

# 不同替代率下玄武岩机制砂混凝土性能影响试验研究

Experimental study on the influence of manufactured sand from basalt on concrete performance at different replacement rates

汪丽娟<sup>1</sup>, 乔宏霞<sup>2</sup>, 刘志超<sup>2</sup>, 宋周义<sup>1</sup>, 孙呈鹏<sup>1</sup>, 施进儒<sup>1</sup>

(1. 甘肃建投矿业有限公司, 甘肃 兰州 730046; 2. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**为了研究玄武岩机制砂替代天然砂对高强度混凝土性能的影响,本试验对玄武岩机制砂设置六种不同的替代率(0%、20%、40%、60%、80%、100%),通过对不同替代率混凝土抗压强度、超声波声速和收缩应变进行试验,研究不同的玄武岩机制砂的替代率对高强度混凝土性能的影响。对JZ40收缩应变随龄期的变化数据进行多项式拟合分析,研究混合砂混凝土收缩应变随龄期的变化规律。试验结果表明:玄武岩机制砂替代天然砂作为细骨料会导致混凝土7 d、28 d、56 d抗压强度略微降低,超声波声速作为评价混合砂混凝土密实度的指标时,应该结合更多的影响因素。当替代率小于40%时,机制砂的掺入有利于降低混凝土的收缩变形,四次函数拟合能够较好的反应混凝土的收缩应变随龄期的变化规律。

**关键词:**机制砂; 替代率; 抗压强度; 收缩应变; 超声波声速

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2021)06-0054-05

**Abstract:** In order to study the influence of replacing natural sand with manufactured sand (M-sand) from basalt on the performance of high-strength concrete, six replacement rates (0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100%) are pre-set to test the concrete compressive strength, ultrasonic sound velocity and compression strain at each of these rates and study the influence of different replacement rates on the performance of high-strength concrete. The variation of shrinkage strain over age of the mixed-sand concrete is studied through polynomial fitting analysis on the variation data of JZ40 shrinkage strain over age. The test results show that the M-sand replacing natural sand as fine aggregate can lead to a slight reduction in the 7 d, 28 d and 56 d compressive strength of the concrete, and when ultrasonic sound velocity is used as an indicator of the compaction of the mixed-sand concrete, more influence factors should be considered. When the replacement rate is less than 40%, the use of M-sand is beneficial to reducing shrinkage of concrete, and quartic function fitting can better reflect the variation of shrinkage strain over age of concrete.

**Key words:** manufactured sand; replacement rate; compressive strength; shrinkage strain; supersonic sound velocity

## 1 前言

机制砂是指通过机械设备破碎和加工,达到与天然砂相同粒径范围的人工砂。天然砂存量匮乏,并且在大型土木工程建设项目中质量也难以满足工程需求,机制砂的发展逐步替代天然砂,使建筑业朝着更加环保的方向发展。在天然砂中粒径小于0.075 mm的颗粒被称为泥粉,而在机制砂中同样大小的粒径颗粒叫做石粉。泥粉只会阻碍水泥的水化过程,所以在国标 GB/T 14684—2001《建筑用砂》中

严格限制了天然砂中泥粉的含量,机制砂中含有一定量的石粉会提高混凝土的性能<sup>[1]</sup>。

在机制砂代替天然砂的发展进程中,研究者们发现机制砂的特性对混凝土的性能有一定的影响,机制砂最主要的特性可以总结为石粉含量、颗粒粒形和细度模数。潘祖伟<sup>[2]</sup>总结了机制砂中的石粉对混凝土强度产生影响的四个方面,即促进水泥的水化过程,填充骨料的孔隙,改变混凝土需水量和胶凝材料组成的变化。机制砂的生产工艺决定了在生产机制砂的过程中会产生15%左右的石粉,同时国际上对机制砂中石粉含量的最高限值也有所不同。经过试验研究表明,机制砂中石粉的最佳含量随着不同强度等级的混凝土和不同的混凝土性能而变化,例如就抗压强度而言,低强度等级的机制砂混凝土的最佳石粉含量介于10%~15%,C60或者C80

