

文章编号:1672-3961(2025)02-0097-09

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.010

碳化钢渣细骨料混凝土本构关系

薛刚^{1,2,3}, 邬松^{1*}, 董伟^{1,2}

(1.内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2.内蒙古自治区土木工程安全与耐久性重点实验室, 内蒙古 包头 014010; 3.内蒙古自治区建筑结构防灾减灾工程技术研究中心, 内蒙古 包头 014010)

摘要:为研究碳化钢渣细骨料对混凝土性能的影响规律,对碳化钢渣进行物理化学试验,制备了普通混凝土及10%、20%及30%三种体积分数的碳化钢渣细骨料混凝土(carbonized steel slag fine aggregate concrete, CSSFC),研究碳化钢渣体积分数对混凝土力学性能及体积稳定性的影响规律。结果表明:随着碳化钢渣细骨料体积分数由10%递增至30%,CSSFC的立方体抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量及峰值应变均逐渐增大,普通混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值为0.76~0.82,CSSFC的轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值为0.85~0.87。研究了适用于CSSFC的本构关系模型,并分析模型拟合参数与力学性能间的关系,以期对钢渣混凝土的应用及推广提供试验及理论依据。

关键词:碳化钢渣;混凝土;细骨料;力学性能;本构关系

中图分类号:TU528

文献标志码:A

引用格式:薛刚,邬松,董伟.碳化钢渣细骨料混凝土本构关系[J].山东大学学报(工学版),2025,55(2):97-105.

XUE Gang, WU Song, DONG Wei. Properties of carbonized steel slag fine aggregate concrete[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(2):97-105.

Properties of carbonized steel slag fine aggregate concrete

XUE Gang^{1,2,3}, WU Song^{1*}, DONG Wei^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Building Structure Disaster Prevention and Mitigation Engineering Technology Research Center, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to study the applicability of the carbon steel slag fine aggregate in concrete and mechanical properties of differences, physical and chemical tests were conducted on carbonated steel slag. Based on this, ordinary concrete and fine aggregate concrete with 10%, 20% and 30% carbonized steel slag were prepared. The influence law of the replacement rate of steel carbide slag on the mechanical properties and volume stability of concrete was studied. Research had found that with the addition of fine aggregate of carbonized steel slag from 10% to 30%, the cube compressive strength, splitting tensile strength, elastic modulus, and peak strain of carbonized steel slag aggregate concrete gradually increased. Axis of normal concrete compressive strength and cube compressive strength ratio was 0.76-0.82, and that of carbonized steel slag concrete was 0.85-0.87. At the same time, the constitutive relationship models applicable to carbonated steel slag fine aggregate concrete were studied and summarized, and the relationship between model fitting parameters and mechanical properties was analyzed, In order to provide theoretical support for the application and popularization of steel slag concrete.

Keywords: carbonized steel slag; concrete; fine aggregate; mechanical property; constitutive relation

收稿日期:2024-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52168032);2023年度自治区直属高校基本科研业务费资助项目(2023RCTD025)

第一作者简介:薛刚(1968—),男,内蒙古包头人,教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为新型混凝土材料与结构。

E-mail: xuegang-2008@126.com

* 通信作者简介:邬松(1994—),男,江西抚州人,硕士研究生,主要研究方向为新型混凝土材料与结构。E-mail:2922487106@qq.com

0 引言

近年来,我国粗钢产量不断增加,2022年为10.13亿t,每炼1t钢大约产生125~140kg钢渣^[1-2],每年钢渣总产量超过1亿t。我国对钢渣的有效利用起步较晚,整体利用率仅为29.5%^[3],与欧美、日本等发达国家84.4%~98.4%的利用率相比还有较大差距。在“双碳”背景下,对钢渣进行碳酸化处理,不仅可以在一定程度上充分利用CO₂^[4],并且能生成具有相对稳定结构的碳酸盐产物,提高钢渣强度及稳定性^[5-6]。

钢渣主要分为转炉钢渣和电炉钢渣,我国80%以上为转炉渣,矿物组分主要包括硅酸二钙、硅酸三钙、铁铝酸钙、RO相以及少量的游离氧化钙、氧化镁等,游离氧化钙和氧化镁在水化过程中生成氢氧化钙和氢氧化镁^[7],体积膨胀,导致钢渣开裂甚至破坏。文献[8]研究发现,当钢渣细骨料体积分数为60%时,混凝土性能最好,对无量纲化应力-应变全曲线拟合结果与试验结果吻合较好。文献[9]研究发现,相较于普通混凝土,钢渣混凝土中的钢渣骨料与四周的凝胶结合较为紧密,且骨料表面的孔洞使其与C-S-H凝胶嵌合更加紧密,结构更加稳固;钢渣砂或钢渣石的体积分数为20%,砂率为0.38,配制的C40钢渣骨料混凝土力学性能最佳。文献[10]研究发现,钢渣混凝土抗压强度变化趋势与孔隙率及吸水率成反比,与超声脉冲速度成正比,表明钢渣使混凝土内部结构更为密实。文献[11]研究发现,钢渣体积分数为20%时,混凝土的立方体抗压强度、劈裂抗拉强度最大;钢渣体积分数为30%时,混凝土的抗折强度最大。依据Carreira and Chu模型及Wee模型对钢渣混凝土本构关系进行分段描述,分段式本构模型与实测钢

渣细骨料混凝土的应力-应变曲线基本吻合^[12]。目前已有较多学者对钢渣混凝土进行了研究,对钢渣骨料进行预处理后掺入混凝土进行性能研究的内容不多,文献[13]研究发现,钢渣砖在一定的压强下进行碳酸化,其强度明显提高;根据X射线衍射以及扫描电镜微观测试结果可知,试件力学性能提升的原因是钢渣中原有的Ca²⁺、参加的水和CO₂发生碳酸化反应,生成了CaCO₃,导致微观结构更为致密、孔隙直径减小、总孔隙体积减小。文献[14]研究发现,由碳化反应生成的碳酸钙晶体主要由方解石组成,少量文石填充在最密集的堆积体系中,进一步加强了基体结构,是高性能可碳化混凝土高强的关键作用机制;经过碳化处理后,高性能可碳化混凝土的稳定性表现得相当出色。

