

# 机制砂片状颗粒含量检测方法研究

Research on the Detection Method of Flaky Particle Content in Machine-made Sand

宋少民, 王毅

(北京建筑大学, 建筑结构与环境修复功能材料北京市重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 为了探究机制砂片状颗粒的定义及其条形筛筛孔宽度是否有优化的可能性, 通过改变条形筛筛孔宽度的条形筛与国标条形筛 (0.45 倍筛) 对比, 研究 0.55 倍、0.60 倍条形筛的片状颗粒检出率; 条形筛筛除片状颗粒后, 规则颗粒对胶砂性能的影响; 明确最合适的条形筛筛孔宽度。结果表明: 筛孔宽度为机制砂颗粒所属粒径范围平均粒径 0.55 倍的条形筛 (0.55 倍筛) 相比于国标条形筛 (0.45 倍筛) 筛分效率高, 片状颗粒评价更合理, 其规则颗粒对胶砂和混凝土性能最有利; 相应 I 类机制砂的片状颗粒含量宜控制在 20% 以内。

**关键词:** 机制砂; 片状颗粒; 条形筛; 胶砂性能; 混凝土性能; 筛孔宽度

中图分类号: TU528.041

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 05-0032-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.007

SONG Shaomin, WANG Yi

(Beijing Key Laboratory of Building Structure and Environmental Remediation Functional Materials, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** This article aims to explore the definition of mechanism sand like particles and whether there is a possibility of optimizing the width of the strip sieve holes. By changing the width of the strip sieve holes, a comparative study was conducted between the modified strip sieve and the national standard strip sieve (0.45 times sieve) to investigate the detection rate of flake particles in the strip sieve and the effect of regular particles on the performance of the adhesive sand after removing flake particles. Based on the experimental results, the most suitable width of the strip sieve holes was determined. The results showed that a strip sieve with a mesh width of 0.55 times the average particle size range of the mechanism sand particles (0.55 times sieve) had higher screening efficiency compared to the national standard strip sieve (0.45 times sieve), and the evaluation of flake particles was more reasonable. Its regular particles were most beneficial to the performance of the binder and concrete; The threshold for the content of flake particles in corresponding Class I mechanism sand should be controlled within 20%.

**Keywords:** machine-made sand; flaky particles; bar screen; mortar performance; concrete performance; mesh width

## 0 引言

砂是混凝土的重要组成材料。2015 年以后, 机制砂替代河砂迅速成为主要的建设用砂, 机制砂的质量对混凝土的性能影响较大。GB/T 14684—2022《建设用砂》(以下简称“规范”)中对机制砂的定义为: 以岩石、卵石、矿山废石和尾矿等为原料, 经除土处理, 由机械破碎、整形、筛分、粉控等工艺制成的, 级配粒形和石粉含量满足要求且粒径小

作者简介: 宋少民 (1965—), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 高性能混凝土材料。

通信作者: 王毅 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 建筑材料。

收稿日期: 2024-03-01

于 4.75 mm 的颗粒<sup>[1]</sup>。由于母岩的材性和破碎工艺等不同,与河砂相比,机制砂的表面粗糙,其形状不规则,多棱角,片状颗粒含量较多<sup>[2]</sup>。对于机制砂颗粒形状对其胶砂和混凝土性能的影响,学者们已经做了一些研究:周新文<sup>[3]</sup>通过不规则机制砂颗粒对砂浆流变性能的影响研究发现,不规则机制砂颗粒对砂浆的流动性有阻碍作用,导致砂浆表观黏度增大,流动性变差;宋少民等<sup>[4]</sup>首次定义了机制砂片状颗粒,即粒径 1.18 mm 以上的机制砂颗粒中最小一维尺寸小于该颗粒所属相应粒级平均粒径 0.45 倍的颗粒。并研发了条形孔筛检测方法;宋少民等<sup>[5]</sup>通过对比研究掺加机制砂片状颗粒 10%、20%、30% 的水泥胶砂和混凝土性能的差异,得出了片状颗粒含量的增加会导致水泥胶砂和混凝土和易性、强度、耐久性降低的结论;黄志刚等<sup>[6]</sup>研究了片状颗粒含量对胶砂和混凝土和易性和强度以及界面微观结构和孔隙结构的影响,发现片状颗粒增多,砂浆流动度和强度降低,并且会增大砂浆的孔隙率,增大多害孔的比例,弱化水泥砂浆与机制砂的界面过渡区,导致砂浆和混凝土强度下降,抗渗性减弱。

