

引用本文: 谢开仲, 刘振威, 盖炳州, 等. 不同岩性的机制砂混凝土本构关系及力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(1): 99-106.
XIE Kai-zhong, LIU Zhen-wei, GE Bing-zhou, et al. Constitutive Relationship and Mechanical Properties of Manufactured Sand Concrete with Different Rocks[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(1): 99-106.

DOI: 10.19815/j.jace.2020.05013

不同岩性的机制砂混凝土本构关系及力学性能

谢开仲^{1,2}, 刘振威¹, 盖炳州¹, 新 赢¹, 朱茂金¹

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004;
2. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要:为研究机制砂混凝土在单轴应力状态下的力学性能, 分别以广西地区石灰岩、卵石、玄武岩 3 种岩性机制砂为细骨料, 以混凝土强度等级为变化参数, 设计并制作了 24 个 150 mm×150 mm×300 mm 标准棱柱体混凝土试件和 24 个 150 mm×150 mm×150 mm 标准立方体混凝土试件, 以河砂混凝土为对比试件, 进行了单轴抗压试验, 获得了试件在单轴受压下的抗压强度和应力-应变全过程曲线, 通过拟合得到了适用于机制砂混凝土的单轴受压本构方程。基于试验数据, 提出了机制砂混凝土的弹性模量计算公式。结果表明: 不同岩性的机制砂混凝土破坏形态大致相同; 机制砂混凝土应力-应变曲线变化趋势与河砂混凝土相似, 在曲线的上升段, 机制砂混凝土与河砂混凝土基本重合, 但在下降段, 机制砂混凝土脆性较大, 曲线比较陡峭; 基于 Sargin 模型拟合得到的机制砂混凝土应力-应变全曲线与试验全曲线吻合较好; 机制砂混凝土的力学性能与不同岩性细骨料的物理特性有关, 随着细度模数的增大或石粉含量的增多, 机制砂混凝土试件峰值应力与峰值应变呈现出先增大后减小的趋势; 当水灰比在 0.3~0.4 之间时, 建议机制砂混凝土换算系数取为 0.77; 卵石机制砂混凝土弹性模量均高于石灰岩和玄武岩机制砂混凝土。

关键词: 机制砂混凝土; 河砂混凝土; 单轴受压; 细度模数; 石粉含量; 弹性模量

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)01-0099-08

Constitutive Relationship and Mechanical Properties of Manufactured Sand Concrete with Different Rocks

XIE Kai-zhong^{1,2}, LIU Zhen-wei¹, GE Bing-zhou¹, XIN Ying¹, ZHU Mao-jin¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China;
2. Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of manufactured sand concrete (MSC) under uniaxial stress, taking three kinds of manufactured sand including limestone sand, pebble sand, basalt sand in Guangxi as fine aggregates, taking the concrete design strength grade as variable parameter, 24 standard prism concrete specimens (150 mm×150 mm×300mm) and 24 cube concrete specimens (150 mm×150 mm×150 mm) were cast. Comparing with the river sand

收稿日期: 2020-05-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51738004); 国家自然科学基金项目(51868007, 51368005, 51878186);

广西科技计划项目(桂科 AD17195096); 四川省科技计划项目(2018GZ0052); 广西大学科学研究基金项目(XBZ100762)

作者简介: 谢开仲(1974-), 男, 广东河源人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: xiekaizhong@163.com.

通信作者: 刘振威(1995-), 男, 河南周口人, 工学硕士研究生, E-mail: gxu_lzw@163.com.

concrete (RSC), the uniaxial compression tests were carried. The compressive strength and stress-strain relation curves were obtained, and the uniaxial compression constitutive equations suitable for MSC were obtained. The formula of elastic modulus of MSC was presented by the test data. The results show that the failure modes of MSC with different lithologies are almost the same. The stress-strain curve of MSC is similar with that of RSC, in the rising stage of the curve, MSC and RSC have basically coincident curve, however, in descending stage, the curve of MSC is much steeper than that of RSC. The stress-strain curve of manufactured sand concrete fitted by Sargin model is in good agreement with the experimental curve. The mechanical properties of manufactured sand concrete are related to the physical properties of fine aggregate with different lithologies. With the increase of fineness modulus or stone powder content, the peak stress and peak strain of manufactured sand concrete show a trend of first increasing and then decreasing. The peak stress and peak strain of manufactured sand concrete show a trend of first increasing and then decreasing. The conversion coefficient of MSC is proposed to be 0.77 when the water cement ratio is 0.3-0.4. The elastic modulus of pebble sand concrete is higher than that of basalt sand concrete and limestone sand concrete.

