

钢渣粗骨料混凝土单轴受压应力-应变试验

王晨霞^{1,2}, 刘 军³, 曹芙波^{1,2}, 仝晓文⁴, 贾永杰⁵

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古自治区高校智能建造与运维工程研究中心, 内蒙古 包头 014010; 3. 广东工商职业技术大学建筑工程学院, 广东 肇庆 526000;

4. 包头市九原区建设工程技术服务中心, 内蒙古 包头 014000;

5. 内蒙古电力建设(集团)有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010091)

摘 要 目的 研究钢渣粗骨料取代率与不同强度等级对钢渣混凝土应力-应变特征、破坏形态、抗压强度、弹性模量、峰值应力及峰值应变的影响。方法 通过对钢渣粗骨料混凝土进行单轴受压试验, 在分析试验结果的基础上, 建立钢渣粗骨料混凝土单轴受压应力-应变关系式, 并结合微观手段分析混凝土内部的破坏形态。结果 钢渣粗骨料混凝土的破坏形态和应力-应变全曲线形状与普通碎石混凝土相似; 钢渣混凝土的棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值高于普通混凝土; 钢渣混凝土峰值应力和峰值应变随取代率的增加而增大, 峰值应力随钢渣混凝土强度的增加而增加, 峰值应变随混凝土强度的增加而减小; 弹性模量受钢渣取代率的影响较小, 随强度等级的增大稍有提高; 泊松比随取代率和强度等级的提高而减小。结论 钢渣粗骨料的性能优于普通混凝土, 用钢渣替代粗骨料可同时满足工程需要和固废再利用的目标。

关键词 钢渣混凝土; 应力-应变全曲线; 微观分析; 破坏形态

中图分类号 TU 528

文献标志码 A

Experimental Investigation on Stress-Strain of Steel-Slag Coarse Aggregate Concrete under Uniaxial Loading

WANG Chenxia^{1,2}, LIU Jun³, CAO Fubo^{1,2}, TONG Xiaowen⁴, JIA Yongjie⁵

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010; 2. Intelligent Construction and Operation Engineering Research Center at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou, China, 014010; 3. School of Architectural Engineering, Guangdong Business and Technology University, Zhaoqing, China, 526000; 4. Construction Engineering Technology Service Center at Baotou Jiuyuan District, Inner Mongolia, China, 014000; 5. Inner Mongolia Electric Power Construction (Group) Company Limited, Hohhot, China, 010091)

收稿日期: 2021-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51868061); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2020MS05071, 2022LHMS05011)

作者简介: 王晨霞(1977—), 女, 副教授, 博士, 主要从事再生混凝土结构及其耐久性方面研究。

Abstract: To investigate the effect of steel slag coarse aggregate replacement rate and different strength grades on stress-strain characteristics, damage morphology, compressive strength, elastic modulus, peak stress and peak strain of steel slag concrete. through the uniaxial compression test of steel slag coarse aggregate concrete, based on the analysis of the test results, the stress-strain relationship of steel slag coarse aggregate concrete under uniaxial compression was established, and the failure mode inside the concrete were analyzed by combining the microscopic means. The failure mode and stress-strain curve shape of steel slag coarse aggregate concrete are similar to those of ordinary gravel concrete. The ratio of prismatic compressive strength to cube compressive strength of steel slag concrete is higher than that of ordinary concrete; the peak stress and peak strain of steel slag concrete increase with the increase of substitution rate, the peak stress increases with the increase of steel slag concrete strength, and the peak value should decrease with the increase of concrete strength. The elastic modulus is less affected by the substitution rate of steel slag, and slightly increases with the increase of strength grade. Poisson's ratio decreases with the increase of substitution rate and strength grade. The performance of steel slag coarse aggregate is better than that of ordinary concrete. Steel slag can replace coarse aggregate and meet the needs of engineering and the goal of solid waste recycling.

