

## 自密实混凝土基本工作性能与其静态稳定性间的关系

张勇<sup>1</sup>, 赵庆新<sup>1</sup>, 李化建<sup>2,3</sup>, 黄法礼<sup>2,3</sup>

(1. 燕山大学建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004;  
2. 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所, 北京 100081;  
3. 高速铁路轨道技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 采用柱状法试验和贯入试验对自密实混凝土的静态稳定性进行了测试, 收集了自密实混凝土扩展度分别达到500 mm、600 mm的流动时间  $T_{500}$ 、 $T_{600}$  及流停时间  $T_{fin}$  和相应的扩展度数据, 并以此为基础, 研究了自密实混凝土基本工作性能与其静态稳定性间的关系。结果表明: 自密实混凝土的流动时间和扩展度与其静态稳定性间存在良好相关性, 流动时间的延长或扩展度的降低均有利于静态稳定性的提高; 同时, 自密实混凝土流动时间  $T_{fin}$ 、 $T_{600}$  和  $T_{500}$  对其静态稳定性敏感程度依次递减; 另外, 当自密实混凝土的基本工作性能至少满足  $5.3 \text{ s} \leq T_{500} \leq 20.0 \text{ s}$ ,  $12.1 \text{ s} \leq T_{600} \leq 46.4 \text{ s}$ ,  $35.7 \text{ s} \leq T_{fin} \leq 63.7 \text{ s}$  和  $550 \text{ mm} \leq \text{坍落扩展度} \leq 715 \text{ mm}$  中的3项时, 可判定其静态稳定性良好。

**关键词:** 自密实混凝土; 流动时间; 扩展度; 静态稳定性

中图分类号: TU 528.53 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2016)02-0261-07

网络出版时间: 2016-01-25 9:59:15 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2310.TQ.20160125.0959.001.html>

## Relationship Between Basic Workability and Static Stability of Self-consolidating Concrete

ZHANG Yong<sup>1</sup>, ZHAO Qingxin<sup>1</sup>, LI Huajian<sup>2,3</sup>, HUANG Fali<sup>2,3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China;  
2. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Science, Beijing 100081, China;  
3. State Key Laboratory for Track Technology of High-Speed Railway, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The static stability of self-consolidating concrete (SCC) was investigated via the penetration test and the column test. The flow time of  $T_{500}$ ,  $T_{600}$  and  $T_{fin}$  were collected when the slump flow reached 500 mm, 600 mm and stopped, and then the flow diameter was also recorded. The relationship between the basic workability and static stability of SCC was analyzed. The results show that the flow time and diameter both are closely related to the static stability of SCC, a longer flow time or a shorter slump flow gives a better static stability. Also, the sensitivity of the flow time decreases to the static stability of SCC from  $T_{fin}$  to  $T_{500}$ . Besides the SCC is considered to have a good static stability when at least three of the basic workabilities are satisfied, which are  $5.3 \text{ s} \leq T_{500} \leq 20.0 \text{ s}$ ,  $12.1 \text{ s} \leq T_{600} \leq 46.4 \text{ s}$ ,  $35.7 \text{ s} \leq T_{fin} \leq 63.7 \text{ s}$ ,  $550 \text{ mm} \leq \text{slump flow} \leq 715 \text{ mm}$ .

**Keywords:** self-consolidating concrete; flow time; flow diameter; static stability

自密实混凝土(SCC)的静态稳定性是其工作性能中的一项重要指标, 通常是指 SCC 在浇筑完成后, 凝结硬化前的静置过程中发生的骨料沉降现象<sup>[1-2]</sup>。该现象的发生主要是由于其较低的塑性黏度

和屈服应力所致。一般说来, 塑性黏度反映了流体各平流层之间产生的与流动方向相反的阻止其流动的粘滞阻力大小, 它支配拌合物的流动能力; 屈服应力则是阻碍塑性变形的最大应力, 其控制拌合物

收稿日期: 2015-07-25。 修订日期: 2015-11-12。

基金项目: 国家自然科学基金(51378499, 51578477, 51578545); 中国铁路总公司重大科研项目(2014G001-C)资助项目。

第一作者: 张勇(1988—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 赵庆新(1973—), 男, 教授。

Received date: 2015-07-25. Revised date: 2015-11-12.

First author: ZHANG Yong (1988-), male, Master candidate.

