

全再生骨料混凝土基本特性及受压损伤本构

肖建庄, 唐宇翔, 张航华, 段珍华, 许碧莞

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为实现废弃混凝土资源最大化利用和充分挖掘其低碳潜能, 提出发展全再生骨料混凝土(FRAC), 即利用废弃混凝土加工成的再生粗、细骨料全部取代天然砂石制备的混凝土。以 4 种不同的骨料体系作为参变量, 完成了 FRAC 的力学性能、收缩特性和单轴抗压应力-应变关系试验研究。分析结果表明, 混凝土抗压强度受再生骨料体系, 尤其是全再生细骨料的负面影响较大, 但经过配合比优化, FRAC 能满足 C30 强度等级以上的制备设计要求; 全再生骨料体系增加了混凝土的干燥收缩, 尤其是早期收缩发展; FRAC 在单轴受压作用下出现较小变形时, 损伤就开始明显发展, 通过考虑初始损伤和受力损伤, 建立了适用于 FRAC 的受压损伤本构模型, 能很好地描述其应力-应变行为特征。最后, 对提升全再生骨料混凝土力学性能未来需要开展的研究方向进行了展望。

关键词: 全再生骨料混凝土(FRAC); 再生粗骨料; 再生细骨料; 力学性能; 收缩; 损伤本构关系

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Basic Property and Compressive Damage Constitutive Model of Full Recycled Aggregate Concrete

XIAO Jianzhuang, TANG Yuxiang, ZHANG Hanghua,
DUAN Zhenhua, XU Biwan

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To realize the maximum and low-carbon utilization of waste concrete resources, a novel full recycled aggregate concrete (FRAC) was proposed, i.e., using the recycled coarse and fine aggregates processed from waste concrete to replace natural sand and gravel to prepare new concrete. Taking four different aggregate combinations as parameter variables, the mechanical properties, shrinkage characteristics, and uniaxial compressive stress-strain relationship of FRAC were

experimentally studied. The results show that the recycled aggregate combinations have an adverse effect on the development of concrete compressive strength, especially for concrete with full recycled fine aggregate. But by adjusting the mixing proportion, the FRAC can meet the design requirement for strength grade above C30. The full recycled aggregate combination increases the drying shrinkage of concrete, especially at the early stages. When FRAC has a small deformation under uniaxial compression, the damage began to develop and accumulate obviously. By considering the initial damage and mechanical damage, a damage constitutive model for FRAC under compression was established, which could well describe its stress-strain behaviour. Finally, the future research direction of improving the mechanical properties of FRAC was prospected.

Key words: full recycled aggregate concrete(FRAC); recycled coarse aggregate; recycled fine aggregate; mechanical property; shrinkage; damage constitutive relationship

发挥废弃混凝土的“城市矿山”功能, 将其加工成再生骨料并科学制备再生骨料混凝土, 可以缓解日益突出的天然砂石资源短缺困境, 为混凝土原料获取的便捷性、经济性和低碳性提供良好依托^[1]。现阶段我国再生粗骨料混凝土的技术研发与应用已得到了快速发展和推广, 初步构筑了涵盖再生原料分级、分类要求以及再生产品品质、生产技术和工程应用的标准体系^[2]。然而, 当前工程应用多集中于再生粗骨料, 针对再生细骨料的应用较少, 未能充分发掘其高附加值利用潜力^[3]。大量废弃混凝土的低效处置与建筑业所面临的“无砂(石)可用”形成了巨大反差^[4]。为此, 肖建庄等^[5-7]提出了发展新一代再生骨料混凝土概念, 即从粗骨料部分取代的再生骨

收稿日期: 2022-04-20

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3803400, 2022YFE0198300); 国家自然科学基金(52078358)

第一作者: 肖建庄(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为再生混凝土材料与结构。

E-mail: jzx@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

料混凝土发展到粗、细骨料全取代下的全再生骨料混凝土 (full recycled aggregate concrete, FRAC)。FRAC 能够实现废弃混凝土资源最大化和高值化利用,充分发挥其既有低碳潜力,有利于构建混凝土循环经济模式,助力我国建筑业绿色低碳发展。

本构关系是连接混凝土材料性能与构件受力行为的桥梁。业内学者通过对再生骨料部分取代的混凝土本构关系的研究^[8-13]发现,在单轴受压工况下,再生骨料混凝土本构关系曲线与普通混凝土存在较大差异,峰值应变和极限压应变增大,弹性模量降低,且整体变异性增大。Zhou 等^[8]研究表明碎石再生粗骨料混凝土应力-应变曲线上升段的斜率比卵石再生粗骨料混凝土高,下降段的曲率更平缓。陈杰等^[9]发现碎红砖的混入会减小再生粗骨料混凝土的抗压强度、增大峰值应变与泊松比,使横向变形系数在较低的荷载等级下迅速发展。Xiao 等^[10]指出现有混凝土本构模型对再生粗骨料混凝土应力-应变曲线上上升段的描述较为准确,但对下降段的预测效果并不理想。张研等^[11]基于热力学定律,推导出混凝土弹塑性应变率型损伤本构模型,可以很好地描述混凝土在不同加载速率时的力学特征。相似地,卢钦旺^[12]基于弹塑性损伤能释放率建立了再生混凝土损伤准则和损伤演化法则。马昆林等^[13]发现,掺入砖混再生粗骨料在混凝土中引入了初始损伤,损伤发展速率呈先增大后减少的趋势。在再生粗、细骨料同时掺入的情况下,损伤变量将进一步变化,因此需要进一步建立相应的损伤本构模型,为构件受力性能分析奠定基础。

再生粗、细骨料全取代所构成的“全再生骨料体系”会对所制备的 FRAC 各项性能产生影响,进而制约 FRAC 的安全应用。为此,本文首先研究不同骨料体系对混凝土抗压强度发展、干燥收缩等基本性能的影响;并测得 FRAC 单轴受压下应力-应变全曲

