

不同加载速率下CFRP约束再生骨料混凝土重复轴压应力-应变关系

李鹏达 冼旭俊 任昱浩 周英武

Cyclic stress-strain relationship of CFRP-confined recycled aggregates concrete under different loading rates

LI Pengda, XIAN Xujun, REN Yuhao, ZHOU Yingwu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230831.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

服役温度对铝合金-碳纤维增强树脂复合材料粘接接头准静态失效的影响

Effect of service temperature on quasi-static failure of aluminum alloy-carbon fiber reinforced polymer composite bonded joints

复合材料学报. 2020, 37(5): 1088–1095 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190708.001>

再生粗骨料硅烷浸渍处理对混凝土介质传输性能的影响

Effect of recycled coarse aggregate after strengthening by silane impregnation on mass transport of concrete

复合材料学报. 2020, 37(10): 2602–2609 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200316.002>

纤维增强聚合物复合材料-钢复合圆管约束混凝土轴压性能预测模型

Models for predicting axial compression behavior of fiber reinforced polymer-steel composite circular tube confined concrete

复合材料学报. 2019, 36(10): 2478–2485 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181218.001>

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>

纤维增强树脂复合材料约束超高性能混凝土轴压性能的细观数值模拟

Meso-scale numerical simulation of axial compression performance of fiber reinforced polymer composite-confined ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1629–1638 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190827.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

不同加载速率下 CFRP 约束再生骨料混凝土 重复轴压应力-应变关系



分享本文

李鹏达, 冼旭俊, 任昱浩, 周英武*

(深圳大学 土木与交通工程学院, 深圳 518060)

摘要: 为研究碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 约束再生骨料混凝土 (RAC) 在重复轴向压缩作用下的力学性能, 对 72 根 CFRP 约束 RAC 圆柱进行了不同加载速率下的单调及重复轴压试验, 分析了加载速率、再生骨料 (RA) 替代率和 CFRP 层数对 CFRP 约束 RAC 的破坏模式、极限状态、重复应力-应变关系的影响。试验结果表明: CFRP 约束对 100wt%RA 替代率混凝土极限状态的增强效果最为显著, 但其增强效果随着加载速率的增大而减小。相比于 3 mm/min 的加载速率, 2 层 CFRP 约束 100wt%RA 替代率混凝土在 18 mm/min 的加载速率下, 其极限强度增强比降低了 16.2%, 极限应变增强比降低了 22.6%。此外, 重复轴压荷载作用下, 卸载刚度和再加载刚度均与 RA 替代率和加载速率呈负相关, 但加载速率的提升会削弱 RA 替代率的影响。最后, 通过对试验数据的回归分析, 建立了考虑加载速率与 RA 替代率耦合作用的 CFRP 约束 RAC 重复轴压应力-应变模型, 模型预测曲线与本文的试验曲线和现有文献收集的试验曲线匹配良好。

关键词: 纤维增强复合材料; 再生骨料混凝土; 加载速率; 重复轴压; 应力-应变

中图分类号: TU528; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)03-1487-18

Cyclic stress-strain relationship of CFRP-confined recycled aggregates concrete under different loading rates

LI Pengda, XIAN Xujun, REN Yuhao, ZHOU Yingwu*

(College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: This study experimentally investigated the mechanical behavior of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) confined recycled aggregate concrete (RAC) under cyclic loading. In total, 72 CFRP-confined circular RAC specimens were tested under monotonic and cyclic axial compression, with a focus on the various loading rates and recycled aggregate (RA) replacement ratios. Test results indicate that the reinforcing effect of CFRP confinement on the ultimate condition of the concrete with 100wt%RA replacement ratio is most pronounced. However, this enhancement diminishes as the loading rate increases. In comparison to a loading rate of 3 mm/min, for two layers of CFRP-confined concrete with 100wt%RA replacement ratio, the enhancement ratio in ultimate strength is reduced by 16.2%, and the enhancement ratio in ultimate strain is reduced by 22.6% at a loading rate of 18 mm/min. Furthermore, under cyclic axial compression loading, both the unloading stiffness and reloading stiffness exhibit a negative correlation with the RA replacement ratio and loading rate. Nevertheless, the loading rate increase weakens the RA ratio's influence. Based on a regression analysis of the experimental data, a new cyclic stress-strain model for CFRP-confined recycled aggregate concrete incorporating the coupled effects of loading rate and RA replacement ratio is proposed. The proposed model exhibits excellent agreement with the experimental curves in this paper and the collected stress-strain curves from the opening literature.

收稿日期: 2023-05-26; 修回日期: 2023-08-14; 录用日期: 2023-08-23; 网络首发时间: 2023-09-01 14:48:53

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230831.004>

基金项目: 国家自然科学基金 (U2001226; 52078299); 深圳市科技计划 (JCYJ20210324095003010; KQTD20200820113004005)

National Natural Science Foundation of China (U2001226; 52078299); Shenzhen Science and Technology Program (JCYJ20210324095003010; KQTD20200820113004005)

通信作者: 周英武, 博士, 教授, 研究方向为新材料/复材结构 E-mail: ywzhou@szu.edu.cn

引用格式: 李鹏达, 冼旭俊, 任昱浩, 等. 不同加载速率下 CFRP 约束再生骨料混凝土重复轴压应力-应变关系 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(3): 1487-1504.

LI Pengda, XIAN Xujun, REN Yuhao, et al. Cyclic stress-strain relationship of CFRP-confined recycled aggregates concrete under different loading rates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(3): 1487-1504(in Chinese).

Keywords: fiber-reinforced polymer; recycled aggregate concrete; loading rate; cyclic axial compression; stress-strain

随着我国城镇化进程的发展, 老旧建筑的拆除不可避免地产生了大量的建筑垃圾^[1]。重复利用城市更新所产生的建筑垃圾, 经过破碎、清洗、筛分后制备再生骨料 (Recycled aggregate, RA), 并取代天然骨料 (Natural aggregate, NA) 配制再生骨料混凝土 (Recycled aggregate concrete, RAC) 已经成为探索混凝土作为可再生资源利用的新趋势^[2-3]。RAC 的广泛应用一方面可以减少建筑废弃物的填埋, 另一方面还能够缓解天然骨料资源的短缺^[1, 4]。然而, 研究已表明 RAC 由于骨料的天然缺陷, 其力学性能相较于天然骨料混凝土 (Natural aggregate concrete, NAC) 下降显著, 同时混凝土表现出更显著的脆性破坏^[5], 这些缺陷大大制约了 RAC 在实际工程中的应用, 尤其是在考虑再生骨料混凝土结构的抗震性能方面。

应用纤维增强复合材料 (Fiber reinforced polymer, FRP) 与 RAC 结合, 通过外包 FRP 的方式已经表明通过施加环向约束力的方法能够显著提高 RAC 的强度和变形能力^[6-8]。同时, 相比于针对再生骨料本身的物理增强^[9-10]或化学方法增强^[11-12], 此方法能够更加经济和稳定地提升 RAC 力学性能, 并削弱再生骨料来源差异所带来的影响。目前, FRP 约束 RAC 的相关研究主要集中于单调荷载作用下的应力-应变行为^[13-15]。然而, 为保证结构的可靠性, RAC 结构需要考虑地震作用下的力学性能, 地震作用的重复施加和加载速率的快速性会导致混凝土发生更加复杂的破坏模式。

由于混凝土在荷载作用下的塑性损伤特性, 尽管 FRP 约束混凝土的应力-应变曲线呈现峰后应变强化特征, 但在重复荷载作用下, 其加载/卸载曲线均呈现出显著的非线性行为。基于大量的试验研究^[16-18], 学者已经建立了一系列的 FRP 约束混凝土在重复荷载作用下的应力-应变模型。Lam 等^[19]定义了切线卸载模量, 并采用混凝土强度作为计算塑性应变的重要参数建立了荷载路径相关的塑性应变模型, 进而提出了完全及部分重复荷载作用下的应力-应变关系模型。在此基础上, 本文第一作者前期也提出混凝土强度和 FRP 约束刚度均会显著影响混凝土的重复轴压应力-应变曲线^[20-21], 并基于上述关键变量建立了卸载和再加载曲线的关键参数模型, 进而提出了一个形式更

简单的重复加载应力-应变模型^[22]。然而, 不同于天然骨料混凝土, RAC 表现出显著的强度削弱特征。因此, 考虑 RAC 强度的影响在 FRP 约束 RAC 重复荷载模型的建立中将会起到关键作用。

混凝土作为一种速率敏感材料, 其力学性能随不同加载速率而变化, 这主要是由于其在不同速率荷载作用下裂缝开展的差异引起的^[23-24]。Fu 等^[25-26]发表了两篇文献综述, 总结了加载速率对混凝土力学性能的影响。研究指出混凝土强度随着加载速率的增大而提升, 但其脆性特征更加显著。Cao 等^[27]针对 FRP 约束混凝土圆柱进行了不同应变速率的单调加载试验研究, 其应变速率从 $3.33 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 到 $3.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。研究发现, 在 FRP 约束作用下混凝土的应力-应变关系和抗压强度受应变速率影响较大, 加载速率不仅仅影响其强度, 同时影响了 FRP 的约束效率。学者也指出, 由于再生骨料的缺陷, 其在轴压荷载作用下的膨胀行为大于天然骨料, 进而也导致了 FRP 约束效率的提升^[28]。然而, 目前对于 FRP 约束 RAC 的研究主要集中在单调荷载作用和准静态 (10^{-5} s^{-1}) 荷载作用, 而现有混凝土结构在实际工程中往往会承受各种复杂的动态荷载作用 (如地震作用、车辆重复荷载作用、风荷载作用等)。在地震作用下, 混凝土结构往往经历更加快速地循环往复加载, 其荷载施加速率一般为 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 量级区间^[23], 常规采用静力作用下的应力-应变模型对结构进行抗震分析势必会导致不精确的问题, 因此正确理解不同加载速率下 FRP 约束 RAC 的重复轴压应力-应变行为是十分必要的。

本文介绍了 72 根碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 约束 RAC 圆柱在单调及重复轴压作用下的试验结果。基于试件的破坏模式、峰值强度和极限应变, 分析了加载速率对 CFRP 约束 RAC 力学性能的影响。此外, 研究了加载速率、RA 替代率和 CFRP 层数对 CFRP 约束 RAC 的重复轴压应力-应变模型关键参数 (包括卸载刚度、再加载刚度、塑性应变、过渡区应力和过渡曲线曲率) 的影响, 并通过对试验数据进行回归分析, 建立了应力-应变曲线的关键参数模型, 应用此模型能够准确地预测 FRP 约束 RAC 在不同加载速率下的重复轴压应力-应变行为。

1 试验概况

1.1 试件设计及制备

设计并制作了 72 根直径 (D) 150 mm、高 (H) 300 mm 的 CFRP 约束 RAC 圆柱。试验主要参数为加载速率、RA 替代率、加载方式和 CFRP 层数。其中,采用 0.3 mm/min、6 mm/min 和 18 mm/min 这 3 种加载速率,对应的应变速率分别为 $1.67\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 、 $3.33\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 、 $1.00\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$,根据现有文献 [29] 对于应变速率的定义, $1.67\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的应变速率属于拟静力荷载,作为参考应变速率。

此外,综合考虑了实际工程结构安全性和资源可持续性,设计中采用高比例再生骨料配制混凝土可缓解天然资源紧缺和实现混凝土的可持续利用。因此,本文将 RA 替代率 (R) 选取为 0wt%、50wt% 和 100wt%,覆盖 0wt%~100wt% 不同替代率的影响研究。此外,为建立模型提供充足可靠的数据库,本文还将加载方式设计为单调加载和重复轴压加载;CFRP 的层数选取一层和两层作为试件设计的变量。相同工况的试件制备了 2 个,试件具体设计参数见表 1。

表 1 碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 约束再生骨料混凝土 (RAC) 试件设计参数
Table 1 Design parameters for carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-confined recycled aggregate concrete (RAC) specimens

Specimen	Loading type	CFRP layer	Loading rate/ (mm·min ⁻¹)	RA replacement rate/wt%	f_{co} /MPa	ε_{co} /%
M0.3R0%1CFRP	Monotonic loading	1	0.3	0	46.3	0.244
M0.3R50%1CFRP				50	43.2	0.240
M0.3R100%1CFRP				100	36.6	0.230
M6R0%1CFRP			6	0	50.4	0.249
M6R50%1CFRP				50	47.3	0.245
M6R100%1CFRP				100	38.2	0.233
M18R0%1CFRP		18	18	0	52.1	0.252
M18R50%1CFRP				50	50.2	0.249
M18R100%1CFRP				100	41.0	0.237
M0.3R0%2CFRP		2	0.3	0	39.7	0.234
M0.3R50%2CFRP				50	38.6	0.233
M0.3R100%2CFRP				100	34.5	0.226
M6R0%2CFRP			6	0	42.9	0.239
M6R50%2CFRP				50	41.6	0.237
M6R100%2CFRP				100	40.8	0.236
M18R0%2CFRP		18	18	0	43.3	0.240
M18R50%2CFRP				50	42.5	0.239
M18R100%2CFRP				100	41.4	0.237
C0.3R0%1CFRP	Cyclic loading	1	0.3	0	46.3	0.244
C0.3R50%1CFRP				50	43.2	0.240
C0.3R100%1CFRP				100	36.6	0.230
C6R0%1CFRP			6	0	50.4	0.249
C6R50%1CFRP				50	47.3	0.245
C6R100%1CFRP				100	38.2	0.233
C18R0%1CFRP		18	18	0	52.1	0.252
C18R50%1CFRP				50	50.2	0.249
C18R100%1CFRP				100	41.0	0.237
C0.3R0%2CFRP		2	0.3	0	39.7	0.234
C0.3R50%2CFRP				50	38.6	0.233
C0.3R100%2CFRP				100	34.5	0.226
C6R0%2CFRP			6	0	42.9	0.239
C6R50%2CFRP				50	41.6	0.237
C6R100%2CFRP				100	40.8	0.236
C18R0%2CFRP		18	18	0	43.3	0.240
C18R50%2CFRP				50	42.5	0.239
C18R100%2CFRP				100	41.4	0.237

Notes: M—Monotonic loading; C—Cyclic loading; The number after "M" or "C"—Loading rate; R—Recycled aggregate replacement rate; CFRP—Carbon fiber reinforced polymer; For example, C18R100%2CFRP—Two-layer CFRP-confined 100wt% recycled aggregate concrete columns with a cyclic loading rate of 18 mm/min; f_{co} —Compressive strength of unconfined RAC specimens; ε_{co} —Peak strain of unconfined RAC specimens; RA—Recycled aggregate.