《规范》颁布后,学者们针对机制砂技术指标和检测方法进行了研究,发现粒径在 1.18~2.36 mm 条形孔筛的筛出率较低,考虑《规范》中颗粒所属粒级的平均粒径的 0.45 倍筛孔宽度是否合理,为此,以条形筛的筛孔宽度为主要研究对象,通过改变筛孔宽度来探究其对胶砂和混凝土性能的影响。利用不同筛孔宽度条形筛筛出机制砂规则颗粒进行胶砂试验,控制机制砂级配不变,在相同水胶比情况下,对比胶砂流动度和强度,综合试验结果明确最优的条形筛筛孔宽度后,再进一步探究使用最优筛孔宽度的条形筛时,片状颗粒含量对胶砂流动度和强度的影响,以及片状颗粒含量对混凝土工作性、强度和电通量的影响。基于此来探究机制砂片状颗粒含量的控制阈值。通过对机制砂粒形检测方法的优化来更合理把控机制砂的粒形。

## 1 原材料与试验方案

### 1.1 原材料

水泥采用金隅生产的 P·O 42.5 水泥,7、28 d 抗压强度分别为 30.2、48.4 MPa,3、28 d 抗折强度

分别为 6.0、8.4 MPa;粉煤灰为 F 类 II 级粉煤灰,细度(45 μm 筛筛余)为 15.5%,需水量比为 101%,活性指数为 76%;矿渣粉为河北产 S95 矿渣粉,比表面积 445 m<sup>2</sup>/kg,烧失量 0.13%,活性指数 95%;碎石为 5~25 连续级配石灰岩碎石,主要物理力学性能见表 1,级配见表 2;外加剂为聚羧酸高效减水剂母液,减水率 40%。

表 1 石灰岩碎石主要物理力学性能  
Table 1 Basic physical and mechanical properties of limestone crushed stone

表观密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	堆积密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	空隙率/%	压碎指标/%
2770	1580	43	7.5

表 2 石灰岩碎石级配  
Table 2 Limestone crushed stone grading

骨料粒径/mm	骨料组合比例/%			
	5~10 mm	10~16.5 mm	16.5~20 mm	20~25 mm
5~25	9.0	63.0	20.6	7.0

符合《规范》连续级配要求;细骨料为铁尾矿机制砂,细度模数为 2.6,级配区为 2 区中砂,主要技术指标见表 3,机制砂级配曲线如图 1 所示。

表 3 机制砂主要技术指标  
Table 3 Basic physical and mechanical properties of machine-made sand

表观密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	堆积密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 / %	石粉含量 / %	MB 值 / (g/kg)	空隙率 / %
2710	1599	0.3	3	0.5	41

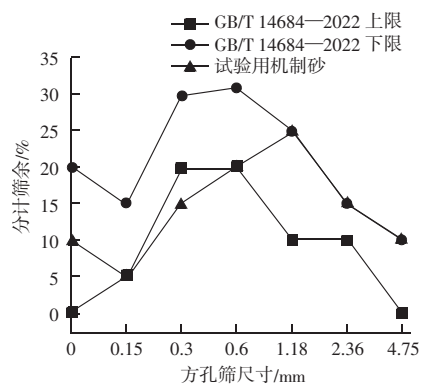


图 1 机制砂分计筛余级配曲线

Fig. 1 Curve particle size sieve residue of machine-made sand

### 1.2 试验方案

(1) 检测方法 《规范》中机制砂片状颗粒含量的检测方法为条形孔筛法,筛孔宽度为颗粒所属粒级的平均粒径的 0.45 倍,即国标条形筛(0.45 倍筛)。先将条形孔筛筛孔宽度改为颗粒所属粒级的平均粒径的 0.55 和 0.60 倍,分别命名为 0.55 倍筛、0.60 倍筛。改变后的条形孔筛基本参数见表 4。

