

# 硅灰对港工高流动度混凝土 流变性能的影响\*

杨 虎, 陆采荣, 梅国兴, 刘伟宝, 王 珩, 戈雪良  
(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,  
国家能源水电工程安全与环境技术研发中心, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 在远离大陆的海洋环境中, 采用现代技术配制的港工高流动度混凝土, 可以解决传统混凝土施工中的振捣质量不佳等问题, 提高混凝土的自动化浇筑程度, 有利于环境保护和可持续发展。以港工高流动度混凝土为研究对象, 测试了拌合物的坍落扩展度、 $J$ -坍落扩展度和  $T_{500}$  等经验工作性能, 使用流变仪测试了剪切应力和塑性黏度两项流变参数。结果表明, 混凝土拌合物的坍落扩展度随时间的增加逐渐降低,  $T_{500}$ 、屈服应力和塑性黏度则随时间的增加不断增大。随着硅灰掺量的增加, 拌合物的屈服应力不断增大, 而塑性黏度首先降低随后逐渐增加。另外, 坍落扩展度与屈服应力线性相关性良好, 随着坍扩度的增加, 屈服应力不断降低。

**关键词:** 高流动度混凝土; 流变性能; 屈服应力; 塑性黏度; 硅灰

中图分类号: TV 431<sup>+</sup>.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)04-0024-05

## Effect of silica fume on rheological properties of self-compacting concretes with different silica fume contents used for harbor engineering

YANG Hu, LU Cai-rong, MEI Guo-xing, LIU Wei-bao, WANG Heng, GE Xue-liang

(R & D Center of Hydropower Engineering Safety and Environmental Technology, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** In the marine environment far from the mainland, there are some problems when placing traditionally vibrated concrete because it requires compaction by vibration in its forms. However, bad compaction qualities often cause durability problems. High fluidity concrete can properly flow into all corners of the mould and fill the framework without any or only a few additional compaction efforts, and hence is conducive to environmental protection and sustainable development. The slump flow and  $T_{500}$  of fresh high fluidity concrete were tested, and in the meanwhile the yield stress and plastic viscosity were measured by using viscometer. The results indicated that yield stress and plastic viscosity increase with water adding time, while slump flow declines with water adding time. The yield stress increases with silica fume content. The plastic viscosity declines at first and then increases. Besides, the yield stress was found to have a strong linear correlation with slump flow. The yield stress declines with slump flow according to this study.

**Keywords:** high-fluidity concrete; rheological property; yield stress; plastic viscosity; silica fume

开展海港工程高流动性混凝土相关领域的研究, 对于我国提高海洋资源开发能力、发展海洋经济, 特别是对离岸深水港建设具有重要的理论

意义和实用价值。在远离大陆的海洋环境中, 采用现代技术配制的港工高流动度混凝土, 可以解决传统混凝土施工中的漏振、过振以及钢筋密集

收稿日期: 2014-07-14

\*基金项目: 水利部公益性行业科研专项 (201301052); 国家自然科学基金 (51209146); 江苏省博士后基金 (1301043B)

作者简介: 杨虎 (1986—), 男, 博士, 工程师, 从事水工港工混凝土材料耐久性研究。

难以振捣等问题,提高混凝土的自动化浇筑程度,减少和避免混凝土表面缺陷的修补,降低劳动强度,有利于环境保护和可持续发展。

通常使用较低的水胶比( $W/C$ )和高掺量的减水剂(WRA)来配置高流动度混凝土。同时为了避免离析和达到高的流动性,提高胶凝材料的用量也是必要的。硅灰或将导致原材料费用的增加,但是粉煤灰、粒化高炉矿渣等矿物掺合料的使用可以降低原材料费用,同时高流动度混凝土能够削减劳动力成本,提高新拌合硬化混凝土的品质。以往通常使用坍落度等经验工作性能来判别混凝土拌合物的和易性,但是这些经验性的测试方法比较敏感,试验操作中较小的变化可能导致不同的结果。随后研究者使用流变学来描述混凝土拌合物的性能<sup>[1-3]</sup>。

