



# 港工自密实混凝土流变特性研究\*

刘伟宝, 陆采荣, 梅国兴, 王珩, 杨虎, 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,  
水利部水工新材料工程技术研究中心, 江苏南京 210029)

**摘要:** 屈服应力和塑性黏度是表征新拌自密实混凝土流变特性的两项基本参数, 使用ConTec Viscometer流变仪对各组新拌混凝土的屈服应力和塑性黏度进行测试, 探讨了不同矿物掺合料对流变参数和坍落扩展度的影响规律, 得到了流变参数与坍落扩展度之间的对应关系, 为进一步开展港工自密实混凝土设计和施工等相关领域的研究提供依据。

**关键词:** 自密实混凝土; 流变特性; 屈服应力; 塑性黏度; 坍落扩展度

中图分类号: TV 431<sup>+</sup>.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)01-0047-05

## Rheology of self-compacting concrete for harbor engineering

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

(Research Center on New Materials in Hydraulic Structures, Ministry of Water Resources, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Yield stress and plastic viscosity are two basic physical parameters characterizing the rheology of fresh SCC concrete. The yield stress and plastic viscosity of different fresh concrete are measured by ConTec Viscometer. The influence of different mineral admixtures on the rheological parameters and slump flow is summarized and the slump flows of fresh concrete in relation to rheological parameters are obtained, which provide theoretical foundations for SCC design and construction in harbor engineering.

**Key words:** self-compacting concrete; rheology; yield stress; plastic viscosity; slump flow

加强海洋资源的开发和利用, 对于我国的可持续发展具有十分重大的战略意义。目前混凝土仍然是海港工程建设的主要建筑材料, 其总体性能不仅取决于各原材料的品质, 而且在很大程度上也取决于从拌和到浇筑这段时期内的流变特性<sup>[1]</sup>。采用现代技术配制港工自密实混凝土, 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<sup>[2]</sup>。

坍落度测试法是迄今为止使用最广泛的用来描述混凝土流变特性的参数<sup>[3]</sup>。与坍落度类似, 针

对自密实混凝土高流动度的特点, 可以采用坍落扩展度对混凝土的填充性进行评价。除此之外还有L型仪法、U型仪法等<sup>[4-5]</sup>。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。本文首先对新拌混凝土的坍落扩展度进行了测定, 在此基础上对其剪切应力和塑性黏度这两项基本物理参数进行了测定, 依据上述指标对新拌混凝土的流变性能进行综合评定。

## 1 流变性和流变参数

### 1.1 牛顿流体和宾汉姆流体

考虑一个流体单元, 其上作用一剪切应力 $\tau$ ,

收稿日期: 2013-04-25

\*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)

作者简介: 刘伟宝(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工港工混凝土材料耐久性研究。

剪切速率为 $\dot{\gamma}$ ，如果在温度不变的条件下，剪切力和剪切速率之间成正比关系，则称该流体为牛顿流体（Newtonian Fluid），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，宾汉姆流体具有以下特性：

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

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>[1,6]</sup>。牛顿流体和宾汉姆流体的 $\tau$ - $\dot{\gamma}$ 关系曲线见图1。

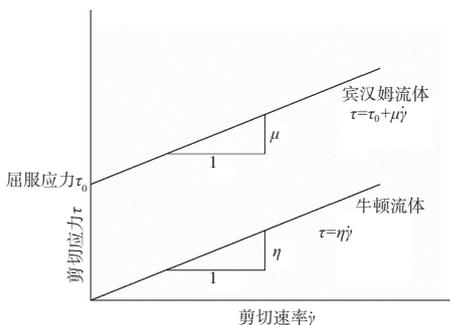


图1 牛顿流体和宾汉姆流体的 $\tau$ - $\dot{\gamma}$ 关系曲线

### 1.2 流变参数测试

使用ConTec Viscometer同轴双圆筒流变仪对各组新拌混凝土进行流变参数的测试。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，内外圆筒的型号则可以根据待测样品中骨料的粒径选用。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。ConTec Viscometer流变仪仅需4~5 min就可完成一次流变参数的测试，通过测量驱动混凝土转动的初始力值和因转速增加混凝土的响应系数，系统计算后直接输出屈服应力和塑性黏度值，自动化程度高。