## 材料科学

表4 改变后的条形孔筛基本参数 /mm

Table 4 Basic parameters of the modified strip-shaped hole sieve

条筛类型	孔纵向间距	孔横向间距	筛孔长度	筛孔宽度	适用粒级
					范围
0.55 倍筛	1.5	1.5	15	1.1	1.18~2.36
			20	1.9	2.36~4.75
			30	3.9	4.75~9.50
0.60 倍筛	1.5	1.5	15	1.2	1.18~2.36
			20	2.1	2.36~4.75
			30	4.3	4.75~9.50

根据研究目的,采用国标条形筛(0.45倍筛)、0.55倍筛、0.60倍筛检测500g机制砂砂样片状颗粒的筛余量。表5为不同规格条形筛检测片状颗粒的筛余量测定结果,相比于国标条形筛(0.45倍筛),0.55倍筛和0.60倍筛的片状颗粒检出率大幅度提高。

表5 不同规格条形筛检测片状颗粒的筛余量

Table 5 Screen residue for detecting flaky particles using different specifications of strip sieves

筛分项目	骨料分计质量/g	筛下颗粒		
		国标条形筛(0.45倍筛)	0.55倍筛	0.60倍筛
4.75~9.5m/g	40.83	13.31	20.13	24.38
2.36~4.75mm/g	90.13	5.50	29.65	37.94
1.18~2.36mm/g	108.38	20.81	37.71	54.62
筛下颗粒质量总计/g		39.9	87.5	117.0
片状颗粒含量/%		8.0	17.5	23.4

(2) 机制砂胶砂级配和配合比 采用国标条形筛(0.45倍筛)、0.55倍筛和0.60倍筛对机制砂进行筛分,将筛分出的片状颗粒和规则颗粒保留。按照表6所示机制砂颗粒级配进行掺配,控制机制砂级配相同。

采用表6机制砂级配,按照水泥450g、机制砂1350g以两种不同水胶比0.50和0.45配合比配制水泥胶砂。

表6 不同条形筛筛除片状颗粒的机制砂分计筛余及空隙率测定结果

Table 6 Packing void ratio results and particle size sieve residue of machine-made sand with different strip-shaped hole sieve

条筛类型	分计筛余/%										空隙率/%
	4.75 mm		2.36 mm		1.18 mm		0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	筛底	
	BP	GP	BP	GP	BP	GP					
国标条形筛(0.45)	0	10	0	15	0	25	20	15	5	10	40.3
0.55倍筛	0	10	0	15	0	25	20	15	5	10	39.8
0.60倍筛	0	10	0	15	0	25	20	15	5	10	40.0

注:BP、GP分别表示片状颗粒、规则颗粒。

使用同种砂源,采用0.55倍筛进行筛分,掺配成不同片状颗粒含量后作为胶砂试验用砂。根据表7

所示颗粒级配要求进行掺配,配制出不同片状颗粒含量的机制砂试样。

表7 不同片状颗粒含量的机制砂分计筛余

Table 7 Particle size sieve residue of machine-made sand with different content of flake particles /%

片状颗粒含量	4.75 mm		2.36 mm		1.18 mm		0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	筛底
	BP	GP	BP	GP	BP	GP				
0	0	10	0	15	0	25	20	15	5	10
10	5	5	2	13	3	22	20	15	5	10
15	5	5	5	10	5	20	20	15	5	10
20	5	5	10	5	5	20	20	15	5	10
30	10	0	10	5	10	15	20	15	5	10
45	10	0	15	0	20	5	20	15	5	10

采用表7的片状颗粒含量的机制砂,按照水泥450g、机制砂1350g以两种不同水胶比0.50和0.45配合比配制出不同片状颗粒含量的水泥胶砂。

(3) 机制砂混凝土配合比 采用表7片状颗粒含量的机制砂制备不同片状颗粒含量的C30、C50混凝土,配合比见表8。

表8 机制砂混凝土配合比

Table 8 Mix proportion of machine-made sand concrete

强度等级	混凝土配合比/(kg/m <sup>3</sup> )					减水剂/%	
	水泥	粉煤灰	矿粉	机制砂	碎石		
C30	208	95	76	801	1021	170	0.5
C50	325	125	50	689	1047	165	0.7