线,建立相应的损伤本构模型;最后讨论了 FRAC 损伤演化规律,为未来的改性提升提供研究基础。

1 试验方案

1.1 试验材料

水泥为 P. O 42.5 级普通硅酸盐水泥;天然粗、细骨料(NCA 和 NFA)分别为上海市某建材市场的碎石和河砂;再生粗、细骨料(RCA 和 RFA)来自上海市某建筑固废资源化利用工厂,骨料最大粒径均为 25 mm;减水剂采用聚羧酸高效减水剂,减水率为 20%~25%;水为普通自来水。粗、细骨料均采用合成级配,以保证再生骨料和天然骨料级配曲线尽可能接近,并分别符合规范《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177 — 2010)和《混凝土和砂浆用再生细骨料》(GB/T 25176 — 2010)的要求,如图 1 所示。按照规范《建设用砂》(GB/T 14684 — 2011)和《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685 — 2011)的规定对所用骨料的物理性能进行测试,结果参见表 1,可以看出这些骨料的性能是目前一般资源化工艺的常规水平^[6-7]。

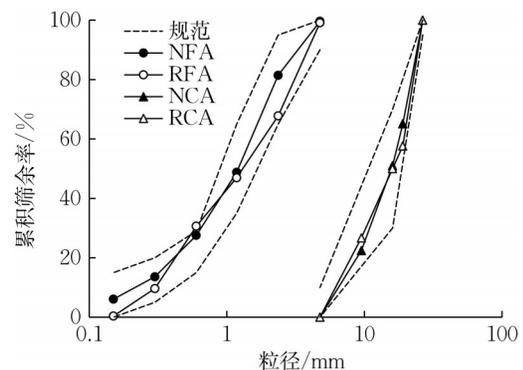


图 1 天然和再生骨料级配曲线

Fig. 1 Grading of natural and recycled aggregates

表 1 骨料的物理性能

Tab. 1 Physical property of coarse and fine aggregates

类型	尺寸/mm	细度模数	压碎值/%	微粉含量/%	表观密度/(kg·m ⁻³)	吸水率/%	含水率/%
RFA	0.15~4.75	3.4		8.5	2 236	13.3	6.6
NFA	0.15~4.75	3.2		1.5	2 610	1.0	0.9
RCA	4.75~25		13.8		2 614	7.7	4.5
NCA	4.74~25		5.1		2 782	0.9	0.8

1.2 配合比设计

在保持相同的水灰比(0.45)条件下,本试验以骨料体系为变量,进行混凝土配合比设计,如表 2 所列。4 种骨料体系的混凝土包括天然骨料混凝土

(NAC,由 NFA 和 NCA 组成)、全再生粗骨料混凝土(FRCAC,由 NFA 和 RCA 组成)、全再生细骨料混凝土(FRFAC,由 RFA 和 NCA 组成)、全再生骨料混凝土(FRAC,由 RFA 和 RCA 组成)。为了确保不

同骨料体系的混凝土中各组分体积比例恒定,按等体积法进行再生骨料体系的统一设计。

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Mix proportion of concrete

编号	单位:kg·m ⁻³							
	水泥	NFA	RFA	NCA	RCA	水	附加水	减水剂
NAC	400	728	0	1 134	0	180	0	0.8
FRCAC	400	728		0	1 066	180	9.5	1.2
FRFAC	400	0	654	1 134	0	180	17.7	1.0
FRAC	400	0	654	0	1 066	180	27.2	2.0

如表1所示,再生骨料由于多孔性而具有较高的吸水率,因此通常需要在再生骨料预饱和或添加附加水的情况下制备再生混凝土,以满足新拌混凝土的工作性能^[8]。考虑到再生骨料的高含量和预饱和和再生细骨料的不易,本试验将自然条件下的再生骨料添加附加水制备混凝土,附加水量由再生骨料自然条件下含水率与再生骨料饱和面干吸水率之差的70%来决定^[14]。为了获得一致且合适的和易性(坍落度 100 ± 20 mm),对每组混凝土的减水剂用量进行了相应调整。

在本试验中,制备混凝土的方法参考两阶段搅拌法^[15]。第一步是在搅拌机中混合粗骨料和细骨料30 s,然后添加所需用水的一半,搅拌60 s后,再加入水泥和高效减水剂,搅拌30 s;最后,加入剩下的一半水,搅拌时间设定为120 s。新拌混凝土在相应的模具中浇筑,并通过振动台压实。在室温下放置1 d后,试样脱模并在相应的条件下进行养护。

1.3 试件与试验方法

在每组混凝土中,分别浇筑了21个 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的立方体,3个 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 515 \text{ mm}$ 的棱柱体和3个 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的棱柱体。所有试件脱模后均先置于标准养护室中(温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$,相对湿度95%以上)养护一定龄期,其中长边为515 mm的棱柱体在养护3d后放入恒温恒湿箱中(温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$,相对湿度 $60 \pm 5\%$),立方体在养护28d(测试龄期不足28d则养护至测试龄期)后转入同上环境的恒温恒湿箱中。参考规范《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009),立方体与长边为515 mm的棱柱体分别用于抗压强度和长期收缩性能的测试。长边为300 mm的棱柱体在养护28 d后,用于单轴抗压应力-应变试验。

单轴试验的加载装置为MTS 815.02 电液伺服试验机,如图2所示。试验前,对试样的上下表面进

行打磨处理,以确保端面平整、应力均匀,并垫上0.4 mm的特氟龙薄膜以减少摩擦。使用橡胶圈,在试件的中间位置安装2个引伸计,以测量轴向应变。参考Xiao等^[10]研究,加载程序依次为预压和正式加载。在预压过程中采用力控制,预加荷载设置为5 kN;正式加载采用位移控制,为了实现准静力加载,应变率取 10^{-5} s^{-1} ,考虑到棱柱体试件高度为300 mm,故加载速率设置为 $0.003 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,最大位移设置为3.0 mm。

