

文章编号:1673-2049(2019)05-0031-08

# 石粉含量对机制砂混凝土力学性能影响试验

谢开仲<sup>1,2,3</sup>, 王红伟<sup>1</sup>, 肖杰<sup>1</sup>, 杨丹<sup>1</sup>

(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;

3. 广西大学 广西工程防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西 南宁 530004)

**摘要:**为了研究石粉含量对机制砂混凝土力学性能的影响,以广西大石山区机制砂为研究对象,开展了机制砂混凝土和天然砂混凝土的力学性能对比试验,研究了石粉含量(质量分数)分别为0%, 3%, 6%, 9%, 12%时对机制砂混凝土立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量和抗折强度的影响,并与天然砂混凝土进行对比。结果表明:机制砂混凝土的力学性能数值随石粉含量增加先变大再变小,石粉含量为3%时机制砂混凝土力学性能数值最大,石粉含量超过3%时会削弱混凝土的密实度、骨架作用 and 水泥砂浆强度,利用不同地域、不同石材制作机制砂混凝土时,应通过试验确定最佳石粉含量;石粉含量大于6%时,机制砂混凝土力学性能数值小于天然砂混凝土,实际工程中应控制石粉含量上限;建议广西大石山区石灰岩机制砂混凝土换算系数取为0.68;提出的机制砂混凝土立方体抗压强度与弹性模量之间换算公式的理论值与实测值的平均比值为0.982,理论值与实测值相对偏差的平均值为1.88%;所得结论可为机制砂混凝土的研究与推广应用提供借鉴和参考。

**关键词:**机制砂混凝土;天然砂混凝土;石粉;力学性能

**中图分类号:**U444 **文献标志码:**A

## Experiment on Influence of Stone Powder Content on Mechanical Properties of Manufactured Sand Concrete

XIE Kai-zhong<sup>1,2,3</sup>, WANG Hong-wei<sup>1</sup>, XIAO Jie<sup>1</sup>, YANG Dan<sup>1</sup>

(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 Education,

Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Engineering

Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

**Abstract:** In order to study the influence of stone powder content on mechanical properties of manufactured sand concrete, manufactured sand from Dashi mountain area in Guangxi was taken as research object. Comparison experiments for mechanical properties of natural sand concrete and manufactured sand concrete were carried out. The influences of stone powder contents(mass fraction) 0%, 3%, 6%, 9% and 12% on cubic compression strength, axial compression strength, splitting tensile strength, elasticity modulus and flexural strength were studied and compared with natural sand concrete. The results show that, with increase of stone powder

收稿日期:2018-11-10

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:xiekai-zhong@163.com。

通信作者:王红伟(1988-),男,河南郑州人,工程师,工学博士,E-mail:gxu\_why@126.com。

content, mechanical properties' value of manufactured sand concrete first increases and then decreases, and mechanical properties' value reaches peak when stone powder content is 3%. When stone powder content exceeds 3%, compactness, skeleton effect and cement mortar strength of concrete are weakened. When manufactured sand concrete is made by different stone materials in different regions, the optimum stone powder content should be determined through experiments. When stone powder content is more than 6%, mechanical properties' value of manufactured sand concrete is less than that of natural sand concrete, in practical engineering, upper limit of stone powder content should be controlled. It is suggested that conversion coefficient of limestone manufactured sand concrete from Dashi mountain area in Guangxi is 0.68. Conversion formula of manufactured sand concrete between cubic compression strength and elastic modulus is proposed. The average ratio of theoretical values to measured values is 0.982, and average relative deviation between theoretical values and measured values is 1.88%. The conclusion can provide reference for research and application of manufactured sand concrete.