## 1.3 试验方法

(1) 胶砂性能:根据GB/T 2419—2005测试胶砂流动度,按GB/T 17671—1999来测定胶砂7、28d抗压、抗折强度。

(2) 混凝土性能:根据GB/T 50080—2016进行混凝土坍落度、扩展度试验;依据GB/T 50081—2019进行混凝土抗压强度试验,测试龄期为7、28d;根据GB/T 50082—2009中的电通量法测定抗氯离子渗透性,测试龄期为56d。

## 2 结果与分析

## 2.1 不同条形筛筛孔宽度对于胶砂性能的影响

图2用0.55倍筛和0.60倍筛筛除片状颗粒的水泥胶砂要大于用国标条形筛(0.45倍筛)筛除片状颗粒的水泥胶砂的流动度,前两者在流动度上相差不大,0.60倍筛筛除片状颗粒的水泥胶砂流动度略高。当水胶比为0.45时,与0.60倍筛筛除片状颗粒的水泥胶砂相比,用国标条形筛(0.45倍筛)和用

0.55 倍筛筛除片状颗粒的水泥胶砂流动度分别下降了 6.3%、1.1%。这主要是因为 0.60 倍筛筛出的规则颗粒相比于其他两种棱角更小,更圆润,故具有更低的比表面积<sup>[7]</sup>,浆体数量不变时,包裹在机制砂表面的浆体润滑层厚度增多,导致胶砂流动性提高。

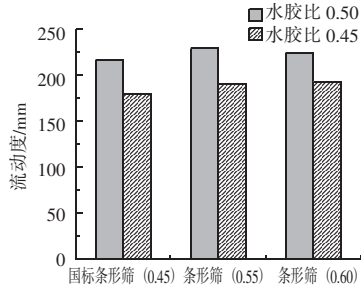


图 2 不同条形筛筛除片状颗粒的机制砂胶砂流动度

Fig. 2 Fluidity of machine-made sand mortar with different strip-shaped hole sieve screens for removing flake particles

图 3 为用不同条形筛筛除片状颗粒的胶砂抗压、抗折强度情况。水胶比为 0.50 时,与用 0.55 倍筛筛除片状颗粒的胶砂相比,用国标条形筛 (0.45 倍筛) 筛除片状颗粒的胶砂 7、28 d 抗折强度降低了 12.1%、11.3%,用条形筛 (0.60) 筛除片状颗粒的胶砂 7、28 d 抗折强度降低了 15.2%、6.3%。从抗压强度上看与用 0.55 倍筛筛除片状颗粒的胶砂相比,用国标条形筛 (0.45 倍筛) 筛除片状颗粒的胶砂 7、28 d 抗压强度降低了 7.7%、9.7%,用 0.60 倍筛筛除片状颗粒的胶砂 7、28 d 抗压强度降低了 5.3%、12.2%。

同理当水胶比为 0.45 时,与用 0.55 倍筛筛除片状颗粒的胶砂相比,用国标条形筛 (0.45 倍筛) 筛除片状颗粒的胶砂 7、28 d 抗折强度降低了 9.7%、8%,而用 0.60 倍筛筛除片状颗粒的胶砂 7、28 d 抗折强度降低了 6.9%、10%。与用 0.55 倍筛筛除片状颗粒的胶砂相比,用国标条形筛 (0.45 倍筛) 筛除片状颗粒的胶砂 7、28 d 抗压强度降低了 5.1%、12.5%,而用 0.60 倍筛筛除片状颗粒的胶砂 7、28 d 抗压强度降低 3.8%、8.7%。试验结果说明,当采用不同筛孔宽度的条形筛时,对无片状颗粒的机制砂胶砂强度存在一定影响。且对抗折强度的影响高于抗压强度的影响。在相同条件下,用 0.55 倍筛筛除片状颗粒的机制砂水泥胶砂强度最高。