目前有关碳化钢渣混凝土基本强度和脆性的研究较多,其本构关系的研究还鲜有报道。混凝土本构关系是结构分析的基础,为此,本研究利用包钢集团钢渣废料,对钢渣进行物理化学性能试验,再进行筛分碳化处理,等体积替代细骨料,制备CSSFC,研究其立方体抗压、劈裂抗拉以及棱柱体受压性能,在此基础上研究了适用于CSSFC的本构关系模型,为碳化钢渣在工程结构中的应用提供科学依据。

1 试验概况

1.1 混凝土原材料及配合比

选用普通硅酸盐水泥P·O42.5,其物理性能指标如表1所示,其他性能指标均符合《通用硅酸盐水泥》(GB175—2023)^[15]要求;使用内蒙古河西电厂生产的Ⅱ级粉煤灰;减水剂为聚羧基型,减水率为20%;使用自来水作为拌合用水。

表1 水泥物理性能指标

Table 1 The physical properties of cement

水泥净浆的标准稠度	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	安定性	凝结时间/min		抗折强度/抗压强度/MPa	
				初凝	终凝	3 d	28 d
26	350	3.14	合格	114	254	5.7/24.6	9.3/47.7

采用包头本地天然河砂,用5mm的方孔筛进行筛分处理,满足Ⅱ区中砂要求,符合《建设用砂》(GB/T14684—2022)^[16]标准;钢渣细骨料取自包钢集团公司,级配满足Ⅱ区中砂要求,可作为细骨料,钢渣主要化学成分如表2所示;石子粒径为5~20mm,满足《建设用卵石、碎石》(GB/T14685—2022)^[17]中连续

级配要求。粗细骨料粒径累计曲线如图1所示。骨料的主要物理性能指标如表3所示。

表2 钢渣主要化学成分

Table 2 The main chemical components of steel slag

化学成分	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	其他
质量分数/%	42.3	22.9	15.2	7.1	5.3	7.2

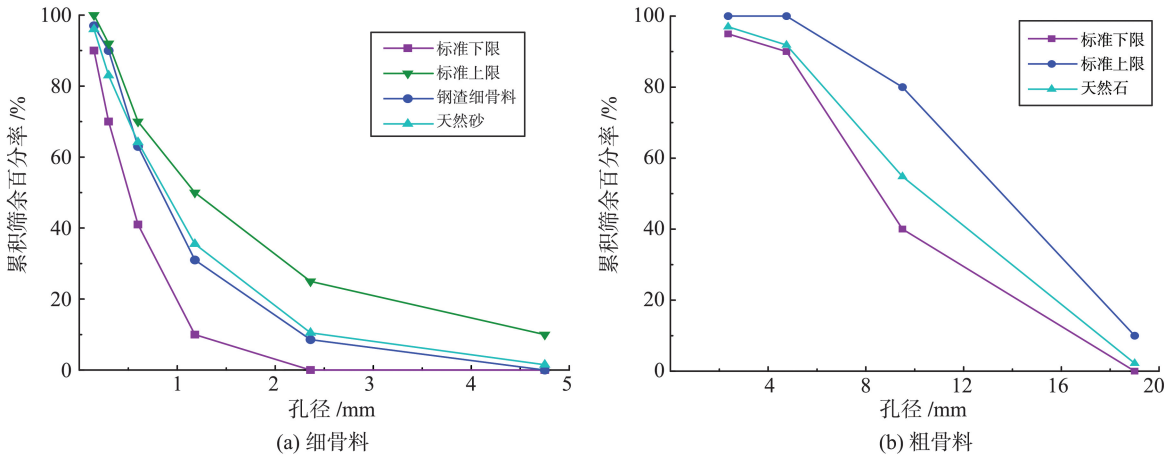


图 1 骨料粒径累积筛余百分率曲线
Fig.1 Aggregate size cumulative sieve percentage curve

表 3 天然砂石及钢渣骨料物理性能指标

Table 3 Physical performance indicators of natural sand, stone, and steel slag aggregates

骨料	表观密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	细度模数	含水率/%	吸水率/%
碳化钢渣细骨料	3 450	1 810	2.93	0.24	3.60
砂	2 630	1 520	2.71	0.50	0.90
石子	2 870	1 550		0.50	0.80

混凝土设计强度等级为 C40,依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2011)进行配合比设计,采用 10%、20%、30% 三种碳化钢渣体积分数

等体积代砂制备 CSSFC,掺入体积分数为 15% 的粉煤灰提高其工作性能。CSSFC 配合比如表 4 所示。

表 4 碳化钢渣细骨料混凝土配合比

Table 4 Carbonized steel slag fine aggregate concrete mix ratio

单位:kg/m³

试验编号	水泥	粉煤灰	河砂	碳化钢渣细骨料	碎石	水	减水剂
NC	323	57	795.0	0	1 054	171	0.9
CSSFC-10	323	57	715.5	107.15	1 054	171	1.1
CSSFC-20	323	57	636.0	214.31	1 054	171	1.3
CSSFC-30	323	57	556.5	321.46	1 054	171	1.5