## 2 原材料和试验方法

试验用水泥为中联P·O 42.5级普通硅酸盐水泥，其化学成分见表1。粉煤灰为广西来宾电厂I级粉煤灰，矿粉为唐山钢铁厂生产的S95级矿粉（表2），石粉为云南石灰石粉（表3,4），硅灰为艾肯公司硅灰。

表1 水泥的化学成分

组分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	LOSS
质量分数/%	21	4.78	2.98	62.9	1.95	0.19	0.61	0.21	5.38

表2 矿粉的物理性能

物理性能	含水量/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	流动度比/%	活性指数/%	
					7 d	28 d
矿粉	0.07	2.86	436	98.2	72.2	96.1

表3 石灰石粉的化学成分

组分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	碱	SO <sub>3</sub>
质量分数/%	1.05	0.47	0.20	54.4	0.51	0.00	0.02	0.01	1.05

表4 石灰石粉的物理性能

指标	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	45μm筛余/%	流动度比/%	需水量比/%	抗压强度比/%		
					7 d	28 d	90 d
石灰石粉	2.66	24	97	103	60	63	65

细骨料为南京河砂，细度模数为3.2，平均粒径为0.55 mm；粗骨料为5~16 mm碎石。减水剂为江苏省建科院生产的博特PCA1聚羧酸高性能减水剂。试验使用的混凝土各胶材质量分数及减水剂用量见表5，水胶比保持为0.34不变。

表5 混凝土各胶材质量分数及减水剂用量

组别	编号	水胶比	配比/%					
			水泥	粉煤灰	矿粉	石粉	硅灰	减水剂
1	P	0.34	100	0	0	0	0	1.0
2	F50	0.34	50	50	0	0	0	1.0
3	F80	0.34	20	80	0	0	0	1.0
4	K50	0.34	80	0	50	0	0	1.0
5	K80	0.34	20	0	80	0	0	1.0
6	S20	0.34	80	0	0	20	0	1.0
7	S50	0.34	50	0	0	50	0	1.0
8	S80	0.34	20	0	0	80	0	1.0
9	G5J1.0	0.34	95	0	0	0	5	1.0
10	G5J1.2	0.34	95	0	0	0	5	1.2
11	G10J1.3	0.34	90	0	0	0	10	1.3
12	G10J1.6	0.34	90	0	0	0	10	1.6

混凝土采用TM3-100自落式搅拌机拌和, 拌和时间为180 s。每组拌和物的坍落扩展度测定按照文献[3-4]进行, 同时使用ConTec Viscometer流变仪测定屈服应力 $\tau_0$ 和塑性黏度 $\mu$ 。根据粗骨料粒径, 选用C200测试系统(内圆筒半径为100 mm, 外圆筒半径为145 mm, 有效高度为15 mm)。

### 3 试验结果

#### 3.1 矿物掺合料对坍落扩展度的影响规律

图2给出了各组新拌混凝土坍落扩展度的实测值以及规范<sup>[3]</sup>中对自密实混凝土坍落扩展度的具体要求。由图2可以看出, 参照组的坍落扩展度只有440 mm, 并不满足规范中对自密实混凝土的最低要求, 但是合理掺加一定量的矿物掺合料后, 不仅可以满足自密实混凝土坍落扩展度的最低要求, 部分组别甚至可以达到 I 级自密实混凝土坍落扩展度的要求。总体看来, 粉煤灰和石粉对混凝土流变特性的改善效果较佳, 如F50的坍落扩展度可以达到660 mm。矿粉掺量高时, 坍落扩展度可以达到 II 级自密实混凝土的要求。硅灰则须辅以较高掺量的减水剂, 坍落扩展度才可以达到 II 级自密实混凝土的要求。