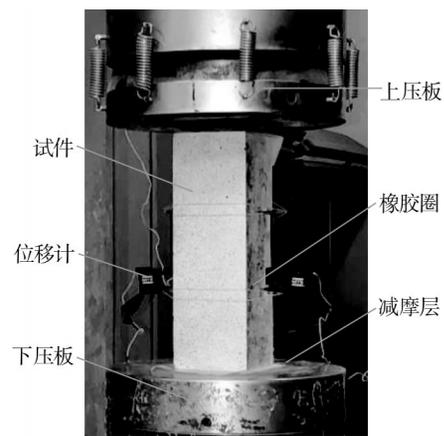


图 2 单轴受压试验装置

Fig. 2 Experimental setup of uniaxial compression

2 试验结果与分析

2.1 抗压强度

图3为混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 随养护时间 t 的变化。如图3a所示,各混凝土的强度发展规律相似,均随龄期的增长,抗压强度逐渐增加,且90 d后强度增长变缓。随着骨料体系从天然骨料向全再生骨料变化,混凝土的抗压强度出现降低趋势。这是由于随着再生组分的增加,附着老砂浆含量增加,其内部的微裂缝和孔洞等初始缺陷以及由其引起的多重界面过渡区导致混凝土细观结构损伤、强度减小。FRCAC、FRFAC和FRAC的180 d抗压强度相较于NAC减小了约5%、14%和15%。可以发现,RFA对抗压强度的削弱作用大于RCA。分析其原因,RFA中的一部分是生产RCA时所剥落的老砂浆,所以再生骨料中附着老砂浆的占比随着再生骨料粒径的减小而增加^[16],导致其对混凝土强度的降低效果更加显著。参考《普通混凝土配合比设计规程(JGJ 55—2011)》的规定,即使考虑到再生骨料混凝土强度较大的标准偏差与混凝土强度的尺寸效应,所有混凝土的28 d抗压强度均满足C30

(38 MPa)以上的制备强度要求。将抗压强度随时间的变化进行归一化处理,即将 f_{cu} 和 lgt 分别除以 28 d 抗压强度 $f_{cu,28}$ 和 $lg28$,结果绘于图 3b。可以从

图 3b 看出,归一化后各类混凝土抗压强度随龄期增长幅度和趋势相近,其关系仍然符合普通混凝土的强度发展规律。

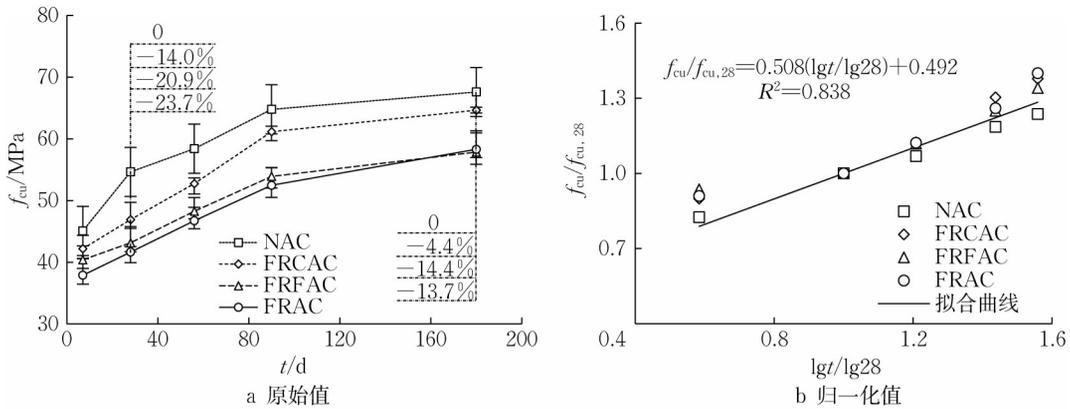


图 3 抗压强度随时间的变化

Fig. 3 Compressive strength of concrete versus time

2.2 干燥收缩

图 4 为混凝土干燥收缩应变 ϵ_{sh} 随养护时间 t 的变化。如图 4a 所示,各组混凝土的长期收缩发展呈现出相似的趋势,即早期收缩应变迅速增加,而随着时间的推移,收缩应变的增长率降低。一般认为,干燥收缩是混凝土长期收缩的主要类型之一,其发展机理为混凝土的失水与孔隙结构的细化。一方面,孔隙越细,临界半径的减小速度越快,在最初几周内收缩速度越快;另一方面,水迁移速率降低,进而导

致收缩发展缓慢^[17]。骨料体系从天然骨料到全再生骨料的变化加速了混凝土的收缩发展,且该趋势在早期更为明显。与 NAC 相比,FRAC 表现出更快的收缩发展速度和更高的收缩应变。各混凝土的收缩趋势与 Zhang 等^[18]研究相似,但不同骨料体系混凝土的收缩应变随时间的比值和极限收缩应变没有展示出明显差异。分析其原因,与他们的研究相比,本试验制备混凝土中使用的附加水更少,从而降低了再生骨料混凝土早期的收缩应变。

