, RAC) 指将建筑废弃物进行回收利用, 经过破碎、清洗与分级等工序之后, 按照设计的比例与级配将其混合形成再生骨料, 部分甚至全部替代砂石等天然粗细骨料, 再加入水和水泥所配制的一种新型绿色环保混凝土^[1-3], 其有效地处理了建筑垃圾, 实现了建筑资源的可持续发展及响应了全球低碳经济发展的要求^[4-6], 成为混凝土研究领域的一个热点问题。

基于此, 国内外的学者对 RAC 的基本性能与应用, 特别是针对钢管再生混凝土 (Recycled aggregate concrete filled steel tube, RACFST) 等组合结构的应用进行了广泛的研究^[7-9]。由于 RACFST 在有效处理建筑废弃物的同时, 又具有钢管混凝土结构承载力高、抗震性能好等优点, 在地震区的高层及超高层建筑之中将会具有良好的应用前景和推广价值^[10-12]。

目前, 对 RACFST 结构的力学性能开展了一定的研究, 马辉等^[13]进行了圆钢管型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究, 得到了再生骨料取代率对轴压承载力的影响规律, 提出了该组合柱的轴压承载力公式。陈梦成等^[14]对不同锈蚀水平下的圆 RACFST 短柱进行试验研究, 并用有限元软件进行模拟, 试验结果与模拟结果基本吻合。柯晓军等^[15]通过高温后方 RACFST 短柱在不同冷却方式下的轴压力学性能研究, 得出喷水冷却与自然冷却相比, 试件剩余承载力和初始刚度降低更大的结论。杨有福等^[16]对矩形 RACFST 短柱进行试验研究, 得到了截面长宽比和再生粗骨料取代率对试件的影响规律, 并建立相应的有限元模型。刘坚等^[17]提出了圆钢管 H 型钢再生混凝土短柱轴压承载力计算公式, 计算值与文献试验数据吻合较好。Li 等^[18]研究了不同高温条件下 RACFST 短柱的抗压性能, 结果发现再生骨料取代率和温度越高, RACFST 柱的抗压强度和弹性模量越差。综上所述, 部分学者认为再生粗骨料取代率对于

承载力影响不大, 但也有学者认为再生粗骨料取代率的增大引起了 RACFST 的强度下降。综合分析发现, 之所以出现观点不一致的主要原因与是否考虑再生骨料本身的吸水特性有关。在破坏形态方面, 研究结论基本相同, 普遍认为 RACFST 的破坏过程和形态与钢管普通混凝土大体相似。

现阶段的研究对象大多与 RACFST 有关, 对 RAC 复合约束的研究偏少, 尤其对基于玄武岩纤维的钢管再生混凝土柱的研究更是少之又少。在一定程度上, 玄武岩纤维来源充足, 相对容易获取, 能够节约成本, 且和混凝土具有较好的相容性^[19-20], 适量掺入于 RAC 中有利于提高 RAC 抗折、劈裂抗拉和抗压强度, 改善 RAC 抗裂和变形性能^[21-22]。同时, 通过外部圆钢管的进一步约束, 大幅度提高 RAC 的力学性能^[23-24]。

因此, 本文提出了钢管玄武岩纤维再生混凝土结构, 旨在通过玄武岩纤维与钢管的复合约束, 大幅度地改善再生骨料的不良品质, 促进建筑垃圾的循环利用幅度, 从而实现建筑垃圾高效的资源化利用^[25-26]。为此, 以再生粗骨料取代率和玄武岩纤维掺量为变化参数, 本文制作了 15 个圆钢管玄武岩纤维再生混凝土短柱试件, 开展轴压性能试验, 揭示其破坏机制, 分析其轴压承载性能, 为钢管玄武岩纤维再生混凝土结构的进一步研究和推广应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

以再生粗骨料取代率 δ 、玄武岩纤维 (BF) 掺量 λ 为变化参数, 设计了 15 个圆钢管玄武岩再生混凝土短柱试件。其中, 再生粗骨料取代率包括 0%、25%、50%、75% 和 100% 这 5 种工况, BF 掺量包括 0 kg/m^3 、 2 kg/m^3 和 4 kg/m^3 这 3 种工况。

配制 C40 RAC 所采用的材料组分为 P-O 42.5 级水泥、天然黄砂、城市自来水、II 级粉煤灰、减水剂及天然粗骨料和再生粗骨料。再生粗骨料由河南理工大学结构大厅试验后的钢筋混凝土梁

经过人工破碎、筛选、清洗、晒干而得，原混凝土设计强度为 C25。不同取代率下 RAC 的配合比见表 1。其中，附加水是考虑再生粗骨料吸水率后需要额外增加的用水；Ⅱ级粉煤灰细度为 43 μm，密度为 2.34 g/cm³，用量取为水泥用量的 20%；减水剂用量取为胶凝材料（水泥和粉煤灰）的 0.5%。采用短切玄武岩纤维，外径、长度和密度分别为 15 μm、18 mm 和 2 650 kg/m³，抗拉强度、弹性模量和断裂伸长率分别为 4 500 MPa、104 GPa 和 3.1%。依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[27]，测得玄武岩纤维再生混凝土 (Basalt fiber reinforced recycled concrete, BFRRC) 的力学性能指标，见表 2。

圆钢管由直缝焊接而成，其中，外径 D 为 159 mm，壁厚 t 为 3.5 mm，高度 480 mm，根据《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[28]，

实测的钢管屈服强度与极限强度分别为 336.54 MPa 和 417.42 MPa，弹性模量、屈服应变和泊松比分别为 178 GPa、1 891×10⁻⁶ 和 0.32。

按照设计尺寸，切割钢管，并对两端截面刨平。为使荷载均匀传递，在试件两端分别焊接 180 mm×180 mm×8 mm 的盖板，盖板应与钢管的几何中心对中。先焊接钢管的一端，然后将 BFRRC 从顶部分层浇筑，并振捣密实。待 BFRRC 收缩完毕后，用同比例的水泥砂浆在浇筑端找平，7 天后，焊接另外一端的盖板，试件与 BFRRC 材料试块同条件自然养护，试件具体设计参数见表 3。

1.2 加载及测量装置

试验采用长春新试验机有限责任公司制造的微机控制电液伺服压力试验机 (YAW-5000 型)，最大试验力为 5 000 kN。试件安装时，保证试件上

表 1 再生混凝土 (RAC) 的配合比
Table 1 Mix ratio of recycled aggregate concrete (RAC)

$\delta/\%$	Water-binder ratio	Sand ratio/%	Net water/(kg·m ⁻³)	Additional water/(kg·m ⁻³)	Cement/(kg·m ⁻³)	Fly-ash/(kg·m ⁻³)	Recycled coarse aggregate/(kg·m ⁻³)	Nature coarse aggregate/(kg·m ⁻³)	Sand/(kg·m ⁻³)	Water reducer/(kg·m ⁻³)
0	0.40	31	205	0.0	427.1	85.4	0.0	1 115.2	501	2.56
25	0.40	31	205	15.6	427.1	85.4	278.8	836.4	501	2.56
50	0.40	31	205	31.2	427.1	85.4	557.6	557.6	501	2.56
75	0.40	31	205	46.8	427.1	85.4	836.4	278.8	501	2.56
100	0.40	31	205	62.5	427.1	85.4	1 115.2	0.0	501	2.56

Note: δ —Replacement ratio of recycled coarse aggregate.