E-mail: zhayon1988@163.com

Correspondent author: ZHAO Qingxin(1973-), male, Professor.

E-mail: zhaoqx2002@163.com

的变形能力<sup>[3]</sup>, 且在实际试验过程中, 分别以自密实混凝土的流动时间和坍落扩展度来对两者进行一定程度的反映; 同时, 自密实混凝土塑性黏度和屈服应力的大小又会对其静态稳定性产生十分重要的影响。近些年, 由于对自密实混凝土静态稳定性重视程度逐渐提高, 其表征方法得到了较大发展<sup>[4–12]</sup>, 但是这些方法都各具特色, 并未形成一种统一、公认的表征方法, 对于自密实混凝土静态稳定性与其基本工作性能间的关系也鲜有报道。

为了更加方便、快捷地对自密实混凝土的静态稳定性进行表征, 从其基本工作性能(流动时间、扩展度)角度出发, 采用现阶段较常用的贯入试验和柱状法试验, 研究了不同配比参数对自密实混凝土基本工作性能及其静态稳定性的影响, 并建立了基于自密实混凝土基本工作性能的相关预测模型来对其静态稳定性进行表征。

表 1 胶凝材料性能参数表  
Table 1 Property of cementitious materials

Material	Mass fraction w/%							Specific surface area/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	
	Loss on ignition	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O	CaO	Free CaO	MgO		
Cement	2.97	2.39	0.016			0.71	3.32	3.08	364
Slag powder	0.18	1.46	0.012	0.44			12.72	2.86	438
Fly ash	3.97	0.41	0.006	0.65	3.11	0.03			

表 2 河砂的累计筛余表  
Table 2 Particle size distribution of river sand

							w/%
Fineness modulus	>4.75	2.36–4.75	1.18–2.36	0.6–1.18	0.3–0.6	0.15–0.3	0–0.15
2.6	4.3	15.6	32.7	44.1	77.3	96.5	100.0

## 1.2 方法

1) 柱状法按 ASTM C1610-14 标准展开, 其是直接从骨料角度出发, 准确性较高。试验时, 将自密实混凝土装入试验仪器, 并静置 15 min 后, 以仪器下节和上节混凝土中粗骨料的质量差异(静态离析百分数)来对其静态稳定性进行表征, 试验评价方法和标准如式(1)所示, 且试验过程中, 应避免试验仪器受到振动。

$$S = 2 \left[ \frac{C_B - C_T}{C_B + C_T} \right] \cdot 10 \quad (1)$$

其中:  $S$  为静态离析百分数, %,  $S \leq 15\%$ ;  $C_B$  为试验仪器下节混凝土中粗骨料质量, kg;  $C_T$  为试验仪器上节混凝土中粗骨料质量, kg。若  $C_T > C_B$ , 则  $S=0$ 。

2) 贯入试验按照 ASTM C1712—14 标准进行,

## 1 实验

### 1.1 原料

胶凝材料选用金隅 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 唐山唐龙的 S95 级矿渣粉, 元宝山电厂 F 类 I 级粉煤灰, 材料性能如表 1 所示; 膨胀剂选用天津豹鸣硫铝酸钙膨胀剂, 其性能指标满足《混凝土膨胀剂》GB 23439—2009 规范要求, 黏度改性材料为铁科院自产, 其性能指标符合《CRTSIII型板式无砟轨道自密实混凝土暂行技术条件》TJ/GW 112—2013 的要求; 粗骨料采用 5~10 mm 和 10~20 mm 碎石按质量比 4:6 掺用, 表观密度 2 720 kg/m<sup>3</sup>, 采用细度模数为 2.6 的 II 区河砂, 累计筛余如表 2 所示; 减水剂采用天津市雍阳减水剂厂的 UNT-5AST 聚羧酸高效减水剂(SP); 引气剂为苏博特 GYQ-III 型引气剂; 消泡剂为 CHUPOL AFK-2 聚醚型消泡剂; 水为北京市海淀地区自来水。

其是从自密实混凝土顶部砂浆层角度出发, 间接对其静态稳定性进行表征, 简单易行。试验时, 将新拌混凝土装入倒坍落度桶内静置[(80±5) s]后, 以一定质量(54 g)贯入头, 规定时间[(30±2) s]内, 在混凝土中的下沉深度(贯入度)来对自密实混凝土的静态稳定性进行表征, 其评价标准如表 3 所示。