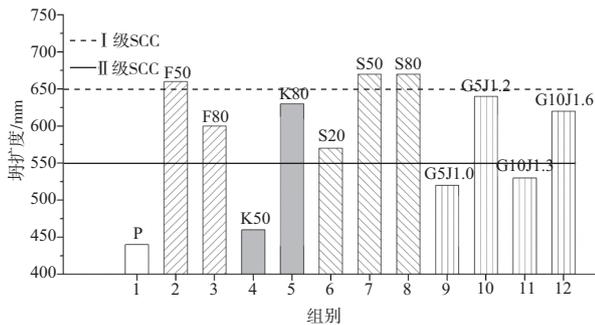


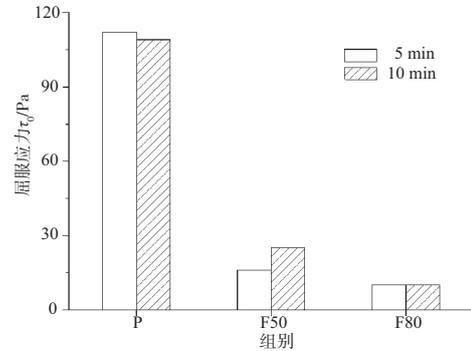
图2 各组新拌混凝土的坍落扩展度

#### 3.2 矿物掺合料对流变参数的影响规律

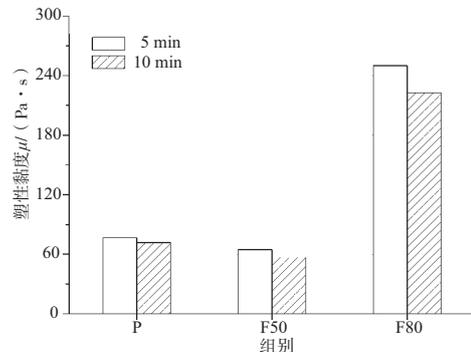
##### 1) 粉煤灰。

图3给出了不同粉煤灰掺量新拌混凝土流变参数的试验结果。从图3中可以看出, 当粉煤灰掺量在0~50%范围内时, 增加粉煤灰掺量虽然对塑性黏度的影响不大, 但是可以降低新拌混凝土的屈服应力, 从而对新拌混凝土的流变性能有较好的改善作用; 当粉煤灰掺量在50%~80%时, 增

加粉煤灰掺量只会增加新拌混凝土的塑性黏度, 而对屈服应力的影响较小, 因此对流变性能是不利的。



a) 屈服应力

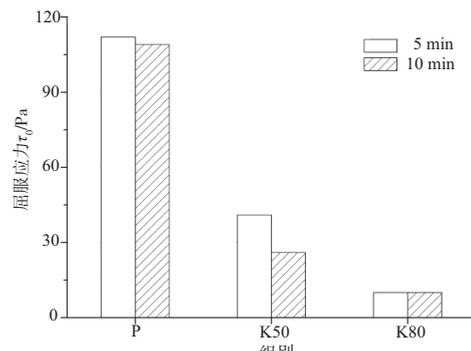


b) 塑性黏度

图3 不同粉煤灰掺量新拌混凝土的物理性质

##### 2) 矿粉。

图4给出了不同矿粉掺量新拌混凝土流变参数的试验结果。从图4可以看出, 随着矿粉掺量的增加, 新拌混凝土的屈服应力有明显的降低, 对改善流动性是有利的; 而塑性黏度则会逐渐增大, 新拌混凝土内部的流动阻力增大, 对流动性又是不利的。总体看来, 掺加矿粉可以增加新拌混凝土的坍落扩展度。