表 2 RAC 实测强度指标
Table 2 Measured strength index of RAC

Specimen	$\delta/\%$	$\lambda/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	f_{cu}/MPa	f_c/MPa	f_c/f_{cu}	E_c/GPa	ν
NAC	0	0	37.4	31.8	0.85	24.70	0.20
RAC(25%)	25	0	36.5	28.5	0.78	16.80	0.23
RAC(50%)	50	0	34.2	26.0	0.76	16.60	0.25
RAC(75%)	75	0	32.9	23.8	0.72	13.30	0.26
RAC(100%)	100	0	32.7	23.2	0.71	15.20	0.27
2BF/NAC	0	2	37.9	32.9	0.87	24.80	0.16
2BF/RAC(25%)	25	2	37.0	29.0	0.78	19.01	0.17
2BF/RAC(50%)	50	2	34.9	26.7	0.77	18.48	0.19
2BF/RAC(75%)	75	2	33.8	24.6	0.73	14.60	0.20
2BF/RAC(100%)	100	2	33.1	23.7	0.72	13.42	0.22
4BF/NAC	0	4	38.7	33.1	0.86	28.40	0.14
4BF/RAC(25%)	25	4	37.6	29.4	0.78	21.47	0.16
4BF/RAC(50%)	50	4	36.2	27.5	0.76	18.91	0.18
4BF/RAC(75%)	75	4	35.1	25.8	0.74	19.06	0.19
4BF/RAC(100%)	100	4	34.2	24.0	0.70	18.27	0.21

Notes: λ —Mass of basalt fiber added to 1 m³ RAC; f_{cu} —Cubic compressive strength; f_c —Axial compressive strength; E_c —Elastic modulus, which is the secant modulus of the stress-strain curve from origin to 0.4 f_c ; ν —Poisson’s ratio, which is the ratio of the transverse strain to the longitudinal strain of basalt fiber reinforced recycled concrete (BFRRC) at 0.4 f_c stress.

表 3 圆钢管玄武岩纤维再生混凝土 (BFRRC) 短柱具体设计参数及实测峰值承载力

Table 3 Specific design parameters and measured peak bearing capacity of the basalt fiber reinforced recycled concrete (BFRRC)-filled circular steel tubular stub column specimens

Specimen	α	ξ	f_c/MPa	N_u/kN
NAC	0.0942	0.997	31.8	1 484.0
RAC(25%)	0.0942	1.113	28.5	1 475.0
RAC(50%)	0.0942	1.220	26.0	1 470.2
RAC(75%)	0.0942	1.332	23.8	1 415.4
RAC(100%)	0.0942	1.367	23.2	1 357.1
2BF/NAC	0.0942	0.964	32.9	1 554.2
2BF/RAC(25%)	0.0942	1.093	29.0	1 536.7
2BF/RAC(50%)	0.0942	1.188	26.7	1 468.2
2BF/RAC(75%)	0.0942	1.289	24.6	1 418.1
2BF/RAC(100%)	0.0942	1.338	23.7	1 346.8
4BF/NAC	0.0942	0.958	33.1	1 499.2
4BF/RAC(25%)	0.0942	1.079	29.4	1 490.4
4BF/RAC(50%)	0.0942	1.153	27.5	1 446.7
4BF/RAC(75%)	0.0942	1.229	25.8	1 426.9
4BF/RAC(100%)	0.0942	1.321	24.0	1 369.9

Notes: α —Steel ratio, $\alpha=A_s/A_c$, where A_s and A_c are the cross-sectional area of the steel tube and internal concrete, respectively; ξ —Confinement coefficient, $\xi=\alpha f_y/f_c$; N_u —Test value of the ultimate bearing capacity of the specimen; NAC—Natural aggregate concrete; f_y —Yield strength of steel tube. In the naming method of a specimen, for example, in 2BF/RAC(25%), 2 represents the basalt fiber content of 2 kg/m³, 25% is the replacement ratio of recycled coarse aggregate.

下段与压力试验机上下承压板中心重合。应变由武汉优泰电子技术有限公司静态应变仪 (uT7116) 通过计算机采集。同时, 在试验机上下承压板上分别布置 1 个量程为 50 mm 的位移计, 加载装置和测点布置如图 1 所示。

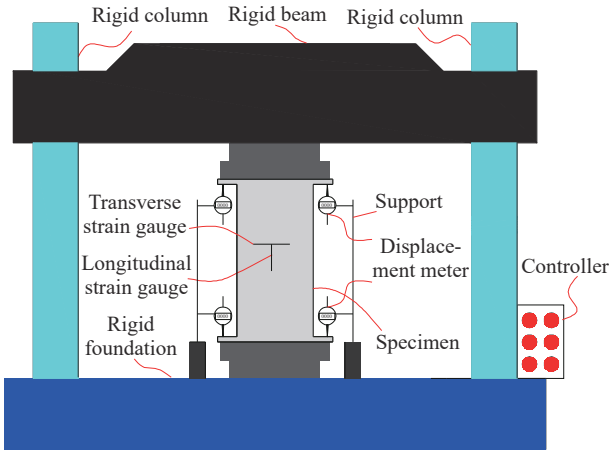


图 1 加载装置及测点布置示意图

Fig. 1 Schematic of loading device and measured point arrangement

正式试验前, 预加载至试件极限荷载的 10%, 持荷 2 min, 然后卸载, 循环加载 3 次; 开始正式加载时, 采用荷载分级控制, 在 0.7 倍的极限荷载之前, 分级荷载取为极限荷载的 1/20; 在达到 0.7 倍的极限荷载之后, 分级荷载取为极限荷载的 1/30; 在达到 0.9 倍的极限荷载时, 转为位移控制, 位移级差约为 3 mm; 当荷载下降至极限荷载的 70% 或若荷载下降段不明显但压缩变形量达

到 6 cm 时, 试验结束。

2 试验结果及讨论

2.1 圆钢管 BFRRC 短柱轴压试验过程及破坏形态

所有试件的受力过程基本相似。在加载初期, 试件均处于弹性阶段, 所有试件的轴向变形很小, 外观变化不明显; 当荷载达到极限荷载的 50%~60% 时, 钢管表面的铁锈逐渐脱落, 荷载-位移曲线斜率出现变化, 钢管内部 BFRRC 微裂缝逐渐发展, 并产生轴向变形, 但由于钢管约束作用, BFRRC 处于三轴受力状态, 钢管处于环向与径向受拉、轴向受压状态; 当荷载达到极限荷载的 90% 时, BFRRC 微裂缝不断扩展, 由于钢管轴向刚度不断下降, 试件上端部出现向外鼓曲的现象, 此时钢管已经达到材料屈服强度, 并伴有微弱的劈裂声音的出现; 当荷载继续增大时, 钢管鼓曲现象严重, 斜向鼓曲环基本形成; 当加载至极限荷载时, 钢管壁出现第二、三道鼓曲环; 继续加载后, 部分试件会出现第四道鼓曲环; 直至试验结束, 由于钢管已超过材料极限强度, 钢管出现竖向撕裂现象。

试件的破坏形态如图 2 所示。可见, 在轴心受压作用下, 钢管玄武岩纤维再生混凝土试件外部钢管发生了鼓曲甚至撕裂破坏, 属于材料强度破坏的范畴。其中, 试件中部和上部均出现向外鼓曲的现象, 根部向外鼓曲现象较弱, 这是由于在 BFRRC 振捣过程中, 再生粗骨料由于自身重力

沉降，使试件根部再生粗骨料相较于上部和中部更加致密，具有更优良的承载能力。因此，试件根部没有出现较明显的鼓曲环。



(a) $\lambda=0\text{ kg/m}^3$



(b) $\lambda=2\text{ kg/m}^3$



(c) $\lambda=4\text{ kg/m}^3$

图2 圆钢管 BFRRC 短柱破坏形态

Fig.2 Failure mode of BFRRC-filled circular steel tubular stub column specimens

试验结束以后，切割、剥开较典型的破坏试件，观察试件内部核心 BFRRC 的破坏形态，如图 3 所示。可见，在钢管鼓曲处及试件端部，由于核心 BFRRC 应力水平达到了其三轴应力状态下的抗压强度，核心 BFRRC 呈压碎状态，破碎的 BFRRC 填充于鼓曲环内，提供一部分的承载能力，且由于外部钢管的约束作用，核心 BFRRC “碎而不散”，与钢管一道共同继续承担外部荷载。总之，钢管玄武岩纤维再生混凝土试件的核心 BFRRC 同样发生了材料强度破坏。

