

文章编号:1007-9629(2022)02-0191-08

# 考虑石粉对流变性影响的自密实混凝土配合比设计

汤 明<sup>1,\*</sup>, 杨 松<sup>1,2</sup>, 郭加付<sup>1</sup>, 张 超<sup>1</sup>, 吕 淼<sup>2</sup>

(1. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100048;

2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**以净浆流变阈值理论为基础, 采用在净浆中加入石粉的试验方法确定净浆流变性, 通过粉煤灰替代率不同的机制砂砂浆基准需水率试验来确定砂浆的堆积密度, 进行了机制砂自密实混凝土配合比试验, 研究了石粉对净浆流变参数、净浆流变阈值和混凝土自密实区域的影响。结果表明: 相同的水粉比下, 掺入石粉后净浆的屈服强度和塑性黏度都明显大于未掺石粉的净浆; 采用堆积密度修正的净浆阈值所确定的净浆自密实区域相较于未掺石粉的净浆自密实区域向水粉比较大的方向移动, 考虑石粉对净浆流变性影响后, 净浆的自密实区域和机制砂混凝土的自密实区域吻合。

**关键词:**机制砂自密实混凝土; 石粉; 流变性; 净浆阈值; 配合比设计

中图分类号: TU528.062

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.02.012

## Mix Design of Self-compacting Concrete Considering the Effect of Limestone Powder on Rheology

TANG Ming<sup>1,\*</sup>, YANG Song<sup>1,2</sup>, GUO Jiafu<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>, LÜ Miao<sup>2</sup>

(1. Power China Road Bridge Group Co., Ltd., Beijing 100048, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Based on the rheological threshold theory of paste, the rheology of paste was determined by paste test with limestone powder(LP) as powder and the packing density of mortar was calculated by the basic water-powder ratio of manufactured sand mortar with different fly ash(FA) contents. Through the mixing test of manufactured sand self-compacting concrete, the effects of LP on the rheological parameters, rheological threshold and self-compacting zone were studied. The results show that with the same water-powder ratio, the yield strength and plastic viscosity of the paste mixed with LP are significantly higher than those without LP. Comparing to the self-compacting zone without LP, the self-compacting zone using the rheological threshold modified by packing density moves towards the direction of higher water-powder ratio. This reveals that the self-compacting zone is consistent with that of concrete mixed by manufactured sand if considering the effect of LP on the rheological property of paste.

**Key words:** manufactured sand self-compacting concrete; limestone powder; rheology; paste rheological threshold; mix design

自密实混凝土要求具有良好的工作性能, 不需外力振捣, 仅靠自身重力就能流经模板的各个角落

达到密实<sup>[1]</sup>. 严格的性能要求必然需要更为严密的混凝土配合比设计方法来对其配合比参数进行合理设

收稿日期: 2020-11-01; 修订日期: 2020-12-30

基金项目: 交通运输行业重点科技项目面上项目(2018-MS2-051)

第一作者(通讯作者): 汤 明(1964—), 男, 云南会泽人, 中电建路桥集团有限公司教授级高级工程师, 博士生导师, 博士. E-mail: LQtangming@powerchina.cn

计<sup>[2]</sup>.近年来随着河砂资源的匮乏,机制砂逐渐代替了河砂,采用机制砂配制自密实混凝土对配合比提出了更高的要求<sup>[3]</sup>.基于净浆流变理论的自密实混凝土配合比设计方法,将净浆、砂浆和混凝土视为宾汉姆流体,建立了配合比与流变参数的量化关系,提出了净浆配合比的自密实性能区域以及相应的计算方法,可有效地进行自密实混凝土配合比设计<sup>[4-5]</sup>.而机制砂具有颗粒级配不良,石粉含量高的特点,进行机制砂自密实混凝土配合比设计时,已有的净浆流变阈值不再适用,使得净浆自密实区域和混凝土自密实区域存在偏差.Zhang等<sup>[6]</sup>对比了净浆自密实区域与混凝土自密实区域,利用经验折算系数对多粉体净浆自密实区域进行修正,结果准确度较高,但没有考虑粉体材料影响净浆流变性的内在机理,当更换粉体时,需重复进行试验以重新确定折算系数,工作量较大.根据现有研究<sup>[7-9]</sup>,掺加适量的石粉可改善净浆与自密实混凝土的流动性,但并未对其影响进行量化.本文基于净浆流变阈值理论,研究了机制砂中石粉对净浆流变性的影响,通过对比分析净浆流变参数以及净浆自密实区域,给出了适用的机制砂自密实混凝土配合比设计方法.

