

碱矿渣再生混凝土单轴受压应力-应变关系研究

万方雄¹, 侯剑², 陶仲珩¹, 杨梓豪¹, 李彪³

(1. 武汉市青山北湖建筑安装工程有限公司, 湖北 武汉 420107;

2. 湖北源发市政工程有限公司, 湖北 武汉 420107;

3. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 为获取碱矿渣再生混凝土(AASRAC)的力学性能参数,对18个混凝土试件进行单轴受压试验,分析再生骨料取代率对受压应力-应变全曲线的影响,并建立AASRAC单轴受压应力-应变曲线全曲线方程。研究表明,AASRAC试件均呈现明显脆性破坏特征,随着再生骨料取代率增大,混凝土峰值强度、弹性模量呈现先小幅增加后降低的趋势。由于碱性激发基体更为致密的孔隙结构以及再生骨料中未水化水泥颗粒在碱激发剂作用下的二次水化作用,当再生骨料取代率为75%时,AASRAC的抗压强度与未掺组强度基本相同。所建立的应力-应变关系方程的计算结果与试验结果吻合良好,该曲线方程能够较好地预测AASRAC在单轴受压荷载下的力学性能参数。

关键词: 碱矿渣混凝土;再生骨料取代率;单轴受压;应力-应变曲线;本构关系

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)02-0114-08

Stress-strain Relations of Alkali-activated Slag-based Recycled Aggregate Concrete Under Uniaxial Compression

WAN Fangxiong¹, HOU Jian², TAO Zhongheng¹, YANG Zihao¹, LI Biao³

(1. Wuhan Qingshan North Lake Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 420107, China;

2. Hubei Yuanfa Municipal Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 420107, China;

3. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China)

Abstract: In order to analyze the mechanical behavior of alkali-activated slag-based recycled aggregate concrete (AASRAC), uniaxial compression tests were conducted on 18 concrete specimens to analyze the effects of recycled aggregate substitute rate on the total stress-strain curves. The results showed that AASRAC specimens show obvious brittle failure characteristics. With the increase of recycled aggregate substitute rate, the peak strength and elastic modulus show a trend of slight increase at first and then decrease. Due to the denser pore structures of alkali-activated paste and the secondary hydration of the unhydrated cement particles in recycled aggregates, the compressive strength of AASRAC is basically the same as that of concrete without recycled aggregate addition when the recycled aggregate substitute rate is 75%. Based on the experimental results and other literature, a uniaxial compressive stress-strain relationship formula of AASRAC was established, and the calculated results showed in good agreement with experimental results.

Keywords: alkali-activated slag-based concrete; recycled aggregate substitute rate; uniaxial compression; stress-strain curves; constitutive relation

随着工业化和城市化的快速发展,我国对混凝土材料的需求量逐年增加,这直接导致了水泥和天然骨料的消耗量大增。水泥生产过程中释放大量的

二氧化碳,造成每年全球水泥生产二氧化碳排放量约占全球碳排放总量的7%~8%^[1]。发展新型环保胶凝材料(如矿渣、粉煤灰等)并部分甚至完全替代

普通硅酸盐水泥制备低碳混凝土,对于环境保护和全球变暖控制具有重要意义^[2]。作为一种环境友好型混凝土,碱矿渣混凝土(AASC)能耗低、早期强度高、耐腐蚀、抗冻融性能优异,具有极大市场潜力^[3]。大量粗骨料的使用使得天然矿产资源趋于枯竭,引起高昂的建造成本。同时,老旧道路和构筑物的拆迁等将每年产生大量建筑垃圾,对自然环境和耕地保护构成严重威胁。再生混凝土骨料的出现为缓解这一危机提供了有效途径^[4]。研究表明,碱激发再生骨料混凝土具有比普通混凝土较优的界面过渡区和微观结构,增强了再生混凝土的强度^[5-7],促进了再生骨料在碱激发混凝土中的应用。