Key words: steel slag concrete; stress-strain curve; microscopic analysis; failure mode

钢渣作为钢铁生产过程中产生的废弃物,其年排放量随着钢铁工业的不断发展逐年增加,我国目前现存的钢渣已超过 2.0×10^8 t,但其综合利用率仅为 22% 左右。钢渣的大量堆积,不仅占用土地,还对土壤及周围环境造成了污染^[1]。吴中伟^[2]在进行资源利用研究时提出我国必须走绿色混凝土道路,使钢渣的回收利用得到重视。M. Maslehuddin^[3]发现不同取代率下普通混凝土与钢渣混凝土的力学性能基本相近。N. Ivanka^[4]将普通混凝土与钢渣混凝土的力学性能、体积变化和耐腐蚀性能做对比,发现钢渣混凝土的力学性能和耐久性优于普通混凝土。张丰等^[5]采用碳化养护使得钢渣砂(石)混凝土的体积稳定性得到了明显改善。尚建丽等^[6]采用对比法发现钢渣-水泥石界面过渡区宽度为 $40 \mu\text{m}$,小于碎石-水泥石界面宽度。于峰等^[7]通过补偿收缩钢渣混凝土应力-应变试验研究得出:随着水灰比的减小,补偿收缩钢渣混凝土的峰值应力和峰值应变逐渐增大。朱训国等^[8]研究得出:钢渣混凝土中加入引气剂和高效减水剂能有效地改善新

拌混凝土的和易性,也能够提高硬化混凝土的耐久性。

钢渣混凝土在力学性能和耐久性方面研究较多^[9-10],也有专家学者研究了钢渣在道路上的应用^[11-12],但对钢渣混凝土本构关系的研究较少。基于此,笔者设计了 6 组试件,其中包括 18 个棱柱体试块与 18 个立方体试块,用来研究不同混凝土强度等级与不同钢渣取代率下混凝土破坏特征、应力-应变关系特征等;研究表明:钢渣混凝土峰值应力和峰值应变随取代率的增加而增大;随钢渣混凝土强度等级的增加,峰值应力增幅较大,峰值应变减小。

1 试 验

1.1 原材料

钢渣产自包头钢铁有限责任公司,水泥采用表观密度为 3.01 g/cm^3 的蒙西牌 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥;砂为天然河砂,细度模数为 3.1,含泥量为 1.3%;掺合料选用 I 级粉煤灰,密度为 2.39 g/cm^3 ;外加剂采用减水率为 25% 的 GL-F4 高效引气减水剂;拌和水为普通生活用水;粗骨料的基本性能

见表1。钢渣细骨料的X射线衍射(XRD)图谱如图1所示。通过XRD测得钢渣的化学成分见表2。

表1 粗骨料的基本性能

Table 1 Basic properties of the coarse aggregate

| 粗骨料 类型 | 堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 吸水率/ % | 压碎指标/ % |
|-----------|--|--|-----------|------------|
| 天然 | 1 436 | 2 766 | 0.8 | 12.7 |
| 钢渣 | 1 600 | 3 130 | 2.2 | 5.6 |

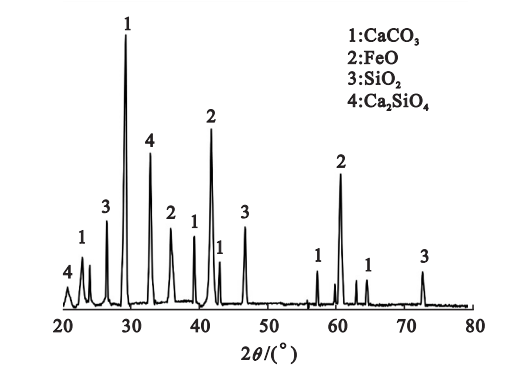


图1 钢渣的XRD谱

Fig.1 XRD pattern of the steel slag

表2 钢渣的化学组成

Table 2 Chemical composition (by mass)

| of the steel slag | | | | | | % |
|-------------------|--------------------------|--|------------|--|---------------------------------------|---|
| w (CaO) | w (SiO ₂) | w (Fe ₂ O ₃) | w (MgO) | w (Al ₂ O ₃) | w (P ₂ O ₅) | |
| 52.7 | 13.2 | 19.5 | 4.6 | 2.32 | 2.13 | |