a) 屈服应力

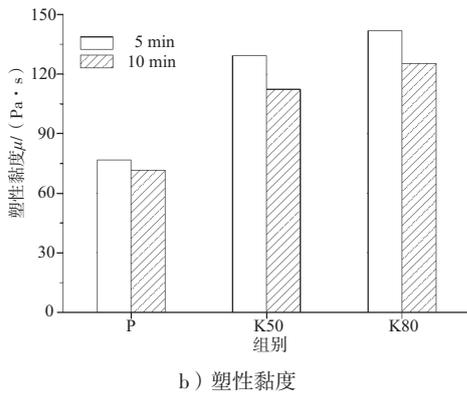


图4 不同矿粉掺量新拌混凝土的物理性质

3) 石粉。

图5给出了不同石粉掺量新拌混凝土流变参数的试验结果。从图5中可以看出，随着石粉掺量的增加，新拌混凝土的屈服应力和塑性黏度均逐渐降低。如图5a)所示，当石粉掺量在0~20%时，增加石粉用量，新拌混凝土屈服应力有明显的降低，流变性能有显著的改善；当石粉掺量在20%~80%时，增加石粉用量，新拌混凝土屈服应力的减少量有限，流变性能的改善作用较小。由图5b)可见，随着石粉掺量不断增大，新拌混凝土的塑性黏度表现出较为均匀的降低过程。

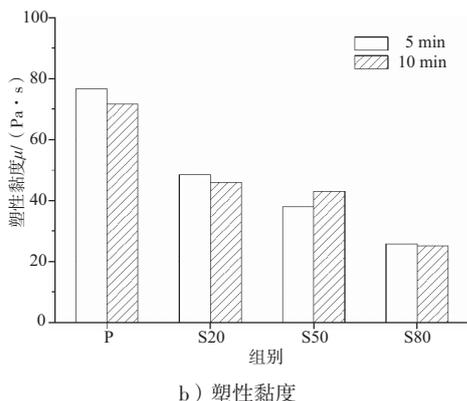
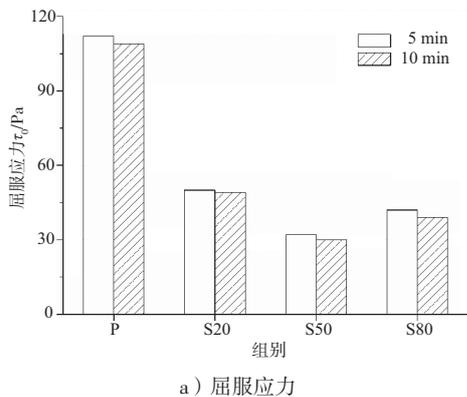


图5 不同石粉掺量新拌混凝土的物理性质

4) 硅灰。

图6给出了不同硅灰掺量新拌混凝土流变参数的试验结果。由图6可以看出，当减水剂掺量一定时，随着硅灰掺量的增加，新拌混凝土的屈服应力先是保持不变，然后迅速增加；塑性黏度则首先降低，随后逐渐恢复。另外，减水剂的加入可以降低屈服应力和塑性黏度，改善新拌混凝土的流变性能。

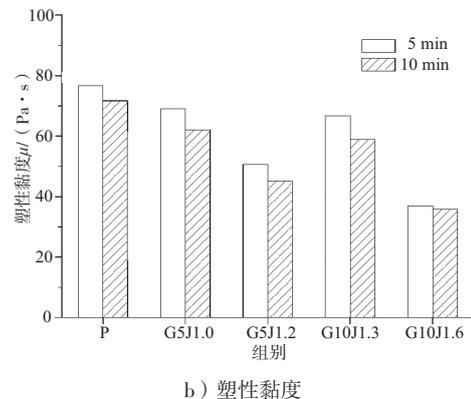
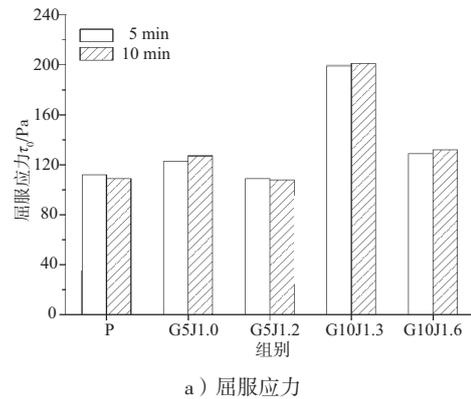