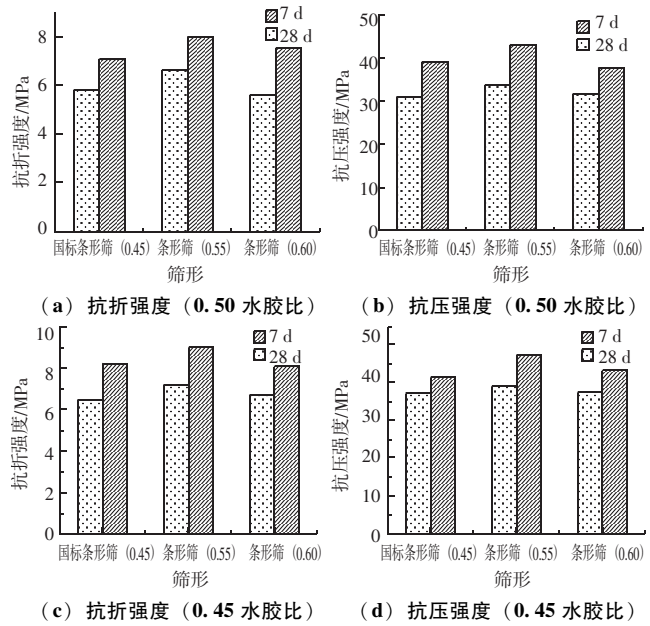


图 3 不同条形筛筛除片状颗粒的机制砂胶砂强度

Fig. 3 Strength of mortar with different strip-shaped hole sieve screens for removing flake particles

## 2.2 片状颗粒含量对胶砂性能的影响

综合对比发现,0.55 倍筛筛出的规则颗粒粒形最好,接下来要探究当采用 0.55 倍筛时,片状颗粒含量对胶砂及混凝土性能的影响。由图 4 片状颗粒含量不同的机制砂胶砂流动度结果可以看出,片状颗粒含量的增加会导致胶砂流动度的降低。当水胶比为 0.5 时,片状颗粒含量为 10%、15%、20%、30%、45% 的胶砂流动度较片状颗粒含量为 0 的胶砂流动度分别下降了 2.6%、4.4%、4.8%、5.2%、8.4%,片状颗粒含量超过 20% 时,胶砂流动度降低较明显。当水胶比为 0.45 时,片状颗粒含量为 20% 时,流动度降幅超过 5%。只是由于片状颗粒含量越高,砂子的总表面积增大,机制砂表面的浆体润滑层厚度减少,流动度降低。

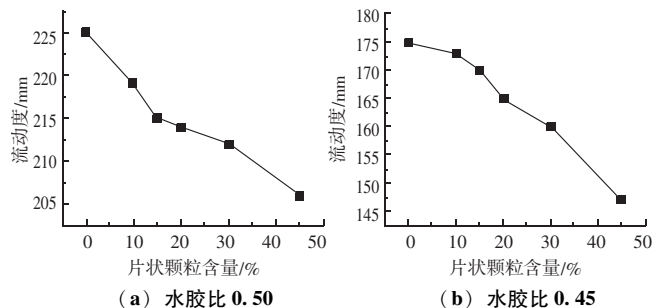


图 4 不同片状颗粒含量的机制砂胶砂流动度

Fig. 4 Fluidity of machine-made sand mortar with different content of flake particles

## 材料科学

由图5可以看出,水胶比为0.45时,与片状颗粒含量为0的胶砂相比,片状颗粒含量为15%、20%、30%的胶砂7d抗折强度也有不同程度的降低,降低了8%、10.6%、13.3%,28d抗折强度分别降低了10.3%、14.4%、24.7%。7d抗压强度分别降低了6.9%、9%、17.7%,28d抗压强度分别降低了4.1%、10.2%、14.3%。

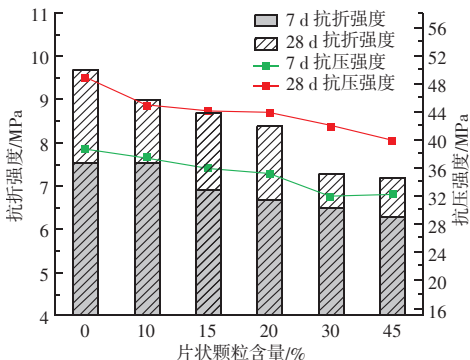


图5 不同片状颗粒含量的机制砂胶砂强度

Fig. 5 Strength of mortar with different strip-shaped hole sieve screens for removing flake