试件的制备过程包括 RAC 的浇筑与养护、缠绕 CFRP 布、粘贴应变片和制作散斑。试件浇筑完成后,需在标准环境下养护至少 28 天。本试验所用水泥为产地深圳的守信牌 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,细骨料采用粒径 0~5 mm 的普通河砂,天然粗骨料采用粒径 5~25 mm、连续级配的花岗岩碎石,再生粗骨料来源为深圳市废弃建筑混凝土破碎制成,粒径范围为 5~25 mm,详细配合比见表 2。缠绕 CFRP 布时,为避免试件在搭接部位脱粘失效,取 CFRP 条带搭接区长度为 150 mm。

表 2 RAC 的配合比
Table 2 Mix ratio of RAC

RA replacement rate/wt%	Water/(kg·m ⁻³)	Cement/(kg·m ⁻³)	NA/(kg·m ⁻³)	RA/(kg·m ⁻³)	Sand/(kg·m ⁻³)
0	201	380	1 128	0	691
50	201	380	564	564	691
100	201	380	0	1 128	691

Note: NA—Natural aggregate.

1.2 CFRP 材料性能试验

试验采用厚度 (t_f) 为 0.167 mm 的 CFRP 作为约束材料,其性能依据《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》(GB/T 3354—2014)^[30]测得,弹性模量 (E_f) 为 248.7 GPa,极限拉伸应变为 1.54%,详见表 3。CFRP 的外部粘合通过浸渍粘合剂来完成;粘合剂采用双组分环氧树脂浸渍的 Sikadur-300,材料参数由制造商提供。与 CFRP 约束 RAC 同批次浇筑了 18 个高 300 mm、直径 150 mm 的标准试件,用于测量不同替代率的 RAC 在不同加载速率下的抗压强度和峰值应变,具体参数见表 1。

表 3 CFRP 的力学性能
Table 3 Mechanical properties of CFRP

Material	t_f /mm	E_f /GPa	f_f /MPa	ε_f %
CFRP	0.167	248.7	3 820.5	1.54

Notes: t_f —Thickness of CFRP; E_f —Modulus of elasticity of CFRP; f_f —Ultimate tensile stress of CFRP; ε_f —Ultimate tensile strain of CFRP.

1.3 试验加载与数据采集

采用图 1(a) 所示的 MTS300 吨液压伺服压力试验机进行加载试验,试件首先采用 10 kN/s 的力控加载至未约束混凝土强度的 30%(约 10 MPa),再通过位移控制的加载方式完成后续加载和卸载。

此加载方式的选择既保证了混凝土开裂前期的荷载位移曲线能被完整地记录下来,同时,力控制加载至较低应力值的选择也避免了干扰加载速率对其峰值强度的影响研究。对于单调加载的试件,在位移控制阶段采用试验方案设定的加载速率加载至试件破坏为止。对于重复轴压加载的试件,在位移控制阶段,采用既定速率加载至目标荷载值再卸载到 1.5 MPa 左右,如此重复直至试件破坏。此外,研究采用数字图像相关技术 (Digital image correlation, DIC) 对试件表面的变形进行测量,并在 DIC 拍摄方向的垂直两侧的中部高度贴轴向应变片 (VSG) 和环向应变片 (LSG)。同时,采用 4 个等间距分布的线性可变量位移传感器 (Linear variable displacement transducer, LVDT) 测量试件的轴向变形,其中 LVDT 的测量高度为 185 mm。此外,试验过程中,轴向荷载由试件下方的柱式压力传感器记录,具体的变形与荷载测量方式如图 1 所示。

2 CFRP 约束再生骨料混凝土柱试验结果与分析

2.1 CFRP 约束 RAC 柱的破坏形态

图 2(a)~2(c) 展示了 CFRP 约束 RAC 在不同加载速率下的破坏形态。图片显示当加载速率为 0.3 mm/min 时,混凝土试件破坏更倾向于压碎破坏 (图 2(a));随着加载速率的增加,试件更易发生斜剪压破坏 (图 2(b))。其内部混凝土裂缝发展的差异也表明加载速率对混凝土内部损伤演化的影响。对比 CFRP 层数对破坏模式的影响发现,两层 CFRP 约束试件的 CFRP 断裂的区域更大 (图 2(d)),相比同样加载速率和替代率的试件 (图 2(h)),CFRP 断裂后混凝土的完整性更低,这是由于两层 CFRP 混凝土承担轴压过程中积累了更多的能量,在破坏的时候对混凝土造成的损伤更大。此外,观察图 2(e)~2(h) 可知,RA 替代率对混凝土试件的破坏影响不显著。但是,与单调加载试件 (图 2(a)) 相比,重复轴压试件 (图 2(e)) 的内部混凝土损伤更严重,这是由于有更多的微裂缝在重复轴压荷载作用下形成,从而破坏时会发现更多的混凝土碎粒。然而,值得注意的是,随着加载速率的增加,因加载方式不同带来的混凝土损伤差异被削弱,综合对比图 2(a) 和 2(e) 与图 2(c) 和图 2(h),加载速率的提升显著地保持了混凝土完整性,这个现象也进一步佐证了加载速率的增加

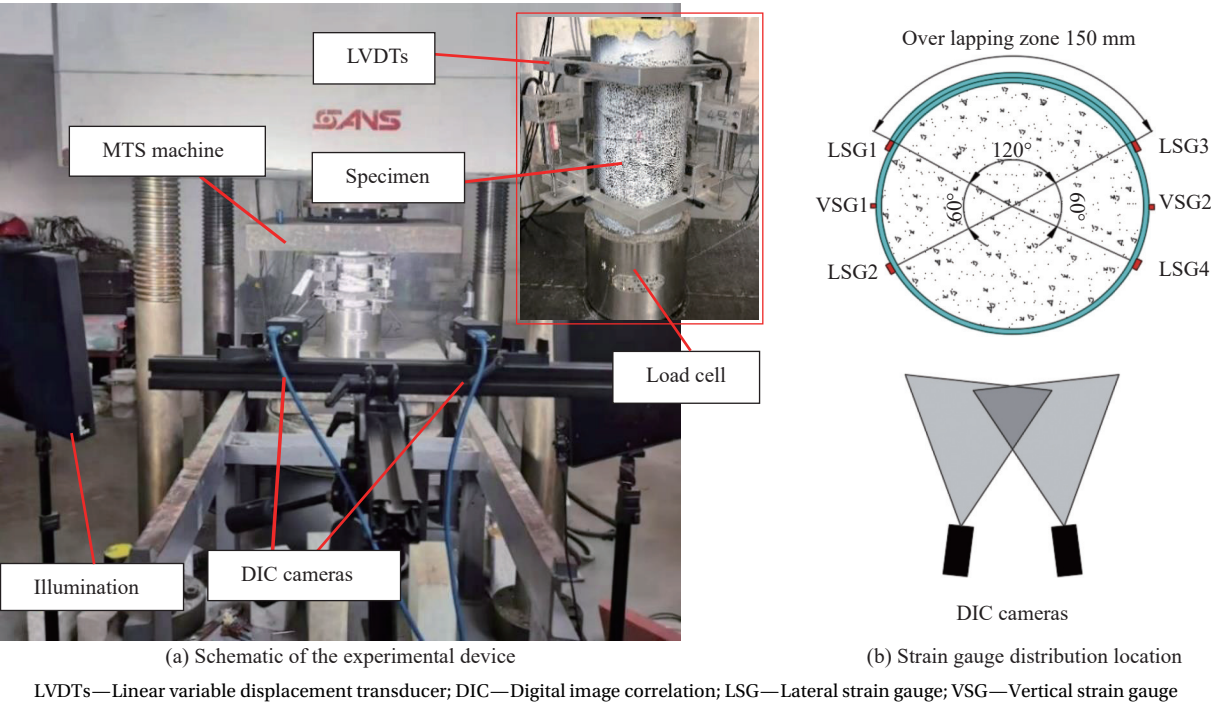


图 1 轴压试验的加载装置及测量装置

Fig. 1 Loading and measuring devices for axial compression tests

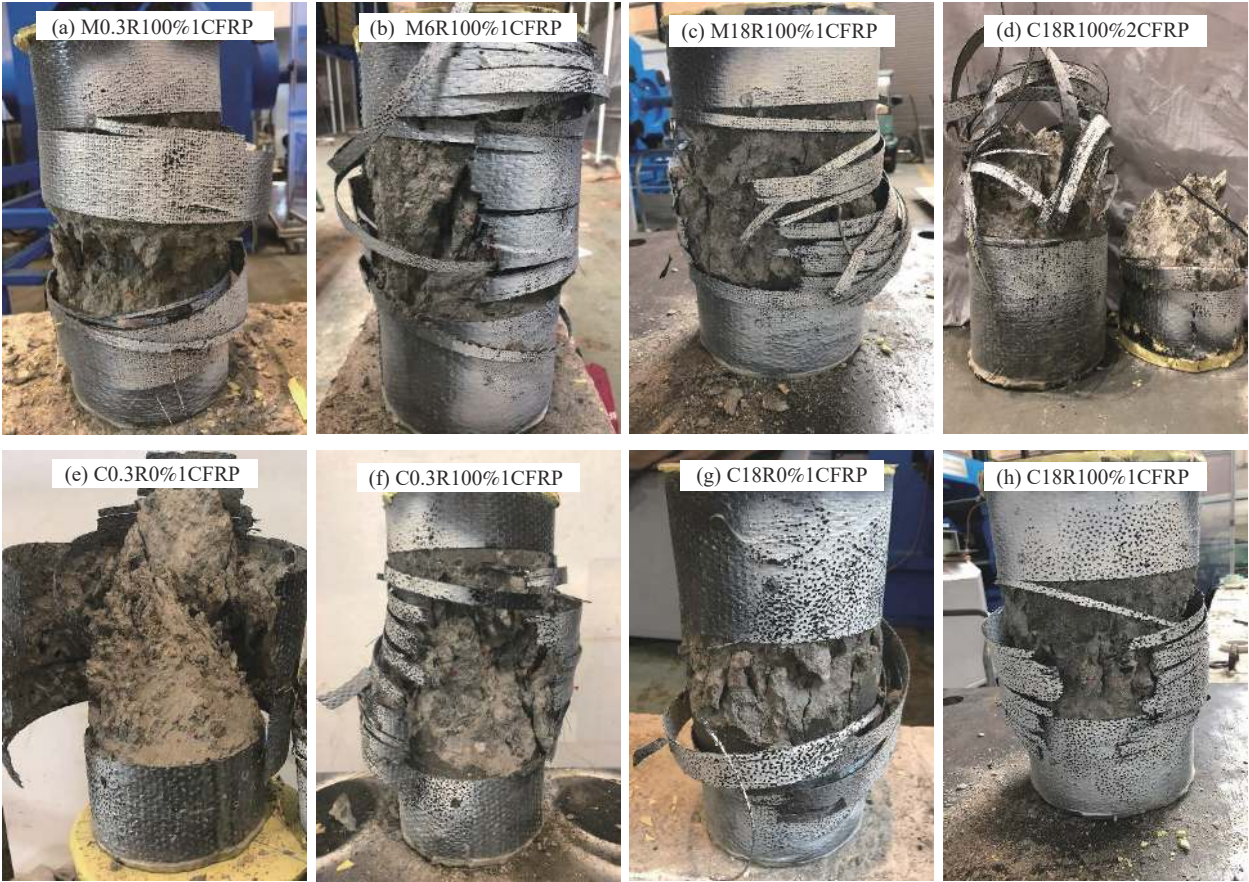


图 2 CFRP 约束 RAC 试件的破坏形态

Fig. 2 Failure modes of CFRP-confined RAC specimens

对 CFRP 约束 RAC 力学性能提升的原因。

2.2 CFRP 约束 RAC 圆柱应力-应变曲线

图 3~图 5 展示了 CFRP 约束 RAC 试件在单调及重复轴压作用下的应力-应变曲线。表 4 给出了

CFRP 约束 RAC 试件的试验数据，可以看出 CFRP 的约束显著提高了 RAC 的强度和延性。轴向应变 (ϵ_c) 与横向应变 (ϵ_l) 分别取 LVDT 和非重叠区域内 DIC 应变数据的平均值。为了便于区分应变，