2.2 圆钢管 BFRRC 短柱的力学性能

2.2.1 圆钢管 BFRRC 短柱荷载-轴向位移关系曲线
试验实测的试件荷载 P -轴向位移 Δ 曲线分别



图3 核心 BFRRC 破坏形态

Fig.3 Failure mode of internal BFRRC

如图 4 所示。可见，所有试件在弹性阶段的轴向割线刚度基本保持不变，荷载与位移大致呈线性关系。进入弹塑性阶段之后，实测的荷载-位移曲线互相偏离较多。试件达到峰值承载力之后，实测曲线峰值出现了平缓的下降段，试件轴向割线刚度下降较多。随后，试件进入了塑性阶段，在此阶段，荷载并没有随着轴向位移的增加而出现骤降现象，实测曲线饱满且出现了较长的变形流幅，试件延性较好，轴向割线刚度变化比较平缓。此外，再生粗骨料取代率对荷载-位移曲线的上升段影响不大，但取代率对峰值荷载、峰值位移和塑性阶段均具有较大影响。

2.2.2 圆钢管 BFRRC 短柱荷载-应变关系曲线
通过在试件外部钢管的中部粘贴横向应变片

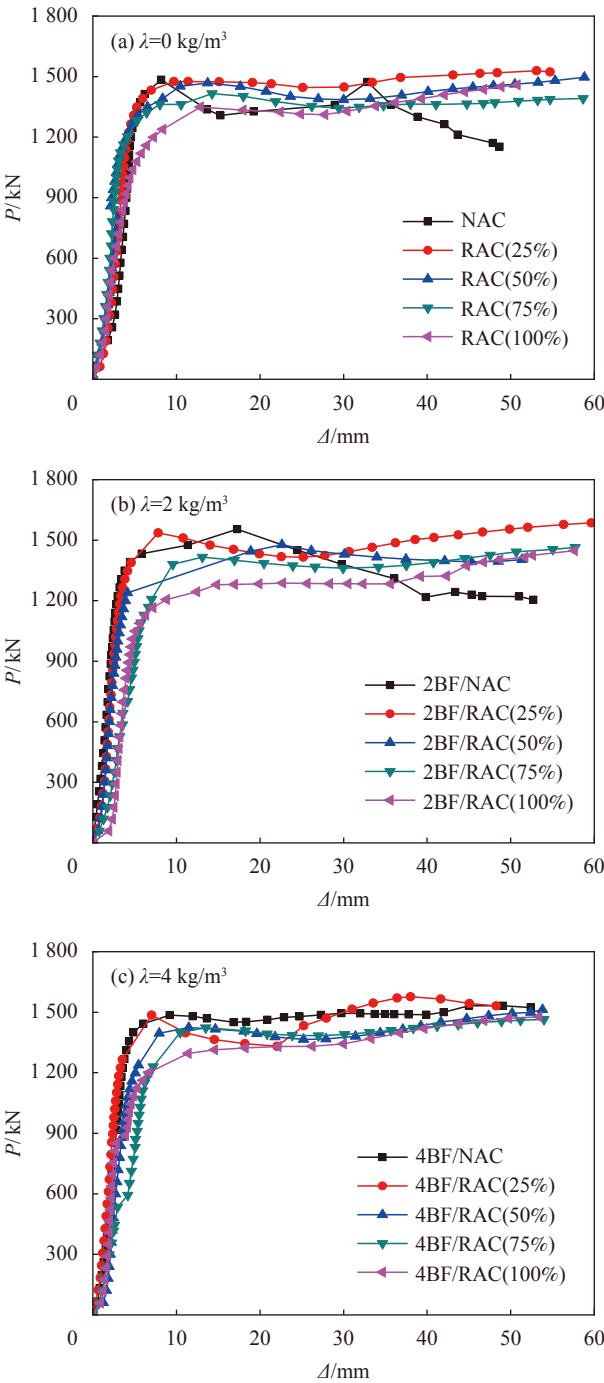


图4 圆钢管 BFRRC 短柱荷载 (P)-轴向位移 (Δ) 曲线

Fig. 4 Load (P) versus axial displacement (Δ) curves for BFRRC-filled circular steel tubular stub column specimens

和纵向应变片，可实测外部钢管横向应变 ε_h 和纵向应变 ε_v 。在不同纤维掺量下，试件的荷载-应变关系曲线如图 5 所示。当荷载达到峰值荷载以后，由于应变很大，应变片出现了溢出和滑移现象，故荷载-应变曲线只给到了峰值荷载对应的应变。

由图 5 可见，在加载初期，因外部钢管对核心 BFRRC 约束作用不大，导致环向应变较小，轴

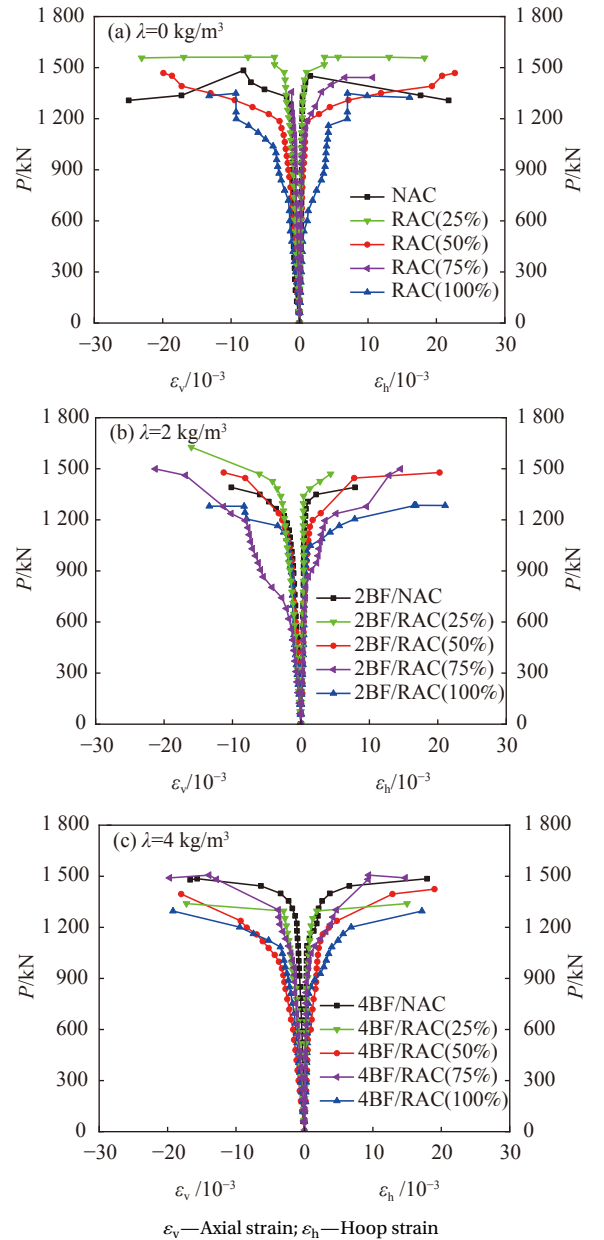


图5 圆钢管 BFRRC 短柱荷载-应变关系曲线

Fig. 5 Relation curves of load versus strain for BFRRC-filled circular steel tubular stub column specimens

向应变和环向应变基本上均呈线性发展，但是前者较后者的斜率小，表明轴向应变发展速度大于环向应变；当荷载继续增加时，BFRRC 和钢管之间出现约束力，应变增大较快；当荷载增加至峰值荷载的 70% 左右时，轴向应变和环向应变均发生转折，曲线斜率显著变小，此后，尽管荷载增加不多，但轴向和环向应变迅速增加。

在同一纤维掺量下，针对不同的再生粗骨料取代率，试件荷载-应变曲线的特征和发展趋势大致相同，取代率对于试件的荷载-应变曲线形状没

有明显影响。所有试件在达到峰值荷载时，轴向和环向应变基本上达到了 20×10^{-3} 左右，外部钢管对核心 BFRRC 的约束效果比较显著。

2.3 圆钢管 BFRRC 短柱轴压性能指标影响因素

2.3.1 圆钢管 BFRRC 短柱峰值承载力

(1) 再生粗骨料取代率

基于表 3 实测的试件峰值承载力，图 6 给出了不同玄武岩掺量下试件荷载-取代率关系。可见，试件的峰值承载力随着再生粗骨料取代率的变化呈现较显著的规律性。在同一纤维掺量下，取代率为 0% 时，试件的峰值承载力最大。随着取代率的增大，试件承载力均出现了不同幅度的下降。当 BF 掺量为 0 kg/m^3 时，试件承载力随取代率的增大而降低的幅度分别为 0.61%、0.33%、3.73%、4.12%；当 BF 掺量为 2 kg/m^3 时，试件承载力随取代率的增大而降低的幅度分别为 1.13%、4.46%、3.41%、5.03%；当 BF 掺量为 4 kg/m^3 时，试件承载力随取代率的增大而降低的幅度分别为 0.59%、2.93%、1.37%、3.99%。在同一纤维掺量下，当取代率由 75% 变化至 100% 时，试件承载力的下降幅度最大，其原因在于：当取代率为 100% 时，再生粗骨料完全取代天然粗骨料，这导致了核心 BFRRC 存在最多的裂纹和微裂缝，BFRRC 的强度最低，使钢管对其约束效果最差，故在宏观层面表现为试件承载力降低最多。