国外目前使用BML Viscometer或者CEMAGREF-IMG测试新拌混凝土的流变性能<sup>[4]</sup>,Ferraris<sup>[5-7]</sup>认为尽管不同的测试装置获得的流变参数不同,但这些测量值之间存在统计关系。国内部分研究者使用圆筒旋转黏度计测试水泥浆体的剪切应力和塑性黏度<sup>[8-11]</sup>,而对高流动度混凝土流变参数的测试结果较少<sup>[12]</sup>。新拌混凝土的流变参数也可以通过坍度间接获得,但坍落度并不适合高流动度混凝土<sup>[13]</sup>,因此开展自密实混凝土屈服应力和塑性黏度等流变参数的测试具有重要的现实意义。

## 1 宾汉姆体的流变特性

考虑一个流体单元,其上作用一剪切应力 $\tau$ ,剪切速率为 $\dot{\gamma}$ ,如果在温度不变的条件下,剪切力和剪切速率成正比关系,则称该流体为牛顿流体<sup>[14]</sup>,记为:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为剪切黏度。

当剪切黏度不为常数时,该流体称为非牛顿流体。在非牛顿流体中,有一类具有黏塑性。对于这类流体,当作用在其上的剪切应力超过某一临界值(屈服应力)时,流体才会发生明显形变。换句话说,此类流体在不发生形变时可以承受一

定的剪切应力。黏塑性材料中最简单的一种称为宾汉姆流体(Bingham fluid),宾汉姆流体具有以下特性:

$$\begin{cases} \tau = G\gamma & \tau < \tau_0 \\ \tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} & \tau \geq \tau_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\tau_0$ 为屈服剪切应力; $\mu$ 为塑性黏度。新拌混凝土由各种粒径的颗粒组成,可以看做是一种良好的宾汉姆流体<sup>[15-17]</sup>。

## 2 试验

### 2.1 原材料及配合比

使用P·II 42.5水泥,密度为3 020 kg/m<sup>3</sup>;硅灰作为矿物掺合料。水泥和硅灰的化学组成见表1。

表1 水泥和硅灰的化学成分

化学组成	成分%	
	水泥	硅灰
SiO <sub>2</sub>	21.00	93.52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.78	0.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.98	0.73
CaO	62.90	0.32
MgO	1.95	0.12
Na <sub>2</sub> O	0.19	0.11
K <sub>2</sub> O	0.61	0.32
TiO <sub>2</sub>	0.21	
烧失量	5.38	3.81

粗骨料使用5~16 mm碎石,表观密度2 850 kg/m<sup>3</sup>。细骨料使用南京地区河砂,细度模数3.2,表观密度2 660 kg/m<sup>3</sup>。减水剂为聚羧酸高性能减水剂。砂石级配曲线见图1,混凝土试验配比见表2。

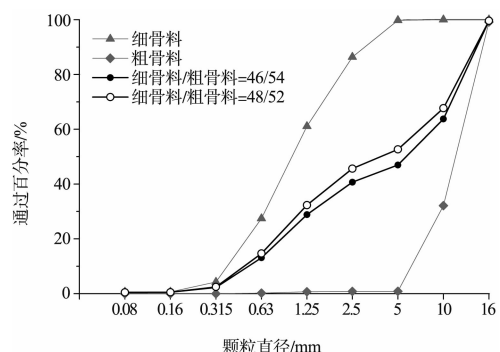


图1 骨料级配曲线

表2 高流动度混凝土配比

编号	水灰比	配比/(kg·m <sup>-3</sup> )					
		水	水泥	硅灰	砂	石	减水剂
P	0.35	181	512	0	766	842	6.91
SF2	0.35	181	501	10	744	842	6.91
SF4	0.35	181	491	20	722	842	6.91
SF6	0.35	181	481	31	750	842	6.91
SF8	0.35	181	471	41	768	842	6.91
SF12	0.35	181	450	61	739	842	6.91
SF16	0.35	181	430	81	714	842	6.91

## 2.2 试验方法

混凝土采用 TM3-100 自落式搅拌机拌合, 拌合时间 180 s。按照文献[18-19]中的测试方法, 分别测定每组拌合物的坍落扩展度、*J*-坍落扩展度和浆体坍扩至直径 500 mm 所需时间 ( $T_{500}$ ) 等传统工作性能参数, 同时使用 ConTec Viscometer 流变仪测定拌合物的屈服应力  $\tau_0$  和塑性黏度  $\mu$  两项流变参数。该流变仪测试部分由外圆筒和内圆筒(包括上部单元、下部单元和顶环)组成。根据本试验粗骨料的粒径, 选用 C200 测试系统(内圆筒半径 100 mm, 外圆筒半径 145 mm, 有效高度 15 mm)。测试时, 盛放混凝土的外圆筒以不同速