3) 自密实混凝土的流动时间和扩展度按照 JGJ 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》测试。

表 3 自密实混凝土抗静态离析评价等级  
Table 3 Degree of static segregation resistance of SCC

Penetration depth (d)	Degree of static segregation
≤10 mm	Resistance
10 mm < d < 25 mm	Moderately resistant
≥25 mm	Not resistant

### 1.3 配比

按表 4 配制自密实混凝土, 研究水胶比、减水

剂用量、含气量、骨料最大粒径、骨料级配及骨料体积分数对其工作性能及静态稳定性的影响。

表 4 自密实混凝土配合比  
Table 4 Mix proportions of SCC

Sample No.	Cement	Slag power	Fly ash	Coarse aggregate/mm		Sand	Water	SP	VMA	EA	Air entraining agent	kg/m <sup>3</sup>
				5~10	10~20							
1	250	137	85	332	498	830	182	7.80	1.04	47	0.052	
2	250	137	85	332	498	830	188	7.80	1.04	47	0.052	
3	250	137	85	332	498	830	191	7.80	1.04	47	0.052	
4	250	137	85	332	498	830	200	7.80	1.04	47	0.052	
5	250	137	85	332	498	830	182	6.76	1.04	47	0.052	
6	250	137	85	332	498	830	182	10.14	1.04	47	0.052	
7	250	137	85	332	498	830	182	10.92	1.04	47	0.052	
8	250	137	85	332	498	830	182	7.80	1.04	47		
9	250	137	85	332	498	830	182	7.80	1.04	47	0.105	
10	250	137	85	332	498	830	182	7.80	1.04	47	0.130	
11	250	137	85	830		830	182	7.80	1.04	47	0.052	
12	250	137	85	332	498 <sup>b</sup>	830	182	7.80	1.04	47	0.052	
13	250	137	85	249	581	830	182	7.80	1.04	47	0.052	
14	250	137	85	415	415	830	182	7.80	1.04	47	0.052	
15	250	137	85	498	332	830	182	7.80	1.04	47	0.052	
16	250	137	85	581	249	830	182	7.80	1.04	47	0.052	
17	264	144	89	305	457 <sup>b</sup>	875	192	6.64	1.10	49	0.055	
18	231	127	78	348	522 <sup>b</sup>	769	168	7.14	0.96	43	0.048	
19	215	118	73	370	555 <sup>b</sup>	716	157	8.16	0.90	40	0.045	

Defoamer is used in Sample No. 8 and has a content of 0.175 kg/m<sup>3</sup>; <sup>b</sup> means a maximum size of the aggregate is 16 mm; SP—Superplasticizer; VMA—Viscosity-modifying agent; EA—Expansion agent.

## 2 结果与讨论

分别测定了以上各配合比自密实混凝土拌合物的流动时间、扩展度及静态稳定性参数, 结果如表 5 所示。

### 2.1 自密实混凝土流动时间与其静态稳定性关系

Nathan 等<sup>[13]</sup>通过对自密实混凝土动态稳定性的研究发现, 增加自密实混凝土拌合物最终流动时间可提高其动态稳定性, 且  $T_{fin}$  更能表征其黏度。为研究自密实混凝土流动时间与其静态稳定性间的关系, 综合表 5 中所有试验数据进行分析, 对自密实混凝土静态稳定性评价参数进行无量纲化处理, 即将静态离析百分数和贯入度分别除以 1% 和 1 mm, 使两者均变为关于自密实混凝土静态稳定性的无量纲参数来进行统一分析, 同时在分析过程中由于 7 号配比的贯入度超出试验仪器量程, 这里只给出了其趋势值, 在作图过程中并不能对其进行表示, 故将其剔除, 结果如图 1 所示。

由图 1 可知, 自密实混凝土的流动时间与其静态稳定性无量纲参数间存在良好相关性, 当自密实混凝土静态稳定性发生突变时, 其流动时间存在临

界值; 另外, 随流动时间延长, 其与自密实混凝土静态稳定性相关性越来越强, 即  $T_{500}$ 、 $T_{600}$  和  $T_{fin}$  对自密实混凝土静态稳定性敏感性依次递增, 这与 Nathan 的研究结果类似。