1.2 混凝土配合比

本试验共设计6组试件,每组包括长×宽×高为150 mm×150 mm×300 mm的棱柱体共18个,用于单轴受压应力-应变试验。边长为100 mm×100 mm×100 mm的立方体共18个,用于抗压强度试验,根据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010),将边长100 mm的立方体试块所得结果乘以0.95的修正系数即得到立方体抗压强度标准值。强度等级以普通混凝土抗压强度设计值为基准,强度等级为C40时粗骨料的取代率为 $r=0、30\%、60\%、100\%$ 。强度等级为C30、C50时,取代率为100%。试验配合比按《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2011)进行,并根据文献[13]做出调整,配合比见表3。

表3 混凝土的配合比

Table 3 Mix ratio of the steel slag concrete

| 编号 | 水胶比 | 各材料体积质量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | | | | | | 外加剂 |
|----------|------|---|--------------|------------|---------------|--------------|------------|-----|
| | | ρ (水泥) | ρ (粉煤灰) | ρ (砂) | ρ (天然碎石) | ρ (钢渣石) | ρ (水) | /% |
| G-40-0 | 0.45 | 337 | 59 | 788 | 1 159 | 0 | 178 | 1.0 |
| G-40-30 | 0.45 | 337 | 59 | 788 | 812 | 382 | 178 | 1.1 |
| G-40-60 | 0.45 | 337 | 59 | 788 | 463 | 766 | 178 | 1.2 |
| G-40-100 | 0.45 | 337 | 59 | 788 | 0 | 1 013 | 178 | 1.3 |
| G-30-100 | 0.50 | 296 | 52 | 811 | 0 | 1 350 | 215 | 1.4 |
| G-50-100 | 0.40 | 380 | 67 | 765 | 0 | 1 280 | 188 | 1.2 |

注:G-40-30中40表示强度等级为C40,30表示钢渣粗骨料掺量为30%,余同。

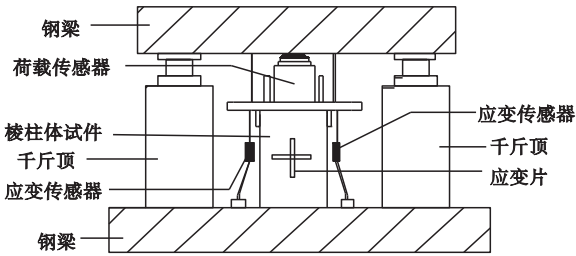
1.3 试验方法

立方体抗压强度试验采用全自动压力试验机进行加载,棱柱体受压试件在成型时的两个侧面中心粘贴2个相互垂直应变片,分别测其纵向应变和横向应变,百分表、荷载传感器和应变片同数据采集器TDS-530相连,实时采集加载过程中荷载及对应的应变和位

移。本试验采用轴心加载方式,棱柱体试件在正式加载前进行3次预压,试验过程中试验机均匀加载,取0.3~0.5 MPa/s,达到极限荷载后,试验机在千斤顶辅助下逐渐卸载,以防混凝土试件因失去承载力而突然崩裂。试验加载装置见图2。



(a)现场加载图



(b)加载装置详图

图2 试验加载图

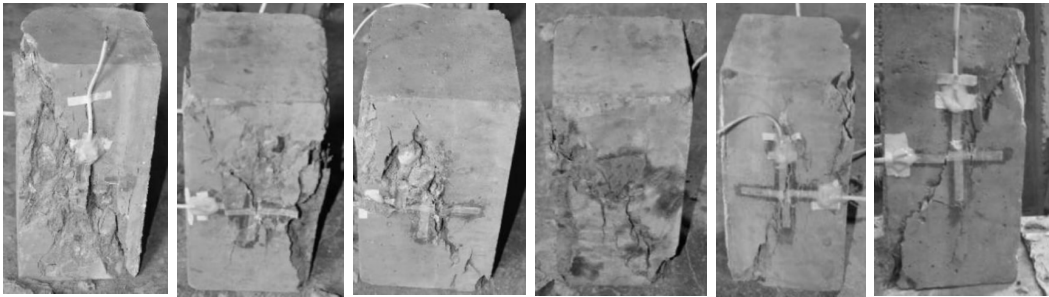
Fig. 2 The test loading diagram

2 试验现象

2.1 试件破坏过程

各试件受压破坏的形态如图3所示。由图可知,钢渣混凝土棱柱体试件在加载初期处于弹性阶段,应变随应力线性增长,试件内

部出现微裂缝;进入弹塑性阶段后,应力继续增加,应变加快。钢渣混凝土与普通混凝土相比,其脆性破坏更加明显,表现为斜剪破坏,斜裂缝与特征承压面的夹角为 $59^{\circ} \sim 75^{\circ}$,大于普通混凝土的对应夹角 $60^{\circ} \sim 64^{\circ}$ 。