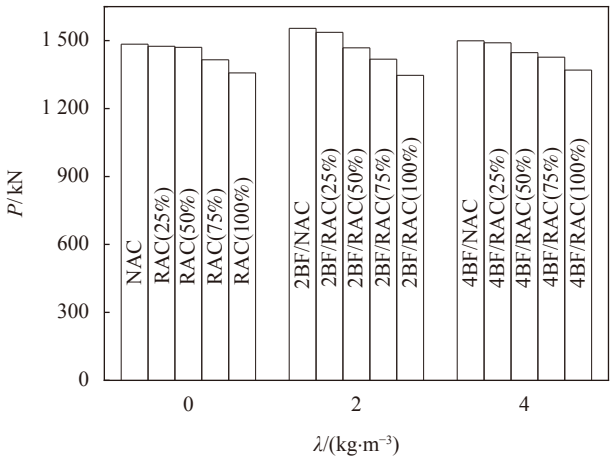


图 6 圆钢管 BFRRC 短柱峰值承载力随取代率的变化幅度
Fig. 6 Variation in BFRRC-filled circular steel tubular stub column specimens peak bearing capacity with replacement ratio

(2) 玄武岩纤维掺量

基于表 3 实测的试件峰值承载力，图 7 给出了不同再生粗骨料取代率下试件荷载-纤维掺量的关系。可见，各试件的峰值承载力并没有随着纤维掺量的变化而出现明显的规律。当纤维掺量由

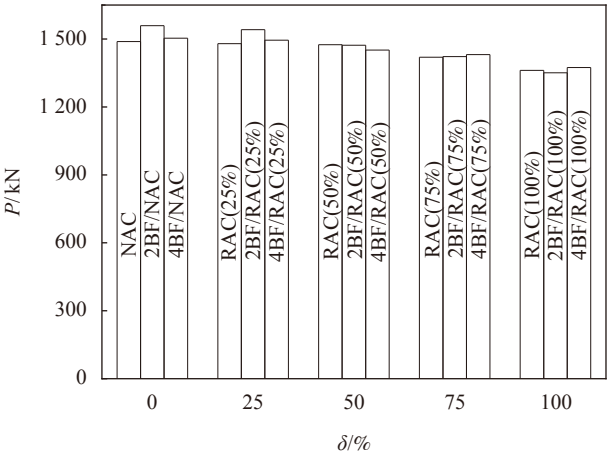


图 7 圆钢管 BFRRC 短柱峰值承载力随纤维掺量的变化幅度
Fig. 7 Variation in the peak bearing capacity of BFRRC-filled circular steel tubular stub column specimens with fiber content

0 kg/m^3 增加至 2 kg/m^3 及由 2 kg/m^3 增加至 4 kg/m^3 时，取代率为 0% 和 25% 的试件出现了先升后降的现象，取代率为 50% 的试件则为持续下降，取代率为 75% 的试件则是持续上升，取代率为 100% 的试件则是先降后升。总体上，掺加玄武岩纤维对钢管再生混凝土短柱轴压承载力有积极的提升作用，但提高幅度不大，这可能是由于随着玄武岩纤维掺量的增加，BFRRC 的抗压强度呈现小幅度提高的现象 (表 2)，但是，BFRRC 的抗压强度远小于钢管 BFRRC 短柱承载力，在高承载力下，纤维掺量对其承载力并无显著提高。

2.3.2 圆钢管 BFRRC 短柱谷值应力及二次峰值应力

基于图 4，采用以下两式计算得到组合截面应力与应变：

$$\sigma = P/A_{sc} \tag{1}$$

$$\varepsilon = \Delta/l \tag{2}$$

式中： σ 为组合截面应力； P 为荷载； A_{sc} 为组合截面面积，即钢管面积与管内混凝土面积之和； ε 为组合截面应变； Δ 为轴向位移； l 为试件高度。定义所测组合截面应力-应变曲线上的首次峰值应力为 σ_1 、谷值应力为 σ_2 、二次峰值应力为 σ_3 。通过以下两式定义试件承载力的退化幅度 λ_1 和回升幅度 λ_2 ，从而揭示试件承载力的退化规律。

$$\lambda_1 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \tag{3}$$

$$\lambda_2 = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \tag{4}$$

试件各应力值、承载力退化幅度和回升幅度见表 4。可见，在不同纤维掺量下，试件承载力

表 4 圆钢管 BFRRC 短柱各应力值、承载力退化幅度和回升幅度

Table 4 Stress values, degradation amplitude and rebound amplitude for bearing capacity of the BFRRC-filled circular steel tubular stub column specimens

Specimen	σ_1	σ_2	σ_3	λ_1	λ_2
NAC	74.74	65.85	74.21	0.88	0.99
RAC(25%)	74.29	72.79	76.94	0.98	1.04
RAC(50%)	74.04	69.75	75.37	0.94	1.02
RAC(75%)	71.28	67.69	70.10	0.95	0.98
RAC(100%)	68.35	66.07	73.47	0.97	1.07
Average	—	—	—	0.94	1.02
2BF/NAC	78.27	61.34	62.61	0.78	0.80
2BF/RAC(25%)	77.39	71.32	79.83	0.92	1.03
2BF/RAC(50%)	73.94	70.14	71.06	0.95	0.96
2BF/RAC(75%)	71.42	68.57	73.73	0.96	1.03
2BF/RAC(100%)	67.83	64.63	72.92	0.95	1.08
Average	—	—	—	0.91	0.98
4BF/NAC	75.50	73.03	77.17	0.97	1.02
4BF/RAC(25%)	75.06	67.04	79.41	0.89	1.06
4BF/RAC(50%)	72.86	68.77	76.21	0.94	1.05
4BF/RAC(75%)	71.86	69.67	73.73	0.97	1.03
4BF/RAC(100%)	68.99	66.61	74.42	0.97	1.08
Average	—	—	—	0.95	1.05

Notes: σ_1 , σ_2 and σ_3 —First peak stress, the valley stress, and secondary peak stress, respectively; λ_1 and λ_2 —Degradation amplitude and rebound amplitude for bearing capacity.

的退化幅度 λ_1 的平均值均在 0.91 以上，表明试件在达到峰值承载力之后，承载能力降低不多，试件的承载稳定性良好。试件承载力回升幅度 λ_2 的平均值均在 0.98 以上，二次峰值应力与首次峰值应力几乎相当，甚至略高于首次峰值应力，这是由于组合截面应力-应变曲线达到波谷以后，尽管外部钢管出现明显的鼓曲环，核心 BFRRC 被压碎，但两者重塑成形，继续参与受力，且后续出现的鼓曲环能够分担较多的外部荷载，使试件在二次峰值点的承载力得到较大的提高。

2.3.3 圆钢管 BFRRC 短柱耗能性能

耗能能力反映了轴压短柱试件本身吸能和耗能之间的内在联系，具有全局变量的意义，其大小常用耗能因子 η 表示：

$$\eta = \frac{S_{OAC\Delta_u}}{P_m\Delta_u}$$

(5)

式中： $S_{OAC\Delta_u}$ 为荷载与位移轴所围成的面积，即图 8 所示的阴影部分面积； P_m 为峰值荷载； Δ_u 为试验结束时的位移； $P_m\Delta_u$ 为矩形 $OP_mB\Delta_u$ 的面积。基于试件的荷载-位移曲线，计算得到的试件耗能因子见表 5。