由于静态离析百分数及贯入度分别不大于 15% 和 10 mm 时, 自密实混凝土静态稳定性良好, 因此, 在分析过程中, 设定当自密实混凝土静态稳定性良好时, 无量纲参数不大于 10。为进一步说明自密实混凝土流动时间与其静态稳定性间的关系, 对图 1 数据进行拟合, 以获得自密实混凝土静态稳定性发生突变时流动时间的临界值, 优选拟合结果如图中曲线所示, 现令图 1 中 3 个方程的  $y$  值均小于等于判别标准 10, 解得:  $T_{500} \geq 5.3$  s,  $T_{600} \geq 12.1$  s,  $T_{fin} \geq 35.7$  s; 另根据相关规范资料<sup>[9,14~16]</sup>得到, 自密实混凝土流动时间  $T_{500}$  取值范围为 2.0~20.0 s, 同时结合  $T_{500}$ 、 $T_{600}$  及  $T_{fin}$  数据间的线性拟合关系  $T_{600}=0.4+2.3T_{500}$  和  $T_{fin}=29.7+1.7T_{500}$  可解得:  $5.0 \leq T_{600} \leq 46.4$  s,  $33.1 \leq T_{fin} \leq 63.7$  s; 综合以上分析结果可知在本试验条件下, 当自密实混凝土流动时间  $5.3 \leq T_{500} \leq 20.0$  s,  $12.1 \leq T_{600} \leq 46.4$  s 或  $35.7 \leq T_{fin} \leq 63.7$  s 时, 其静态稳定性良好。

表 5 自密实混凝土性能参数记录表

Table 5 Test results of the performance parameters of SCC

Sample No.	$T_{500}/\text{s}$	$T_{600}/\text{s}$	$T_{\text{fin}}/\text{s}$	Slump flow/mm	Penetration depth/mm	Static segregation percent/%
1	5.8	12.6	38.7	645	3	1.7
2	4.0	12.7	42.8	705	6	0.0
3	5.3	10.1	35.8	700	7	1.4
4	3.2	6.1	35.7	725	10	29.0
5	6.3	14.3	35.7	610	2	0.0
6	5.3	12.1	30.0	710	6	16.0
7	4.1	10.3	33.7	750	>30	64.0
8	6.6	16.1	40.0	660	3	2.6
9	7.1	14.9	48.6	660	3	0.0
10	10.5	24.4	44.4	645	5	0.0
11	17.7	40.4	61.2	605	7	1.4
12	8.1	19.1	46.4	640	6	1.4
13	8.1	20.9	40.1	600	0	2.8
14	9.7	18.7	48.4	620	3	0.0
15	6.8	15.3	49.8	680	5	0.0
16	8.3	19.2	42.5	600	1	2.7
17	6.1	14.6	39.2	650	6	7.7
18	9.2	24.4	50.7	610	4	0.0
19	11.8		41.5	575	1	0.0

$T_{500}$ ,  $T_{600}$  and  $T_{\text{fin}}$  are flow times collected when the slump flow reached 500 mm, 600 mm and stopped.