## 1 基于净浆流变阈值的自密实混凝土配合比设计方法

### 1.1 净浆流变阈值理论

#### 1.1.1 净浆流变参数

净浆的流变参数(屈服强度和塑性黏度)可以通过坍落扩展度试验获得:坍落扩展度 $S$ 反映净浆屈服强度的大小; $t_{200}$ 为净浆扩展度到达200 mm所需的时间,反映流动速度的快慢,即塑性黏度的大小.屈服强度和塑性黏度分别用式(1)<sup>[10]</sup>和式(2)<sup>[11]</sup>计算得到.

$$\tau_{\text{paste}} = \frac{225\rho_{\text{paste}}gV_{\text{cone}}^2}{128\pi(S/2)^2} - \lambda \frac{(S/2)^2}{V_{\text{cone}}} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{paste}} = \frac{\rho_{\text{paste}}gh_{\text{cone}}V_{\text{cone}}}{150 \times S_{\text{L,press}} \times S_{\text{press}}^2} t_{200} \quad (2)$$

式中: $\tau_{\text{paste}}$ 为净浆的屈服强度,Pa; $\rho_{\text{paste}}$ 为净浆的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$ 为重力加速度; $V_{\text{cone}}$ 为净浆坍落扩展度筒内部的体积, $\text{m}^3$ ;  $\lambda$ 为表面张力系数,大量试验表明, $\lambda=0.000\ 05$ ;  $\eta_{\text{paste}}$ 为净浆的塑性黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $h_{\text{cone}}$ 为净浆坍落扩展度筒的高度,cm;  $S_{\text{press}}$ 为净浆在某一时刻的扩展度,在本式中取200 mm;  $S_{\text{L,press}}$ 为与 $S_{\text{press}}$ 对应的坍落高度,mm.

#### 1.1.2 净浆流变阈值

自密实混凝土可以视为由砂浆和悬浮于其中的

石子组成.吴琼<sup>[4]</sup>基于砂浆膜厚理论,建立了满足自密实混凝土工作性能的砂浆屈服强度和塑性黏度阈值.根据砂浆和净浆流变参数关系,本文用等效堆积密度 $\varphi_e$ 替代理想最大砂率 $\varphi_{\text{max}}$ (体积分数,文中砂率均为体积分数),得到净浆屈服强度和塑性黏度的阈值,如式(3)、(4)所示.

$$\tau_{\text{paste}} \leq \tau_{\text{threshold}} = \frac{\sqrt{2}\Delta\rho gr^2}{3\delta_{\text{mortar}}} / (1 - \varphi/\varphi_e)^{-n} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{paste}} \geq \eta_{\text{threshold}} = \frac{20\Delta\rho gr^2}{9\delta_{\text{mortar}}} / (1 - \varphi/\varphi_e)^{-[\eta]\varphi_{\text{max}}} \quad (4)$$

式中: $\tau_{\text{threshold}}$ 为净浆的屈服强度阈值,Pa; $\eta_{\text{threshold}}$ 为净浆的塑性黏度阈值, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\Delta\rho$ 为砂浆与石子密度差; $r$ 为石子半径; $\delta_{\text{mortar}}$ 为砂浆的膜厚; $\varphi$ 为实际砂率; $n$ 为经验系数,一般取4.2<sup>[12]</sup>;  $[\eta]$ 为特征黏度,一般取2.5<sup>[13]</sup>.

$\varphi_{\text{max}}$ 可通过式(5)进行计算<sup>[14]</sup>.

$$\varphi_{\text{max}} = 1 - 0.45(d_{\text{min}}/d_{\text{max}})^{0.19} \quad (5)$$

式中: $d_{\text{min}}$ 、 $d_{\text{max}}$ 分别为砂子的最小粒径和最大粒径.

净浆屈服强度和塑性黏度阈值的计算式表明,在砂石掺量和物理性能一定的情况下,混凝土自密实性能由净浆的屈服强度和塑性黏度控制,这样就建立了自密实混凝土工作性能和净浆流变参数之间的关系,从而可以根据净浆的流变性来预测混凝土的工作性能.

#### 1.1.3 砂浆堆积密度对净浆流变阈值的影响

净浆以水泥、粉煤灰作为粉体材料,但由式(5)可以看出理想最大砂率 $\varphi_{\text{max}}$ 未考虑砂的粒径分布与砂中的粉体.对机制砂来说,其粒径分布较宽,并含有大量石粉, $\varphi_{\text{max}}$ 采用式(5)计算则不能反应材料特性.本文针对机制砂中石粉的影响,充分考虑材料堆积特性,引入混合堆积密度 $\varphi_p$ 的概念, $\varphi_p$ 按式(6)计算.

$$\varphi_p = \frac{V_c + V_{\text{FA}} + V_s}{V_c + V_{\text{FA}} + V_s + V_w} \quad (6)$$

式中: $V_c$ 、 $V_{\text{FA}}$ 、 $V_s$ 、 $V_w$ 分别为砂浆中水泥、粉煤灰、砂(含石粉)、水的体积,均为砂浆基本需水率对应的材料体积,可通过砂浆基本需水率试验得到.

Li等<sup>[15]</sup>通过试验提出了考虑粉煤灰影响的等效堆积密度 $\varphi_e$ ,用 $\varphi_e$ 代替 $\varphi_{\text{max}}$ ,得到了很好的结果,其中 $\varphi_e=1.09\varphi_p$ .通过砂浆堆积密度对净浆流变阈值计算式进行修正,进一步量化材料颗粒体系变化对自密实混凝土流变性的影响.