[作者简介] 汪丽娟,女,工程师,研究方向绿色建筑材料。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51168031);西部盐渍土地区基于硫酸盐腐蚀的混凝土耐久性寿命预测研究

[引用格式] 汪丽娟,乔宏霞,刘志超,等.不同替代率下玄武岩机制砂混凝土性能影响试验研究[J].中国矿山工程,2021,50(6):54-58.

机制砂混凝土的最佳石粉含量介于3%~10%<sup>[3]</sup>。国外学者 Ahn<sup>[4]</sup>认为石粉含量对混凝土的抗折强度也有影响,当机制砂的石粉含量高达30%时,抗折强度下降10%,石粉含量低于20%时,会因石粉含量的不同对抗折强度有不同程度的提高。张琨健<sup>[5]</sup>通过建立粒形系数表征机制砂粒形对混凝土性能的影响。结果表明,粒形系数较好的反应了粒形结构,粒形较好的机制砂中颗粒填充比较饱满,孔隙较小,改善了混凝土的和易性、保水性,减少制备混凝土的用水量,同时提高混凝土的早期抗裂性能。谢华兵<sup>[6]</sup>以四区间级配和泰波级配的偏差值 $R^2$ 作为级配评价指标,结果表明,级配的本身决定了堆积孔隙率的大小,石粉有较好的填充作用。 $R^2 = 43 \times 10^{-4}$ 级配机制砂混凝土工作性能较好,级配对混凝土耐久性(抗氯离子渗透)没有显著的影响。

不同地区生产机制砂所用的矿石种不同导致机制砂的性能也有所差别,粉体种类和含量都是影响机制砂MB值的因素。在相同石粉含量的情况下,

铁尾矿机制砂的MB值最高,同时随着机制砂细粉细度的提高呈现上升趋势<sup>[7]</sup>。在确定的混凝土强度等级(C50)的基础上,本试验主要通过改变玄武岩机制砂的替代率,研究不同玄武岩机制砂替代率对混凝土性能的影响。对玄武岩矿产丰富的地区的机制砂的生产和使用提供理论指导。

## 2 原材料和试验方案

### 2.1 原材料

本次试验选用兰州某公司生产的P. O42.5普通硅酸盐水泥,主要的物理性能见表1。粉煤灰选用兰州某钢厂提供的二级粉煤灰,其主要的化学成分是 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,物理性能指标见表2。玄武岩机制砂由兰州某矿业公司提供,经检测石粉含量为5.6%;堆积密度为 $1\,520\text{ kg/m}^3$ 。试验选用的天然砂堆积密度为 $1\,450\text{ kg/m}^3$ ,天然砂和机制砂的其他性能指标见表3。粗骨料选用形状均匀硬度较高的玄武岩碎石,减水剂为江苏某公司生产的高效减水剂,主要的性能指标见表4。

表1 P. O42.5水泥物理性能指标

原材料	凝结时间/min		安定性	标准稠度/%	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ≥300	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	初凝	终凝		调整水量法		3 d	28 d	3 d	28 d
水泥	133	166	合格	26.4	415	27.4	52.6	6.9	9.4

表2 II级粉煤灰物理性能指标

原材料	细度(0.045 mm方孔筛筛余)/%	需水量比/%	含水量/%	烧失量	三氧化硫/%	活性指数/%
规范标准	≤25	≤105	≤1.0	≤8.0	≤3.0	—
粉煤灰	20.8	101	0.2	1.37	0.40	81

表3 细骨料的物理性能指标

类型	细度模数	表观密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	堆积密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	含泥量/%	空隙率/%	亚甲蓝MB值	硫化物及硫酸盐/%	氯离子含量/%
机制砂	2.8	2 620	1 520	3.0	42.0	1.0	0.17	0.02
天然砂	2.7	2 580	1 450	3.5	39.0		0.20	0.05