度旋转, 内圆筒中的上部单元测量扭矩, 底部单元消除或降低底部效应, 顶环则用以稳定测试高度。内外圆筒的表面都有竖直的隔板用以消减混凝土的滑移。

## 3 结果及分析

### 3.1 传统工作性能

表3给出了各组拌合物的密度、含气量、坍落扩展度、*J*-坍落扩展度测试结果。从表3可以看出, 掺加硅灰提高了拌合物的含气量, 同时降低了拌合物坍落扩展度和 *J*-坍落扩展度。坍落扩展度的降低和硅灰掺量之间存在明显的关系: 当硅灰掺量  $\leq 8\%$  时, 增加硅灰掺量对坍落扩展度的影响比较有限; 当硅灰掺量  $\geq 12\%$  时, 增加硅灰掺量对坍落扩展度的影响较为显著。这种关系在  $T_w \leq 60$  min 时尤为明显。除此之外, 坍落扩展度随着加水时间  $T_w$  逐渐降低。

### 3.2 流变参数

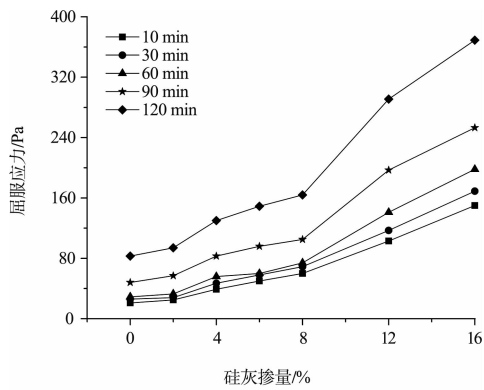
不同  $T_w$  时拌合物的屈服应力  $\tau_0$  和塑性黏度  $\mu$  见表4。图2分别给出了拌合物屈服应力和塑性黏度随硅灰掺量的变化规律。

表3 高流动度混凝土拌合物的传统工作性能

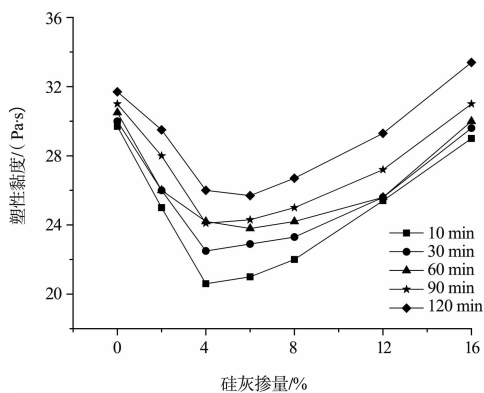
编号	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	含气量/%	坍落扩展度/mm					<i>J</i> -坍落扩展度/mm	$T_{500}/s$
			10 min	30 min	60 min	90 min	120 min		
P	2 371	5.6	740	680	655	620	500	690	5.0
SF2	2 255	8.3	705	685	660	655	485	665	5.2
SF4	2 264	9.0	715	680	645	595	390	685	4.5
SF6	2 302	7.8	705	665	635	565	435	655	4.4
SF8	2 329	7.0	675	665	640	480	385	625	4.8
SF12	2 279	9.0	470	450	430	375	340	415	
SF16	2 248	8.5	405	385	370	330	300	345	

表4 高流动度混凝土拌合物的流变参数

编号	屈服应力/Pa					塑性黏度/(Pa·s)				
	10 min	30 min	60 min	90 min	120 min	10 min	30 min	60 min	90 min	120 min
P	21.0	26.0	29.0	48.0	83.0	29.7	30.0	30.5	31.0	31.7
SF2	25.0	28.0	33.0	57.0	94.0	25.0	26.0	26.0	28.0	29.5
SF4	39.0	47.0	56.0	83.0	130.0	20.6	22.5	24.2	24.1	26.0
SF6	50.0	58.0	60.0	96.0	149.0	21.0	22.9	23.8	24.3	25.7
SF8	60.0	69.0	74.0	105.0	164.0	22.0	23.3	24.2	25.0	26.7
SF12	103.0	117.0	141.0	197.0	291.0	25.4	25.6	25.6	27.2	29.3
SF16	150.0	169.0	198.0	253.0	369.0	29.0	29.6	30.0	31.0	33.4