注:NC 表示普通混凝土,CSSFC-10 为碳化钢渣体积分数为 10% 的混凝土,其他以此类推。

1.2 试验方法

钢渣碳化试验:将钢渣颗粒放入碳化箱中,常压环境下通入体积分数为 99% 的 CO₂ 气体,环境湿度为 55%,温度为 25 ℃,碳化时间为 4 h。

体积安定性试验:试验参照《水泥压蒸安定性试验方法》(GB/T750—1992)^[18]进行。分别制备不同碳化钢渣体积分数下尺寸为 25 mm×25 mm×280 mm 的砂浆棒试件,用比长仪测量初始长度,再将试件放在饱和蒸汽压力为 2.0 MPa、温度为 216 ℃ 环境下的压蒸釜中压蒸 3 h,待其冷却,取出试件,用比长仪测量其长度,并观察不同钢渣体积分数下的试件形态。试件膨胀率

$$L_A = \frac{L_1 - L_0}{L} \times 100, \quad (1)$$

式中:L_A 为试件膨胀率,%;L 为试件有效长度,取 250 mm;L₁ 为压蒸后长度,mm;L₀ 为脱模后长度,mm。

碳化钢渣混凝土力学性能试验参考《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019)^[19]进行,采用 100 mm×100 mm×100 mm 的试件进行立方体抗压及劈裂抗拉强度试验,采用 150 mm×150 mm×300 mm 棱柱体进行轴心抗压强度试验。

2 结果与讨论

2.1 碳化钢渣体积安定性分析

随着钢渣体积分数由 10% 递增至 30%,砂浆棒膨胀率呈现小幅度增长,但均满足规范《钢渣应用技术要求》(GB/T32546—2016)中小于 0.8% 的限值要求,不同钢渣体积分数下砂浆棒膨胀率如图 2 所示。钢渣体积分数低于 30% 的砂浆棒安定性良好,钢渣体积分数为 50% 的砂浆棒压蒸后,表面出现大面积脱落(在图 3 中圈出),如图 3 所示。断裂

面处钢渣骨料在压蒸过程中,其表面存在的大量游离CaO与MgO,水化反应转化为Ca(OH)₂和Mg(OH)₂,试件体积膨胀进而发生砂浆开裂及脱

落,碳化后钢渣表面游离CaO与MgO较少,压蒸后其膨胀率相对较低,体积安定性更好。选用碳化钢渣作为细骨料制备混凝土进行力学性能研究。

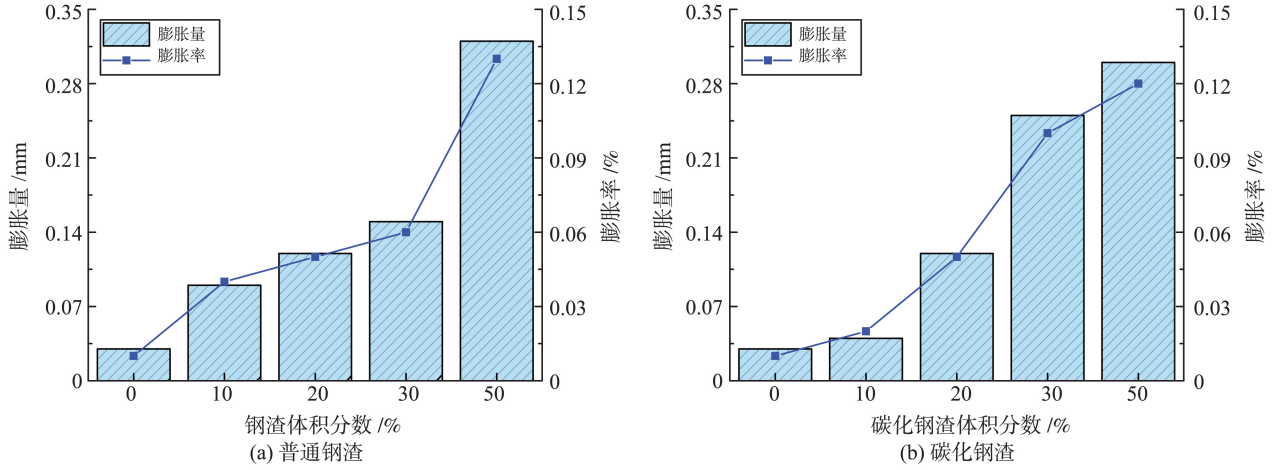


图2 钢渣混凝土体积安定性
Fig.2 Volume stability of steel slag concrete

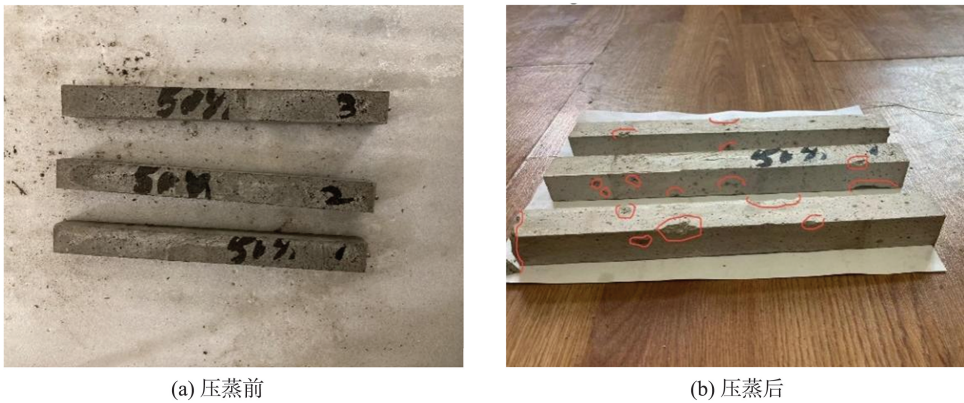


图3 砂浆棒压蒸前后形态
Fig.3 Shape of mortar bar before and after pressure steaming

2.2 碳化钢渣混凝土抗压强度分析

从破坏形态可以发现,CSSFC的完整度更好,如图4所示。随着碳化钢渣细骨料体积分数由10%逐渐提高到30%,立方体抗压强度逐渐增大,当钢渣体积分数为30%时,其抗压强度最大,为52.7 MPa。这是因为,一方面钢渣具有较高的密度,在受力过程中能够提供较高的承载力^[20],另一方面相较于普通河砂,钢渣表面更为粗糙,与水泥基质形成良好的机械咬合作用,混凝土整体性得以增强^[21]。CSSFC-10、CSSFC-20及CSSFC-30组较NC组抗压强度分别提高1.27%、9.55%及11.89%。