表4 减水剂性能指标

检验掺量/%	水泥净浆流动度/mm	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	固含量/%	pH值	硫酸钠含量/%	氯离子含量/%	碱量/%
2.1	230	1.067	18.2	6	4.12	0.01	2.42

### 2.2 试验方法

按照表5所示的机制砂混凝土配合比制作强度等级为C50的混凝土试块,水胶比为0.35,砂率为39%。分6组制作混凝土试块,改变每一组的玄武

岩机制砂的用量,使机制砂的替代天然砂的替代率为0%、20%、40%、60%、80%和100%。试模选用 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的立方体模具,每一种替代率制作12个试块。将每组试块置于温度条件

为  $22 \pm 2$  °C 和湿度条件为 95% 的标准养护室中养护。在龄期为 7 d、28 d、56 d 时测试混凝土试块的抗压强度,在龄期为 1 d、3 d、7 d、14 d、28 d、56 d、90

d、120 d 时测试混凝土超声波声速和收缩应变。试验过程中所用到的测量仪器如图 1 所示。

表 5 机制砂混凝土配合比

编号	替代率/%	水泥/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	粉煤灰/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	天然砂/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	机制砂/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	碎石/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	水/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	减水剂/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	坍落度/ mm
JZ0	0	366	90	684	0	1 072	160	3.8	200
JZ20	20	349	90	547	137	1 072	160	3.8	195
JZ40	40	330	90	410	274	1 072	160	3.8	190
JZ60	60	312	90	274	410	1 072	160	3.8	190
JZ80	80	367	90	137	547	1 072	160	3.8	180
JZ100	100	367	90	0	684	1 072	160	3.8	180



(a) 混凝土超声波检测仪



(b) 万能试验机

图 1 试验仪器

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 抗压强度

抗压强度是混凝土力学性能中做基本的参数,不同龄期下混凝土的抗压强度基本不同。在工程建设中早期抗压强度对加快施工进度,保证工程质量有重要的影响<sup>[8]</sup>。如图 2 所示,机制砂替代率对混凝土早期抗压强度的影响很小,虽然随着机制砂用量的增多,7 d 抗压强度呈现先降后升的变化趋势,但是变化的幅度很小。7 d 最大的抗压强度值和最小的抗压强度值相差仅为 6.2 MPa,当机制砂替代率为 60% 时,7 d 抗压强度接近天然砂混凝土抗压强度。试验数据表明,天然砂混凝土的早期水化进程略快,但是考虑到试验数据的测量误差,可以认为机制砂替代率对混凝土的早期强度没有影响<sup>[9]</sup>。

28 d 和 56 d 的混凝土抗压强度随着机制砂替代率的变化规律大致相同,不同替代率下的抗压强度均为超过天然砂混凝土的抗压强度,当替代率达为 40% 时,28 d 和 56 d 的混凝土抗压强度为最低值,分别为 52 MPa 和 60 MPa。石粉作为粒径小于

0.075 mm 的粉末状颗粒在混凝土体系中对抗压强度有一定的影响:①粉细度较小,很够填充细骨料之间的孔隙;②参与水化过程,水化产物使混凝土结构更密实。但是石粉对混凝土的性能的影响并非都是正向的,石粉含量超过限值,就会破坏合理的颗粒级配,降低粒径大的颗粒的占比,削弱骨料的骨架作用,从而导致抗压强度的下降<sup>[10]</sup>。针对不同强度等级的混凝土,石粉的最佳含量不同,对于中低强度等级混凝土石粉的最佳含量为 10% ~ 20%;对于高强度混凝土石粉的最佳含量为 0% ~ 10%。