国内外学者对碱激发再生混凝土(AARAC)的力学性能和耐久性进行了研究,取得了重要研究成果。研究表明,AARAC 的力学性能和耐久性随再生骨料取代率的变化规律与再生混凝土类似^[7];随着再生骨料取代率增大,其抗压强度、抗拉强度和弹性模量逐渐降低,而吸附率、浸没吸水率和渗透空隙率等不断提高^[8]。然而,再生骨料中的未水化水泥颗粒可以与碱激发浆体发生反应,从而在再生骨料界面过渡区形成更多的反应产物^[9]。因此,70%再生骨料取代率的碱激发混凝土的抗压强度与未掺组的强度基本相同^[10]。此外,Xie 等^[11]研究了含 100%再生骨料的 AARAC 单轴受压破坏形态和应力-应变关系,发现其破坏主要取决于再生骨料及其界面过渡区的缺陷。Tang 等^[12]研究了再生骨料取代率对地聚物混凝土静态和动态受压行为的影响。结果表明,混凝土峰值应力、弹性模量和韧性等指标随再生骨料取代率的增加而降低,但峰后延性呈现相反趋势,基于试验结果建立了经验应力-应变模型。赵秋红等^[13]通过单轴压缩试验研究了钢纤维增强地聚物再生混凝土受压应力-应变关系,并建立了单轴受压本构关系方程。而 Nattapong 等^[14]的试验结果表明,再生骨料表面的水化产物在碱激发浆体的作用下进行二次水化反应,导致混凝土中界面处的黏结强度增大,因此,AARAC 弹性模量和应变能力随再生骨料取代率增大而不断增加。

综上可知,虽然国内外不少学者对碱激发再生

混凝土的力学性能进行了一些研究,但研究结论存在一定分歧,且关于力学行为的系统性研究文献还较少。为此,本文对 18 个碱矿渣再生混凝土(AAS-RAC)试件进行单轴压缩试验,研究再生骨料取代率对其破坏模式、抗压强度、弹性模量、峰值应变、应力-应变关系的影响规律。并基于现有研究和文献中试验结果,建立 AASRAC 单轴受压应力-应变关系方程。

1 试验概况

1.1 原材料与配合比

根据《普通混凝土配合比设计规程》^[15](JGJ 55—2011)和《再生混凝土结构技术标准》^[16](JGJ/T 443—2018)以及前期经验设计 C40 碱矿渣混凝土。胶凝材料为 S95 粒化高炉矿渣,其化学组成及物理性能指标列于表 1。碱性激发剂为工业水玻璃,其模数为 2.25,波美度为 50 Be, SiO₂ 和 Na₂O 含量分别为 29.99% 和 13.75%。采用苛性碱(NaOH, 纯度≥96%)调节水玻璃模数。减水剂为减水率约为 28% 的萘系高效减水剂。细骨料为细度模数为 2.7 的优质河砂;天然粗骨料为粒径为 5 mm~20 mm 碎石,再生粗骨料为当地建筑工地废弃混凝土经破碎、筛分、清洗后,粒径为 5 mm~20 mm 的再生混凝土粗骨料,其物理力学指标见表 2。

为研究再生粗骨料取代率对碱矿渣混凝土力学性能的影响,参考课题组前期成果,确定再生骨料取代率为 25%、50%、75% 和 100%。共计 6 组 18 个试件,包含 1 组水泥普通混凝土(OPC)试件,为确保水胶比、胶砂比和砂率等一致,其配合比中水泥质量与其他组矿渣相同。各组混凝土配合比设计见表 3。

1.2 试件设计及制作

试验采用尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体试件。试件制作和养护依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[17](GB/T 50081—2019)进行。试件浇筑时,同批次制作 3 个边长为 100 mm 的立方体试块,28 d 龄期后,测试其立方体抗压强度(f_{cu}),试验结果列于表 4。

表 1 水泥和高炉矿渣化学组分和物理性能指标

胶凝材料	化学组成/%						密度 /(g·cm ⁻³)	比表面积 /(m ² ·kg ⁻¹)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃		
水泥	62.91	20.72	4.84	3.18	2.15	3.56	3.15	3413
S95	36.82	26.75	19.66	0.32	11.10	2.65	2.90	428

表 2 天然骨料和再生骨料物理力学参数

骨料类别	粒径/mm	堆积密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	压碎指标/%	冲击指数/%	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	细度模数	吸水率/%
NA	5~20	1431	9.7	13	2873	2.7	1.68
RA	5~20	1366	15.3	28	2655	2.6	5.85

表 3 碱矿渣再生混凝土试件配合比设计

单位: kg/m^3

编号	试件名	水泥	矿渣	天然骨料	再生骨料	河砂	水玻璃	氢氧化钠	减水剂	水	f_{cu}
1	OPC	417	—	1086.0	—	724	—	—	3.3	175	47.530
2	R00	—	417	1086.0	0.0	724	161.75	3.59	3.3	84	65.497
3	R25	—	417	814.5	271.5	724	161.75	3.59	3.3	84	60.095
4	R50	—	417	543.0	543.0	724	161.75	3.59	3.3	84	59.399
5	R75	—	417	271.5	814.5	724	161.75	3.59	3.3	84	52.304
6	R100	—	417	0.0	1086.0	724	161.75	3.59	3.3	84	44.627