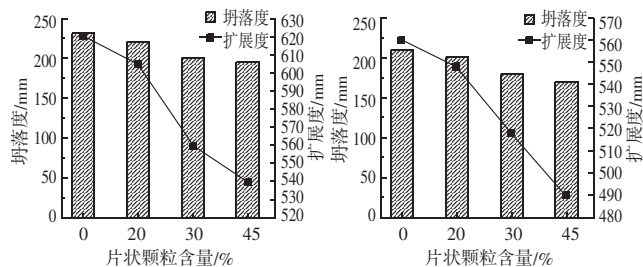
由试验结果可知,随着砂样中片状颗粒含量的增加会导致胶砂抗压强度和抗折强度不同程度的降低。这是由于机制砂片状颗粒与正常颗粒和规则颗粒相比,抗压碎能力较弱。且在胶砂试块振捣成型过程中,易发生水平定向排列,使片状颗粒下表面浆体的孔隙率提高,导致颗粒与浆体的界面过渡区的缺陷增多。

### 2.3 片状颗粒含量对混凝土性能的影响

由图6可知,片状颗粒含量对不同强度等级的混凝土均有显著影响。由C30混凝土工作性结果可知,片状颗粒含量为0的混凝土扩展度为620mm,坍落度为230mm,片状颗粒含量为20%,坍落度降低4.3%,扩展度降低2.4%。片状颗粒含量为45%,混凝土坍落度下降15.2%,扩展度下降12.9%。片状颗粒含量为0的C50混凝土扩展度为520mm,坍落度为210mm,当片状颗粒含量达到30%,发现坍落度下降14.3%,而扩展度下降7.5%。片状颗粒含量增加到45%时,坍落度下降19.0%,扩展度下降了12.5%。

图7为片状颗粒含量不同的C30和C50混凝土抗压强度测试结果。随着片状颗粒含量增大,混凝土强度随之降低。对于C30混凝土,从7d强度上

看,片状颗粒含量为20%、30%、45%相较于片状颗粒含量为0的混凝土抗压强度分别下降3%、9.6%、13.2%。由28d抗压强度看出,抗压强度分别下降3%、9.6%、13.2%,28d强度分别下降6.1%、8.1%、12.1%。对于C50混凝土,片状颗粒含量为20%、30%、45%相比片状颗粒含量0的混凝土,7d抗压强度分别下降9.2%、11.6%、13.5%,28d强度下降7.4%、13%、15.6%。



(a) C30

(b) C50

图6 不同片状颗粒含量的混凝土工作性

Fig. 6 Workability of machine-made sand concrete with different content of flake particles

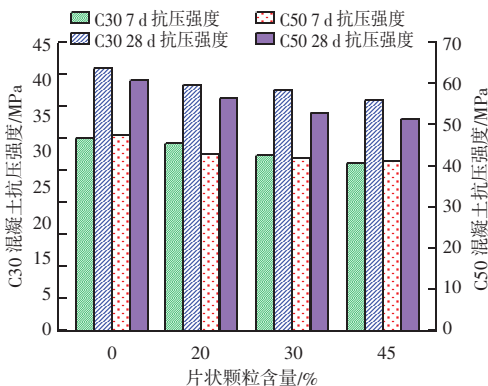


图7 不同片状颗粒含量的混凝土抗压强度

Fig. 7 Strength of machine-made sand concrete with different content of flake particles

由图8可知,对于C30混凝土,片状颗粒含量为30%、45%时,相比于片状颗粒含量0的混凝土,56d龄期混凝土电通量增加了16.1%、25%。对于C50混凝土,片状颗粒含量为20%、30%、45%时,相比于片状颗粒含量0的混凝土,56d龄期混凝土电通量增加了11%、21.1%、30%。由此,混凝土的电通量也受片状颗粒含量的影响,当片状颗粒含量增加到30%时,电通量增加20%以上。由于片状颗粒含量增多,在相同的混凝土配合比情况下,导致混凝土内部孔隙结构变差,抗渗性降低。