本试验用石粉含量为 5.6% 的玄武岩机制砂,代替天然砂的用量。随着替代率的升高,在整个混合砂混凝土体系中,石粉的含量是由低到高的变化趋势,并且石粉含量始终小于 5.6%。机制砂颗粒形状不规则,多棱角,天然砂颗粒表面圆滑,由于机制砂细度相对较大,所以在混合砂中存在比天然砂大的孔隙率。较少的石粉并不能够完全填充骨料之间的孔隙,导致混合砂混凝土的抗压强度略低。

#### 3.2 超声波声速

超声波检测技术是检测混凝土密实度和内部缺

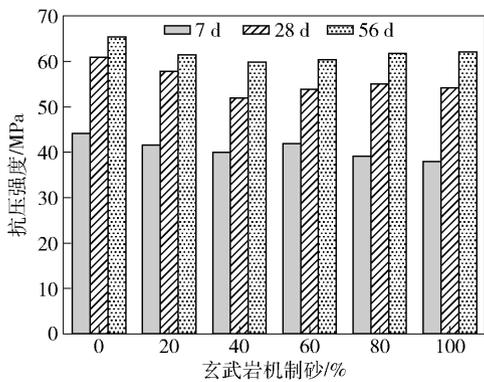


图2 机制砂含量对不同龄期混凝土抗压强度的影响

陷的主要方法,在使用该方法测试声速时,在试块的两个对立面选取测点,并且保持发射器和接收器轴线在同一直线上<sup>[11]</sup>。试验检测结果如图3所示,随着混凝土龄期的增长,天然砂混凝土和混合砂混凝土声速的变化趋势有明显的不同。掺有机制砂的混凝土试块的变化曲线大致M型,即先增加后减小,再增加再减小的变化趋势。于函<sup>[12]</sup>在研究天然骨料透水混凝土超声波波速与混凝土各项指标的关系时,发现超声波波速与总孔隙率、抗压强度、干密度等存在相关关系。超声波在混凝土中的传播路径是非直线型的,传播过程中会绕开裂缝和孔隙等内部缺陷。试验数据显示,不同龄期下不同机制砂掺量的混凝土中超声波声速的变化规律较为混乱,例如龄期为90d时,天然砂混凝土的超声波声速大于混合砂混凝土的超声波声速,即说明在天然砂混凝土中声波传播速度快,混凝土密实程度高,内部孔隙较少。龄期为3d和7d时,情况相反,混合砂混凝土的超声声速大于天然砂混凝土的超声波声速。超声波声速受多因素影响,在探究其变化规律时应该结合更多的变量指标。

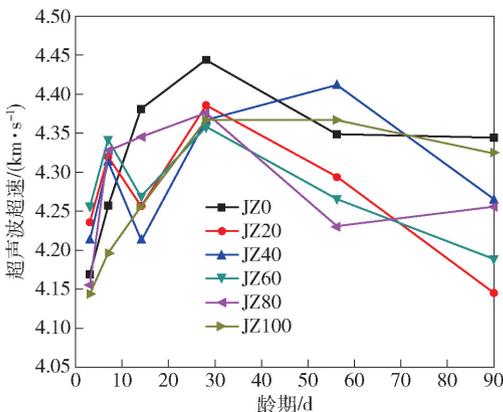


图3 机制砂含量对不同龄期混凝土超声声速的影响

### 3.3 收缩应变

混凝土收缩是指在非荷载作用下,因体积变化

而产生的变形。混凝土配置过程中的水灰比、水泥活性、集料(粗细骨料)以及制备之后的养护环境等因素都会影响混凝土的收缩。混凝土的收缩应变是用来表征收缩大小的一个指标。图4所示为不同机制砂含量的混凝土收缩应变随龄期的变化规律,观察图4可知,在六组不同的机制砂含量的混凝土中,收缩应变随龄期的变化规律是相同的。随着龄期的增长收缩应变增大,并且趋于一个稳定的数值。混凝土的收缩变形主要发生在28d之前,以JZ40为例;28d的收缩应变是120d的73.6%。从本试验数据来看,混合砂混凝土中玄武岩机制砂含量超过60%时,混凝土的收缩应变高于天然砂混凝土。相反当混合砂混凝土中玄武岩机制砂含量为40%时,最有利于降低混凝土的收缩应变,JZ40的收缩应变比天然砂收缩应变的14%低。