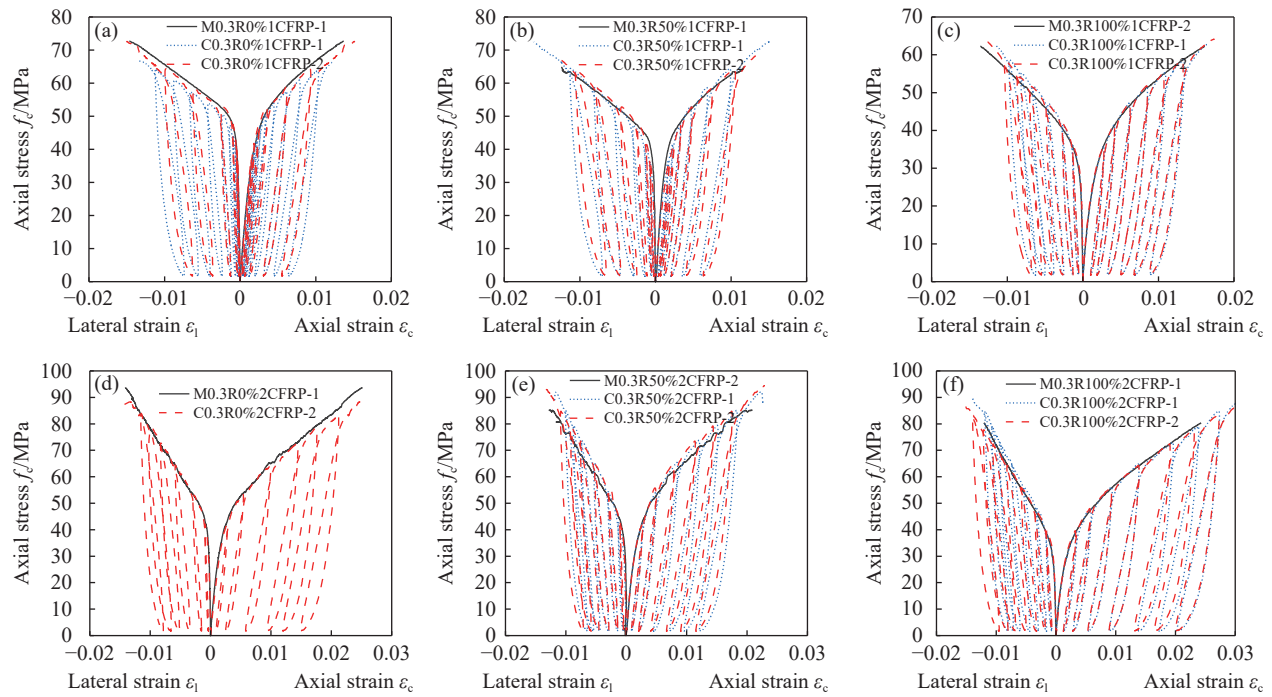


图 3 0.3 mm/min 加载速率下 CFRP 约束再生骨料混凝土应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves for CFRP-confined recycled aggregate concrete at 0.3 mm/min loading rate

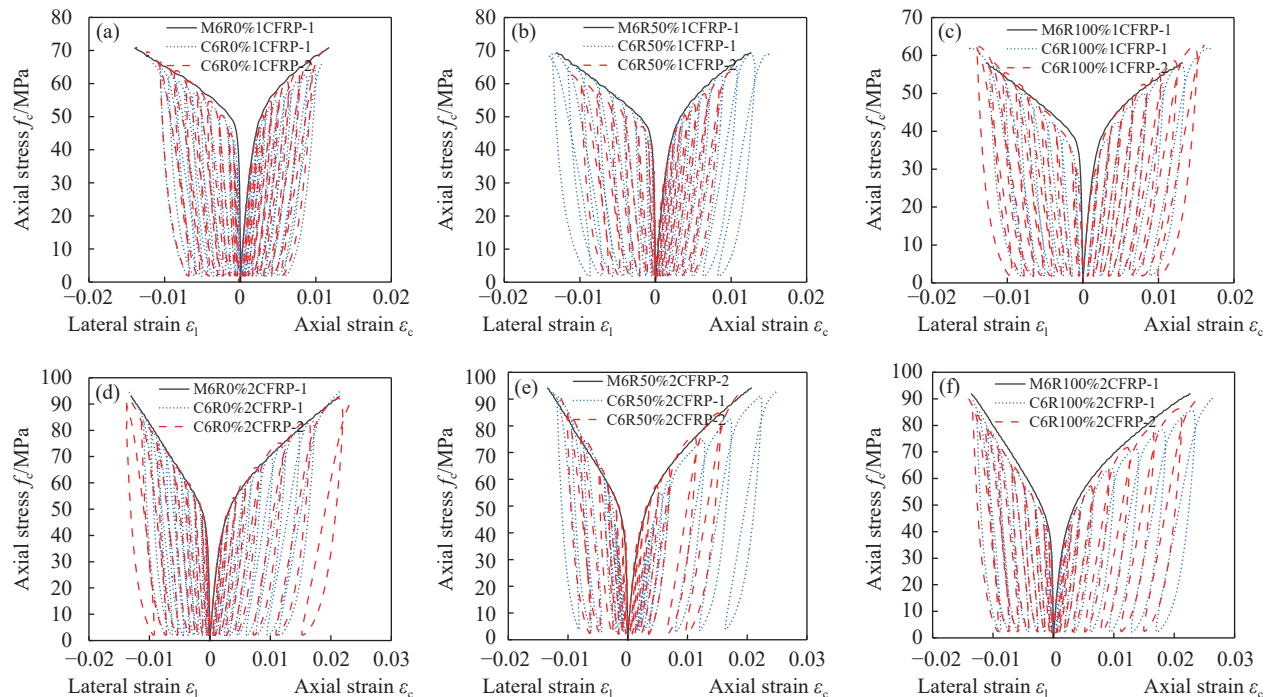


图 4 6 mm/min 加载速率下 CFRP 约束再生骨料混凝土应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves for CFRP-confined recycled aggregate concrete at 6 mm/min loading rate

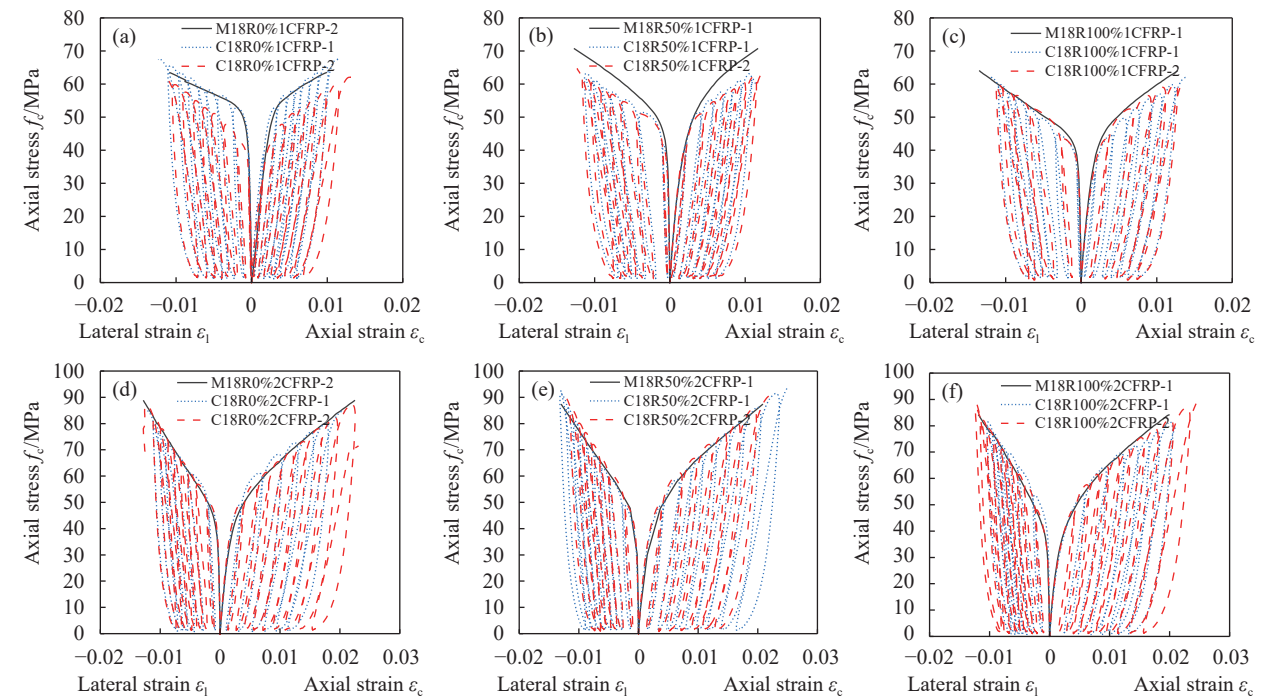


图5 18 mm/min 加载速率下 CFRP 约束再生骨料混凝土应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves for CFRP-confined recycled aggregate concrete at 18 mm/min loading rate

