

# 石粉对机制砂混凝土早期收缩和开裂性能的影响研究

Effect of Stone Powder on Early - Age Shrinkage and Cracking Behavior of Manufactured Sand Concrete

陈 迎

(广西壮族自治区港航发展中心, 南宁 530029)

**摘要:** 为研究机制砂中石粉掺量对混凝土早期体积稳定性的影响, 测试了不同石粉掺量的不同强度混凝土和易性、早期收缩和抗裂性能、抗压强度和孔隙结构。结果表明: 掺加适量石粉可有效改善机制砂混凝土拌合物的保水性、黏聚性和抗离析性, 有利于提高机制砂混凝土的抗裂性能和抗压强度; 掺加过量石粉会增加混凝土的需水量和早龄期收缩率, 降低其抗裂性能和硬化后的强度。对于 C30 机制砂混凝土, 石粉掺量可放宽至 20%; 对于 C50 机制砂混凝土, 石粉掺量应严格控制在 10% 以内。混凝土用机制砂中石粉掺量的最佳值应结合工程环境和实际用途确定, 更有利于砂资源贫乏区域的机制砂混凝土扩大化应用。

**关键词:** 机制砂混凝土; 石粉掺量; 体积稳定性; 微观结构

中图分类号: TU525 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0044-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.008

CHEN Ying

(Port and Shipping Development Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530029, China)

**Abstract:** To study the influence of stone powder content on the early shrinkage and cracking performance of manufactured concrete, the working performance, early shrinkage, early cracking, compressive strength, and pore distribution of manufactured sand concrete with different strength and different contents were tested. The test results show that the addition of stone powder is beneficial to improve the water retention, cohesiveness, and anti-segregation performance of manufactured sand concrete but it will increase the amount of water reducing agent and early shrinkage strain of manufactured sand concrete. An appropriate amount of stone powder is beneficial to improve the crack resistance and compressive strength of manufactured sand concrete, but excessive stone powder will lead to the decrease of crack resistance and compressive strength. The stone powder content in manufactured sand can be relaxed to 20% for C30 concrete, and the content of stone powder should be controlled within 10% for the C50 concrete. The optimum value of stone powder content in manufactured sand for concrete should be determined in combination with engineering environment and practical use, which is more conducive to the expansion application of manufactured sand concrete in areas with poor sand resources.

**Key words:** manufactured sand concrete; stone powder content; volume stability; microstructure

## 0 引言

近年来, 为保护生态环境和实现可持续发展战略, 禁采、限采天然砂的相关规定相继出台, 这就导致作为混凝土主要原材料之一的河砂严重短缺, 机制砂的市场需求出现急剧增长<sup>[1-2]</sup>。与普通河砂相比, 机制砂不仅有更高的经济效益和环境效益, 还

可以有效解决混凝土细骨料供需矛盾的问题。因此,近年来机制砂逐渐成为混凝土用河砂的替代品<sup>[3-4]</sup>。尽管如此,目前机制砂在建筑行业并未得到普遍推广和认可,一些技术问题还有待进一步探索。

目前,国内学者针对机制砂中石粉掺量对混凝土性能的影响已开展了一些研究,Celik 等<sup>[5]</sup>认为保持粗细骨料占比不变的情况下比表面积会随着石粉掺量的增大而增大,因此其需水量也会随之增大。Ahmed 等<sup>[6]</sup>也同样认为混凝土需水量会随着石粉掺量的增加而明显增大,但其黏聚性和保水性同时会得到明显的改善。王雨利等<sup>[7]</sup>认为随机制砂中石粉掺量的增加,机制砂混凝土的和易性和强度呈现先提升后降低的变化趋势。于本田等<sup>[3]</sup>认为适量石粉对混凝土抗压强度和抗氯离子渗透性有较好的提升效果,但过量石粉将会导致其性能劣化。何世钦<sup>[8]</sup>、方国富<sup>[9]</sup>和杨奕菲<sup>[10]</sup>等也同样认为,一定量石粉的加入可以改善混凝土的工作性能,改善机制砂体系的颗粒级配和密实性,进而改善机制砂混凝土的宏观性能和微观结构。在微观结构层面,Soroka 等<sup>[11]</sup>首次报道了石粉对水泥水化进程存在成核作用,可以促进水化产物生成的结论。此后,石粉对水泥基材料还存在填充作用<sup>[12]</sup>、稀释作用<sup>[13]</sup>和化学作用<sup>[14-15]</sup>等结论被相继提出和论证。Liu 等<sup>[15]</sup>通过试验分析了花岗斑岩机制砂中石粉掺量对混凝土体积稳定性、强度、电通量值和抗硫酸盐侵蚀性能的影响规律和影响机理。