### 1.2 净浆自密实区域

以水泥与粉煤灰作为粉体材料,利用净浆基本需水率试验得到中心点的水粉比( $V_w/V_p$ ,体积比),

减水剂掺量<sup>1)</sup>( $w_{sp}$ )根据经验或者推荐值使用,然后增大或减小水粉比和减水剂掺量,各取3个水平,得到9个点的配合比参数,计算9个点的净浆流变参数(屈服强度 $\tau_{paste}$ 和塑性黏度 $\eta_{paste}$ ),利用双线性插值法得到

区域内所有点的屈服强度和塑性黏度值,最后根据式(3)、(4)得到符合阈值准则的净浆区域;同时满足屈服强度阈值和塑性黏度阈值的区域即为净浆自密实区域(SCP-zone),如图1所示。

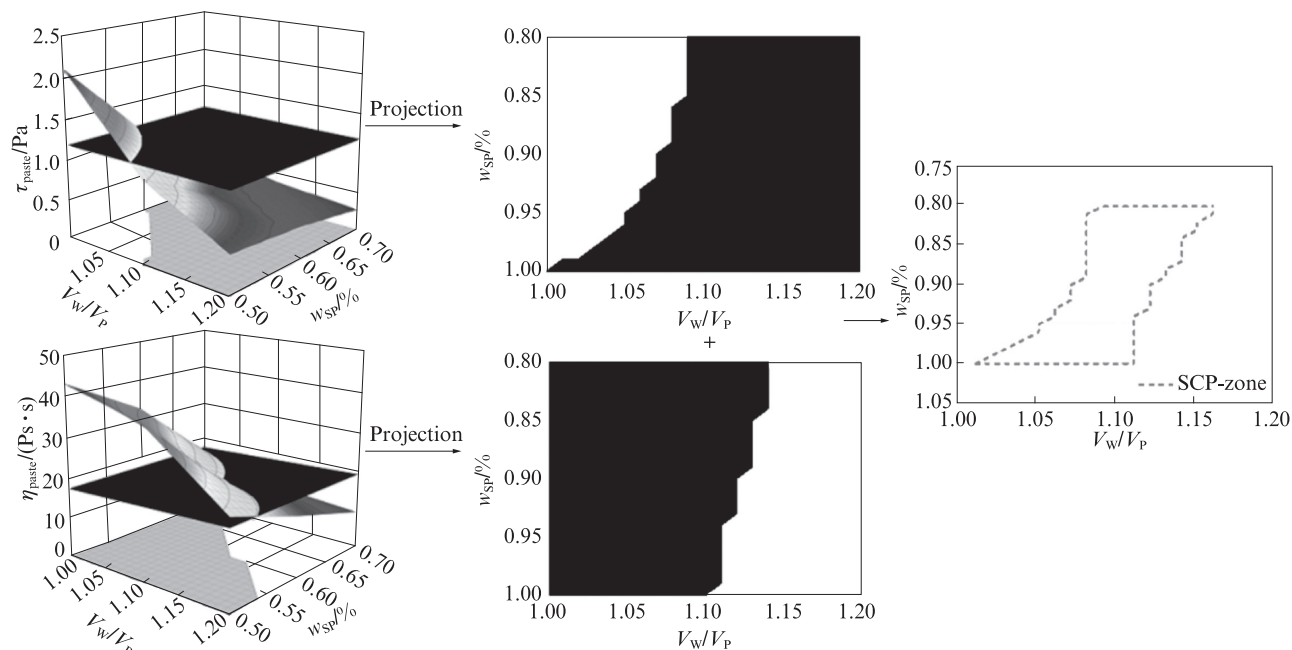


图1 净浆自密实区域

Fig. 1 Self-compacting paste zone (SCP-zone)

### 1.3 混凝土自密实区域

根据基准点的混凝土配合比参数、坍落扩展度( $S_{SCC}$ )和V漏斗通过时间( $t_v$ ),采用双线性插值法得到基准点内部各点的 $S_{SCC}$ 和 $t_v$ 曲面图.根据自密实混凝土工作性能的要求, $S_{SCC}$ 应大于600 mm, $t_v$ 应在5~25 s之间.将符合工作性能要求的曲面图在坐标平面内投影,两者投影重叠的部分为混凝土自密实区域(SCC-zone),如图2所示.将得到的混凝土自密实区域和净浆自密实区域对比,如果净浆的自密实区域和混凝土的自密实区域基本吻合,就说明净浆流变试验能够指导混凝土配制。

## 2 考虑石粉对流变性影响的自密实混凝土配合比试验

### 2.1 试验原材料

采用P·O 42.5硅酸盐水泥(C),密度为3.21 g/cm<sup>3</sup>;选用Ⅱ级粉煤灰(FA),密度为2.31 g/cm<sup>3</sup>;细骨料采用机制砂(S),为Ⅱ区级配,表观密度为2.83 g/cm<sup>3</sup>,石粉(LP)含量为12.2%,亚甲蓝值MB=1.2;石粉密度为2.5 g/cm<sup>3</sup>,含水率为1.12%;粗骨料(G)采用5~

10 mm和10~19 mm石子,两者质量比为4:6,表观密度为2.84 g/cm<sup>3</sup>;减水剂(SP)采用聚羧酸高效减水剂;水(W)为室温自来水。

### 2.2 测试方法

#### 2.2.1 净浆流变参数测定

净浆流变参数由净浆微型坍落扩展度试验获得,参照GB/T 8077—2012《混凝土外加剂匀质性试验方法》,拍摄测试全过程的视频,在测得净浆于微型扩展度筒中通过自重流出后的最终扩展度值后,通过视频回放的方法获取流动时间 $t_{200}$ 。