表 4 CFRP 约束 RAC 试件试验结果

Table 4 Test results for CFRP-confined RAC specimens

Specimen	$f_{cu}/$ MPa	f_{cu}/f_{co}	$\varepsilon_{cu}/\%$	$\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{h,rup}/\%$	Specimen	$f_{cu}/$ MPa	f_{cu}/f_{co}	$\varepsilon_{cu}/\%$	$\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{h,rup}/\%$
M0.3R0%1CFRP-1	72.7	1.58	1.37	5.61	1.47	C0.3R0%1CFRP-1	66.7	1.44	1.23	5.03	1.42
M0.3R0%1CFRP-2	71.0	1.54	1.41	5.79	1.43	C0.3R0%1CFRP-2	72.6	1.57	1.51	6.18	1.50
M0.3R50%1CFRP-1	62.7	1.46	1.19	4.96	1.38	C0.3R50%1CFRP-1	72.5	1.68	1.50	6.23	1.61
M0.3R50%1CFRP-2	64.9	1.51	1.17	4.87	1.40	C0.3R50%1CFRP-2	68.2	1.58	1.32	5.50	1.28
M0.3R100%1CFRP-1	—	—	—	—	—	C0.3R100%1CFRP-1	62.8	1.72	1.65	7.14	1.17
M0.3R100%1CFRP-2	62.3	1.73	1.61	7.04	1.36	C0.3R100%1CFRP-2	64.1	1.75	1.74	7.53	1.31
M6R0%1CFRP-1	71.0	1.42	1.17	4.71	1.36	C6R0%1CFRP-1	66.6	1.32	1.10	4.42	1.23
M6R0%1CFRP-2	73.6	1.47	1.22	4.89	0.99	C6R0%1CFRP-2	69.6	1.38	1.11	4.43	1.24
M6R50%1CFRP-1	69.5	1.48	1.27	5.16	1.14	C6R50%1CFRP-1	69.2	1.46	1.50	6.10	1.44
M6R50%1CFRP-2	71.9	1.53	1.31	5.34	1.12	C6R50%1CFRP-2	63.6	1.34	1.01	4.11	1.22
M6R100%1CFRP-1	53.6	1.41	1.06	4.56	1.25	C6R100%1CFRP-1	62.0	1.62	1.69	7.27	1.49
M6R100%1CFRP-2	58.1	1.53	1.32	5.69	1.27	C6R100%1CFRP-2	62.7	1.64	1.60	6.88	1.23
M18R0%1CFRP-1	63.6	1.22	1.00	3.96	1.09	C18R0%1CFRP-1	67.6	1.30	1.14	4.52	1.22
M18R0%1CFRP-2	72.6	1.40	1.13	4.49	1.47	C18R0%1CFRP-2	62.1	1.19	1.31	5.19	1.15
M18R50%1CFRP-1	70.8	1.42	1.17	4.71	0.99	C18R50%1CFRP-1	63.1	1.26	1.14	4.58	1.12
M18R50%1CFRP-2	72.1	1.44	1.19	4.78	1.42	C18R50%1CFRP-2	64.6	1.29	1.25	5.01	1.23
M18R100%1CFRP-1	64.1	1.56	1.28	5.39	1.35	C18R100%1CFRP-1	62.0	1.51	1.38	5.83	1.19
M18R100%1CFRP-2	62.9	1.54	1.28	5.39	1.28	C18R100%1CFRP-2	60.5	1.48	1.33	5.60	1.13
M0.3R0%2CFRP-1	93.7	2.40	2.51	10.74	1.41	C0.3R0%2CFRP-1	88.3	2.22	2.50	10.62	1.34
M0.3R0%2CFRP-2	80.8	2.07	2.09	8.94	1.17	C0.3R0%2CFRP-2	—	—	—	—	—
M0.3R50%2CFRP-1	91.4	2.40	2.63	11.29	1.39	C0.3R50%2CFRP-1	92.0	2.38	2.26	9.68	1.12
M0.3R50%2CFRP-2	85.2	2.24	2.08	8.95	1.28	C0.3R50%2CFRP-2	94.4	2.45	2.28	9.78	1.36
M0.3R100%2CFRP-1	80.4	2.36	2.43	10.73	1.31	C0.3R100%2CFRP-1	89.6	2.60	3.09	13.60	1.40
M0.3R100%2CFRP-2	86.0	2.53	2.50	11.06	1.22	C0.3R100%2CFRP-2	87.6	2.54	3.05	13.42	1.54
M6R0%2CFRP-1	92.9	2.19	2.15	8.97	1.31	C6R0%2CFRP-1	94.8	2.21	2.15	8.96	1.35
M6R0%2CFRP-2	85.3	2.01	2.10	8.77	1.29	C6R0%2CFRP-2	92.1	2.15	2.30	9.59	1.38
M6R50%2CFRP-1	91.2	2.20	2.28	9.60	1.45	C6R50%2CFRP-1	92.6	2.23	2.50	10.50	1.13
M6R50%2CFRP-2	94.3	2.27	2.07	8.72	1.44	C6R50%2CFRP-2	92.5	2.22	1.91	8.03	1.13

续表 4

Specimen	f_{cu}/MPa	f_{cu}/f_{co}	$\varepsilon_{cu}/\%$	$\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{h,rupt}/\%$	Specimen	f_{cu}/MPa	f_{cu}/f_{co}	$\varepsilon_{cu}/\%$	$\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{h,rupt}/\%$
M6R100%2CFRP-1	87.8	2.17	1.87	7.93	1.36	C6R100%2CFRP-1	90.1	2.21	2.63	11.11	1.25
M6R100%2CFRP-2	92.0	2.27	2.27	9.60	1.39	C6R100%2CFRP-2	90.3	2.21	2.41	10.16	1.41
M18R0%2CFRP-1	—	—	—	—	—	C18R0%2CFRP-1	84.8	1.96	2.08	8.64	1.21
M18R0%2CFRP-2	91.5	2.13	2.44	10.16	1.36	C18R0%2CFRP-2	87.2	2.01	2.31	9.59	1.26
M18R50%2CFRP-1	87.4	2.08	2.09	8.74	1.13	C18R50%2CFRP-1	93.9	2.21	2.51	10.51	1.25
M18R50%2CFRP-2	95.1	2.26	2.31	9.67	1.22	C18R50%2CFRP-2	90.7	2.13	2.25	9.42	1.25
M18R100%2CFRP-1	84.2	2.05	2.00	8.43	1.23	C18R100%2CFRP-1	81.5	1.97	2.11	8.89	0.99
M18R100%2CFRP-2	—	—	—	—	—	C18R100%2CFRP-2	89.8	2.17	2.49	10.47	1.22

Notes: f_{cu} —Ultimate strength of specimens; f_{cu}/f_{co} —Ultimate strength enhancement ratio of the specimens; ε_{cu} —Ultimate strain of specimens; $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$ —Ultimate strain enhancement ratio of the specimens; $\varepsilon_{h,rupt}$ —Hoop rupture strain of specimens; "—"—Data not measured; Two specimens with the same parameters were prepared, and they were distinguished by "-1" and "-2".

此处将受压应变表示为正，受拉应变表示为负。可以看出，针对不同加载速率/不同 RA 替代率的试件，其单调加载曲线和重复加/卸载曲线的包络线基本叠合，均呈两段式；这种现象已经在之前的研究^[19,31]中得到证实。对于重复轴压试件，卸载曲线在初始卸载阶段接近于线性，当轴向应力卸载至接近横轴时，曲线表现出高度的非线性，其切线模量随应力的减小而减小，当卸载应力趋于 0 时，切线模量的减小尤其快。再加载过程从残余塑性应变开始，前半部分近似线性增长，然后进入非线性过渡阶段，最后逐渐收敛于单调加载曲线。仔细观察图 3~图 5 并对比其不同的参数(加载速率、RA 替代率、CFRP 层数等)的影响，可以看出当加载速率一定时，RA 替代率越大，试件应力-应变曲线的硬化上升段越低；当 RA 替代率一定时，加载速率越大，应力-应变曲线的硬化上升段越陡峭。同时，两层 CFRP 约束的试件的应力-应变曲线显著高于一层 CFRP 约束的试件。

3 CFRP 约束再生骨料混凝土极限状态

如图 3~图 5 所示，本文研究的 FRP 约束均为强约束，应力-应变曲线均呈现为峰后的应变强化趋势。因此，本文中极限点即为峰值点，即极限强度 (f_{cu}) 和极限应变 (ε_{cu}) 定义为应力-应变曲线的极限点(峰值点)。由于单调荷载作用下 CFRP 约束 RAC 的应力-应变曲线与重复荷载作用下的应力-应变包络线具有较高的叠合性，因此将不同加载方式的极限状态值放在一起讨论，具体值见表 4。

3.1 CFRP 约束 RAC 极限强度 f_{cu}

图 6 显示了加载速率与 RA 替代率对极限强度增强比的影响。极限强度增强比定义为试件的极限强度与相同工况的无约束 RAC 试件的抗压强度

之比。同一加载速率的试件，RA 替代率越大，极限强度增强比越大。这表明随着 RA 替代率的增加，约束效率增强，这一结果验证了 Ilki 等^[32]的结论。然而，随着 CFRP 层数增加和加载速率的提升(图 6(b))，RA 替代率对强度的影响被显著削弱，这是由于较大的约束刚度和加载速率抑制了骨料自身缺陷对强度的影响。此外，纵向对比同一 RA 替代率的试件，可以看出极限强度增强比

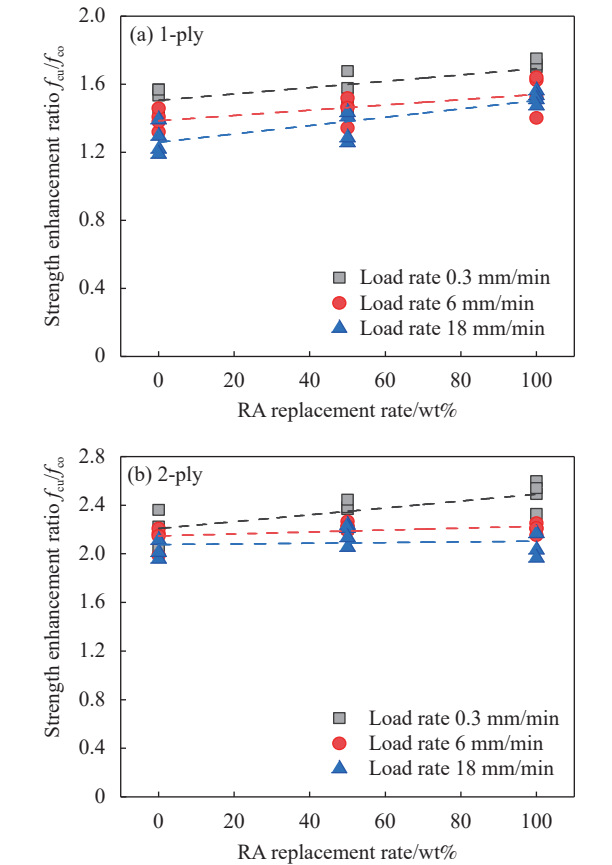


图 6 加载速率与 RA 替代率对 CFRP 约束 RAC 极限强度增强比的影响

Fig. 6 Effect of loading rate and RA replacement rate on ultimate strength enhancement ratio of CFRP-confined RAC

随着加载速率的增加而减小。这是由于加载速率的增加同时也提高了无约束混凝土强度，进而降低了约束效率，这一现象对于 RA 替代率 100wt% 的试件尤为明显。结合表 4 数据中 2 层 CFRP 约束 100wt%RA 替代率混凝土，18 mm/min 加载速率下混凝土的极限强度增强比相对于 3 mm/min 的试件强度比降低了 16.2%。

基于以上数据，本文借鉴已有模型的数学表达式^[33-34]，通过对试验数据进行回归分析得到新的极限强度模型如下：

$$\frac{f_{cu}^d}{f_{cu,0}} = 1 + \left(0.02 \ln \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right) + 0.009 \right) \lg \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right)$$

(1)

表 5 CFRP 约束混凝土极限强度模型

Table 5 Ultimate strength model of CFRP-confined concrete

References	Ultimate strength model	ω
[27]	$\frac{f_{cc}^d}{f_{cc,0}} = 1 + 0.1 \left(\lg \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) \right) \left(\frac{f_{30}}{f_{co}} \right)^{0.73}$	0.1203
[33, 35]	$\frac{f_{cc}^d}{f_{cc,0}} = 1 + (0.06 \ln \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right) + 0.274) \lg \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right)$	0.3077
[34]	$\frac{f_{cc}^d}{f_{cc,0}} = 1 + \left(0.204 + 0.056 \ln \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right) \right) \lg \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right)$	0.2083

Notes: f_1 —Confinement stress of CFRP; $f_{cc,0}$ —Ultimate strength of CFRP-confined recycled aggregate concrete columns in quasi-static conditions; f_{cc}^d —Ultimate strength of CFRP-confined recycled aggregate concrete columns in a non-quasistatic conditions; $\dot{\varepsilon}$ —Dynamic strain rate; ε_0 —Quasi-static strain rate, taking a value of $1.67 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; f_{30} —Compressive strength of C30 concrete, taken as 30 MPa.

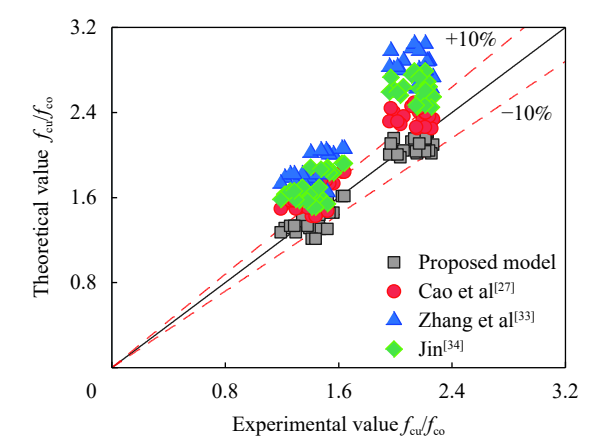


图 7 CFRP 约束混凝土的极限强度模型评估

Fig. 7 Evaluation of ultimate strength model of CFRP-confined concrete

$$\omega = \sum_{i=1}^j \frac{|\text{Expe.} - \text{Theo.}|}{|\text{Expe.}|}$$

(2)

式中： j 为试验数据的数量；Expe.和Theo.分别表示 CFRP 约束 RAC 极限强度的试验值和理论值。如图 7 显示，所选的极限强度模型大多高估了加载速率的影响，尽管 Cao 等^[27]的模型表现较好，

式中： $f_1 = 2E_f t_f \varepsilon_{h, \text{rup}} / D$ ，表示极限状态下 RAC 受到的侧向约束力； $\varepsilon_{h, \text{rup}}$ 为 CFRP 的环向破裂应变； $f_{cu,0}$ 为准静态荷载下 CFRP 约束 RAC 的极限强度； f_{cu}^d 为非准静态荷载下 CFRP 约束 RAC 的极限强度； $\dot{\varepsilon}$ 为试件的应变加载速率； ε_0 为准静态应变加载速率，其值为 $1.67 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。该模型考虑加载速率的影响及 FRP 约束对再生骨料混凝土约束效率的影响。同时，作者收集了考虑加载速率影响的 FRP 约束混凝土极限强度模型(表 5)，并将本文的试验结果与表中模型的预测结果进行比较(图 7)。本文采用绝对误差 (Absolute error, ω) 评估模型性能，其计算式如下：