**Key words:** manufactured sand concrete; natural sand concrete; stone powder; mechanical property

## 0 引言

混凝土是一种重要的建筑材料,直接影响着工程结构的质量和安全,近年来,随着土木工程的大规模建设和发展,建筑材料的短缺和分布不均衡问题日益凸显,尤其是混凝土的重要制作材料天然砂,因地制宜地研究新型替代材料已经成为工程界和学术界的关注热点和焦点。机制砂混凝土作为一种新型的建筑材料,对于天然砂资源短缺但岩石资源丰富地区的工程建设具有重要的意义,尤其是在取代天然砂<sup>[1-5]</sup>方面具有明显优势,已逐步在工程中应用<sup>[6]</sup>。目前关于机制砂混凝土的试验研究中,复掺材料对机制砂混凝土影响研究的报道比较多<sup>[7-9]</sup>,而作为机制砂重要组成部分的石粉,相关的试验研究<sup>[10-13]</sup>还不够全面和深入,且主要集中在石粉对机制砂混凝土胶浆氯离子性能<sup>[14]</sup>、MB 值<sup>[15-16]</sup>、机制砂颗粒形貌<sup>[17]</sup>等参数的影响研究方面。由于低石粉含量达不到预期效果,高石粉含量会造成混凝土黏度大和泌水问题<sup>[18-20]</sup>,因此需要确定最佳石粉含量,相关的研究多是基于不同石粉含量对混凝土力学性能、施工性等因素的影响来确定最佳石粉含量,例如张恒等<sup>[21]</sup>、王青等<sup>[22]</sup>、李军等<sup>[23]</sup>、李北星等<sup>[24]</sup>、黄昌华等<sup>[25]</sup>均提出了相应的最佳石粉含量,此外石粉含量对高等级机制砂混凝土的影响<sup>[26]</sup>及在高等级机制砂混凝土中的应用<sup>[27]</sup>研究还比较少。综上所述,由于石材地域分布和石材性能的差异以及试验中试件数量限制,目前尚无一个广泛接受和认可的最佳石粉含量,针对石粉含量对机制砂混凝土

力学性能的研究还不够深入,需要进一步开展试验研究进行完善。为此本文针对广西山区的石材,开展了机制砂混凝土的立方体抗压强度试验、轴心抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验、弹性模量试验和抗折强度试验,研究了石粉含量对广西山区机制砂混凝土力学性能的影响,得出了一些有益结论,可以为机制砂混凝土的发展与应用提供借鉴和参考。

## 1 试验设计

### 1.1 试验概况

为了对比研究石粉含量对机制砂混凝土力学性能的影响,根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)中的试验方法进行试验设计,主要开展了立方体抗压强度试验、轴心抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验、抗折强度试验、弹性模量试验共计 5 种试验<sup>[28]</sup>。每种试验的试件数量均为 15 个,尺寸均为标准试件,石粉含量(质量分数)均为 0%、3%、6%、9%、12% 五种,浇筑完试件后按照标准养护条件进行养护,根据试验类型不同,对相应试件采用试验机进行分级加载,并记录加载过程中试件的破坏形态和力学性能。

### 1.2 材料参数

对比试验中材料的技术参数如下:粗骨料选用粒径小于等于 31.5 mm 的连续级配碎石,密度为  $2\,680\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;水泥选用 P.O42.5 强度的海螺牌水泥,密度为  $3\,100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;细骨料选用石灰岩机制砂,细度模数为 3.38,表观密度为  $2\,693\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;石粉粒径小于 0.075 mm,石粉含量为 6.2%,MB

值为 1.1;天然砂细度模数为 2.95,表观密度为  $2\,602\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,含泥量(质量分数)为 1.6%。

### 1.3 配合比设计

机制砂混凝土配合比依据《普通混凝土配合比设计规程》(JTJ 55—2011)进行设计。

配合比设计步骤如下:①依据规范计算公式获得混凝土配制强度;②采用瑞士学者保罗米提出的强度公式确定水灰比为 0.55;③初步确定用水量为  $205\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;④确定水泥用量为  $372.73\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;⑤依据规范确定砂率为 40%;⑥采用绝对体系法计算粗细骨料含砂量为  $719.53\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,碎石用量为  $1\,079.3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。经过步骤①~⑥,初步确定水、水泥、砂、碎石的配合比为 0.55:1:1.93:2.90。依据规范《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)得出坍落度为 110 mm 时水、水泥、砂、碎石的配合比为 0.55:1:1.72:2.58。

按照水灰比 0.4,0.45,0.5,0.55 共设计 4 组试验(每组 3 个标准试件)检验强度,确定最终配合比。混凝土抗压强度与水灰比关系见图 1。

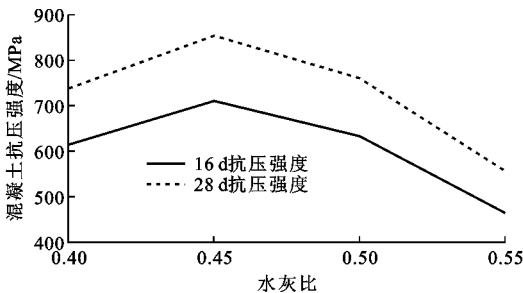


图 1 混凝土抗压强度与水灰比的关系

Fig. 1 Relationship Between Concrete Compressive Strength and Water-cement Ratio

对图 1 分析可知,水灰比为 0.45 时混凝土抗压强度最大,故最终混凝土的水、水泥、砂、碎石用量分别为  $220,488.89,657.65,986.47\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 立方体抗压强度试验