#### 2.2.2 混凝土流变性测试

采用坍落扩展度筒与V型漏斗试验仪,测定混凝土的坍落扩展度与V漏斗通过时间<sup>[2]</sup>。

#### 2.2.3 基本需水率试验

基本需水率是指浆体开始流动的最小用水量,可综合反映材料的粒径分布、堆积情况和颗粒形状.净浆与砂浆的基本需水率均通过Okamura等<sup>[16]</sup>提出的方法进行测定.引入浆体相对扩展度 $R_a$ 的概念,测量浆体流动度试验中当流动停止后2个垂直方向的扩展直径 $d_1$ 、 $d_2$ ,然后根据式(7)计算 $R_a$ :

1)文中涉及的掺量、含量及含水率等除特别说明外均为质量分数。

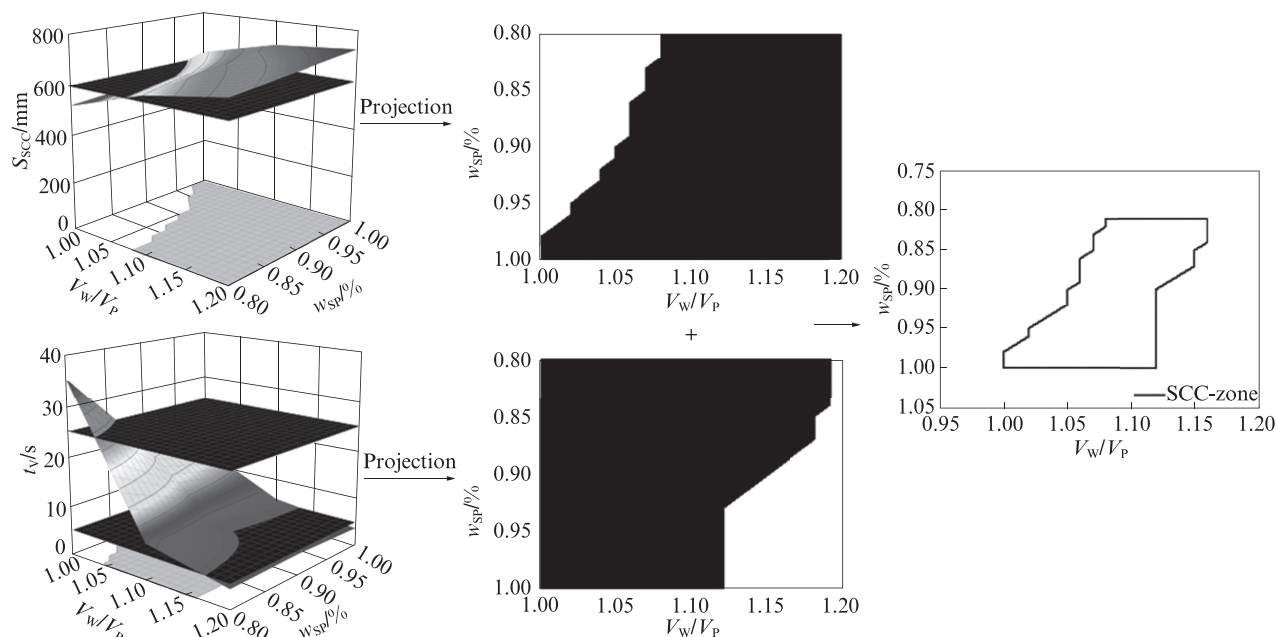


图2 混凝土自密实区域

Fig. 2 Self-compacting concrete zone (SCC-zone)

$$R_a = (d_1 d_2 - d_0^2) / d_0^2 \quad (7)$$

式中:  $d_0$  为坍落扩展度筒内圈直径, 砂浆坍落扩展度筒的  $d_0 = 100$  mm, 净浆坍落扩展度筒的  $d_0 = 60$  mm.

以水泥、粉煤灰作为粉体材料, 进行不同水粉比的净浆与砂浆流动度试验, 计算相应的相对扩展度, 拟合水粉比和相对扩展度的关系, 得到  $R_a = 0$  时对应的水粉比, 即浆体的基本需水率.

### 2.3 考虑石粉影响的净浆配合比设计

基于净浆流变性的自密实混凝土配合比设计中, 粉体材料仅考虑水泥、粉煤灰, 细骨料采用机制砂, 但机制砂中石粉含量较大, 会对净浆流变性产生很大影响, 导致净浆自密实区域和混凝土自密实区域不吻合. 为了研究石粉含量对净浆自密实区域的影响并考虑粉煤灰掺量的影响, 设计了加石粉与不加石粉的净浆配合比试验. 其中净浆中石粉与水泥的体积比和混凝土中石粉与水泥的体积比相同.

以纯水泥净浆为例, 首先基于水泥的基本需水率确定水粉比, 再以基本需水率对应的水粉比  $V_w/V_p = 1.15$  为中心点, 增大和减小水粉比, 确定3个基准点的水粉比分别为1.05、1.15、1.25. 掺加石粉导致净浆的基本需水率增大, 因此调整掺加石粉的净浆试验基准点, 将其移动至1.10、1.20、1.30. 参考经验值确定3个基准点的减水剂掺量, 分别为0.50%、0.60%、0.70%. 从而掺加石粉与未掺加石粉的净浆各有9个基准点配合比, 共进行18组净浆流变试验, 其配合比及试验结果如表1所示. 其中, 配合比编号

采用水粉比加减水剂掺量的形式.