采用 60 L 强制搅拌机拌制混凝土。试件制备时,先将再生粗骨料润湿至表面风干状态,其次将粗骨料、河砂、胶凝材料等加入搅拌机并拌制均匀 3 min~5 min;然后将提前 24 h 配制的模数为 2 的水玻璃与苛性碱混合液及水倒入搅拌机中,拌制 3 min。混凝土拌制完成后,装入预先准备的塑料模具中,并在振动台上振捣 2 min~3 min 直至混凝土密实。最后,将试件静置于实验室 24 h 后进行脱模,并放置于标准养护室中进行养护。

1.3 试验方法

通过电液伺服岩石力学测试系统 MTS-311.41 进行试验,其最大荷载为 2 500 kN。测试过程中,采用两个电子位移计 (linear variable displacement transducer, LVDT) 测试试件竖向变形。为减小试件表面不平整对试验结果的影响,采用超细石英砂对试件表面抹平,并采用 40% 预估最大荷载进行预压。加载过程中采用位移控制加载模式,加载速率为 0.01 mm/s 以保证为准静态加载状态。

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

典型的 AASRAC 试件破坏形态如图 1 所示。从图 1 中可以看出,所有试件均为脆性破坏,宏观主裂缝贯穿整个试件,且有大量竖向裂缝分布在试件表面,这些宏观裂缝决定了试件的最终破坏。但当再生骨料取代率不同时,试件的破坏形态有所差异。可以发现,随着再生骨料取代率增大,试样表面裂纹数量先增大后减小,在再生骨料取代率为 50% 时试件破坏程度最为严重。这主要在于混凝土试件的脆

性特征与其抗压强度密切相关,混凝土强度等级越高,其脆性越显著。当再生骨料取代率为 50% 时,混凝土抗压强度最高,其脆性特征也最为明显。而再生骨料取代率为 100% 时,试件抗压强度较低,其破坏程度最轻。

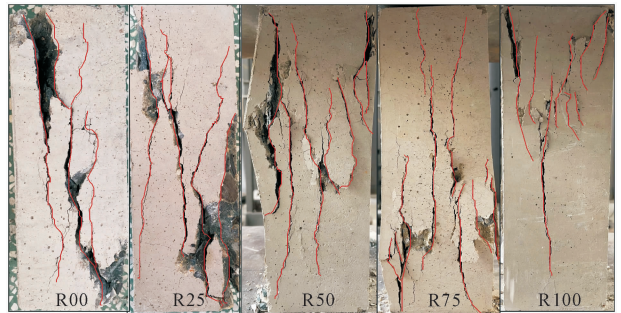


图 1 试件破坏形态

2.2 应力-应变关系全曲线

图 2 为不同再生骨料取代率的 AASRAC 实测受压应力-应变关系曲线,每条曲线均为三个试件的平均值。曲线的关键力学特征包括峰值应力、峰值应变、弹性模量等计算见表 4。其中,峰值应力,即单轴抗压强度,为峰值应变处的轴向应力。参考 ASTM C469M^[18],弹性模量为应力-应变曲线上特定点 (纵向应变为 50 $\mu\epsilon$) 与任意点 (峰值应力的 40% 对应的应变) 之间的割线模量,其计算公式为:

$$E_c = \frac{0.4 \times f_{\text{ck}} - f_1}{\epsilon_2 - 0.00005}$$

(1)

式中: E_c 为碱矿渣再生混凝土的弹性模量; f_{ck} 为峰值应力; f_1 为 50 $\mu\epsilon$ 应变对应的应力; ϵ_2 为应力达到峰值应力 40% 时的应变。

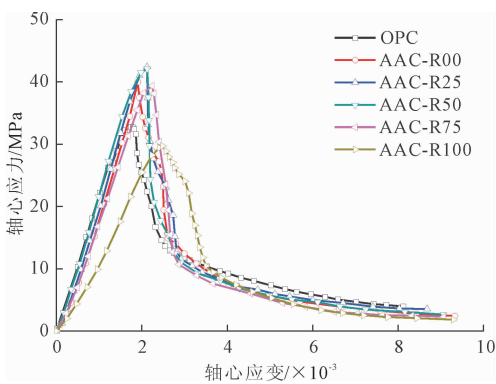


图2 碱矿渣再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线

从图2中可以看出,所有曲线的变化趋势基本相同,呈现出明显的上升段、下降段和稳定段。在初始加载阶段,由于混凝土材料固有的弹性特性,试件的轴向应力与应变基本呈线性关系。当应力超过峰值应力约70%时,试样表面出现微裂纹,曲线开始偏离直线,应力向峰值应力的增长速度相对较慢,在