其绝对误差为 0.1203，但模型的预测仍不够准确且存在较大离散性。新模型的 ω 为 0.0475 且离散性较小，显著地提升了模型的预测精度，证明其能更好地预测不同加载速率下的 CFRP 约束 RAC 的极限强度。

3.2 CFRP 约束 RAC 极限应变 ε_{cu}

图 8 显示加载速率与 RA 替代率对极限应变增强比的影响。可看出，同一加载速率的试件，RA 替代率越大，极限应变增强比越大。与 3.1 节强度的变化趋势相似，随着 CFRP 层数和加载速率的增加，RA 替代率对高加载速率试件的影响被显著削弱(图 8(b))。同时，从图 8 可以看出，加载速率的影响对 100wt%RA 替代率的试件更显著。结合表 4 数据中 2 层 CFRP 约束 100wt%RA 替代率混凝土，相比 3 mm/min 加载速率下混凝土的极限应变增强比，18 mm/min 的试件的极限应变增强比降低了 22.6%。这一现象说明 CFRP 的约束效率对内部混凝土缺陷较大的试件更显著，此约束效率也会随着加载速率的增加而增强。

作者收集的 FRP 约束混凝土极限应变模型如

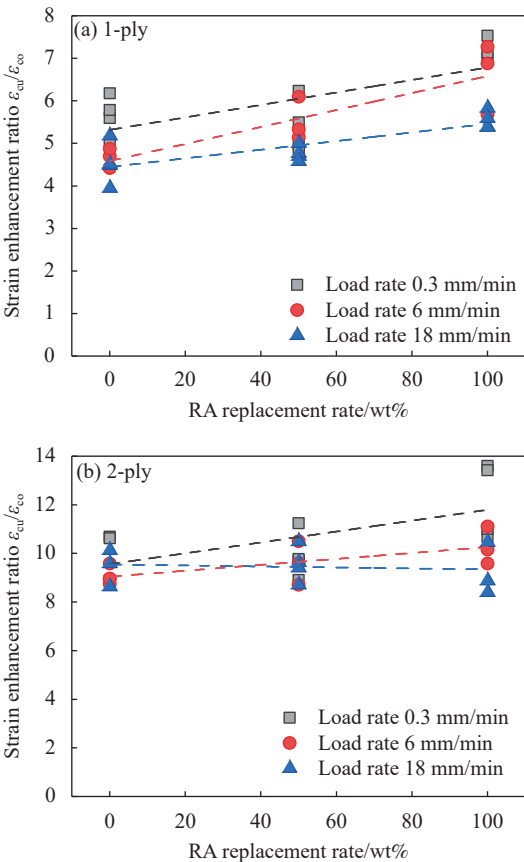


图8 加载速率与RA替代率对CFRP约束RAC极限应变增强比的影响
Fig. 8 Effect of loading rate and RA replacement rate on ultimate strain enhancement ratio of CFRP-confined RAC

表6所示，这些模型都考虑了加载速率的影响。图9将表中模型预测值和试验结果进行对比，发现所选模型大多高估了加载速率对极限应变的影响，其中张宝超等^[33, 35]的模型绝对误差为1.3436，与试验值相差较大；对比发现，其混凝土试件的粗骨料粒径小于15 mm，而本试验试件的粗骨料粒径为5~25 mm，两者存在明显差异，较小的骨料缝隙更容易被压碎的砂石填充，其强度和变形等性能会更加优异。在前文讨论中可知，随着

RA替代率的增加，极限应变增大，CFRP约束RAC的延性更好。Cao等^[27]的模型较准确地考虑了加载速率的影响，表现出很好的模型预测性能。

4 CFRP约束再生骨料混凝土重复轴压应力-应变模型的关键参数分析

4.1 典型重复轴压应力-应变曲线

与NAC相似，CFRP约束RAC在重复轴压作用下的应力-应变曲线示意图如图10所示，每个完整的应力-应变曲线包含卸载曲线和再加载曲线两个部分。式(3)和式(5)为图10中卸载曲线和再加载曲线的表达式。图中 f_{cu} 和 ε_{cu} 分别为极限应力和极限应变， E_2 为包络线的二阶刚度。 f_{un} 和 ε_{un} 分别为卸载应力与卸载应变，卸载路径与横轴的交点定义为残余塑性应变 ε_{pl} ，此 ε_{pl} 是表达材料的塑性变形关键参数，也是重复轴压应力-应变模型的关键点^[21-22]。此外，卸载曲线在该点处的切线斜率为卸载刚度 $E_{un,0}$ 。再加载曲线的斜率定义为再加载刚度 E_{re} ，线性部分末端的应力定义为弹性极限应力 f_r ，再加载曲线起始于点 $(f_{re}, \varepsilon_{re})$ 最终与包络线交于点 $(f_{ret,env}, \varepsilon_{ret,env})$ 。 n 为曲线在过渡区的曲率控制参数，当 n 减小时，转弯曲率减小，过渡区越平缓；当 n 接近无穷大时，曲线近似为两条直线^[22]。重复轴压的应力-应变曲线的关键参数可以通过式(3)和式(5)曲线拟合方法^[22]从试验结果中得到，其中，卸载曲线参数 $E_{un,0}$ 通过式(3)与试验数据进行拟合获取：

$$f_c = a \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{pl}} \right)^m (\varepsilon_c - \varepsilon_{pl}) \tag{3}$$

其中，

$$m = \log \frac{f_{un}/[a(\varepsilon_{un} - \varepsilon_{pl})]}{\varepsilon_{un}/\varepsilon_{pl}} \tag{4}$$

对上式中的轴向应变 ε_c 求导，令 $\varepsilon_c = \varepsilon_{pl}$ ，得到 $\left. \frac{df_c}{d\varepsilon_c} \right|_{\varepsilon_c = \varepsilon_{pl}} = a = E_{un,0}$ 。系数 a 即等于 $E_{un,0}$ 。

表6 CFRP约束混凝土的极限应变模型

Table 6 Ultimate strain model of CFRP-confined concrete

References	Ultimate strain model	ω
[27]	$\frac{\varepsilon_{cc}^d}{\varepsilon_{cc,0}} = 1 - 0.11g\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right)$	0.0940
[33, 35]	$\frac{\varepsilon_{cc}^d}{\varepsilon_{cc,0}} = 1.822 + 0.1651g\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right)$	1.3436
[34]	$\frac{\varepsilon_{cc}^d}{\varepsilon_{cc,0}} = 1 + (0.2887\frac{f_i}{f_{co}} + 0.0329)g\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right)$	0.3481

Notes: $\varepsilon_{cc,0}$ —Ultimate strain of CFRP-confined concrete columns in quasi-static conditions; ε_{cc}^d —Ultimate strain of CFRP-confined concrete columns in a non-quasi-static conditions.

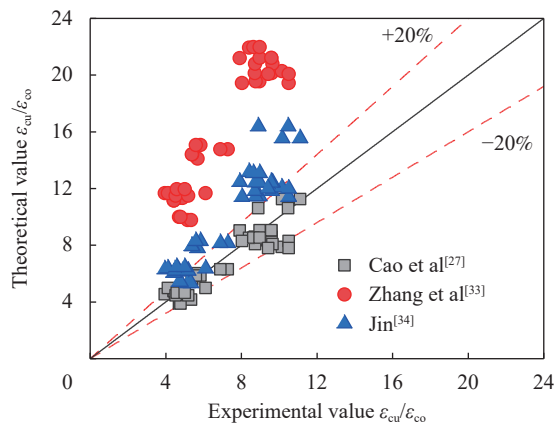


图9 CFRP 约束混凝土的极限应变模型评估

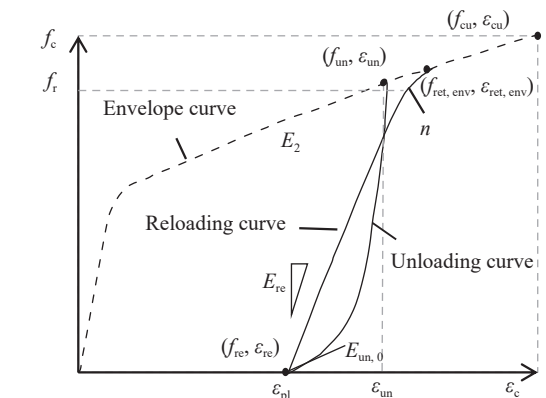
Fig. 9 Evaluation of ultimate strain model of CFRP-confined concrete

再加载曲线的参数 E_{re} 、 f_r 、 ε_{pl} 和 n ，通过下式^[22]与试验数据拟合获取：

$$f_c = \frac{(E_{re} - E_2)(\varepsilon_c - \varepsilon_{pl})}{(1 + ((E_{re} - E_2)(\varepsilon_c - \varepsilon_{pl})/f_r)^n)^{\frac{1}{n}}} + E_2(\varepsilon_c - \varepsilon_{pl}) \quad (5)$$

4.2 CFRP 约束 RAC 卸载刚度 $E_{un,0}$

在重复轴压应力-应变曲线的研究中， $E_{un,0}$ 是控制卸载曲线非线性阶段的关键参数。图 11 为 RA 替代率、加载速率和约束刚度对 $E_{un,0}$ 的影响。从图 11(a)~11(b) 可以看出，在同一卸载应变下，试件的 RA 替代越大， $E_{un,0}$ 越小。然而，随着加载速率的增大， $E_{un,0}$ 受 RA 替代率的影响减弱



E_2 —The second stiffness; f_{un} —Unloading stress; ε_{un} —Unloading strain; ε_{pl} —Plastic strain; $E_{un,0}$ —Unloading stiffness; E_{re} —Reloading stiffness; f_r —Elastic limit stress; f_{re} —Reloading stress; ε_{re} —Reloading strain; $f_{ret, env}$ —Return envelope stress; $\varepsilon_{ret, env}$ —Return envelope strain; n —Curvature of transition zone

图 10 CFRP 约束混凝土重复轴压下的典型应力-应变曲线

Fig. 10 Typical stress-strain curve of CFRP-confined concrete under cyclic compression

(图 11(b))，这也说明较高的加载速率加剧了混凝土的内部损伤，缩减了不同替代率混凝土的强度差异所带来的影响。同样，图 11(c)~11(d) 显示加载速率对 $E_{un,0}$ 影响显著。在同一卸载应变下，加载速率越大的试件，其 $E_{un,0}$ 越小。此外，从图 11(e)~11(f) 可以看出，约束刚度的变化对 100wt%RA 替代率的混凝土和加载速率快的混凝土试件 $E_{un,0}$ 的影响显著。分析可知，RA 自身的缺陷及较高的加

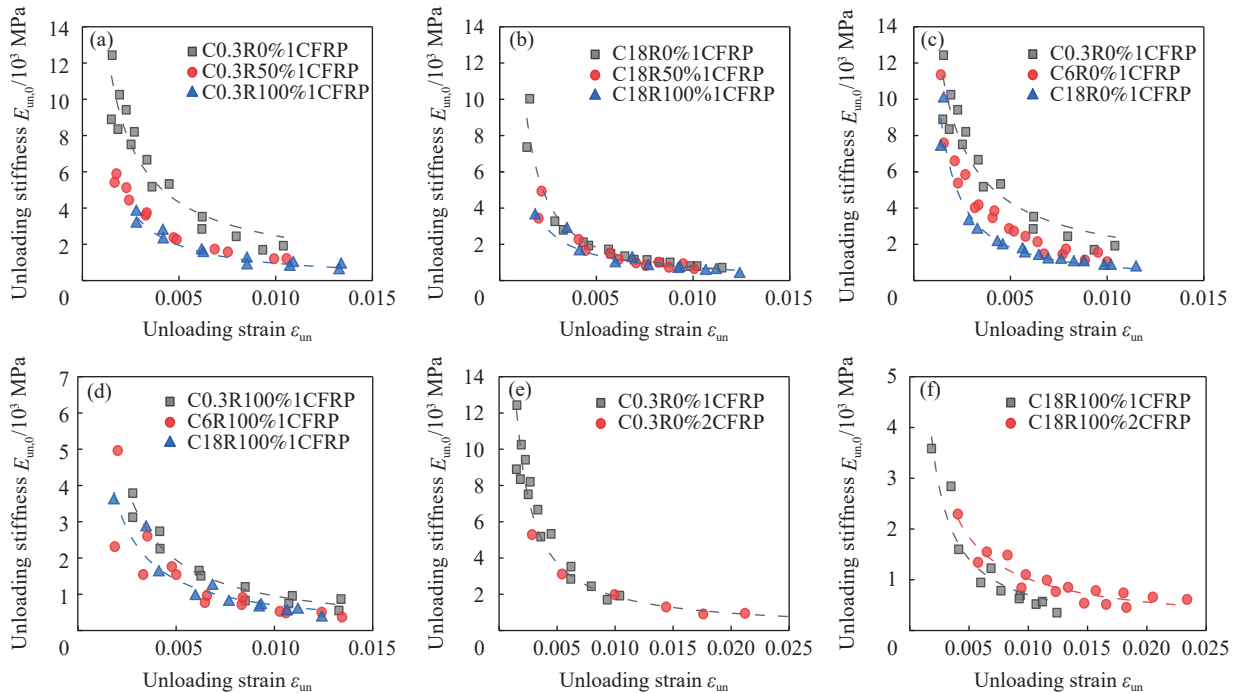


图 11 RA 替代率、加载速率和约束刚度对 CFRP 约束 RAC 卸载刚度 $E_{un,0}$ 的影响

Fig. 11 Effect of RA replacement ratios, loading rate and confinement stiffness on unloading stiffness $E_{un,0}$ of CFRP-confined RAC