适量玄武岩机制砂和天然砂混合使用可以降低混凝土的收缩应变,主要原因是适当的玄武岩机制砂和天然砂混合能够有效的改善颗粒级配、细度模数,其次机制砂中的石粉可以改善混凝土内部孔隙结构,使混凝土变大更加密实,提高抗水渗透的性能,降低收缩率<sup>[13]</sup>。

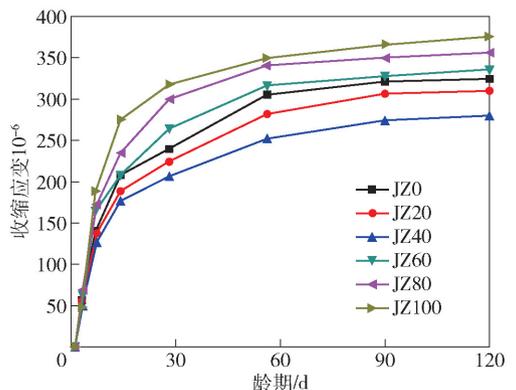


图4 机制砂含量对混凝土收缩应变的影响

### 3.4 龄期与收缩应变的关系

郑怡、徐以艳研究了石灰岩质机制砂混凝土收缩徐变特性与普通混凝土收缩徐变特性的区别,结果表明:石灰岩质机制混凝土收缩徐变发展规律与普通混凝土相似,实验数据与ACI209模型吻合较好,以ACI209模型为基础,对石灰岩质机制砂混凝土收缩徐变模型进行修正。通过分析试验数据,可以得到玄武岩质机制砂混凝土的收缩特性。玄武岩机制撒砂含量为40%时,相同龄期下混凝土试块收缩应变最小。为了进一步确定JZ40混合砂混凝土收缩应变与龄期的关系,对JZ40的试验数据进行多项式拟合分析。拟合过程中发现线性拟合和二次函