基于表 5 计算得到的耗能因子，图 9 给出了试件的耗能能力随再生粗骨料取代率、纤维掺量的变化情况。可见：

(1) 试件的耗能随再生粗骨料取代率的增大呈稳步提升的规律。当 BF 掺量为 0 kg/m^3 时，试件的耗能因子随取代率增大而提高的幅度分别为 1.20%、1.55%、1.41%、0.12%；当 BF 掺量为 2 kg/m^3 时，试件的耗能因子随取代率增大而提高的幅度分别为 1.41%、0.35%、1.84%、0.11%；当 BF 掺量为 4 kg/m^3 时，试件的耗能因子随取代率增大而提高的幅度分别为 1.03%、0.34%、0.11%、0.11%。其原因在于：一方面，随着取代率的增加，再生粗骨料表面附带的水泥基体含量也随之增多，

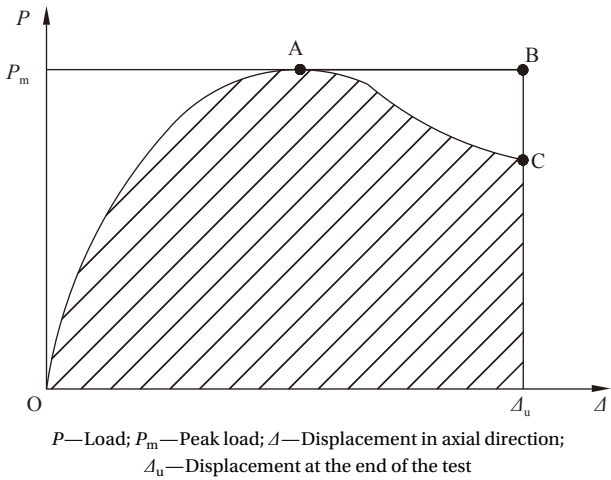


图 8 耗能计算模型

Fig. 8 Calculation model of energy dissipation

表 5 圆钢管 BFRRC 短柱轴压性能指标

Table 5 Axial compression performance index of BFRRC-filled circular steel tubular stub column specimens

Specimen	P_m/kN	η	μ
NAC	1 484.0	0.831	1.87
RAC(25%)	1 475.0	0.841	1.99
RAC(50%)	1 470.2	0.854	2.09
RAC(75%)	1 415.4	0.866	2.18
RAC(100%)	1 357.1	0.867	2.26
2BF/NAC	1 554.2	0.854	1.89
2BF/RAC(25%)	1 536.7	0.866	2.03
2BF/RAC(50%)	1 468.2	0.869	2.10
2BF/RAC(75%)	1 418.1	0.885	2.28
2BF/RAC(100%)	1 346.8	0.886	2.37
4BF/NAC	1 499.2	0.876	1.93
4BF/RAC(25%)	1 490.4	0.885	2.13
4BF/RAC(50%)	1 446.7	0.888	2.20
4BF/RAC(75%)	1 426.9	0.889	2.30
4BF/RAC(100%)	1 369.9	0.890	2.48

Notes: P_m —Test value of ultimate bearing capacity; η —Energy dissipation factor; μ —Ductility coefficient.

其强度显然不如再生骨料本身强度，在轴向荷载作用下附加的水泥基体被压酥，再生粗骨料之间会发生摩擦，从而增加内能的消耗；另一方面，再生粗骨料及附着的水泥基体存在较多的裂纹和微裂缝，在轴向压力作用下，裂纹和微裂缝闭合的过程吸收了较多能量。

(2) 试件的耗能随玄武岩纤维掺量的增大呈现增大的规律。当纤维掺量由 0 kg/m^3 增加至 2 kg/m^3 时，取代率为 0%、25%、50%、75% 和 100% 的试件耗能因子提高幅度分别为 2.77%、2.97%、1.76%、2.19%、2.19%；当纤维掺量由 2 kg/m^3 增加至 4 kg/m^3 时，取代率为 0%、25%、50%、75% 和 100% 的试件耗能因子提高幅度分别

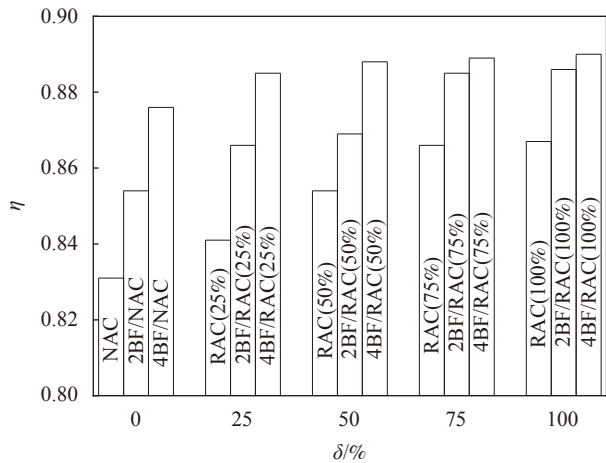


图 9 圆钢管 BFRRC 短柱耗能因子与取代率、纤维掺量变化关系
Fig. 9 Relations among energy dissipation factor, replacement ratio, and fiber content for the BFRRC-filled circular steel tubular stub column specimens

为 2.58%、2.19%、2.19%、0.45%、0.45%。这是由于随着荷载的增加，核心 BFRRC 微裂缝不断扩展，玄武岩纤维在核心 RAC 中起到了链接的作用，增强了 RAC 之间的整体工作性能，具有增加韧性和延缓、阻止裂缝扩展的效果，并且玄武岩纤维断裂时会消耗一部分内能，从而导致耗能增加。

2.3.4 圆钢管 BFRRC 短柱延性系数

延性系数 μ 是衡量试件变形性能的重要指标之一，采用下式表示：

$$\mu = \frac{\Delta_v}{\Delta_p} \tag{6}$$

其中： Δ_v 一般取为荷载下降至 0.85 倍峰值荷载所对应的位移，但由于在峰值之后，试件承载力没有下降至 0.85 倍峰值荷载，故取 Δ_v 为荷载-位移曲线首次谷值对应的位移 (谷值位移)； Δ_p 取为峰值位移。计算得到的试件延性系数见表 5。

基于表 5 计算得到的延性系数，图 10 给出了试件的延性系数随再生粗骨料取代率、纤维掺量的变化情况。可见：

(1) 试件的延性系数随再生粗骨料取代率的增大呈现增大的趋势。当 BF 掺量为 0 kg/m^3 时，试件的延性系数随取代率增大而提高的幅度分别为 6.42%、5.03%、4.31%、3.67%；当 BF 掺量为 2 kg/m^3 时，试件的延性系数随取代率增大而提高的幅度分别为 7.41%、3.45%、8.57%、3.95%；当 BF 掺量为 4 kg/m^3 时，试件的延性系数随取代率增大而提高的幅度分别为 10.36%、3.29%、4.55%、7.83%。这是由于随着取代率的增加，再生粗骨料

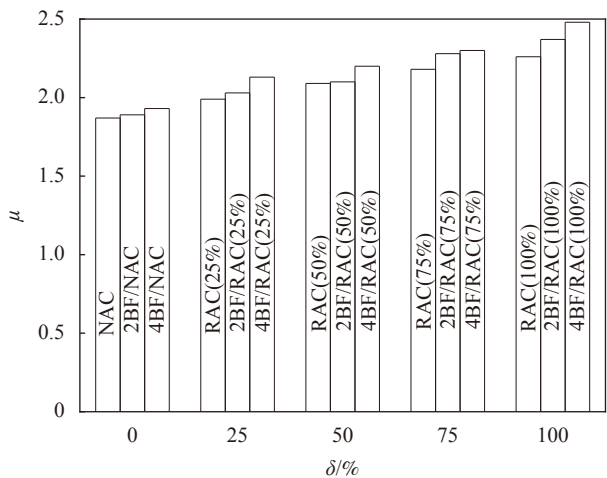


图 10 圆钢管 BFRRC 短柱延性系数与取代率、纤维掺量变化关系
Fig. 10 Relations among ductility coefficient, replacement ratio, and fiber content for the BFRRC-filled circular steel tubular stub column specimens