然而,现有研究以石粉掺量对机制砂混凝土和易性、力学性能和耐久性能的变化规律为主,有关其早期收缩和开裂性能的研究报道较少,还有待进一步开展研究。鉴于此,选取石灰石粉为研究对象,测试了不同石粉掺量的不同机制砂混凝土强度的早期开裂性能、收缩率、抗压强度和孔隙分布。旨在揭示石粉掺量对机制砂混凝土早期体积稳定性性能的影响规律和机理,研究成果可为天然砂资源贫乏区域的机制砂工程应用范围提供一种思路。

## 1 试验

### 1.1 原材料

水泥为 P·O 42.5 级水泥,性能指标见表 1;机制砂细度模数为 2.9,由石灰岩破碎而成,原材料机

制砂颗粒级配符合二区中砂要求,性能指标见表 2,水泥和石粉的主要化学成分见表 3;粗骨料为 5~25 mm 玄武岩碎石;减水剂聚羧酸高性能减水剂;水为自来水。

表 1 水泥物理力学性能  
Table 1 Physical and mechanical properties of cement

比表面积 /(m <sup>2</sup> /kg)	安定性	凝结时间/min		28 d 抗折 强度/MPa	28 d 抗压 强度/MPa
		初凝	终凝		
355	合格	260	320	7.3	23.3 48.2

表 2 机制砂主要性能  
Table 2 Main indexes of manufactured sand

细度 模数	表观密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	压碎指 标/%	石粉掺 量/%	MB 值	紧密堆积密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	松散堆积密度 /(kg/m <sup>3</sup> )
2.9	2 630	8	8	1.0	1 760	1 640

表 3 水泥和石粉的化学组成  
Table 3 Chemical composition of cement and stone powder /%

成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Loss
水泥	56.51	25.74	3.88	7.45	1.35	3.02	0.85	0.65	0.55
石粉	50.08	4.66	1.06	1.25	1.85	0.32	—	0.45	40.41

### 1.2 混凝土配合比

设计 C30 和 C50 两种不同强度等级的混凝土配合比。试验前需调配机制砂试样中的石粉掺量分别为 5%、10%、15% 和 20% 备用。考虑到石粉掺量对混凝土和易性和早龄期体积稳定性可能会存在较大的影响,因此通过试配后决定将混凝土拌合物的坍落度设计为 180 ± 20 mm,使混凝土拌合物的早期收缩和抗裂性能测试结果更具参考价值。待混凝土拌合完成后,对其工作性能进行测试与评估。不同石粉掺量的机制砂混凝土配合比见表 4。

表 4 混凝土配合比

Table 4 Concrete mix proportion / (kg/m<sup>3</sup>)

试样 编号	水胶比	水泥	砂		碎石	水	减水剂
			机制砂	石粉			
C30	0.45	344	800		1 100	155	3.4
C30P5	0.45	344	760	40	1 100	155	3.4
C30P10	0.45	344	720	80	1 100	155	4.1
C30P15	0.45	344	680	120	1 100	155	4.8
C30P20	0.45	344	640	160	1 100	155	5.5
C50	0.32	484	800		1 060	155	4.8
C50P5	0.32	484	665	35	1 060	155	5.8
C50P10	0.32	484	630	70	1 060	155	6.8
C50P15	0.32	484	595	105	1 060	155	7.7
C50P20	0.32	484	560	140	1 060	155	9.7