在纯水泥净浆的基础上, 分别以体积分数为20%、30%的粉煤灰替代水泥, 进行掺加石粉与不掺加石粉的净浆基准点流变试验, 每种粉煤灰替代率下获得18组试验结果, 其配合比及试验结果如表2、3所示.

### 2.4 自密实混凝土配合比设计

自密实混凝土配合比试验采用与净浆试验相同的水粉比和减水剂掺量 (见表1~3), 石粉由机制砂引入, 不另外掺加. 固定石子用量为270 L, 砂率为45%, 进行坍落扩展度和V漏斗试验. 自密实混凝土配合比及试验结果见表4.

## 3 结果与分析

### 3.1 净浆流变参数

采用式(1)、(2)计算净浆流变参数. 由于掺入石粉后净浆流变性发生改变, 坍落扩展度  $S$  减小,  $t_{200}$  增大, 因此表1~3中掺加石粉与未掺加石粉的净浆基准点相近, 但不完全相同. 为在相同配合比下进行流变参数对比, 将未掺入石粉的净浆进行双线性插值计算, 得到其在水粉比为1.10时的屈服强度和塑性黏度, 结果列于表5. 其中, “-”表示未掺加石粉, “+”表示掺入石粉.

由表1~3和表5可以看出, 加入石粉后, 相同水粉比下净浆的  $S$  减小、 $t_{200}$  增大, 相应的屈服强度和塑性黏度都增大, 但增大幅度随着水粉比和减水剂掺



表1 水泥(+石粉)净浆配合比及试验结果

Table 1 Mix proportion and test results of cement paste with or without LP

Cement paste						Cement paste with LP						
Mix No.	Mix proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )			S/mm	t <sub>200</sub> /s	Mix No.	Mix proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )				S/mm	t <sub>200</sub> /s
	C	W	SP				C	LP	W	SP		
1.05-0.50%	1 540.40	506.00	7.70	240	3.75	1.10-0.50%	1 336.70	302.90	460.30	6.68	205	4.24
1.05-0.60%	1 540.40	504.80	9.24	267	2.81	1.10-0.60%	1 336.70	302.90	459.20	8.01	269	3.10
1.05-0.70%	1 540.40	503.60	10.78	302	2.37	1.10-0.70%	1 336.70	302.90	458.20	9.35	283	2.90
1.15-0.50%	1 468.80	529.00	7.34	270	2.86	1.20-0.50%	1 275.90	302.90	479.70	6.38	260	2.88
1.15-0.60%	1 468.80	527.80	8.81	280	2.35	1.20-0.60%	1 275.90	302.90	478.70	7.65	274	2.15
1.15-0.70%	1 468.80	526.60	10.28	320	1.52	1.20-0.70%	1 275.90	302.90	477.70	8.93	305	1.22
1.25-0.50%	1 403.50	549.90	7.02	305	1.99	1.30-0.50%	1 220.40	302.90	497.50	6.11	275	2.06
1.25-0.60%	1 403.50	548.80	8.42	312	1.27	1.30-0.60%	1 220.40	302.90	496.60	7.32	287	1.74
1.25-0.70%	1 403.50	547.70	9.82	335	0.77	1.30-0.70%	1 220.40	302.90	495.60	8.54	310	0.88

表2 水泥+20%粉煤灰(+石粉)净浆配合比及试验结果

Table 2 Mix proportions and test results of cement and 20% FA paste with or without LP

Cement and 20% FA paste							Cement and 20% FA paste with LP							
Mix No.	Mix proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )				S/mm	t <sub>200</sub> /s	Mix No.	Mix proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )					S/mm	t <sub>200</sub> /s
	C	FA	W	SP				C	FA	LP	W	SP		
0.95-0.50%	1 295.50	266.70	480.90	7.81	230	3.58	1.00-0.50%	1 122.80	231.00	302.90	439.00	6.76	215	3.72
0.95-0.60%	1 295.50	266.70	479.70	9.37	265	3.13	1.00-0.60%	1 122.80	231.00	302.90	437.90	8.12	247	2.84
0.95-0.70%	1 295.50	266.70	478.40	10.94	308	1.82	1.00-0.70%	1 122.80	231.00	302.90	436.90	9.48	278	1.75
1.05-0.50%	1 232.30	253.60	506.20	7.43	260	2.79	1.10-0.50%	1 069.30	220.00	302.90	460.40	6.40	248	2.34
1.05-0.60%	1 232.30	253.60	505.00	8.91	302	1.67	1.10-0.60%	1 069.30	220.00	302.90	459.50	7.69	284	1.71
1.05-0.70%	1 232.30	253.60	503.90	10.40	315	1.31	1.10-0.70%	1 069.30	220.00	302.90	458.20	8.96	306	1.24
1.15-0.50%	1 169.50	239.30	530.30	6.09	298	1.43	1.20-0.50%	1 020.70	210.00	302.90	480.00	6.11	271	1.96
1.15-0.60%	1 169.50	239.30	531.10	7.31	322	0.98	1.20-0.60%	1 020.70	210.00	302.90	479.00	7.33	290	1.34
1.15-0.70%	1 169.50	239.30	531.90	8.53	340	0.84	1.20-0.70%	1 020.70	210.00	302.90	478.00	8.56	312	1.08