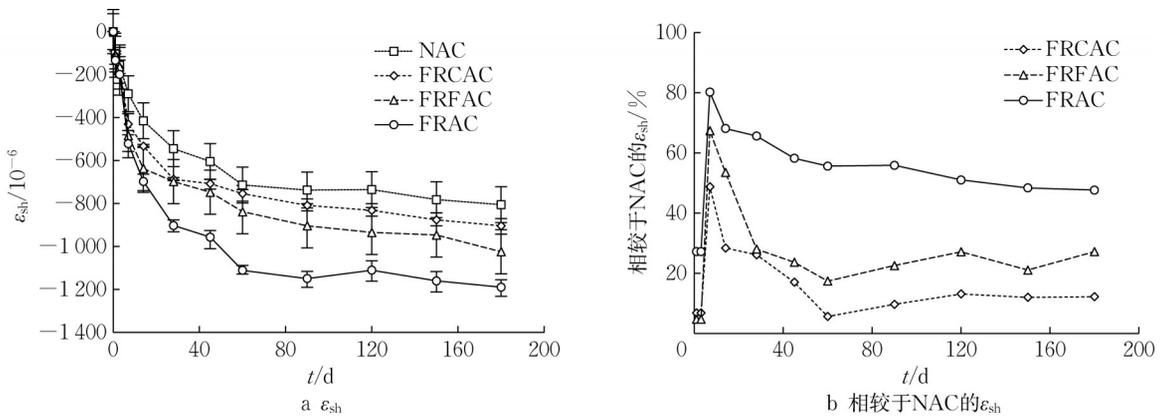


图 4 混凝土干燥收缩随时间的变化

Fig. 4 Drying shrinkage of concrete versus time

将不同再生骨料体系混凝土与天然骨料混凝土的收缩应变对比,结果如图 4b 所示。可以看出,相较于 NAC,不同再生骨料体系试件的收缩应变均表现出一定的增加,且早期增长幅度较大,7 d 达到最大值,45 d 后趋于稳定。对于 FRCAC、FRFAC 和 FRAC,极限收缩应变(本文取 180 d)分别增加了约

12%、27% 和 47%,充分说明再生粗骨料与再生细骨料对混凝土收缩性能的组合影响高于单一影响。产生这一现象有三方面主要原因。首先,大量均匀分布的老砂浆导致产生更多的连通孔隙,从而导致更高的收缩应变。其次,再生粗、细骨料的组合使用使混凝土的附加用水量较高,在早期容易引起更高

的水分丧失,进而加速混凝土早期收缩应变的发展;此外,再生骨料体系的使用降低了混凝土的强度和弹性模量,进一步加剧了混凝土的收缩变形。

2.3 应力-应变曲线

图5为不同骨料体系对混凝土受压应力-应变曲线的影响。如图5a所示,再生骨料混凝土的应力-应

变曲线上升斜率均小于NAC。与NAC相比,它们的峰值应力减小,而峰值应变增大。如图5b所示,使用再生骨料对归一化应力-应变曲线的上升部分的影响有限,但降低了下降部分的曲率,使曲线更陡峭,表明全再生骨料的加入使混凝土具有较高的脆性。

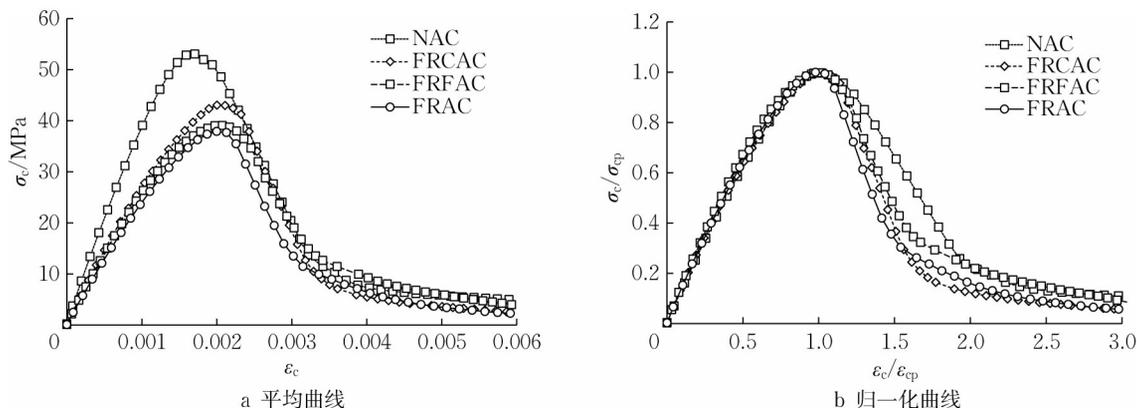


图 5 混凝土应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain of concrete

根据试验结果,图6展示了每种混凝土应力-应变曲线的特征指标,包括峰值应力(σ_{cp} ,也称轴心抗压强度 f_{cm})、峰值应变(ϵ_{cp})和极限应变(ϵ_{cu})、割线模量(E_{sec})和弹性模量(E_c)。根据《混凝土结构设计规

范(GB 50010—2010)》,极限应变取峰值后50%峰值应力水平下的轴向应变。弹性模量和割线模量分别为从原点到40%和100%峰值应力的直线斜率。表3汇总了这些特征指标的具体数值。