图6 不同硅灰掺量新拌混凝土的物理性质

以屈服应力为纵坐标，塑性黏度为横坐标，图7给出了流变参数随矿物掺合料掺量的变化趋势。如图7所示，不同矿物掺合料对混凝土的流变参数影响规律并不相同。结合3.1中矿物掺合料对坍落扩展度的影响规律，可以发现流变图中左下方的区域是流变特性较好的区域。

3.3 坍落扩展度与流变参数的对应关系

在试验采用的配合比范围之内，新拌混凝土的坍落扩展度在440~670 mm变化。图8给出了流变参数与新拌混凝土坍落扩展度之间的关系。从图8中可以看出，越近x轴和y轴的点，其坍落扩展度越大，对应的流变性能也越好。另外，当塑性

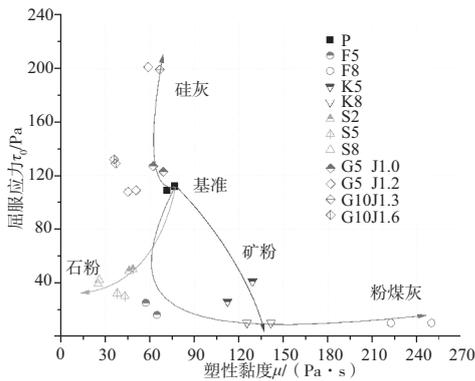


图7 掺合料种类对新拌混凝土的流变参数的影响

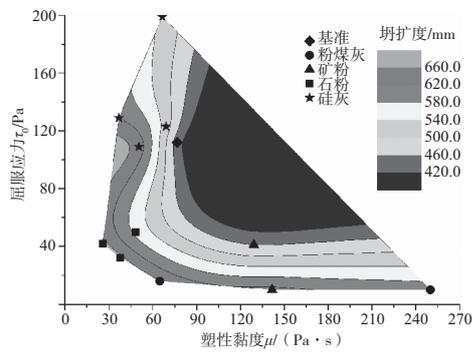


图8 不同流变参数新拌混凝土的坍落扩展度

黏度较低的时候, 新拌混凝土的坍落扩展度主要受塑性黏度影响, 坍落扩展度随着塑性黏度的增加而降低; 当塑性黏度较高的时候, 新拌混凝土的坍落扩展度主要受屈服应力影响, 坍落扩展度随着屈服应力的增加而降低。

#### 4 结论

1) 对不同新拌混凝土的坍落扩展度进行测定, 结果表明: 矿物掺合料对新拌混凝土的坍落扩展度有不同的改善效果, 其中粉煤灰和石粉的

改善作用较为明显。

2) 使用ConTec Viscometer对新拌混凝土的屈服应力和塑性黏度两项基本流变参数进行测定, 得到矿物掺合料种类和掺量对混凝土的流变参数影响规律, 结合矿物掺合料种类对坍落扩展度的影响规律, 获得基于流变图的混凝土流变参数变化规律。

3) 使用流变图对坍落扩展度和流变参数之间的对应关系进行了探讨。当塑性黏度较低的时候, 新拌混凝土的坍落扩展度随着塑性黏度的增加而降低; 当塑性黏度较高的时候, 坍落扩展度随着屈服应力的增加而降低。

#### 参考文献:

- [1] Tattersall G H, Banfill P F G. The rheology of fresh content [M]. Great Britain: Pitman Books Limited, 1983.
- [2] 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.
- [3] CCES 02-2004 自密实混凝土设计与施工指南[S].
- [4] CECS 203: 2006 自密实混凝土应用技术规程[S].
- [5] 陆采荣, 梅国兴, 张一禾, 等. 港工自密实自养护抗裂型耐久混凝土关键技术[J]. 中国港湾建设, 2010 (10): 80-82.
- [6] 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, 51(3): 171-179.

( 本文编辑 武亚庆 )