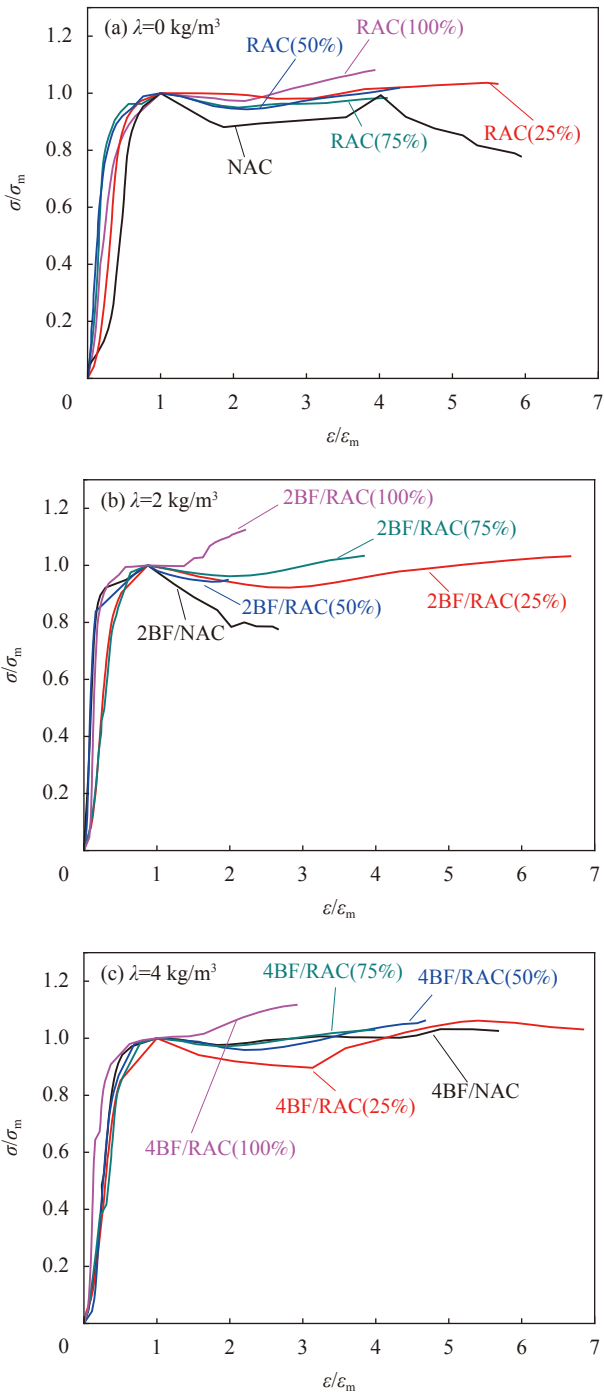
附带的裂纹和微裂缝逐渐被压密，导致了塑性阶段特征点变形量的增加。

(2) 试件的延性系数随玄武岩纤维掺量的增大呈现增大的规律。当纤维掺量由 0 kg/m^3 增加至 2 kg/m^3 时，取代率为 0%、25%、50%、75% 和 100% 的试件延性系数提高幅度分别为 1.07%、2.01%、0.48%、4.59%、4.87%；当纤维掺量由 2 kg/m^3 增加至 4 kg/m^3 时，取代率为 0%、25%、50%、75% 和 100% 的试件延性系数提高幅度分别为 2.12%、4.93%、4.76%、0.88%、4.64%。这是由于核心 BFRRC 在轴压力作用下产生裂纹和微裂缝，而纤维具有增韧阻裂的作用，在一定程度上抑制了裂缝的产生和发展，玄武岩纤维具有较高的抗拉强度和较大的弹性模量，当掺于核心 RAC 中时，增加了新旧界面之间的黏结力，起到了桥梁连接的效果，使 BFRRC 的脆性减小，韧性增大，故在宏观层面上表现为试件的延性系数随玄武岩纤维掺量的增加而增大。

2.4 圆钢管 BFRRC 短柱无量纲化受压组合截面应力-应变全过程曲线分析

通过位移计实测了试件的轴向位移，依据式 (1) 和式 (2)，得到试件的名义组合截面应力-应变全过程曲线，对其进行归一化处理，如图 11 所示。其中， ε_m 、 σ_m 分别为峰值应变、峰值应力。

由图 11(a)~11(c) 可见，基于简单、实用的原则，将试件的无量纲化曲线均划分为弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段。基于各阶段的变形规律，



σ and σ_m —Composite-section stress and peak stress; ε and ε_m —Composite-section strain and peak strain

图 11 圆钢管 BFRRC 短柱无量纲组合截面应力-应变全过程曲线
Fig. 11 Dimensionless full-curves of composite-section stress versus strain for the BFRRC-filled circular steel tubular stub column specimens

参考相关文献 [29-30]，建立如下式所示的数学模型：

$$\begin{cases} Y = aX & X < x_A \\ Y = X^b & x_A \leq X < 1 \\ Y = cX^2 + dX + e & 1 \leq X \end{cases} \quad (7)$$

式中： $X=\varepsilon/\varepsilon_m$ ， $Y=\sigma/\sigma_m$ ，其中， $\varepsilon_m=\varepsilon_{scy}$ ， $\sigma_m=f_{scy}$ ， f_{scy} 为试件组合强度指标， ε_{scy} 为试件组合强度指标 f_{scy} 对应的应变(10^{-6})； a 为弹性段控制参数，经试验数据拟合，取 a 为1.8， $x_A=0.45$ ； b 为弹塑性段控制参数，取为0.15； c 、 d 和 e 为塑性段控制参数，分别取为0.02、-0.07和1.08。对影响试件工作机制和力学性能的因素进行分析，考虑取代率和玄武岩纤维掺量对于试件的组合峰值应力和组合峰值应变的影响，建立试件的组合截面应力-应变全过程曲线方程，如下列各式所示：

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1.8\varepsilon f_{scy}}{\varepsilon_{scy}} & \varepsilon < 0.45\varepsilon_{scy} \\ \sigma = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{scy}}\right)^{0.15} f_{scy} & 0.45\varepsilon_{scy} \leq \varepsilon < \varepsilon_{scy} \\ \sigma = \left[0.02\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{scy}}\right)^2 - 0.07\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{scy}}\right) + 1.08\right] f_{scy} & \varepsilon_{scy} \leq \varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

$$f_{scy} = \eta(1.212 + B\xi + C\xi^2)f_c \quad (9)$$

$$\varepsilon_{scy} = \varphi[1\,300 + 14.93f_c + 1\,400 + 40(f_c - 20)]\xi^{0.99} \quad (10)$$