Key words: manufactured sand concrete; river sand concrete; uniaxial compression; fineness modulus; stone powder content; elastic modulus

0 引言

机制砂混凝土是指将机制砂部分或全部代替天然细骨料所制成的混凝土。由于机制砂是岩石通过机械破碎而制成的筛分粒径小于 4.75 mm 的岩石颗粒,这使得机制砂与河砂相比具有不规则的棱角尖边、较高的石粉含量和较粗糙的表面等不同的特征,因此对混凝土工作性能及力学性能有着不同程度的影响^[1-6]。近几年来,国内外学者对不同材料的混凝土本构关系展开了深入的试验研究,如肖建庄等^[7]和陈宗平等^[8]发现,随着再生粗骨料取代率增加,再生混凝土峰值应力和弹性模量均呈下降趋势,但应力-应变曲线下降段相比于普通混凝土更加陡峭,破坏形式为脆性破坏。赵秋红等^[9]和 Bompa 等^[10]指出橡胶混凝土的峰值应力、峰值应变、弹性模量都随着橡胶含量的增加而降低,并建立了适用于橡胶混凝土的本构模型。叶中豹等^[11]对钢纤维混凝土进行试验研究,发现钢纤维含量的增加使得混凝土的峰值应变与峰值应力都随之提高,并提出了一种与应变和应变率相关函数的本构关系。对于机制砂混凝土方面,陈正发等^[12]指出机制砂混凝土的应力-应变关系呈现非线性表征,并在 Jones-Nelson-Morgan 模型的基础上引入温度系数,建立了机制砂混凝土的单轴受压本构模型;梁冬瑶^[13]以机制砂作为细骨料,对不同石粉含量的再生混凝土进行研究,并结合损伤力学的理论方法,得出机制砂混凝土

土本构方程在各变量下的参数。

目前对不同岩性机制砂混凝土的本构关系和力学性能的研究较少,基于上述分析,本文以机制砂为细骨料,以母岩岩性的机制砂及强度等级为研究变量,与河砂混凝土进行对比分析,通过试验揭示其内在特性,获取各变量下的参数,建立机制砂混凝土应力-应变本构方程,为机制砂在混凝土工程中的应用提供技术指导。

1 试验概况

1.1 原材料性能试验

为了开展机制砂混凝土相关研究,首先将不同机制砂母岩块石经过切割、打磨加工成 70 mm×70 mm×70 mm 抗压试块和 $\phi 50\times 50$ 劈裂试块,根据《公路工程岩石试验规程》(JTG E41—2005)开展岩石试验研究,其母岩的力学性能见表 1,机制砂母岩强度从大到小依次为卵石、玄武岩、石灰岩。

表 1 母岩的力学性能

Tab. 1 Mechanical Properties of Parent Rock		
母岩	抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa
玄武岩	110.8	3.9
卵石	139.2	5.1
石灰岩	105.2	3.8

不同岩性的机制砂母岩经机械破碎分别得到石灰岩机制砂(LS)、卵石机制砂(PS)和玄武岩机制砂(BS),并采用河砂(RS)进行对比,根据《建筑用砂》

(GB/T 14684—2011)对不同细骨料的颗粒级配、表观密度、堆积密度、含泥量及机制砂中石粉含量等性能指标进行了测试,主要性能指标见表 2,细骨料均为Ⅱ区级配,机制砂的表观密度、堆积密度和石粉含量均高于河砂,而细度模数和孔隙率较低。机制砂的表观密度、堆积密度和石粉含量从大到小依次为石灰岩机制砂、卵石机制砂、玄武岩机制砂。

表 2 机制砂与河砂的物理特性

Tab. 2 Physical Properties of Manufactured Sand and River Sand

细骨料 类型	细度 模数	表观密度/ (kg·m ⁻³)	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	空隙 率/%	石粉含 量/%
BS	2.85	2 686.0	1 565.8	41.7	2.55
PS	2.87	2 690.9	1 669.3	38.0	3.75
LS	3.10	2 708.8	1 670.3	38.3	10.80
RS	2.94	2 622.3	1 533.1	41.5	0.20

研究中使用的粗骨料粒径为 4.75~31.5 mm 连续级配的石灰岩碎石,按照《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)的规定对碎石的颗粒级配、表观密度和堆积密度等进行了测试,其物理性能均符合要求。水泥采用的是 P. O42.5 海螺牌普通硅酸盐水泥,经检测其性能指标均达标。试验用的外加剂为聚羧酸高性能减水剂,减水率为 30%,试验用水为自来水。

1.2 试验方法

1.2.1 配合比设计

参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)对不同岩性机制砂混凝土的工作性能进行测试,在强度满足要求的情况下略微调整水灰比与砂率,保证坍落度达到 160~180 mm,得到的机制砂混凝土基准配合比见表 3。