峰值应力处试件表面形成宏观主裂纹,并出现脆响断裂声。峰值过后,轴向应力急剧下降,试件表面产生更多裂缝。随着轴向位移增大,裂纹继续扩展并逐渐相交为主裂纹。当轴向应力接近10 MPa时,曲线开始向应变轴方向凸起,出现拐点。之后,应力不断减小,曲线逐渐趋于平缓。

由图2可知,碱矿渣混凝土的力学性能指标优于素混凝土,具有较高的峰值强度和峰值应变。但在下降段和破坏段,其应力-应变曲线低于素混凝土,峰后延性相对较差。此外,再生骨料取代率对混凝土受压应力-应变曲线具有显著影响,并在上升段和下降段呈现完全相反的变化趋势。随着再生骨料取代率增大至100%,上升段的斜率先增大后减小,峰值应力和峰值应变的变化趋势基本一致,而下降段的延性则呈现出相反的规律。由此可以看出,AASRAC的峰后延性主要与混凝土抗压强度有关,而混凝土的抗压强度又与再生骨料取代率密切相关。

表4 碱矿渣再生混凝土受压力学性能指标

试件编号	峰值应力		峰值应变		弹性模量	
	平均值/MPa	标准差	平均值/ 10^{-3}	标准差	平均值/GPa	标准差
OPC	32.804	0.752	1.724	0.056	21.777	1.089
R00	39.962	0.855	1.871	0.020	22.445	1.122
R25	42.219	0.713	2.070	0.062	23.726	1.186
R50	42.746	1.029	2.113	0.009	24.060	1.203
R75	39.356	0.702	2.204	0.031	20.296	1.015
R100	29.322	0.265	2.415	0.186	13.799	0.689

2.3 关键力学性能指标

图3为再生骨料取代率对AASRAC抗压强度、峰值应变和弹性模量的影响规律。由图3可知,AASC的峰值应力、峰值应变和弹性模量均大于素混凝土(OPC),其增长幅度分别为17.91%、7.86%和2.98%。这主要在于:由于碱性激发剂的作用,AASRAC基体和粗骨料-基体界面更为致密,增大了混凝土密实度,进而提高了其力学性能。当再生骨料取代率增加至100%时,AASRAC的峰值应力和弹性模量变化趋势相似,均先增大到峰值后减小,但峰值应变不断增大。其中,峰值应力分别增大了5.64%、6.96%、-1.52%和-26.62%;弹性模量分别变化了5.71%、7.19%、-9.57%和-38.52%;峰值应变分别增加了10.62%、12.93%、17.75%和29.03%。可以看出,再生骨料取代率为75%的试件抗压强度与未掺组相比没有明显下降。基于以上观察发现,再生骨料对AASRAC的影响不同于对普

通水泥混凝土的影响。对于再生混凝土,国内外众多学者^[19]对其力学性能和耐久性等进行了系统研究,取得了丰硕成果。研究结果一致表明,由于再生混凝土骨料较高的天然吸水性和初始缺陷,再生骨料取代天然骨料掺入后会导致混凝土基体中孔隙、弱界面等初始损伤增加,在一定程度上降低了混凝土的力学性能,包括抗压强度、抗拉强度、弹性模量、抗弯强度等。但对于碱矿渣再生混凝土,碱激发剂的强碱特性可促进胶凝材料水化,生成更多水化产物,填充混凝土在硬化过程中的初始缺陷^[11-12],显著增强混凝土的抗压强度。再生混凝土骨料由老砂浆、界面和天然粗骨料组成,老砂浆及其骨料界面过渡区中存在的具有水化活性的未水化胶凝材料颗粒^[4],在碱性激发剂作用下,将进一步水化^[14],生成的水化产物有效填充和密实了再生骨料与基体界面,进而使得AASRAC更为致密。

因此,当再生骨料取代率增加至50%时,AAS-

RAC 的抗压强度和弹性模量有一定程度的增大^[11]。然而,当再生骨料取代率达到 75% 或 100% 时,再生骨料掺入引入的初始缺陷所带来的负面影响超过碱激发效应的正贡献,最终使得 AASRAC 的抗压强度和弹性模量呈下降趋势。不同于抗压强度,混凝土

的峰值应变主要由基体、骨料、骨料-基体基面等的变形能力决定。与天然骨料相比,再生骨料弹性模量较低,变形能力较大,且混凝土基体孔隙随着再生骨料掺入而增多。因此,在相同外荷载作用下,随着再生骨料取代率增加,AASRAC 的峰值应变不断增大。