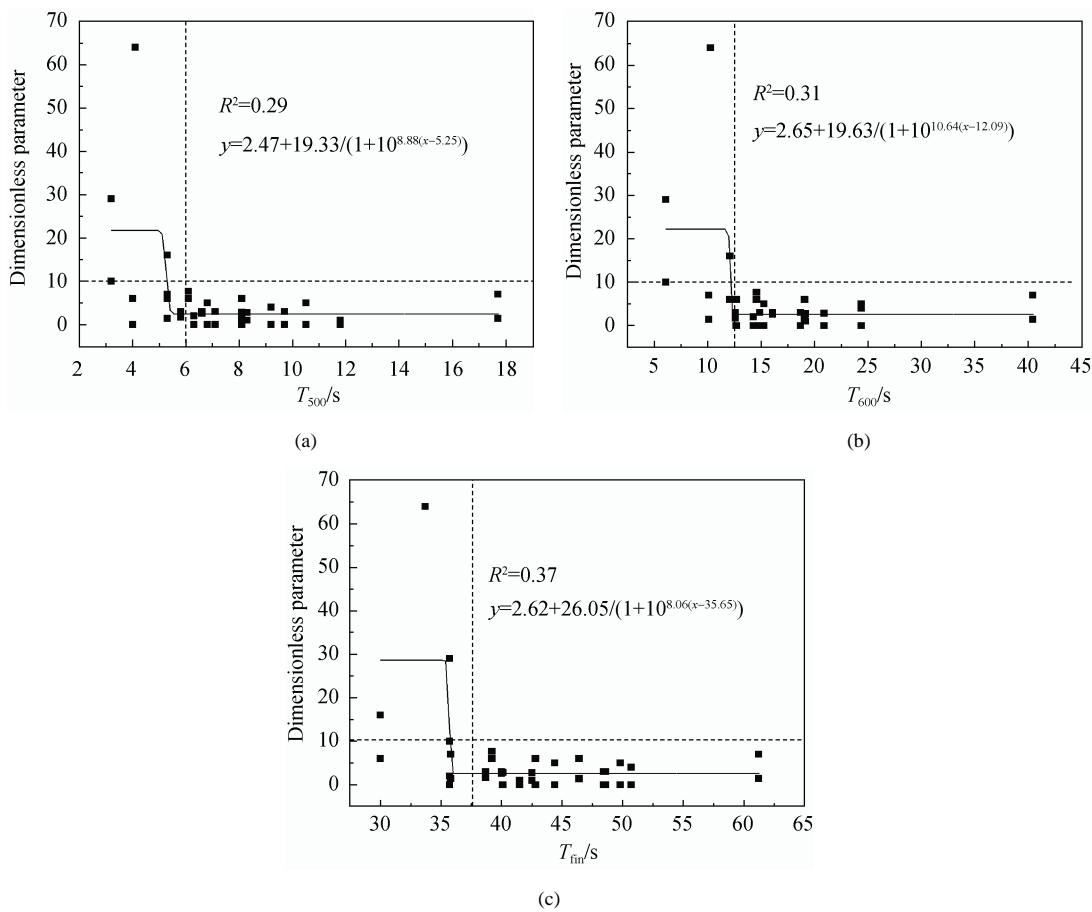


图 1 自密实混凝土流动时间与其静态稳定性间的关系

Fig. 1 Connection between the flow time and the static stability of SCC

## 2.2 自密实混凝土坍落扩展度与其静态稳定性的关系

有研究<sup>[17]</sup>表明, 在 Bingham 流体中, 骨料的沉降随其屈服应力增大而减小, 也即随混凝土坍落扩展度的减小而减小。为建立自密实混凝土坍落扩展度与其静态稳定性间的关系, 综合表 5 中所有试验数据, 同样对自密实混凝土静态稳定性评价参数进行了无量纲化处理, 并设定当自密实混凝土静态稳定性良好时, 无量纲参数不大于 10, 同样将贯入度大于 30 mm 数据剔除, 分析结果如图 2 所示。

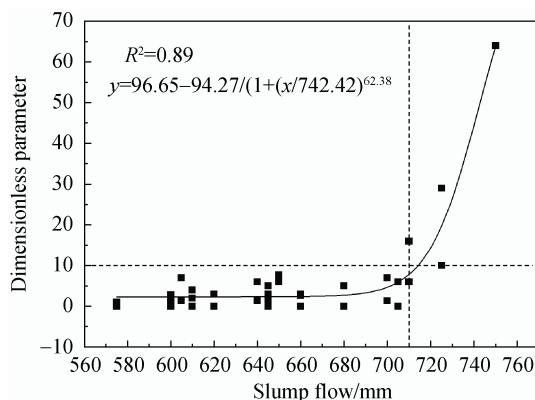


图 2 自密实混凝土扩展度与其静态稳定性间的关系  
Fig. 2 Relationship between the slump flow and the static stability of SCC

图 2 为自密实混凝土静态稳定性参数与其扩展度间的关系, 不难发现扩展度对自密实混凝土静态稳定性的影响亦存在临界值。拟合图 2 数据可得到

自密实混凝土扩展度与其静态稳定性间的关系为:

$$y = 96.65 - \frac{94.27}{1 + (\frac{x}{742.42})^{62.38}} \quad (2)$$

式中:  $y$  为关于自密实混凝土静态稳定性的无量纲参数,  $y \leq 10$ ;  $x$  为自密实混凝土的坍落扩展度, mm。

令式(2)中  $y$  小于等于 10, 解得  $x \leq 715$  mm, 同时结合相关规范资料<sup>[9,14-16]</sup>整理得到的通常自密实混凝土扩展度取值范围(550~850 mm)可知, 在本试验条件下当自密实混凝土的坍落扩展度为 550~715 mm 时, 其静态稳定性良好。