表 3 机制砂混凝土配合比

Tab. 3 Mix Proportions of MSC

混凝土 强度	水灰比	砂率/%	材料用量/(kg·m ⁻³)				
			水	水泥	砂	碎石	减水剂
C40	0.38	42	160	421	748	1 021	4.63
C50	0.31	38	153	494	685	1 118	5.93

1.2.2 试件制作

试验采用 3 种不同母岩岩性的机制砂和河砂作为细骨料,共制作了 48 个混凝土试件,每组共设计了 3 个 150 mm×150 mm×300 mm 标准棱柱体试件和 3 个 150 mm×150 mm×150 mm 标准立方体试件,前者用于测出混凝土应力-应变本构关系,后者为了测出混凝土立方体抗压强度,混凝土试件浇筑 24 h 后脱模,在标准养护室内养护 28 d 后进行

单轴加载试验。

1.2.3 试验加载装置及方法

试件采用由中科院和 SIMENS 公司联合研发的 RMT-201 岩石与混凝土力学试验机进行单轴受压加载,测点布置及加载装置见图 1,2。为了获取试件受力全过程的应力-应变($\sigma-\epsilon$)曲线,试验采用荷载和位移混合控制的加载制度,即试验先采用荷载控制加载到试件预估峰值的 70%,加载速率为 10 kN·s⁻¹;后采用位移控制的加载制度施加竖向荷载直至试件破坏,加载速率为 0.005 mm·s⁻¹。本试验位移的采集选取试件中间 100 mm 的混凝土竖向变形作为测试结果,对试验机自动采集的各试件受力轴向荷载-位移曲线进行相关处理,得到试件的应力-应变全过程曲线。立方体抗压强度根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)采用电液伺服万能试验机进行单轴加载试验。

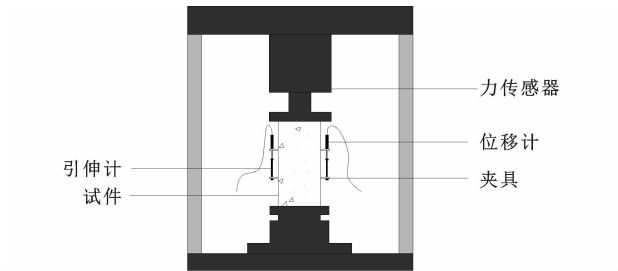


图 1 测点布置

Fig. 1 Layout of Measuring Points



图 2 加载装置

Fig. 2 Loading Device

2 试验结果及分析

2.1 标准龄期棱柱体抗压强度

2.1.1 破坏形态

试验过程中,分别对不同岩性的试件进行细微观察发现,3 种不同岩性的机制砂混凝土试件的破坏形态基本相似,均表现出较大的脆性。在荷载控制阶段,随着压力荷载的不断增大,试件的中间部分

首先由肉眼可见的裂缝逐渐形成 1 条贯穿的主裂缝;在位移控制阶段,峰值荷载前,试件表面逐渐出现裂纹,裂纹沿上下方向延伸,峰值点过后,新的裂纹不断出现,旧的裂纹宽度也逐渐增大,混凝土承载力迅速下降,与河砂混凝土相比,石灰岩机制砂混凝土和玄武岩机制砂混凝土裂缝较多,每个试件破坏表面均有 4~6 条贯穿裂缝,卵石机制砂混凝土裂缝数目与河砂混凝土大致相同,原因可能是由于卵石机制砂的粒径分布均匀,砂中含有适量的石粉颗粒,有效地填充了混凝土孔隙,提高了混凝土的抗压性能,使得裂缝数目相对较少^[14-15]。从破坏后的断面细致观察发现,所有试件的最终破坏界面均出现在粗骨料与水泥砂浆的界面过渡区,粗骨料本身未出现断裂,典型试件的破坏形态见图 3。

2.1.2 应力-应变全曲线

根据 RMT-201 试验机自动采集的各试件受力全过程的轴向荷载-位移数据,通过式(1)可以转化得到各试件的轴向应力-应变(σ - ϵ)全过程曲线,如图 4 所示,其中 BS,PS,LS 和 RS 为细集料类型,40 和 50 分别代表混凝土设计强度,“1”表示第 1 个混凝土试件,依此类推。