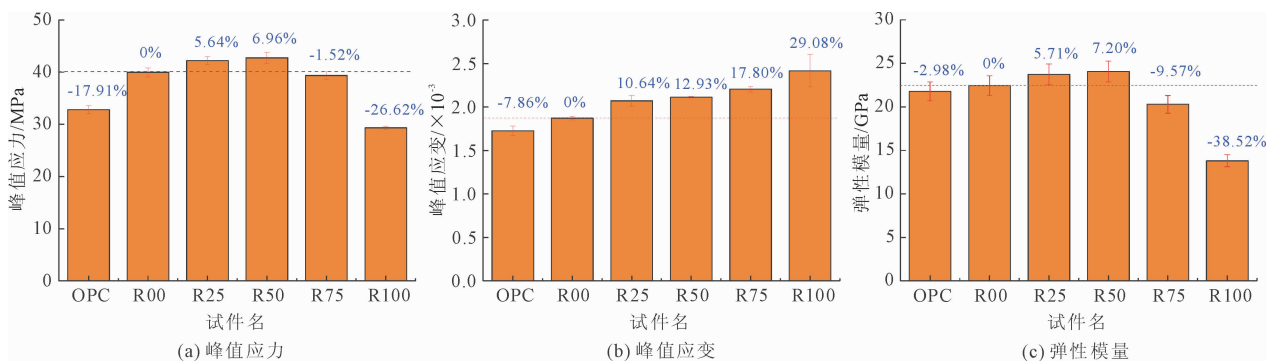


图 3 AASRAC 关键力学性能指标随再生骨料取代率的变化规律

3 受压应力-应变关系模型

3.1 受压应力-应变关系方程

为准确描述混凝土在外部荷载作用下的力学行为,众多学者对普通混凝土、再生混凝土、高强混凝土等材料提出了大量经验模型,其形式主要有多项式、指数、三角函数、有理分式等。对于碱激发混凝土,Tang 等^[12]、赵秋红等^[13]、Li 等^[20]学者对现有的应力-应变关系数学模型进行了验证,结果表明,由 Carreira 等^[21]提出的普通混凝土应力-应变有理分式模型能够适用于碱激发混凝土受压应力-应变响应预测,公式如下:

$$\frac{\sigma_c}{f_0} = \frac{n(\varepsilon_c/\varepsilon_0)}{n-1 + (\varepsilon_c/\varepsilon_0)^n} \quad (2)$$

式中: σ_c 为受压应力; f_0 为混凝土轴心抗压强度; n 为控制曲线形状的材料参数; ε_c 为受压应变; ε_0 为混凝土受压峰值应变。对于碱激发混凝土,Tang 等^[12]对改模型进行了修正,为:

$$\frac{\sigma_c}{f_0} = \begin{cases} \frac{n(\varepsilon_c/\varepsilon_0)}{n-1 + (\varepsilon_c/\varepsilon_0)^n} & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{\alpha(\varepsilon_c/\varepsilon_0)}{\alpha-1 + (\varepsilon_c/\varepsilon_0)^\beta} & x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: n 、 α 、 β 均为控制曲线上升和下降段曲率的参数。对于上升阶段,参数 n 为:

$$n = \frac{1}{1 - \frac{f_{ck}}{\varepsilon_0 E_c}} \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (4)$$

对于下降段, α 和 β 与混凝土的抗压强度密切相关。其中, β 决定了曲线的形状。参考文献[12,20],

其值可取为:

$$\beta = 1.592 + \frac{f_{ck}}{15} \quad (5)$$

参数 α 代表了曲线的曲率程度。通过对本文试验数据的回归分析,可以将其描述为 AASC 抗压强度的函数:

$$\alpha = 2.97 - 0.032f_{ck} \quad (6)$$

由式(1)~式(6)可知,所提出的应力-应变关系模型只需要三个关键力学参数,即峰值应力(f_0)、峰值应变(ε_0)和弹性模量(E_c)。

3.2 力学特征参数取值

3.2.1 峰值应力

在工程结构设计和分析中,通常采用轴心抗压强度作为设计的依据。由于本文试验数据有限,收集文献[13,22-23]中的试验结果,用于峰值应力计算公式的建立。如前所述,AASRAC 的峰值应力与再生骨料取代率密切相关,本文采用 ξ 来描述再生骨料取代率对峰值应力的影响程度,其定义为 AASRAC 轴心抗压强度与对照组 AASC 抗压强度之比。通过回归分析,得到 ξ 与再生骨料取代率的关系式,见式(7),拟合结果见图 4。

$$\xi = 0.996 + 0.29M_{RA} - 0.36M_{RA}^2 \quad (7)$$

式中: M_{RA} 为再生骨料取代率。

然而,在实际工程现场,轴心抗压强度测试难度较大,因此常测试混凝土立方抗压强度,再转换为轴心抗压强度,此种方法易于测试,在实际工程中应用较多。因此,本文在搜集文献[13,24]试验数据结果的基础上,通过回归分析,建立了 AASRAC 单轴抗