载速率使混凝土的内部损伤加剧，此时较大的约束刚度能够更好地抑制混凝土的损伤发生。

Lam 等^[19]认为， $E_{un,0}$ 仅与卸载应变和无约束混凝土强度有关。本文通过试验发现，RA 替代率与加载速率对 $E_{un,0}$ 有显著影响。为了准确预测不同加载速率下 CFRP 约束 RAC 的卸载刚度，在 Li 等^[22]模型基础上考虑加载速率带来的影响。考虑到公式的适用性和拟合的准确性，函数式被设定为指数型多项式组合。根据本文的试验数据进行回归分析，得到如下模型：

$$\frac{a}{E_c} = 0.21 \left(\frac{f_{co}}{f_{30}} \right)^{0.12} \rho^{-0.19} \left(\frac{\varepsilon_{un}}{\varepsilon_{co}} \right)^{-0.77} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{-105.165 \varepsilon_{un}^{1.51}}$$

(6)

式中： $\rho = 2E_{ftf}/Df_{co}$ ； f_{co} 取相应 RA 替代率的无约束混凝土抗压强度。

从图 12 可以看出，Lam 等^[19]的模型高估了 $E_{un,0}$ 。新建模型中包含应变加载速率系数 $\dot{\varepsilon}/\varepsilon_0$ ，提高了模型预测的准确性。

4.3 CFRP 约束 RAC 残余塑性应变 ε_{pl}

塑性应变不仅定义了卸载曲线与应变轴的交叉点，同时也能够表征卸载曲线和加载曲线的非线性行为^[17, 21]。Li 等^[22]对重复轴压荷载作用下 FRP 约束混凝土的研究中显示，无约束混凝土强度和约束刚度是影响 ε_{pl} 的关键因素，本文进一步

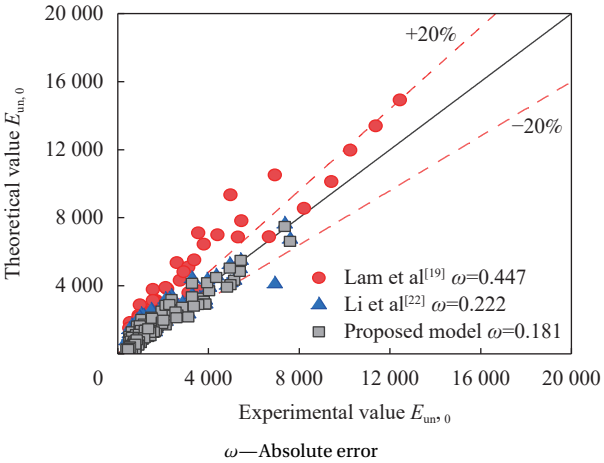


图 12 CFRP 约束 RAC 卸载刚度 $E_{un,0}$ 的模型性能对比

Fig. 12 Comparison of model performance of unloading stiffness $E_{un,0}$ CFRP-confined RAC

研究加载速率与 RA 替代率对其影响。

图 13 显示 ε_{pl} 随着卸载应变的增大而增大，反映了试件在重复且逐渐增大的压缩荷载下的损伤累积。然而，由于本文中 RA 带来的再生骨料混凝土强度变化范围较小，不同 RA 替代率和约束刚度对 ε_{pl} 的影响不显著(图 13(a)~13(b) 和图 13(d)~13(f))。图 13(c)~13(d) 展示了不同加载速率对 ε_{pl} 的影响。在相同的卸载应变下， ε_{pl} 随着加载速率的增加而变小。

上述讨论可知，除卸载应变外，加载速率也

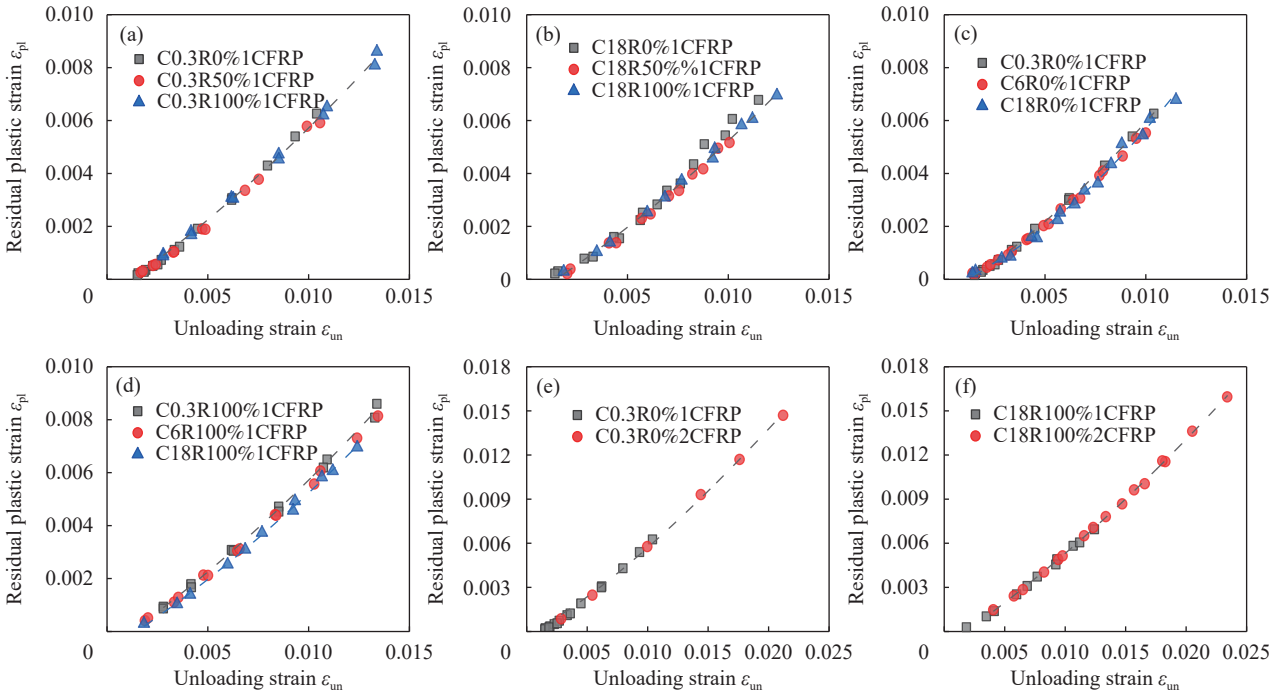


图 13 RA 替代率、加载速率和约束刚度对 CFRP 约束 RAC 残余塑性应变 ε_{pl} 的影响

Fig. 13 Effect of RA replacement ratios, loading rate and confinement stiffness on residual plastic strain ε_{pl} of CFRP-confined RAC

是影响 ε_{pl} 不可忽略的因素。本文采用常见的分段

$$\varepsilon_{pl} = \begin{cases} 0, & 0 < \varepsilon_{un} \leq 0.001 \\ 7.35 \left(\frac{f_{co}}{f_{30}} \right)^{-0.36} (\varepsilon_{un} - 0.001)^2 + \rho^{-0.17} (\varepsilon_{un} - 0.001) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right)^{-0.17 \varepsilon_{un}^{0.63}}, & 0.001 < \varepsilon_{un} \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (7)$$

对比目前现有的模型，采用本文提出模型所计算的预测值与试验结果有更好的匹配度，如图 14 所示。

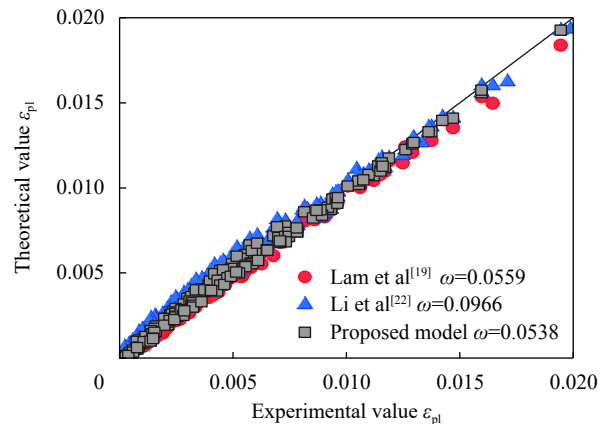


图 14 CFRP 约束 RAC 残余塑性应变 ε_{pl} 的模型性能对比
Fig. 14 Comparison of model performance of residual plastic strain ε_{pl} of CFRP-confined RAC

4.4 CFRP 约束 RAC 再加载刚度 E_{re}

FRP 约束及混凝土的内部损伤均能引起再加载刚度 E_{re} 的变化 [36-38]。 E_{re} 是再加载应力-应变模型的另一个重要参数。图 15 表达了 RA 替代率、

函数表达式，通过数学回归分析，得到以下模型：

$$\frac{E_{re}}{E_c} = 0.585 \left(\frac{f_{co}}{f_{30}} \right)^{0.388} \rho^{0.021} (\bar{\varepsilon})^{-0.266} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right)^{(761.45 \varepsilon_{un}^2 - 16.42 \varepsilon_{un} + 0.032)} \quad (8)$$

其中，

$$\bar{\varepsilon} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_{un}}{\varepsilon_{co}}, & \varepsilon_{un}/\varepsilon_{co} \leq 10 \\ 10, & \varepsilon_{un}/\varepsilon_{co} > 10 \end{cases} \quad (9)$$

本文提出的模型在考虑加载速率的情况下显

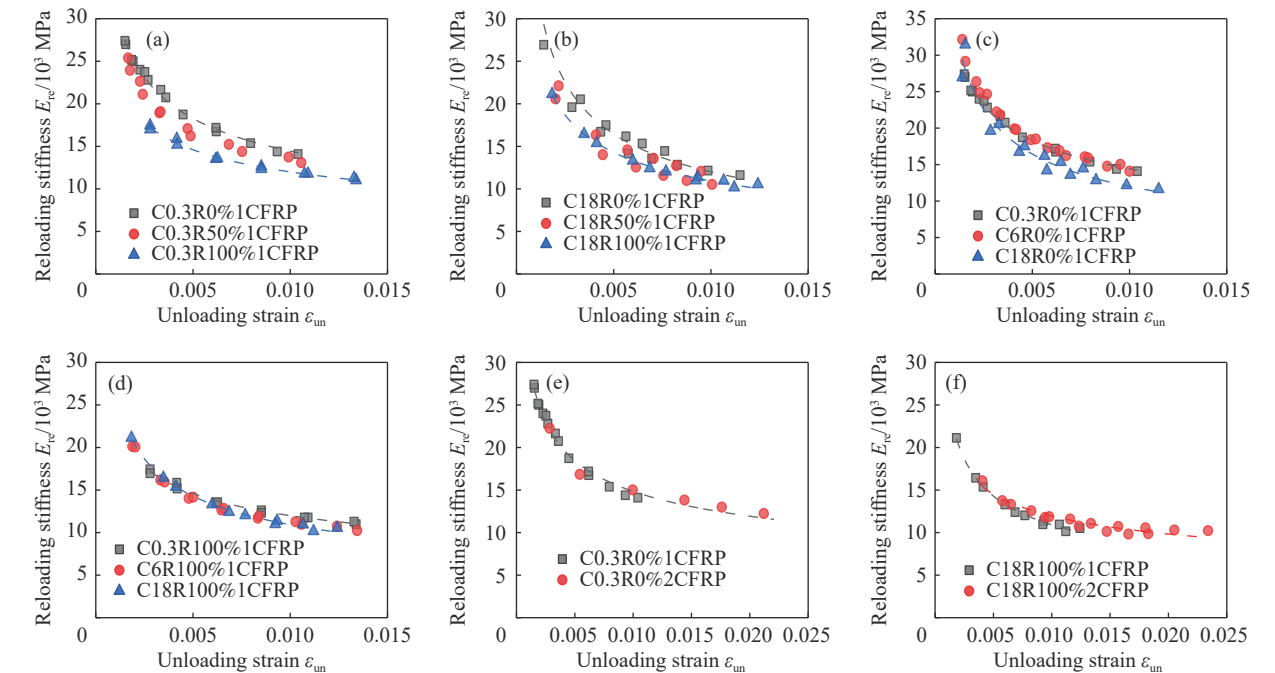


图 15 RA 替代率、加载速率和约束刚度对 CFRP 约束 RAC 再加载刚度 E_{re} 的影响

Fig. 15 Effect of RA replacement ratios, loading rate and confinement stiffness on CFRP-confined RAC reloading stiffness E_{re}