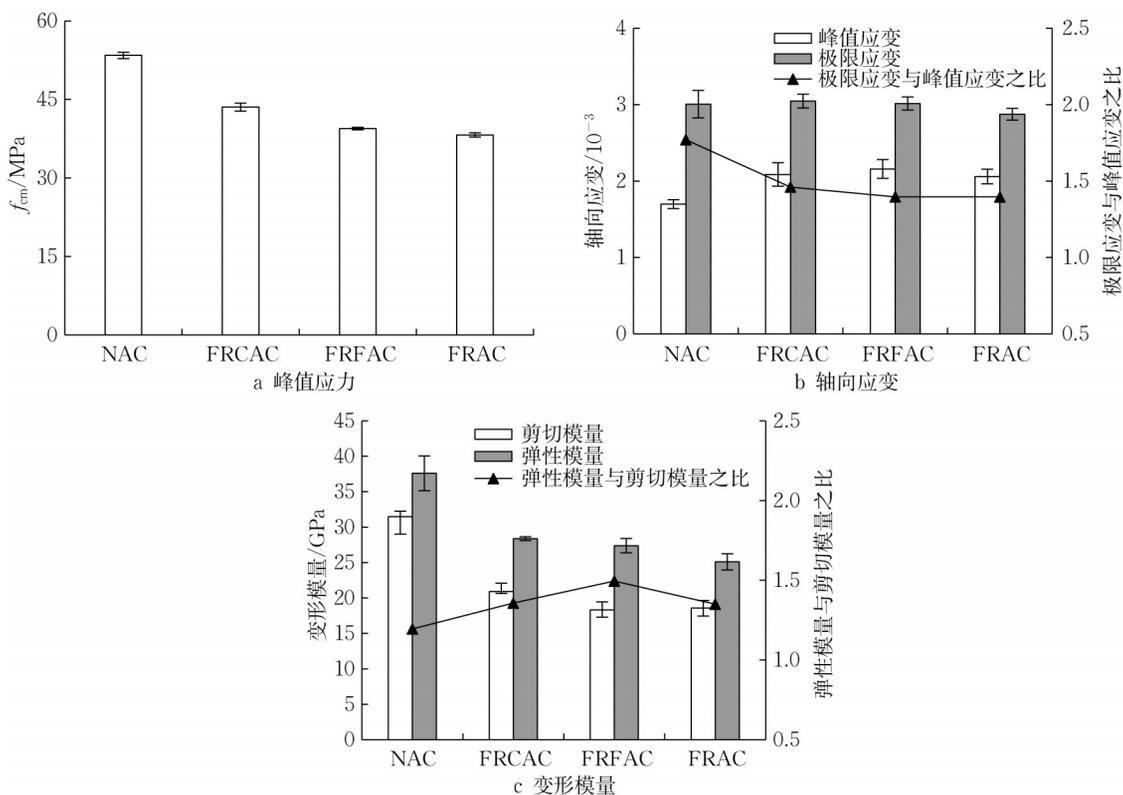


图 6 混凝土特征指标
Fig. 6 Characteristic index of concrete

表3 混凝土应力-应变曲线的特征指标和模型参数

Tab. 3 Characteristic index and model parameters for stress-strain curve of concrete

编号	特征指标							模型参数	
	f_{cm}/MPa	$\epsilon_{cp}/10^{-3}$	$\epsilon_{cu}/10^{-3}$	$\epsilon_{cp}/\epsilon_{cu}$	E_c/GPa	E_{sec}/GPa	E_{sec}/E_c	λ	k
NAC	53.4	1.70	3.01	1.7	37.6	31.5	0.84	0.002 31	5.599
FRCAC	43.5	2.09	3.05	1.5	28.4	20.9	0.74	0.003 00	3.253
FRFAC	39.5	2.16	3.02	1.4	27.4	18.3	0.67	0.003 11	2.476
FRAC	38.2	2.06	2.87	1.4	25.1	18.6	0.74	0.002 96	3.310

由图 6a 和图 6b 可知, FRCAC、FRFAC 和 FRAC 的峰值应力与 NAC 相比分别降低了约 19%、26% 和 29%, 峰值应变增加了约 22.9%、27.1% 和 21.2%, 而极限应变的变化趋势不明显。全再生骨料混凝土的极限应变与峰值应变之比约为 1.4, 低于 NAC 的比值(约 1.8), 表明加入全再生骨料会降低混凝土棱柱体在轴心压力作用下的峰后变形能力。另外, 混凝土的割线模量和弹性模量也是反映混凝土材料变形能力的重要指标, 如图 6c 所示, 两者在不同类型的混凝土中具有相同的变化规律; 全再生骨料混凝土中两者之间的比率约等于 1.39。与 NAC 的结果进行比较, FRCAC、FRFAC 和 FRAC 的弹性模量分别降低了约 25%、27% 和 33%。

3 损伤本构模型

3.1 模型的建立

基于 Lemaitre^[19]提出的应变等价性原理(即有效应力作用在无损伤试件上的应变与名义应力作用在持续损伤试件上的应变保持一致), 根据胡克定律, 可以得到损伤本构方程为

$$\sigma = (1 - D)E\epsilon \quad (1)$$

式中: σ 为有效应力, MPa; D 为损伤变量; E 为弹性模量, GPa; ϵ 为应变。

损伤变量可以定义为材料已经破坏的界面微元数目与所拥有的总界面数目之比。在单轴受压下, 相较于天然骨料混凝土, 全再生骨料混凝土除了承受荷载作用时发展的损伤 D_f , 还存在再生骨料体系(recycled aggregate combination)引起的初始损伤 D_{rac} 。全再生骨料混凝土的初始损伤, 即再生骨料存在的初始缺陷, 主要包括母体混凝土服役阶段和废弃混凝土破碎加工引起的裂缝、孔洞和夹杂, 以及制备成新混凝土后产生的多重复杂界面过渡区。基于损伤力学理论, 即材料内部的损伤劣化程度可以由其宏观力学性能来表征, D_{rac} 可以表示为

$$D_{rac} = 1 - \frac{E_{rac}}{E_{NAC}} \quad (2)$$

式中: E_{rac} 为不同再生骨料体系的弹性模量; E_{NAC} 为天然骨料混凝土的弹性模量。

在单轴加载下, 全再生骨料混凝土的本构关系为

$$\sigma = E_{rac}\epsilon(1 - D_f) \quad (3)$$

将式(2)代入式(3), 可得

$$\sigma = E_{NAC}\epsilon(1 - D_{rac})(1 - D_f) \quad (4)$$

则全再生骨料混凝土总损伤变量 D 可以表示为

$$D = D_f + D_{rac} - D_f D_{rac} \quad (5)$$

假设全再生骨料混凝土单轴受压下的界面微元破坏的极限应变服从 Weibull 分布^[13], 其概率密度函数可表示为

$$\varphi(\epsilon) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{\epsilon}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{\epsilon}{\lambda}\right)^k} \quad (6)$$