压强度与立方抗压强度的关系方程,如式(8)所示,拟合结果如图 5 所示。

$$f_{ck} = 0.785f_{cu} \tag{8}$$

式中: f_{ck} 、 f_{cu} 分别表示轴心抗压强度和立方体抗压强度。

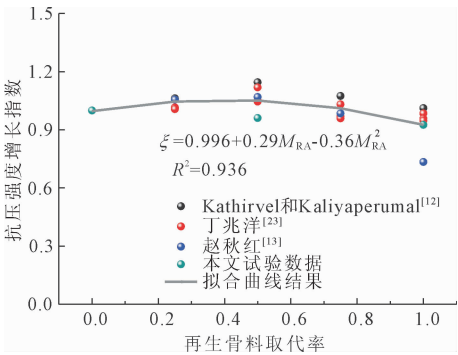


图 4 峰值应力增长幅度与再生骨料取代率的关系拟合结果

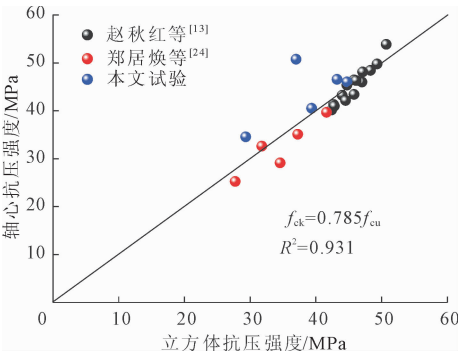


图 5 轴心抗压强度与立方体强度关系拟合结果

3.2.2 峰值应变

类似峰值应力,定义参数 η 表征再生骨料取代率对峰值应变的影响程度。基于对本文及文献[12-13,24]中试验数据的回归分析,可得峰值应变增长幅度与再生骨料取代率的关系,见式(9),拟合结果见图 6。

$$\eta = 1 + 0.279M_{RA} \tag{9}$$

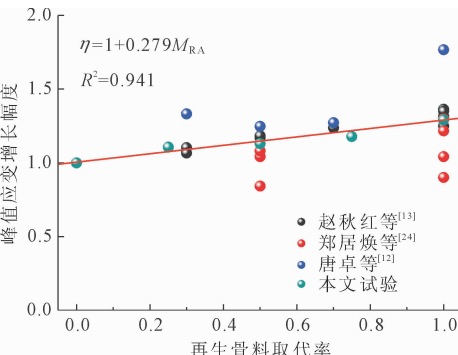


图 6 峰值应变变化幅度与再生骨料取代率的关系拟合结果

对于碱激发混凝土,国内外学者提出了较多峰值应变计算公式。本文参考课题组前期研究成果^[20]及相关文献^[12],得到 AASC 峰值影响计算公式为:

$$\varepsilon_0 = 2.35 \frac{f_c^{0.45}}{E_c^{0.86}} \tag{10}$$

式中: f_c 为轴心抗压强度; E_c 为混凝土弹性模量。由此可得 AASRAC 峰值应变计算公式为:

$$\varepsilon_0 = 2.35 \frac{f_c^{0.45}}{E_c^{0.86}} (1 + 0.279M_{RA}) \tag{11}$$

3.2.3 弹性模量

混凝土弹性模量是混凝土工程结构设计与分析中的重要材料参数。采用参数 δ 代表再生骨料取代率对弹性模量的影响程度。基于本文试验数据结果拟合分析,可得 δ 与再生骨料取代率的函数关系为式(12),拟合结果见图 7。

$$\delta = 0.989 + 0.631M_{RA} - 1.001M_{RA}^2 \tag{12}$$

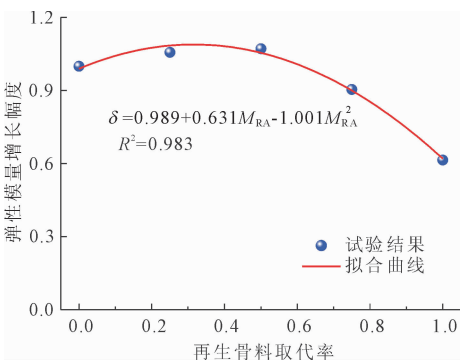


图 7 弹性模量变化幅度与再生骨料取代率的关系拟合结果

国内外众多学者提出了混凝土弹性模计算方法,并对其适用性进行了检验和验证。对于碱激发混凝土,Nath 和 Sarker^[25]提出的计算方法具有较强适用性,见式(13):