数拟合离散性较大,所以选择三次函数、四次函数和五次函数进行拟合分析,分析结果如图5所示。

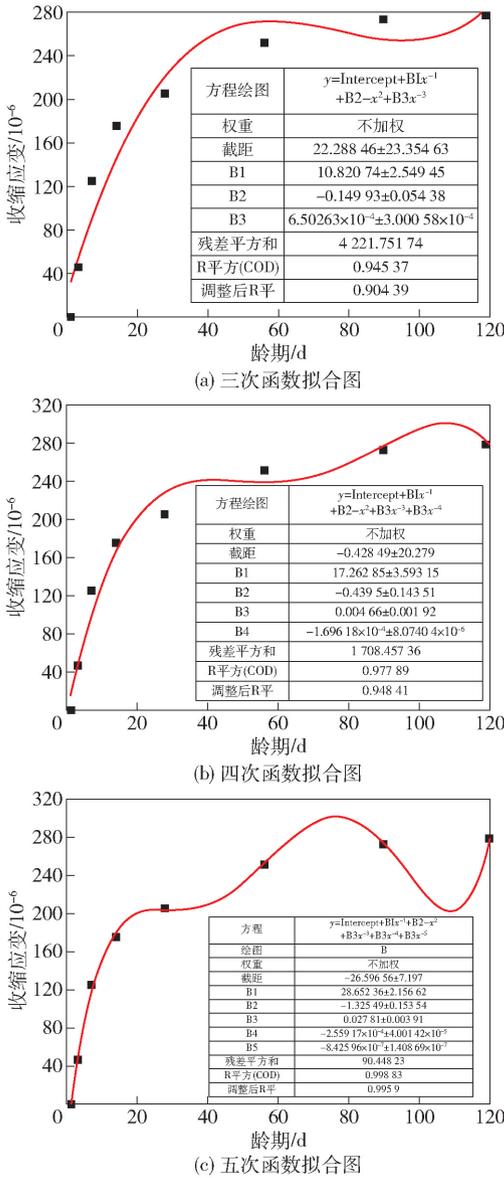


图5 拟合图

对比三种曲线关系可知,三次函数拟合的数据较实测值偏差较大,四次函数拟合曲线和五次函数拟合曲线与实测值较吻合,可靠度高。三条曲线的相关系数R<sup>2</sup>由小到大依次为0.904、0.948、0.996,虽然五次函数的拟合曲线的相关系数最大,但是拟合曲线的发展规律不符合混合砂混凝土收缩应变随龄期的变化规律。综合对比可知,一元四次函数关系能够较好的预测JZ40混合砂混凝土收缩应变随龄期的变化规律。

### 4 结论

(1)天然砂混凝土7 d、28 d、56 d的抗压强度均

高于同龄期玄武岩机制砂混凝土的抗压强度,但是随着龄期的增长,不同含量玄武岩机制砂混凝土的抗压强度趋向于天然砂混凝土的抗压强度。

(2)超声波声速能够有效的反应混凝土的密实度,但以此指标评价不同含量玄武岩机制砂混凝土的密实度时,试验数据波动较大,应结合更多的影响因素对次进行分析。

(3)相同龄期下,玄武岩机制砂的掺量对混凝土收缩应变有较大的影响,纯机制混凝土的收缩应变在相同龄期下最高。当玄武岩机制砂含量低于40%时,玄武岩机制砂的掺入能够改善混凝土的收缩变形。

(4)四次函数拟合能过够很好的反应混凝土的收缩应变随着龄期的变化规律,并且可靠度较高。

### [参考文献]

[1] 鲁浩,李国华,杨家伟,等. 机制砂混凝土研究现状与存在问题分析[J]. 四川建材,2014,40(1):3-4,6.

[2] 潘祖伟,刘艳云. 机制砂石粉含量对混凝土的强度影响[J]. 四川水泥,2018(11):324.

[3] 王稷良. 机制砂特性对混凝土性能的影响及机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2008.

[4] Nam-Shik Ahn. An experimental study on the guidelines for using higher contents of aggregate micro fines in portland cement concrete [D]. The Univity of Texas August,2000.

[5] 张珉健. 机制砂粒型对混凝土性能的影响研究[J]. 新型建筑材料,2015,42(8):17-20.

[6] 谢华兵. 机制砂粒形与级配特性及其对混凝土性能的影响[D]. 广州:华南理工大学,2016.

[7] 李晓光,裴秀卫,刘谨谨. 不同类型机制砂中粉体种类及含量对MB值的影响[J]. 施工技术,2019,48(8):109-113.

[8] 徐传昶,安俊江. 不同替代率机制砂砼早期抗压强度和弹模研究[J]. 山东交通科技,2016(6):54-56.

[9] 梁金科. 玄武岩石粉对机制砂混凝土基本性能与氯离子扩散性能影响研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2019.

[10] 邓翀,鄢佳佳,叶仙松. 机制砂掺量对混凝土力学性能和体积稳定性的影响研究[J]. 新型建筑材料,2018,45(4):42-46.

[11] 颜华,宋波. 装配式混凝土密实度的超声波现场测试[J]. 科学技术与工程,2019,19(7):224-230.

[12] 于函,刘寒冰,罗国宝. 超声波波速与透水混凝土性能关系的试验研究[J]. 科学技术与工程,2019,19(4):224-231.

[13] 张水,曹辉,陈焰,等. 机制砂质量及机制砂混凝土性能研究[J]. 江苏建材,2020(1):25-29.