2.3 碳化钢渣混凝土劈裂抗拉强度分析

CSSFC劈裂抗拉强度试验结果如图5所示。由图5可以看出,随着碳化钢渣细骨料体积分数由10%增至30%,立方体劈裂抗拉强度逐步提升。特别是当碳化钢渣体积分数达到30%时,其劈裂抗拉强度达到最大,为2.91 MPa。与普通混凝土

相比,CSSFC-10、CSSFC-20和CSSFC-30组的劈裂抗拉强度分别比NC组提高了1.86%、4.46%和8.18%,碳化钢渣细骨料对混凝土增强机理与2.2节相同。

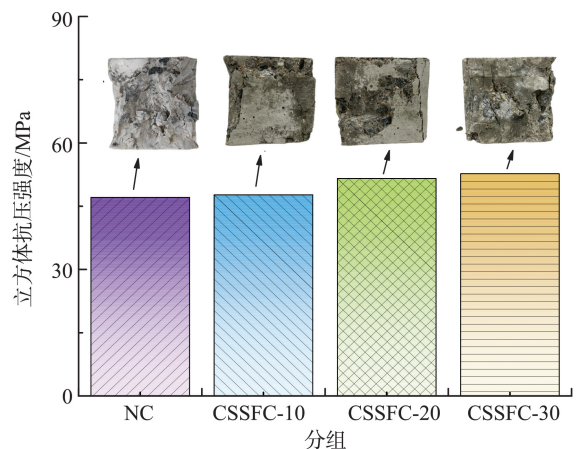


图4 碳化钢渣混凝土立方体抗压强度
Fig.4 Steel carbide slag concrete cube compressive strength

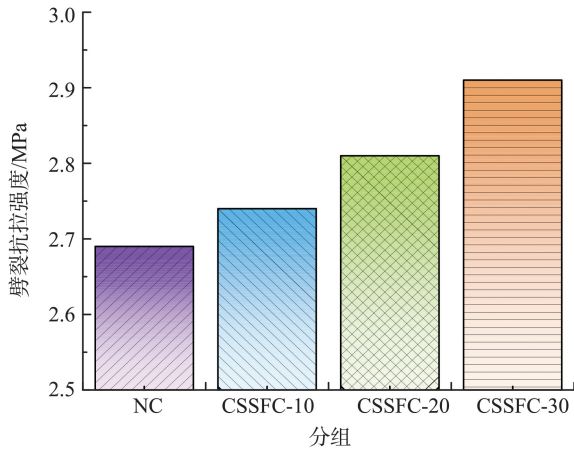


图 5 碳化钢渣细骨料混凝土劈裂抗拉强度

Fig.5 Carbide steel slag concrete splitting tensile strength

2.4 碳化钢渣混凝土应力-应变分析

NC、CSSFC-10、CSSFC-20 及 CSSFC-30 的应力-应变关系曲线如图 6 所示(σ 为应力, ε 为应变)。从图 6 可以观察到,在 $0.5f_c$ (f_c 为混凝土轴心抗压强度)之前,试件产生弹性变形,应力-应变关系近似为直线,不同钢渣体积分数的混凝土上升段斜率存在差异,其中 CSSFC 的斜率明显高于普通混凝土,表明钢渣提高了混凝土的变形模量^[22]。

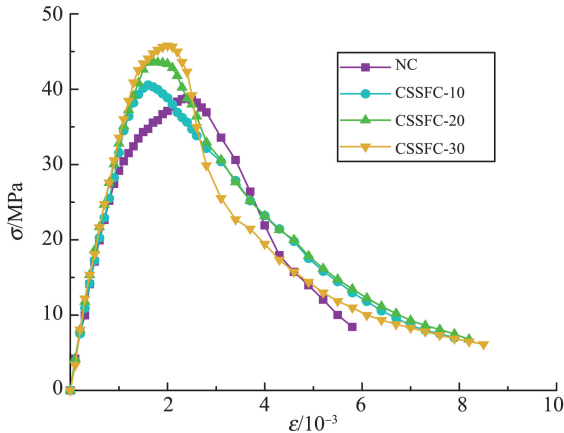


图 6 碳化钢渣细骨料混凝土应力-应变关系曲线

Fig.6 Carbide steel slag fine aggregate concrete stress-strain curve

在 $0.5f_c \sim f_c$, 曲线斜率降低,应变增长速率较应力增长速率更高,不同钢渣体积分数下混凝土的斜率减小速度不同。CSSFC 的峰值应力明显高于普通混凝土,且在 10%~30% 区间随着碳化钢渣细骨料体积分数增加而增大。从图 6 还可以发现,在 $0.5f_c \sim f_c$, CSSFC 的变形能力明显低于普通混凝土,钢渣降低了混凝土的变形能力,使其更快发生脆性破坏^[23]。

在峰值应力后,随着碳化钢渣细骨料体积分数由 10% 增至 30%,应力逐渐减小,曲线进入到下降段,当试件破坏时,钢渣混凝土发出砰爆声,且随着钢渣体积分数的增加声音更大。与普通混凝土相

比,CSSFC 的下降部分更为陡峭,并展现出更加明显的脆性特点。

2.5 立方体抗压与轴心抗压参数分析

NC、CSSFC-10、CSSFC-20 及 CSSFC-30 四组碳化钢渣混凝土峰值应力及弹性模量如表 5 所示。对比发现,普通混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值 f_c/f_{cu} 为 0.76~0.82,与普通混凝土相比,CSSFC 的 f_c/f_{cu} 比值为 0.85~0.87,显示出更高的抗压强度和弹性模量。而且,随着碳化钢渣细骨料体积分数由 10% 递增至 30%,立方体的抗压强度也相应提高,加载板与试件表面的摩擦力形成的环箍作用减弱,轴心抗压强度与立方体抗压强度比值有所提高。