$$E_c = 3510 \sqrt{f_c} \tag{13}$$

由式(12)和(13)可得 AASRAC 弹性模量计算公式:

$$E_c = 3510(0.989 + 0.631M_{RA} - 1.001M_{RA}^2) \tag{14}$$

3.3 模型验证

为检验所建立的 AASRAC 受压应力-应变关系模型的适用性,利用本文独立组和文献[13]中的试验数据结果对所建立模型进行了验证,再生骨料取代率范围为 0~100%。图 8 为模型预测与试验数据的对比结果。由图 8 可知,所建立的 AASRAC 材料受压应力-应变关系模型能够较好地预测不同再生骨料取代率的 AASC 在单轴受压荷载下的力

学响应,具有可靠性和适用性。

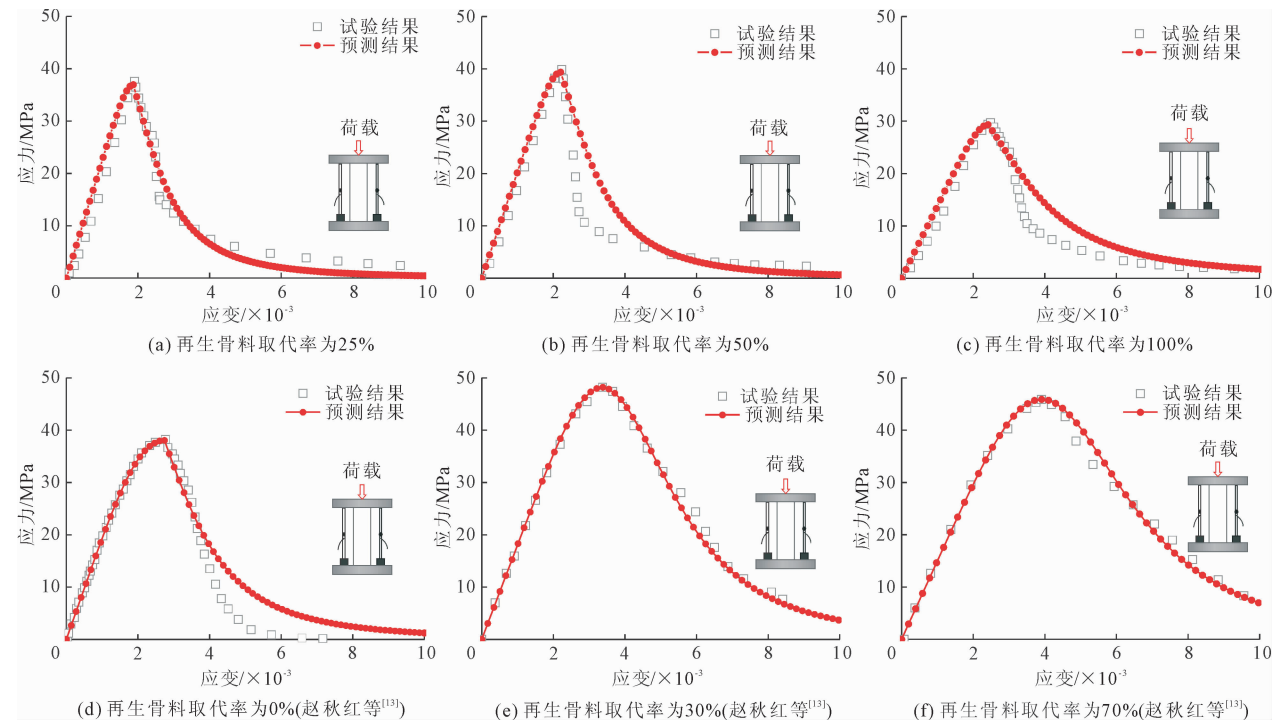


图 8 AASRAC 受压应力-应变关系模型验证结果

4 结 论

(1) AASRAC 试件均表现为脆性破坏特征。再生骨料掺入对试件破坏形态具有明显影响,当再生骨料取代率为 50% 时试件破坏程度最为严重,脆性特征最显著。

(2) 随着再生骨料取代率增大,AASRAC 抗压强度和弹性模量先增大后减小,但峰值应变不断增大。由于碱激发剂的作用,促使再生混凝土骨料中未水化的水泥颗粒进行二次水化,其水化产物使得 AASC 基体和粗骨料-基体界面更为致密,从而改善了其力学性能。

(3) 基于现有研究及文献中的试验数据结果,建立了不同再生骨料取代率的 AASRAC 单轴受压应力-应变关系方程。所提出的公式能较好地预测 AASRAC 在单轴受压荷载下的力学响应。

参考文献:

[1] 肖建庄,黎 鹭,丁 陶. 再生混凝土生命周期 CO₂ 排放评价[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016,46(5):1088-1092.