$$B = 0.1759f_y/215 + 0.974 \quad (11)$$

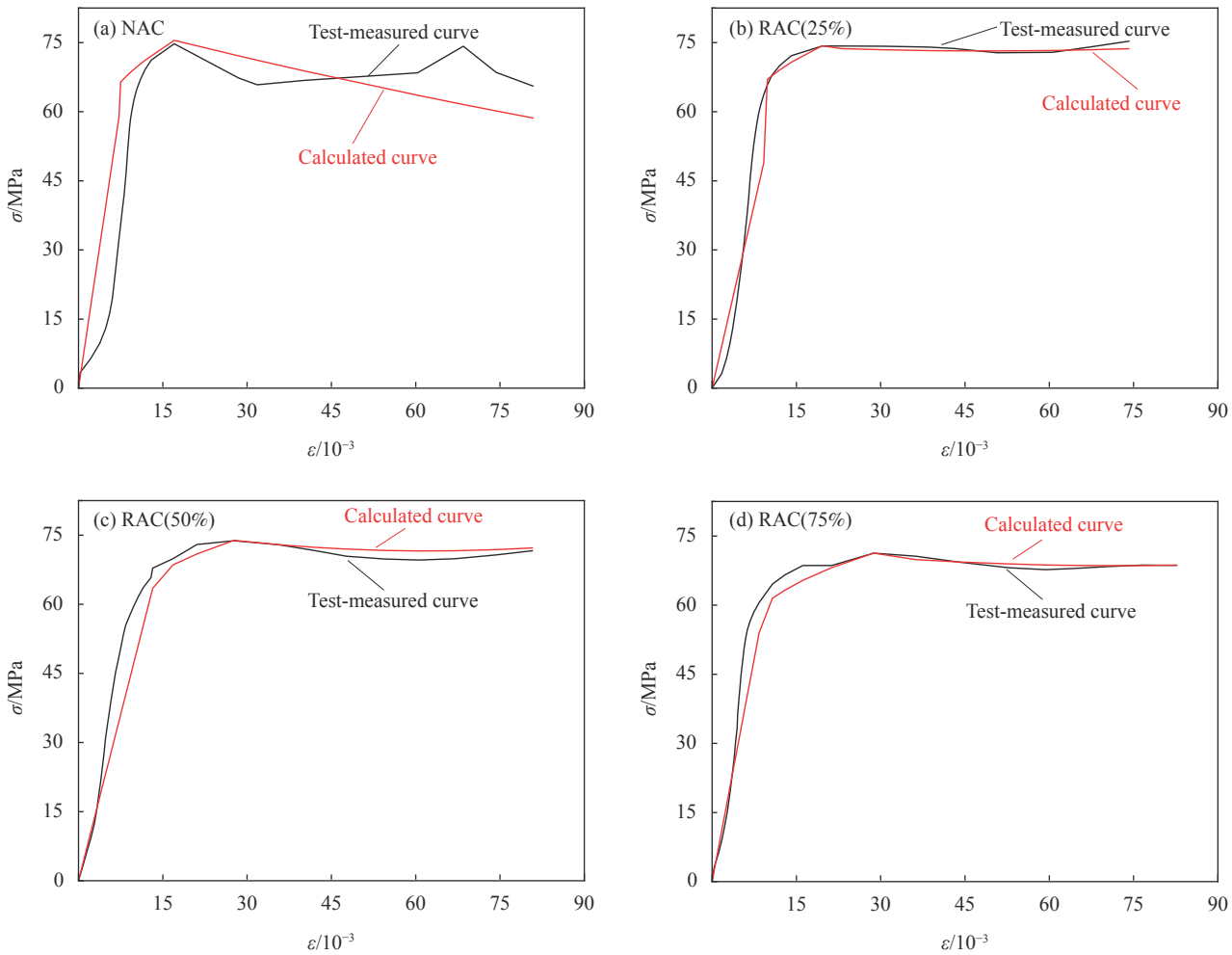
$$C = -0.1038f_c/20 + 0.0309 \quad (12)$$

式中： ξ 为约束效应系数； f_y 为钢管的屈服强度； η 、 φ 为与取代率、纤维掺量有关的计算值修正系数，经拟合分析，建立了 η 、 φ 的函数方程，如下两式所示：

$$\eta = (0.028\lambda - 0.26)\delta^2 + (-0.03\lambda + 0.32)\delta + (-0.01\lambda^2 + 0.036\lambda + 1.046) \quad R^2 = 0.9025 \quad (13)$$

$$\varphi = (-0.014\lambda + 0.66)\delta + (-0.019\lambda + 3.35) \quad R^2 = 0.9534 \quad (14)$$

根据式(8)~(14)，能够计算得到试件的组合截面应力-应变全过程曲线，并与试验实测曲线作对比，如图12所示。可见，计算曲线和试验曲线总体吻合较好，表明本文建立的数学方程可以用于计算钢管BFRRC短柱轴压组合截面应力-应变全过程曲线。



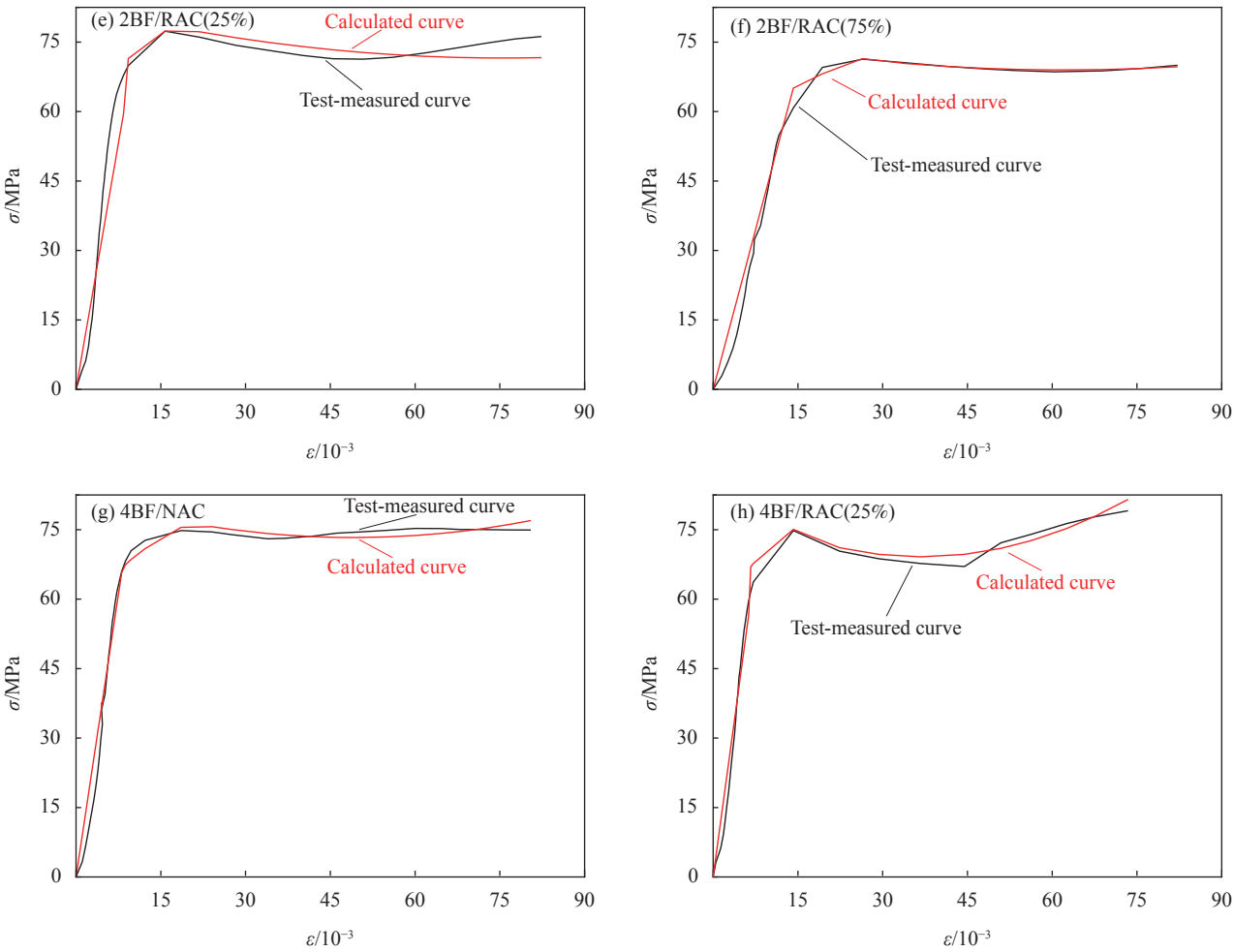


图 12 典型圆钢管 BFRRC 短柱组合截面应力-应变试验与计算曲线对比

Fig. 12 Comparison of composite-section stress-strain curves between test and calculation for typical BFRRC-filled circular steel tubular stub column specimens

3 结论

在本文的设计参数变化范围内，对 15 个圆钢管玄武岩再生混凝土 (BFRRC) 短柱试件开展了轴压性能试验与组合截面应力-应变全过程曲线理论分析，主要得到以下结论：

(1) 在轴压荷载作用下，圆钢管 BFRRC 试件外部钢管出现了鼓曲甚至撕裂破坏，核心 BFRRC 呈压碎的破坏状态，但“碎而不散”。试件破坏形态属于强度破坏；

(2) 在不同的玄武岩纤维掺量下，试件实测的荷载-位移曲线饱满，且具有较长的变形流幅，延性较好；

(3) 在同一玄武岩纤维掺量下，随着再生粗骨料取代率的增大，试件承载力逐渐降低；在同一取代率下，随着玄武岩纤维掺量的增大，试件承载力提高幅度不大。随着再生粗骨料取代率的增

加，试件耗能性能、延性系数不断增大，提升幅度最高可达 1.84% 和 10.36%，随着玄武岩纤维掺量的增加，耗能性能、延性系数不断增大，增加幅度最高可达 2.97% 和 4.93%；

(4) 通过引入再生粗骨料取代率和玄武岩纤维掺量影响因子，建立了圆钢管 BFRRC 短柱轴压组合截面应力-应变全过程曲线方程，且计算曲线与试验实测曲线吻合较好。

目前，由于还没有发现钢管 BFRRC 结构的相关文献报道，本文提出的钢管 BFRRC 短柱轴压组合截面应力-应变曲线方程的普遍适用性有待于进一步验证和校核。此外，受限于试验条件，本文设计参数仅考虑了再生粗骨料取代率和玄武岩纤维掺量，且设计参数变化水平不多，对短柱性能影响较大的钢管壁厚、核心混凝土强度、长细比等影响因素均没有考虑，这将依赖于下一步开展

的有限元建模和分析。

参考文献:

[1] 商效瑞, 杨经纬, 李江山. 基于CT图像的再生混凝土细观破坏裂纹分形特征[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(7): 1774-1784.
SHANG Xiaoyu, YANG Jingwei, LI Jiangshan. Fractal characteristics of meso-failure crack in recycled coarse aggregate concrete based on CT image[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(7): 1774-1784(in Chinese).