对机制砂混凝土和天然砂混凝土试件进行加载,加载过程见图 2,加载初期试件表面无裂纹出现,随着荷载增大,裂缝开始出现并变宽,直到试件被压坏,试件的破坏面与竖直方向约呈  $45^\circ$ ,试件表面外鼓,裂缝主要出现在四角且比较集中。机制砂混凝土立方体抗压强度与石粉含量关系见图 3。

由不同石粉含量立方体抗压强度试块的破坏过程及试块立方体抗压强度与石粉含量关系可知:



图 2 立方体抗压强度试验加载过程

Fig. 2 Loading Process of Cube Compressive Strength Test

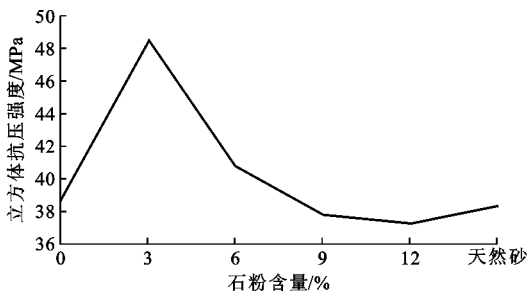


图 3 立方体抗压强度与石粉含量关系

Fig. 3 Relationship Between Cubic Compression Strength and Stone Powder Content

(1)机制砂混凝土立方体抗压强度随着石粉含量递增而先变大再变小。石粉含量为 3% 时达到最大值,即存在最佳石粉含量,主要是由于石粉含量小于 3% 时石粉能够填充不同材料之间的间隙,改善混凝土界面结构,促进水泥的水化作用;当石粉含量超过 3% 时,细骨料密度增加,粗骨料密度降低,混凝土的骨架作用和密实度均降低,同时由于石粉不具有完全活性,水泥含量不变情况下,过多的石粉含量会使水泥浆强度降低,因此石粉含量超过 3% 时强度下降。在利用不同地域不同石材制作机制砂混凝土和相应构件时,应通过试验确定最佳石粉含量。

(2)石粉含量小于 6% 时,机制砂混凝土立方体抗压强度大于天然砂混凝土,石粉含量大于 6% 时,机制砂混凝土立方体抗压强度小于天然砂混凝土。制作机制砂混凝土时,应控制石粉含量上限。

### 2.2 轴心抗压强度试验

对机制砂混凝土和天然砂混凝土试件进行加载,加载过程见图 4。机制砂混凝土试件破坏形态主要表现为试件中间部分或棱角部分剪切破坏,石粉含量越高,试件破坏时裂纹越小,石粉含量越低,试件破坏时裂纹越多,宽度较大,主要集中在试件棱



图 4 轴心抗压强度试验加载过程

Fig. 4 Loading Process of Axial Compressive Strength Test

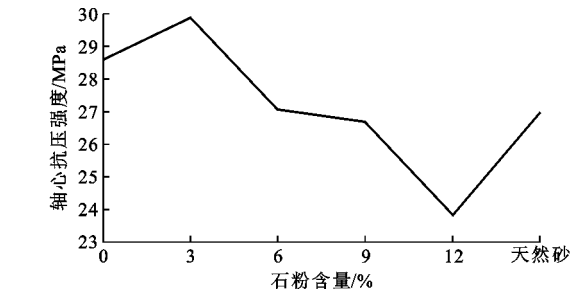


图 5 轴心抗压强度与石粉含量关系

Fig. 5 Relationship Between Axial Compressive Strength and Stone Powder Content

由不同石粉含量轴心抗压强度试块的破坏过程及试块轴心抗压强度与石粉含量关系可知：

(1)轴心抗压强度与石粉含量关系和立方体抗压强度与石粉含量关系类似，石粉含量为 3% 时达到峰值，即存在最佳石粉含量。石粉含量与轴心抗压强度之间的变化规律成因与立方体抗压强度试验相同。