示出更好的模型性能，如图 16 所示。

4.5 CFRP 约束 RAC 加载曲线过渡区应力 f_t

f_t 是指再加载曲线的线性部分末端与曲线相连处的应力值。图 17 为 RA 替代率、加载速率和约束刚度对 f_t 的影响。图 17(a)~17(b) 显示， f_t 随着卸载应变的增加呈现线性上升趋势。由于 RAC 的强度较 NAC 更低，因此在同一卸载应变下，RA 替代率越大， f_t 越小。观察图 17(c)~17(d) 可知，在同一卸载应变下，加载速率越大， f_t 越大。从图 17(e)~17(f) 可以看出，不同约束刚度下 f_t 的变化趋势与 E_{re} 一致，在高加载速率和高 RA 替代率的共同作用下，较大的约束刚度能更好地抑制受损伤的混凝土，表现出更大的过渡区应力 f_t 。

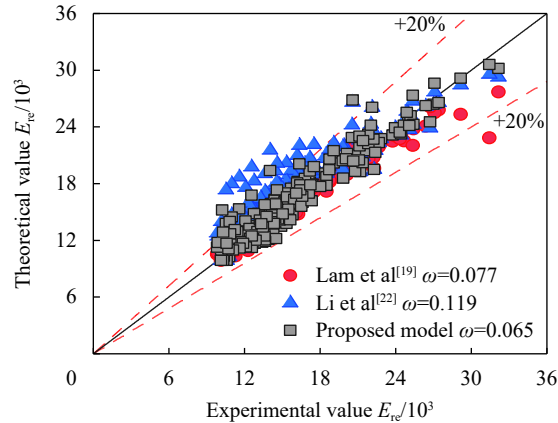


图 16 CFRP 约束 RAC 再加载刚度 E_{re} 的模型性能对比

Fig. 16 Comparison of model performance of reloading stiffness E_{re} of CFRP-confined RAC

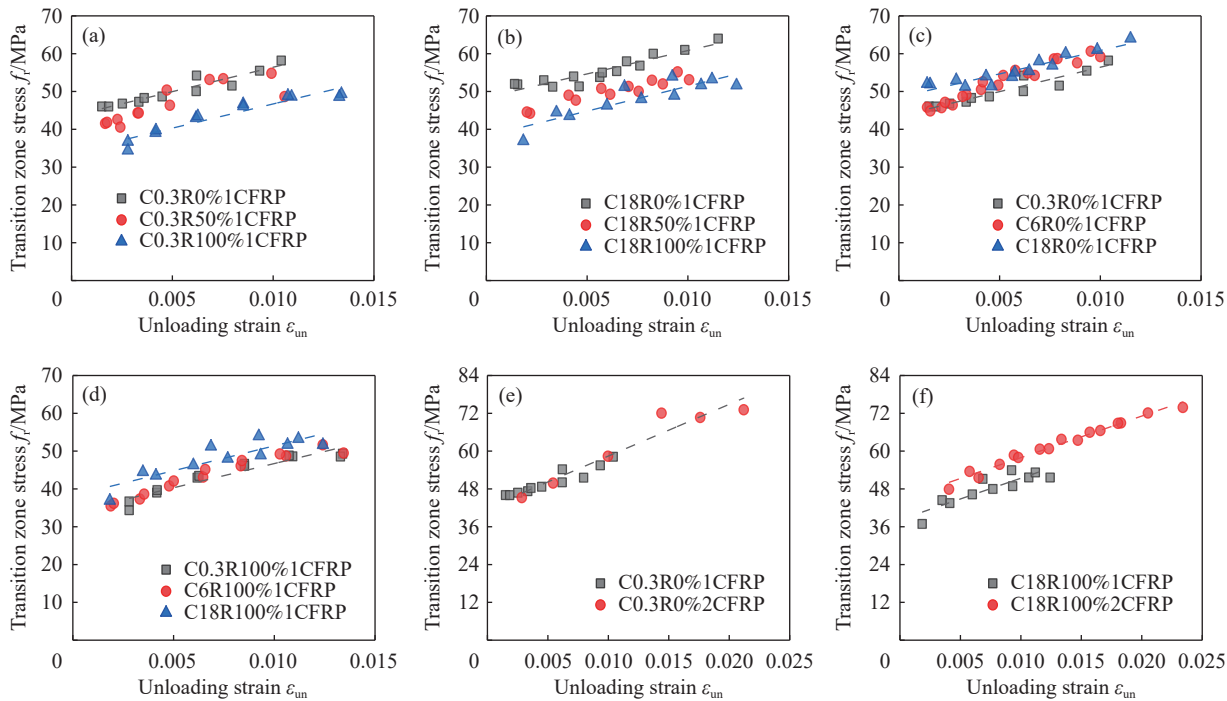


图 17 RA 替代率、加载速率和约束刚度对 CFRP 约束 RAC 过渡区应力 f_t 的影响

Fig. 17 Effect of RA replacement ratios, loading rate and confinement stiffness on CFRP-confined RAC transition zone stress f_t

基于上述讨论，通过回归分析，发现下列模型最适合 f_t 的试验结果：

$$f_t = \left(0.067 \frac{\epsilon_{un}}{\epsilon_{co}} + 0.733 \rho^{0.1} \right) f_{co} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0} \right)^{0.0724 \epsilon_{un}^{0.137}} \left(\frac{f_{co}}{f_{30}} \right)^{-0.255} \tag{10}$$

模型的表现如图 18 所示。

4.6 CFRP 约束 RAC 过渡曲线曲率 n

过渡区曲率参数 n 的试验结果如图 19 所示。

尽管试验数据相对离散，但可以清楚地注意到， n 的值随着卸载应变的增加而增加。当卸载应变一定时，加载速率越大， n 越大。此外，RA 替代率和约束刚度对 n 没有显著影响。通过回归分析得到以下模型：

$$n = \left(2.61 \left(\frac{\epsilon_{un}}{\epsilon_{co}} \right) + 4.88 \right) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0} \right)^{0.187 \epsilon_{un}^{0.238}} \tag{11}$$

模型的性能表现对比现有模型^[22] 显示出更好的预测能力，如图 20 所示。实际上曲率 n 的模型

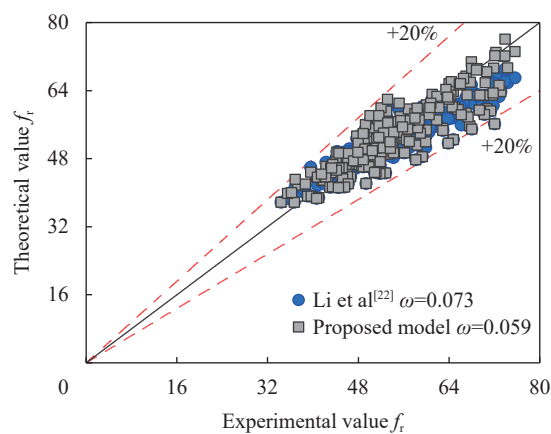


图 18 CFRP 约束 RAC 过渡区应力 f_t 的模型性能对比

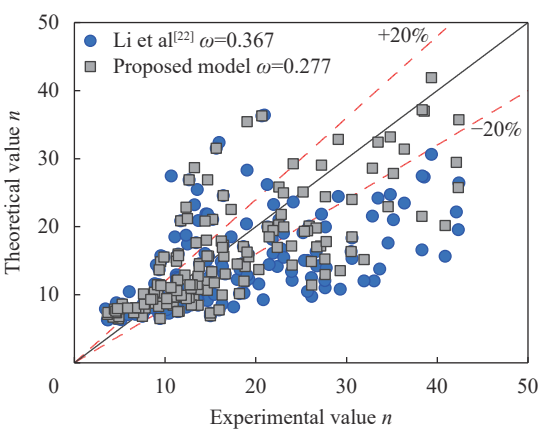


图 20 CFRP 约束 RAC 曲率 n 的模型性能对比

Fig. 18 Model performance comparison of CFRP-confined RAC transition zone stress f_t

Fig. 20 Comparison of model performance of curvature n of CFRP-confined RAC

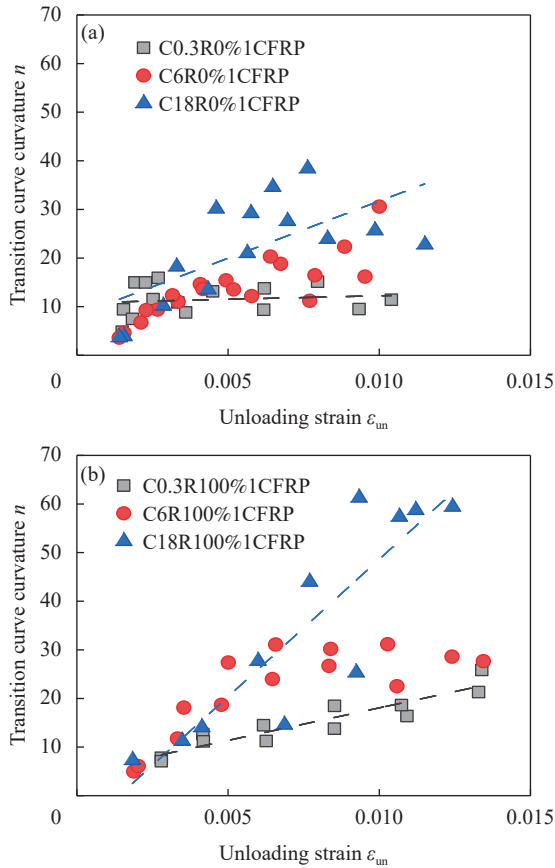


图 19 加载速率对 CFRP 约束 RAC 曲率 n 的影响

Fig. 19 Effect of loading rate on n of CFRP-confined RAC

预测精度对重复轴压应力-应变模型的性能影响不大,因此,此相对离散的预测结果并没有显著影响对 FRP 约束 RAC 完整加载/卸载曲线的预测。

5 CFRP 约束再生骨料混凝土重复轴压应力-应变模型表现

基于上述参数分析,并将曲线关键参数模型

(式 (6)~(8)、式 (10)、式 (11)) 代入卸载曲线模型 (式 (3)) 和再加载曲线模型 (式 (5)) 中绘制重复荷载作用下的应力-应变曲线。图 21(a)~21(d) 显示了整体模型的预测结果与本文中试验曲线的对比,所选取的应力-应变曲线数据包含:不同加载速率、不同再生骨料替代率和不同层数 FRP 约束再生骨料混凝土短柱。对比结果表明,采用本文提出的关键参数模型能够实现整体卸载/再加载曲线的准确预测。

此外,为进一步验证模型的适用性,本文还收集了 Lam 等^[39]、Wang 等^[40]、Li 等^[31] 和 Ilki 等^[41] 的试验数据与模型进行对比。以上文章的数据均包含重复轴压荷载作用下的 FRP 约束混凝土应力-应变曲线。其中, Lam 等^[39] 采用了与本文不同的重复轴压加载速率 (0.6 mm/min); Wang 等^[40] 采用了与本文不同的混凝土强度 (24.5~41.1 MPa); Li 等^[31] 的数据包含了不同再生骨料替代率 (R) 的变量 (50wt% 和 100wt%); 而 Ilki 等^[41] 的数据包含了更广泛的 FRP 约束刚度 (1~5 层 FRP)。选用这些典型数据能够从不同的参数方面验证本文所提出模型的准确性及适用性。如图 21(e)~21(h) 所示,模型的预测值不仅仅与曲线上的特征点相匹配,同时能够较好地预测加载和卸载过程的全部曲线。综上所述,本文提出的模型能够适用于 FRP 约束再生骨料混凝土在重复轴压荷载作用下的应力-应变行为预测,并较准确地考虑 RA 替代率、加载速率和约束刚度的影响,表现出良好的预测性能。尽管如此,本文所提出的模型适用性也受目前数据库的限制。基于本文的试验数据及目前现有的 FRP 约束混凝土重复轴压荷载应力-应变曲线数据^[31, 39-41],本文提出的模型适用于加载速率为