## 2 结果与分析

### 2.1 和易性

由表 5 可以看出,C30 和 C50 混凝土的减水剂用

## 材料科学

量均随机制砂中石粉掺量的增加而增大, 离析率随石粉掺量的增加而减小。其原因为, 当石粉掺量较少时, 机制砂中的细颗粒较少, 混凝土需水量低, 但易出现离析和泌水现象。然而, 随着石粉掺量的增大, 机制砂的比表面积增加, 导致混凝土的需水量增加; 另一方面, 石粉颗粒的填充作用改善了混凝土体系的颗粒级配, 增强了水泥砂浆的保水性和黏聚性, 降低了混凝土体系的离析率。

对于 C30 混凝土而言, 其胶凝材料用量较少, 石粉的加入对其工作性能的优化效果更为明显。当石粉掺量达到 20% 时, 混凝土和易性并未出现劣化现象。但对于 C50 混凝土而言, 其胶凝材料用量和粉体颗粒相对较多, 尽管适量石粉的加入在一定程度上改善其工作性能, 但过量的石粉将会导致混凝土需水量骤增和浆体的流动性变差。如石粉掺量为 20% 时, C50 混凝土的工作性能出现过黏 (增加大量减水剂后并未改善)。总体来看, 适量石粉的加入有利于改善混凝土的工作性能, 但过量石粉的掺入会导致其需水量骤增和黏聚性变差。

表 5 混凝土拌合物工作性能

Table 5 Workability of concrete mixture

试样编号	减水剂 /kg	流动性	黏聚性	保水性	坍落度 /mm	扩展度 /mm	离析率 /%
C30	3.4	较差	骨料未包裹	有大量泌水	160	420	2.0
C30P5	3.4	较好	少量骨料未包裹	有明显泌水	180	450	1.2
C30P10	4.1	较好	较好	较差, 有少量泌水	185	500	1.0
C30P15	4.8	良好	较好	良好	190	540	0.8
C30P20	5.5	良好	良好	良好	185	580	0.8
C50	4.8	较好	较好	有明显泌水	190	500	0.9
C50P5	5.8	较好	较好	少量泌水	185	550	0.6
C50P10	6.8	良好	良好	良好	190	600	0.5
C50P15	7.7	良好	良好	良好	180	550	0.5
C50P20	9.7	较差	微黏	良好	165	400	0.3

## 2.2 早期收缩

由图 1 可以看出, 所有混凝土试样的收缩应变在 3~10 h 内均出现迅速上升, 10 h 后的收缩应变曲线变化开始有所减缓, 虽然混凝土总收缩率依旧在增加, 但其增加幅度明显减小。分析其原因为, 在 3~10 h 内水泥水化反应迅速 (混凝土初凝-终凝阶段), 混凝土中的水分被大量消耗, 混凝土收缩变形在该阶段内最为明显。随着混凝土龄期的增加 (超过 10 h 时) 水泥水化反应速率减慢, 收缩速率同样