a) 屈服应力



b) 塑性黏度

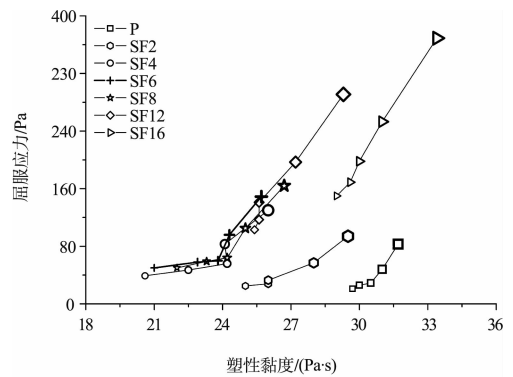
图 2 基于 Bingham 模型的高流动度混凝土拌合物的流变参数与硅灰掺量的关系

如图 2a) 所示, 随着硅灰掺量的增加, 拌合物的屈服应力不断增大。当硅灰掺量较小时, 屈服应力的增长速度也较平缓; 当硅灰掺量较大时, 屈服应力的增长速度较迅速。此外, 随着  $T_w$  的增加, 屈服应力的增长速度也会增快。

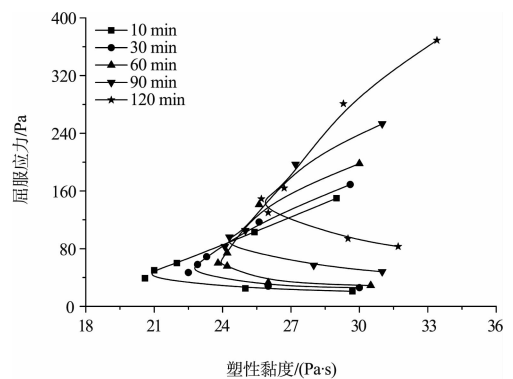
图 2b) 所示的塑性黏度与硅灰掺量的关系更为复杂。当硅灰掺量为 0% ~ 4% 时, 塑性黏度随着硅灰掺量的增加而降低; 当硅灰掺量超过 6% 时, 塑性黏度则逐渐上升。

图 3a) 给出了不同组别拌合物的流变曲线, 在每段连线中, 数据点的尺寸越大, 代表  $T_w$  越大。由图 3a) 可知, 屈服应力和塑性黏度都随时间的增加而增加。图 3b) 给出了不同  $T_w$  时拌合物的流变图。由图 3 可以看出, 当硅灰掺量较小时, 随着硅灰掺量的增加, 屈服应力缓慢增加而塑性黏度逐渐降低; 当硅灰掺量较大时, 随着硅灰掺量的增加, 屈服应力的涨幅逐渐增大, 塑性黏度

也逐渐恢复。



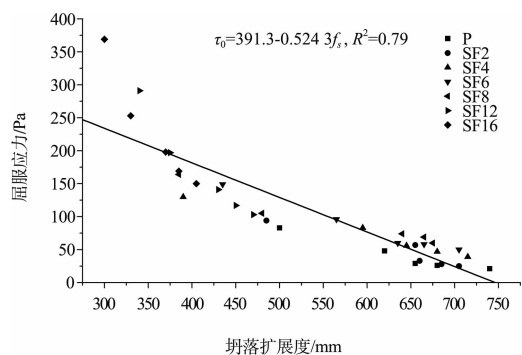
a) 流变参数与硅灰掺量的关系



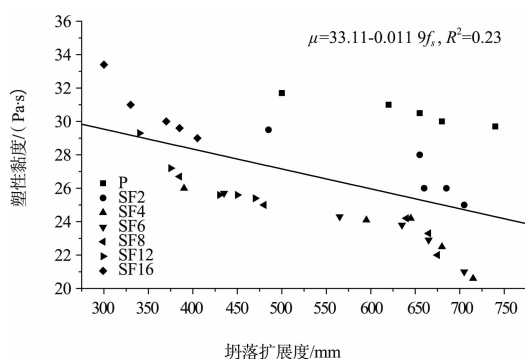
b) 流变参数与  $T_w$  的关系

图 3 高流动度混凝土拌合物流变曲线

以表 3 中的坍落扩展度为横坐标, 表 4 中的屈服应力和塑性黏度分别为纵坐标, 绘制  $\tau_0$ -坍落扩展度和  $\mu$ -坍落扩展度散点图, 并使用最小二乘法分别对图中测点进行线性拟合 (图 4)。由图 4,  $\tau_0$ -坍落扩展度拟合方程中  $R^2 = 0.79$ , 线性关系良好;  $\mu$ -坍落扩展度 ( $f_s$ ) 拟合方程中  $R^2 = 0.23$ , 线性关系较差。因此坍落扩展度与屈服应力的相关性大于其与塑性黏度的相关性。