式中: k 为形状参数, 决定分布的形状; λ 为刻度参数, 决定分布的幅度。

混凝土受荷下的宏观破坏是由于界面微元的不断破坏累积所致^[12]。对式(6)进行积分, 可以得到

$$D_f = \int_0^\epsilon \varphi(\epsilon) d\epsilon = 1 - e^{-\left(\frac{\epsilon}{\lambda}\right)^k} \quad (7)$$

联立式(2)、(5)和(7)可以得到不同再生骨料体系混凝土在荷载作用下的总损伤变量, 为

$$D = 1 - \frac{E_{rac}}{E_{NAC}} e^{-\left(\frac{\epsilon}{\lambda}\right)^k} \quad (8)$$

将式(7)代入式(3), 得到全再生骨料混凝土损伤本构模型, 为

$$\sigma = E_{rac}\epsilon e^{-\left(\frac{\epsilon}{\lambda}\right)^k} \quad (9)$$

由混凝土单轴受压应力-应变曲线的几何特征可知, 在峰值点处 $\sigma = \sigma_{cp}$, $\epsilon = \epsilon_{cp}$ 且曲线斜率为零。对式(9)进行求导得峰值应力时曲线斜率为

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = E_{rac} e^{-\left(\frac{\epsilon_{cp}}{\lambda}\right)^k} \left[1 - k\left(\frac{\epsilon_{cp}}{\lambda}\right)^k\right] = 0 \quad (10)$$

由式(10)中, 前2项不为零, 整理可得

$$\lambda = \frac{\epsilon_{cp}}{\left(\frac{1}{k}\right)^{\frac{1}{k}}} \quad (11)$$

将式(11)代入式(9),可得

$$k = \left[\ln \frac{E_{rac} \epsilon_{cp}}{\sigma_{cp}} \right]^{-1} \quad (12)$$

3.2 模型参数的确定和验证

将试验得到的各组试件的峰值应力、应变和弹性模量分别代入式(11)和(12)中,可以得到各组所对应的模型参数 k 和 λ 的值,如表3所示。通过回归分析,对表3中的参数(包括 λ 、 k 和 E_c)和轴心抗压强度进行拟合,结果绘于图7。如图7所示,各参数均能用多项式函数进行很好地近似,拟合度 R^2 均大于0.93。从拟合结果可知,随着全再生骨料体系的使

用,抗压强度减小,分布参数 λ 呈先增大后减小的趋势,而 k 的变化规律相反,表明混凝土峰值应力减小,峰值应变增大,脆性变小。这与Xiao等^[10]通过等强度设计发现再生粗骨料的掺入使混凝土脆性增大的试验结果相反。这是因为本文采用的是等配合比设计,使得全再生骨料混凝土强度明显低于天然骨料混凝土,而一般而言,混凝土强度越低,其脆性越小。在后续研究中,可进一步通过等强度设计排除这一因素的干扰。如图7c所示,随着全再生骨料体系的使用,尤其是再生细骨料,混凝土强度减小, E_c 随之线性下降。分析其原因,再生骨料由于其表面附有旧水泥浆体,从而导致其刚度下降,进而降低材料弹性模量,而再生细骨料附着砂浆量通常高于再生粗骨料^[16]。

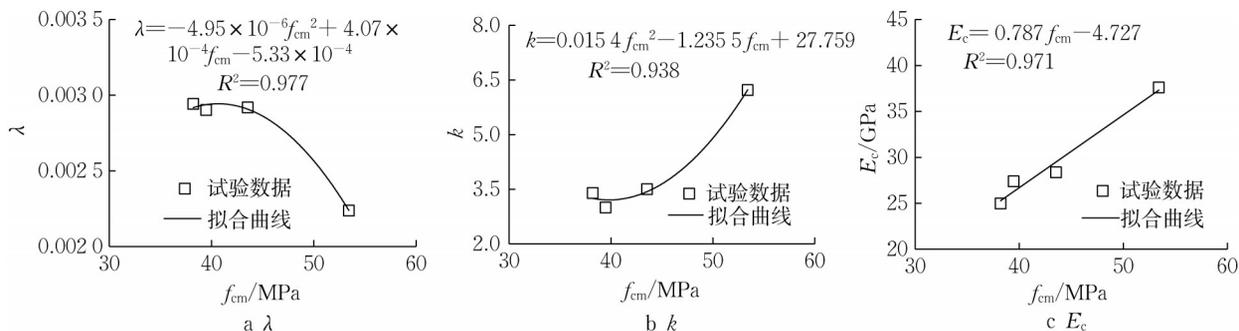


图7 模型参数与 f_{cm} 的关系

Fig. 7 Relationship between model parameter and f_{cm}

将由图7确定的各参数拟合函数关系代入式(9),得到各类混凝土预测的应力-应变曲线,并将预测结果和试验结果进行比较,如图8所示。从对比结果可见,损伤模型能很好地预测峰值应力前的上升段,对下降段的预测相对较差,但除了NAC以外整体相关系数 R 均大于0.98。此外,将式(7)计算得到的 D_f 与基于试验应力-应变曲线斜率变化推算出的结果进行比较,并绘于图8。可以发现,式(7)能较好预测受力损伤变化,验证了前述Weibull分布假设的合理性。在加载初期,材料处于弹性变形阶段,未出现明显受力损伤。随着荷载不断增加,受力损伤不断累计,直至到1,材料完全破坏。这些表明本文所建立的全再生粗骨料混凝土损伤本构模型的可靠性较高,能很好地描述不同骨料体系的再生混凝土在单轴加载下的变形情况。