表3 水泥+30%粉煤灰(+石粉)净浆配合比及试验结果

Table 3 Mix proportions and test results of cement and 30% FA paste with or without LP

Cement and 30% FA paste							Cement and 30% FA paste with LP							
Mix No.	Mix proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )				S/mm	t <sub>200</sub> /s	Mix No.	Mix proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )					S/mm	t <sub>200</sub> /s
	C	FA	W	SP				C	FA	LP	W	SP		
0.90-0.50%	1 163.44	410.52	467.39	7.87	238	3.81	1.00-0.50%	982.46	330.33	302.89	439.20	6.58	226	3.95
0.90-0.60%	1 163.44	410.52	466.13	9.44	278	2.67	1.00-0.60%	982.46	330.33	302.89	438.13	7.89	270	2.72
0.90-0.70%	1 163.44	410.52	464.87	11.02	302	2.31	1.00-0.70%	982.46	330.33	302.89	437.08	9.21	285	1.69
1.00-0.50%	1 105.26	390.00	494.02	7.48	275	2.55	1.10-0.50%	935.67	317.18	302.89	460.60	6.26	259	2.52
1.00-0.60%	1 105.26	390.00	492.82	8.97	298	1.81	1.10-0.60%	935.67	317.18	302.89	459.59	7.52	297	1.63
1.00-0.70%	1 105.26	390.00	491.63	10.47	312	1.53	1.10-0.70%	935.67	317.18	302.89	458.59	8.77	308	1.08
1.10-0.50%	1 052.63	371.43	518.11	7.12	282	2.29	1.20-0.50%	893.15	320.53	302.89	480.06	5.98	282	1.77
1.10-0.60%	1 052.63	371.43	516.97	8.54	315	1.38	1.20-0.60%	893.15	320.53	302.89	479.10	7.17	302	1.12
1.10-0.70%	1 052.63	371.43	515.83	9.97	330	0.92	1.20-0.70%	893.15	320.53	302.89	478.15	8.37	328	0.97

表 4 自密实混凝土配合比及试验结果  
Table 4 Mix proportions and test results of self-compacting concrete

Cement			Cement and 20% FA			Cement and 30% FA		
Mix No.	$S_{SCC}/mm$	$t_V/s$	Mix No.	$S_{SCC}/mm$	$t_V/s$	Mix No.	$S_{SCC}/mm$	$t_V/s$
1. 10-0. 50%	442	38. 12	1. 00-0. 50%	465	45. 25	1. 00-0. 50%	497	25. 73
1. 10-0. 60%	595	22. 43	1. 00-0. 60%	550	28. 78	1. 00-0. 60%	597	11. 26
1. 10-0. 70%	660	16. 69	1. 00-0. 70%	630	10. 22	1. 00-0. 70%	670	8. 17
1. 20-0. 50%	550	21. 40	1. 10-0. 50%	525	29. 12	1. 10-0. 50%	598	15. 91
1. 20-0. 60%	665	9. 75	1. 10-0. 60%	630	8. 27	1. 10-0. 60%	665	7. 58
1. 20-0. 70%	700	10. 46	1. 10-0. 70%	695	5. 57	1. 10-0. 70%	700	4. 35
1. 30-0. 50%	650	15. 76	1. 20-0. 50%	605	11. 45	1. 20-0. 50%	690	5. 37
1. 30-0. 60%	685	8. 12	1. 20-0. 60%	660	4. 79	1. 20-0. 60%	698	4. 19
1. 30-0. 70%	730	45. 50	1. 20-0. 70%	725	3. 82	1. 20-0. 70%	718	4. 07

表 5 加石粉前后净浆的流变参数对比  
Table 5 Rheological characteristics comparison of pastes with or without LP

Cement paste					Cement and 20% FA paste					Cement and 30% FA paste				
Mix No.	$\tau_{paste}/Pa$		$\eta_{paste}/(Pa\cdot s)$		Mix No.	$\tau_{paste}/Pa$		$\eta_{paste}/(Pa\cdot s)$		Mix No.	$\tau_{paste}/Pa$		$\eta_{paste}/(Pa\cdot s)$	
	—	+	—	+		—	+	—	+		—	+	—	+
1. 10-0. 50%	1. 31	3. 86	39. 2	52. 9	1. 10-0. 50%	0. 82	1. 72	24. 6	27. 5	1. 10-0. 50%	0. 82	1. 72	24. 6	27. 5
1. 10-0. 60%	0. 87	1. 06	30. 7	38. 6	1. 10-0. 60%	0. 76	0. 70	15. 5	21. 0	1. 10-0. 60%	0. 76	0. 70	15. 5	21. 0
1. 10-0. 70%	0. 45	0. 78	23. 2	36. 2	1. 10-0. 70%	0. 34	0. 47	12. 6	19. 0	1. 10-0. 70%	0. 34	0. 47	12. 6	19. 0

量的增大呈减小趋势;掺入粉煤灰后,相同水粉比下净浆的S增大、 $t_{200}$ 减小,相应的屈服强度和塑性黏度都减小.

3.2 净浆流变阈值

采用与净浆试验相同的粉体材料和机制砂,进行不同水粉比的砂浆扩展度试验,通过拟合得到相应的基准需水率,由式(6)计算基准需水率对应的砂浆堆

积密度 $\varphi_p$ ,即可得到材料的等效堆积密度 $\varphi_e$ .然后根据式(3)、(4)计算净浆流变阈值,结果如表6所示.