## 2.3 各参数与静态稳定性间的关系

为更好地对自密实混凝土的静态稳定性进行表征, 现对 2.1 和 2.2 节分析结果及表 5 试验数据进行以下分析, 结果见表 6。

由表 6 可发现, 自密实混凝土的基本工作性能与其静态稳定性间的关系可分为以下 2 种情况: 1) 自密实混凝土的流动时间不少于两项满足分析结果要求时, 其扩展度一定满足要求, 且静态稳定性良好, 反之则不然; 2) 自密实混凝土的流动时间不超过一项满足分析结果要求, 其扩展度和静态稳定性不满足要求。同时考虑到试验误差等因素影响, 此处综合认为, 当自密实混凝土的基本工作性能至少满足  $5.3 \text{ s} \leq T_{500} \leq 20.0 \text{ s}$ ,  $12.1 \text{ s} \leq T_{600} \leq 46.4 \text{ s}$ ,  $35.7 \text{ s} \leq T_{fin} \leq 63.7 \text{ s}$  和  $550 \text{ mm} \leq \text{坍落扩展度} \leq 715 \text{ mm}$  中的 3 项时, 可判定其静态稳定性良好。

表 6 各参数与静态稳定性间的关系

Table 6 Relationship between the parameters and the static stability

Sample No.	$5.3 \text{ s} \leq T_{500} \leq 20.0 \text{ s}$	$12.1 \text{ s} \leq T_{600} \leq 46.4 \text{ s}$	$35.7 \text{ s} \leq T_{fin} \leq 63.7 \text{ s}$	$550 \text{ mm} \leq \text{Slump flow} \leq 715 \text{ mm}$	Satisfy numbers	Static stability
1	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
2	Dissatisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	3	Favourable
3	Satisfy	Dissatisfy	Satisfy	Satisfy	3	Favourable
4	Dissatisfy	Dissatisfy	Satisfy	Dissatisfy	1	Worse
5	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
6	Satisfy	Satisfy	Dissatisfy	Satisfy	3	Favourable
7	Dissatisfy	Dissatisfy	Dissatisfy	Dissatisfy	0	Worse
8	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
9	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
10	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
11	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
12	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
13	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
14	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
15	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
16	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
17	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
18	Satisfy	Satisfy	Dissatisfy	Satisfy	3	Favourable
19	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	3	Favourable

## 2.4 判据正确性验证

为验证判据的正确性, 在基准配比(1#)的基础之上分别配制了单掺粉煤灰和矿渣粉 0%、20%、

30%的自密实混凝土, 但当粉煤灰掺量达到 30%时, 混凝土黏度较大无法达到自密实, 这里不参与分析, 其余试验结果如表 7 和表 8 所示。

表 7 单掺矿粉及粉煤灰自密实混凝土性能参数测试结果

Table 7 Test result of different content of mineral admixture of SCC

Sample	$T_{500}/\text{s}$	$T_{600}/\text{s}$	$T_{\text{fin}}/\text{s}$	Slump flow/mm	Penetration depth/mm	Static segregation percent/%
100%C	6.8	18.6	44.0	650	2	5.6
20%FA+80%C	11.1		37.4	570	1	1.3
20%SL+80%C	7.8	22.2	47.2	630	7	10.0
30%SL+70%C	6.7	22.4	38.1	640	7	4.0

C—Cement; FA—Fly ash; SL—Slag powder.

表 8 各参数与静态稳定性间的关系

Table 8 Relationship between the parameters and the static stability

Sample	$5.3 \text{ s} \leq T_{500} \leq 20.0 \text{ s}$	$12.1 \text{ s} \leq T_{600} \leq 46.4 \text{ s}$	$35.7 \text{ s} \leq T_{\text{fin}} \leq 63.7 \text{ s}$	$550 \text{ mm} \leq \text{slump flow} \leq 715 \text{ mm}$	Satisfy numbers	Static stability
100%C	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
20%FA+80%C	Satisfy		Satisfy	Satisfy	3	Favourable
20%SL+80%C	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable
30%SL+70%C	Satisfy	Satisfy	Satisfy	Satisfy	4	Favourable