表 5 碳化钢渣细骨料混凝土力学性能参数

Table 5 Mechanical performance parameters of carbonated steel slag fine aggregate concrete

分组	立方体抗压强度/MPa	峰值应力/MPa	弹性模量/GPa	f_c/f_{cu}
NC	47.1	38.8	33.2	0.82
CSSFC-10	47.7	40.6	36.4	0.85
CSSFC-20	51.6	43.7	39.3	0.86
CSSFC-30	52.7	45.8	40.6	0.87

随着碳化钢渣细骨料体积分数由 10% 提高至 30%,试样弹性模量也相应提高,特别是当碳化钢渣体积分数达到 30% 时,CSSFC 的弹性模量达到峰值 40.633 GPa。钢渣骨料相较于天然骨料有更强的刚度,并且表面粗糙多孔,在拌合过程中砂浆进入钢渣表面的孔隙中,增加了骨料与砂浆基质间的机械咬合,在一定程度上使混凝土弹性模量有所提高^[24-25]。

利用回归分析方法,研究了 CSSFC 的轴心抗压强度和弹性模量与立方体抗压强度之间的转换关系,结果为

$$f_c = 1.099f_{cu} - 12.486, \quad R^2 = 0.964, \quad (2)$$

$$E_c = -0.197f_{cu}^2 + 20.778f_{cu} - 507.086, \quad R^2 = 0.919, \quad (3)$$

式中, f_c 为混凝土轴心抗压强度, f_{cu} 为立方体抗压强度, E_c 为弹性模量。

3 碳化钢渣混凝土本构关系

3.1 模型确定

将 CSSFC 应力-应变曲线进行无量纲化处理,如图 7 所示。本构关系模型分为单一公式型和两段式型。文献[26]提出了普通混凝土的两段式本构关系模型,该应力-应变关系模型具有较高的适用性。文献[27]建立的模型表达式为单一方程且方

程参数少,计算相对简便。Sargin 模型^[28]是经典的混凝土单轴受压本构方程,采用一个有理分式表达混凝土应力-应变全曲线。

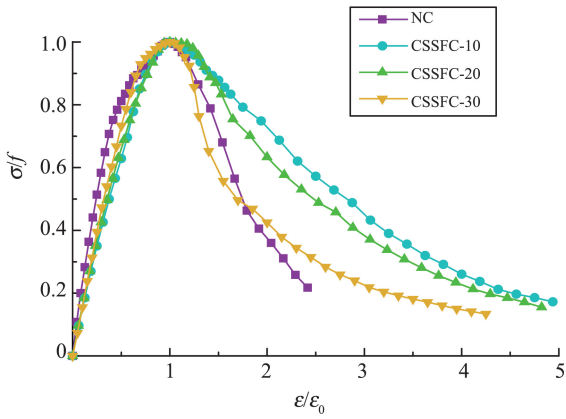
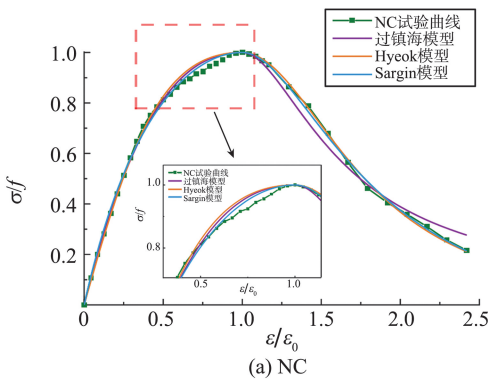


图7 碳化钢渣细骨料混凝土无量纲化应力-应变全曲线
Fig.7 The full stress-strain curve of carbonized steel slag fine aggregate concrete is dimensionless

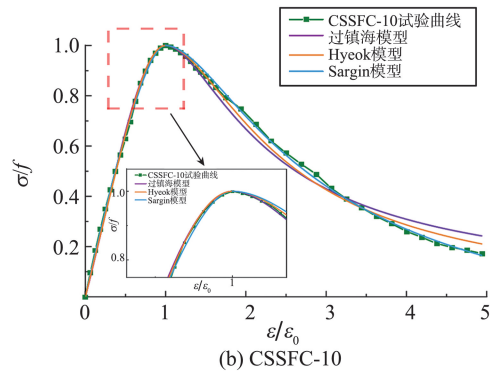
本研究借鉴国内外典型的混凝土本构关系模型拟合分析了 CSSFC 的应力-应变关系试验结果,得到可更好表达碳化钢渣混凝土单轴受压力学行为的本构模型。

文献[26]建立的混凝土本构模型采用分段式方程为

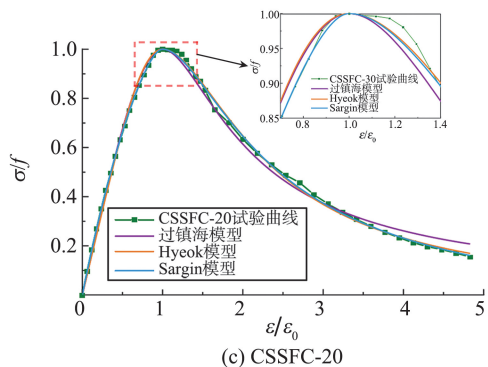
$$y = \begin{cases} ax + (3-2a)x^2 + (a-2)x^3 & 0 < x \leq 1 \\ \frac{x}{b(x-1)^2 + x} & 1 < x \end{cases}, \quad (4)$$