[2] 于 琦,万小梅,赵铁军,等. 碱激发矿渣混凝土抗氯离子渗透性及电测试验方法研究[J]. 材料导报,2022,36(5):100-105.

[3] Amer I, Kohail M, EI-Fekey M S, et al. A review on alkali-activated slag concrete [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021,12:1475-1499.

[4] 肖建庄,王春晖,郑振鹏,等. 再生骨料混凝土结构抗震设计关键问题[J]. 土木工程学报,2020,53(11):46-54.

[5] Nanyakkara O, Gunasekara C, Sandanayake M, et al. Alkali activated slag concrete incorporating recycled aggregate: Long term performance and sustainability aspect [J]. Construction Building Materials, 2021, 271:121512.

[6] Pawluczuk E, Wichrowska K K, Jimenez J R, et al. Geopolymer concrete with treated recycled aggregates: Macro and microstructural behavior [J]. Journal of Building Engineering, 2021,44:103317.

[7] Nuaklong P, Sata V, Chindaprasirt P. Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens [J]. Construction Building Materials, 2018,161: 365-373.

[8] Thomas B S, Yang J, Bahurudeen A, et al. Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review [J]. Cleaner Materials, 2022, 3(2): 100056.

[9] Kathirvel P, Kaliyaperumal S R M. Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability

- properties of alkali activated slag concrete [J]. Construction Building Materials, 2017,133:65-72.
- [10] Shi X S, Collins F G, Zhao X L, et al. Mechanical properties and microstructures analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012,237:20-29.
- [11] Xie J, Wang J, Zhang B, et al. Physicochemical properties of alkali activated GGBS and fly ash geopolymeric recycled concrete [J]. Construction Building Materials, 2019,204:384-398.
- [12] Tang Z, Hu Y, Tam V W Y, et al. Uniaxial compressive behaviors of fly ash/slag-based geopolymeric concrete with recycled aggregates [J]. Cement and Concrete Composites, 2019,104:103375.
- [13] 赵秋红,董 硕,谢 萌. 钢纤维增强地聚物再生混凝土单轴受压全曲线试验[J]. 建筑结构学报,2022,43(11):255-265.
- [14] Nattapong D, Srikkhama T, Plongkrathok C, et al. Assessment of equivalent substrate stiffness and mechanical properties of sustainable alkali-activated concrete containing recycled concrete aggregate [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022,16:e00982.
- [15] 普通混凝土配合比设计规程:JGJ 55—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression: ASTM C469M[S]. West Conshohocken, United States: American Society of Testing and Materials, 2010.
- [19] 史才军,曹芷杰,谢昭彬. 再生混凝土力学性能的研究进展[J]. 材料导报,2016,30(23):96-103,126.
- [20] Li B, Wang C, Yu S, et al. Compressive constitutive behavior of steel fiber reinforced geopolymeric recycled aggregate concrete: Experimental investigation and analytical model [J]. Structures, 2023,58:105531.
- [21] Carreira D J, Chu K H. Stress-strain relationship for plain concrete in compression [J]. Journal of American Concrete Institute, 1985,82:797-804.
- [22] Kathirvel P, Kaliyaperumal S R M. Influence of recycled concrete aggregates on the flexural properties of reinforced alkali activated slag concrete [J]. Construction Building Materials, 2016,102:51-58.
- [23] 丁兆洋,苏 群,李明泽,等. 水玻璃模数对地聚物再生混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报,2023,26(1):61-70.
- [24] 郑居焕,刘如月,颜桂云,等. 砖骨料地聚物再生混凝土力学性能试验研究[J]. 工业建筑,2022,52(9):234-240.
- [25] Nath P, Sarker PK. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete [J]. Construction Building Materials, 2017,130:22-31.

~~~~~

(上接第71页)

- [12] 罗 为,熊光启,熊晨晨,等. 振动搅拌工艺制备轻质高强钢纤维混凝土[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(1):14-22.
- [13] 张颜科,路 钰,杨 迎,等. 振动搅拌对普通混凝土和超高性能混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品,2023(11):16-21.
- [14] 何志勇,阳洁颖,邹丽梅,等. 双卧轴振动搅拌对超高性能混凝土性能的影响研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(5):154-162.
- [15] 李汉渤,丁平洋,张孙文,等. 振动搅拌对混凝土新拌性能及耐久性性能影响[J]. 建筑结构,2022,52(S1):1609-1614.
- [16] 纤维混凝土应用技术规程:JGJ/T 221—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.