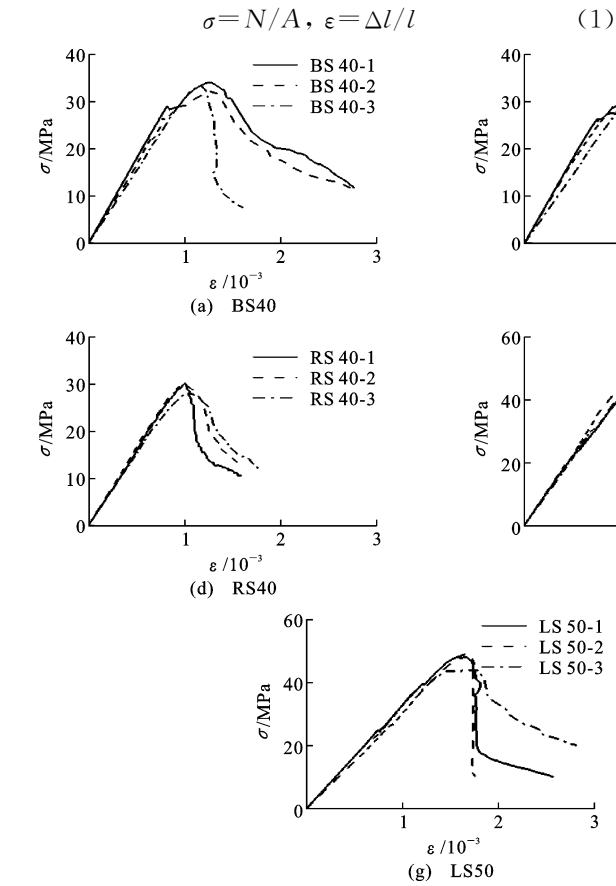


图 4 标准龄期下混凝土试件的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain Curves of Concrete Specimens Under Standard Age

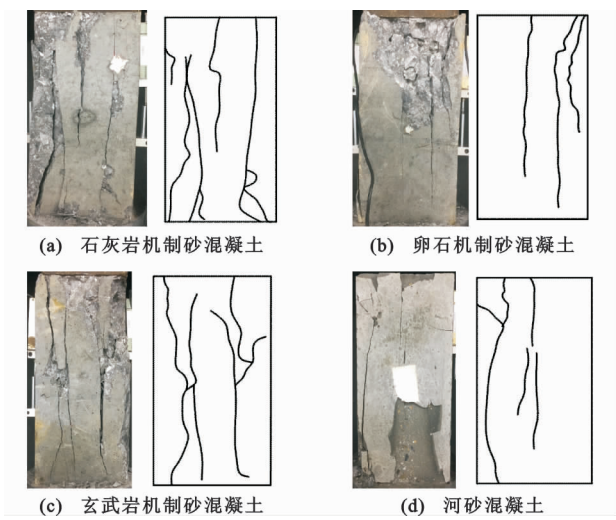


图 3 混凝土试件破坏形态

Fig. 3 Failure Modes of Concrete Specimens

式中: N 为试件的轴向荷载; A 为试件的横截面面积; l 为试件的标距,即位移计上下测点距离; Δl 为试件标距内混凝土的轴向压缩变形值。

从图 4 可以看出,不同岩性机制砂混凝土的应力-应变曲线在相同的设计强度等级下变化过程大致相似,均经历了从弹性、弹塑性、峰值点、下降、下降段拐点到残余段的发展历程,函数图像为明显的

凸曲线,在峰值点后的下降段,机制砂混凝土相比河砂混凝土的脆性大,尤其是当水灰比越小时,机制砂混凝土应力-应变曲线的下降段更加陡峭,其中卵石机制砂混凝土较为明显。

根据混凝土单轴受压下的应力-应变曲线可提取出各混凝土试件的峰值应力和峰值应变等特征值指标,每组试验数据均计算出 3 个试件的平均值,具体数值见表 4。

表 4 标准龄期下试件的峰值应力和峰值应变
Tab. 4 Peak Stress and Peak Strain of Specimens Under Standard Age

试件编号	BS40	PS40	LS40	RS40	BS50	PS50	LS50	RS50
峰值应力/ MPa	33.12	31.30	32.00	28.84	45.76	55.52	47.08	40.03
峰值应变/ 10 ⁻³	1.24	1.41	1.17	1.10	1.13	1.41	1.65	1.10

为了便于分析不同岩性机制砂细集料对其混凝土力学性能的影响,图 5 给出了 3 种不同岩性机制砂和河砂的细度模数和石粉含量(质量分数)。由表 4 和图 5 可见,随着石粉含量的增加或细度模量的增大,混凝土的峰值应力呈现先增大后减小的趋势。这是因为机制砂中的细颗粒在混凝土中具有良好的填充效果^[16-17]。当石粉含量或细度模数超过一定范围时,在相同的水灰比下,机制砂中多余的细颗粒会吸收一部分自由水,使得混凝土中没有足够的浆体来包裹所有的集料,导致混凝土密实性较差,强度降低^[18],特别是在强度等级比较高时,下降趋势较为明显,因此使得卵石机制砂混凝土的峰值应力在 C50 强度等级下比玄武岩机制砂混凝土和石灰岩机制砂混凝土分别大 21.3%和 17.9%。