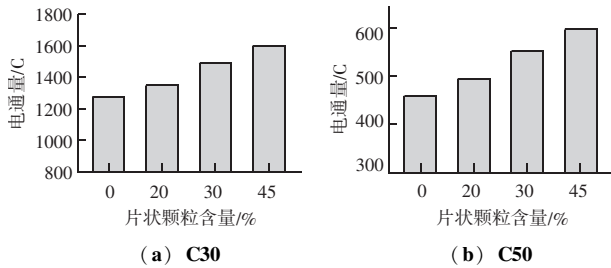


图8 不同片状颗粒含量的混凝土电通量  
Fig.8 Strength of machine-made sand concrete with different content of flake particles

### 3 结论

(1) 相比于 GB/T 14684—2022《建设用砂》中规定的颗粒所属粒级的平均粒径的 0.45 倍筛孔宽度, 筛孔宽度为颗粒所属粒级范围的平均粒径 0.55 倍的条形筛, 可以提高不良粒形的检出效率。用该条形筛筛除片状颗粒后的规则颗粒对胶砂的流动性和强度更有利。

(2) 当使用筛孔宽度为颗粒所属粒级的平均粒径 0.55 倍的条形筛作为片状颗粒检测方法时, 对于

I 类机制砂而言, 片状颗粒含量应控制在 20% 以下, 建议相应的机制砂片状颗粒定义调整为粒径 1.18 mm 以上的机制砂颗粒中, 最小一维尺寸小于该颗粒所属相应粒级的平均粒径 0.55 倍的颗粒。

### 参 考 文 献

- [1] 建设用砂: GB/T14684—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [2] 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.
- [3] 周新文. 机制砂对水泥砂浆流变性能的影响及作用机理 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [4] 宋少民, 刘娟红, 郭丹, 等. 一种混凝土机制砂片状颗粒含量测定方法: CN104390879A [P]. 2015-03-04.
- [5] 宋少民, 郭丹. 机制砂片状颗粒含量对水泥胶砂与混凝土性能的影响 [J]. 混凝土, 2015 (12): 60-62.
- [6] 黄志刚, 徐志华, 李北星, 等. 机制砂片状颗粒对砂浆和混凝土性能与微观结构的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (6): 1981-1989.
- [7] 季韬, 李锋, 庄一舟, 等. 机制砂比表面积对混凝土性能的影响 [J]. 混凝土, 2011 (2): 80-82.

(上接第 31 页)

Building Materials, 2013, 38: 306-315.

- [2] WEI D, DU C, LIN Y, et al. Impact factors of hydration heat of cemented tailings backfill based on multi-index optimization [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2020, 18: 100601.
- [3] CHU I, KWON S H, AMIN M N, et al. Estimation of temperature effects on autogenous shrinkage of concrete by a new prediction model [J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 171-182.
- [4] DO T A, HA L M, NGUYEN Q T, et al. Evaluation of methods for analyzing early-age cracking risk in concrete walls of tunnel structures [J]. Transport and Communications Science Journal, 2020, 71 (7): 746-759.
- [5] SCHACKOW A, EFFTING C, GOMES I R, et al. Temperature variation in concrete samples due to cement hydration [J]. Applied thermal engineering, 2016, 103: 1362-1369.
- [6] 李之达, 孙绪涛. 考虑管冷的大体积混凝土水化热初期温度场研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2018, 37 (6): 1-7.
- [7] 侯炜, 宋一凡, 马超. 基于管冷系统的大体积混凝土水化热时

变温度效应 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2021, 41 (4): 65-67.

- [8] HUANG Y, LIU G, HUANG S, et al. Experimental and finite element investigations on the temperature field of a massive bridge pier caused by the hydration heat of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 192: 240-252.
- [9] 黄海东, 徐名遥, 李鸣, 罗超. 含有冷管的混凝土承台瞬态温度场及精细化分析模型研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2022, 41 (8): 102-111.
- [10] 汪建群, 魏桂亮, 刘杰, 陈杰, 等. 跨海大桥大体积混凝土承台水化热实测与分析 [J]. 桥梁建设, 2020, 50 (3): 25-31.
- [11] 大体积混凝土施工标准: GB 50496—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [12] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [13] 大体积混凝土温度测控技术规范: GB/T 51028—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.