进行砂浆扩展度试验时采用机制砂,因此其试验结果反应了石粉的影响.从表6可以看出,随粉煤灰掺量增加,砂浆的基准需水率减小,等效堆积密度增大;粉体材料相同时,随水粉比增大,屈服强度阈值减小,塑性黏度阈值增大.

表 6 不同净浆的流变阈值  
Table 6 Thresholds of different pastes

Powder type	Basic water demand ratio	$\varphi_e$	$V_W/V_P$	$\tau_{threshold}/Pa$	$\eta_{threshold}/(Pa\cdot s)$
Cement	1. 49	0. 73	1. 05	0. 93	16. 4
			1. 15	0. 92	17. 2
			1. 25	0. 91	17. 9
			0. 95	0. 98	14. 9
Cement and 20% FA	1. 41	0. 74	1. 05	0. 97	15. 5
			1. 15	0. 96	17. 4
			0. 90	1. 01	15. 3
Cement and 30% FA	1. 38	0. 74	1. 00	1. 00	16. 3
			1. 10	0. 99	17. 1

3.3 净浆和混凝土的自密实区域

利用 1.2 中净浆自密实区域的确定方法绘制表 1~3 中 6 种工况的净浆自密实区域;按照 1.3 中混凝土自密实区域的确定方法绘制自密实混凝土区域,然后将净浆自密实区域(SCP-zone)和混凝土自密实

区域(SCC-zone)绘制到同一坐标系中,如图 3 所示.

由图 3(a)、(c)、(e)可以看出,掺入石粉前净浆和混凝土的自密实区域不能吻合.由于机制砂中含有大量具有活性的石粉,且粒径与粉煤灰相近,在混凝土中起着外加矿物掺和料的作用,导致混凝土的需