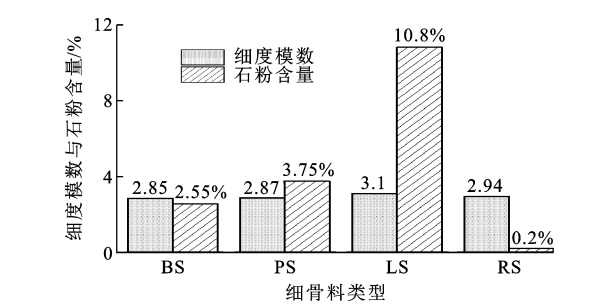


图 5 不同细集料的石粉含量和细度模数
Fig. 5 Stone Powder Content and Fineness Modulus of Different Fine Aggregates

试件达到峰值应力时对应的峰值应变随着石粉含量的增加或细度模数的增大,也表现出先增大后减小的变化规律。当设计强度为 C40 时,卵石机制砂混凝土的峰值应变相比于玄武岩机制砂混凝土和

石灰岩机制砂混凝土分别高 13.7%和 20.5%;当设计强度为 C50 时,石灰岩机制砂混凝土的峰值应变最大。原因是不同强度等级下,由于水灰比的不同,使得石粉参与水化反应后,黏附在粗骨料表面的水泥基有所不同,黏附的水泥基实际上是增加了凝固后混凝土的胶凝体含量,随着胶凝体含量的增加,试件的峰值应变也会有所增大^[19]。

从表 4 和图 5 还可以看出,不同岩性机制砂混凝土试件的峰值应力与峰值应变均大于河砂混凝土试件。这可能是由于机制砂中含有的石粉促进了水泥水化,改善了混凝土的界面结构,使混凝土更加密实,强度得到提高。此外,机制砂中细骨料表面粗糙且多棱角,有效地限制了骨料颗粒间的滑动^[1,6]。

2.1.3 机制砂混凝土本构方程拟合

根据试验实测的应力-应变曲线,在每一组试件中,抽取一个下降段数据较为充足的曲线进行量纲一化分析,8 组试验数据分别取 BS40-3, PS40-1, LS40-2, RS40-3, BS50-2, PS50-2, LS50-3, RS50-2 对应的数值,将试验测得的应力-应变曲线进行归一化处理,采用多种本构方程拟合量纲一化曲线,利用最小二乘法选取最佳的机制砂混凝土拟合本构模型,本次试验所选模型基于 Sargin 提出的普通混凝土单轴受压本构方程[式(2)]^[20],为了验证本构方程的适用性,分别对不同岩性机制砂混凝土和河砂混凝土应力-应变曲线进行拟合(图 6)并与试验曲线对比。

$$\frac{\sigma}{\sigma_c} = \left[a_1 \frac{\epsilon}{\epsilon_c} + (a_2 - 1) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c} \right)^2 \right] / \left[1 + (a_1 - 2) \frac{\epsilon}{\epsilon_c} + a_2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c} \right)^2 \right] \quad 0 \leq \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \leq 1$$
$$\frac{\sigma}{\sigma_c} = \left[b_1 \frac{\epsilon}{\epsilon_c} + (b_2 - 1) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c} \right)^2 \right] / \left[1 + (b_1 - 2) \frac{\epsilon}{\epsilon_c} + b_2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c} \right)^2 \right] \quad \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \geq 1$$

(2)

式中: σ_c, ϵ_c 分别为峰值应力与峰值应变; a_1, a_2 和 b_1, b_2 分别为控制上升段和下降段的方程参数。

由图 6 可以看出,当 $a_1 = 1.15, a_2 = 0.51, b_1 = -0.19, b_2 = 1.23$ 时,拟合曲线与试验曲线的均值基本重合,这表明由式(2)所描述的全曲线方程可以作为机制砂混凝土单轴受压本构模型,适用于机制砂混凝土结构非线性分析。

2.2 标准龄期立方体抗压强度

2.2.1 破坏特征

随着压力荷载的不断增大,混凝土试件沿高度方向中央部位表面出现裂缝并逐渐变宽,然后裂缝

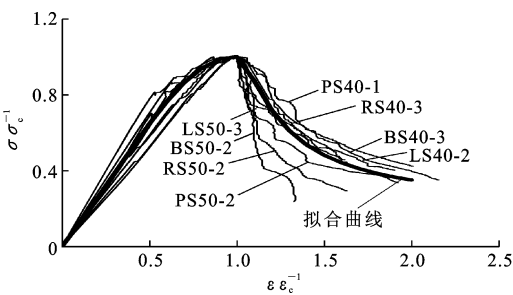


图6 拟合的应力-应变曲线与试验曲线

Fig. 6 Fitting Stress-strain Curve and Test Curves

往上下方向延伸,直到试件被压破坏,同时混凝土外鼓,裂缝主要集中在试件四角,试件的破坏面与竖荷载方向大致呈 45°角,最终的破坏形态呈正倒相接的四角锥形。

2.2.1 试验结果

混凝土单轴受压试验结果见表 5,各类型的混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 均取其 3 个试件的平均值,其中棱柱体抗压强度 f_c 取平均峰值应力。