变缓; 另外, 随着龄期的增加, 混凝土逐渐硬化, 其抵抗变形的能力逐渐增强, 这也就导致混凝土收缩曲线的变化逐渐趋于平稳。

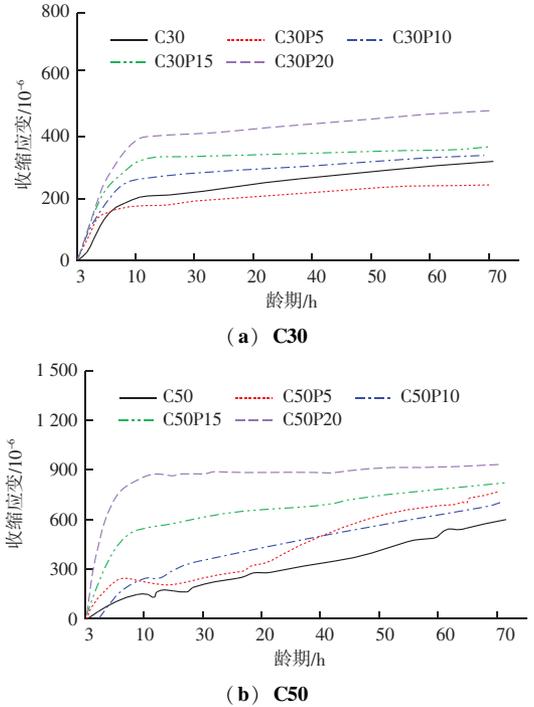


图 1 混凝土早龄期收缩曲线

Fig. 1 Early age shrinkage curve of concrete

与未掺石粉的对照组相比, 石粉掺量为 5% 的 C30 混凝土试样的收缩率有所降低; 但石粉掺量为 10%、15% 和 20% 的机制砂混凝土试样收缩率均明显增加。随石粉掺量增加, C50 混凝土收缩率增加。石粉掺量增大会增加混凝土早期收缩率有以下几个方面的原因: 第一, 石粉的掺入增加了小颗粒占比, 混凝土毛细管变细, 毛细管压力增加, 导致收缩增大; 第二, 比水泥颗粒更细的石粉颗粒代替水泥作为成核点, 促进了水泥水化产物的生成, 导致混凝土早期自收缩率增加; 第三, 由于石粉掺量增加, 混凝土变得致密, 混凝土表面的水很难向内迁移补充水分, 导致混凝土自收缩增大。另外, 混凝土体系更密实也会使水分不易向外散失, 干缩有所减小。这可能就是石粉掺量为 5% 时 C30 混凝土收缩率有所降低的原因。

## 2.3 早期开裂

由表 6 可以看出, 对于 C30 混凝土而言, 石粉掺量为 5% 的混凝土开裂效果并不明显, 这是因为, 石粉掺量较低时 C30 混凝土工作性能较差, 平板试

件制作过程大量水泥浆体流失, 导致混凝土试件的开裂面积较小, 但这并不意味着其具有较好的抗裂性能。当石粉掺量大于等于 10% 时, 较多石粉的加入使得混凝土体系的颗粒级配和密实度得到了优化, 其泌水、离析现象得到改善; 另一方面, 石粉的加入提升了混凝土体系的密实度, 有利于降低其早期开裂风险。总体来看, 石粉掺量大于 10% 后, C30 混凝土总开裂面积先减小后增加, 但变化幅值不太明显。

表 6 混凝土平板开裂试验结果

Table 6 Slab cracking test results of concrete

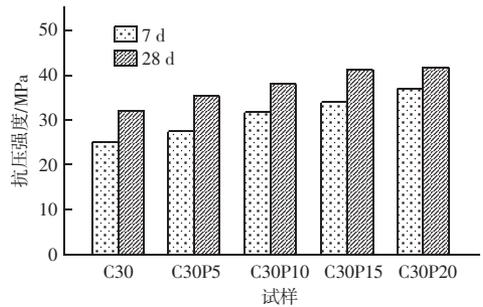
试样编号	每条裂缝的平均开裂面积 / (mm <sup>2</sup> /bar)	单位面积的裂缝数目 / (bar/m <sup>2</sup> )	单位面积上的总开裂面积 / (mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
C30	27.23	2.08	56.64
C30P5	38.76	2.08	80.62
C30P10	65.33	6.25	408.31
C30P15	53.69	6.25	335.56
C30P20	69.25	6.25	432.81
C50	62.23	8.33	518.38
C50P5	68.63	6.25	428.94
C50P10	72.60	6.25	453.75
C50P15	95.54	8.33	795.85
C50P20	106.86	10.41	1 112.41

对于 C50 混凝土而言, 混凝土试件的总开裂面积随着石粉掺量的增加先减小后增大, 石粉掺量为 5% 时混凝土开裂面积达到最小。分析其原因为, 尽管 C50 混凝土胶凝材料用量多, 细颗粒相对较为充足, 但不掺加石粉时其和易性仍相对较差, 平板试件成型过程中易出现“骨料下沉、浆体上浮”问题, 试件表面的抗裂强度较差、开裂面积较大。适量石粉的加入使得其工作性能、颗粒级配和密实度均得到了进一步改善, 降低了早期开裂风险和抗裂能力, 这就导致石粉掺量为 5%~10% 时混凝土试样的开裂面积较小。然而, 混凝土中的粉体细颗粒随石粉掺量的增加会进一步增多, 导致水泥砂浆黏稠度增加; 当石粉掺量超过 10% 后混凝土的黏聚性和保水性持续增强, 混凝土内部的自由水迁移困难, 收缩量增大, 混凝土开裂风险增加, 抗裂性能降低。