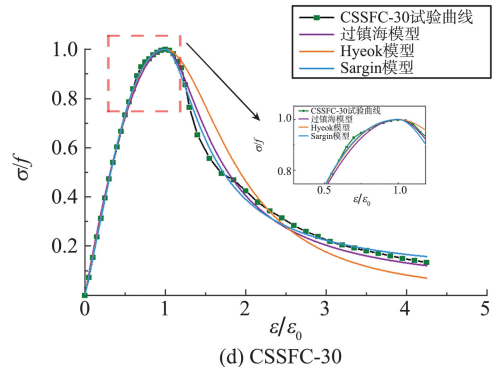
(a) NC



(b) CSSFC-10



(c) CSSFC-20



(d) CSSFC-30

图8 碳化钢渣混凝土拟合曲线

Fig.8 Fitting curve of carbonized steel slag concrete

式中:参数 a 的取值为 $1.5 \leq a \leq 3$; $y = \sigma/f_c$, f_c 为峰值应力, σ 为应力; $x = \varepsilon/\varepsilon_c$, ε_c 为峰值应变, ε 为应变。

Keun-Hyeok Yang 提出的模型表达式为单一方程且方程参数少,计算简便,表达式为

$$y = \frac{(\beta+1)x}{\beta+x^{\beta+1}}, \quad (5)$$

式中 β 为模型参数。

Sargin 模型采用同一个有理分式表达混凝土应力-应变全曲线,适用性强,是典型的混凝土单轴受压本构方程,具体表达为

$$y = \frac{ax + (b-1)x^2}{1 + (a-2)x + bx^2}, \quad (6)$$

式中, $a = E_c \varepsilon_c / \sigma_c$, $b = 0.8 - 0.05 \sigma_c$ 。

各本构关系模型拟合结果如图8所示。本构关系模型表达式为统一式的 Sargin 与 Keun-Hyeok Yang 模型对 CSSFC 应力-应变曲线进行全段拟合,拟合效果较差。改变参数取值,将曲线分为上升段和下降段,分别建立相应的本构模型公式,对其应力-应变曲线进行分段拟合,拟合结果令人满意, Sargin 模型比 Keun-Hyeok Yang 模型拟合效果更好。本构模型表达式采用分段式过镇海模型,分段拟合 CSSFC 应力-应变曲线,上升段与下降段拟合曲线均与试验曲线基本吻合,但上升段参数 a 出现小于 1.5 的结果,不满足该模型中 $1.5 \leq a \leq 3$ 的几何特征。

本研究结合现行规范中混凝土单轴受压本构模型及拟合分析所得结果,通过基于 Sargin 提出的本构关系模型,将曲线分为上升段和下降段分别拟

合,最终得到 CSSFC 本构关系模型公式,拟合曲线与试验曲线如图 9 所示,拟合参数及相关系数如表 6 所示。

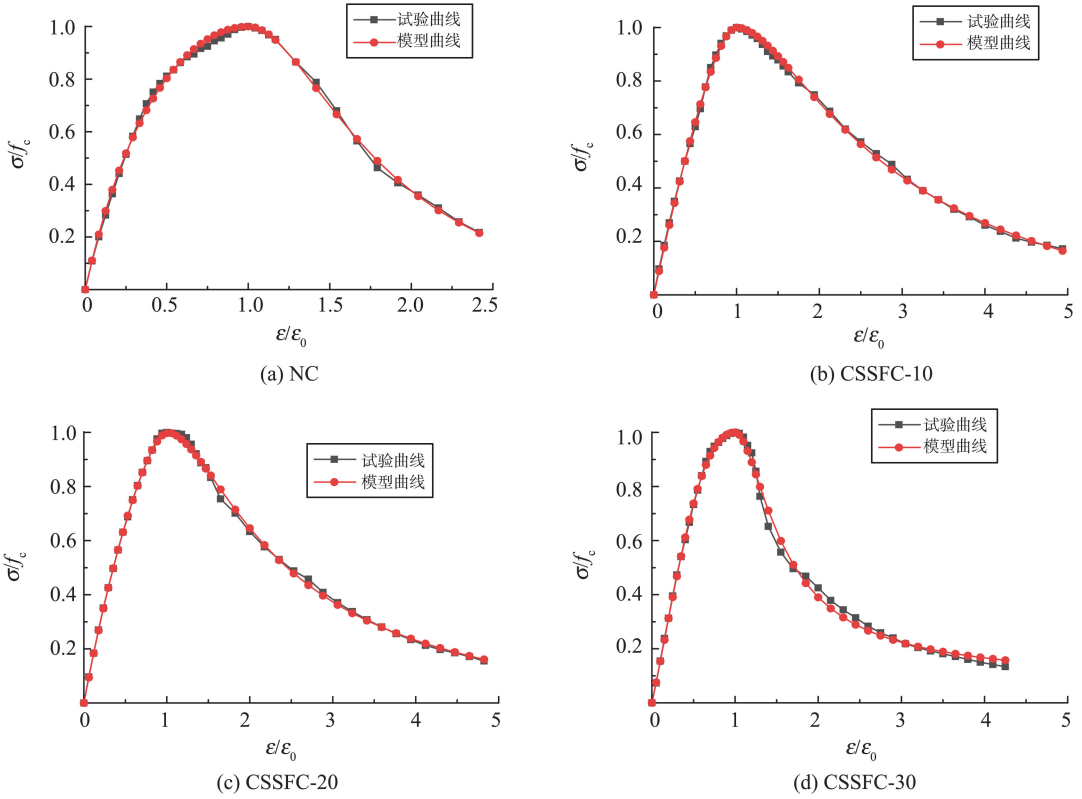


图 9 碳化钢渣混凝土模型曲线

Fig.9 Model curve of carbonized steel slag concrete

表 6 拟合参数及相关系数

Table 6 Fit parameters and correlation coefficients

试件编号	a_1	b_1	R^2	a_2	b_2	R^2
NC	2.806 7	-0.533 2	0.997 4	0.647 2	0.826 1	0.998 6
CSSFC-10	1.442 0	-0.056 7	0.999 2	1.719 0	0.777 3	0.998 7
CSSFC-20	1.643 8	-0.325 4	0.999 9	1.146 1	0.882 9	0.998 5
CSSFC-30	1.486 3	0.833 1	0.999 7	0.191 4	1.064 3	0.994 0