表 5 标准龄期下棱柱体试件和立方体试件抗压强度的对比

Tab. 5 Compressive Strength Comparison Between Prism Specimens and Cube Specimens Under Standard Age								
试件编号	BS40	PS40	LS40	RS40	BS50	PS50	LS50	RS50
f_c /MPa	33.12	31.30	32.00	28.84	45.76	55.52	47.08	40.03
f_{cu} /MPa	43.30	43.40	43.20	42.20	59.09	67.71	60.00	50.90
f_c/f_{cu}	0.76	0.72	0.74	0.68	0.77	0.82	0.78	0.79

由表 5 可知,在相同强度等级下,机制砂混凝土抗压强度均高于河砂混凝土,特别是当设计强度为 C50 时,石灰岩机制砂混凝土和卵石机制砂混凝土的立方体抗压强度比河砂混凝土分别高 16% 和 33%。原因是因为机制砂是由机械破碎得到,使得机制砂骨料表面织构凹凸、棱角分明,改善了砂与集料之间的界面,增强了界面之间的咬合力,使其与水泥之间具有较好的黏结性;同时,机制砂相比河砂中含有更多的石粉,石粉可以填充骨料之间的孔隙,使得混凝土变密实,强度得到提高^[21-22]。

当设计强度为 C40 时,3 种不同岩性的机制砂混凝土抗压强度基本相同。当设计强度为 C50 时,卵石机制砂混凝土的立方体抗压强度比石灰岩机制砂混凝土和玄武岩机制砂混凝土分别高 12.9% 和 14.5%。这可能是由于卵石母岩的抗压强度较大,并且卵石机制砂中的石粉含量适量,能有效填充骨料之间的孔隙,增强了砂浆的流动性,提高了混凝土的和易性能,使混凝土的孔隙结构得到改善,混凝土更加密实^[23-25]。

将轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值定义

为混凝土的换算系数,根据试验数据可以计算出不同岩性机制砂混凝土的换算系数,见表 5。由表 5 可知:不同岩性机制砂混凝土换算系数在 0.72~0.82 之间,且平均值为 0.767,变异系数为 0.04,河砂混凝土换算系数为 0.74,因此当水灰比在 0.3~0.4 之间时,建议机制砂混凝土换算系数取为 0.77。

2.3 弹性模量

试验采取应力-应变全曲线上原点及 0.40 f_c 点之间的割线模量作为混凝土的弹性模量值,其中 f_c 为棱柱体构件抗压强度;不同岩性机制砂混凝土试件弹性模量见图 7。

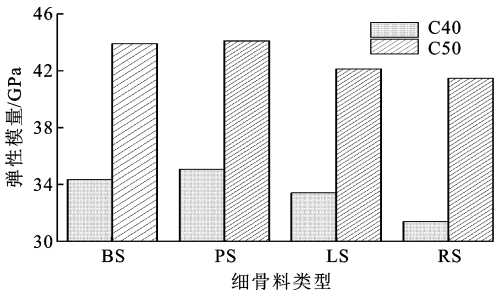


图7 混凝土试件的弹性模量

Fig. 7 Elastic Modulus of Concrete Specimens

由图 7 可以看出:机制砂混凝土的弹性模量均大于河砂混凝土的弹性模量,最大差值比河砂混凝土高 11.7%。不同岩性机制砂混凝土弹性模量曲线呈向下开口,当设计强度为 C40 时,PS 混凝土弹性模量比 BS 混凝土和 LS 混凝土分别大 2.1% 和 5.0%。机制砂混凝土的弹性模量与强度有关,一般而言,混凝土等级越高,弹性模量越大^[26],正如前面分析所述,由于机制砂的颗粒形状、棱角凹凸以及石粉含量影响着混凝土的抗压强度,从而影响着混凝土的弹性模量。

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的弹性模量计算式,对机制砂混凝土试验数据进行拟合,得到的拟合表达式为

$$E_c = 10^5 / (0.989 + \frac{82.675}{f_{cu}})$$

(3)

式中: E_c 为弹性模量。

弹性模量实测值与根据式(3)计算出的不同岩性机制砂混凝土弹性模量计算值见表 6,其比值的平均值为 1.001 2,变异系数为 0.048 3,说明式(3)能够较好地表达机制砂混凝土的弹性模量随立方体抗压强度的变化趋势。