3.3 损伤演化

为了探究不同骨料体系对混凝土损伤演化发展的影响,将由试验确定的弹性模量、分布参数和应变

代入式(8)中,可以得到各组试件总损伤变量。为了更好地比较不同配比的全再生骨料混凝土,将总损伤变量和损伤变量发展速率($dD/d\epsilon$)与归一化应变(ϵ_c/ϵ_{cp})之间的关系分别绘于图9a和图9b。由图9a可知,随着应变的增加,全再生骨料混凝土呈现“S”型增长趋势,从初始损伤逐渐增加到1。结合图9a和图9b可以发现,斜率变化率与观察到的全再生骨料混凝土单轴受压破坏时各特征点^[6]所对应。当 ϵ_c 小于 $1/3 \epsilon_{cp}$ 时,材料处于弹性变形阶段,未出现明显的损伤增加;一旦超过比例极限,开始出现明显的受力损伤,此时试件处于内部微开裂的稳定扩展阶段,试件表面未出现可见裂缝;达到峰值应变后,前期所积累的应变能迅速释放,裂纹失稳扩展,损伤发展速率达到最大值;到达极限应变后(约 $1.5 \epsilon_{cp}$),试件出现宏观斜裂缝,并逐步贯通,表明试件正承受压应力和剪应力的共同作用,导致轴向损伤发展速率的降低;最后应变发展到约 $2.5 \epsilon_{cp}$ 时,总损伤变量增大至1,表明试件完全损伤破坏。

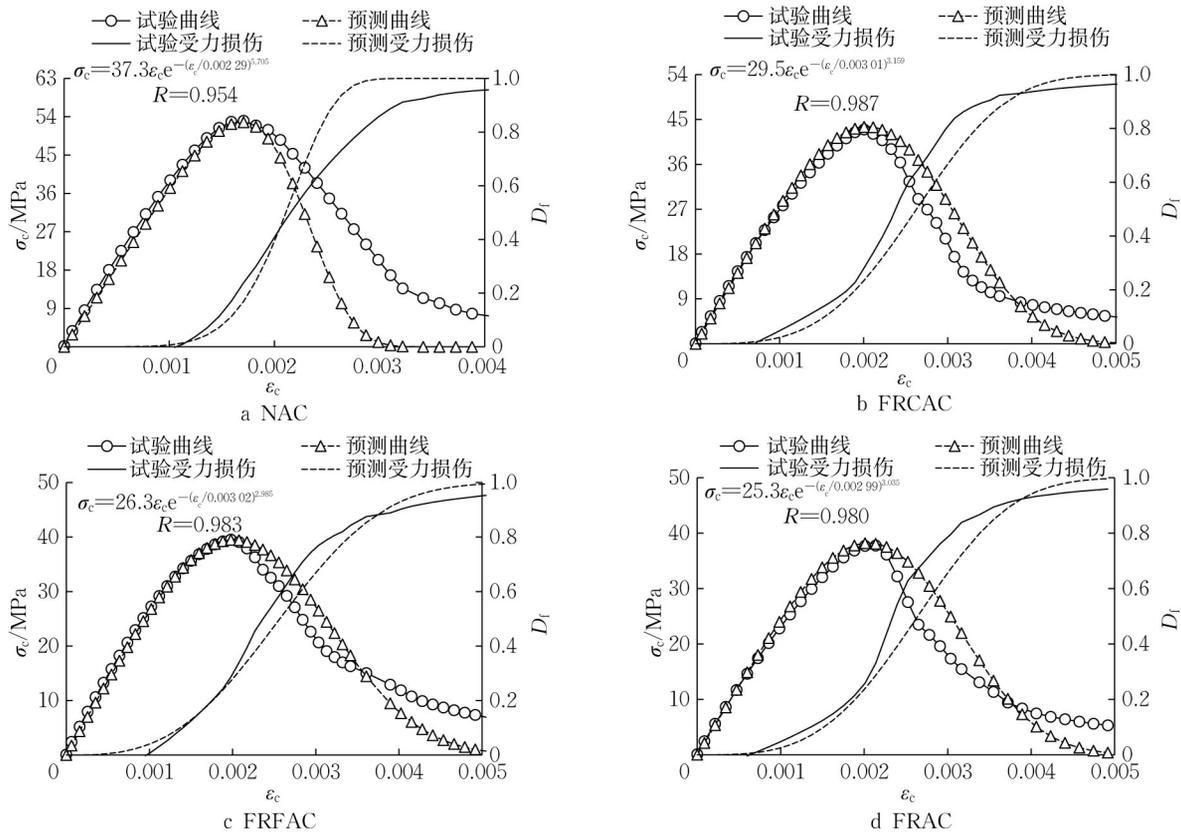


图 8 $\sigma_c-\epsilon_c$ 试验结果与预测结果对比

Fig. 8 Comparisons between test results and prediction results

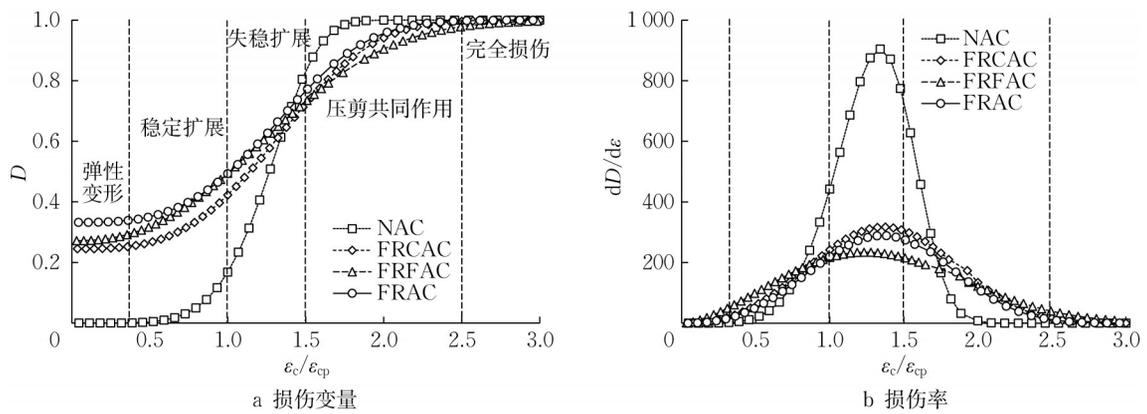


图 9 全再生骨料混凝土损伤演化规律

Fig. 9 Damage evolution law of FRAC

由图9还可以发现,相较于天然骨料混凝土,全再生骨料混凝土弹性阶段的应变更小,即在受到外力作用下出现较小变形时,损伤变量就开始累积。再生骨料体系的使用降低了混凝土损伤发展速率的最大值,与马昆林等^[13]发现一致,表明当损伤发展速率还较低时,材料就发生了裂纹的失稳扩展。这可以归因于全再生骨料体系带来的较大的初始损伤,导致发生裂纹失稳扩展所需累积的损伤较小。此