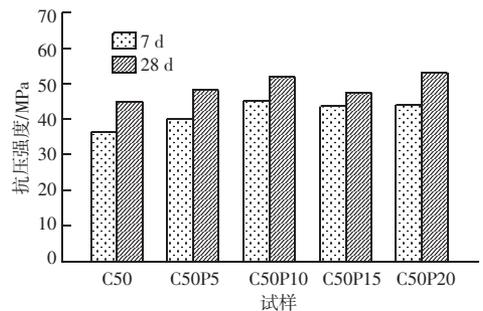
## 2.4 抗压强度

由图 2 可以看出, 随石粉掺量的增加, C30 和 C50 混凝土强度表现出不同的变化趋势。C30 混凝土随石粉掺量的增加强度值增加, C50 混凝土随石粉掺

量的增加强度值先增加后降低。其原因为, 当水胶比较大时, 胶凝材料用量较少, 混凝土体系的细颗粒占比较小, 混凝土密实度较差。石粉的掺入优化了混凝土体系级配的缺陷和孔隙结构, 其成核作用也有利于混凝土孔隙率的降低, 随石粉掺量的增加混凝土强度提高。但是当水胶比较小时, 混凝土体系的胶凝材料用量较多, 当石粉掺量控制在一定范围内时, 石粉的填充作用和成核作用可以优化混凝土的孔隙结构, 提高混凝土强度。然而, 当石粉掺量达到一定限值后, 混凝土孔隙已经较为密实, 石粉的填充和成核等有利作用趋向于饱和, 但是大量石粉带来的“界面缺陷”和“内部微裂缝”等劣化作用开始逐渐显著, 导致混凝土强度有所降低。



(a) C30



(b) C50

图 2 混凝土抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of concrete

对于不同强度等级的混凝土而言, 石粉掺量对 7 d 强度的提升效果均大于 28 d 强度。这主要是因为, 石粉成核作用对水化产物的生成有促进作用, 其在水泥水化反应早期的体现更为显著。随着龄期的增加, 水泥水化反应也逐渐放缓甚至趋向于完成。因此, 其成核作用对后期强度的影响随混凝土龄期的增加逐渐减小。

## 2.5 NMR

由图 3 和表 7 可以看出, 当石粉掺量小于 10%

## 材料科学

时, 机制砂混凝土的  $T_2$  谱特征峰面积以及总峰面积均随石粉掺量的增加而减小。分析其原因为, 石粉具有一定的填充作用, 石粉的掺入降低了机制砂混凝土体系的孔隙率; 另一方面, 石粉可以成为水泥水化的成核点, 促进水泥水化反应的进行和产物的形成, 优化孔结构和改善界面黏结性能。这两个方面的原因使得机制砂混凝土的孔隙结构得到优化, 孔隙率降低。然而, 当石粉掺量大于 10% 时,  $T_2$  谱曲线的变化较不明显。这是因为, 石粉掺量较高时, 混凝土的孔隙已经较为密实, 石粉的填充和成核等作用趋向于饱和, 此时, 石粉的继续增加不仅不会降低混凝土的孔隙率, 甚至会导致部分孔隙的劣化

(可能由“最紧密结构被破坏”和“内部微裂缝扩张”等劣化作用引起)。

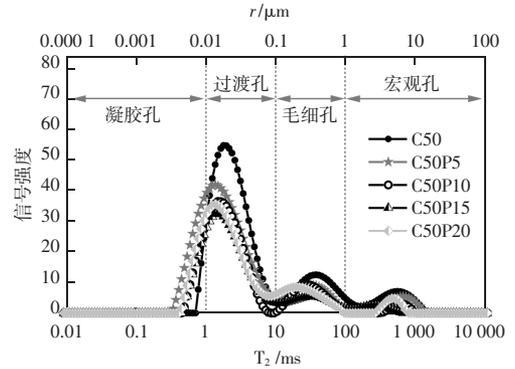


图3 C50 混凝土  $T_2$  曲线  
Fig. 3  $T_2$  curve of C50 concrete

表7  $T_2$  谱特征峰峰面积及孔隙分布

Table 7 The characteristic peak area of  $T_2$  spectrum and pore size distribution