3 结 语

(1)不同岩性机制砂混凝土的破坏形态基本相

表 6 弹性模量实测值与式(3)得到的弹性模量计算值

Tab.6 Measured Value of Elastic Modulus and Theoretical Value of Elastic Modulus Calculated by Eq. (3)

试件编号	BS40	PS40	LS40	RS40	BS50	PS50	LS50	RS50
E_t/GPa	34.34	35.06	33.41	31.39	43.88	44.08	42.1	41.45
E_c/GPa	34.50	34.55	34.45	33.92	41.87	45.25	42.25	38.27
E_c/E_t	1.004	0.985	1.031	1.080	0.954	1.026	1.003	0.923

注: E_t 为弹性模量实测值。

似,与河砂混凝土相比,卵石和玄武岩机制砂混凝土裂缝数目较多,石灰岩机制砂混凝土裂缝数目与河砂混凝土大致相同。

(2)机制砂混凝土应力-应变曲线变化趋势与河砂混凝土相似,在曲线的上升段,机制砂混凝土与河砂混凝土基本重合,但在下降段,机制砂混凝土脆性较大,曲线比较陡峭,基于 Sargin 模型拟合得到的机制砂混凝土应力-应变全曲线与试验全曲线吻合较好。

(3)不同岩性机制砂混凝土力学性能的差异与细骨料的细度模数和石粉含量有关,随着细度模数或石粉含量的增多,机制砂混凝土试件峰值应力与峰值应变呈现出先增大后减小的趋势,不同岩性的机制砂混凝土试件其峰值应力与峰值应变均大于河砂混凝土。

(4)基于机制砂混凝土立方体抗压强度试验和轴心抗压强度试验的数据统计分析,当水灰比在 0.3~0.4 之间时,建议广西山区机制砂混凝土的换算系数取为 0.77。

(5)卵石机制砂混凝土弹性模量高于石灰岩和玄武岩机制砂混凝土,并且机制砂混凝土的弹性模量大于河砂混凝土,基于试验数据,提出了机制砂混凝土弹性模量的计算表达式,计算值与实测值误差较小,能够较为准确地表达机制砂混凝土弹性模量随立方体抗压强度的变化规律。

参考文献:

References:

[1] SHEN W G,LIU Y,WANG Z W,et al. Influence of Manufactured Sand's Characteristics on Its Concrete Performance[J]. Construction and Building Materials, 2018,172:574-583.

[2] MUNDRA S,SINDHI P R,CHANDWANI V,et al. Crushed Rock Sand — An Economical and Ecological Alternative to Natural Sand to Optimize Concrete Mix [J]. Perspectives in Science,2016,8:345-347.

[3] YANG R,YU R,SHUI Z H,et al. The Physical and Chemical Impact of Manufactured Sand as a Partial

Replacement Material in Ultra-high Performance Concrete (UHPC)[J]. Cement and Concrete Composites, 2019,99:203-213.

[4] 芮捷,刘唐志,王兵,等. 机制砂级配对高强混凝土性能的影响研究[J]. 中外公路,2014,34(1):298-300.

RUI Jie,LIU Tang-zhi,WANG Bing,et al. Study on the Influence of Gradation of Manufactured Sand on the Performance of High Strength Concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway,2014,34(1):298-300.

[5] 李晟,董城,郑祖恩,等. 机制砂在湘西山区公路工程中的应用[J]. 公路工程,2016,41(3):132-134,146.

LI Sheng,DONG Cheng,ZHENG Zu-en,et al. Application of Manufactured Sand in Highway Engineering in Xiangxi Mountainous Area[J]. Highway Engineering,2016,41(3):132-134,146.

[6] XIE K Z,BAI M Y,QING Z G,et al. Study on Durability of Manufactured Sand Based on Stone Powder Content[J]. Science of Advanced Materials,2018,10(11):1608-1614.

[7] 肖建庄,杜江涛. 不同再生粗集料混凝土单轴受压应力-应变全曲线[J]. 建筑材料学报,2008,11(1):111-115.

XIAO Jian-zhuang,DU Jiang-tao. Complete Stress-strain Curve of Concrete with Different Recycled Coarse Aggregates Under Uniaxial Compression[J]. Journal of Building Materials,2008,11(1):111-115.

[8] 陈宗平,徐金俊,郑华海,等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力-应变本构关系[J]. 建筑材料学报,2013,16(1):24-32.

CHEN Zong-ping,XU Jin-jun,ZHENG Hua-hai,et al. Basic Mechanical Properties Test and Stress-strain Constitutive Relations of Recycled Coarse Aggregate Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2013,16(1):24-32.

[9] 赵秋红,王菲,朱涵. 结构用橡胶集料混凝土受压全曲线试验及其本构模型[J]. 复合材料学报,2018,35(8):2222-2234.