(2)石粉含量小于 6% 时，机制砂混凝土轴心抗压强度大于天然砂；石粉含量大于 6% 时，机制砂混凝土轴心抗压强度小于天然砂，机制砂混凝土应控制石粉含量的上限。

对立方体抗压强度试验和轴心抗压强度试验进行总结可知，立方体抗压强度和轴心抗压强度与石粉含量变化规律相同，都存在最佳石粉含量，使得机制砂混凝土的立方体抗压强度与轴心抗压强度达到峰值，石粉含量小于 6% 时，机制砂混凝土的立方体抗压强度和轴心抗压强度大于天然砂混凝土。

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，根据试验数据计算不同石粉含量的换算系数，换算系数与石粉含量关系见图 6。

对图 6 中的换算系数进行统计分析可知：

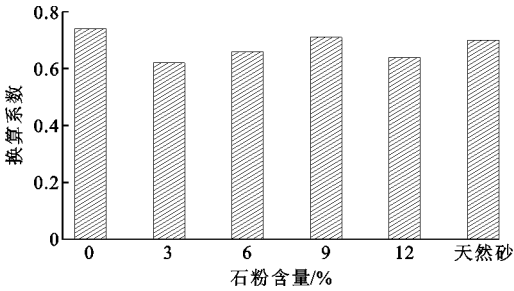


图 6 换算系数与石粉含量关系

Fig. 6 Relationship Between Conversion Coefficient and Stone Powder Content

(1)不同石粉含量机制砂混凝土的换算系数平均值为 0.674，天然砂混凝土换算系数为 0.70，与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中混凝土换算系数 0.76 接近，建议石灰岩机制砂混凝土换算系数取为 0.68。

(2)随着石粉含量的递增，机制砂混凝土的换算系数与天然砂混凝土的换算系数之间没有明显的大小关系和变化规律。

### 2.3 劈裂抗拉强度

对机制砂混凝土和天然砂混凝土试件开展劈裂抗拉强度试验。由试件破坏形态可知不同石粉含量机制砂混凝土试块破坏特征相同，加载初期试件表面无裂纹，随荷载不断增大，试块中间出现 1 条裂纹并迅速扩大直至把试件劈为两半。试件典型破坏形态见图 7，劈裂抗拉强度与石粉含量关系见图 8。



图 7 试件典型破坏形态

Fig. 7 Typical Failure Mode of Specimen

由试件劈裂抗拉强度与石粉含量关系可知：机制砂混凝土劈裂抗拉强度与石粉含量关系曲线呈向下开口，在石粉含量为 3% 时达到峰值，即存在最佳石粉含量，石粉含量与劈裂抗拉强度之间的变化规律成因与立方体抗压强度试验相同。石粉含量大于 6% 时，机制砂混凝土劈裂抗拉强度小于天然砂混凝土，为了确保机制砂混凝土构件的力学性能，应控制



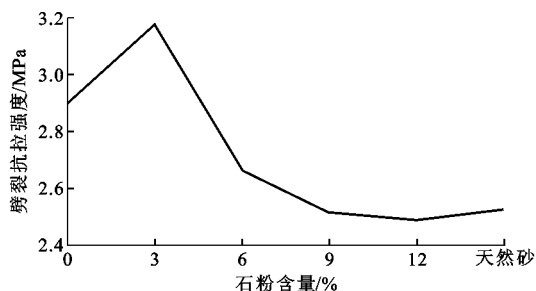


图8 劈裂抗拉强度与石粉含量关系

Fig. 8 Relationship Between Splitting Tensile Strength and Stone Powder Content

机制砂混凝土中石粉含量的上限。

## 2.4 弹性模量试验

对机制砂混凝土和天然砂混凝土试件开展弹性模量试验,试验加载过程见图9,弹性模量与石粉含量关系见图10。



图9 弹性模量试验加载过程

Fig. 9 Loading Process of Elastic Modulus Test

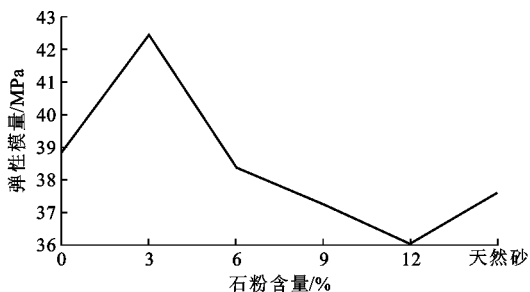


图10 石粉含量与弹性模量关系

Fig. 10 Relationship Between Elastic Modulus and Stone Powder Content

由弹性模量与石粉含量的关系曲线可知:

(1) 机制砂混凝土弹性模量与石粉含量关系曲线呈向下开口,石粉含量为3%时弹性模量达到峰值,即存在最佳石粉含量,石粉含量与弹性模量之间的变化规律成因与立方体抗压强度试验相同。

(2) 石粉含量大于6%时,机制砂混凝土弹性模量小于天然砂混凝土,为了确保机制砂混凝土力学

性能,应控制机制砂混凝土中石粉含量的上限。

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)可知抗压强度与弹性模量之间的换算公式为

$$E_c = \frac{1 \times 10^5}{2.2 + 34.7/f_{cu}} \quad (1)$$

式中: $E_c$ 为弹性模量; $f_{cu}$ 为立方体抗压强度。

根据式(1)计算得出的弹性模量与实测弹性模量对比见图11。由图11可知,弹性模量的实测平均值比理论平均值大17.86%,规范弹性模量计算值偏保守。

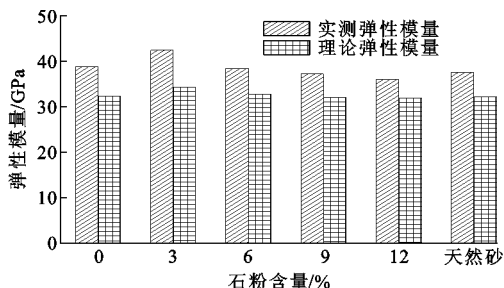


图11 式(1)计算的理论弹性模量与实测弹性模量对比

Fig. 11 Comparison Between Theoretical Elastic Modulus by Eq. (1) and Measured Elastic Modulus

《高强混凝土结构设计与施工建议》中提到的混凝土弹性模量的另一种计算方法见式(2)

$$E_c = (0.26\sqrt{f_{cu}} + 1.8) \times 10^4 \quad (2)$$

根据式(2)计算的混凝土弹性模量与实测弹性模量对比见图12。由图12可知,弹性模量的实测平均值比理论平均值大11.45%。对式(2)进行优化,可得到机制砂混凝土的立方体抗压强度与弹性模量之间的换算公式,如式(3)所示

$$E_c = (0.31\sqrt{f_{cu}} + 1.8) \times 10^4 \quad (3)$$

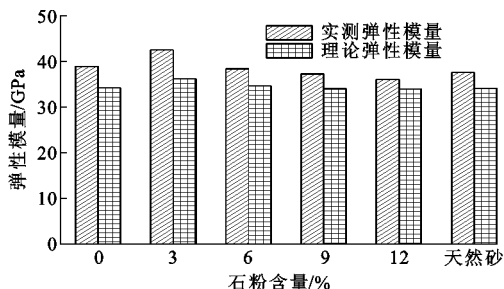


图12 式(2)计算的理论弹性模量与实测弹性模量对比

Fig. 12 Comparison Between Theoretical Elastic Modulus by Eq. (2) and Measured Elastic Modulus

根据式(3)计算的混凝土弹性模量与实测弹性模量对比见图13。由图13可知,式(3)计算的弹性模量与实测弹性模量比较接近,理论计算弹性模量与实测弹性模量比值的平均值为0.982,理论值与

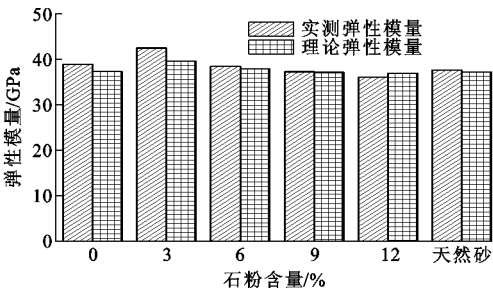


图 13 优化后理论弹性模量与实测弹性模量对比  
Fig. 13 Comparison Between Theoretical Elastic Modulus and Measured Elastic Modulus After Optimization

实测值相对偏差的平均值为 1.88%，推荐的机制砂混凝土立方体抗压强度与弹性模量之间的换算公式具有较高精度。

2.5 抗折强度

对机制砂混凝土和天然砂混凝土试件开展抗折强度试验，试验加载过程见图 14。由试件破坏形态可知，不同石粉含量机制砂混凝土试件抗折强度的破坏特征基本上一致：加载初期试件表面无裂纹出现，随着荷载不断增大，试件底部中间出现第 1 条裂纹并很快裂纹贯穿试件，将试件分为两半。抗折强度与石粉含量关系见图 15。