试样编号	$T_2$ 曲线面积					孔隙占比 %			
	总峰面积	0.01 ~ 1 ms	1 ~ 10 ms	10 ~ 100 ms	> 100 ms	0.0001 ~ 0.01 $\mu\text{m}$	0.01 ~ 0.1 $\mu\text{m}$	0.1 ~ 1 $\mu\text{m}$	> 1 $\mu\text{m}$
C50	1 224.7	48.3	841.8	211.6	123.0	3.9	68.7	17.3	10.0
C50P5	1 089.3	240.0	633.6	159.5	56.2	22.0	58.2	14.6	5.2
C50P10	786.8	119.4	510.6	134.3	22.6	15.2	64.9	16.1	3.9
C50P15	725.7	113.3	478.9	98.8	34.8	15.6	66.0	13.6	4.8
C50P20	836.4	148.5	509.6	143.4	34.9	17.8	60.9	17.2	4.2

## 2.6 机理分析

结合上述试验结果和现有研究成果来看, 机制砂中石粉对水泥基材料可能存在填充、成核、稀释、化学、游离和微裂缝等多种作用。当石粉掺量小于最佳掺量值时, 石粉对混凝土微观结构主要表现为成核和填充作用; 尽管石粉掺量增加引起比表面积增大大会导致其需水量增大, 但其工作性能、混凝土力学性能和耐久性能均会得到明显地提升。石粉掺量大于一定限值后, 石粉对混凝土微观结构的影响表现为多元化, 导致混凝土宏观性能出现无规律变化。

总体来看, 适量石粉的加入有利于机制砂混凝土性能的提升, 但目前关于其最佳掺量值尚未得到统一。Liu 等<sup>[15]</sup> 则提出, 机制砂混凝土的最佳石粉掺量取决于许多参数, 如水胶比、胶凝材料用量、石粉的特性 (比如岩性、粒度分布、化学成分等)、级配、骨料形状等。此次试验数据结果也同样表明, 不同强度等级的机制砂混凝土中石粉掺量存在较大差异。在机制砂的工程应用中, 石粉掺量的控制应结合工程环境和实际使用情况确定, 这将更有利于扩大天然砂资源贫乏区域的机制砂混凝土应用范围。

## 3 结论

为研究石粉掺量对机制砂混凝土早期体积稳定性的影响规律和影响机理, 测试了 C30 和 C50 两种不同强度等级和 4 种不同石粉掺量机制砂混凝土的和易性、早期收缩和抗裂性能、抗压强度和孔隙分析。得到主要结论如下:

(1) 掺加适量石粉可有效改善混凝土拌合物的保水性、黏聚性和抗离析性, 有利于提高机制砂混凝土的抗裂性能和抗压强度; 过量石粉的掺加会增加混凝土的需水量和早龄期收缩率, 降低混凝土抗裂性能和强度。

(2) 石粉对混凝土硬化后强度的影响远小于其对早龄期体积稳定性的影响; 相比于高强度混凝土, 石粉对 中低强度混凝土性能的改善效果更为显著。对于 C30 机制砂混凝土, 石粉掺量可放宽至 20%; 但对于 C50 机制砂混凝土, 石粉掺量应严格控制于 10% 以内。

(3) 机制砂混凝土的最佳石粉掺量取决于许多参数, 如水胶比、胶凝材料用量、石粉特性 (包括岩性、粒度分布、化学成分等)、 (下转第 90 页)

## 岩土力学

煤灰综合利用, 2020, 34 (4): 10-13.

- [3] 孙志明. 杂填土边坡稳定性分析及其抗滑桩优化设计 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (2): 28-31.
- [4] 郝广杰. 考虑土层变形特征的边坡稳定性分析方法研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (2): 62-67.
- [5] 张超, 魏松涛, 刘彬, 等. 山区高速公路灰岩质高陡边坡失稳与加固措施分析 [J]. 公路, 2023, 68 (7): 264-269.
- [6] 宋洋, 马旭琪, 赵常青, 等. 隐伏非贯通软弱夹层岩质边坡剪切蠕变特征及稳定性研究 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (4): 755-763.
- [7] 苏培东, 唐雨生, 马云长, 等. 基于应变软化的软弱夹层边坡渐进破坏 [J]. 长江科学院院报, 2022, 39 (6): 69-75.
- [8] 胡斌, 刘杨, 常书祥, 等. 含缓倾软弱夹层矿山高边坡滑动面位置与空间形态反演 [J]. 金属矿山, 2021 (7): 40-49.
- [9] 许四法, 姜伙军, 孙昌一, 等. 降雨强度对双层软弱夹层边坡稳定性影响分析 [J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50 (5):

492-497.