ZHAO Qiu-hong,WANG Fei,ZHU Han. Compression Test on Curves and Constitutive Model of Crumb Rubber Concrete for Structural Purposes [J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2018,35(8):2222-2234.

[10] BOMPA D V,ELGHAZOULI A Y,XU B,et al. Experimental Assessment and Constitutive Modelling of Rubberised Concrete Materials[J]. Construction and Building Materials,2017,137:246-260.

- [11] 叶中豹,李永池,赵 凯,等.一种新形式的钢纤维混凝土冲击动态本构关系及材料参数的确定[J].爆炸与冲击,2018,38(2):266-270.
YE Zhong-bao,LI Yong-chi,ZHAO Kai,et al. A New Impact Dynamic Constitutive Relation of Steel Fiber Reinforced Concrete and the Determination of Material Parameters[J]. Explosion and Shock Waves,2018,38(2):266-270.
- [12] 陈正发,秦彦龙,刘桂凤,等.高温后机制砂混凝土的本构关系试验研究[J].混凝土,2013(12):72-74,86.
CHEN Zheng-fa,QIN Yan-long,LIU Gui-feng,et al. Experimental Study on Constitutive Relation of Concrete with Manufactured-sand After High Temperatures[J]. Concrete,2013(12):72-74,86.
- [13] 梁冬瑶.含石粉机制砂再生混凝土受压性能研究及水化机理分析[D].南宁:广西大学,2017.
LIANG Dong-yao. Compressive Performance and Hydration Mechanism of Concrete Made with Recycled Coarse Aggregate and Manufactured Sand Incorporating Stone Powder[D]. Nanning:Guangxi University,2017.
- [14] BONAVETTI V L,IRASSAR E F. The Effect of Stone Dust Content in Sand[J]. Cement and Concrete Research,1994,24(3):580-590.
- [15] SABIH G,TAREFDER R A,JAMIL S M. Optimization of Gradation and Fineness Modulus of Naturally Fine Sands for Improved Performance as Fine Aggregate in Concrete[J]. Procedia Engineering,2016,145:66-73.
- [16] LI H J,HUANG F L,CHENG G Z,et al. Effect of Granite Dust on Mechanical and Some Durability Properties of Manufactured Sand Concrete[J]. Construction and Building Materials,2016,109:41-46.
- [17] 吴永根,李文哲,韩 照,等.砂细度模数对道面混凝土性能的影响[J].空军工程大学学报:自然科学版,2013,14(4):5-8.
WU Yong-gen,LI Wen-zhe,HAN Zhao,et al. Effect of Sand Fineness Modulus on Performance of Pavement Concrete[J]. Journal of Air Force Engineering University:Natural Science Edition,2013,14(4):5-8.
- [18] CELIKT T,MARAR K. Effects of Crushed Stone Dust on Some Properties of Concrete[J]. Cement and Concrete Research,1996,26(7):1121-1130.
- [19] 唐凯靖,刘来宝,周 应.岩性对机制砂特性及其混凝土性能的影响[J].混凝土,2011(12):62-63,66.
TANG Kai-jing,LIU Lai-bao,ZHOU Ying. Effects of Lithology on Properties of Manufactured Sand and the Performance of the Concrete with Manufactured Sand [J]. Concrete,2011(12):62-63,66.
- [20] 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 Zhen-hai,SHI Xu-dong. Reinforced Concrete Theory and Analyses[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2003.
- [21] YANG H F,LIANG D Y,DENG Z G,et al. Effect of Limestone Powder in Manufactured Sand on the Hydration Products and Microstructure of Recycled Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials,2018,188:1045-1049.
- [22] LI B X,KE G J,ZHOU M K. Influence of Manufactured Sand Characteristics on Strength and Abrasion Resistance of Pavement Cement Concrete[J]. Construction and Building Materials,2011,25(10):3849-3853.
- [23] AN J,KIM S,NAM B. Effect of Aggregate Mineralogy and Concrete Microstructure on Thermal Expansion and Strength Properties of Concrete[J]. Applied Science,2017,7(12):1307.
- [24] GUPTA L K,VYAS A K. Impact on Mechanical Properties of Cement Sand Mortar Containing Waste Granite Powder[J]. Construction and Building Materials,2018,191:155-164.
- [25] ZHOU M K,CAI J W,WANG J L,et al. Research on Properties of Concrete Prepared with Artificial Sand Containing Stone Powder at High Content[J]. Key Engineering Materials,2006,302:263-268.
- [26] 李北星,周明凯,田建平,等.石粉与粉煤灰对 C60 机制砂高性能混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2006,9(4):381-387.
LI Bei-xing,ZHOU Ming-kai,TIAN Jian-ping,et al. Effect of Stone Dust and Fly Ash on Properties of C60 High Performance Concrete Containing Manufactured Sand[J]. Journal of Building Materials,2006,9(4):381-387.