图 14 抗折强度试验加载过程  
Fig. 14 Loading Process of Flexural Strength Test

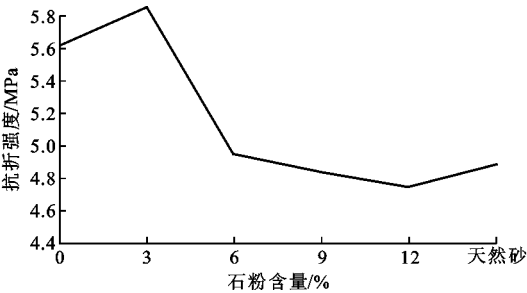


图 15 抗折强度与石粉含量关系  
Fig. 15 Relationship Between Flexural Strength and Stone Powder Content

由图 15 中机制砂混凝土抗折强度与石粉含量

的关系曲线可知：

(1)机制砂混凝土抗折强度与石粉含量关系曲线呈向下开口，并在石粉含量为 3% 时抗折强度最大，即存在最佳石粉含量，石粉含量与抗折强度之间的变化规律成因与立方体抗压强度试验相同。

(2)石粉含量小于 6% 时，机制砂混凝土抗折强度大于天然砂混凝土抗折强度；石粉含量大于 6% 时，机制砂混凝土抗折强度小于天然砂混凝土。为了确保机制砂混凝土的抗折强度，应在实际工程中控制机制砂混凝土的石粉含量上限。

3 结 语

(1)机制砂混凝土的立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量以及抗折强度随石粉含量的增加而先变大再变小，曲线呈向下开口，石粉含量为 3% 左右时达到峰值。

(2)石粉含量不同时，机制砂混凝土与天然砂混凝土的立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量以及抗折强度差异较大。石粉含量小于 6% 时，机制砂混凝土力学性能优于天然砂混凝土，为确保机制砂混凝土的力学性能，应控制机制砂混凝土中石粉含量的上限。

(3)随着石粉含量的递增，机制砂混凝土的换算系数与天然砂混凝土的换算系数之间没有明显的大小关系和变化规律。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，建议广西大石山区石灰岩机制砂混凝土的换算系数取为 0.68。

(4)提出的机制砂混凝土立方体抗压强度与弹性模量之间的换算公式具有较高的计算精度，弹性模量理论值与实测值的平均比值为 0.982，理论值与实测值相对偏差的平均值为 1.88%。

参考文献：

References:

[ 1 ] 刘昊栋,曹瑞东,杨会伟,等. 机制砂-EPS 轻质混凝土性能试验研究[J]. 混凝土,2017(12):108-111.  
LIU Hao-dong, CAO Rui-dong, YANG Hui-wei, et al. Experimental Study of the Properties of Light-weight Manufactured Sand-EPS Concrete [J]. Concrete, 2017(12): 108-111.  
[ 2 ] 金巧兰,元成方. 材料因素对 C40 级机制砂混凝土抗压强度的影响[J]. 人民黄河, 2017, 39(10): 129-132, 136.  
JIN Qiao-lan, YUAN Cheng-fang. Effects of Material