3.2 模型参数分析

(1) 上升段拟合参数

不同碳化钢渣体积分数下混凝土 f_{cu}/f_c 与上升段参数 a_1 及 b_1 间的拟合关系曲线如图 10 所示。由图 10 可以看出,随着碳化钢渣体积分数的变化,其 f_{cu}/f_c 与拟合参数均呈二次函数的关系,其中 f_{cu}/f_c 与上升段参数 a_1 及 b_1 间的拟合相关性系数分别为 0.996 及 0.994,令 $Q=f_{cu}/f_c$,则 Q 与 a_1 及 b_1 间的拟合关系分别为

$$a_1 = 521.602Q^2 - 1212.333Q + 705.852, \quad R^2 = 0.996, \quad (7)$$

$$b_1 = 453.978Q^2 - 1095.240Q + 660.013, \quad R^2 = 0.994. \quad (8)$$

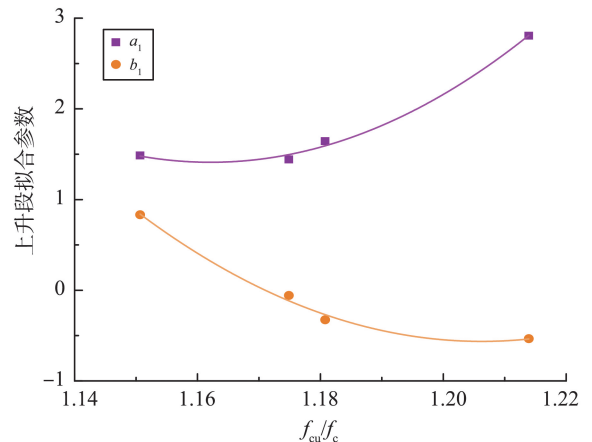


图 10 上升段拟合参数与 f_{cu}/f_c 间关系曲线

Fig.10 The relationship curve between the fitting parameters of the rising segment and f_{cu}/f_c

由表5可知, Q 与碳化钢渣体积分数成反比, 由图10可知, 参数 a_1 随着 Q 的增大而增大, 故参数 a_1 与碳化钢渣体积分数成反比, 同理, 参数 b_1 与碳化钢渣体积分数成正比。

(2) 下降段拟合参数

NC、CSSFC-10、CSSFC-20 及 CSSFC-30 四组碳化钢渣混凝土峰值应力与下降段参数 a_2 及 b_2 间的拟合关系曲线如图11所示。随着碳化钢渣体积分数的变化, 其峰值应力与拟合参数同样呈二次函数的关系, 其中峰值应力与下降段参数 a_2 及 b_2 间的拟合相关性系数分别为 0.930 及 0.999, 式(9)、(10)分别为其拟合关系公式, 即

$$a_2 = -0.099f_c^2 + 8.361f_c - 173.288, \\ R^2 = 0.930, \quad (9)$$

$$b_2 = 0.011f_c^2 - 0.908f_c + 19.287, \\ R^2 = 0.999. \quad (10)$$

将公式(2)分别带入公式(9)和(10)可得下降段拟合参数与立方体抗压强度间的关系为

$$a_2 = -0.120f_{cu}^2 + 6.472f_{cu} - 84.327, \\ b_2 = 0.013f_{cu}^2 - 0.696f_{cu} + 9.665.$$

参数 a_2 随 f_c 的增大先增大后减小, f_c 与碳化钢渣体积分数成正比, 故参数 a_2 与碳化钢渣体积分数成正比; 同理, 参数 b_2 随碳化钢渣体积分数的增大先减小后增大。

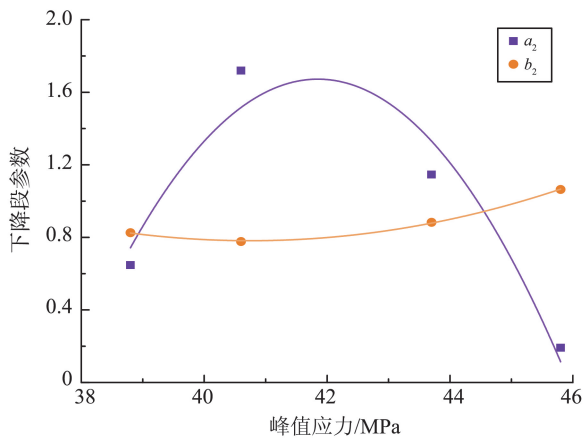


图11 下降段拟合参数与峰值应力间关系曲线

Fig.11 The relationship curve between the fitting parameters of the descending section and the peak stress

4 结论

本文研究了不同体积分数下 CSSFC 的基本力学性能, 通过单轴受压试验得到了 CSSFC 应力-应变曲线、弹性模量等变形特征, 得出了如下主要结论。

(1) 碳化钢渣细骨料对混凝土强度有明显提高作用, 随着碳化钢渣细骨料体积分数由 10% 逐渐提高到 30%, 混凝土立方体抗压强度及劈裂抗拉强度随之增大, 且均高于普通混凝土, 强度提高的主要原因是碳化钢渣骨料与水泥浆体间的界面过渡区致密, 可以更好地将骨料强度传递到混凝土中, 从而提高其抗压强度, 其中 CSSFC-10、CSSFC-20 及 CSSFC-30 组较 NC 组抗压强度分别提高 1.27%、9.55% 及 11.89%。

(2) 碳化钢渣混凝土单轴受压试验中各组棱柱体试件的破坏过程类似, 从应力-应变曲线可以看出, 在加载初期 $0.5f_c$ 之前, 随着碳化钢渣细骨料体积分数由 10% 递增至 30%, 弹性模量也随之增大。钢渣对混凝土轴心抗压强度有一定程度的提高, 但相应的峰值应变减小, 降低了混凝土的变形性能, 使混凝土更早发生脆性破坏。