[2] 陈守开, 刘新飞, 郭磊, 等. 再生骨料掺配比再生透水混凝土性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(6): 1590-1598.
CHEN Shoukai, LIU Xinfei, GUO Lei, et al. Influence of recycled aggregate proportion on performance of recycled pervious concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(6): 1590-1598(in Chinese).

[3] 王玉梅, 邓志恒, 肖建庄, 等. 再生混凝土压-剪应力下受力性能与破坏准则[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(S1): 373-380.
WANG Yumei, DENG Zhiheng, XIAO Jianzhuang, et al. Mechanical properties and failure criterion of recycled aggregate concrete under compressive-shear stress state[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(S1): 373-380(in Chinese).

[4] 关博文, 吴佳育, 陈华鑫, 等. 再生骨料残余砂浆覆盖率测试及其对混凝土渗透性的影响[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(10): 155-165.
GUAN Bowen, WU Jiayu, CHEN Huaxin, et al. Test of coverage rate of residual mortar on recycled aggregate and its influence on permeability of concrete[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(10): 155-165(in Chinese).

[5] 陈宗平, 周春恒, 李伊, 等. 高温后再生混凝土力学性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(12): 105-113.
CHEN Zongping, ZHOU Chunheng, LI Yi, et al. Research on mechanical behavior of recycled aggregate concrete after high temperatures[J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(12): 105-113(in Chinese).

[6] 段珍华, 江山山, 肖建庄, 等. 再生粗骨料含水状态对混凝土性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(3): 545-550.
DUAN Zhenhua, JIANG Shanshan, XIAO Jianzhuang, et al. Effect of moisture condition of recycled coarse aggregate on the properties of concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(3): 545-550(in Chinese).

[7] WU B, LIN L, ZHAO J X, et al. Creep behavior of thin-walled circular steel tubular columns filled with demolished concrete lumps and fresh concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 773-790.

[8] 蔡敏伟, 王卫华, 丁启荣, 等. 复式不锈钢管再生块体混凝土短柱轴压试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(S1): 226-233.
CAI Minwei, WANG Weihua, DING Qirong, et al. Tests on composite-sectioned stainless CFST columns filled with demolished concrete lumps under axial compression[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(S1): 226-233(in Chinese).

[9] 贾恒瑞, 陈宗平, 陈俊睿. 高温后圆钢管再生混凝土界面黏结滑移性能及本构方程研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(10): 119-133.
JIA Hengrui, CHEN Zongping, CHEN Junrui. Research on interfacial bond behavior and constitutive equation of recycled aggregate concrete filled circle steel tube after exposure to high temperature[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(10): 119-133(in Chinese).

[10] ZENG L, LI L J, SU Z, et al. Compressive test of GFRP-recycled aggregate concrete-steel tubular long columns[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 176: 295-312.

[11] ZHANG X G, GAO X. The hysteretic behavior of recycled aggregate concrete-filled square steel tube columns[J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109523.

[12] CHEN Z P, JING C G, XU J J, et al. Seismic performance of recycled concrete-filled square steel tube columns[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2017, 16(1): 119-130.

[13] 马辉, 郭婷婷, 李哲, 等. 圆钢管型钢再生混凝土组合柱轴压性能及承载力计算[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(2): 97-105.
MA Hui, GUO Tingting, LI Zhe, et al. Axial compression performance and bearing capacity calculation of recycled concrete filled circular steel tube-profile steel composite columns[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(2): 97-105(in Chinese).

[14] 陈梦成, 方苇, 黄宏, 等. 锈蚀圆钢管再生混凝土轴压短柱受力性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(12): 138-146.
CHEN Mengcheng, FANG Wei, HUANG Hong, et al. Axial compressive behavior of recycled concrete filled corroded circular steel tubular columns[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(12): 138-146(in Chinese).

[15] 柯晓军, 但宇, 龙虹任, 等. 冷却方式对高温后方钢管再生混凝土短柱轴压性能的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(1): 182-192.
KE Xiaojun, DAN Yu, LONG Hongren, et al. Influence of cooling methods on axial compressive performance of RACFSST short columns after high temperatures[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(1): 182-192(in Chinese).

[16] 杨有福, 黄翔宇. 矩形钢管再生混凝土短柱的轴压性能[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(12): 121-127.
YANG Youfu, HUANG Xiangyu. Compressive behavior of rectangular recycled aggregate concrete-filled steel-tubular stub columns[J]. *Journal of South China University of*

- Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(12): 121-127(in Chinese).
- [17] 刘坚, 张鹏程, 江进, 等. 圆钢管H型钢再生混凝土短柱的轴压承载力分析[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(6): 1280-1286. LIU Jian, ZHANG Pengcheng, JIANG Jin, et al. Axial bearing capacity analysis of H-section steel-reinforced recycled aggregate concrete filled circular steel tube stub columns[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(6): 1280-1286(in Chinese).
- [18] LI W G, LUO Z Y, TAO Z, et al. Mechanical behavior of recycled aggregate concrete-filled steel tube stub columns after exposure to elevated temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 146: 571-581.
- [19] ZHANG X G, KUANG X M, WANG F, et al. Strength indices and conversion relations for basalt fiber-reinforced recycled aggregate concrete[J]. *Dyna*, 2019, 94(1): 82-87.
- [20] ALNAHHAL W, ALJIDDA O. Flexural behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 169: 165-178.
- [21] KATKHUDA H, SHATARAT N. Improving the mechanical properties of recycled concrete aggregate using chopped basalt fibers and acid treatment[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 140: 328-335.
- [22] WANG Y Y, CHEN J, GENG Y. Testing and analysis of axially loaded normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns[J]. *Engineering Structures*, 2015, 86: 192-212.
- [23] CHEN J, LIU X, LIU H W, et al. Axial compression behavior of circular recycled concrete-filled steel tubular short columns reinforced by silica fume and steel fiber[J]. *Steel and Composite Structures*, 2018, 27(2): 193-200.
- [24] HOU M, DONG J F, LI L, et al. Experimental research on AFRP reinforced recycled steel tube columns subjected to axial compression[J]. *Advanced Composites Letters*, 2017, 26(6): 198-201.
- [25] XU J J, CHEN Z P, ZHAO X Y, et al. Seismic performance of circular recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns: FEM modelling and sensitivity analysis[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 141: 509-525.
- [26] KURDA R, DE BRITO J, SILVESTRE J D, et al. Combined influence of recycled concrete aggregates and contents of fly ash on concrete properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 157: 554-572.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019(in Chinese).
- [28] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: China Standards Press, 2011(in Chinese).
- [29] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2018: 222-259.
HAN Linhai. Concrete filled steel tube structures—Theory and practice[M]. 3rd edition. Beijing: Science Press, 2018: 222-259(in Chinese).
- [30] 柯晓军, 陈宗平, 薛建阳, 等. 方钢管再生混凝土短柱轴压承载性能试验研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(8): 35-41.
KE Xiaojun, CHEN Zongping, XUE Jianyang, et al. Experimental study on the bearing capacity of recycled aggregate concrete-filled square steel tube short columns under axial compression[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(8): 35-41(in Chinese).