(a)G-40-0 (b)G-40-30 (c)G-40-60 (d)G-30-100 (e)G-40-100 (f)G-50-100

图3 试件的破坏形态

Fig. 3 Failure modes of the specimens

随着混凝土强度等级的提高,钢渣混凝土试件的破坏过程更加急促;C50钢渣混凝土试件在达到极限承载力后仍未见明显裂缝,且试件破坏突然,并伴随着很大声响,有碎渣飞溅。从破坏的剖面可以发现,普通碎石混凝土多数表现为粗骨料与水泥石的界面破坏,少数为骨料破坏,这是由于碎石压碎值较低的缘故;而钢渣混凝土则表现为粗骨料的界面过渡区破坏,钢渣石本身破坏极少。

2.2 应力-应变全曲线

不同钢渣取代率下混凝土棱柱体实测应力-应变全曲线如图4所示。由图4可知,不同的钢渣取代率和强度等级对钢渣混凝土曲

线形状的影响大不相同,但均有上升段和下降段,上升段曲线包括弹性阶段和弹塑性阶段。随钢渣取代率的增加,曲线上升段斜率稍有增加,混凝土弹性模量提高较大,在到达棱柱体的峰值应变前,随钢渣取代率的增加,弹性模量有所增大。不同强度等级的钢渣混凝土与普通混凝土应力-应变曲线走势基本相同,但各特征点又有所不同。随强度等级的提高,钢渣混凝土的上升段表现为更明显的线性增长,弹性段更长,弹塑性段缩小,峰值应变随混凝土强度等级的增大而略微减少。随着钢渣混凝土强度等级的提高,混凝土破坏表现为更加明显的脆性破坏。

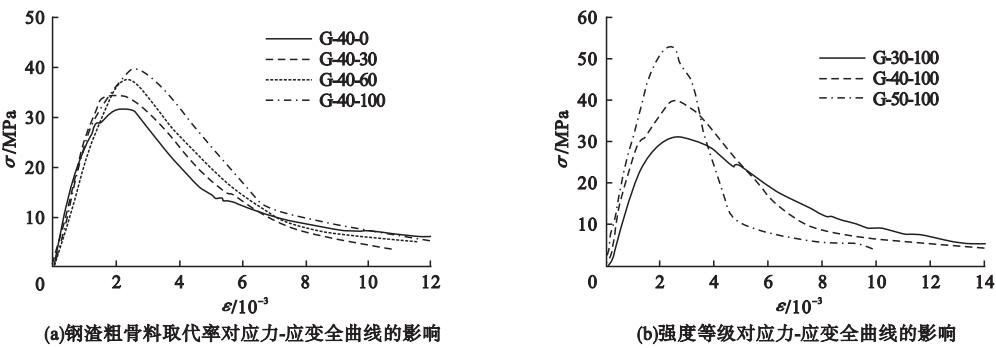


图4 钢渣混凝土的应力-应变全曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of the steel slag concrete

3 试验结果分析

3.1 强度指标

不同取代率和不同强度等级下钢渣粗骨料混凝土的立方体抗压强度与棱柱体轴心抗压强度值(已考虑尺寸效应)如表4所示。

表4 钢渣混凝土立方体强度与棱柱体强度

Table 4 Cube and prism strength of the steel slag concrete

| 试件编号 | 密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 立方体 强度 f_{cu}/MPa | 棱柱体 强度 f_c/MPa | f_c/f_{cu} |
|----------|--|----------------------------------|-------------------------------|--------------|
| G-40-0 | 2 441 | 43.6 | 31.4 | 0.72 |
| G-40-30 | 2 535 | 45.8 | 34.8 | 0.76 |
| G-40-60 | 2 678 | 48.4 | 37.8 | 0.78 |
| G-40-100 | 2 869 | 49.3 | 39.9 | 0.81 |
| G-30-100 | 2 808 | 41.3 | 31.2 | 0.76 |
| G-50-100 | 2 842 | 61.8 | 53.1 | 0.86 |