(3) 随着碳化钢渣细骨料体积分数由 10% 增至 30%, 环箍作用的弱化使 CSSFC 单轴抗压强度和立方体抗压强度之比增大, 从而使 NC 组轴心抗压强度和立方体强度之比达到 0.76~0.82, CSSFC-10、CSSFC-20 及 CSSFC-30 组轴心抗压强度和立方体抗压强度的比值为 0.85~0.87。

(4) 对钢渣混凝土应力-应变曲线进行无量纲化处理, 运用过镇海模型、Keun-Hyeok Yang 模型以及 Sargin 模型进行本构关系拟合, 拟合分析发现, 运用 Sargin 模型分段拟合, 通过改变参数 β 取值, 上升段与下降段均与试验曲线具有较高拟合程度。同时对模型上升段及下降段的拟合参数进行分析, 得出了具有较高关联程度的参数-强度关系公式。

参考文献:

- [1] LI Z, SHEN A, YANG X, et al. A review of steel slag as a substitute for natural aggregate applied to cement concrete [J]. Road Materials and Pavement Design, 2023, 24(2): 537-559.
- [2] VAN H Q, HUYNH T P. A comprehensive investigation on the impacts of steel slag aggregate on characteristics of high-performance concrete incorporating industrial by-products [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 80: 107982.
- [3] 何亮, 詹程阳, 吕松涛, 等. 钢渣沥青混合料应用现状 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 15-33.
HE Liang, ZHAN Chengyang, LÜ Songtao, et al. Application status of steel slag asphalt mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(2):

- 15-33.
- [4] 何懋灿. 加速碳化钢渣骨料的制备及其应用研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2020.
HE Maocan. Accelerate the preparation and application of carbonized steel slag aggregate[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2020.
- [5] SHEN W G, LIU Y, WU M M, et al. Ecological carbonated steel slag pervious concrete prepared as a key material of sponge city [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 120244.
- [6] PANG B, ZHOU Z, HOU P, et al. Autogenous and engineered healing mechanisms of carbonated steel slag aggregate in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 107: 191-202.
- [7] WANG Q, WANG D Q, ZHUANG S Y. The soundness of steel slag with different free CaO and MgO contents [J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 138-146.
- [8] 李斌, 力乙鹏, 王晨霞, 等. 水淬钢渣混凝土应力-应变全曲线试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(8): 163-169.
LI Bin, LI Yipeng, WANG Chenxia, et al. Experimental study on full stress-strain curve of water quenched steel slag concrete[J]. Journal of Building Structure, 2019, 40(8): 163-169.
- [9] 贺希茂, 葛序尧, 张波. 钢渣骨料混凝土基本力学性能研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(3): 37-43.
HE Ximao, GE Xuyao, ZHANG Bo. Research on basic mechanical properties of steel slag aggregate concrete[J]. Building Science, 2023, 39(3): 37-43.
- [10] ANDRADE H D, DE C J M F, COSTA L C B, et al. Mechanical performance and resistance to carbonation of steel slag reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 298: 123910.
- [11] 薛刚, 孙立所, 赵玉杰, 等. 基于宏-细观尺度的钢渣混凝土力学性能研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(1): 180-186.
XUE Gang, SUN Lisuo, ZHAO Yujie, et al. Research on mechanical properties of steel slag concrete based on macro-micro scale[J]. Industrial Construction, 2022, 52(1): 180-186.
- [12] 薛刚, 付乾, 周海峰, 等. 钢渣细骨料混凝土单轴受压应力-应变关系试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(6): 1165-1174.
XUE Gang, FU Qian, ZHOU Haifeng, et al. Experimental study on stress-strain relationship of steel slag fine aggregate concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(6): 1165-1174.
- [13] 张平, 张冰心, 常钧. 钢渣砖碳化性能的研究[J]. 炼钢, 2022, 38(2): 83-88.
ZHANG Ping, ZHANG Bingxin, CHANG Jun. Study on carbonation performance of steel slag brick [J]. Steelmaking, 2022, 38(2): 83-88.
- [14] 曾海马, 刘志超, 王发洲. 碳化养护对大掺量钢渣砂浆的力学性能及显微结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1801-1807.
ZENG Haima, LIU Zhichao, WANG Fazhou. Effect of carbonization curing on mechanical properties and microstructure of high-content steel slag mortar [J]. Journal of the Silicate, 2020, 48(11): 1801-1807.
- [15] 中华人民共和国工业和信息化部, 中国国家标准化管理委员会. 通用硅酸盐水泥: GB 175—2023[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [16] 中国建筑材料联合会. 建设用砂: GB/T 14684—2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [17] 中国建筑材料联合会. 建设用卵石、碎石: GB/T 14685—2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [18] 中国建筑材料联合会. 水泥压蒸安定性试验方法: GB/T 750—1992[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [19] 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.
- [20] ZENG S F, NIU D T, WANG Y, et al. Insight into mechanical properties and microstructure of concrete containing steel slag and ground-granulated blast-furnace slag [J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2023, 12(9): 1169-1180.
- [21] XUE G, FU Q, XU S, et al. Macroscopic mechanical properties and microstructure characteristics of steel slag fine aggregate concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 56: 104742.
- [22] LI S, LIU G, YU Q S. The role of carbonated steel slag on mechanical performance of ultra-high performance concrete containing coarse aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2021, 307: 124903.
- [23] COSTA L C B, NOGUEIRA M A, ANDRADE H D, et al. Mechanical and durability performance of concretes produced with steel slag aggregate and mineral admixtures [J]. Construction and Building Materials, 2022, 318: 126152.
- [24] GONZALEZ-ORTEGA M A, CAVALARO S H P, DE S G R, et al. Durability of concrete with electric arc furnace slag aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2019, 217: 543-556.