a) 屈服应力与坍落扩展度的关系



b) 塑性黏度与坍落扩展度的关系

图4 高流动性混凝土拌合物流变参数与坍落扩展度的关系

#### 4 结论

1) 混凝土拌合物的坍落扩展度和  $J$ -坍落扩展度都随硅灰掺量的增加而增大。

2) 混凝土拌合物的屈服应力和塑性黏度都随时间的增加而增加。随着硅灰掺量的增加, 拌合物的屈服应力不断增大。当硅灰掺量较小时, 屈服应力的增长速度也较平缓; 当硅灰掺量较大时, 屈服应力的增长速度较迅速。随着硅灰掺量的增加, 拌合物的塑性黏度先降低后增加。当硅灰掺量较小时, 塑性黏度逐渐降低; 当硅灰掺量较大时, 塑性黏度则逐渐上升。

3) 坍落扩展度与屈服应力的相关性较大, 与塑性黏度的相关性较小。

#### 参考文献:

- [1] Wallevik O H, Wallevik J E. Rheology as a tool in concrete science: the use of rheographs and workability boxes[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41 (12): 1 279-1 288.
- [2] De Larrard F, Ferraris C F, Sedran T. Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material[J]. Materials and Structures, 1998(31): 494-498.
- [3] Cyr M, Legrand C, Mouret M. Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(9): 1 477-1 483.
- [4] Saak A W, Jennings H M, Shah S P A. Generalized approach for the determination of yield stress by slump and

slump flow [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(3): 363-371.

- [5] Ferraris C, Brower L. Comparing of concrete rheometers: international tests at LCPC (Nantes, France) in October 2000[R]. Washington: National Institute of Standards and Technology, 2001.
- [6] Ferraris C, Brower L. Comparison of concrete rheometers: international tests at MB (Cleveland, Ohio) in May 2003[R]. Washington: National Institute of Standards and Technology, 2004.
- [7] Ferraris C, De Larrard F. Testing and modeling of fresh concrete rheology [R]. Washington: National Institute of Standards and Technology, 1998.
- [8] 石帅, 邓敏, 莫立武. 矿物掺合料和外加剂对超细水泥流变性能的影响[J]. 混凝土, 2011(10): 65-68.
- [9] 姜从盛, 时建刚, 丁庆军, 等. 矿物掺合料和外加剂对水泥浆体流变性的影响[J]. 化学建材, 2007, 23 (2): 45-48.
- [10] 李惠. 自密实混凝土流变及工作性影响因素的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [11] 邓宏卫. 轻质高强粉煤灰陶粒的制备及其混凝土性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [12] 刘伟宝, 陆采荣, 梅国兴, 等. 港工自密实混凝土流变特性研究[J]. 水运工程, 2014 (1): 47-51.
- [13] Hu C, De Larrard F, Sedran T, et al. Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete[J]. Materials and Structures, 1996, 194(29): 620-631.
- [14] Barnes H A, Hutton J F, Walters K. An Introduction to Rheology[M]. Netherlands: Elsevier Science, 1989.
- [15] Tattersall G H, Bloomer S J. Further development of the two-point test for workability and extension of its range[J]. Materials and Structures, 1979, 109(31): 202-210.
- [16] Tattersall G H. Relationships between the British standard test for workability and two-point test [J]. Magazine of Concrete Research, 1973, 84(25): 169-174.
- [17] Domone P L J, Yongmo X, Banfill P F G. Developments of the two-point workability test for high-performance concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1999 (3): 171-179.
- [18] CCES 02—2004 自密实混凝土设计与施工指南[S].
- [19] CECS 203: 2006 自密实混凝土应用技术规程[S].

(本文编辑 武亚庆)