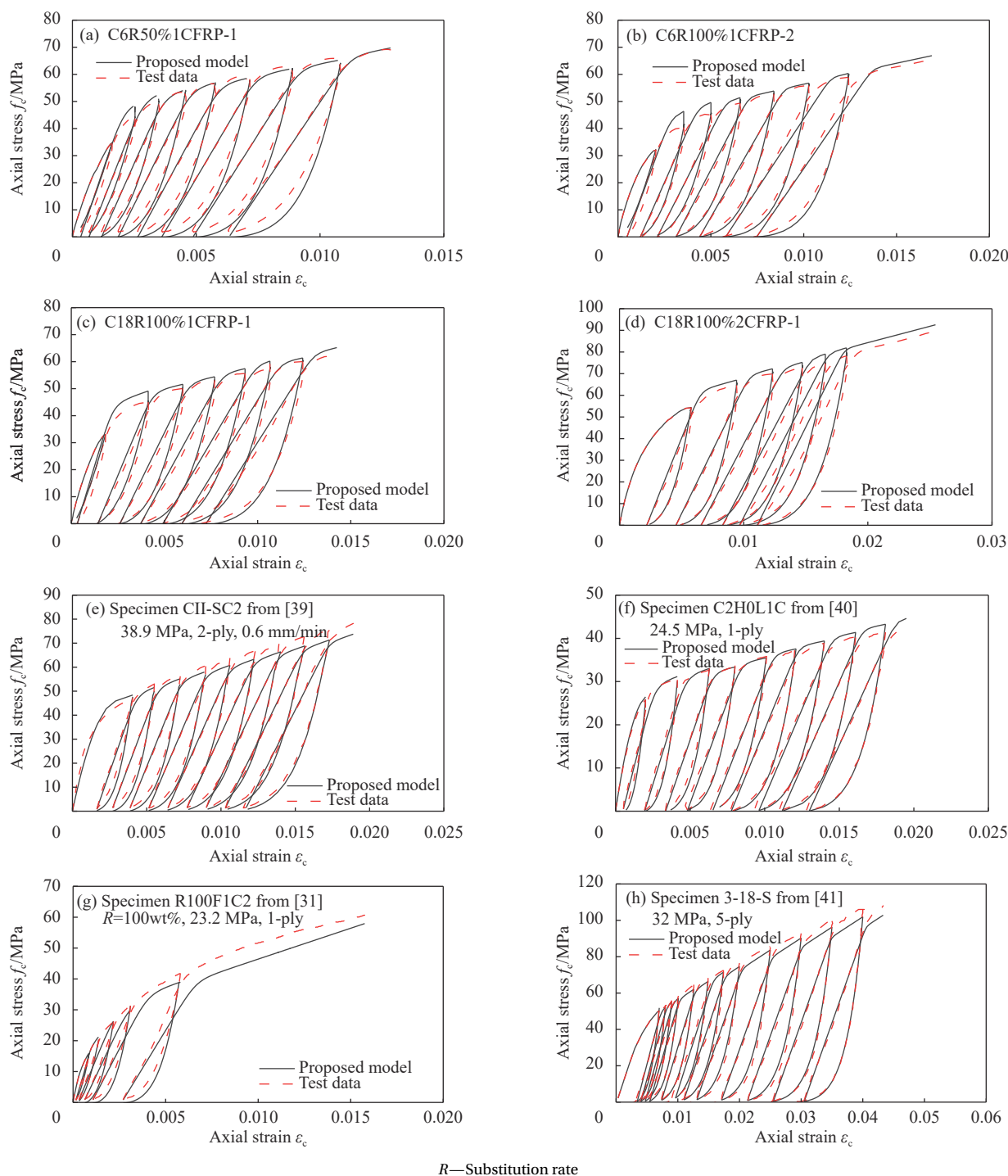


图 21 CFRP 约束 RAC 重复轴压应力-应变模型的整体性能

Fig. 21 Overall performance of CFRP-confined RAC cyclic axial compression stress-strain model

0.3~18 mm/min; 碳纤维 FRP 层数最大为 5 层; 混凝土强度为 24.5~52.1 MPa。关于高强混凝土和不同 FRP 种类的相关研究, 未来将进一步开展。

6 结论

对 72 个碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 约束再生骨料混凝土试件进行了单调和重复轴压试

验。研究分析了加载速率、再生骨料替代率和 CFRP 层数对试件在重复轴压下的力学性能的影响, 为建立相关的应力-应变模型提供了一个重要的数据库。通过本文的研究, 可以得出以下结论:

(1) CFRP 约束对 100wt% 再生骨料 (RA) 替代率混凝土极限状态的增强效果最为显著, 但其增

强效果随着加载速率的增大而减小。相比于 3 mm/min 的加载速率, 2 层 CFRP 约束 100wt% RA 替代率混凝土在 18 mm/min 的加载速率下, 其极限强度增强比降低了 16.2%, 极限应变增强比降低了 22.6%;

(2) 在重复荷载作用下, 再生骨料替代率或加载速率越大的试件, 其内部混凝土的损伤更严重, 使其卸载刚度和再加载刚度越小。此外, CFRP 约束再生骨料混凝土受到较高加载速率作用时, 其卸载刚度和再加载刚度对再生骨料替代率的敏感程度会有所降低;

(3) 同一卸载应变下, 加载速率越大的试件, 其残余塑性应变越小, 过渡区应力和过渡区曲率越大。值得注意的是, 再生骨料替代率对残余卸载应变和过渡区曲率的影响不显著, 但再生骨料替代率越大的试件, 其过渡区应力越小。由此可见, CFRP 约束再生骨料混凝土在重复荷载作用下的应力-应变曲线受再生骨料自身缺陷的影响显著;

(4) 本文通过大量的试验, 建立了更详尽的数据库, 进而提出了一个考虑加载速率和再生骨料替代率耦合作用的 CFRP 约束再生骨料混凝土的极限状态模型和重复轴压应力-应变模型。所提出的模型能够准确地预测所收集试验数据的应力-应变曲线上的关键点数据和其整体曲线趋势, 为再生骨料混凝土在工程结构中的应用提供参考。

参考文献:

- [1] ZHOU Y, HU J, LI M, et al. FRP-confined recycled coarse aggregate concrete: Experimental investigation and model comparison[J]. *Polymers*, 2016, 8(10): 375.
- [2] GÜNÇAN N F. Using waste concrete as aggregate[J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(7): 1385-1390.
- [3] XIAO J, WANG C, DING T, et al. A recycled aggregate concrete high-rise building: Structural performance and embodied carbon footprint[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 868-881.
- [4] BARNHOUSE P W, SRUBAR III W V. Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 110: 89-97.
- [5] EVANGELISTA L, DE BRITO J. Concrete with fine recycled aggregates: A review[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2014, 18(2): 129-172.
- [6] BAI Y L, DAI J G, MOHAMMADI M, et al. Stiffness-based design-oriented compressive stress-strain model for large-rupture-strain (LRS) FRP-confined concrete[J]. *Composite Structures*, 2019, 223: 110953.
- [7] HU B, ZHOU Y, XING F, et al. Experimental and theoretical investigation on the hybrid CFRP-ECC flexural strengthening of RC beams with corroded longitudinal reinforcement[J]. *Engineering Structures*, 2019, 200: 109717.
- [8] WEI Y, ZHANG X, WU G, et al. Behaviour of concrete confined by both steel spirals and fiber-reinforced polymer under axial load[J]. *Composite Structures*, 2018, 192: 577-591.
- [9] ZHU Y G, KOU S C, POON C S, et al. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 35(1): 32-38.
- [10] SHAYAN A, XU A. Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate[J]. *Materials Journal*, 2003, 100(5): 371-380.
- [11] KOU S C, ZHAN B J, POON C S. Use of a CO₂ curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 45: 22-28.
- [12] KONG D, LEI T, ZHENG J, et al. Effect and mechanism of surface-coating pozzalanics materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(5): 701-708.
- [13] CHEN G, HE Y, JIANG T, et al. Behavior of CFRP-confined recycled aggregate concrete under axial compression[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 111: 85-97.
- [14] ZHAO J, YU T, TENG J. Stress-strain behavior of FRP-confined recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(3): 04014054.
- [15] XIE T, OZBAKKALOGLU T. Behavior of recycled aggregate concrete-filled basalt and carbon FRP tubes[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 105: 132-143.
- [16] SHAO Y, ZHU Z, MIRMIRAN A. Cyclic modeling of FRP-confined concrete with improved ductility[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28(10): 959-968.
- [17] OZBAKKALOGLU T, AKIN E. Behavior of FRP-confined normal-and high-strength concrete under cyclic axial compression[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2012, 16(4): 451-463.
- [18] ABBASNIA R, AHMADI R, ZIAADINY H. Effect of confinement level, aspect ratio and concrete strength on the cyclic stress-strain behavior of FRP-confined concrete prisms[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(2): 825-831.
- [19] LAM L, TENG J. Stress-strain model for FRP-confined concrete under cyclic axial compression[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(2): 308-321.
- [20] LI P, WU Y F. Stress-strain behavior of actively and

- passively confined concrete under cyclic axial load[J]. *Composite Structures*, 2016, 149: 369-384.
- [21] LI P, WU Y F, ZHOU Y, et al. Cyclic stress-strain model for FRP-confined concrete considering post-peak softening[J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 902-915.
- [22] LI P, WU Y F. Stress-strain model of FRP confined concrete under cyclic loading[J]. *Composite Structures*, 2015, 134: 60-71.
- [23] ZHOU H Y, YANG C K, CI J C, et al. Rate correlation research situation of ordinary concrete about strain-rate within the scope of the earthquake[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2017, 858: 151-156.
- [24] DENG J W, LIU C W, LIU J F. Effect of dynamic loading on mechanical properties of concrete[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 568: 147-153.
- [25] FU H, ERKI M, SECKIN M. Review of effects of loading rate on concrete in compression[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117(12): 3645-3659.
- [26] FU H, ERKI M, SECKIN M. Review of effects of loading rate on reinforced concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117(12): 3660-3679.
- [27] CAO Y, LIU M, WU Y F. Effect of low strain rate on the axial behavior of concrete in CFRP-confined circular cylinders[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 255: 119351.
- [28] LI P, YANG T, ZENG Q, et al. Axial stress-strain behavior of carbon FRP-confined seawater sea-sand recycled aggregate concrete square columns with different corner radii[J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113589.
- [29] BISCHOFF P, PERRY S. Compressive behaviour of concrete at high strain rates[J]. *Materials and Structures*, 1991, 24: 425-450.
- [30] 中国国家标准化管理委员会. 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法: GB/T 3354—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for tensile properties of directional fiber reinforced polymer matrix composites: GB/T 3354—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014(in Chinese).
- [31] LI P, SUI L, XING F, et al. Static and cyclic response of low-strength recycled aggregate concrete strengthened using fiber-reinforced polymer[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 160: 37-49.
- [32] 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.
- [33] 张宝超, 潘景龙. FRP 约束混凝土快速荷载下应力应变关系初探[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(5): 466-471.
- ZHANG Baochao, PAN Jinglong. Preliminary study on stress-strain relationship of FRP confined concrete under rapid loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(5): 466-471(in Chinese).
- [34] 金希荣. FRP 约束混凝土柱快速荷载下力学性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- JIN Xirong. Experimental studies on behavior of FRP confined concrete columns under rapid loading [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007(in Chinese).
- [35] 张宝超, 潘景龙, 姜洪斌. FRP 约束混凝土快速荷载下的强度计算[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(8): 958-961.
- ZHANG Baochao, PAN Jinglong, JIANG Hongbin. Strength calculation of FRP confined concrete under rapid loading[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2003, 35(8): 958-961(in Chinese).
- [36] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 80(2): 233-245.
- [37] WU Y F, YUN Y, WEI Y, et al. Effect of predamage on the stress-strain relationship of confined concrete under monotonic loading[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(12): 04014093.
- [38] SIDOROFF F. Description of anisotropic damage application to elasticity[C]. *Physical Non-Linearities in Structural Analysis: Symposium Senlis*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1981: 237-244.
- [39] LAM L, TENG J, CHEUNG C, et al. FRP-confined concrete under axial cyclic compression[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28(10): 949-958.
- [40] WANG Z, WANG D, SMITH S T, et al. Experimental testing and analytical modeling of CFRP-confined large circular RC columns subjected to cyclic axial compression[J]. *Engineering Structures*, 2012, 40: 64-74.
- [41] ILKI A, KUMBASAR N. Behavior of damaged and undamaged concrete strengthened by carbon fiber composite sheets[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2002, 13(1): 75-90.