由表4可知,随着混凝土强度等级和钢渣粗骨料取代率的增加,钢渣混凝土的棱柱体与立方体抗压强度均有所增加,二者的比值也有所增加;随钢渣取代率的增加,钢渣混

凝土棱柱体抗压强度呈增大趋势,出现这种情况跟钢渣骨料的物理性能有关。钢渣粗骨料表面粗糙,能够与水泥砂浆结合良好,形成“锚固”作用;钢渣本身含有与水泥相似的硅酸二钙、硅酸三钙等活性化合物,在后期有二次水化反应,使界面区域的粘结性随钢渣取代率的增加而增大。

3.2 弹性模量

不同钢渣取代率下的弹性模量见图5(a)。钢渣取代率为30%的钢渣混凝土试件弹性模量与普通混凝土相差不大,钢渣取代率为60%的试件弹性模量低于普通混凝土,钢渣全取代普通骨料后,钢渣混凝土弹性模量约为普通混凝土的1.2倍,不同强度等级对弹性模量的影响见图5(b)所示。钢渣混凝土强度等级在C30-C40时,弹性模量增长显著;C40之后增长缓慢,是因为随着强度等级的提高,钢渣混凝土内部密实度增加,内部损伤越少。

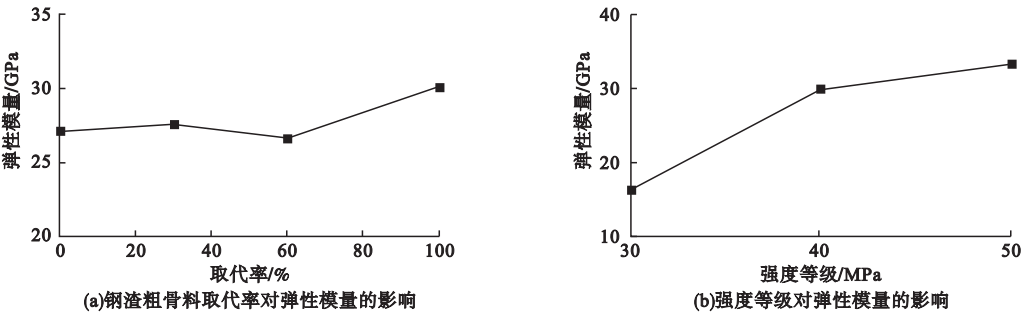


图5 钢渣混凝土的弹性模量

Fig. 5 Elastic modulus of the steel slag concrete

3.3 峰值应力与峰值应变

单轴受压应力-应变曲线最大应力为峰值应力 σ_c , 所对应的应变值为峰值应变 ε_c 。钢渣粗骨料取代率和混凝土强度等级对钢渣混凝土的峰值应力与峰值应变的影响如图 6

所示。由图 6(a)可知,峰值应力随钢渣取代率的增加而增大,当钢渣取代率为 60% 时峰值应力较普通混凝土提高 20.4%;当钢渣取代率大于 60% 时,峰值应力增长渐缓。