外,全再生骨料混凝土比天然骨料混凝土更晚地达到完全损伤状态。分析其原因,可能是由于在相同配合比下,全再生骨料混凝土强度明显低于天然骨料混凝土,导致峰值荷载后不易发生脆性破坏。全再生骨料混凝土试件加载至下降段时,没有听见与天然骨料混凝土类似的试件崩裂的声音。通常而言,随着强度的升高,混凝土声发射信号活跃期向加载后段移动^[20]。

4 存在的问题

总体而言,全再生骨料混凝土在满足基本配制强度要求下,相较于天然骨料混凝土在力学和收缩性能方面存在一定程度的劣化。然而本试验是在没有采取特殊预处理措施制备FRAC的前提下进行各个性能测试,如果采取一些科学调控措施,如再生骨料改性及其级配调整、选用合适的掺合料和减缩剂以及优化养护工艺等,可以预期其力学性能等优化效果也将随之变化。此外,大量关于再生粗骨料混凝土和再生细骨料混凝土的已有研究也能为全再生骨料混凝土研究提供基础。在后续研究中,可以结合断裂力学理论对全再生骨料混凝土裂缝扩展全过程进行深入分析;可以进行等强度配合比设计,利用声发射技术进一步探究全再生骨料混凝土在不同受力工况下(如单轴受拉、多轴受压、剪切滑移以及与钢筋黏结滑移等)的损伤机理、破坏特征以及变形性能规律。

5 结语

在新提出的全再生骨料混凝土概念的基础上探究了不同骨料体系对全再生骨料混凝土力学性能、收缩性能和单轴受压下应力-应变行为的影响规律,基于试验与分析,可以得出以下结论:

(1) 全再生骨料混凝土的抗压强度随龄期发展规律与普通混凝土类似。FRCAC、FRFAC和FRAC的180d抗压强度分别相对NAC降低了约5%、14%和15%。通过合理调整附加用水量,全再生骨料混凝土可以满足C30强度等级以上的设计要求。

(2) 全再生骨料体系增加了混凝土的干燥收缩应变,尤其在早期收缩阶段。在未采取特别预处理措施的情况下,FRCAC、FRFAC和FRAC的180d收缩应变分别相较于NAC增加了约12%、27%和47%。

(3) 全再生骨料混凝土损伤演化发展经历了弹性变形、稳定扩展、失稳扩展、压剪共同作用和完全损伤等阶段。在全再生骨料体系下,混凝土的峰值应力减小、峰值应变增大、极限应变保持稳定、弹性模量和割线模量均减小。基于试验结果,通过考虑初始损伤和受力损伤建立了损伤本构模型,能较好描述不同再生骨料体系混凝土在单轴受压作用下的变形情况。

在后续的研究中,可以采用一些科学调控措施,如再生骨料多尺度改性以及优化养护工艺等,对全再生骨料混凝土配比进行优化设计。不同骨料体系对混凝土不同受力下的力学和变形性能的影响机理仍需进一步深入研究。

作者贡献声明:

肖建庄:提出研究思路,指导研究内容和方案,审阅及修订论文。

唐宇翔:试验,收集与处理数据,分析与撰写论文初稿。

张航华:试验,收集与处理数据,审阅及修订论文。

段珍华:审阅及修订论文。

许碧莹:审阅及修订论文。

参考文献:

- [1] MONTEIRO P, MILLER S A, HORVATH A. Towards sustainable concrete[J]. *Nature Materials*, 2017, 16(7):698.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 再生混凝土结构技术标准: JGJ/T 443—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for recycled concrete structure: JGJ/T 443—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [3] NEDELJKOVI M, VISSER J, AVIJA B, *et al.* Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: a critical review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021(1):102196.
- [4] BENDIXEN M, BEST J, HACKNEY C, *et al.* Time is running out for sand[J]. *Nature*, 2019, 571(7763): 29.
- [5] 肖建庄, 马旭伟, 刘琼, 等. 全再生混凝土概念的衍化与研究进展[J]. *建筑科学与工程学报*, 2021, 38(2):15. XIAO Jianzhuang, MA Xuwei, LIU Qiong, *et al.* Evolvement and research progress of concept for full recycled concrete[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2021, 38(2):15.
- [6] TANG Y, XIAO J, ZHANG H, *et al.* Mechanical properties and uniaxial compressive stress-strain behavior of fully recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 323: 126546.
- [7] ZHANG H, XIAO J, TANG Y, *et al.* Long-term shrinkage and mechanical properties of fully recycled aggregate concrete: testing and modelling [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 130: 104527.
- [8] ZHOU C, CHEN Z. Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 134: 497.
- [9] 陈杰, 耿悦, 王玉银, 等. 含碎红砖再生混凝土基本力学性能及其应力-应变关系[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(12):184. CHEN Jie, GENG Yue, WANG Yuyin, *et al.* Basic mechanical properties and stress-strain relationship for recycled concrete including crushed clay bricks [J]. *Journal of Building*

(下转第1982页)