由表 8 所示自密实混凝土基本工作性能参数与其静态稳定性间的关系可发现, 采用 2.3 节所提出的判别方法可以很好地对自密实混凝土地静态稳定性作出判断。

## 3 结论

1) 自密实混凝土的基本工作性能与其静态稳定性间存在良好相关性, 且当自密实混凝土静态稳定性良好时, 其流动时间和坍落扩展度均在一定区域范围内轻微波动, 同时延长自密实混凝土的流动时间或减小坍落扩展度均有利于其静态稳定性的提高;

2) 自密实混凝土流动时间越长, 其对静态稳定性敏感程度越高, 即  $T_{\text{fin}}$ 、 $T_{600}$  和  $T_{500}$  对自密实混凝土静态稳定性敏感程度依次递减;

3) 当自密实混凝土基本工作性能至少满足  $5.3 \text{ s} \leq T_{500} \leq 20.0 \text{ s}$ ,  $12.1 \text{ s} \leq T_{600} \leq 46.4 \text{ s}$ ,  $35.7 \text{ s} \leq T_{\text{fin}} \leq 63.7 \text{ s}$  和  $550 \text{ mm} \leq \text{坍落扩展度} \leq 715 \text{ mm}$  中的三项时, 可判断其静态稳定性良好。

## 参考文献:

- [1] BENSEBTI S E, AGGOUN S, KADRI E H, et al. Experimental test for evaluation of SCC static segregation[J]. Adv Mater Res, 2014, 875-877: 68–76.

- [2] BUI V K, MONTGOMERY D, HINCZAK I, et al. Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete[J]. Cem Concr Res, 2002, 32: 1489–1496.  
[3] 张雄, 张蕾. 流变学理论在水泥基材料中的应用[J]. 粉煤灰综合利用, 2013, (4): 9–13.  
ZHANG Xiong, ZHANG Lei. Fly Ash Comprehensive Util (in Chinese), 2013, (4): 9–13.  
[4] ASTM. ASTM C1611 Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete[S]. US: ASTM, 2014.  
[5] LANGE D A, STRUBLE L J, DAMBROSIA M D, et al. Performance and acceptance of self-consolidating concrete: Final report[R]. University of Illinois: Urbana-Champaign, 2008: 1–30.  
[6] ASTM. ASTM C1712. Standard test method for rapid assessment of static segregation resistance of self-consolidating concrete using penetration test[S]. US: ASTM, 2014.  
[7] SHEN L, STRUBLE L, LANGE D. New method for measuring static segregation of self-consolidating concrete[J]. J Test Evaluat, 2007, 35(3): 1–7.  
[8] ASTM. ASTM C1610 Standard test method for static segregation of self-consolidating concrete using column technique[S]. US: ASTM, 2014  
[9] 住房和城乡建设部. JGJ/T 283—2012 自密实混凝土应用技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
[10] MESBAH H A, YAHIA A, KHEYAT K H. Electrical conductivity method to assess static stability of self-consolidating concrete[J]. Cem Concr Res, 2011, 41: 451–458.

- [11] LIN SHEN, HAMED BAHRAMI JOVEIN, MO LI. Measuring static stability and robustness of self-consolidating concrete using modified segregation probe[J]. *Construct Build Mater*, 2014, 70: 210–216.
- [12] 傅沛兴, 张全贵, 黄艳平. 自密实混凝土检测方法探讨[J]. 混凝土, 2006(9): 77–82.  
FU Peixing, ZHANG Quangui, HUANG Yanping. Concrete(in Chinese), 2006 (9): 77–82.
- [13] NATHAN T, AMEDEO G, LIBERATO F, et al. Correlating dynamic segregation of self-consolidating concrete to the slump-flow test[J]. *Construct Build Mater*, 2012, 28: 499–505.
- [14] 中国土木工程学会. CCES 02—2004 自密实混凝土设计与施工指南[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [15] 中国工程建设标准化协会. CECS 203—2006 自密实混凝土应用技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [16] BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, et al. The european guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use [S]. European: European Project Group, 2005.
- [17] SHEN Lin, STRUBLE L, LANGE D. Modeling static segregation of self-consolidating concrete[J]. *ACI Mater J*, 2009, 106(4): 367–374.