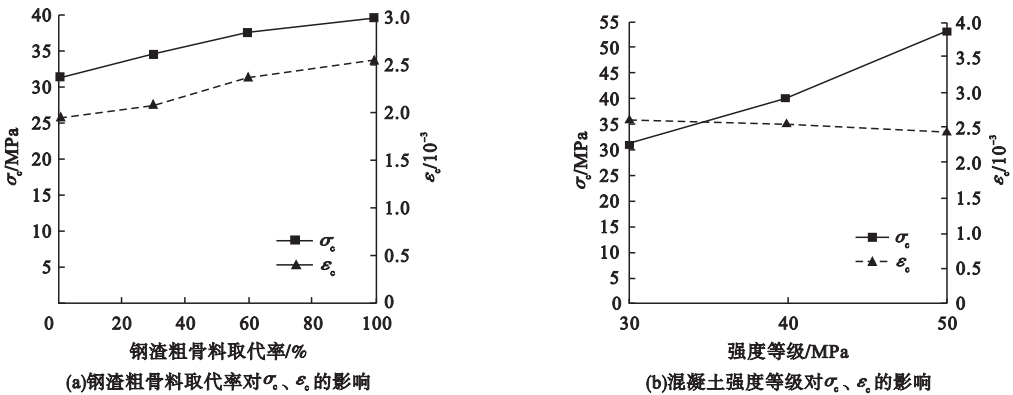


图 6 钢渣混凝土的峰值应力与峰值应变

Fig. 6 Peak stress and peak strain of the steel slag concrete

相比于钢渣粗骨料取代率,混凝土强度等级对钢渣混凝土的峰值应力和峰值应变影响较明显。由图 6(b)可知,其中强度等级 C50 的钢渣取代率为 100% 的混凝土比强度等级 C40 钢渣取代率为 100% 的混凝土的峰值应力提高了 13.2 MPa, 峰值应变降低 0.115×10^{-3} , 主要是因为强度等级的提高会使钢渣混凝土内部结构更加密实, 钢渣粗骨料黏结面更紧密, 弹性更好。

3.4 泊松比

图 7(a) 为相同强度等级的钢渣混凝土与钢渣掺量之间的关系曲线图, 图 7(b) 为强度等级对钢渣混凝土泊松比影响的关系曲线。由图 7 可知, 钢渣混凝土棱柱体试件的泊松比在 0.19 ~ 0.25, 随着钢渣取代率、强度等级的增加, 钢渣混凝土的泊松比逐渐减少, 试件抗变形能力降低。

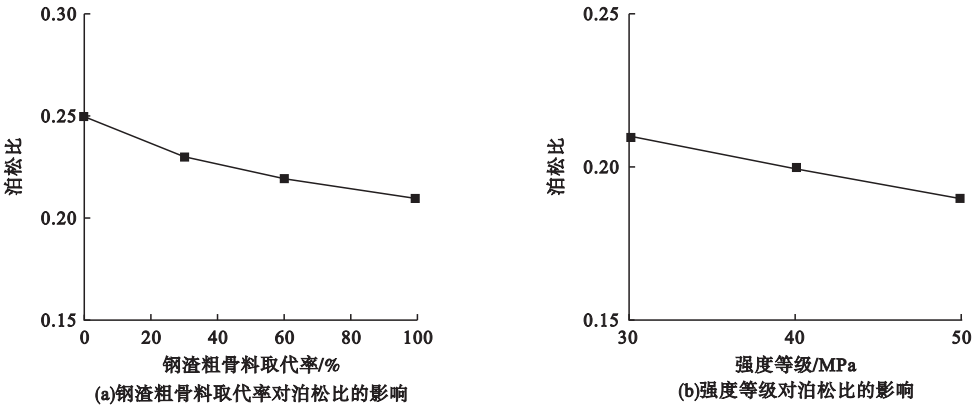


图 7 钢渣粗骨料混凝土的泊松比

Fig. 7 Poisson's ratio of the steel slag concrete

3.5 无量纲曲线方程

采用以 $\varepsilon/\varepsilon_0$ 和 σ/σ_c 为横纵坐标的无

量纲应力-应变全曲线如图 8 所示。

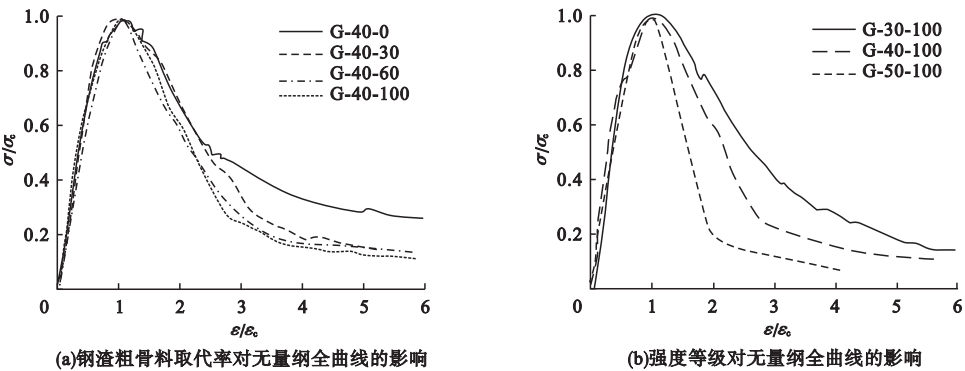


图8 钢渣混凝土无量纲应力-应变全曲线

Fig. 8 Dimensionless complete stress-strain curve of the steel slag concrete

由图8可知,上升段和下降段有明显的区别,采用过镇海教授^[14-15]提出的方程及参考规范^[16]进行拟合:

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

式中: $x = \varepsilon/\varepsilon_0$, $y = \sigma/\sigma_c$, α 、 b 分别为参数。

钢渣混凝土应力应变曲线中参数 a 、 b 的拟合值见表5。参数 a 随着取代率的增加总体呈减小趋势,说明弹性模量总体降低;而随强度等级的提高有增大的趋势。参数 b 随钢渣取代率、强度等级的增大,呈增大趋势,下降段曲线与应变轴面积越小说明钢渣

混凝土脆性越大。图9为两组拟合曲线的对比。

表5 钢渣混凝土应力应变曲线参数 a 、 b 拟合

Table 5 The stress-strain curve fitting parameters of the steel slag concrete

| 试件编号 | a | b |
|----------|-------|-------|
| G-40-0 | 1.828 | 0.946 |
| G-40-30 | 1.683 | 1.151 |
| G-40-60 | 1.326 | 1.575 |
| G-40-100 | 1.516 | 1.651 |
| G-30-100 | 1.232 | 0.970 |
| G-50-100 | 1.578 | 6.226 |

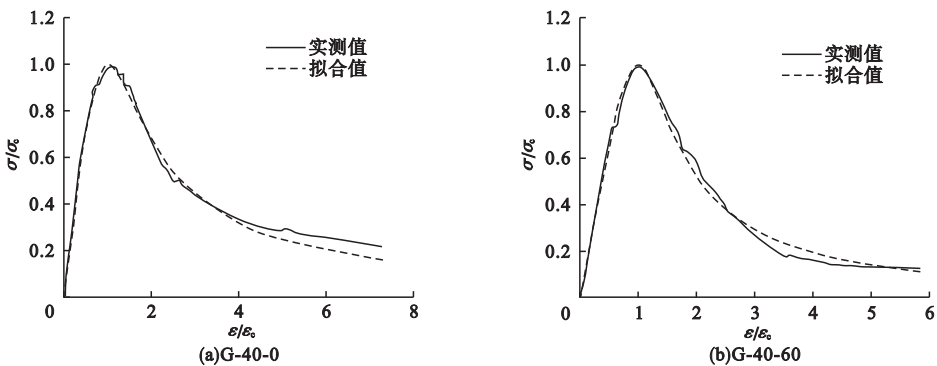


图9 实测值与计算值应力-应变全曲线对比

Fig. 9 The comparison between measured and calculated stress strain curves

4 结 论

(1)随着钢渣粗骨料取代率的增加,钢渣混凝土的峰值应力和峰值应变增加,且峰

值应力的增加幅度大于峰值应变;钢渣混凝土与普通混凝土弹性模量相差不大、泊松比呈下降趋势,取代率为100%钢渣混凝土的弹性模量约为普通混凝土的1.2倍。

(2)混凝土强度等级较钢渣粗骨料取代率对钢渣混凝土应力-应变曲线影响较为明显;随着强度等级的增加,钢渣混凝土的峰值应力增加较大,而峰值应变逐渐减小,混凝土强度为C40、C50钢渣混凝土的弹性模量约为强度为C30的钢渣混凝土弹性模量的1.7和2倍。