- [10] 刘杨, 彭亮, 祝鑫, 等. 降雨条件下含缓倾软弱夹层矿山高边坡稳定性分析 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42 (7): 71-79.
- [11] 陈权川, 徐庆方, 谢配红, 等. 含软弱夹层缓倾顺层岩质边坡中抗滑桩-键组合结构的应用 [J]. 安全与环境工程, 2023, 30 (4): 131-140.
- [12] 王来贵, 马玮航, 赵娜, 等. 含软弱夹层顺层岩质边坡变形-滑动演化过程研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2023, 42 (2): 129-135.
- [13] 陈云生, 米德才. 天峨龙滩特大桥下老岸拱座基坑边坡稳定性分析及加固方案 [J]. 公路, 2023 (2): 54-60.
- [14] 郭献章, 杨治华, 李凤柱, 等. 含软弱夹层顺层岩质边坡锚固优化分析 [J]. 金属矿山, 2022 (11): 186-192.
- [15] 李华勇, 王志鹏. 软弱夹层边坡抗滑稳定分析与抗滑桩桩位选择 [J]. 水运工程, 2021 (9): 187-193.

(上接第 48 页)

骨料级配、骨料形状等; 最佳石粉掺量的控制应进一步结合工程环境和实际使用情况确定。

## 参 考 文 献

- [1] 宋少民, 王毅. 机制砂片状颗粒含量检测方法研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 32-37.
- [2] 杨彬, 张志萱, 王啸夫, 等. 石粉含量对混凝土工作性能和力学性能影响的研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2017 (2): 36-37, 41.
- [3] 于本田, 刘通, 王焕, 等. 花岗斑岩石粉含量对混凝土性能及微观结构的影响 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2022, 52 (5): 1052-1062.
- [4] 刘通, 于本田, 王焕, 等. 高吸附性石粉含量对水泥砂浆力学性能及微观结构的影响 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (8): 16-22.
- [5] CELIK T, MARAR K. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26 (4): 1121-1130.
- [6] AHMED A E, EL - KOURD A A. Properties of concrete incorporating natural and crushed stone very fine sand [J]. ACI Materials Journal, 1989, 86 (4): 417-424.
- [7] 王雨利, 董颖, 杨玉辉, 等. 石粉对机制砂混凝土性能的影响 [J]. 混凝土, 2006 (11): 44-45, 49.

- [8] 何世钦, 吕森, 马冬哲, 等. 高石粉含量机制砂自密实混凝土配制方法试验研究 [J]. 混凝土, 2019 (11): 132-135, 140.
- [9] 方国富, 游秋森, 张显羽, 等. 硅质机制砂对混凝土性能影响机理研究 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49 (4): 81-84, 144.
- [10] 杨奕菲, 刘嘉良, 巩璇, 等. 石粉对水泥净浆流变性能的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (6): 105-109.
- [11] SOROKA I, STERN N. Calcareous fillers and the compressive strength of portland cement [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6 (3): 367-376.
- [12] 史才军, 王德辉, 贾煌飞, 等. 石灰石粉在水泥基材料中的作用及其耐久性的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2017, 45 (11): 1582-1593.
- [13] WANG D H, SHI C J, FARZADNIA N, et al. A review on use of limestone powder in cement - based materials: mechanism, hydration and micro - structures [J]. Construction and Building Materials, 2018, 181: 659-672.
- [14] 林基泳, 蒋勇, 吴兴颜, 等. 石粉对混凝土性能影响的研究现状 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (12): 3842-3848.
- [15] LIU T, ZHU L H, YU B T, et al. Experimental studies to investigate efficacies of granite porphyry powder as homologous manufactured sand substitute [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2023, 21 (4): 307-321.