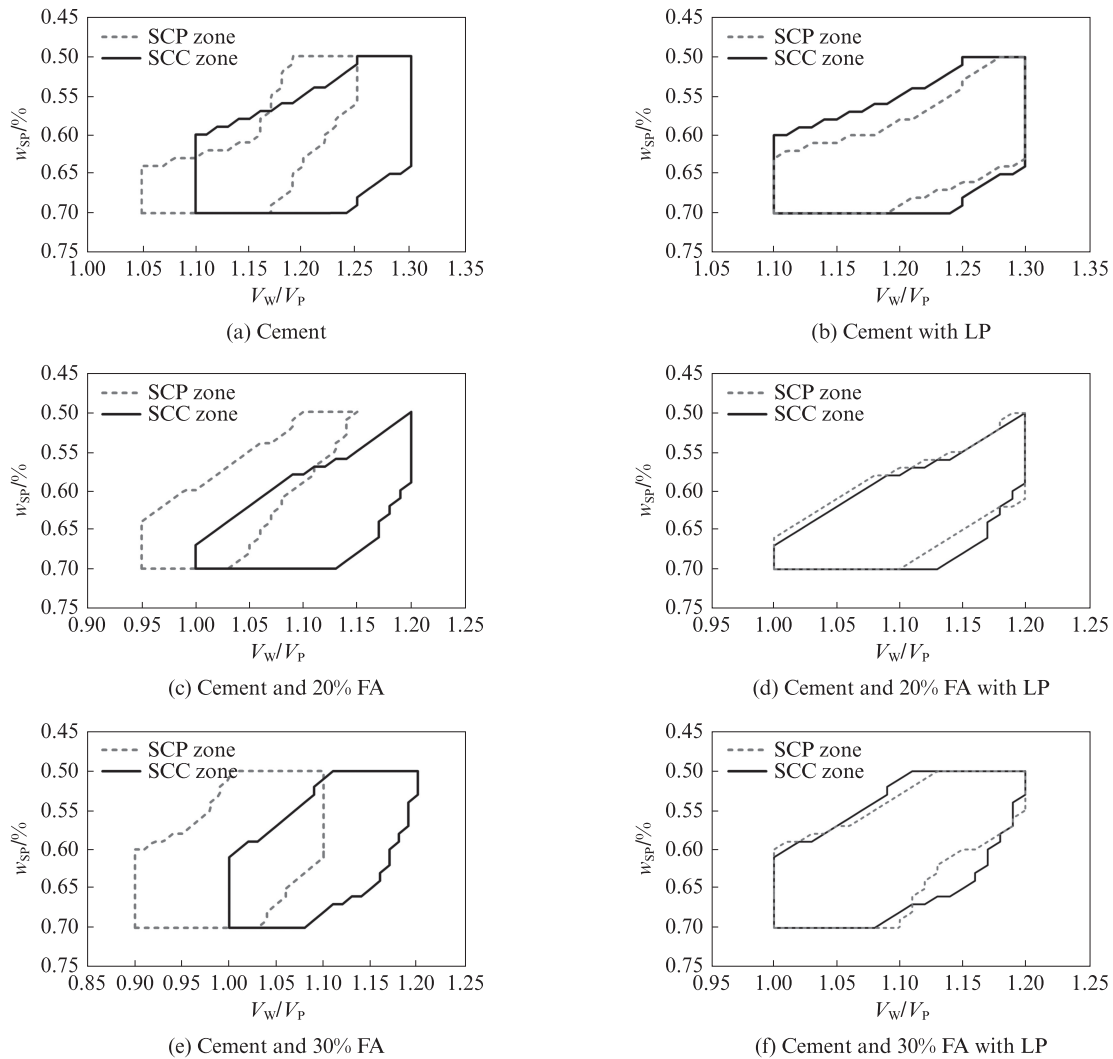


图3 各工况净浆和混凝土自密实区域

Fig. 3 SCP-zones and SCC-zones with different powders

水率增加;但在计算净浆的基本需水率时,机制砂中的石粉不参与计算,相当于在同水粉比的混凝土中又加入石粉,导致净浆的自密实区域和混凝土的自密实区域不吻合.掺石粉后净浆的流变参数发生变化,屈服强度和塑性黏度均增大,使得净浆自密实区域向右移动,与混凝土的自密实区域吻合较好,如图3(b)、(d)、(f)所示.图3(d)、(f)表明粉煤灰替代率为20%、30%且加石粉的水泥净浆自密实区域与混凝土自密实区域吻合均良好.进一步验证了采用堆积密度修正的净浆阈值公式的准确性,修正后的净浆自密实区域相较于未考虑石粉的净浆自密实区域向水粉比较大的方向移动,与混凝土的自密实区域能够高度吻合.

## 4 结论

(1)进行机制砂自密实混凝土配合比设计时,净浆自密实区域和混凝土自密实区域有偏差,净浆自

密实区域偏向水粉比小的区域,需要考虑石粉对净浆流变参数的影响.

(2)在相同的水粉比下,掺入石粉后净浆的屈服强度和塑性黏度都明显大于未掺石粉的净浆,净浆自密实区域相较于未掺石粉的净浆自密实区域向水粉比较大的方向移动.

(3)采用砂浆基准需水率试验获得的等效堆积密度来修正净浆流变阈值,考虑石粉对净浆流变性影响所确定的净浆自密实区域和机制砂混凝土自密实区域吻合,表明本文提出的机制砂自密实混凝土配合比设计方法是可行的.

## 参考文献:

- [1] OKAMURA H, OUCHI M. Self-compacting concrete [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003(1):5-15.
- [2] 安雪晖. 自密实混凝土技术手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008:55-57.

- AN Xuehui. Technical manual of self-compacting concrete[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2008:55-57. (in Chinese)
- [3] 蒋林华, 张炎, 李辰治, 等. 石灰石粉水泥基材料的研究与应用进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1):83-89.
- JIANG Linhua, ZHANG Yan, LI Chenzhi, et al. Review on the research and application of cement-based materials with limestone powder[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1):83-89. (in Chinese)
- [4] 吴琼. 基于净浆流变性的自密实混凝土配合比设计方法研究[D]. 北京:清华大学, 2013.
- WU Qiong. The development of mix design method for self-compacting concrete based on the rheological characteristics of paste[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [5] 聂鼎. 基于净浆流变理论的自密实混凝土配合比设计方法研究[D]. 北京:清华大学, 2016.
- NIE Ding. Research on optimizing mix proportion of self-compacting concrete based on paste rheological theory[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese)
- [6] ZHANG J B, AN X H, LI P F. Research on a mix design method of self-compacting concrete based on a paste rheological threshold theory and a powder equivalence model[J]. Construction and Building Materials, 2020, 233:117292.
- [7] 冯乃谦. 高性能和超高性能混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016:264-267.
- FENG Naiqian. High performance and ultra-high performance concrete[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016:264-267. (in Chinese)
- [8] 赵凯月, 董振平, 张金团, 等. 石灰石粉在混凝土中的应用现状[J]. 混凝土, 2018(10):35.
- ZHAO Kaiyue, DONG Zhenping, ZHANG Jintuan, et al. Research status of limestone powder concrete[J]. Concrete, 2018(10):35. (in Chinese)
- [9] 张倩倩, 张丽辉, 冉千平, 等. 石灰石粉对水泥浆体流变性能的影响及作用机理[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5):680-686.
- ZHANG Qianqian, ZHANG Lihui, RAN Qianping, et al. Effect of lime stone powder on rheological properties of cement paste and its mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(5):680-686. (in Chinese)
- [10] ROUSSEL N, STEFANI C, LEROY R. From mini-cone test to Abrams cone test: Measurement of cement based materials yield stress using slump tests[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(5):817-822.
- [11] CHIDIAC S E, MAADANI O, RAZAQPUR A G, et al. Controlling the quality of fresh concrete-A new approach[J]. Magazine of Concrete Research, 2000, 52(5):353-363.
- [12] TOUTOU Z, ROUSSEL N. Multi scale experimental study of concrete rheology: From water scale to gravel scale[J]. Materials and Structures, 2006, 39(2):189-199.
- [13] BANFILL P F G. The rheology of fresh cement and concrete-A review[J]. E & Fn Spon, 2003, 34(10):1933-1937.
- [14] HU C, DE LARRARD F. The rheology of fresh high-performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(2):283-294.
- [15] LI P F, ZHANG T, AN X H, et al. An enhanced mix design method of self-compacting concrete with fly ash content based on paste rheological threshold theory and material packing characteristics[J]. Construction and Building Materials, 2020, 234:117380.
- [16] OKAMURA H, OZAWA K. Mix design for self-compacting concrete [J]. Concrete Library of Japanese Society of Civil Engineers, 1995, 25(6):107-120.