参考文献

- [1] 杨素洁,张冰,杨亚东,等.钢渣综合利用现状研究[J].化工矿物与加工,2021,50(4):31-35.
(YANG Shujie, ZHANG Bing, YANG Yadong, et al. Research on the status of comprehensive utilization of steel slag [J]. Industrial minerals & processing, 2021, 50(4): 31-35.)
- [2] 吴中伟.绿色高性能混凝土与科技创新[J].建筑材料学报,1998,1(1):3-9.
(WU Zhongwei. The technological innovation of green high performance concrete [J]. Journal of building materials, 1998, 1(1): 3-9.)
- [3] MASLEHUDDIN M, SHARIF A M, SHAMEEM M, et al. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes [J]. Construction and building materials, 2003(17):105-112.
- [4] IVANKA N, DUBRAVKA B, GORAN V. Utilization of steel slag as an aggregate in concrete [J]. Materials and structures, 2011, 44(9):1565-1575.
- [5] 张丰,莫立武,邓敏.碳化养护对钢渣混凝土强度和体积稳定性的影响[J].硅酸盐学报,2016,44(5):640-646.
(ZHANG Feng, MO Liwu, DENG Min. Effect of carbonation curing on mechanical strength and volume stability of steel slag concrete [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2016, 44(5): 640-646.)
- [6] 尚建丽,邢琳琳.钢渣粗骨料混凝土界面过渡区的研究[J].建筑材料学报,2013,16(2):217-220.
(SHANG Jianli, XING Linlin. Study on interstition zone of steel slag coarse aggregate concrete [J]. Journal of building materials, 2013, 16(2): 217-220.)
- [7] 于峰,王旭良,张扬,等.补偿收缩钢渣混凝土应力-应变关系试验[J].建筑材料学报,2017,20(4):527-534.
(YU Feng, WANG Xuliang, ZHANG Yang, et al. Stress-strain relationship of shrinkage compensating steel-slag concrete [J]. Journal of building materials, 2017, 20(4): 527-534.)
- [8] 朱训国,王利芬,赵双,等.钢渣混凝土抗冻与抗渗性能研究[J].四川建筑科学研究,2019,45(3):106-109.
(ZHU Xunguo, WANG Lifan, ZHAO Shuang, et al. Study on frost resistance and impermeability of steel slag concrete [J]. Sichuan building science, 2019, 45(3): 106-109.)
- [9] 石东升,冯倩,丁晓宇,等.钢渣代碎石混凝土配合性能及力学性能的试验[J].混凝土,2015(5):73-75.
(SHI Dongsheng, FENG Qian, DING Xiaoyu, et al. Experiment of mix proportion and mechanical performance about concrete using steel slag coarse aggregates [J]. Concrete, 2015(5): 73-75.)
- [10] 王强,曹丰泽,于超,等.钢渣骨料对混凝土性能的影响[J].硅酸盐通报,2015,34(4):1004-1010.
(WANG Qiang, CAO Fengze, YU Chao, et al. Influence of steel slag aggregate on the properties of concrete [J]. Bulletin of Chinese ceramic society, 2015, 34(4): 1004-1010.)
- [11] 李伟,王鹤彬,王达,等.转炉钢渣沥青混合料路用性能试验研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(6):1062-1069.
(LI Wei, WANG Hebin, WANG Da, et al. Experimental study on road performance of converter steel slag asphalt mixture [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(6): 1062-1069.)
- [12] 李伟,王海龙,李峰,等.废钢渣与砂土的混合土材料力学特性试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2008(5):794-799.
(LI Wei, WANG Hailong, LI Feng, et al. Test study on the mechanical characteristics of soil mixed with steel slag and sand [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2008, 24(5): 794-799.)
- [13] 廉慧珍,李玉琳.关于混凝土配合比选择方法的讨论:关于当代混凝土配合比要素的选择和配合比计算方法的建议之二[J].混凝土,2009(5):1-4.
(LIAN Huizhen, LI Yulin. Discussion on method for selecting mix proportion of concrete: proposal on selection of factors and method for calculating mix proportion of current concrete [J]. Concrete, 2009(5): 1-4.)
- [14] 过镇海.混凝土的强度与变形:试验基础与本构关系[M].北京:清华大学出版社,1997.
(GUO Zhenhai. Strength and deformation of concrete-test basis and principal structure relationship [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.)
- [15] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土原理和分析[M].北京:清华大学出版社,2003.
(GUO Zhenhai, SHI Xudong. Principles and analysis of reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局.混凝土结构设计规范:GB50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
(Ministry of Construction of the People's Republic of China, State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Code for design of concrete structure: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)