- Factors on the Compressive Strength of Machine-made Sand C40 Concrete[J]. Yellow River, 2017, 39(10):129-132,136.
- [3] 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(4):42-46.
- DENG Chong, YAN Jia-jia, YE Xian-song. Effects of Manufactured Sand on the Mechanical Properties and Volume Stability of Concrete[J]. New Building Materials, 2018(4):42-46.
- [4] 赵 卓,陈 捷,鲁春晓. 材料因素对机制砂混凝土电阻率的影响[J]. 混凝土, 2017(11):126-128.
- ZHAO Zhuo, CHEN Jie, LU Chun-xiao. Effect of Material Factors on Resistivity of the Manufactured Sand Concrete[J]. Concrete, 2017(11):126-128.
- [5] 王忠伟,赵 卓,鲁春晓. 材料因素对机制砂混凝土渗透性的影响[J]. 混凝土, 2017(11):132-134,144.
- WANG Zhong-wei, ZHAO Zhuo, LU Chun-xiao. Effect of Material Factors on the Permeability of Manufactured Sand Concrete[J]. Concrete, 2017(11):132-134,144.
- [6] 杨 鑫,于月祥,宋晓乐. 高强机制砂混凝土应用研究[J]. 施工技术, 2017, 46(增):312-316.
- YANG Xin, YU Yue-xiang, SONG Xiao-le. Application Study on High Strength Machine-made Sand Concrete[J]. Construction Technology, 2017, 46(S):312-316.
- [7] 申爱琴,张 敬,樊 莉,等. 高寒山区 C40 机制砂混凝土耐久性能[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2018, 39(1):115-119.
- SHEN Ai-qin, ZHANG Jing, FAN Li, et al. Durability of C40 Machine-made Sand Concrete for Highway Culvert in Alpine Areas[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2018, 39(1):115-119.
- [8] 李锡松,杨成军. 钢渣机制砂生产工艺及其用于混凝土砌块的研究[J]. 新型建筑材料, 2017(8):155-157.
- LI Xi-song, YANG Cheng-jun. Study on Preparation of Steel Slag Sand and Its Application on Preparing Concrete Block[J]. New Building Material, 2017(8):155-157.
- [9] 马相明,张 蕾. 高速公路施工中高性能机制砂混凝土的应用研究[J]. 公路工程, 2017, 42(5):149-153, 238.
- MA Xiang-ming, ZHANG Lei. The Application of High Performance Mechanism Concrete in the Highway Construction[J]. Highway Engineering, 2017, 42(5):149-153,238.
- [10] 兰 聪,陈 景,刘 霞,等. 石灰石机制砂中石粉对混凝土性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2018(7):46-48,130.
- LAN Cong, CHEN Jing, LIU Xia, et al. Study on the Effect of the Stone Powder on Performance of Concrete in the Limestone Machine-made Sand[J]. New Building Materials, 2018(7):46-48,130.
- [11] 高瑞军,吴 浩,王 玲,等. 外掺机制砂石粉对水泥基材料流变性能的影响及机理[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(4):1080-1085.
- GAO Rui-jun, WU Hao, WANG Ling, et al. Effect and Mechanism of Machine-made Sand Stone Powder on Rheological Properties of Cement-based Materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(4):1080-1085.
- [12] 毛永琳,朱 江,杨 勇,等. 机制砂中的石粉对水泥浆体流动性和干燥收缩的影响[J]. 混凝土, 2019(2):76-79,84.
- MAO Yong-lin, ZHU Jiang, YANG Yong, et al. Influence of Crushed Sand Fines on Fluidity and Dry Shrinkage of Cement Paste[J]. Concrete, 2019(2):76-79,84.
- [13] 李家和,张保生,王云东,等. 石灰岩高石粉含量机制砂混凝土配合比设计及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(11):3641-3645,3651.
- LI Jia-he, ZHANG Bao-sheng, WANG Yun-dong, et al. Study on Mixture Ratio Design and Performance of Manufactured Sand Concrete with High Content of Limestones[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(11):3641-3645,3651.
- [14] 叶仙松,李北星,祝文凯,等. 花岗岩石粉与矿物掺合料对胶浆氯离子结合性能的影响[J]. 武汉大学学报:工学版, 2018, 51(1):27-31.
- YE Xian-song, LI Bei-xing, ZHU Wen-kai, et al. Influence of Granite Micro Fines and Mineral Additions on Chloride Ion Binding of Cementitious Material Paste[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(1):27-31.
- [15] 滕爱国,杨海成,范志宏,等. 泥粉对砂岩机制砂 MB 值及砂浆性能的影响[J]. 水运工程, 2017(9):48-52.
- TENG Ai-guo, YANG Hai-cheng, FAN Zhi-hong, et al. Influence of Clay Powder for Manufactured Sand's MB Value and Mortar Property[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(9):48-52.
- [16] 董 瑞,沈卫国. 石粉和泥粉对 MB 值的动态关系研究[J]. 混凝土, 2017(12):67-70,74.
- DONG Rui, SHEN Wei-guo. Dynamic Relationships Among MB Value, Micro Fines and Clay Powder

- Content[J]. Concrete, 2017(12): 67-70, 74.
- [17] 李 艳, 任永华, 黄法礼, 等. 石粉含量对机制砂颗粒形貌参数的影响[J]. 铁道建筑, 2017, 57(8): 139-142.
- LI Yan, REN Yong-hua, HUANG Fa-li, et al. Influence of Crusher Dust on Particle Shape Parameters of Machine-made Sands[J]. Railway Engineering, 2017, 57(8): 139-142.
- [18] 张广田, 陈朝阳, 刘娟红. 硅质机制砂混凝土改善措施及应用研究[J]. 施工技术, 2018, 47(2): 107-111.
- ZHANG Guang-tian, CHEN Zhao-yang, LIU Juan-hong. Study on the Application and Improvement Measures of Siliceous Mechanism Sand Concrete[J]. Construction Technology, 2018, 47(2): 107-111.
- [19] 张广田, 刘娟红, 隋宝龙, 等. 硅质机制砂改性剂的机理研究与应用[J]. 材料导报, 2017, 31(12): 56-62.
- ZHANG Guang-tian, LIU Juan-hong, SUI Bao-long, et al. Mechanism Study and Application of the Modifier for Siliceous Machine-made Sand [J]. Materials Ports, 2017, 31(12): 56-62.
- [20] 梁远博, 谷坤鹏, 王成启. 硅灰对高石粉含量机制砂制备混凝土的影响[J]. 水运工程, 2017(7): 53-57.
- LIANG Yuan-bo, GU Kun-peng, WANG Cheng-qi. Influence of Silica Fume on Concrete Prepared by High Stone Powder Content Manufactured Sand[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(7): 53-57.
- [21] 张 恒, 谭信荣, 马 辉, 等. 机制砂在隧道喷射混凝土及二次衬砌中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(12): 1536-1543.
- ZHANG Heng, TAN Xin-rong, MA Hui, et al. Application of Mechanical-crushed Sands to Tunnel Shotcrete and Secondary Lining[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(12): 1536-1543.
- [22] 王 青, 江 满, 徐 港, 等. 机制砂石粉含量对泵送混凝土强度的影响[J]. 混凝土, 2018(2): 102-106.
- WANG Qing, JIANG Man, XU Gang, et al. Effect of Mechanical Gravel Powder Content on Strength of Pumped Concrete[J]. Concrete, 2018(2): 102-106.
- [23] 李 军, 李志刚, 梁德兴. 中国西南沿海地区石灰岩机制砂对混凝土性能的影响研究[J]. 公路, 2018(2): 213-216.
- LI Jun, QING Zhi-gang, LIANG De-xing. Study on Influence of Limestone Mechanism Sand on Concrete Performance in Coastal Areas of Southwest China[J]. Highway, 2018(2): 213-216.
- [24] 李北星, 尹立愿, 冯紫豪, 等. 石粉含量对 C60 机制砂海工混凝土耐久性的影响研究[J]. 混凝土, 2017(10): 169-173.
- LI Bei-xing, YIN Li-yuan, FENG Zi-hao, et al. Study on the Effects of Rock Dust Content on the Durability of C60 Manufactured Sand Marine Concrete[J]. Concrete, 2017(10): 169-173.
- [25] 黄昌华, 杨海成, 盛余飞, 等. 砂岩石粉含量对机制砂混凝土劈裂抗拉强度的影响及机理研究[J]. 水运工程, 2017(9): 58-63.
- HUANG Chang-hua, YANG Hai-cheng, SHENG Yu-fei, et al. Effect of Sandstone Powder Content on Tensile Splitting Strength and Mechanism for Sandstone Concrete[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(9): 58-63.
- [26] 张 坤, 管民生, 杜宏彪. C100 高强机制砂混凝土的制备及其性能研究[J]. 混凝土, 2018(4): 134-136, 140.
- ZHANG Kun, GUAN Min-sheng, DU Hong-biao. Preparation and Performance of C100 High Strength Concrete Using Manufactured Sand [J]. Concrete, 2018(4): 134-136, 140.
- [27] 丁庆军, 徐 意, 牟廷敏. 高石粉机制砂制备 C100 钢管混凝土的研究与应用[J]. 混凝土, 2017(11): 1-4.
- DING Qing-jun, XU Yi, MOU Ting-min. Study and Application of C100 CFST Prepared with High Stone Powder Manufactured Sand[J]. Concrete, 2017(11): 1-4.
- [28] 肖 杰. 广西大石山区石灰岩机制砂混凝土的应用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- XIAO Jie. Application Research of Limestone Manufactured Sand Concrete in Guangxi Area [D]. Nan-ning: Guangxi University, 2017.